

基于斥力模型的地铁环控机房水系统设备自动空间优化方法

刘墨云

(福州轨道交通设计院有限公司, 福州 350004)

摘 要: 针对地铁站环控机房内设备的优化布置问题和环控机房空间压缩问题, 提出一种基于斥力模型的自动空间优化方法, 使用斥力模型定量计算并反映水系统设备的总体疏密程度, 并以所有设备间、设备与墙体间的合力作为优化目标, 使用差分进化算法优化给定空间内的设备定位以降低合力。在此基础上, 逐渐收缩水系统设备所处的给定空间, 以探求水系统设备所需的最小空间值。以某地铁站环控机房为案例, 使用该方法优化案例机房内的设备布置, 优化后设备总占地面积由 105.0 m^2 降低至 100.1 m^2 , 同时各设备间保持合理的安全间距。该方法可实现在保持设备间合理安全间距的前提下, 降低环控机房内部设备的总占地面积, 提高机房内空间利用效率。

关键词: 轨道交通; 斥力模型; 地铁车站; 通风空调系统; 机房布置; 自动优化

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)02-0146-09

Automatic Spatial Optimization Method for Water-System Equipment Layout in Metro Station Environmental Control Rooms Based on the Repulsion Model

LIU Moyun

(Fuzhou Roil Transit Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350004)

Abstract: Due to the large quantity of equipment in environmental control rooms, it is necessary to optimize the equipment layout to save space while guaranteeing normal maintenance. Therefore, an automatic spatial optimization approach is proposed to optimize the layout of central chiller plants. A repulsion model is adopted to quantify the rationality of equipment layout, which was regarded as the optimization objective. The differential evolution algorithm is utilized to adjust the equipment layout within a given space for the lowest optimization objective. Moreover, this approach repeatedly reduces the given space to minimize the space occupation of the central chiller plant. A real metro station environmental control room was taken as the case to verify the effectiveness of the proposed approach. Results indicate that the proposed approach reduced the occupied area of the equipment from 105 m^2 to 100.1 m^2 , with reasonable equipment spacing maintained. Therefore, the proposed approach is able to optimize equipment layout for metro station environmental control rooms, thereby achieving room space saving and reasonable equipment spacing.

Keywords: rail transit; repulsion model; metro station; heating, ventilation, and air-conditioning system; equipment room layout; automatic optimization

随着社会发展, 目前国内大量城市正在积极修建轨道交通系统^[1], 并且各城市在轨道交通建设中

持续推进“降本增效”研究, 其中缩减车站规模、降低建设成本是建设期的核心工作之一^[2]。作为地铁车

收稿日期: 2025-06-13 修回日期: 2026-01-08

作者简介: 刘墨云, 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道交通暖通空调设计和研究工作, 67258827@qq.com

基金项目: 福建省建设厅科技计划项目(2023-K-87)

引用格式: 刘墨云. 基于斥力模型的地铁环控机房水系统设备自动空间优化方法[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(2): 146–154.

Liu Moyun. Automatic spatial optimization method for water-system equipment layout in metro station environmental control rooms based on the repulsion model[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(2): 146–154.

站设备用房的大户,环控机房面积通常占车站建筑面积的35%左右(约600 m²),其空间优化成为缩减车站规模的关键突破口^[3]。然而,环控机房内设备类型复杂、数量密集。如何在满足运行安全、维保便利的前提下实现空间集约利用,成为设计师面临的技术挑战。

在保障地铁环控机房设计科学性与空间利用高效性方面,众多学者开展了深入研究。陈娟^[4]分析了地铁站环控机房设计中需要考虑的问题,指出要提高地铁站环控机房空间利用率,可优化设备选型、优化管线路径,以及令同线路的多个地铁站共用一个集中制冷站以减少各地铁站内部的设备数量。Sheng等^[5]以多智能体强化学习方法调整社区内建筑物数量与摆放方案,提高社区内建筑物布局的贴边度、对齐度、均匀度和中心度。Mirhoseini等^[6]使用强化学习方法优化芯片布局,将芯片布局优化工作的耗时缩短到6 h。Fan等^[7]将体育馆内部的布局问题描述为多目标优化问题,并使用遗传算法进行解决。该方法可降低11%的制冷能耗,3.3%的辐射得热,提升0.9%的热舒适百分比评分。王龙等^[8]提出在地铁站中部位置设置环控机房,以缩短冷水机组与空调末端之间的距离,优化通风系统和空调大小系统的布置形式,并缓解传统设计方案中环控机房内设备安装空间紧张的问题。为提高环控机房内的空间利用率,罗曼等^[9]为地铁站设计了一种装配式环控机房。该环控机房使用了混凝土夹层将机房分隔为上下部分,以提高机房内部的空间利用率,同时避免在安装、检修等过程中上下层设备的相互干扰。

既有研究围绕地铁站环控机房设备繁杂、空间资源紧张等问题,提出诸多优化策略。但在实际工程应用中,现有优化过程仍存在不足:一是高度依赖设计师的空间规划经验与工程实践能力;二是方案设计平均耗时长;三是不同设计团队输出方案差异率高,难以保证成果一致性。无法快速适配不同规模、功能需求的环控机房,难以形成标准化、通用化的技术体系。

