

文章编号: 1671-6612 (2026) 03-460-05

城市轨道交通高效制冷机房建设的探讨

陆良宇 李嘉辰 朱 斌 李建飞

(合肥通用机械研究院有限公司 合肥 230031)

【摘 要】 探讨了城市轨道交通高效制冷机房的发展现状与建设技术路线。通过对具备先进性策略的制冷机房案例进行运行数据监测,结果表明其夏季系统能效比达到 6.03kWh/kWh,符合“领跑级”标准。进一步的经济性分析表明,虽然高效机房存在一定的增量投资,但全生命周期内具备显著的经济效益与环保效益。研究成果为后续城市轨道交通高效制冷机房的改进与建设提供参考。

【关键词】 高效制冷机房; 系统能效比; 城市轨道交通; 运行数据监测

中图分类号 TU83 文献标志码 A

Discussion on Efficient Cooling Machine Rooms for Urban Rail Transit

Lu Liangyu Li Jiachen Zhu Bin Li Jianfei

(Hefei General Machinery Research Institute Co., Ltd, Hefei, 230031)

【Abstract】 This paper explores the current development status and construction technology routes of high-efficiency cooling machine rooms in urban rail transit. By monitoring operational data of cooling machine rooms with advanced strategies, the results indicate that their system energy efficiency ratio in summer reaches 6.03 kWh/kWh, meeting the 'leading level' standard. Further economic analysis shows that although high-efficiency machine rooms involve certain incremental investments, they offer significant economic and environmental benefits over their entire lifecycle. The findings of this study provide a reference for the improvement and construction of high-efficiency cooling machine rooms in urban rail transit.

【Keywords】 High-efficiency refrigeration room; System efficiency ratio; Urban rail transit; Operational data monitoring

0 引言

城市的不断发展,离不开轨道交通的支撑,其给我们生活和工作中带来的便利性不言而喻。城市轨道交通在飞速发展的同时,能耗却一直居高不下,当前轨道交通系统运行过程中空调系统占总能耗的比例最高,约占总量的 60%~70%^[1]。随着国际形势下绿色低碳发展的推进,积极参与节能减排,降低能源消耗,实现可持续发展变得举足轻重。而制冷机房作为城市轨道交通系统中能耗占比最高的一环,提高能效从而有效地降低系统总能耗,意义非凡。本文对城市轨道交通高效制冷机房实现的技术路线进行探讨,结合实际案例的跟踪监测及分析,从而为城市轨道交通系统高能效制冷机房的

设计及改进提供参考。

1 城市轨道交通高效制冷机房的现状

目前,空调制冷机房系统能效比 Energy Efficiency Ratio of Chiller Plant System (EERs),也就是空调制冷机房系统总制冷量与总耗电量的比值,即所有冷水机组的制冷量之和与所有冷水机组、冷水泵、冷却水泵及冷却塔的耗电量之和的比值,是国际上衡量制冷机房效率的通用指标^[2],其单位用 W/W 或 kWh/kWh 表示。美国采暖、制冷与空调工程师学会 ASHRAE 针对制冷机房提出的分级要求,规定制冷季平均能效 COP $\geq$ 5.0 的制冷机房为高效^[3];新加坡 BCA 推行的绿建标准

GREEN MARK 更注重实测运营效率, 由新加坡住建部门对其监测运行 1 年后验收评审, 该认证不仅关注建筑的能源效率, 还从材料选择、水资源管理、室内环境质量等多个维度进行综合评估^[4]。国内由中国制冷空调工业协会与中国勘察设计协会发布的标准 T/CRAAS 1039-2023(T/CECA 20026-2023)《高效空调制冷机房系统能效监测与分级标准》, 规定了高效空调制冷机房系统监测、数据的存储要求、能效的分级评价等要求^[5], 标准将目前高效空调制冷机房系统能效分为 4 个等级, 分别是三级、二级、一级和领跑级, 领跑级为最高等级。

