



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文
(专业学位)

多联机冷媒管路自动生成算法研究

姓 名：董丽妍

学 号：2232750

学 院：机械与能源工程学院

学科门类：工学

专业学位类别：土木水利

专业领域：人工环境工程（含供热、通风及空调工程）

研究方向：建筑智能化

指导教师：许鹏

行业导师：

联合培养单位：

二〇二五年三月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A thesis submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master of Engineering

**Research on the Automatic Generation
Algorithm of Refrigerant Pipe Routing for
Variable Refrigerant Flow Air Conditioning
System**

Candidate: Dong Liyan

Student Number: 2232750

School/Department: School of Mechanical
Engineering

Categories: Engineering

First-level Discipline/Degree: Civil Engineering

Second-level Discipline/Degree's Field: Built
Environment

Research Fields: Building Automation

Supervisor: Xu Peng

Associate Supervisor:

Joint Training Institution:

March 2025

多联机冷媒管路自动生成算法研究

董丽妍

同济大学

摘要

传统的多联机冷媒配管设计要求设计人员具备丰富的工程经验,考虑允许配管长度和高低差限制、空间限制等诸多因素,以确保提供合理准确的设计结果并保证快速出图,但上游建筑设计和需求的反复变化会导致设计人员需要反复修改设计结果,再加上分歧管与管线的连接绘制具有一定的复杂性,大大增加时间成本的投入。现有的相关研究方法主要聚焦于空调水系统,而多联机制冷剂系统中存在分歧管这一管道连接件,会大大增加连接难度,并且需要考虑允许配管长度和允许高低差对管路生成的影响。因此,为了适当减轻重复性的劳动成本,为设计人员提供快速出图的设计辅助工具,本文提出了多联机空调系统冷媒管路自动生成的方法。

本论文首先开展自动系统分区,基于全年逐时负荷数据和建筑平面几何信息,采用层次聚类方法完成系统初步分区,同时,将多联机冷媒配管长度和高低差的设计约束参数化,通过预估路径长度与高差,对初始分区结果进行二次优化。接着采用改进的逃逸图法构建建筑障碍空间表达模型,再采用并行搜索的改进蚁群算法以四通数量最少,管长最短和管路分布均匀性最佳为优化目标,实现障碍规避的多联机空调系统冷媒管路布局设计。此外,本文梳理冷媒管路中分歧管与配管的标准连接模式,并将其归类为 12 种典型连接形式,构建可操作化的数据结构模型。通过图遍历与广度优先搜索方法对布置结果中的连接节点进行排序,再依据分歧管插入形式依次叠加计算,进而实现分歧管与上下游管线的自动关联,确保生成三维管路系统的结构完整性。

本文提出的研究方法已在常规公共建筑上得到测试和验证,基于 Python 和 Revit 实现了暖通空调系统冷媒管路自动化设计从分区到出图的全过程,其中涉及住宅建筑,学校建筑,办公建筑,医院建筑与商业建筑,共十栋。本文选取四栋建筑展示冷媒管路自动生成的结果,设计结果表明,算法运行时长均在 200s 以内,能够节约时间成本;通过统计连接错误的管段数量与管段总数,计算得到的布管允许错误率均控制在 5%以内,管道自动布置效果良好。

关键词: 冷媒管路自动布线, 多目标寻优, 分歧管连接算法, 蚁群算法

ABSTRACT

The traditional design of variable refrigerant flow (VRF) air conditioning system relies heavily on the expertise and experience of designers, considering factors such as permissible piping length and elevation differences constraints and spatial limitations to ensure accurate and efficient design results while enabling rapid drafting. However, frequent changes in upstream architectural designs and project requirements often necessitate repeated modifications, significantly increasing time costs. Additionally, the complexity of connecting divergence tubes to refrigerant pipelines further complicates the design process. Existing research methods primarily focus on chilled water systems, whereas VRF systems introduce divergence tubes as connection components, substantially increasing routing complexity. Furthermore, factors such as allowable piping length and elevation differences must be considered in refrigerant pipeline generation. Therefore, to reduce repetitive manual workload and provide designers with an efficient drafting tool, this study proposes an automatic VRF refrigerant piping generation method.

This study first conducts automatic system zoning based on hourly load calculations and building geometry. A hierarchical clustering method is employed for initial zoning, followed by a secondary zoning process that formulates and quantifies the VRF system's piping length and height difference constraints. The piping layout space is then modeled using an escape graph method, and an ant colony optimization (ACO) approach with a concurrent search strategy is applied to optimize the refrigerant piping layout with objectives of minimizing the number of four-way branches, shortening pipeline length, and ensuring uniform pipeline distribution while avoiding obstacles. To achieve realistic connections between divergence tubes and pipelines, this study identifies 12 possible connection types, determining missing and replaceable elements of pipelines. A breadth-first search algorithm is utilized to traverse and rank three-way branch components along the pipeline from the starting point to each terminal. The final piping configuration is obtained through iterative calculations based on the insertion of divergence tubes.

The proposed method has been tested and validated in conventional public

buildings. A complete automated VRF refrigerant piping design workflow—from system zoning to drafting—has been implemented using Python and Revit. The method has been applied to 10 buildings, including residential, educational, office, hospital, and commercial structures. Four buildings are selected to demonstrate the results of the automatic refrigerant piping generation. The design results show that algorithm runtime is within 200 seconds, significantly reducing time costs. By statistically analyzing the number of connection errors in the pipe segments against the total number of segments, the calculated allowable error rate for the piping is within 5%, demonstrating the effectiveness of the automated piping layout.

Key Words: Automatic refrigerant piping layout, multi-objective optimization, divergence tube access algorithm, ant colony optimization

目录

摘要	I
ABSTRACT	II
第 1 章 引言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 管道布线设计研究现状	4
1.2.1 管道布线设计研究现状	4
1.2.2 国内外研究总结	7
1.3 研究内容及技术路线	8
1.3.1 研究内容	8
1.3.2 技术路线与文章架构	9
第 2 章 多联机空调系统自动分区	11
2.1 概述	11
2.2 基于层次聚类的系统初步分区	11
2.3 基于设计规则的系统二次分区	13
2.3.1 设计规则简化	14
2.3.2 分区优化算法	15
2.4 本章小结	17
第 3 章 冷媒管路平面布管算法	19
3.1 概述	19
3.2 基于改进逃逸图的布局空间建模	19
3.3 基于并行搜索蚁群算法的管路生成	21
3.3.1 室内机布置及干管管线提取	21
3.3.2 冷媒管道连接规则	23
3.3.3 管路布置的约束条件	24
3.3.4 目标函数设置	25
3.3.5 管路自动生成算法	26
3.4 本章小结	31
第 4 章 基于规则的分歧管自动接入算法	32
4.1 概述	32
4.2 问题描述	32
4.3 基于广度优先搜索的分歧管排序	32
4.4 分歧管连接关系生成	35
4.5 本章小结	41

第 5 章 结果评估及配管长度校核	42
5.1 管线布局结果存储	42
5.1.1 冷媒配管数据存储与选型	42
5.1.2 冷凝水管选型方法	44
5.1.3 节点数据存储	44
5.2 允许配管长度校核	45
5.2.1 配管长度定义	46
5.2.2 允许配管长度和高低差校核方法	47
5.3 管路自动连接方案综合评价	47
5.4 本章小结	49
第 6 章 冷媒管路自动生成案例	50
6.1 冷媒管道自动布线设计案例	50
6.1.1 示例建筑 A——办公建筑	50
6.1.2 示例建筑 B——学校建筑	54
6.1.3 示例建筑 C——医院建筑	59
6.2 冷媒管道自动布线设计寻优案例	65
6.3 本章小结	68
第 7 章 结论与展望	69
7.1 结论与成果	69
7.2 创新点	70
7.3 局限性与展望	70
参考文献	71
致谢	77
个人简历、在读期间发表的学术成果	78

第1章 引言

1.1 研究背景及意义

随着建筑能效标准的不断提高，暖通空调系统的设计正朝着更高效、智能化和节能化方向发展。其中，多联机空调系统（Variable Refrigerant Flow, VRF）具有控制灵活、节能环保、环境舒适、运转平稳且易于安装和维修等优势，在商业、住宅和办公建筑中得到广泛应用^[1,2]。与传统的风冷热泵或冷水机组相比，多联机空调系统通过电子膨胀阀动态调节冷媒流量，使多台室内机可共用同一台或一组室外机，根据实际负荷需求精确控制冷媒供给，从而提高综合部分负荷效率（Integrated Part Load Value, IPLV）^[3]并降低能耗。然而，多联机空调系统的冷媒管路布局较为复杂，其设计受到建筑空间布局、设备布置、制冷剂流动特性及安装规范的影响，且管路布局的合理性会对系统的运行效率、安装成本以及后期维护的便捷性等产生关键影响。因此，如何高效、智能地生成冷媒管路布局，成为多联机系统优化设计中的核心问题。

目前，多联机冷媒管路的设计仍然主要依赖人工经验，设计师需要综合考虑建筑结构、冷媒流量需求、压力损失等多种因素，完成方案设计，负荷计算，设备选型与布置，管道布局设计等步骤，再采用手动的方式绘制管线方案并逐步优化、反复修改。然而，这种传统方法尚存在诸多不足：

(1) 设计及绘图过程耗时费力

在传统设计过程中，一旦建筑布局或设备位置稍有变动，整个冷媒管路设计方案及绘图结果可能需要大幅调整，增加了重复性工作。在进行管路布局结果校核时，设计师需要手动计算配管长度、分歧管位置、冷媒流量分配等，耗时较长，且这些计算通常是繁琐且涉及多变量的，存在计算错误的风险，后续可能影响系统运行稳定性。在手动校核过程中，一旦发现设计结果不满足设计手册中的配管长度限制，则可能需要重新划分系统分区，并重新绘制图纸，这种情况不仅使得设计周期进一步延长，还会导致反复修改和沟通，增加项目成本^[4]。

(2) 方案优化不足，冷媒分布不均

为了赶上工程进度，现有的人工设计方法通常以满足基本连接需求为主，而缺乏对多种设计方案的对比，难以针对冷媒配管长度、冷媒流动均匀性、能效最优等要素进行全局优化。并且，由于冷媒管路设计高度依赖设计人员的经验和技能，缺乏统一的设计标准和优化工具，不同设计师的设计思路和方案可能存在较

大差异，在面对同一项目时，可能会采用不同的设计策略，难以保证最优方案。而在实际工程中，冷媒管路的长度和布局直接影响冷媒流动阻力和系统整体能效。管路过长或布置过于复杂会增加冷媒在管道内流动的阻力，导致压缩机工作负担增加，系统能效下降。如果设计人员不进行管路长度和布局优化，可能会导致系统能耗增大，甚至出现冷媒供给不足、制冷效果不理想的情况。此外，长距离输送还可能加剧制冷剂温度波动，进而影响设备的制冷效率。由于多联机系统是多台室内机共享一台或一组室外机，在设计时还需要确保冷媒均匀分布，才能保证各个室内机的运行效率和房间舒适度。然而，在人工设计条件下，由于计算和分析不足，冷媒流量的分配可能出现偏差，部分室内机可能面临制冷不足、功耗增加，甚至影响整个系统稳定性的问题。

(3) 未充分应用 BIM 技术，协同能力不足

建筑信息模型（Building Information Modeling, BIM）技术能够将建筑的几何形态、材料属性、施工过程等信息进行数字化整合，并贯穿建筑的全生命周期，以实现信息的高效共享和协同管理^[5-7]。这一技术不仅帮助工程技术人员更准确地理解和利用建筑数据，还能为设计团队、施工方及运维管理单位提供统一的信息平台。在工程实践中，BIM 技术的应用可以优化设计流程、减少施工中的信息偏差，同时提升项目管理效率，从而降低成本并缩短工期。BIM 技术作为新一代建筑设计技术，能够集成建筑结构、机电系统及暖通设备信息，提升设计效率和可视化能力。在建筑设计中，结构、机电（电气、给排水）等系统的设计往往通过 BIM 进行协同，建筑师、结构工程师和电气工程师可以实时共享信息、同步调整方案。然而，暖通系统的设计通常不充分集成到 BIM 流程中，导致建筑和暖通系统之间协同不足，可能会出现局部优化但整体不协调的情况。另外，传统的 CAD 图纸和 3D 建模通常依赖于手动输入，设计师需要手动校对建筑结构与冷媒管路的兼容性，往往会导致设计冲突，造成返工和延误。并且现有技术未能将 BIM 与暖通设计中的智能布管算法结合，仍主要用于基础展示，而非辅助优化。

(4) 暖通领域自动化设计水平较低

空调系统的设计通常受到建筑结构和功能需求的制约，其中许多设计环节具有一定的重复性，而创新性要求相对有限，这为实现自动化设计提供了可能。近年来，为了提升设计效率并减少人工依赖，研究人员开始尝试将自动化技术引入暖通空调系统的设计流程。2020 年，在前人研究的基础上，陈喆提出了基于非监督式学习的暖通空调系统自动化设计流程框架，旨在利用人工智能技术构建通用化的自动设计工具。该框架主要包括四个核心模块：BIM 模型检查、负荷计算及自动分区、空调系统类型与环路定义、以及设备与管路布置，如图 1.1 所示。

在此框架下,建筑几何信息和结构数据被整合进 EnergyPlus 软件进行自动负荷计算。同时,通过风口布置算法确定最佳送风位置,并采用最小生成树算法和 A* 算法分别解决管路连接和障碍规避问题。该设计框架为实现暖通空调系统的自动化设计提供了强有力的技术支持,并显示了将智能化技术应用于暖通行业中的巨大潜力。

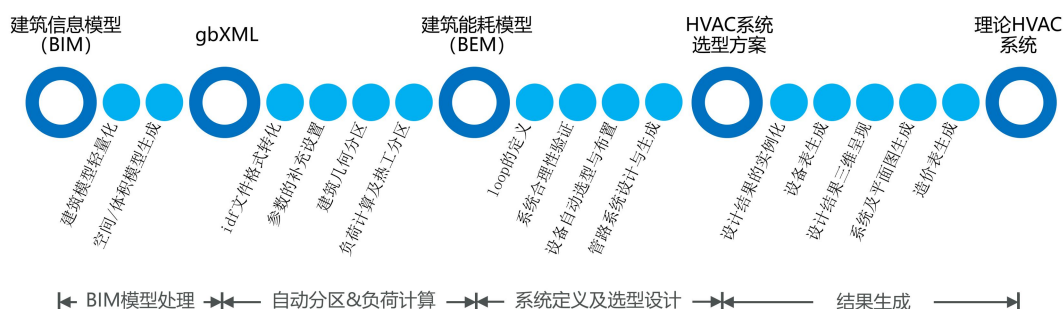


图 1.1 暖通空调系统自动化设计流程

建筑和暖通空调设计是一项较为复杂的任务,且随着设计任务量的增加,时间周期的缩短以及用户对能效和舒适度的更高追求,设计师越来越多地倾向于利用计算机设计工具来辅助他们完成任务。基于此, M.W. Ellis^[8]对各类集成建筑设计工具(Integrated Building Design Systems, IBDS)以及专家系统的发展进行了梳理,这些工具涵盖了建筑能耗模拟、设备选型与仿真、系统设计与选型、计算机辅助设计(Computer-Aided Design, CAD)、建筑声学分析以及建筑规范解析等方面。作者指出,尽管这类工具具备较大的应用潜力,但由于操作较为复杂、部分软件成本较高且计算时间较长等问题,其实际应用推广受到限制,发展进程未达到预期,有待针对上述问题作出改进。目前,暖通行业的智能化程度仍相对较低,尤其是在冷媒管路设计领域,几乎没有专门的自动化设计工具,设计师通常只能依赖一些通用制图软件,如 AutoCAD 或 Revit,根据管路设计基本要求,手动绘制和调整管路布局,这种方式不仅效率较低,且这些工具本身并不具备自动化优化功能,导致设计方案的质量和优化水平受到限制。AutoCAD 主要用于二维平面绘制,但由于缺乏对空间维度的全面考虑,在实际施工过程中,可能会遇到空间受限或管道排布不合理的问题,影响设计的精度和可行性。相比之下,Revit 作为 BIM 建模工具,虽然支持三维建模和手动布管,但其当前功能更倾向于依赖设计人员手动绘制管道,缺乏智能优化算法的辅助。因此,如何在 Revit 环境下集成智能布管优化技术,实现管路的自动化三维布局,仍然具有很大的研究价值。

针对当前多联机空调系统中存在的问题,并结合暖通空调系统向自动化和智能化发展的趋势,本研究拟探索多联机空调系统的自动化设计方法。在 BIM

数据解析、负荷计算与室内机选型布置的基础上,提出一种结合自动分区,避障空间建模和智能优化算法的冷媒管路自动布置方案,以实现三维可视化布局。该方法旨在减少人工干预,提高设计效率,使设计人员能够快速获取符合多目标优化要求的冷媒管路方案,并在建筑方案调整时实现自动优化,从而降低重复绘制的工作量。本文的研究成果可为暖通行业的智能化升级提供技术支持,推动行业向更高效、智能和数据驱动的方向发展。

1.2 管道布线设计研究现状

1.2.1 管道布线设计研究现状

目前,管道布线设计(Pipe Route Design, PRD)在航空发动机、船舶管道、工厂布局、天然气分配系统、机器人路径规划等领域均有广泛应用,旨在通过自动化的手段减少项目生产时间和设计相关成本。自 20 世纪 70 年代以来,管道布线优化设计已被研究数十年^[9],经历了从单目标、单约束模型到多目标、多约束数学模型的演进,从二维空间扩展到三维空间,研究深度和广度不断提升。早期的路径规划算法包括 A*算法^[10]、Dijkstra 算法^[11]等传统方法,而随着人工智能技术的发展,越来越多的智能优化算法被广泛应用于 PRD 领域^[12],主要有遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[13]、蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)^[14]、粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)^[15]等。针对不同应用场景,研究人员不断改进现有算法或采用混合优化方法,以提升路径寻优效果。多联机冷媒管路设计属于 PRD 中的多末端混合管路设计问题,混合管路包括单管路和分支管路,其中分支管路是一类具有一个起始点和多个终止点的管路类型。

在研究初期,学者们主要聚焦于两点间的最短路径问题。1961 年,C. Y. Lee^[16]提出迷宫算法(Maze Algorithm, MA),通过划分均匀网格的方式标记障碍物所在网格,在无障碍网格中逐步确定下一节点,基于波的扩散原理找到起点和终点的最短可行路线。1991 年,Aurenhammer^[17]对 Voronoi 图进行解析,奠定了骨架搜索法的基础,通过构造骨架结构来降低计算量。1993 年,Reginaldo G^[18]采用整数编程和线性网络优化的方法,提出一个优化工艺机房组件布置和管道路由的策略。1998 年,Schmidt^[19]首次使用 Hightower^[20]提出的逃逸算法对管道布线进行优化。1971 年,Newell^[21]在 Nicholson^[22]的算法基础上,研究分支管道布置算法。2002 年,基于实际工程问题,Park 和 Storch^[23]沿用网格划分空间的方法,提出一种满足几何约束的细胞生成方法来规划分支管道布线,将分支管道视为

“端分叉”和“中分叉”这两种简单形式的复合。然而，分支连接的实现需要人工参与，需人为输入主管和分支管线信息，并预先确定分支节点的位置。

随着优化算法的发展，越来越多的学者采用启发式算法求解管道路由问题。1991年，Colormi^[24]等人提出蚁群优化算法，指出蚁群的行为是高度结构化的。该算法通过模拟蚁群在觅食过程中种群所体现的协同配合，用于求解旅行商问题（Travelling Salesman Problem, TSP）。之后，该算法被用于解决多种场景的优化问题。

在此基础上，有学者开展了针对分支管路的研究。2006年，Asmara 和 Nienhuis^[25]采用单元分解和数学规划法开发了一款自动管道系统，将 DPSO 算法和 Dijkstra 算法结合起来，可用于优化分支管道的连接。DPSO 算法用于优化管道路由顺序，每个粒子对应一种排序方式；Dijkstra 算法以成本最低为目标，确定最短无碰撞路径。该方法可以处理多个系统管道的布置问题，但随着管路数量增加，计算成本显著增加。2008年，邬君^[26]将分支管路系统视为多个独立支管的组合，采用蚁群算法优化单种群，再采用多种群协同进化算法优化整体管路布局，构建了船舶分支管路系统的三维仿真模型。

在航空管路布局优化方面，2011年，Qiang Liu^[27]等人基于斯坦纳树理论，提出了一种离散粒子群优化算法来规划航空发动机直线支管走管布局，该算法采用吸引算子和能量函数来规划离散图空间中最短的无碰撞连接网络。2015年，为了降低计算复杂度，该学者^[28]还提出了一种基于曼哈顿可视图（Manhattan Visibility Graph, MVG）的直角管路生成算法，相比于原来的 RSMTO 算法，能够有效地减少网格节点数至 n （ n 为起终点和障碍物顶点数之和），从而显著缩小搜索范围。他进一步提出基于避障斯坦纳树的多目标管道布局模型，优化分支长度、分支点数量及管道平滑度，并采用多目标粒子群优化算法求解。此外，他^[29]结合直线斯坦纳最小树（Rectilinear Steiner Minimal Tree, RSMT）^[30]理论，构建以管道长度、分支点数、能耗和弯头数量为优化目标的多目标进化算法（MOEA/D），来提高寻优效率。2016年，Yanfeng Qu^[31]针对航空发动机三维管路设计，采用自适应八叉树建模，并结合最大最小蚁群优化算法（Max-Min Ant System, MMAS）^[32]，优化管道长度、弯头数及固有频率。同年，该学者将问题转向正交三维管路设计，采用逃逸图和轨迹图建模，将管长和弯头数作为优化设计目标，在此基础上，引入并行搜索策略与动态更新方法，进一步改进最大最小蚁群优化算法，使其能够高效求解直线支管的路径规划问题。相较于 Liu 的研究结果，该方法在分支点数、计算时间以及适应度函数方面都更具优势。

在多管路布局优化方面，2015年，王运龙^[33]等人采用多蚁群进化算法，用于实现多管路的布局优化，并注重与人的交互。2016年，姜文英^[34]融合蚁群算

法与遗传算法,用以解决单管路设计问题,并将改进的蚁群算法作为协同进化过程中各种群的进化方法,用协同进化算法解决多管路、分支管路优化布置问题。

近年来,管路布局优化方法不断向智能化和高效计算方向发展。2020年,针对船舶管道布线设计,Zongran Dong^[35]提出用改进A*算法(A*-Router)求解单管路路由设计,用改进GA算法(A*-GA-Router)优化多管路路由,并采用改进的Steiner树框架,结合已有的单管路由算法,提出了通用性更强的分支管路布线方法。2022年,该学者^[36]针对多管道和分支管道的布线问题,提出一种基于Pareto解和人工选择的组合布线方法。同年,Xuanyi Bian^[37]等人提出基于改进A*算法的单管、支管和多管的自动路由方法,通过引入“块迭代”和动态权值,提高算法的精度和效率。在此基础上,利用Python和OpenGL^[38]开发了支持自动管路设计、优化结果可视化及与三维设计软件双向交互的船舶管道路由自动设计系统,提高了算法的可操作性。Ueng SK和Huang HK^[39]提出基于距离场的管道算法来严格对标空间限制和安全规定,首先将工作空间转换为三维图像,并在自由空间上计算距离场,然后,通过剥离距离场和分割3D图像,在工作空间外创建一个无碰撞的可行空间,再采用改进的Dijkstra方法来计算管道路径。2023年,Youngsu^[40]等人提出一种基于课程的强化学习方法,用于具有高频修改需求的船舶管道布线,可快速响应变更,并且在减少寻路时间和最小化弯头数量上表现良好。Jisang Ha^[41]等人提出结合专家知识和启发式搜索算法的船舶管道布线方法。在专家系统中,利用排布模板模型处理与管道布线相关的专家知识,再结合布置评价模型评估管道布局可行性。在管道布线中,以管道长度、弯头数、空间因子和专家知识可行性指标为目标函数,采用启发式搜索算法进行设计。除此之外,很多研究学者还采用其他优化算法求解管路优化布置问题,如最短路径快速算法^[42],快速扩展随机树算法^[43]等。

以上研究列出了不同领域采用的管路布置算法,均不能直接应用于暖通空调系统中的管路布局设计,但其研究方法和思路为暖通空调管路设计提供了有力参考。在暖通空调领域,2003年,Benachir Medjdoub^[44]采用面向对象的方法针对低压热水机房的设备选型、定位及三维管道拓扑的自动生成进行研究,在这一过程中设计者可以在用户界面上参与修正,提供了交互的便利性。2009年,该学者^[45]在吊顶风机盘管系统研究中引入案例推理(Case Base Reasoning, CBR)方法,以解决空调系统复杂几何问题。CBR通常包含检索、重用、更正和存储四个阶段,并结合机器学习对象数据库进行优化。在此过程中,该学者将不同类型的房间归类至相应的案例数据库,从而实现建筑平面内风机盘管与风口的初步连接。然而,早期方法主要关注几何层面,局限性较大。因此,2015年,该学者^[46]对案例库进行了重新定义,使其能够生成参数化解,并加强用户交互功能。类似

于 CBR 的核心思想, Georg Suter^[47]提出了选择、聚合、分解三种操作,并构建了布局操作表达式,以基于现有建筑房间布局模型生成新的布局模型。在此过程中,房间内各元素的空间关系通过有向加权网络图加以明确表达。2017 年, Aurelien Bres^[48]等人开发了一种采用最小生成树算法自动生成 HVAC 配电子系统的方法,然而,该方法需要设计师预先确定风机盘管等输配节点的位置,且在早期设计阶段主要用于建筑性能模拟,并未考虑碰撞、管件生成、分支管路等问题。2023 年, Hang Guan 将多目标优化的蚁群算法应用于空调水系统管道设计,并建立了自动调平模型和设计方案综合评价体系。

1.2.2 国内外研究总结

国内外学者针对管路布线设计开展了大量研究,涉及船舶、航空航天、机器人等诸多领域。其中,船舶工业和航空航天领域的管路布局设计研究较为成熟,涵盖单管路、多管路和分支管路,采用的算法涉及单一优化算法、混合算法以及改进算法。这些成果在提升布线效率、优化路径长度、减少连接件数量等方面取得了显著进展,为本文冷媒管路优化设计提供了可借鉴的建模思路与算法框架。

在暖通空调领域,针对多联机空调系统冷媒管路自动设计的研究几乎处于空白状态。目前,多数学者采用网格划分方法进行布局空间建模,算法鲁棒性不高。针对冷媒管路系统的整体布线优化和三维模型生成的研究数量有限,缺乏可直接应用于工程实践的系统化解决方案,从立管到多个室内末端连接的全流程自动化建模与三维图纸转换技术尚未成熟,限制了暖通自动化设计水平的提升。

冷媒管路的连接方式与空调水系统类似,但存在关键区别,冷媒管路中的三通位置需实例化为分歧管,主配管经分歧管分流后形成两条不在同一直线上的配管。这种差异使得同一拓扑结构在三维图纸上的表现完全不同(如图 1.2 所示),在水管连接中采用三通构件,而在冷媒管道连接中则需要用分歧管及其附属构件替代,从而改变了原有管道结构。另外,水系统的优化设计主要以最小化管道长度和减少弯头数量为目标,并在计算过程中结合输入的障碍物信息进行避障布置。而冷媒管道的优化设计需要额外考虑冷媒分布的均匀性并限制四通数量,以保障系统稳定性并减少能源浪费。上述差异决定了空调水系统的优化设计方法难以直接适用于冷媒系统,亟需进一步研究和完善针对冷媒管道特性的优化设计方法。

