



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

(学术学位)

基于多目标组合优化的空调水系统管路自动  
设计

姓名：关航

学号：2030267

学院：机械与能源工程学院

学科：供热、供燃气、通风及空调工程

论文研究方向：空调系统自动设计

指导教师：许鹏

二〇二三年二月

同济大学



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master of Engineering

**Automatic design of air conditioning water  
system pipeline based on multi-objective  
optimization**

Candidate: Guan Hang

Student Number: 2030267

School/Department: Department of Mechanical and  
Energy Engineering

Discipline: Engineering

Major: Heating, gas, ventilation and air conditioning  
engineering

Research Fields: Automatic design of HVAC

Supervisor: Xu Peng

February, 2023

同济大学

## 摘要

建筑部门是三大能源消耗部门中节能减排潜力最大的,是未来实现减排目标的关键。在建筑的运行总能耗中,暖通空调系统运行能耗占比高达 50%。而在所有的暖通系统能耗中,输配系统占据了很大一部分。为了降低空调系统的输配能耗,可以运行阶段采用变频控制策略、故障诊断等方法。实际上,输配系统的布局及选型设计也是非常重要的,如果在设计中存在不合理,是无法通过运行控制策略改善的。目前,空调水系统的设计大多依靠设计师经验,同时为了应对上游设计的变更,设计师需要花费大量时间修改图纸。因此,为了改善空调水系统设计中的不合理性,解放设计师双手,从而使设计师将更多时间用在决策上,本文提出了基于多目标优化的空调水系统管路自动设计。

本论文首先总结了将水系统布局应遵循的物理规则及经济规则,并将水系统布局设计问题归纳为多末端障碍规避的正交分支管路设计问题;采用逃逸图法对布局空间进行建模,采用并行搜索的蚁群算法以路径最短和弯头最少为优化目标,实现障碍规避的空调水系统管路布局设计;基于专家知识提出了水力计算模型,包括尺寸选择、环路水力计算以及水力调平模型;最后针对本文提出的算法采用初投资、综合部分能耗以及环路静态水力平衡检查三个指标对不同权重下的水系统布局设计结果进行量化,量化结果可以用于选择和优化水系统设计。

本文所提出的算法已在 8 栋建筑中完成测试,本文选取了四栋建筑测试空调水系统布局设计寻优,一个办公建筑 A 和幼儿园建筑 B 来展示本文所提出布局寻优及水力计算模型的性能。测试结果显示,本文所提出的算法在四栋建筑及办公建筑 A、幼儿园建筑 B 六个建筑中都得到了较好的设计结果;当房间内设备数量较少时,改变权重对水系统布局设计结果影响很小,因此当房间内设备数量较少时,可以忽略权重值对布局结果的影响,而当房价内内设备数量较多时,可以通过设置多个不同权重对比三个量化指标来选择较为合适的设计结果。

**关键词:** 水系统管路布局, 障碍规避、蚁群算法、水力计算

同济大学

## Abstract

The building sector has the greatest potential for energy savings and emission reductions among the three major energy-consuming sectors and is key to achieving future emission reduction targets. In the total energy consumption of building operation, the energy consumption of the HVAC system accounts for up to 50%. And in all the energy consumption of HVAC system, the transmission and distribution system occupies a large part. In order to reduce the power consumption of air conditioning system, variable frequency control strategy and fault diagnosis are adopted during operation. In fact, the layout and selection design of the transmission and distribution system is also very important. If there is something unreasonable during design phase, it cannot be improved through the operation control strategy. At present, the design of air conditioning water system mostly relies on designers' experience. To cope with the design changes before water system design, designers have to spend a lot of time revising drawings. Therefore, in order to improve the irrationality in the design of air conditioning water system and make it possible for designers to spend more time on decision-making, this paper proposes an automatic design algorithm for air conditioning water system pipeline layout based on multi-objective optimization.

In this paper, the physical and economic rules of water system layout are firstly summarized, and the layout design problem of water system is summarized into the orthogonal branch pipeline design problem of multi-terminal obstacle avoidance. The escape graph method was used to model the layout space. The ant colony algorithm with parallel search was used to optimize the pipeline layout design of air conditioning water system toward the shortest path and the fewest elbows with obstacle avoidance. Based on experts' knowledge, the hydraulic calculation model is proposed, including size selection, hydraulic calculation and hydraulic regulation. Finally, based on the algorithm proposed in this paper, initial investment, comprehensive partial energy consumption and static hydraulic balance check are used to quantify the layout design results of the water system under different weights. The quantitative results can be used to select and optimize the design of the water system.

The algorithm proposed in this paper has been tested in 8 buildings. In this paper, four building, an office building A and a kindergarten building B are selected to

demonstrate the performance of the algorithm proposed in this paper. The test results show that the design results in the six buildings have good performance. When the number of devices in the room is small, changing the weight has little influence on the layout design result of the water system. Therefore, when the number of devices in the room is small, the influence of the weight value on the layout result can be ignored. When the number of devices in the house price is large, the more appropriate design result can be selected by setting multiple different weights and comparing three quantitative indicators.

**Key words:** water system pipeline layout, obstacle avoidance, ant colony algorithm, hydraulic calculation

同济大学



## 目录

第 1 章 引言 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 管路自动化设计研究现状	
1.2.1 管路设计研究现状 .....	4
1.2.2 空调水系统水力平衡调节 .....	7
1.2.3 空调水系统管路性能评价 .....	8
1.2.4 小结 .....	9
1.3 研究内容及技术路线 .....	9
1.3.1 研究基础 .....	9
1.3.2 研究目的及意义 .....	10
1.3.3 研究内容和技術路线 .....	11
第 2 章 多目标组合优化的水系统布管算法 .....	13
2.1 概述 .....	13
2.2 基于网络图的水系统管路布局问题及规则 .....	13
2.2.1 水系统管路布局问题描述 .....	13
2.2.2 水系统管路布局规则及数学描述 .....	15
2.2.3 布局空间建模方法 .....	16
2.3 基于蚁群算法的水系统管路设计算法 .....	19
2.3.1 干管管线的提取 .....	19
2.3.2 空调房间内管道布局设计算法 .....	20
2.4 本章小结 .....	30
第 3 章 基于专家知识的管路系统水力计算及调平模型 .....	33
3.1 概述 .....	33
3.2 管路系统水力计算模型 .....	33
3.2.1 管材的选择 .....	33
3.2.2 管道选型 .....	33
3.2.3 阀门选型 .....	35
3.2.4 冷凝水管的设计 .....	37
3.2.5 环路阻力计算 .....	37
3.2.6 水力计算模型流程 .....	40
3.3 自动水力平衡模型 .....	41
3.3.1 改变管径 .....	42
3.3.2 调节平衡阀 .....	44
3.4 本章小结 .....	46
第 4 章 管路设计结果数据格式及优化评价 .....	47

4.1 管路设计结果数据格式 .....	47
4.1.1 管路设计结果数据结构 .....	47
4.1.2 各系统属性信息 .....	48
4.2 管路设计结果评价指标 .....	50
4.2.1 初投资 .....	50
4.2.2 综合部分能耗 .....	50
4.2.3 环路的静态水力平衡度检查 .....	53
4.3 本章小结 .....	53
第 5 章 空调水系统寻优案例 .....	55
5.1 水系统布局设计寻优案例 .....	55
5.2 空调水系统设计寻优案例 .....	57
5.2.1 示例建筑 A .....	57
5.2.2 示例建筑 B .....	61
5.3 小结 .....	65
第 6 章 结论与展望 .....	67
6.1 结论与成果 .....	67
6.2 创新点 .....	68
6.3 局限性及展望 .....	68
参考文献 .....	69
附录 A 示例建筑 A 布局设计结计算表 .....	75
附录 B 示例建筑 B 布局设计计算表 ( $a = 0.45, b = 0.9$ ) .....	83
附录 C 示例建筑 B 布局设计计算表 ( $a = 0.9, b = 0.9$ ) .....	89
附录 D 示例建筑 B 布局设计计算表 ( $a = 0.9, b = 0.45$ ) .....	95
附录 E 示例建筑 B 布局设计计算表 ( $a = 1, b = 0$ ) .....	101
致谢 .....	109
在读期间发表的学术成果 .....	111

# 第 1 章 引言

## 1.1 研究背景

工业、交通和建筑部门是三大能源消耗部门。国际能源署（International Energy Agency, IEA）在《2020 年能源技术展望》<sup>[1]</sup>中指出，2018 年全球终端能源消费达到了 99.4 亿吨标准油，其中建筑部门能源消耗占全球终端能源的 35%，而碳排放则占全球碳排放的 38%（IEA 所计算的建筑能源消耗不包括建筑材料生产和建筑拆除阶段耗费的能源和产生的碳排放）。建筑部门是节能减排潜力最大的能源消耗部门，是未来实现减排目标的关键<sup>[2]</sup>。在建筑的运行总能耗中，暖通空调系统运行能耗占比高达 50%<sup>[3]</sup>。

在建筑运行阶段降低能耗的方法可以分为两大类<sup>[4]</sup>：被动式节能和主动式节能。被动式节能是在设计阶段，对建筑的位置、空间布局及围护结构设计等方面降低空调用能；而主动式节能是指从建筑设计出发、从冷热源系统、风水系统、控制方式等方面降低空调能耗。从以上降低能耗的两种方法来看，空调系统的设计对于降低空调能耗至关重要。在所有暖通空调系统能耗中，输配系统占据了很大一部分<sup>[5]</sup>。

传统的水系统输配设计流程是在末端设备选型及设备位置确定后，设计师根据规范标准及个人经验绘制管道图纸，在完成管道连接后，对管路进行选型。目前，空调系统末端侧水系统管路设计存在一下两个主要问题：

### （1）传统水系统设计耗时耗力

在末端侧水系统管路设计过程中，存在大量耗时且重复性高的工作，特别是在与其他设备碰撞或者甲方意见变化时，绘制图纸时非常耗时耗力的。为了解暖通空调设计过程中的工作量及耗时情况，课题组采用调查问卷的形式对经验丰富的暖通空调设计师进行调研。调研结果显示（如图 1.1），影响空调系统设计进度 Top3 原因有建筑图纸会被反复修改、和其他专业设备位置协商、暖通空调系统设计难度较大、建筑体量大且结构复杂、对规范不熟悉、甲方要求及特殊建筑类型。其中，影响空调系统设计进度最大的原因中，建筑图纸会被反复修改占比超过 60%，除此之外，有 81.25% 的调查对象认为建筑图纸会被反复修改位于影响空调系统设计的 Top3 原因。

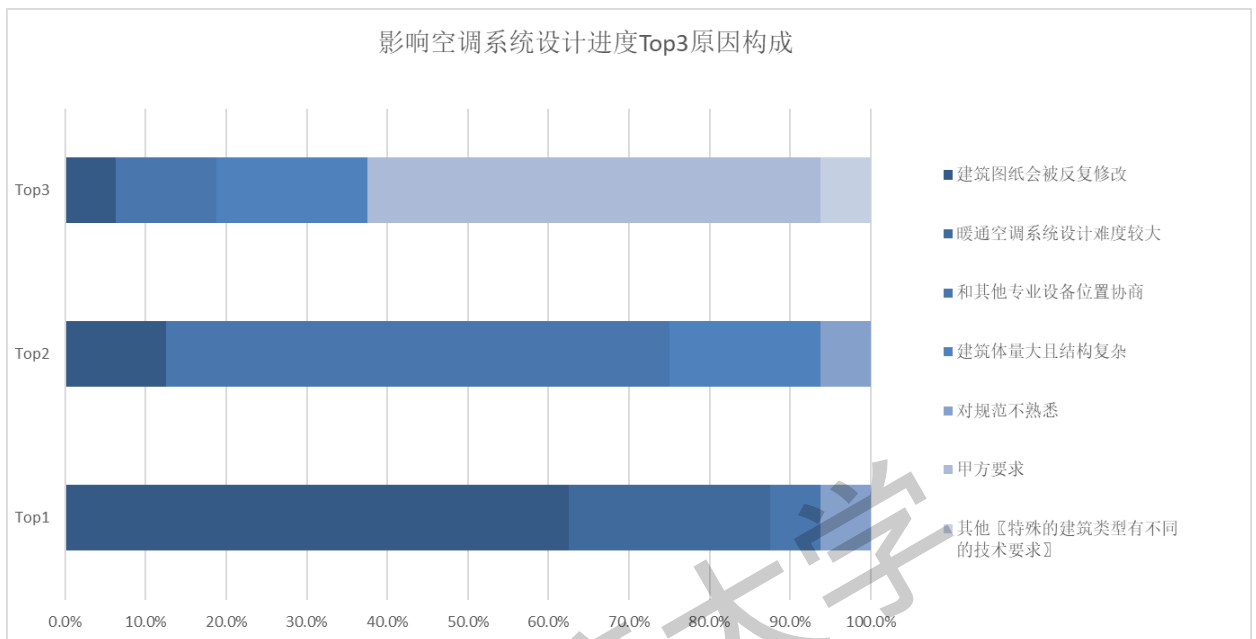


图 1.1 影响空调系统设计进度Top3原因

从暖通系统设计耗时情况来看,有 60%的设计师认为图纸绘制占据设计时间的 2/5 以上,其余认为占据 1/3 以上。

### (2) 水系统管路设计存在不合理性

经过多年的研究和行业的发展,针对空调水系统的设计方法、控制策略以及管网布置原则,国内外学者都进行了大量的研究,并作出了较大的改善,使系统的水力稳定性以及节能效果都得到了优化。

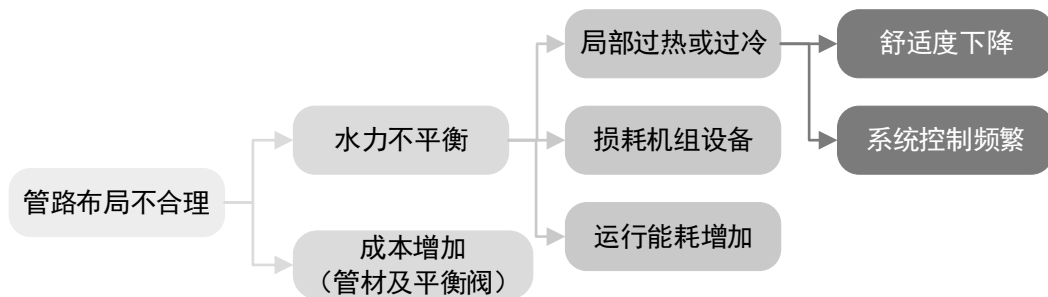


图 1.2 水系统设计不合理带来的影响

但是对于空调水系统特别是国内空调水系统方面的相关研究仍存在方方面面的不足,具体体现在以下几个方面:在初始设计阶段中,对空调水系统的水力稳定性方面所做的工作不够,没有给出部分负荷运行时水力失调的解决方案;因为设计周期普遍较短,没有管网设计之后进行的水力平衡计算或者计算不严谨,

水系统管网的设计通常凭借设计人员的经验,没有进行更深层次的核算,往往造成不同环路之间的不平衡率达不到要求;传统设计中依据流速法或比摩阻法来确定管路管径,往往会使变流量系统存在很多问题,当空调系统运行过程中出现水力失调问题后,往往寄希望于后期的系统调试来解决水系统的平衡,缺乏合理的方案以及复杂的计算而设计出的系统容易出现水力失调,特别是在一些大的系统更容易出现的问题<sup>[6]</sup>。水力失调分为静态水力失调和动态水力失调。静态水力失调是一种稳定的失调现象,它是这个系统自身存在的。由设计缺陷导致的水力不平衡性会使得暖通空调系统在运行过程中各房间的温度不均匀,进而导致室内舒适度下降。为了解决水系统的水力平衡问题,目前最常见的解决办法是在设计阶段将水系统的结构形式可以设置为同程式水系统,或者设置电动平衡调节阀,在运行阶段通过阀门调节功能来保证系统的流量分布均匀性,从而解决水力失衡的问题。

基于以上暖通空调用能背景和水系统设计存在的问题,如果能够实现自动设计空调水系统管路设计,且能在设计过程中考虑到水系统的水力平衡性及运行能耗情况,那么将会解放暖通设计师的双手,而将更多时间放在方案决策上,不仅可以提高设计效率,还可以提高设计质量,从而保证空调水系统的输配功能及房间舒适度,并且减少运行能耗,使得暖通空调系统的运行控制更加简单。

## 1.2 管路自动化设计研究现状

### 1.2.1 管路设计研究现状

管路设计是二十世纪七十年代开始，迷宫算法、网络优化算法、逃避算法、专家系统、遗传算法、栅格法、粒子群算法、蚁群算法等等。可以将管路设计问题按末端个数划分为两末端和多末端，按目标个数划分为单目标和多目标。为了解决管路自动设计的问题，国内外学者针对不同的子问题提出了很多不同的方法。下图是近年来国内外学者在研究管路设计问题时所用到的方法。

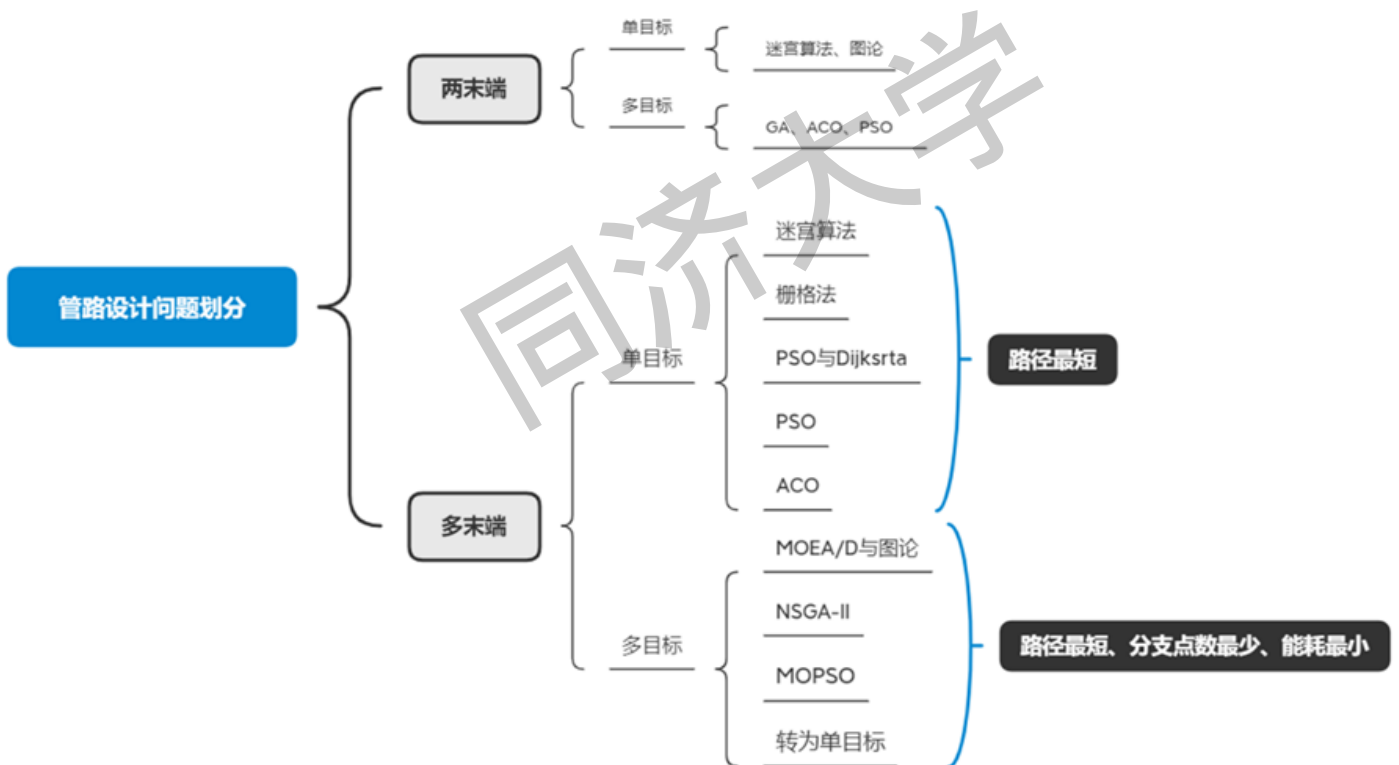


图 1.3 管路设计问题划分

对于传统的两末端管路设计问题，例如机器人路径规划、设备连接、交通路径规划等等，大多学者采用遗传算法、迷宫算法、A\*算法来求解。1999年，Sunand Sandurkar<sup>[7]</sup>利用包含障碍物信息的.STL文件作为输入，采用遗传算法得到从起点到重点的最优路径。2010年，Marcus Furuholmen<sup>[8]</sup>将三种不同的标准算法、协同进化算法和增量算法应用于三维管道路由问题，并对其性能进行了比较，发现协同进化算法和增量算法具有较好的性能。2013年，南昌航空大学的高敏<sup>[9]</sup>针对机器人的路径规划进行了研究，首先采用栅格法对障碍环境进行建模，然后采用

粒子群算法与蚁群算法相结合,提高了收敛速度和搜索精度,得到全局最优路径。2013年, Tao Ren<sup>[10]</sup>以航空发动机为研究对象提出了基于改进的 GA 算法实现最短路径规划的方法。2015年,王运龙提出了基于人机结合遗传算法的船舶管路设计方法,其中人工个体可以由设计者自行设计、从算法个体中择优选择和修改算法个体得到。2015年, Changtao Wang 等人<sup>[11]</sup>采用遗传算法实现管路设计,其中,遗传算法的评价函数参数包括管长、弯头数量。2016年,隋海腾<sup>[12]</sup>将迷宫算法与遗传算法结合求解三维路径规划模型问题。2020年, Marvin Stanczak<sup>[13]</sup>采用枚举法实现了三维管路设计。2021年,该学者<sup>[14]</sup>采用 A\*算法和线性规划的方法求解管路设计问题。

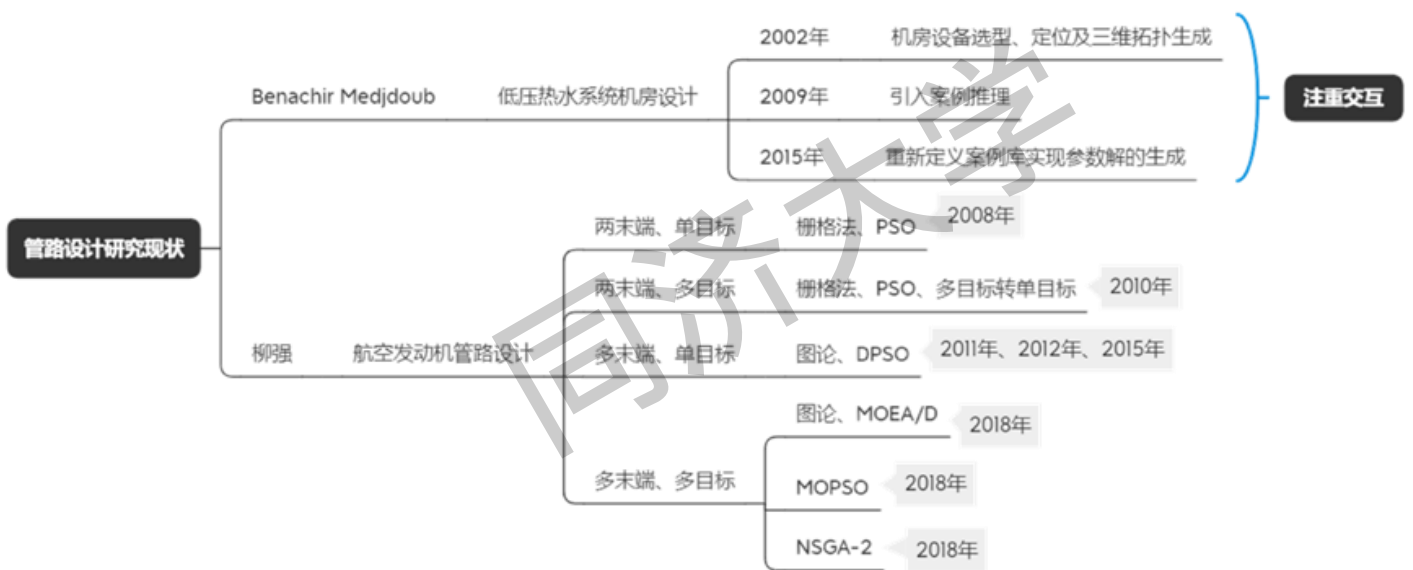


图 1.4 管路布局设计研究现状总结

对于两末端、多目标的管路设计问题,大多采用加权系数法或优先等级法将多目标问题转化为单目标问题进行求解。2002年, A.R. Soltani<sup>[15]</sup>针对建筑工地内交通工具的路径规划展开研究,将该问题转化为在避开障碍物的情况下将路径最短作为目标,将安全风险低、高能见度作为约束惩罚函数实现多目标路径规划。并对比 Dijkstra, A\*及遗传算法三种方法的结果,得出: Dijkstra 算法和 A\*算法采用一种贪婪搜索方法,通过做出一系列选择来得到一个解,每个选择都在当时寻找最好的结果,而不考虑做出这种选择的潜在缺陷。基于遗传算法的概率优化方法生成一组可行的、最优的和接近最优的解,捕获全局最优解。2020年, Farhan Ajiwaskita<sup>[16]</sup>针对船舶机舱的管路设计问题采用 DIJKSTRA 方法进行求解,以最短路径为目标,通过改变几何参数的惩罚值(如管道弯头数和管道交叉)得到不同的管路设计方案,最后根据非几何参数值(如耗材和安装成本)来评价设计方案,得到最终的管路设计结果。

对于多末端的管路设计问题,除了可以按照目标优化的个数分为单目标和多目标外,还可以按照管路设计类型分为多管道问题和分支管路设计问题。多管道问题比较常见的是机房内多个设备的连接问题,分支管路设计问题有航空发动机管路设计、船舶机房管路设计及暖通空调系统的风水系统设计等等。2002年, Jin-Hyung Park<sup>[17]</sup>提出了一种满足几何约束条件的单元格生成法实现最短路径管道路由的自动生成,并以材料成本、安装成本、阀门操作作为评估参数对备选方案进行评估选择。2008年, Qiang Liu<sup>[18]</sup>采用网格法和改进后的粒子群优化算法实现管路设计。2011年, liu<sup>[19]</sup>等人将连接在受约束空间中的多个终端与障碍物的直线支管路由表述为具有障碍物的直线斯坦纳最小树(RSMTO)问题,提出了一种采用基于逃逸图的离散分支管路设计(DPSO-RBPRA)问题的离散粒子群优化(PSO)算法,该算法采用吸引函子和能量函数在离散图空间中规划最短无碰撞连接网络。2012年<sup>[20]</sup>,该学者、在航空发动机集成设计工程的背景下,研究了具有多个末端的非正交分支管路设计,它可以表述为带障碍的欧氏斯坦纳最小树(ESMTO)问题。2015年,<sup>[21]</sup>为了减少计算复杂度,该学者提出了用曼哈顿可见图代替逃逸图的正交管路设计算法。2018年,利用直线斯坦纳最小树(RSMT)理论建立了分支路由图。为了求解该模型,结合图论采用了基于分解的多目标进化算法(MOEA/D)来搜索最终的路由最优解,在该模型中将管道长度、分支点数、能耗和管道弯管作为路由目标<sup>[22]</sup>。为了不依赖于栅格建模和图论建模,该学者以管路长度和弯头数作为优化目标采用 NSGA-II、遗传算法及惩罚函数法求解计算得到 Pareto 解集<sup>[23]</sup>。同年,该学者以分支管路长度最小化、分支点数量最小化以及管路平滑度最优为优化目标建立了基于避障 Steiner 树的分支管路多目标布局模型。考虑到模型的复杂性,设计基于多目标粒子群优化(MOPSO)的模型求解算法<sup>[9]</sup>。2014年,董宗然<sup>[24]</sup>针对船舶管路设计依靠专家经验且效率低的问题,首先对布置空间进行网格化处理,然后采用最短路径快速法进行求解。2020年<sup>[25]</sup>,该学者提出了一种改进的 A\*算法来解决单管路设计;针对多管道路由问题,提出了一种 A\*与遗传算法相机的求解苏纳法;针对分支管路设计,结合单管路算法提出了一种改进的斯坦纳树框架,与基于协同进化的方法相比,该方法具有通用性和可行性。2015年, Wen-Ying Jiang 等人<sup>[26]</sup>将协同进化机制与多蚁群算法结合来解决分支管路设计问题。2016年, Tee-Ann Teo<sup>[27]</sup>将模型室内外地理空间数据和数据网络模型作为输入建立了应急响应和行人路线规划。2016年, Y.-F. Qu<sup>[28]</sup>针对航空发动机三维管路设计,首先采用自适应八叉树建模,在考虑了管道总长度、弯头数以及管道固有频率后提出了采用分层节点选择和动态更新机制的最大最小蚁群优化算法。并且,该学者将研究结果与 liu 在 2011 年提出的离散粒子群优化算法<sup>[19]</sup>进行对比,发现该方法可以减少计算时间且结果更贴合工程实



际。同年,该学者将问题转向正交三维管路设计<sup>[29]</sup>,首先采用逃生图和轨迹图建模,将管长和弯头数作为适应度评价指标,然后采用了并行搜索和动态更新机制的并行最大最小蚂蚁系统优化算法进行求解,与 liu 的研究结果<sup>[19]</sup>对比得出该方法路径的分支点数、运行时间以及适应度函数中都表现出了优势。2018年,马江涛等人<sup>[30]</sup>针对非正交分支管路的自动布局问题,提出一种基于局部二次学习概率路径图算法的分支管路布局方法,首先采用回溯算法计算出端点之间的最小斯坦纳树,并对斯坦纳点位置进行优化处理,得到分支点位置,在此基础上通过局部二次学习构建路径图,并用 DIJKSTRA 搜索出个分支管路的最短路径。2017年, Gleb Belov 针对化工设备连接的三维管路设计进行了研究<sup>[31]</sup>。

在建筑暖通空调领域, Jorens 等<sup>[32]</sup>指出,以往的研究大多集中在管道尺寸和材料选择的优化上。他们提出了一个综合管道布局、尺寸和材料的优化问题。该模型具有离散决策变量和非线性约束的特点。优化算法是在他们后来的工作中开发的。Bres 等人<sup>[33]</sup>开发了一种自动生成 HVAC 配电子系统的方法。采用最小生成树算法生成配水系统,然而,该方法在早期设计阶段主要用于建筑性能模拟。本研究未考虑碰撞等问题。Brahme<sup>[34]</sup>开发了生成式设计代理,使用启发式和最短路径算法自动生成管道布局。2002年, Benachir Medjdoub<sup>[35]</sup>采用面向对象的方法针对低压热水供热系统机房的设备选型、定位及三维管道拓扑的自动生成进行研究,这一过程需要设计者参与修正,在一定程度上增加了设计灵活性。2009年<sup>[36]</sup>,该学者针对天花板风机盘管系统引入案例推理来处理复杂的几何问题。由于之前的方法局限于几何层面,该学者在 2015年<sup>[37]</sup>重新定义了案例库以实现参数解的生成,且更加注重用户交互。2017年, Aurelien Bres<sup>[38]</sup>等研究了 HVAC 水路输配系统的连接关系(直连、二通、三通、阀门等)自动生成及寻优方法,该方法需要设计者预先确定输配节点(风机盘管、散热片等)在建筑内的位置,同样也将生成的 HVAC 系统用于建筑能耗模拟,得到较为接近建筑实际运行能耗的结果。

## 1.2.2 空调水系统水力平衡调节

为了解决空调水系统水力失调的问题,除了优化管路设计(改变管路布局或管路管径),在运行过程中最常见的调节方法是通过水泵变频调速和调节各支路平衡阀的开度,实现对管路系统的阻力分配的调节<sup>[39]</sup>。实际工程中,多采用手动调节的补偿法对平衡阀进行调节。随着计算机技术的出现,越来越多的学者采用计算机辅助平衡调节。石兆玉、张立勇等人采用模拟分析法生成调节方案<sup>[40,41]</sup>,该方法可以避免多次调试,省去很多麻烦。马仲元<sup>[42]</sup>是在模拟分析法的基础上,

对全系统进行阻力分析进而调整阀门开度,整体思路是根据支路流量计算调节阀开启度。

在空调水系统的运行控制时,水泵变频也是一项常用措施。空调水系统常见的控制方式有温差控制、最不利末端压差控制、供回水总管压差控制和最小阻力控制<sup>[43]</sup>。其中,最小阻力控制法相对于其他几种控制策略来说节能效果较好<sup>[43,44]</sup>。