目前高效制冷机房评价标准主要针对的是建筑领域的空调制冷机房系统, 并非为轨道交通领域制定, 虽然 T/CRAAS 1039-2023 标准本身主要面向公共建筑, 但其对“领跑级”能效的界定和评价方法, 为分析轨道交通这一特定高能耗场景提供了关键的参照框架。相较于普通公共建筑, 轨道交通制冷机房实现并推广“领跑级”能效面临更大挑战, 核心难点在于:

(1) 负荷极端复杂且瞬变

内外热源交织: 地铁系统同时存在列车牵引、制动、空调、照明、人员等巨大内部产热, 以及通过活塞风井、出入口与外界交换的复杂外部负荷, 导致冷负荷计算异常困难。

瞬时冲击负荷: 列车到发、早晚高峰客流会造成制冷负荷的剧烈、瞬时波动, 对机组的快速响应和稳定运行提出极高要求, 传统系统很难始终保持高效。

(2) 运行时间与空间的特有限制

“全时部分负荷”运行: 为保障车站环境, 制冷系统在夜间停运后仍需长时间运行以消除余热, 但其时负荷率极低。如何在这种“全时但极低负荷”工况下保持高效, 是巨大挑战。

设备空间极度紧张: 地下车站空间昂贵且局促, 往往难以容纳为追求最高能效而优化的、可能体积更大的设备。

(3) 初投资与改造壁垒高

高昂的初始成本: 达到“领跑级”需采用磁悬浮离心机组、智能群控系统、高效水泵冷却塔等顶级设备和控制系统, 初始投资远高于常规方案。

既有站点改造困难: 对运营中的线路进行制冷系统升级改造, 面临施工窗口期短、不能影响正常

运营、管线拆改困难等巨大障碍, 技术风险和成本激增。

(4) 设计与运维的协同挑战

设计-施工-运维脱节: 传统的分段管理模式, 容易导致高效的设计理念在施工阶段被打折扣, 或在运维阶段因理解不足、策略不当而无法实现预期能效。

缺乏专业复合型人才: 能实现“领跑级”持续运行需要既懂暖通, 又精通自动化控制和轨道交通运营特性的复合型团队, 此类人才稀缺。

2 实现城市轨道交通高效制冷机房建设的技术路线

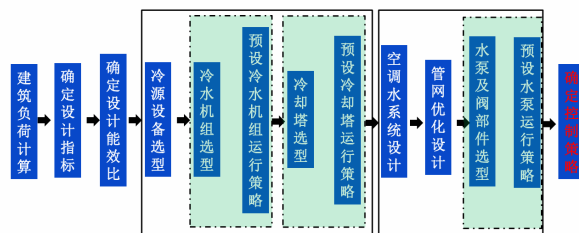


图 1 制冷机房建设的技术路线

Fig.1 Technical plan for building a chiller room

制冷机房从设计到建设运行需要多个学科的相互配合, 其技术路线如图 1 所示, 包括建筑的负荷计算及模拟, 整体方案设计, 设备选型, 管网优化, 能源系统管理及制定运行策略等。结合技术路线, 城市轨道交通制冷机房“领跑级”的实现可通过以下几个方面:

(1) 前瞻性的顶层设计与充足的预算

战略定位: 在项目规划或可研阶段, 就将能效目标明确为“领跑级”, 并获得决策层的支持与预算保障。

采用高性能核心设备: 选用高效、低阻力的冷水机组如磁悬浮变频离心式冷水机组、直流变频多联机等在最不利和部分负荷工况下均有优异能效表现的设备。因冷冻水进水温度越低, 盘管的换热性能越好, 采取大温差运行策略, 供回水温度 6/13℃ 比传统输配系统冷冻水泵能耗下降约 31%^[6], 降低冷却水供水温度, 减少运行时冷却水流量。