鉴于此,本文提出一种基于斥力模型的地铁站环控机房水系统设备自动空间优化方法。本方法先将环控机房内水系统设备抽象为空间单元体,再通过构建斥力模型量化单元体间、单元体与结构障碍物间的相互作用关系。同时,本方法引入差分进化算法,对单元体空间坐标进行智能迭代优化,实现以最小空间面积完成设备合理布局。本研究可为突破传统设计瓶颈

提供智能化、轻量级的解决方案。

1 斥力模型与空间自动优化方法

本方法主要由3部分构成:①定义各类型设备群单元体;②定义设备间斥力模型及设备与结构障碍物之间的作用力模型;③在给定空间内,使用差分进化算法优化各设备群的空间定位;④小步收缩给定空间以探索设备群所需的最小空间。

1.1 定义各类设备群单元体

本方法在应用时,首先应定义各设备群的单元体。地铁站环控机房内容纳了多种类型的设备,包括冷水机组、水泵、空调箱、风机、分集水器、水处理仪器等^[10]。本方法旨在优化空调水系统设备的空间定位,因此需定义5种设备群的单元体,分别为冷水机组群整体单元、分水器集水器整体单元、水处理仪器单元(包含自动加药装置)、冷却水泵群整体单元和冷冻水泵群整体单元。

在定义这些设备群的整体单元时,基本原则为:①首先按照实际系统的制冷制热需求,选出合适的设备型号与数量,并确定每台设备的俯视面形状尺寸;②当某一类设备仅有一台时,该台设备被定义为一个单元体,单元体为长方形,且长方形尺寸应尽量小,但能完全覆盖该设备的俯视面投影(如图1所示,虚线长方形对应单元体);③当某一类设备有多台时,该类设备之间以安全间距平行摆放,相对位置不变,设备群整体被定义为一个单元体(如图2所示,两台水泵以安全间距为间隔平行摆放,整体被定义为一个泵组单元体);④单元体矩形不仅应覆盖设备主体的俯视面投影,还应覆盖设备接管、接口位置的俯视面投影(如图1~图5所示)。

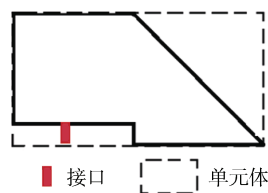


图1 设备单元体示意

Figure 1 Schematic diagram of an equipment unit

制冷水系统内的大多设备外形均不规则(设备俯视面非标准矩形)。本方法将这些设备的单元体定义为能够覆盖设备(包括接口)的投影面的矩形。这一做法虽然简化了单元体并降低了优化难度与复杂度,但在一定程度上将设备以外的空间也计入了设备单元体内

部,会造成后续优化时浪费一部分空间,使得优化结果无法达到理论最优。

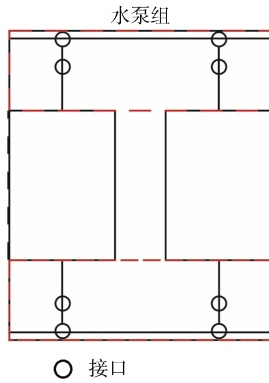


图2 冷冻水/冷却水泵组单元体
Figure 2 Schematic diagram of the chilled water/cooling water pump unit

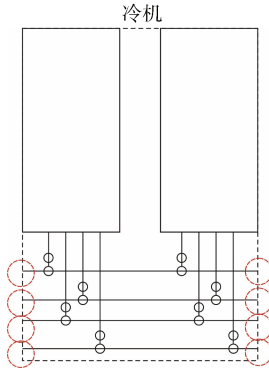


图3 冷水机组群整体单元体
Figure 3 Schematic diagram of the overall unit of the chillers group

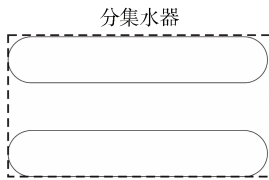


图4 分集水器单元体
Figure 4 Schematic diagram of the integrated water distributor-collector unit

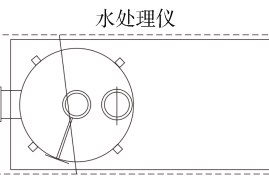


图5 水处理仪单元体
Figure 5 Schematic diagram of the water treatment unit

1.2 设备间斥力模型

为保证设备的正常安装、运行、检修,在定位环

控机房内设备时,应当保证设备之间留有正常间距,且设备之间互相不应发生重叠^[11]。基于这个目标,本方法定义斥力函数,计算所有单元体之间两两互相的斥力,斥力与单元体之间间距呈负相关。当单元体之间存在重叠时,斥力趋向无穷大。任意两个单元体之间的斥力计算如下:

$$D_x = \text{abs}(X_A - X_B) - (L_{A,x} + L_{B,x}) / 2 - D_{\text{safe}} \quad (1)$$

$$D_y = \text{abs}(Y_A - Y_B) - (L_{A,y} + L_{B,y}) / 2 - D_{\text{safe}} \quad (2)$$