### 1.2.3 空调水系统管路性能评价

对于空调水系统管路的性能评价及决策问题,不少学者也展开了研究。此外,在研究提高水力平衡的策略研究上,不可避免地涉及到不同策略对水力平衡性的影响,即如何评价不同策略下的水力平衡性。空调水系统管路的性能评价大多关注于管路的水力平衡性以及系统能耗。

1997年,江亿<sup>[45]</sup>针对热网及空调水系统给出了变流量调节时,各用户支路可调性和稳定性的定量定义。2002年,秦绪忠、江亿<sup>[46]</sup>采用1997年提出的水力稳定性定量分析指标分析了对不同网络连接方式和系统调节方式对系统水力稳定性的影响。2004年,韩晓红等人<sup>[47]</sup>通过实例分析了不同位置比压降对管网水力稳定性的影响,并在此基础上给出最佳比摩阻的求解过程,为便于求解和工程应用,引入局部阻力系数、平均比摩阻的推导。2006年,符永正等人<sup>[48]</sup>采用依次关闭各支路,然后计算未关闭支路流量的方法得到流量偏离系数,分析和对比异程系统与同程系统的稳定性。2010年,重庆大学的陈明<sup>[49]</sup>以重庆大学主教学楼中央空调系统为例,针对冷冻水变流量系统,探讨了不同控制方式下的冷冻水管路水力工况稳定性。在该研究中,水力工况的稳定性通过绘制不同控制方式下的系统水压图定性分析评价。2014年,南京工业大学的盛超<sup>[6]</sup>采用水力稳定性和流量偏离系数对水力管网的动态稳定性进行评价,对比分析了增大干管压降对系统部分负荷下不同支路个数末端系统动态水力稳定性的影响。2017年,刘亮等人<sup>[50]</sup>通过对比管网水力平衡调节前后支路的水力平衡度、流量变化、水压图变化,定性定量分析水力平衡调节措施的优劣。2018年,长安大学的常赛南<sup>[51]</sup>对比分析了变流量空调水系统控制方法对水力稳定性和能耗的影响,其中水力稳定性的评价指标采用水力失调度。2019年,刘庆东<sup>[52]</sup>利用FLOWMASTER模拟软件建立该地铁站空调水系统的模拟仿真平台,通过模型模拟空调水系统的全年运行情况,包括控制特性及运行能耗,其中控制特性通过比较运行流量与所需流量进行评价。2015年,Balogun等人<sup>[53]</sup>针对海上管路决策问题采用模糊逻辑近似推理和层次分析法建立了管线评价标准,评价指标包括经济标准、工程标准和环境标准。

## 1.2.4 小结

通过以上的文献分析，可以得出以下三点结论：

(1) 国内外学者针对路径规划展开了大量的研究，研究领域涉及船舶、航天、机器人等等。但在暖通空调输配系统领域，大部分学者将关注点集中在风系统领域，关注管道尺寸和管材的选择，少部分关注布局设计；研究对象为水系统的研究非常少，且在布局设计中并未考虑碰撞问题。

(2) 在空调水系统的水力平衡调试方面。补偿法是实际工程中较为常用的方法，但需手动反复调节；计算机辅助的模拟分析法调节次数少，调节过程简单。水系统泵阀联动优化控制计算复杂，系统响应慢。

(3) 在管路系统性能评价方面，评价指标大多采用水力平衡性能及运行能耗，但这些指标往往用在系统的运行阶段。国内外学者在管网系统水力稳定性评价方面做了不少研究，对于水力稳定性评价指标可分为定量指标和定性指标，其中定量指标有可调性、水力稳定度、流量偏离系数以及统计学指标等等，定性指标有流量变化、水压图变化。目前有部分研究还停留在理论层面。应用于实际的研究中，由于管网系统较为复杂，对于既定管路水系统需要根据设计图纸或者现场实测得到管段、阀件及各设备元件的参数建立模型，这无疑是耗时耗力的。为简化模型，部分研究将末端水系统的小支路进行合并，或者模拟 3、5 或者 10 个水系统末端支路，这在一定程度上降低了评价结果的精确度。

## 1.3 研究内容及技术路线

### 1.3.1 研究基础

在建筑信息化的 BIM 时代，BIM 已广泛应用在能源相关建模、仿真模拟和信息等方面，其优势主要在于数据的易处理性，这将使能源建模实现自动化、更好地输出显示，实现存储和组织新的建筑数据的功能。课题组致力于将 BIM 中的建筑信息用于负荷计算从而代替手工进行参数设置的方式，在得到负荷计算结果之后，结合建筑信息实现 BIM 建筑模型到原理图生成的 HVAC 自动设计的过

程。图 1.5 为 HVAC 自动设计流程图。

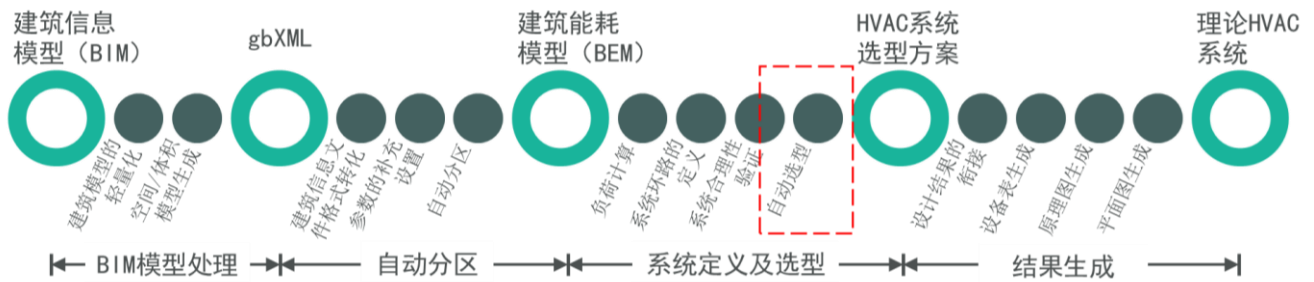


图 1.5 自动设计流程图

自动设计除了可以减少设计人员的工作量，依靠经验设计导致的设计不合理以外，还可利用计算机强大的计算能力快速生成设备选型表、设备连接关系、初投资及运维成本信息，使得设计师更快更好的进行方案比较，采用计算机选型还可以进行更科学的选型设计，如可根据全年逐时负荷进行冷机台数选择优化，对暖通空调系统的节能设计也有一定的促进作用。

在之前的研究工作中，也开展了关于输配系统设计方面的研究工作。但是这些研究工作将研究对象放在了风系统的设计。在实际工程中，风口的连接与水系统末端设备的连接有很大差别的。

1. 风口可以作为中间节点，连接两段管道；而水系统末端设备只能作为终点，供回水系统分别有一段管道与其连接；
2. 先前的研究在布局设计中采用编码方式逐步搜索，在空调区域如果有多个风口，搜索速度是非常慢的；
3. 先前的研究工作也对空调风系统建立了水力计算模型，风系统和水系统的水力计算虽然在步骤上是相同的，但计算公式等有所差别。此外，相较于风系统，水系统的水力平衡性较难实现。

### 1.3.2 研究目的及意义

本论文隶属于暖通空调系统自动设计项目中系统定义及选型部分，旨在实现暖通空调水系统管路的自动设计。即在在完成暖通空调系统末端选型及定位后，以建筑几何信息及末端选型结果和位置作为输入，在考虑障碍规避及几何约束条件下实现暖通空调水系统管路的多目标优化自动布局，建立水系统水力计算模型及快速调平模型完善水系统设计，最终建立水系统管路设计结果的综合评价体系，指导和优化水系统设计。

本研究不仅可以提高设计师的设计效率，提高设计质量，指导和优化设计，并且其研究将会推动建筑暖通设计行业的发展和人工智能在建筑领域的发展。

### 1.3.3 研究内容和技术路线

本论文的研究对象是空调系统末端侧水系统布局及选型设计，并不考虑机房侧水系统及水泵对水系统的影响。

本论文的研究内容主要分为以下三个部分：

#### （1）水系统的管路布局设计寻优算法

管路布局设计是指在考虑管道与障碍物（柱子、楼梯间）以及末端设备的碰撞问题，尽可能使路径最短、弯头最少、水力平衡性最好，即实现多目标的组合优化设计，以期实现初成本和运行成本的平衡。水系统管路布局设计在管路设计分类中属于多末端、多目标障碍规避的正交分支管路设计问题，属于 NP-难和离散化问题。

#### （2）水力计算及自动调平模型

管路尺寸的选择，附件和阀门的安装是水系统设计中不可或缺的一部分。本研究除了建立了水力计算模型外，还建立了自动调平模型以实现末端管路系统的水力平衡，并生成初调节方案，从而保证输配系统的基本功能和房间的舒适度。

#### （3）水系统设计方案综合评价体系

在管路布局优化设计阶段，多个目标的权重设置不同会产生多个不同的设计结果。本研究通过建立设计方案综合评价体系来量化设计结果在成本、运行能耗及水力平衡等方面的性能，从而来指导和优化设计结果。

本论文的技术路线如下图 1.6 所示：

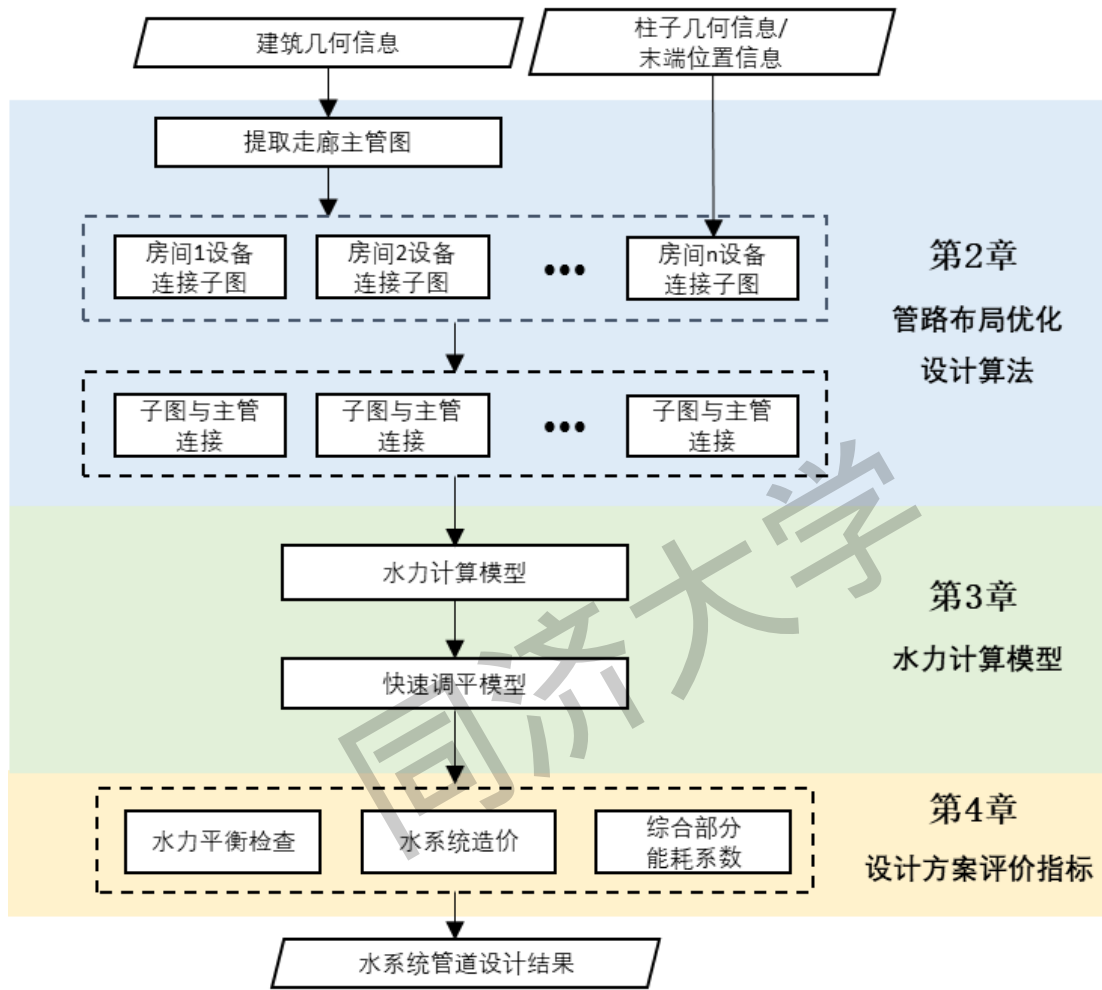


图 1.6 课题技术路线

本文各章节内容构成如下：

第一章介绍了课题的研究背景及现状，确定课题的研究内容及技术路线；第二章介绍了水系统布局设计算法；第三章介绍了水力计算模型及快速调平算法；第四章介绍了管路设计结果的评价指标；第五章采用实际建筑分析本论文所提出的设计优化算法的设计结果与原始设计结果的性能；最后一章总结了本文的结论及展望。

## 第 2 章 多目标组合优化的水系统布管算法

### 2.1 概述

水系统管路的设计往往耗费大量工时，计算机辅助设计的快速发展为该问题提供了新的解决思路，为空调系统设计人员节省了大量时间且提高了设计质量。为了更加高效地设计水系统管路，首先要明确管路设计的规则及管路、设备和障碍物等的空间模型表述。目前随着智能优化算法在路径规划领域的应用逐渐广泛，比如船舶管路布局设计、发动机管路设计等等，但在空调水系统设计领域仍处于空白状态。因此，本论文是智能优化算法在空调水系统设计领域的初尝试。

本章节对水系统管路布局的问题进行归纳，对管路布局进行描述和设计空间的建模，将多智能体蚁群算法应用于水系统管路路径的设计优化。

### 2.2 基于网络图的水系统管路布局问题及规则

#### 2.2.1 水系统管路布局问题描述

水系统管路自动设计的问题核心是路径的确定，即在建筑平面内从立管处连接多个末端的路径。由于在实际工程中，为了施工方便、防止管道噪音和管道泄漏对房间人员的舒适带来影响，因此，水系统干管一般沿走廊敷设。由此将水系统干管的位置定于走廊区域。房间内的设备管路连接与走廊干管连接后得到水系统管路设计结果。整体思路见下图 2.1 所示。

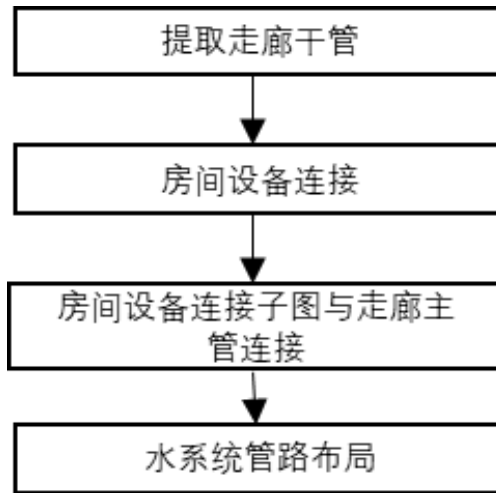


图 2.1 水系统管路布局整体思路

本小节的路径规划问题指的是房间内设备连接的路径规划。设备间之间的路径不得与障碍物碰撞，且规定路径是正交的。如下图 2.2 所示：

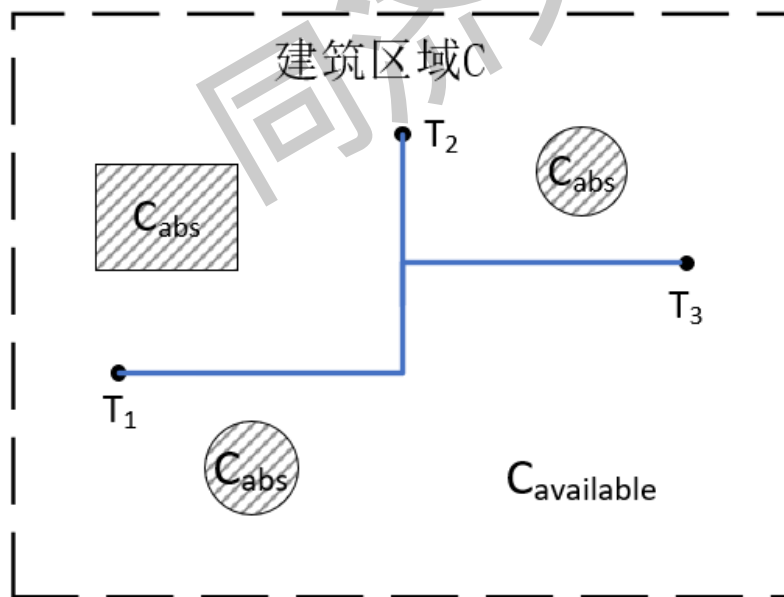


图 2.2 路径规划问题描述

虚线边框表示的建筑区域 C 是水系统管路布局所在的平面， $C_{available}$  是管路布局的可行区域， $C_{abs}$  表示障碍物区域。虽然水系统管路布局设计与其他领域的管路规划问题类似，但在规则约束上有明显不同，布局结果也相差较大。水系统管路设计需要满足多项规则，本论文将这些规则进行了总结，主要分为物理规则和经济规则。



## 2.2.2 水系统管路布局规则及数学描述

### 2.2.2.1 物理规则

水系统管路设计的总体要求是起点连接各个末端设备点,也可以看作多个给定点的连接。在各点连接的路径中允许增加额外点(或称中间节点)。这种问题在路径规划中称作斯坦纳树问题。斯坦纳树问题可由下图 2.3 表述,其中 A、B、C、D 表示给定点, S 表示斯坦纳点:

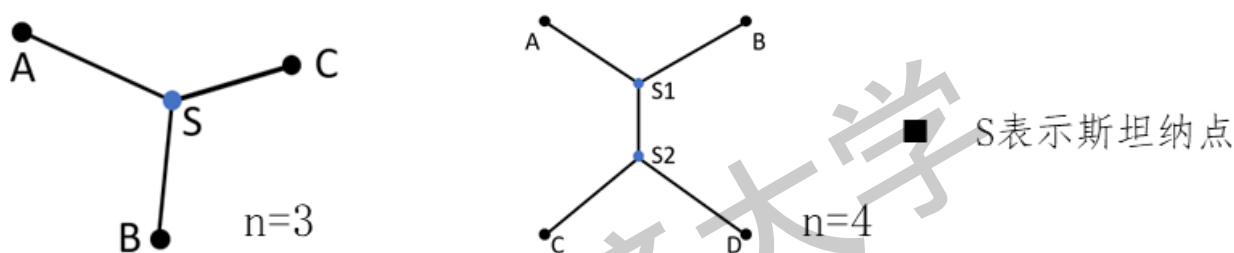


图 2.3 斯坦纳树问题描述(允许在给定点外增加额外点)

给定点在水系统管路中称作立管原点或者末端设备点,允许有一根管道与其连接;中间节点在水系统管路中称作构件,包括弯头、三通、四通,允许最少两根管道,最多四根管道与其相连。与点相连接管道的个数称作度。以下图 2.4 为例, A、B、C 为三个给定点,他们的度为 1, S 表示中间节点,点 S 的度为 3。

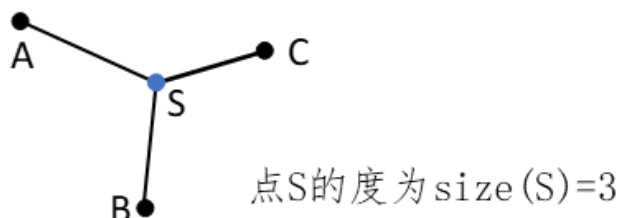


图 2.4 点的度描述

按照这个规则,给定点的度为 1,中间节点的度在[2,4]范围内。

水系统管路应尽量建筑的墙线平行或垂直方向敷设,美观且易维修。常见的两点之间管路的距离为曼哈顿距离和欧几里得距离。二者的定义如下:

点 $(x_1, y_1)$ 和 $(x_2, y_2)$ 的曼哈顿距离公式:

$$H_{manhattan}((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$$

点 $(x_1, y_1)$ 和 $(x_2, y_2)$ 的欧几里得距离公式:

$$H_{euclidean}((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

曼哈顿距离为两点之间的直线距离，欧几里得距离是两点之间距离投影到最标轴的长度之和，如图 2.5 所示。

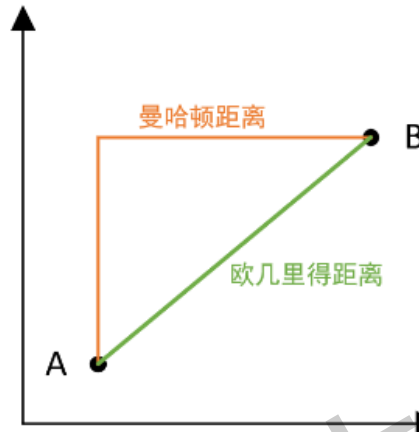


图 2.5 两点之间的曼哈顿距离与欧几里得距离

根据二者的定义，本文在计算两点之间的距离时，采用曼哈顿距离。

还需注意的是，无论是船舶、航空领域，还是空调水系统领域，管路布局都不能穿过障碍物，在本论文中，障碍物指的是柱子和已有的设备。管路布局时，与设备之间应当预留足够的维护和操作空间，两条管路之间同样需要预留空间，方便检查人员操作在空调水系统领域。

### 2.2.2.2 经济规则

水系统管路的总体布局应使管路系统长度尽量短，弯头个数尽量少。管路长度及弯头个数涉及到管路系统的初投资。考虑到水系统管路在运行过程中的水力平衡及能耗问题，各环路的管路长度应尽量相等。

按照上述总结的水系统管路布局的物理规则及经济规则，将水系统管路布局问题简化为多末端、多目标、障碍规避的正交分支管路设计问题。

## 2.2.3 布局空间建模方法

在路径规划研究中，大多学者采用栅格法<sup>[54,55,56]</sup>、可视图法<sup>[20,57,58,59]</sup>和逃逸图法<sup>[19,60,61,62]</sup>来对布局空间进行建模，目的是构造实现管路设计目标的潜在路径图。

### (1) 栅格法

栅格法是 Howden W E<sup>[63]</sup>在 1968 年提出的，其实质上是进行单

元分割，一般结合路径搜索算法解决路径规划问题。图 2.6 为栅格法布局空间建模示例，该方法的原理如下<sup>[54,55]</sup>：

假设布局空间  $C$  长  $L$ ，宽  $W$ ，栅格的尺寸为  $b$ ，则布局空间内的栅格数量为  $(L/b) \times (W/b)$ 。则布局空间可由集合  $C$  表示：

$$C = \{c_i\}, c_i \text{取值 } 0 \text{ 或 } 1, i \text{ 为正整数}$$

当  $c_i$  为 0 时，该栅格称为自由栅格；当  $c_i$  为 1 时，该栅格为障碍栅格。

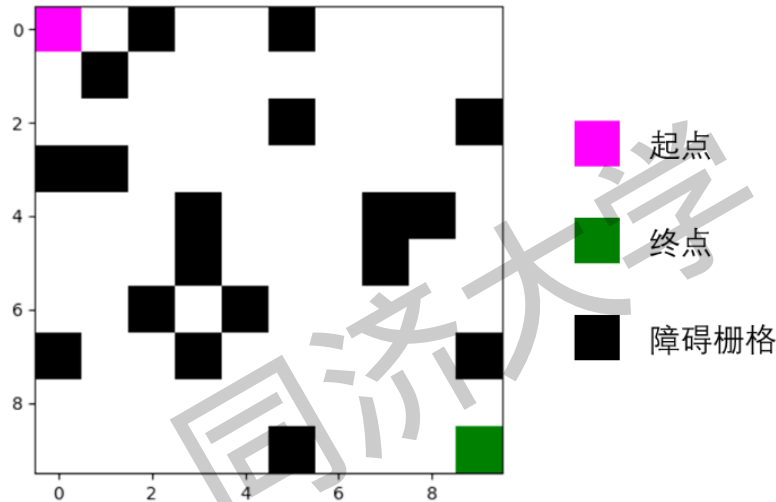


图 2.6 栅格法布局空间建模示例

栅格法是以栅格为最小单位存储环境信息，栅格尺寸的大小对于后续路径搜索的速度和质量有很大影响。栅格尺寸越小，对布局空间的描述越详细，但同时占用越多的计算空间，路径规划算法的搜索范围也越大；若栅格尺寸太大，虽然计算空间和搜索范围会减少，但是可能会错过较优路径。

## (2) 可视图法

可视图法由 Tomas L P 和 Michael A W<sup>[57]</sup>于 1979 年提出。以下图 2.7 为例解释可视图法的建模过程<sup>[55,57,64]</sup>，阴影部分为障碍物。目标从起点  $S$  到达终点  $G$ ，同时避开障碍物。若以  $C = \{N, L\}$  表示该布局空间的可视图，则  $N$  表示起点、终点和障碍物的所有顶点的集合， $L$  表示集合  $N$  内点两两连接且不与障碍物碰撞的边。若路径需要与障碍物相隔一定的距离，则将障碍物的边界向外扩大相应距

离即可。切线图法和 Voronoi 图法对可视图法进行了改进。

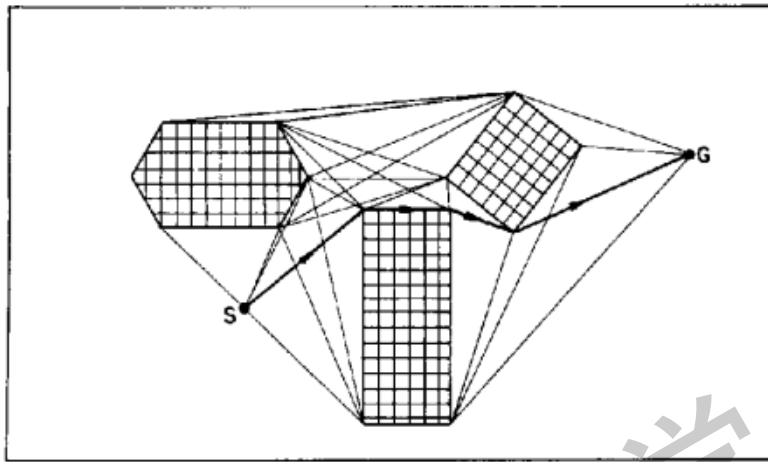


图 2.7 可视图法的布局空间建模示例[44]

### (3) 逃逸图法

逃逸图法是 Hightower<sup>[65]</sup>在 1988 年提出的，是直线路径规划中应用最广泛的图方法之一<sup>[66]</sup>。1994 年，Ganley 和 Cohoon<sup>[51]</sup>对逃逸算法进行改进，提出了一种 2D 平面逃逸图的建模方法，用于解决大规模电路板的设计问题。Q Liu 等人将该建模方法应用到航空发动机领域，结合粒子群算法或者图搜索算法解决问题。该建模方法的基本思路（如图 2.8 所示）如下：给定一个有  $n$  个节点的路由空间(其中  $n$  为终端和障碍顶点的总数)，逃逸图可以通过从终端和障碍顶点沿水平和垂直方向延伸直线来构造。这些线一直延伸到被障碍物或边界阻挡。

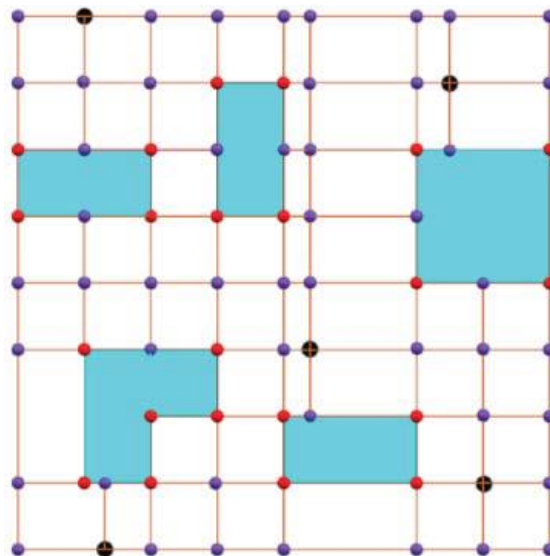


图 2.8 逃逸图法建模示例<sup>[61]</sup>

由于空调水系统管路是正交管道，且 Q Liu 等人采用逃逸图建模方法解决航空发动机管线设计得到了良好的设计结果，因此本研究采用逃逸图方法进行布局空间的建模。

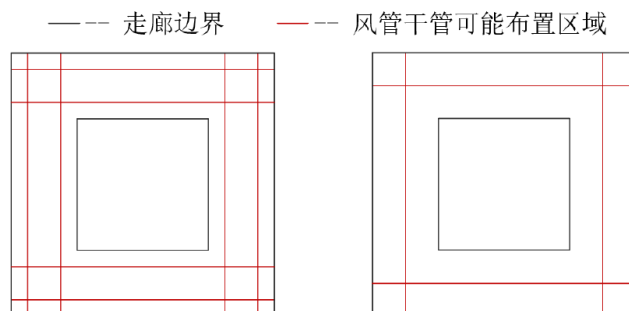
## 2.3 基于蚁群算法的水系统管路设计算法

2.1 章节确定了水系统管路布局的问题及整体思路。本章节将详细介绍水系统管路布局的设计优化算法，包括干管管线的提取和房间内设备的连接算法。

### 2.3.1 干管管线的提取

实际建筑中，水系统立管一般放置于管井中。在本论文中，将水系统立管的位置视为该楼层系统分区水系统管路的起始位置。实际工程中，由立管输送的冷媒一般是先经过走廊，再依次送至各个房间的末端；若立管输送的冷媒沿房间敷设，不仅房间内管道交叉造成的不美观，而且经过房间的干管会产生噪音从而对房间人员造成不舒适。因此，遵从实际的工程经验，应从水系统立管这个起点，先确定一根位于走廊区域的干管。

为了在走廊区域内确定一根干管的位置，首先识别走廊区域的几何信息，提取走廊的中心线，再根据走廊内柱子和末端设备的位置信息找到无碰撞的走廊主管位置。在本论文中，提取走廊区域的中心线采用课题组先前的研究成果<sup>[67]</sup>，如图 2.9 所示。该算法以走廊边界的边长为切割依据，将多边形切割成多个两边平行的四边形，再通过中心线的连通算法连接所有四边形的中心线，生成满足管道布置要求的连通的走廊中心线拓扑，并转化为图数据结构。



a. 实际工程中风管干管的布置位置；b. 本文规定的风管干管布置位置

图 2.9 干管布置位置示例

## 2.3.2 空调房间内管道布局设计算法

### 2.3.2.1 基于逃逸图的布局空间建模

在 2.2.3.3 章节中介绍了逃逸图建模方法的基本思路，但在水系统管道布局中，需要增加约束条件以满足实际工程的要求。此外，障碍物越多，逃逸图就越复杂。为了满足实际工程需要和提高路径规划的速度与质量，在构造逃逸图时采取以下几点措施：

- (1) 将设备的进出水口点看作末端点，将末端的实际几何边界与位于房间内的柱子一样看作障碍物。
- (2) 在逃逸图中，将局部构件看作点，将管道看作一条边。为了避免局部构件或管道与障碍物发生碰撞，管道与障碍物应间隔一定距离。因此，在构造逃逸图时，将末端设备和柱子扩大，末端点位置延伸使其位于已扩大的设备边界上，将该点称为虚拟末端点。在确定房间内的管路布局后，将实际末端点位置与虚拟末端点连接起来。
- (3) 在实际工程中，风机盘管的前侧会安装一段短风道，因此设备前侧的边不得向外延伸。在本研究中，通过延伸虚拟末端点及设备后侧的两个顶点构造逃逸图。
- (4) 在延伸末端点和障碍物顶点时，延伸线遇到边界停止。因此构造逃逸图之前需要定义布局空间的边界，布局空间的最大边界即为房间的几何边界，但由于末端设备一般处于房间的中部，若将房间的几何边界作为布局空间的边界，势必会增加不必要的边，增加计算的存储空间。本研究将末端设备和柱子的最小包络矩形作为布局空间的边界，以减少计算复杂度。
- (5) 在延伸各点后得到逃逸图删去不必要的点和边，以减少计算复杂度。

