

基于 BIM 的空调系统全自动设计初探研究

——空调水系统图自动生成工具研发

摘要

目前空调系统设计过程重复性强，占用了设计人员大量工作时间，设计效率低下。暖通空调设计领域需要一个更准确并且创建迅速的模型，以简化设计人员的工作。BIM（Building Information Model，建筑信息模型）可以使不同工种的设计人员进行信息交互，在建造工程界越来越常用。若能利用 BIM 的信息化特点，简化暖通设计师的部分工作，实现有一定自动化程度的设计，则可以大大提高暖通空调设计工作的效率。

基于此，本文着眼于暖通设计过程，使用基于 BIM 的建筑模型，尝试用自动设计的思路完成建筑的暖通空调设计。

为完成暖通空调自动化设计的探索，本文首先设计了空调水系统图自动成图工具。在分析空调水系统图的特征后，本文对空调水系统图进行了三层拓扑抽象，将成图问题简化至基础图形形式。随后，本文根据拓扑抽象后图形的特征，提出了对应的布局算法（基于环路拓扑的引斥力布局模型），连线算法（基于障碍的线探索模型），和环路细胞模型。接着，本文使用 python 语言，采用面向对象程序设计的设计方法，设计并完成了空调水系统图自动成图工具。该工具可以读取包含空调系统信息的 IFC 文件，并自动绘制水系统图，输出 png 格式文件。

结合已有工具，本文从一栋 3 层办公楼的 BIM 建筑模型入手，采用自动设计为主，人工设计作为补充的方式，经过负荷计算，空调系统设计和设备选型，系统图绘制和 BIM 正向设计，完成了该建筑空调系统的自动设计。其中在设备选型和管道设计中，本文采用了 HVAC Design Bot 工具，并对这一工具的使用效果进行了评价。

本文完成了一套暖通空调自动设计的流程，并尝试开发工具提供了设计流程的自动化程度，是对暖通空调自动设计的初步探索，为进一步的工作奠定了基础。

关键词：暖通空调，自动设计，空调水系统图，自动成图

Primal Research on BIM Based HVAC Automatic Design

——Development of HVAC Water System Layout Automatic Generation Tool

ABSTRACT

At present, the design process of the HVAC is repetitive. Designers spend a lot of time on it. The design efficiency is low. The HVAC design field requires an accurate and rapidly creating model to simplify the designer's work. BIM (Building Information Model), which enables designers of different types of work to interact with information, is now increasingly used in the field of construction engineering. If we can take advantage of the informational features of BIM, simplify some of the work of HVAC designers, and achieve a design with a certain degree of automation, we can greatly improve the efficiency of HVAC design work.

Based on this, this paper focuses on the HVAC design process, using BIM-based building models, and attempts to complete the HVAC design of the building with the idea of automatic design.

In order to complete the exploration of HVAC automation design, this paper first designed the automatic generation tool for HVAC water system layout. After analysis, this paper carries out a three-layer topology abstraction on the HVAC water system layout, and simplifies the generation problem to a basic graphic form. Subsequently, based on the characteristics of the topological abstraction graph, this paper proposes the corresponding layout algorithm (Force Layout Model Based on Loop Topology), the connection algorithm (Obstacle-based Line Exploration Model), and the Loop Cell Model. Then, this paper adopts the design method of object-oriented programming, and uses Python to design and complete the automatic generation tool for HVAC water system layout. This tool can read the IFC file containing the information of the HVAC system, and automatically draw the water system layout and output the png format file.

Combined with the existing tools, this paper starts with the BIM architectural model of a 3-story office building, adopts automatic design as the main method, and artificial design as a supplementary way to complete the automatic design of the building HVAC system. The design process includes load calculation, air conditioning system design and equipment selection, system drawing and BIM forward design. In the equipment selection and pipeline design, the HVAC Design Bot tool was used in this paper, and the effect of this tool was evaluated.

This paper completed a set of HVAC automatic design process, and tried to develop tools to provide automation of the design process. It is a preliminary exploration of the automatic design of HVAC, which laid the foundation for further work.

Key words: HVAC, automatic design, HVAC water system layout, automatic generation

目 录

1	引 言	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的及意义	2
1.3	国内外研究现状	2
1.3.1	BIM 技术与相关数据共享标准	3
1.3.2	暖通空调自动设计发展现状	4
1.3.3	自动成图技术	5
1.4	本文的主要研究内容	6
2	水系统图及拓扑抽象	8
2.1	暖通空调水系统图	8
2.1.1	暖通空调相关图纸	8
2.1.2	空调水系统	9
2.1.3	水系统图自动成图目标	11
2.2	水系统图的拓扑抽象	11
2.2.1	成图拓扑模型	11
2.2.2	部件拓扑模型	12
2.2.3	环路拓扑模型	13
2.3	水系统图自动生成拓扑逻辑	14
3	水系统图自动生成基础算法	16
3.1	基于环路拓扑模型的布局算法	16
3.1.1	基于引斥力模型的布局算法	16
3.1.2	模拟退火法	20
3.1.3	引斥力模型的求解算法	22
3.2	连线算法	24
3.2.1	基于障碍的线探索算法	25
3.2.2	交叉判定及打断	34
3.2.3	特殊连线形式	36
3.3	环路细胞模型	36
3.3.1	细胞与环路细胞	37
3.3.2	环路细胞的“细胞膜”和“通道蛋白”	38
3.3.3	环路细胞类型和结构	42
4	水系统图自动生成工具开发	47
4.1	工具开发平台简介	47
4.1.1	Python 语言	47
4.1.2	Matplotlib 库	47
4.2	开发准备	47
4.2.1	水系统图自动生成流程	47
4.2.2	软件的输入和输出	49
4.2.3	软件计算流程	49
4.3	软件程序架构	50
4.3.1	面向对象程序设计	50
4.3.2	软件程序架构	51
4.3.3	图形界面设计	52

4.4 软件评价及展望	53
5 自动设计实例——3层办公楼自动设计	54
5.1 从 BIM 到负荷计算	54
5.1.1 办公建筑模型信息向 IDF 文件的转换	54
5.1.2 负荷计算	55
5.2 空调系统设计及设备选型	57
5.2.1 空调系统设计	57
5.2.2 HVAC Design Bot 设备选型及管路设计	57
5.3 系统图自动生成及 BIM 正向设计	67
5.3.1 系统图	67
5.3.1 BIM 正向设计	69
5.4 自动设计实例小结及评价	69
6 结论和展望	71
6.1 成果及结论	71
6.2 展望	72
参考文献	73
附录 A 程序架构示意图	76
附录 B 管路连接关系及管径描述	80
谢 辞	87

装
订
线

1 引言

1.1 研究背景

一栋建筑物从立项到建造需要不同领域从业人员多步骤的通力合作，对设计人员而言，其中工作量最大、工作成果最直观的环节便是设计及图纸绘制。早期的建筑界设计人员使用“T”形绘图尺及绘图板，在白纸上一笔一画地画下自己对建筑物不同维度不同视角的设计构想，不仅需要耗费大量的时间和劳力，也十分容易出现错误。20世纪70年代至80年代，可投入工程设计中的计算机辅助设计CAD（Computer Aided Design）系统的出现，一定程度地解放了设计从业人员的劳动力。设计人员们从此纷纷开始使用计算机进行二维设计图的绘制，这也标志着建设工程信息化时代的到来。但受限于技术，CAD软件并不能识图，图形信息的整合及规范检查等工作依然需要耗费设计人员的大量精力与时间，“手绘制图”的弊端没有得到完全的解决。

BIM（Building Information Model）是“建筑信息模型”的简称，其概念起源于20世纪70年代的美国，并于2002年由Autodesk公司提出，从而正式推广开来。从本质上讲，BIM技术是在原有CAD技术基础上发展起来的一种多维模型信息集成技术^[1]，它可以集成不同设计师在设计不同阶段，甚至是不同领域从业人员在工程不同阶段的工作信息，是建设工程信息化时代里程碑式的进展。它的技术为计算机自动识图，自动报错甚至自动进行规范检查等提供了可能，大大简化了设计人员的一些不必要的繁杂工作，提高了工程设计的效率。同时，得益于其信息化程度，人们也渐渐看到了实现自动设计的曙光。

BIM在实际工程中的应用使得不同工种的设计人员得以进行信息交互。整个设计过程可以在同一个BIM模型的基础上进行，一部分设计结束可以直接应用到下一部分设计中，环环紧扣；全套设计结束后，建筑、结构、给排水、暖通及电气的信息均可以加载在同一个图上，建筑信息一目了然。虽然在引入BIM技术之后，设计效率可以得到很大的提升，但对于暖通设计师而言，繁琐而可替代的工作量依然存在。

传统暖通设计师的工作一般分为几大部分。首先，在拿到建筑及结构设计图纸后，需要根据建筑所处地理位置，室内设定参数等及功能特点进行分区，然后分别进行负荷的计算，从而估算出建筑所需配备的冷热源容量和各区负荷大小；接着，需要根据建筑功能，建筑内外部的结构特点以及业主的需求进行空调系统形式（即包括冷热源及末端设备形式等）的选择；然后，根据前两步确定的系统形式和建筑负荷，通过计算进行各种设备的布局和选型；最后，进行管路的设计，并根据系统设计及管路设计结果绘制图纸。其中，除了第二步的空调系统选择之外，其余三个步骤中，都存在着大量繁杂冗余的工作量，如各区的负荷计算、各个设备的选型等需反复套用公式的工作，再如绘制图纸等工作量大但并非设计核心的工作。诸多这些工作量，使得暖通设计师往往并没有能够将关注点放在为建筑选择合适的系统这一核心的问题上，反而常常是拿到图纸草草选择系统类型，便一头扎入其余的工作中。而这样的设计模式，也使得设计的容错率较低。一旦某一步算错，后面的工作需要花许多时间重新再做；一旦建筑或者结构的工程师稍微改一改图纸，之前完成的许多工作量，可能要重新来过。暖通设计师在这样的工作中反反复复，劳心劳累，工

作量大，但设计效率却不高，显然并非上策。

在建造工程界 BIM 技术越来越常用，建造工程信息化程度越来越高的今天，能否利用 BIM 的信息化特点，简化暖通设计师的部分工作，从而实现有一定自动化程度的设计，开始成为部分学者感兴趣的话题。

1.2 研究目的及意义

基于以上背景，本课题着眼于暖通设计过程，使用基于 BIM 的建筑模型，采用以自动设计为主，人工设计作为补充的方式，完成一栋 3 层办公楼的空调系统设计。其中，在建筑负荷计算、各设备选型等阶段，本课题借助已有的一些设计工具进行自动设计，并分析其设计结果，评价其设计方法；在绘制图纸阶段，本课题设计了自动绘制系统示意图的工具，用于自动生成所设计系统的水系统示意图，并人工使用 BIM 进行一层平面的正向设计。通过以上工作，本课题将阐释基于常规设计流程的空调系统全自动化设计流程，并分析目前空调系统全自动化设计仍存在的问题。

本课题的意义如下：

① 有利于推动 BIM 的推广和发展。在设计过程中，人工使用 BIM 进行一层平面的正向设计，是将 BIM 的应用提前到设计阶段的一种尝试；而本课题提出的空调结构自动化设计，充分利用了 BIM 信息化的特点，符合 BIM 概念提出时提高设计效率的初衷，可以对 BIM 的推广与发展起到推动作用，有着广阔的前景。

② 有利于推动建筑行业节能性设计的发展。在设计过程中采用的建筑能耗模拟计算负荷的方法，可以为设计建筑的节能性提供有力依据，能一定程度的证明设计方法在节能角度的优越性，在建筑行业节能化设计方面有一定的发展前景。

③ 有利于提高暖通设计从业人员的工作效率。目前暖通空调系统设计过程重复性强，占用了设计人员的大量工作时间。暖通空调系统亟需一个更准确并且创建迅速的模型，帮助设计人员完成设计，本课题提出的设计方法，能减少设计人员的大量工作量，提高设计效率。

④ 有利于提高空调系统设计的合理性。在已知负荷和建筑结构的基础上，根据本文的设计思路，可以同时实现多种空调系统结构的设计，供设计师选择调整。设计师能将更多精力用于设计本身，从而提高空调系统设计的合理性，减少了设计的随意性。

⑤ 有利于增强暖通行业科研成果与实际设计间的联系。由于常规设计工作量巨大，更新设计方法时间成本高，目前许多的工程设计在设计过程中存在着大量依照经验的简化设计，往往未能及时应用上科研人员研究出的更节能合理的设计方法，科研人员的成果也难有机会在更大的范围内得到检验。暖通行业的科研与实际间存在着较大的脱节现象。本课题提出的设计方法，在更新设计方法上耗费的时间成本较低，有利于推动设计技术的更新换代。

1.3 国内外研究现状

在本课题中，为实现暖通空调全自动设计过程的探索，需要从 BIM 模型提取所需建筑信息，并使用建筑能耗模型（Building Energy Mode, BEM）进行建筑能耗计算，使用已有的设计工具进行设备自动选型，设计并使用自动绘制系统图工具等。则本课题涉及的内容包括 BIM 技术与相

关数据共享标准、暖通空调自动设计发展现状、自动成图技术等方面。

1.3.1 BIM 技术与相关数据共享标准

BIM 是建设项目的兼具物理特性与功能特性的数字化模型，且是从建设项目的最初概念设计开始的整个生命周期里做出任何决策的可靠共享信息资源。BIM 是基于公共标准化协同作业的共享化数字模型^[2]。自美国佐治亚理工大学的 Chuck Eastman 于 1975 年提出“A Computer-based Description of a Building”以来，BIM 技术历经了二十余年的理论研究阶段。直到 2002 年，Autodesk 公司开发了第一款商用 BIM 软件，BIM 技术才渐渐在工程界推广开来。

根据 2016 年的英国 NBS 发布的年度国际 BIM 报告，除捷克外，BIM 技术在全球各个参与调查的国家的认知度都超过了 90%，BIM 正在加速成为各国家建设信息的标准规范。早在 2003 年，美国总务署便推出了全国 3D-4D-BIM 计划，后又要求从 2007 年起所有大型项目都需要应用 BIM。到了 2009 年 7 月，美国威斯康星州更是成为了第一个要求州内新建大型公共建筑项目都需要在设计阶段开始便使用 BIM 的州政府。2011 年 5 月，英国内阁办公室发布文件，要求至 2016 年，政府要求全面协同 3D BIM，并将全部文件进行信息化管理。韩国国土交通海洋部则于 2010 年 1 月发布了《建筑领域 BIM 应用指南》，并计划于 2016 年前将 BIM 应用于全部公共工程。而日本建筑学会也于 2012 年发布了日本 BIM 指南。

与此同时，BIM 在我国也在高速发展中。2011 年 5 月，住房城乡建设部发布的《2011~2015 建筑业信息化发展纲要》中明确指出应在施工阶段就开展 BIM 技术的研究与应用。2012 年，中国建筑科学研究院等单位共同发起了中国 BIM 发展联盟。2016 年 9 月住建部发布《2016~2020 年建筑业信息化发展纲要》要求加快 BIM 普及应用。在产业界，一些公共建筑重点项目、铁路项目等均采用了 BIM 技术，如上海世博会博物馆新建工程在全生命周期均采用了 BIM 技术，京沪高速铁路静安连接线搬倒井互通立交工程也采用了 BIM 技术。根据 2015 年的《中国 BIM 应用价值研究报告》，在目前的 BIM 应用增长中，中国已跻身世界前五^[3]。

在建筑领域，国际协作联盟 IAI（Industry Alliance for Interoperability，现更名为 Building SMART International）提出的工业基础类别 IFC（Industry Foundation Classes）和美国绿色建筑研究中心开发的绿色建筑可拓展性标记语言 gbXML（green building Extensible Markup Language）是建筑业两大主流的信息标准。

IFC 是一种开放的数据模型标准，几乎涵盖了建设工程的主要领域，其中涉及了建筑、结构、电气、暖通、施工管理、设施管理等，在版本更替中仍在不停地丰富和完善，最新的版本是 IFC2×4。一个 IFC 数据模型通常包含了建筑的众多信息，很难以人工逐行阅读的方式提取需要的信息，故一般需要专用工具箱或软件来读取 IFC 文件。目前，IFC 标准已经得到了部分大型软件厂商包括 Autodesk、Graphisoft 等的支持，这些软件厂商旗下的软件之间可以通过 IFC 传递数据，不同 BIM 工具之间的互操作性得到了很好的加强。

gbXML 也是 BIM 的一种开放标准，基于计算机中常用的标记语言 XML，具有很好的数据交互性，有利于信息共享。但目前所有的 BIM 软件对 gbXML 尚未能实现完全支持^[4]，虽可以通过 BIM 模型生成 gbXML 文件，但或多或少地存在着数据缺失问题。

1.3.2 暖通空调自动设计发展现状

人工智能（AI）技术现如今已广泛应用于建筑设计及优化中，它具有显著的缩短时间，减少成本以及项目生命周期中涉及的其他设计和人力资源成本的潜力。看到 AI 技术在建筑设计运用的诸多优越性，许多学者也开始探索其引入暖通空调自动设计的可能性。

在暖通空调设计中，最耗时且最繁琐的部分是负荷计算及管道布局，而对于功能区丰富的大型建筑，空调系统的配置和冷热源选型也很重要，是值得重点关注的。

在负荷计算上，多年来已经有了许多成果。美国采暖制冷及空调工程师学会（American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE）便提出了总等效温差法（Total Equivalent Temperature Difference, TETD），冷负荷温差法（Cooling Load Temperature Difference, CLTD），传递函数法（Transfer Function Method, TFM），热平衡法（Heat Balance, HB）和辐射时间序列法等（Radiant Time Series, RTS）^[5]。其中 TETD 和 CLTD 只能用于计算峰值负荷。随着计算机技术的发展，许多用于预测建筑物负荷和能量性能的模拟工具渐渐面世。EnergyPro, eQUEST, EnergyGauge USA, REM/Rate 等建筑能耗计算软件均基于 DOE 2.1e 的加权因子（Weighting Factor, WF）方法。这些工具可以计算出每个计算空间的逐时负荷，帮助人们更好地理解建筑特性。目前相对而言最完备也是最复杂的负荷计算工具是由美国政府开发的 EnergyPlus，它使用了 HB 方法^[6]。以上软件帮助人们较好地计算出建筑的负荷，但仍需花费较多的时间。因为建筑模型常常与建筑能耗模拟工具不兼容，工程师必须在建筑能耗模拟软件中重建建筑模型并运行模拟。一旦建筑的体系结构模型更改，则能耗模拟模型也需要重新建立。

随着 BIM 技术开始应用，学者们发现 BIM 中集成的大量建筑信息可为建筑能耗模拟提供数据支持，从而大大减少建模过程中的重复数据输入过程。从 BIM 建筑模型到建筑能耗模拟有两个主要的思路，一是开发基于 BIM 模型的能耗模拟软件，二是将 BIM 模型转化为合适的格式导入已有的能耗模拟软件。

目前，基于 BIM 的建筑能耗模拟软件主要有 Autodesk 的 Ecotect Analysis、Insight 模拟软件、Green Building Studio 为 Revit 提供的能耗云计算服务、以及由英国 IES 公司开发的 IES VE 软件等。但这些计算软件中内置的计算标准均为国外标准，对基于国内标准建造的建筑还不能完全自动进行模拟^[7]。我国的 BIM 技术的应用起步比国外较晚，但也开发了部分软件进行了尝试。由中国建筑科学研究院开发的 PKPM-Energy 也可实现 Revit 模型导入进行负荷能耗计算。但是该软件全年负荷计算方法较为简单，主要考虑建筑围护结构传热和太阳辐射形成的供暖空调负荷^[8]，可以用于设计阶段的选型计算与能耗评估，对于运行阶段能耗模拟控制精度不够。由鸿业科技开发的 HY-EP 软件虽然可以提供建筑全年动态负荷能耗计算^[9]，但是仍需手动设置房间性质以及分区信息，对于大体量模型模拟速度较慢，如需简化模型减少计算时间仍需手动进行模型更改。

由于 BIM 软件对本身对暖通空调系统的描述欠佳，大量设备、人行为模式和控制策略缺失^[10]，将 BIM 模型直接用于能耗模拟存在一定程度上的先天劣势。将 BIM 模型导出的文件格式转化为能耗模拟软件支持的输入格式，然后导入现有的能耗模拟软件进行模拟成为部分学者的研究方向。目前研究主要围绕着 BIM 软件与能耗模拟软件 EnergyPlus 之间的对接展开，细化到具体

的文件格式则为 IFC 文件格式或 gbXML 文件格式同 EnergyPlus 的 IDF (Input Data File) 文件格式之间的数据转换。

美国劳伦斯伯克利国家实验室 (LBNL) 利用中间工具 BPro COM-Server 开发了 IFCtoIDF 插件^[11],但 BPro 当时只关注 IFC 数据文件中包含的特定建筑元素的几何描述。LBNL 的 Vladimir Bazjanac^{[12][13]}的研究成果 GST/IDF Generator 实现了 IFC 的几何简化及向 IDF 的转化。国内学者对 IFC 与 IDF 的转换也有一定研究,清华大学的马智亮、曾统华等^[14]建立了 IFC 数据与 IDF 数据间的转换机制。冯妍^[15]则建立了贴合我国节能设计标准的 IFC 数据与 IDF 数据转化的系统。

Autodesk 公司的商业化 web 服务 Green Building Studio 可以将 gbXML 文件转换成 IDF 文件,但只能转换建筑围护结构的几何信息,不能转换围护结构的热工信息。英国的 DesignBuilder 同样可以将 gbXML 文件进行转换,但其转换并不成熟,在实际转换中常出现丢失构件、信息断层的问题^[15]。梁思雨^[16]建立了 gbXML 与 IDF 模型数据格式间的数据转换机制,但在水暖电信息的转换上仍不能保证完整。此外,新加坡也正在研制 gbXML 与 IDF 的转换工具。

暖通空调系统的管道布局设计通常是费时费力的。目前已有学者提出了关于自动生成管道系统的一些概念性想法。R. Brahme 等^[17]使用结合启发式和最短路径算法的方法来自动设计空气系统网络和空气分支大小。Aurelien B 等^[18]提出了一种在建筑物内事先生成空调系统输配模型的方法。Benachir Medjdoub 等^[19]提出了一个机房设计方案,使用优化算法最小化管道长度和弯曲次数。但是上述方法更适用于简单的建筑模型,而不是功能区较多的实际建筑,这些建筑的空调系统要复杂得多。

适当空调系统配置可以减少能耗。空调系统可分为空气侧和水侧,目前关于两侧的设计和优化都有很多研究。对于空气侧系统的设计和优化,Asiedu 等^[20]用 GA (Genetic algorithm) 设计风管系统,使生命周期成本最低。Justin B^[21]提出了一种使用 GA 在 HVAC 设计过程的各个阶段均进行优化设计的方法,并开发了一个 Matlab 程序来为给定的平面图生成分区策略。对于水侧系统配置,Jonathan Wright^{[22][23]}开发了 HVAC 系统及其组件的数学模型,并使用直接搜索算法来获得优化的系统配置。P.P. Angelov 和 Y. Zhang 等^[24]使用遗传算法自动设计和优化 HVAC 二次系统。Magdalena Stanescu 等^[25]提出了一种基于日负荷曲线的空调系统优化方法。定义全局负荷率为实际负荷与可能的最大负荷之比,并作为目标函数。结果表明,使用优化系统可以节省 18.8% 的能量。

在设计中存在多个冷源时,正确配置冷源的数量和尺寸也会对耗能情况产生巨大影响。传统设计中为了设计和管理方便,常采用几个同样大小的冷源。然而,相关研究表明这种方法并不节能^{[26][27]}。Pei Huang 等^[28]提出了一种通过生命周期分析优化多冷源机组配置的策略。S.M.Deng^[29]研究建议根据酒店建筑的负荷频率分析来确定冷水机组的容量比。Lee 等^[26]调查了香港现有的几个 HVAC 系统,并提出了一个简化的能量预测模型,用于根据负荷频率分析来配置多个冷源的冷量分配。

1.3.3 自动成图技术

图形作为一种可视化表达方式,在许多问题中相较于文字有着更清晰更直观的优势,因而被

广泛应用在各种场合。各学科中的许多问题都使用了在二维平面上绘制的图形，如电路原理图、生物网络示意图和软件工程等，而暖通设计中绘制的各式图纸也多为二维图纸。

图论是应用数学的分支之一，它以由点和基础的线连接而成的图作为研究对象。J.A Bondy 等^[30]编写的图论及应用对图论进行了简要的介绍，S.Even^[31]的图算法一书则介绍了解决图形问题的基础算法。图论的相关知识是解决二维图形绘制的数学基础，其中的许多经典算法对解决实际图形问题有着启示性的作用。但出于实际应用甚至美观的要求，实际图形问题往往有更多的限制条件，如较少的图线交叉，均匀分布的点，正交化的构图等，这些都使得图形的绘制问题计算量激增，且变得更加复杂。

为实现图纸分布均匀并减少交叉，R. Lipton^[32]等人提出了一种使直线长度尽可能一致的算法，同时还提出了一种图形尽可能对称的直线图的算法，但这个算法的前提是已知一个图形的同构群（即构造相同的所有图形），几乎是不可解的。P. Eades^[33]等人提出了一种基于物理模型的启发算法，并称之为 spring embedder。这一算法的绘制过程是将图形内各元素模拟为一个机械系统，顶点被物体替换，线则为弹簧。如果物体间距离太远，弹簧的引力作用会使物体靠近；如果物体间距离太近，弹簧会产生斥力作用使物体远离。Davidson^[34]等人在此基础上提出了一个目标函数，使得顶点分布均匀，边长度尽可能一致，边交叉最少，同时防止顶点离边缘过近。并使用模拟退火算法进行优化求解，结果显示画出来的图形较美观，更符合实际要求。

正交化的构图是许多实际图形的要求。解决正交化绘图的基础画法是网格格式绘图。C. Batini 等^[35]基于图论提出了一种正交化绘图方法，将绘图分为三个阶段，一是确定图的拓扑结构（planarization），二是将图形正交化（orthogonalization），三是将图形对应网格压实生成最终的图形（compaction）。平面正交化网格图的研究最早衍生于电气电路布局问题^[36]。1993年，新加坡的 GOOI H B^[37]提出电气单线图自动成图的概念，并提出了大规模电路设计的布线算法，该算法将图形生成成分布和布线两部分，布局部分可以采用 spring embedder 等力导演算法，而布线则分为平面规划放置和走线。该算法思想为后来研究者研究电气单线图自动成图起到了指导作用。

暖通空调图纸的自动生成目前暂时缺少相关的研究成果，但有一部分商用软件进行了半自动成图的尝试。MagiCAD 套件、鸿业科技的 MEP 系列软件均基于 BIM 或 AutoCAD 平台，均可实现在用户绘制部分图形后，一键生成相关二维图纸。但这实为对已绘制图形进行映射变换后成图，离自动成图仍有一定距离。

1.4 本文的主要研究内容

根据杨志伟等^[38]提出的自动化设计流程，自动设计过程包括空调分区及负荷计算、理想系统生成及实际系统生成等流程，本课题作为自动设计理念应用于设计中的初步探索，对自动设计过程进行适当简化，并在探索实践过程中对自动设计流程进行修正。本课题所涉及系统设计过程如图 1.1 所示：

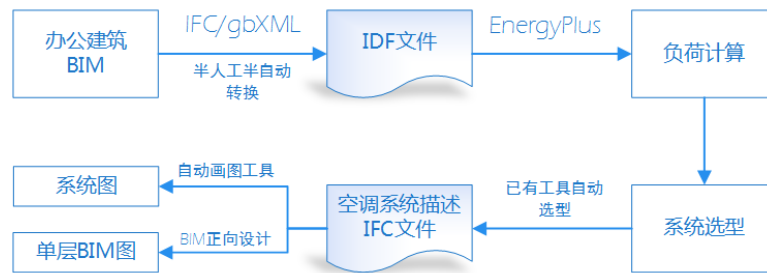


图 1.1 系统设计流程

为实现这一自动设计流程，本文首先进行水系统图自动成图工具的设计，由于目前缺乏空调水系统图自动生成的相关成果，在进行设计时需分析空调水系统图特征，并类比其他自动成图问题寻找合适的成图方法，具体工作包括：

① 空调水系统图特征分析及拓扑抽象：分析空调水系统图特征，并尝试化繁为简进行拓扑抽象。衡量水系统图中信息的重要程度，在不同级别的拓扑抽象模型中将重要度不高的信息除去，最终将水系统图成图问题抽象至基础图形形式。

② 空调水系统图生成算法：类比电气单线图生成，空调水系统图生成问题亦可分为两大步骤：布局及连线。针对水系统图特征，参照已有的布局及连线算法模型，建立合适的水系统图布局算法，连线算法及边界连线模型。

③ 空调水系统图生成工具软件实现：使用 python 语言编写水系统图生成工具，完善文件输入及输出功能，并制作图形界面。

随后结合设计的水系统图自动成图工具，根据图 1 所示的自动设计流程，使用基于 BIM 的建筑模型，采用半人工半自动的方式，完成一栋 3 层办公楼的空调系统设计。其中从办公建筑 BIM 模型至负荷计算部分为课题组已完成工作，非本文工作重点，将仅进行简要叙述和评价。除此之外，自动设计的工作还包括：

① 空调系统设计及具体设备选型：根据办公楼的使用特点和建筑特点，选择空调系统形式。将已求得的负荷，导入课题组已完成的 HVAC Design Bot 工具中，进行空调系统各设备的选型，并生成空调系统描述的 IFC 文件。

② 系统图生成及单层平面正向设计尝试：使用上一部分设计的水系统图自动成图工具生成办公楼的空调水系统图。采用人工绘图的方式，使用 BIM 软件进行单层平面的正向设计。

③ 评价及展望：分析设计过程的自动化程度及设计结果，评价该自动设计思路的可行性，仍存在的问题和可改进之处，并对未来空调系统全自动设计的发展进行展望。

装订线

2 水系统图及拓扑抽象

2.1 暖通空调水系统图

2.1.1 暖通空调相关图纸

建筑暖通空调相关的图纸一般包括文字类和图纸，其中文字类包括图纸目录、说明（设计说明、施工说明）、设备图例、设备材料表等，图纸包括系统图（水系统图、风系统图、系统原理图）、平面图（风管平面图、水管平面图）、详图（冷冻机房详图、空调机房详图、节点剖面图）等。在实际工程中一套空调系统施工图纸中涵盖的具体图纸类型与系统具体形式紧密相关，但上述几大类往往不可或缺^[39]。

在文字类中，图纸目录包括该工程的设计图纸目录，在该工程中使用的标准图纸目录或其他图纸目录等；设计施工说明常常是整套设计图纸的首页，对于简单项目可以与平面图合并，内容主要包括建筑概况、各项设计说明（采暖、空调、通风等）、设计方案概述、主要设计参数的选择、设计依据和施工应注意事项等等，设计施工说明往往叙述了主要的设计信息，十分重要；设备图例和设备材料表则包含了各系统设备与主要材料的型号和数量上的汇总。

图纸则相对较复杂。

系统图分为系统轴测图和系统原理图，在此类图中管道往往采用单线绘制。在复杂系统中，冷热源侧的系统图常与末端输配的系统图分开绘制，但在不太复杂的系统中，往往也将二者合在一起绘制。

系统轴测图一般用 45° 投影法按比例绘制，在小系统中较为常见，它采用三维坐标，图纸上涵盖的信息包括各种设备的尺寸、定位尺寸、型号、数量等。所有的管道连接、弯折均需要在图上表示出尺寸、定位尺寸。当系统稍大时，常常将系统分断成几部分绘制，这将导致图纸数目增多及阅读直观性下降，故现在许多系统的系统图均采用系统原理图的形式。

系统原理图，也叫作系统流程图，它也需涵盖各设备的尺寸型号数量等，与系统轴测图的显著差别是不按照投影规则和比例绘制，不受物体实际空间位置的约束（但最好与实际空间位置大体一致），而是尽可能以简洁的方式，清晰地表示出系统的流程。系统原理图是表达设计者的设计方案最直观的展示之一，是设计图纸的重要组成部分。