综上所述,本文在借鉴船舶机舱管路和空调水系统管道优化设计方法的基础上,结合冷媒系统的结构特性与运行约束,围绕章节 1.3 所述的研究内容展开研究。

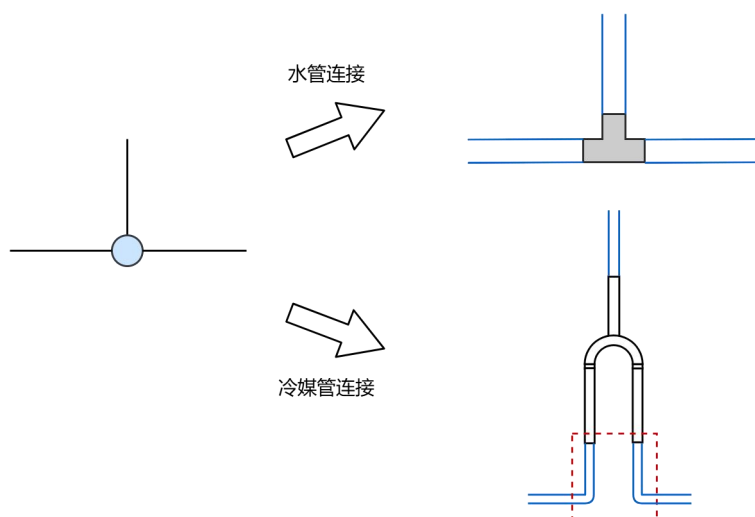


图 1.2 相同拓扑连接在水管和冷媒管中的差异

1.3 研究内容及技术路线

1.3.1 研究内容

基于图 1.1 所示的暖通空调系统自动化设计流程,已有相关人员针对 BIM 模型预处理,室内设备自动选型与布置,空调风、水系统输配自动化设计等方面展开研究,本文要做的是将该工作继续扩展,进一步完成多联机空调系统的自动分区以及冷媒管路自动布局与连接。在实际工程中,制冷剂管道的连接与水系统输配管路的连接存在一些相似之处,但也有很大差异。

a. 先前研究中采用默认的分区方式,而对于多联机系统而言,系统分区方案直接影响系统规模和配管长度计算,因此,在进行布管设计之前,必须优先确定合理的系统分区。

b. 在先前的研究中,水系统输配设计通过建立水力计算模型,以尽可能规避水力失调的问题。而冷媒管道的设计无需进行水力计算,但需要优化冷媒分布均匀性,并严格校核允许配管长度和允许高低差。

c. 在水系统的连接关系中,通常采用垂直且对称的三通构件连接三段管道。而在冷媒管道设计中,分歧管作为关键连接构件,与管路的连接更为复杂,且手动连接和调整过程耗时较长。

本论文的研究对象为多联机空调系统的冷媒管路布局设计。研究内容主要分为以下四个部分:

(1) 多联机空调系统自动分区算法研究

本文结合建筑能耗模型提供的建筑各房间全年逐时负荷计算结果及 gbXML 文件中存储的建筑平面几何信息,首先采用层次聚类方法将空调分区过程数据化、自动化,实现相同负荷特性房间的自动聚类,完成对建筑的初步分区。随后,估算各分区待生成的冷媒管配管长度和高低差,依据设计手册中的系统配管长度要求进行二次分区。

(2) 冷媒管路平面布局优化算法研究

多联机空调系统的管路设计需要避免冷媒管道与障碍物(结构柱等)以及末端设备发生碰撞,找到管道可行的布局空间,构建避障路由图。在走廊管路设计时,主要考虑走廊内设备、柱子等物理约束,并应尽可能靠墙布置;在房间管路设计时,采用并行搜索的蚁群算法进行路径寻优,通过构建多目标优化函数(最小化四通数量,最短路径长度,最佳冷媒分布均匀性),得到最优布局方案。

(3) 分歧管自动接入管路算法研究

在确定冷媒管道的整体拓扑结构之后,本论文采用广度优先搜索(Breadth-First Search, BFS)方法,从起点依次搜索管道分支结构,并对管路中的分歧管进行排序。结合设计规范和连接关系约束,对管道及其附件进行偏移、调整、重置等操作,以确保实现分歧管与管路的连接。

(4) 管路自动连接方案定量校核及综合评价

由于多联机系统设计对允许配管长度和允许高低差有极为严格的限制,因此需要对生成的设计方案进行定量校核。若不满足要求,需重新调整分区进行布管;若满足要求,则可进一步对该设计结果的合理性进行定量评价,评价其运行时间和允许错误率。此外,在冷媒管路布局优化设计阶段,设置不同的目标函数权重值会得到不同的寻优设计结果。为此,本研究构建综合评价体系,从项目成本、系统稳定性等多个维度对方案进行量化分析,以辅助设计师决策。

1.3.2 技术路线与文章架构

本文的技术路线如图 1.3 所示。

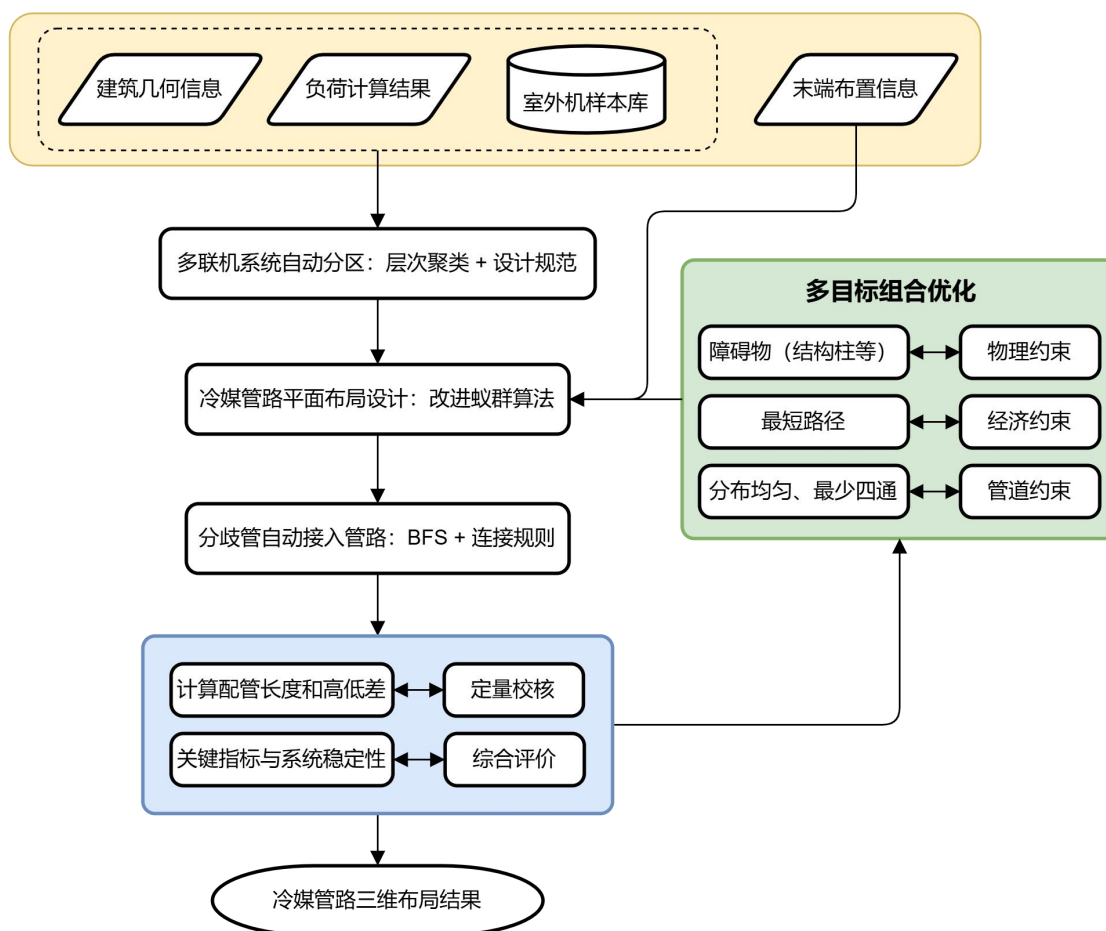


图 1.3 文章技术路线

本文第二章介绍了多联机空调系统自动分区算法；第三章介绍了多目标优化的冷媒管路平面布局设计算法；第四章提出了分歧管自动接入管路算法；第五章是对管路自动连接结果的校核及评估；第六章将本文提出的冷媒管路自动设计方法应用于实际工程建筑进行验证；第七章为结论与展望部分。

第2章 多联机空调系统自动分区

2.1 概述

在多联机系统设计中,空调分区需要综合考虑房间负荷特性、空间布局与功能、使用时间和频率、楼层、朝向、配管长度等多个因素,以确保空调系统的舒适性和稳定性。系统分区是多联机系统自动设计的关键环节,合理的系统分区是自动设计成功的必要条件。传统的人工设计方法需要设计师综合以上因素,结合个人经验确定分区结果。若采用计算机程序辅助分区,则必须提取和量化关键影响因素,作为算法的输入,以实现科学合理的自动分区。合理的空调系统分区可以确保室外机容量与实际负荷相匹配,避免因设备选型过大或过小而导致能效下降;同时,通过优化分区,使冷媒管道尽可能缩短,充分考虑冷媒管井位置,并优化分歧点位置,可以减少冷媒流动的压力损失,提高系统效率。因此,优化系统分区对于多联机空调系统的设计至关重要。

本章基于层次聚类和设计规则自动划分空调区域。

2.2 基于层次聚类的系统初步分区

聚类分析用于将未标记的对象分成若干组,使同一组对象之间的相似性最大化,而使不同组对象之间的相似性最小化^[49]。层次聚类(Hierarchical Clustering)^[50]是一种基于树状结构的聚类方法,旨在构建由不同粒度的聚类组成的分层结构,可用于依据建筑负荷计算结果自动划分空调区域。本文采用凝聚型层次聚类方法^[51](图2.1,纵轴表示聚类的相似性度量)对各房间逐时负荷进行分析,把每个空调房间作为一个簇,每个簇为该房间8760小时的逐时负荷数据所组成的高维空间点,进而可以计算高维空间中簇与簇之间的距离和相似度,不断合并距离最小的两个簇,直至最后合成一个簇。据此挖掘建筑负荷特性,递归地对数据进行合并或分裂,自动划分出初步的空调分区结果。

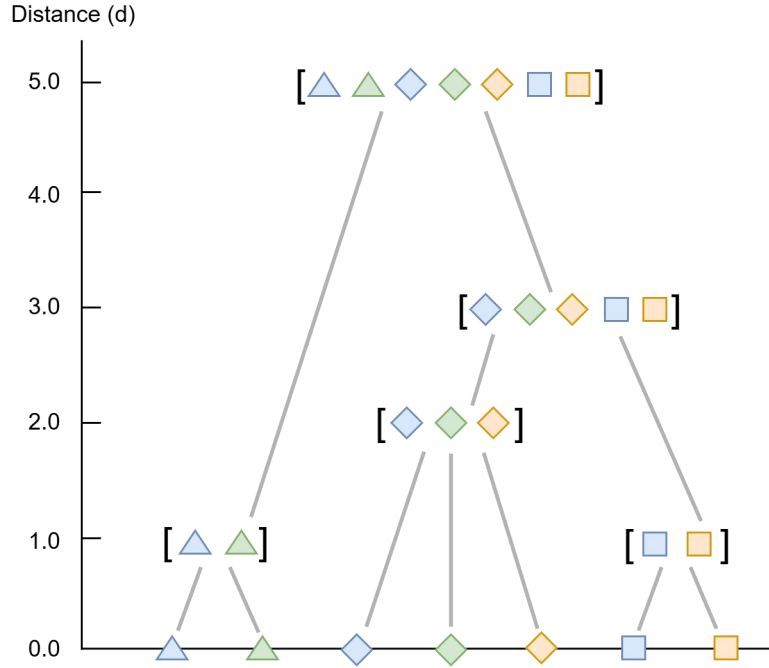


图 2.1 层次聚类示意

当涉及到距离度量时,时间序列聚类中应用最广泛的距离度量方式包括欧几里得距离,皮尔逊相关系数,斯皮尔曼距离和动态时间规整^[52,53]。考虑到负荷曲线特性,数值敏感性和计算时间的限制,本文在对数据点和数据点的距离,数据点和组合数据点的距离进行计算时,选择欧几里得距离^[54]作为距离度量, n 维空间内两点之间的欧几里得距离计算表达式如下:

$$D_{Euclidean} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2.1)$$

式中, x_i 和 y_i 分别表示点 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和点 $Y(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 在第 i 个维度上的坐标值, $i \in [1, n]$ 。

目前,用于计算两个组合数据点间距离的常见方法有三种,分别为 Single Linkage, Complete Linkage 和 Average Linkage^[55,56]。为避免极端值的影响,保障簇结构的稳定性,选择 Average Linkage 用于距离计算。在评估簇间相似性时,可计算簇内各数据点与另一簇所有数据点的平均距离,并将其作为衡量标准。若该平均距离较小,则表明这两个簇之间的相似性较高,从而具有更大的合并可能性^[57]。簇间距离的计算表达式见(2.2)。

$$D(C_i, C_j) = \frac{1}{|C_i| \cdot |C_j|} \sum_{x_i \in C_i} \sum_{x_j \in C_j} d(x_i, x_j) \quad (2.2)$$

式中, $|C_i|$ 和 $|C_j|$ 分别表示簇 C_i 和 C_j 中的元素个数, $d(x_i, x_j)$ 是簇 C_i 中的点 x_i 和簇 C_j 中的点 x_j 之间的距离。

采用后验的方法确定层次聚类的聚类数 k 值。给定 k 的取值范围，截断聚类树，取不同 k 值下的聚类结果，利用簇内簇间误差平方和比率 (Within Cluster Sum Of Squares To Between Cluster Variation Ratio, WCBCR) [58] 衡量聚类的紧密性和分离度。WCBCR 越小，聚类效果越好，即簇内紧密性更强，簇间分离度更高。选出聚类效果最优时所对应的聚类数 k ，将自下而上的按簇间距离排列好的数据划分为 k 个簇，即 k 个分区，此时迭代终止，即可得到层次聚类的分区结果。WCBCR 的计算公式如下：

$$WCBCR = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{x_i \in \Omega_j} d^2(\omega_j, x_i)}{\sum_{1 \leq p < q \leq k} d^2(\omega_p, \omega_q)} \quad (2.3)$$

式中， k 是指聚类的数目， Ω_j 是第 j 个簇的样本集合， ω_j 是第 j 个簇的中心， $d^2(\omega_j, x_i)$ 用于计算各样本点到簇中心的平方距离， $d^2(\omega_p, \omega_q)$ 用于计算不同簇中心之间的平方距离。

根据负荷特性完成房间聚类之后，将负荷聚类结果与建筑房间的空间布局信息（包括房间几何信息、防火防烟分区信息）结合，进一步自动规划空调分区内部的房间分配。将负荷特性相似且空间位置相近、处于同一防火分区内的房间划分为同一分区。该部分算法需对房间负荷特性和空间相似度进行组合优化，遍历聚类分区内房间，将聚类分区里空间距离偏离其他房间的离群房间转移到负荷特性相似，靠近分区几何中心且在同一防火分区内的分区内，当优化目标函数 P （计算表达式见(2.4)）最小时，实现最优的分区结果。添加此优化目标函数，可以避免将负荷特性相似但空间相距甚远的房间合并为同一分区，也可以避免将空间邻近但负荷特性差异极大的房间合并为同一分区，进一步保证了分区的合理性。

$$P = \lambda_1 \sum_C \sum_{i,j \in C} D_{load}(i, j) + \lambda_2 \sum_C \sum_{i,j \in C} D_{space}(i, j) \quad (2.4)$$

式中， C 为聚类分区，邻接矩阵 $D_{load}(i, j)$ 为第 i, j 个房间的负荷特性相似度（计算表达式见(2.5)），邻接矩阵 $D_{space}(i, j)$ 为房间 i, j 形心点的欧氏距离，若房间跨越防火分区，则距离设为无穷大。 λ_1, λ_2 分别为负荷权重系数，空间相似度权重系数。

$$D_{load}(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{房间 } i \text{ 和 } j \text{ 在同一负荷分区} \\ 1, & \text{房间 } i \text{ 和 } j \text{ 在不同负荷分区} \end{cases} \quad (2.5)$$

2.3 基于设计规则的系统二次分区

2.3.1 设计规则简化

根据负荷特性和空间布局划分的空调分区可以为多联机系统分区提供一个初步结果，除此之外，区别于其他的空调系统，多联机系统分区还要重点考虑配管长度对分区的限制^[59]，以保障系统的稳定运行。

通过解析存储了建筑信息的 gbXML 文件，获取多联机室外机位置，冷媒管井位置信息以及各房间的长、宽、高、几何形状等方面的数据，采用提取关键字的方式自动识别 gbXML 文件中的建筑塔楼、裙房屋顶、设备层或设备平台位置的数据，确定放置室外机的位置坐标；同时自动提取冷媒管井位置信息，取其形心点作为位置坐标。在系统分区这一环节，尚未生成布管结果，所以需要对配管长度进行估算。依据选定的室外机样本系列，结合建筑平面布局，自动估算待生成冷媒管道的配管长度及室内机与室外机之间的高差，以检验其是否满足该样本系列所规定的配管长度限制条件。

根据多联机室外机摆放位置及当前运行的楼层平面计算室外机和室内机之间的高度差 H （计算表达式见(2.6)），记室内机高度为 z_{pos_indoor} ，室外机高度为 $z_{pos_outdoor}$ 。室外机在上与室外机在下这两种情况所对应的允许高低差不同，故还需要对室内机和室外机的位置关系做出判断。再根据多联机室外机摆放位置及冷媒管井位置，初步规划冷媒管线走向。以第一分歧管至最远室内机距离 L_0 为先决判断条件，确定距离冷媒管井最远的空调房间，以其形心点位置坐标作为最远室内机的位置坐标，估算 L_0 。考虑到实际走管需要对障碍物进行规避导致冷媒管道长度增加，以及估算时第一分歧管的位置尚不确定，故在对配管长度进行估算时考虑乘以 1.2 的富余系数。根据多联机室外机摆放位置、冷媒管井位置及最远室内机预计布置位置计算室外机至最远室内机的距离 L 。同样地，考虑到避障和室外机在屋面上存在摆放位置的差异，预留一定的富裕值，来保障系统分区的合理性及后续正常运行。

$$H = |z_{pos_outdoor} - z_{pos_indoor}| \quad (2.6)$$

$$L_0 = 1.2 \times (|x_{pos_indoor} - x_{pos_shaft}| + |y_{pos_indoor} - y_{pos_shaft}| + |z_{pos_outdoor} - z_{pos_indoor}|) \quad (2.7)$$

$$L = 1.2 \times (|x_{pos_outdoor} - x_{pos_shaft}| + |y_{pos_outdoor} - y_{pos_shaft}| + |z_{pos_outdoor} - z_{pos_indoor}| + |x_{pos_indoor} - x_{pos_shaft}| + |y_{pos_indoor} - y_{pos_shaft}|) \quad (2.8)$$

对于超过配管长度限制的房间，系统首先会优先考虑室外机的布置位置和冷媒管井所处位置是否合理，若不合理，则需对其位置进行调整或适当调整分区规模，以确保所有的多联机系统分区都能满足系统冷媒配管长度的要求，保障空调

系统的节能运行。满足设计要求的每一个多联机系统会被存储成一个“VRFLoop”，该“VRFLoop”里面包含该多联机系统的名称和该分区内的各房间信息，用于后续继续进行室内机和冷媒管路的布置。

2.3.2 分区优化算法

在本研究中，针对 VRF 系统的分区优化问题，提出了一种基于空间关系和配管长度计算的二次分区优化方法（见图 2.2）。首先，以基于建筑负荷计算结果（LoadDict）及建筑物几何信息（bembody）生成的初步分区方案为依托，进一步结合室外机样本系列、冷媒管配管长度限制及安装空间的约束，对分区方案进行优化调整，以提高系统能效^[60,61]。当建筑存在设备平台时，优先将室外机布置在设备平台上；若无设备平台，优先将室外机集中安置于设备层；若无设备层，则结合楼层结构选择合适的平台或屋顶区域进行安装。在冷媒管井位置未知时，室外机位置亦可以提供一定的参考。接着，结合冷媒管高低差约束条件，计算分区内室外机与室内机之间的高差。同时，引入配管长度的约束条件，判断分区是否满足单一系统供冷需求，若第一分歧管或室外机至最远室内机距离超过阈值，则适当调整分区方案，以减少制冷剂传输损耗。此外，为满足实际施工条件，算法对分区方案进行循环优化，在不违背建筑空间限制的前提下，适当调整室外机布局，优化系统结构，最终生成符合工程需求的优化分区结果。

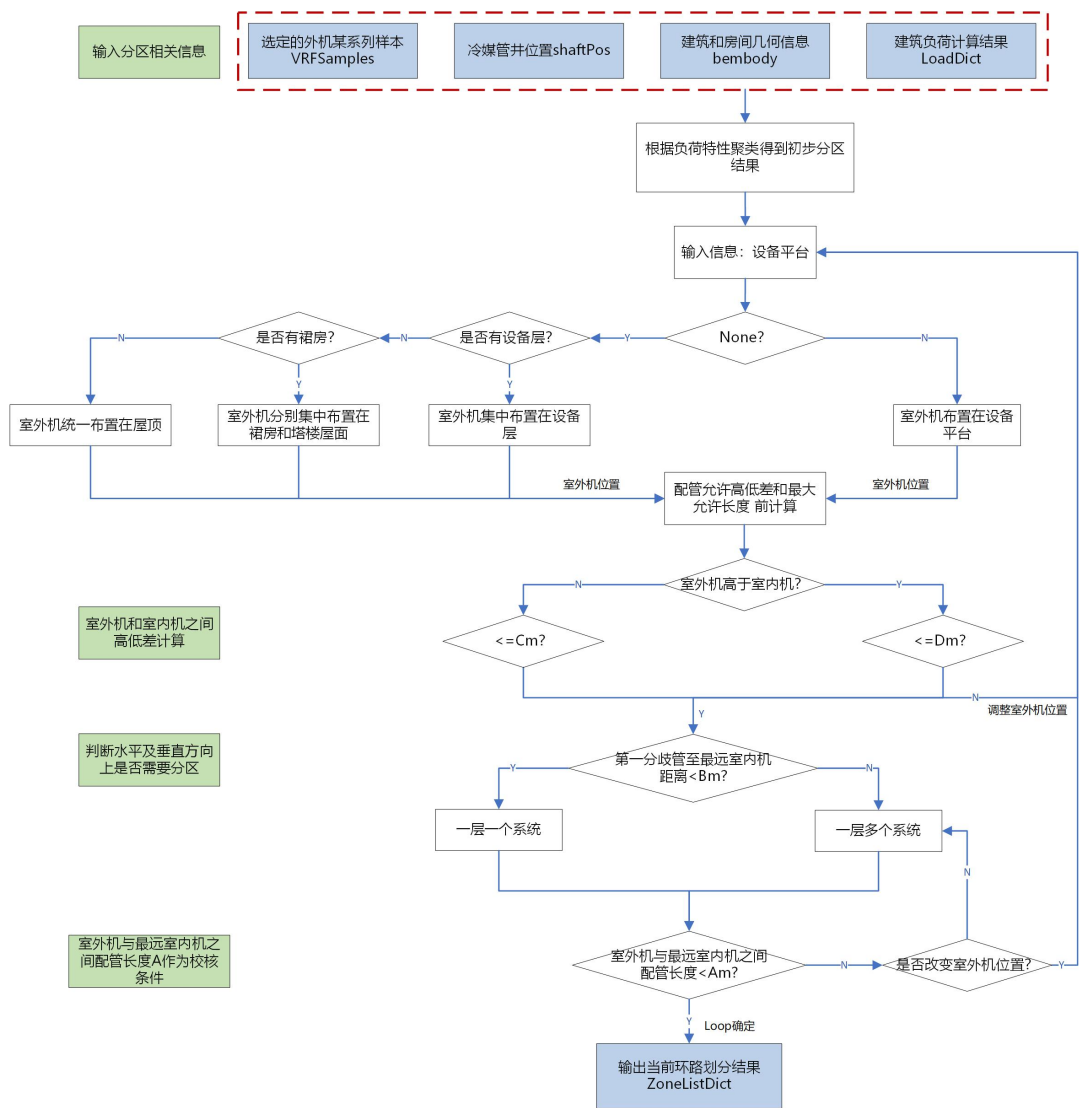


图 2.2 空调分区优化逻辑示意图

表 2.1 是基于规则对系统分区进行优化的部分算法伪代码，运行完成后返回环路划分结果 ZoneList。

表 2.1 分区优化算法伪代码

输入：bembody, LoadDict, shaftPos

输出：ZoneList

VRFSourceSamples := search_db_info(database, "vrfsource_sample");

A, B, C, D, E := 查询设计手册; Area := 整合的建筑几何信息;

Zoning := 聚类分区结果; floorsList := 楼层列表;

deviceFloor := 设备层高度; podiumHeight := 裙房高度; floorHeight := 屋顶高度;

ZoneList := []

```

for f in floorsList do
    flag := True
    while flag do
        outdoorPos := shaftPos
        heightDifference, outToInHeight := height_difference_calculation(outdoorPos, Area, C,
D)

        bifurcationToIn := bifurcationTube_to_indoorUnit(outdoorPos, Area)
        if heightDifference <= outToInHeight then
            if bifurcationToIn < B then
                ZoneList.append(Zoning[f])
            else then
                ZoneList.append(zone1)
                ZoneList.append(zone2)
            else then
                break
        outToInLength := outdoor_to_indoorUnit(outdoorPos, Area, ZoneList)
        if outToInLength < A then
            flag := False
        else then
            break
    return ZoneList

```

2.4 本章小结

本章主要介绍了空调系统的自动分区方法,具体包括基于凝聚型层次聚类的负荷特性分析,结合空间布局和防火分区的聚类结果优化,以及基于配管长度计算的二次分区优化。

本文的系统分区主要考虑负荷特性、空间几何、防火分区、配管长度对分区的影响。具体而言,首先,依据负荷计算结果采用凝聚型层次聚类算法初步划分空调区域,在该过程中,通过 WCBCR 指标确定聚类数,以确保簇内紧密性和簇间分离度的平衡。随后,结合建筑空间布局信息,构建优化目标函数 P ,通过房间的遍历与转移调整分区结果,直至目标函数收敛,从而优化聚类分区内部的房间分配。此外,针对多联机系统配管长度的限制,本章在管路生成前进行了方案

规划,通过预估走管路径和简化配管计算,提前计算分区内的配管长度和高低差。若评估结果不满足设计手册中的限制条件,则需要进一步细分空调区域。最终,本章实现了科学、合理的多联机空调系统自动分区,并输出了环路划分结果。

第3章 冷媒管路平面布管算法

3.1 概述

本研究主要针对常规建筑平面内的多联机空调系统，重点探讨其管路生成与优化方法，不涉及富有设计感的曲面建筑等特殊建筑形式。研究中所考虑的空调房间类型以矩形房间或可近似为矩形的房间为主，以确保方案适用于主流建筑布局，提升工程设计的普适性与可操作性。

为了提高多联机空调系统管路布局的设计效率，本章节首先明确了管路设计的关键约束条件，包括冷媒分布均匀性、管道长度、管道附件、空间布局及障碍物等因素，并建立了管路、设备及建筑空间之间的几何表达模型，以便在优化过程中充分考虑避障。在此基础上，引入改进的智能算法对冷媒管路设计进行优化，以自动化的方式辅助管路布置与绘图。

3.2 基于改进逃逸图的布局空间建模

常见的空间建模方法包括栅格法^[62]、可视图法^[63]、Voronoi 图法^[17,64,65]、逃逸图法^[20,66]、角度约束图法^[67,68]等，各有优劣。

- 栅格法：该方法将空间离散化成固定大小的网格单元，适用于连续或自由布管场景。计算速度由网格数量决定，网格划分越细，计算量和存储需求也会大幅增加。
- 可视图法：该方法计算的是点与点之间的可视连通性，主要用于最短路径搜索，适用于自由空间中的任意布线问题（如机器人路径规划）。
- Voronoi 图法：用于找到距离障碍物最远的“安全路径”，通常用于自动布管或城市规划，但需要作正交化处理，且计算复杂度较高。
- 角度约束图法：该方法在构造路径时施加 0° 和 90° 的角度约束，确保路径方向符合特定规则，计算效率较高，但不能完全适应复杂障碍物环境。
- 逃逸图法：由从终端和障碍物顶点向空间边界延伸的水平或垂直方向的线构成，计算效率较高，具备良好的避障能力。

综合考虑冷媒管路的正交特性、末端点与主管管的高精度坐标（位置坐标精度均为 0.001）需求以及障碍物的影响，选择逃逸图法进行布局空间建模。逃逸图法采用水平和垂直方向的延伸线生成连通图，能够严格对应正交管路布置要求，

无需额外调整路径方向。另外，逃逸图法直接使用实际管道坐标和设备几何边界进行建模，不受栅格精度限制，并且在扩展路径时遇到障碍物或边界自动停止。

将逃逸图法用于管路布局空间建模的基本思路为：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），从终端和障碍顶点沿水平和垂直方向延伸直线，一直延伸到被障碍物或边界阻挡。由于逃逸图顶点数目会影响到计算效率和精度，并且在冷媒管道布局中，需要增加约束条件来满足布管要求，所以在构造逃逸图时采取以下几点简化措施。