基于以上几点措施，我们将逃逸图建模法进行改进，具体操作步骤如下：

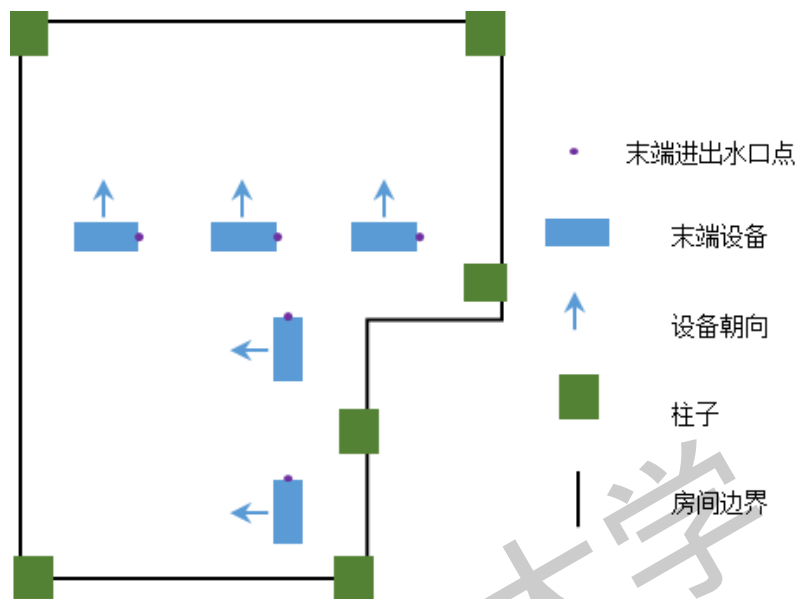


图 2.10 房间设备及障碍物信息

如图 2.10 所示，该空调房间内有 5 个末端设备，每个设备的朝向如箭头所示。

- (1) 将设备和柱子的边界向外延展一定距离，计算虚拟末端点，如图 2.11 (a) 所示，深色框图为设备或柱子的实际布局，浅色框图为设备或柱子扩大后的布局，紫色点为实际末端点，黄色点为虚拟末端点；
- (2) 计算房间内所有设备的最小包络矩形作为初始布局边界，若初始布局空间与房间内的柱子发生碰撞，则将所有设备和与初始布局空间发生碰撞的柱子的最小包络矩形作为最终的布局边界，否则初始布局边界即为最终布局边界，如图 2.11 (a) 所示，红色边界为布局边界；
- (3) 延伸虚拟末端点、设备后侧边、柱子的所有顶点，遇到障碍物（这里指的是设备和柱子）和布局边界停止，如图 2.11 (b) 和 (c) 所示；

(4) 删去不必要的边和点。当逃逸图中的点度只有 1 且不是虚拟末端点时，将删去该点及其所连接的边，如图 2.11 (d) 所示。

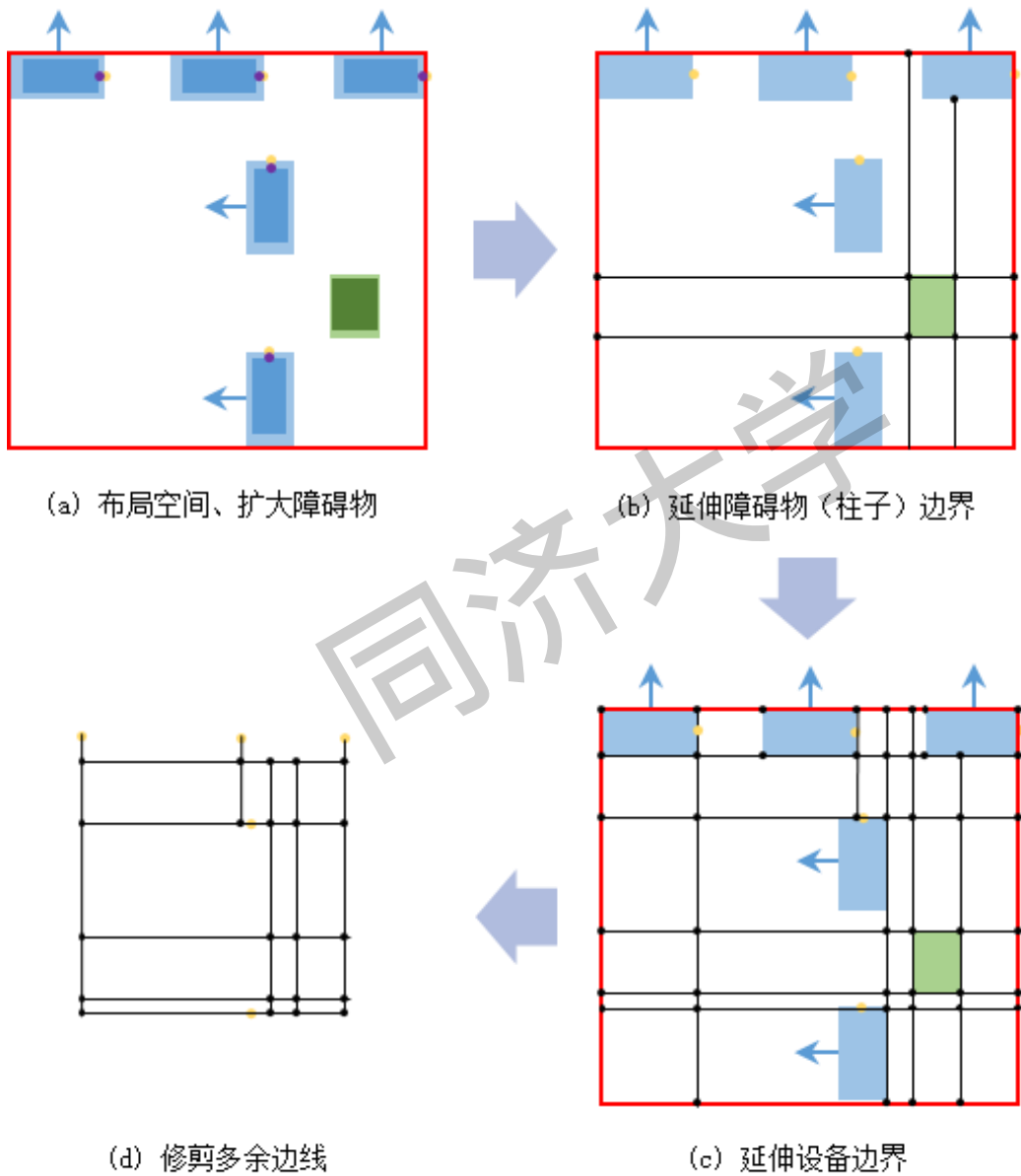


图 2.11 逃逸图法布局空间建模步骤

表 2.1 逃逸图建模算法伪代码

输入：房间几何信息 $R$ 、设备选型结果 $P$ （型号、尺寸、朝向、进出水口位置）、柱子几何信息 $C$
输出：布局空间逃逸图 $G=(N,L)$



---

```

1:  $E_{extend}$ , 设备的延展轮廓线;  $C_{extend}$ , 柱子的延展轮廓线;  $T_{virtual}$ , 虚拟末端点,  $O = E_{extend} + C_{extend}$ , 房间障碍物;
2:  $B_{initial}$  = 最小包络矩形多边形 ( $E_{extend}$ ), 初始布局边界
3:  $C_{collision} = [C_i \text{ for } C_i \text{ in } C_{extend} \text{ if } C_i \text{ overlays with } B_{initial}]$ , 与初始布局边界碰撞的柱子
4:  $B$  = 最小包络矩形多边形 ( $O$ ), 最终布局边界
5:  $G = nx.graph()$ 
6: for  $T_i$  in  $T_{virtual}$ :
7:    $L_{hTi}, L_{vTi}$  = 水平方向线与垂直方向线
8:    $J\_node = [L_{hTi}, L_{vTi}$  与  $B$  或  $O$  的交点]
9:   update  $G (L_{hTi}, L_{vTi}, J\_node)$ 
10: for  $E_i$  in  $E_{extend}$ :
11:    $L_{bi}$  = 设备后侧延伸线
12:    $J\_node = [L_{bi}$  与  $B$  或  $O$  的交点]
13:   update  $G (L_{bi}, J\_node)$ 
14: for  $C_i$  in  $C_{extend}$ :
15:    $L_{c1i}, L_{c2i}, L_{c3i}, L_{c4i}$  = 柱子四条边延伸线
16:    $J\_node = [L_{c1i}, L_{c2i}, L_{c3i}, L_{c4i}$  与  $B$  或  $O$  的交点]
17:   update  $G (L_{c1i}, L_{c2i}, L_{c3i}, L_{c4i}, J\_node)$ 
18: for  $N_i$  in  $G = (N, L)$ :
19:   if 度 ( $N_i$ ) = 1 and  $N_i$  not in  $T_{virtual}$ :
20:      $edge$  = 与  $N_i$  相邻的边
21:     删除  $N_i$  与  $edge$ 
22: return  $G = (N, L)$ 

```

---

### 2.3.2.2 并行搜索蚁群算法

#### (1) 蚁群算法简介

蚁群算法最早是由意大利学者 Colomi A., Dorigo M. 于 1991 年提出的<sup>[68]</sup>。蚁群算法是一种仿生学算法, 通过模拟自然界中蚁群觅食行为而提出的一种群体智能算法。其基本原理是蚂蚁在觅食时会在经过的路径上释放信息素, 随着时间的推移, 较短的路径上积累的信息素较多, 后来的蚂蚁在选择路径时选择信息素较多的路径概率较大, 从而形成正反馈机制, 最终蚁群或发现最短路径<sup>[69]</sup>。它具有以下三个特点<sup>[70]</sup>:

- a) 正反馈性
- b) 强启发性
- c) 协调性与并行性

近年来, 由于蚁群算法优越的性能, 使其在许多的领域得到广泛应用, 如旅行商问题、指派问题(Assignment Problem)、调度问题(Scheduling Problem)、连续优化(Continuous Optimization)、系统辨识、化工、图像处理等<sup>[70]</sup>。

### (2) 适应度函数

在 2.2.2 章节中总结了水系统管路设计的物理规则和经济规则。此外, 适应度函数和约束可以相互转化。适应度函数是评价管路设计的标准。在本论文中适应度函数由两部分组成, 如式 2.1 和 2.2 所示。

$$F_g = aL_g + bB_g \quad (2.1)$$

$$a + b = 1 \quad (2.2)$$

其中 a、b 为两个相对重要参数。 $L_g$  是管路设计结果中所有管段的长度之和, 每段管道的距离采用 2.2.2.1 章节中介绍的曼哈顿距离计算。 $B_g$  是弯道数之和。

则在本章节中蚁群算法的目标可以表示为  $Min(fitness\_function\_Fg)$ 。

### (3) 并行搜索策略

在本论文中, 并行搜索策略用于构造 RBPRO(障碍规避的正交分支管路设计, Rectilinear Branch Pipe Routing with Obstacles)。蚁群中蚂蚁的个数等于末端点个数, 每个蚂蚁对应一个末端点。每只蚂蚁都有它的禁忌表, 用于存储它所经过的顶点。每一时刻的蚂蚁有一个邻居节点集合, 用于存储下一时刻蚂蚁的可能位置, 这个邻居节点集合是蚂蚁在该位置点的相邻节点集合(除了在禁忌表内的节点)。图 2.12 展示了 RBPRO 的构造流程图。

步骤 1: 每只蚂蚁根据状态转移规则确定下一时刻的位置

步骤 2: 下一时刻的位置添加至每只蚂蚁的禁忌表中

步骤 3: 通过判断蚂蚁的下一时刻位置是否在其他蚂蚁的禁忌表中来判断是否有蚂蚁相遇。若有蚂蚁相遇, 进入步骤 4; 若无蚂蚁相遇, 进入步骤 1 开始确定下一时刻的位置

步骤 4: 若有蚂蚁相遇, 将这些蚂蚁的禁忌表合并去重, 并将这些蚂蚁合并为一个蚂蚁。例如 A 的下一时刻位置在 B 的禁忌表中, 则将 A 的禁忌表添加至 B 的禁忌表中, 同时删除 A。此外, 将 A 的禁忌表存储到 D 中, 方便可视化 RBPRO 结果。D 的结构形式为  $D = \{A:A\text{的禁忌表}, \dots\}$ ,

步骤 5: 判断当前蚂蚁的个数是否为 1, 若个数大于 1, 继续从步骤 1 开始确定下一时刻的位置; 否则, 输出 RBPRO 结果。

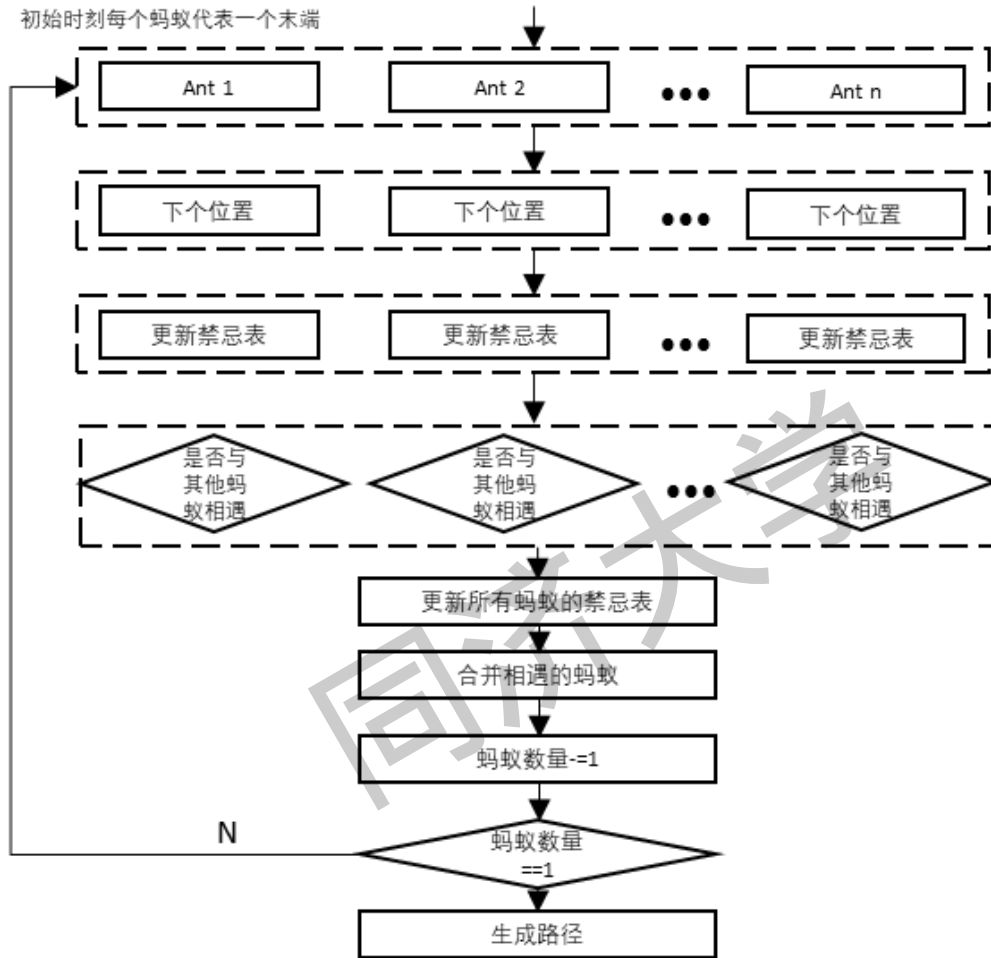


图 2.12 RBPRO 构造流程图

(4) 基于伪随机比例的状态转移规则

每只蚂蚁在选择下一步路径时是按照状态转移规则来决定的。在基本蚁群算法中, 长度越短、信息素浓度越大的路径被蚂蚁选择的概率越大:

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau(i,j)]^\alpha [\eta(i,j)]^\beta}{\sum_{s \in J_k(i)} [\tau(i,s)]^\alpha [\eta(i,s)]^\beta}, j \in allowed_k \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (2.3)$$

根据概率采用轮盘赌策略随机选择下一个城市。轮盘赌策略的规则如下:

根据状态转移概率计算得到蚂蚁到下一时刻位置的概率, 以  $P = \{P(i, j)\}, j \in allowed_k$ 。在  $(0, 1)$  内随机取一个数, 判断该值落在累积概率区

间（图 2.13 为累积概率示意图）内，落在哪个区间，该区间对应的下一时刻位置被蚂蚁选择。

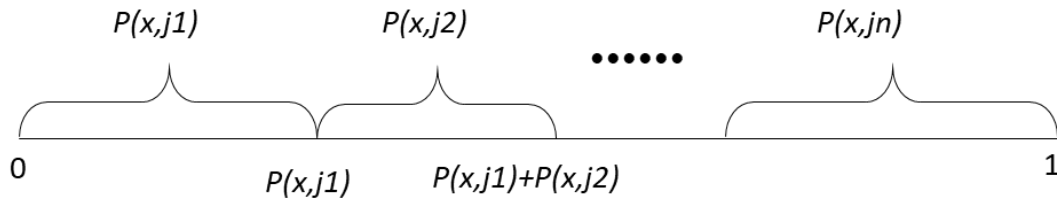


图 2.13 累积概率示意图

为了避免轮盘赌策略的随机性太高，Dorigo 等人结合 Q 学习将确定性与随机性结合，建立开发当前路径与随机路径的平衡<sup>[71,72,73]</sup>。这种状态转移规则也可以称为伪随机比例规则，具体规则如下：

$$j = \begin{cases} \arg \max_{j \in J_k(i)} \{ [\tau(i, j)]^\alpha [\eta(i, j)]^\beta \}, & \text{if } q \leq q_0 \\ P_{ij}^k, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau(i, j)]^\alpha [\eta(i, j)]^\beta}{\sum_{s \in J_k(i)} [\tau(i, s)]^\alpha [\eta(i, s)]^\beta}, & j \in \text{allowed}_k, q > q_0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.5)$$

对于每只蚂蚁  $k$ ,

$\text{allowed}_k$  表示蚂蚁下一时刻可以选择的位置点；

$\tau(i, j)$  表示  $t$  时刻路径  $(i, j)$  上的信息素；

$\alpha$  表示信息启发式因子，它反映了路径上的信息素值对蚂蚁选择路径的影响。 $\alpha$  越大，路径上的信息素值对蚂蚁选择路径的影响越大，也就是说群里的协作性更强；

$\beta$  表示理想启发式因子，它反映了环境信息对蚂蚁选择路径的影响大小。

$\beta$  值越大，说明环境对蚂蚁的影响越大；

$q$  是随机产生的从 0 到 1 的数值；

$q_0$  是设定的阈值，取值范围  $[0, 1]$ ， $q \leq q_0$  时蚂蚁利用先验知识选择下一时刻的位置点， $q > q_0$  时蚂蚁采用轮盘赌法选择下一时刻的位置点。这种方法使得蚂蚁在选择路径时既能够充分利用先验知识，又增加了探索的多样性。 $q_0$  值的大小决定了先验知识和随机搜索的相对重要性。通过改变  $q_0$  的值，可以调整先验搜索和随机搜索之间的平衡。

$\eta(i, j)$  表示启发式函数，公式如下：

$$\eta(i,j) = \frac{1}{dist} \quad (2.6)$$

$$dist = \mu d(i,j) + \lambda d(i,centroid) + \sigma \min(D) \quad (2.7)$$

$$D = [d(i,p) \text{ for } p \text{ in other ants' tabu\_list}] \quad (2.8)$$

$d(x,y)$ 表示位置点 $x$ 和位置点 $y$ 之间的曼哈顿距离,为了使蚂蚁尽可能选择路径短的路径;

$centroid$ 表示所有末端点的几何中心位置,为了使蚂蚁尽可能与其他蚂蚁相遇;

$\min(D)$ 表示蚂蚁当前位置与其他蚂蚁经过的位置之间曼哈顿距离最短的距离,为了使蚂蚁尽可能与其他蚂蚁相遇;

$\mu, \lambda, \sigma$ 是三个常数,表示 $d(x,y), d(i,centroid), \min(D)$ 三个距离的相对重要性,其中, $d(i,centroid), \min(D)$ 是本论文根据实际工程要求做出的改进。

#### (5) 基于最大最小蚂蚁系统的信息素更新策略

在一群蚂蚁完成一次并行搜索或者一次迭代结束后,需要对所有路径的信息素进行更新,信息素的更新策略采用最大最小蚂蚁系统的更新规则,这样可以避免搜索停滞。

$$tau_{tem} = tau \cdot r\text{ho} + Q/F_g \quad (2.9)$$

$$Q = \sum_{L \in G(N,L)} d(L) \quad (2.10)$$

$$tau_{update} = \begin{cases} tau_{tem}, & \text{if } tau_{min} \leq tau_{tem} \leq tau_{max} \\ tau_{min}, & \text{if } tau_{tem} < tau_{min} \\ tau_{max}, & \text{if } tau_{tem} > tau_{max} \end{cases} \quad (2.11)$$

$r\text{ho}$ 表示路径上原有信息素的保留因子;

$F_g$ 表示某次布局结果的适应度函数,对于局部更新来说,是一群蚂蚁在完成一次并行搜索后所得到布局结果的适应度函数值,对于全局更新来说,是一次迭代过程中所有布局结果适应度函数值的最小值;

$Q$ 表示所有路径的曼哈顿距离之和;

$tau_{max}, tau_{min}$ 为设定的最大最小信息素值。

#### (6) 具体步骤

步骤1: 初始化。定义迭代次数  $i\_max$ , 每次迭代的种群数  $group\_max$ , 初始信息素  $tau\_init$ , 信息素最大值, 信息素最小值,  $\alpha, \beta, \mu, \lambda, \sigma, centroid, r\text{ho}, Q$ , 初始  $F\_min$  和  $F$  值(可以随机取一个很大的值, 保证第一次的 RBPRO

适应度函数值小于该二值即可);

步骤 2: 一个种群的蚂蚁采用并行策略构造 RBPRO;

步骤 3: 计算本次布局结果 RBPRO 的适应度函数值  $F$ ;

步骤 4: 更新局部信息素;

步骤 5: 判断  $F_g$  是否小于  $F_{g-1}$ , 若 T, 将 `Out_path` 更换为本次的 RBPRO 结果, 否则 pass。该步骤是为了记录一次迭代过程中适应度函数值最小的 RBPRO 结果, 该结果用于更新全局信息素。

步骤 6: 判断  $F_g$  是否小于  $F_{min}$ , 若 T, 将 `final_path` 更换为本次的 RBPRO 结果, 否则 pass。该步骤是为了记录全局中适应度函数值最小的 RBPRO 结果, 在达到迭代次数后输出该结果作为最终的布局结果。

步骤 7: `group+=1`, 并判断是否小于等于 `group_max`, 若 F, 则更新全局信息素, 转至步骤 8, 若 T, 转到步骤 2;

步骤 8: `i+=1`, 判断是否小于等于迭代次数, 若 T, 转至步骤 2, 开始新一次迭代, 若 F, 则输出 `final_path`。

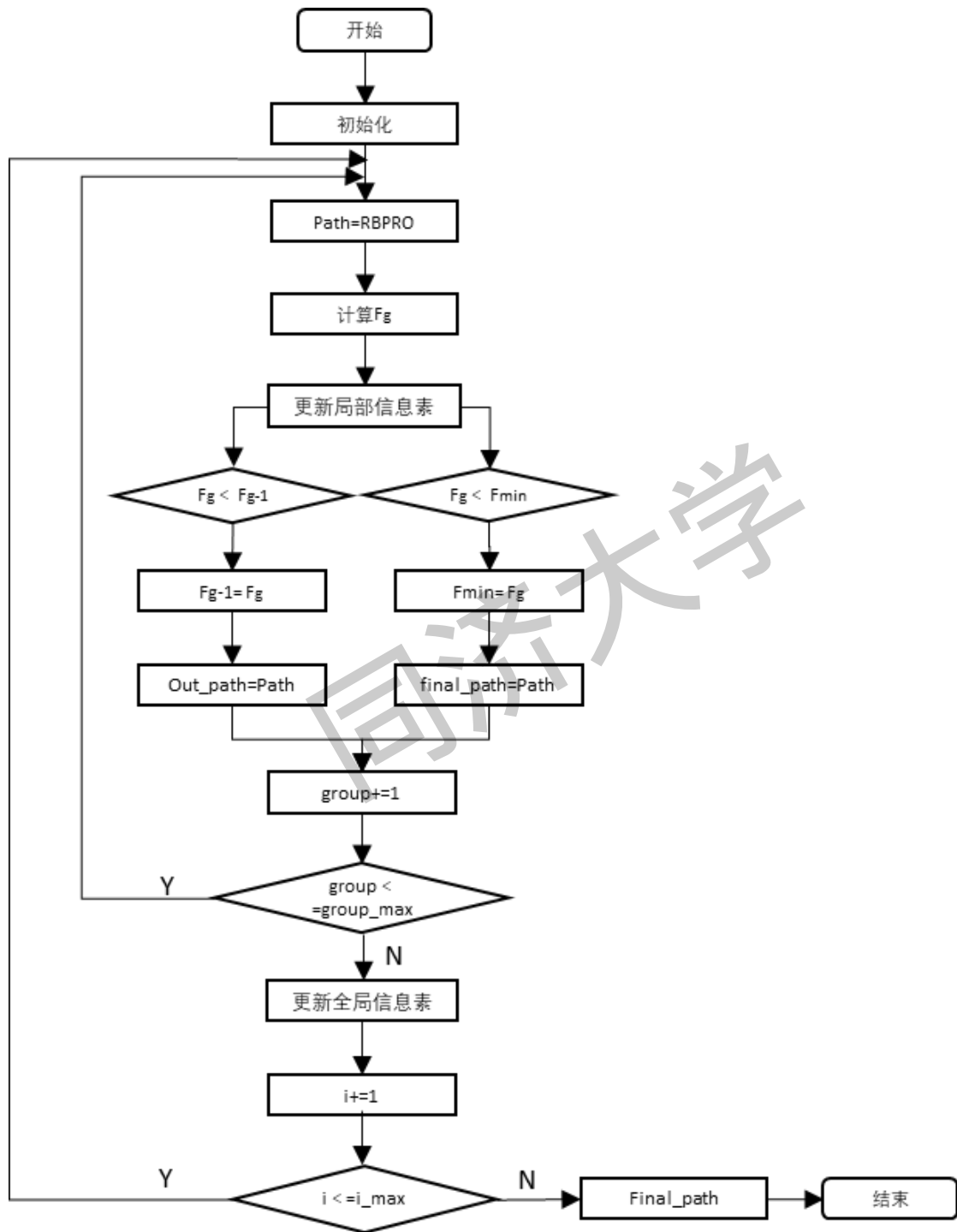


图 2.14 蚁群并行搜索流程图

## (7) 误差及解决方法

在每群蚂蚁构造 RBPRO 时,可能会有多余的边,这些边会对适应度函数的计算结果及信息素的更新造成误差,因此在每群蚂蚁结束一次并行搜索构造 RBPRO 时,需要对产生的 RBPRO 做些许修改。

下面以 2.3.2.1 章节所建立的逃逸图说明这个误差及解决方法，如图 2.15：

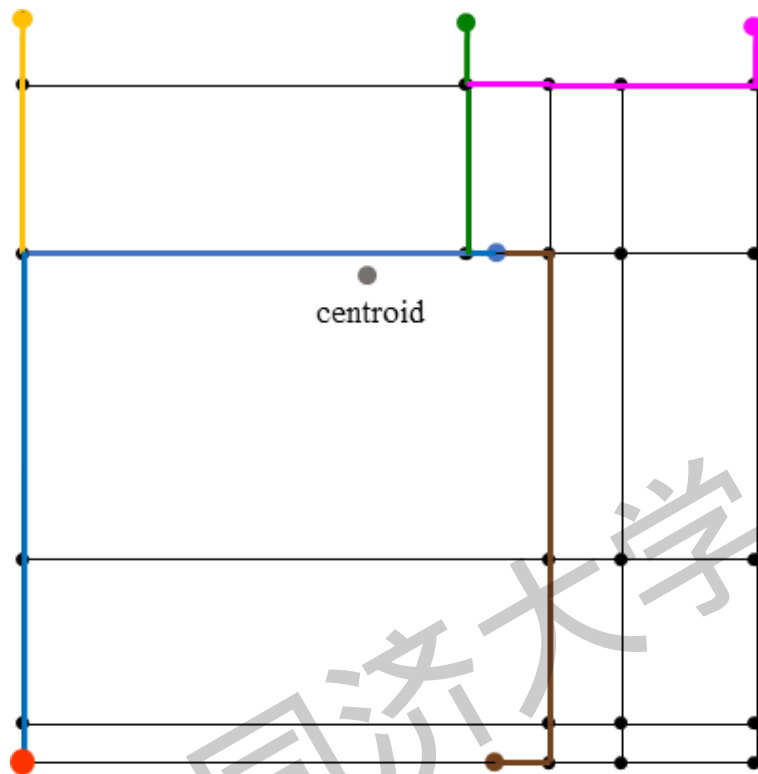


图 2.15 存在误差时的 RBPRO 结果示例图

（注：该图知识为了说明误差情况及解决办法，并不代表真是算法输出结果）

图中用黄色、绿色、紫色、蓝色及棕色的路径分别表示五个末端节点的路径，可以看到，在最后的結果中，用红点表示的节点并非末端，因此需要把多余的边点删掉，保证结果的准确性。

在本论文中，所采用的方法是，随机选取一个末端点，找到该末端点到其他几个末端历经的最短路径，将这些路径的边和点存储下来并去重，称作有效路径。判断初始生成的 RBPRO 结果的路径和节点是否在有效路径中，若 F，则删去，否则跳过。

在每个空调房间确定了管路布局结果后，找到干管上与房间管路布局路径上最近的点，在两点之前建立路径。在遍历完所有空调房间后，该系统分区的水系统管路布局设计也就完成了。

## 2.4 本章小结

本章首先对空调水系统管路布局设计问题进行了描述，确定了一个系统分区



内水系统管路布局设计的整体思路。

总结了水系统布局需要遵循的物理规则和经济规则，并对物理规则进行了数学描述，按照物理规则的数学描述，可以将空调水系统管路布局设计问题描述为多末端障碍规避的正交分支管路设计问题。

详细介绍了水系统管路布局设计算法，首先基于课题组先前的研究成果提取干管，接着对空调房间进行管路布局空间的建模，基于逃逸图采用蚁群算法确定房间内的管道布局结果。结合实际工程，本文采用了伪随机比例的状态转移规则、布局和全局的信息素更新策略以及最大最小蚂蚁系统以获得更优的结果。此外，本论文在这些原有算法的基础上，将启发式函数做了修改以满足本研究的工程要求。

最后算法输出的水系统设计结果的数据格式为 `graph`，具体的结构形式将在 4.1 章节详细介绍。

同济大学

## 第3章 基于专家知识的管路系统水力计算及调平模型

### 3.1 概述

水系统水力计算是空调水系统设计中非常重要的一步，管道尺寸的大小、阀门的选择都会影响不仅会影响水系统的水力平衡，还会影响到系统的初投资。管径越小，系统的初投资越小，但管道的阻力会越大，使得水泵提供的压头变大，运行能耗增加<sup>[74]</sup>。此外，若水系统的选型不合理使得各环路的不平衡度相差较大，会使得末端设备的水流量分配不均，导致房间的温度偏离设计值，人体会产生不舒适感。因此，水系统的水力计算的目的是在保证各环路之间的水力平衡度满足要求的前提下，尽量选择初投资与运行成本之和最低的管径。

本章基于专家知识对第2章得到的水系统管路布局结果进行水力计算，并开发了一种动态调平模型。

### 3.2 管路系统水力计算模型

#### 3.2.1 管材的选择

根据《实用供热空调设计手册第二版》<sup>[75]</sup>表 26.2-1 选择空调水系统的管材，部分摘录如下：

表 3.1 管材选择表

序号	用途	适用管材种类
1	输送 $t \leq 60^\circ\text{C}$ 的热水或冷水	焊接钢管、无缝钢管、镀锌钢管、PP-R 塑铝稳态管、铝塑复合管 (XPAP1、XPAP2、XPAP5)、PB 管、PE-RT 管、PE-X 管、PP-R 管
2	冷凝水管	镀锌钢管、PE 管、PVC 管、UPVC 管

在管材选择时还应注意，实际工程中，空调冷热水的输送，宜优先采用聚丙烯 (PP-R) 塑铝稳态复合管。

#### 3.2.2 管道选型

《实用供热空调设计手册第二版》第 26.5.1 章节中提到：“计算管道沿程阻

力时，单位长度摩擦阻力损失（比摩阻）宜控制在 100~300Pa/m，通常，最大不应超过 400Pa/m。

(1) 按照比摩阻不超过 200Pa/m 选择管道尺寸。

当管道管材为 PPR 塑铝稳态管时，采用《实用供热空调设计手册第二版》式 26.4-4 比摩阻公式计算：

$$R = 0.012(d)^{-4.87}(Q)^{1.85} \times 1000, \text{ 管材为PPR塑铝稳态管} \quad (3.1)$$

$R$ 表示管道的比摩阻，单位 Pa/m;