平面图通常是在建筑专业提供的建筑平面图上，采用正投影法绘制，并且应包括定位尺寸。暖通空调常见的平面图有各层设备布置平面图、空调水管平面图、通风工程平面图、风管系统平面图、各机房平面图等。风管平面图甚至还可根据系统复杂程度详细为风口布置平面图、风管布置平面图、新风平面图、排风平面图等。平面图是设计图纸的主要部分，其绘图耗时往往最长，绘图复杂程度也最高。

详图，是以表达平面图难以表达的内容而绘制的，常采用正投影法绘制。在立管复杂，部件多，设备管道风口等纵横交错的地方，常需要用详图补充表示。此外，安装节点，部分设备的结构也需要用详图表示，部分详图有标准图可以选用。

本文中所涉及的水系统图为水系统原理图，水系统原理图是目前工程中水系统图最常用的形式，它往往涵盖了冷热源信息和末端信息，能较好地描述出整栋建筑空调系统的概况特征。应当

初投资高。

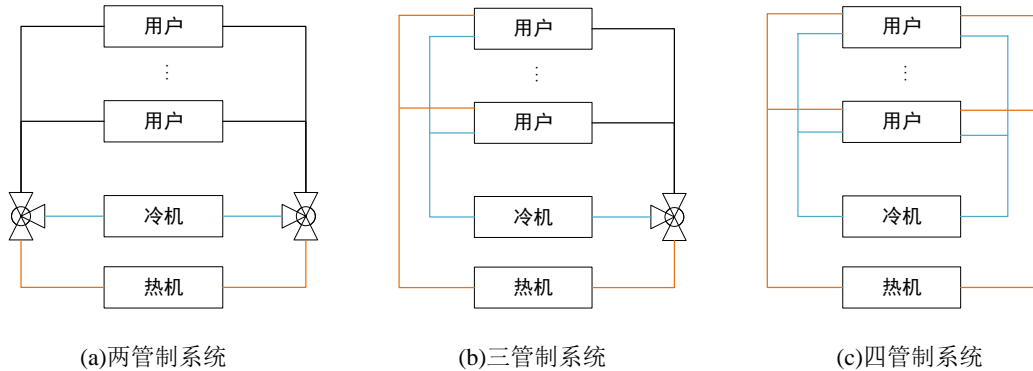


图 2.2 两管制、三管制、四管制系统示意图

定流量、变流量系统的主要区别是是否依靠改变水流量来改变冷量。定流量系统通过改变供回水温度调节冷量；而变流量系统则利用一根旁通管来保证冷水机组流量及供回水水温，从而调节冷量。

一次泵系统和二次泵系统区别在于冷源侧和末端间的水泵组数。冷源侧和末端合用一组循环泵的称为一次泵系统；冷源侧和末端分别配置两组循环泵的称为二次泵系统。

同程式、异程式系统的主要区别在于流经每个末端的管程差别。在同程式系统中，水历经每个末端的路程一致，水量调节十分简单，但初投资高；而在异程式系统中，空调水流经每个末端的管程均不同，因而水量分配调节较困难，但初投资较低。

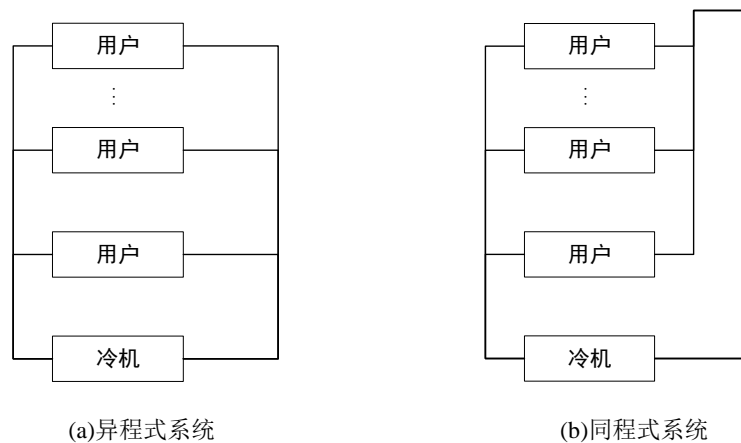


图 2.3 同程、异程式系统示意图

针对广义的空调水系统，则除了冷冻水冷却水环路外，根据实际情况往往还需考虑供采暖水环路等。当热源同时可作为冷源时，如热泵类冷热源，系统图与狭义空调水系统的系统图类似，可合并考虑；当接入供热管网或使用锅炉供暖时，供暖水系统将十分复杂，由于本文是水系统图自动生成的初步尝试，将暂不考虑这一情况，但在进行算法设计时，为此种情况留出一定余地。

装
订
线

2.1.3 水系统图自动成图目标

根据 2.1.1 节的相关介绍和分析，水系统流程图可将冷热源与末端输配分开绘制，也可一起绘制。显然，相对于一起绘制，分开绘制在布图和连接上更加简单，若将一起绘制摸索清楚，则分开绘制的问题亦可迎刃而解。此外，根据 2.1.2 节，水系统分类繁多，特殊情况下图形十分复杂，初次探索水系统图自动生成便想一口吞象显然并不现实。罗马并非一日建成，本文适当简化问题，确定目标水系统基础特征为：热源仅考虑采用热泵供暖的水系统流程图，冷热源与末端输配同图连接绘制。

兼顾图形表达清晰及美观，参照 GOOI H B^[37]提出的电气单线图自动成图三原则，可以订立水系统图自动成图的绘图目标为：

① 连线尽可能短。有连接关系的两个部件，距离应尽可能接近，从而使连线具备尽可能短的必要条件；两部件间的连线不应“绕远路”，应简短而直接。

② 交叉尽可能少。若将有连接关系的部件作为一组，则部件组间应减少连线的相互干扰；连线应避免多余的交叉，两线不应出现重复交叉。

③ 部件应尽可能均匀分布。作为工程图纸，画布区域是确定且大小有限的，各部件应在画布范围内合理布局，使得画布得到均匀合理利用。

2.2 水系统图的拓扑抽象

显然，由于水系统图中部件较多且连接关系具有一定复杂性，将图形不加以拓扑简化而试图直接进行生成将十分复杂，不仅难以建立求解方式，计算量亦极大，是不现实的。参照廖凡钦^[42]等人提出的配电网分层拓扑模型思路，本文试图将水系统图进行分层拓扑抽象，以简化成图问题。

拓扑抽象过程中进行的简化主要有：

① 删去连接简单的非主要设备。原拓扑中存在着类似于小型的除污器等串联于管路中，且占图空间不大的非主要设备，适当将其删去，简化为管路，可降低成图问题的复杂性。

② 合并并联的同类设备。原拓扑中存在着多冷机并联，多水泵并联等情况，将其分别简化为抽象化的单一冷机，单一水泵再考虑绘图；同理，各末端在连接关系上实为相互并联，可以简化为抽象化的单一末端。完成以上简化后可以降低成图的复杂性，使成图逻辑更加清晰。

③ 合并同一环路的主要设备。原拓扑中，属于同一环路的设备可能有许多，将其合并考虑，可以将成图问题有效简化为单线成图问题，降低成图问题的复杂性。值得一提的是，除冷却水环路直接成一环路外，对冷冻水环路及热水环路，均以分集水器为分界点，将环路切割为供水侧（即源侧）环路与末端侧（即用户侧）环路。

④ 合并供回水线路。作为环路，水管一般有供有回，原拓扑中可能存在着供回水分开绘制的情况，为了将成图问题简化为单线成图问题，需将供回水合并为同一线路。

2.2.1 成图拓扑模型

成图拓扑模型是指经过一定的拓扑简化之后的水系统图成图拓扑，它包含了水系统图成图所需的所有设备，简化而清晰地描述了成图目标。与一般系统图相比，成图拓扑模型同一环路的设

备集中放置，供回水管道几乎同路，具有可简化为单线模型的特征。如图 2.4，所示，图中示例图形为一个 6 层建筑的水系统图，该建筑采用螺杆式冷水机组+冷却塔作为冷源，风机盘管+新风机组作为末端，图中为经过一定拓扑简化的水系统成图拓扑模型。

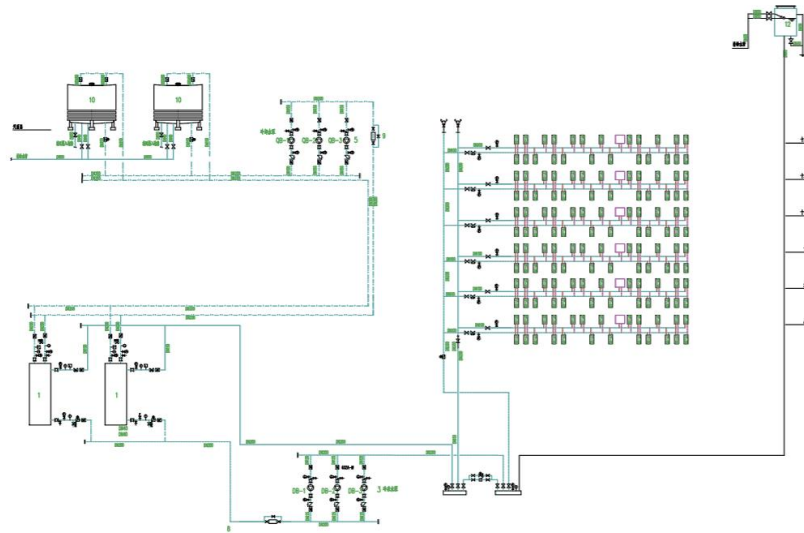
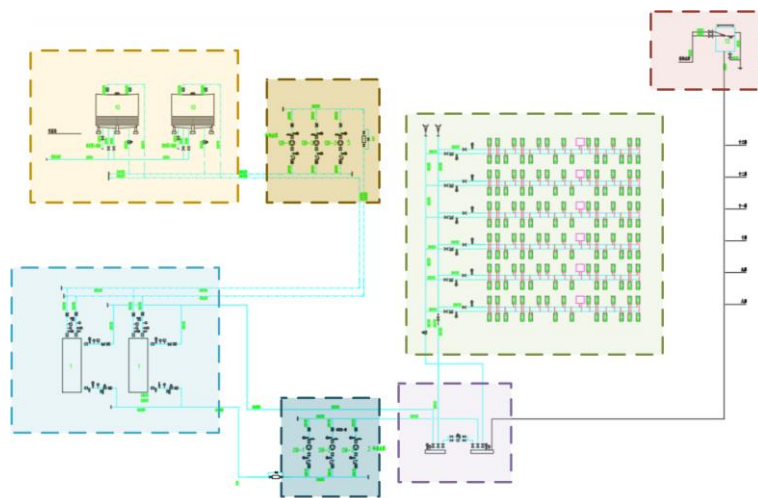


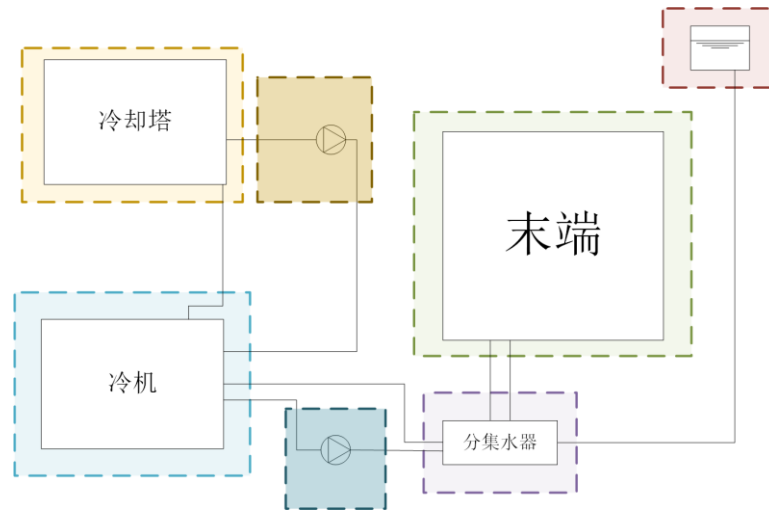
图 2.4 成图拓扑模型示意图

2.2.2 部件拓扑模型

在成图拓扑模型的基础上，去除连接简单的非主要设备（简化成直线段），简化同类设备，则可以得到部件拓扑模型。值得一提的是，为避免成图重叠，在简化为单一设备的过程中，简化结果仍需带有简化前的形状特征，即图形的长与宽。图 2.5 展示了成图拓扑模型简化为部件拓扑模型的过程，相同底色及边框的虚线框在(a)(b)两图中分别代表简化前后的图形。



(a) 拓扑简化前

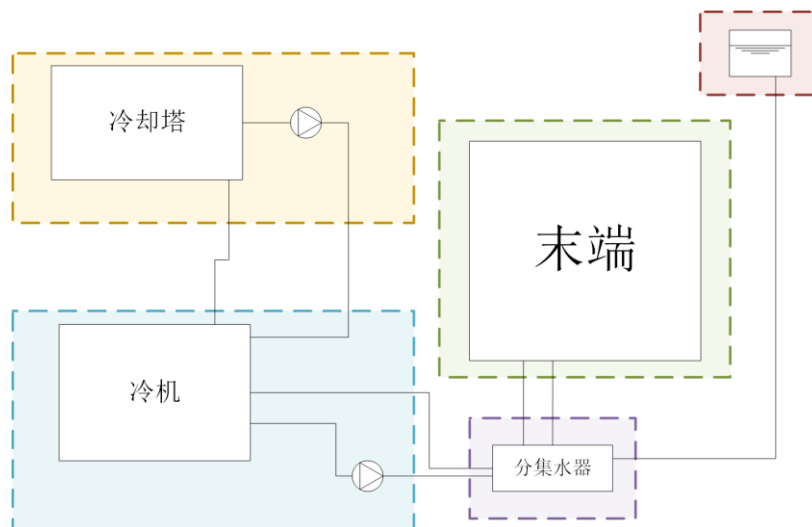


(b) 拓扑简化后

图 2.5 部件拓扑模型示意图

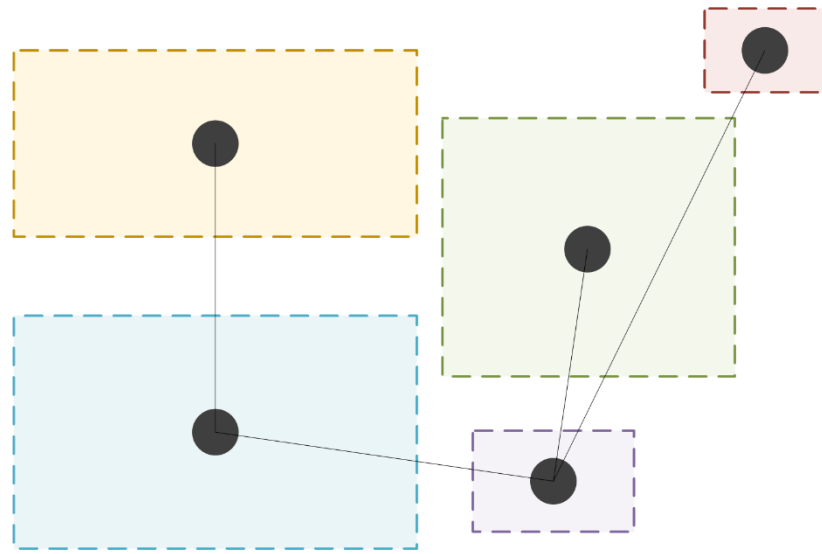
2.2.3 环路拓扑模型

在部件拓扑模型的基础上，进一步对同一环路设备进行合拓扑合并简化，此步将拓扑模型完全抽象为单线模型，每一环路被抽象为一个点，但该点仍具有拓扑抽象前形状属性（长与宽）。由图 2.6 已经可以清楚的看出，示例图形中存在三个环路，冷却水环路、冷冻水供水环路、及冷冻水末端环路。将示例图形所述系统进一步拓扑抽象，如图 2.6 所示，相同底色及边框的虚线框在 (a)(b) 两图中分别代表简化前后的图形。值得一提的是由于经过高度抽象，此时点并无法表示出其对应原结构的进出口属性，故图 (b) 中点间连线并无必要为直角折线，只表示点间的连接关系，不具有真实的成图连线意义。



(a) 拓扑简化前

装
订
线



(b) 拓扑简化后

图 2.6 环路拓扑模型示意图

2.3 水系统图自动生成拓扑逻辑

2.2 节所述水系统图的三层拓扑抽象是将水系统一点一点地提取特征，抽象简化的过程，也是将自动成图问题抽丝剥茧，在不同维度上一步步简化的过程。事实上，水系统图自动生成的拓扑逻辑恰与拓扑抽象过程相反，拓扑抽象与成图拓扑逻辑的关系如下。

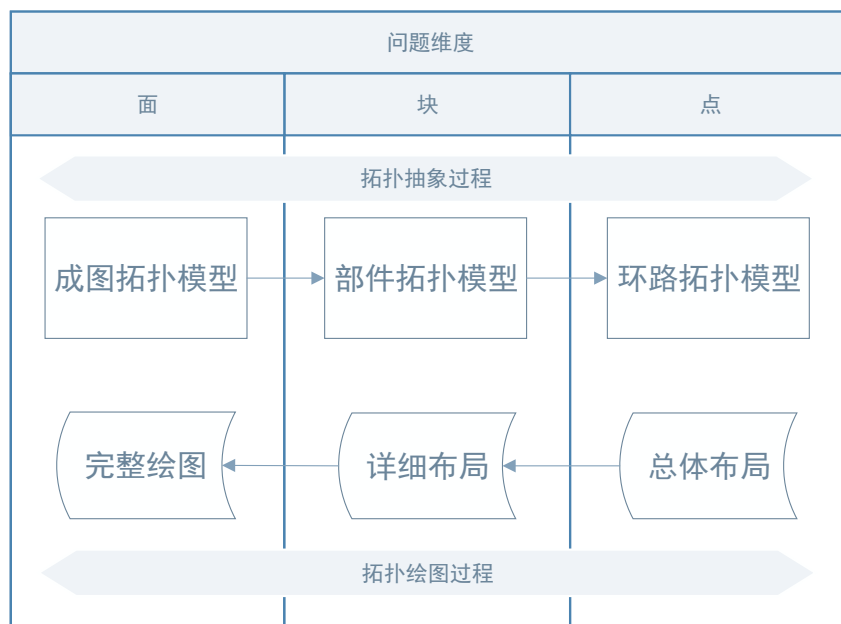


图 2.7 拓扑抽象与成图拓扑间关系

在成图的最初，先进行总体布局求解出环路拓扑模型，定位各环路的绘图位置和绘图区域。

随后，需要在环路拓扑所确定的绘图位置基础上，对各环路内部分别进行详细布局，确定环路内部各部件间的连线及环路间的连线，得到部件拓扑模型。最后对部件拓扑模型进行细化绘制，完成完整绘图，得到最终的成图拓扑模型，亦即目标图形。

由此，成图的三层拓扑间关系环环相扣，但联系并不十分直接，分别需要各自独立的整套算法支持。在真实绘图过程中，各层拓扑间可能会存在一定程度的耦合，取决于具体的算法。水系统图自动生成拓扑逻辑的主要意义在于帮助理解成图过程，本文水系统图自动生成的流程将于核心算法介绍结束后得出。

3 水系统图自动生成基础算法

3.1 基于环路拓扑模型的布局算法

图形布局具有许多种方法。对简单的无向图来说，最常用的方法是物理类比的方法，即将布局问题类比为物理问题，建立适当的模型进行求解。最早的基于物理模型启发算法解决布局问题的是 P. Eades^[33]等人提出的 spring embedder 算法。而后 Davidson^[34]等人在此基础上对此模型进行了改进，试图获得更好的绘图效果。

具体到实际学科中的布局问题，我国学者对上述布局算法应用到电气类图形的布局上这一问题进行了一些探讨。程远^[43]等人提出了张力斥力模型，用于解决无向网络拓扑图的布局。在这一模型中“力”仅沿边作用，并非“力场”。同时引入了“质量”概念，并以电度数赋值。该模型以系统平衡作为求解目标，计算复杂度较高。廖凡钦^[42]等人提出了引力斥力模型，用于解决配电网电气接线图的布局。与前者不同，在这一模型中，单点对多点均有力的作用，是类似“力场”的概念。同时，该模型不含“质量”概念，但将电度数通过分级运算后作为理想长度；以各点位置不再变化作为求解目标，计算复杂度较高。

本问题中环路拓扑模型的布局，需要满足布局均匀，线路较短，交叉较少的特征。除此以外，分析本问题中环路拓扑模型布局问题与现有引力斥力模型可解决问题的不同之处，主要有：

- ① 布图范围有限制，需要考虑绘图范围与点的关系，若未引入合适模型，问题的求解可能对初始效果敏感。
- ② 抽象化后的点仍需带有长度意义，且该长度是矩形绘图范围的抽象，可能为各向异性的。
- ③ 绘图位置可能具有一定的物理意义，如当一个系统图中存在屋顶设备和地下设备时，地下设备一般画在图的下部，屋顶设备一般画在图的上部。

3.1.1 基于引斥力模型的布局算法

基于上述分析，本文建立了基于引斥力模型的环路拓扑模型布局算法。将环路拓扑模型的布局类比为在一个二维图框中的机械系统力平衡问题，各点间存在着引力的作用，以防止点间过于分散，同时防止连接边过长或不够直接；各个点间同时存在着斥力作用，以防止各点所代表的环路间存在绘图交叉现象；同时图框的边界对这一力平衡问题起到附加作用，以防止布图离边框过近。

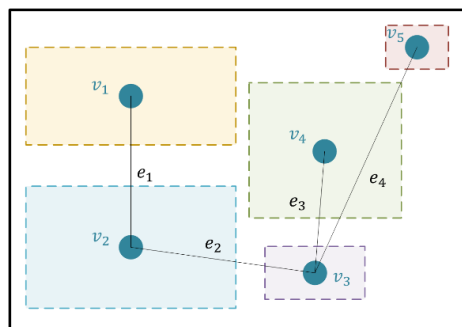


图 3.1 无向图 $G(V, E)$ 示意

具体算法简述如下，对任意环路拓扑模型，定义 V 为环路点集 $\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ ，内含 m 个环路拓扑模型中代表环路的点，与环路一一对应；定义 E 为连接边集 $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ ，内含 n 个环路拓扑模型中点间连接的边，与环路间的连接关系一一对应。则可以得到一个无向图 $G(V, E)$ （如图 3.1 所示），对该无向图 G 有：

A. 质量

由 2.2.3 节，在环路拓扑模型中，每一环路被抽象为一个点，为了保证拓扑抽象与成图间的可逆性，该点仍具有拓扑抽象前形状属性（长与宽）。这一形状属性的大小应直接影响到点在引斥力模型中的作用大小。综上，考虑取矩形框的外接圆半径的值乘上安全系数作为质量，则对任意点 v_a 有：

$$m_a = k_m r_a = \frac{1}{4} k_m \sqrt{width_a^2 + length_a^2} \quad (3.1)$$

式中： k_m ——安全系数，在本问题中取 1.5；

r_a ——矩形框外接圆半径，如图 3.2 所示；

$width_a$ ——矩形框的宽；

$length_a$ ——矩形框的长。

当质量较大时，意味着该点需占有的空间较大，此时，该点对其余点斥力较大，同时其单位移动对最终结果的影响更大。

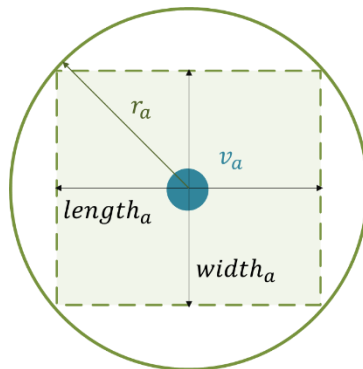


图 3.2 矩形框外接圆半径示意

B. 引力

对无向图中的两点间赋予引力作用，使得二者相距不致于太远。考虑到为了使图形更加符合美观的要求，边的长度尽可能短是必须的，但无连接关系的点间过于接近可能反而导致绘图困难，或者是产生不必要的边交叉，故对图中任意两点间均赋予引力作用是不必须的。因而在本问题中，考虑对有连接关系的两点间赋予引力作用。考虑到在本问题中点具有形状属性，故两点间的距离是有实际绘图意义的，又根据 Davidson^[34]等人的研究发现，弹力公式实际上在类似的力导向模型中效果最佳。则对任意边 e_c ，考虑其两 endpoint 分别为 v_a, v_b ，有：

$$F_{c-attraction} = \begin{cases} k_{attraction}(d_{a,b} - L_{(a,b)ideal}), & d_{a,b} > L_{(a,b)ideal} \\ 0, & d_{a,b} \leq L_{(a,b)ideal} \end{cases} \quad (3.2)$$

式中： $k_{attraction}$ ——引力系数，亦称引力项重要度系数；

$d_{a,b}$ ——a, b 两点间距离，即边 e_c 的长度；

$L_{(a,b)ideal}$ ——理想长度，即指两点间的理想距离。在理想条件下，各点所代表的矩形框不应该发生重叠。由于矩形框长度特性各向不同，考虑理想长度沿正交方向不同，理想长度可由下式定义（如图 3.3）：

$$L_{x(a,b)ideal} = k_m(length_a + length_b) \quad (3.3)$$

$$L_{y(a,b)ideal} = k_m(width_a + width_b) \quad (3.4)$$

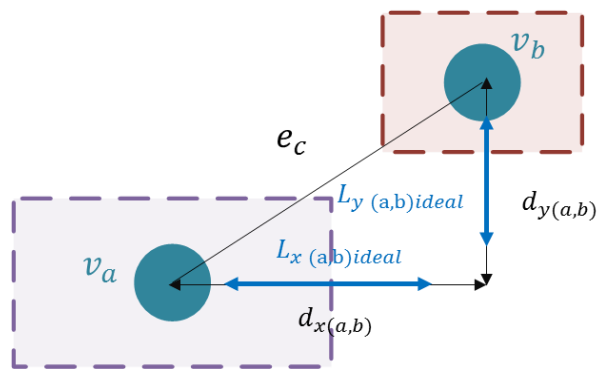


图 3.3 理想长度示意

则引力可以沿正交方向分别求解，每个点受到的引力合力沿正交方向分别为

$$F_{x-a-attraction} = \sum_{i=0}^{n_a} F_{x-i-attraction} \quad (3.5)$$

$$F_{y-a-attraction} = \sum_{i=0}^{n_a} F_{y-i-attraction} \quad (3.6)$$

式中： n_a ——包含点 v_a 的所有边的个数。

C. 斥力

对无向图中的两点间赋予斥力作用，可以使点互不交叠，同时图形尽可能分散在画图范围内。与引力不同，任意两点间都不应距离太近，故考虑对图中的任意两点间均需引入斥力作用。根据 Davidson^[34]等人的研究，效果最好的斥力函数是引入类似于电势能的函数。由于本问题中事先定义了质量，则可以将质量替代电荷量带入势能公式。则对图中任意两点 v_a, v_b ，有：

$$F_{(a,b)reputation} = \begin{cases} k_{reputation} \frac{m_a m_b}{d_{a,b}}, & d_{a,b} > 0 \\ 0, & d_{a,b} \leq 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

式中： $k_{reputation}$ ——斥力系数，亦称斥力项重要度系数。

则每个点受到的斥力合力为：

$$F_{a-reputation} = \sum_{i=0}^m F_{(a,i)reputation} \quad (3.8)$$

D. 边缘效应

由于本问题中绘图区域有限制，需要考虑边缘对布局的影响，否则将极易出现无解或解出边

缘聚集的无意义解现象（如图 3.4）。

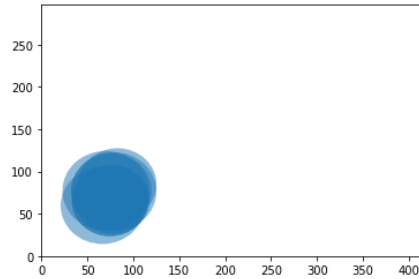


图 3.4 无意义解示例

因此，本问题考虑引入边缘效应，边缘效应应使点的布局不离边缘过近，尽量聚集在图画中心。一种常规的边缘效应思路是引入边缘斥力效应及中心引力效应，但本文尝试后认为此种方法会使模型变得复杂，同时也达不到较好的效果。Davidson^[34]在其研究中提出了一种较好的思路，考虑将点距离每一个边界的距离取平方的倒数和。这一思路从数学上很好的解决了边缘效应的问题，当点距任一边界过近时，点距该边界的距离平方倒数项会十分大，则和项相应增大；而当点处于图形较中心位置时，点距各边界的距离平方倒数项大小较接近，和项可能取得最小值。也就是说，该方法同时解决了点不应离边缘过近，同时应尽可能靠近中心两个问题。考虑到本问题中点具有形状属性，则点距边缘的距离不单单是点坐标与边缘坐标的直接求差，还应考虑点所携带的形状属性，定义点与边缘距离属性如下：

假设图纸的范围为 $[x_1, x_2] \times [y_1, y_2]$ （其中 $x_1 < x_2, y_1 < y_2$ ），对任意点 $v_a(x_a, y_a)$ ，具有形状属性 $length_a \times width_a$ ，则它距四个边界的距离属性可以由下式求得：

$$graph_{l_a} = \begin{cases} x_a - \frac{1}{2}width_a - x_1, & x_a > \frac{1}{2}width_a + x_1 \\ f_{punish}, & x_a < \frac{1}{2}width_a + x_1 \end{cases} \quad (3.9)$$

$$graph_{r_a} = \begin{cases} x_2 - \frac{1}{2}width_a - x_a, & x_a < x_1 - \frac{1}{2}width_a \\ f_{punish}, & x_a > x_1 - \frac{1}{2}width_a \end{cases} \quad (3.10)$$

$$graph_{b_a} = \begin{cases} y_a - \frac{1}{2}length_a - y_1, & y_a > \frac{1}{2}length_a + y_1 \\ f_{punish}, & y_a < \frac{1}{2}length_a + y_1 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$graph_{t_a} = \begin{cases} y_2 - \frac{1}{2}length_a - y_a, & y_a < y_1 - \frac{1}{2}length_a \\ f_{punish}, & y_a > y_1 - \frac{1}{2}length_a \end{cases} \quad (3.12)$$

式中： f_{punish} ——惩罚系数，用于惩罚点距边缘过近，应是一个较小的值，在本问题中取 $1e-4$ ；
则边界效应可由下式衡量：

$$F_{a-graph} = k_{graph} \left(\frac{1}{graph_{l_a}^2} + \frac{1}{graph_{r_a}^2} + \frac{1}{graph_{b_a}^2} + \frac{1}{graph_{t_a}^2} \right) \quad (3.13)$$

式中： k_{graph} ——边界效应系数，亦称边界效应项重要度系数；

E. 合力

则可以将上述四项整合为该引力斥力模型的“合力”，也可理解为点所受的各种力的总和。事实上，各项力的相加并无必要是绝对符合“物理意义”的。则定义点所受“合力”如下：

$$F_a = F_{x-a-attraction} + F_{y-a-attraction} - F_{x-a-reputation} + F_{a-graph} \quad (3.14)$$

在理想条件下，对一个物理系统，所有顶点的初始速度为 0，这就意味着整个系统的整体初“动量”为 0。假如仅考虑引力斥力的作用，此时系统不受“外力”，“动量”守恒，系统总“动量”一直为 0。则系统最终阶段将相对稳定，要么内部顶点振荡，要么静止^[43]。如果用合理的方式处理振荡，则应有可求的最优“平衡”解，即各点所受合力均为 0 的解。而本模型引入了边缘效应，可以视作“外力”作用，系统此时不再是“动量”守恒的系统，但必定有“能量”最低的情况存在。可将所有点受力总和作为目标函数，亦作为衡量系统“能量”的指标。则目标函数为

$$F = \sum_{i=1}^m F_i \quad (3.15)$$

此函数必定存在着最优解。该问题的求解可以转化为优化求解问题。

值得一提的是，该函数中的各项均有系数 ($k_{attraction}, k_{reputation}, k_{graph}$)，这些系数可统称为重要度因子，表征该项在优化函数中所占的比重。在确定重要度因子时，需先将各项进行归一化处理，然后再根据布图时对各项的要求赋予权重。各项重要度系数的确定方法如下：

$$k = k_{weight} \times k_{normal} \quad (3.16)$$

式中： k_{weight} ——权重系数；

k_{normal} ——归一化系数，归一化时不应将特殊分段考虑其中。

结合本问题具体情况，可以求得各重要度因子为

$$\begin{cases} k_{attraction} = 1.5 \\ k_{reputation} = 15 \\ k_{graph} = 40 \end{cases} \quad (3.17)$$

