

城市轨道交通照明系统的节能措施研究

孙超

广州地铁设计研究院股份有限公司

摘要：本文以城市轨道交通照明系统节能作为切入点，简要叙述城市轨道交通运营期间照明系统所遇到的现状问题，以此阐述照明系统节能优化的必要性。并立足实际问题，深入探讨城市轨道交通工程中的照明系统有效节能措施，旨在最大限度提高照明系统节能属性，保证照明系统安全稳定运行，将城市轨道交通总体运营成本和照明成本控制合理范围内，为我国城市轨道交通绿色发展模式提供借鉴。

关键词：城市轨道交通；照明系统；节能措施

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.09.006

引言

近年来，随着城市化进程的加快，为缓解城市交通矛盾，治理交通拥堵问题，我国在各地新建大量的地铁、轻轨等轨道交通工程，向市民提供更高质量的交通出行服务。与此同时，照明系统作为城市轨道交通工程的重要组成部分，存在耗电量大、用电成本高、控制模式僵化等问题，既加重了轨道交通运营负担，也不利于向乘客营造舒适光环境，限制了城市轨道交通运营水平与服务质量的提升。因此，加大对照明系统的节能改造是解决这一问题的关键，本文就此开展研究。

一、城市轨道交通照明系统现状问题

（一）运行成本高

相比于地面公共交通而言，城市轨道交通的建设位置具有特殊性，以地下空间为主（包括带上盖的车辆基地），需要在轨道交通站台与盖下车辆基地布置大量照明灯具，营造高照度人工照明环境，方可满足轨道交通运营需求和作业检修需求，这无疑使得照明成本在城市轨道交通总体运营成本中占据较大比重。根据相关统计结果显示，照明负荷普遍占据15%左右的轨道交通总体负荷，照明用电量占据25%左右的总体用电量。同时，在北京、深圳与上海等大城市中，轨道交通照明成本占比更高，照明成本普遍占据30%以上的总体运营成本，且年耗电量超过1亿千瓦时。

（二）无法满足照明控制需要

在早期城市轨道交通工程中，虽然应用到自动控制技术，由自动照明控制方式取代人工照明控制方式，有利于提高照明系统节能属性、照明质量，但实际应用效果并未达到预期要求，并未切实满足现代城市轨道交通工程的照明控制需求。例如，从灯具控制角度来看，自动控制系统中的控制回路与控制器的数量较少，普遍将照明系统划分为若干区域，采取大面积区域控制等方式，

并没有实现单灯控制目标。而从控制功能角度来看，自动控制系统仅具备定时启闭灯具、灯具整体调光等基础性功能，既无法有效应对各类突发状况与复杂问题，同时，也无法根据外部环境变化情况来自动制定、执行相应控制措施。

（三）照明系统故障频发

早期城市轨道交通工程的照明系统运行稳定性较差，受到灯具老化、现场复杂环境、车辆晃动等多方面因素影响，灯具不亮等运行故障问题频繁出现，不但影响到轨道交通照明质量，严重时还会由此引发乘客踩踏、人员触电、电气火灾等安全事故出现，存在安全隐患。例如，在列车行驶期间，早期普遍安装荧光灯、金卤灯等光源，这类光源虽然具备良好节能效果与优异综合表现，但在灯具使用期间，受到列车晃动因素影响，明显加快灯具老化速度和缩短实际使用寿命，需要在城市轨道交通运营期间频繁更换照明灯具，由此产生额外照明成本，并因灯具更换不及时而出现一系列问题。相比之下，对LED灯等新型固态光源的应用，将会明显增加灯具实际使用寿命和降低照明系统故障率^[1]。