$d$ 表示管道直径，单位 m;

$Q$ 表示管道流量，单位  $m^3/s$ 。

当管道管材为其他时，按照常规的水力计算公式计算。

《实用供热空调设计手册第二版》第 26.5.1 章节提到，在计算摩擦阻力系数  $\lambda$  值时采用紊流过渡区的计算公式。一般室内热水采暖管网和空调冷冻水管网的流动状态几乎都处于紊流过渡区<sup>[76]</sup>。因此，本论文在选用直径时假设管内流体流动状态为紊流过渡区。

《实用供热空调设计手册第二版》表 1.4-4 中紊流过渡区的其中一个摩擦阻力系数计算公式如下：

$$R = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (3.2)$$

$$\lambda = 0.11 \left( \frac{k_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} \quad (3.3)$$

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (3.4)$$

经推导，可得出：

$$R = 0.11 \left( \frac{k_s}{d} + \frac{68\pi dv}{4Q} \right)^{0.25} \cdot \frac{8Q\rho^2}{\pi^2 d^5} \quad (3.5)$$

其中，

$k_s$ 表示管道表面的当量绝对粗糙度，m；对于空调冷冻水这种闭式循环水系

统来说： $k_s=0.2\text{mm}$ ；

$Re$ 表示雷诺数；

$\nu$ 表示运动黏度，单位  $\text{m}^2/\text{s}$ ，查《实用供热空调设计手册第二版》表 1.2-7 水的物理参数，取  $10^\circ\text{C}$  水的运动黏度为  $1.3 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ；

$\rho$ 表示水的密度，单位  $\text{kg}/\text{m}^3$ ，取  $1000 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

(2) 计算管道表面积和流速。

$$S = \frac{1}{4} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (3.6)$$

$$v = Q/S \quad (3.7)$$

(3) 计算管道的雷诺数

(4) 计算管道的实际比摩阻。

当管道管材为 PPR 塑铝稳态管时，实际比摩阻公式如下（公式参考广州地铁设计院的设计导则）：

$$R = \left\{ \begin{array}{l} 0.00107 \frac{v^2}{d^{1.3}} \times 0.583, \text{ if } v \geq 1.2 \\ 0.00107 \frac{v^2 \left(1 + \frac{0.867}{v}\right)^{0.3}}{d^{1.3}} \times 0.583, \text{ if } v < 1.2 \end{array} \right\} \quad (3.8)$$

当管道管材为其他时，通过判断雷诺数大小计算管道的摩擦阻力系数。

### 3.2.3 阀门选型

在阀门选型过程中，末端设备种类及管路系统形式不同，阀门的种类也不同。在本论文中，第 2 章节所得到的管路布局结果为异程式两管制系统，不同末端设备的阀门种类选择参照同济大学建筑设计研究院的选择规则。

当末端设备为空气处理机组或新风机组时，应在进水管道上从靠近设备处依次安装温度计、压力计、管道过滤器、压力表和蝶阀，在出水管道上从靠近设备处依次安装温度计、压力表、蝶阀、动态平衡电动二通调节阀、蝶阀；进水管安装旁通蝶阀。如图 3.1 所示：

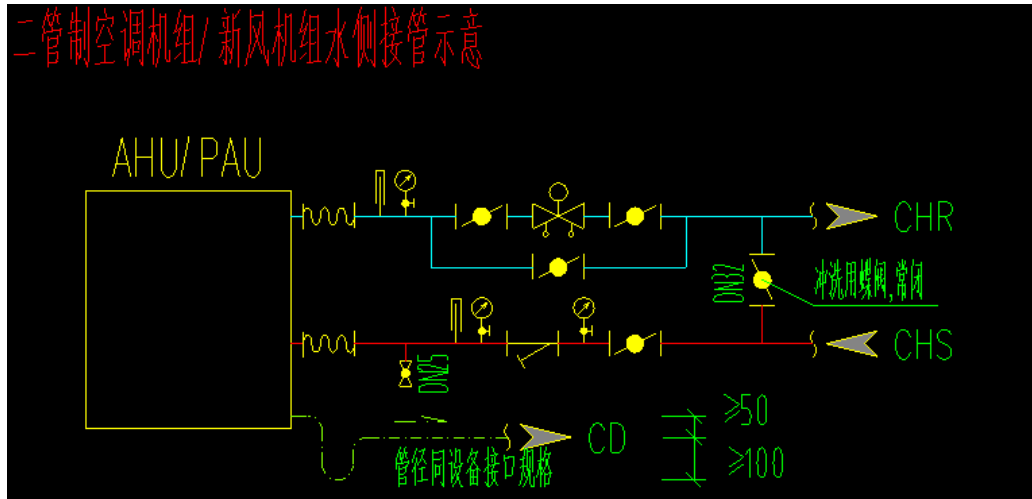


图 3.1 二管制空调机组/新风机组水侧接管示意图

当末端设备为风机盘管机组（环路 1~2 台）时，应在进水管道上从靠近设备处依次安装过滤器和蝶阀，在出水管道上从靠近设备处依次安装动态平衡电动二通调节阀和球阀；当末端设备为风机盘管机组（环路 3~4 台）时，应在进水管道上从靠近设备处依次安装过滤器和蝶阀，在出水管道上从靠近设备处依次安装电动二通双位阀和球阀，如图 3.2 所示：

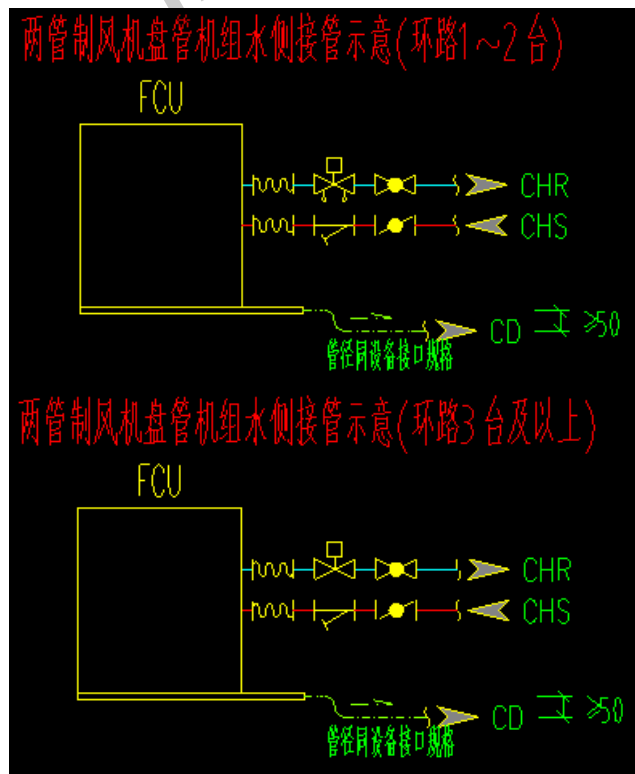


图 3.2 两管制风机盘管机组水侧接管示意图

为通常情况下，风机盘管系统环路的水平供水干管上安装蝶阀，水平回水干管上从靠近立管侧依次安装蝶阀、自力式压差平衡阀。如图 3.3 所示：

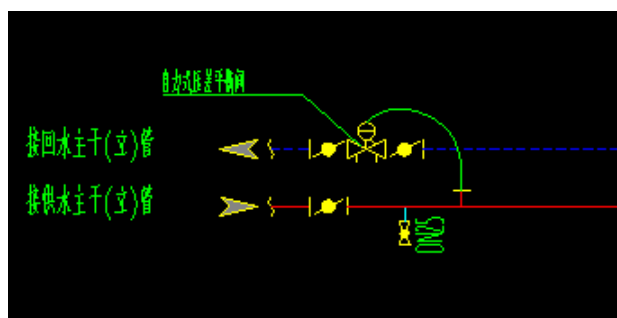


图 3.3 两管制风机盘管环路接管示意图

阀门的尺寸按照阀门所在管道的尺寸选定，本研究假设所采用的阀门的流量特性均为直线流量特性。

### 3.2.4 冷凝水管的设计

冷凝水管的设计主要是冷凝水管管径的选择，一般根据冷凝水量和敷设坡度计算确定。《实用供热空调设计手册第二版》表 26.5-14 列举了不同负荷下的冷凝水管尺寸，如下表 3.2：

表 3.2 冷凝水管的管径选择表

冷负荷 (kW)	公称直径 (mm)	冷负荷 (kW)	公称直径 (mm)	冷负荷 (kW)	公称直径 (mm)
7	20	101~176	40	1056~1512	100
7.1~17.6	25	177~598	50	1513~12462	125
17.7~100	32	599~1055	80	>12462	150

### 3.2.5 环路阻力计算

#### 3.2.5.1 环路沿程阻力

环路  $n$  的沿程阻力可用下式计算：

$$\Delta P_{mn} = \sum_{i \in Loop_n} R_i l_i \quad (3.9)$$

$Loop_n$  表示环路  $n$ ， $i$  表示环路  $n$  的第  $i$  根管道；

$R_i$ 表示管道  $i$  的比摩阻, Pa;

$l_i$ 表示管道  $i$  的管长, m。

### 3.2.5.2 环路的局部阻力

除了平衡阀外, 其余局部构件及阀门按照下式计算:

$$\Delta P_{jn1} = \sum_{i \in Loop_n} \zeta_i \frac{\rho v_i^2}{2} \quad (3.10)$$

$Loop_n$ 表示环路  $n$ ,  $i$ 表示环路  $n$  的第  $i$  个局部构件或阀门;

$\zeta_i$ 表示管道配件或阀门的局部阻力系数;

$v_i$ 表示管道配件或阀门的计算水流速度, m/s。

平衡阀两端压差的计算公式公式及含义如下:

首先假设平衡阀的流量特性曲线为直线型。

当平衡阀开度  $x$  为 1 时<sup>[75]</sup>:

表 3.3 平衡阀阀体主要技术参数及指标<sup>[77]</sup>

公称通径 DN(mm)		15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200
100%开 度时流量 系数 $C_v$ 值(参 考)	O 形	24	44	84	122	198	320	443	595	1096	1692	2602	4212
	矩形	8.7	13.4	20	32.6	44.3	70	114	134	186	270	462	688
	V 形	7.5	11	17	28	38	60	98	116	155	233	397	595
流量特性		J 矩形: 近似直线; V 形 (对数) 等百分比; O 形: 快开											

由于本论文假设平衡阀的流量特性曲线为直线型, 因此选择截面形状为矩形的流量系数。

按照所选阀门尺寸按照表选择 100%开度时的流量系数  $C_v$ (单位  $\frac{USgal/min}{(\frac{lbf}{in^2})^{0.5}}$ )。

流量系数  $A_v$ , 单位  $m^2$ 。

$$A_v = \frac{24C_v}{10^6} \quad (3.11)$$

$$\Delta P_{balance\_valve} = \rho / \left( \frac{3600A_v}{Q} \right)^2 \quad (3.12)$$

当平衡阀开度不为 1<sup>[78]</sup>时:



$$\Delta P_{balance\_valve} = 1000 \left( \frac{Q}{K} \right)^2 \quad (3.13)$$

$$K = \begin{cases} -1.472x^3 + 19.04x^2 + 9.659x + 4.716, & \text{if } d == 15 \\ -8.8x^3 + 80.024x^2 - 61.169 + 65.729, & \text{else} \end{cases} \quad (3.14)$$

$\Delta P$ 表示平衡阀两侧压差，Pa；

$Q$ 表示流量，单位  $m^3/h$ ；

$K$ 表示流量系数；

$x$ 表示阀门开度，当阀门全开时， $x=4$ ；当阀门全关时， $x=0$ 。在模型中，将阀门的开度归一化表示为  $range(0,1)$ 。

表 3.4 所用附件的局部阻力系数

名称		局部阻力系数 $\zeta$						
斜杆式截止阀 (球阀)	DN	15	20	25	32	40	50	
	$\zeta$	1.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
蝶阀	$\zeta$	0.1						
过滤器	$\zeta$	2.0						
普通 90°弯头	DN	15	20	25	32	40	50	65
	$\zeta$	2.0	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0
变径管：渐缩	渐	0.1 (对应小断面流速)						
扩	扩	0.3 (对应小断面流速)						
三通 (分流)	直流	0.1						
	变向	1.5						

则环路  $n$  的总局部阻力如下式：

$$\Delta P_{jn} = \Delta P_{jn1} + \Delta P_{balance\_valve} \quad (3.15)$$

### 3.2.5.3 末端设备阻力

当水系统末端设备为风机盘管机组时，设备水阻与设备型号有关，具体信息如下表 3.5<sup>[75]</sup>：

表 3.5 机组额定风量的水阻

规格	风量 ( $m^3/h$ )	水阻 (kPa)
FP-34	340	30
FP-51	510	30

FP-68	680	30
FP-85	850	30
FP-102	1020	40
FP-136	1360	40
FP-170	1700	40
FP-204	2040	40
FP-238	2380	50

环路总阻力

$$\Delta P = \Delta P_{mn} + \Delta P_{jn} + \Delta P_{fcun} \quad (3.16)$$

### 3.2.6 水力计算模型流程

图 3.4 是本论文水力计算模型的具体流程。

步骤 1: 需通过判断各节点度来判断节点的类型: 末端、管路起点、弯头、三通或者四通。

步骤 2: 判断环路类型, 若为冷凝水系统, 转至步骤 3, 否则转至步骤 4;

步骤 3: 计算节点及管道负荷, 根据管道负荷选择管道尺寸 (参照 3.2.4 章节), 输出冷凝水系统结果;

步骤 4: 计算节点及管道流量;

步骤 5: 依照设定的比摩阻限值和管道流量计算管道尺寸, 计算管道比摩阻;

步骤 6: 阀门选型, 确定阀门的位置, 种类及尺寸, 具体规则参照 3.2.3 章节;

步骤 7: 计算各环路阻力, 确定最不利环路, 计算其余环路与最不利环路的水力不平衡度, 若各环路水力平衡度达到要求, 结束并输出水系统的供水环路管路设计结果, 若未达到要求, 转至步骤 8;

步骤 8: 依照各环路与最不利环路的水力不平衡度结果, 采取调节管径和调节环路平衡阀两个措施实现水力平衡。

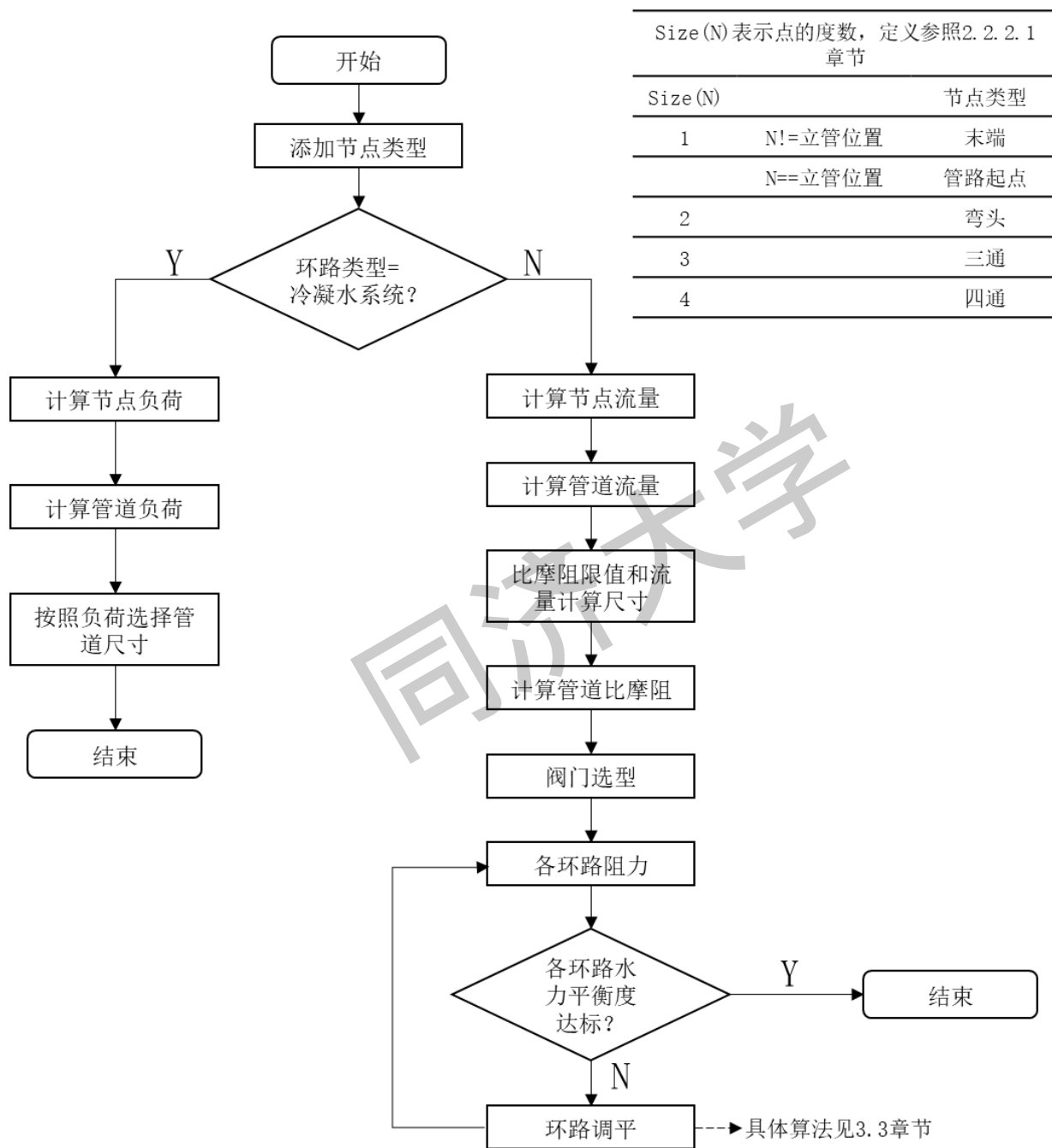


图 3.4 水力计算模型流程图

### 3.3 自动水力平衡模型

管路系统承担着将用户所需的制冷量输送到建筑各处的功能，其运行状况的

好坏会直接影响房间舒适度。因此,在管路设计中,可以通过合理选择管径尺寸,使系统尽可能实现设计工况下的水力平衡。但是,实际情况下,只调节管径尺寸很难完全实现设计工况下的水力平衡,因此需要调节平衡阀的开度来实现水力平衡[84]。本论文首先采用调节管径大小的措施,而后采用调节平衡阀的开度来实现水系统在设计工况下的水力平衡。值得一提的是,本论文所开发的调节平衡阀开度的算法同样适用于调节动态水力平衡。

### 3.3.1 改变管径

在 3.2.5 章节中介绍了如何计算环路的总阻力。当所有环路的总阻力计算完成后,环路阻力最大的环路称为最不利环路,其阻力记为 $\Delta P_{max}$ 。则其余环路与最不利环路的水力不平衡度  $x$  可以按下式计算:

$$x = \frac{\Delta P_{max} - \Delta P_i}{\Delta P_{max}} \times 100\% \quad (3.17)$$

$\Delta P_i$ 表示环路  $i$  的计算总阻力。

为了使调节管径实现水力平衡的同时降低管网系统的总阻力,本论文选择对阻力较大的环路增加管径,对阻力较小的环路缩小管径,管网干管的管径不变。

首先需要获取目标环路,这里的目标环路指的是需要调节管径大小的环路,包括增大管径和缩小管径。

所有环路不平衡度的平均值和方差,分别记为 $x_{mean}$ 和 $\sigma$ 。将所有环路不平衡度中最接近 $x_{mean}$ 的环路记为 $loop_{base}$ 。

将环路不平衡度 $\leq x_{mean} - \sigma$ 的所有环路添加至 $loop_{expand}$ ,结构类型为列表。

将环路不平衡度 $\geq x_{mean} + \sigma$ 的所有环路添加至 $loop_{narrow}$ ,结构类型为列表。

由于在调节管路管径时并非是对目标环路内的所有管路都改变尺寸,比如与基准环路的共享管段,或者环路之间的重复管段,都不是目标管路。因此需要获取目标管路。基本思路是找到这些环路与基准环路的共享管段与非共享管段,将非共享管段去重即可得到目标管路。

以下图 3.5 为例解释该部分算法规则:

假设 $loop_3$ 为基准环路 $loop_{base}$ , $loop_1$ 和 $loop_2$ 为需要缩小管径的环路, $loop_4$ 和 $loop_5$ 为需要扩大管径的环路。

对于 $loop_4$ 和 $loop_5$ , $loop_4$ 与 $loop_{base}$ 的非共享管段为管段 4 和 5; $loop_5$ 与 $loop_{base}$ 的非共享管段为管段 4、10 和 11。将这些共享管段去重后,得到应扩大管径的管段为 4、5、10、11。

对于 $loop_1$ 和 $loop_2$ , $loop_1$ 与 $loop_{base}$ 的非共享管段为管段 6 和 7; $loop_2$ 与 $loop_{base}$ 的共享管段为管段 8。将这些共享管段去重后,得到应扩大管径的管段

为6、7和8。

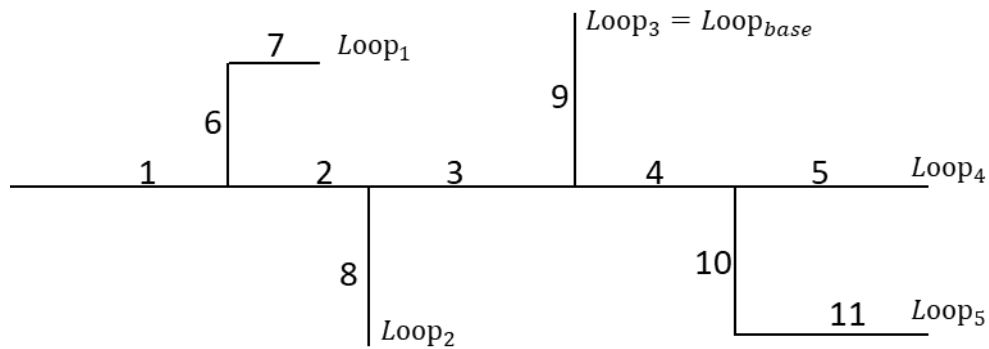


图 3.5 目标管路获取示例

在得到目标管段后，将需要缩小管径的管段的直径降低一个尺寸标准即可；但在扩大管径时，管段扩大后的尺寸有可能会大于前一段管道的尺寸，但这在实际工程中是不可能出现的。因此当扩大后的管径大于该环路与基准环路共享管段的最后一段管道时，则该段管道的尺寸不做修改，否则增加一个尺寸标准。

具体流程图如图 3.6:

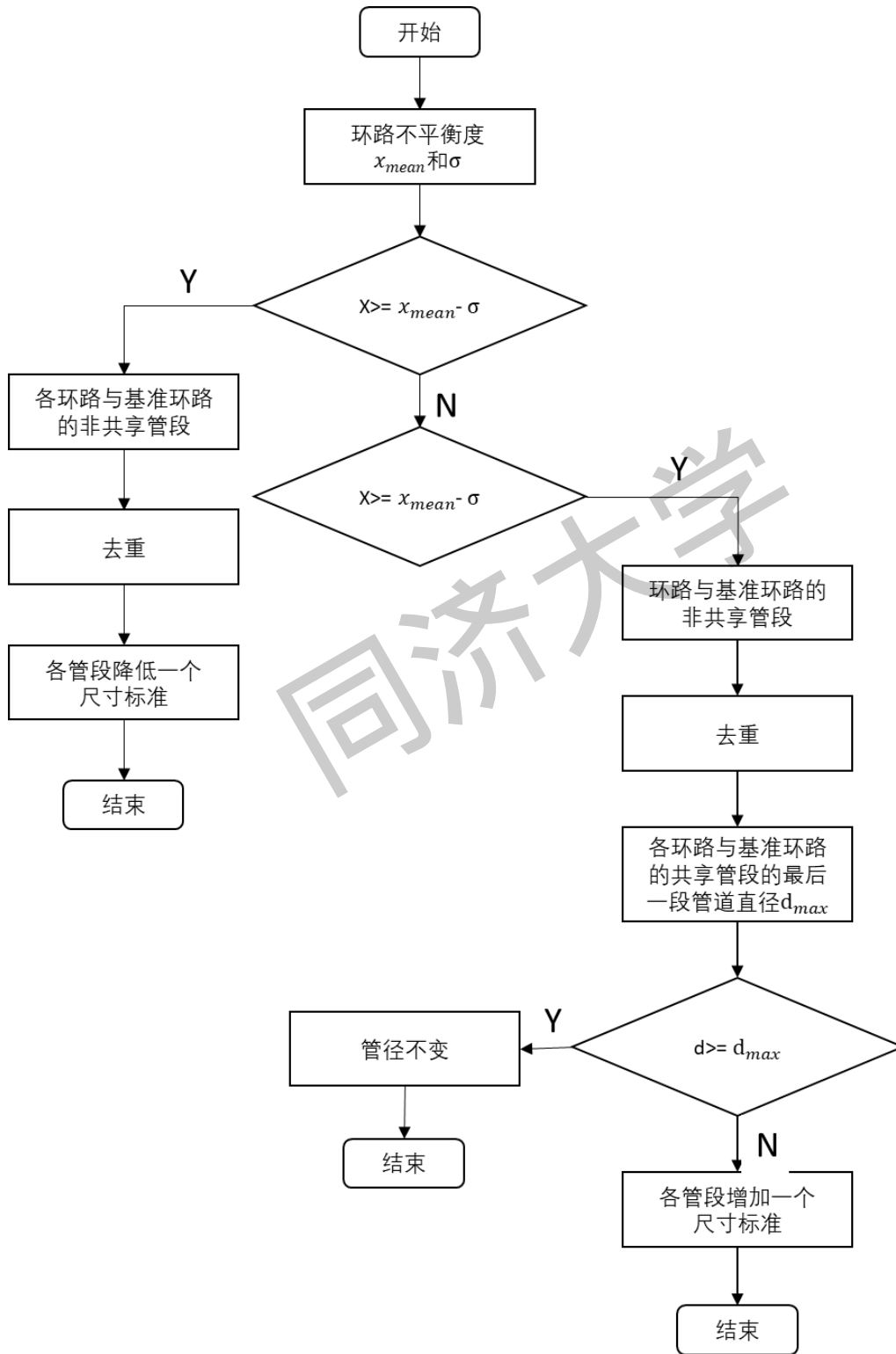


图 3.6 管径调节规则流程图

### 3.3.2 调节平衡阀开度

在 3.3 章节开头提到，只是调节管径也很难实现管网的水力平衡，那么若在

调节管径后依然无法实现水力平衡，则将采取改变平衡阀开度的措施。值得注意的是，在本论文中，所提到的平衡阀均为动态平衡阀。若在调节动态平衡阀后依然无法满足水力平衡性的要求，在不满足水力平衡性要求的末端安装静态平衡阀。本论文改变平衡阀开度所采用的措施为模拟分析阻力法。即先确定最不利环路的阻力作为其余环路的资用压差，通过改变平衡阀开度使各环路总阻力满足水力平衡要求。

假设最不利环路的阻力为 $\Delta P_{max}$ 。

对于环路  $i$ ，原始阻力为 $\Delta P_{i\_ini}$ ，平衡阀原始阻力为 $\Delta P_{ib\_ini}$ 。

由于其余环路与最不利环路阻力差小于 15%即可，则环路  $i$  的平衡阀的资用阻力是一个范围（ $0.85\Delta P_{max} - \Delta P_{i\_ini} + \Delta P_{ib\_ini}$ ， $\Delta P_{max} - \Delta P_{i\_ini} + \Delta P_{ib\_ini}$ ）。

将平衡阀开度（1，0）划分为 40 个离散值，遍历计算，当开度为 $x_b$ 时，所计算的 $\Delta P_{ib}$ 在平衡阀的资用阻力范围内，则环路  $i$  的平衡阀开度 $x_i$ 应为 $x_b$ 。

算法伪代码如下：

---

输入：环路阻力计算结果，管路设计结果 G

输出：管路设计结果 G

---

最不利环路阻力 $\Delta P_{max}$

for  $i$  in Loop:

    环路初始阻力 $\Delta P_{i\_ini}$

    该环路平衡阀原始阻力为 $\Delta P_{ib\_ini}$

    平衡阀的尺寸  $d$

    该环路平衡阀资用压差最小值 $\Delta P_{min} = 0.85\Delta P_{max} - \Delta P_{i\_ini} + \Delta P_{ib\_ini}$

    该环路平衡阀资用压差最大值 $\Delta P_{max} = \Delta P_{max} - \Delta P_{i\_ini} + \Delta P_{ib\_ini}$

    for  $x$  in range(40,0,1):

$x_b = x/10$

$\Delta P_b$

        if  $\Delta P_b$  in range( $\Delta P_{min}, \Delta P_{max}$ ):

$\Delta P_{ib\_ini} = \Delta P_b$

$x_i = x_b$

            break

    将 $x_i$ 和 $\Delta P_{ib\_ini}$ 存储到 G 中，更新 G

---

### 3.4 本章小结

本章详细介绍了管路水系统水力计算模型，主要包括管路尺寸选择、阻力计算及水力调平。

本章所提到的专家知识包括以下两部分：

1. 管路尺寸的选择按照比摩阻限值计算，本论文中，比摩阻限值取  $200\text{Pa/m}$ ，以保证管道的比摩阻在  $100\sim 300\text{Pa}$  之间。

2. 管道系统阀门的选择参考了同济设计院的设计经验。

环路阻力的阻力主要包括沿程阻力、局部阻力及末端设备的阻力。其中沿程阻力的计算因管道管材不同所采用的计算公式不同，计算局部阻力时，平衡阀阻力与其他构件阀门的计算公式有所不同。

水力调平主要通过改变部分环路的管段管径及调节平衡阀的开度来实现。

最终输出系统供水系统环路和冷凝水系统的结果图。



## 第4章 管路设计结果数据格式及优化评价

在对水系统管路布局进行设计和选型后,所得到的结果以 `graph` 的形式储存。此外,由于在管路布局设计算法中适应度函数权重设置的不同会得到不同的设计结果。因此,本章主要对水系统管路布局结果的格式及所存储的信息进行详细说明,并提出了综合部分能耗系数的概念,与初投资、水力稳定度建立一个水系统管路设计结果的评价体系,用于评价结果的设计质量,优化水系统设计的合理性。

### 4.1 管路设计结果数据格式

#### 4.1.1 管路设计结果数据结构

每个分区水系统管路结果表述为下式,每个图以 `python.networkx.graph()` 格式存储。

```
result = [supply graph, return graph, condensed graph]
```

`Network`<sup>[79]</sup>使用“dictionary of dictionaries of dictionaries”作为基础图数据结构,方便用于大规模稀疏网络的查找。以下图 4.1 所展示的网络图为例说明水系统管路设计结果的数据结构及信息读取方式:

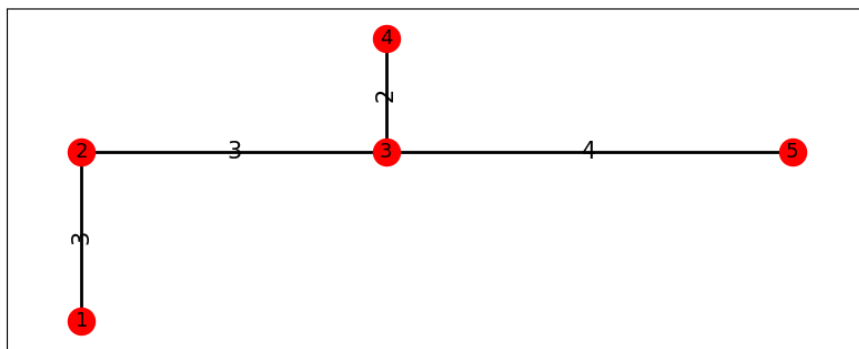


图 4.1 `graph` 数据结构的表达

在图中,各个节点的属性信息如下:

```
G.add_node(1,pos=(1,0),type="plant")
```

```
G.add_node(5,pos=(8,3),type="terminal")
```

```
G.add_node(2,pos=(1,3),type="turn")
```

```
G.add_node(3,pos=(4,3),type="three_way")
```

```
G.add_node(4,pos=(4,5),type="terminal")
```