1. 将室内机的进出水口点看作末端连接点，将室内机的实际几何边界与位于房间内的柱子一样看作障碍物，并将其简化为矩形。

2. 将局部构件看作点，将管道看作边。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，将末端设备和柱子适当扩大，延伸末端点位置使其位于已扩大的设备边界上，将该点称为虚拟设备连接点。在确定房间内的管路布局后，连接实际设备连接点与虚拟设备连接点。

3. 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或边缘，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。本文将室内机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。

基于实际的工程布管需要，再对逃逸图的建模对象作如下处理：

- (1) 计算房间内所有设备的最小包络矩形作为初始布局边界（图 3.1 所示的红色边界）。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。

- (2) 延伸虚拟设备连接点、天花机各个侧边、风管机后侧边、柱子的所有顶点，遇到障碍物（设备和柱子）和布局边界停止，如图 3.1(a)和(b)所示。

- (3) 删去不必要的边和点，以减少计算复杂度。当逃逸图中点的度为 1 且不是虚拟设备连接点时，删去该点及其所连接的边，处理后的空间模型见图 3.2。

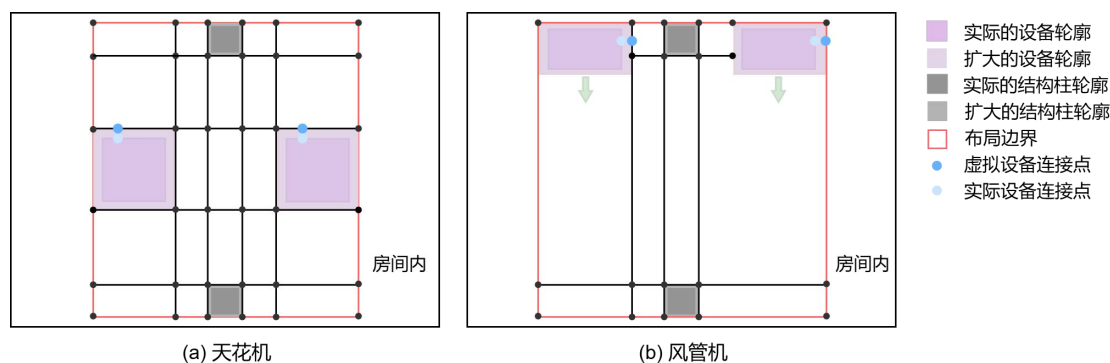


图 3.1 基于改进逃逸图的布局空间建模示意图

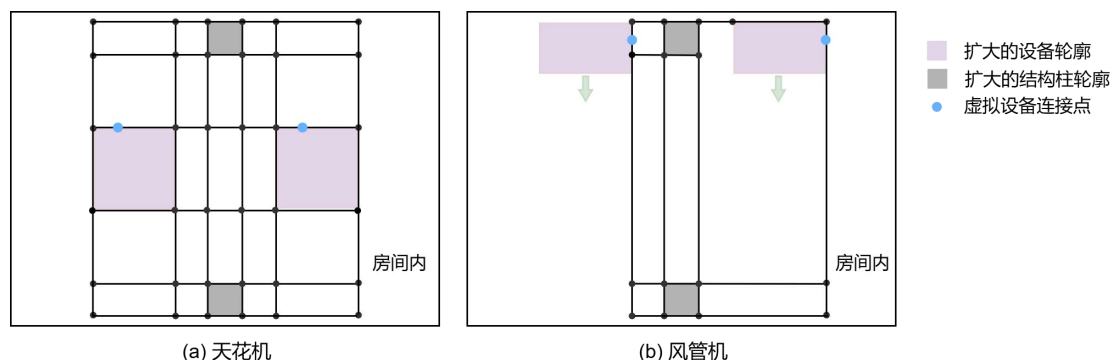


图 3.2 删除非必要元素后的布局空间建模示意图

3.3 基于并行搜索蚁群算法的管路生成

3.3.1 室内机布置及干管管线提取

在室内机布置方面，本论文参考了课题组的既有研究成果^[69]，并基于负荷计算结果完成室内机的选型与布置优化。各个区域或房间的冷/热负荷计算结果，房间几何形状，气流组织形式作为室内机选型的主要依据，输入设计需求后，遍历数据库中的室内机选型样本，计算各样本的额定制冷量与室内负荷之间的差值，从而匹配最合适的室内机型号。在室内机布置过程中，采用几何识别方法，针对不同类型的室内机进行合理布局，并综合考虑墙体、房间内部建筑元素及避障需求。

对于天花机的布置（图 3.3）而言，主要是基于房间外接矩形生成布置线段和室内机，该方法对房间形状无严格限制。布置线段方向与外接矩形的短边方向保持一致，通过布置线段间距和外接矩形长边确定布置线段的数量，再结合室内机布置间距和布置线段长度计算每条布置线段上的室内机数量，取布置线段上的避障点位作为布置点位，并确定天花机朝向；对于风管机的布置（图 3.4）而言，

风管机通常采用侧吹风模式，一般布置在贴墙位置，因此采用房间边界偏移的方式生成布置线段。该方法要求房间平面不得为曲线型，通过提取距离墙体一定距离的房间内线段作为风管机的布置线段，并基于与房间门的距离及布置线段长度对布置线段的优先级进行综合排序，计算最优布置线段上实际需要布置的风管机数量，取布置线段上的避障点位作为布置点位，并确定风管机朝向。

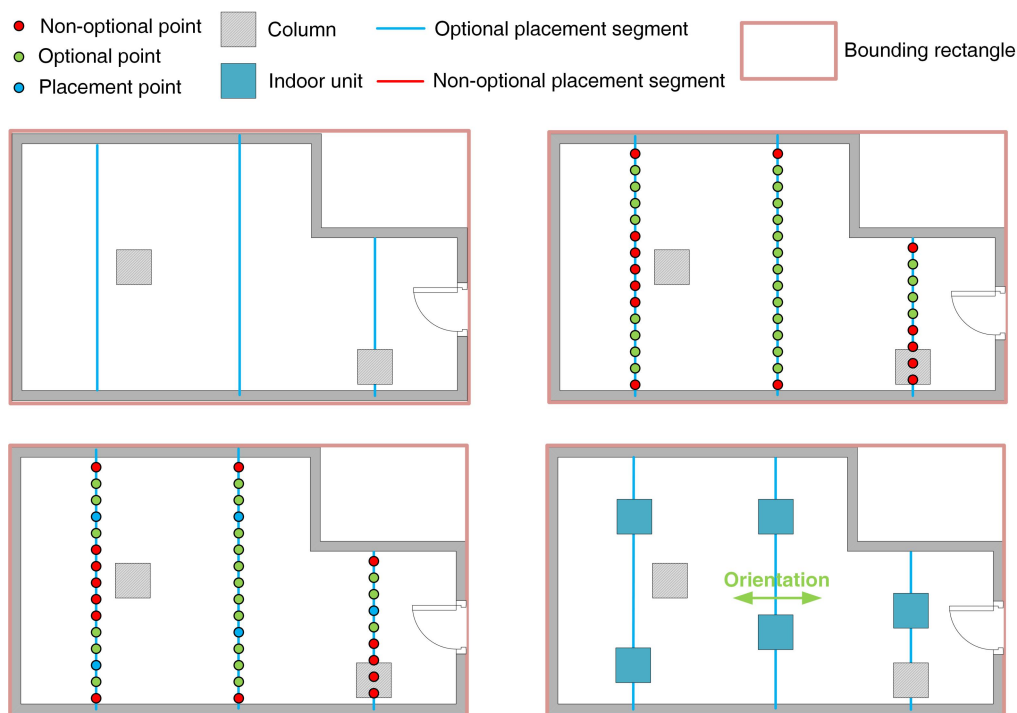


图 3.3 天花机布置流程

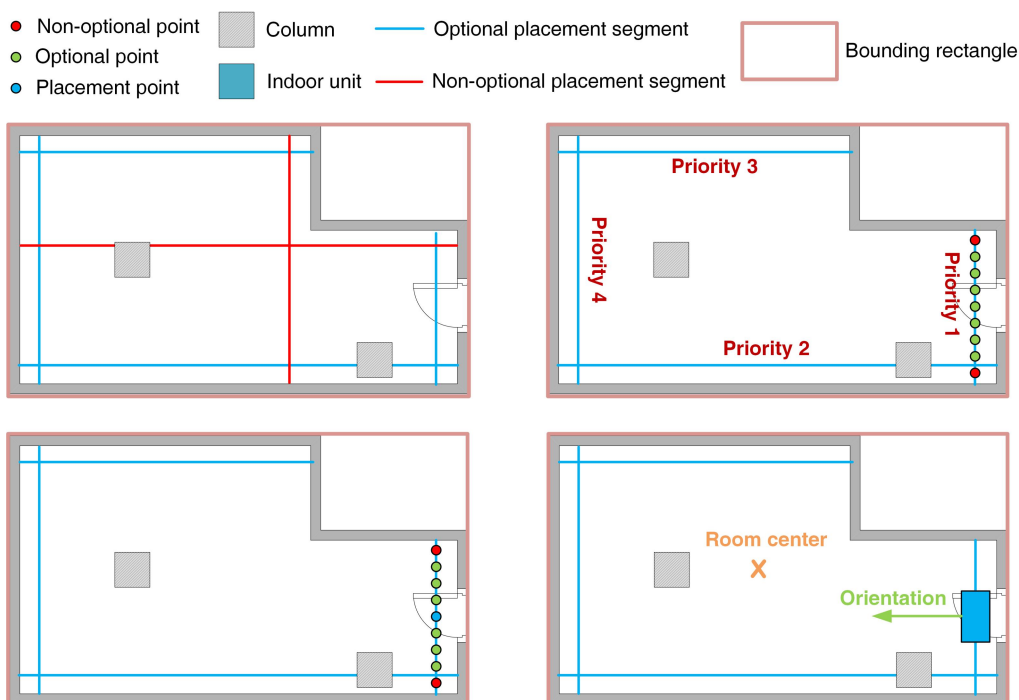


图 3.4 风管机布置流程

在实际工程中，建筑平面内冷媒管线的起点通常位于冷媒管井处，而终点则对应各个房间的设备连接点。如果直接采用算法生成从起点到多个终端设备的最短路径，可能会导致主配管多次穿越房间、管线走向不合理、拐弯数量增加等问题，从而影响冷媒管道布线的规范性和施工便捷性。为了满足冷媒管道的布线要求，需要在路径生成过程中施加合理的约束条件，提前设定走廊主配管，确保管线能够沿走廊、管井等区域布置，并避免管道无序穿越房间。

在干管管线提取方面，本论文借鉴了课题组对复联通域中心线提取的研究方法，如图 3.5 所示，并基于提取关键字的方式识别建筑平面内的走廊房间区域，确定求解域。该算法以走廊外轮廓的最长边为基准，根据边长对走廊多边形逐步切割，切割成多个两边平行的四边形，随后，从基准边最长的四边形开始，依次搜索相邻四边形，逐步生成连通的中心线拓扑。对于每个四边形，选取非基准边和非切割边的中点连线作为初始中心线，并沿走廊区域内部延伸至边界后加入整体中心线网络。当某个四边形的中心线未与已有中心线连通时，则需在相邻四边形的共享边上添加连接边，以确保中心线的整体连通性。最终，遍历所有四边形后，形成完整的走廊中心线拓扑结构。

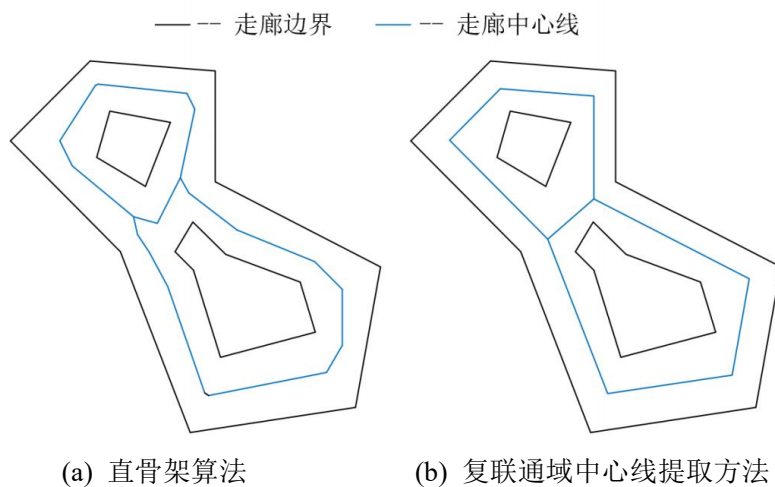


图 3.5 干管中心线提取方法

3.3.2 冷媒管道连接规则

在路径规划问题中，求解从起点到多个末端点的最优连接路径，并允许在管道网络中引入额外的中间节点以构建连接所有末端点的最小树，被称为斯坦纳树（Steiner Tree）问题^[70,71]（图 3.6）。相比于最小生成树（Minimum Spanning Tree, MST）^[72,73]，斯坦纳树在保证所有目标点连通的同时，可以通过引入额外的中继

节点（斯坦纳点）来进一步优化路径长度，减少整体管道消耗。

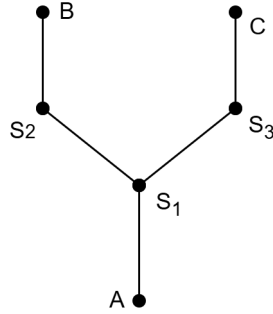


图 3.6 斯坦纳树问题示意

本论文中的给定输入点集是指多联机系统冷媒管路中的冷媒立管起点和末端设备连接点的集合，每个输入点均只能与一根管道连接。中间节点则对应冷媒管路中的管道附件，如弯头、三通（后续实例化为分歧管）以及四通（尽量避免使用）。这些中间节点在管道网络中承担连接作用，需至少连接两根管道，最多可连接四根管道。在图 3.6 中，A、B、C 分别代表给定的目标点，它们的度均为 1； S_1 、 S_2 、 S_3 表示中间节点， S_1 的度为 3， S_2 、 S_3 的度为 2。根据斯坦纳树的构造规则，输入点的度固定为 1，而中间节点的度则可取 2、3 或 4。

由于冷媒管路设计为正交形式，沿建筑墙线平行或垂直方向敷设，故采用曼哈顿距离^[74]来计算管路拓扑结构中两点之间的距离，点 (x_1, y_1) 和点 (x_2, y_2) 之间的曼哈顿距离计算公式如下：

$$H_{manhattan}((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \quad (3.1)$$

3.3.3 管路布置的约束条件

冷媒管路布置是一项较为复杂的工程设计任务，在布局过程中需要满足一系列的约束条件，以确保最终方案的可行性。本文对冷媒管路布置需要满足的约束条件作以下归纳总结。

（1）物理约束

冷媒管道的布置必须避开建筑结构，如承重墙、柱、电梯井等，同时避免与室内机、配电箱等设备发生冲突。此外，管道应尽可能沿墙壁、天花板布置，以减少对可用空间的占用，同时避免阻碍门窗或通行路径。在流体力学层面，应考虑高低差对冷媒回油的影响，避免因高低差过大导致的回油不畅。

（2）经济约束

冷媒管道通常使用铜管，材料价格较高，因此布管方案需尽可能减少管道用量。此外，管道的保温材料也是一项重要的开支，过长的管道会增加保温成本。在能耗方面，过长或不合理的管路布局会导致更大的压力损失，使得压缩机需要

额外消耗能源来维持系统运行，因此优化管道路径有助于降低运行能耗。在维护成本方面，过于复杂的管路布局可能导致后期检修困难，因此应确保管道布置合理，尽量避免穿越不可拆卸的建筑物结构，以便于后续维护。

(3) 工程约束

在连接方式上，布管方案需要遵循合理的分歧管使用规则，尽可能减少使用四通管，以三通管为主，以确保冷媒的均匀分配。在施工方面，管道的焊接需采用高温银焊，以保证密封性，防止冷媒泄漏；同时减少焊接点，以降低施工难度。此外，为了保证管道的稳定性，施工时还需要合理规划支架的固定点，避免因管道过长导致悬空问题。考虑到冷媒系统对泄漏极为敏感，布管方案应尽可能减少接头数量，以降低潜在隐患。此外，施工过程中还需预留足够的管道安装空间，避免管道过于密集而影响施工操作。

综上所述，在进行冷媒管路的自动布置时，必须综合考虑物理、经济和工程约束，在三者之间取得平衡。在路径规划过程中，物理约束主要通过避障的空间建模加以解决，经济约束则可在优化目标函数时进行权衡，而工程约束则需要控制在目标函数的同时确保管路布局符合施工规范。

3.3.4 目标函数设置

本论文中的冷媒管道布局设计为多目标、障碍规避的路径寻优问题。目标函数的设置旨在满足一定的约束条件，引入对布管合理性、经济性的综合考量，并指导支管路由优化设计。本文主要考虑的优化目标包括以下三点：

- (1) 尽量保障冷媒分布的均匀性；
- (2) 尽量减少管路的总长度；
- (3) 尽量减少四通的数量。

因此，本文的目标函数 F 由三部分组成，见式(3.2)，路径寻优的结果取目标函数的最小值 $\text{Min}(F)$ 。

$$F = \omega_1 f_1 + \omega_2 \sum_{(i,j) \in E} L_{ij} + \omega_3 N_3 \quad (3.2)$$

式中， f_1 代表冷媒分布均匀性评价函数， E 为管道系统中边的集合， L_{ij} 为管道 (i, j) 的长度， N_3 代表四通数量， ω_1 ， ω_2 ， ω_3 分别为三者的权重系数。

管道的冷媒流量受压降的影响较大，优化压力分布可以有效改善冷媒分布的均匀性。在多联机系统的冷媒管路设计中，冷媒的流动受到管道长度、管径、流速、摩擦阻力以及局部阻力（弯头、分歧管等）的影响，导致不同设备接收到的冷媒流量可能存在差异。因此，合理控制管道压力损失，确保各设备处的冷媒压力尽可能接近，是优化冷媒分布的重要目标。

本文通过计算不同设备处的冷媒压力差来衡量冷媒分布的均匀性，该指标主要用于约束布置设备较多的房间。在具体计算时，使用均方偏差 f_1 衡量各设备处的冷媒压力 P_i 与平均压力 $\bar{P}$ 的偏离程度，这种度量方法不仅考虑了所有室内机的压力分布，还能避免异常值对评价结果的影响。 f_1 越小，说明所有设备的压力分布越接近均值，即冷媒分布越均匀；反之，则说明部分设备的压力远离平均值，可能会导致冷媒供应不均，影响制冷效果。

$$f_1 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \quad (3.3)$$

其中，冷媒在管道内流动时，由于管壁的摩擦会产生压力损失，这部分压力损失可由 Darcy-Weisbach 方程^[75]计算：

$$\Delta P_{friction} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.4)$$

式中， f 为摩擦系数， L 为管道长度， D 为管道内径， ρ 为冷媒密度， v 为冷媒流速。

总压力损失等于摩擦压力损失和局部压力损失之和。冷媒在经过弯头、三通、阀门等局部构件时，会产生压力损失^[76]，计算公式如下：

$$\Delta P_{local} = K \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.5)$$

式中， K 为局部阻力系数。

3.3.5 管路自动生成算法

在逃逸图构建完成之后，将支管走管转化为考虑避障的正交斯坦纳树（Orthogonal Steiner Tree with Obstacles, OSTO）。蚂蚁的数量由末端设备的数量决定，以每个末端设备作为一只独立的蚂蚁，模拟其从起点（冷媒立管）向目标点（汇聚点）移动。采用禁忌表防止回路，利用信息素更新引导搜索方向，并不断合并路径提高求解效率^[77]。OSTO 构建步骤如下：

步骤 1：完成初始化操作。设定蚂蚁数量 M ，每只蚂蚁从对应的末端设备点出发。每只蚂蚁维护一个禁忌表，记录已访问节点，同时，定义前、后、左、右的相邻节点为候选邻居集合；

步骤 2：每只蚂蚁根据伪随机比例规则选择下一个节点^[78]；

步骤 3：选中的节点被添加到该蚂蚁的禁忌表，防止回溯；

步骤 4：根据动态更新机制对局部信息素进行更新；

步骤5: 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判断是否有蚂蚁相遇。如果蚂蚁A的下一个顶点在蚂蚁B的禁忌表中, 蚂蚁A遇到蚂蚁B, 则合并二者的禁忌表, 并删除蚂蚁B, 蚂蚁的数量减1; 如果不在, 则算法转到步骤2, 蚂蚁A继续搜索下一个顶点;

步骤6: 执行遗传算法中遗传算子的变异操作, 通过与相邻节点构建矩形获取新的路径, 并将新路径与原路径进行比较, 保留目标函数值较小的路径;

步骤7: 判断蚁群中是否只剩下一只蚂蚁。如果蚂蚁的数量大于1, 算法将转到步骤2, 蚂蚁A将继续搜索它的下一个节点; 反之, 则说明所有末端设备已完成连接, 继续执行下一步;

步骤8: 执行遗传算法中遗传算子的交叉操作, 通过交换两条路径相交节点之后的路径来获取新路径, 并将新路径与原路径进行比较, 保留目标函数值较小的路径;

步骤9: 根据目标函数值确定本次迭代的最优解路径, 输出 OSTO 结果。

OSTO 构建流程如图 3.7 所示。

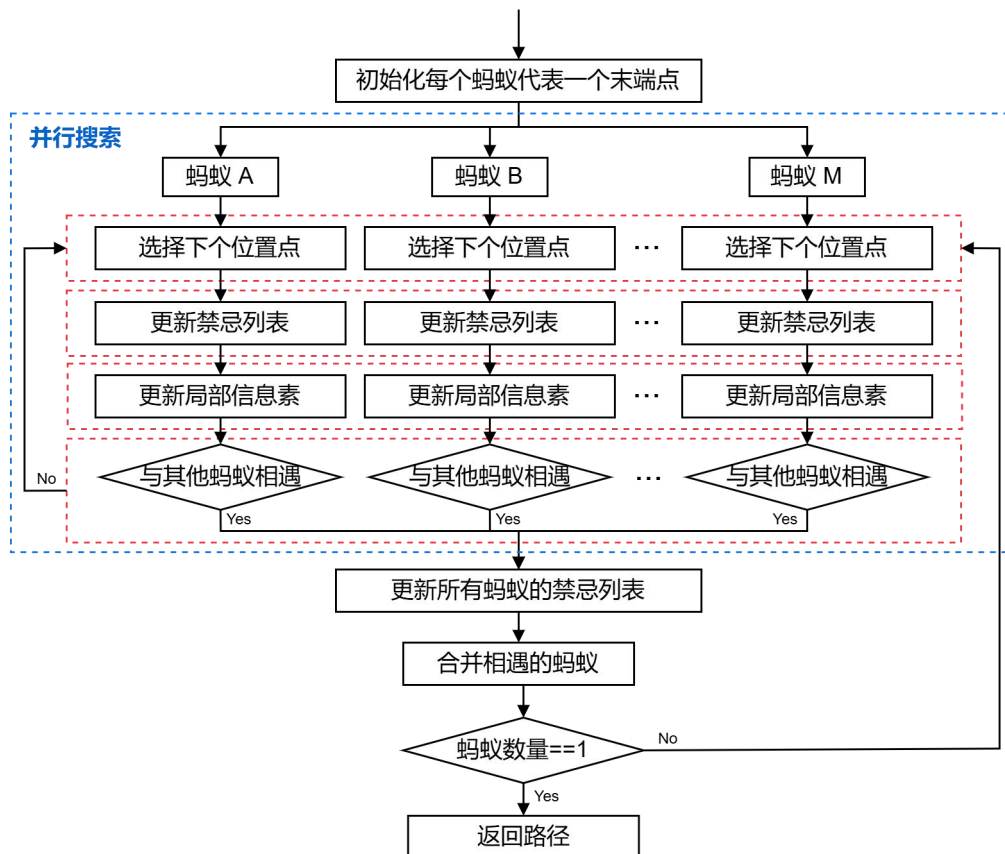


图 3.7 OSTO 构建流程图

步骤2中所提及的伪随机比例规则是蚁群算法中常用的路径选择规则, 蚂蚁在选择下一步的路径时, 会根据当前路径上的信息素浓度和启发因子计算选择概

率^[31]。如下式所示：

$$S_{ij}^m(t) = \begin{cases} \arg \max_{j \in G_m} \left\{ [\tau_{\theta_i, \theta_j}(t)]^\alpha \cdot [\varphi_{\theta_i, \theta_j}^m]^\beta \right\} & q \leq q_0 \\ P_{ij}^m(t) & otherwise \end{cases} \quad (3.6)$$

$$P_{ij}^m(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{\theta_i, \theta_j}(t)]^\alpha \cdot [\varphi_{\theta_i, \theta_j}^m]^\beta}{\sum_{j \in G_m} [\tau_{\theta_i, \theta_j}(t)]^\alpha \cdot [\varphi_{\theta_i, \theta_j}^m]^\beta} & if (i, j, k) \in G_m \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (3.7)$$

其中， G_m 是蚂蚁下一时刻可以选择的节点集合， θ_j 是 θ_i 的相邻节点， $\tau_{\theta_i, \theta_j}(t)$ 表示 t 时刻该路径上的信息素浓度， $\varphi_{\theta_i, \theta_j}^m$ 表示启发式信息。 α ， β 和 q_0 是预先设定的经验参数， α 和 β 用来控制信息素浓度和启发式信息的权重。 α 越大，路径上的信息素值对蚂蚁选择路径的影响越大。 β 越大，说明环境信息对蚂蚁的影响越大。 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^[79]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。蚂蚁更倾向于选择 $\tau_{\theta_i, \theta_j}(t)$ 和 $\varphi_{\theta_i, \theta_j}^m$ 值更大的下一节点。

启发式信息与当前节点的位置和末端的位置有关。在路径选择过程中，为了提高寻优效率，除了依靠信息素浓度的引导外，还会利用一些预先定义的规则，也就是引入启发式函数^[80]。启发式函数的公式定义如下：

$$\varphi_{\theta_i, \theta_j}^m = \frac{1}{\mu d(\theta_i, \theta_j) + \sigma \min(d(\theta_j, \theta_k)) + \delta d(\theta_j, \theta_{average})} \quad (3.8)$$

其中， μ ， σ ， δ 是三个经验常数。 $d(\theta_i, \theta_j)$ 表示两个位置点之间的曼哈顿距离，使蚂蚁倾向于选择距离更短的路径。 $\min(d(\theta_j, \theta_k))$ 表示从节点 θ_j 到其他蚂蚁禁忌表中所有节点的最短曼哈顿距离， $d(\theta_j, \theta_{average})$ 表示节点到末端节点平均位置的曼哈顿距离，用于使当前蚂蚁尽快与其他蚂蚁相遇。

步骤4中提及的动态更新机制模仿了自然界中蚂蚁通过信息素传递信息的过程，动态调整搜索方向，可以提高算法的收敛速度和解的质量。蚂蚁从节点 θ_i 移动到节点 θ_j 后，根据公式所示的局部更新规则更新所经过边的信息素强度，可以加快收敛速度，其中 ρ 为路径上原有信息素的保留因子， $\rho \in [0, 1]$ 。当一群蚂蚁走完路径后，根据式中的群体更新规则更新所有边的信息素强度，扩大搜索空间。公式(3.11)中的 Q 表示斯坦纳树上的信息素总量。

$$\tau_{\theta_i, \theta_j}(t+1) = \rho \tau_{\theta_i, \theta_j}(t) + \Delta \tau_{\theta_i, \theta_j} \quad (3.9)$$

$$\Delta \tau_{\theta_i, \theta_j} = \sum_{m=1}^k \Delta \tau_{\theta_i, \theta_j}^m \quad (3.10)$$

$$\Delta \tau_{\theta_i, \theta_j}^m = \begin{cases} \frac{Q}{F_g}, & \text{蚂蚁 } m \text{ 经过的边 } (\theta_i, \theta_j) \text{ 在寻优路径上} \\ 0, & \text{蚂蚁 } m \text{ 经过的边 } (\theta_i, \theta_j) \text{ 不在寻优路径上} \end{cases} \quad (3.11)$$

