

## 城市轨道交通深度节能降耗策略研究\*

赖治平

(南宁轨道交通运营有限公司, 530029, 南宁)

**摘要** [目的]随着城市轨道交通运营线路的增加及运营时间的增加,电能耗也在逐年增长。为降低电能耗,减少运营成本,需对城市轨道交通节能降耗策略进行深入研究。[方法]分析了城市轨道交通电能耗的构成,归纳了列车牵引能耗、动力设备能耗及照明能耗的影响因素,总结了南宁轨道交通在节能降耗方面所采取的策略及在实践应用中取得的成效,从列车牵引、动力设备、照明等方面提出了城市轨道交通深度节能降耗的策略建议。[结果及结论]南宁轨道交通在 2022—2023 年通过实施 ATO(列车自动驾驶)牵引制动曲线优化、列车空调控制逻辑优化、BAS(环境与设备监控系统)焓值优化、“风、水平衡”调试及照明亮度调节优化等节能降耗策略,使电能耗大幅下降,每条线路每年可节电约 16 GWh。建议各地城市轨道交通运营公司结合自身的运营特点,在线路设计、设备及管材选型、施工质量、运营组织、运营管理等方面,制定相应能源消耗及节能管理办法,实现最大限度节能降耗。

**关键词** 城市轨道交通;节能降耗;列车牵引;动力设备;照明

中图分类号 TK018

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.057

## Deep Energy-saving and Consumption Reduction Strategies for Urban Rail Transit

LAI Zhiping

(Nanning Rail Transit Operation Co., Ltd., 530029, Nanning, China)

**Abstract** [Objective] With the increase in urban rail transit operational lines and operating hours, electrical energy consumption rises annually. To reduce energy consumption and operational costs, it is essential to conduct in-depth research on energy-saving and consumption reduction strategies for urban rail transit. [Method] The composition of electrical energy consumption in urban rail transit is analyzed, and influencing factors of train traction energy consumption, power equipment energy consumption, and lighting energy consumption are summarized. The strategies and practical applications of Nanning rail transit in energy-saving and consumption reduction are re-

viewed. Strategies and suggestions for urban rail transit deep energy-saving and consumption reduction in areas such as train traction, power equipment, and lighting. [Result & Conclusion] In 2022 to 2023, Nanning rail transit significantly reduced energy consumption by implementing strategies such as ATO (automatic train operation) traction and braking curve optimization, train air-conditioning control logic optimization, BAS (building automation system) optimization for enthalpy value, 'wind and water balance' commissioning, lighting brightness adjustment. These strategies resulted in an annual energy saving of approximately 16 GWh per line. It is recommended that urban rail transit operating companies across various regions develop specific energy consumption and saving management measures tailored to their operational characteristics in aspects like line design, equipment and material selection, construction quality, operational organization, and management. This approach aims to achieve maximum energy savings and consumption reduction.

**Key words** urban rail transit; energy-saving and energy consumption reduction; train traction; power equipment; lighting

随着运营线路的增加,城市轨道交通电能耗越来越大。据调查统计,电能耗成本占城市轨道交通总运营成本近 20%,节能降耗成为降低运营成本的关键要素之一。对于节能降耗,各地城市轨道交通运营公司均采取了相应的措施;文献[1-2]介绍了供电节能、车站节能、线路规划节能、运输组织模式节能和车辆节能的主要措施,提出了实现车辆有效节能的建议;文献[3-4]针对节能问题和方案进行了研究。但是,现有研究仍未完全利用好当前节能降耗新技术、新产品的优势。本文结合南宁轨道交通节能降耗一系列措施的运用及效果,对城市轨道交通电能耗进行分析并提出相应的深度节能降耗策略和建议。

## 1 城市轨道交通电能耗分析

城市轨道交通电能耗主要包括列车牵引能耗、

\* 广西重点研发计划项目(桂科 AB22035008,桂科 AB23075209)

