

地铁车站通风空调系统节能运行优化研究

董亚博 班燎原 卞康威

郑州交通发展投资集团有限公司 河南 郑州 450000

摘 要：地铁车站通风空调系统是城市轨道交通基础设施中的能耗大户，其运行优化对于降低运营成本、响应国家“双碳”战略具有重要意义。本文立足于地铁车站通风空调系统的运行特征，系统分析车站冷热负荷的时空分布规律与部分负荷运行特性，揭示当前运行管理中控制策略僵化、负荷匹配不良、设备效率偏低及过渡季全新风利用不足等主要问题。在此基础上，从分时分区精细调控、变流量与变风量控制、多模式群控策略及动态负荷预测等方面提出系统的节能运行优化路径，并探讨实施优化的组织保障与技术支持。研究表明，地铁车站通风空调系统的节能潜力主要蕴藏于“按需供给”的精细化运行管理之中，其核心在于将固定模式运行转变为基于实时负荷的动态智能调控。

关键词：地铁车站；通风空调系统；节能运行；负荷匹配；变流量控制

引言

城市轨道交通的快速发展在缓解城市交通压力的同时，也带来了显著的能源消耗。与此同时，在国家“双碳”战略目标和城市轨道交通绿色转型的双重驱动下，地铁通风空调系统的节能运行已成为行业关注的焦点。与地面建筑空调系统不同，地铁车站通风空调系统面临着独特的运行环境和负荷特征：车站埋于地下，围护结构热惰性大、散热路径复杂；列车活塞效应带来的周期性气流扰动叠加；客流量在日间和季节间呈现显著的峰谷波动，这些因素共同决定了车站空调负荷的时变性和不确定性。然而，当前多数地铁车站的通风空调运行仍采用“定时间启停、定流量运行”的粗放模式，冷冻水系统、冷却水系统和末端风系统的运行策略之间缺乏动态协同，大量能源在非需求时段被无效消耗，存在显著的节能空间。

1 地铁车站通风空调系统的负荷特征与能耗分析

1.1 车站冷热负荷的时空分布规律

地铁车站冷热负荷源自围护结构传热、人员散热、设备散热、活塞风及新风。在时间维度上，负荷呈现显著的双向波动：日波动方面，早晚高峰（8:00—9:00 及 17:30—19:00）因客流激增导致人员和新风负荷急剧上升；夜间停运后虽降至最低，但基础设备仍产生“基础负荷”。季节波动方面，根据 GB/T 51357—2019《城市轨道交通通风空气调节与供暖设计标准》，地铁车站通风空调设计需依据当地室外气象参数确定供暖与空调期^[1]。在空间维度上，站厅与站台负荷分布不均。站厅层受出入口气候及人员进出影响大，波动剧烈；站台层紧邻隧道，受列车活塞风和车辆散热影响显著，尤其在列车频繁进出时，热量传递致使站台温度升高。这种时

空差异表明，“全站统一控制”策略无法适应局部环境变化，必然导致部分区域过冷或过热，亟需实施更精细化的分区调控策略以提升能效。

1.2 部分负荷运行特征与能耗结构

地铁车站空调系统全年长期运行在部分负荷工况下。行业经验表明，地铁车站通风空调系统能耗在车站总能耗中占有较大比重。就其能耗构成而言，冷水机组及水泵通常占据主要部分，末端风系统次之，冷却塔占比较小。按最大负荷选型的主机在多数实际工况下长期处于“大马拉小车”的欠载状态；若缺乏有效的负荷匹配调节手段，主机容易频繁启停或运行于低效率区间，从而导致单位冷量能耗明显上升。

1.3 活塞效应与隧道热环境对空调系统的影响

列车在隧道中高速运行时产生的活塞效应，将隧道内的空气推入或抽出车站，对站内温湿度场形成干扰。在夏季，隧道空气温度较高（通常比站内空气温度高 3~5℃），活塞风携带的热量进入站内增加了空调系统的冷负荷，同时也对站台门的密封性能提出了要求。在过渡季节，适度利用活塞风进行自然通风换气，则可以在不开启空调主机的情况下满足车站的温湿度要求，是有效的被动式节能手段。合理利用和调控活塞效应，使其从“被动干扰”转变为“可控资源”，是通风空调系统节能运行的重要课题。

2 当前通风空调系统运行中的主要能耗问题

当前通风空调系统主要存在四大能耗问题：一是运行模式固定，缺乏基于室外温湿度和客流的动态调整能力，导致过渡季及夜间无效能耗高；二是水系统变流量调节缺失，冷冻与冷却水泵多采用定流量运行，未利用相似定律潜力降低功耗，能效低下；三是设备群控策略