$$R_x = \begin{cases} \frac{f_R}{D_x} & D_x > 0 \\ 0 & D_x \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$R_y = \begin{cases} \frac{f_R}{D_y} & D_y > 0 \\ 0 & D_y \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$R_{AB} = R_{BA} = \begin{cases} R_x + R_y & D_x > 0 \text{ or } D_y > 0 \\ \frac{1}{f_{\text{punish}}} & D_x \leq 0 \text{ and } D_y \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, A 表示设备群 A 对应的单元体, B 表示设备群 B 对应的单元体, x 与 y 分别为设备单元体中心位置(即图2中虚线长方形的中心)对应的 x 轴坐标和 y 轴坐标; L_x 与 L_y 分别表示单元体的 x 轴方向和 y 轴方向长度; D_x 与 D_y 分别为两个单元体在 x 方向和在 y 方向的斥力当量距离; f_R 为斥力系数, 其与 D_x 和 D_y 相除后得到无量纲的单方向斥力。 f_R 与设备之间 x/y 方向斥力为正比关系, 因此可被视为斥力的放大系数, 该参数被定义得越大, 则设备间无量纲斥力的绝对值越大。本研究将 f_R 取 1 000 mm, 意义为当两设备之间的单方向间距相比安全间距仍有 1 000 mm 余量时, 斥力计算结果为 1。

D_{safe} 为两设备之间为保证正常设备安装、检修的最小安全间距; R_x 与 R_y 分别为两个单元体在 x 轴和 y 轴方向上的斥力分量(无量纲); R_{AB} 和 R_{BA} 为 A、B 两个单元体之间的总斥力(无量纲), 假如两个单元体之间不重叠且间距大于安全间距, 则总斥力等于 R_x 与 R_y 之和, 否则总斥力趋近无穷大(f_{punish} 被定义为极小值, 例如 10^{-6})。

1.3 设备与机房结构之间的作用力模型

在设备布局时, 设备与机房结构之间应留有足够的安全间距, 假如单元体与机房结构之间距离小于安全距离, 单元体将会受到来自机房结构的无穷大斥力。

另一方面,一般在满足边缘安全距离的情形下,更希望设备离机房结构更近,这样可以为后续机房中部的各类管线留出足够的空间。这表现为:当单元体与机房结构之间的间距大于安全间距时,边缘将对设备施以作用力,其大小与离机房结构的距离为正相关。式(6)为将机房结构对设备的作用力表达为房间中心对设备的斥力。

$$R_{\text{border},i} = \begin{cases} (D_i - D_{\text{safe},\text{border}}) \times f_{\text{border}} & D_i \geq D_{\text{safe},\text{border}} \\ \frac{1}{f_{\text{punish}}} & D_i < D_{\text{safe},\text{border}} \end{cases} \quad (6)$$

$$R_{\text{border}} = \sum_{i=1}^4 R_{\text{border},i} \quad (7)$$

式中, R_{border} 为设备群单元体所受机房结构的作用力; $R_{\text{border},i}$ 为设备单元体的第 i 条边所受机房结构的作用力; D_i 表示单元体的第 i 条外形边缘距离机房结构最近的点,与机房结构之间距离, mm; $D_{\text{safe},\text{border}}$ 为预定义的设备离机房结构安全距离, mm; f_{border} 为机房结构对设备的作用力系数, mm^{-1} , 该参数与设备和机房结构之间作用力为成正比关系,因此可被视为作用力的放大系数,其被定义得越大,则设备与机房结构之间的无量纲作用力的绝对值越大,本研究将 f_{border} 取 1 mm^{-1} ,即当设备与机房结构之间的单方向间距相比安全间距仍有 100 mm 余量时,作用力计算结果为 100 , f_{punish} 被预定义为极小值(如 10^{-6})以用于惩罚不合理的摆放(设备离墙过近)。

1.4 机房内整体合力模型

1.2 节与 1.3 节所述所有力的合力(所有单元体所受的各项力的总和)即为本方法优化过程中的优化目标,通过式(8)计算。该合力在后续优化过程中,也被作为优化目标。

$$F_{\text{sum}} = \sum_{j=1}^n R_j + R_{\text{border},j} \quad (8)$$

式中, j 表示第 j 个设备群; F_{sum} 为所有设备群所受合力; n 为设备群单元数(当机房内同时包含冷却水泵组、冷冻水泵组、冷水机组群、分集水器、水处理仪时, n 为 5)。

1.5 基于差分进化算法的设备群单元体定位优化过程

本方法基于差分进化算法调整每个设备群单元体的空间定位。差分进化算法是一种模拟生物种群进化过程的启发式寻优算法,该算法通过初始化种群、模

拟种群变异、种群交叉、自然选择、判断进化过程终止等操作来模拟种群进化过程并在解空间中找到最优值^[12]。该算法对各类工程优化问题有较好的适应性^[13]。本环节实现的基本流程为:

1) 起始状态下,用户需按以下要求摆放所有设备群单元体至初始位置:一是设备与设备之间不发生碰撞;二是设备与机房结构之间不发生碰撞;三是按照冷冻水与冷却水的流动方向依次排列各类型设备群单元体。随后本方法计算当前所有设备群单元体的总体合力,记作 $F_{\text{sum},1}$ 。