在步骤 6 和步骤 8 中，所提到的遗传算子的变异和交叉机制是在不受信息素影响的情况下探索新的解空间，从而减少因信息素更新导致的早熟现象，提高算法的稳定性和搜索能力。其中，变异操作基于设定的变异概率，在路径上选取特定节点作为变异点，并将其作为变异基因的一部分。随后，该节点与相邻的两个节点形成矩形区域，并在确保矩形的四条边未被障碍物阻挡的情况下，将该节点移动至矩形内的对角位置，以此产生新的候选路径。交叉操作的执行方式如下：首先，在两条路径中确定一个或多个相交的节点，将这些节点视为交叉基因点，并交换交叉节点之后的路径部分，从而生成两条全新的路径。相较于原始路径，经过交叉操作后得到的新路径通常弯头数量有所减少，从而优化整体布线结构。遗传算子的变异和交叉操作过程分别如图 3.8 和 3.9 所示。

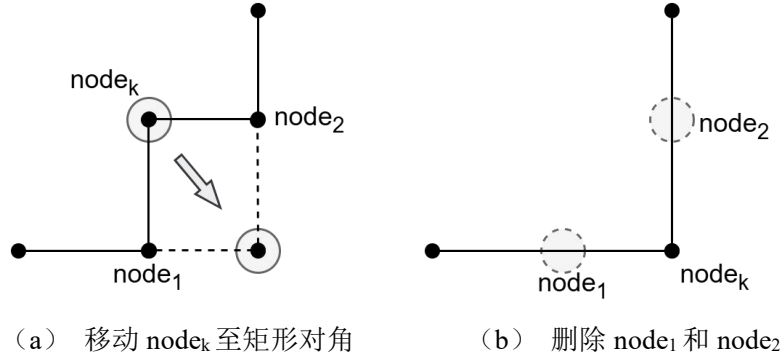
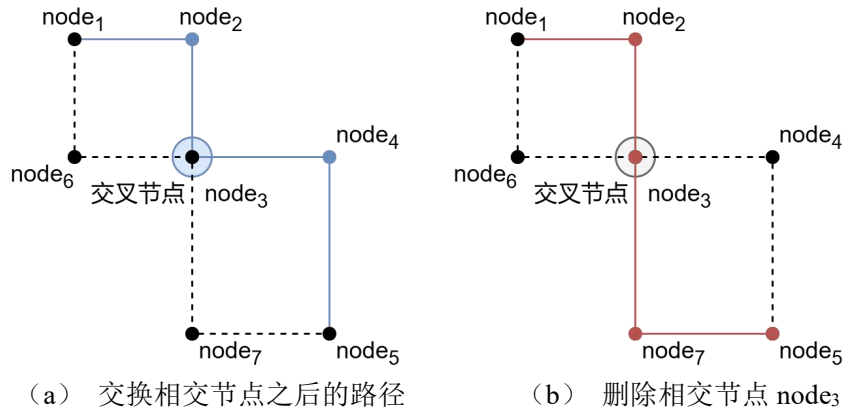
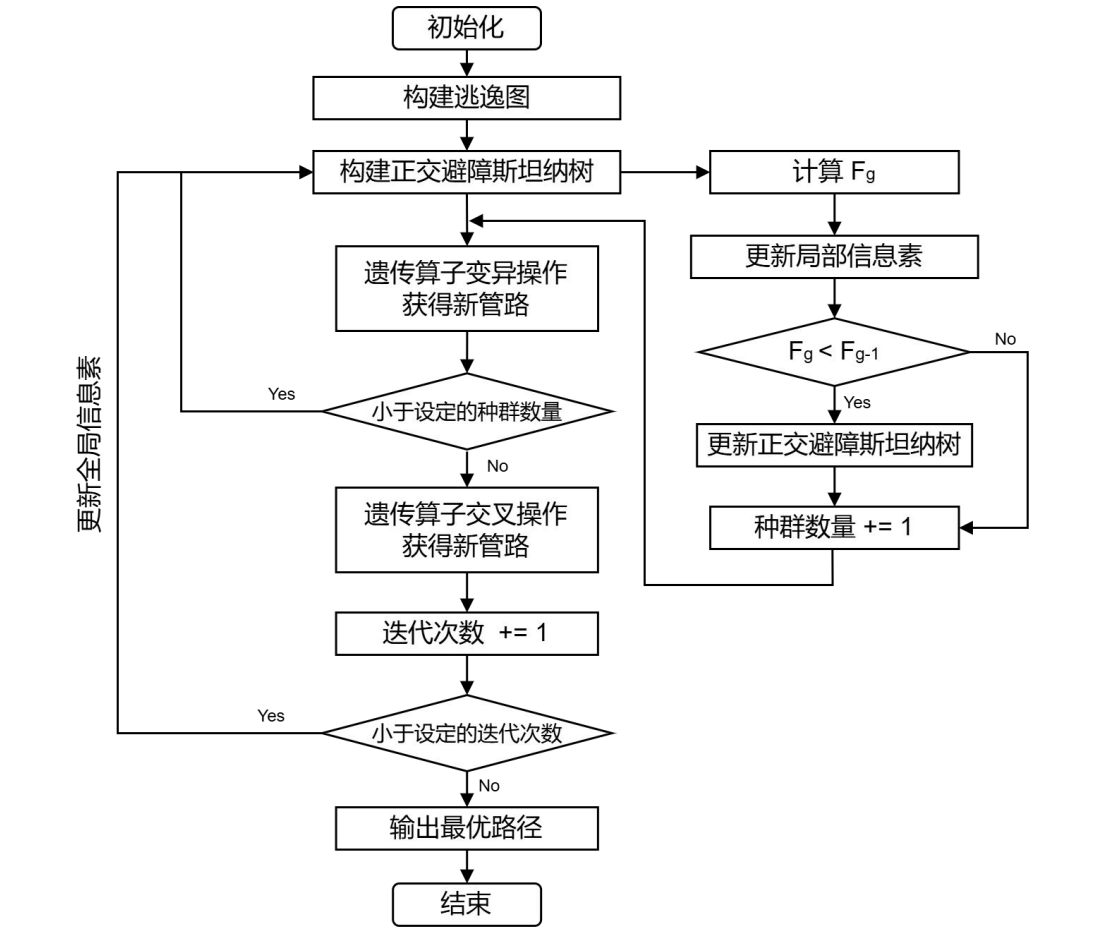


图 3.8 遗传算子的变异操作过程





3.4 本章小结

本章围绕冷媒管路的平面布管算法展开研究,针对冷媒管路布局特点,提出了一种基于改进逃逸图的布局空间建模方法,并采用并行搜索的改进蚁群算法进行管路优化生成。首先,在布局空间建模中,针对多联机冷媒管道的布管特性,对逃逸图方法作出改进,构建适用于冷媒管路设计的建模方式,以正确表达空间约束,提高算法效率。

随后,在管路生成部分,首先概述了室内机布置及干管管线提取方法。接着,分析了冷媒管道的连接规则,并进一步梳理了管路布置的约束条件,从物理、经济、施工三个角度定义管道布置的约束,以确保布管的合理性。同时,目标函数设置部分从冷媒分布均匀性、管路总长度、四通数量等多个优化目标出发,建立了用于评估管路优劣的数学模型。

最后,采用改进的路径搜索策略和信息素更新机制,结合遗传算法中的变异和交叉操作,用改进的并行搜索蚁群算法优化冷媒管路的整体布局,并在迭代收敛后进行管路修剪,仅保留有效路径。经过上述步骤,最终完成从空间建模、约束定义、目标优化到路径生成的完整冷媒管路自动布管流程,为后续工程应用奠定基础。

第4章 基于规则的分歧管自动接入算法

4.1 概述

本章介绍了一种分歧管自动接入管路算法，其主要目的是在满足工程管道附件配置需求的前提下，实现分歧管与管道系统的精准匹配与自动连接。该算法能够根据前后管径的变化自主调整分歧管规格，确保分歧管与管道的正确连接，提升设计效率。此外，该方法从实际工程图纸中提炼分歧管连接规则，基于这些规则调整原有管路拓扑结构，以支持后续的三维出图，使得冷媒管路系统的建模更加直观、高效，为实际施工提供可靠的参考依据，提升施工可行性。

4.2 问题描述

图 4.1(a)是某大空间水系统的管道连接设计图，图 4.1(b)是相对应的设置多联机空调系统的冷媒管道连接设计图。从管道布局的设计结果来看，管道附件的生成并不会对水系统管路结构产生影响，干管管线一直位于同一直线上，所以可以将水管设计问题简化为节点的连接问题；而对冷媒管道而言，干管中心线随分歧管与管道连接形式的不同而不断发生变化，因此，无法直接将平面上的节点连接简化成特定节点之间的拓扑问题，需要找到分歧管与管道之间的连接规律，对管路结构作进一步调整。

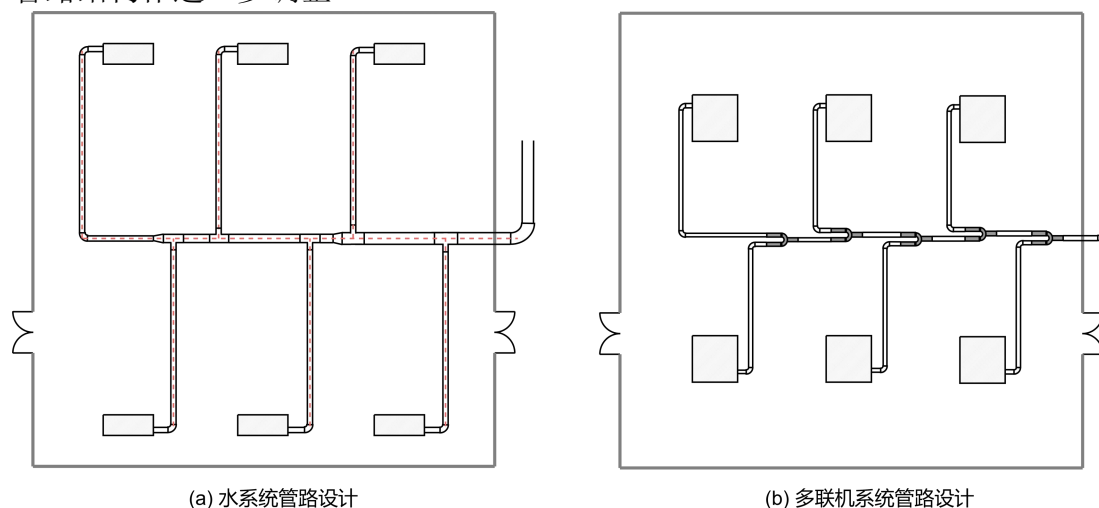


图 4.1 管道连接设计示意图

4.3 基于广度优先搜索的分歧管排序

将分歧管插入到管路中通常需要对相关管道进行偏移调整,而偏移距离的设定受多个因素影响,包括分歧管的顺序、分歧管的朝向以及其与主配管的连接方式。因此,在正式布置分歧管之前,必须先对冷媒管路中从起点至各个末端的分歧管顺序进行合理排布。

常见的图搜索方法主要分为无信息搜索(盲目搜索)和有信息搜索(启发式搜索)两大类^[81]。其中,无信息搜索不依赖额外的启发信息,仅基于图的拓扑结构进行搜索,适用于不含目标方向信息的问题。主要包括深度优先搜索(Depth-First Search, DFS)^[82]、广度优先搜索^[83]、一致代价搜索(Uniform Cost Search, UCS)^[84]、双向搜索(Bidirectional Search)^[85]等。

(1) 深度优先搜索

DFS 的基本策略是沿着某一路径不断向前推进,直至节点穷尽,此时再依次回溯至最近的分叉点,探索尚未访问的分支,直至遍历完整个搜索空间。DFS 可以通过递归或使用显式栈来实现,每次访问一个节点时,都会将其标记为已访问,并依次访问其相邻节点。由于 DFS 是一种盲目搜索,它可能会进入死循环,因此在遍历过程中需要维护一个访问记录。DFS 适用于解决需要完整遍历的场景,如连通性检测、拓扑排序和强连通分量检测。其优势在于只占用较少的存储空间,但它无法保证找到的是最短路径。

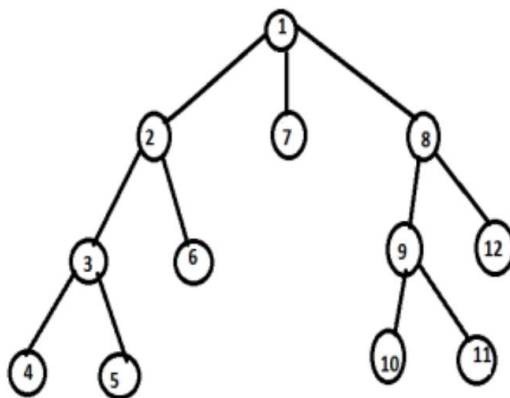


图 4.2 深度优先搜索示意

(2) 广度优先搜索

BFS 是一种按照层次结构遍历图的算法,能够保证在无权图中找到最短路径。BFS 的基本原理是通过构建一个队列(FIFO),记录已经访问但其相邻节点尚未完全考察的节点,从而实现逐层扩展搜索的过程。该算法的搜索顺序是从起点开始,依次访问所有距离为 1、2、3 …… 的节点,直至找到目标节点或遍历完整个图。BFS 的时间复杂度与 DFS 相同,但由于队列中存储了大量未处理的节点,存储需求较高。BFS 适用于逐层扩展场景或求解最短路径问题,广泛应用于网络

分析、社交网络关系链计算、迷宫求解等领域。

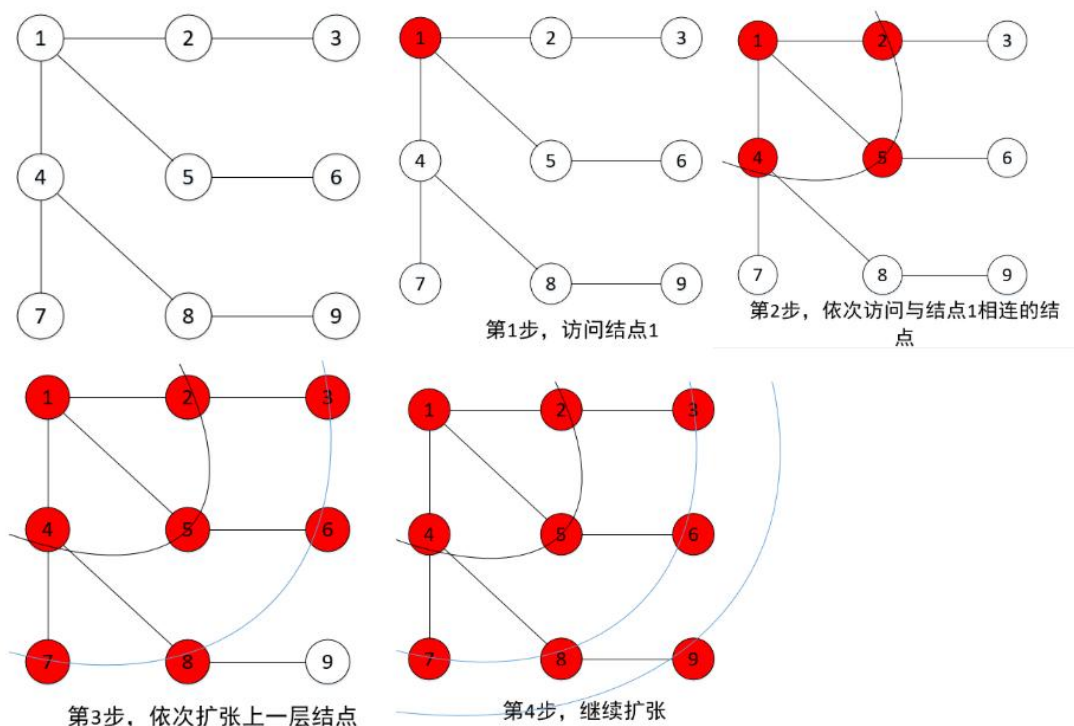


图 4.3 广度优先搜索示意

(3) 一致代价搜索

UCS 是一种基于最小代价优先的搜索策略，适用于加权图中的最短路径求解。它的核心思想是使用优先队列 (Min-Heap)，每次扩展当前代价最小的路径，并确保最优路径总是先于次优路径被扩展。与 BFS 仅适用于无权图不同，UCS 能够正确求解带权图的最短路径，因此在 Dijkstra 算法中也被广泛使用。UCS 适用于需要精确计算路径代价的场景，如路径规划、物流调度和冷媒管路优化。它的主要优点是保证最优解，但缺点在于计算量较大，尤其当路径代价分布较复杂时，搜索过程会消耗较多计算资源。

(4) 双向搜索

双向搜索是一种优化 BFS 的搜索策略，主要用于最短路径搜索。传统的 BFS 只从起点出发，而双向搜索则同时从起点和目标点出发进行两次 BFS，直到两条搜索路径在某个节点相遇。由于搜索深度降低为原本的平方根级别，可以显著缩小搜索空间。对于大规模的图搜索，双向搜索能够有效加速路径查找过程。尽管双向搜索在路径规划、导航系统等领域表现优越，但它要求目标节点是已知的，并且需要额外的存储空间来维护两个搜索方向的状态。此外，如何高效地管理两次搜索的交汇点，也是双向搜索实现中的一个关键问题。

由于 VRF 冷媒管路的拓扑结构相对规则且规模相对较小，本论文采用 BFS

这一经典图搜索算法来对管路结构进行层次化遍历，确定分歧管的布置顺序。具体而言，BFS 算法从初始节点出发，首先访问其所有直接相连的相邻节点，并将其标记为已访问。随后，依次访问这些相邻节点的未被访问的邻接节点，确保遍历的顺序按照层级关系逐步推进。特别地，在搜索过程中，对于度数为 3 的节点（即未来需要实例化为分歧管的节点），进行额外标记，以便后续进行分歧管的插入与偏移计算。该过程持续进行，直至所有节点都被遍历完成。图 4.4 展示了两种无向图结构的广度优先生成树。在此基础上，通过 BFS 遍历图中的节点，得到的访问序列均为：1, 2, 12, 11, 3, 6, 7, 10, 4, 5, 8, 9。

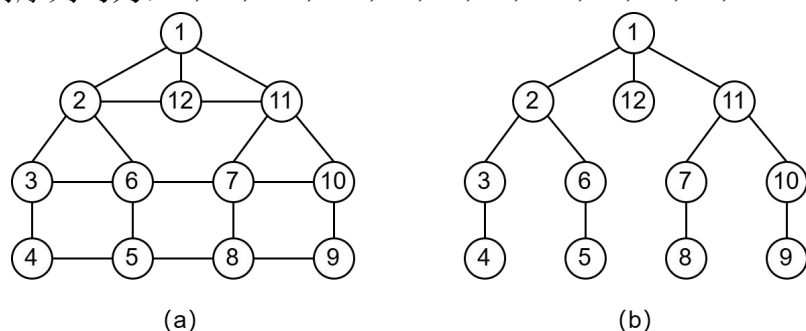


图 4.4 无向图的广度优先生成树

4.4 分歧管连接关系生成

在空调水系统中，Graph 上度为 3 的节点可以直接实例化为三通，由于其结构简单，通常呈现垂直且对称的形式，因此不涉及管道位置偏移。然而，在多联机冷媒管路系统中，度为 3 的节点并不能直接映射为分歧管。其原因在于，主配管经过分歧管分流后，会形成两条不在同一直线上的支管道，因此必须进行额外的管路调整，包括管道偏移、附加管道以及相应的管道附件，以确保分歧管能够正确接入并完成冷媒管路的布局。

分歧管与管路的连接方式存在 12 种不同的形态（见图 4.5），其中，分歧管的朝向及其与主配管的连接方式对管道的偏移距离、管道附件布置及整体管路布局都会产生影响。因此，在实际布局过程中，需要按照一定顺序对分歧管进行分类并逐步插入，同时开展必要的管路修整工作，以确保系统布局的合理性。对于 (a)-(h) 这八种接入形式，每一个分歧管前面的分歧管的朝向及与支配管的连接方式会对后面的分歧管的位置、新建弯头的位置及管道偏移量产生影响，所以需要获取分歧管的顺序信息，并且每插入一次分歧管，需记录一次分歧管插入形式，在后续分歧管的插入中累计前面所有的偏移量，进而确定当前的分歧管实际位置。而对于 (i)-(l) 这四种接入形式，尽管无需叠加管路上游的偏移量，但仍然需要考

考虑新增管道及附件的布置。

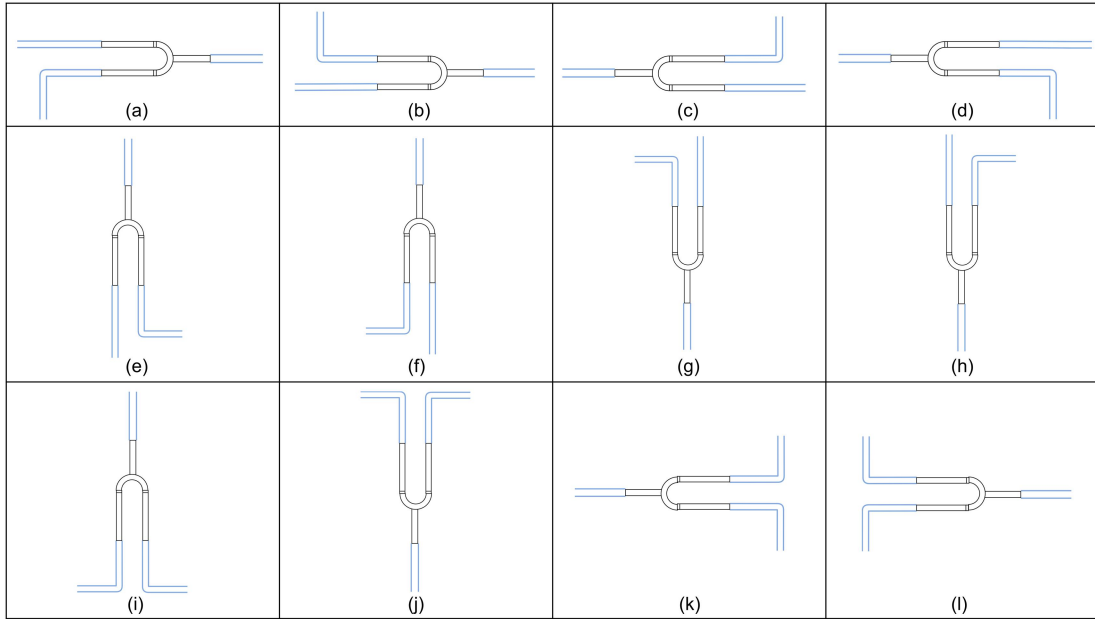


图 4.5 分歧管与管路连接形式

算法中计算量的设置与分歧管的机械构造以及设计规范有关,分歧管的结构与尺寸标注见图 4.6。此外,《多联机应用手册》规定,应注意水平直管段的距离,相邻两分歧管间的水平直管段距离应 $\geq 0.5\text{m}$ 。因此,本文中设置主配管干线上的管道偏移量为 0.04 的倍数,新增的转弯之前的管道长度设置为 0.2m。同时,为保证上下游管段与分歧管的管径同步变化,定义管道和分歧管的 fromID 和 toID 列表。分歧管的 fromID 列表中存储上游管段的尾端点 ID, $\text{len}(\text{fromID})==1$, toID 列表中存储下游管段的首端点 ID, $\text{len}(\text{toID})==2$; 管道的 fromID 列表中存储相连设备的对应接口 ID, $\text{len}(\text{fromID})==1$, toID 列表中存储相连设备的对应接口 ID, $\text{len}(\text{toID})==1$ 。

以图 4.7 中的管路元素为例,对于分歧管而言,

`DeviceDict[B1.ID].fromID=[Component[P1.ID].outputport.ID]`

`DeviceDict[B1.ID].toID=[Component[P2.ID].inputport.ID,Component[P3.ID].inputport.ID]`

对于与分歧管连接的支管段而言,

`Component[P2.ID].fromID=[DeviceDict[B1.ID].outputport[0].ID]`

`Component[P2.ID].toID=[DeviceDict[B3.ID].inputport[0].ID]`

`Component[P3.ID].fromID=[DeviceDict[B1.ID].outputport[1].ID]`

`Component[P3.ID].toID=[Component[P4.ID].inputport.ID]`

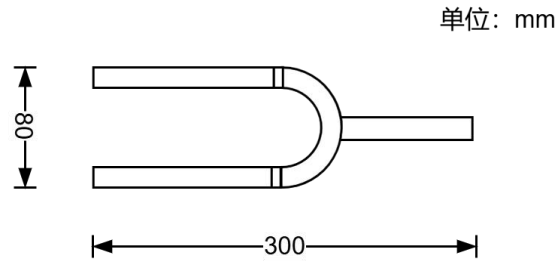


图 4.6 分歧管结构及尺寸示意

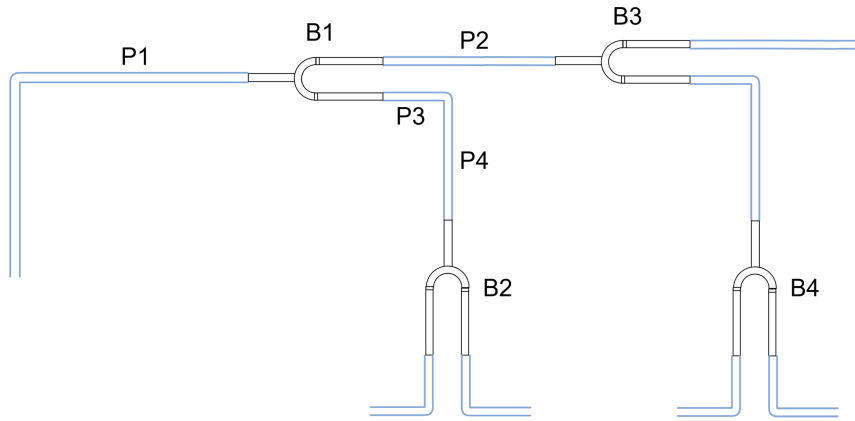


图 4.7 分歧管与管道连接示意图

表 4.1 是分歧管自动接入管路系统的部分算法伪代码，输入信息包括：有向图，环路信息，设备及管道数据结构，设备连接列表，输出更新后的设备与管道数据结构。

表 4.1 分歧管自动接入算法部分伪代码

输入: graph, loop, DeviceDict, ComponentDict, DeviceList

输出: DeviceDict, ComponentDict

a, b, c, d, e, f, g, h := 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0

tripletDict, tripletNum := find_three_branches_by_BFS(graph)

for tn in range(tripletNum) do

 preNode := list(graph._pred[tripletDict[tn].keys()][0])

 succNodes := list(graph._succ[tripletDict[tn].keys()])

 for key, value in DeviceList.items() do

 if DeviceList[key][0] == tripletNode and DeviceList[key][1] == 'PBifurcationTube' then

 arbt1 := key

 # 判断分歧管与管路连接形式

 if succNodes[0][0] == succNodes[1][0] or succNodes[0][1] == succNodes[1][1] then

```

oneTurn := False
if succNodes[0][1] == succNodes[1][1] then
    # 分歧管接入形式(i)
    if preNode[0] == tripletDict[tn][0] and tripletDict[tn][1] < preNode[1] then
        nod := (tripletDict[tn][0], tripletDict[tn][1]+0.4, tripletDict[tn][2])
        DeviceDict[arbtI].set_direction((1.0, 0.0, 0.0))
        for toid in DeviceList[arbtI][2] do
            ind := DeviceList[arbtI][2].index(toid)
            comID := randid()
            pituID := randid()
            ComponentDict[comID] := to_pipe(loop)
            if ComponentDict[toid].outputport.placement.coords[0] < nod[0] then
                ComponentDict[comID].inputport.placement := Point(nod[0]-0.04,
nod[1]+0.2, nod[2], unit = 'm', n = 3)
                ComponentDict[comID].outputport.placement := Point(nod[0]-0.04,
nod[1]+0.4, nod[2], unit = 'm', n = 3)
            else then
                ComponentDict[comID].inputport.placement := Point(nod[0]+0.04,
nod[1]+0.2, nod[2], unit = 'm', n = 3)
                ComponentDict[comID].outputport.placement:= Point(nod[0]+0.04,
nod[1]+0.4, nod[2], unit = 'm', n = 3)
            turnNode := ComponentDict[comID].outputport.placement.coords
            DeviceDict[pituID] := to_device(turnNode, loop, nodetype = 'turn')
            DeviceDict[pituID].fromID := [ComponentDict[comID].outputport.ID]
            DeviceDict[pituID].toID := [ComponentDict[toid].inputport.ID]
            ComponentDict[toid].inputport.placement := Point(turnNode[0],
turnNode[1], turnNode[2], unit = 'm', n = 3)
            ComponentDict[toid].fromID := DeviceDict[pituID].outputport[0].ID
            ComponentDict[comID].fromID := DeviceDict[arbtI].outputport[ind].ID
            ComponentDict[comID].toID := DeviceDict[pituID].inputport[0].ID
            DeviceDict[arbtI].toID[ind] := ComponentDict[comID].inputport.ID
        # 分歧管接入形式(j)
        elif preNode[0] == tripletDict[tn][0] and tripletDict[tn][1] > preNode[1] then