3.1.2 模拟退火法

使用简单的设定循环次数及终止条件，使点在力的作用下不断移动，以图达到平衡的解法在一定的解法步数内并不能稳定求出解（因为计算复杂度过高），而通过更改循环终止条件也常常不能求出较好的解。因为这个目标函数并不是单调的，这种求解方法对初始条件极其敏感，并不收敛。故应考虑更改求解方式，使用启发式算法求解。

模拟退火（Simulated Annealing, SA）是一种灵活的优化方法，适用于大规模的组合优化问题。模拟退火算法是模拟晶体退火过程的一种算法，起源于统计力学，现如今已成功地应用于许多经典的组合优化问题，如旅行商问题等。模拟退火不同于一般的迭代改进方法，它允许不够好的中间解以一定概率出现打破解的情况，而不是像一般的迭代方法一样每一次迭代都改进中间解。若一个问题有一个非常大的离散配置解空间，这个空间一般对于穷举搜索来说太大了，而问题要求在这个空间上目标函数要最小化（或最大化），则这类问题就非常适合用模拟退火算法求解。

模拟退火方法模拟一个液体退火成晶体的过程。众所周知，当液体被缓慢冷却时，它会达到

一种完全有序的形式，称为晶体，它代表了系统的最低能量状态。相反，如果冷却过快，则会导致非晶体结构的出现，这种结果也具有不高的能量，但高于系统的最低能量状态，可以视为局部极小值。上述二者的不同之处在于，当液体被缓慢冷却时，原子在每一温度下都有时间达到热平衡。在这种状态下，系统服从玻尔兹曼分布，对任意能量状态 E ，其概率分布如下：

$$p(E) = e^{-E/kT} \quad (3.18)$$

式中： k ——玻尔兹曼常数；

T ——液体温度。

对于每一个温度，每个能量状态 E 都有非零概率，因此系统都有可能改变其状态与更高的能量状态。而在低温下，系统往往处于能量非常低的状态，在温度为零时可以达到全局最小值。模拟退火过程的基本规律是，系统从具有能量 E_1 的状态变为具有能量 E_2 的状态的概率是

$$e^{\frac{E_2 - E_1}{kT}} \quad (3.19)$$

这条规则意味着，当新的候选状态的能量 E_2 小于当前的能量 E_1 时，新的能量状态将被百分之百接受。但如果新的候选状态的能量 E_2 大于当前的能量 E_1 ，则该状态被接受的可能性是服从一定概率分布的。这条规则使求解过程允许以一定的概率接受比前次迭代结果更差的解，从而使得求解可以通过迭代找到全局最优解。

理论上已经证明，只要模拟过程足够充分，这种算法就可以以概率 1 收敛到全局最优解。但是由于完全的模拟退火算法需要非常长的计算时间，特别是对于大规模问题，很难使退火过程模拟得足够充分。但大量的实际应用已经表明，即使模拟过程不太充分，也常常能够找到全局最优解或接近全局最优解的较优解。

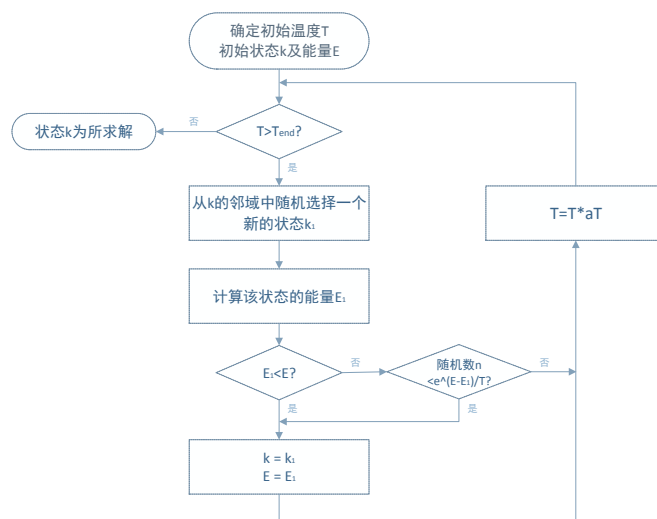


图 3.5 模拟退火算法计算流程

模拟退火算法的求解过程一般流程图 3.5 所示，每次迭代循环都对应一个等间隔逐渐减小的温度 T ，迭代终止条件是达到最终退火温度 T_{end} 。则设置合理的温度间隔 ΔT 及合理的退火温度 T_{end} 对迭代结果至关重要。

装 订 线

3.1.3 引斥力模型的求解算法

根据 3.1.2 节分析，本文引斥力模型目标函数具有对穷举而言过大的解空间，适合采用模拟退火算法。为了使用模拟退火算法求解本问题，需要对模型进行进一步的细化。

A. 解空间

对于一个有布图范围的布局问题，理论上说，布图范围内所有点均为无向图中每个点可能所在的位置。众所周知，一维区间数轴上的点有无数个，二维亦然，图纸范围 $[x_1, x_2] \times [y_1, y_2]$ （其中 $x_1 < x_2, y_1 < y_2$ ）内，有无数个点。具体到无向图 $G(V, E)$ 的解，为这无数个点的排列组合。这种连续型的问题，解空间无穷大，无法求解。进行离散化以缩小解空间是必须的。

除此之外，由于模型具有一定的物理意义，在未经过详尽的物理证明的前提下，无法保证最终可以求得一个“静止”的解，最终状态或可是各点在一定位置范围内振荡，在振荡范围内点位置的排列组合均可以使目标函数接近最小值，在求解时可能花费更多的时间。适当的离散化问题亦可以使得这一问题的求解变得更加简洁。

故本文考虑对原引力斥力模型进行离散化处理，具体到二维图形上，即为网格化处理。由于点具有绘图意义，不可以布在图框边界上，故两轴取值区间 $[x_1, x_2], [y_1, y_2]$ 均为开区间。对两轴取值区间进行等间隔分割，可以得到二维网格 $Net(N_x, N_y)$ 如图 3.6 所示。

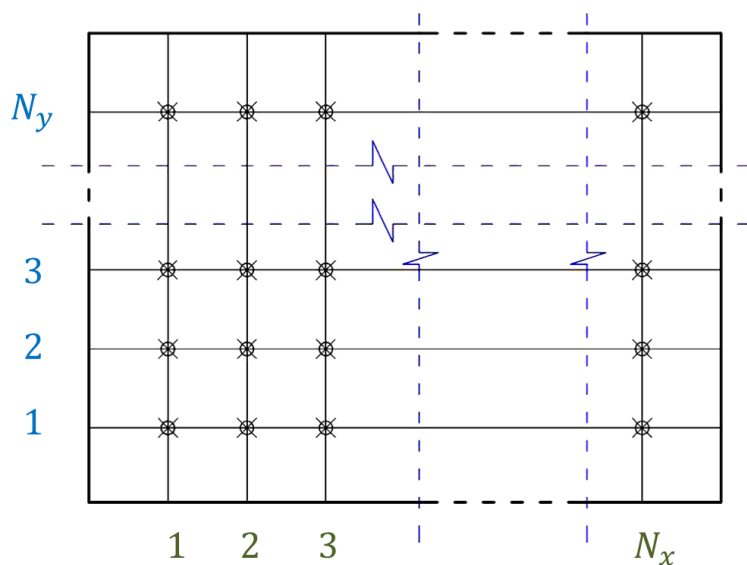


图 3.6 二维网格化处理的绘图范围

图中所有网格点所构成的点集 N ，即为无向图 $G(V, E)$ 中每个点可能所在的位置。 N 中任意 m 个（ m 为无向图 $G(V, E)$ 中点个数）互不重复的点的排列方式为该问题的一个解，可称为该模型的一个状态。由 N 中所有任意 m 个互不重复的点的所有排列方式构成的集合 S 为该问题的解空间。

B. 状态编码

为了使用模拟退火算法，需要对模型的每一个状态进行编码。模型的状态为多数的排列组合，

使用一位编码显然不够直观。一种合理的方式是对每个点的位置分别编码，再将这些点的位置编码组合成一个复合编码。

则首先需要点对集 N 内的每一个网格点进行编码。从图 3.7 中可以看出，已知图范围 $[x_1, x_2] \times [y_1, y_2]$ ，设横轴向网格间距为 d_x ，纵轴向网格间距为 d_y ，则可以计算网格列数 N_x 及网格行数 N_y （其中MOD为求余运算）：

$$N_x = \begin{cases} \frac{x_2-x_1}{d_x}, & \text{MOD}(x_2-x_1, d_x) = 0 \\ \frac{x_2-x_1}{d_x} + 1, & \text{MOD}(x_2-x_1, d_x) \neq 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

$$N_y = \begin{cases} \frac{y_2-y_1}{d_y}, & \text{MOD}(y_2-y_1, d_y) = 0 \\ \frac{y_2-y_1}{d_y} + 1, & \text{MOD}(y_2-y_1, d_y) \neq 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

从图的左下角开始编号，同时为了与编程语言编号一一对应，编号从 0 起编。则第 i 行 j 列的网格点 k 其编号为：

$$pt_k = (j-1) \times N_y + (i-1) \quad (3.21)$$

式中， i 的取值范围为 $[0, N_y - 1]$ 的整数闭区间， j 的取值范围为 $[0, N_x - 1]$ 的整数闭区间。则点编码的范围为整数闭区间 $[0, N_x N_y - 1]$ 。

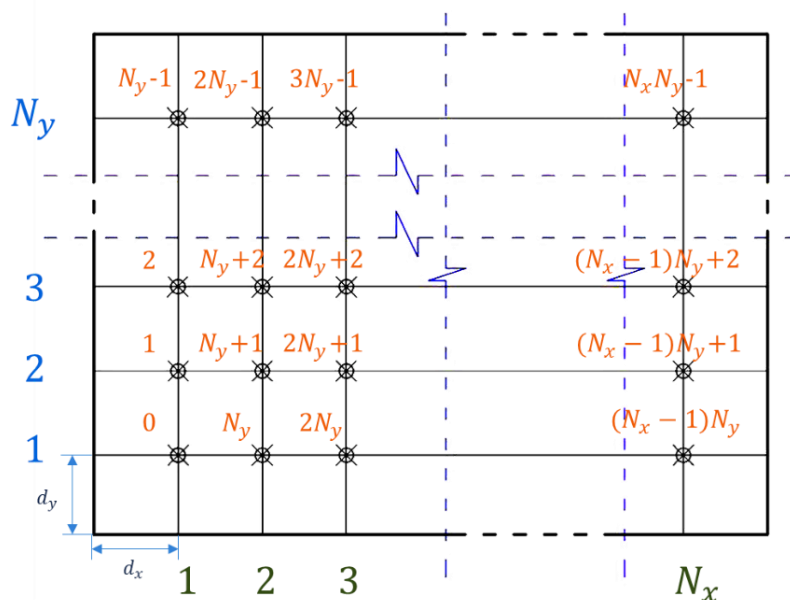


图 3.7 绘图范围二维网格编码

则对无向图 $G(V, E)$ ，其中 V 为环路点集 $\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ ，其编码如式(3.22)所示。式中， pt_1, pt_2, \dots, pt_m 为环路点集 $\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 各点的对应网格点编码，符合式(3.21)编码规范。

$$(pt_1, pt_2, \dots, pt_m) \quad (3.22)$$

装订线

C. 初始状态

为了开始迭代求解，一个初始状态是必须的。一个合理的初始条件可以减少迭代趋向稳定的时间，使得求解更加迅速。对于本布局问题，点尽可能分散，且边交叉较少的初始条件较为理想。而又因为初始条件并无必要是完全符合布图条件的，为了使各点尽可能的分散，本模型考虑将各点按连接顺序沿图纸范围的四边布置，由于目标函数中含有边缘效应项，开始计算后点会往中间靠拢，故不需最终解担心点离图纸边缘过近。

此外，在此模型中，由于部分点所代表的设备可能在布局时需带有空间物理意义，则在初始状态及边缘效应上需要予以特殊考虑。综合考虑，本模型决定在各点位置初始化的同时兼顾物理意义，这样可以使得计算在较短的步数内获得符合物理意义的较优解。

一般来说设备的空间位置对应系统图上的位置主要体现上纵向空间上，即屋顶设备应该绘制在图面的最上方，而地面设备应该绘制在屋顶设备之下，地下设备则应该绘制在图面的最下方。对于全图面设备在实际中都处于几乎同一高度上的情况（主要是不含末端情况的水系统图），则各设备的位置可以只考虑图形布局。故本模型考虑在环路拓扑中对每一个点附加空间属性，该属性记录其大概的高度空间位置（屋顶/地面/地下）。当整张图上所有点的空间属性一致时，则初始布局不需考虑附加空间物理意义。当图上分别存在不同的空间属性时，则初始布局需细化考虑，最高处的设备沿顶边布置，最低处的设备沿底边布置。

D. 退火参数

为了使用模拟退火算法进行计算，退火算法的一些参数需要被确定。定义起始温度 $T = 10$ ，退火比例 $\alpha T = 0.999$ ，及结束温度 $e = 1e - 30$ 。为了节省计算时间，定义最大迭代次数 $n = 5000$ 。此外，为了防止状态变化过快，限制每次状态变化只能为任一点，在上下左右任一方向移动一步。

3.2 连线算法

在确定了环路拓扑的布局，或确定了部件拓扑的布局后，需要将不同环路/部件间用正交的线连接起来，这一过程称为连线。

1961年发布的 Lee 算法是世界上最早的连线/寻路算法，后来在该算法的基础上又发展出了一系列的衍生算法，这些算法统称为迷宫算法。迷宫算法的基本思想是模拟波的传播过程，若要寻找从点 A 到 B 的最短路径，就假设 A 是一个波源点，向四周发射波，波遇障碍会绕射，最早到达 B 点的波所经过的路径即为最短路径^[44]。由于波是向四周发射的，迷宫算法搜索路径的时间往往较长。人们广泛熟知的广度优先算法、Dijkstra 算法都是迷宫算法的变种。这种算法计算较慢，但可以保证找到最短路径。最佳优先搜索（Best-First-Search, BFS）算法是一种贪婪算法，它每一步都试图离目标更近一些，虽然计算耗时短，但在存在障碍物的情况下并不能保证找到最短路径。A*算法则是上述二者的结合，它既保证了较少的计算量，也提高了找到最短路径的成功率。上述算法均为目前主流的寻路/连线算法，被广泛应用于各类寻路问题中。事实上，自动成图的连线问题与寻路问题虽有共通性，却并不完全相同。寻路算法需要在走过每一步后计算下一步的走向，计算量较大，但往往无法保证路径弯折最少，而自动成图的连线问题需要保证较少的弯折。1969年线探索算法^[45]的提出让人们看到了自动成图连线问题减少计算量的曙光。早期的线探

索算法是一种无网格布线算法^[46]，基本思想是假设不存在障碍，从起点 A 及目标点 B 出发分别画一条探索线，其中过 A 的线垂直，过 B 的线水平，遇到障碍则转向做逃避线，直到二者直线相交，此时路径为所寻路径。该方法保证了较少的弯折，同时计算量大大减少。

具体到本问题的连线，水系统图的环路拓扑模型及部件拓扑模型均有一特点，即抽象后的矩形具有形状大小意义，这就导致了：

- ① 连接线并不是从矩形中心出发，而是从矩形的任一位置出发（后文将具体定义）；
- ② 相连的各矩形大小互不相同，且在相连过程中互为障碍；
- ③ 连接点所基于的矩形可能成为到达本连接点的连接线生成的障碍。

此外，对于环路拓扑模型的连线问题，单线连接线最后还需要变成双线（供回水线）。以上特征便使得本问题的连线问题与一般单线成图的连线问题^[47]大不相同（如图 3.8），为了解决本问题的连线问题，需要提出新的连线算法，或对现有算法加以改进。

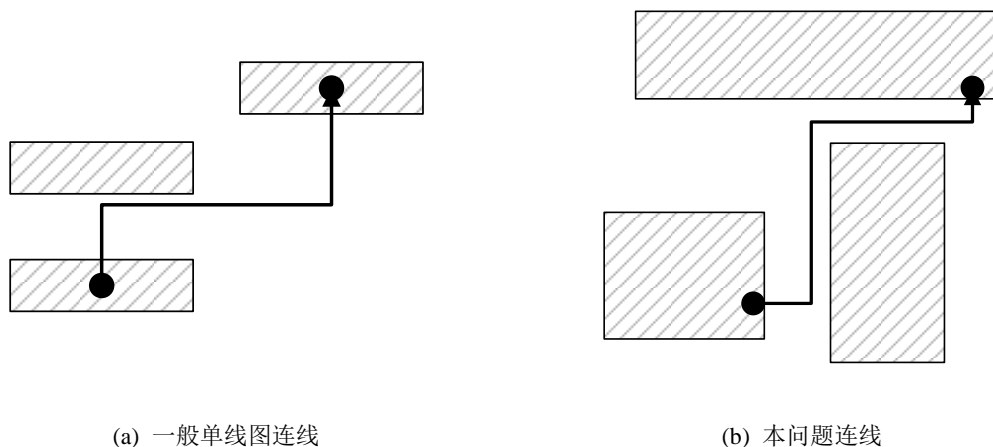


图 3.8 连线问题对比示意图

3.2.1 基于障碍的线探索算法

A. 朝向目标的线探索算法

朝向目标的线探索算法是指已知起点和终点，从起点出发的探索线进行横向、竖向交替探索，只要未遇到死点或者临界点，线的探索方向始终朝向目标^[48]。该算法的示意图如图 3.9 所示。图中 A 为起点，B 为终点，虚线框为由起点和终点组成的包容矩形，带斜线的矩形框表示障碍，包容矩形中的障碍将可能对线探索造成影响。 C_1, C_2, C_3 表示每条探索线的起点， D_1, D_2 表示探索线的预定终点。每次探索都预定探索线终点，在探索线上逐点探索，若探索前方遇到障碍时，改变探索方向并开始新的探索线，直至到达终点。

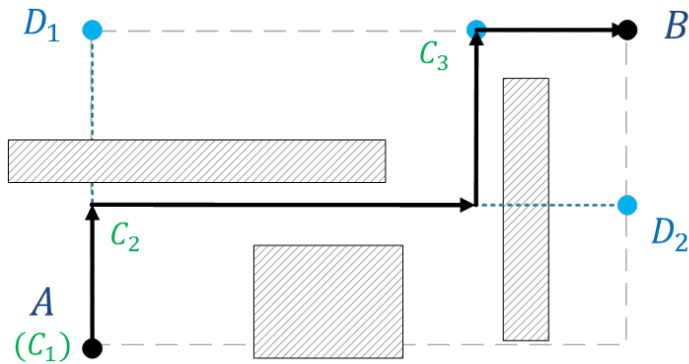


图 3.9 朝向目标的线探索算法示意图

在这一算法中，出发点 A 和到达点 B 为已知，但出发和到达方向未知，其确定是根据 A 与 B 两点确定的包容矩形，在矩形内随机定义水平或竖直的出发方向，而到达方向完全根据布线计算结果确定，是目标导向且距离最短的。点与障碍的关系相对独立，点不依附于障碍，且线路计算不基于网格，故其出发到达方向不受限制。此外，此算法虽然使用了探索线，但本质上还是逐点探索，仍有一定的计算量，可进一步改进。

B. 基于障碍的线探索算法

正如上文分析所述，本问题水系统图的连线问题可以归纳为两个主要特征：连接线非布局点中心出发，以及连接点关联于障碍物（布局点所代表的矩形）。常规的朝向目标的线探索算法并不完全适用于本问题，需要进行改进。本文根据水系统图连线问题特点，在朝向目标的线探索算法基础上进行了改进，提出了障碍关联的线探索算法，其主要特征如下：

① 全局网格化处理。障碍物网格化处理使得连接线关联于障碍物的同时又与障碍物于计算上独立，还使得障碍物的信息存储更加直观，使得非逐点探索成为可能；连接线网格化处理可以大大减少探索连线计算量。

② 规定出发及到达方向。出发及到达方向原则上垂直于连接点所基于矩形，以应对自身成为障碍的情况，同时避免单线模型变为双线模型时，进出水线发生冲突。

③ 首步探索进行多次。由于出发及到达方向受限，首步探索可能并非指向目标，这会导致路径偏长，当连线较多时会引起不必要的交叉。对首步引入多次探索，并最终选择拐点最少的路径，可以有效解决这个问题。同时多次探索也可在一定程度上应对死点现象的发生。

具体如下：

a. 算法准备

① 障碍点生成及障碍点矩阵 N_{pt}

水系统图的连线问题发生在环路拓扑模型、部件拓扑模型完成布局后，此时画布上布置着一系列的中心点经过布局的矩形，待连接点附着于矩形的边上，位置已知但与各自附着矩形的方位关系各不相同。矩形即作为连接点的附着基础，又在连线中对探索线起到阻碍。因此，模型定义画布上的一系列矩形为障碍。值得一提的是，为了保证拓扑结构的独立清晰及完整性，减少不必要的内部连线交叉，矩形在此处被视作密实障碍，连接线不可能穿过矩形与连接点相连。

由于此时矩形的中心点经过布局,为已知量,而矩形的形状属性亦未已知量,即矩形的位置,大小均已确定,则可以整体网格化,将密实矩形网格离散化为一系列的点(如图 3.10)。

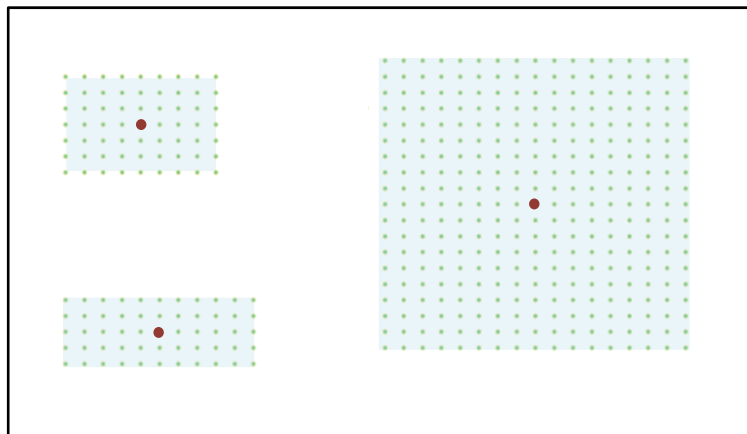


图 3.10 障碍点网格化示意图

网格化的方法与网格点编号同 3.1.3 节(如图 3.7)。将网格化后的障碍点存储于障碍点矩阵 N_{pt} 中。

② 连接点、方向及连线方向

在水系统图的自动生成过程中,连接点的物理含义是该环路或该部件上外部供/回水管的接入点,连接点间通过连线相互连接,从而使水系统的水形成环路。由于将代表环路/部件的矩形看作是密实障碍,连接点是附着于障碍上的,且通过连接点的外部连接线无法穿过矩形内部。亦即此时连接点的连线方向完全受限,需要在算法上予以定义。

在明确连线进出方向前,先明确本算法中的方向定义,该方向定义适用于探索线的方向及进出方向。对图上任意点 (x_0, y_0) , 其有向连线/有向探索线上存在另一点 (x_1, y_1) , 定义方向 D , 有:

$$D = \begin{cases} 1, & x_1 > x_0, y_1 = y_0 \\ -1, & x_1 < x_0, y_1 = y_0 \\ 2, & x_1 = x_0, y_1 > y_0 \\ -2, & x_1 = x_0, y_1 < y_0 \end{cases} \quad (3.23)$$

公式(3.23)意为当连线/探索线方向水平向右时 $D = 1$, 水平向左时 $D = -1$, 竖直向上时 $D = 2$, 竖直向下时 $D = -2$ 。图 3.11 为该方向编号定义的示意图。

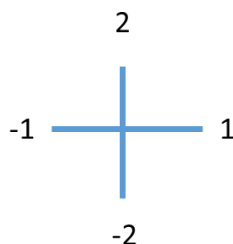


图 3.11 方向编号示意图

装订线

根据前文分析，连接点的连线方向受到其所附着的矩形障碍的限制，则可定义为垂直于连接点所在矩形边，方向向外。图 3.12 展示了矩形四边上的连接点的进出方向，位于矩形四角上的点连线方向根据与其相连的连接点方位确定。

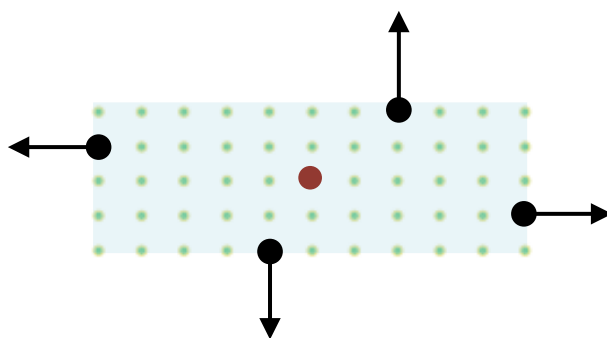


图 3.12 连接点连线方向示意图

③ 连接（Connection）定义

在水系统图的自动生成过程中，连线的物理含义是各环路/部件间相连的供/回水管，连接则表示各环路/部件间的水路连接关系。于布局问题中，连接被表示为无向图 $G(V, E)$ 中的边 E ，而在连线问题中，连接作为问题主体需要被细化定义。连接（Connection）由两个连接点及将它们连接起来的连线组成，由于连接点附着于代表环路/部件的矩形上，连接也从属于连接点对应的环路/部件。

如图 3.13，设有两设备/环路X、Y，它们之间有连接关系，该连接关系在两设备/环路上的连接点分别为A、B。则连接、连接点、矩形（环路/部件）间的相互关联关系如图 3.14 所示。

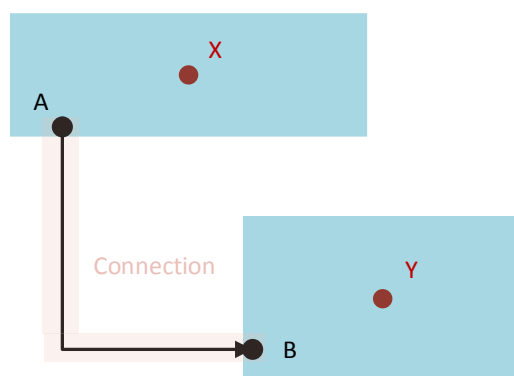


图 3.13 连接、连接点、矩形关系示意图

从图 3.14 也可以看出，每个连接（Connection）都可以访问其两个连接点的连线方向，定义其中任意一个连接点为该连接的入口点，则另一个连接点为该连接的出口点。则连接的进出方向可以完全确定，分别为连接入口点的连线方向，及连接出口点的连线方向（该方向与有向连线、有向探索线的方向相反）。

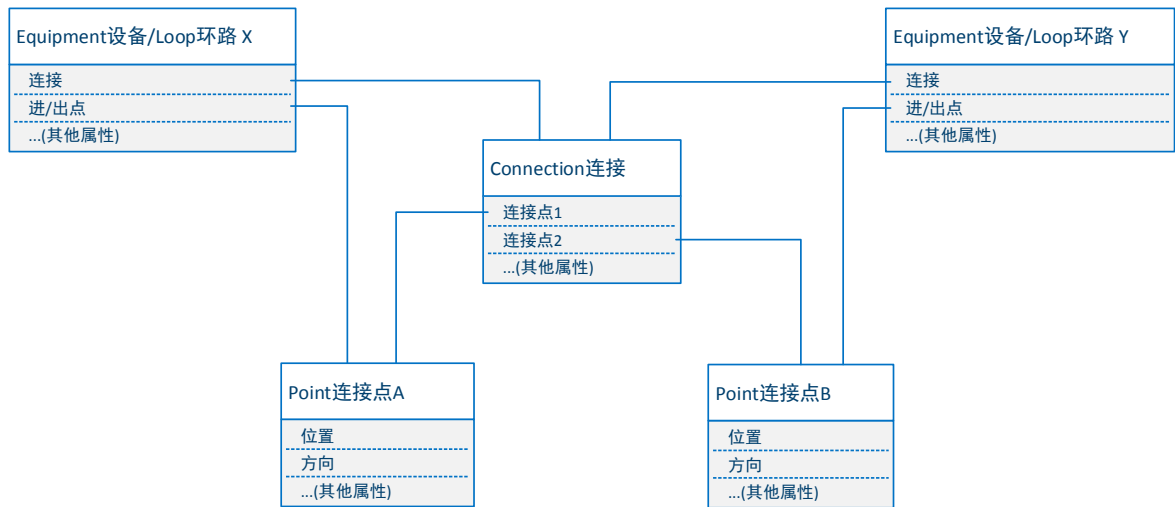


图 3.14 连接、连接点、矩形间相互关联关系示意图

则对一个已知的待连线图，可以获得进出点、进出方向均确定的连接集 C 。

b. 基于障碍的线探索基本原理

获取障碍点集 N_{pt} ，连接集 C 后，可以开始进行线探索连线。基于障碍的线探索算法的基本原理是，对任意连接，从连接入口点开始，按照连接进入方向做探索线。于障碍点集 N_{pt} 中寻找阻碍探索线的最近障碍点，使探索线于障碍点前转向，随后向着目标方向继续做探索线。如此不断做探索线直至以规定的连接出口方向的相反方向到达连接出口点。

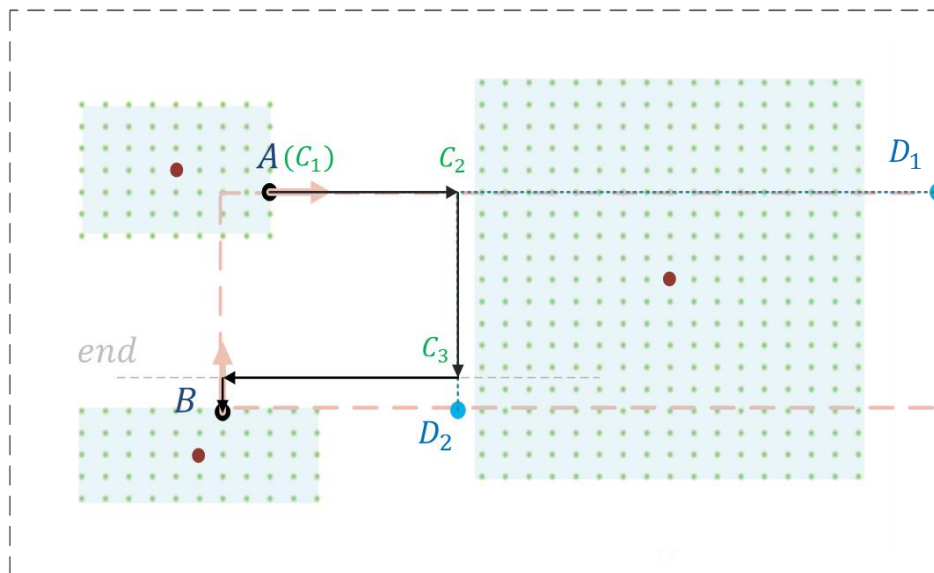


图 3.15 基于障碍的线探索算法基本原理示意图

如图 3.15 所示，深灰色虚线框为图纸范围，粉色虚线框为由起点终点及图纸范围组成的探索线范围，小点表示障碍点，连接的入口点为 A ，进入方向为 1，出口点为 B ，出口方向为 2， C_1, C_2, C_3

表示每条探索线的起点, D_1, D_2 表示探索线的预定终点。值得一提的是, 虚线 end 是为了使实现符合出口方向的连线形式而预留出的拐弯终点线。当探索方向与出口方向一致但探索线和出口点不在同一直线上时, 意味着探索仍需拐两次弯才能到达出口点, 在出口点前必须预留空间以完成最后一次拐弯, 否则探索线将在一次拐弯后直接指向出口点, 会因遇到障碍而不能完成满足出口方向的连线。图 3.16 展示了未设虚线 end 的连线情况, 其中红色箭头将无法完成连线。