动力设备能耗和照明能耗等。经统计分析,列车牵引能耗、动力设备能耗和照明能耗分别约占总能耗的40%、53%和7%。其中,通风空调设备能耗约占动力设备能耗的60%。因此,降低列车牵引能耗和通风空调设备能耗是城市轨道交通节能降耗的重要工作。各地城市轨道交通公司针对列车牵引能耗和通风空调设备能耗均采取了相应的降耗策略,并不断探索节能降耗的措施办法,以实现最大限度降低运营能耗成本。

## 2 电能耗影响因素分析

### 2.1 列车牵引能耗影响因素

1) 列车属性。包括电机性能、空调设备的选型、再生制动能力及能量回馈能力、车体质量、运行阻力和牵引制动曲线等。

2) 线路条件。包括线路坡度、曲线半径、站间距和车站位置。

3) 运营组织。包括列车运行等级、运营间隔、运行图、满载率和列车驾驶模式等。

4) 运营管理。

### 2.2 动力设备能耗影响因素

1) 地下车站及地面建筑节能设计。包括地下车站规模和层数、结构、建筑平面布置、房间面积、降压变电所位置、出入口朝向、车站装修材料选型、站台门类型,以及地面建筑总平面的布置和设计、围护结构、外墙砌体、设置空调的房间设计等。

2) 通风空调设备。包括通风空调设备及相应保温管材选型、保温管线施工质量、“风、水平衡”调试、BAS(环境与设备监控系统)焓值调试等。

3) 其他专业设备配置的数量、容量、效率及运行方式。

4) 运营管理。

### 2.3 照明能耗影响因素

1) 地下车站及地面建筑设计。包括地下车站规模、建筑平面布置、出入口采光、公共区人流重点区域设计、装修材料选型、地面建筑布局等。

2) 灯具选型、控制路径及控制模式设计。

3) 灯具的安装位置及方式。

4) 运营管理。

## 3 南宁轨道交通节能降耗措施

南宁轨道交通根据自身运营生产实际及设备特点,针对节能降耗采取了一系列节能策略。

### 3.1 列车牵引节能策略

1) 优化信号系统列车控制曲线。南宁轨道交通根据线路特点,在保证列车最大运能的情况下,优化信号系统列车控制曲线(即ATO(列车自动运行)模式下列车牵引、制动曲线),并在不同线路进行了测试,优化后,列车牵引节能可提升10%~19%。

优化前,列车在区间运行时,运行速度一直紧贴速度码,列车牵引次数较多,能耗相对较大,如图1所示。通过对列车起动、区间运行、进站停车等阶段进行分析发现,可通过降低运行等级的区间目标速度,以最高运行等级目标速度来指导列车进行更多的惰行,从而使列车在运行过程中尽可能减少牵引时长,使列车尽可能长时间处于惰行状态。通过减少牵引和制动转换,从而达到以ATO控车实现节能的目的。

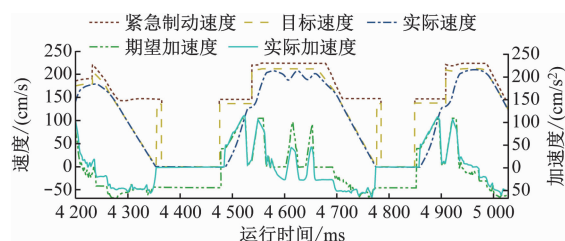


图1 优化前信号系统列车控制曲线图

Fig. 1 Diagram of signaling system train control curves before optimization

优化后南宁轨道交通4号线、5号线信号系统列车控制曲线如图2所示。列车在最高运行等级1运行时,不再通过施加牵引/制动使列车运行速度紧贴速度码,当列车运行速度小于速度码(目标速度)1 km/h时(经现场测试,该数据较合适,接近速度码的下限值),列车执行惰行;当列车运行速度小于速度码超过1 km/h时,施加牵引;同时,降低运行等级2区间运行速度码(目标速度),不再通过施加牵引/制动使列车运行速度紧贴速度码,而是当列车运行速度小于速度码7.5 km/h(经现场测试,该数据较合适,接近速度码的下限值)时,列车执行惰行,列车运行速度小于速度码超过7.5 km/h时,施加牵引;把目标制动率由0.54 m/s<sup>2</sup>提高至0.70 m/s<sup>2</sup>(通过增大制动率减少制动时间,从而增加惰行时间),在确保不降低该运行等级旅行速度的前提下,利用地势增加列车惰行比例,减少牵引能耗。

