



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

(学位论文)

上海地铁四号线车辆客室照明节能改造
研究

姓名： 顾耀君

学号： 1231556

所在院系： 汽车学院

职业类型： 工程硕士

专业领域： 车辆工程

指导教师： 魏学哲

副指导教师： 吴浩

二〇一六年七月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of Engineering

**Energy-Saving Modification Research of
Shanghai Metro Line 4 Vehicles' Saloon
Illuminance**

Candidate: Gu Yaojun

Student Number: 1231556

School/Department: School of Automotive Studies

Discipline: Engineering Master

Major: Vehicle Engineering

Supervisor: Wei Xuezhe

Deputy Supervisor: Wu Hao

July, 2016

上海地铁四号线车辆客室照明节能改造研究

顾耀君

同济大学

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

城市轨道交通作为一种安全、快捷、舒适、环保的交通方式，逐渐成为解决各大城市交通问题的有效途径。随着投运列车数的增加，地铁运营消耗的电能也急剧增加。随着“节能减排”工作的推进和市民节能意识的加强，人们对轨道交通的节能要求也与日俱增。

本文就上海地铁四号线车辆运营过程中客室照明采用的灯具和控制方式进行了研究。由于 LED 灯具的节能优势，决定应用于四号线车辆客室照明的节能改造方案。通过解决 LED 灯具在应用中遇到的电源选型、接线改造、照度要求、电磁兼容等问题，实现了 LED 灯具替代荧光灯具的节能替代改造。通过节能计算和现场测试，客室照度符合相关标准要求。

通过对四号线车辆客室照明控制回路中串联光敏控制装置，使列车具备了根据外界照度强弱来调节客室常用照明开关的功能，使列车在露天条件下运营时可以关闭客室常用照明，从而实现节能。

针对既有的客室照明光敏节能控制器的功能缺陷，本文从实用性需求出发，重新设计开发了一种适应各种光照强度变化工况的智能光敏节能控制器。设计新型光敏节能控制器的基础是掌握四号线列车运营线路的光照变化规律。通过采集四号线的光照强度数据，并分析照度的变化规律，制定了有针对性的节能控制策略，实现了客室照明节能与乘客照明需求之间的平衡。为了保证光敏节能控制器的轨道交通车辆应用的要求，在设计时充分考虑为了控制器的电源、安装位置、电路结构、可靠性、电磁兼容、振动与冲击等要求。通过装车功能试验，证明新型智能光敏节能控制器实现了设计功能，具有很好的实用性。

新型智能光敏节能控制器的应用，结合客室照明 LED 灯具替代改造，综合节能率到达 50%以上，实现了节能目标。同时，四号线车辆客室照明节能改造方案的实用化以及取得的良好节能效果，有利于此方案在其它线路既有车辆上推广应用，有利于轨道交通行业节能工作的进步与发展。

关键词：上海地铁四号线，客室照明，LED 照明，智能光敏节能控制器，节能率

ABSTRACT

As a safe, fast, conformable and environment friendly transportation, urban rail transit has gradually become the effective solution to traffic problems in big cities. As fast development of Shanghai Rail Transit, Metro Units have provided huge convenience for citizens. And as the increase of operational trains, energy consumption is also rising for Metro operation. People has more requirement for rail transit since the development of “energy saving and emission reduction” and increased awareness of energy saving.

This essay has furthered the research of saloon lighting and control method of SHL4 Metro Units. This essay has analyzed energy-saving advantage of LED lighting which will be applied for SHL4 saloon. The problems for LED lighting application, such as power supply selection, wiring alteration, luminance requirement and electromagnetic compatibility, have been solved and energy-saving modification has been realized. Energy-saving calculation and site test show saloon illuminance meets relevant standards and requirements.

Besides, photosensitive control device in series of SHL4 saloon lighting control circuit makes saloon light switch adjust to the external illuminance. When train is running in the open air, saloon common lighting could be turned off, which thus saves energy.

For existing functional defects of saloon lighting photosensitive energy-saving controller, this essay has re-designed a type of intelligent photosensitive energy-saving controller adjusting to all lighting intensity based on practical demands. The basis of designing photosensitive energy-saving controller is to understand the illuminance change rules along SHL4 operational lines. By collecting SHL4 illuminance intensity data, analyzing change rules and developing pointed energy-saving control strategy, an balance between saloon energy-saving lighting and passenger demand has been reached. To meet the standard of photosensitive energy-saving controller application in rail transit industry, power supply of controller, installation location, circuit structure, reliability, electromagnetic compatibility and vibration and shock have been fully considered in design. Functional test on train has proved this new type intelligent photosensitive energy-saving controller has realized design functions, which is very practical.

The application of this new type intelligent photosensitive energy-saving controller combined with replacement of saloon LED lights has reached more than 50% comprehensive energy-saving rate, realizing energy-saving goal. Meanwhile, practicability of SHL4 saloon illuminance energy-saving modification and good performance are helpful to the extending application on other lines, as well as the improvement and development of energy-saving work in rail transit industry.

Key Words: Shanghai Metro Line 4, saloon lighting, LED lighting, intelligent photosensitive energy-saving controller, energy saving rate

目录

第 1 章 引言.....	1
1.1 概述.....	1
1.2 轨道交通车辆节能技术概况.....	1
1.2.1 减轻车辆自重.....	1
1.2.2 牵引系统节能措施.....	2
1.2.3 辅助系统节能措施.....	2
1.3 地铁车辆客室照明节能技术国内外应用概况.....	4
1.3.1 LED 光源替代传统照明光源.....	4
1.3.2 光敏控制方式.....	4
1.4 研究的目的是和意义.....	6
1.5 本文主要研究工作.....	7
1.6 本章小结.....	8
第 2 章 四号线车辆客室照明 LED 替代改造研究.....	9
2.1 LED 的原理与优势.....	9
2.1.1 LED 的发光原理.....	9
2.1.2 LED 的技术特点.....	9
2.1.3 LED 灯具与传统灯具的比较.....	10
2.2 LED 在轨道交通车辆上的应用.....	11
2.2.1 国内外应用情况.....	11
2.2.2 社会效益.....	11
2.3 四号线车辆 LED 照明节能替代改造研究.....	12
2.3.1 客室照明分布.....	12
2.3.2 客室照明功率计算.....	13
2.3.3 客室照明照度计算.....	14
2.3.4 LED 灯具的选择.....	18
2.3.5 振动冲击要求及测试.....	21
2.3.6 电磁兼容要求及测试.....	21
2.4 节能计算.....	22
2.4.1 节能率计算.....	22
2.4.2 节电量计算.....	22
2.5 本章小结.....	23
第 3 章 四号线车辆客室照明光敏节能控制电路改造设计.....	25
3.1 四号线线路条件及车辆概况.....	25
3.1.1 四号线运营线路条件.....	25