2) 在寻优前,本方法需先定义可优化自变量,即每个设备群单元体的横纵坐标偏移值,共 10 个自变量。该 10 个自变量均为 0 时,所有设备群单元体的坐标为初始坐标,当任一自变量的值为 a 时,该自变量对应的设备群单元体的坐标值即为初始值+ a 。在此基础上,本方法需定义每个自变量的调整范围,本方法将调整范围定为 $(-5\ 000, 5\ 000)$,即每个设备群单元体的横纵坐标均可在初始值的 $\pm 5 \text{ m}$ 范围内变化。

3) 随后本方法开始使用 Python 平台的第三方库 Scipy 实现差分进化算法寻优^[12]。将合力计算函数(内含各设备群单元体的初始坐标和区域边界坐标),以及各自变量的调整范围传入 Scipy 库的 differential_evolution 方法,寻找合力最小的解(即算法认为“最优”的各台设备坐标偏移量)及其对应的合力。需要指出,差分进化算法是一种启发式优化算法。为解决优化问题,该算法内部会初始化种群,并通过变异、交叉、选择三步循环迭代,逐步找到收敛解。因此,差分进化算法运行时可能出现无法得到收敛解(算法给不出一个显式结果)、收敛解并非最优解(算法未找到合力最小的布置方案)的问题。为应对发散问题,理论上需要调节差分进化算法的 3 个核心超参数:缩放因子、交叉概率和种群规模^[14-15]。但本研究使用的 Scipy 库对于差分进化算法的超参数已做了工程化调优,能够适配维度低于 30 的工程优化问题,因此本研究不调整差分进化算法的 3 个核心超参数。

为应对发散风险,使用简单的处理方法:面对给定的机房空间,反复运行 10 次优化步骤,观测 10 次优化结果中是否有收敛解。若有收敛解,则观察 10 次优化结果中的收敛解中,合力最小的解是否触发了安全间距惩罚(即合力大于 $\frac{1}{f_{\text{punish}}}$)。假如合力最小的解并未触发安全间距惩罚,则将该解保留(视为较优可用

解),并认定当前给定的机房空间可以实现安全的设备布置。若 10 个解中无收敛解,或合力最小的收敛解依然触发了安全间距惩罚,则认定当前给定的机房空间无法实现安全的设备布置。

4) 假如完成第 3)步后,获得了收敛解,且最小收敛解未触发设备之间的安全间距惩罚以及设备与机房结构的安全间距惩罚,则使用 1.6 节所述的小步长收缩方法以缩小给定区域面积(即调整区域边界坐标),随后重复第 3)、4)步。

1.6 小步长收缩给定空间

为探求最小的水系统设备布置空间,本文设计了小步长收缩给定空间的过程。地铁站环控机房的俯视形状基本为长方形,长边与地铁轨道平行,短边与地铁轨道垂直。水系统设备往往被布置在机房内的一片更小的长方形区域(见图 6)。本方法在每次差分进化优化完成后,将水系统设备给定空间的长方形的长边缩短 100 mm,然后再进行一轮差分进化以优化水系统设备定位。该过程与差分进化寻优过程交替进行,以实现寻求最小的水系统设备的布置空间,进而节约机房空间。当区域面积缩小至差分进化算法无法找到不触发惩罚的设备布置方案时,即认为找到了环控系统水系统所需的最小布置面积。

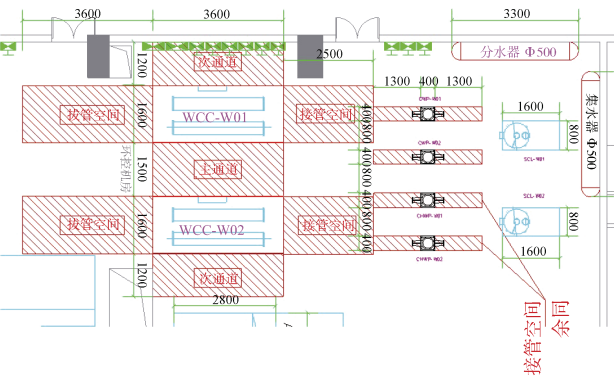


图 6 某地铁站大端环控机房中制冷水系统布局
Figure 6 Layout plan of the chilled-water system in the large-end environmental control room of a metro station

2 案例实现分析

2.1 案例系统设备群单元体初始化

以某地铁站的环控机房内部的空调水系统(图 6 系统)为例阐述本方法的具体实现过程,并将本方法自动优化前后的水系统设备布置情况、占地面积进行对比,分析本方法的效用。该案例机房内,实际可摆放水系统设备的区域约为 7 m×15 m 的长方形区域,水系统设

备数量与实际尺寸如表 1 所示。

表 1 案例系统各设备实际尺寸
Table 1 Actual dimensions of equipment in the case system

设备	单台设备尺寸(含接口)	台数
冷水机组	长度 3 600 mm, 宽度 1 600 mm, 高度 2 000 mm	2
冷冻水泵	长度 3 000 mm, 宽度 400 mm, 高度 1 200 mm	2
冷却水泵	长度 3 000 mm, 宽度 400 mm, 高度 1 200 mm	2
分水器	直径 500 mm, 长度 3 300 mm	1
集水器	直径 500 mm, 长度 3 300 mm	1
水处理仪	长度 1 600 mm, 宽度 800 mm	2