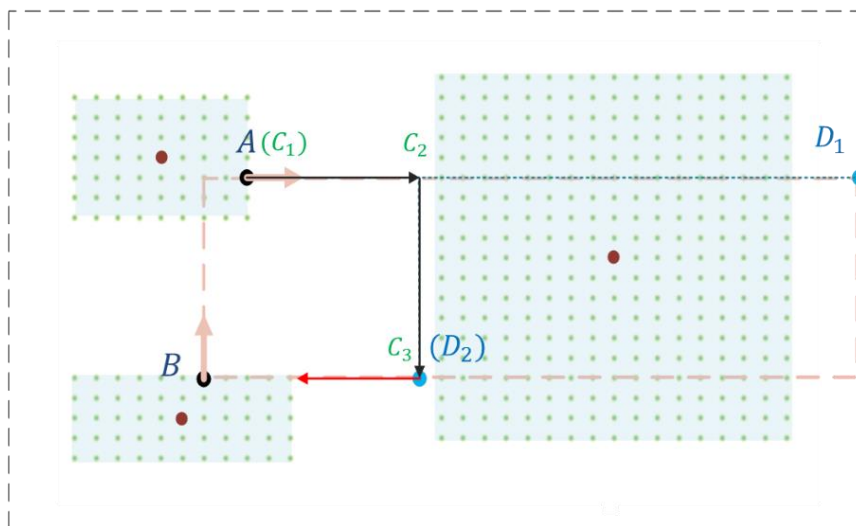


图 3.16 未设 end 线的情况

此外由图 3.15, 由于受到连接进出口方向的限制, 连接的第一段探索线无法指向目标, 这会导致路径偏长, 当连线较多时会引起不必要的交叉。针对这一现象, 本文考虑对第一段探索引入逐点探索, 对设第一段探索至最近障碍点距离为 d 格, 则对第一步探索走 $[1, d]$ 格分别求线, 最后取拐弯最少且第一步走线最短的走线方式为解。图 3.17 是改进后的算法示意。

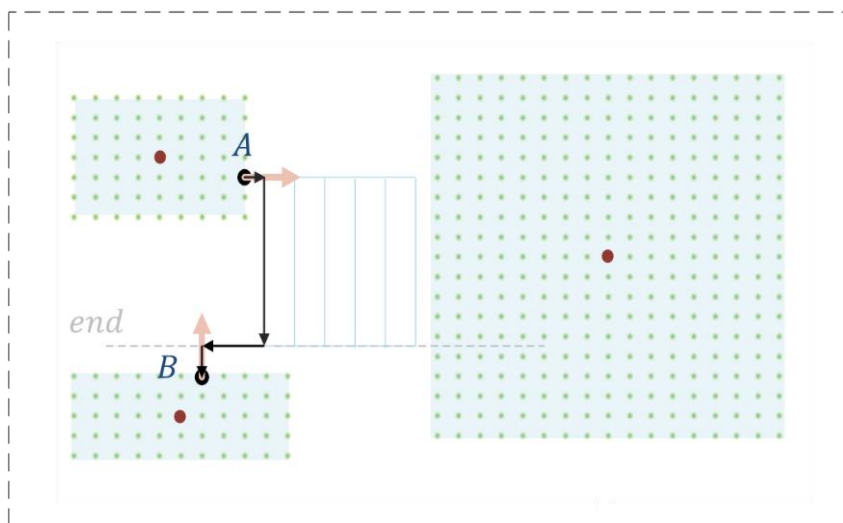


图 3.17 首步改进的基于障碍的线探索算法基本原理示意图

c. 线探索的特殊情况

① 死点的处理方式

当图中障碍较多且连接的起点终点相距较远时，线探索可能出现步入死点，即探索方向终点即为目标但前方已无路可走，此时该路径将被放弃。如图 3.18 中的连接路径 1，当探索线行至 C_3D_3 ，探索方向与终点到达方向一致，但前方出现障碍物已无路可走，此时线探索步入死点，即使绕远路到达目的地，该路径拐点过多也应被放弃。由于首步改进的基于障碍的线探索法不止进行一条线探索路径尝试，最终可以找到如图 3.18 中绿色路径的连线方式。

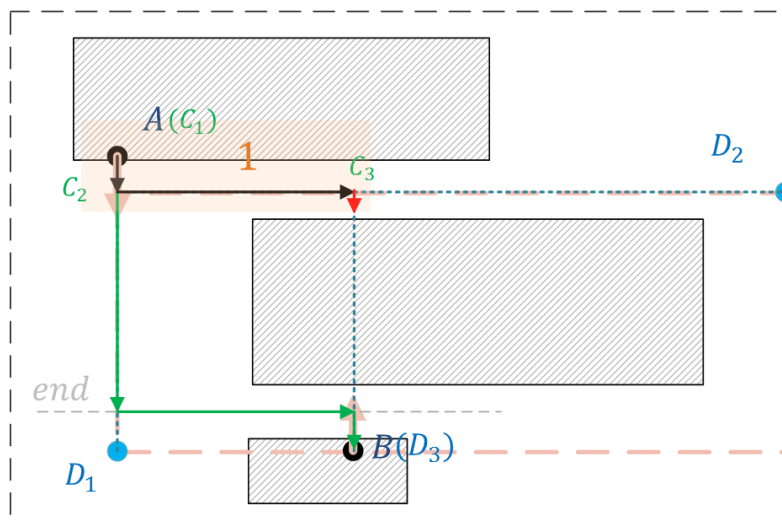


图 3.18 死点的处理方式

② 共线判断

以上所有连线都只考虑了单一连线的情况，事实上，在实际的水系统图连线过程中，需要进行多个连接的连线，这些连线可能会出现交叉、甚至共线现象。少量的交叉可以被容忍，但共线是需要坚决避免的。一个最基本的思路是将连线离散化后加入障碍点集，但由于基于障碍的线探索算法中，探索线在遇到障碍时会发生转向，故连线不宜被加入障碍点集，否则可能会出现大量不必要的拐弯甚至导致无解。

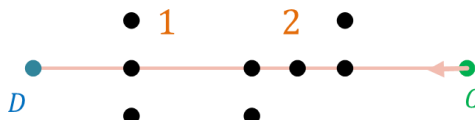


图 3.19 共线判断示意图

事实上，只要在拐弯之前判断拐弯后探索线是否会与已有连线共线，即可避免共线现象的发生。先将已有的连线生成连线点集 L 。对每一次探索确定的拐点，取此时拐点（下一探索线起点）至下一探索线终点线段 CD ，对线段 CD 上的每一点在连线点集 L 中查找，取出所有于连线点集中存在的点，形成交叉点集 N' 。对交叉点集 N' 中的每一点，查找与下一探索方向（拐弯后探索方向）

装订线

垂直的方向上的两个相邻点是否均存在于连线点集中 L ，若均存在，则确定为交叉（如图 3.19 中 1 所示），若有一个不存在，则可判断为共线（如图 3.19 中 2 所示）。若共线判断为真，拐点应退格，以避免共线。

d. 基于障碍的线探索法小结

前文分别从算法准备，基本原理及特殊情况三个角度介绍了基于障碍的线探索法，现将基于障碍的线探索法按计算流程进行简单小结。

基于障碍的线探索法连线的前提是已知障碍点集 N_{pt} ，定义好连接点及连接方向的连接集 C ，同时需要初始化一个连线点集 L ，将每一个连接生成的最终连线离散化后存入其中。

随后，对连接集中的任一连接，起点为 A ，终点为 B 有：

- (1) 参数初始化，将连接起点 A 作为布线起点 C ，根据连接进入方向确定当前探索线的方向。
- (2) 根据连接入口点、连接出口点、连接进出方向及图纸范围，确定布线范围。
- (3) 根据布线范围及当前布线起点、探索线方向，确定探索线终点 D 及探索线 CD 。
- (4) 在障碍点集中 N_{pt} 查找探索线上的点，若存在，则确定首步布线范围 $BeginRange$ 为起点至最近障碍点 P 之间的线段 CP （不包括 C, P ）；若不存在，则确定首步布线范围 $BeginRange$ 为起点至探索线终点 D 的线段 CD （不包括 C ）。
- (5) 按离起点从近到远顺序取 $BeginRange$ 上的点作为首步拐点，也作为新探索线的起点 C 。
- (6) 根据布线范围，及终点 B 位置，确定新的探线方向及探线终点 D 。
- (7) 进行共线检查，若共线判断为真，放弃该布线尝试，转回第(5)步，选取新的首步拐点；若共线判断为假，则根据新探索线的起点，终点和探线方向确定新的探索线 CD 。
- (8) 检查当前探线方向与连接出口方向是否相同。若相同，则判断当前探索线是否经过连接终点。若未经过连接终点，需将探索线终点 D 更改到 end 线上。
- (9) 在障碍点集中 N_{pt} 查找探索线上的点，若存在，则确定探索线上最近障碍点 P 之前的一点为下一拐点（即新探索线起点）；若不存在，则确定探索线终点 D 为下一拐点（即新探索线起点）。
- (10) 检查新拐点是否与终点相同，若是，已完成一次布线尝试，存储，并返回第(5)步，选取新的首步拐点，若此时所有首步拐点已尝试布线完毕，则跳转第(13)步。若否，判断当前探索线终点是否为终点，若是终点，则布线已进入死点，放弃该布线尝试，转回第(5)步。
- (11) 根据布线范围，及终点 B 位置，确定新的探线方向及探线终点 D 。
- (12) 进行共线检查，若共线判断为真，拐点（即新探索线起点）需退格，并转回第(10)步；若共线判断为假，则根据新探索线的起点，终点和探线方向确定新的探索线 CD 。并返回第(8)步。
- (13) 比较所有布线尝试路径的拐点数，取拐点数最少的一个为最终走线路径；若存在拐点数相同情况，则比较首步拐点与连接起点的距离，取最短的一个为最终走线路径。

该过程可用流程图简要表示如图 3.20 所示。

装订线

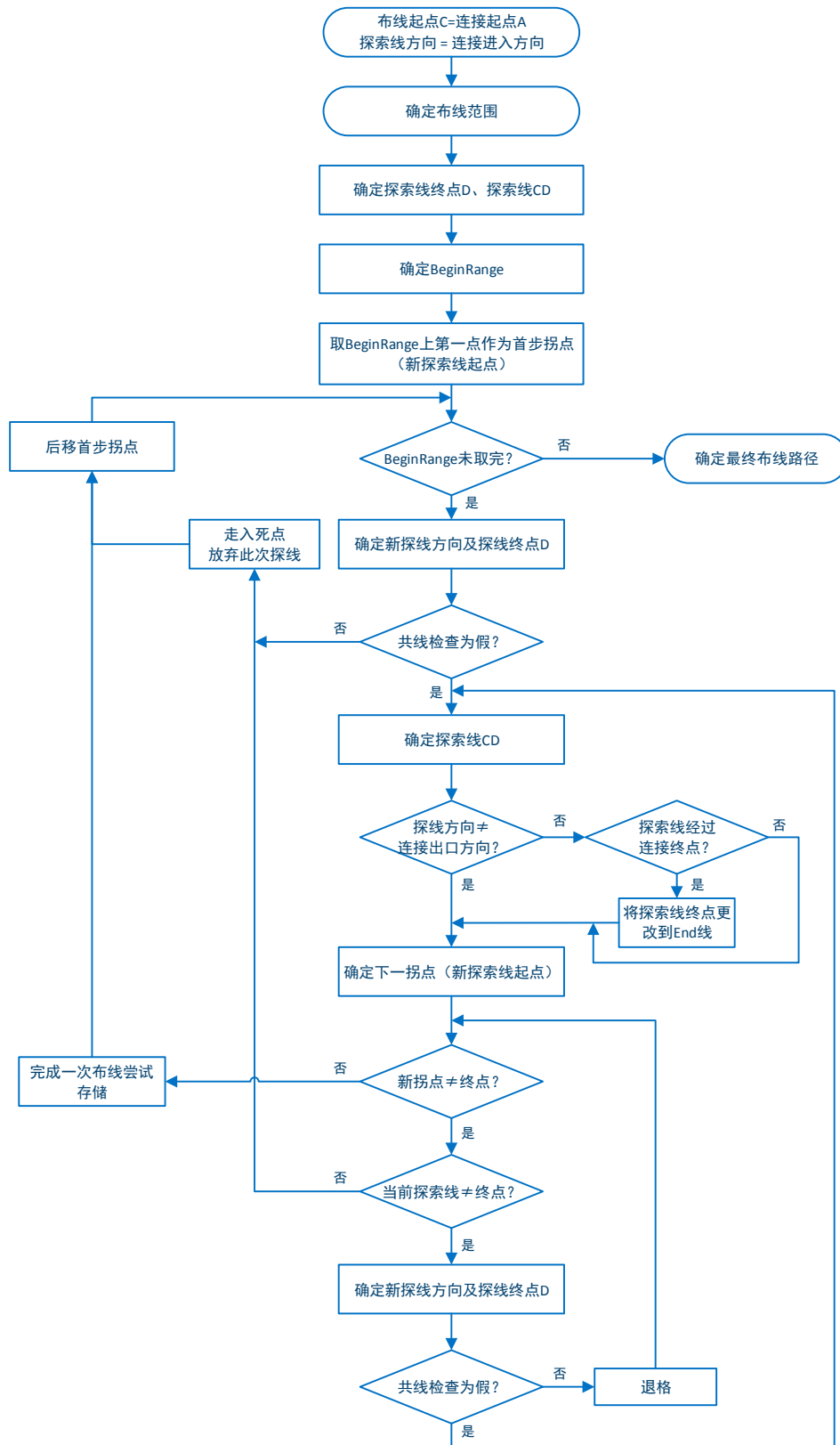


图 3.20 基于障碍的线探索法算法流程图

3.2.2 交叉判定及打断

根据 2.1.3 节提出的水系统图自动成图目标，水系统图的连线交叉应尽可能少。在实际工程的水系统图中，连线交叉处需要有其中一条线进行打断，以保证图形的清晰无歧义。3.2.1 节提出的基于障碍的线探索算法解决了水系统图的连线问题，但为了保证连线的简洁，并没有完全避免连线交叉现象。事实上，由于本文将水系统图简化为单线问题，连线间的部分交叉是不可避免的。需要寻找合适的交叉判定算法识别图形交叉现象，并设计打断算法对交叉的线段进行打断处理。

A. 交叉判定

两个线段的交叉判定现在已经有比较成熟的算法，归纳起来有两种主要的方法，一是直接计算出两线段所在直线的交点，然后判断交点是否在线段上；二是使用向量的方法，称为快速排斥实验和跨立实验^[49]。

本文采用后面一种算法来进行交叉判定。假设有两线段 A_1A_2 和 B_1B_2 ，需要判断二者是否相交。

快速排斥实验是指判断以线段 A_1A_2 为对角线的矩形，以线段 B_1B_2 为对角线的矩形是否相交。如果这两个矩形不相交，那么这两个线段也必定不相交。如图 3.21 所示，以线段 A_1A_2 和 B_1B_2 为对角线的两个矩形不相交， A_1A_2 和 B_1B_2 可以直接判断为不相交。

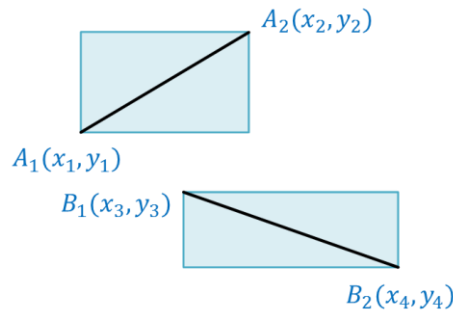


图 3.21 快速排斥实验示意图

若两线段端点的坐标为 $A_1(x_1, y_1)$, $A_2(x_2, y_2)$, $B_1(x_3, y_3)$, $B_2(x_4, y_4)$ ，则快速排斥中的矩形判断可以表示成，当且仅当(3.24) (3.25) (3.26) (3.27)四个式子均为真时，两个矩形相交。

$$\max(x_1, x_2) \geq \min(x_3, x_4) \quad (3.24)$$

$$\max(x_3, x_4) \geq \min(x_1, x_2) \quad (3.25)$$

$$\max(y_1, y_2) \geq \min(y_3, y_4) \quad (3.26)$$

$$\max(y_3, y_4) \geq \min(y_1, y_2) \quad (3.27)$$

跨立实验是指通过判断一个线段是否“跨立”于另一个线段上。所谓跨立，即是判断线段的两个端点是否位于另一个线段的同一侧，若是，则两线段不是跨立关系，若不是，则两线段是跨立关系，二者相交。如图 3.22 所示，(a)中，线段 B_1B_2 的两个端点 B_1 , B_2 分别位于线段 A_1A_2 的两侧，则线段 B_1B_2 跨立于线段 A_1A_2 上，二者相交；(b)中，线段 B_1B_2 的两个端点 B_1 , B_2 位于线段 A_1A_2 的同一侧，则线段 B_1B_2 未跨立于线段 A_1A_2 上，二者不相交。

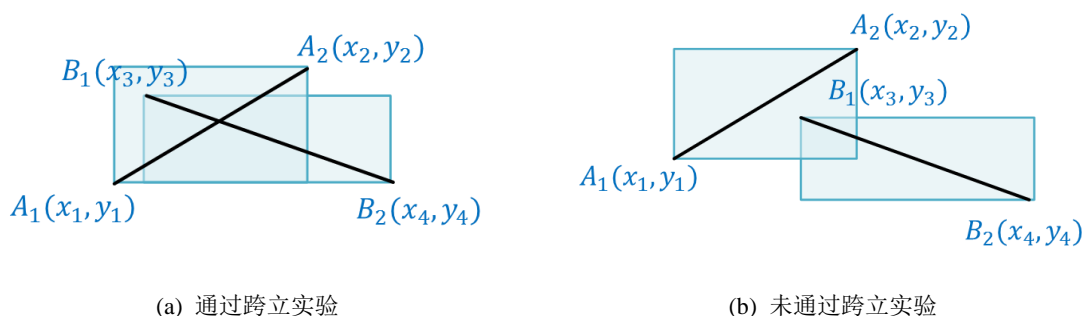


图 3.22 跨立实验示意图

跨立实验可以通过判断由一个线段两个端点分别与另一线段上一个端点构成的向量，与另一线段构成的向量的叉积是否相同来确定。如图 3.23 所示，计算(3.28)与(3.29)符号是否相同，若相同，说明不跨立，线段也就不相交，否则两线段相交。

$$(B_1 - A_2) \times (A_1 - A_2) \tag{3.28}$$

$$(B_2 - A_2) \times (A_1 - A_2) \tag{3.29}$$

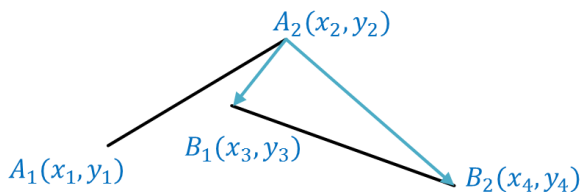


图 3.23 跨立实验向量计算法示意图

B. 交叉点确定及打断

在确定两线交叉后，需要进一步找出交叉点，才能够进行下一步的打断操作。交叉点的查找比较简单，即根据两不平行不重合直线有且仅有一个交点，若已判断线段相交，则直线交点必为线段交点。只要根据线段确定其对应的直线，然后联立两直线求解交点即可。

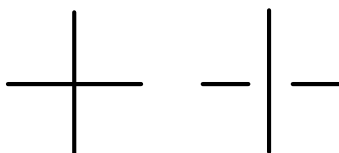


图 3.24 交叉打断示意图

在同一张水系统图上，交叉线的打断最好同向，如竖向统一打断或横向统一打断等。判断交叉后集体打断可以满足这一要求。本文采用的是统一横向打断（竖向打断事实上同理），在判断出交叉及确定交叉点后，将横向交叉线段一分为二，两个线段分别在交叉点左右相同距离确定端点（如图 3.24）。

装订线

3.2.3 特殊连线形式

正如 2.1.2 节所述，水系统的管路存在一些特殊的连接方式，当这些连接方式不同时，代表着不同的水系统，如同程式、异程式的区别等。在水系统图成图的过程中，这些连线形式是需要被表示出来的；此外水系统的管路存在着并联的连接方式，这会使连线存在一些不可避免的交叉、共线现象，如两管制、三管制、四管制系统中，其连接冷机、连接末端处都可能存在大量的交叉，由于管路存在并联，部件部件之间的连线必定共线。

因为这些特殊的连线形式往往有比较固定的连接走向，为了表示清晰不宜相距太远，却又可能不一定完全符合图学审美的成图要求（例如同程式显然并非最短距离、四管制存在大量的交叉等），此时若使用连线算法自动生成往往可能不能达到好的效果。此外，对于水管路存在并联的问题，3.2.1 节所述的基于障碍的线探索算法以无法处理并联共线的情况。

综合考虑，本文认为应当对这些连线形式独立存为一种已完成一定量连接的“部件”图块，在需要时调用，则可以达到想要的连线效果。如图 3.25 展示同程式/异程式连接图块的示意图，它们的进出口完全相同，与外部的连接亦完全相同，只需要在绘图时根据需要选择即可。图 3.26 展示了四管制并联侧的连接示意，该连接同时处理了并联共线和交叉打断，进出口位置可以通过并联个数计算得到，绘图时可以直接布置。

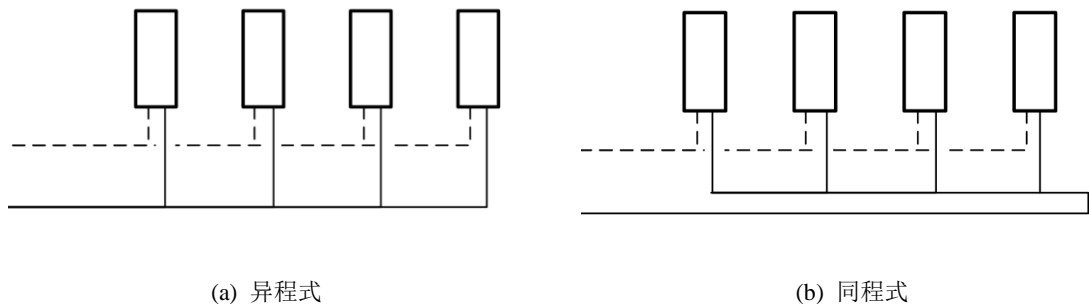


图 3.25 同程式/异程式连接图块示意图

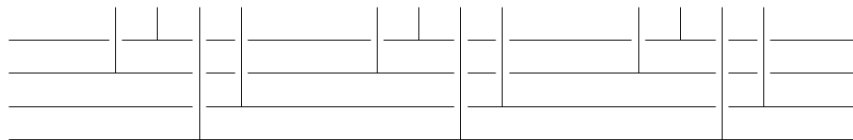


图 3.26 四管制并联侧连接图块示意图

3.3 环路细胞模型

与一般的自动成图问题不同，要想最终生成一个水系统图，只解决了布局问题和连线问题并不够。从 2.2 节，水系统图拓扑简化的过程可以看出，水系统图有许多繁杂的细节需要考虑。布局算法解决了图形上各环路的布置问题，连线算法解决了图形上大部分的连线问题，但从图形布

局到连线中间还有一个很重要的问题没有解决，那就是连线点的引出问题。部件拓扑的连线点引出问题较为简单，因为部件（如冷机、水泵）进出点往往是可以固定的，但环路拓扑的连线点引出显然是个多解问题。环路拓扑的连线点应该如何定位，环路拓扑内部的连线和外部的连线如何建立联系，是目前需要解决的问题。

本节提出的环路细胞模型将主要解决这一问题。除此之外，环路拓扑的内部结构还有许多特征，一个环路拓扑内部包含着多个部件，环路可以由其包含的部件类别进行分类，从而提高整个模型的精炼度，减少编程的工作量。本节提出的环路细胞模型亦将分析环路拓扑的内部结构，并进行分类。

3.3.1 细胞与环路细胞

根据 2.2 节，水系统图被简化为环路拓扑模型后，各个环路相对独立，内部各自有部件结构，但又有一定共性，环路拓扑在某位置依靠连线与外部相连。这一系列的特征，与人们熟知的细胞有一定相似性。细胞膜使细胞成为相对独立的环境，细胞内部有结构（细胞膜、线粒体等），可以根据细胞结构对不同细胞进行分类，细胞膜具有选择透过性，细胞膜上的通道蛋白可以主动运输物质。为了便于理解环路拓扑特征，本文将环路拓扑类比为细胞，其类比关系如表 3.1。

表 3.1 环路与细胞的类比

类比维度	环路拓扑	细胞
	环路拓扑外矩形	细胞膜
结构	部件（冷机、水泵等）	细胞器（线粒体、核糖体等）
	环路拓扑的进出连线点	细胞膜上的通道蛋白
	环路拓扑外矩形大小	细胞大小
概念	内外部连线	主动运输
	部件间连线	膜泡运输路径
分类	冷热源水环路、末端水环路	植物细胞、动物细胞

对每一个环路细胞，“细胞膜”（环路拓扑矩形）使其内部成为一个相对独立的环境，外部的连线不能穿入，甚至穿透环路细胞；“细胞膜”上的“通道蛋白”（进出连线点）是环路细胞内部与外部的连接点，要想与该环路相连，外部连线只能与“细胞膜”上的“通道蛋白”相接。与一般细胞不同，环路细胞的“通道蛋白”流动性不强，位置相对固定。

环路细胞中有多个“细胞器”（部件），这些“细胞器”之间存在着“膜泡运输”（水流动）的物质传递，某一次“膜泡运输路径”即为各部件间的连线。值得注意的是，此处与真实细胞略有不同，真实细胞中膜泡运输是起终点固定但路线随机的。

不同环路细胞所具有的不同“细胞器”，使得环路细胞可以被区分为不同类型的环路细胞。例如，具有冷机、水泵，则为冷源水环路细胞（包括冷冻水环路、及冷却水环路）。

环路细胞具有一定大小（形状属性），这个大小有范围，并不是一成不变的，根据环路细胞的功能及属性（部件个数）确定。不同类型的环路细胞有着不同的细胞大小范围。

综上，本文得到了一个环路细胞的概念，它是由环路拓扑特征提取后类比细胞得来的。

3.3.2 环路细胞的“细胞膜”和“通道蛋白”

根据 3.3.1 节所确定的环路细胞概念，环路细胞的“细胞膜”（环路拓扑矩形）使其内部成为一个相对独立的环境，“细胞膜”上的“通道蛋白”（进出连线点）是环路细胞内部与外部的连接点。

根据 2.3 节提出的自动成图拓扑思路，在布局生成环路拓扑模型之后，应该要细化生成部件拓扑模型。各环路内部的部件细化应当是各自独立的，且环路布局时生成的网格未必适合部件拓扑模型的布局和连线。也就是说，在环路细胞“细胞膜”的内外侧，可能存在着两套不同的网格。

除此之外，由于目前的布局模型和连线模型的网格划分都不考虑边界线，而环路细胞的矩形边界线实际上是有绘图意义的，在内外部连接时，连线需要跨越这一边界线。根据目前已有的模型，外部连线时，边界线上的点被视作障碍点，而在内部连线时，边界线上的点不会被赋予网格编号，内外连线之间存在着一段空白，需要补充模型进行填补。

目前已有的模型并未确定环路细胞的进出连线点。进出连线点，亦即“通道蛋白”的定位也是十分重要的，一个好的进出点定位可能大大减少连线长度，使得连线更加简洁明了。

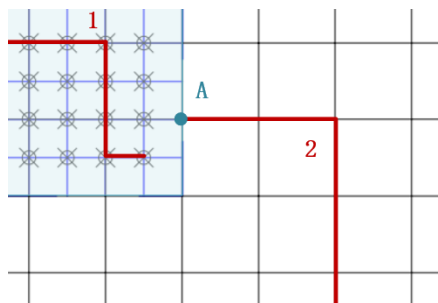


图 3.27 当前存在问题

图 3.27 表示出了上述问题，其中 1 为环路细胞内部连线，2 为外部连线，A 为连接点。综上，环路细胞“细胞膜”和“通道蛋白”模型的完备需要考虑三个需求：

- ① 内外两套网格点的转换；
- ② 内外连线间空白的填补；
- ③ 确定连线进出点的位置。

则补充定义及方法：补充查找最近点的方法进行内网格点的转换；具体定义“通道蛋白”为一种特殊的连线形式，根据内部连接点确定最适合的外部连接点，并将二者用连线连接起来；补充“通道蛋白”的定位方法，根据环路细胞的连接上下游确定进出点定位。

A. 查找最近点

两套网格点的存在可能使连线点的定位存在一定的错位现象，从而无法进行连线。需要定义一个查找最近点的方法，使得一套网格内的点可以与另一套网格上距离最近的点相互关联起来，方便连线的进行。

由于对连线点，它同时具有位置及连线方向两个属性，则可以据此在另一个网格点集中进行筛选查找。具体方法如下，在另一网格点集找查找本连线点连线方向上距离最近的网格点，将两点关联起来，并将连线点位置更新为新点位置，同时更新连线方向，新的连线方向应与两点连接的连线末端同向。

图 3.28 展示了三种查找对应情况，其中 A 是待匹配的原网格中点，B 为匹配后的点。(a)表示直接对应的情况，即 A 与 B 位置相同，可直接对应，连线点定义的连线方向不会发生改变。(b)表示了同向对应的情况，在点 A 的连接方向上可以找到对应的点 B，则连线方向不会发生改变。(c)表示转向对应，在点 A 的连接方向上不能找到对应的点，则找最近的网格点 B，关联确立后，连线方向将发生改变。

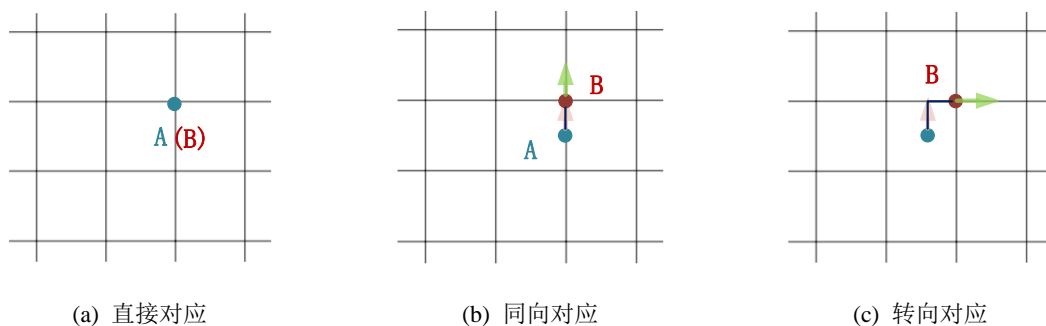


图 3.28 查找对应点示意图

B. 通道蛋白

根据先前的模型，内外连线之间存在着空白段，需要被填补。在实际成图过程中，环路拓扑的连线应该上在部件拓扑内部连线之后，故两段连线的连接实际上是一个传递关系，即根据环路细胞内部的连线点定位，确定对应的环路细胞外部连线点定位，以便于进行环路拓扑的连线。则可以把“通道蛋白”具体定义为一种特殊的连线形式，它由内部连接点、外部连接点和它们之间的连线组成。

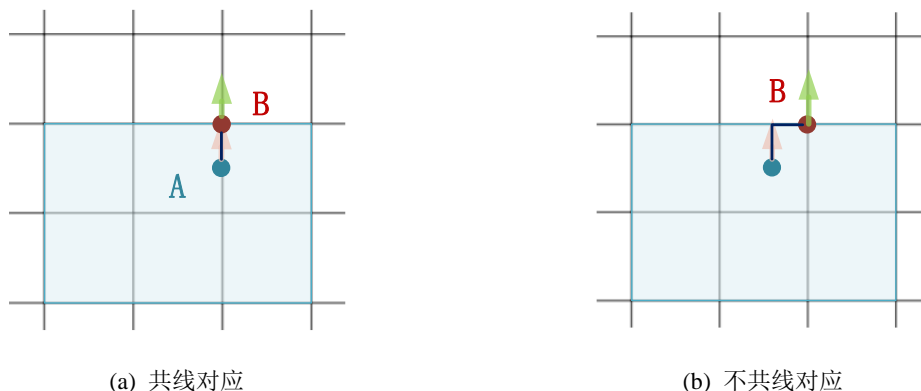


图 3.29 通道蛋白内外连线点对应

内外连接点的定位传递与查找对应点的过程十分类似，只是受连线算法的限制，连接点的连线方向应垂直于其所在的矩形边，故连接点的连线方向是直接传递的，在对应过程中不会发生改变。图 3.29 展示了通道蛋白内外连线点对应的示意图，可以看到，图(b)中虽然内外连线点的连接线发生了弯折，但是新点的连接方向并没有发生改变。