各个边的属性信息如下：

```
G.add_edge(3, 4, weight=2)
```

```
G.add_edges_from([(1, 2), (2, 3)], weight=3)
```

```
G.add_edge(3, 5, weight=4)
```

若要读取 G 上的节点或边的属性信息，可参照以下方法：

```
>>>G.nodes # 获取所有节点列表
```

```
[1, 5, 2, 3, 4]
```

```
>>>G.nodes[1] # 获取节点 1 的属性信息
```

```
{'pos': (1, 0), 'type': 'plant'}
```

```
>>>nx.get_node_attributes(G,'pos') # 获取所有节点的位置信息
```

```
{1: (1, 0), 5: (8, 3), 2: (1, 3), 3: (4, 3), 4: (4, 5)}
```

```
>>>G.edges # 获取所有的边列表
```

```
[(1, 2), (5, 3), (2, 3), (3, 4)]
```

```
>>>G.edges[1,2] G.get_edge_data(1,2)或 # 获取边 (1, 2) 的属性信息
```

```
{'weight': 3}
```

```
>>>nx.get_edge_attributes(G,'weight') # 获取所有边的权重信息
```

```
{(1, 2): 3, (5, 3): 4, (2, 3): 3, (3, 4): 2}
```

```
>>>G.adj # Graph 的所有信息
```

```
{1: {2: {'weight': 3}}, 5: {3: {'weight': 4}}, 2: {1: {'weight': 3}, 3: {'weight': 3}},
```

```
3: {4: {'weight': 2}, 2: {'weight': 3}, 5: {'weight': 4}}, 4: {3: {'weight': 2}}}
```

## 4.1.2 各系统属性信息

### 4.1.2.1 供水系统属性信息

表 4.1 供水系统属性信息表

节点属性信息			边属性信息
节点共有属性		节点特有属性	
pos			weight
type	raiser	raiser (T or F)	WaterFlow
	turn/triplet/straight/four_way	WaterFlow	size

	terminal	WaterFlow, info=[房间名称, 设备型号, 末端中心位置, 接口相对标高]	elevation
	butterfly_valve/Yfilter/cutoff_valve	size (类型及尺寸), direction	velocity
port_lis			Pm
elevation (绝对)			

## 4.1.2.2 回水系统属性信息

表 4.2 回水系统属性信息表

节点属性信息			边属性信息
节点共有属性		节点特有属性	
pos			weight
type	raiser	raiser (T or F)	WaterFlow
	turn/triplet/straight/four_way	WaterFlow	size
	terminal	WaterFlow, info=[房间名称, 设备型号, 末端中心位置, 接口相对标高]	elevation
	butterfly_valve /cutoff_valve	size (类型及尺寸), direction	velocity
	balance_valve	开度	
port_lis			Pm
elevation			

注：供回水系统的属性不同之处在于阀门的种类

## 4.1.2.3 冷凝水系统属性信息

表 4.3 冷凝水系统属性信息表

节点属性信息			边属性信息
节点共有属性		节点特有属性	
pos			weight
type	raiser	raiser (T or F)	CoolingCapacity
	turn/triplet/straight/four_way	无	size

	terminal	info=[房间名称, 设备型号, 末端中心位置, 接口相对标高]	elevation
port_lis			
CoolingCapacity			
elevation			

## 4.2 管路设计结果评价指标

在第 2 章水系统管路布局设计优化时,按照最短路径和弯头个数对路径进行优化,通过改变权重值,可以得到多个不同的水系统布局结果。选择哪种结果需要根据以下几点设计原则:

- a. 初投资尽可能低;
- b. 水系统各环路与最不利环路的阻力差低于 15%, 以保证房间舒适度;
- c. 运行能耗尽可能低。

根据上述三点原则,本论文提出了一种水系统布局结果评价体系,该体系不仅可以用于本研究,也可以帮助设计人员在实际工程中选择水系统设计结果。

### 4.2.1 初投资

水系统初投资。本论文只关注空调水系统,因为只计算水系统包含的各项初投资,包括末端设备、管材、阀门和局部构件的初投资成本。

### 4.2.2 综合部分能耗

由于本论文所研究的水系统处于设计阶段,无法获得实际运行的能耗数据。因此本论文参照综合部分负荷性能系数的概念,等价计算实际运行时的能耗。

采暖空调系统逐时冷负荷是一个时变量,空调逐时计算冷负荷峰值是空气处理机组或风机盘管表冷器的选型的依据,但实际上,系统在峰值负荷下的运行时间仅占总实际运行时间的 10%左右<sup>[80]</sup>,绝大部分时间空调系实在 40%~80%负荷范围内运行的<sup>[75]</sup>。而 EER、COP 是单一评价冷水机组满负荷性能的指标,不能全面反映机组运行效率<sup>[81]</sup>,因而美国制冷学会(AHRI)以及美国暖通空调工程师学会(ASHRAE)提出了综合部分负荷系数(IPLV)的概念,用来衡量制冷、热泵机组部分负荷工作条件下的运行效果<sup>[82]</sup>。

国标《公共建筑节能设计标准》<sup>[82]</sup>给出综合部分负荷系数的计算公式：  
综合部分负荷性能系数（IPLV）的计算公式为，

$$\text{IPLV} = 0.012A + 0.328B + 0.397C + 0.263D$$

A: 100% 负荷时的性能系数(W/W)，冷却水进水温度 30℃，冷凝器进气干球温度 35℃；

B: 75% 负荷时的性能系数(W/W)，冷却水进水温度 26℃，冷凝器进气干球温度 31.5℃；

C: 50% 负荷时的性能系数(W/W)，冷却水进水温度 23℃，冷凝器进气干球温度 28℃；

D: 25% 负荷时的性能系数(W/W)，冷却水进水温度 19℃，冷凝器进气干球温度 24.5℃。

公式中权重的取值是这四个部分负荷运行工况下的累计负荷百分比<sup>[81]</sup>。中国建筑科学研究院的王碧玲等人对个气候典型代表城市的公共建筑负荷进行分析，得出不同累计负荷率下的占比。详细结果如下表：

表 4.4 不同累计负荷率下的权重占比及平均负荷率

	权重/%	平均负荷率/%
100%负荷	1.2	98.4
75%负荷	32.8	74.7
50%负荷	39.7	49.7
25%负荷	26.3	21.8

因此本论文提出综合部分能耗，用来等价实际运行过程中的运行能耗指标。综合部分能耗的公式如下：

$$\text{IPEV} = 0.012E_{100\%} + 0.328E_{75\%} + 0.397E_{50\%} + 0.263E_{25\%} \cdots \cdots \quad (4.1)$$

$E_{\text{Percent}}$  表示负荷在不同负荷率下的水系统最不利环路的阻力。

在计算不同负荷率下水系统最不利环路的阻力时，根据式<sup>[75]</sup>可以看出，管道流量与计算管段的负荷成正比。

$$Q = \frac{L}{1.163\Delta t} \cdots \cdots \quad (4.2)$$

$Q$ 表示计算管段的水流量，L/s

$L$ 表示计算管段的冷负荷，W；

$\Delta t$ 表示供回水温差，℃。

当环路内所有串联管段的几何尺寸、摩擦阻力系数、局部阻力系数、流体密度不变时，环路阻抗  $S$  不变。最不利环路所有串联管段阻力（包括设备阻力）之和等于管网的总阻力<sup>[83]</sup>。环路阻力可以表示为

$$\Delta P = SQ^2 \dots\dots (4.3)$$

当计算不同负荷率下的环路阻力时，由于负荷等比例变化导致各管段的流量等比例发生变化。由于最不利环路管段的几何尺寸、摩擦阻力系数、局部阻力系数、流体密度不发生变化，那么环路沿程阻力的阻抗不发生变化，而局部阻力除了平衡阀以外的阻抗也不发生变化。因此为了简便计算，我们将环路的总阻力拆分成三部分：

$$\Delta P = \Delta P_{part} + \Delta P_{valve} + \Delta P_{fcu} \dots\dots (4.4)$$

$$\Delta P_{part} = S_{part}Q^2 \dots\dots (4.5)$$

$S_{part}$  表示除平衡阀以外的管路阻抗；

$\Delta P_{valve}$  表述平衡阀两端压差；

$\Delta P_{fcu}$  表示环路末端设备风机盘管机组的阻力。

那么在不同负荷率下，管网的负荷、流量及  $\Delta P_{part}$  有如下关系：

$$\frac{L_{100\%}}{Q_{100\%}} = \frac{L_{75\%}}{Q_{75\%}} = \frac{L_{50\%}}{Q_{50\%}} = \frac{L_{25\%}}{Q_{25\%}} \dots\dots (4.6)$$

$$\frac{\Delta P_{part100\%}}{Q_{100\%}^2} = \frac{\Delta P_{part75\%}}{Q_{75\%}^2} = \frac{\Delta P_{part50\%}}{Q_{50\%}^2} = \frac{\Delta P_{part25\%}}{Q_{25\%}^2} \dots\dots (4.7)$$

在 3.2.5 章节介绍的环路水力计算模型中，可得到水系统管路最不利环路的总阻力，即  $E_{100\%} = \Delta P_{100\%}$ 。

平衡阀两端压差及环路末端设备风机盘管机组的阻力  $\Delta P_{fcu}$  依旧按照 3.2.5 章节建立的到计算模型进行计算。

依照公式中负荷、流量、管网总阻力的关系式，可以得出在不同负荷率下管网的总阻力，即：

$$E_{75\%} = \Delta P_{75\%} = 0.75^2 \Delta P_{100\%} + \Delta P_{valve75\%} + \Delta P_{fcu} \dots\dots (4.8)$$

$$E_{50\%} = \Delta P_{50\%} = 0.50^2 \Delta P_{100\%} + \Delta P_{valve50\%} + \Delta P_{fcu} \dots\dots (4.9)$$

$$E_{25\%} = \Delta P_{25\%} = 0.25^2 \Delta P_{100\%} + \Delta P_{valve25\%} + \Delta P_{fcu} \dots\dots (4.10)$$

则水系统管网的综合部分能耗值可以用下式计算：

$$IPEV = 0.012E_{100\%} + 0.328E_{75\%} + 0.397E_{50\%} + 0.263E_{25\%} \dots\dots (4.11)$$

### 4.2.3 环路的静态水力平衡度检查

若所有环路都满足静态水力平衡度要求，则水力平衡度检查结果为 1，否则平衡度检查结果为 0。

由于本论文不涉及机房侧的设计计算，因此不考虑运行工况下的水力平衡。

## 4.3 本章小结

本章首先介绍了水系统设计结果的数据结构，信息属性和读取方式。设计结果以 graph 表示，是点和线的集合。其中节点代表末端设备、局部构件、阀门等；边表示管段，节点和边的属性信息以字典形式存储在 graph 中。

接着介绍了本论文所采用的设计结果评价指标，包括初投资、综合部分能耗以及各环路水力平衡度检查。其中，初投资和综合部分能耗与成本有关、水力平衡度检查与系统的运行状态有关。通过这些量化指标，辅助设计师选择合适的设计结果，或者根据这些量化指标修改设计结果，以提高设计质量。

同济大学

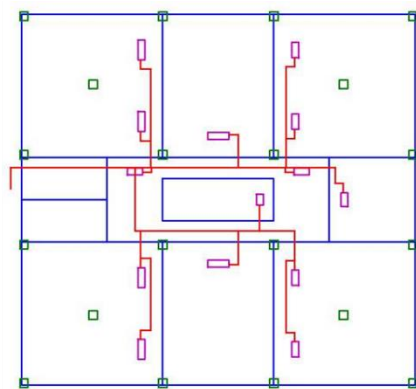


## 第 5 章 空调水系统寻优案例

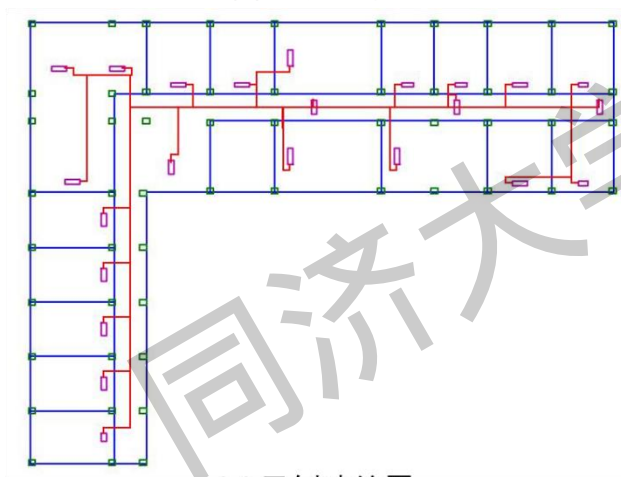
### 5.1 水系统布局设计寻优案例

本章节以四个建筑为例测试本文第 2 章节提出的基于网络图的水系统管路布局算法。

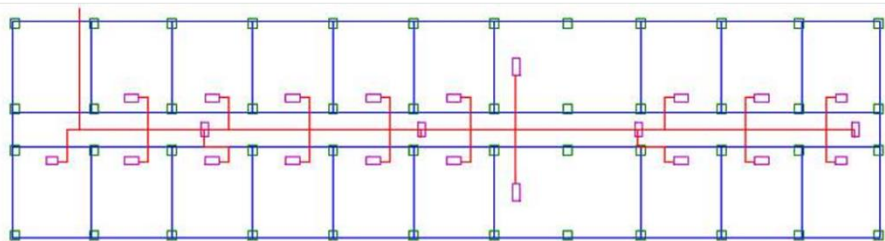
四栋建筑均为办公建筑。下图 5.1 为水系统管路布局供水系统的平面示意图。图中，蓝色边线为房间边界，紫色块图为设备，绿色块图为柱子，红色边线为管道（下同）。从下图中各建筑的水系统管路走向来看，本文所提出的算法可以实现水系统管路设计的目的。需要说明的是，在水系统管路布局设计的结果中会出现走廊管道与走廊区域设备碰撞的问题（如图 5.1 中示例建筑 II、III、IV），但由于设备位置及走廊干管的位置是本算法的输入，该问题不属于本文的研究范畴，在此不作讨论。



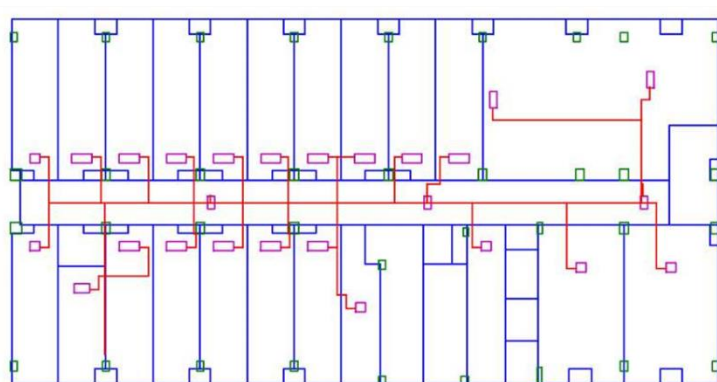
(a) 示例建筑 I



(b) 示例建筑 II



(c) 示例建筑 III



(d) 示例建筑 IV

图 5.1 水系统布局设计寻优案例 ( $a=0.45$ ,  $b=0.9$ )

## 5.2 空调水系统设计寻优案例

本章节以办公建筑 A 为例测试本论文所提出的管路布局算法和水力计算模型，通过 4.2 章节介绍的初投资和综合部分能耗来评价设计结果的质量；以办公建筑 B 为例测试自动调平模型，将调平后的模型与原始设计模型的水力平衡度进行对比，分析自动调平模型的性能。

### 5.2.1 示例建筑 A

将本文提出的管路布局算法应用于某办公建筑中，记为建筑 A。建筑内房间大多为办公室和会议室，少部分房间功能为走廊和设备用房。

建筑 A 外形如图 5.2:

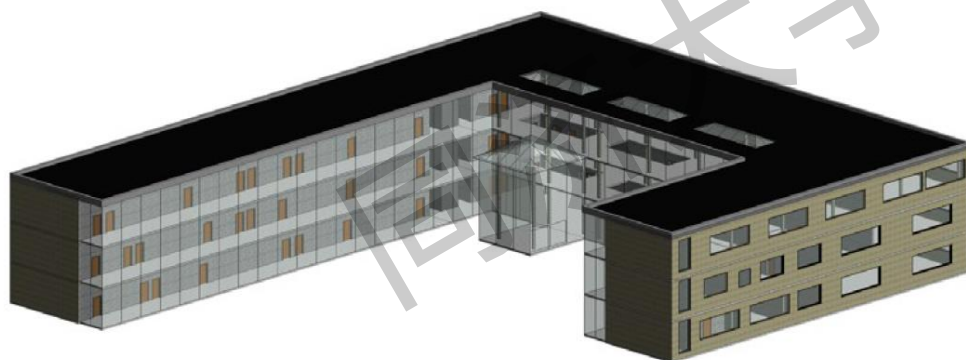


图 5.2 示例建筑 A 外形

一层建筑及设备布局如图 5.3:

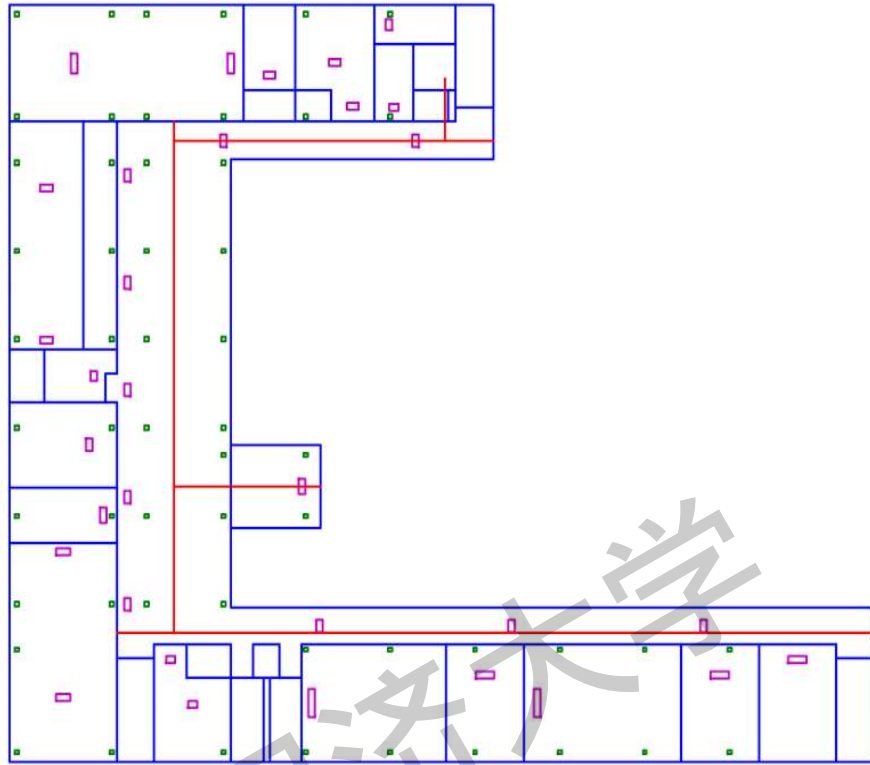


图 5.3 示例建筑 A 一层房间及设备布局

由于该示例建筑各房间内的设备数量较少（走廊区域的设备与走廊主管单个连接），本文所提出的方法所产生的可能布局结果很少，因此即使设置了不同的权重值，该示例建筑所得到的水系统管路布局设计结果相同。以该示例建筑 11\_OFFICE 房间为例，按 2.2.3 章节介绍的布局空间建模方法所建立的潜在路径图及寻优结果如下图 5.4（蓝色块图表示设备，蓝点表示潜在路径图的节点，黄点表示末端点位置，红线表示潜在路径）。无论权重值设为多少，示例建筑 A 11\_OFFICE 房间潜在路径图寻优后的路径都如图 5.4（c）所示。因此当寻优房间内设备量较少时，权重值的设定对管路寻优结果影响极小。

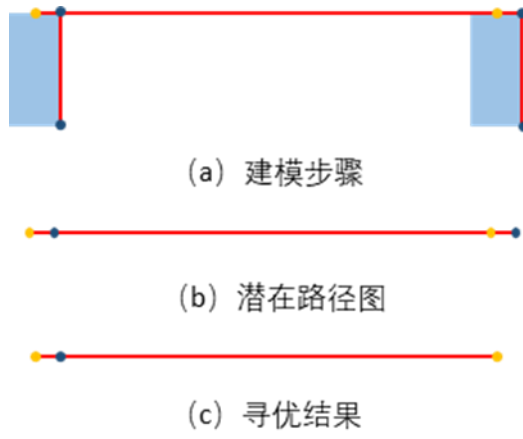
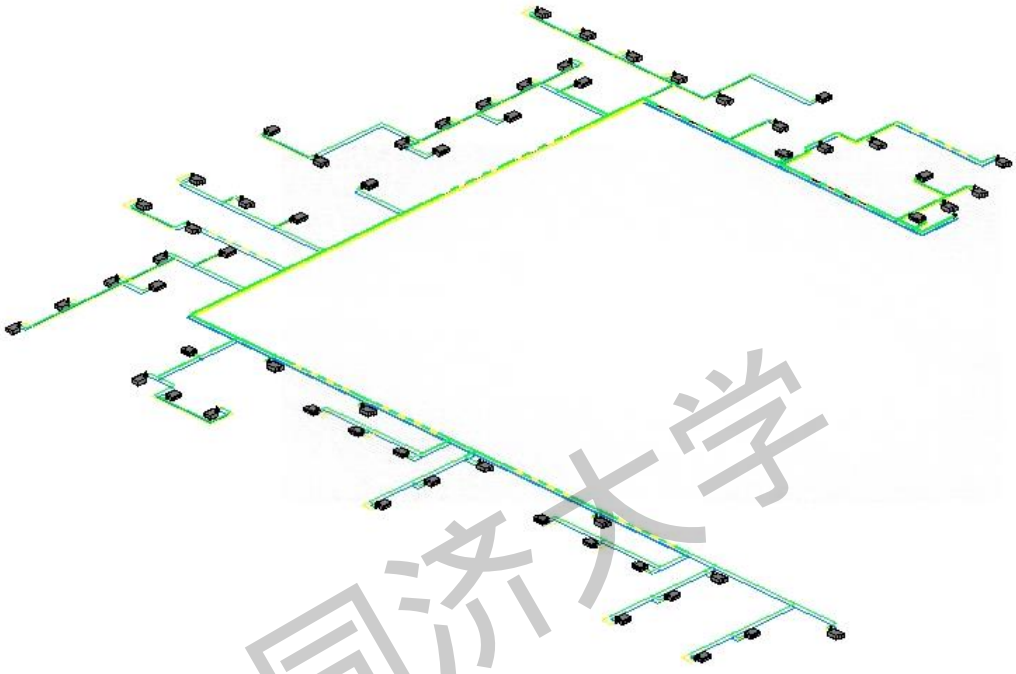
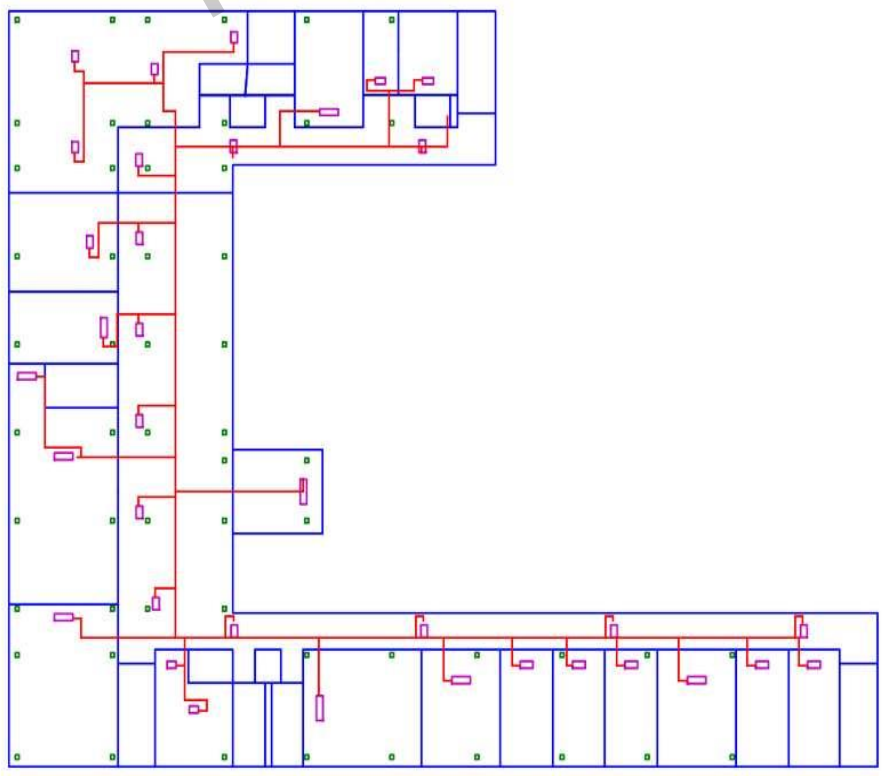


图 5.4 示例建筑 A 11\_OFFICE 房间寻优过程

下表为不同权重下布局设计及水力计算结果：

同济大学

表 5.1 不同权重下水系统管路布局结果及水力计算结果

权重值	$a = 0.45, b = 0.9$	$a = 0.9, b = 0.9$	$a = 0.9, b = 0.9$
布局设计结果 (3D)			
一层水系统布局设计结果			
初始水	$\mu = 0.535, \sigma^2 = 0.070, \sigma = 0.270$		

力计算 结果	
调节管 径后水 力计算 结果	$\mu = 0.350, \sigma^2 = 0.041, \sigma = 0.207$
调节阀 门后水 力计算 结果	$\mu = 0.159, \sigma^2 = 0.019, \sigma = 0.139$
初投资	69354.84
综合部 分能耗	291947.29

### 5.2.2 示例建筑 B

将本文所提出的方法应用于一个幼儿园项目中，记为示例建筑 B。

示例建筑 B 外形图如图 5.3 所示。



图 5.3 示例建筑 B 外形图

一层房间及设备布局如图 5.4 所示。

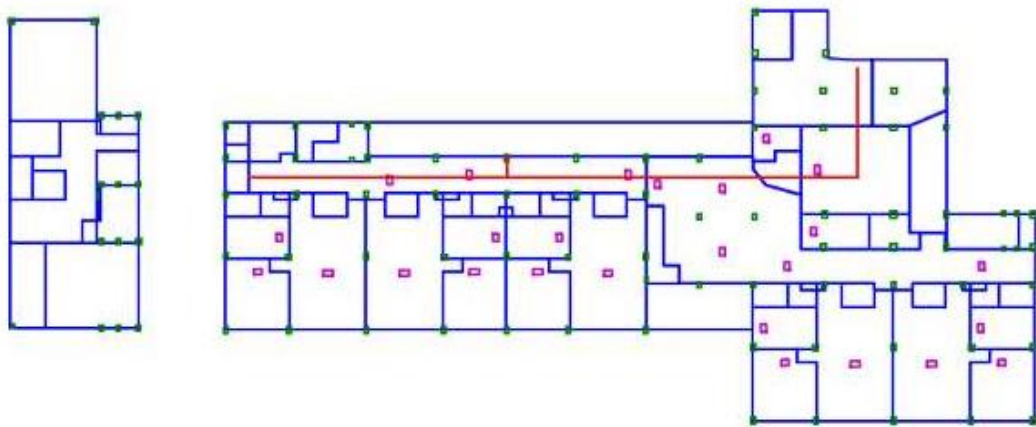


图 5.4 示例建筑 B 一层房间及设备布局

不同权重下水系统布局设计结果及水力计算结果如下表。从表所列举的房间内设备信息可以看到，1\_F\_23\_ACTIVITY 内有 5 个设备，1\_F\_1\_BEDROOM 有 3 个设备，其余房间内设备均为 2。因此从管路走向来看，不同权重下水系统管路的布局设计结果相差较小（原因在 5.1 章节中），不同权重之间结果的差别在于 1\_F\_23\_ACTIVITY 房间内设备之间管道的连接结果不同。

但从每个权重值下的水力计算来看，通过调节管径和调节阀门都能够有效降低各环路不平衡度的均值和方差，即降低了管路系统各环路之间的不稳定性。

从水力计算结果、初投资及综合部分能耗数据来看，不同权重的设计结果相差明显。通过对比这三个指标，应选择权重值为  $a = 1, b = 0$  的设计结果。

表 5.2 示例建筑 B 不同权重下水系统布局及水力计算结果

权重值	$a = 0.45, b = 0.9$	$a = 0.9, b = 0.9$	$a = 0.9, b = 0.45$	$a = 1, b = 0$
布局设计结果 (3D)	图 5.5			
一层水系统布局设计结果	图 5.6			
初始水力计算结果	$\mu = 0.498, \sigma^2 = 0.063, \sigma = 0.257$	$\mu = 0.560, \sigma^2 = 0.065, \sigma = 0.260$	$\mu = 0.547, \sigma^2 = 0.058, \sigma = 0.245$	$\mu = 0.485, \sigma^2 = 0.066, \sigma = 0.262$
调节管径后水力计算结果	$\mu = 0.3833, \sigma^2 = 0.027, \sigma = 0.169$	$\mu = 0.440, \sigma^2 = 0.029, \sigma = 0.175$	$\mu = 0.303, \sigma^2 = 0.036, \sigma = 0.194$	$\mu = 0.271, \sigma^2 = 0.023, \sigma = 0.154$
调节阀门后水力计算结果	$\mu = 0.297, \sigma^2 = 0.036, \sigma = 0.196$	$\mu = 0.358, \sigma^2 = 0.034, \sigma = 0.188$	$\mu = 0.260, \sigma^2 = 0.037, \sigma = 0.187$	$\mu = 0.216, \sigma^2 = 0.024, \sigma = 0.160$



初投资	57150	57150	57150	59398.88
综合部分能耗	275697.41	363711.96	321879.27	275697.41

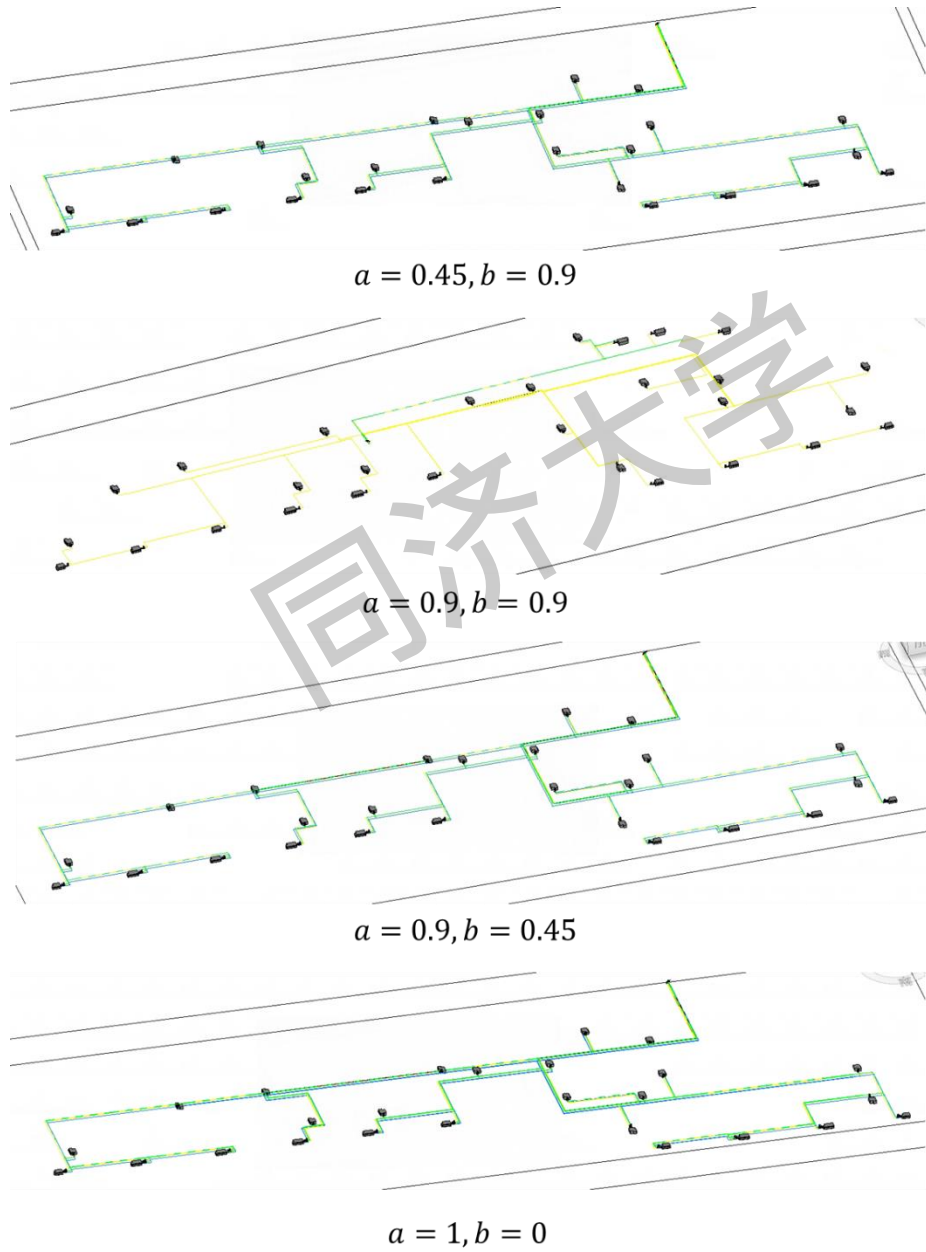


图 5.5 不同权重下布局设计结果 (3D)