在本案例分析中,将 5 类实际设备群抽象为 5 个设备群单元体。同类型多台设备被整体定义为单个设备群单元体,设备群单元体的尺寸依据 1.1 节所述方式定义。同类型设备的安装间距取设备手册中规定的设备间安全距离。定义完成后,各设备群单元体尺寸如表 2 所示。各单元体之间的安全间距以及各单元体距离机房结构的安全间距依据本案例机房的实际需求取得^[16-18],如表 3 所示。使用本方法优化具体的环控机房时,应根据实际设备的设备手册以及实际机房的需求,确定各类安全距离。

表 2 案例系统各设备群单元体尺寸
Table 2 Dimensions of equipment cluster units in the case system

设备	设备群单元体尺寸		设备群内部安全间距/mm
	x 轴方向/mm	y 轴方向/mm	
冷水机组(2 台平行)	3 600	4 700	1 500
冷冻水泵组(2 台平行)	3 000	1 600	800
冷却水泵组(2 台平行)	3 000	1 600	800
分水器与集水器	1 500	3 300	500
水处理仪组(2 台平行)	1 600	2 400	800

表 3 案例系统各设备群单元体之间的安全间距、单元体与机房结构的安全间距

Table 3 Safety clearances equipment-cluster units and between the units and the room structure in the case system

设备群单元体	冷水机组	冷冻水泵组	冷却水泵组	分水器与集水器	水处理仪组
冷水机组					
冷冻水泵组	2 500 mm				
冷却水泵组	2 500 mm	800 mm			
分水器与集水器	2 500 mm	2 000 mm	2 000 mm		
水处理仪组	2 500 mm	800 mm	800 mm	800 mm	
机房结构	1 000 mm	1 000 mm	1 000 mm	0 mm	1 000 mm

在定义完成设备群单元体后,本案例分析将给定一个初始水系统设备布置区域,该区域初始为 $7\text{ m}\times 15\text{ m}$,区域面积会随着优化过程逐渐收缩(区域右边缘逐渐向左移动),最终停止在本方法能找到的最小面积,并初始化各单元体的位置,人工按照冷却水与冷冻水的流动方向,将各类型设备群单元体依序分散摆放至初始区域,如图7所示。各设备被人工初始摆放至 $7\text{ m}\times 15\text{ m}$ 的初始区域,具体位置如下:分集水器、水处理仪、冷水机组三类单元体在 y 轴方向居中摆放;冷却水泵、冷冻水泵两类单元体在 y 轴方向与冷机单元体上下边缘平齐。在 x 轴方向,分集水器单元体被摆放至紧贴区域左边缘位置,因为分集水器单元体可以贴墙放置。冷水机组单元体被摆放至紧贴区域右边缘,这是因为区域右边缘不是墙体,右边缘以外依然是机房内部空间,因此水系统设备不需考虑与区域右边缘的安全间距。同时各单元体之间的初始间距满足表3中的安全间距要求。

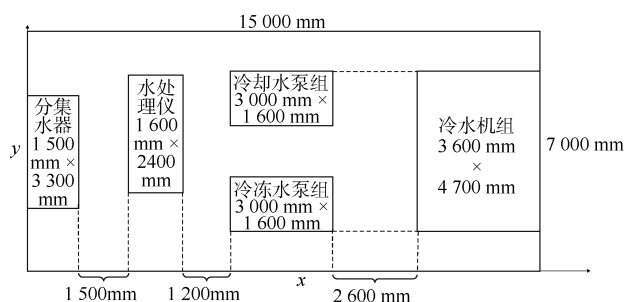


图7 优化前水系统设备群初始状态($7\text{ m}\times 15\text{ m}$)

Figure 7 Initial water-system equipment clusters before optimization ($7\text{ m}\times 15\text{ m}$)

总之,在人工摆放各单元体初始位置时,需要考虑单元体与单元体之间的安全间距,还应考虑单元体与机房结构之间的安全间距,但不需要考虑压缩水系统设备空间的目标,该目标将由后续的自动优化过程实现。

2.2 优化设备单元体布置

将设备群单元体的坐标、水系统设备群区域面积初始化完成后,本节定义斥力模型参数 $f_R=1\,000\text{ mm}$, $f_{\text{border}}=1\text{ mm}^{-1}$, $f_{\text{punish}}=10^{-6}$ 。参数标定的具体方法见2.3节。

随后本案例分析交替执行1.5节和1.6节所述过程,反复在给定的区域内寻找最优的设备群单元体布置解,并逐步缩小给定区域,直至无法找到不触发安全间距惩罚的解。表4和图8展示了给定区域从初始的 $7\text{ m}\times 15\text{ m}$,逐步被缩小至 $7\text{ m}\times 14.2\text{ m}$ 的过程中,每种

面积所对应的最小(最优)合力。由表4和图8可见,当给定区域缩小至 $7\text{ m}\times 14.2\text{ m}$ 时,优化算法无法再找到不触发安全间距惩罚的设备群单元体布置方案,因此该案例水系统所需的最小区域为 $7\text{ m}\times 14.3\text{ m}$ 。表5展示了在给定的区域为 $7\text{ m}\times 14.3\text{ m}$ 时,优化算法给出的最优布置方案下,所有设备单元体的 xy 向坐标相比于初始布置方案的位移量。