二、城市轨道交通照明系统的有效节能措施

（一）采用LED节能灯具

LED灯具也被称为发光二极管，由电致发光材料制成，在通电条件下把电能持续转换为可见光。相比于传统照明光源，LED光源有着发光效率高、使用寿命长、维护成本低廉、故障率低、环保的显著优势，也是现代城市轨道交通工程中的主流照明光源。例如，从发光效率角度来看，LED灯的光效普遍保持在100lm/W左右，传统照明灯具光效略低于这一数值，如普通双光荧光灯光效仅为60lm/W。从使用寿命角度来看，LED灯平均使用寿命在5万小时左右，而传统金卤灯平均使用寿命仅为9000-15000h，荧光灯平均使用寿命在6000-10000h。而从故障率角度来看，LED灯属于固态封装类型灯具，在灯具运输、安装与使用期间，不受到外部环境与振动作用力明显影响，可以长时间保持稳定运行工况，基本不会出现各类运行故障问题^[2]。

此外，在城市轨道交通工程中，在选用LED照明光源的前提下，还需要采取灯具选型、光衰控制、驱动改造三项措施，确保LED灯具节能效果得到最大程度发挥。第一，灯具选型是根据轨道交通照明要求来明确LED等性能指标要求，一般情况下，需要选用LED白灯，要求总谐波失真率不超过15%、显色指数超过80、色温值控制在5000K上下，并把功率因数控制在95%以上。第

二，光衰控制是为避免LED灯具使用一段时间后出现热阻明显增加与老化速度加快等问题出现的措施，需要选用由14mil白光断芯片制成的LED白灯，必要时还可采取使用碳化硅材质晶片、使用荧光胶水等措施，最大限度减小现场环境对灯具光通量造成的影响系数。第三，驱动改造是将传统驱动方式改造为恒流驱动方式，系统运行期间将采取调节负载阻值方法来控制直流电压波动程度，确保系统在较长运行时间内保持稳定工作电流值，预防因电压值骤然、频繁波动而引发各类故障问题出现。

（二）运用智能照明系统

智能照明是在系统中应用到智能控制技术，使得系统具备强大的逻辑运算能力，在无人工直接干预前提下，模拟人类思维方式，对所掌握信息进行推理分析，输出符合照明控制需求、有利于降低系统运行能耗的控制指令，以此来实现节能目标，并减轻管理负担。目前，在城市轨道交通照明系统中，主要采取PLC控制、DALI数字控制两项技术手段。其中，PLC控制是在系统中加装PLC可编程逻辑控制器，工作人员提前在控制器中编写梯形图程序，程序由若干条控制命令组成，后续根据程序扫描结果来执行对应控制命令，此项技术有着控制方式多、控制效果显著的优势。DALI数字控制是在系统中加装接收器、传感器与控制主机等设备，将接收器布置在各区域照明灯具中，通过接口连接系统程序和控制器，由接收器持续现场信号，按照处理结果来下达控制指令，再将指令传达给对应地址照明灯具，控制灯具执行启闭、调光等动作，此项技术有着扩展性强、系统易于开发的优势^[3]。

此外，智能照明技术当前已在多个城市轨道交通工程中得以应用，但由于技术问世时间较短，智能照明技术应用经验较为匮乏，存在应用场景单一的问题，实际控制效果与节能效果并未达到预期要求。因此，还需要在轨道交通工程中积极拓展技术应用场景，具体可采取感应控制、照明场景控制、单灯控制、照度均匀度控制四项措施。第一，感应控制是在系统中安装多类型传感器与搭配智能算法，强化照明系统的环境感知能力，系统持续判断环境条件、照明需求来下达控制指令。例如，智能照明系统按照人群密度估算结果来制定照明控制方案，通过摄像头等终端感知设备来掌握现场情况，将站台层等区域人群密度导入网络模型中，根据模型输出值来下达调节各组光源输出功率、调节各区域环境照度值等控制指令，在人群密度较大时适当调高环境照度，在人群密度较小时则适当调低环境照度。第二，照明场景控制是由工作人员提前在系统中设定多种照明场景，不同场景的适用条件、灯具启闭数量、运行能耗存在明显差异，照明系统在到达特定时间点或满足触发条件后，自动切换至指定的照明场景。例如，在车站公共