2) 在线路上相应车站设置能量回馈装置。将

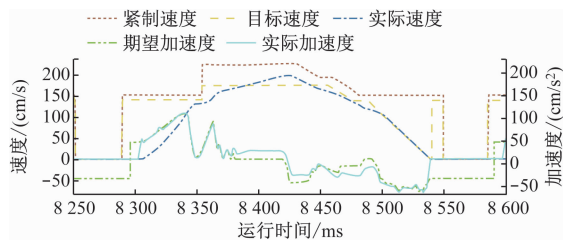


图2 优化后信号系统列车控制曲线图

Fig. 2 Diagram of signaling system train control curves after optimization

车辆制动时产生的再生能量,通过能量回馈装置再回送电网,使列车牵引单位时间电能耗降低。

3) 设置“强冷”和“弱冷”车厢。既满足市民差异化需求,又实现列车节能减排。

4) 采用变频空调。利用空调变频技术实现温度有效调节和控制,实现列车空调节能。

5) 优化空调控制逻辑。设置了列车温度设定公式。

6) 采用适宜的列车客室照明和空调开关策略。列车到达载客运营的首发站前,关闭客室照明和列车空调,仅开启驾驶端空调;列车清客回场时,关闭客室照明和列车空调,仅开启驾驶端空调。

### 3.2 动力设备节能策略

1) 车站通风空调系统采用水冷直膨机+多联机。南宁轨道交通1~3号线车站通风空调系统采用传统的风-水联动控制系统,水系统采用常规螺杆机组、空调水泵及冷却塔,大系统和小系统采用空调柜末端送风。采用风-水联动控制系统对大系统、水系统设备进行节能控制。4号线和5号线车站通风空调系统大系统采用水冷直膨空调机组,水系统采用“冷却水路水力循环洁净模块、冷却塔”,小系统设备大端采用“水冷多联机+送、排风机”,设备小端采用“风冷多联机+送、排风机”。采用水冷直膨空调机组自带的节能控制系统对大系统、水系统进行节能控制。传统风-水联动控制系统车站与水冷直膨机+多联机控制系统车站耗能对比如表1所示。采用水冷直膨机技术的车站(那洪立交站)通风空调总耗电量比采用常规螺杆机组风-水联动控制系统的车站(体育中心东站)平均每个月节约电量约为34 900 kWh,总节电率为26.72%。

2) 对BAS焓值进行优化,降低通风空调系统的能耗。

3) 全面开展通风空调“风、水平衡”调试,实现空调系统的均衡运行和效率优化,提高空调系统的

表1 风-水联动控制系统车站与水冷直膨机+多联机控制系统车站耗能对比

Tab. 1 Comparison of energy consumption between wind-water linkage control system station and water-cooled expansion machine + multi-unit control system station

月份	不同控制系统下的耗电量/(kWh)		节电率/%
	水冷直膨机+多联机控制系统	风-水联动控制系统	
5月	57 680	93 855	38.54
6月	114 104	120 096	4.99
7月	112 067	173 357	35.35
8月	127 071	178 173	28.68
9月	982 39	124 697	21.22
10月	65 031	93 417	30.39
平均值	95 698	130 599	26.72

注:那洪立交站和体育中心东站分别采用水冷直膨机+多联机控制系统和风-水联动控制系统。

节能效果。

4) 对于公共区空调,按运营需求适时调节冷水机组冷水量或加开备用冷水机组。根据客流量及气温高低情况调节温度,过渡期原则上不得开启2组及以上冷水机组(除设置有风-水联动控制系统自动控制的车站外)。