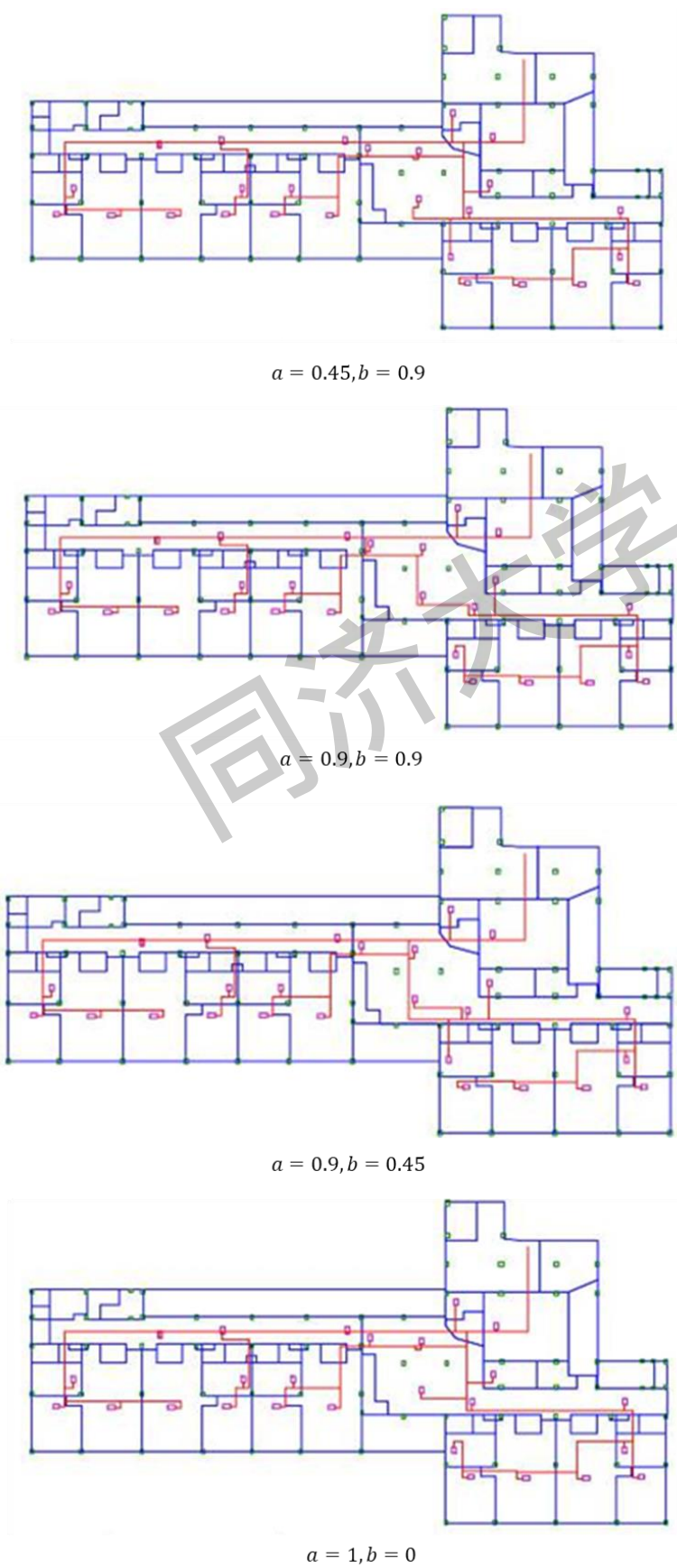


图 5.6 一层水系统布局设计结果

### 5.3 小结

由两个示例建筑的测试结果来看，当房价内设备数量较少时，设置权重对管路设计结果的影响很小。因此，在使用本文所提出的设计方法时，若建筑体量较小或房间内设备数量较少，则可以较为随机地设置权重值；而当房间内设备数量较多时，则需多次设置不同的权重值对比量化指标来选择设计结果。

同济大学

同济大学

## 第6章 结论与展望

### 6.1 结论与成果

基于目前空调水系统设计存在的诸多问题：水系统画图改图耗时耗力，设计大多依靠经验且未经核算等等，本论文提出了一种水系统管路自动布局设计算法、基于专家知识的水力计算模型和水力平衡模型；为了评价该算法的设计合理性，本文提出了一个管路设计结果的评价体系，用于指导和优化水系统设计。通过深入研究，本文获得了以下结论和成果：

提出了基于网络图的水系统布局设计算法。本文首先将水系统管路布局设计所需要遵循的物理规则和经济规则进行总结，并将这些规则转化为数学描述，从而将水系统管路布局问题描述为多末端障碍规避的正交分支管路设计问题；接着将水系统布局空间采用逃逸图的方法来进行建模，采用并行搜索的蚁群算法进行设备之间管路的布局设计，优化目标为路径最短和弯头最少，通过设置权重得到不同的布局设计结果；最后将房间内生成的子连接图与走廊干管进行连接，得到最终的水系统布局设计结果。

提出了基于专家知识的水力计算及调平模型。水力计算模型包括管路尺寸选择、阻力计算及水力调平。其中管路尺寸的选择按照比摩阻限值进行初选后核算，阻力计算是计算各环路下沿程阻力、局部阻力及设备阻力之和，然后进行不平衡度的计算；水力调平是通过改变管径及调节阀门来实现管路系统的水力平衡。

针对本文的水系统布局设计结果提出了三个指标来量化设计结果的合理性，分别是初投资、综合部分能耗及环路的静态水力平衡度。初投资与综合部分能耗与成本有关，综合部分能耗是迁移综合部分负荷的概念，用来表示不同运行负荷下的水系统运行阻力，环路的静态水力平衡度表征了水系统布局的静态特性，与动态的水力平衡相关。

最后，采用了两个示例建筑对本文所提出的水系统布局设计算法及水力计算模型进行测试，采用所提出的三个量化指标对不同权重下得到的设计结果进行量化，用来指导水系统设计结果的选择及优化。

## 6.2 创新点

本论文的关键技术在于提出一种求解正交分支管路设计的模型以及建立合理的水系统设计方案评价体系。相较于先前的研究工作，本论文的创新点在于以下：

- 1) 实现障碍规避的空调水系统末端侧管路自动设计；在布局寻优时采用并行搜索提高了寻优搜索速度。
- 2) 针对水系统较难实现水力平衡性，采用改变管径和改变调节阀开度的策略来调节水力平衡。
- 3) 提出空调水系统末端侧管路设计的综合评价方法。参照综合部分负荷的概念，提出了采用综合部分负荷来近似评价运行期间的水系统能耗。

## 6.3 局限性及展望

基于第 5 章的测试结果来看，本文所提出的水系统自动布局设计算法及水力计算模型是基本可以满足工程要求的。但依旧存在以下两个方面的问题：

本论文所提出的水系统布局设计算法中，干管的提取是提取走廊中心线近似作为干管的位置（基于课题组先前的研究成果），但在测试过程中发现走廊区域设备的布置位置也大多位于走廊区域的中心位置，这样会使得走廊区域的设备与干管发生碰撞。但由于本论文中将干管的位置及设备的位置信息作为输入，不在本论文的研究范围内，因此在本论文课题中将走廊区域设备与干管发生碰撞的问题忽略。但在之后的研究工作中，会将这个问题考虑在内。

在实际的研究工作中，采用了 8 栋建筑对本文的算法进行测试。但这个测试量还远远不够，在今后的研究工作中，会继续对此算法进行测试及改进。

## 参考文献

- [1] EA. Energy Technology Perspectives 2020[R], 2020.
- [2] 施庆伟. 中国建筑部门碳排放达峰模拟与减排责任分担研究[D]. 重庆大学,2021.DOI:10.27670/d.cnki.gcqdu.2021.000533.
- [3] Okafor V C, Ezeanya N C, Nwandikom G I, et al. Energy saving potential, environmental and economic importance of evaporative cooling system: A review [J]. 2021.
- [4] 李艳丽. 建筑能耗监测管理系统设计与分析[D]. 东南大学,2020.DOI:10.27014/d.cnki.gdnau.2020.002663.
- [5] Guan, Hang, Xiao, Tong, Luo, Wei, et al. Automatic fault diagnosis algorithm for hot water pipes based on infrared thermal images[J]. Building and Environment. 2022(218). DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109111.
- [6] 盛超. 水力管网动态评价指标及量化研究[D].南京工业大学,2014.
- [7] Sandurkar S., Chen W. GAPRUS—genetic algorithms based pipe routing using tessellated objects[J]. Computers in Industry, 1999: 38(3), 209–223. doi:10.1016/s0166-3615(98)00130-4
- [8] Furuholmen, M., Glette, K., Hovin, M., & Torresen, J. (2010). Evolutionary Approaches to the Three-dimensional Multi-pipe Routing Problem: A Comparative Study Using Direct Encodings. Lecture Notes in Computer Science, 71–82. doi:10.1007/978-3-642-12139-5\_7
- [9] 高敏. 基于粒子群蚁群算法的路径规划研究[D].南昌航空大学,2013.
- [10] Ren, T., Zhu, Z.-L., Dimirovski, etc. A new pipe routing method for aero-engines based on genetic algorithm. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 228(3), 424–434. doi:10.1177/0954410012474134
- [11] Changtao Wang, Xiaotong Sun, Tiancheng Yuan, etc. A Method Based Genetic Algorithm for Pipe Routing Design. 5th International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology (AEMT 2015): 826-830.
- [12] 隋海腾,牛文铁.基于迷宫算法和遗传算法的船舶管路路径规划[J].工程设计学报,2016,23(02):188-194.
- [13] Marvin Stanczak, Cédric Pralet, Vincent Vidal, Vincent Baudouin. Optimal Pipe Routing Techniques in an Obstacle-Free 3D Space. ICORES 2020, Feb 2020, La Valette, Malta. fhal-02865302f
- [14] Stanczak M., Pralet C., Vidal V., Baudouin V. (2021) A Pipe Routing Hybrid Approach Based on A-Star Search and Linear Programming[C]. In: Stuckey P.J. (eds) Integration of Constraint Programming, Artificial Intelligence, and Operations Research. CPAIOR 2021. Lecture Notes in Computer Science, vol 12735. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78230-6\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78230-6_12)
- [15] Soltani, A. R., Tawfik, H., Goulernas, J. Y., & Fernando, T. (2002). Path planning in construction sites: performance evaluation of the Dijkstra, A\*, and GA search

- algorithms[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2002: 16(4), 291–303. doi:10.1016/s1474-0346(03)00018-1
- [16] Ajiwaskita, F., Gunawan, & Yanuar. (2020). Pipe-routing optimization using system engineering methodology in ship engine room. *RECENT PROGRESS ON: MECHANICAL, INFRASTRUCTURE AND INDUSTRIAL ENGINEERING: Proceedings of International Symposium on Advances in Mechanical Engineering (ISAME): Quality in Research 2019*. doi:10.1063/5.0001001
- [17] Park, J.-H., & Storch, R. L.. Pipe-routing algorithm development: case study of a ship engine room design[J]. *Expert Systems with Applications*, 2002: 23(3), 299–309. doi:10.1016/s0957-4174(02)00049-0
- [18] Liu, Q., & Wang, C. (2008). A Modified Particle Swarm Optimizer for Pipe Route Design. 2008 11th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering - Workshops. doi:10.1109/csew.2008.29
- [19] Liu, Q., & Wang, C. (2011). A discrete particle swarm optimization algorithm for rectilinear branch pipe routing. *Assembly Automation*, 31(4), 363–368. doi:10.1108/01445151111172952
- [20] Liu, Q., & Wang, C. (2012). Multi-terminal pipe routing by Steiner minimal tree and particle swarm optimisation. *Enterprise Information Systems*, 6(3), 315–327. doi:10.1080/17517575.2011.594910
- [21] Liu, Q. (2015). A rectilinear pipe routing algorithm: Manhattan visibility graph. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1–10. doi:10.1080/0951192x.2015.1033019
- [22] 柳强, 毛莉. 基于 MOPSO 的航空发动机分支管路多目标布局优化. *机械工程学报*, 2018,54(19):197-203.
- [23] 焦国帅, 柳强. 基于 NSGA- II 的三维空间直角管路布局优化. *控制工程*, 2018,25(11):2058-2063.
- [24] 董宗然, 林焰. 基于最短路径快速算法的船舶管路自动敷设方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2014,20(12):2962-2972.
- [25] Dong, Z., & Bian, X. (2020). Ship Pipe Route Design Using Improved A\* Algorithm and Genetic Algorithm. *IEEE Access*, 8, 153273–153296. doi:10.1109/access.2020.3018145
- [26] Jiang, W.-Y., Lin, Y., Chen, M., & Yu, Y.-Y. (2015). A co-evolutionary improved multi-ant colony optimization for ship multiple and branch pipe route design. *Ocean Engineering*, 102, 63–70. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.04.028
- [27] Teo, T.-A., & Cho, K.-H. (2016). BIM-oriented indoor network model for indoor and outdoor combined route planning. *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), 268–282. doi:10.1016/j.aei.2016.04.007
- [28] Qu, Y.-F., Jiang, D., & Zhang, X.-L. (2016). A New Pipe Routing Approach for Aero-Engines by Octree Modeling and Modified Max-Min Ant System Optimization Algorithm. *Journal of Mechanics*, 34(01), 11–19. doi:10.1017/jmech.2016.86
- [29] Qu, Y., Jiang, D., & Yang, Q. (2016). Branch pipe routing based on 3D connection graph and concurrent ant colony optimization algorithm. *Journal of Intelligent Manufacturing*. doi:10.1007/s10845-016-1203-4



- [30] 马江涛,刘检华,徐联杰,吴宏超,徐金宝.基于 LTL-PRM 算法的分支管路自动布局方法[J].机械工程学报,2018,54(15):160-170.
- [31] Belov, G., Czauderna, T., Dzaferovic, A., Garcia de la Banda, M., Wybrow, M., Wallace, M. (2017). An Optimization Model for 3D Pipe Routing with Flexibility Constraints. In: Beck, J. (eds) Principles and Practice of Constraint Programming. CP 2017. Lecture Notes in Computer Science(), vol 10416. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-66158-2\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66158-2_21).
- [32] Jorens S, Sörensen K, Verhaert I, De Corte A. Air distribution system design optimization in non-residential buildings: problem formulation and generation of test networks. *J Build Eng* 2017;12:60–7
- [33] Bres A, Judex F, Suter G, Wilde PDe. A Method for automated generation of HVAC distribution subsystems for building performance simulation. In: Proceedings of the 15th IBPSA conference; 2017.
- [34] Brahme R. Complex building performance analysis in early stages of design: A solution based on differential modeling, homology-based mapping, and generative design agents. In: Proceedings of the 17th IBPSA conference; 2001.
- [35] Medjdoub, B., Richens, P., & Barnard, N. (2003). Generation of variational standard plant room solutions[J]. *Automation in Construction*, 2002: 12(2), 155–166. doi:10.1016/s0926-5805(02)00006-7
- [36] Medjdoub B. Constraint-based adaptation for complex space configuration in building services, Special Issue Building Information Modeling Applications[J]. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 2009: 14, 724-735. <http://www.itcon.org/2009/47>
- [37] Benachir Medjdoub, Mokhtaria Benzohra Chenini. A constraint-based parametric model to support building services design exploration[J]. *Architectural Engineering and Design Management*, 2015: 11(2), 123-136, DOI: 10.1080/17452007.2013.834812
- [38] Aurelien Bres, Florian Judex, Georg Suter, etc. A Method for Automated Generation of HVAC Distribution Subsystems for Building Performance Simulation[J]. *Building Simulation*, 2017:1548-1557. doi.org/10.26868/25222708.2017.413
- [39] Tomasz Cholewa, Igor Balen, Alicja Siuta-Olcha. On the influence of local and zonal hydraulic balancing of heating system on energy savings in existing buildings – Long term experimental research[J]. *Energy & Buildings*, 2018, 179.
- [40] 石兆玉, 赵红平, 陈兆祥等. 科学院中关村东南供热区初调节报告[J]. 区域供热, 1990(01): 1-9.
- [41] 张立勇. 供热管网的流体网络分析及水力平衡研究[D]. 天津大学, 2003.
- [42] 马仲元, 张志红, 岳少青. 供热管网水力平衡调节方法的研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2006, 23(4): 18-21.
- [43] 文建良. 风机盘管水系统管网特性研究[D]. 华南理工大学, 2010.
- [44] 徐亦波. 空调冷热水循环泵变转速节能控制方法[J]. 暖通空调, 2004, 34(9): 32-35.
- [45] 江亿. 管网可调性和稳定性的定量分析[J]. 暖通空调, 1997(03): 3-9.
- [46] 秦绪忠, 江亿. 供热空调水系统的稳定性分析[J]. 暖通空调, 2002(01): 12-16.
- [47] 韩晓红, 陈光明, 邹平华. 影响热网水力稳定性的若干因素分析[J]. 暖通空

- 调,2004(09):91-95.
- [48] 符永正,蔡亚桥.异程系统与同程系统的水力稳定性分析和比较[J].武汉科技大学学报(自然科学版),2006(03):289-292.
- [49] 陈明. 中央空调水系统节能策略研究及设计评估软件开发[D].重庆大学,2010.
- [50] 刘亮,吴春玲,陈轲,付强.基于 HacNet 的供热系统水力工况分析及性能预测[J].制冷与空调,2017,17(06):53-58.
- [51] 常赛南. 变流量空调水系统稳定性的定量评价[D].长安大学,2018.
- [52] 刘庆东. 空调冷冻水系统水力特性及其优化控制研究[D].华中科技大学,2019.
- [53] Balogun, A.-L., Matori, A.-N., & Hamid-Mosaku, A. I. (2015). A fuzzy multi-criteria decision support system for evaluating subsea oil pipeline routing criteria in East Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 74(6), 4875–4884. doi:10.1007/s12665-015-4499-z
- [54] 王娟娟,曹凯.基于栅格法的机器人路径规划[J].农业装备与车辆工程,2009(04):14-17.
- [55] 黄耀. 基于栅格法的汽车路径规划[D].华中科技大学,2008.
- [56] 刘文之. 基于激光雷达的 SLAM 和路径规划算法研究与实现[D].哈尔滨工业大学,2018.
- [57] Tomas L P, Michael A W. An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles[J]. *Communications of the ACM*, 1979, 22(10): 560-570. <https://doi.org/10.1145/359156.359164>
- [58] B. Oommen, S. Iyengar, N. Rao and R. Kashyap. Robot navigation in unknown terrains using learned visibility graphs, Part1: The disjoint convex obstacle case[J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, 3(6): 672-681. doi: 10.1109/JRA.1987.1087133.
- [59] Liu, Q., Wang, C. A graph-based pipe routing algorithm in aero-engine rotational space[J]. *J Intell Manuf* 26, 1077–1083 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0840-0>
- [60] 牛亚肖. 基于网络图的复杂空间管路布局方法研究[D].天津大学,2017.
- [61] L. Liu and Q. Liu, Multi-objective routing of multi-terminal rectilinear pipe in 3D space by MOEA/D and RSMT[C], 2018 3rd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), 2018, pp. 462-467, doi: 10.1109/ICARM.2018.8610824.
- [62] J. L. Ganley and J. P. Cohoon, Routing a multi-terminal critical net: Steiner tree construction in the presence of obstacles[C], *Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems - ISCAS '94*, 1994, pp. 113-116 vol.1, doi: 10.1109/ISCAS.1994.408768.
- [63] Howden W E. The sofa problem [J]. *Computer Journal*, 1968, 11(3): 299-301
- [64] 李磊, 叶涛, 谭民等. 移动机器人技术研究现状与未来[J]. *机器人*, 2002, 24(5):476-480
- [65] Hightower D W. A solution to line routing problems on the continuous plane [J]. *Papers on Twenty-five years of electronic design automation*. ACM, 1988: 11-34. <https://doi.org/10.1145/800260.809014>
- [66] H. Li, Q. Zhang, “A multiobjective differential evolution based on decomposition for multiobjective optimization with variable linkages,” In *Proceedings of Parallel Problem Solving from Nature.*, pp. 583-592, 2006. [https://doi.org/10.1007/11844297\\_59](https://doi.org/10.1007/11844297_59)
- [67] 陈志森. 空调输配系统（风）自动化设计研究[D].同济大学,2022.
- [68] Colorni A, Dorigo M, Maniezzo V, et al. Distributed optimization by ant

- colonies[C].Proceedings of the 1st European Conference on Artificial Life, 1991:134~142.
- [69] 付鹏. 多智能体中基于蚁群算法信息素的 Q 学习研究[D].南京邮电大学,2013.
- [70] 王沛栋. 改进蚁群算法及在路径规划问题的应用研究[D].中国海洋大学,2012.
- [71] Gambardella L M, Dorigo M. Ant-Q: a reinforcement learning approach to the Traveling salesman Problem [C]. Proceedings of the 12th International Conference on Machine Learning, 1995: 252-260.
- [72] Dorigo M, Gambardella L M. A study of some properties of Ant-Q[C]. Proceedings of the 4th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, 1996: 656-665
- [73] Dorigo M, Gambardella L M. Ant Colony System:A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem[C]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53~66.
- [74] 暖通空调系统设计手册 <https://www.guifanku.com/tushushouce/23335.html>
- [75] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 第 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008
- [76] 王雪连. 水系统平衡阀节能性的工程应用研究[D].青岛理工大学,2013.
- [77] 电动 V 型调节阀 - 武汉格莱特控制阀有限公司 (grat.com.cn) <https://www.grat.com.cn/product/pro3/product-108.html>
- [78] Qin Hu, Zhongyuan Yuan. Hydraulic Balance Debugging Method for Air Conditioning Water System. E3S Web Conf. 165 06056 (2020).DOI: 10.1051/e3sconf/202016506056
- [79] <https://www.osgeo.cn/networkx/>
- [80] 蒋小强, 龙惟定, 王民, 等. 空调水系统变流量的运行特性 [J]. 流体机械, 2010, 38 (3): 71-75.
- [81] 王碧玲, 邹瑜, 孙德宇, 刘宗江. 冷水机组综合部分负荷性能系数(IPLV)计算公式的更新[J].暖通空调,2015,45(10):23-29.
- [82] 公共建筑节能设计标准
- [83] 付祥钊. 流体输配管网[M]. 第 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [84] 廖滢. 中央空调冷冻水系统的调节方法研究[D].清华大学,2011.

同济大学

## 附录 A 示例建筑 A 布局设计结计算表

表 A1 示例建筑 A 初始环路水力计算结果

	loop	pm	pj	fcu	pmj	balance
0	(16.976, 41.831, 3.054)	53419.9	4672.626	30000	88092.52	0.812
1	(18.346, 38.677, 3.054)	25372.53	3907.715	30000	59280.24	0.873
2	(-3.011, 41.755, 3.054)	75574.06	7310.756	30000	112884.8	0.759
3	(9.003, 41.755, 3.054)	66107.81	7310.756	30000	103418.6	0.779
4	(-5.158, 32.888, 3.054)	97235.04	6515.079	30000	133750.1	0.714
5	(-5.158, 22.046, 3.054)	127020.7	6812.201	30000	163832.9	0.65
6	(-3.858, -3.466, 3.054)	272971	7069.194	30000	310040.2	0.338
7	(-3.858, 6.93, 3.054)	252699.3	7069.194	30000	289768.5	0.381
8	(6.083, -3.964, 3.054)	259454.1	6605.726	30000	296059.8	0.368
9	(4.388, -0.763, 3.054)	195796	6230.916	30000	232026.9	0.504
10	(21.491, 38.597, 3.054)	20028.15	2164.273	30000	52192.43	0.889
11	(21.119, 44.533, 3.054)	59617.91	3221.521	30000	92839.43	0.802
12	(11.986, 40.893, 3.054)	65598.52	4796.854	30000	100395.4	0.786
13	(1.069, 3.178, 3.054)	211148.9	6892.997	30000	248041.9	0.47
14	(1.069, 10.827, 3.054)	149708.8	6074.358	30000	185783.2	0.603
15	(1.069, 18.477, 3.054)	127185.5	6483.255	30000	163668.7	0.65
16	(1.069, 26.126, 3.054)	98110.4	6175.101	30000	134285.5	0.713
17	(1.069, 33.775, 3.054)	80077.46	6636.003	30000	116713.5	0.751
18	(8.434, 36.243, 3.054)	40424.21	4686.325	30000	75110.53	0.84
19	(15.799, 1.635, 3.054)	232116.2	7592.39	30000	269708.6	0.424
20	(23.164, 36.243, 3.054)	10063.5	3511.63	30000	43575.13	0.907
21	(30.529, 1.635, 3.054)	282551.7	7579.536	30000	320131.2	0.316
22	(45.259, 1.635, 3.054)	393765.9	7600.109	30000	431366	0.079
23	(-1.508, 19.467, 3.054)	173056.5	5115.939	30000	208172.5	0.555
24	(-1.858, 14.563, 3.054)	200228.7	6700.935	30000	236929.7	0.494
25	(14.46, 11.582, 3.054)	153358.4	6107.055	30000	189465.5	0.595
26	(-0.78, 9.529, 3.054)	229325.3	6473.938	30000	265799.2	0.432

27	(15.198, -3.864, 3.054)	378687.4	17608.94	30000	426296.4	0.089
28	(52.457, -0.763, 3.054)	376120.8	9336.971	30000	415457.8	0.112
29	(46.5, -1.863, 3.054)	427798.5	10318.83	30000	468117.3	0
30	(32.5, -3.864, 3.054)	411967.2	17312.06	30000	459279.3	0.019
31	(28.5, -1.863, 3.054)	238791.1	9396.772	30000	278187.9	0.406

表 A2 示例建筑 A 调节管径后水力计算结果

	loop	pm	pj	fcu	pmj	balance
0	(16.976, 41.831, 3.054)	154709.7	7243.395	30000	191953.1	0.343
1	(18.346, 38.677, 3.054)	62965.36	4937.8	30000	97903.16	0.665
2	(-3.011, 41.755, 3.054)	75574.06	7310.756	30000	112884.8	0.613
3	(9.003, 41.755, 3.054)	66107.81	7310.756	30000	103418.6	0.646
4	(-5.158, 32.888, 3.054)	97235.04	6515.079	30000	133750.1	0.542
5	(-5.158, 22.046, 3.054)	127020.7	6812.201	30000	163832.9	0.439
6	(-3.858, -3.466, 3.054)	255712.6	6234.672	30000	291947.3	0
7	(-3.858, 6.93, 3.054)	235440.9	6234.672	30000	271675.6	0.069
8	(6.083, -3.964, 3.054)	230132.6	5209.902	30000	265342.5	0.091
9	(4.388, -0.763, 3.054)	166474.5	4835.093	30000	201309.6	0.31
10	(21.491, 38.597, 3.054)	68909.7	3251.865	30000	102161.6	0.65
11	(21.119, 44.533, 3.054)	210854.8	6207.788	30000	247062.6	0.154
12	(11.986, 40.893, 3.054)	118060	6444.443	30000	154504.5	0.471
13	(1.069, 3.178, 3.054)	193890.6	6058.475	30000	229949	0.212
14	(1.069, 10.827, 3.054)	149708.8	6074.358	30000	185783.2	0.364
15	(1.069, 18.477, 3.054)	127185.5	6483.255	30000	163668.7	0.439
16	(1.069, 26.126, 3.054)	98110.4	6175.101	30000	134285.5	0.54
17	(1.069, 33.775, 3.054)	80077.46	6636.003	30000	116713.5	0.6
18	(8.434, 36.243, 3.054)	87450.5	5327.993	30000	122778.5	0.579
19	(15.799, 1.635, 3.054)	176865.9	6094.251	30000	212960.1	0.271
20	(23.164, 36.243, 3.054)	25479.78	4153.298	30000	59633.08	0.796
21	(30.529, 1.635, 3.054)	209305.6	6089.989	30000	245395.6	0.159
22	(45.259, 1.635, 3.054)	181391.3	5914.83	30000	217306.2	0.256
23	(-1.508, 19.467, 3.054)	173056.5	5115.939	30000	208172.5	0.287
24	(-1.858, 14.563, 3.054)	200228.7	6700.935	30000	236929.7	0.188

25	(14.46, 11.582, 3.054)	153358.4	6107.055	30000	189465.5	0.351
26	(-0.78, 9.529, 3.054)	229325.3	6473.938	30000	265799.2	0.09
27	(15.198, -3.864, 3.054)	182460.2	15557.16	30000	228017.3	0.219
28	(52.457, -0.763, 3.054)	179044.2	7899.942	30000	216944.1	0.257
29	(46.5, -1.863, 3.054)	196303.3	8287.107	30000	234590.4	0.196
30	(32.5, -3.864, 3.054)	190349.8	15373.14	30000	235723	0.193
31	(28.5, -1.863, 3.054)	189572.2	8244.449	30000	227816.7	0.22

表 A3 示例建筑 A 调节阀后水力计算结果

	loop	pm	pj	fcu	pmj	balance
0	(16.976, 41.831, 3.054)	154709.7	66232.48	30000	250942.2	0.14
1	(18.346, 38.677, 3.054)	62965.36	168836.3	30000	261801.6	0.103
2	(-3.011, 41.755, 3.054)	75574.06	170338.8	30000	275912.8	0.055
3	(9.003, 41.755, 3.054)	66107.81	170338.8	30000	266446.6	0.087
4	(-5.158, 32.888, 3.054)	97235.04	133274.7	30000	260509.7	0.108
5	(-5.158, 22.046, 3.054)	127020.7	95285.8	30000	252306.5	0.136
6	(-3.858, -3.466, 3.054)	255712.6	6234.672	30000	291947.3	0
7	(-3.858, 6.93, 3.054)	235440.9	6234.672	30000	271675.6	0.069
8	(6.083, -3.964, 3.054)	230132.6	5209.902	30000	265342.5	0.091
9	(4.388, -0.763, 3.054)	166474.5	4835.093	30000	201309.6	0.31
10	(21.491, 38.597, 3.054)	68909.7	3251.865	30000	102161.6	0.65
11	(21.119, 44.533, 3.054)	210854.8	7468.471	30000	248323.3	0.149
12	(11.986, 40.893, 3.054)	118060	113284.1	30000	261344.1	0.105
13	(1.069, 3.178, 3.054)	193890.6	27377.8	30000	251268.3	0.139
14	(1.069, 10.827, 3.054)	149708.8	78531.24	30000	258240.1	0.115
15	(1.069, 18.477, 3.054)	127185.5	94956.85	30000	252142.3	0.136
16	(1.069, 26.126, 3.054)	98110.4	132934.7	30000	261045.1	0.106
17	(1.069, 33.775, 3.054)	80077.46	153245.4	30000	263322.8	0.098
18	(8.434, 36.243, 3.054)	87450.5	132087.6	30000	249538.1	0.145
19	(15.799, 1.635, 3.054)	176865.9	45052.83	30000	251918.7	0.137
20	(23.164, 36.243, 3.054)	25479.78	43111.88	30000	98591.66	0.662
21	(30.529, 1.635, 3.054)	209305.6	9099.587	30000	248405.2	0.149
22	(45.259, 1.635, 3.054)	181391.3	37661.8	30000	249053.1	0.147