C. 通道蛋白的定位

截至目前，本文确定了环路细胞的布局算法，确定了环路细胞间的连线算法，但没有确定环路细胞的连接进出口点（即通道蛋白）的位置。根据先前的模型，环路拓扑间的连接关系是完全确定的，而由于根据 3.2.1 节分析，环路拓扑矩形本身会作为障碍影响连线，连线点的合理设置就变得至关重要。

本文根据环路细胞间的连接关系，确定了连线点的位置。为了方便表述，下文将称待确定通道蛋白位置的环路细胞为本体细胞，与之相连的环路细胞为相连细胞。连线点的确定分为以下几种情况：

a. 左右分离

两环路细胞的左右位置关系完全独立，于横轴上不存在坐标范围重叠，且于纵轴上存在坐标范围重叠，这样的位置关系称为左右分离。

针对左右分离的情况，考虑将“通道蛋白”布置于环路细胞“细胞膜”的左右边界线上。

当两环路细胞存在绝对的上下关系，即两环路细胞上下边界线的位置关系一致时，“通道蛋白”布置于“空隙”较大的一端。如图 3.30 所示，当相连细胞的上、下边线同时低于本体细胞的上、下边线时，称为上位布置，“通道蛋白”布置于边界线的上部，靠近角点；当相连细胞的上、下边线同时高于本体细胞的上、下边线时，称为下位布置，“通道蛋白”布置于边界线的下部，靠近角点。

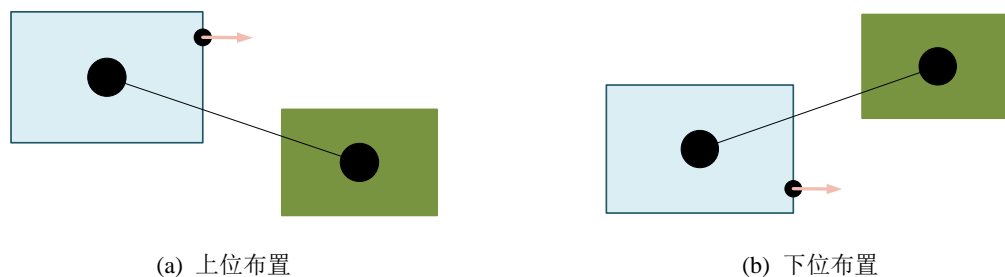


图 3.30 左右分离、绝对上下关系“通道蛋白”布置示意图

当两环路细胞不存在绝对的上下关系，即两环路细胞上下边界线的位置关系不一致时，“通道蛋白”的布置取决于两环路细胞的左右关系。当本体细胞位于相连细胞左侧时，“通道蛋白”布置于边界线的上部，靠近角点；当本体细胞位于相连细胞的右侧时，“通道蛋白”布置于边界线的下部，靠近角点。如图 3.31 所示，当相连细胞的上、下边线与本体细胞的上、下边线的上下位置关系不一致时，本体细胞若位于相连细胞左侧，称为左上位布置，否则称为右下位布置。



图 3.31 左右分离、不绝对上下关系“通道蛋白”布置示意图

b. 上下分离

两环路细胞的上下位置关系完全独立，于纵轴上不存在坐标范围重叠，且于横轴上存在坐标范围重叠，这样的位置关系称为上下分离。

针对上下分离的情况，考虑将“通道蛋白”布置于环路细胞“细胞膜”的上下边界线上。



图 3.32 上下分离、绝对左右关系“通道蛋白”布置示意图

当两环路细胞存在绝对的左右关系，即两环路细胞左右边界线的位置关系一致时，“通道蛋白”布置于“空隙”较大的一端。如图 3.32 所示，这一规则与左右分离、绝对上下关系类似。



图 3.33 上下分离、不绝对左右关系“通道蛋白”布置示意图

与左右分离类似，当两环路细胞不存在绝对的左右关系，即两环路细胞左右边界线的位置关

系不一致时，“通道蛋白”的布置取决于两环路细胞的左右关系。当本体细胞位于相连细胞上侧时，“通道蛋白”布置于边界线的左部，靠近角点；当本体细胞位于相连细胞的下侧时，“通道蛋白”布置于边界线的右部，靠近角点。如图 3.33 所示。

c. 上下左右完全分离

两环路细胞的上下左右的位置关系都完全独立，于纵轴、横轴上都不存在坐标范围重叠，这样的位置关系称为上下左右分离。

针对上下左右分离的情况，考虑将“通道蛋白”优先布置于环路细胞“细胞膜”的上下边界线上，并且尽量靠近相连细胞布置。如所示。

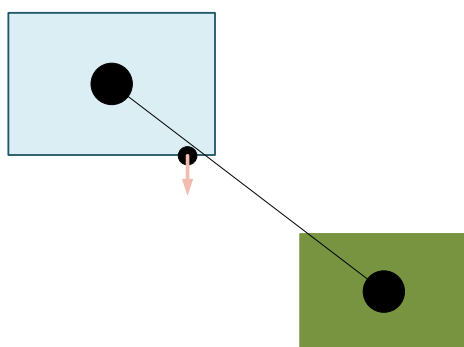


图 3.34 上下左右完全分离“通道蛋白”布置示意图

3.3.3 环路细胞类型和结构

根据 3.2.1 节的定义，环路细胞根据其内部“细胞器”的不同被区分为几种不同的细胞。其中“细胞器”指的是冷机、水泵、末端及已成图块的特殊连线形式（如立管）等部件。

分析部件拓扑结构（图 2.5），可以发现环路细胞可以归类为几种：冷热源水环路细胞，末端水环路细胞和特殊细胞（如分集水器等）。这几种细胞有着各自的部件特点和大小特征。如图 3.35 所示，实线矩形代表冷热源水环路细胞，虚线矩形是末端水环路细胞，点划线矩形则为特殊细胞。

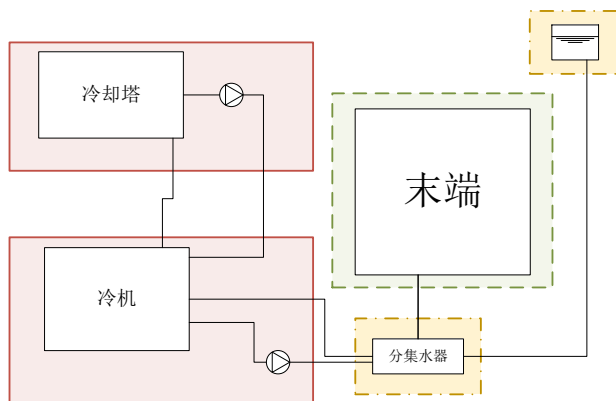


图 3.35 环路细胞分类示意图

下面对几种环路细胞分别进行介绍，值得注意的是当观察维度从“细胞”（环路）到“细胞器”（部件）再到“细胞器”（部件）内部，事实上是环路拓扑到部件拓扑再到成图拓扑的过程。

A. 冷热源水环路细胞

冷热源水环路细胞是指，内含冷机/热机等制冷制热设备，水泵的环路细胞。典型的冷热源水环路细胞有冷机水环路拓扑、冷却塔水环路拓扑等。

a. 细胞器（部件）

冷热源水环路细胞的“细胞器”主要有两大类，一类是冷机/热机等制冷制热设备，一类是水泵。不同系统的水泵表示方式可能基本一致，但不同的制冷制热设备的画法大多不同，但也有相似性，比如冷机的进出口连接的阀件大多类似。

对于制冷制热设备先并联后与水泵串联的水环路形式，有如下定义。

制冷制热设备“细胞器”的定义细化为所有同类制冷制热设备并联后构成的整体部件，它既包括多台机器本身，也包括机器进出口的连接阀件，和机器间的特殊连线方式。以风冷热泵为例，热泵本身以外，热泵进出口均需柔性连接，进口需配备过滤器，进出口都应安装可调节阀门，温度计和压力表。此外，热泵大多为并联，热泵可能为两管制或四管制供回水，设备的并联连线关系也需要表示出来。图 3.36 是三台四管制供回水风冷热泵的示意图，由于并联连线关系已表示，图块的进出口已经确定。显然，当台数，管制式等属性确定后，风冷热泵“细胞器”的图块大小也可以被确定。

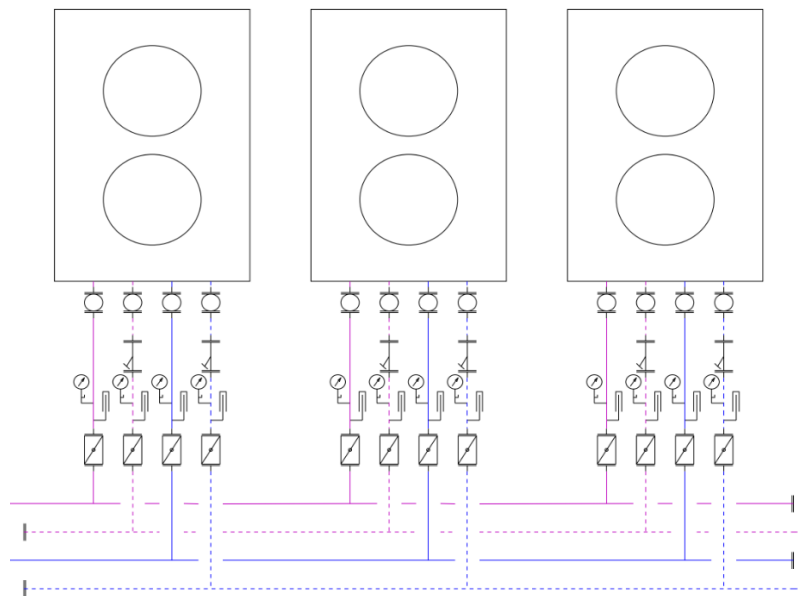


图 3.36 风冷热泵“细胞器”示意图

水泵“细胞器”的定义细化为所有水泵并联后构成的整体部件。水泵的连接方式多为习惯性连接，水泵进出口均需柔性连接，需接温度计、压力表，及可调节阀门，进口需接 Y 型过滤器，出口需接单向止回阀。图 3.37 是三台水泵的示意图，三台水泵间的并联关系已被表示出，图块的

进出口已经确定。显然，当并联水泵个数确定后，水泵“细胞器”的图块大小也可以被确定。

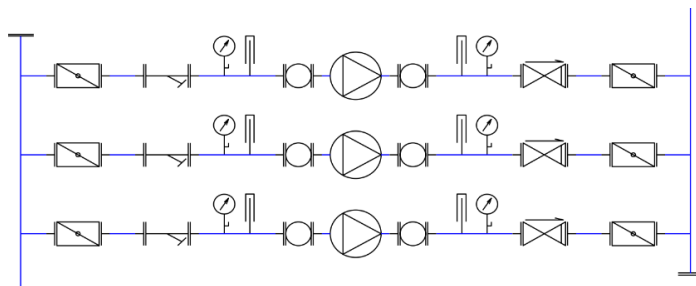


图 3.37 水泵“细胞器”示意图

对于制冷制热设备与水泵串联后再并联的水环路形式仍有待进一步细化。

b. 细胞器位置及细胞大小

一个冷热源水环路细胞中“细胞器”连接关系较为简单固定，存在的“细胞器”个数也非常有限，为使成图整洁，这些“细胞器”的布局完全可以对称或成行列摆放。可以定义环路细胞中的布局形式为“X”型布置，或“Y”型布置。“X”型布置意为各细胞器成行摆放，“Y”型布置意为各细胞器成列摆放。环路细胞的布置类型可以由用户自定，或在布图初始化时根据全图各环路细胞的大小合理配置。图 3.38 展示了风冷热泵冷源环路细胞的“Y”型布局示例。

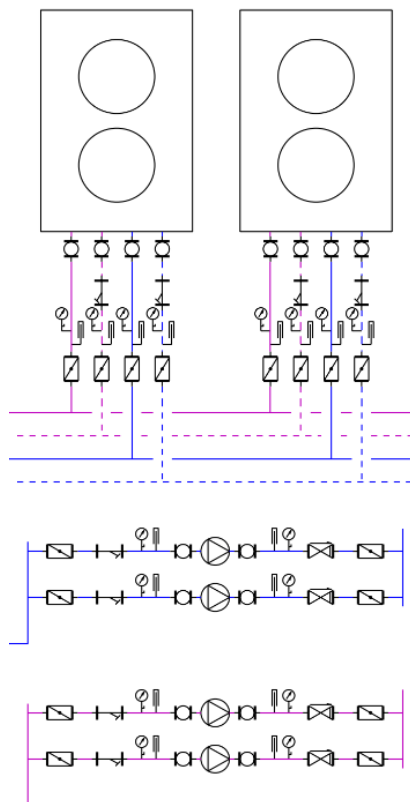


图 3.38 风冷热泵冷源环路细胞 Y 型布局示例

装
订
线

冷热源水环路可能存在两管制、三管制、四管制等不同的制式，两管制的系统只有一个水泵“细胞器”，而三管制、四管制系统有两个水泵“细胞器”。当环路的制式确定后，细胞器的个数可以被确定。当制冷制热设备个数，水泵个数等相关参数被确定后，各细胞器图块的大小也可以被确定。若环路细胞的布局形式也已经确定，只要预留一定的连线空间，就可以确定细胞的大小。连线空间的预留，可以由部件大小乘以大于 1 的安全系数确定，安全系数中大于 1 的部分乘以部件大小，就是为该部件预留的连线空间。细胞的大小可由下式求解。

$$X = \begin{cases} \sum k_{safe} X_i, & \text{if } arrangetype = x \\ \max(k_{safe} X_i), & \text{if } arrangetype = y \end{cases} \quad (3.30)$$

$$Y = \begin{cases} \max(k_{safe} Y_i), & \text{if } arrangetype = x \\ \sum k_{safe} Y_i, & \text{if } arrangetype = y \end{cases} \quad (3.31)$$

式中： k_{safe} ——安全系数；
 X_i, Y_i ——部件形状。

B. 末端水环路细胞

末端水环路细胞的“细胞器”主要有两大类：一类是供回水立管，一类是各楼层末端。

供回水立管“细胞器”由可以绘制在一起的所有末端环路供回水立管构成。一个空调系统的同一片区在不同楼层可能分立管供应，供应同一片区的所有立管构成一个供回水立管细胞器。当供回水立管根数及最高最低供水楼层确定后，供回水立管“细胞器”的大小可以被确定。

各楼层末端“细胞器”则由一个供回水立管“细胞器”供给的所有末端及它们间的并联连接关系构成，其中同一楼层的末端绘制在同一水平线上。末端可有多种形式，可设置横放或竖放，可调整间距。当末端楼层，对应末端个数及末端的上述属性确定后，各楼层末端“细胞器”的大小可以被确定。

图 3.39 是某建筑一至四层的供回水立管、末端水环路“细胞器”示意图。

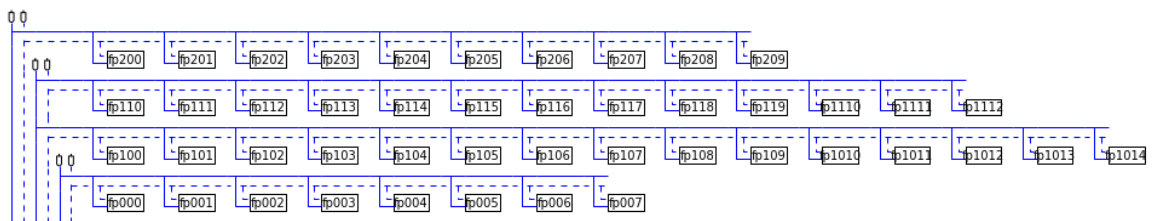


图 3.39 供回水立管、末端水环路细胞器示意图

一个末端水环路细胞中“细胞器”连接关系较为简单固定，且由于二者具有高度对应的空间关心，直接水平排布即可。由于进出口数较多，末端水环路细胞需要在下部留出一定的连线空间让供回水立管连接环路细胞进出口。连线空间可根据供回水立管数确定。当连线空间、供回水立管、各楼层末端的大小均确定后，可以确定末端水环路细胞的大小。

C. 特殊环路细胞

特殊环路细胞是指由一个部件单独称为一个环路细胞的细胞。

装
订
线

分集水器是特殊环路细胞的一种，它的结构比较简单，只有一个“细胞器”，即分集水器。分集水器由分水器，集水器，温度计，压力表，进出水管和分集水器中间的平衡管构成，其中进出水管的数目与末端水环路直接相关。分集水器的进出管亦有一些固定连接，如可调节阀，压力表等。当末端水环路个数被确定时，分集水器的部件大小可以被确定，则分集水器环路细胞的大小就可以被确定。图 3.40 是分集水器的示意图。

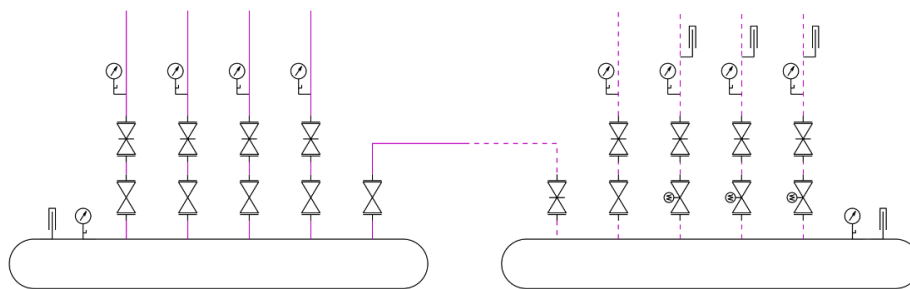


图 3.40 分集水器示意图

装
订
线

4 水系统图自动生成工具开发

4.1 工具开发平台简介

4.1.1 Python 语言

水系统图自动生成需要依靠编程实现。早期的编程语言主要是指机器语言、汇编语言，后来也包括了高级语言。高级语言的出现极大地降低了编程的门槛，使得非专业人员也可以通过编程实现自己想要实现的功能^[47]。Python 语言是高级语言的一种，它是一种解释性、面向对象的开源语言，语法简单，具有易学、易读、易于维护等特点^[50]。

Python 语言有许多的优点，比如不存在编译过程，可以缩短编辑到调试的周期；Python 使用模糊的数据类型概念，变量不需预定义就可以使用，这也使得代码的编写更加友好，编程十分简洁，更适合新手上手，可读性亦比较强；作为一种开源语言，其相关库的开发变得更加便捷，编程者可以自由选用他人编写的库以实现自己想要的功能，大大减少了编程的难度和复杂性。

本文选用 Python 语言作为水系统图自动生成工具开发的编程语言，其代码简单易维护，同时可以选用 Python 语言丰富的标准库以实现想要的功能，缩短了程序的开发周期。

4.1.2 Matplotlib 库

Matplotlib 库是 Python 的一个标准库，是 Python 语言中应用最为广泛的可视化库，具有强大的二维图线绘制功能。Matplotlib 试图让简单的事情变得更加简单，困难的事情变得可能。用户只需几行代码即可生成线状图，直方图，功率谱，条形图，错误图，散点图等。其中 pyplot 模块被广泛用于绘制简单图形，其语言命令与 MATLAB 接近，命令简单，功能强大。

本文使用 Matplotlib 实现水系统图的可视化生成，主要用到 Patches 模块和 Path 模块。Path 模块可以帮助我们生成一个类似多段线的路径，当其转化为 Patches 模块的对象后，会变成一个图块。这两个模块可以帮助我们绘制由直线，曲线等组成的二维图形。此外，collection 模块可以收集待绘制的二维图形，并更改其颜色、线形、线粗细等属性，这一功能在绘制水系统图时也是相当重要的，因为人们往往使用不同的颜色来区分不同的水管路（冷热水等），使用不同的线型来区分供回水管路。

4.2 开发准备

4.2.1 水系统图自动生成流程

根据 2.3 节提出的水系统图成图拓扑思路和第 3 章介绍了水系统自动生成的基础算法，本文对水系统图的自动生成流程进行进一步细化。

因为水系统图的连线在部件没有确定时没有办法确定连线点，连线只能在最后完成，故无法将水系统图的成图完全按照成图拓扑思路一步接一步进行。但成图拓扑之间依然存在着类似套环的紧密联系。在实际成图中，首先完成环路拓扑的布局，确定各个环路的布置位置；随后对不同的环路细胞，分别进行部件拓扑布局，确定部件的具体位置；在每个部件中绘制图线，完成成图拓扑的细化，随后可以获得部件拓扑间的连线点；紧接着完成部件拓扑的连线，最后是环路拓扑

的连线。各成图拓扑之间是互相包含的关系，先从抽象到具象布局，获得连线点，再从具象回到抽象连线。以上所述水系统图自动成图的流程可以表示为图 4.1。

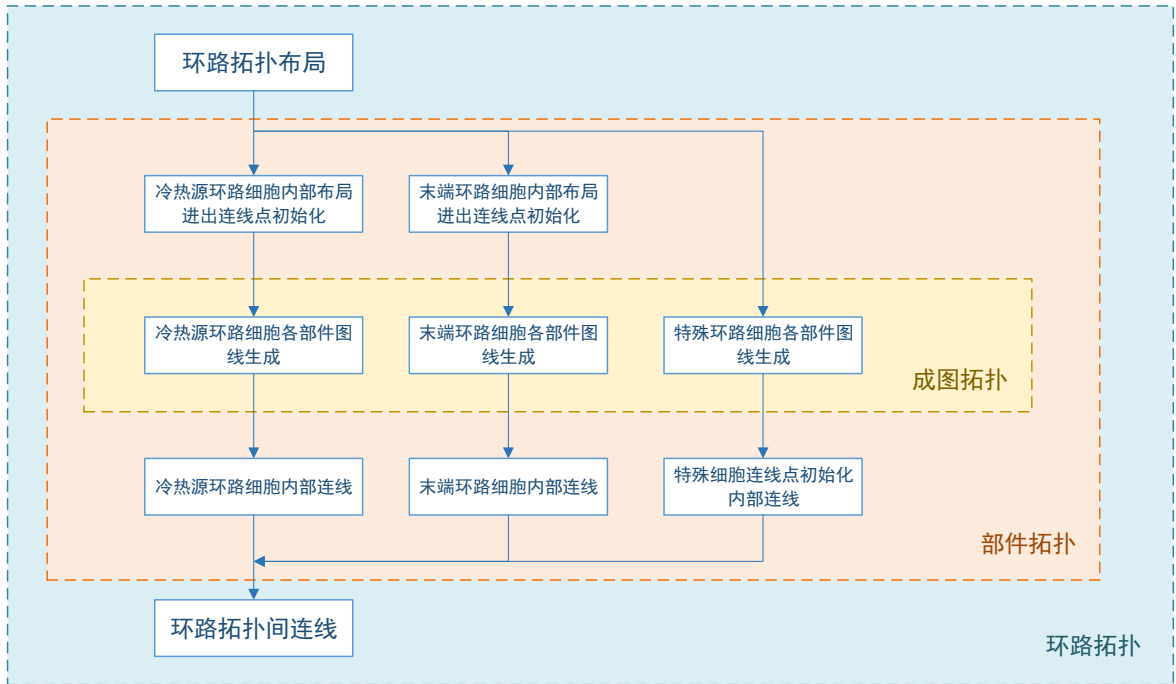


图 4.1 水系统图自动生成流程示意图

以上水系统图的流程生成了水系统图的一系列图线，可以称为水系统图图线生成过程。该生成过程有两大核心流程，布局及连线。其中布局计算（主要针对环路拓扑的布局计算）的流程如图 4.2 所示，连线计算的流程如图 4.3 所示。

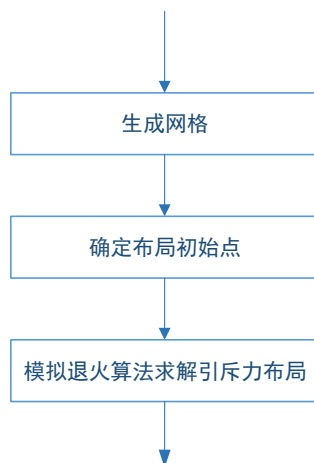


图 4.2 布局计算流程示意图

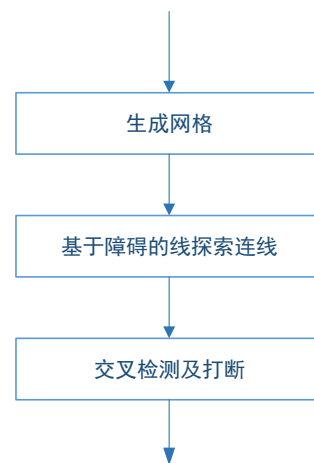


图 4.3 连线计算流程示意图

4.2.2 软件的输入和输出

要想完成水系统图的自动生成，待绘制水系统图的相关信息自然必不可少。由于本工具是图 1.1 自动设计流程中的一环，其输入流可来自于上一步的结果。

如图 1.1 所示，在使用 HVAC Design Bot 完成系统选型后，将获得空调系统描述的 IFC 文件，本工具将使用 IFC 文件作为输入文件，识别并读取其中的空调系统相关信息。

IFC 标准是一种能处理与建筑有关的各种信息的分层框架，其分层自下而上依次为标准资源层（Resource Layer）、标准核心层（Core Layer）、标准共享层（Interoperability Layer）以及专业领域层（Domain Layer）^[16]。其中与暖通空调设备及管道有关的信息位于 IFC 标准信息的最高层——专业领域层，被称为 HVAC Domain 相关。

IFC 物理文件由 header 和数据段组成，数据部分用于描述建筑模型的实体实例，每一个实体描述独立成一句语句，所有语句具有相同的数据格式，每条语句都有一个独一无二的编号^[51]。图 4.4 是一个语句示例，其中“\$”表示该属性没有被赋值。

#78=IFCPROPERTYSINGLEVALUE(NO,\$,IFCTEXT(YKC3CPQ55EJG),\$)

编号	实体实例	属性
----	------	----

图 4.4 IFC 数据语句示例

在描述空调系统的 IFC 物理文件中，IfcRelassignsToGroup 描述了空调系统所包含的环路信息。末端设备由 IfcFlowTerminal 表示，核心设备（即冷热源、泵等）用 IfcBuildingElementProxy 表示，流量分配元件用 IfcFlowSegment 表示，其他附件用 IfcFlowFitting 表示。IFC 物理文件同时存储了上述设备选型后的相关参数，参数用 IfcPropertySingleValue 表述，参数需要在 IfcRelDefinesByProperties 中与具体设备建立连接，才能表述该设备。

除此之外，IFC 文件使用 PORTs 来描述管路间的连接关系，使用 IfcDistributionPort 定义 PORT，IfcRelConnectsPortToElement 将设备与 PORT 相连，IfcRelConnectsPorts 将 PORT 与 PORT 相连。

读取 IFC 文件，提取系统后，需要对环路拓扑矩形及他们之间的连接关系，还有各环路细胞进行初始化，随后可以进行自动成图（本软件的默认图纸大小为 A1）。

成图结束后，需要将文件输出以备打印出图所需，考虑输出为 dpi 为 600 的 png 格式文件（也可为 pdf 文件），图形大小与图纸大小一致，可以直接打印出图。

4.2.3 软件计算流程

综合 4.2.1 节和 4.2.2 节，可以归纳软件计算流程如图 4.5 所示，其中连线上的内容表示过程传递的信息。

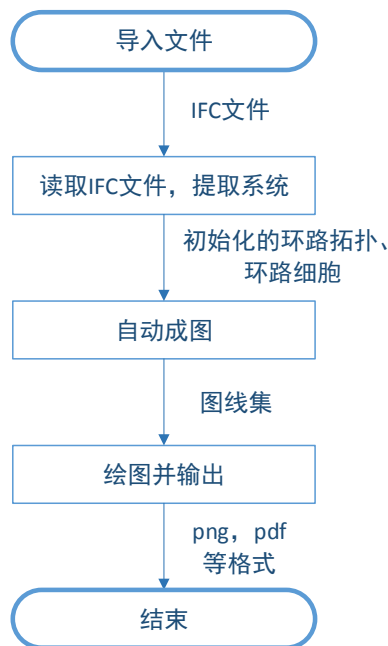


图 4.5 软件计算流程

4.3 软件程序架构

4.3.1 面向对象程序设计

面向对象程序设计是一种具有突出优势的编程方法，它注重对象的抽象、封装、继承和多态。将具有相同特征的事物提取其特征描述为类，则每一个事物都为该类的一个实例。不同的类可以通过继承的方法来拥有上一级类的属性、方法。在一个架构较为完整的面向对象程序设计程序中，每一个对象都有其相对应的类，同一类的对象具有相同的特征、属性和方法。不同的对象之间只能传送数据，对象内部的数据可能不是互相可见的。

分析本文所面对的水系统图自动生成这一问题，在计算过程中有许多相似属性的事物，本文考虑对其建立相应的类。

针对成图问题全局而言，可以抽象出 Part, Equipment, Point, Connection 四大类，分别对应环路细胞，设备部件，连接点，连接。在 Point 的基础上定义 mid_Point 子类，表示不属于任何部件的点（即属于“通道蛋白”的点），在 Connection 的基础上定义 Bridge 子类，表示通道蛋白。以上六大类的继承和关联关系如图 4.6 所示。其中粗线箭头表示继承关系，连线表示关联关系。这六大类的定义和关联使得各对象间可以互相访问，数据的存储更加清晰和高效。

针对冷热源环路细胞、末端环路细胞、特殊细胞中的各个部件，各自分别定义类，继承于 Equipment 父类，各子类除了可以具有 Equipment 父类的属性之外，还可以计算自身图块大小等。

针对冷热源环路细胞、末端环路细胞、特殊细胞等环路拓扑对象，各自分别定义类，继承于 Part 父类，并与对应的部件类实例对象相关联。各子类具有 Part 父类的属性，可以根据其关联的部件类实例对象计算细胞大小。

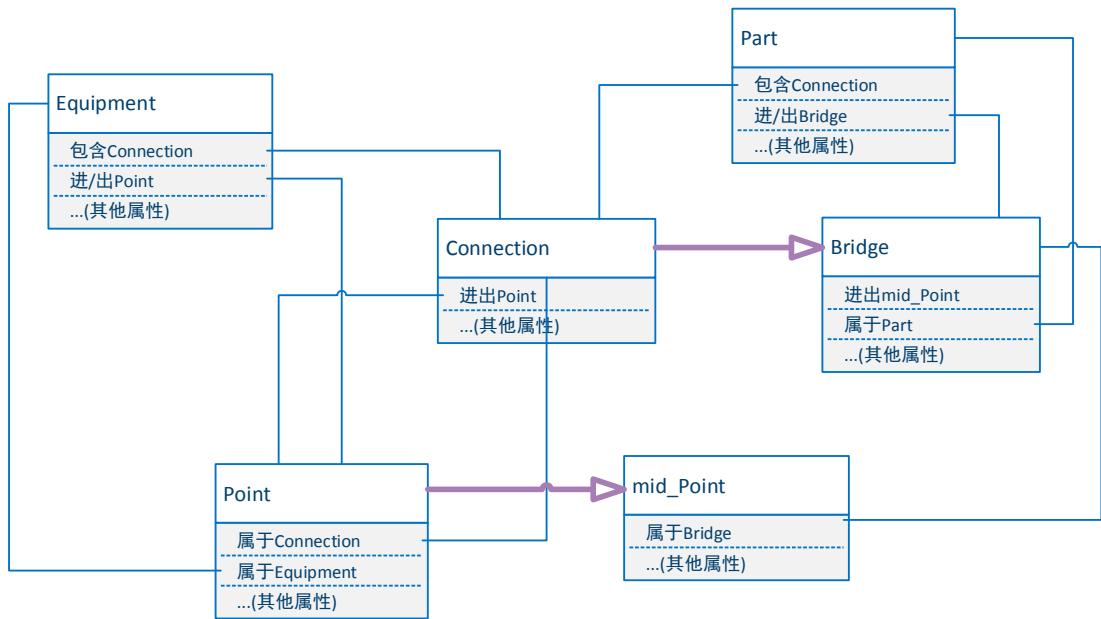


图 4.6 基础六类继承及关联关系示意图

4.3.2 软件程序架构

程序参照 Python 小型库的方式进行文件架构，各算法，各环路，各设备，各图块独立成代码文件，文件间相互引用，但彼此独立。这些代码文件与定义类的文件一起构成了程序架构，图 4.7 展示了程序中各代码文件的相互引用关系，附录 A 则是完整的程序架构示意图，示意图中后缀为.py 为代码，以 Class 为开头的为定义的类，其他的是各类有独立功能的函数。