3.1.2 四号线车辆概况.....	25
3.1.3 四号线列车客室照明控制原理.....	26
3.2 三种典型客室照明光敏节能控制电路.....	27
3.2.1 三号线车辆客室照明光敏节能控制电路.....	27
3.2.2 十一号线车辆客室照明光敏节能控制电路.....	29
3.2.3 十六号线车辆客室照明光敏节能控制电路.....	30
3.2.4 三种车辆客室照明光敏节能控制功能分析.....	32
3.3 四号线车辆客室照明控制电路节能改造的可行性分析.....	32
3.3.1 集中调光节能方案.....	32
3.3.2 四号线列车客室照明节能控制改造方案设计.....	34
3.4 光敏控制节能改造节电量计算.....	41
3.5 本章小结.....	42
第4章 四号线车辆客室照明光敏节能控制器设计与实现.....	43
4.1 光敏节能控制原理.....	43
4.1.1 光敏二极管原理.....	43
4.1.2 光敏三极管原理.....	44
4.2 光照度检测电路设计.....	44
4.2.1 照度检测范围.....	44
4.2.2 照度检测电路设计.....	45
4.3 四号线沿线光照度分析.....	46
4.3.1 地面区间照度分析.....	47
4.3.2 地面站台照度分析.....	47
4.3.3 地下区间照度分析.....	49
4.3.4 地下站台照度分析.....	50
4.3.5 照度数据分析.....	51
4.3.6 控制策略.....	52
4.4 客室照明光敏节能控制器设计与实现.....	55
4.4.1 照度传感器电路设计.....	55
4.4.2 计时功能.....	57
4.4.3 可编程控制.....	58
4.4.4 兼容性设计.....	61
4.4.5 可靠性与安全性设计.....	64
4.5 光敏节能控制器装车试验与功能验证.....	67
4.5.1 控制逻辑功能验证.....	67
4.5.2 装车功能验证.....	68
4.5.3 正线运营功能验证.....	69
4.5.4 节能数据.....	70
4.5.5 节电量计算.....	70

4.6 综合节能效果评估	71
4.6.1 综合节能率计算.....	71
4.6.2 综合节能量计算.....	72
4.7 本章小结.....	73
第5章 结论与展望.....	75
5.1 结论.....	75
5.2 展望.....	75
致谢.....	77
参考文献.....	78
附录 A LED T8 灯管振动与冲击试验报告.....	81
附录 B LED T8 灯管电磁兼容试验报告.....	83
附录 C 《上海申通地铁四号线列车客室 LED 节能改造项目》竣工报告	85
附录 D 列车客室照明光敏节能控制器振动与冲击试验报告	86
附录 E 列车客室照明光敏节能控制器电磁兼容试验报告	88
附录 F 列车客室照明光敏节能控制器功能试验记录表	90
附录 G 列车客室照明光敏节能控制器专家评审意见	91
附录 H 列车客室照明光敏节能控制器用户报告	92
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	93

第1章 引言

1.1 概述

随着我国经济的快速发展，城市化进程不断加快，城市人口不断增多，城市区域不断扩张，日益严重的交通拥堵问题逐步成为制约城市发展的瓶颈。城市轨道交通作为一种安全、快捷、舒适、环保的大客流交通方式，逐渐成为有效解决各大城市交通问题的有效途径。

上海作为中国最大的城市，经过二十年的发展，轨道交通已经成为市民出行的主要交通方式。截至2015年底，上海轨道交通单日最大客流已突破1000万人次记录。根据规划，预计到2020年左右，上海轨道交通将达到800公里规模，可承担单日1000万至1200万人次的出行任务。随着上海轨道交通的飞速发展，上海地铁为广大市民出行带来了极大的方便，同时随着投运列车数的增加，地铁运营消耗的电能也急剧增加。

随着贯彻落实科学发展观、全面建设小康社会的积极推进，“十一五”规划纲要中提出的“节能减排”概念作为社会共识深入人心。全社会各行各业投入大量的人力物力，研究和发​​展节能减排技术，努力实现“十二五”规划纲要中制定的具体节能减排目标。同时，全国各地“雾霾”现象的频繁发生，空气污染日益严重，使全社会更加关注节能减排。近年来，作为上海轨道交通的运营方，上海申通地铁集团多次接到人大代表意见及市民来信，反映轨道交通列车运营中存在的各种不利于节能的环节与问题，希望运营部门采取有效措施，降低能耗水平。因此，如何在保证运营质量的前提下，实现节能减排目标的相关实用技术研究，成为目前轨道交通车辆节能减排技术研究的重要方向之一。

1.2 轨道交通车辆节能技术概况

1.2.1 减轻车辆自重

地铁车辆是轨道交通的重要设备，是实现载客的主体工具，也是主要耗能设备之一。其特点是重量大，车辆自重占定员车总重的60%，每节车辆行驶1千米用电量约为2.4kWh。根据上海、广州等大型城市地铁的最新能耗统计，地铁运营车辆的能耗大约占系统总能耗的40%左右。因此，减轻车辆自重是降低能耗的

重要有效途径之一。

根据国内外地铁车辆的使用经验，地铁车辆每增加 1 吨，全年耗电约增加 1 万度电。因此，现代地铁车辆通过采用铝合金车体、在满足运营要求的前提下选择功率较小的牵引设备和制动电阻、采用强迫风冷方式、内装轻量化等措施，实现地铁车辆的轻量化设计，从而取得较好的节能减排效果。

1.2.2 牵引系统节能措施

目前，绝大多数的地铁车辆的牵引系统采用交流变频变压 (VVVF) 传动方式，由于该传动方式能够实现电制动，可以降低地铁车辆运行能耗。

地铁车辆的电制动是指地铁列车运营过程中，列车在制动工况下，牵引电机从电动机状态转换为发电机状态，列车的动能转换为电能。其中，再生制动通过牵引逆变器控制将列车的动能转换为再生电能反馈回电网，如同一供电区间内有其它列车处于牵引工况，则该电制动能量即可由其它车辆吸收利用，从而达到节能的目的。否则，列车将采用电阻制动方式通过车载制动电阻将电能转换为热能并发散至运营区间内。目前，国内外普遍采用上述方式利用或消耗电制动能量。

由于再生制动电能需由同一供电区间内的其它列车处于牵引工况才能实现，因此实际上相当部分的电制动能量是由电阻制动消耗掉的，同时带来隧道内粉尘、噪音、温升等问题，不利于节能减排的实现。因此，国内外部分线路尝试采用超级电容作为列车电制动能量吸收装置。当列车处于电制动工况时，超级电容吸收电制动能量；当列车处于牵引工况时，超级电容释放储存的电能，起到稳定电网电压的作用。因此，采用超级电容作为储能装置，可以实现储存能量和稳定网压的作用，同时解决了电阻制动带来的污染问题。但是，由于该方式初期建设投资较大，后期维护成本较高，因此目前应用实例较少。

1.2.3 辅助系统节能措施

地铁列车的辅助系统是指为除牵引系统以外所有用电设备供电的系统，主要设备包括空调通风设备、空气压缩机、蓄电池充电机、牵引设备冷却风扇、列车控制设备、照明等，是保证列车正常运行及乘客舒适度不可缺少的重要系统。

目前，辅助系统典型的结构形式主要分为分区供电方式和并网供电方式。分区供电方式中，列车上每台辅助逆变器通过互相独立的 380V 交流中压母线分别为列车的部分中压负载供电。当任意逆变器故障时，则相应供电的三相负载由于断电而失效。并网供电方式则是列车上有一条贯穿全列车 380V 交流中压母线，列车上的所有辅助逆变器并联在中压母线上同时向全列车的中压负责供电。当单

台或多台辅助逆变器的故障时，三相负载根据供电能力进行降级模式运行，对列车的辅助系统影响较小。

并网供电方式相比分区供电方式具有明显的节能优势，其主要原因是并网供电在设计时只需考虑各类负载的正常工况，其恶劣工况通过并网控制来处理。分区供电则需考虑各类负载的恶劣工况，因此实际能耗更高。