表4 不同区域面积下,差分进化优化所得的最小系统合力

Table 4 Minimum system resultant force obtained by differential evolution optimization under different spatial areas

区域尺寸	差分进化算法寻找到的最小合力
$7\text{ m}\times 15.0\text{ m}$	71 714.85
$7\text{ m}\times 14.9\text{ m}$	71 215.75
$7\text{ m}\times 14.8\text{ m}$	70 717.51
$7\text{ m}\times 14.7\text{ m}$	70 218.96
$7\text{ m}\times 14.6\text{ m}$	69 720.95
$7\text{ m}\times 14.5\text{ m}$	69 223.64
$7\text{ m}\times 14.4\text{ m}$	68 727.65
$7\text{ m}\times 14.3\text{ m}$	68 232.18
$7\text{ m}\times 14.2\text{ m}$	1 068 210.30(无法找到非惩罚解)

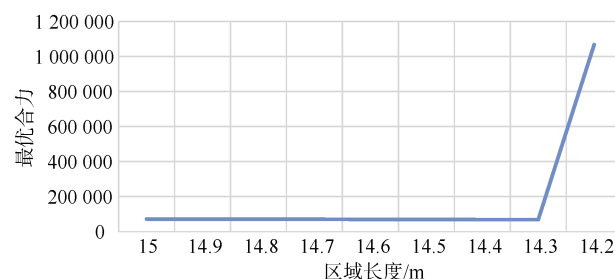


图8 不同区域面积下,差分进化优化所得的最小系统合力

Figure 8 Minimum system resultant force obtained by differential evolution optimization under different spatial areas

表5 最终优化方案下各设备单元体的坐标移动量

Table 5 Coordinate displacement of all equipment units under the final optimization plan

设备单元体	相比初始布置方案的坐标移动量/mm	
	x	y
冷水机组	-700.37	63.45
冷冻水泵组	-796.27	-85.14
冷却水泵组	-790.62	138.96
分水器与集水器	0.10	-1 209.92
水处理仪组	-571.40	-963.83

图9和表5共同展示了当给定区域为 $7\text{ m}\times 14.3\text{ m}$ 时,优化算法给出的最优布置方案。由图9和表5可见,在寻优过程中,由于分集水器与墙壁的最小安全

间距为 0，因此优化算法将分集水器单元体的位置向区域左下角墙角调整，既利用了墙角位置，又为其他设备留出更多空间。在优化布置后，水处理仪器单元体与其他设备的间距缩小了，这是由于水处理仪器单元体与其他设备之间的安全距离限值较小(800 mm)。同时，可以发现冷水机组被优化算法布置在贴近区域右边缘位置，这是因为区域右边缘不是机房墙壁，设备与右侧边缘的安全距离为 0。因此冷机单元体在不超出右侧边缘的前提下，其越贴近边缘，越能给中央设备单元体留出更多布置空间，降低系统总合力。本研究方法的优化程序可在不同项目中复用，只需要根据实际案例中的具体情况定义设备单元体尺寸与初始位置，即可实现使用程序优化设备布置并压缩制冷水系统占地面积，优化时间不超过 1 min。经评估，人工优化本案例机房的制冷水系统设备布置并缩减制冷水系统占地面积，需 1~2 d。由于本方法的优化程序可复用，且反复执行优化过程的操作简易，因此可在一定程度上减少工作量。

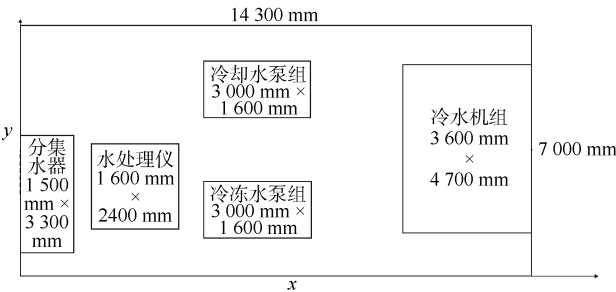


图 9 优化后水系统设备群布置方案(7 m×14.3 m)

Figure 9 Optimized layout plan for the water-system equipment clusters (7 m×14.3 m)

2.3 斥力模型参数标定讨论

f_R 与 f_{border} 的设定与本方法的式(3)~式(6)相关：在模型定义过程中，为了鼓励优化方法扩大设备间距，缩小设备-结构间距(利用结构附近的空间)，斥力模型使用除法计算设备间斥力，使用乘法计算设备-结构间作用力。这导致在 f_R 与 f_{border} 的比不够大时，设备间斥力在系统总合力中的占比会显著小于结构作用力，使得设备间斥力项可能不起作用。因此应设定 f_R 高于 f_{border} 几个数量级。

本节测试了案例系统在初始状态下，不同参数比 ($f_R : f_{border}$) 计算的设备间总斥力和设备-结构总作用力如表 6 所示。在 f_R 是 f_{border} 的 10^6 倍时，初始布置方案下两种力的量级一致。而由于在优化过程中，机房面

积会被逐渐压缩，这会使得设备间斥力上升而设备-结构间作用力下降，因此 f_R 与 f_{border} 的比例应小于 10^6 倍，可取 $10^3 \sim 10^5$ (见图 10)，以避免优化后期设备-结构间作用力在总合力中不起作用。