粗放,多台主机、水泵及冷却塔间负荷分配不均,常出现机组低效运行或配置不合理现象,且缺乏优化联动与预判机制;四是过渡季与冬季全新风利用不足,因控制逻辑简单,未能及时切换至免费供冷模式,造成人工制冷浪费^[2]。这些问题共同导致了系统整体能源利用率低下的现状。

3 通风空调系统节能运行优化策略

3.1 分时分区精细调控策略

基于车站不同区域、不同时段负荷差异,实施差异化的调控策略。在时间维度上,编制“日运行曲线”和“季节运行曲线”——早高峰前提前预冷,高峰时段全效运行,平峰时段适度减载,夜间停运后切换至节能通风模式(仅维持最低新风量,关停冷水机组)。在空间维度上,将站厅层和站台层的温度设定分别优化——站台层因人员密度高、停留时间短,可适当放宽温度设定(如26~27℃),站厅层因人员流动快,可设定略高温度(如27~28℃)。不同区域独立调节,避免全站统一控制的“一刀切”。分时分区调控的实现依赖于温度传感器的合理布设和空调箱分区控制的硬件配置。

3.2 冷冻水系统变流量运行优化

将冷冻水系统的定流量运行模式升级为变流量运行,根据末端空调箱的实际冷量需求动态调节冷冻水流量,使水泵功耗随流量降低而下降。变流量调控的关键是建立合理的压差设定值——在供回水总管之间设置压差传感器,根据末端阀门开度(或最不利环路压差)实时调节水泵转速,维持系统在满足最不利末端需求的最小压差下运行,避免过大的压差造成能量浪费^[3]。在多台水泵并联的配置下,根据流量需求优化水泵开启台数和转速匹配,避免单台高转速运行效率低于两台低转速并联的情况,并通过变频器实现水泵转速的无级调节。

3.3 冷却水系统与冷却塔的联合优化

冷却水系统的优化应从冷却水温设定、冷却塔风机控制和水泵变流量三方面协同入手。在冷却水温设定方面,根据室外湿球温度和主机冷凝器需求,动态调节冷却塔风机的转速和开启台数,在部分负荷工况下允许冷却水温度适度升高(如从32℃提升至35℃),以换取冷却塔风机功耗的显著降低,但需权衡主机效率的下降幅度,总体以“主机+冷却塔”综合能耗最低为优化目标。在冷却水泵控制方面,与冷冻水泵类似,采用变流量运行策略,根据主机冷凝侧压差或温差调节水泵转速,避免满负荷运行。

3.4 空调箱变风量与新风经济利用策略

末端空调箱的节能运行应推行“变风量+变新风”的组合策略。在变风量控制方面,根据站内温湿度实测值与设定值的偏差,调节空调箱送风机的转速,实现风

量的按需供应。在部分负荷时段,降低送风量可以减少风机的电耗,但同时需保证站内最小新风量和空气质量要求。在新风控制方面,建立“基于焓值的新风自动切换”逻辑——实时比较室外空气焓值与回风焓值,当室外焓值低于回风焓值时,自动增大新风比例直至全新风运行,关闭冷水机组;当室外焓值高于回风焓值时,采用最小新风量运行以降低冷负荷。通过温湿度传感器和焓值比较器的在线数据,实现新风阀、回风阀和排风阀的联动调节,使新风引入量在节能与舒适之间实现动态最优平衡。

3.5 多机组负荷分配与群控策略优化

建立基于“能耗最优”的机组群控逻辑,替代传统的“逐台启停”方式。在确定开启机组台数时,将总负荷按各机组的性能曲线进行最优分配,使机组尽可能在其最高能效比(COP)区间运行——优先加载效率最高的机组达到其高效区上限后,再启动下一台机组,避免多台机组同时运行在低负载率下,从而提升冷水机组整体的运行效率^[4]。水泵和冷却塔的开启台数与主机开启台数进行联动优化,确保各子系统之间的匹配与协同。群控系统还应具备预冷和提前停机功能——在高峰客流到来前提前启动系统蓄冷,在高峰结束前保持系统连续稳定运行,避免频繁启停带来的效率损失和机械冲击。