(2) 全生命周期的智能化控制系统

基于 AI 的智能群控: 部署能够根据实时负荷、室外气象参数、电价等因素, 自学习、自适应的冷

站群控系统，动态优化机组、水泵、冷却塔的运行组合和频率。

针对湿度有要求的环境控制，采用温湿度独立控制方案，干式末端通过高温冷水对环境温度进行调控，独立新风系统调节环境湿度，温湿度独立控制技术能够使 COP 提升约 35%^[7]。

融入全站智能能源平台：制冷机房的控制系统需与车站的通风、照明、电扶梯等系统联动，实现能源的综合调度与最优分配。选择可变频控制的风机与水泵，且与控制系统相互联动。

（3）精细化的设计与深度调试

全工况仿真与设计：利用 BIM 数字化技术精细化管理管路水力计算，优化管道布置，从而精准扬程选择。采用低阻力管件如顺水三通，顺水弯头，45°弯头代替 90°弯头等策略，优化后三通、弯头阻力损失可分别减少 66%和 50%^[8]。

严格的深度调试：在系统投入运行前，必须进行超越常规的深度调试，确保每一个部件和控制逻辑都达到设计预期，这是将设计能效转化为运行能效的关键一环。

3 实际案例分析

本文选取了广州市某一具备先进性策略的地铁站制冷机房的全年运行情况进行跟踪测试。

3.1 站点概况

该站点为分站供冷，冷水机房设置在车站负一层，站内采用异程式系统，供水温度为 9℃，回水温度为 17℃，车站总计算冷量 3570kW（1000RT），共设置 3 台冷水机组，主机串联逆流设计，水系统大温差高出水温度。设置 6 台变频冷冻水泵，6 台冷却水泵，4 台冷却塔。

表 1 制冷机房概况

Table 1 Overview of the cooling machine room

机房	概况
负荷特点	外界变化只影响新风负荷，人员站厅层短时间停留，室内设计温度高（暂时舒适）
室内环境	27.00℃
主机	三台高效变频螺杆机，可无极卸载
水泵及冷却塔风机	变频调节运行；冷却塔并联运行，可利用散热面积，降低冷却塔出水温度
空调水系统	BIM 精细化制图及施工督导、加大管径、采用低阻力阀门
空调风系统（末端）	大温差低阻力组空、空调箱及风机盘管末端
运行策略	高效智能环控系统、智能控温、智能启停、智能控载、智能寻优及智能联动

表 2 制冷机房设备配置

Table 2 Equipment configuration of the cooling machine room

设备类型	数量	配置参数
螺杆式冷水机组	2	制冷量：1351kW 制冷名义：COP7.20 压缩机数量：2
螺杆式冷水机组	1	制冷量：903kW 制冷名义：COP7.14 压缩机数量：2
立式冷冻水泵 1	4	额定功率：11kW
立式冷冻水泵 2	2	额定功率：7.5kW
立式冷却水泵 1	4	额定功率：11kW
立式冷却水泵 2	2	额定功率：7.5kW
横流方塔	4	额定功率：5.5kW 冷却水量：208m³/h

如表 1、表 2 所示，该站点的设计及配置具有先进性，其运行采取高效智能环控系统从冷源到末端进行了整体系统优化，冷源主机采用 3 台双机头水冷螺杆冷水机组，即 2 台 380RT（151RT+229RT

的大小双机头螺杆机组）、1 台 255RT（101RT+154RT 的大小双机头螺杆机组），大小机组以及大小机头容量之比约为 100:66，该配机方式可确保主机在全运行周期内高效运行；冷冻水

泵、冷却水泵采用变频调节运行; 空调冷冻水供回水温度设计为 9/17℃, 采用大温差、低流量设计降低冷冻水输配系统能耗; 制冷机房内管路连接形式进行了优化, 并通过加大管径、采用低阻力阀件等措施降低管路的阻力损失。

3.2 测试方法

地铁站制冷机房的测试项目包括制冷机房系统总制冷量、制冷机房系统运行耗电量: 制冷机房系统总耗电量, 制冷机组总耗电量、水泵总耗电量、冷却塔总耗电量、分项耗电量占比, 及综合系统能效比 EERs, 由于夏季是制冷机房运行高峰期, 测试过程覆盖整个夏季(6 月-9 月), 测试所用仪器仪表如表 3 所示。