表 6 不同比例的斥力参数下，案例系统初始状态的系统合力
Table 6 System resultant force of the initial state of the case system under different repulsion-parameter scales

参数	设备间总斥力	设备-结构总作用力
$f_R=10^6, f_{border}=1$	29 094.40	71 700.0
$f_R=10^5, f_{border}=1$	2 909.44	71 700.0
$f_R=10^4, f_{border}=1$	290.94	71 700.0
$f_R=10^3, f_{border}=1$	29.09	71 700.0

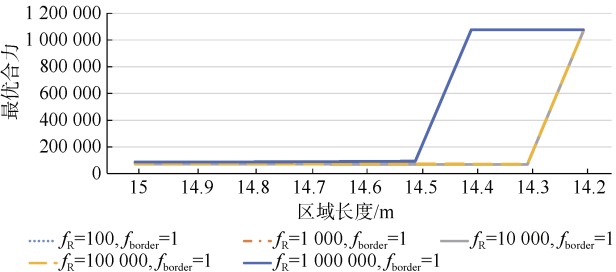


图 10 不同区域面积和斥力模型参数下，差分进化优化所得的最小系统合力

Figure 10 Minimum system resultant force obtained by differential evolution optimization under different spatial areas and repulsion-model parameters

在确定 f_R 与 f_{border} 两者的比例后，应按照合力绝对值确定 f_{punish} 。设定 f_{punish} 的原则是：要保持安全间距约束，则惩罚斥力应当比正常合力大几个数量级。本文案例中正常合力量级(表 6)为 10^4 级，因此 f_{punish} 被设定为 10^{-6} 。

本节测试在若干组不同的 f_R 与 f_{border} 下，使用本方法优化布置案例系统的效果，如图 10 所示， f_R 与 f_{border} 的比例在 $10^3 \sim 10^5$ 时，优化结果差异较小。

3 结论

本文提出了一种基于斥力模型的地铁站环控机房水系统设备自动空间优化方法，该方法将地铁站环控机房内的水系统设备(冷机、冷冻水泵、冷却水泵、分集水器、水处理仪)，按照设备类型定义为不同的设备群单元体。同时，本方法定义了各单元体之间、各单元体与机房墙壁之间的斥力模型，并将所有单元体所受合力作为优化单元体布置的优化目标。本方法使用差分进化算法优化单元体在给定区域内的布置方案，同时逐步压缩给定区域，最终自动找到水系统设备所

需的最小布置区域。

本研究以某地铁站环控机房作为案例分析验证本方法的有效性,将该案例机房中制冷水系统设备群的总占地面积由 $7\text{ m}\times 15\text{ m}$ 降低至 $7\text{ m}\times 14.3\text{ m}$,并保持了设备之间必要的安全间距。

本方法的不足之处:设备布置方案会影响到检修空间以及管线路径,而检修空间和管线路径又会影响到后期系统运行(水系统阻力与能耗)、人工维护的成本。因此,完整的设备优化布置方法应当综合考虑前期的安装面积成本与后期运维成本,以寻找总成本最低方案。但目前本研究尚未显式考虑改变设备布置对检修难度、管线路径的影响,仅通过简化方式降低由于压缩系统占地带来的潜在运维难度:①本文为优化方法设置了较为严格且留有余量的安全间距以避免检修、走管间距过小;②本研究在定义设备单元体时,将设备主体以外的接头、接管位置均包含进设备单元体内,因此矩形设备单元体尺寸会略大于设备的主体尺寸,这也给实际机房布置留出了一部分空间余量。未来应进一步定量显式考虑设备布置对管线布置和后期检修的影响,并以总成本(建设+维护)作为优化布置目标。

本方法通过构建数字化模型与智能算法相结合的创新技术体系,既能实现环控机房水系统设备群的自动优化布置,又能自动探求设备群所需的最小布置区域面积,进而提高地铁站环控机房的平面优化设计效率,以及设备布置合理度和空间利用率。同时,相比于现有的环控机房优化设计解决方案,本方法对于常规的设计方案的改动幅度较小,且应用成本较低,更易于融入常规设计流程。笔者认为在未来的建筑设计工作中,更多的自动化设计方法、自动化软件将被开发出来并作为工程师的辅助工具,且这类工具的能力与易用性也将会逐渐提升,这有助于进一步提高建筑设计工作的生产力与效率。