23	(-1.508, 19.467, 3.054)	173056.5	46090.56	30000	249147.1	0.147
24	(-1.858, 14.563, 3.054)	200228.7	18816.11	30000	249044.8	0.147
25	(14.46, 11.582, 3.054)	153358.4	65096.14	30000	248454.5	0.149
26	(-0.78, 9.529, 3.054)	229325.3	6473.938	30000	265799.2	0.09
27	(15.198, -3.864, 3.054)	182460.2	37928.22	30000	250388.4	0.142
28	(52.457, -0.763, 3.054)	179044.2	40672.61	30000	249716.8	0.145
29	(46.5, -1.863, 3.054)	196303.3	24293.64	30000	250597	0.142
30	(32.5, -3.864, 3.054)	190349.8	28530.48	30000	248880.3	0.148
31	(28.5, -1.863, 3.054)	189572.2	31002.04	30000	250574.2	0.142

表 A4 示例建筑 A 初投资

Product	Description	Unit	Unit Price of Materials(RMB)	Unit Price of Installation(RMB)	Unit Price(RMB)	Quantity	Price(RMB)
热镀锌管	1、规格型号：DN100 2、连接形式：焊接（氩弧焊打底） 3、压力等级：1.60MPA	m	54.27439	34.102	88.37639	25.55	2258.017
热镀锌管	1、规格型号：DN80 2、连接形式：焊接（氩弧焊打底） 3、压力等级：1.6MPA	m	42.62272	24.518	67.14072	140.54	9435.957
热镀锌管	1、规格型号：DN70 2、连接形式：焊接（氩弧焊打底） 3、压力等级：1.6MPA	m	34.64038	24.518	59.15838	10.58	625.8956
热镀锌管	1、规格型号：DN50 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA	m	28.07082	7.781	35.85182	26.28	942.1857
热镀锌管	1、规格型号：DN40 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA	m	20.69618	6.909	27.60518	92.49	2553.204
热镀锌管	1、规格型号：DN32 2、连接形式：丝接	m	17.97057	6.363	24.33357	135.06	3286.492



管	3、压力等级：1.6MPA						
热镀锌管	1、规格型号：DN25 2、连接形式：丝接						
管	3、压力等级：1.6MPA	m	13.18893	5.799	18.98793	171.56	3257.568
热镀锌管	1、规格型号：DN20 2、连接形式：丝接						
管	3、压力等级：1.6MPA	m	9.530576	5.061	14.59158	151.96	2217.336
热镀锌弯头	1、规格型号：DN100 2、连接形式：焊接						
头	3、压力等级：1.6MPA	个	25.27434	91.652	116.9263	2	233.8527
热镀锌弯头	1、规格型号：DN40 2、连接形式：丝接						
头	3、压力等级：1.6MPA	个	3.829062	21.559	25.38806	12	304.6567
热镀锌弯头	1、规格型号：DN32 2、连接形式：丝接						
头	3、压力等级：1.6MPA	个	2.552708	17.694	20.24671	6	121.4802
热镀锌弯头	1、规格型号：DN25 2、连接形式：丝接						
头	3、压力等级：1.6MPA	个	1.701805	15.072	16.77381	32	536.7618
热镀锌弯头	1、规格型号：DN20 2、连接形式：丝接						
头	3、压力等级：1.6MPA	个	1.701805	15.072	16.77381	60	1006.428
热镀锌三通	1、规格型号：DN450*80 2、连接形式：焊接						
通	3、压力等级：1.6MPA	个	2021.947	543.543	2565.49	2	5130.98
热镀锌三通	1、规格型号：DN200*100 2、连接形式：焊接						
通	3、压力等级：1.6MPA	个	265.3805	194.95	460.3305	4	1841.322
热镀锌三通	1、规格型号：DN200*65 2、连接形式：焊接						
通	3、压力等级：1.6MPA	个	265.3805	194.95	460.3305	2	920.6611
热镀锌三通	1、规格型号：DN200*40 2、连接形式：焊接						
通	3、压力等级：1.6MPA	个	265.3805	194.95	460.3305	13	5984.297

通	3、压力等级：1.6MPA						
热镀锌三通	1、规格型号：DN200*32 2、连接形式：焊接						
通	3、压力等级：1.6MPA	个	265.3805	194.95	460.3305	9	4142.975
热镀锌三通	1、规格型号：DN125*80 2、连接形式：焊接						
通	3、压力等级：1.6MPA	个	93.51504	99.675	193.19	6	1159.14
热镀锌三通	1、规格型号：DN125*65 2、连接形式：焊接						
通	3、压力等级：1.6MPA	个	93.51504	99.675	193.19	2	386.3801
热镀锌三通	1、规格型号：DN125*50 2、连接形式：焊接						
通	3、压力等级：1.6MPA	个	93.51504	99.675	193.19	2	386.3801
热镀锌三通	1、规格型号：DN125*40 2、连接形式：焊接						
通	3、压力等级：1.6MPA	个	93.51504	99.675	193.19	7	1352.33
热镀锌三通	1、规格型号：DN50*32 2、连接形式：焊接						
通	3、压力等级：1.6MPA	个	30.3292	38.899	69.2282	8	553.8256
热镀锌三通	1、规格型号：DN40*32 2、连接形式：焊接						
通	3、压力等级：1.6MPA	个	17.69204	34.895	52.58704	4	210.3481
热镀锌三通	1、规格型号：DN32*25 2、连接形式：焊接						
通	3、压力等级：1.6MPA	个	15.1646	29.617	44.7816	13	582.1608
热镀锌三通	1、规格型号：DN25*20 2、连接形式：焊接						
通	3、压力等级：1.6MPA	个	10.10973	24.44	34.54973	21	725.5444
静态平衡阀	1、规格型号：DN40 2、连接形式：法兰连接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	425.7195	31.95	457.6695	4	1830.678
静态	1、规格型号：DN32	个	299.8717	30.57	330.4417	4	1321.767

平衡 阀	2、连接形式：法兰连接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢						
静态 平衡 阀	1、规格型号：DN25 2、连接形式：法兰连接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	290.0398	28.49	318.5298	15	4777.947
静态 平衡 阀	1、规格型号：DN20 2、连接形式：法兰连接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	290.0398	28.49	318.5298	9	2866.768
Y 型 过滤 器	1、规格型号：DN40 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	194.6708	33.82	228.4908	4	913.9632
Y 型 过滤 器	1、规格型号：DN32 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	166.355	30.49	196.845	4	787.3802
Y 型 过滤 器	1、规格型号：DN25 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	106.1841	23.67	129.8541	15	1947.811
Y 型 过滤 器	1、规格型号：DN20 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	70.78938	21.59	92.37938	9	831.4144
内丝 接球 阀	1、规格型号：DN40 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	56.6315	33.82	90.4515	8	723.612
内丝 接球	1、规格型号：DN32 2、连接形式：丝接	个	46.0131	30.49	76.5031	8	612.0248

阀	3、压力等级：1.6MPA						
	4、材质：碳钢						
	1、规格型号：DN25						
内丝	2、连接形式：丝接						
接球	3、压力等级：1.6MPA						
阀	4、材质：碳钢	个	33.62496	23.67	57.29496	30	1718.849
	1、规格型号：DN20						
内丝	2、连接形式：丝接						
接球	3、压力等级：1.6MPA						
阀	4、材质：碳钢	个	26.54602	21.59	48.13602	18	866.4483
Total							69354.84

## 附录 B 示例建筑 B 布局设计计算表 ( $a = 0.45, b = 0.9$ )

表 B1 示例建筑 B 初始环路水力计算结果 ( $a = 0.45, b = 0.9$ )

	loop	pm	pj	fcu	pmj	balance
0	(80.694, 8.573, 2.954)	124571	4312.423	30000	158883.5	0.587
1	(62.619, 8.573, 2.954)	73244.26	4421.48	30000	107665.7	0.72
2	(50.569, 15.818, 2.954)	61955.19	4159.131	30000	96114.32	0.75
3	(56.594, 9.861, 2.954)	100367.6	4275.815	30000	134643.4	0.65
4	(56.594, 15.436, 2.954)	57553.56	4301.831	30000	91855.39	0.761
5	(13.432, 8.073, 2.954)	243667.2	2528.981	30000	276196.2	0.282
6	(82.582, 0.048, 2.954)	191845	4287.87	30000	226132.9	0.412
7	(19.957, 7.961, 2.954)	288645.4	4926.154	30000	323571.6	0.158
8	(80.582, 3.098, 2.954)	173237.8	4861.224	30000	208099	0.459
9	(76.057, -0.077, 2.954)	295672.2	6848.996	30000	332521.2	0.135
10	(15.432, 11.098, 2.954)	174838.6	2808.814	30000	207647.4	0.46
11	(47.862, 16.648, 2.954)	65202.39	2599.146	30000	97801.53	0.746
12	(33.082, 16.648, 2.954)	114544.8	2828.621	30000	147373.4	0.617
13	(25.692, 16.173, 2.954)	119889.8	2573.232	30000	152463.1	0.603
14	(27.057, 7.961, 2.954)	322935.2	4828.821	30000	357764.1	0.069
15	(45.982, 7.961, 2.954)	117508	4214.952	30000	151723	0.605
16	(68.957, -0.077, 2.954)	336795.1	7599.274	30000	374394.4	0.026
17	(62.432, 0.048, 2.954)	347888.5	6518.656	30000	384407.2	0
18	(41.457, 11.098, 2.954)	115790.5	4567.185	30000	150357.7	0.609
19	(35.557, 11.098, 2.954)	169782.6	3454.658	30000	203237.3	0.471
20	(33.557, 8.073, 2.954)	240501.7	5195.666	30000	275697.4	0.283
21	(39.457, 8.073, 2.954)	171634.9	6308.193	30000	207943.1	0.459
22	(60.432, 3.098, 2.954)	84875.5	4002.123	30000	118877.6	0.691
23	(65.082, 11.648, 2.954)	63087.61	3907.029	30000	96994.64	0.748
24	(65.432, 17.098, 2.954)	22064.27	3209.077	30000	55273.35	0.856
25	(60.682, 19.853, 2.954)	46158.94	2652.703	30000	78811.64	0.795

表 B2 示例建筑 B 调节管径后水力计算结果 ( $a = 0.45, b = 0.9$ )

	loop	pm	pj	fcu	pmj	balance
0	(80.694, 8.573, 2.954)	98894.49	3976.689	30000	132871.2	0.518
1	(62.619, 8.573, 2.954)	72470.8	4021.882	30000	106492.7	0.614
2	(50.569, 15.818, 2.954)	187001.8	6638.963	30000	223640.8	0.189
3	(56.594, 9.861, 2.954)	107602	4330.524	30000	141932.5	0.485
4	(56.594, 15.436, 2.954)	178436.6	7141.932	30000	215578.6	0.218
5	(13.432, 8.073, 2.954)	169068.2	2340.584	30000	201408.7	0.269
6	(82.582, 0.048, 2.954)	143885.3	4087.215	30000	177972.5	0.354
7	(19.957, 7.961, 2.954)	130870.8	3888.173	30000	164759	0.402
8	(80.582, 3.098, 2.954)	118087.3	4203.841	30000	152291.1	0.448
9	(76.057, -0.077, 2.954)	130620	5623.389	30000	166243.4	0.397
10	(15.432, 11.098, 2.954)	145320.9	2455.826	30000	177776.7	0.355
11	(47.862, 16.648, 2.954)	65202.39	2599.146	30000	97801.53	0.645
12	(33.082, 16.648, 2.954)	114544.8	2828.621	30000	147373.4	0.465
13	(25.692, 16.173, 2.954)	109745.8	2299.052	30000	142044.8	0.485
14	(27.057, 7.961, 2.954)	141240.5	3839.604	30000	175080.1	0.365
15	(45.982, 7.961, 2.954)	169500.3	5133.621	30000	204633.9	0.258
16	(68.957, -0.077, 2.954)	143510.6	5930.815	30000	179441.5	0.349
17	(62.432, 0.048, 2.954)	151216	4652.421	30000	185868.4	0.326
18	(41.457, 11.098, 2.954)	167782.8	5485.855	30000	203268.6	0.263
19	(35.557, 11.098, 2.954)	169782.6	3454.658	30000	203237.3	0.263
20	(33.557, 8.073, 2.954)	240501.7	5195.666	30000	275697.4	0
21	(39.457, 8.073, 2.954)	223627.2	7226.863	30000	260854	0.054
22	(60.432, 3.098, 2.954)	92109.93	4056.831	30000	126166.8	0.542
23	(65.082, 11.648, 2.954)	70322.04	3961.738	30000	104283.8	0.622
24	(65.432, 17.098, 2.954)	60375.22	4077.452	30000	94452.67	0.657
25	(60.682, 19.853, 2.954)	121952.9	3521.078	30000	155474	0.436

表 B3 示例建筑 B 调节阀门后水力计算结果 ( $a = 0.45, b = 0.9$ )

	loop	pm	pj	fcu	pmj	balance
0	(80.694, 8.573, 2.954)	98894.49	18723.96	30000	147618.5	0.465
1	(62.619, 8.573, 2.954)	72470.8	18769.15	30000	121240	0.56
2	(50.569, 15.818, 2.954)	187001.8	18620	30000	235621.8	0.145

3	(56.594, 9.861, 2.954)	107602	16311.56	30000	153913.5	0.442
4	(56.594, 15.436, 2.954)	178436.6	29260.33	30000	237697	0.138
5	(13.432, 8.073, 2.954)	169068.2	38992.92	30000	238061.1	0.137
6	(82.582, 0.048, 2.954)	143885.3	40739.55	30000	214624.9	0.222
7	(19.957, 7.961, 2.954)	130870.8	76345.06	30000	237215.8	0.14
8	(80.582, 3.098, 2.954)	118087.3	22318.06	30000	170405.4	0.382
9	(76.057, -0.077, 2.954)	130620	78080.28	30000	238700.3	0.134
10	(15.432, 11.098, 2.954)	145320.9	20570.05	30000	195891	0.289
11	(47.862, 16.648, 2.954)	65202.39	20713.37	30000	115915.8	0.58
12	(33.082, 16.648, 2.954)	114544.8	20942.84	30000	165487.6	0.4
13	(25.692, 16.173, 2.954)	109745.8	20413.27	30000	160159.1	0.419
14	(27.057, 7.961, 2.954)	141240.5	76296.49	30000	247537	0.102
15	(45.982, 7.961, 2.954)	169500.3	36823.52	30000	236323.8	0.143
16	(68.957, -0.077, 2.954)	143510.6	64919.9	30000	238430.5	0.135
17	(62.432, 0.048, 2.954)	151216	19399.69	30000	200615.7	0.272
18	(41.457, 11.098, 2.954)	167782.8	37175.75	30000	234958.5	0.148
19	(35.557, 11.098, 2.954)	169782.6	35144.56	30000	234927.2	0.148
20	(33.557, 8.073, 2.954)	240501.7	5195.666	30000	275697.4	0
21	(39.457, 8.073, 2.954)	223627.2	7226.863	30000	260854	0.054
22	(60.432, 3.098, 2.954)	92109.93	4056.831	30000	126166.8	0.542
23	(65.082, 11.648, 2.954)	70322.04	3961.738	30000	104283.8	0.622
24	(65.432, 17.098, 2.954)	60375.22	4077.452	30000	94452.67	0.657
25	(60.682, 19.853, 2.954)	121952.9	3521.078	30000	155474	0.436

表 B4 示例建筑 B 初投资 ( $a = 0.45, b = 0.9$ )

Product	Description	Unit	Unit_Price_ of_Materials (RMB)	Unit_Price_ of_Installati on(RMB)	Unit_Pri ce(RMB)	Quantit y	Price(R MB)
热镀锌 钢管	1、规格型号：DN70 2、连接形式：焊接（氩弧焊打底） 3、压力等级：1.6MPA	m	34.64038	24.518	59.15838	49.04	2901.127
热镀锌 钢管	1、规格型号：DN50 2、连接形式：丝接	m	28.07082	7.781	35.85182	57.37	2056.819

	3、压力等级：1.6MPA						
热镀锌 钢管	1、规格型号：DN40 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA	m	20.69618	6.909	27.60518	162.09	4474.524
热镀锌 钢管	1、规格型号：DN32 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA	m	17.97057	6.363	24.33357	132.16	3215.925
热镀锌 钢管	1、规格型号：DN25 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA	m	13.18893	5.799	18.98793	116.07	2203.928
热镀锌 钢管	1、规格型号：DN20 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA	m	9.530576	5.061	14.59158	163.3	2382.804
热镀锌 弯头	1、规格型号：DN70 2、连接形式：焊接 3、压力等级：1.6MPA	个	12.63717	64.444	77.08117	2	154.1623
热镀锌 弯头	1、规格型号：DN50 2、连接形式：焊接 3、压力等级：1.6MPA	个	5.054867	38.899	43.95387	2	87.90773
热镀锌 弯头	1、规格型号：DN40 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA	个	3.829062	21.559	25.38806	6	152.3284
热镀锌 弯头	1、规格型号：DN32 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA	个	2.552708	17.694	20.24671	17	344.194
热镀锌 弯头	1、规格型号：DN25 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA	个	1.701805	15.072	16.77381	21	352.2499
热镀锌 弯头	1、规格型号：DN20 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA	个	1.701805	15.072	16.77381	47	788.3688
热镀锌 三通	1、规格型号：DN200*65 2、连接形式：焊接	个	265.3805	194.95	460.3305	4	1841.322



	3、压力等级：1.6MPA						
热镀锌三通	1、规格型号：DN200*50 2、连接形式：焊接 3、压力等级：1.6MPA	个	265.3805	194.95	460.3305	10	4603.305
热镀锌三通	1、规格型号：DN200*40 2、连接形式：焊接 3、压力等级：1.6MPA	个	265.3805	194.95	460.3305	16	7365.288
热镀锌三通	1、规格型号：DN200*32 2、连接形式：焊接 3、压力等级：1.6MPA	个	265.3805	194.95	460.3305	18	8285.95
热镀锌三通	1、规格型号：DN125*65 2、连接形式：焊接 3、压力等级：1.6MPA	个	93.51504	99.675	193.19	2	386.3801
热镀锌三通	1、规格型号：DN125*40 2、连接形式：焊接 3、压力等级：1.6MPA	个	93.51504	99.675	193.19	4	772.7602
热镀锌三通	1、规格型号：DN50*32 2、连接形式：焊接 3、压力等级：1.6MPA	个	30.3292	38.899	69.2282	2	138.4564
热镀锌三通	1、规格型号：DN40*32 2、连接形式：焊接 3、压力等级：1.6MPA	个	17.69204	34.895	52.58704	2	105.1741
热镀锌三通	1、规格型号：DN32*25 2、连接形式：焊接 3、压力等级：1.6MPA	个	15.1646	29.617	44.7816	2	89.5632
热镀锌三通	1、规格型号：DN25*20 2、连接形式：焊接 3、压力等级：1.6MPA	个	10.10973	24.44	34.54973	15	518.246
静态平衡阀	1、规格型号：DN32 2、连接形式：法兰连接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	299.8717	30.57	330.4417	3	991.325
静态平衡阀	1、规格型号：DN25	个	290.0398	28.49	318.5298	4	1274.119

衡阀	2、连接形式：法兰连接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢							
静态平 衡阀	1、规格型号：DN20 2、连接形式：法兰连接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	290.0398	28.49	318.5298	19	6052.067	
Y型过 滤器	1、规格型号：DN32 2、连接形式：丝接 3、 4、 压力等级：1.6MPA 材质：碳钢	个	166.355	30.49	196.845	3	590.5351	
Y型过 滤器	1、规格型号：DN25 2、连接形式：丝接 3、 4、 压力等级：1.6MPA 材质：碳钢	个	106.1841	23.67	129.8541	4	519.4163	
Y型过 滤器	1、规格型号：DN20 2、连接形式：丝接 3、 4、 压力等级：1.6MPA 材质：碳钢	个	70.78938	21.59	92.37938	19	1755.208	
内丝接 球阀	1、规格型号：DN32 2、连接形式：丝接 3、 4、 压力等级：1.6MPA 材质：碳钢	个	46.0131	30.49	76.5031	6	459.0186	
内丝接 球阀	1、规格型号：DN25 2、连接形式：丝接 3、 4、 压力等级：1.6MPA 材质：碳钢	个	33.62496	23.67	57.29496	8	458.3596	
内丝接 球阀	1、规格型号：DN20 2、连接形式：丝接 3、 4、 压力等级：1.6MPA 材质：碳钢	个	26.54602	21.59	48.13602	38	1829.169	
							57150	

## 附录 C 示例建筑 B 布局设计计算表 ( $a = 0.9, b = 0.9$ )

表 C1 示例建筑 B 初始环路水力计算结果 ( $a = 0.9, b = 0.9$ )

	loop	pm	pj	fcu	pmj	balance
0	(80.694, 8.573, 2.954)	246458.2	6795.528	30000	283253.7	0.522
1	(62.619, 8.573, 2.954)	156090.2	6439.701	30000	192529.9	0.675
2	(56.594, 9.861, 2.954)	113328.7	5864.791	30000	149193.5	0.748
3	(56.594, 15.436, 2.954)	97100.3	4520.289	30000	131620.6	0.778
4	(50.569, 15.818, 2.954)	64662.66	3762.853	30000	98425.51	0.834
5	(13.432, 8.073, 2.954)	249577.2	2566.876	30000	282144.1	0.524
6	(82.582, 0.048, 2.954)	357554.9	6726.409	30000	394281.3	0.335
7	(19.957, 7.961, 2.954)	294555.4	4964.048	30000	329519.5	0.444
8	(80.582, 3.098, 2.954)	336952.3	7557.553	30000	374509.8	0.369
9	(76.057, -0.077, 2.954)	439860.8	9060.818	30000	478921.6	0.192
10	(15.432, 11.098, 2.954)	180748.6	2846.708	30000	213595.3	0.64
11	(47.862, 16.648, 2.954)	71112.4	2637.041	30000	103749.4	0.825
12	(33.082, 16.648, 2.954)	120454.8	2866.515	30000	153321.3	0.741
13	(25.692, 16.173, 2.954)	125799.8	2611.127	30000	158411	0.733
14	(27.057, 7.961, 2.954)	328845.2	4866.716	30000	363712	0.387
15	(45.982, 7.961, 2.954)	121520.8	4871.654	30000	156392.5	0.736
16	(68.957, -0.077, 2.954)	504087.1	9749.824	30000	543836.9	0.083
17	(62.432, 0.048, 2.954)	524417.8	8761.651	30000	563179.5	0.05
18	(41.457, 11.098, 2.954)	119803.3	5223.888	30000	155027.2	0.739
19	(35.557, 11.098, 2.954)	175692.6	3492.552	30000	209185.2	0.647
20	(33.557, 8.073, 2.954)	246411.8	5233.56	30000	281645.3	0.525
21	(39.457, 8.073, 2.954)	175647.7	6964.896	30000	212612.6	0.642
22	(60.432, 3.098, 2.954)	554110.7	8963.885	30000	593074.6	0
23	(65.082, 11.648, 2.954)	196599.6	6490.403	30000	233090	0.607
24	(65.432, 17.098, 2.954)	22064.27	3209.077	30000	55273.35	0.907
25	(60.682, 19.853, 2.954)	41335.09	3216.596	30000	74551.69	0.874

表 C2 示例建筑 B 调节管径后水力计算结果 ( $a = 0.9, b = 0.9$ )

	loop	pm	pj	fcu	pmj	balance
0	(80.694, 8.573, 2.954)	145322.2	4525.639	30000	179847.8	0.506
1	(62.619, 8.573, 2.954)	106745.4	4355.33	30000	141100.7	0.612
2	(56.594, 9.861, 2.954)	90752.72	4155.342	30000	124908.1	0.657
3	(56.594, 15.436, 2.954)	90274.68	3814.875	30000	124089.6	0.659
4	(50.569, 15.818, 2.954)	177683.9	5671.075	30000	213355	0.413
5	(13.432, 8.073, 2.954)	249577.2	2566.876	30000	282144.1	0.224
6	(82.582, 0.048, 2.954)	213074.4	4616.425	30000	247690.9	0.319
7	(19.957, 7.961, 2.954)	294555.4	4964.048	30000	329519.5	0.094
8	(80.582, 3.098, 2.954)	178321.4	4837.244	30000	213158.7	0.414
9	(76.057, -0.077, 2.954)	171256.2	6138.217	30000	207394.5	0.43
10	(15.432, 11.098, 2.954)	180748.6	2846.708	30000	213595.3	0.413
11	(47.862, 16.648, 2.954)	158516.9	3505.416	30000	192022.3	0.472
12	(33.082, 16.648, 2.954)	120454.8	2866.515	30000	153321.3	0.578
13	(25.692, 16.173, 2.954)	125799.8	2611.127	30000	158411	0.564
14	(27.057, 7.961, 2.954)	328845.2	4866.716	30000	363712	0
15	(45.982, 7.961, 2.954)	122599.5	4194.696	30000	156794.2	0.569
16	(68.957, -0.077, 2.954)	191619.7	6420.974	30000	228040.6	0.373
17	(62.432, 0.048, 2.954)	201696.8	5203.731	30000	236900.5	0.349
18	(41.457, 11.098, 2.954)	120882	4546.93	30000	155428.9	0.573
19	(35.557, 11.098, 2.954)	175692.6	3492.552	30000	209185.2	0.425
20	(33.557, 8.073, 2.954)	246411.8	5233.56	30000	281645.3	0.226
21	(39.457, 8.073, 2.954)	176726.4	6287.938	30000	213014.3	0.414
22	(60.432, 3.098, 2.954)	211829.8	5266.15	30000	247095.9	0.321
23	(65.082, 11.648, 2.954)	136917.1	4438.965	30000	171356.1	0.529
24	(65.432, 17.098, 2.954)	60375.22	4077.452	30000	94452.67	0.74
25	(60.682, 19.853, 2.954)	117129.1	4084.971	30000	151214.1	0.584

表 C3 示例建筑 B 调节阀后水力计算结果 ( $a = 0.9, b = 0.9$ )

	loop	pm	pj	fcu	pmj	balance
0	(80.694, 8.573, 2.954)	145322.2	19272.91	30000	194595.1	0.465
1	(62.619, 8.573, 2.954)	106745.4	19102.6	30000	155848	0.572
2	(56.594, 9.861, 2.954)	90752.72	18902.61	30000	139655.3	0.616

3	(56.594, 15.436, 2.954)	90274.68	18562.15	30000	138836.8	0.618
4	(50.569, 15.818, 2.954)	177683.9	20418.35	30000	228102.2	0.373
5	(13.432, 8.073, 2.954)	249577.2	34256.78	30000	313834	0.137
6	(82.582, 0.048, 2.954)	213074.4	36306.33	30000	279380.8	0.232
7	(19.957, 7.961, 2.954)	294555.4	4964.048	30000	329519.5	0.094
8	(80.582, 3.098, 2.954)	178321.4	4837.244	30000	213158.7	0.414
9	(76.057, -0.077, 2.954)	171256.2	112977.8	30000	314234.1	0.136
10	(15.432, 11.098, 2.954)	180748.6	29556.61	30000	240305.2	0.339
11	(47.862, 16.648, 2.954)	158516.9	30215.32	30000	218732.2	0.399
12	(33.082, 16.648, 2.954)	120454.8	29576.42	30000	180031.2	0.505
13	(25.692, 16.173, 2.954)	125799.8	29321.03	30000	185120.9	0.491
14	(27.057, 7.961, 2.954)	328845.2	4866.716	30000	363712	0
15	(45.982, 7.961, 2.954)	122599.5	30904.6	30000	183504.1	0.495
16	(68.957, -0.077, 2.954)	191619.7	94894.57	30000	316514.2	0.13
17	(62.432, 0.048, 2.954)	201696.8	27322.13	30000	259018.9	0.288
18	(41.457, 11.098, 2.954)	120882	26665.33	30000	177547.3	0.512
19	(35.557, 11.098, 2.954)	175692.6	25610.95	30000	231303.6	0.364
20	(33.557, 8.073, 2.954)	246411.8	36980.53	30000	313392.3	0.138
21	(39.457, 8.073, 2.954)	176726.4	113127.5	30000	319854	0.121
22	(60.432, 3.098, 2.954)	211829.8	31976.05	30000	273805.8	0.247
23	(65.082, 11.648, 2.954)	136917.1	31148.87	30000	198066	0.455
24	(65.432, 17.098, 2.954)	60375.22	30787.35	30000	121162.6	0.667
25	(60.682, 19.853, 2.954)	117129.1	30794.87	30000	177924	0.511

表 C4 示例建筑 B 初投资 ( $a = 0.9, b = 0.9$ )

Product	Description	Unit	Unit_Price_of _Materials(R MB)	Unit_Price_ of_Installati on(RMB)	Unit_Pri ce(RMB)	Quantit y	Price(RM B)
	1、规格型号：DN70						
	2、连接形式：焊接（氩弧 热镀锌 焊打底）						
钢管	3、压力等级：1.6MPA	m	34.64038	24.518	59.15838	49.04	2901.127
热镀锌	1、规格型号：DN50	m	28.07082	7.781	35.85182	57.37	2056.819

钢管	2、连接形式：丝接						
	3、压力等级：1.6MPA						
	1、规格型号：DN40						
热镀锌	2、连接形式：丝接						
钢管	3、压力等级：1.6MPA	m	20.69618	6.909	27.60518	162.09	4474.524
	1、规格型号：DN32						
热镀锌	2、连接形式：丝接						
钢管	3、压力等级：1.6MPA	m	17.97057	6.363	24.33357	132.16	3215.925
	1、规格型号：DN25						
热镀锌	2、连接形式：丝接						
钢管	3、压力等级：1.6MPA	m	13.18893	5.799	18.98793	116.07	2203.928
	1、规格型号：DN20						
热镀锌	2、连接形式：丝接						
钢管	3、压力等级：1.6MPA	m	9.530576	5.061	14.59158	163.3	2382.804
	1、规格型号：DN70						
热镀锌	2、连接形式：焊接						
弯头	3、压力等级：1.6MPA	个	12.63717	64.444	77.08117	2	154.1623
	1、规格型号：DN50						
热镀锌	2、连接形式：焊接						
弯头	3、压力等级：1.6MPA	个	5.054867	38.899	43.95387	2	87.90773
	1、规格型号：DN40						
热镀锌	2、连接形式：丝接						
弯头	3、压力等级：1.6MPA	个	3.829062	21.559	25.38806	6	152.3284
	1、规格型号：DN32						
热镀锌	2、连接形式：丝接						
弯头	3、压力等级：1.6MPA	个	2.552708	17.694	20.24671	17	344.194
	1、规格型号：DN25						
热镀锌	2、连接形式：丝接						
弯头	3、压力等级：1.6MPA	个	1.701805	15.072	16.77381	21	352.2499
	1、规格型号：DN20						
热镀锌	2、连接形式：丝接						
弯头	3、压力等级：1.6MPA	个	1.701805	15.072	16.77381	47	788.3688
热镀锌	1、规格型号：DN200*65	个	265.3805	194.95	460.3305	4	1841.322

三通	2、连接形式：焊接						
	3、压力等级：1.6MPA						
	1、规格型号：DN200*50						
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	265.3805	194.95	460.3305	10	4603.305
	1、规格型号：DN200*40						
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	265.3805	194.95	460.3305	16	7365.288
	1、规格型号：DN200*32						
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	265.3805	194.95	460.3305	18	8285.95
	1、规格型号：DN125*65						
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	93.51504	99.675	193.19	2	386.3801
	1、规格型号：DN125*40						
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	93.51504	99.675	193.19	4	772.7602
	1、规格型号：DN50*32						
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	30.3292	38.899	69.2282	2	138.4564
	1、规格型号：DN40*32						
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	17.69204	34.895	52.58704	2	105.1741
	1、规格型号：DN32*25						
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	15.1646	29.617	44.7816	2	89.5632
	1、规格型号：DN25*20						
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	10.10973	24.44	34.54973	15	518.246
	1、规格型号：DN32						
	2、连接形式：法兰连接						
静态平	3、压力等级：1.6MPA						
衡阀	4、材质：碳钢	个	299.8717	30.57	330.4417	3	991.325