表 3 系统仪表传感器清单

Table 3 System instrument sensor list		
设备名称	测量参数	精度
铂电阻	水温	精度: ±0.2K
电磁流量计	流量	±0.5%MV
电磁流量计	流量	±0.5%MV
电磁流量计	流量	±0.5%MV
电磁流量计	流量	±0.5%MV
超声波冷热量表	冷量	2 级
超声波冷热量表	冷量	2 级
超声波冷热量表	冷量	2 级
超声波冷热量表	冷量	2 级
电表	功率	0.5 级

3.3 测试结果分析

表 4 制冷机房系统监测数据汇总

Table 4 Summary of monitoring data for the chiller room system				
序号	检查项目		单位	检验数据
1	制冷机房系统制冷运行	制冷机房系统总制冷量	kWh	3017274.300
2		制冷机房系统总耗电量	kWh	500543.900
3		制冷机房机组总耗电量	kWh	412149.400
4		机组总耗电量占比	%	89.68
5	制冷机房系统运行耗电量	水泵总耗电量	kWh	68129.200
6		水泵总耗电量占比	%	7.69
7		冷却塔总耗电量	kWh	20265.300
8		冷却塔总耗电量占比	%	2.63
9	制冷机房系统能效比 EERs	制冷机房系统能效比	kWh/kWh	6.03

如表 4 所示, 通过对广州某地铁站点夏季制冷量及机冷机房耗电量的跟踪监测, 最终计算出该地铁站制冷机房夏季系统能效比 EERs 达到 6.03kWh/kWh, 根据现主流高效机房规范 T/CRAAS 1039-2023《高效集中空调制冷机房系统能效监测及评价标准》^[9], 属于“领跑级”水平。

从图 2 分项耗电量占比图示可以看出, 由于该地铁制冷机房不仅采用了水系统大温差运行策略, 而且基于 BIM 系统的精细化管路设计及施工, 大大降低了循环水输配系统能耗, 其水泵耗电量仅占系统总耗电量 7.69%, 达到先进水平。智能环控系统对冷却塔风机及水泵的联合控制, 进一步提升了系统运行效率, 冷却塔耗电量仅占总系统的 2.63%。制冷机组的耗电量占据了整个制冷机房系统的 89.68%。

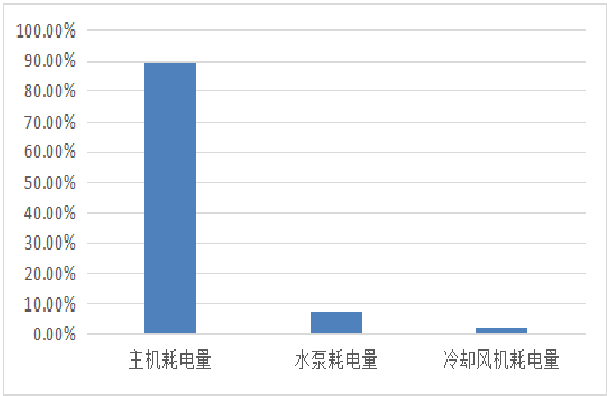


图 2 制冷机组总耗电量、水泵总耗电量、冷却塔总耗电量占比

Fig.2 Proportion of total electricity consumption of the chiller unit, water pumps, and cooling tower