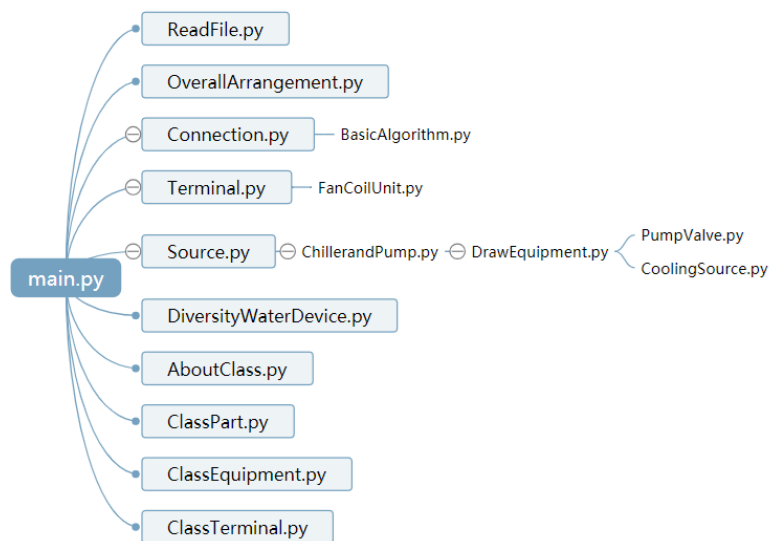


图 4.7 程序各文件的相互引用关系

装订线

4.3.3 图形界面设计

为了使水系统图自动生成工具的可操作性更强，本文为水系统图自动生成工具设置了简单的图形界面，图 4.8 为该工具的图形界面。



图 4.8 图形界面

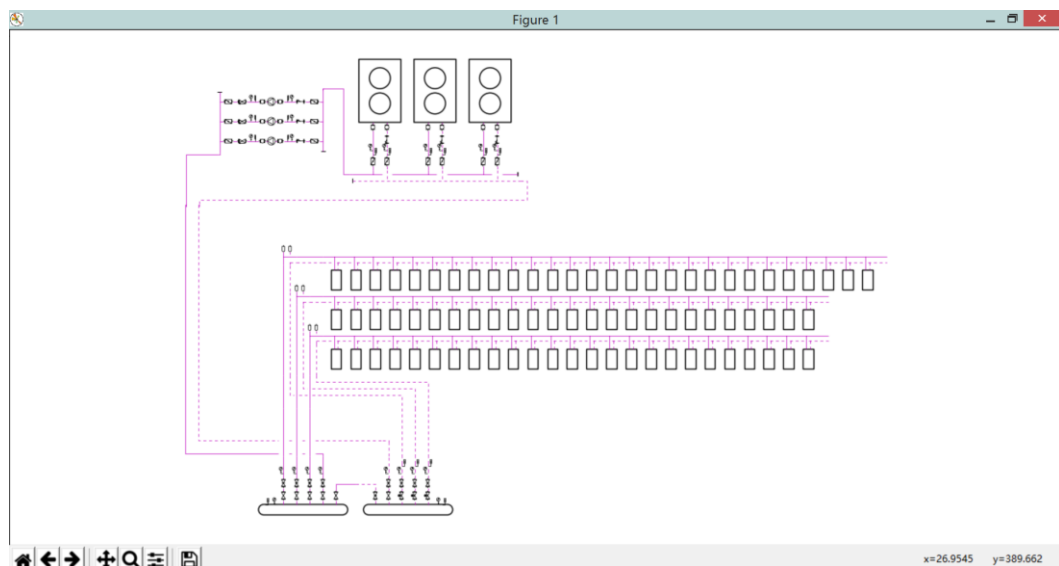


图 4.9 系统图绘制结果

图形界面主要实现几个功能。

一是导入文件，IFC 文件可以通过单击导入文件后在弹出对话框里选择导入，也可以放到软件所在文件夹下的 output 文件夹中。当没有文件通过导入文件按键导入时，软件将会自动读取

output 文件夹中的 IFC 文件进行绘图；

二是绘制系统图，目前的系统图绘制工具没有做很多的给用户选择的选项，用户当前只需通过单击绘制系统图，稍等片刻就可以一键生成 IFC 文件对应的系统图，并在软件所在文件夹下得到一个系统图的 png 文件。生成系统图的界面如图 4.9 所示，值得一提的是界面下方的工具条可供用户拖动、放大查看图形（如图 4.10），自由保存图形等。

三是退出，绘图完成后，单击退出按钮可以退出软件。

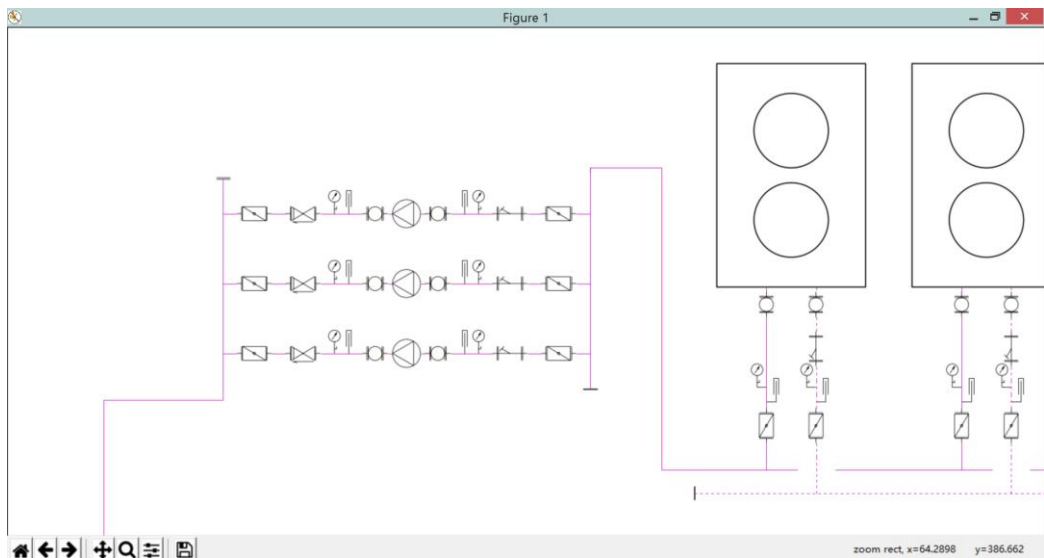


图 4.10 放大查看图形

4.4 软件评价及展望

目前水系统图自动生成工具框架搭建基本完成，能基本实现风冷热泵与末端同图绘制的系统图的一键自动生成，图形清晰，连线准确。图块布局合理，图线交叉少，基本符合成图要求。

但仔细分析，可以发现目前该工具仍然存在以下问题有待改进：

① 文字标注问题尚未很好的解决。由于图形较大，而文字本身分辨率高，在图形上标注文字时会出现像素溢出现象，需要自建完整字库或寻找其他解决方式；

② 图库仍有待扩充，目前只建立了风冷热泵模块，还不能完成其他水系统形式的绘图，但由于框架基本搭建完成，多种水系统形式绘图指日可待；

③ 一些图块的绘制仍不够准确，如分集水器的平衡管，冷冻水环路的除污设备等；

④ 目前并联靠的是默认图快，并联的连线算法并没有建立，后期若想绘制更为复杂的图形，需要从这一步入手进一步改进。

⑤ 目前一键生成的模式用户自由度不够，可以考虑加入用户选项，提高用户参与度和工具可操作性。

5 自动设计实例——3 层办公楼自动设计

本章选取一栋 3 层办公建筑，从该建筑的 BIM 模型入手，按照图 1.1 的自动设计流程，借助已有工具及前文所设计工具，以自动设计为主，人工调整作为补充的方式完成该建筑的空调系统设计。其中图 1.1 中的 BIM 建筑模型到负荷计算这部分工作为课题组另一合作人员的主要工作，本文仅参与其中部分环节。此部分工作并非本文主要工作，故将仅做简单介绍。

本章设计对象是 Autodesk Revit 一栋 3 层示例建筑，设其位于上海，该建筑主要用于办公，建筑总面积为 4750.17m²，无地下室及地下车库，层高 3.8 米，建筑总高度 12 米。建筑外观如图 5.1 所示。



图 5.1 三层办公建筑外观

5.1 从 BIM 到负荷计算

5.1.1 办公建筑模型信息向 IDF 文件的转换

为了将建筑用于负荷计算，需要将 BIM 模型转化为合适的格式导入已有的能耗模拟软件。本设计选用的能耗模拟软件是 EnergyPlus，其格式文件是 IDF 文件。借助 BIM 模型轻量化后导出的中间格式文件 gbXML 文件，可利用已有工具 gbEplus 将 gbXML 文件转化为 IDF 文件。

A. BIM 轻量化

暖通工程师拿到建筑 BIM 模型常常来自建筑设计师和结构设计师，这样的模型中往往存在着大量梁、柱、家具、绿化等构件，这些构件的存在于能耗模拟毫无影响，反而使得模型中信息存在大量冗余。除此之外，这些构件的存在可能会导致导出 gbXML 格式文件时出现不必要的面切割现象。如图 5.2 所示，当未经轻量化的 BIM 模型直接导出为 gbXML 格式时，本应是一个完整面的面由于柱、家具等边界线的切割变得支离破碎，而这种切割对于能耗模拟来说显然是不必要的。

轻量化 BIM 模型是指将不必要的构件删去，使得模型以最简洁的方式完整地表达能耗模拟

所需的所有建筑信息。



图 5.2 因柱、家具而被切割的平面

基于以上分析，由于目前尚缺乏合适有效的 BIM 轻量化软件或插件，课题组成员使用人工重建 BIM 模型的方式对该三层办公建筑的 BIM 模型进行了 BIM 轻量化。

B. 导出 gbXML 文件

Autodesk Revit 软件可以将 BIM 模型导出成 gbXML 文件，导出方法有两大类共四种方法，包括使用能量设置导出（使用概念体量和建筑图元、使用概念体量、使用建筑图元），使用房间/空间体积导出。四种方法有相似之处但又各不相同。课题组成员分别使用四种方法将该 BIM 模型导出为 gbXML 文件，并分析四种方法导出模型的信息完整性。

分析结果表明，使用能量设置的三种方法导出文件信息完整性较高，而适用房间/空间体积导出的 gbXML 文件缺失与能量相关的信息（如 Material、Zone、WindowType、Schedule 等）；但是使用能量设置的三种方法导出存在大量的几何面缺失，而使用房间/空间体积导出的 gbXML 文件几何信息较为完整。由于几何信息难以通过后期键入，只能从 BIM 模型中获取，而其他的诸如 Material（材料）、Schedule（时刻表）此类热工信息可以考虑后期添加。综合四种方法，使用房间/空间体积导出的 gbXML 文件更加符合要求。

基于以上分析，课题组成员使用房间/空间体积导出法导出了 BIM 建筑模型的 gbXML 文件。

C. 转换成 IDF 文件

国内外有许多学者开发了一些将 gbXML 文件转化为 IDF 文件的工具。本课题采用的 gbXML 文件向 IDF 文件转换的工具是 gbEplus。gbEplus 是一个开源但仍在开发的工具，经过测试，它可以将 gbXML 文件中的几何信息较为准确地转化为 IDF 信息，但是无法转化热工信息。同时，gbEplus 会默认添加一系列的模拟设置信息和热工信息，这些信息往往并不符合用户的需求，需要进行手动补充及修改。

5.1.2 负荷计算

EnergyPlus 是美国劳伦斯伯克利国家实验室研发的能耗模拟软件，它采用热平衡法计算建筑负荷，是目前主流的能耗模拟软件之一。在上一步获得 IDF 文件后，本课题将其进一步导入 EnergyPlus 软件中进行仿真模拟，计算建筑的全年负荷。

A. 参数设置

基于 5.1.1 节的结果，gbEplus 转化得到的 IDF 文件存在着不符合要求的热工信息及模拟设置信息，课题组成员使用 EnergyPlus 的 IDF Editor 对模型进行了手动修改。

本建筑的空气调节区域是办公室、走廊，其他房间（楼梯间、设备房、竖井等）作为非空调区域。课题组成员根据《实用供热空调设计手册》^[41]，DGJ 08-107-2015《公共建筑节能设计标准》^[52] 及 GB50736-2012《民用建筑供暖、通风与空气调节设计规范》^[53]的规定设置了空调室内设定温湿度、围护结构参数、人员密度、照明密度、设备功率密度、作息时刻表等参数。其中，室内设定温湿度如

表 5.1 所示。

表 5.1 空调房间室内设计参数

房间类型	夏季温度/°C	夏季相对湿度/%	冬季温度/°C	冬季相对湿度/%	每人新风量/m ³ ·h ⁻¹
办公室	24	50~60	18	50~60	30
走廊	26	50~60	18	50~60	30

B. EnergyPlus 模拟

为了计算负荷，设定理想空调系统（IdealLoadsAirSystem），该系统忽略损失，认为空调送风能够 100% 带走室内的热湿负荷。使用模拟计算迭代设置为每小时计算 4 次，即每 15 分钟迭代计算一次。使用 EnergyPlus 官网上提供的上海市天气 epw 文件作为天气文件，进行模拟。

C. 负荷计算结果

本案例办公建筑的总面积为4752.17m²，其中空调区域的面积为4457.34 m²。计算结果显示，全建筑的峰值冷负荷为526.07kW，则单位空调面积冷负荷为118.02W/m²，全建筑的峰值热负荷为365.61kW，单位空调面积热负荷82.02W/m²。其中峰值负荷时刻新风冷负荷为262.11kW，新风热负荷为136.15kW。冬季峰值负荷为夏季峰值负荷的69.8%，夏季新风负荷占峰值负荷的49.8%，冬季新风负荷占峰值负荷的37.2%，模拟结果与工程经验值较为相符。

模拟同时计算出了建筑的全年负荷，如图 5.3 所示。

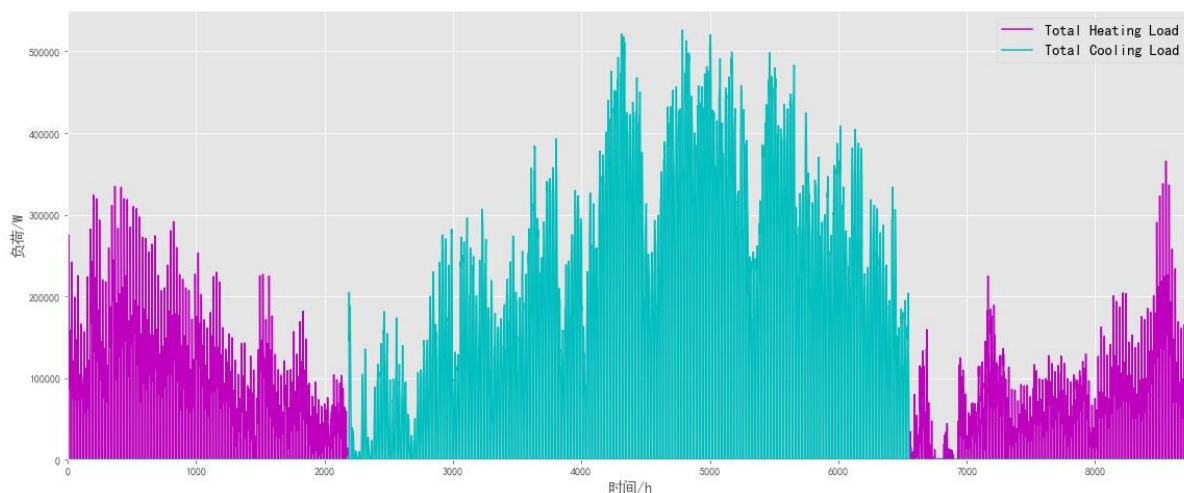


图 5.3 建筑全年逐时负荷曲线

5.2 空调系统设计及设备选型

5.2.1 空调系统设计

A. 冷热源

本案例办公建筑峰值冷负荷为526.07kW，峰值热负荷为365.61kW，不属于大型系统。同时，该建筑体量较小且图纸中未预留机房的位置。而建筑地处未设集中供暖的上海，但有制冷制热需求。综合考虑，选用风冷热泵作为冷热源。

B. 建筑分区及末端形式

建筑内部存在多个房间，且建筑东西南北向跨度均较大，同楼层各房间负荷特性有较大差别，应考虑各房间独立分区且设置分散式末端。故选用风冷热泵+新风机组作为末端形式，每个空调房间独立成为一个风机盘管分区，每层楼独立为一个新风分区。

5.2.2 HVAC Design Bot 设备选型及管路设计

A. HVAC Design Bot 简述

HVAC Design Bot 为课题组正在开发中的暖通空调系统自动设计选型工具，主要用于空调系统的设备选型和管道设计。它内置含有一定数量设备样本的样本库，使用时要求用户输入包含建筑几何信息和热工信息的 IDF 文件、建筑全年负荷数据以及人工分区结果，用户也可根据需求将手中设备样本改成样本库对应格式进行选型。目前已能实现以下功能：

① 根据分区计算各分区负荷。

② 根据用户选择的冷热源形式和末端形式进行各种设备的选型，目前工具支持的冷热源形式有：冷水机组+锅炉、风冷热泵，支持的末端形式有：风机盘管+独立新风机、全空气定风量系统、VAV 系统；

③ 根据建筑内部的结构确定大致的管道走向，进行水力计算，设计每段管道管径，同时生成以及管道与设备之间连接关系的信息。

B. 选型结果

将 5.1 节获得的 IDF 文件及负荷数据导入 HVAC Design Bot，并根据 5.2.1 确定的空调系统冷热源形式及末端形式在 HVAC Design Bot 中进行相应选择。可获得选型结果如下：

a. 空调冷热源设备选型

HVAC Design Bot 根据建筑全年逐时负荷对风冷热泵的台数进行了非对称优化选择，优化目标以能耗最优为主（可供选项包含能耗，机房面积，初投资等）。选型结果如表 5.2 所示，共选择两台开利风冷螺杆式热泵机组，一台制冷量为165kW，一台制冷量为378kW，估算能耗为175.7 kW。

b. 冷冻水环路其他设备选型

根据冷机数量（两台）配备对应数量的冷冻水泵，共选择卧式冷冻水泵三台（两用一备），水泵流量56.4m³/h，具体参数如表 5.3 所示。同时也进行了分集水器的选型，根据选型结果，分集水器断面直径为 159mm。

表 5.2 风冷热泵选型结果

型号	类型	品牌	名义制冷量 /kW	名义制热量 /kW	制冷电功率 /kW	制热电功率 /kW	冷冻水流量 /m ³ ·h ⁻¹	热水流量 /m ³ ·h ⁻¹	长 /mm	宽 /mm	高 /mm
30RQ162G	螺杆	Carrier	165	176	47.5	50	28.1	30.6	2410	2253	2297
30RQ412G	螺杆	Carrier	378	432	128.2	128	64.8	75.2	4798	2253	2297

表 5.3 冷冻水泵选型结果

型号	类型	名义流量/m ³ ·h ⁻¹	最大扬程/kPa	功率/kW	管径/mm	长/mm	宽/mm	高/mm
KQW80/185-11/2	卧式	56.4	392	11	80	785	330	527
KQW80/185-11/2	卧式	56.4	392	11	80	785	330	527
KQW80/185-11/2	卧式	56.4	392	11	80	785	330	527

表 5.4 新风机选型结果

分区名称	型号	形式	风量 /m ³ ·h ⁻¹	冷量 /kW	热量 /kW	水流量 /m ³ ·h ⁻¹	长 /mm	宽 /mm	高 /mm	机外静压 /Pa	水阻力 /mH ₂ O	电机功率 /kW	重量 /kg
OAD1	DBFP150	吊装式	15000	198.2	206.8	27.11	2260	1795	712	330	14.66	4.62	290
OAD2	DBFP150	吊装式	15000	198.2	206.8	27.11	2260	1795	712	330	14.66	4.62	290
OAD3	DBFP150	吊装式	15000	198.2	206.8	27.11	2260	1795	712	330	14.66	4.62	290

表 5.5 风机盘管选型结果

房间名称	型号	品牌	风量/m ³ ·h ⁻¹	供冷量/W	供热量/W	噪声≤dB(A)	电功率/W	水阻力/kPa	水流量/m ³ ·h ⁻¹	数量
1F:10office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	1
1F:11office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	5
1F:12office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	2
1F:13office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	2
1F:14office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	5
1F:17office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	2
1F:1office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	5
1F:23office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	3
1F:24office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	2
1F:25office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	4
1F:26office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	2
1F:27office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	2
1F:28office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	1
1F:2office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	1
1F:30corridor2	FP-85	NaSen	638	3600	5400	43	76	30	0.77	2
1F:31corridor3	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	5
1F:33corridor1	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	12
1F:5office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	2
1F:7office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	1
1F:8office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	1

续表 5.5

房间名称	型号	品牌	风量/m ³ ·h ⁻¹	供冷量/W	供热量/W	噪声≤dB(A)	电功率/W	水阻力/kPa	水流量/m ³ ·h ⁻¹	数量
1F:9office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	1
2F:34office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	1
2F:37office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	1
2F:38office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	2
2F:39office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	1
2F:40office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	2
2F:44office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	1
2F:45corridor2	FP-102	NaSen	765	4320	6480	45	96	35	0.93	4
2F:46office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	5
2F:47corridor1	FP-85	NaSen	638	3600	5400	43	76	30	0.77	10
2F:48office	FP-85	NaSen	638	3600	5400	43	76	30	0.77	2
2F:49office	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	2
2F:51office	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	5
2F:52office	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	4
2F:53office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	2
2F:58office	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	3
2F:59office	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	2
2F:60office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	2
2F:61office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	2
2F:62office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	2

续表 5.5

房间名称	型号	品牌	风量/m ³ ·h ⁻¹	供冷量/W	供热量/W	噪声≤dB(A)	电功率/W	水阻力/kPa	水流量/m ³ ·h ⁻¹	数量
2F:63office	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	2
2F:64office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	2
2F:65office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	2
2F:66corridor3	FP-102	NaSen	765	4320	6480	45	96	35	0.93	5
3F:67office	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	2
3F:70office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	2
3F:71office	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	2
3F:73office	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	5
3F:74corridor2	FP-170	NaSen	1275	7200	10800	48	152	40	1.55	2
3F:75office	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	2
3F:76office	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	2
3F:78office	FP-34	NaSen	255	1440	2160	37	37	20	0.31	1
3F:79office	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	2
3F:80office	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	3
3F:81office	FP-68	NaSen	510	2880	4320	41	62	25	0.62	3
3F:82corridor1	FP-136	NaSen	1020	5760	8640	46	134	40	1.24	12
3F:83office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	2
3F:88office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	3
3F:89office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	3
3F:90office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	2

续表 5.5

房间名称	型号	品牌	风量/m ³ ·h ⁻¹	供冷量/W	供热量/W	噪声≤dB(A)	电功率/W	水阻力/kPa	水流量/m ³ ·h ⁻¹	数量
3F:91office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	3
3F:92office	FP-51	NaSen	383	2160	3240	39	52	20	0.46	3
3F:93corridor3	FP-136	NaSen	1020	5760	8640	46	134	40	1.24	5

表 5.6 盾安样本库风机盘管选型结果

房间名称	型号	品牌	风量/m ³ ·h ⁻¹	供冷量/W	供热量/W	噪声≤dB(A)	电功率/W	水阻力/kPa	水流量/m ³ ·h ⁻¹	数量
1F:10office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	1
1F:11office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	5
1F:12office	FP-34WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	255	2021	3137	35.5	36	26.9	404	2
1F:13office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	2
1F:14office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	5
1F:17office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	2
1F:1office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	5
1F:23office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	3
1F:24office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	2
1F:25office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	4
1F:26office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	2
1F:27office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	2
1F:28office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	1
1F:2office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	1

续表 5.6

房间名称	型号	品牌	风量/m ³ ·h ⁻¹	供冷量/W	供热量/W	噪声≤dB(A)	电功率/W	水阻力/kPa	水流量/m ³ ·h ⁻¹	数量
1F:30corridor2	FP-85WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	638	3509	6090	41	76	28.9	701	2
1F:31corridor3	FP-51WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	383	2816	4595	37.5	47	26.8	550	5
1F:33corridor1	FP-51WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	383	2816	4595	37.5	47	26.8	550	12
1F:5office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	2
1F:7office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	1
1F:8office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	1
1F:9office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	1
2F:34office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	1
2F:37office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	1
2F:38office	FP-34WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	255	2021	3137	35.5	36	26.9	404	2
2F:39office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	1
2F:40office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	2
2F:44office	FP-34WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	255	2021	3137	35.5	36	26.9	404	1
2F:45corridor2	FP-102WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	765	4176	7447	44	94	36.2	825	4
2F:46office	FP-34WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	255	2021	3137	35.5	36	26.9	404	5
2F:47corridor1	FP-68WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	510	3570	5719	39	55	21.8	722	10
2F:48office	FP-85WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	638	3509	6090	41	76	28.9	701	2
2F:49office	FP-51WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	383	2816	4595	37.5	47	26.8	550	2
2F:51office	FP-51WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	383	2816	4595	37.5	47	26.8	550	5
2F:52office	FP-51WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	383	2385	4111	37.5	49	29.2	466	4

续表 5.6

房间名称	型号	品牌	风量/m ³ ·h ⁻¹	供冷量/W	供热量/W	噪声≤dB(A)	电功率/W	水阻力/kPa	水流量/m ³ ·h ⁻¹	数量
2F:53office	FP-34WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	255	2021	3137	35.5	36	26.9	404	2
2F:58office	FP-51WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	383	2816	4595	37.5	47	26.8	550	3
2F:59office	FP-51WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	383	2816	4595	37.5	47	26.8	550	2
2F:60office	FP-34WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	255	2021	3137	35.5	36	26.9	404	2
2F:61office	FP-34WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	255	2021	3137	35.5	36	26.9	404	2
2F:62office	FP-34WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	255	2021	3137	35.5	36	26.9	404	2
2F:63office	FP-51WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	383	2816	4595	37.5	47	26.8	550	2
2F:64office	FP-34WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	255	2021	3137	35.5	36	26.9	404	2
2F:65office	FP-34WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	255	2021	3137	35.5	36	26.9	404	2
2F:66corridor3	FP-102WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	765	4176	7447	44	94	36.2	825	5
3F:67office	FP-51WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	383	2385	4111	37.5	49	29.2	466	2
3F:70office	FP-34WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	255	2021	3137	35.5	36	26.9	404	2
3F:71office	FP-51WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	383	2385	4111	37.5	49	29.2	466	2
3F:73office	FP-51WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	383	2816	4595	37.5	47	26.8	550	5
3F:74corridor2	FP-170WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	1275	8272	14047	46.5	150	39.4	1615	2
3F:75office	FP-51WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	383	2816	4595	37.5	47	26.8	550	2
3F:76office	FP-51WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	383	2816	4595	37.5	47	26.8	550	2
3F:78office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	1
3F:79office	FP-51WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	383	2816	4595	37.5	47	26.8	550	2
3F:80office	FP-51WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	383	2816	4595	37.5	47	26.8	550	3

续表 5.6

房间名称	型号	品牌	风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	供冷量/W	供热量/W	噪声 \leq dB(A)	电功率/W	水阻力/kPa	水流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	数量
3F:81office	FP-68WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	510	3060	4998	40	59	25.3	619	3
3F:82corridor1	FP-102WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	765	5237	8200	44	94	36.4	1034	12
3F:83office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	2
3F:88office	FP-34WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	255	2021	3137	35.5	36	26.9	404	3
3F:89office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	3
3F:90office	FP-34WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	255	2021	3137	35.5	36	26.9	404	2
3F:91office	FP-34WA-2-G12	盾安安逸 i-Ease	255	1692	2793	36.5	36	16.9	338	3
3F:92office	FP-34WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	255	2021	3137	35.5	36	26.9	404	3
3F:93corridor3	FP-102WA-3-G12	盾安安逸 i-Ease	765	5237	8200	44	94	36.4	1034	5

表 5.7 盾安样本库风冷热泵选型结果

型号	类型	品牌	名义制冷量	名义制热量	制冷电功率	制热电功率	冷冻水流量	热水流量	长	宽	高
			/kW	/kW	/kW	/kW	/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$			
FLRMA250C	螺杆	盾安安杰 i-Super	250	267	76.5	72.6	43	43	2950	2150	2620
FLRMA350C	螺杆	盾安安杰 i-Super	354	378	106.8	100.8	61	61	3950	2150	2620

c. 新风分区计算及新风机设备选型

本建筑每层楼自成一个新风分区，由于根据负荷计算结果，新风冷负荷更大，新风机的选型应根据夏季工况来定。故 HVAC Design Bot 对各新风分区进行了新风冷负荷统计和夏季风量计算，结果如表 5.8 所示。

表 5.8 新风分区负荷风量统计

楼层	分区名称	新风冷负荷/kW	新风量 /m ³ ·h ⁻¹
1	OAD1	87.51	12301.44
2	OAD2	86.19	12117.87
3	OAD3	88.41	12338.79

随后进行新风机选型，考虑到本建筑没有设置机房，在选型时选择吊装式新风机组（可供选项有机房立式、机房卧式、吊装式）。选型结果如表 5.4 所示。

d. 风机盘管选型

对每一个房间进行风机盘管的选型，选型结果如表 5.5 所示，表中风量冷量热量均指风机盘管中档风速时的参数。

e. 管路水力计算及连接关系

HVAC Design Bot 根据从包含建筑几何信息的 IDF 文件读取的建筑物结构信息，对空调系统的管路布置进行了大致的规划。随后进行了水力计算，确定了各管段的管径，同时生成了各管路与设备，各管路间的连接关系。单层的水力计算表、管道管径及设备与管道、管道与管道之间的连接关系见附录 B。

f. 更改样本库

本设计将手头有的盾安产品样本整理成工具所需的样本格式，添加到样本库中，进行风机盘管、风冷热泵设备的重新选型。风机盘管选型结果如表 5.6 所示，表中风量冷量热量均指风机盘管中档风速时的参数。风冷热泵选用了两台盾安安杰 i-Super 风冷螺杆型热泵机组，制冷剂为 R407C，一台制冷量为250kW，一台为350kW，具体参数如表 5.7 所示。

由于样本库较小，选型过程中出现了过配警告，特别是风冷热泵的选型，出现了比较大的过配现象，由此可以发现，样本库的丰富性将很大程度地影响到 HVAC Design Bot 选型的效果。

C. HVAC Design Bot 功能评价

HVAC Design Bot 是一个尚在研发中的工具，其最终目标在于为设计人员提供一个提供一键式的自动选型工具，从而替代设计人员繁复而易错的选型计算工作，解放设计人员耗费在选型上的精力和时间，使他们可以将更多心思花在为建筑选择合适的空调系统上，提高暖通设计工作的效率和质量。

目前 HVAC Design Bot 已经搭建起一个核心技术框架，可以实现一些系统中核心设备的自动选型和管道选型。本案例选择了风冷热泵，风机盘管+独立新风机组的冷热源末端组合形式，对计算结果进行分析后可以发现：