空调通风系统作为地铁车辆主要的耗能系统之一，对其进行节能设计或改造将会到达很好的节能减排效果。现有地铁车辆空调大多采用定频空调机组，制冷量按额定载荷的所需最大热负荷选取。运营中，由于客室空调系统的热负荷并非总处于最大值，在客流较小的时段，制冷量常常处于输出大于需求的不经济状态。传统的定频空调压缩机在固定的频率下运转，对于负荷变化只能采用启停控制。同时，定频空调机组是通过频繁启停压缩机的方式来调制冷量的输出。压缩机每启停一次就造成一次开关损耗，这种控制方式增加了能耗。

目前，随着技术的发展，空调变频控制和新风量自动控制成为主流的节能技术开始推广应用。

变频空调与普通定频空调的主要区别在于前者增加了变频器。变频器能使压缩机电机的转速无级连续可调，其转速是根据室内空调负荷而成比例变化的。因此变频制冷系统可以随室内空调热负荷的变化而调整压缩机转速，使制冷量与热负荷达到平衡。在初始运行阶段，变频空调处于高频工作状态，压缩机以最大转速运转，使室温迅速降低；当室温接近设定值时，控制程序控制压缩机转速降低，制冷量减少，以平衡室内的热负荷。上海地铁五号线列车部分列车客室空调进行了变频改造，以检验变频空调在轨道交通车辆上的适用性。经过连续测试，在气温最高的季节变频空调比原有的定频空调节电 29%，在气温最低的季节变频空调的最高节电率更是高达 50%。

轨道交通车辆载客量大，必须向客室内输入新风，不断更换车内的空气，使空气保持一定的新鲜程度。现有轨道交通车辆空调装置采用定新风系统，新风输入占了空调装置负荷的很大部分。轨道交通车辆的定员较多，乘客人数随时间、区段的变化很大，上下班高峰乘客最多，繁华地段乘客集中，在车内人数少于定员人数时，车内空气品质将高于标准，但会增加车内瞬时冷负荷，从而造成了不必要的电能浪费。

因此，合理地控制新风量就是在保证客室内二氧化碳浓度不超过标准值的前提下，减小新风负荷，从而达到降低空调能耗的目的。要兼顾这两个方面，就要使新风量随着二氧化碳浓度变化而变化。实践中，首先需将空调机组新风门设置为电动控制，在客室内布置二氧化碳传感器，将二氧化碳浓度数据传至空调控制器，空调控制器控制新风门的开启度随客室内二氧化碳浓度的变化而自动调节，

以保证客室内有适当的新鲜空气量。上海地铁四号线采用此控制方法对于列车空调进行了节能改造，根据对用电数据的统计发现，可以实现 13%的节能率。

国内地铁车辆客室照明大多采用传统的荧光灯作为光源，其效率低、能耗大等特点已经不能适应轨道交通发展的需要和节能减排的要求。近年来，随着 LED 照明技术的发展，LED 光源以其效率高、能耗小、寿命长等优势，逐渐取代荧光灯等传统照明方式在各个领域内得到大范围的应用。目前，国内部分城市的新建地铁线路已经开始采用 LED 作为列车客室照明光源，取得了较好的节能效果。

1.3 地铁车辆客室照明节能技术国内外应用概况

目前，国内外关于城市轨道交通车辆照明节能技术的研究，主要集中在使用更节能的 LED 灯具替代传统的白炽灯和荧光灯，以及在客室照明控制回路中增加光敏控制器，使列车能够在外界照度充足时关闭客室照明，以达到节能目的。

1.3.1 LED 光源替代传统照明光源

目前，轨道交通车辆的照明大部分仍采用传统的荧光灯作为照明灯具，其成本虽然低廉，但发光效率低、需要配合镇流器使用、维护成本高、能耗大，不符合目前节能减排的要求。目前，发光二极管（Light Emitting Diode，缩写为 LED）作为新型的光源形式，以其超长寿命、抗衰减性、低能耗、抗震动冲击等优势，正逐步取代传统照明光源，在轨道交通车辆上逐步推广应用。自 2008 年以来，各地区的地铁运营方陆续引入 LED 照明灯具应用。2008 年，香港地铁成为全球首例将 LED 光源为引入地铁客室照明应用领域。2011 年，中国半导体照明工程研发及产业联盟发布了《地铁场所照明用 LED 灯具技术规范》，该技术规范细化了地铁场所照明用 LED 灯具的设计、生产、使用等环节的具体要求，为 LED 灯具在轨道交通行业内的推广行业提供了指导。近年来，新建地铁的城市中，郑州、昆明、杭州、宁波等地铁线路列车客室照明先后采用了 LED 照明光源。上海、深圳、广州、南京、北京等城市的地铁车辆上也逐步通过旧车改造和新车采购等方式推广应用 LED 照明光源，均达到了很好的节能效果。因此，采用 LED 光源替代传统荧光灯是节能减排的有效措施和发展趋势。

1.3.2 光敏控制方式

除了采用 LED 光源替代传统的荧灯光源外，轨道交通车辆客室照明节能的另一种主要方式是采用光敏控制方式，即根据外界照度的强弱对客室照明进行

开关控制或亮度调节，从而起到节能减排的作用。

2003 年，上海地铁三号线引进的法国 ALSTOM 生产的 03A01 型电动列车是国内第一种具备客室照明光敏节能控制功能的列车。03A01 型列车采用 LU1000 系列光敏控制器，安装于列车司机室右上方挡风玻璃内，如图 1.1 所示。其控制阈值为 250 lx，动作延时时间为 1 秒，且参数不可调。ALSTOM 列车通过在客室照明控制回路中串联 LU1000 控制器的控制触点，当外界照度大于 250 lx 时，触点断开，列车的常用照明关闭，起到节能作用。当外界照度低于 250 lx 时，触点闭合，列车的常用照明打开，保证客室内照度。

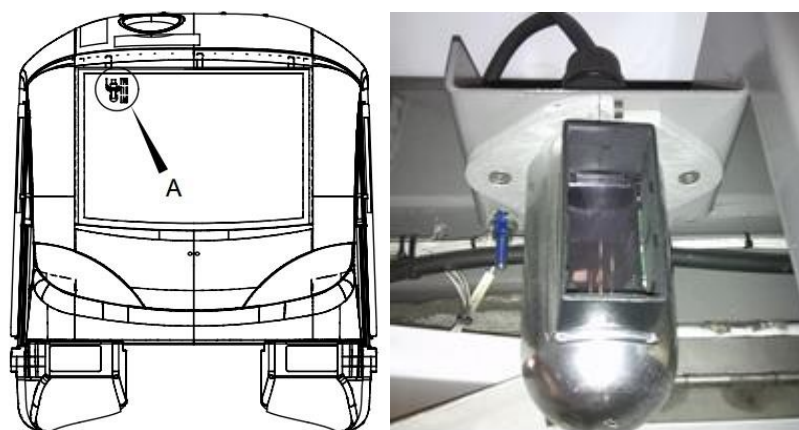


图 1.1 03A01 型列车光控制器及安装位置 A 示意图

在实际运用中，由于控制阈值设置单一，且延时时间过短等原因，列车在进出地面站台或长度较短的隧道或桥洞时，会出现客室照明短时间内频繁开启和关闭的现象。一方面，由于列车采用的是传统荧光灯，容易造成灯管损耗加剧，寿命严重缩短，增加运营的维护成本。频繁的开关照明会造成客室内乘客的舒适度下降，容易引起投诉等，降低了运营服务质量。另一方面，由于客室照明的开关由主控司机室上方的光控制器控制，因此存在列车驶出隧道时，主控司机室的光控制器检测到大于阈值的照度，从而在 1 秒后关闭客室常用照明。此时，由于列车长度较长，大部分列车处于隧道内，隧道客室内照度将明显降低，影响舒适度。