区域，设立全亮模式、正常模式、省电模式、清扫模式，全亮模式是在客流量与人群密度达到一定标准后开启全部照明灯具，正常模式是在昼间、夜间分别开启一定数量的照明灯具，省电模式是在客流量较少时间段内仅开启部分灯具，清扫模式是在轨道交通运营结束后开启部分区域照明灯具、以此来满足车站清扫工作开展需要。第三，单灯控制是在各盏照明灯具中均安装配套分控制器，保持各处分控制器与总控制器的联通状态，由总控制器下达总体控制指令，并将指令分解后传达给各处分控制器，控制单盏灯具执行调光、启闭等动作^[4]。第四，照度均匀度控制是在轨道交通站台等区域中安装传感器，根据传感器监测信号来判断现场环境照度，如果环境照度不达标、各区域照度不均匀，系统将对比实际照度值和额定照度值，根据二者偏差程度来下达调光控制指令。

（三）加装灯具末端稳压调控装置

现代城市轨道交通工程中存在配电距离较长的问题，不但在电能输送期间产生较高比例的线损量，造成部分电能无效损耗，同时，还因此导致线路电压值明显提高，进一步提高了轨道交通照明系统运行能耗。对此，需要在照明系统中采取调节供电半径、末端稳压改造两项措施，以此来减少线损量和照明系统能耗水平。其中，调节供电半径是在轨道交通范围内设置若干座微型变电站与配电终端，通过变电站向配电终端供电，再由配电终端向邻近区域内照明灯具与配套设备供电，尽可能把实际供电半径控制在200m以内，避免在电能输送期间产生过高比例的线损量。而末端稳压改造则是在各盏照明灯具中安装末端稳压调控装置，采取无线通信方式来保持灯具终端和稳压调控单元间的通讯，由MCU装置持续监测输出电压值，在电压值临近警戒值是借助电源模块PV引脚来调节电压，始终把线路电压值控制在合理范围内，以此来照明供电期间的线路能量损耗^[5]。

（四）搭建光导照明系统

城市轨道交通工程受到技术限制，轨道交通照明环境以人工照明为主，对智能照明控制、选用高效光源等节能措施的落实，可以显著降低照明系统运行能耗，但仍旧需要持续消耗电能来维持系统运行，致使照明系统节能效果无法无限制提升。

为最大程度降低城市轨道交通系统的整体能耗水平，需要运用到光导照明技术，由光导照明系统将室外自然光线引入车站层或盖下车辆基地等轨道交通区域当中，通过缩短照明系统运行时间来取得额外的照明节能效果。现阶段，光导照明系统主要由采光罩、导光格栅、导光管、反射膜与漫射器等部分组成，凭借采光装置将室外自然光传导至地下空间或室内空间当中，无须在昼间运行照明系统，或是在环境照度较低情况下开启少数照明灯具即可。其中，采光罩起到采集室外自然光

线作用,考虑到采光罩运行条件较差,持续受到外部环境侵蚀,需要在表面施作紫外线涂层,以此来延长采光罩使用寿命。导光格栅由单组或多组不透光挡板组成,起到调节导光管内自然光线强度的作用,需要安装具备开度调节功能的导光格栅。导光管设置在建筑物与构筑物内部,连通采光罩与漫射器,通过导光管将所收集自然光线传导至漫射器中,需要在导光管表面设置反射膜,并对导光管弯度进行调整,这将起到提高光线反射率、增加光线传输距离的作用。而漫射器则起到二次分配自然光线的作用,控制光线均匀照向车站、轨道线路等各处区域^[6]。

此外,在应用光导照明技术时,需要做好前期勘察工作,全面掌握轨道交通照明面积、环境照度要求、地表空间布局等多方面因素,在其基础上制定光导照明方案,以取得理想节能效果和工程综合效益。例如,从采光罩布置角度来看,尽可能将采光罩布置在车站地表或车辆基地综合楼的绿化带或者等区域中,且周边不得存在障碍物遮挡光线,避免因地面过度改造而产生额外造价成本。而从照明效果角度来看,在光导照明装置无法维持较高室内环境照度时,可以在车站等建筑物结构中设置若干采光通风井,由采光井引导室外自然光线。