```

```

        nod := (tripletDict[tn][0], tripletDict[tn][1]-0.4, tripletDict[tn][2])
        DeviceDict[arbt1].set_direction((-1.0, 0.0, 0.0))
        # 后续具体步骤同分歧管接入形式(i)的代码逻辑类似
    elif succNodes[0][0] == succNodes[1][0] then
        # 分歧管接入形式(k)
        if preNode[1] == tripletDict[tn][1] and tripletDict[tn][0] > preNode[0] then
            nod := (tripletDict[tn][0]-0.4, tripletDict[tn][1], tripletDict[tn][2])
            DeviceDict[arbt1].set_direction((0.0, -1.0, 0.0))
            # 后续具体步骤同分歧管接入形式(i)的代码逻辑类似
        # 分歧管接入形式(l)
        elif preNode[1] == tripletDict[tn][1] and tripletDict[tn][0] < preNode[0] then
            nod := (tripletDict[tn][0]+0.4, tripletDict[tn][1], tripletDict[tn][2])
            DeviceDict[arbt1].set_direction((0.0, 1.0, 0.0))
            # 后续具体步骤同分歧管接入形式(i)的代码逻辑类似
    else then
        oneTurn := True
        comID := randid()
        ComponentDict[comID] := to_pipe(loop)
        if preNode[1] == tripletDict[tn][1] and tripletDict[tn][0] < preNode[0] then
            if has_multiple_bends(graph, tripletDict[tn], tripletDict[tn-1]) == True then
                a, b := 0, 0
            for key, com in ComponentDict.items() do
                if com.toID == DeviceDict[arbt1].inputport[0].ID then
                    nod := (tripletDict[tn][0]+0.4, com.outputport.placement.coords[1],
tripletDict[tn][2])
                    for toid in DeviceList[arbt1][2] do
                        ind := DeviceList[arbt1][2].index(toid)
                        toid1 := DeviceList[arbt1][2][0]
                        toid2 := DeviceList[arbt1][2][1]
                        if ComponentDict[toid].direction[0] == 0 then
                            # 分歧管接入形式(a)
                            if ComponentDict[toid].direction[1] < 0 then
                                ComponentDict[comID].inputport.placement := Point(nod[0]-0.2,

```

```

nod[1]-0.04, nod[2], unit = 'm', n = 3)
    ComponentDict[comID].outputport.placement := Point(nod[0]-0.4,
nod[1]-0.04, nod[2], unit = 'm', n = 3)
    ComponentDict[comID].fromID :=
DeviceDict[arbtI].outputport[0].ID
    # 分歧管接入形式(b)
    else then
        ComponentDict[comID].inputport.placement := Point(nod[0]-0.2,
nod[1]+0.04, nod[2], unit = 'm', n = 3)
        ComponentDict[comID].outputport.placement := Point(nod[0]-0.4,
nod[1]+0.04, nod[2], unit = 'm', n = 3)
        ComponentDict[comID].fromID :=
DeviceDict[arbtI].outputport[1].ID
        turnNode := ComponentDict[comID].outputport.placement.coords
        devID := randid()
        DeviceDict[devID] := to_device(turnNode, loop, nodetype = 'turn')
        DeviceDict[devID].toID := [ComponentDict[toid].inputport.ID]
        ComponentDict[toid].fromID := DeviceDict[devID].outputport[0].ID
        ComponentDict[toid].inputport.placement :=
ComponentDict[comID].outputport.placement
    else then
        if ComponentDict[toid3].direction[1] < 0 then
            DeviceDict[arbtI].toID := [ComponentDict[comID].inputport.ID,
ComponentDict[toid].inputport.ID]
            ComponentDict[toid].fromID := DeviceDict[arbtI].outputport[1].ID
            ComponentDict[toid].inputport.placement := Point(nod[0]+0.2,
nod[1]+0.04, nod[2], unit = 'm', n = 3)
            ComponentDict[toid].outputport.placement :=
Point(ComponentDict[toid].outputport.placement.x, nod[1]+0.04, nod[2], unit = 'm', n = 3)
        else then
            DeviceDict[arbtI].toID := [ComponentDict[toid].inputport.ID,
ComponentDict[comID].inputport.ID]
            ComponentDict[toid].fromID := DeviceDict[arbtI].outputport[0].ID
            ComponentDict[toid].inputport.placement := Point(nod[0]+0.2,

```

```

nod[1]-0.04, nod[2], unit = 'm', n = 3)
        ComponentDict[toid].outputport.placement                :=
Point(ComponentDict[toid].outputport.placement.x, nod[1]-0.04, nod[2], unit = 'm', n = 3)
        fromid := DeviceList[arbt1][3][0]
        ComponentDict[fromid].outputport.placement := Point(nod[0]+0.1, nod[1], nod[2],
unit = 'm', n = 3)
        # 此处省略分歧管接入形式(c)-(h)的伪代码, 同(a)的代码逻辑类似
        DeviceDict[arbt1].placement := Point(nod[0], nod[1], nod[2], unit = 'm', n = 3)
        DeviceDict[arbt1].set_model('FQZHN: FQZHN')
return DeviceDict, ComponentDict

```

4.5 本章小结

本章围绕分歧管自动接入管路算法展开研究, 提出了一种基于 BFS 和分歧管连接规则的管路拓扑修整方法, 以实现分歧管的自动插入与合理布置。

首先, 通过 BFS 遍历冷媒管路网络, 确定度为 3 的节点, 并据此排布分歧管插入顺序。此外, 在多联机冷媒管路中, 分歧管插入需结合管道偏移、附件添加及连接方式调整等操作, 以确保分歧管正确接入管路系统。在分歧管的具体接入过程中, 分歧管的朝向及其与支配管的连接方式会影响管道偏移量及附件位置, 因此对于 12 种不同的分歧管与管路连接形式, 需设置不同的分歧管连接规则, 按照顺序逐步修正管路布局, 以保证管路拓扑结构的完整性。

第 5 章 结果评估及配管长度校核

5.1 管线布局结果存储

在多联机空调系统的冷媒管路设计过程中，如何高效、准确地存储和管理设计结果是非常关键的一环。本节将介绍冷媒配管和冷凝水管道的选型方法和数据存储格式，以便后续可视化和分析。

5.1.1 冷媒配管数据存储与选型

5.1.1.1 冷媒配管选型方法

平面内的冷媒配管主要分为主配管和支配管两种类型，不同配管类型所对应的选型方法不同，但都与室内机容量有关。

表 5.1 冷媒配管类型

配管名称	配管连接位置	图示编号 (图 5.1)
室内机主配管	室内机第一分歧后不直接与室内机相连的配管	L2~L9
室内机支配管	分歧后直接与室内机相连的配管	a, b, c, d, e, f, g, h, i, j
室内机分歧管组件	连接主配管、支配管间的配管组件	A, B, C, D, E, F, G, H, I

《多联机应用手册》中对与室内机连接的支配管与主配管的尺寸选型作出了规定，见表 5.2 和表 5.3。

表 5.2 室内机主配管尺寸匹配表

下游内机容量 A (×100W)	主配管尺寸 mm (不得大于主管的尺寸)	
	气管	液管
A<168	Φ 15.9	Φ 9.5
168≤A<224	Φ 19.1	Φ 9.5
224≤A<330	Φ 22.2	Φ 9.5
330≤A<470	Φ 28.6	Φ 12.7
470≤A<710	Φ 28.6	Φ 15.9
710≤A<1040	Φ 31.8	Φ 19.1

$1040 \leq A < 1540$	$\Phi 38.1$	$\Phi 19.1$
$1540 \leq A < 1800$	$\Phi 41.3$	$\Phi 19.1$
$1800 \leq A < 2450$	$\Phi 44.5$	$\Phi 22.2$
$2450 \leq A < 2690$	$\Phi 54$	$\Phi 25.4$
$2690 \leq A$	$\Phi 54$	$\Phi 28.6$

表 5.3 室内机支配管尺寸匹配表

室内机容量 A ($\times 100W$)	当支配管长度 $\leq 10m$		当支配管长度 $\geq 10m$	
	气侧	液侧	气侧	液侧
$A \leq 50$	$\Phi 12.7 \times 0.8$	$\Phi 6.4 \times 0.8$	$\Phi 15.9 \times 1.0$	$\Phi 9.5 \times 0.8$
$A \geq 56$	$\Phi 15.9 \times 1.0$	$\Phi 9.5 \times 0.8$	$\Phi 19.1 \times 1.0$	$\Phi 12.7 \times 0.8$

在匹配管道尺寸之前，需要计算管道下游连接的室内机容量之和。本文的管道和节点信息都存储在 `networkx.Graph()` 中。首先，为图中的各个节点添加“CoolingCapacity”标签，设备连接点处节点属性的值为与样本库中对应型号设备的制冷量值，非设备连接点位置的节点属性则赋值为 0。接着，遍历所有末端连接点，叠加计算从起点到每个设备连接点的管道下游设备容量，获取所有 edge 所对应的“CoolingCapacity”值。最后，依据设计手册中的选型标准，确定主配管和支配管的尺寸。

5.1.1.2 冷媒配管属性信息

本文通过定义冷媒配管属性（表 5.4），输出完整的管道信息，为后续实现 Revit 三维可视化提供可能。

表 5.4 冷媒配管属性信息表

edge 属性名称	edge 属性含义
ID	随机生成的管道编号
type	管道类型（液管/气管）
inputport	管道入口点信息（ID/位置/尺寸/介质等）
outputport	管道出口点信息（ID/位置/尺寸/介质等）
fromID	管道入口连接的设备出口点 ID
toID	管道出口连接的设备进口点 ID
loopID	隶属的环路 ID
size	管道尺寸
weight	管道长度
direction	管道方向

material	管道材料
----------	------

冷凝水管的属性定义方式与冷媒配管相同。

5.1.2 冷凝水管选型方法

在空调制冷时，盘管温度下降，导致周围空气中的水蒸气遇冷凝结，形成小水滴，这些水滴逐渐在冷却表面上聚集，最终形成冷凝水。冷凝水管道的设计不仅要保证冷凝水的顺利排放，还要避免管道内的水流滞留，以确保系统长期稳定运行。

对于每台室内机，需要根据其制冷负荷计算冷凝水的排放量，再根据排放量确定管道的规格。通过对所有末端设备的计算，可以得到整个冷凝水管道系统的总流量需求。管径计算方法见表 5.5。

表 5.5 冷凝水管管径确定

末端设备冷量 (kW)	冷凝水管的公称直径 (mm)
≤7	20
7.1~17.6	25
17.7~100	32
101~176	40

一般来说，冷凝水管道的流速不应过高，通常保持在 1-3m/s 之间，以避免水流的噪声和冲击。根据经验值，每 1kW 冷负荷 1h 约产生 0.4kg 左右冷凝水。根据计算出的冷凝水流量和设计标准，选择适当的管道直径。

在冷凝水管道设计中，为了确保冷凝水能够顺利排放，管道应具有适当的坡度，通常坡度应保持在 1%至 2%之间，坡度过小可能导致水流滞留，坡度过大则可能导致水流过快，增加管道磨损^[86]。另外，冷凝水管道通常使用传热性能较差的 PVC、PP、PE 等材料制造。连接时需要保证管道的密封性，避免冷凝水泄漏。管道之间的连接可以通过三通、弯头、直通接头等方式进行。

5.1.3 节点数据存储

管路系统中的节点主要包括直通，弯头，分歧管等管道连接件，直通用于管道的线性延伸，弯头用于改变管路方向，分歧管则用于实现冷媒的分配。其属性信息见表 5.6。通过构建 Revit 设备库，结合输出的节点属性，实现管道连接件的选型与匹配，并呈现在三维视图中。

表 5.6 节点属性信息表

node 属性名称	node 属性含义
ID	随机生成的节点编号
type	节点类型
placement	节点位置
inputport	连接件入口点列表（ID/位置/尺寸/介质等）
outputport	连接件出口点列表（ID/位置/尺寸/介质等）
fromID	连接件入口连接的管道出口点的列表
toID	连接件出口连接的管道入口点的列表
loopID	隶属的环路 ID
direction	连接件方向
model	连接件型号

5.2 允许配管长度校核

允许配管长度和高低差校核是多联机空调系统设计中必不可少的环节。允许配管长度和高低差的校核是为了确保冷媒管路系统的设计符合技术规范 and 性能要求，并能够在实际使用中稳定高效地运行。超过这些限制可能会导致压缩机负荷过重、冷媒回流不畅等问题，甚至损坏设备。如果配管长度过长，冷媒在流动过程中会受到较大的摩擦阻力，从而导致冷媒流速减慢，降低冷凝与蒸发效率，进而影响系统的能效和制冷/制热效果。同样，过大的高低差会导致冷媒的压力损失增大，使得冷媒流动不稳定，降低系统工作效率。通过校核配管长度和高低差，可以确保系统正常运行，减少不必要的能源浪费，提高系统的经济性。

图 5.1 中给出了简易的冷媒配管设计连接形式，便于更好地理解配管长度的计算方法。

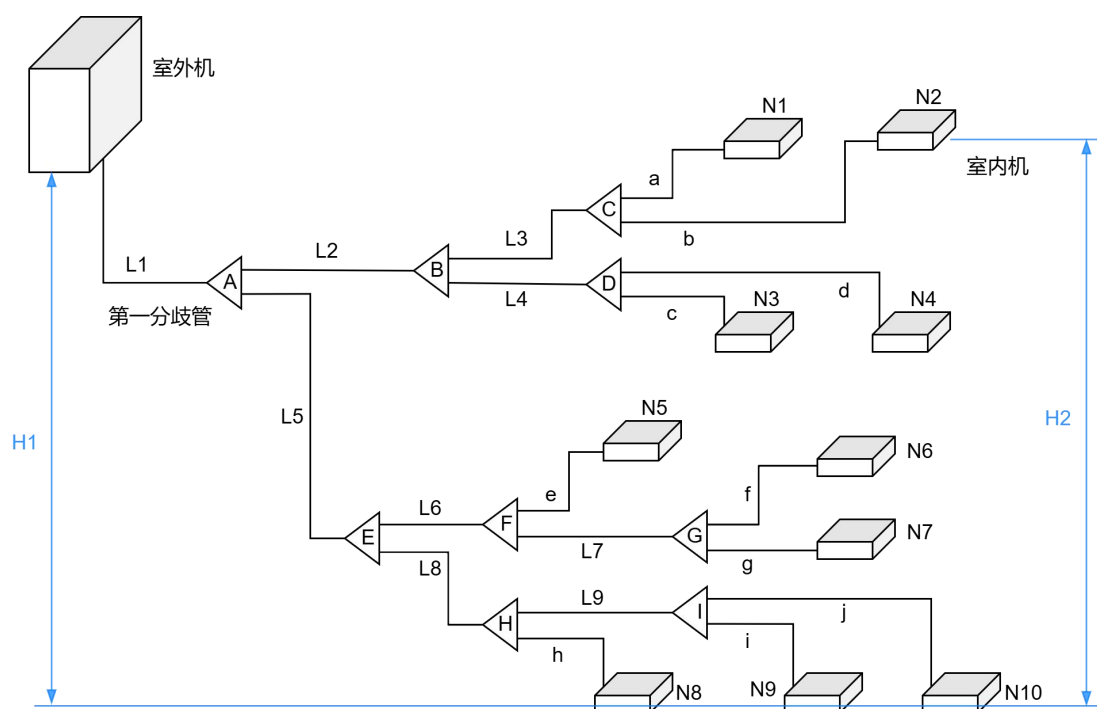


图 5.1 冷媒配管设计系统图

5.2.1 配管长度定义

不同室外机系列样本的配管限制条件存在差别，本文在表 5.7 中列出了部分多联机对应的冷媒配管长度和落差限制。将设计手册中的相关数据录入数据库，供允许配管长度和高低差校核使用。

表 5.7 冷媒配管长度和落差限制

配管类型			允许值 (m)		配管部分 (图 5.1)
			X 系列	S 系列	
配管长	配管总长		≤1000	≤1000	$L1+(L2+L3+L4+L5+L6+L7+L8+L9)*2$ $+a+b+c+d+e+f+g+h+i+j$
	最远配管长度	实际长度	≤165	≤165	$L1+L5+L8+L9+j$
		相当长度	≤190	≤190	
	第一分歧到最远配管相当长度 L		≤40	≤40	$L5+L8+L9+j$
落差	室内机和室外机之间的落差 H1	室外机高于室内机时	≤90	≤50	/
		室外机低于室内机时	≤110	≤90	/

		内机时			
	室内机与室内机落差 H2	≤30	≤30	/	

注：1、计算相当长度时，分歧管折算长度为等价配管长度 0.5m。

2、配管等效长度为单程配管等效长度，即等于气侧或液侧的等效长度。

5.2.2 允许配管长度和高低差校核方法

在进行允许配管长度的校核时，主要涉及配管总长、最远配管长度以及第一分歧点到最远配管点的等效长度的计算。具体来说，需要依次遍历每个环路中的所有液管，根据表 5.7 中的计算公式，叠加计算管路长度，从而得到该环路的配管总长；依次遍历所有的末端设备连接点，分别计算各室内机配管长度，以及第一分歧到各室内机的等效配管长度，并取其中的最大值作为最远配管长度。最后，将计算得到的配管长度结果与数据库中对应字段的限制长度进行比较，若计算值小于限制长度，则该环路的配管长度符合设计要求；若超出限制长度，则校核不通过，需要重新划分环路或调整管路布线结果。

对于允许高低差的校核，需要评估室内机与室外机之间的高低差，以及室内机之间的高低差。计算室内机和室外机之间的高低差时，取该环路室内机中心点到室外机底部的最大落差值；计算室内机和室内机之间的落差时，则需确定该环路内所有室内机位置的最高点与最低点，并计算它们的高程差值。同样地，需要将计算得到的配管高低差结果与数据库中对应字段的限制高低差值进行比较，若计算值小于允许高低差，则该环路的高低差满足设计要求；若超出允许范围，则校核不通过，此时需要重新规划室外机安装位置或调整环路划分结果。

5.3 管路自动连接方案综合评价

本节通过对管路设计方案进行定量评价和综合量化分析，评估不同设计方案的优劣，为决策提供依据。

首先，对于满足允许配管长度和高低差限制的设计方案，进行定量评价是不可或缺的一步。具体而言，方案的评估从算法运行时间和允许错误率这两个关键指标入手。算法运行时间主要反映算法执行效率，使用 Python 的 time 库对算法运行时间进行测量，记录管路布局生成过程所需的时间 Δt 。允许错误率则能够衡量设计结果的准确性和可靠性，统计异常连接的管段数量和总管段数量，计算允许错误率能否满足设计要求（本文要求允许错误率控制在 10% 以内，即正确连接的管道占比大于 90%），计算公式见(5.2)。通过对这些指标进行定量分析，我

们能够判断算法能否在规定时间内完成设计师期望的设计任务。

$$\Delta t = t_{end} - t_{start} \quad (5.1)$$

$$\text{允许错误率(\%)} = \frac{\text{异常连接的管段数}}{\text{管段总数}} \times 100\% \quad (5.2)$$

其次,综合量化分析需要从项目成本、系统稳定性等多个维度进行评估。本文在目标函数设计阶段已加入对成本和稳定性的考量,主要是通过减少管线长度来降低成本,通过优化冷媒分布来保障系统稳定性。

在项目成本方面,方案的成本不仅包括管道和设备(室内机,室外机,管道连接件等)的直接成本,还应考虑系统的安装维护成本、能耗成本等附加费用。合理的管路布局设计能够在保证功能和性能的基础上,降低项目总体成本,尤其是对于大规模工程项目而言,降低成本是一项关键目标。

$$\text{总成本} = \sum_{i=1}^n (\text{管道长度}_i \times \text{管道单价}_i) + \sum_{j=1}^m (\text{设备数量}_j \times \text{设备单价}_j) + \quad (5.3)$$

附加费用

系统稳定性是指设计方案在实际运行过程中是否能够稳定提供预期的制冷/制热效果,而冷媒分布均匀性是影响系统稳定性的重要因素。因为如果冷媒流量在系统内部分配不均,就可能导致部分室内机制冷量不足(过热)或过量供冷(过冷),从而影响整体系统的运行效率和用户体验。因此,合理的冷媒分布不仅能优化能源利用,还能提高系统的长期稳定性,避免局部过载或冷媒循环不畅的问题。

为了量化管路系统的冷媒分布均匀性,从整体布局角度对系统进行评估,重点关注冷媒在管网中的流动情况。特别是主配管经第一分歧管分流后,分歧出的两配管上所连接的室内机容量差异不仅能反映冷媒在初始分配时的均匀性,还能间接影响后续分歧点的负载均衡情况。如果第一分歧管两侧的配管连接的室内机容量相差较大,则意味着冷媒在初始分流时已经出现明显的不均衡分配,这种不均衡会在后续的分歧点进一步放大,可能导致某些区域冷媒供应不足或过量,从而影响系统稳定性。因此,本文引入容量平衡度 U 来衡量第一分歧管两侧的室内机容量分布情况,设第一分歧管分流后两根配管上所连接的室内机总容量分别为 Q_1 和 Q_2 。 U 的取值范围为 $[0,1]$,其中 $U=0$ 表示两侧容量完全均衡, U 越大,说明冷媒在初始分配阶段的不均衡程度越高。

$$U = \frac{|Q_1 - Q_2|}{Q_1 + Q_2} \quad (5.4)$$

5.4 本章小结

本章围绕冷媒管路自动布局结果的存储、允许配管长度和高低差校核以及自动连接方案的综合评价展开。

在管线布局结果存储部分，本章介绍了冷媒配管与冷凝水管的数据存储格式和选型方法，并详细说明了管道属性信息的组织方式。并且通过建立完整的节点数据存储结构，可以有效管理直通、弯头、分歧管等管道连接件，为后续三维可视化提供数据支持。

在允许配管长度和高低差校核部分，本文通过计算配管总长、最远配管长度以及第一分歧到最远配管的等效长度，确保设计方案符合设计规范的约束。此外，还考虑了高低差校核，计算室内机与室外机之间以及各室内机之间的高低差，并与规范限定值进行对比，确保系统运行的稳定性。

在管路自动连接方案的综合评价部分，本章从定量分析和多维度评估两个方面对不同方案进行优化对比。首先，对满足配管长度限制的方案进行运行时间和允许错误率等关键性能指标的评估，以衡量自动布管算法的可行性；其次，从项目成本、冷媒分布均匀性等多个维度进行综合量化分析，确保最终的管路布局既满足工程约束，又具备良好的经济性和可靠性。

第 6 章 冷媒管路自动生成案例

6.1 冷媒管道自动布线设计案例

本章节以三栋常规建筑为例测试本文所研究的冷媒管路自动生成算法。三栋建筑分别为办公建筑，学校建筑和医院门诊楼建筑，其管路自动生成的过程涉及：自动分区，自动布管，分岐管自动连接，允许配管长度和高低差校核以及方案评价。

6.1.1 示例建筑 A——办公建筑

示例建筑 A 所示办公建筑（图 6.1）的建筑面积为 $5121.26 m^2$ ，建筑共三层，主要功能房间为办公室、会议室、指导室等。该建筑的各房间之间的负荷特性差异不大，但楼层负荷较大，故依照自动分区算法将建筑的每一层划分为两个空调区域。



图 6.1 Revit 模型-示例建筑 A

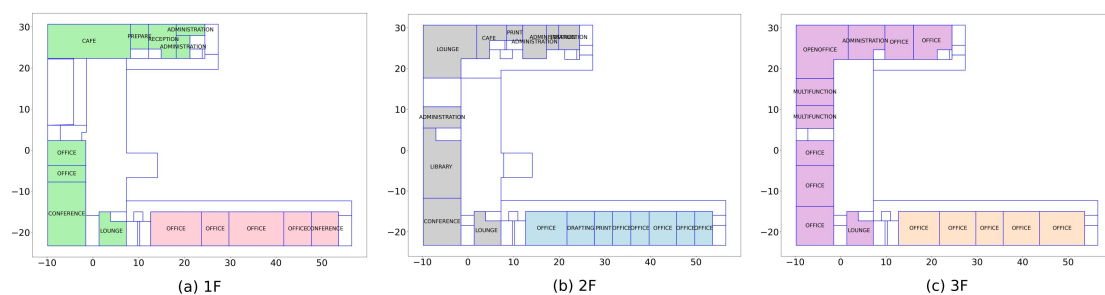


图 6.2 示例建筑 A 的自动分区结果

识别各个分区内的冷媒管井，确定管路自动布线的起点。在图 6.3 所示的平面布管结果中，灰色框线代表建筑轮廓，绿色矩形代表障碍物，紫色矩形代表室内机，蓝色圆点代表虚拟的设备连接点，红色线为管道连接线。