上海地铁十一号线 11A01 型列车由南车株洲电力机车有限公司生产，采用国内某厂商生产的光敏控制器作为客室照明的自动控制器，如图 1.2 所示。其控制阈值为 50lx，动作延时时间为 3 秒。虽然，11A01 型列车通过优化安装在两头司机室的光控制器的控制，实现了全列车完全驶出隧道后关闭客室常用照明的功能。但是，由于其控制阈值单一且延时时间不够，在进出地面站台或长度较短的隧道或桥洞时，同样会出现客室照明短时间内频繁开启和关闭的现象。因此，在实际运营中也未开启该功能进行节能。



图 1.2 11A01 型列车光控制器及安装位置示意图

2013 年底建成通车的上海地铁十六号线列车，由南车株洲电力机车有限公司生产，采用与十一号线同样型号的光控制器。与十一号线相比，十六号线列车的照明节能方面有了很大的进步。首先，客室照明采用 LED 作为光源，可以大幅降低照明用电的能耗。其次，通过光敏控制及集中驱动电源的方式，列车可以根据外界照度的强弱实现对 LED 灯具电流大小的自动调节，从而实现节能与客室照度需求的平衡，同时保证了客室照度的均匀分布。但是，在实际运营中，十六号线列车同样存在进出站台即出现客室照明亮暗变化的现象，实际上未彻底解决十一号线列车存在的同类问题。

目前，上海地铁有多种车型具备通过光控制器实现自动开关客室照明的功能。在实际运用中，地铁运营单位发现，由于阈值设置单一、延时太短等原因，列车在进出地面站台或长度较短的隧道或桥洞时，会出现客室照明短时间内频繁开启和关闭的现象。一方面，容易造成荧光灯管损耗增加运营的维护成本。频繁的开关照明容易引起乘客投诉，降低运营服务质量。另一方面，由于列车长度较长，完全驶出隧道需要一定的时间。主控司机室的光控制器检测到大于阈值的照度，而关闭客室常用照明，处于隧道内客室照度将明显降低，影响舒适度。

综上所述，除十六号线 16A01 型列车以外，上海轨道交通所有已投入运营的列车在高架或地面线路运行时，无论外界光照条件如何，客室照明均采用全开的方式，不能起到节能作用。

1.4 研究的目的是和意义

轨道交通车辆的能耗主要由牵引系统与辅助系统能耗组成。其中，牵引系统已经通过再生制动等相关技术充分吸收和利用制动能量。辅助系统中，通过并网供电提高效率，空调通过变频、根据载荷调节新风门风量等技术实现节能。但是，乘客容易关注的客室照明系统的节能技术研究相对滞后，有待做进一步研究。

上海地铁四号线作为上海唯一的一条环形线路，既有地下线路部分，又有地面线路部分，且地面站台形式不一，沿线建筑物林立，光照强度变化复杂。因此，本文选择运营情况较为典型的上海地铁四号线作为研究对象，以列车的客室照明控制系统作为切入点，分析采用最新节能技术在四号线列车上应用的可行性或采用成熟技术加以改造的技术路线。结合实际的运营环境和运营需求，制定出可行的技术方案，做到在保证列车运营安全、功能完整、满足运营需求的前提下，实现降低照明系统能耗水平，为实现大规模网络化运营下的城市轨道交通车辆节能减排做技术上的探索和准备。

四号线列车客室照明现有客室照明灯具的总额定功率 7kW，根据四号线工作日及节假日列车运行图的规定，全年四号线开行列车 117305 小时，则用电量为 821135kWh。初步估算，四号线车辆客室照明通过节能改造后，与原有荧光灯具和照明全开方式的耗电功率相比可实现 50%以上的节能效率，同时每年可节约电能 40 万千瓦时以上，具有很好的节能潜力。

要实现上述目标，目前主要存在以下问题：

- 1) 四号线列车客室照明采用传统荧光灯具，功耗大、寿命短、维护成本高，不利于节能目标的实现；
- 2) 四号线列车设计时未设置客室照明光敏控制功能，无法实现根据外界照度进行节能控制；
- 3) 既有型号的客室照明光敏控制器功能不完善，无法直接应用于四号线列车的客室照明节能改造，需开发一种符合运营需求的新型光敏节能控制装置。

1.5 本文主要研究工作

由于目前已投入运营的列车配备的客室照明光敏控制器均不符合实际运营的要求，同时十六号线新车采用的方案无法在既有车辆上实现。因此，为了实现占车辆总数绝大部分的旧车客室照明的节能目标，必须结合相关运营的线路光照度环境，研究有针对性的对策，实现良好的节能效果与成本之间的平衡。本文将以上海地铁四号线为研究对象，通过采用 LED 灯具替代传统荧光灯灯具以及开发能够针对正线复杂光照度环境进行精确控制客室照明智能光敏节能控制器，结合四号线列车的照明控制回路改造，实现投入成本低、节能效率高、适应复杂光照度环境、保证客室照度舒适度的可行方案。本文主要工作如下。

- 1) LED 灯具选型时，核算客室照度是否符合轨道交通车辆相关标准的要求。LED 灯具必须满足安装尺寸、电源、接口形式等与列车的兼容性，同时必须符合轨道交通车辆标准的振动冲击、电磁兼容等要求。

2) 上海地铁四号线列车客室照明分两部分控制, 分别为紧急照明和常用照明。控制电路通过继电器与西门子 SIBAS KLIP 分站等设备的配合, 实现紧急照明和常用照明的开关控制。原有照明控制电路不具备光敏控制功能, 完全由人工手动控制照明的开关。在此基础上实现节能改造, 必须将采集的光强信号转换成列车能够识别的信号, 实现客室照明节能控制。同时, 需结合三号线、十一号线、十六号线等列车照明节能控制案例优缺点, 围绕四号线列车及其运营条件的实际情况, 制定可行的、低成本的改造方案。

3) 由于既有客室照明光控制器阈值设置单一、延时太短等原因, 列车在进出地面站台或长度较短的隧道或桥洞时, 会出现客室照明短时间内频繁开启和关闭的现象。因此四号线列车的客室照明节能改造无法简单应用相关产品, 必须寻找或另行开发一种符合要求的光敏控制器。针对存在的问题, 首先需对四号线列车的运营环境进行研究, 了解沿线光照度变化规律。据此对列车进出站点、隧道、建筑物、天气变化等因素的影响进行深入分析, 制定有针对性的控制策略, 使客室照明节能光敏控制器具备一定的智能化功能, 实现节能与客室照度需求间的平衡。本课题计划开发一种由单片机控制, 采用电子式触点、通过专用软件控制应对复杂光照环境的智能光敏控制器, 实现既保证客室照明舒适度要求又节能环保的效果。同时, 新控制器必须能够利用列车提供的 110V 直流电源, 结构紧凑、便于安装、适于四号线列车的客室照明控制方式, 并且具有节能计算功能等。

1.6 本章小结

本章介绍了城市轨道交通对市民出行的重要性以及市民对车辆节能要求的日益提高。简单地叙述了目前相对成熟的车体轻量化、牵引系统、辅助系统等车辆节能技术的应用情况与效果。对国内外车辆客室照明节能技术的应用现状进行了分析, 并总结了其存在的问题。分析了上海地铁四号线车辆采用 LED 替代荧光灯和光敏节能控制改造方案的可行性, 并拟定了与客室照明原灯具和控制方式耗电功率相比实现 50%以上节能率的目标。