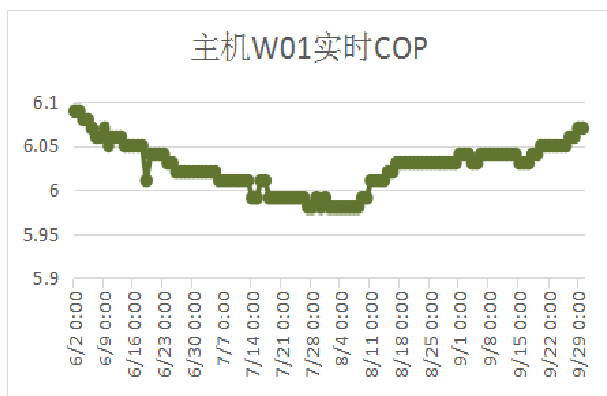


图3 制冷机房系统能效比变化曲线

Fig.3 Variation curve of system energy efficiency ratio of the chiller room

从图3制冷机房系统能效比变化曲线可以看出,由于7月、8月为广州地铁站制冷的高峰期,负荷率较高达到80%以上,此时制冷机房系统能效比较低,约为6.00kWh/kWh。进入秋冬季后,冷机负荷率下降到60%~70%,制冷机组在部分负荷下运行的COP会更高^[10],制冷机房的能效比也会更高。

4 经济性分析

实现“领跑级”高效制冷机房往往需要更高的初始投资,但建筑节能项目的经济型评价需基于全生命周期成本视角进行分析^[11],其在长期运行中产生的节能效益,使其全生命周期成本具备显著优势。本部分将结合前文案例,对高效制冷机房与传统方案进行简要的经济性对比分析。

4.1 增量投资构成

高效制冷机房的增量投资主要来源于以下几个方面:

(1) 核心高效设备:如磁悬浮离心机组、直流变频多联机、高效变频水泵等,其购置成本通常高于常规设备。

(2) 智能控制系统:基于AI的群控系统、全生命周期能效管理平台的软硬件投入。

(3) 精细化设计与深度调试:包括BIM深度应用、系统仿真、水力优化设计及超越常规的深度调试服务所产生的额外技术费用。

4.2 经济效益分析

高效制冷机房的核心经济回报体现在运行电费的显著降低。根据表4监测数据,该案例夏季系

统能效比(EERs)达到6.03。假设一个同等冷负荷(3570kW)的传统地铁站制冷机房,其夏季平均EERs为5.0(行业常见水平)进行对比:案例站点夏季制冷季总耗电量:500543.9kWh,同等负荷传统机房预估耗电量:(3017274.3kWh/5.0)≈603454.9kWh;夏季单季节电量:603454.9-500543.9=102911kWh。电费节约:按工业电价0.8元/kWh计算,夏季单季节节约电费约8.2万元。

4.3 综合效益

除了直接的经济效益,高效制冷机房还带来显著的环境效益(减少碳排放)和社会效益(响应国家双碳战略,提升企业绿色形象)。此外,智能控制系统提升了系统稳定性和可维护性,降低了运维管理强度和故障风险,带来了隐性的管理效益。

5 结束语

本文通过对高效制冷机房技术路线的探讨与广州某地铁站的案例,系统论证了在城市轨道交通这一复杂场景下实现超高能效的可能性与路径。案例监测数据显示,该站点夏季系统能效比(EERs)达到6.03kWh/kWh,满足《高效空调制冷机房系统能效监测与分级标准》(T/CRAAS 1039-2023)的“领跑级”要求。这证明,集成化、系统化的技术路线在实现高效制冷机房中的关键作用。经济性分析表明,尽管高效制冷机房的初投资有所增加,但其可使运行能耗显著下降。本文的研究成果与数据分析,可为后续城市轨道交通高效制冷机房的改进及建设提供参考,助力轨道交通行业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 邓先平.广州地铁环控系统初探[J].地铁与轻轨,1992,(3):5-10,18.
- [2] 张昆,宋业辉,钱程.高效制冷机房性能化设计方法研究[J].暖通空调,2021,51(S1):296-301.
- [3] HARTMAN T.ALL-variable speed centrifugal chiller plants[J].ASHRAE Journal,2001,(9):43-51.
- [4] Building and Construction Authority. Green Mark 2021 certification standard[EB/OL]. [2021-11-1]. <https://www1.bca.gov.sg/buildsg/sustainability/green-mark-certification-scheme/green-mark-2021>.

(下转第470页)