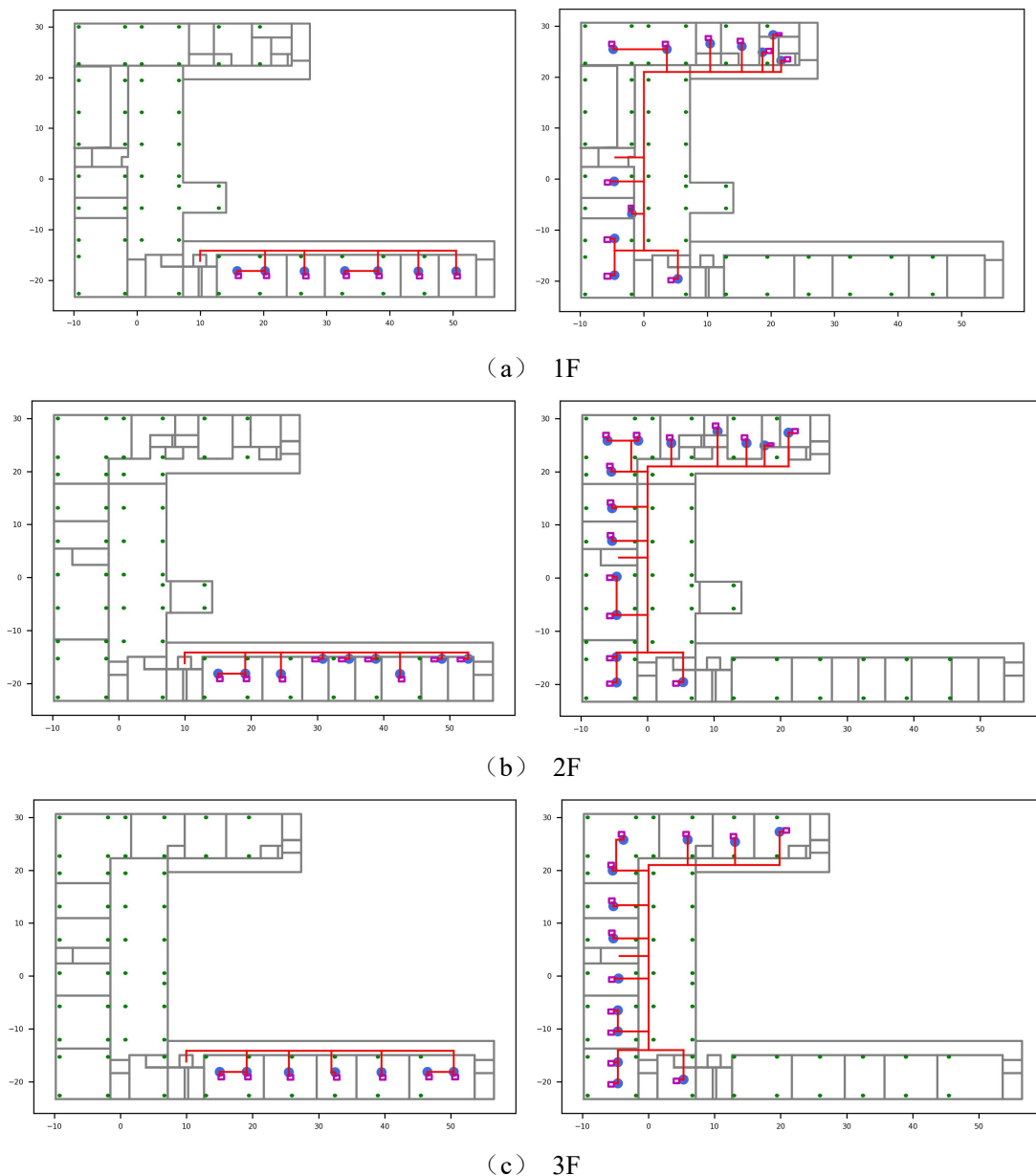
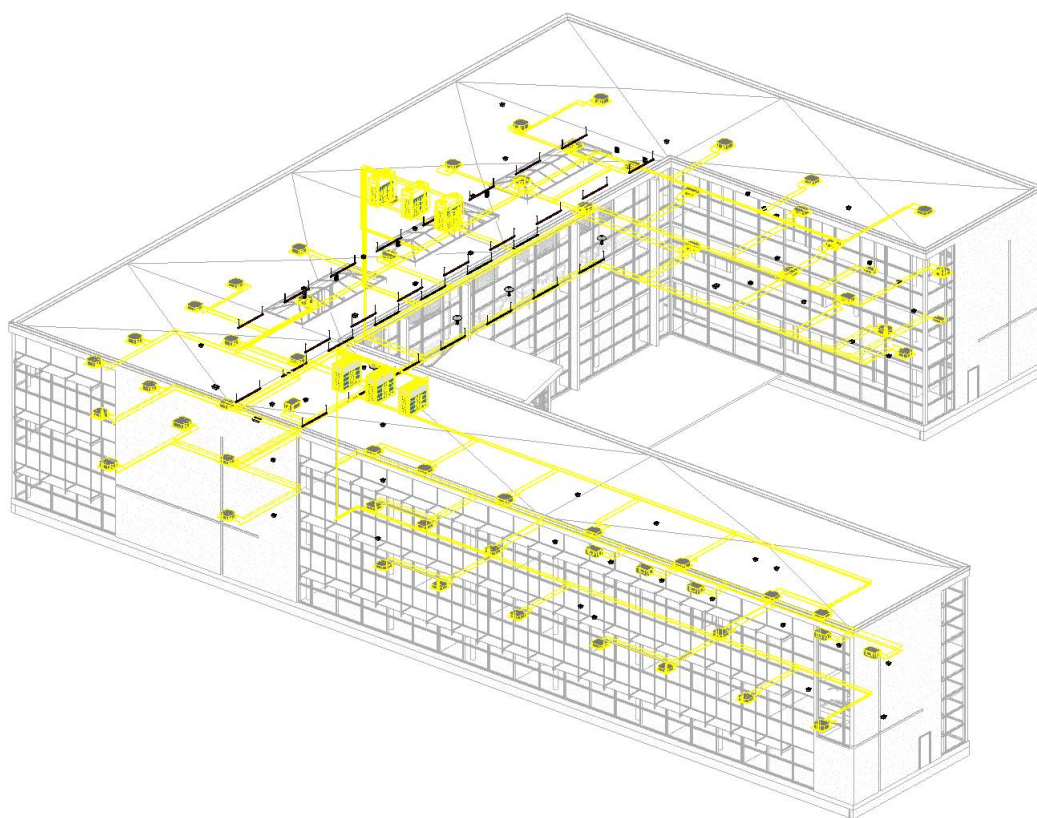
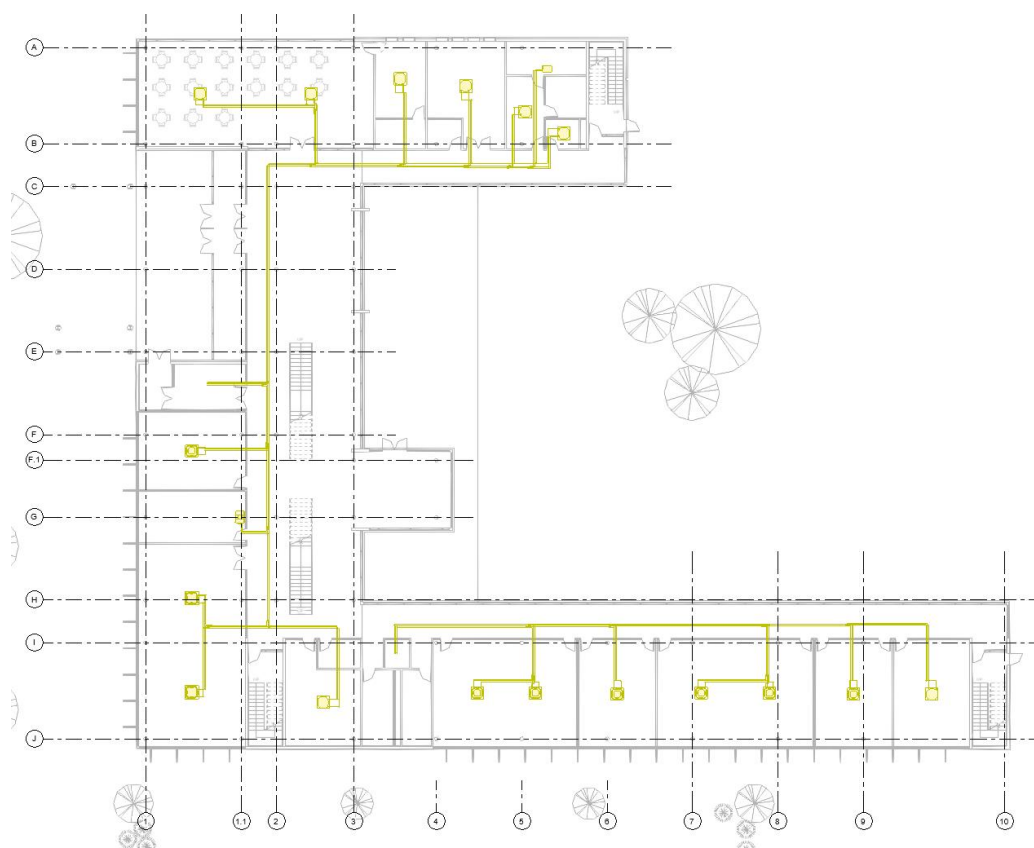


图 6.3 示例建筑 A 的平面自动布管结果

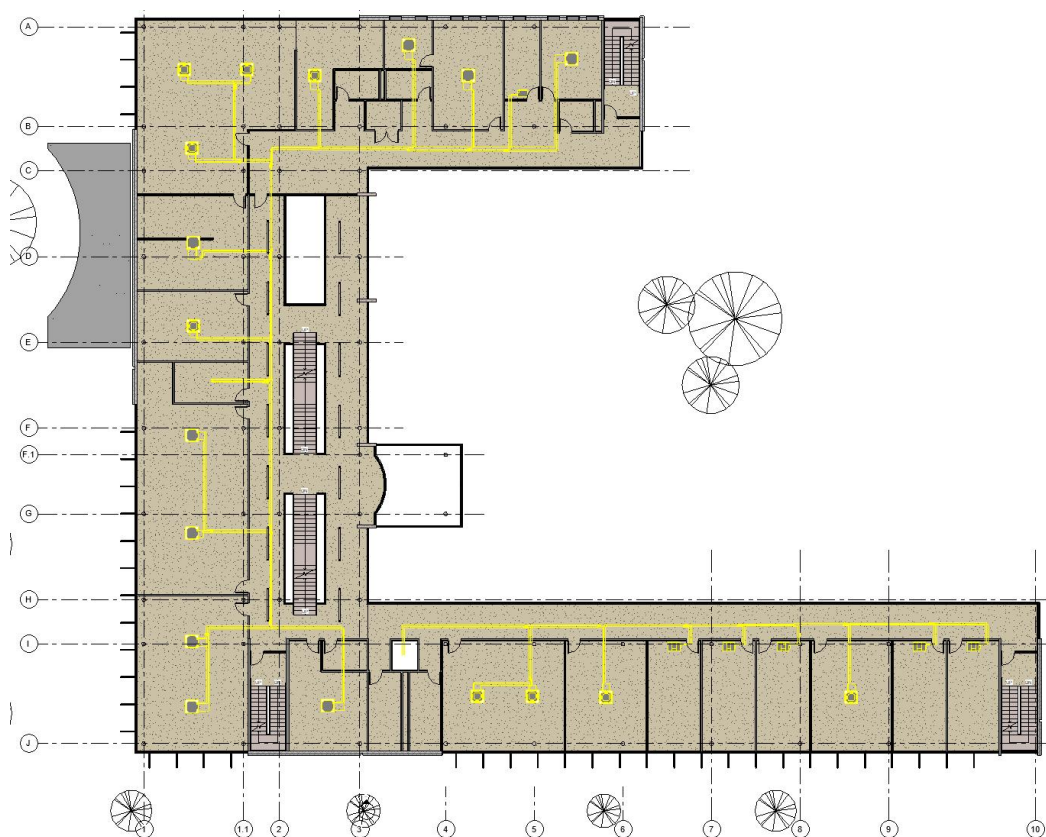
将存储了环路、管道和设备信息的 json 文件导入 Revit 建模软件，即可实现管路系统的三维可视化。由于实现了分歧管的自动接入，因此分歧管可根据上下游配管的管径自主变径，自动匹配对应型号。



(a) 3D 视图



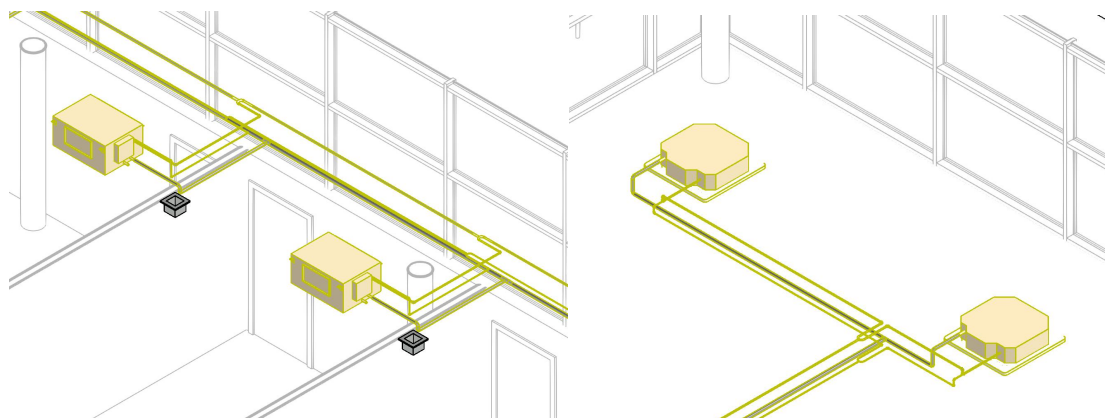
(b) 楼层平面-1F



(c) 楼层平面-2F



(d) 楼层平面-3F



(e) 管路连接细节图

图 6.4 示例建筑 A 的管路三维可视化结果

从表 6.1 可以看出，示例建筑 A 各环路的允许配管长度和高低差校核均能通过。

表 6.1 示例建筑 A 的允许配管长度和高低差校核结果

	L1	L2	L3	H1	H2
限制条件 (m)	≤ 1100	≤ 220	≤ 120	≤ 110	≤ 40
Loop1-实际值 (m)	77.3	61.1	35.8	9.5	0
Loop3-实际值 (m)	75.0	59.5	37.6	5.8	0
Loop5-实际值 (m)	75.8	63.0	40.9	1.9	0
限制条件 (m)	≤ 1000	≤ 175	≤ 90	≤ 90	≤ 30
Loop2-实际值 (m)	137.3	63.2	46.1	9.6	0
Loop4-实际值 (m)	157.3	62.1	46.8	5.8	0
Loop6-实际值 (m)	141.3	60.6	44.9	1.9	0
校核结果	通过	通过	通过	通过	通过

注释：L1：配管总长，

L2：最远室内机配管实际长度，

L3：第一分歧到最远配管相当长度，

H1：室内机与室外机的落差，

H2：室内机与室内机的落差。

6.1.2 示例建筑 B——学校建筑

该学校建筑(图 6.5)建筑面积 3748 m^2 ，空调面积 2143 m^2 ，体形系数为 0.27，主体建筑为框架结构。建筑共三层，主要功能为教室、活动室、保安室等。对于

建筑一层而言,左右两侧在建筑平面内存在隔断,因此在系统分区时被划分为两个空调区域,除此之外,各分区内的空调房间负荷特性相似,且能够匹配到合适的室外机组。



图 6.5 Revit 模型-示例建筑 B

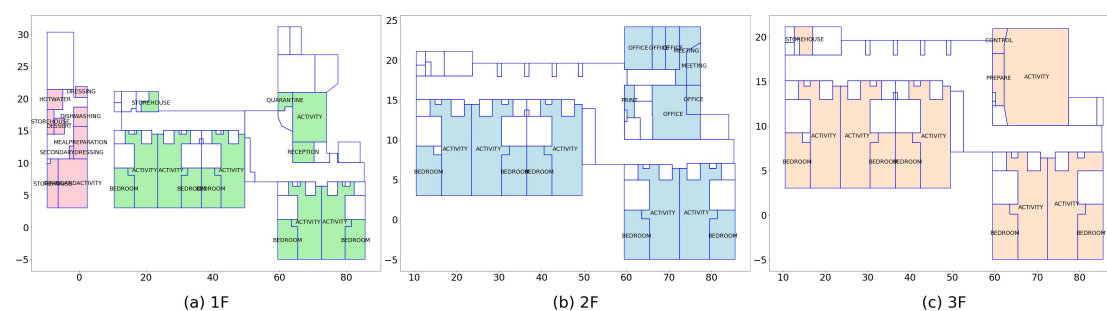
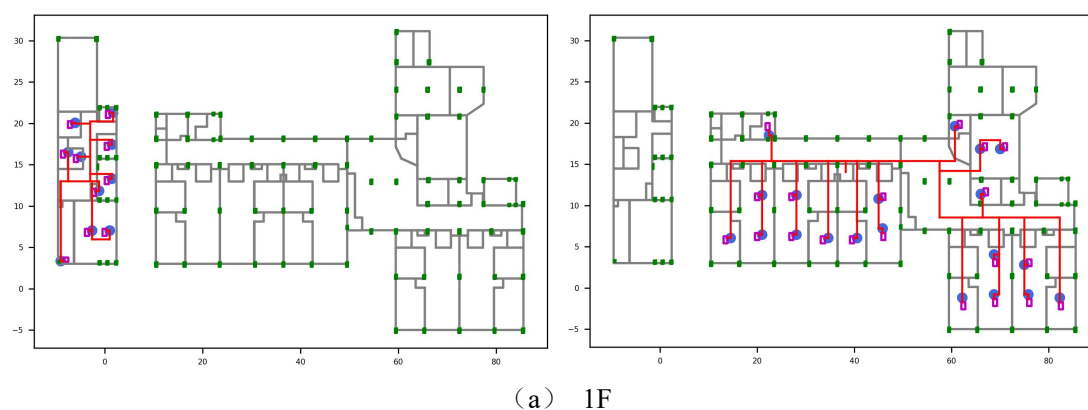
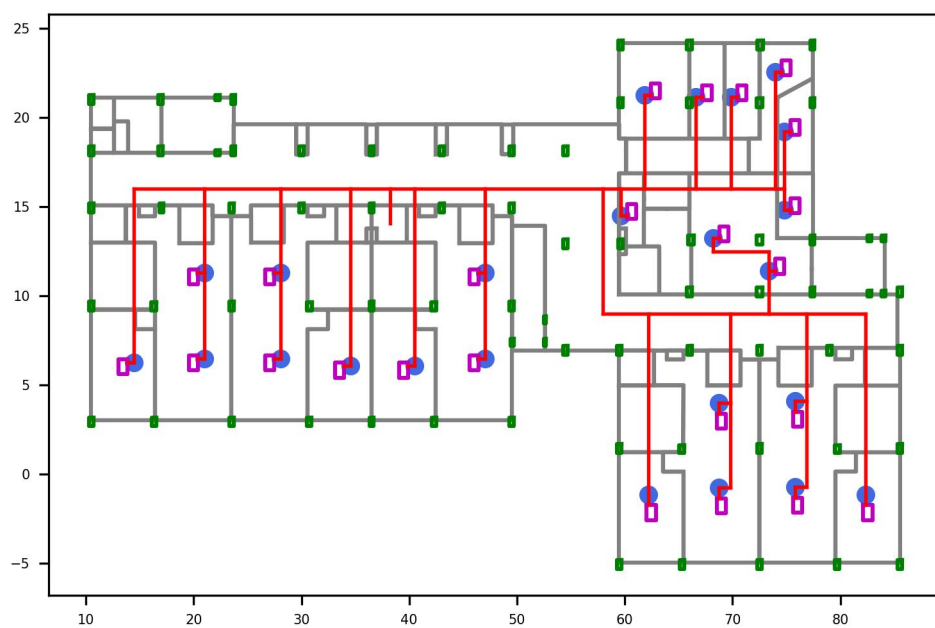
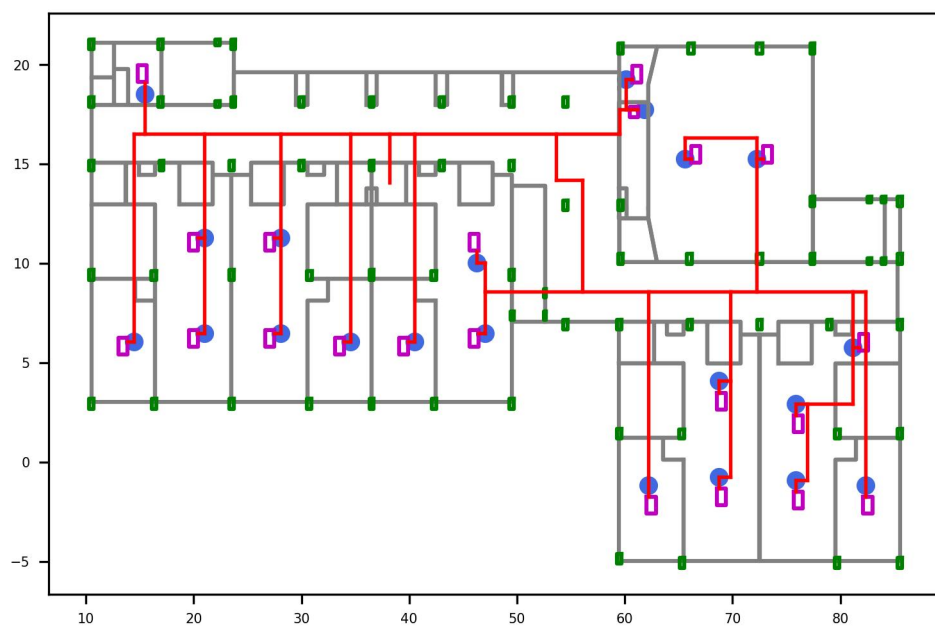


图 6.6 示例建筑 B 的自动分区结果





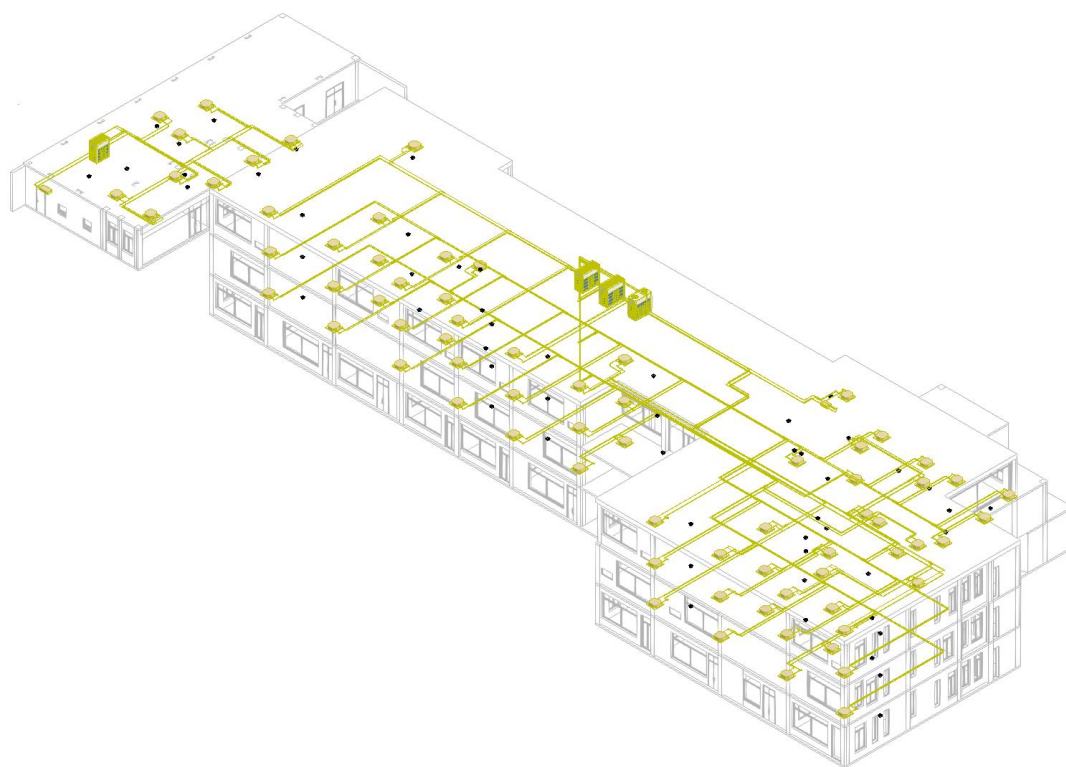
(b) 2F



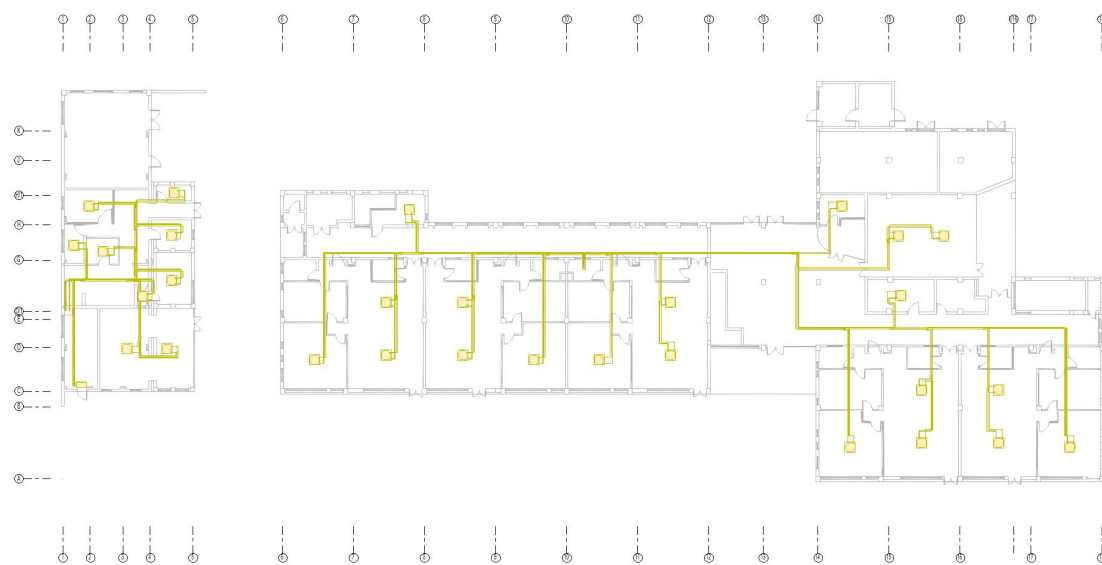
(c) 3F

图 6.7 示例建筑 B 的平面自动布管结果

图 6.8 为示例建筑 B 三维可视化的结果。得益于走廊主配管的输入，各房间内设备可以更快、更准确地与主配管相连，提高自动生成效率。



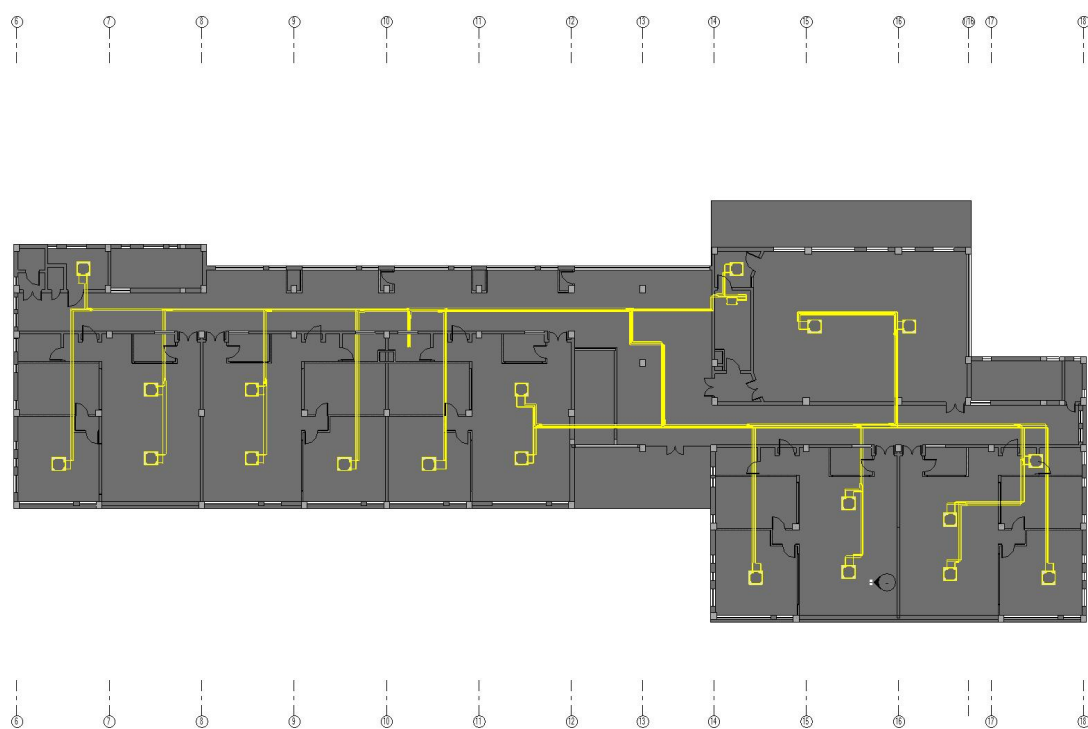
(a) 3D 视图



(b) 楼层平面-1F



(c) 楼层平面-2F



(d) 楼层平面-3F

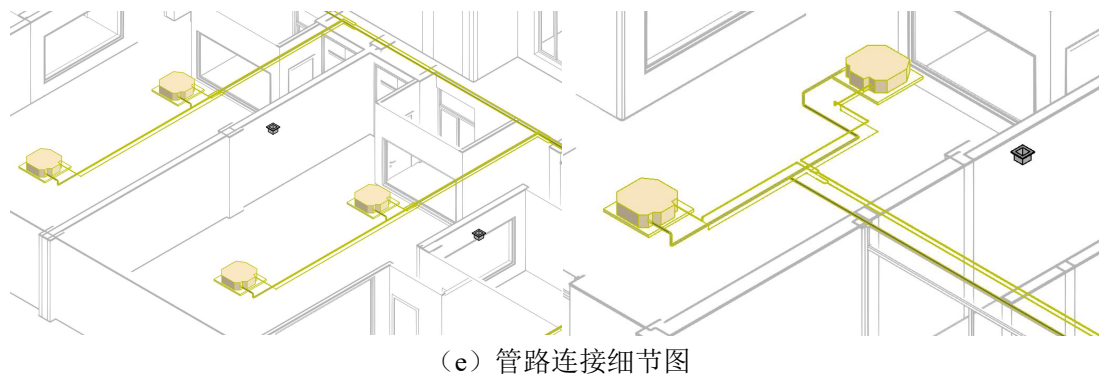


图 6.8 示例建筑 B 的管路三维可视化结果

从表 6.2 可以看出，示例建筑 B 的允许配管长度和高低差校核均满足限制条件要求。

表 6.2 示例建筑 B 的允许配管长度和高低差校核结果

	L1	L2	L3	H1	H2
限制条件 (m)	≤1100	≤220	≤120	≤110	≤40
Loop1-实际值 (m)	73.5	26.8	20.9	9.4	0
Loop2-实际值 (m)	217.3	74.8	63.0	9.3	0
Loop3-实际值 (m)	250.9	75.5	63.4	5.6	0
限制条件 (m)	≤1000	≤175	≤90	≤90	≤30
Loop4-实际值 (m)	233.1	75.5	63.9	1.8	0
校核结果	通过	通过	通过	通过	通过

6.1.3 示例建筑 C——医院建筑

示例建筑 C 所示医院门诊楼(图 6.9)占地面积约 $922 m^2$ ，建筑面积 $2795.97 m^2$ ，主体结构为框架结构。该建筑共三层，主要功能房间为就诊室、办公室等。该医院门诊楼规模较小，且功能较为单一，自动分区的结果为一层一个分区，每个分区由各自的室外机负责（图 6.10）。