第 2 章 四号线车辆客室照明 LED 替代改造研究

LED 照明具有高效低耗、寿命长等优点，因此在轨道交通车辆客室照明中的应用越来越普及。目前我国多个城市轨道交通车辆客室照明的开始应用 LED 作为照明灯具，亮度及节能效果良好。相关成功案例为本文所述的四号线车辆客室照明的 LED 节能替代改造提供了借鉴经验。本章介绍了 LED 灯具发光的原理与应用的优势。通过分析四号线车辆客室照明原有荧光灯的应用情况，提出 LED 灯具替代需要解决的技术问题与解决方案，并计算替代后实现的照明效果和节能率。

2.1 LED 的原理与优势

2.1.1 LED 的发光原理

LED 是发光二极管的英文缩写，是一种新型光源，全称 Light Emitting Diode。它利用固体半导体芯片作为发光材料，通过在半导体 P-N 结两端施加直流电压使得半导体中自由电子和自由空穴的直接碰撞复合引起光子发射而产生光，所以也被称为冷光源。

LED 的发光颜色、发光效率与制造 LED 的材料和制造工艺有关。通常单只 LED 只能发出单色光，但是通过在制造过程中添加含铝 (Al)、镓 (Ga)、铟 (In)、氮 (N) 等的化学物，LED 可发出涵盖所有可见光光谱范围，大量应用于各种发光光源领域。

2.1.2 LED 的技术特点

1) LED 光源的光效理论值最高可达 370lm/w，目前实验室最高光效已达到 250lm/w，应用于地铁车辆照明用 LED 光效可达 100lm/w，是目前应用于地铁车辆照明中光效最高的照明光源。

2) LED 光源单面出光，在整个灯具光学系统的设计过程中其发光角度通常为 120 度，可以做到很高的灯具效率。

3) LED 光源可以实现灯具的无极调光，可以结合照明场合的实际需要动态调整照明的亮度，实现智能化管理。

4) LED 灯具的光通量衰减到 70% 的标称寿命约为 100,000 小时，考虑到实

际使用中的频繁开关和启动等因素，使用寿命在合理的散热设计和电源驱动条件下，可以长达 50000 小时。

5) LED 是一种固态光源，采用软性硅胶封装的全固体一体化结构，没有传统灯具中玻璃、钨丝等可动易损部件。因此，相比于传统灯具，LED 更能够经受得住振动、冲击而不致引起损坏，适合应用于对振动冲击有特殊要求的轨道交通车辆场合。

6) LED 还具有体积小、重量轻、工作电压低、发光响应快、光色纯等特性。

2.1.3 LED 灯具与传统灯具的比较

目前仍在普遍使用的传统灯具，如白炽灯、荧光灯、高压钠灯等在灯具体积、电量消耗、使用寿命、发热量、坚固耐用性等多个方面相比 LED 灯具存在明显的劣势。同时，作为冷光源的 LED 又在绿色环保、智能可控、可靠性高以及响应时间短等方面的具有突出优势。因此，随着 LED 灯具光效的提高和散热技术的日益成熟，使其作为一种新的光源快速进入各种照明应用领域，并且正在从早期的指示灯、装饰、背景光源等场合，快速进入到家用照明、商业照明、道路照明、景观照明、交通工具照明、场地照明等场合。

表 2.1 LED 灯具与荧光灯的比较

项目		LED灯	荧光灯
色纯度		覆盖全部可见光光谱	单一(白/黄)
工作温度(°C)		≤45	≥70
有害波段		无紫外、红外及辐射线	除可见光，尚含紫外、红外及辐射线
方向性		强	全方向
光衰		慢	快
抗震性		极强	差
光源效率 (lm/w)	理论值	370	80
	实验室值	250	
	应用值	100	
电源效率(%)		85	70
灯具效率(%)		90	75
光源光效(lm/w)		84.15	42
使用寿命 (h)	理论值	60000--100000	8000--12000
	应用值	>50000	6000--8000

以目前在大体量场合以及交通运输车辆上广泛使用的荧光灯为例，与 LED 灯的比较如表 2.1 所示。从对比数据可以发现，LED 灯具在各个方面全面超越荧光灯，具有极好的应用前景。

2.2 LED 在轨道交通车辆上的应用

2.2.1 国内外应用情况

轨道交通系统中可以常用的 LED 灯具类型主要有 LED 筒灯、LED 灯管、LED 吸顶（吸壁）灯、LED 平板灯等。这类灯具产品目前技术较为成熟，性能稳定、质量可靠。近年来，国内外采用 LED 灯具提供照明的地铁线路逐渐增多。

2012 年 4 月，东京地铁投入使用的银座新“1000 系”地铁列车的前部标识灯和客室灯全面采用 LED 照明，客室灯在确保亮度不低于荧光灯的同时，节能约 40%。

2012 年 6 月，巴黎地铁成为世界上第一个全面配备 LED 照明的交通网络。

2013 年底，北京地铁四号线对 10 个地铁车站开展 LED 节能改造，使用 1 万多个 LED 灯具替换传统荧光灯具，预计每年可节省电量达 600 万 kWh。

杭州地铁一号线车辆在设计初始就提出了采用 LED 照明的理念。在开通试运营后收到了良好的效果，每年可节省用电 371 万 kWh。

在地铁车辆中采用 LED 光源照明，无论从节能、环保以及后续的维护工作等方面，都优于采用荧光灯等传统光源的照明方案，带来明显的社会效益和经济效益。

2.2.2 社会效益

1) 节能性好

LED 照明具有发光效率高、能耗低、寿命长等特点，灯具本身在节能方面体现出明显的优势。LED 灯通电可立即正常工作，无需长时间等待。光源显色性好，接近自然光。车辆进入偏暗的区间后，为客室照明根据运行场合以最优化的方式进行节能控制创造了条件，提升 LED 的节能减排效果。

2) 绿色环保

LED 光谱单色性，无红外、紫外光，无辐射，可以安全触摸，属于典型的绿色照明光源，在使用中也不会危害人体健康。LED 主要材料为硅与铜以及封装用的树脂，不含汞类有害物质。而荧光灯管中使用了剧毒的汞，LED 不存在环境污染问题。

3) 节省投资

虽然轨道交通车辆客室照明的费用在地铁建设的总投资中所占的比例极小。但是在日常运营中，采用 LED 灯不仅可以节省大量电费，还由于能显著延长灯

具的使用周期，比传统光源更长的使用寿命和更低的光衰，可以节省大量的更新费用和维修费用。同时，减少了维护工作量和降低了劳务成本的支出。

4) 提高服务质量

LED 容易被集成到智能控制系统中，实现智能调光、调色、远程控制等功能。智能化的照明方式可以根据不同的光学、美学、人类心理学及生理学的需求，提供不同的照明方案，在环境、光学自适应方面满足地铁乘客照明的需求。LED 光源在使用时限超过本身寿命的情况下，不会立即熄灭而造成照明失效，为车辆客室的照明检修提供了安全性及时间上的保障，保障了乘客的需求。LED 灯具抗震性强，非常适合地铁运营环境，减少了由于照明故障对列车运营造成的影响。