参考文献

- [1] Lin Dong, Broere W, Cui Jianqiang. Metro systems and urban development: Impacts and implications[J]. Tunnelling and underground space technology, 2022, 125: 104509.
- [2] 魏薇. 地铁车站建筑规模减量化策略研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(12): 21-24.
- [3] 义剑峰. 地铁车站规模压缩思路研究[J]. 路桥工程 2024, 1(7): 204-206.
- [4] 陈娟. 地铁地下车站环控设计问题分析[J]. 暖通空调, 2006, 36(2): 76-78.
- [5] Sheng Tao, Xiong Yun, Wang Haofen, et al. Deep reinforcement learning for community architectural layout generation[J]. Knowledge and information systems, 2025, 67(3): 2453-2480.
- [6] Mirhoseini A. Chip Placement with Deep Reinforcement Learning[J]. arXiv, 2020. 2004(10746): 1-15.
- [7] Fan Zhaoxiang, Liu Mengxuan, Tang Shuoning, et al. Multi-objective optimization for gymnasium layout in early design stage: Based on genetic algorithm and neural network[J]. Building and environment, 2024, 258: 111577.
- [8] 王龙, 王培海. 关于车站中部设置环控机房的地铁环控系统探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2022(5): 94-99.
- [9] 罗曼, 刘舸争, 黄际政, 等. 一种高空间利用率及维护便捷的装配式地铁车站环控机房: CN215168501U[P]. 2021-12-14.
- [10] 龚伟. 地铁车站负荷率与不同类型环控设备能效参数对比分析[J]. 暖通空调, 2024, 54(增刊 2): 457-461.
- [11] 杨洋, 许仁杰, 那艳玲, 等. 地铁制冷机房管路阻力优化特性与能耗影响分析[J]. 暖通空调, 2025, 55(S1): 327-331.

Wei Wei. Research on the scale reduction strategy of subway

station building[J]. Engineering and technological research, 2024, 9(12): 21-24.

- [3] 义剑峰. 地铁车站规模压缩思路研究[J]. 路桥工程 2024, 1(7): 204-206.
- [4] 陈娟. 地铁地下车站环控设计问题分析[J]. 暖通空调, 2006, 36(2): 76-78.
- [5] Sheng Tao, Xiong Yun, Wang Haofen, et al. Deep reinforcement learning for community architectural layout generation[J]. Knowledge and information systems, 2025, 67(3): 2453-2480.
- [6] Mirhoseini A. Chip Placement with Deep Reinforcement Learning[J]. arXiv, 2020. 2004(10746): 1-15.
- [7] Fan Zhaoxiang, Liu Mengxuan, Tang Shuoning, et al. Multi-objective optimization for gymnasium layout in early design stage: Based on genetic algorithm and neural network[J]. Building and environment, 2024, 258: 111577.
- [8] 王龙, 王培海. 关于车站中部设置环控机房的地铁环控系统探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2022(5): 94-99.
- [9] 罗曼, 刘舸争, 黄际政, 等. 一种高空间利用率及维护便捷的装配式地铁车站环控机房: CN215168501U[P]. 2021-12-14.
- [10] 龚伟. 地铁车站负荷率与不同类型环控设备能效参数对比分析[J]. 暖通空调, 2024, 54(增刊 2): 457-461.
- [11] 杨洋, 许仁杰, 那艳玲, 等. 地铁制冷机房管路阻力优化特性与能耗影响分析[J]. 暖通空调, 2025, 55(S1): 327-331.

- Yang Yang, Xu Renjie, Na Yanling, et al. Optimization characteristics of pipeline resistance in subway refrigeration room and analysis of energy consumption impact[J]. Heating ventilating & air conditioning, 2025, 55(S1): 327-331.
- [12] Storn R, Price K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of global optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [13] 王掩刚, 奚宁宁, 胡佳伟, 等. 基于差分进化算法的串列叶型优化研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(6): 1223-1230.
- Wang Yangang, Xi Ningning, Hu Jiawei, et al. Investigation of differential evolution algorithm for a tandem cascade optimization[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(6): 1223-1230.
- [14] Zhang Jingqiao, Sanderson A C. JADE: adaptive differential evolution with optional external archive[J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2009, 13(5): 945-958.
- [15] Tanabe R, FUKUNAGA A S. Improving the search performance of SHADE using linear population size reduction[C]//2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). July 6-11, 2014, Beijing, China. IEEE, 2014: 1658-1665.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB 50736—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑给水排水设计标准: GB 50015—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of building water supply and drainage: GB 50015—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 通风与空调工程施工质量验收规范: GB 50243—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code of acceptance for construction quality of ventilation and air conditioning works: GB 50243—2016[S]. Beijing: China Planning Press, 2017.

(编辑: 王艳菊)

封面车站设计理念

武汉地铁2号线珞雄路站地处光谷广场珞雄路口, 是光谷广场综合体的重要组成部分。车站周边环境着丰富的商业资源与充满活力的大学城, 设计以“霓流花韵”为主题, 巧妙融入武汉闻名遐迩的樱花元素, 将现代艺术感与生命感交融共生, 让一切自然发生, 营造出舒适且富有灵性的空间。

车站空间依托建筑特有的高挑结构, 将站厅层打造成通透的拱形空间。以立柱为中心, 提炼花朵的形态, 大片的仿生花柱拔地而起, 连接天地。顶面绘有渐变色彩的“花海”天花板, 花瓣层层晕染, 仿佛春风拂过; 搭配灵动、浪漫的蝴蝶装置, 结合蒲公英主题艺术墙《飞翔》, 以动态线条展现种子随风飘扬的生机, 营造出富有韵律的艺术氛围, 象征光谷中心如樱花般绚烂绽放、蓬勃向上的生命力。

这一灵动飘逸的车站空间, 已成为兼具艺术性与功能性的城市地标, 彰显武汉独特的城市美学。

北京城建设计发展集团股份有限公司 倪爽 供稿