(五) 照明分区布置

在城市轨道交通工程中,不同区域的功能定位、照明需求存在明显差异,如果对全部区域实施完全一致的照明方案,不但会增加照明系统运行能耗,同时,还有可能因无法满足实际照明需求而出现各类问题。因此,需要在照明节能方案中采取分区布置措施,明确站台、列车、轨道等区域的照明需求,针对性制定照明方案。例如,在站台区域中,有着乘客停留时间较短、局部人群密集的特征,因而需要在站台两侧与车门部位布置较多照明灯具,以及在集中候车区域中布置光线柔和、节能效果显著的LED灯具,灯具型号与数量根据具体照明需求而定。而在列车中,需要在车辆两端布置有效照明距离超过200m的车载照灯,帮助司机准确掌握前方路况,并在线路沿途布置若干盏宽照明灯,凭借智能照明系统,在检测到列车驶入、驶离对应区间后,自动开启和关闭宽照明灯。

(六) 明确照度标准

照度标准是城市轨道交通照明系统能耗水平的决定性因素,照度标准越高,则环境平均照度越高、照明系统运行能耗越大。从轨道交通运营角度来看,不合理的照度标准,将会明显影响到轨道交通运营成本与运营效率,在照度标准过高时增加照明成本,在照度标准偏低时在一定程度上影响到轨道交通运营秩序。因此,为取得理想节能效果,需要遵循实际出发原则,综合考虑建筑物等级、客流量估算值、照明区域面积等多方面因素,准确计算站台、候车区域等各处区域的最佳照度标

准,围绕所设定照度标准来制定照明方案。同时,在特殊情况下,可以将通道、站厅、站台等区域下调或是调高一个照明等级,以满足实际照明需求为主要目的,以提高照明系统节能属性为次要目的,不得出现主次不分情况。

(七) 配置灯具附件

为提高照明灯具使用率,避免灯具在运行期间耗费过多电能,需要在各盏照明灯具中额外加装多种类附件,一般情况下,需要在灯具中额外设置反射罩和镇流器附件。其中,反射罩是在灯具外部安装具备高透光率的透明保护罩,既可以保护照明灯具不受外部环境影响、延长灯具实际使用寿命和降低故障率,同时,照明光线在透过罩体时还将出现反射、折射现象,控制光线均匀照射至周边区域中的各处角落,起到增加光通量、减少灯具布置数量、保持环境照度均匀等多重作用。而镇流器起到限制瞬间高压与限流等作用,避免照明灯具在启闭等步骤因电流电压过幅变化而造成电能损耗与缩短灯具使用寿命,尽可能在照明系统中安装功能齐全、性能优异的节能型电感镇流器,不推荐使用早期型号的普通电感镇流器。

三、结语

综上所述,照明系统节能改造是建设新一代绿色城市轨道交通工程的重要举措,节能改造效果直接影响到轨道交通系统总体能耗水平与运营效益。因此,工作人员务必提高对照明系统节能改造工作的重视程度,深入剖析轨道交通照明系统现状问题,针对性落实采用LED灯具、智能照明控制、加装末端稳压调控装置、搭建光导照明系统、照明分区布置、明确照度标准、配置灯具附件等节能改造措施,提高节能效果,推动我国轨道交通事业稳健发展。

参考文献

- [1] 杨爽,许琰.沈阳地铁站照明系统节能环保措施的研究[C]//第十七届沈阳科学学术年会论文集.[出版者不详],2020:1332-1335.
- [2] 孙冬云.地铁智能照明系统现存问题与优化措施[J].光源与照明,2022(02):98-100.
- [3] 廖远辉.LED综合节能装置在地铁照明系统中的应用[J].技术与市场,2016,23(06):124-125.
- [4] 詹占岚.城市轨道交通车辆段及停车场光导照明系统[J].建筑电气,2019,38(04):53-57.
- [5] 戴梦云,侯晓蓉,洪俊伟.绿色视角下的轨道交通照明系统节能研究——以南昌地铁一号线为例[J].市场周刊,2018(07):143-146.
- [6] 朱大缓.上海轨道交通车辆基地照明系统节能改造实施方式探索[J].城市轨道交通研究,2016,19(06):143-144+151.