2.3 四号线车辆 LED 照明节能替代改造研究

2.3.1 客室照明分布

四号线列车客室采用荧光灯作为光源，共有 T8 规格的 36W、18W 两种灯管，尺寸规格 $\Phi 26 \times 1198\text{mm}$ 和 $\Phi 26 \times 588\text{mm}$ ，采用标准的 G13 安装接口。电源采用车载的 110VDC 电源，范围为 77~137.5VDC。控制上，设置为 2 路常用照明与 1 路紧急照明，分别由不同的接触器进行控制。客室照明采用分散驱动电源方式，每个灯管都有一个逆变电源，分别安装于每个灯体背面。其中，A 车两侧各布置 10 根 36W 常用照明和 5 根 36W 紧急照明荧光灯管，如图 2.1 与表 2.2 所示。

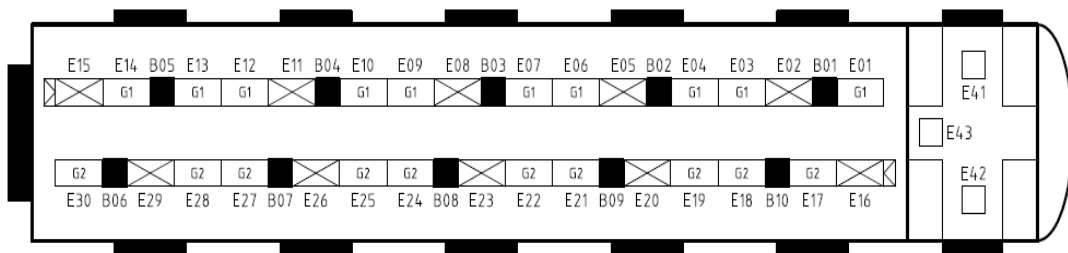


图 2.1 A 车客室照明布置图

注： \square_{G1} ：常用照明组 1（36W）； \square_{G2} ：常用照明组 2（36W）；
 \square_{G1} ：常用照明组 1（18W）； \square_{G2} ：常用照明组 2（18W）
 \boxtimes ：紧急照明组（36W）。

表 2.2 A 车客室照明分布表

	规格	尺寸 (mm)	安装接口	电源 (VDC)	功率 (W)	数量 (根)
常用照明	T8	$\Phi 26 * 1198$	G13	77~137.5	36	20
紧急照明	T8	$\Phi 26 * 1198$	G13	77~137.5	36	10

B 车和 C 车客室照明的布置上采用完全相同的设计，在车厢两侧各布置 10 根 36W 常用照明和 5 根 36W 紧急照明荧光灯管，另在一端的尽头位置安装 2 根 18W 的常用照明短灯管，如图 2.2 与表 2.3 所示。

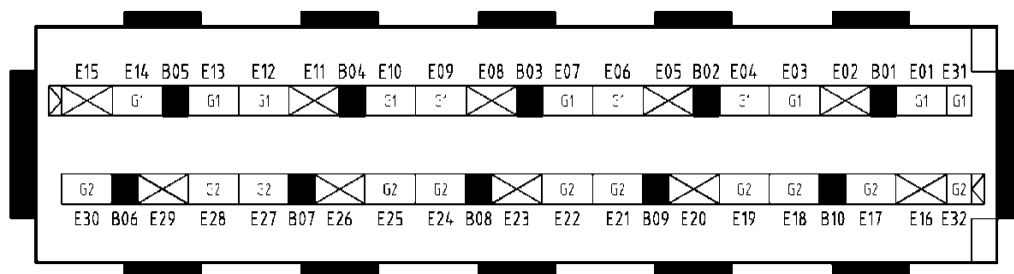


图 2.2 B/C 车客室照明布置图

注： \square_{G1} ：常用照明组 1（36W）； \square_{G2} ：常用照明组 2（36W）；
 \square_{G1} ：常用照明组 1（18W）； \square_{G2} ：常用照明组 2（18W）
 \boxtimes ：紧急照明组（36W）。

表 2.3 B/C 车客室照明分布表

	规格	尺寸 (mm)	安装接口	电源 (VDC)	功率 (W)	数量 (根)
常用照明	T8	$\Phi 26*1198$	G13	77~137.5	36	30
	T8	$\Phi 26*588$	G13	77~137.5	18	2
紧急照明	T8	$\Phi 26*1198$	G13	77~137.5	36	10

2.3.2 客室照明功率计算

如表 2.4 所示，全列车客室照明灯具共计 36W 荧光灯管 180 根，18W 荧光灯管 8 根。其中，紧急照明 36W 荧光灯管 72 根，常用照明 36W 荧光灯管 108 根和 18W 荧光灯管 8 根。每根灯管配备一个功率为 2W 的电子镇流器。因此，全列车常用照明的总功率为 4.264kW，紧急照明的总功率为 2.736kW，列车客室照明的总功率为 7000W。

表 2.4 四号线列车客室荧光灯照明功率统计表

	功率 (W)	数量(根)	功耗 (kW)
常用照明	36+2	108	4.104
	18+2	8	0.16
紧急照明	36+2	72	2.736
合计	/	/	7

2.3.3 客室照明照度计算

为了满足乘客的照明需求,《地铁车辆通用技术条件》(GB/T 7928-2003)要求离客室地板面 0.8m 以上的位置平均照度不低于 250 lx。因此,在选择 LED 灯具时,必须首先保证客室照度要求。

2.3.3.1 客室理论照度计算方法

通常采用的照度计算有三种方法:单位容量法、利用系数法、逐点计算法。目前,轨道交通车辆客室照明照度计算最常用的是利用系数法。其计算公式为

$$E_{av} = \frac{CR \times \Phi \times U \times K}{A} \quad (2.1)$$

其中, E_{av} 为通过公式计算得出的规定平面平均照度。 CR 为灯具的透光率,由灯罩的材质或形式决定。如荧光灯的透光率在敞开式情况下为 0.75, 格栅式为 0.6; 采用透明玻璃或塑料灯罩为 0.65, 采用同样材质的磨砂或棱镜灯罩则为 0.6。 Φ 则为灯具的总光通量, 即所要计算场所安装的所有灯具的光通量总和。

U 为利用系数, 是指从照明灯具照射出来的光束有效到达规定表面的比例。因此, 利用系数主要与照明灯具的设计、安装高度、房间的大小和相关墙面的反射率等因素有关。具体数值可据客室空间比和客室内顶板、墙面、地板的反射率, 查利用系数表得出。

K 为维护系数, 照明灯具在使用一定周期后, 在规定表面的平均照度与该灯具在相同条件下新装时在同一表面上所得到的平均照度之比。一般指由于照明灯具老化而发生的光衰或灰尘积累使空间反射率降低而乘上的系数。一般较清洁的场所, 如客厅、卧室、办公室、教室、阅读室、医院、高级品牌专卖店、艺术馆、博物馆等维护系数 K 取 0.8; 而一般性的商店、超市、营业厅、影剧院、机械加工车间、车站等场所维护系数 K 取 0.7; 而污染指数较大的场所维护系数 K 则可取到 0.6 左右。

A 则为计算照度所在的工作面面积。

2.3.3.2 客室照度计算

为了满足《地铁车辆通用技术条件》的要求, 需要对算四号线车辆离地板面 0.8m 的平面的平均照度。根据式 (2.1) 计算平均照度, 需要确定利用系数法公式中的各个参数。