图 6.9 Revit 模型-示例建筑 C

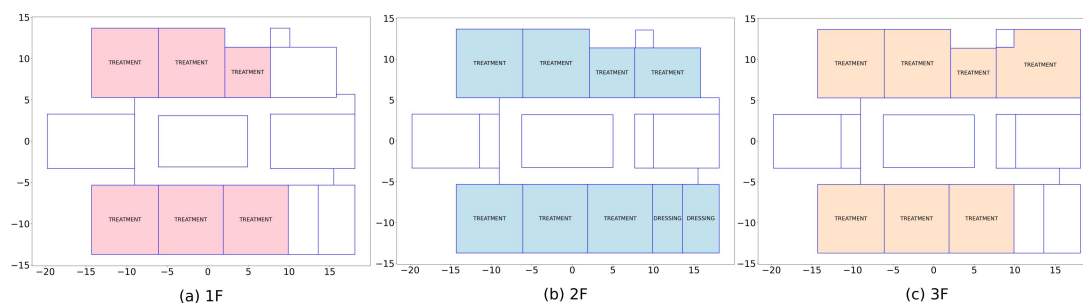
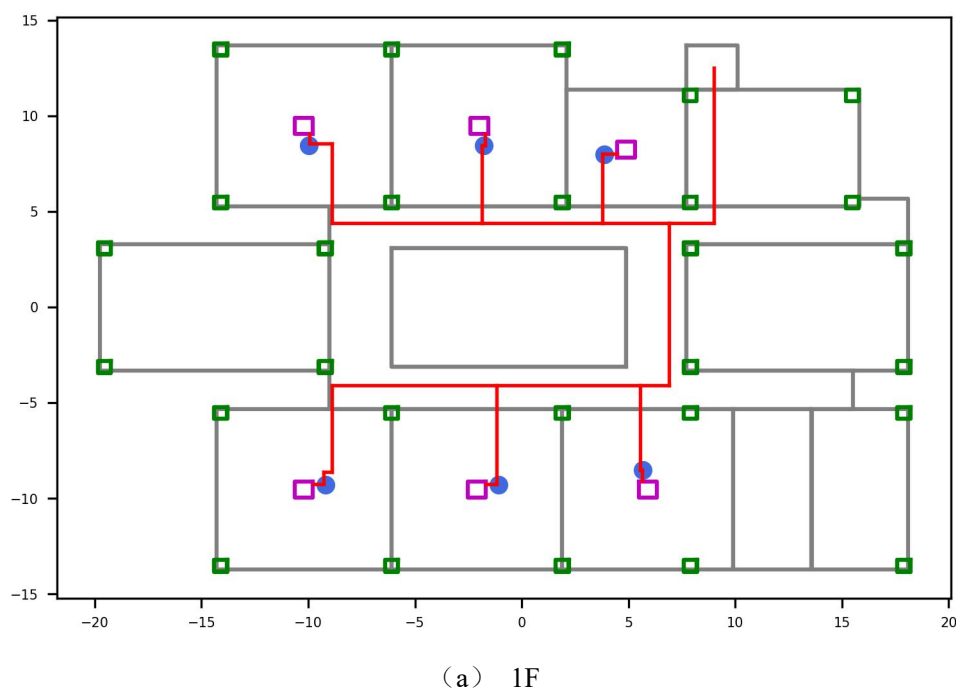
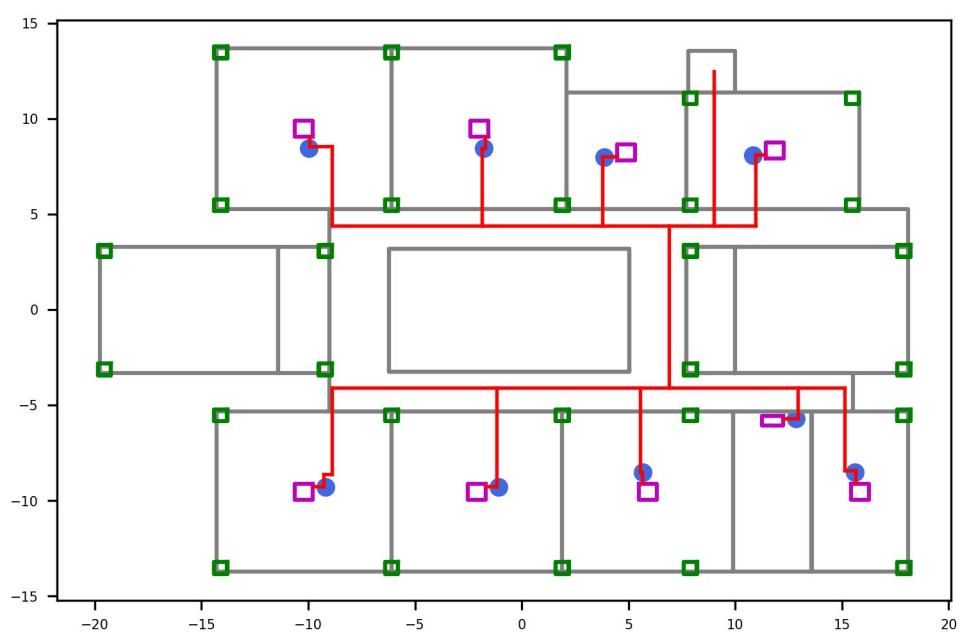


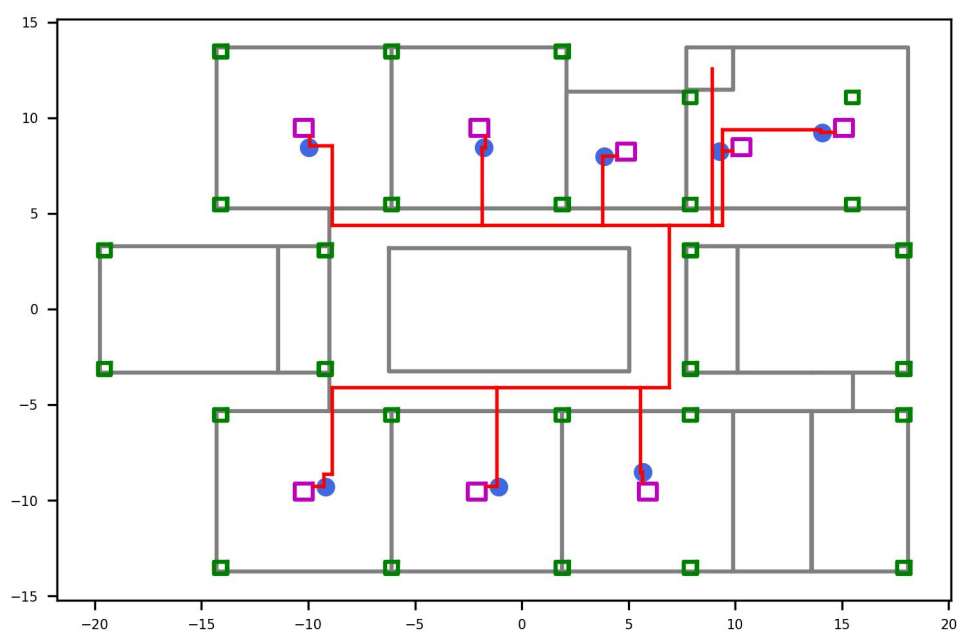
图 6.10 示例建筑 C 的自动分区结果

以下为示例建筑 C 的冷媒配管平面布局结果，房间内空调负荷较小，房间的室内机数量较少，连管速度较快且连管效果良好。





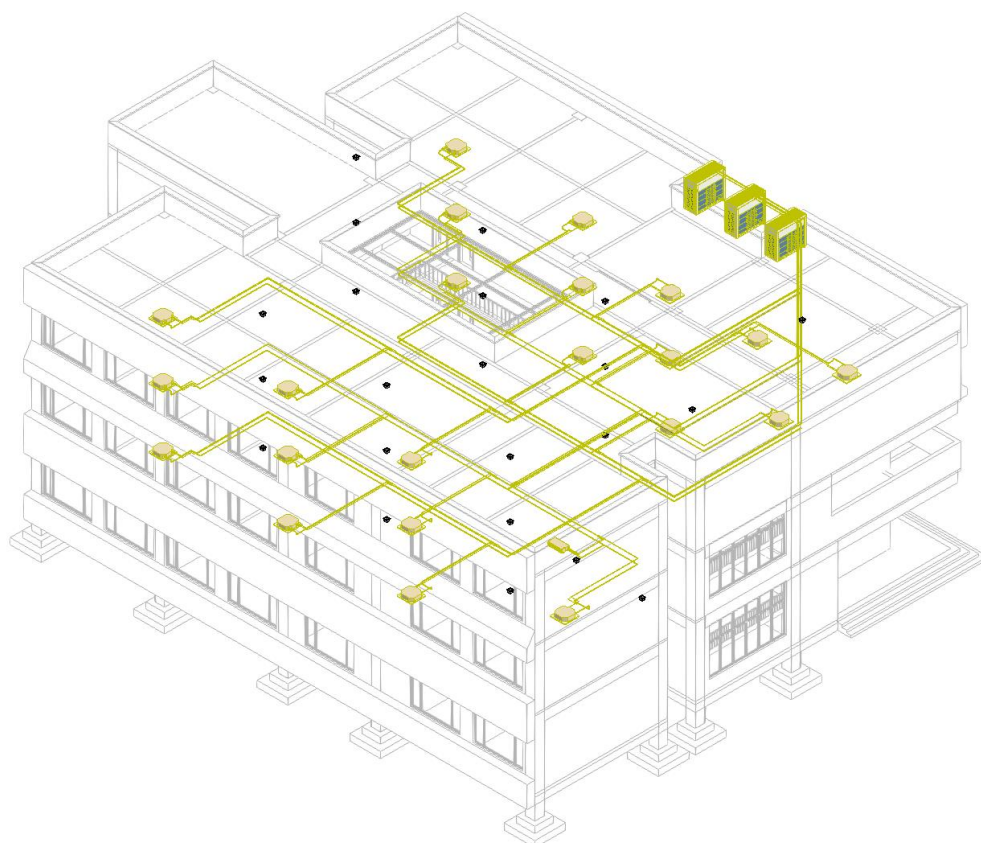
(b) 2F



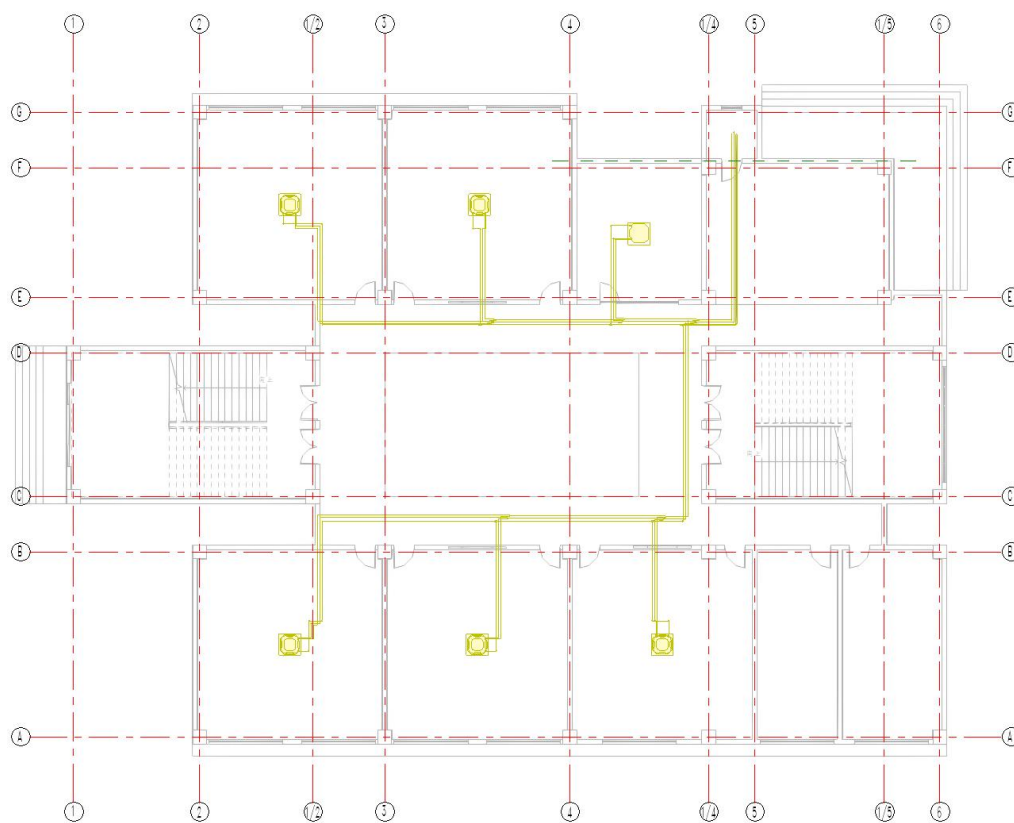
(c) 3F

图 6.11 示例建筑 C 的平面自动布管结果

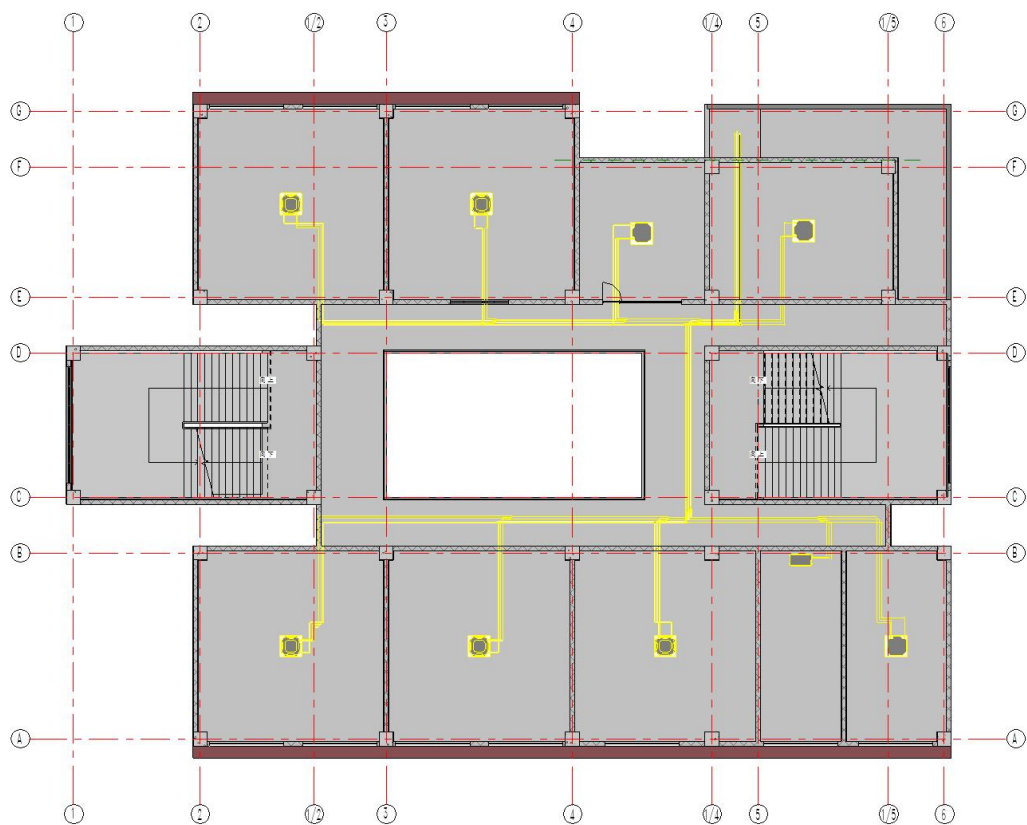
图 6.12 展示了示例建筑 C 的三维布管结果，管路布局结果较为规整，基本上能够保证室内机均匀分布在主配管两侧。



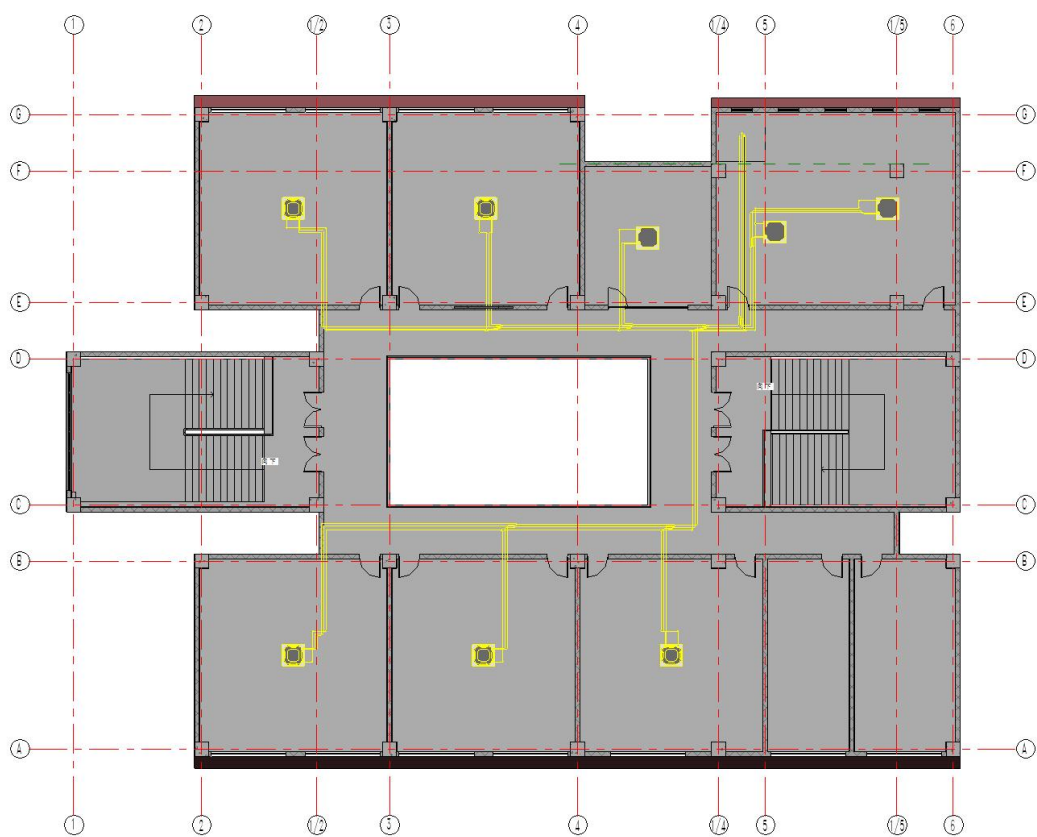
(a) 3D 视图



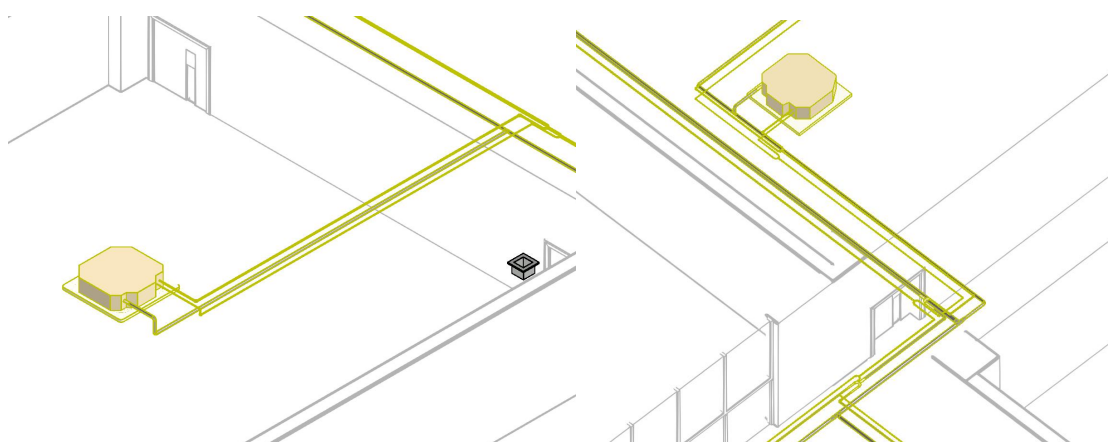
(b) 楼层平面-1F



(c) 楼层平面-2F



(d) 楼层平面-3F



(e) 管路连接细节图

图 6.12 示例建筑 C 的管路三维可视化结果

表 6.3 中所示的示例建筑 C 的允许配管长度和高低差校核结果符合设计规范。

表 6.3 示例建筑 C 的允许配管长度和高低差校核结果

	L1	L2	L3	H1	H2
限制条件 (m)	≤1100	≤220	≤120	≤110	≤40
Loop1-实际值 (m)	81.6	53.0	31.1	9.4	0
Loop2-实际值 (m)	104.7	51.7	33.1	5.6	0
Loop3-实际值 (m)	92.9	50.7	33.1	1.8	0
校核结果	通过	通过	通过	通过	通过

表 6.4 和表 6.5 分别统计了案例建筑在冷媒管路自动生成过程中算法的运行时间和允许错误率。实验结果表明，算法运行时间受到建筑房间数量和面积的影响，不同规模建筑的布管耗时存在一定差异。然而，在所有测试案例中，冷媒管路自动生成的计算时间均保持在秒级，相较于传统的人工绘图方式，图纸生成速度显著提升，大幅提高了设计效率。

在管路自动生成过程中，为了评估方案的可行性，本文对生成结果的允许错误率进行了统计分析。计算允许错误率时，异常管段的定义包括但不限于以下几种情况：未正确连接至系统的孤立管段、因长度过短而无法生成的管段、发生几何碰撞的管段、超出建筑边界的管段等。针对案例建筑进行的测试表明，冷媒管路自动布置的允许错误率均控制在 10% 以内，且平均允许错误率为 3.8%，管道自动连接效果良好，能够满足设计和施工要求。

表 6.4 多联机系统冷媒管路自动布置耗时统计

	示例建筑 A	示例建筑 B	示例建筑 C
分区时间 (s)	14.1	24.2	6.7

布管时间 (s)	37.8	50.6	11.3
总时间 (s)	51.9	74.8	18.0

表 6.5 多联机系统冷媒管路自动布置结果允许错误率统计

	示例建筑 A	示例建筑 B	示例建筑 C
管段总数	612	684	232
异常管段数	26	19	10
允许错误率 (%)	4.2	2.8	4.3
平均允许错误率 (%) : 3.8			

6.2 冷媒管道自动布线设计寻优案例

本章节以一栋商业建筑（图 6.13）为例讨论自动布线设计的寻优，分别赋予目标函数不同的权重值，对自动生成的管路设计方案进行运行时间、允许错误率的定量评价，并对系统稳定性进行量化评估。

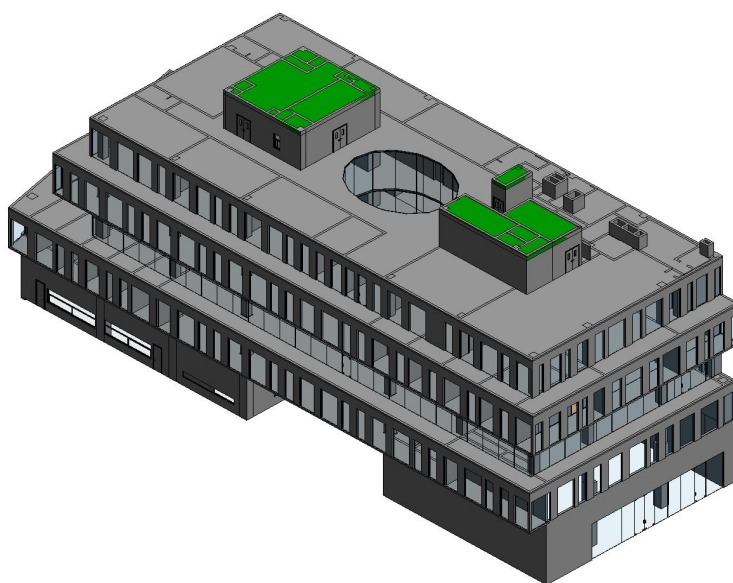


图 6.13 Revit 模型-某商业建筑

该商业建筑共五层，建筑面积 $8872.17 m^2$ ，体形系数为 0.23，主体建筑为框架结构。赋予目标函数不同的权重值，所得到的算法运行时间统计于表 6.6 中，自动布置结果的允许错误率统计于表 6.7 中。算法运行时间与权重设置的关联性不强，主要还是由房间内的室内机数量决定，室内机数量增多，计算负担也会加大。允许错误率与权重设置之间没有明显的关联，但随着建筑平面复杂程度的提高和房间内室内机数量的增加，允许错误率会略有升高。

表 6.6 不同权重的冷媒管路自动布置耗时统计

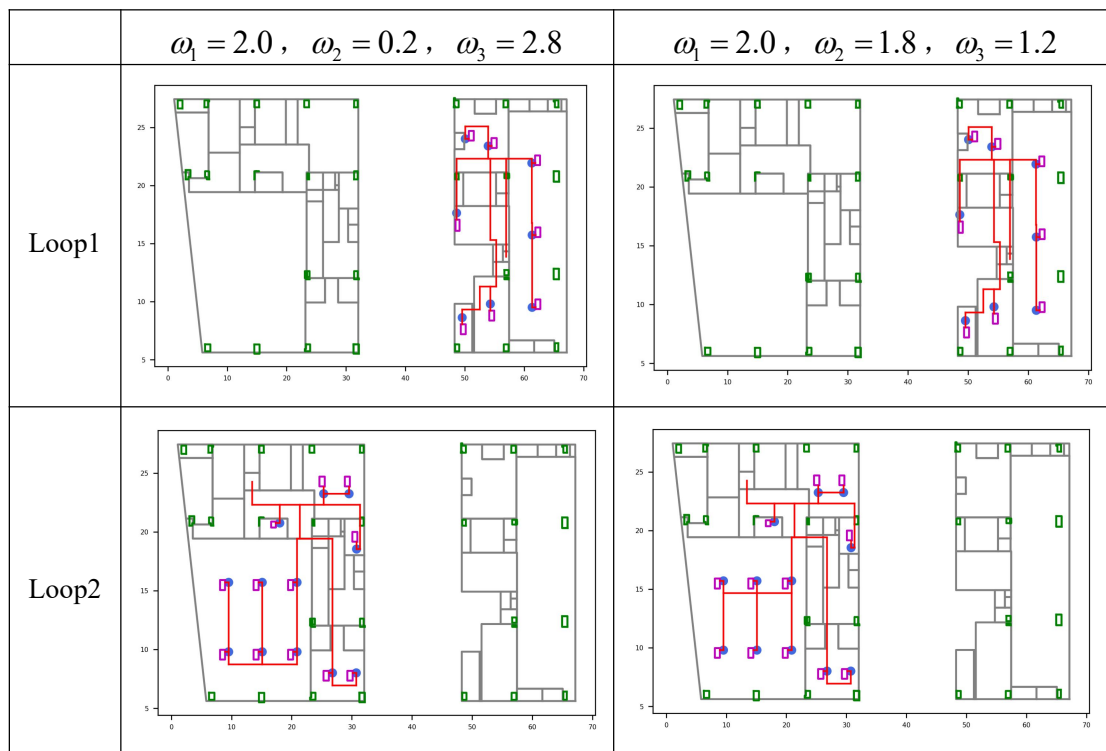
	$\omega_1 = 2.0, \omega_2 = 0.2, \omega_3 = 2.8$	$\omega_1 = 2.0, \omega_2 = 1.8, \omega_3 = 1.2$
分区时间 (s)	33.8	33.8
布管时间 (s)	160.0	159.2
总时间 (s)	193.8	193.0