在冷热源机组，风机盘管，新风机组的选型上，HVAC Design Bot 的选型结果较为可靠，且选型过程采用了一些优化方法（如冷机根据全年负荷特性曲线优化选型），相较常规设计经验先行的设计方法而言，其设计结果更为科学节能；在管路选型和描述上，HVAC Design Bot 能够实现大致的管路规划和水力计算，能够完整而准确的生成管路连接关系的描述文件，连接关系中管路和管径可以一一对应，该信息可以用于图形绘制。

但就目前而言，HVAC Design Bot 也存在一定的问题：

- ① 样本库不够大，选型过程中容易经常出现过配警告，设备过配可能会降低系统节能性；
- ② 各类设备的分类不够详细，例如水泵有卧式泵、立式泵，风机盘管有明装、暗装等形式，目前尚未针对分类做出选项供用户选择；
- ③ 样本库中大部分设备只有额定工况数据，选型过程中亦未考虑根据实际工程中设备进、出口水温，进、出口空气温度对样本的性能参数进行修正；
- ④ 目前一些设备的选型方法仍然以工程经验选型为主，这些方法未必节能性很强，且理论依据不够充足；
- ⑤ 缺乏阀件的选型和描述；
- ⑥ 缺乏冷凝水管路的描述。

基于上述分析，本文对 HVAC Design Bot 的展望及改进建议如下：

- ① 应当进一步扩展样本库，同时提高样本数据的完整性；
- ② 细化设备分类，同时提高用户的选择自由度；
- ③ 应考虑非额定工况下设备性能的修正问题；
- ④ 后期需要大量需要经过文献调研和案例调研，引入更加科学的选型方法，提高节能性；
- ⑤ 进一步完善工具功能，补充阀件、冷凝水管路的选型；
- ⑥ 丰富支持选型的空调系统种类，使工具的普适性更强。
- ⑦ 可进一步完善造价评估，能耗预测等功能，使得系统的对比评价甚至自动优化选择成为可能。

5.3 系统图自动生成及 BIM 正向设计

5.3.1 系统图

HVAC Design Bot 在完成选型之后导出了描述空调系统及包含管道连接关系和管径的 IFC 文件，本设计将其导入第 4 章完成的水系统图自动生成工具中，生成系统图如图 5.4 所示。

可以观察到，水系统图自动生成工具基本清晰地展现了所设计空调系统的架构，图形布局较合理，交叉较少，走线基本简洁，图层图线分类清晰，能准确表达供回水管路和设备阀件。但图纸离工程图纸还有一定细节上的差异，如文字标注问题，目前自建字库不足，无法详尽标注设备信息；部分部件仍然存在缺失现象，如缺乏水处理器等；缺乏图框、图例等施工图常备的信息。这些特点仍有待后期改善。但总的来说系统图有效地反映了空调系统设计的基本信息，虽不能直接用作施工图，但已起到便于设计人员相互沟通的效果。

装
订
线

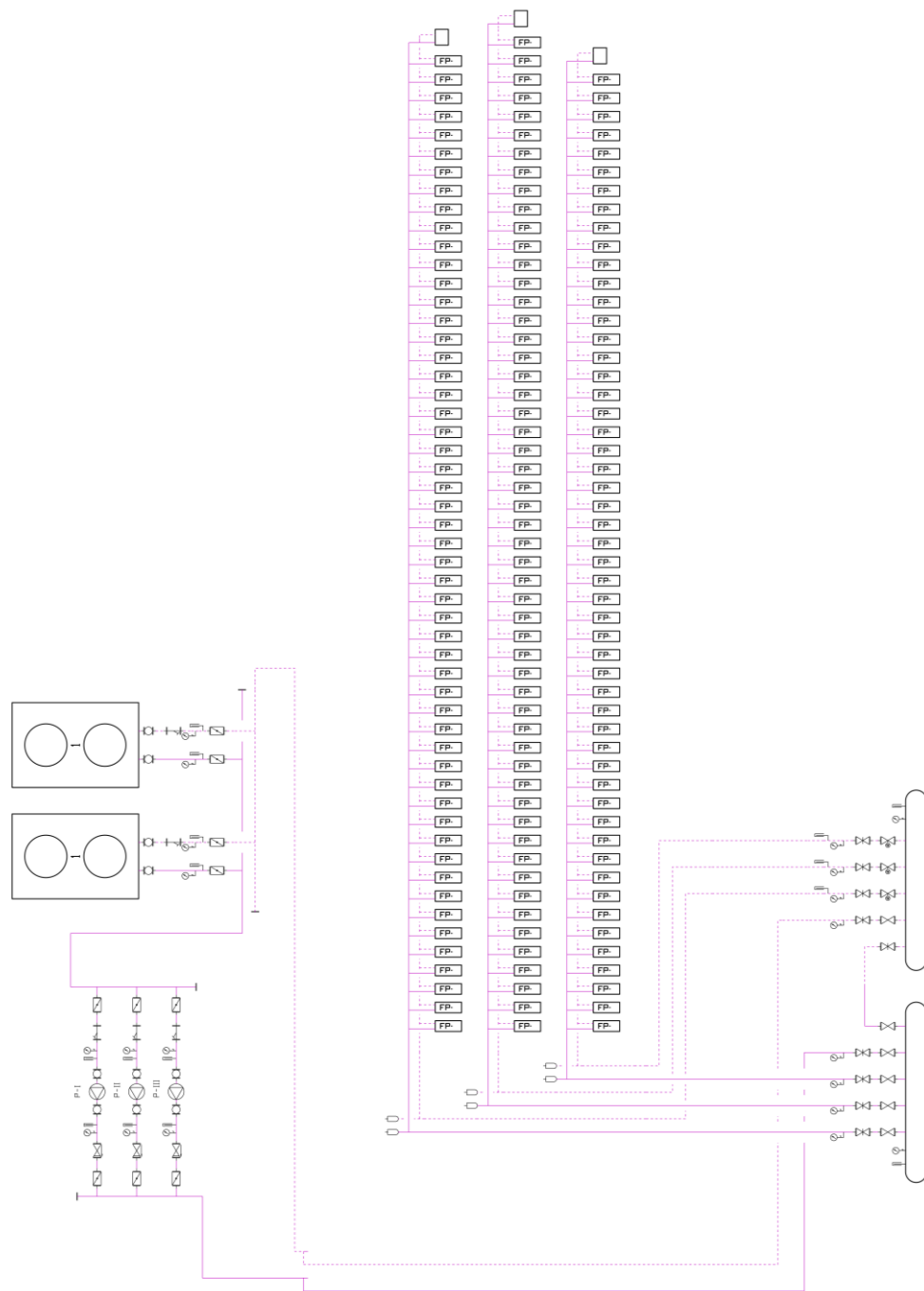


图 5.4 水系统图自动生成结果

5.3.1 BIM 正向设计

BIM 正向设计是指从三维 BIM 模型出发，不需翻模，在设计绘图阶段不需将二维数据转化为 BIM 模型，而是直接在 BIM 模型上完成方案设计、施工图设计^[54]。与之对应，逆向设计指的是在所有设计建立在常规的设计流程上，最后将设计成果翻模成 BIM 模型，利用 BIM 模型的信息集成特点进行不同工种间工作的协调。

目前，BIM 技术因其集成了许多工种的设计信息，便于不同工种设计人员间的沟通交流，在设计领域越来越广泛地被应用。综合分析正向设计与逆向设计的工作效率，正向设计显然是暖通空调设计未来发展的趋势。本设计是基于 BIM 的暖通空调全自动设计初探，采用正向设计的形式作为生成施工图的手段。

受时间限制，本设计仅完成了一层水管的 BIM 建模，未出成施工图纸，但已能一定程度上的反映当前设计的自动化程度。根据 HVAC Design Bot 所生成的管路连接关系描述及管径（见附录 B），本设计在 BIM 中绘制了一层平面的水管风管 BIM 模型，如图 5.5 所示。

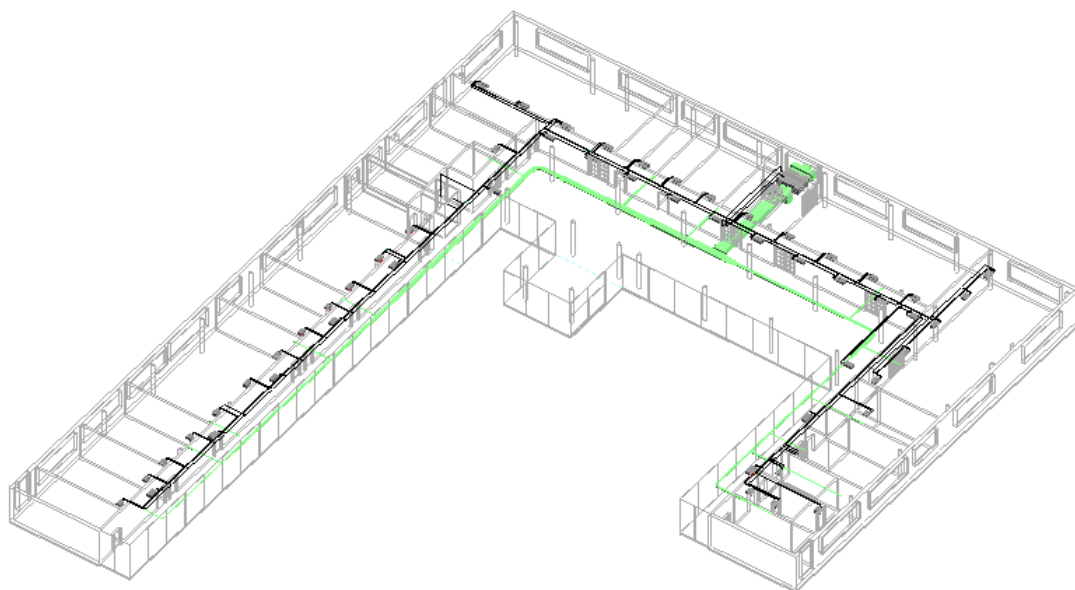


图 5.5 一层平面水管风管 BIM 图

5.4 自动设计实例小结及评价

本章选择了一栋 3 层办公建筑，从该建筑的 BIM 模型入手，按照图 1.1 的自动设计流程，借助已有工具及前文所设计工具，以自动设计为主，人工调整为补充的方式完成该建筑的空调系统设计。设计流程主要分为负荷计算，系统设计及设计成果可视化三大部分，这三大部分中工作的自动化程度小结如表 5.9 所示。

表 5.9 自动设计实例自动化程度小结

设计阶段	工作项	全自动	部分自动	全人工	说明
	BIM 轻量化			√	
负荷计算	导出 gbXML 文件	√			
	转化成 IDF 文件	√			
	EnergyPlus 模拟		√		参数需人工设置
	系统形式选择			√	
系统设计	系统分区		√		新风使用默认自动分区
	设备选型	√			
	管路设计和水力计算	√			
设计成果	系统图	√			
可视化	平面正向设计			√	

本次设计中大部分的工作项都采用了自动设计的方式进行设计，虽然工作量无法进行横向评估，不能得出一个设计自动化程度的百分比准确数值，但从表 5.9 可以看出设计自动化程度已经较高。

在使用自动化设计替代人工工作时，自动设计的准确性也是需要保证的。结合自动设计过程，本文对使用自动设计工具的项目的成果与一般人工成果进行了对比。分析结果如下：

① 对负荷计算，采用从 BIM 到 EnergyPlus 计算负荷的自动设计流程能较为准确的计算出建筑负荷，相较一般的于能耗计算软件中重新建模，或使用表算法计算负荷的负荷计算方法相比，其负荷计算准确性并不低于常规方法，且工作效率更高。

② 对系统设计，使用自动选型工具 HVAC Design Bot 可以较为科学有效地进行设备选型，相较常规的表算甚至手算选型，其选型结果准确，效率高。

③ 对设计成果可视化，使用前文设计的系统图生成工具进行系统图生成，其生成结果虽不能直接出图为施工图纸，但能准确地描述所设计系统。且其绘制效率高，便于设计人员之间相互沟通和改善方案。

综上，本设计实例中各自动设计项目的成果均达到预期，与人工完成相比，成果差距不大。可以认为，本设计中自动设计程度较高，设计成果有效，是自动设计的一次成功的尝试。

6 结论和展望

6.1 成果及结论

分析当前暖通空调设计领域从业人员的工作可以发现，目前空调系统设计过程重复性强，占用设计人员工作时间。暖通空调设计领域需要一个更准确并且创建迅速的模型，以简化设计人员的工作。基于此，本文着眼于暖通设计过程，使用基于 BIM 的建筑模型，探索进行自动设计的可能性。

通过分析暖通空调自动设计的发展现状，本文发现，在设计成果的展现即画图领域，目前尚缺乏相关的研究成果。因此，本文首先尝试设计水系统图自动成图工具。

随后结合设计的水系统图自动成图工具，使用基于 BIM 的建筑模型，采用半人工半自动的方式，完成一栋 3 层办公楼的空调系统设计。其中从办公建筑 BIM 模型至负荷计算部分为课题组已完成工作，非本文工作重点。

现对本文完成的主要工作及成果进行小结。

在水系统图自动成图工具设计阶段：

(1) 空调水系统图的拓扑抽象。本文首先分析暖通空调水系统图的特征，确定自动成图绘图目标，随后对目标进行成图，部件，环路三层拓扑抽象，简化绘图问题。

(2) 空调水系统图生成算法。根据已建立的拓扑抽象模型，本文分析了成图所需的算法。参考已有的布局算法，本文针对水系统图环路拓扑模型特点，提出了适用于本问题的基于环路拓扑模型的引斥力模型布局算法，并将该算法进行改进，使用模拟退火算法求解。通过分析已有的连线算法的适用问题与水系统图连线问题的不同之处，本文根据本问题特征提出了基于障碍的线探索算法，并分析和考虑了连线过程中可能出现的特殊情况，使用交叉检测及打断算法对发生交叉的线段进行处理；针对该算法所不能解决的连线问题，本文通过建立特殊连线形式解决。鉴于本成图问题的复杂性，本文提出了环路细胞模型，对连线点确立，成图拓扑及部件拓扑的图块大小和内部图线等细节问题加以补充定义和处理。

(3) 空调水系统图生成工具软件。本文在已提出算法的基础上，细化了水系统图生成的流程。使用 python 语言，采用面向对象程序设计的设计方法，建立了基准类，并参照 python 库的书写方式建立了程序架构。针对上游工具 HVAC Design Bot 的输出文件格式 IFC 物理文件，本文细化了工具的输入功能，并根据暖通工程图纸的要求细化了输出功能，使工具可以输出分辨率较高的 png 文件。本文还为该工具设计了图形界面，方便用户操作。本文设计的水系统图生成软件，能够基本实现风冷热泵与末端同图绘制的系统图的一键自动生成，图形清晰，连线准确。图块布局合理，图线交叉少，基本符合成图要求。

在自动设计实例尝试阶段，本文完成了：

(4) 空调系统设计及具体设备选型。本文根据自动设计流程上游求得的负荷，综合办公楼的使用特点和建筑特点，选择空调系统形式。并使用课题组已完成的 HVAC Design Bot 工具，进行空调系统各设备的选型和管路设计。值得一提的是，本文将盾安产品样本输入样本库中进行选型，已观察非默认样本库中 HVAC Design Bot 工具的选型表现。分析选型结果，HVAC Design Bot

工具可以实现风冷热泵系统中核心设备的自动选型和管道选型，选型结果可靠有效。

（5）系统图生成及单层平面正向设计尝试。本文使用前文设计的水系统图自动成图工具生成了办公楼的空调水系统图，图形虽离工程图纸还有一定细节上的差异有待后期改善，但基本清晰地展现了所设计空调系统的架构，成图效果较好，可以方便设计人员的沟通。随后，本文采用人工绘图的方式，使用 BIM 软件进行单层平面的正向设计。

（6）基于自动设计实例的自动设计流程评价。本文分析了设计流程的自动化程度，对比了自动设计与人工设计的成果可靠性，认为实例设计中自动设计程度较高，设计成果有效，是自动设计的一次成功的尝试，图 1.1 的自动设计流程方向准确，能有效提高暖通空调领域设计的效率。

6.2 展望

本文是对暖通空调自动设计的一次初步探索，完成了一个建筑实例的暖通空调设计，同时设计了自动成图工具提高了暖通空调设计的自动化程度。在探索过程中，本文发现虽然目前暖通空调的设计已经能达到一定的自动化程度，但还有许多地方等待后续研究人员改进。目前可以预见的工作主要有：

（1）针对负荷计算，当前从 BIM 模型到能耗模拟软件还需要大量的人工介入，如 BIM 的轻量化，EnergyPlus 模拟的人工补充设置等。BIM 的轻量化或可以借助 Revit 软件的插件开发平台实现，而 EnergyPlus 模拟的参数或可以通过编程设置默认值实现。

（2）针对系统设计和设备选型，当前 HVAC Design Bot 支持的空调系统种类比较有限，有待进一步丰富，同时也需进一步完善工具功能，如扩大样本库、补充阀件、冷凝水管路的选型等。还可进一步完善造价评估，能耗预测等功能，使得系统的对比评价甚至自动优化选择成为可能。

（3）针对水系统图的自动生成，本文设计的水系统图自动生成工具软件生成效果目前离工程施工图纸还有一定距离，图库有待进一步扩充，连线形式尚未能支持并联也有待改进，文字标注问题需要通过自建字库或导出解决。

（4）针对平面管路的设计，目前这部分研究尚为空白，有待研究人员完善。

参考文献

- [1] 张立茂, 吴贤国. BIM 技术与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [2] NBIMS-US™ V3.National BIM Standard[S]. 2015.
- [3] 孙晓璐.让 BIM 发展助力企业转型升级——写在《中国 BIM 应用价值研究报告》发布之际[J]. 中国勘察设计,2015(05):16-17.
- [4] gb XML.org.Software tools that integrate with gbXML[EB/OL].http://www.gbxml.org/Software_Tools_that_Support_GreenBuildingXML_gbXML.2019.
- [5] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.Handbook of Fundamentals[S].Atlanta,USA,2001.
- [6] Bill Smith.HVAC Peak Load Calculation Methods—History and Comparisons[EB/OL]. <http://www.elitesoft.com/web/newsroom/loadcalcs.html>.2019
- [7] 徐文博,赵妍研,栗峰.基于 BIM 技术的建筑能耗分析研究[J].建筑工程技术与设计,2015.
- [8] 中国建筑科学研究院, 建研科技股份有限公司, 上海凯创建筑科技有限公司. PKPM-Energy 使用者手册 [EB/OL]. <https://www.pkpm.cn/statics/js/pdfshow/web/viewer.html?file=https://www.pkpm.cn/uploadfile/2017/0724/20170724101350425.pdf>. 2019
- [9] 冯延力.全年负荷计算及能耗分析软件在华森知识城 BIM 项目中的应用[C]//第十七届全国工程建设计算机应用大会论文集: 492 - 493.
- [10] HONG T, LANGEVIN J, SUN K. Building simulation: Ten challenges[J]. Building Simulation, 2018, 11(5): 871-898.
- [11] A.Karola, H.Lahtela, R.Hanninen, etc.BSPro COMServer-Interoperability between software tools using industrial foundation classes[J].Energy and Buildings.2002,34(9):901-907.
- [12] V.Bazjanac, T.Maile.IFC HVAC INTERFACE to EnergyPlus-a case of expanded interoperability for energy simulation:Proceedings of Building Simulation[C]//USA,2004.
- [13] Vladimir Bazjanac.IFC BIM-based methodology for semi-automated building energy performance simulation[J].Lawrence Berkeley National Laboratory Paper LBNL-919E.2008.
- [14] 马智亮,曾统华,魏振华,等.从节能设计 IFC 数据生成 IDF 数据的机制及关键算法[J].土木工程信息技术,2012,4(01):1-5.
- [15] 冯妍.基于 BIM 技术的建筑节能设计软件系统研制[D].清华大学,2010.
- [16] 梁思雨.面向 EnergyPlus 的 BIM 数据处理方法研究[D].西安建筑科技大学,2018.
- [17] R. Brahme, A. Mahdavi, K.P. Lam, S. Gupta. Complex building performance analysis in early stages of design: A solution based on differential modeling, homology-based mapping, and generative design agents[C]//Seventh International IBPSA Conference, 2010, 661-668.
- [18] Aurelien Bres, Florian Judex, Georg Suter, Pieter de Wilde. A Method for Automated Generation of HVAC Distribution Subsystems for Building[J]. Proceedings Building simulation, 2017.

- [19] Benachir Medjdoub, Paul Richens, Nick Barnard. Generation of variational standard plant room solutions[J]. Automation in Construction 12 (2002):155-166.
- [20] Y. Asiedu, Robert W. Besant, P. Gu. HVAC duct system design using genetic algorithms[J]. HVAC&R RESEARCH, 14(2008): 149-173.
- [21] Justin Berquist, Alexander Tessier, William O'Brien, Ramtin Attar and Azam Khan. An Investigation of Generative Design for Heating, Ventilation, and Air-Conditioning[J]. AUTODESK Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design. May 22-24, 2017, Toronto, Canada.
- [22] Wright, J.A., The formulation, characteristics and solution of HVAC system optimized design problems[J]. ASHRAE Transactions, 2(1993):2133-2145.
- [23] Wright, J.A., The optimized design of HVAC systems[M].© JA Wright,1986.
- [24] Angelov, P., et al., Automatic design synthesis and optimization of component-based systems by evolutionary algorithms[J]. Genetic and Evolutionary Computation - Gecco 2003, Pt Ii, Proceedings, 2724(2003):1938-1950.
- [25] Stanescu, M., S. Kajl, And L. Lamarche, Optimization of HVAC system design for a university archetype building[J]. Air & Heat Water & Energy, 8(2011):229-234.
- [26] W.L.Lee, S.H.Lee. Developing a simplified model for evaluating chiller-system configurations[J]. Applied Energy 84 (2007): 290-306.
- [27] Landman W. Off-design chiller performance[J]. Trane Engineer Newsletter 1996:25(5).
- [28] Pei Huang, Gongsheng Huang, Godfried Augenbroe, Shan Li. Optimal configuration of multiple-chiller plants under cooling load uncertainty for different climate effects and building types[J]. Energy and Buildings, 158 (2018) 684-697.
- [29] S.M. Deng. Sizing replacement chiller plants[J]. ASHRAE Journal.144 (2002): 47.
- [30] J.A. Bondy, U.S.R. Murty.Graph Theory with Applications[M]. North-Holland, Amsterdam, 1976.
- [31] S. Even. Graph Algorithms[M]. Computer Science Press, Potomac, MD, 1979.
- [32] R. Lipton, S. North, and J. Sandberg. A Method for Drawing Graphs[J]. Computational Geometry, 153- 160, 1985.
- [33] P. Eades. A Heuristic for Graph Drawing[J]. Congressus Numerantium. vol.42:149-160,1984
- [34] Davidson R, Harel D. Drawing graphs nicely using simulated annealing[J]. ACM Transactions on Graphics, 1996, 15(4): 301-331.
- [35] C. Batini, E. Nardelli, M. Talamo, et al. A Graphtheoretic Approach to Aesthetic Layout of Information Systems Diagrams[C]. 10th Internet Workshop on Graphtheoretic Concepts in Computer Science (Berlin), 9-18, Trauner Verlag, 1984.
- [36] Battista G D, Eades P, Tamassia R, et al. Algorithms for drawing graphs: an annotated bibliography[J]. Computational Geometry: Theory and Applications, 1988, 4(5): 235-282.

- [37] Ong Y S, Gooi H B, Chan C K. Algorithms for automatic generation of one-line diagrams[J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147(5):292.
- [38] 杨志伟,许鹏,陈喆.基于 BIM 的暖通空调自动设计[J].建设科技,2018(23):44-48.
- [39] 张智广.暖通空调识图与造价[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [40] 黄利萍,胥进.通风与空调识图教材[M].上海:上海科学技术出版社,2004.
- [41] 陆耀庆.实用供热空调设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [42] 廖凡钦,刘东,闫红漫,等.基于拓扑分层的配电网电气接线图自动生成算法[J].电力系统自动化, 2014(13):174-181.
- [43] 程远,严伟,李晓明.基于斥力-张力模型的网络拓扑图布局算法[J].计算机工程, 2004(3):104-105.
- [44] 徐宁,洪先龙.超大规模集成电路物理设计理论与算法[M].北京:清华大学出版社,2009:119-121.
- [45] Hightower D W.A solution to linerouting problem on the continuous plane[C]//Proc Design Automation Workshop.1969.
- [46] 杨瑞元.无网格线探索布线算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,1998,10(3):200-207.
- [47] 郝新培.单线图自动成图技术研究[D].山东大学,2016.
- [48] 杨瑞元.朝向目标的线探索法—用小型计算机实现自动布线[J].计算机学报,1981,4(4):286-295.
- [49] 线段交叉判断（快速排斥实验+跨立实验）[DB/OL].（2016-05-21）[2019-06-01]. <https://blog.csdn.net/xia842655187/article/details/51469130>
- [50] 肖建,林海波等. Python 程序设计[M].北京:清华大学出版社,2003.06:1-4
- [51] 刘学成.空调冷负荷的建筑信息化模型应用研究[D].北京林业大学, 2012.
- [52] 公共建筑节能设计标准: DGJ 08-107-2015[S].上海.2015
- [53] 民用建筑供暖、通风与空气调节设计规范:GB50736-2012[S].2012
- [54] 吴文勇,焦柯,童慧波,等.基于 Revit 的建筑结构 BIM 正向设计方法及软件实现[J].土木工程信息技术, 2018 ver.10;No.47(03):43-49.