4 工程案例:郑州地铁陇海东路站通风空调节能改造

4.1 案例选择说明

选取郑州市轨道交通既有线路通风空调系统合同能源管理项目中的样板站——陇海东路站作为工程案例。该案例数据来自项目竣工验收公开信息,刊载于长江产业投资集团官方网站(2025年8月15日)及澎湃新闻(2025年8月5日),来源可查、数据可核。陇海东路站位于郑州地铁2号线,是44座改造车站中率先完成测试的样板站,其节能率和改造模式对郑许线具有直接参考价值。

4.2 项目概况与改造前运行状况

该项目覆盖郑州地铁1号线二期、2号线一期、2号线二期、城郊线一期、城郊线二期、14号线一期共44座车站,采用F+EPC+O的EMC(合同能源管理)模式,由万润新能源负责出资建设,铁四院负责诊断、节能改造方案设计、设备采购、施工、调试及节能管理服务。运营方无需前期资金投入即可分享节能收益。改造前,44座车站通风空调系统长期以固定时间表启停、定流量运行,冷冻水系统和冷却水系统缺乏动态调节能力,末端风系统未能根据站内实际负荷进行变风量调节。这与本文第2章分析的“运行模式固定化”“水系统变流量调节手段缺乏”“群控策略粗放”等问题完全吻合。

表 1：郑州地铁陇海东路站节能改造项目概况

项目要素	内容
项目名称	郑州市轨道交通既有车站通风空调系统合同能源管理项目
改造范围	1 号线二期、2 号线一期/二期、城郊线一期/二期、14 号线一期，共 44 座车站
样板站	陇海东路站（郑州地铁 2 号线）
改造模式	F+EPC+O 合同能源管理（EMC）
投资主体	万润新能源全额出资
技术实施方	深圳万润新能源 + 中铁第四勘察设计院联合体
服务期限	10 年（自验收完成之日起计算）

4.3 改造技术措施

该项目采用“全局主动寻优算法”，以“一种基于权重系数切换的地铁空调冷冻水变频复合控制方法及系统”构建了全维度风水联动节能控制系统。核心技术措施包括：第一，全年逐时负荷预判与前馈控制。系统通过全年 8760 小时空调系统负荷模拟实现预判及前馈，提前预判车站冷负荷变化趋势，实现运行模式的前馈切换，而非被动响应。第二，风水联动主动寻优控制。将冷冻水系统、冷却水系统与末端风系统作为一个整体进行协同优化，依托机器自主学习和主动寻优控制算法，实现机房整体运行在能效最优处。第三，隐形故障自动诊断。系统自动判断影响能耗的隐形故障并给出设备保养建议，确保节能效果的长期稳定性。

4.4 节能效果

根据项目竣工验收公开数据，陇海东路站作为样板站，节能率达 35.5%。

表 2：郑州地铁通风空调节能改造项目量化效果

指标	数值	来源
样板站陇海东路站节能率	35.5%	项目验收数据
项目整体站均节能率	≥ 30%	项目验收数据
覆盖车站数量	44 座	项目验收数据
10 年合同期预计节电量	9660 万度	项目验收数据
10 年合同期预计减排 CO ₂	92730 吨	项目验收数据

表 3：郑州地铁 EMC 项目招标节能承诺与分享机制
（来源：中标结果公示）

基础电量（万度/站均）	年均分享比例	承诺站均节能率
< 62	95.0%	28.0%
62~65	95.0%	28.0%
65~68	90.0%	28.0%
≥ 68	84.0%	30.0%

结束语

地铁车站通风空调系统的节能潜力主要蕴藏于运行管理的精细化优化，而非设备替换。本文基于车站冷热负荷的时空分布规律，剖析了当前固定模式运行、负荷匹配不良及群控策略粗放等痛点，提出了分时分区调控、变流量控制、多模式群控优化及动态负荷预测等系统策略。研究表明，在既有设备条件下，通过优化精细化运行策略，可实现节能。达成这一目标不仅依赖控制系统的智能化升级，更需运营管理理念转变与制度保障。随着物联网、大数据和人工智能技术的深度应用，该系统正从“人工经验操控”向“数据驱动智控”转型，节能优化也将由静态策略演进为持续迭代的动态过程，推动轨道交通运营迈向高效节能的新阶段。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通通风空气调节与供暖设计标准:GB/T51357—2019[S]. 北京: 中国计划出版社,2019.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范:GB50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2013.

[3] 李安桂, 等. 贴附通风理论及技术在地铁车站中的应用 [J]. 西安建筑科技大学学报,2021.

[4] 地铁车站空调冷却水变流量控制策略研究 [C].2020 年全国铁路与城轨暖通学术年会论文集,2020:363-366.