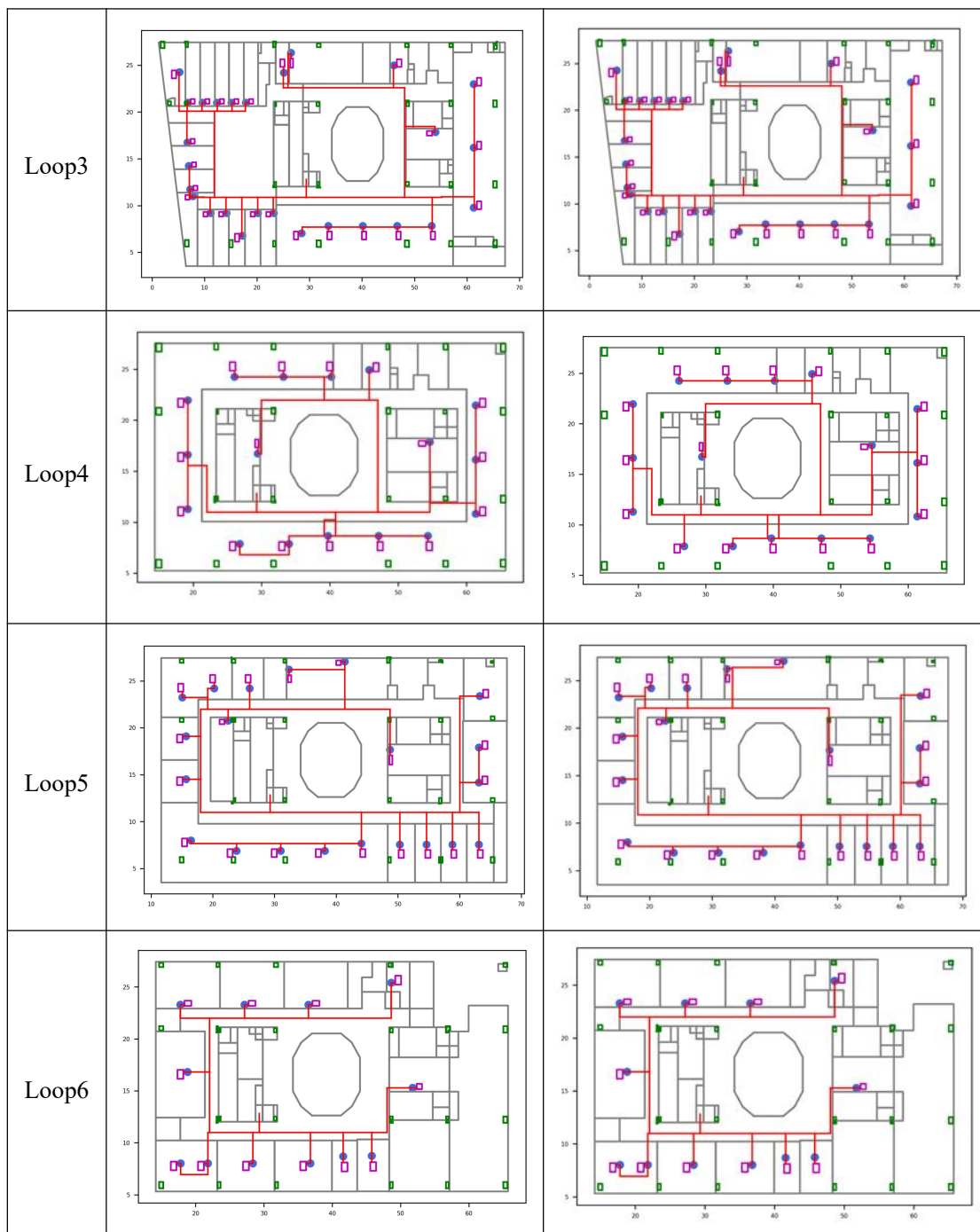
表 6.7 不同权重的冷媒管路自动布置结果允许错误率统计

	$\omega_1 = 2.0, \omega_2 = 0.2, \omega_3 = 2.8$	$\omega_1 = 2.0, \omega_2 = 1.8, \omega_3 = 1.2$
管段总数	1016	1013
异常管段数	43	46
允许错误率 (%)	4.2	4.5

在表 6.8 中, Loop2 中有四通生成, 通过控制目标函数的权重, 可以控制房间内四通数量, 管线总长度, 以及冷媒分布均匀性的平衡。

表 6.8 不同权重的冷媒管路自动布置结果允许错误率统计





经校核,各环路的允许配管长度和高低差均满足设计要求,下面计算 $\omega_1 = 2.0$, $\omega_2 = 0.2$, $\omega_3 = 2.8$ 时冷媒配管的容量平衡度 U ,以此来判断整个环路的冷媒分配均匀程度。

表 6.9 冷媒配管的容量平衡度

	Loop1	Loop2	Loop3	Loop4	Loop5	Loop6
容量平衡度 U	0.25	0.83	0.11	0.65	0.14	0.33

综上所述,冷媒分布均匀性受到多方面因素的影响,一方面,冷媒分布均匀

性与目标函数的权重设置存在一定关联,这里主要影响的是房间内的冷媒分配情况,其影响范围相对局部,且程度较小。另一方面,冷媒分布均匀性还受到冷媒管井位置和走廊主配管布局的影响,这决定了整个系统的冷媒输送路径,对冷媒的整体分布起到了关键作用。冷媒管井位置直接影响主配管的分布路径及压力损失,因此在建模初期,需要合理规划冷媒管井位置,以确保冷媒输送路径的均衡性。而本研究中的走廊主配管则采用已有算法自动生成。

6.3 本章小结

本章测试了四栋典型公共建筑的冷媒管路自动生成情况,并从多个维度对生成结果进行了量化分析,包括算法运行时间、允许错误率计算、允许配管长度和高低差校核以及系统稳定性评估。分析结果表明,算法运行时间能够控制在秒级,且四栋测试建筑的允许错误率均低于5%。同时,所有测试案例的配管长度与高低差均符合设计规范,确保了方案的可行性。此外,系统稳定性的优化需要从目标函数设置和初期规划两方面入手,以进一步提升冷媒分配的均匀性。总体而言,本文提出的冷媒管路自动生成方法能够满足工程设计需求,并且在绘图效率上远远高于人工绘图,在配管计算的精度和准确度上也更具优势,为设计和施工提供了更加高效、便捷的辅助工具。

第 7 章 结论与展望

7.1 结论与成果

本研究针对多联机空调系统的冷媒管路布置的诸项问题,提出了基于层次聚类和设计规则的系统自动分区方法,随后,提出了基于改进逃逸图建模与并行搜索蚁群算法的冷媒配管自动生成方法以及基于 BFS 和连接规则的分歧管自动接入管路的方法,并对生成结果进行综合评估,最终实现冷媒管路的三维可视化。该方法在考虑建筑空间约束、配管优化目标以及冷媒配管连接规则的基础上,实现了冷媒管路的自动规划,提高了设计效率。

具体而言,首先,本文基于层次聚类和冷媒管路设计规则自动划分空调区域。本文的系统分区主要考虑负荷特性、空间几何、防火分区、配管长度的影响。首先,依据负荷计算结果采用凝聚型层次聚类算法初步划分空调区域,在该过程中,通过 WCBCR 指标确定聚类数。此外,针对多联机系统配管长度的限制,预估走管路径并简化配管计算,提前计算分区内的配管长度和高低差。若评估结果不满足设计手册中的限制条件,则需要进一步细分空调区域。

其次,通过改进的逃逸图构建冷媒管路避障寻径空间,使管线在避障的同时满足施工可行性要求。随后,论文综合考虑了冷媒管路的约束条件,通过设定目标函数,从冷媒分布均匀性、管路总长度、四通数量等方面进行优化,采用并行搜索的改进蚁群算法自动规划冷媒管路路径,确保生成最优方案。平面管路布局生成之后,采用 BFS 算法对 Graph 中度为 3 的节点进行排序,依照分歧管与管路的连接规则依次将分歧管接入到管路中,并实现上下游配管与分歧管对应点位的真实连接。

最后,在方案评价方面,根据多联机设计手册要求,依次计算各个环路的配管长度和高低差,判断方案是否满足设计要求,若满足要求,则采用算法运行时间和允许错误率指标评估方案的可靠性。此外,通过计算主配管上的室内机容量偏差来衡量系统的冷媒分布均匀性,以确保系统稳定运行。最终,在四栋公共建筑上进行测试来验证本研究方法,该方法在保证冷媒管路合理性的同时,能够显著提高设计效率,算法运行时间控制在秒级,且自动布置的允许错误率均低于 5%,验证了该方法的可行性。

7.2 主要贡献

本论文的主要贡献包括以下两个方面：

(1) 提出了面向多联机空调系统冷媒管路布局的自动化建模与优化方法

本文综合多联机空调系统的设计需求，提出了一套从空调区域自动划分、避让空间建模到冷媒管路自动生成的完整方法框架。具体包括：基于负荷特性聚类 and 设计规则优化的自动分区策略；采用改进逃逸图构建布局空间可行域；引入并行搜索机制并与遗传算子融合的改进蚁群优化算法，协同考虑管路长度、冷媒分布均匀性与四通数量等多目标因素，实现冷媒管路的高效自动化布置。

(2) 构建了融合设计约束与性能指标的布管方案综合评估体系

基于管路拓扑结构，本文提出分歧管自动接入算法，构建数据化、格式化的分歧管连接规则，实现智能接入。此外，从配管长度和高低差校核，算法运行时间和允许错误率计算，项目成本及运行稳定性评估等多个维度，对自动布置方案进行综合量化分析，为多目标布置结果提供全面的合理性评估标准，有效解决了方案优化不足、设计效率较低等现存问题。

7.3 局限性与展望

尽管本研究提出的冷媒管路自动布置方法在诸多方面取得了较好的效果，但仍存在一定的局限性。

首先，算法在复杂建筑环境下的适应性仍有提升空间，特别是在大规模建筑或存在较多障碍物的情况下，计算效率和优化效果可能受到影响。其次，自动布管结果对走廊主配管的依赖性较强，若走廊主配管无法生成或生成效果不佳，冷媒管路自动生成的效果也会受到较大影响。

未来研究可从以下几个方面进一步优化：

(1) 进一步扩展算法的测试范围，引入更多建筑开展算法测试和优化工作，提高算法的鲁棒性。

(2) 针对规模较大的建筑，引入建筑标准层，减轻计算工作量和绘图负担。

(3) 可以考虑与其他智能算法的对比分析，例如引入协同进化算法来实现冷媒管路自动规划。

(4) 结合其他建筑子系统，综合考虑冷媒管道的布局。

参考文献

- [1] 吕雪涛. 多联机空调系统的设计与应用[J]. 住宅与房地产, 2021.
- [2] 曾卫军. 多联机空调系统设计问题探析[J]. 收藏, 2019, 18.
- [3] 程亨达, 成建宏, 邵双全, 等. 我国不同气候区办公建筑多联机系统能效分析.[J/OL]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2023, 43(2)[2025-03-06]. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=20954468&AN=169933329&h=YZREIexKvKLCt6ZUSmCWf%2FGYLY6Gnlb%2FFc6a5pMSKaLsP1R7u62P8bEzoixRTfaWjKSaHt2J8JwcJnaFvaOA%3D%3D&crl=c>.
- [4] 姚杨. 暖通空调热泵技术 [M/OL]. 中国建筑工程出版社, 2019[2025-03-06]. <https://oss0-cdn.changxianggu.com/file/2020/06/b91e0c0a6d572b702d42fa88e6e91235.pdf>.
- [5] BORRMANN A, KÖNIG M, KOCH C, 等. Building Information Modeling: Why? What? How?[M/OL]//BORRMANN A, KÖNIG M, KOCH C, 等. Building Information Modeling. Cham: Springer International Publishing, 2018: 1-24[2025-03-06]. http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-92862-3_1. DOI:10.1007/978-3-319-92862-3_1.
- [6] COSTIN A, ADIBFAR A, HU H, 等. Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure—Literature review, applications, challenges, and recommendations[J]. Automation in construction, 2018, 94: 257-281.
- [7] TANG S, SHELDEN D R, EASTMAN C M, 等. A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends[J]. Automation in construction, 2019, 101: 127-139.
- [8] ELLIS M W, MATHEWS E H. Needs and trends in building and HVAC system design tools[J]. Building and environment, 2002, 37(5): 461-470.
- [9] LIN Y, BIAN X yi, DONG Z ran. A discrete hybrid algorithm based on Differential Evolution and Cuckoo Search for optimizing the layout of ship pipe route[J]. Ocean Engineering, 2022, 261: 112164.
- [10] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths[J]. IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4(2): 100-107.
- [11] DIJKSTRA E W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs[M/OL]//APT K R, HOARE T. Edsger Wybe Dijkstra. 1 版. New York, NY, USA: ACM, 2022: 287-290[2025-02-13]. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3544585.3544600>. DOI:10.1145/3544585.3544600.
- [12] 杨世忠, 孙崇国, 李善伟. 基于改进 GA 的变风量空调系统优化控制仿真[J]. 计算机仿真, 2021.
- [13] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence[M/OL]. MIT press, 1992[2025-02-13]. <https://www.google.com/books?hl=zh-CN&lr=&id=5EgGaBkwvWcC&oi=fnd&pg=PR7&dq>

- =Adaptation+in+Natural+and+Artificial+Systems&ots=mKir4_Olwj&sig=HAYGQng4OuLXWwf3NWzU7jgvktY.
- [14] DORIGO M, BIRATTARI M, STUTZLE T. Ant colony optimization[J]. IEEE computational intelligence magazine, 2006, 1(4): 28-39.
- [15] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C/OL]//Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks: 卷 4. ieee, 1995: 1942-1948[2025-02-13]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/488968/>.
- [16] LEE C Y. An algorithm for path connections and its applications[J]. IRE transactions on electronic computers, 1961(3): 346-365.
- [17] AURENHAMMER F. Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure[J/OL]. ACM Computing Surveys, 1991, 23(3): 345-405. DOI:10.1145/116873.116880.
- [18] GUIRARDELLO R. Optimization of process plant layout[M/OL]. The University of Wisconsin-Madison, 1993[2025-02-13]. <https://search.proquest.com/openview/4ea7415d36eefc0431609deac7c8c110/1?pq-origsite=scholar&cbl=18750&diss=y>.
- [19] SCHMIDT-TRAUB H, KÖSTER M, HOLTKÖTTER T, 等. Conceptual plant layout[J]. Computers & chemical engineering, 1998, 22: S499-S504.
- [20] HIGHTOWER D W. A solution to line-routing problems on the continuous plane[C/OL]//Proceedings of the 6th annual conference on Design Automation - DAC '69. Not Known: ACM Press, 1969: 1-24[2025-02-13]. <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=800260.809014>. DOI:10.1145/800260.809014.
- [21] NEWELL R G. An Interactive Approach to Pipe Routing in Process Plants.[C]//IFIP Congress (2). 1971: 1080-1085.
- [22] NICHOLSON T A J. Finding the shortest route between two points in a network[J]. The computer journal, 1966, 9(3): 275-280.
- [23] 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.
- [24] COLORNI A, DORIGO M, MANIEZZO V. Distributed optimization by ant colonies[C/OL]//Proceedings of the first European conference on artificial life: 卷 142. Paris, France, 1991: 134-142[2025-02-13]. <https://faculty.washington.edu/paymana/swarm/colorni92-ecal.pdf>.
- [25] ASMARA A, NIENHUIS U. Automatic piping system in ship[C/OL]//International Conference on Computer and IT Application (COMPIT). Citeseer, 2006: 269-280[2025-02-13]. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=9a31e64f0388eeb3e6b6ae249d521294f16c48f1>.
- [26] 郭君, 林焰, 纪卓尚, 等. 基于协同进化的舰船分支管路系统路径优化研究[J]. 船海工程, 2008, 37(4): 135-138.
- [27] LIU Q, WANG C. A discrete particle swarm optimization algorithm for rectilinear branch pipe routing[J]. Assembly Automation, 2011, 31(4): 363-368.
- [28] LIU Q. A rectilinear pipe routing algorithm: Manhattan visibility graph[J/OL]. International

- Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2015: 1-10. DOI:10.1080/0951192X.2015.1033019.
- [29] LIU L, LIU Q. Multi-objective routing of multi-terminal rectilinear pipe in 3D space by MOEA/D and RSMT[C/OL]//2018 3rd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM). IEEE, 2018: 462-467[2024-07-17]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8610824/>.
- [30] HWANG F K. On Steiner Minimal Trees with Rectilinear Distance[J/OL]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 1976, 30(1): 104-114. DOI:10.1137/0130013.
- [31] QU Y, JIANG D, YANG Q. Branch pipe routing based on 3D connection graph and concurrent ant colony optimization algorithm[J/OL]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2018, 29(7): 1647-1657. DOI:10.1007/s10845-016-1203-4.
- [32] STÜTZLE T, HOOS H H. MAX-MIN ant system[J]. Future generation computer systems, 2000, 16(8): 889-914.
- [33] 王运龙, 王晨, 彭飞, 等. 基于人机结合遗传算法的船舶管路三维布局优化设计[J]. 中国造船, 2015, 56(1): 196-202.
- [34] 姜文英. 船舶主船体高效率布置设计方法研究[D]. 大连理工大学, 2016.
- [35] DONG Z, BIAN X. Ship pipe route design using improved A* algorithm and genetic algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 153273-153296.
- [36] DONG Z ran, BIAN X yi, ZHAO S. Ship pipe route design using improved multi-objective ant colony optimization[J]. Ocean Engineering, 2022, 258: 111789.
- [37] BIAN X, LIN Y, DONG Z. Auto-routing methods for complex ship pipe route design[J]. Journal of Ship Production and Design, 2022, 38(02): 100-114.
- [38] STEMKOSKI L, PASCALE M. Developing graphics frameworks with Python and OpenGL[M/OL]. Taylor & Francis, 2021[2025-03-06]. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/48838>.
- [39] UENG S K, HUANG H K. A distance-field-based pipe-routing method[J]. Materials, 2022, 15(15): 5376.
- [40] KIM Y, LEE K, NAM B, 等. Application of reinforcement learning based on curriculum learning for the pipe auto-routing of ships[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2023, 10(1): 318-328.
- [41] HA J, ROH M I, KIM K S, 等. Method for pipe routing using the expert system and the heuristic pathfinding algorithm in shipbuilding[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2023, 15: 100533.
- [42] 段凡丁. 关于最短路径的 SPFA 快速算法[J]. 西南交通大学学报, 1994, 29(2): 207-212.
- [43] 刘亚秋, 赵汉琛, 刘勋, 等. 一种基于改进的快速扩展随机树的工业机器人路径避障规划算法[J/OL]. Information & Control, 2021(2)[2025-03-06]. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=10020411&AN=175949773&h=z5G3i40n3NqFR2vZGiDJunz6EZfWDv9pSd2Nb36tWqa90ZsteizbzKwroAE%2BDBwfVvk3d8IYYrByQIy8CAYpJA%3D%3D&crl=c>.
- [44] MEDJDOUB B, RICHENS P, BARNARD N. Generation of variational standard plant room solutions[J]. Automation in Construction, 2003, 12(2): 155-166.
- [45] MEDJDOUB B. Constraint-based adaptation for complex space configuration in building

- services[J]. Journal of Information Technology in Construction (ITCon), 2009, 14: 724-735.
- [46] MEDJDOUB B, CHENINI M B. A constraint-based parametric model to support building services design exploration[J/OL]. Architectural Engineering and Design Management, 2015, 11(2): 123-136. DOI:10.1080/17452007.2013.834812.
- [47] SUTER G, PETRUSHEVSKI F, ŠIPETIĆ M. Operations on network-based space layouts for modeling multiple space views of buildings[J]. Advanced Engineering Informatics, 2014, 28(4): 395-411.
- [48] BRES A, JUDEX F, SUTER G, 等. A method for automated generation of HVAC distribution subsystems for building performance simulation[C/OL]//Building Simulation 2017: 卷 15. IBPSA, 2017: 1548-1557[2025-02-13]. https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bs2017_413.
- [49] DASGUPTA S, LONG P M. Performance guarantees for hierarchical clustering[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2005, 70(4): 555-569.
- [50] CAI R, ZHANG Z, TUNG A K, 等. A general framework of hierarchical clustering and its applications[J]. Information Sciences, 2014, 272: 29-48.
- [51] 冯晓蒲, 张铁峰. 四种聚类方法之比较[J]. 微型机与应用, 2010, 29(16): 1-3.
- [52] Dynamic Time Warping[M/OL]//MÜLLER M. Information Retrieval for Music and Motion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 69-84[2025-03-06]. http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-74048-3_4. DOI:10.1007/978-3-540-74048-3_4.
- [53] FAISAL M, ZAMZAMI E M. Comparative analysis of inter-centroid K-Means performance using euclidean distance, canberra distance and manhattan distance[C/OL]//Journal of Physics: Conference Series: 卷 1566. IOP Publishing, 2020: 012112[2025-03-06]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1566/1/012112/meta>.
- [54] DANIELSSON P E. Euclidean distance mapping[J]. Computer Graphics and image processing, 1980, 14(3): 227-248.
- [55] JARMAN A M. Hierarchical cluster analysis: Comparison of single linkage, complete linkage, average linkage and centroid linkage method[J]. Georgia Southern University, 2020, 29: 32.
- [56] SHARMA S, BATRA N. Comparative study of single linkage, complete linkage, and ward method of agglomerative clustering[C/OL]//2019 international conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon). IEEE, 2019: 568-573[2025-03-06]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8862232/>.
- [57] 耿嘉艺, 钱雪忠, 周世兵. 紧邻类与小类数据集下的模糊聚类有效性指标[J/OL]. Application Research of Computers/Jisuanji Yingyong Yanjiu, 2020, 37(9)[2025-03-08]. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=10013695&AN=146740104&h=QYc2qGhFcCptFuLI5Ir2QgUCGdXT5GVgKqKhPctfCA2Zlq5cpcOw4D%2FPn3B8Aj3W38IWstegNUK4irIxN4eJvA%3D%3D&crl=c>.
- [58] TSEKOURAS G J, KOTOULAS P B, TSIREKIS C D, 等. A pattern recognition methodology for evaluation of load profiles and typical days of large electricity customers[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(9): 1494-1510.
- [59] 蔡永雄. 变频多联机空调系统设计[J]. 大众科技, 2015, 17(3): 78-79.
- [60] 王宜卿, 成建宏, 陈焕新, 等. 用于居民建筑的多联机系统能效标准分区可行性探

- 讨[J/OL]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2023, 43(3)[2025-03-06].
<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=20954468&AN=172900787&h=Ovjus1k4RxxG9IXobU2eyL58US8PACUU%2BCh8Vgup8Y7qov%2Bp4QNWQQ6b9Kt83%2FRB8dCX3UTNEbpenrvlQu%2FbnA%3D%3D&crl=c>.
- [61] 胡桂秋, 逯国强. 多联机空调系统设计要点[J/OL]. 承德石油高等专科学校学报, 2015, 4[2025-03-06].
<https://s-fa.banshouhui.com/uploads/20201107/FjAgrhpX2g7J7RJZbHHwfrDgZtJR.pdf>.
- [62] HOWDEN W E. The sofa problem[J]. The computer journal, 1968, 11(3): 299-301.
- [63] LOZANO-PÉREZ T, WESLEY M A. An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles[J/OL]. Communications of the ACM, 1979, 22(10): 560-570. DOI:10.1145/359156.359164.
- [64] EDELSBRUNNER H, SEIDEL R. Voronoi diagrams and arrangements[C/OL]//Proceedings of the first annual symposium on Computational geometry - SCG '85. Baltimore, Maryland, United States: ACM Press, 1985: 251-262[2025-03-06].
<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=323233.323266>. DOI:10.1145/323233.323266.
- [65] ERWIG M. The graph Voronoi diagram with applications[J/OL]. Networks, 2000, 36(3): 156-163. DOI:10.1002/1097-0037(200010)36:3<156::AID-NET2>3.0.CO;2-L.
- [66] GANLEY J L, COHOON J P. Routing a multi-terminal critical net: Steiner tree construction in the presence of obstacles[C/OL]//Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems-ISCAS'94: 卷 1. IEEE, 1994: 113-116[2025-03-06].
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/408768/>.
- [67] 唐志荣, 冀杰, 吴明阳, 等. 基于改进人工势场法的车辆路径规划与跟踪[J]. 西南大学学报 (自然科学版), 2018, 40(6): 174-182.
- [68] 朱冰, 韩嘉懿, 赵健, 等. 基于安全场改进 RRT* 算法的智能汽车路径规划方法[J]. 汽车工程, 2020, 42(9): 1145-1150.
- [69] DONG L, LIN B, JIANG Y, 等. Automatic Generation of Pipe Routing for Variable Refrigerant Flow Air Conditioning System[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 100: 111755.
- [70] HWANG F K, RICHARDS D S. Steiner tree problems[J/OL]. Networks, 1992, 22(1): 55-89. DOI:10.1002/net.3230220105.
- [71] KOU L, MARKOWSKY G, BERMAN L. A fast algorithm for Steiner trees[J/OL]. Acta Informatica, 1981, 15(2): 141-145. DOI:10.1007/BF00288961.
- [72] GREENBERG H J. Greedy algorithms for minimum spanning tree[J/OL]. University of Colorado at Denver, 1998[2025-03-06].
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=3b970f06f9fa8cd229d78e51ff146a0e034861fb>.
- [73] DEY A, PAL A. Prim's algorithm for solving minimum spanning tree problem in fuzzy environment[J]. Annals of Fuzzy Mathematics and Informatics, 2016, 12(3): 419-430.
- [74] KRAUSE E F. Taxicab geometry[J]. Mathematics Teacher, 1973, 66(8): 695-706.
- [75] KU C L. 連環再冷系統應用於普通病房改建負壓隔離病房之研究[D/OL]. National Taiwan Normal University (Taiwan), 2022[2025-03-07].

- <https://search.proquest.com/openview/f04caad3e0497d8f6c0e7ea7af9c3a45/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>.
- [76] 马宪亭. 流体传动中的压力损失分析与计算[J]. 流体传动与控制, 2010(4): 50-51.
- [77] DORIGO M, BLUM C. Ant colony optimization theory: A survey[J]. Theoretical computer science, 2005, 344(2-3): 243-278.
- [78] 梁江涛, 王慧琴. 基于改进蚁群算法的建筑火灾疏散路径规划研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(5): 1044.
- [79] 夏桂梅, 曾建潮. 一种基于轮盘赌选择遗传算法的随机微粒群算法[J]. 计算机工程与科学, 2007, 29(6): 51.
- [80] 朱艳, 游晓明, 刘升. 基于启发式机制的改进蚁群算法[J]. 信息与控制, 2019, 48(3): 265-271.
- [81] DEBNATH S K, OMAR R, LATIP N A, 等. A review on graph search algorithms for optimal energy efficient path planning for an unmanned air vehicle[J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2019, 15(2): 743-749.
- [82] TARJAN R. Depth-First Search and Linear Graph Algorithms[J/OL]. SIAM Journal on Computing, 1972, 1(2): 146-160. DOI:10.1137/0201010.
- [83] BUNDY A, WALLEN L. Breadth-First Search[M/OL]//BUNDY A, WALLEN L. Catalogue of Artificial Intelligence Tools. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1984: 13-13[2025-02-18]. http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-96868-6_25. DOI:10.1007/978-3-642-96868-6_25.
- [84] VERWER B J H, VERBEEK P W, DEKKER S T. An efficient uniform cost algorithm applied to distance transforms[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(4): 425-429.
- [85] 白响恩, 江明哲, 徐笑锋, 等. 基于双向搜索的改进蚁群算法的船舶路径规划[J]. 中国航海, 2022, 45(3): 13-20.
- [86] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[Z]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

致谢

三年时光，白驹过隙。突然之间，觉得轻松。或许因为经历过的，不管好的坏的，总是会变得简单，甚至变得模糊。流过的泪，诉过的苦，也随时间消逝在银河，就像从没出现过。大抵人总是喜欢选择性淡忘，或者说是要忘掉一些对你的人生无关紧要的过路的东西。

成长，是有的。从心态上，从解决问题的能力上，从自我认知上，从对世界的认知上，这些都在不知不觉地发生着变化。在科研项目上，在实践实习中，我更清晰地认识到了自己的优势，也更清楚地感知着社会的规则。

还是要感谢，那些不可或缺的人。

感谢我的家人和朋友们，永远给予我前进的勇气。

感谢老师，提供学术上的指导。

感谢自己，那么坚强。

依旧在路上，在通往璀璨人生的路上。

个人简历、在读期间发表的学术成果

个人简历：

董丽妍，女，2000年6月生。

2022年6月毕业于重庆大学 建筑环境与能源应用工程专业 获工学学士学位。

2022年9月入同济大学攻读硕士研究生。

已发表论文：

- [1] Dong L, Lin B, Jiang Y, et al. Automatic Generation of Pipe Routing for Variable Refrigerant Flow Air Conditioning System[J]. Journal of Building Engineering, 2024: 111755.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111755>

研究及项目经历：

- [1] 2023年1月-2024年12月：基于BIM的多联机系统自动化设计，横向课题，主要负责人
- [2] 2024年6月至今：基于轨道交通车站BIM的暖通自动化研究，横向课题，参与人

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文《多联机冷媒管路自动生成算法研究》，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责任由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 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；学校有权保存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：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日