5) 针对设备区空调,当重要设备房温度超27℃时,方可开启多联机空调、座式空调等备用冷源,避免小系统与多联机空调双系统同时运行。

6) 办公区域空调系统在空调季节设定制冷温度不低于27℃。

7) 线网所有自动扶梯设置为变频模式,关闭客流量较小站点的下行电梯,正常运行的扶梯在运营结束后30 min内关闭。

8) 线网所有车站广播、PIS(乘客信息系统)屏、安检设备、广告LED(发光二极管)屏在运营结束后30 min内关闭。

9) 改造PIS屏自适应感光调节,预计每条线路每年可节电5万kWh。

10) 隧道风机每月1日、15日运营结束后执行30 min晚通风模式。

11) 轨排风机在每月5日和25日的13:00—14:00开启。

### 3.3 照明节能策略

1) 设计采用LED照明灯具。



2) 运营期间车站公共区照明执行节电模式或者调光模式,运营结束后执行停运模式并将智能照明亮度调整为适当百分比。

3) 车站出入口飞顶照明改造成时控装置控制,实现早晚定时开、关功能。

4) 车站设备区通道照明保持常闭,安全疏散通道工作照明根据亮度需求开启或关闭。

5) 设备房和管理用房照明“人走灯灭”。

6) 隧道照明按季度轮流停用 1 个回路,在执行

停运模式后全部关闭(如因工作需要可向车站申请开启工作区段照明)。

7) 办公室、走廊及洗手间照明,充分利用自然光,采光不好的走廊可酌情间隔开灯,无人值班时应予以关闭。

### 3.4 节能效果

南宁轨道交通采取上述节能措施后,每条线路每年节电效果如表 2 所示。

表 2 南宁轨道交通 1~5 号线每年综合电能耗统计

Tab.2 Annual comprehensive power consumption statistics of Nanning Rail Transit Line 1 to Line 5

年份	年综合电能耗/(GWh)						节能措施实施情况
	1 号线	2 号线	3 号线	4 号线	5 号线	全线网	
2018	151.13	77.68				228.82	未实施
2019	155.73	81.59				237.32	未实施
2020	151.84	81.33	103.21			336.83	未实施
2021	154.78	97.02	110.10	75.03		436.93	未实施
2022	140.43	87.65	99.91	65.89	74.98	468.85	实施
2023	131.84	81.92	94.58	59.31	64.48	432.12	实施

## 4 城市轨道交通深度节能降耗策略

综上所述,城市轨道交通电能耗的高低主要取决于线路设计、设备及管材的选型、施工质量、运营组织、运营管理等方面。根据目前行业对节能降耗的深度研究,以及新技术、新产品的运用,在线路设计、设备选型、运营组织和运营管理等方面还有一些节能策略值得推广。

1) 设计方面。初步设计阶段,线路总体设计单位应全面统筹考虑整个线路电能耗,在线路、车站、场段及设备设施设计时,充分利用设备设施节能及自然条件,采用智慧化、智能化手段,设计基于大数据的智能化能源管理系统,最大限度节能降耗。

2) 设备选型方面。对于车辆系统,建议牵引电机采用节能高效的永磁同步电机、空调采用变频空调、针对运行间隔大的线路设置再生能量回馈装置;对于照明系统,建议采用 LED 智能照明设备及场景联动模式控制;对于通风空调系统,建议采用变频技术、水冷直膨机+水冷多联机,或者磁悬浮冷水机组、“风-水联动”控制;对于电扶梯系统,建议电梯采用节能型电梯、扶梯采用变频技术;对于供电系统,建议采用节能型变压器等。

3) 运营组织方面。优化列车运行图,合理调整

行车间隔和行车速度;运营期间,采用 ATO 模式或自动驾驶模式运行,保持列车节能运行控制。

4) 运营管理方面。保证列车最大运能的情况下,优化信号系统列车控制曲线;优化 BAS 焓值及通风空调“风、水平衡”调试,实现通风空调系统的均衡运行和效率优化。各城市轨道交通运营公司根据自身实际运营情况,制定相应能源消耗及节能管理办法,实现最大限度节能降耗。