附录 A 程序架构示意图

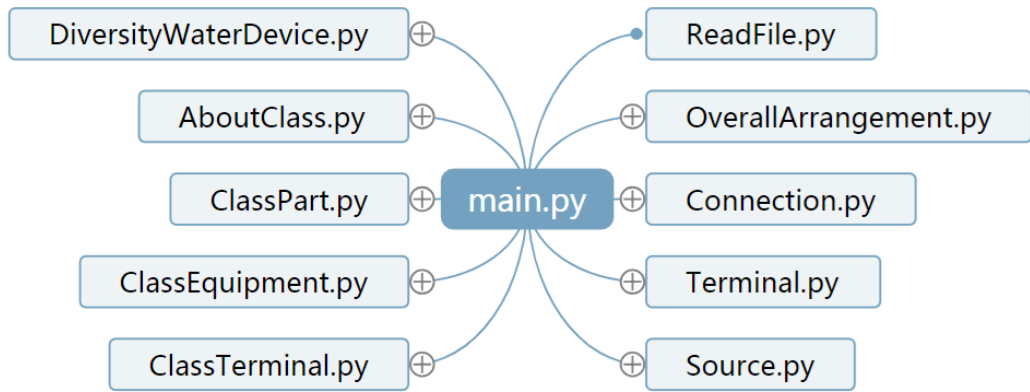


图 A.1 程序一层架构

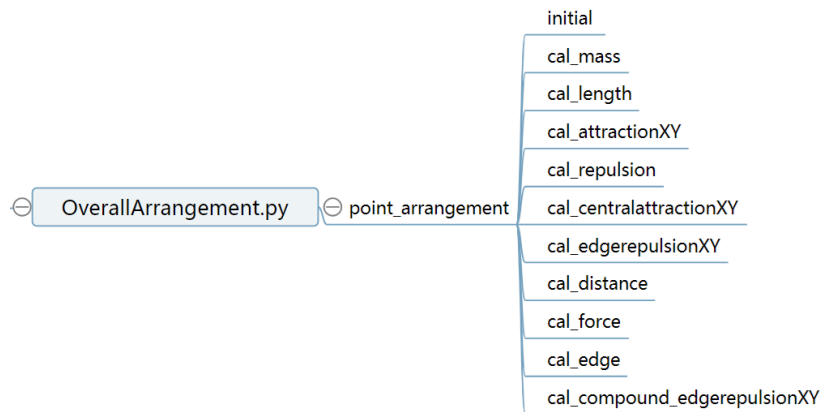


图 A.2 OverAllArrangement 架构

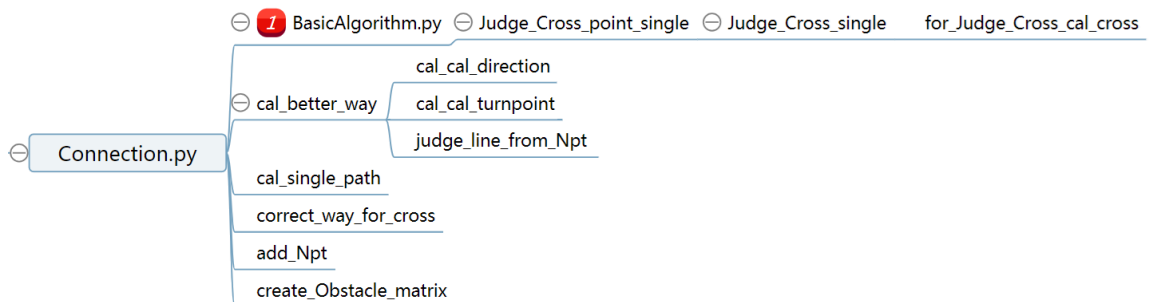


图 A.3 Connection 架构

装订线

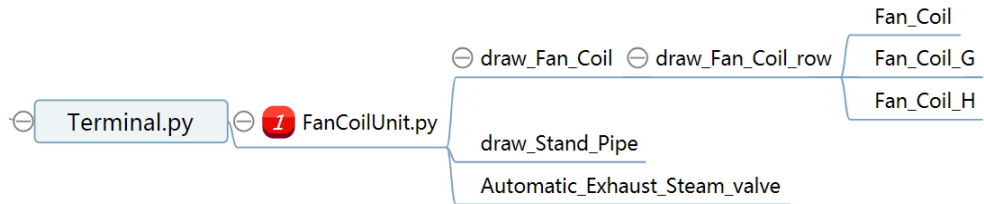


图 A.4 Terminal 架构

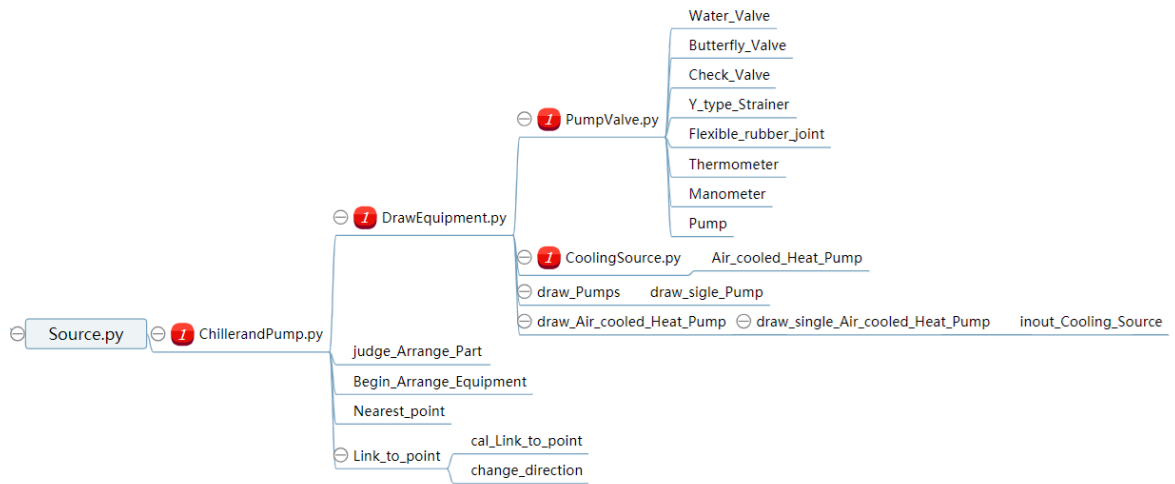


图 A.5 Source 架构

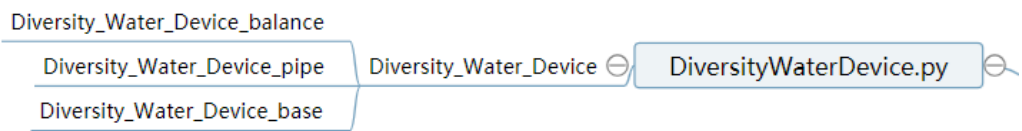


图 A.6 DiversityWaterDevice 架构

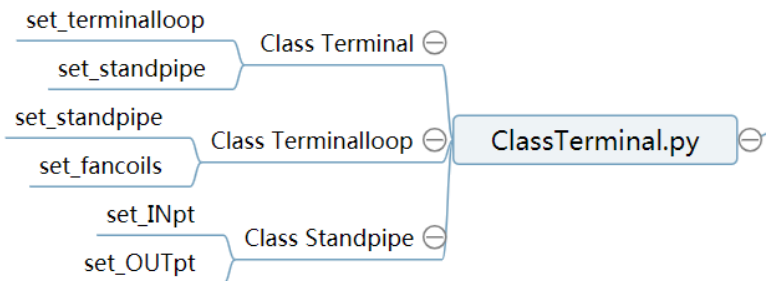


图 A.7 ClassTerminal 架构

装
订
线

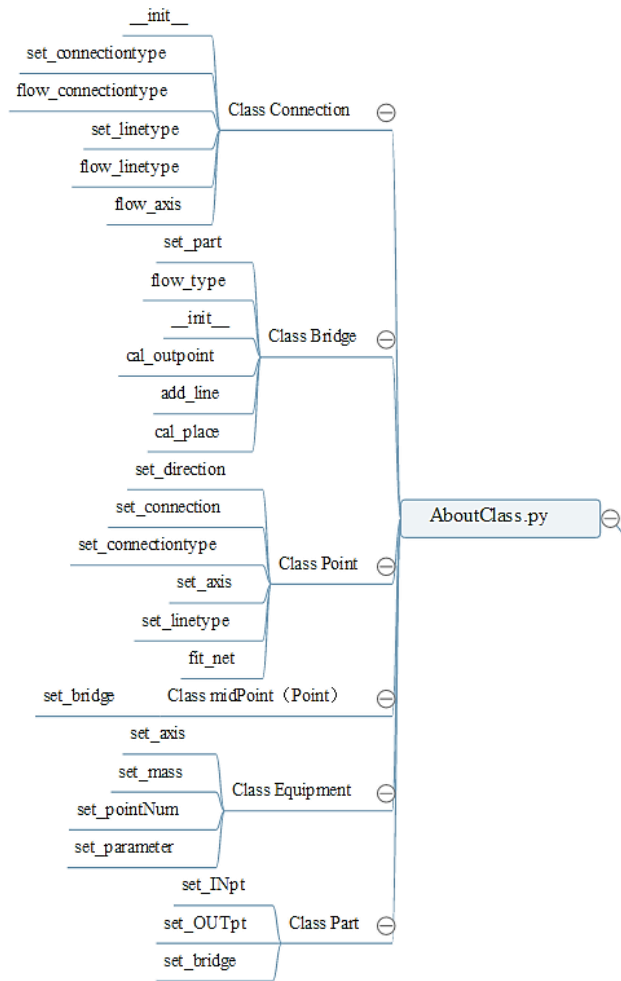


图 A.8 AboutClass 架构

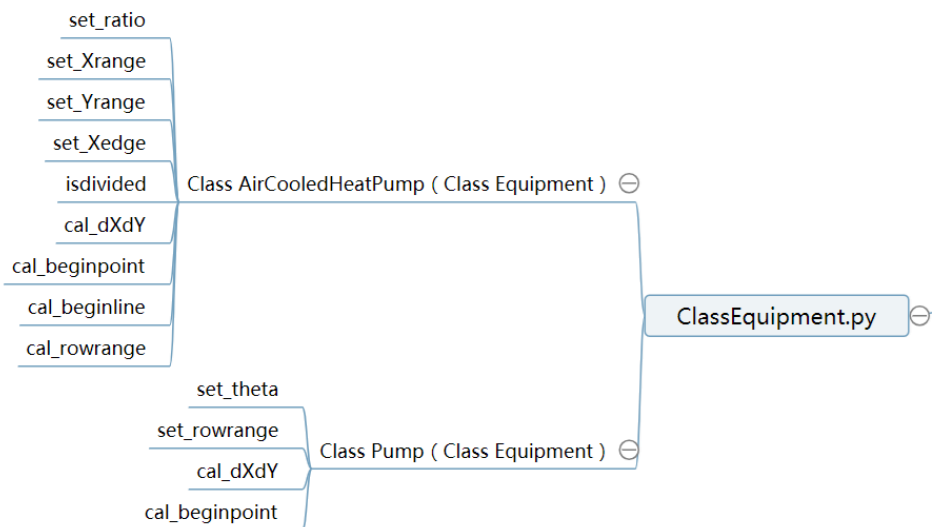


图 A.9 ClassEquipment 架构

装
订
线

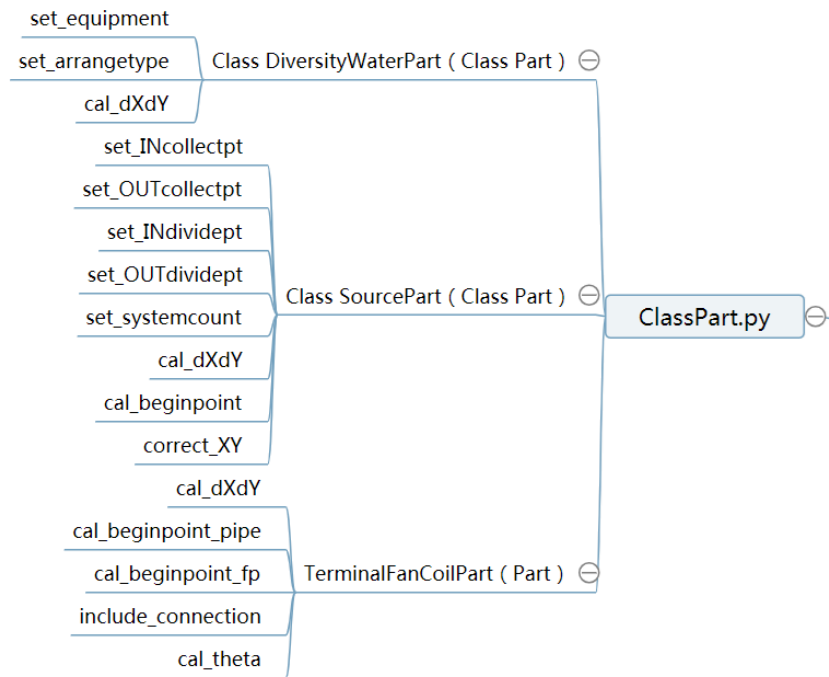


图 A.10 ClassPart 架构

装
订
线

附录 B 管路连接关系及管径描述

表 B.1 一楼管道连接关系及管径描述

InPort	OutPort	PortName	Load/W	Length/m	DN
1F:18wellhole_1	1F:33corridor1_1	1F:18wellhole_1_1F:33corridor1_1	68880.15	4	100
1F:33corridor1_1	1F:17office_2	1F:33corridor1_1_1F:17office_2	2041.711	2	15
1F:33corridor1_1	1F:33corridor1_2	1F:33corridor1_1_1F:33corridor1_2	64540.25	4	100
1F:33corridor1_2	1F:33corridor1_3	1F:33corridor1_2_1F:33corridor1_3	62242.07	4	100
1F:33corridor1_3	1F:33corridor1_4	1F:33corridor1_3_1F:33corridor1_4	59943.88	4	100
1F:33corridor1_4	1F:33corridor1_5	1F:33corridor1_4_1F:33corridor1_5	57645.7	3	80
1F:33corridor1_5	1F:33corridor1_6	1F:33corridor1_5_1F:33corridor1_6	55347.51	4	80
1F:33corridor1_6	1F:33corridor1_7	1F:33corridor1_6_1F:33corridor1_7	53049.33	4	80
1F:33corridor1_7	1F:33corridor1_8	1F:33corridor1_7_1F:33corridor1_8	50751.14	4	80
1F:33corridor1_8	1F:33corridor1_9	1F:33corridor1_8_1F:33corridor1_9	48452.96	4	80
1F:17office_2	1F:17office_1	1F:17office_2_1F:17office_1	1020.856	4	15
1F:18wellhole_1	1F:31corridor3_1	1F:18wellhole_1_1F:31corridor3_1	37155.82	5	70
1F:31corridor3_1	1F:31corridor3_2	1F:31corridor3_1_1F:31corridor3_2	34732.13	4	70
1F:31corridor3_2	1F:31corridor3_3	1F:31corridor3_2_1F:31corridor3_3	32308.43	4	70
1F:31corridor3_3	1F:31corridor3_4	1F:31corridor3_3_1F:31corridor3_4	29884.74	4	70
1F:31corridor3_4	1F:24office_2	1F:31corridor3_4_1F:24office_2	6325.833	3	25
1F:31corridor3_4	1F:31corridor3_5	1F:31corridor3_4_1F:31corridor3_5	21135.21	4	50
1F:31corridor3_5	1F:31corridor3_6	1F:31corridor3_5_1F:31corridor3_6	18711.51	4	50
1F:31corridor3_6	1F:31corridor3_7	1F:31corridor3_6_1F:31corridor3_7	16287.82	4	50
1F:31corridor3_7	1F:31corridor3_8	1F:31corridor3_7_1F:31corridor3_8	13864.13	4	40
1F:31corridor3_8	1F:31corridor3_9	1F:31corridor3_8_1F:31corridor3_9	11440.43	4	32
1F:31corridor3_9	1F:31corridor3_10	1F:31corridor3_9_1F:31corridor3_10	2293.286	4	20
1F:31corridor3_10	1F:27office_2	1F:31corridor3_10_1F:27office_2	2293.286	3	20
1F:31corridor3_9	1F:26office_2	1F:31corridor3_9_1F:26office_2	6723.449	4	32
1F:24office_2	1F:24office_1	1F:24office_2_1F:24office_1	1095.55	4	15
1F:27office_2	1F:27office_1	1F:27office_2_1F:27office_1	1146.643	4	15
1F:26office_2	1F:26office_1	1F:26office_2_1F:26office_1	1153.835	4	15
1F:26office_2	1F:25office_4	1F:26office_2_1F:25office_4	4415.779	4	25
1F:25office_4	1F:25office_3	1F:25office_4_1F:25office_3	3311.834	3	20
1F:25office_3	1F:25office_2	1F:25office_3_1F:25office_2	2207.889	3	15
1F:25office_2	1F:25office_1	1F:25office_2_1F:25office_1	1103.945	3	15
1F:24office_2	1F:23office_3	1F:24office_2_1F:23office_3	4134.733	5	25

装订线

续表 B.1

InPort	OutPort	PortName	Load/W	Length/m	DN
1F:23office_3	1F:23office_2	1F:23office_3_1F:23office_2	2756.489	3	20
1F:23office_2	1F:23office_1	1F:23office_2_1F:23office_1	1378.244	3	15
1F:33corridor1_9	1F:30corridor2_1	1F:33corridor1_9_1F:30corridor2_1	46154.78	5	80
1F:30corridor2_1	1F:30corridor2_2	1F:30corridor2_1_1F:30corridor2_2	43097.46	4	80
1F:30corridor2_2	1F:5office_1	1F:30corridor2_2_1F:5office_1	31234.69	3	70
1F:30corridor2_2	1F:30corridor2_3	1F:30corridor2_2_1F:30corridor2_3	8805.451	3	32
1F:30corridor2_3	1F:30corridor2_4	1F:30corridor2_3_1F:30corridor2_4	5748.132	4	25
1F:30corridor2_4	1F:8office_1	1F:30corridor2_4_1F:8office_1	2690.813	2	20
1F:8office_1	1F:9office_1	1F:8office_1_1F:9office_1	2339.523	2	20
1F:9office_1	1F:7office_1	1F:9office_1_1F:7office_1	1071.291	3	15
1F:9office_1	1F:10office_1	1F:9office_1_1F:10office_1	765.1417	3	15
1F:5office_1	1F:5office_2	1F:5office_1_1F:5office_2	30224.88	4	70
1F:5office_2	1F:2office_1	1F:5office_2_1F:2office_1	29215.07	5	70
1F:2office_1	1F:1office_5	1F:2office_1_1F:1office_5	28045.34	3	70
1F:1office_5	1F:1office_4	1F:1office_5_1F:1office_4	26648.75	3	70
1F:1office_4	1F:1office_3	1F:1office_4_1F:1office_3	25252.16	3	50
1F:1office_3	1F:1office_2	1F:1office_3_1F:1office_2	23855.56	3	50
1F:1office_2	1F:1office_1	1F:1office_2_1F:1office_1	1396.594	3	15
1F:1office_2	1F:11office_5	1F:1office_2_1F:11office_5	21062.37	5	50
1F:11office_5	1F:11office_4	1F:11office_5_1F:11office_4	19598.39	3	50
1F:11office_4	1F:11office_3	1F:11office_4_1F:11office_3	18134.41	3	50
1F:11office_3	1F:11office_2	1F:11office_3_1F:11office_2	16670.42	3	50
1F:11office_2	1F:11office_1	1F:11office_2_1F:11office_1	15206.44	3	40
1F:11office_1	1F:28office_1	1F:11office_1_1F:28office_1	13742.46	3	40
1F:28office_1	1F:12office_2	1F:28office_1_1F:12office_2	12788.8	4	40
1F:12office_2	1F:12office_1	1F:12office_2_1F:12office_1	1627.824	4	15
1F:12office_2	1F:13office_2	1F:12office_2_1F:13office_2	9533.151	5	32
1F:13office_2	1F:14office_5	1F:13office_2_1F:14office_5	8455.498	4	32
1F:14office_5	1F:14office_4	1F:14office_5_1F:14office_4	5902.276	3	25
1F:14office_4	1F:14office_3	1F:14office_4_1F:14office_3	4426.707	3	25
1F:14office_3	1F:14office_2	1F:14office_3_1F:14office_2	2951.138	3	20
1F:14office_2	1F:14office_1	1F:14office_2_1F:14office_1	1475.569	3	15
1F:14office_5	1F:13office_1	1F:14office_5_1F:13office_1	1077.653	4	15

装订线

表 B.2 二楼管道连接关系及管径描述

InPort	OutPort	PortName	Load/W	Length/m	DN
1F:18wellhole_1	2F:66corridor3_1	1F:18wellhole_1_2F:66corridor3_1	67552.86	1	100
2F:66corridor3_1	2F:66corridor3_2	2F:66corridor3_1_2F:66corridor3_2	64020.04	3	100
2F:66corridor3_2	2F:66corridor3_3	2F:66corridor3_2_2F:66corridor3_3	53036.97	4	80
2F:66corridor3_3	2F:66corridor3_4	2F:66corridor3_3_2F:66corridor3_4	49504.15	4	80
2F:66corridor3_4	2F:59office_2	2F:66corridor3_4_2F:59office_2	45971.33	2	80
2F:59office_2	2F:66corridor3_5	2F:59office_2_2F:66corridor3_5	40894.61	3	70
2F:66corridor3_5	2F:60office_2	2F:66corridor3_5_2F:60office_2	37361.79	3	70
2F:60office_2	2F:66corridor3_6	2F:60office_2_2F:66corridor3_6	30020.08	2	70
2F:66corridor3_6	2F:61office_2	2F:66corridor3_6_2F:61office_2	26487.26	3	70
2F:61office_2	2F:66corridor3_7	2F:61office_2_2F:66corridor3_7	24651.83	2	50
2F:66corridor3_7	2F:62office_2	2F:66corridor3_7_2F:62office_2	21119.01	3	50
2F:62office_2	2F:66corridor3_8	2F:62office_2_2F:66corridor3_8	19283.58	2	50
2F:66corridor3_8	2F:66corridor3_9	2F:66corridor3_8_2F:66corridor3_9	15750.76	3	50
2F:66corridor3_9	2F:63office_2	2F:66corridor3_9_2F:63office_2	5076.716	2	25
2F:66corridor3_9	2F:66corridor3_10	2F:66corridor3_9_2F:66corridor3_10	7141.219	4	32
2F:66corridor3_10	2F:64office_2	2F:66corridor3_10_2F:64office_2	7141.219	2	32
2F:64office_2	2F:65office_2	2F:64office_2_2F:65office_2	1735.181	3	15
2F:65office_2	2F:66corridor3_11	2F:65office_2_2F:66corridor3_11	0	2	15
2F:59office_2	2F:59office_1	2F:59office_2_2F:59office_1	2538.358	4	20
2F:60office_2	2F:60office_1	2F:60office_2_2F:60office_1	5506.287	4	25
2F:60office_1	2F:61office_1	2F:60office_1_2F:61office_1	3670.858	4	20
2F:61office_1	2F:62office_1	2F:61office_1_2F:62office_1	1835.429	4	15
2F:63office_2	2F:63office_1	2F:63office_2_2F:63office_1	2538.358	4	20
2F:64office_2	2F:64office_1	2F:64office_2_2F:64office_1	3570.61	4	20
2F:64office_1	2F:65office_1	2F:64office_1_2F:65office_1	1735.181	3	15
2F:66corridor3_2	2F:58office_1	2F:66corridor3_2_2F:58office_1	7450.25	4	32
2F:58office_1	2F:58office_2	2F:58office_1_2F:58office_2	4966.833	3	25
2F:58office_2	2F:58office_3	2F:58office_2_2F:58office_3	2483.417	3	20
1F:18wellhole_1	2F:53office_2	1F:18wellhole_1_2F:53office_2	102844.5	5	125
2F:53office_2	2F:47corridor1_1	2F:53office_2_2F:47corridor1_1	99170.02	1	100
2F:47corridor1_1	2F:47corridor1_2	2F:47corridor1_1_2F:47corridor1_2	95965.16	4	100
2F:47corridor1_2	2F:47corridor1_3	2F:47corridor1_2_2F:47corridor1_3	92760.3	4	100
2F:47corridor1_3	2F:47corridor1_4	2F:47corridor1_3_2F:47corridor1_4	89555.44	4	100
2F:47corridor1_4	2F:47corridor1_5	2F:47corridor1_4_2F:47corridor1_5	86350.58	3	100

装订线

续表 B.2

InPort	OutPort	PortName	Load/W	Length/m	DN
2F:47corridor1_5	2F:47corridor1_6	2F:47corridor1_5_2F:47corridor1_6	83145.72	4	100
2F:47corridor1_6	2F:47corridor1_7	2F:47corridor1_6_2F:47corridor1_7	79940.86	4	100
2F:47corridor1_7	2F:47corridor1_8	2F:47corridor1_7_2F:47corridor1_8	3204.861	3	20
2F:53office_2	2F:53office_1	2F:53office_2_2F:53office_1	1837.239	4	15
2F:47corridor1_7	2F:49office_2	2F:47corridor1_7_2F:49office_2	73531.13	7	100
2F:49office_2	2F:49office_1	2F:49office_2_2F:49office_1	22857.83	4	50
2F:49office_1	2F:51office_5	2F:49office_1_2F:51office_5	20384.26	4	50
2F:51office_5	2F:51office_4	2F:51office_5_2F:51office_4	17925.62	3	50
2F:51office_4	2F:51office_3	2F:51office_4_2F:51office_3	15466.97	3	50
2F:51office_3	2F:51office_2	2F:51office_3_2F:51office_2	13008.33	3	40
2F:51office_2	2F:51office_1	2F:51office_2_2F:51office_1	10549.68	3	32
2F:51office_1	2F:52office_4	2F:51office_1_2F:52office_4	8091.034	3	32
2F:52office_4	2F:52office_3	2F:52office_4_2F:52office_3	6068.275	2	25
2F:52office_3	2F:52office_2	2F:52office_3_2F:52office_2	4045.517	2	20
2F:52office_2	2F:52office_1	2F:52office_2_2F:52office_1	2022.758	2	15
2F:49office_2	2F:48office_2	2F:49office_2_2F:48office_2	48199.75	6	80
2F:48office_2	2F:48office_1	2F:48office_2_2F:48office_1	3078.379	4	20
2F:48office_2	2F:46office_1	2F:48office_2_2F:46office_1	42042.99	4	70
2F:46office_1	2F:46office_2	2F:46office_1_2F:46office_2	40252.07	2	70
2F:46office_2	2F:46office_3	2F:46office_2_2F:46office_3	5372.756	2	25
2F:46office_3	2F:46office_4	2F:46office_3_2F:46office_4	3581.837	2	20
2F:46office_4	2F:46office_5	2F:46office_4_2F:46office_5	1790.919	2	15
2F:46office_2	2F:45corridor2_1	2F:46office_2_2F:45corridor2_1	33088.4	4	70
2F:45corridor2_1	2F:45corridor2_2	2F:45corridor2_1_2F:45corridor2_2	29794.88	4	70
2F:45corridor2_2	2F:40office_1	2F:45corridor2_2_2F:40office_1	26501.37	3	70
2F:40office_1	2F:44office_1	2F:40office_1_2F:44office_1	24552.17	3	50
2F:44office_1	2F:45corridor2_3	2F:44office_1_2F:45corridor2_3	22929.72	2	50
2F:45corridor2_3	2F:45corridor2_4	2F:45corridor2_3_2F:45corridor2_4	19636.2	3	50
2F:45corridor2_4	2F:38office_1	2F:45corridor2_4_2F:38office_1	16342.69	3	50
2F:38office_1	2F:45corridor2_5	2F:38office_1_2F:45corridor2_5	9880.544	3	32
2F:45corridor2_5	2F:45corridor2_6	2F:45corridor2_5_2F:45corridor2_6	6587.029	4	25
2F:45corridor2_6	2F:45corridor2_7	2F:45corridor2_6_2F:45corridor2_7	3293.515	4	20
2F:40office_1	2F:40office_2	2F:40office_1_2F:40office_2	974.597	4	15
2F:38office_1	2F:38office_2	2F:38office_1_2F:38office_2	4871.513	4	25

装订线

续表 B.2

InPort	OutPort	PortName	Load/W	Length/m	DN
2F:38office_2	2F:37office_1	2F:38office_2_2F:37office_1	2419.876	4	20
2F:37office_1	2F:34office_1	2F:37office_1_2F:34office_1	1409.171	3	15
2F:38office_2	2F:39office_1	2F:38office_2_2F:39office_1	861.0079	4	15

表 B.3 三楼管道连接关系及管径描述

InPort	OutPort	PortName	Load/W	Length/m	DN
1F:18wellhole_1	3F:93corridor3_1	1F:18wellhole_1_3F:93corridor3_1	59883.17	1	100
3F:93corridor3_1	3F:93corridor3_2	3F:93corridor3_1_3F:93corridor3_2	55733	4	80
3F:93corridor3_2	3F:93corridor3_3	3F:93corridor3_2_3F:93corridor3_3	46687.31	3	80
3F:93corridor3_3	3F:93corridor3_4	3F:93corridor3_3_3F:93corridor3_4	42537.14	4	80
3F:93corridor3_4	3F:89office_3	3F:93corridor3_4_3F:89office_3	38386.97	3	70
3F:89office_3	3F:93corridor3_5	3F:89office_3_3F:93corridor3_5	34006.87	2	70
3F:89office_3	3F:89office_2	3F:89office_3_3F:89office_2	2920.066	2	20
3F:89office_2	3F:89office_1	3F:89office_2_3F:89office_1	1460.033	2	15
3F:93corridor3_5	3F:93corridor3_6	3F:93corridor3_5_3F:93corridor3_6	29856.7	4	70
3F:93corridor3_6	3F:90office_2	3F:93corridor3_6_3F:90office_2	25706.53	2	70
3F:90office_2	3F:93corridor3_7	3F:90office_2_3F:93corridor3_7	22296.52	3	50
3F:93corridor3_7	3F:93corridor3_8	3F:93corridor3_7_3F:93corridor3_8	18146.35	4	50
3F:93corridor3_8	3F:91office_3	3F:93corridor3_8_3F:91office_3	13996.18	1	40
3F:91office_3	3F:91office_2	3F:91office_3_3F:91office_2	2920.066	2	20
3F:91office_2	3F:91office_1	3F:91office_2_3F:91office_1	1460.033	2	15
3F:91office_3	3F:93corridor3_9	3F:91office_3_3F:93corridor3_9	9616.076	3	32
3F:93corridor3_9	3F:93corridor3_10	3F:93corridor3_9_3F:93corridor3_10	5465.906	4	25
3F:93corridor3_10	3F:93corridor3_11	3F:93corridor3_10_3F:93corridor3_11	5465.906	4	25
3F:90office_2	3F:90office_1	3F:90office_2_3F:90office_1	1705.005	4	15
3F:93corridor3_2	3F:88office_1	3F:93corridor3_2_3F:88office_1	4895.524	4	25
3F:88office_1	3F:88office_2	3F:88office_1_3F:88office_2	3263.682	3	20
3F:88office_2	3F:88office_3	3F:88office_2_3F:88office_3	1631.841	3	15
3F:93corridor3_11	3F:92office_3	3F:93corridor3_11_3F:92office_3	5465.906	4	25
3F:92office_3	3F:92office_2	3F:92office_3_3F:92office_2	3643.937	3	20
3F:92office_2	3F:92office_1	3F:92office_2_3F:92office_1	1821.969	3	15
1F:18wellhole_1	3F:83office_2	1F:18wellhole_1_3F:83office_2	119408.9	5	125
3F:83office_2	3F:82corridor1_1	3F:83office_2_3F:82corridor1_1	116538.7	1	125
3F:82corridor1_1	3F:82corridor1_2	3F:82corridor1_1_3F:82corridor1_2	112380.2	4	125

装 订 线

续表 B.3

InPort	OutPort	PortName	Load/W	Length/m	DN
3F:82corridor1_2	3F:82corridor1_3	3F:82corridor1_2_3F:82corridor1_3	108221.8	4	125
3F:82corridor1_3	3F:82corridor1_4	3F:82corridor1_3_3F:82corridor1_4	104063.3	4	125
3F:82corridor1_4	3F:82corridor1_5	3F:82corridor1_4_3F:82corridor1_5	99904.88	3	100
3F:82corridor1_5	3F:82corridor1_6	3F:82corridor1_5_3F:82corridor1_6	95746.42	4	100
3F:82corridor1_6	3F:82corridor1_7	3F:82corridor1_6_3F:82corridor1_7	91587.96	4	100
3F:82corridor1_7	3F:82corridor1_8	3F:82corridor1_7_3F:82corridor1_8	45698.89	4	80
3F:82corridor1_8	3F:82corridor1_9	3F:82corridor1_8_3F:82corridor1_9	41540.44	4	70
3F:83office_2	3F:83office_1	3F:83office_2_3F:83office_1	1435.1	4	15
3F:82corridor1_9	3F:74corridor2_1	3F:82corridor1_9_3F:74corridor2_1	37381.98	7	70
3F:74corridor2_1	3F:74corridor2_2	3F:74corridor2_1_3F:74corridor2_2	26933.59	4	70
3F:74corridor2_2	3F:70office_1	3F:74corridor2_2_3F:70office_1	3501.273	3	20
3F:74corridor2_2	3F:74corridor2_3	3F:74corridor2_2_3F:74corridor2_3	16970.15	3	50
3F:74corridor2_3	3F:74corridor2_4	3F:74corridor2_3_3F:74corridor2_4	6462.171	4	25
3F:70office_1	3F:70office_2	3F:70office_1_3F:70office_2	1750.637	4	15
3F:74corridor2_1	3F:71office_1	3F:74corridor2_1_3F:71office_1	3986.219	5	20
3F:71office_1	3F:71office_2	3F:71office_1_3F:71office_2	1993.109	4	15
3F:74corridor2_3	3F:67office_1	3F:74corridor2_3_3F:67office_1	4045.803	5	20
3F:67office_1	3F:67office_2	3F:67office_1_3F:67office_2	2022.902	4	15
3F:82corridor1_7	3F:76office_2	3F:82corridor1_7_3F:76office_2	41730.61	7	70
3F:76office_2	3F:76office_1	3F:76office_2_3F:76office_1	2250.726	4	15
3F:76office_2	3F:78office_1	3F:76office_2_3F:78office_1	20998.74	4	50
3F:78office_1	3F:79office_2	3F:78office_1_3F:79office_2	19919.3	4	50
3F:79office_2	3F:79office_1	3F:79office_2_3F:79office_1	2345.548	4	20
3F:79office_2	3F:80office_3	3F:79office_2_3F:80office_3	15228.21	5	40
3F:80office_3	3F:80office_2	3F:80office_3_3F:80office_2	12722.09	3	40
3F:80office_2	3F:80office_1	3F:80office_2_3F:80office_1	10215.98	3	32
3F:80office_1	3F:81office_3	3F:80office_1_3F:81office_3	7709.861	3	32
3F:81office_3	3F:81office_2	3F:81office_3_3F:81office_2	5139.908	3	25
3F:81office_2	3F:81office_1	3F:81office_2_3F:81office_1	2569.954	3	20
3F:76office_2	3F:75office_2	3F:76office_2_3F:75office_2	16230.42	6	50
3F:75office_2	3F:75office_1	3F:75office_2_3F:75office_1	2450.707	4	20
3F:75office_2	3F:73office_1	3F:75office_2_3F:73office_1	11329.01	4	32
3F:73office_1	3F:73office_2	3F:73office_1_3F:73office_2	9063.205	2	32
3F:73office_2	3F:73office_3	3F:73office_2_3F:73office_3	6797.404	2	32

续表 B.3

InPort	OutPort	PortName	Load/W	Length/m	DN
3F:73office_3	3F:73office_4	3F:73office_3_3F:73office_4	4531.602	2	25
3F:73office_4	3F:73office_5	3F:73office_4_3F:73office_5	2265.801	2	20

装
订
线

谢辞

本科毕业论文的经历于我而言，如同初征沙场的新兵拿起了领军的权杖，野心勃勃却吃力难当。面对一个全新的问题，从算法、到程序、到架构，竭尽一人全身心之力，才勉强交出一份答卷。好在这一路上，一直有导师及课题组同门们的引导和鼓励，家人朋友们的支持和陪伴，否则我也许做梦也无法想象今天我已独立地写出一个前人没有做过的小工具，虽然其仍有诸多不足，但却为暖通空调的自动设计的推动尽了自己绵薄之力。回顾过去两个多月的咬牙拼搏，挑灯夜战，感慨万分亦心存感动感激。

感谢许鹏老师给予了我足够的信任，给了我这次尝试和挑战的机会，在我迷茫灰心时用客观的视角点醒和鼓励我。感谢课题组的师兄师姐们和未来的同门郭明月，感谢他们予以我的激励和推动，也感谢他们予以我的包容和肯定。我们是一个很好的团队，对自动设计的初步探索如果没有大家的同甘共苦，互相帮助，绝无可能走到今天。

完成毕业论文的过程虽然辛苦，时至今日，却很好地为我大学本科四年的学习成果交上一份自觉满意的答卷。在此，我想感谢大学四年里帮我打开新世界大门的老师和前辈们。感谢孙丹路老师在那个不算闷热的夏天教会我什么是日复一日的坚持；感谢戴毅茹老师在那个灯光昏暗的机房里带我认识了 MATLAB，从此我握住了数学建模、算法编程的敲门砖；感谢李峥嵘老师和徐尤锦学长在我的热水器小课题步入山穷水尽时予以的指导和帮助；感谢程纬老师和马如进老师介绍给我 python、机器学习和大数据分析这三位新朋友……想感谢的老师和前辈还有很多很多，大学四年正是因为有着他们的教导和帮助，才收获颇丰。

我本静谧池塘里一片无力的浮萍，能磕磕绊绊走到今天少不了朋友们的支持和帮助。我想感谢我的男朋友，感谢他的关怀备至和陪伴，感谢他让我明白了追求自由和理想的力量；感谢我的天使姐妹们，谢谢她们在我自责时告诉我她们懂得；感谢我高中时代的好友，四年来鼓励和陪伴从未被距离打败过；感谢所有和我合作过的伙伴们，和你们并肩作战的时光让我学会了很多。

最后我还想感谢我的爸爸妈妈和姐姐，虽然远隔万里，他们一直站在我不远的身后，在我灰心时鼓励我，在我飘飘然时劝诫我，在我难过时予以我直击心灵的鼓励。

毕业论文甚至是大学四年的酸甜苦辣，也许都会随着时间流逝而慢慢淡去，但我会永远心存感激。