四号线车辆客室照明采用的为塑料半透明灯罩, 因此灯具透光率 CR 可取为 0.6。

灯具的总光通量 Φ 则为客室内所有灯具的光通量之和。由于 A 车的照明布

置与 B 车和 C 车不同，因此需分别计算。

利用系数 U 和维护系数需要根据客室的空间比和客室内顶板、墙面、地板的反射率查表获得。四号线车辆客室的顶板涂装美观油漆，有效反射率为 70%，侧墙平均反射率为 50%，地板采用聚合材料，反射率为 20%。客室的空间比则需要根据车体的尺寸进行计算，计算公式为式 (2.2)。

$$RCR = \frac{5 \times h \times (a + b)}{a \times b} \quad (2.2)$$

其中，RCR——客室空间比；

a ——客室宽度；

b ——客室长度；

h ——灯具距离规定平面的高度。

1) A 车客室照度计算

根据 A 车车体尺寸图 (图 2.3) 可以确定车体宽度为 3000mm，去除两侧侧墙厚度 20mm 后客室宽度 a 为 2800mm；客室内部长度 20930mm；客室顶板至地板面的净高度为 2100mm，减去 800mm 的规定平面高度后，灯具距离规定平面的高度 1300mm。利用式 (2.2) 计算，可以求出客室空间比 RCR。

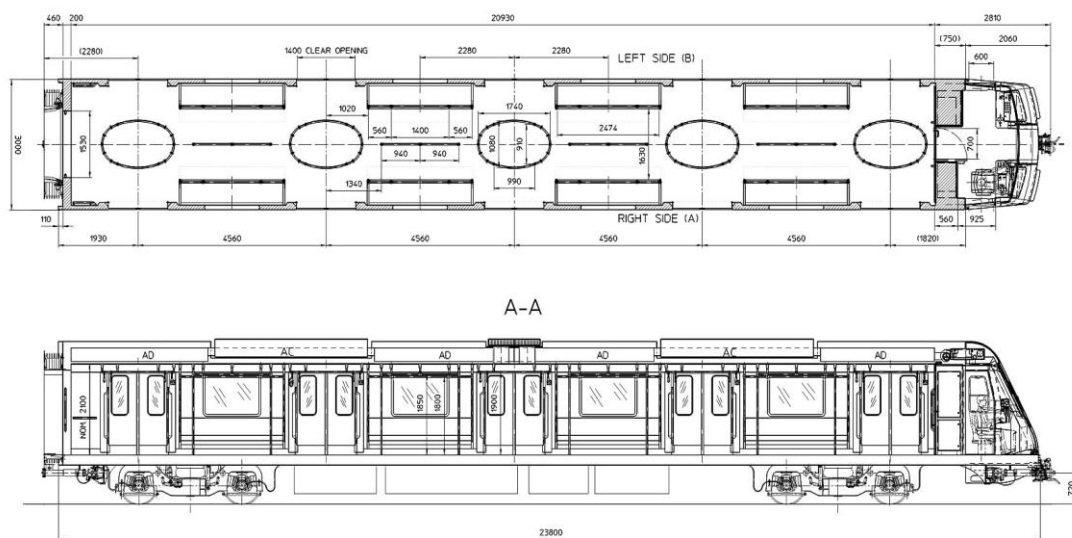


图 2.3 A 车车体尺寸图

$$\begin{aligned} RCR &= \frac{5 \times h \times (a + b)}{a \times b} \\ &= \frac{5 \times 1300 \times (2800 + 20930)}{2800 \times 20930} \\ &= 2.63 \end{aligned} \quad (2.3)$$

据客室空间比和客室内顶板、墙面、地板的反射率，查利用系数表可知：利用系数 $U=0.8$ ；维护系数 $K=0.7$ 。A 车共 30 根 1198mm 长灯管，选用单根光通量 2000lm 的 LED 灯管进行照度计算，则灯具总光通量 Φ 为 60000lm。

根据式 (2.1)，计算 A 车离地板面 0.8 米处的平均照度

$$\begin{aligned} E_{av} &= \frac{CR \times \Phi \times U \times K}{A} \\ &= \frac{0.6 \times 60000 \times 0.8 \times 0.7}{2.8 \times 20.93} \\ &= 344 \end{aligned} \quad (2.4)$$

计算结果为平均照度 344lx，满足轨道交通相关标准对客室照明最低照度的要求。

2) B 车客室照度计算

根据 B 车车体尺寸图 2.4 可以确定客室宽度 a 灯具距离规定平面的高度 h 与 A 车相同，客室内部长度 21880mm。利用式 (2.2) 计算，可以求出客室空间比 RCR。

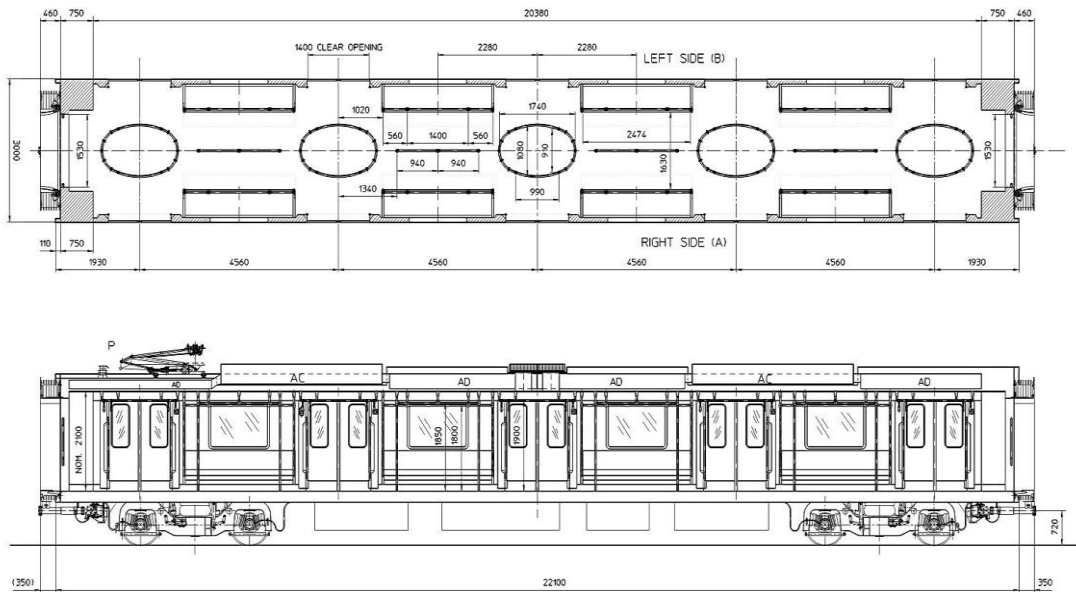


图 2.4 B 车车体尺寸图

$$\begin{aligned} RCR &= \frac{5 \times h \times (a + b)}{a \times b} \\ &= \frac{5 \times 1300 \times (2800 + 21880)}{2800 \times 21880} \\ &= 2.62 \end{aligned} \quad (2.5)$$

据客室空间比和客室内顶板、墙面、地板的反射率，查利用系数表可知：利

用系数 $U=0.8$ ；维护系数 $K=0.7$ 。B 车共 30 根 1198mm 长灯管和 2 根 588mm 短灯管，选用单根光通量 2000lm 和 1000lm 的 LED 灯管分别替代长、短灯管进行照度计算，则灯具总光通量 Φ 为 62000lm。