静态平衡阀	1、规格型号：DN25						
	2、连接形式：法兰连接						
	3、压力等级：1.6MPA						
	4、材质：碳钢	个	290.0398	28.49	318.5298	4	1274.119
静态平衡阀	1、规格型号：DN20						
	2、连接形式：法兰连接						
	3、压力等级：1.6MPA						
	4、材质：碳钢	个	290.0398	28.49	318.5298	19	6052.067
Y型过滤器	1、规格型号：DN32						
	2、连接形式：丝接						
	3、压力等级：1.6MPA						
	4、材质：碳钢	个	166.355	30.49	196.845	3	590.5351
Y型过滤器	1、规格型号：DN25						
	2、连接形式：丝接						
	3、压力等级：1.6MPA						
	4、材质：碳钢	个	106.1841	23.67	129.8541	4	519.4163
Y型过滤器	1、规格型号：DN20						
	2、连接形式：丝接						
	3、压力等级：1.6MPA						
	4、材质：碳钢	个	70.78938	21.59	92.37938	19	1755.208
内丝球阀	1、规格型号：DN32						
	2、连接形式：丝接						
	3、压力等级：1.6MPA						
	4、材质：碳钢	个	46.0131	30.49	76.5031	6	459.0186
内丝球阀	1、规格型号：DN25						
	2、连接形式：丝接						
	3、压力等级：1.6MPA						
	4、材质：碳钢	个	33.62496	23.67	57.29496	8	458.3596
内丝球阀	1、规格型号：DN20						
	2、连接形式：丝接						
	3、压力等级：1.6MPA						
	4、材质：碳钢	个	26.54602	21.59	48.13602	38	1829.169
							57150



## 附录 D 示例建筑 B 布局设计计算表 ( $a = 0.9, b = 0.45$ )

表 D1 示例建筑 B 初始环路水力计算结果 ( $a = 0.9, b = 0.45$ )

	loop	pm	pj	fcu	pmj	balance
0	(80.694, 8.573, 2.954)	189305.6	4320.961	30000	223626.5	0.545
1	(62.619, 8.573, 2.954)	106654.7	4023.776	30000	140678.5	0.714
2	(56.594, 15.436, 2.954)	63044.62	4008.932	30000	97053.56	0.803
3	(50.569, 15.818, 2.954)	66541.64	4140.905	30000	100682.5	0.795
4	(56.594, 9.861, 2.954)	126189	4478.659	30000	160667.7	0.673
5	(13.432, 8.073, 2.954)	247337.6	2566.876	30000	279904.5	0.431
6	(82.582, 0.048, 2.954)	271433.3	4296.408	30000	305729.8	0.378
7	(19.957, 7.961, 2.954)	292315.8	4964.048	30000	327279.9	0.334
8	(80.582, 3.098, 2.954)	249223.8	4869.762	30000	284093.6	0.422
9	(76.057, -0.077, 2.954)	396561.4	6857.534	30000	433419	0.119
10	(15.432, 11.098, 2.954)	178509	2846.708	30000	211355.7	0.57
11	(47.862, 16.648, 2.954)	68872.78	2637.041	30000	101509.8	0.794
12	(33.082, 16.648, 2.954)	118215.2	2866.515	30000	151081.7	0.693
13	(25.692, 16.173, 2.954)	123560.2	2611.127	30000	156171.3	0.682
14	(27.057, 7.961, 2.954)	326605.6	4866.716	30000	361472.3	0.265
15	(45.982, 7.961, 2.954)	122094.5	4196.726	30000	156291.2	0.682
16	(68.957, -0.077, 2.954)	443538.9	7607.813	30000	481146.7	0.022
17	(62.432, 0.048, 2.954)	455204.5	6527.195	30000	491731.7	0
18	(41.457, 11.098, 2.954)	120376.9	4548.959	30000	154925.9	0.685
19	(35.557, 11.098, 2.954)	173453	3492.552	30000	206945.6	0.579
20	(33.557, 8.073, 2.954)	244172.1	5233.56	30000	279405.7	0.432
21	(39.457, 8.073, 2.954)	176221.4	6289.967	30000	212511.3	0.568
22	(60.432, 3.098, 2.954)	107908.9	4227.554	30000	142136.4	0.711
23	(65.082, 11.648, 2.954)	155583.6	4531.135	30000	190114.7	0.613
24	(65.432, 17.098, 2.954)	22064.27	3209.077	30000	55273.35	0.888
25	(60.682, 19.853, 2.954)	41335.09	3216.596	30000	74551.69	0.848

表 D2 示例建筑 B 调节管径后水力计算结果 ( $a = 0.9, b = 0.45$ )

	loop	pm	pj	fcu	pmj	balance
0	(80.694, 8.573, 2.954)	189305.6	4320.961	30000	223626.5	0.305
1	(62.619, 8.573, 2.954)	106654.7	4023.776	30000	140678.5	0.563
2	(56.594, 15.436, 2.954)	146041.7	5096.524	30000	181138.2	0.437
3	(50.569, 15.818, 2.954)	173619.6	5767.21	30000	209386.8	0.349
4	(56.594, 9.861, 2.954)	126189	4478.659	30000	160667.7	0.501
5	(13.432, 8.073, 2.954)	233477.3	2597.896	30000	266075.2	0.173
6	(82.582, 0.048, 2.954)	271433.3	4296.408	30000	305729.8	0.05
7	(19.957, 7.961, 2.954)	262127	4456.407	30000	296583.4	0.079
8	(80.582, 3.098, 2.954)	249223.8	4869.762	30000	284093.6	0.117
9	(76.057, -0.077, 2.954)	263402.4	6101.873	30000	299504.2	0.07
10	(15.432, 11.098, 2.954)	209730	2900.575	30000	242630.6	0.246
11	(47.862, 16.648, 2.954)	187498.3	4313.416	30000	221811.7	0.311
12	(33.082, 16.648, 2.954)	149436.2	2920.382	30000	182356.6	0.433
13	(25.692, 16.173, 2.954)	154781.2	2664.994	30000	187446.2	0.418
14	(27.057, 7.961, 2.954)	205649.7	4096.916	30000	239746.6	0.255
15	(45.982, 7.961, 2.954)	156118.1	4261.869	30000	190380	0.409
16	(68.957, -0.077, 2.954)	278146	6409.298	30000	314555.3	0.023
17	(62.432, 0.048, 2.954)	286748.4	5130.905	30000	321879.3	0
18	(41.457, 11.098, 2.954)	154400.6	4614.102	30000	189014.7	0.413
19	(35.557, 11.098, 2.954)	204674	3546.419	30000	238220.4	0.26
20	(33.557, 8.073, 2.954)	275393.1	5287.427	30000	310680.6	0.035
21	(39.457, 8.073, 2.954)	210245	6355.11	30000	246600.1	0.234
22	(60.432, 3.098, 2.954)	107908.9	4227.554	30000	142136.4	0.558
23	(65.082, 11.648, 2.954)	155583.6	4531.135	30000	190114.7	0.409
24	(65.432, 17.098, 2.954)	60375.22	4077.452	30000	94452.67	0.707
25	(60.682, 19.853, 2.954)	117129.1	4084.971	30000	151214.1	0.53

表 D3 示例建筑 B 调节阀后水力计算结果 ( $a = 0.9, b = 0.45$ )

	loop	pm	pj	fcu	pmj	balance
0	(80.694, 8.573, 2.954)	189305.6	19068.23	30000	238373.8	0.259
1	(62.619, 8.573, 2.954)	106654.7	18771.05	30000	155425.8	0.517

2	(56.594, 15.436, 2.954)	146041.7	19843.8	30000	195885.5	0.391
3	(50.569, 15.818, 2.954)	173619.6	20514.48	30000	224134.1	0.304
4	(56.594, 9.861, 2.954)	126189	19225.93	30000	175415	0.455
5	(13.432, 8.073, 2.954)	233477.3	10534.64	30000	274011.9	0.149
6	(82.582, 0.048, 2.954)	271433.3	4296.408	30000	305729.8	0.05
7	(19.957, 7.961, 2.954)	262127	4456.407	30000	296583.4	0.079
8	(80.582, 3.098, 2.954)	249223.8	4869.762	30000	284093.6	0.117
9	(76.057, -0.077, 2.954)	263402.4	6101.873	30000	299504.2	0.07
10	(15.432, 11.098, 2.954)	209730	34590.47	30000	274320.5	0.148
11	(47.862, 16.648, 2.954)	187498.3	36003.32	30000	253501.6	0.212
12	(33.082, 16.648, 2.954)	149436.2	34610.28	30000	214046.5	0.335
13	(25.692, 16.173, 2.954)	154781.2	34354.89	30000	219136.1	0.319
14	(27.057, 7.961, 2.954)	205649.7	43055.5	30000	278705.1	0.134
15	(45.982, 7.961, 2.954)	156118.1	14001.51	30000	200119.6	0.378
16	(68.957, -0.077, 2.954)	278146	6409.298	30000	314555.3	0.023
17	(62.432, 0.048, 2.954)	286748.4	5130.905	30000	321879.3	0
18	(41.457, 11.098, 2.954)	154400.6	4614.102	30000	189014.7	0.413
19	(35.557, 11.098, 2.954)	204674	40198.76	30000	274872.8	0.146
20	(33.557, 8.073, 2.954)	275393.1	5287.427	30000	310680.6	0.035
21	(39.457, 8.073, 2.954)	210245	38102.08	30000	278347.1	0.135
22	(60.432, 3.098, 2.954)	107908.9	12164.3	30000	150073.2	0.534
23	(65.082, 11.648, 2.954)	155583.6	12467.88	30000	198051.4	0.385
24	(65.432, 17.098, 2.954)	60375.22	12014.19	30000	102389.4	0.682
25	(60.682, 19.853, 2.954)	117129.1	12021.71	30000	159150.8	0.506

表 D4 示例建筑 B 初投资 ( $a = 0.9, b = 0.45$ )

Product	Description	Unit	Unit_Price_of_Materials (RMB)	Unit_Price_of_Installation (RMB)	Unit_Price (RMB)	Quantity	Price (RMB)
热镀锌管	1、规格型号: DN70 2、连接形式: 焊接 (氩弧焊打底) 3、压力等级: 1.6MPA	m	34.64038	24.518	59.15838	49.04	2901.127
热镀锌管	1、规格型号: DN50	m	28.07082	7.781	35.85182	57.37	2056.819

镀锌管	2、连接形式：丝接							
	3、压力等级：1.6MPA							
热镀锌管	1、规格型号：DN40							
镀锌管	2、连接形式：丝接						162.0	
	3、压力等级：1.6MPA	m	20.69618	6.909	27.60518	9		4474.524
热镀锌管	1、规格型号：DN32							
镀锌管	2、连接形式：丝接						132.1	
	3、压力等级：1.6MPA	m	17.97057	6.363	24.33357	6		3215.925
热镀锌管	1、规格型号：DN25							
镀锌管	2、连接形式：丝接						116.0	
	3、压力等级：1.6MPA	m	13.18893	5.799	18.98793	7		2203.928
热镀锌管	1、规格型号：DN20							
镀锌管	2、连接形式：丝接							
	3、压力等级：1.6MPA	m	9.530576	5.061	14.59158	163.3		2382.804
热镀锌弯头	1、规格型号：DN70							
镀锌弯头	2、连接形式：焊接							
	3、压力等级：1.6MPA	个	12.63717	64.444	77.08117	2		154.1623
热镀锌弯头	1、规格型号：DN50							
镀锌弯头	2、连接形式：焊接							
	3、压力等级：1.6MPA	个	5.054867	38.899	43.95387	2		87.90773
热镀锌弯头	1、规格型号：DN40							
镀锌弯头	2、连接形式：丝接							
	3、压力等级：1.6MPA	个	3.829062	21.559	25.38806	6		152.3284
热镀锌弯头	1、规格型号：DN32							
镀锌弯头	2、连接形式：丝接							
	3、压力等级：1.6MPA	个	2.552708	17.694	20.24671	17		344.194
热镀锌弯头	1、规格型号：DN25							
镀锌弯头	2、连接形式：丝接							
	3、压力等级：1.6MPA	个	1.701805	15.072	16.77381	21		352.2499
热镀锌弯头	1、规格型号：DN20							
镀锌弯头	2、连接形式：丝接							
	3、压力等级：1.6MPA	个	1.701805	15.072	16.77381	47		788.3688
热镀锌	1、规格型号：DN200*65	个	265.3805	194.95	460.3305	4		1841.322

热镀锌三通	2、连接形式：焊接							
	3、压力等级：1.6MPA							
热镀锌三通	1、规格型号：DN200*50							
热镀锌三通	2、连接形式：焊接	个	265.3805	194.95	460.3305	10	4603.305	
热镀锌三通	3、压力等级：1.6MPA							
热镀锌三通	1、规格型号：DN200*40							
热镀锌三通	2、连接形式：焊接	个	265.3805	194.95	460.3305	16	7365.288	
热镀锌三通	3、压力等级：1.6MPA							
热镀锌三通	1、规格型号：DN200*32							
热镀锌三通	2、连接形式：焊接	个	265.3805	194.95	460.3305	18	8285.95	
热镀锌三通	3、压力等级：1.6MPA							
热镀锌三通	1、规格型号：DN125*65							
热镀锌三通	2、连接形式：焊接	个	93.51504	99.675	193.19	2	386.3801	
热镀锌三通	3、压力等级：1.6MPA							
热镀锌三通	1、规格型号：DN125*40							
热镀锌三通	2、连接形式：焊接	个	93.51504	99.675	193.19	4	772.7602	
热镀锌三通	3、压力等级：1.6MPA							
热镀锌三通	1、规格型号：DN50*32							
热镀锌三通	2、连接形式：焊接	个	30.3292	38.899	69.2282	2	138.4564	
热镀锌三通	3、压力等级：1.6MPA							
热镀锌三通	1、规格型号：DN40*32							
热镀锌三通	2、连接形式：焊接	个	17.69204	34.895	52.58704	2	105.1741	
热镀锌三通	3、压力等级：1.6MPA							
热镀锌三通	1、规格型号：DN32*25							
热镀锌三通	2、连接形式：焊接	个	15.1646	29.617	44.7816	2	89.5632	
热镀锌三通	3、压力等级：1.6MPA							
热镀锌三通	1、规格型号：DN25*20							
热镀锌三通	2、连接形式：焊接	个	10.10973	24.44	34.54973	15	518.246	
热镀锌三通	3、压力等级：1.6MPA							
静态平衡阀	1、规格型号：DN32							
	2、连接形式：法兰连接							
	3、压力等级：1.6MPA							
	4、材质：碳钢	个	299.8717	30.57	330.4417	3	991.325	

静态平衡阀	1、规格型号：DN25 2、连接形式：法兰连接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	290.0398	28.49	318.5298	4	1274.119
静态平衡阀	1、规格型号：DN20 2、连接形式：法兰连接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	290.0398	28.49	318.5298	19	6052.067
Y型过滤器	1、规格型号：DN32 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	166.355	30.49	196.845	3	590.5351
Y型过滤器	1、规格型号：DN25 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	106.1841	23.67	129.8541	4	519.4163
Y型过滤器	1、规格型号：DN20 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	70.78938	21.59	92.37938	19	1755.208
内丝接球阀	1、规格型号：DN32 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	46.0131	30.49	76.5031	6	459.0186
内丝接球阀	1、规格型号：DN25 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	33.62496	23.67	57.29496	8	458.3596
内丝接球阀	1、规格型号：DN20 2、连接形式：丝接 3、压力等级：1.6MPA 4、材质：碳钢	个	26.54602	21.59	48.13602	38	1829.169
							57150

## 附录 E 示例建筑 B 布局设计计算表 ( $a = 1, b = 0$ )

表 E1 示例建筑 B 初始环路水力计算结果 ( $a = 1, b = 0$ )

	loop	pm	pj	fcu	pmj	balance
0	(80.694, 8.573, 2.954)	125438.7	4267.44	30000	159706.2	0.588
1	(62.619, 8.573, 2.954)	65205.79	3861.198	30000	99066.99	0.745
2	(56.594, 9.861, 2.954)	66104.89	3854.784	30000	99959.68	0.742
3	(50.569, 15.818, 2.954)	61955.19	4159.131	30000	96114.32	0.752
4	(56.594, 15.436, 2.954)	57553.56	4301.831	30000	91855.39	0.763
5	(13.432, 8.073, 2.954)	243667.2	2528.981	30000	276196.2	0.288
6	(82.582, 0.048, 2.954)	202004.9	4198.32	30000	236203.3	0.391
7	(19.957, 7.961, 2.954)	288645.4	4926.154	30000	323571.6	0.166
8	(80.582, 3.098, 2.954)	186919.4	5029.464	30000	221948.9	0.428
9	(76.057, -0.077, 2.954)	261262.2	6532.729	30000	297794.9	0.232
10	(15.432, 11.098, 2.954)	174838.6	2808.814	30000	207647.4	0.465
11	(47.862, 16.648, 2.954)	65202.39	2599.146	30000	97801.53	0.748
12	(33.082, 16.648, 2.954)	114544.8	2828.621	30000	147373.4	0.62
13	(25.692, 16.173, 2.954)	119889.8	2573.232	30000	152463.1	0.607
14	(27.057, 7.961, 2.954)	322935.2	4828.821	30000	357764.1	0.077
15	(45.982, 7.961, 2.954)	117508	4214.952	30000	151723	0.609
16	(68.957, -0.077, 2.954)	310732.8	7221.735	30000	347954.5	0.103
17	(62.432, 0.048, 2.954)	327888.6	6233.562	30000	364122.1	0.061
18	(41.457, 11.098, 2.954)	115790.5	4567.185	30000	150357.7	0.612
19	(35.557, 11.098, 2.954)	169782.6	3454.658	30000	203237.3	0.476
20	(33.557, 8.073, 2.954)	240501.7	5195.666	30000	275697.4	0.289
21	(39.457, 8.073, 2.954)	171634.9	6308.193	30000	207943.1	0.464
22	(60.432, 3.098, 2.954)	351362.7	6435.796	30000	387798.5	0
23	(65.082, 11.648, 2.954)	63087.61	3907.029	30000	96994.64	0.75
24	(65.432, 17.098, 2.954)	22064.27	3209.077	30000	55273.35	0.857
25	(60.682, 19.853, 2.954)	46158.94	2652.703	30000	78811.64	0.797

表 E2 示例建筑 B 调节管径后水力计算结果 ( $a = 1, b = 0$ )

	loop	pm	pj	fcu	pmj	balance
0	(80.694, 8.573, 2.954)	153338.2	4378.868	30000	187717.1	0.319
1	(62.619, 8.573, 2.954)	188490.7	5600.403	30000	224091.1	0.187
2	(56.594, 9.861, 2.954)	105614.5	4641.349	30000	140255.9	0.491
3	(50.569, 15.818, 2.954)	187001.8	6638.963	30000	223640.8	0.189
4	(56.594, 15.436, 2.954)	178436.6	7141.932	30000	215578.6	0.218
5	(13.432, 8.073, 2.954)	169068.2	2340.584	30000	201408.7	0.269
6	(82.582, 0.048, 2.954)	201309.1	4469.654	30000	235778.8	0.145
7	(19.957, 7.961, 2.954)	130870.8	3888.173	30000	164759	0.402
8	(80.582, 3.098, 2.954)	176670.8	4690.472	30000	211361.3	0.233
9	(76.057, -0.077, 2.954)	223654.5	6302.368	30000	259956.8	0.057
10	(15.432, 11.098, 2.954)	145320.9	2455.826	30000	177776.7	0.355
11	(47.862, 16.648, 2.954)	152606.8	3467.522	30000	186074.4	0.325
12	(33.082, 16.648, 2.954)	114544.8	2828.621	30000	147373.4	0.465
13	(25.692, 16.173, 2.954)	109745.8	2299.052	30000	142044.8	0.485
14	(27.057, 7.961, 2.954)	141240.5	3839.604	30000	175080.1	0.365
15	(45.982, 7.961, 2.954)	169500.3	5133.621	30000	204633.9	0.258
16	(68.957, -0.077, 2.954)	188986.3	6274.202	30000	225260.5	0.183
17	(62.432, 0.048, 2.954)	197137.1	5056.959	30000	232194	0.158
18	(41.457, 11.098, 2.954)	167782.8	5485.855	30000	203268.6	0.263
19	(35.557, 11.098, 2.954)	169782.6	3454.658	30000	203237.3	0.263
20	(33.557, 8.073, 2.954)	240501.7	5195.666	30000	275697.4	0
21	(39.457, 8.073, 2.954)	223627.2	7226.863	30000	260854	0.054
22	(60.432, 3.098, 2.954)	205147.8	5119.379	30000	240267.2	0.129
23	(65.082, 11.648, 2.954)	195708.3	5857.329	30000	231565.7	0.16
24	(65.432, 17.098, 2.954)	60375.22	4077.452	30000	94452.67	0.657
25	(60.682, 19.853, 2.954)	121952.9	3521.078	30000	155474	0.436

表 E3 示例建筑 B 调节阀后水力计算结果 ( $a = 1, b = 0$ )

	loop	pm	pj	fcu	pmj	balance
0	(80.694, 8.573, 2.954)	153338.2	19126.14	30000	202464.4	0.266
1	(62.619, 8.573, 2.954)	188490.7	17581.44	30000	236072.1	0.144



2	(56.594, 9.861, 2.954)	105614.5	16622.39	30000	152236.9	0.448
3	(50.569, 15.818, 2.954)	187001.8	18620	30000	235621.8	0.145
4	(56.594, 15.436, 2.954)	178436.6	29260.33	30000	237697	0.138
5	(13.432, 8.073, 2.954)	169068.2	38992.92	30000	238061.1	0.137
6	(82.582, 0.048, 2.954)	201309.1	4469.654	30000	235778.8	0.145
7	(19.957, 7.961, 2.954)	130870.8	76345.06	30000	237215.8	0.14
8	(80.582, 3.098, 2.954)	176670.8	31400.38	30000	238071.2	0.136
9	(76.057, -0.077, 2.954)	223654.5	6302.368	30000	259956.8	0.057
10	(15.432, 11.098, 2.954)	145320.9	2455.826	30000	177776.7	0.355
11	(47.862, 16.648, 2.954)	152606.8	3467.522	30000	186074.4	0.325
12	(33.082, 16.648, 2.954)	114544.8	2828.621	30000	147373.4	0.465
13	(25.692, 16.173, 2.954)	109745.8	2299.052	30000	142044.8	0.485
14	(27.057, 7.961, 2.954)	141240.5	76296.49	30000	247537	0.102
15	(45.982, 7.961, 2.954)	169500.3	36823.52	30000	236323.8	0.143
16	(68.957, -0.077, 2.954)	188986.3	16388.69	30000	235375	0.146
17	(62.432, 0.048, 2.954)	197137.1	7585.58	30000	234722.6	0.149
18	(41.457, 11.098, 2.954)	167782.8	37175.75	30000	234958.5	0.148
19	(35.557, 11.098, 2.954)	169782.6	35144.56	30000	234927.2	0.148
20	(33.557, 8.073, 2.954)	240501.7	5195.666	30000	275697.4	0
21	(39.457, 8.073, 2.954)	223627.2	7226.863	30000	260854	0.054
22	(60.432, 3.098, 2.954)	205147.8	5119.379	30000	240267.2	0.129
23	(65.082, 11.648, 2.954)	195708.3	8886.122	30000	234594.5	0.149
24	(65.432, 17.098, 2.954)	60375.22	7106.244	30000	97481.46	0.646
25	(60.682, 19.853, 2.954)	121952.9	6549.871	30000	158502.8	0.425

表 E4 示例建筑 B 初投资 ( $a = 1, b = 0$ )

Product	Description	Unit	Unit_Price_ of_Materials (RMB)	Unit_Price_ of_Installati on(RMB)	Unit_Pric e(RMB)	Quantity	Price(RMB)
1、规格型号: DN70							
热镀锌 钢管	2、连接形式: 焊接 (氩弧 焊打底)	m	34.64038	24.518	59.15838	33.7	1993.637

3、压力等级：1.6MPA							
1、规格型号：DN50							
热镀锌	2、连接形式：丝接						
钢管	3、压力等级：1.6MPA	m	28.07082	7.781	35.85182	165.74	5942.08
1、规格型号：DN40							
热镀锌	2、连接形式：丝接						
钢管	3、压力等级：1.6MPA	m	20.69618	6.909	27.60518	57.02	1574.048
1、规格型号：DN32							
热镀锌	2、连接形式：丝接						
钢管	3、压力等级：1.6MPA	m	17.97057	6.363	24.33357	150.81	3669.746
1、规格型号：DN25							
热镀锌	2、连接形式：丝接						
钢管	3、压力等级：1.6MPA	m	13.18893	5.799	18.98793	112.66	2139.18
1、规格型号：DN20							
热镀锌	2、连接形式：丝接						
钢管	3、压力等级：1.6MPA	m	9.530576	5.061	14.59158	164.9	2406.151
1、规格型号：DN70							
热镀锌	2、连接形式：焊接						
弯头	3、压力等级：1.6MPA	个	12.63717	64.444	77.08117	2	154.1623
1、规格型号：DN50							
热镀锌	2、连接形式：焊接						
弯头	3、压力等级：1.6MPA	个	5.054867	38.899	43.95387	4	175.8155
1、规格型号：DN40							
热镀锌	2、连接形式：丝接						
弯头	3、压力等级：1.6MPA	个	3.829062	21.559	25.38806	2	50.77612
1、规格型号：DN32							
热镀锌	2、连接形式：丝接						
弯头	3、压力等级：1.6MPA	个	2.552708	17.694	20.24671	20	404.9342
1、规格型号：DN25							
热镀锌	2、连接形式：丝接						
弯头	3、压力等级：1.6MPA	个	1.701805	15.072	16.77381	20	335.4761
热镀锌	1、规格型号：DN20						
弯头	2、连接形式：丝接	个	1.701805	15.072	16.77381	57	956.1069

3、压力等级：1.6MPA							
1、规格型号：DN450*80							
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	2021.947	543.543	2565.49	2	5130.98
1、规格型号：DN200*65							
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	265.3805	194.95	460.3305	2	920.6611
1、规格型号：DN200*50							
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	265.3805	194.95	460.3305	18	8285.95
1、规格型号：DN200*40							
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	265.3805	194.95	460.3305	2	920.6611
1、规格型号：DN200*32							
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	265.3805	194.95	460.3305	18	8285.95
1、规格型号：DN125*50							
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	93.51504	99.675	193.19	2	386.3801
1、规格型号：DN125*40							
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	93.51504	99.675	193.19	2	386.3801
1、规格型号：DN50*32							
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	30.3292	38.899	69.2282	4	276.9128
1、规格型号：DN40*32							
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	17.69204	34.895	52.58704	4	210.3481
1、规格型号：DN32*25							
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通	3、压力等级：1.6MPA	个	15.1646	29.617	44.7816	2	89.5632
1、规格型号：DN25*20							
热镀锌	2、连接形式：焊接						
三通		个	10.10973	24.44	34.54973	19	656.445

3、压力等级：1.6MPA							
1、规格型号：DN32							
2、连接形式：法兰连接							
静态平	3、压力等级：1.6MPA						
衡阀	4、材质：碳钢	个	299.8717	30.57	330.4417	4	1321.767
1、规格型号：DN25							
2、连接形式：法兰连接							
静态平	3、压力等级：1.6MPA						
衡阀	4、材质：碳钢	个	290.0398	28.49	318.5298	3	955.5895
1、规格型号：DN20							
2、连接形式：法兰连接							
静态平	3、压力等级：1.6MPA						
衡阀	4、材质：碳钢	个	290.0398	28.49	318.5298	19	6052.067
1、规格型号：DN32							
2、连接形式：丝接							
Y型过	3、压力等级：1.6MPA						
滤器	4、材质：碳钢	个	166.355	30.49	196.845	4	787.3802
1、规格型号：DN25							
2、连接形式：丝接							
Y型过	3、压力等级：1.6MPA						
滤器	4、材质：碳钢	个	106.1841	23.67	129.8541	3	389.5622
1、规格型号：DN20							
2、连接形式：丝接							
Y型过	3、压力等级：1.6MPA						
滤器	4、材质：碳钢	个	70.78938	21.59	92.37938	19	1755.208
1、规格型号：DN32							
2、连接形式：丝接							
内丝接	3、压力等级：1.6MPA						
球阀	4、材质：碳钢	个	46.0131	30.49	76.5031	8	612.0248
1、规格型号：DN25							
2、连接形式：丝接							
内丝接	3、压力等级：1.6MPA						
球阀	4、材质：碳钢	个	33.62496	23.67	57.29496	6	343.7697

	1、规格型号：DN20						
	2、连接形式：丝接						
内丝接	3、压力等级：1.6MPA						
球阀	4、材质：碳钢	个	26.54602	21.59	48.13602	38	1829.169
Total							59398.88

同济大学

同济大学

## 致谢

感谢三年来家人朋友们的支持，你们是我坚强的后盾。

感谢许老师及学院其他老师对我的培养和指导。

感谢课题组的小伙伴和班级同学。

同济大学

同济大学



## 在读期间发表的学术成果

### 个人简历:

关航, 女, 1998 年 10 月生。

2020 年 7 月毕业于郑州大学 建筑环境与能源应用工程专业 获学士学位。

2020 年 9 月入同济大学攻读硕士研究生。

### 已发表论文:

- [1] Hang Guan, Tong Xiao, Wei Luo, Jiefan Gu, Ruikai He, Peng Xu, Automatic fault diagnosis algorithm for hot water pipes based on infrared thermal images, *Building and Environment*, 2022. 218: 109111, ISSN 0360-1323. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109111>.
- [2] Zhisen Chen, Hang Guan, Xiaolei Yuan, Tian Xie, Peng Xu, Rule-based generation of HVAC duct routing, *Automation in Construction*, 2022. 139: 104264, ISSN 0926-5805. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104264>.

同济大学

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文《基于多目标组合优化的空调水系统自动设计》，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律 responsibility 由本人承担。

学位论文作者签名：关航

日期：2023年 3月 16日

## 同济大学学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；允许论文被查阅和借阅。学校有权将本学位论文的全部或部分内 容授权编入有关数据库出版传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于（在以下方框内打“√”）：

保密，在\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

不保密。

学位论文作者签名：关航

日期：2023年 3月 16日

指导教师签名：许鹏

日期：2023年 3月 16日

### 七、学位论文答辩委员会决议

姓名	关航	学号	2030267	所在学科/专业	供热供燃气工程及空调工程
指导教师	许鹏	答辩日期	2023.3.15	答辩地点	开物楼A413
论文题目	基于多目标组合优化的空调水系统管路自动设计				

关航同学的硕士学位论文《基于多目标组合优化的空调水系统管路自动设计》以暖通空调水系统的自动设计方法为研究对象，研究成果对提高暖通空调水系统设计的自动化具有一定的指导意义。

论文将水系统管路布局设计问题描述为多末端障碍规避的正交分支管路问题，采用网络图建模及并行搜索方法，得到了管路优化布局方案；建立了水力计算模型，通过变管径和调节阀门开度改进水系统管路的平衡度；提出了初成本、水力平衡度、综合能耗等三个指标评价水系统管路自动设计结果的合理性。

论文目标明确，框架完整，思路清晰，模型及论证合理，结论可信，体现了作者具有较扎实的理论基础和专业知识，具备一定从事科学研究工作和解决实际工程问题的能力。

关航同学答辩过程阐述清晰，思路明确，能正确回答答辩委员提出的问题。论文达到了硕士学位论文水平。经无记名投票表决，四位答辩委员中，四位同意建议授予关航工学硕士学位，并推荐其申请优秀硕士学位论文。

答辩委员会主席签名：

潘毅群

2023年3月15日

答辩委员会共 4 人，经表决，4 人建议授予申请人硕士学位。根据《同济大学学位授予工作细则》<sup>[注]</sup>（在□内划“√”）：

申请人可在一年内修改论文，申请重新答辩一次。

建议授予申请人硕士学位。

建议不授予申请人硕士学位。

推荐为同济大学优秀硕士学位论文。

答辩委员会成员签名	职务	姓名	职称	单位	签名
	主席	潘毅群	教授	同济大学	潘毅群
	委员	于航	教授	同济大学	于航
		许鹏	教授	同济大学	许鹏
		李玮伟	副教授	同济大学	李玮伟
秘书	叶蔚	副教授	同济大学	叶蔚	

注：根据《同济大学学位授予工作细则》第十一条规定：

1. 申请人获得全体答辩委员会成员三分之二以上（含）同意票，为建议授予申请人硕士学位；
2. 申请人获得全体答辩委员会成员二分之一以上（含）、三分之二以下（不含）同意票，申请人可在一年内修改论文，申请重新答辩一次；
3. 申请人获得全体答辩委员会成员二分之一以下（不含）同意票，为建议不授予申请人硕士学位。