## 5 结语

本文分析了城市轨道交通电能耗的主要构成,归纳了列车牵引能耗、动力设备能耗及照明能耗的影响因素,结合南宁轨道交通在列车牵引、动力设备、照明等方面节能降耗实践,提出进一步深度节能降耗策略,可供各地城市轨道交通运营公司借鉴,推动国家“双碳”政策落地。

## 参考文献

- [1] 蔡芳,王峥,江巧逢.城市轨道交通节能措施研究[J].铁道车辆,2023,61(3):102.  
QI Fang, WANG Zheng, JIANG Qiaofeng. Research on energy-saving measures of urban rail transit[J]. Rolling Stock, 2023, 61(3): 102.

(下转第 330 页)

及列车信号接口需求等方面阐述了灵活编组列车重联的主要设计内容,并从车辆重联形式试验和车辆重联例行试验两个维度介绍了灵活编组列车的主要验证内容。目前,上海轨道交通 16 号线根据高峰和非高峰客流需求制定了 3 辆编组或“3+3”辆编组列车运营方案<sup>[5]</sup>,并利用在线联挂、解编试验验证了该方案的可行性。经测试,该方案可在 3 min 内实现列车联挂或解编。研究成果可为城市轨道交通灵活编组列车的设计及验证提供参考。

## 参考文献

- [1] 顾海艇. 城市轨道交通列车交路编组一体化编制方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016: 15.  
GU Haiting. Combinatorial optimal method of routing and formation on urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016: 15.
- [2] 许得杰, 毛保华, 陈绍宽, 等. 考虑开行比例的大小交路列车开行方案优化[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 173.  
XU Dejie, MAO Baohua, CHEN Shaokuan, et al. Optimization of operation scheme for full-length and short-turn routings considering operation proportion[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 173.
- [3] 柳晓峰, 曹增明. 上海轨道交通 16 号线列车重联技术与应

应用[J]. 电力机车与城轨车辆, 2015, 38(3): 1.

LIU Xiaofeng, CAO Zengming. Research and application of coupling technology for Shanghai Rail Transit Line 16 vehicle[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2015, 38(3): 1.

- [4] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 城市轨道交通车辆组装后的检查与试验规则: GB/T 14894—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Rules for inspecting and testing of urban rail transit vehicles after completion of construction: GB/T 14894—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.

- [5] 徐东超, 朱游龙, 张广吉, 等. 城轨列车全自动以太网灵活编组研究[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(8): 21.

XU Dongchao, ZHU Youlong, ZHANG Guangji, et al. Research on fully automatic ethernet flexible marshalling of urban rail trains[J]. Industrial Control Computer, 2023, 36(8): 21.

· 收稿日期: 2022-04-22 修回日期: 2022-06-28 出版日期: 2024-08-10

Received: 2022-04-22 Revised: 2022-06-28 Published: 2024-08-10

· 通信作者: 曹成鹏, 高级工程师, 18611102365@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 325 页)

- [2] 贾惠茗. 城市轨道交通节能设计研究[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(11): 36.  
JIA Huiming. Discussion on energy-saving design of urban rail transit[J]. Environmental Science and Management, 2021, 46(11): 36.
- [3] 王晓保, 李亮, 李晓龙, 等. 城市轨道交通系统能耗裕度与节能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(3): 86.  
WANG Xiaobao, LI Liang, LI Xiaolong, et al. Analysis on ECM and energy saving of urban mass transit[J]. Urban Mass Transit, 2011, 14(3): 86.
- [4] 刘海东, 毛保华, 丁勇, 等. 城市轨道交通列车节能问题及方案研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(5): 68.

LIU Haidong, MAO Baohua, DING Yong, et al. Train energy-saving scheme with evaluation in urban mass transit systems[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(5): 68.

· 收稿日期: 2024-03-29 修回日期: 2024-04-30 出版日期: 2024-08-10

Received: 2024-03-29 Revised: 2024-04-30 Published: 2024-08-10

· 作者: 赖治平, 高级工程师, 121412436@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: [tougao. umt1998. com](http://tougao. umt1998. com)