根据式 (2.1)，计算 B 车离地板面 0.8 米处的平均照度

$$\begin{aligned} E_{av} &= \frac{CR \times \Phi \times U \times K}{A} \\ &= \frac{0.6 \times 62000 \times 0.8 \times 0.7}{2.8 \times 21.88} \\ &= 340 \end{aligned} \quad (2.6)$$

计算结果为平均照度 340 lx，满足轨道交通相关标准对客室照明平均照度不低于 250lx 的要求。

3) C 车客室照度计算

根据 C 车车体尺寸图 2.5 可以确定客室宽度 a 灯具距离规定平面的高度 h 与 A 车和 B 车相同，车体长度为 21680mm。利用式 (2.2) 计算，可以求出客室空间比 RCR。

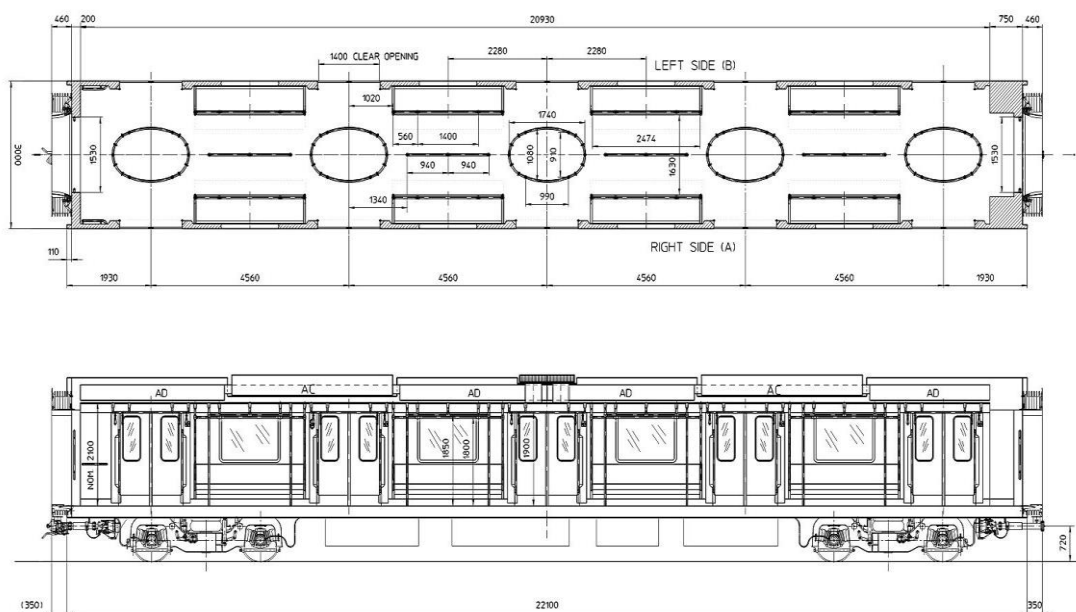


图 2.5 C 车车体尺寸图

$$\begin{aligned} RCR &= \frac{5 \times h \times (a + b)}{a \times b} \\ &= \frac{5 \times 1300 \times (2800 + 21680)}{2800 \times 21680} \\ &= 2.62 \end{aligned} \quad (2.7)$$

据客室空间比和客室内顶板、墙面、地板的反射率，查利用系数表可知：利用系数 $U=0.8$ ；维护系数 $K=0.7$ 。C 车共 30 根 1198mm 长灯管和 2 根 588mm 短灯管，选用单根光通量 2000lm 和 1000lm 的 LED 灯管分别替代长、短灯管进行照度计算，则灯具总光通量 Φ 为 62000lm。

根据式 (2.1)，计算 B 车离地板面 0.8 米处的平均照度

$$\begin{aligned} E_{av} &= \frac{CR \times \Phi \times U \times K}{A} \\ &= \frac{0.6 \times 62000 \times 0.8 \times 0.7}{2.8 \times 21.68} \\ &= 343.2 \end{aligned} \quad (2.8)$$

计算结果为平均照度 343.2 lx，满足轨道交通相关标准对客室照明平均照度不低于 250lx 的要求。

上述客室照度计算说明，在没有外界光源的影响下，所选 LED 灯具的照度完全可以满足《地铁车辆通用技术条件》(GB/T 7928-2003)关于离客室地板面 0.8m 以上的位置平均照度不低于 250 lx 的要求。

2.3.4 LED 灯具的选择

2.3.4.1 LED 灯具类型及选择

目前在轨道交通车辆上所用的 LED 灯具主要包括灯管和平面光源两种结构。

LED 灯管的机械尺寸、外部特征可与传统的荧光灯管一致，有 T5、T8、T10 等规格，长度包括 300mm~1500mm 不等，使用、维修都比较方便。

LED 平面光源即平板式 LED 照明，是将单个 LED 光源通过综合的计算和排列组成一个合适的平面，位于散热板和灯罩之间。它具有照度均匀、灯罩无暗区等优点，给照明场合带来很好的美感和质感。但是与 LED 灯管相比，其成本大约提高 15%。

在选择 LED 灯具时必须考虑车辆的车体设计、电源布置等具体情况。新车采购项目可以在车体和客室照明设计阶段考虑采用平板式 LED 照明，采用集中驱动电源调光节能的方式，能够取得更好的照明效果和节能效果，如上海轨道交通十六号线新车、九号线增购新车、十一号线增购新车等项目。

既有车辆选择 LED 灯具则要兼顾列车上的安装空间限制、电源电压的兼容性以及电路改造可行性等问题。目前的大部分灯管式 LED 灯具均实现了交直流宽电压通用，完全适用于列车照明应用场合，因此应选择兼容车载 110V 直流电源的灯具，可省去逆变电源，降低维护成本。另外，如采用平板式 LED 照明、集中驱动电源调光节能的方式，则需要在原有列车上重新调整布线和车体布局，

改造难度与成本均较高，难以取得较好的效费比。灯管式 LED 灯具的安装方式与荧光灯管相同，可实现很好的互换性，大大降低改造的难度。因此，采用灯管式 LED 灯具是既有车辆客室照明节能改造的合理选择。

2.3.4.2 LED 灯具规格及选择

四号线选用国内某厂家生产的内置式双端进电 LED T8 灯管，尺寸 588mm、1198mm，插头类型为 G13，可直接替代原 T8 普通荧光灯管，无需改变原照明灯具安装方式。

该型 LED 灯管具有较良好的散热性能，LED 灯管任何位置温升不大于 20℃，发光角度 $\geq 120^\circ$ 。同时，该型灯管内置电源并具有短路、浪涌电流、过电压、过热保护功能。

2.3.4.3 LED 灯具电源要求

四号线车辆客室照明全部采用车载蓄电池充电器输出的 110VDC 电源。根据轨道交通车载电气设备的相关标准，节能改造用 LED 灯管需满足 77VDC~137.5 VDC 电压范围内正常工作。同时，为了方便改造和维护，LED 灯管采用两端正、负电源供电方式，并且 LED 灯管正接、反接均可正常工作。

LED 的一个缺点是过度的电流冲击和浪涌会影响 LED 的寿命，要保证 LED 的寿命就必须在电路板上集成或另外增加恒流恒压驱动电源，即恒流源。本次采用的 T8 规格的 LED 灯管因为有足够大内部空间，灯管里已集成恒流源，无需另外配置。

2.3.4.4 LED 灯具安装要求

四号线车辆客室照明节能改造，采用 T8 型 20W 和 10W 的 LED 灯管，分别替代荧光灯的 36W 灯管和 18W 灯管，外形尺寸与安装接口一致。因此，四号线车辆客室 LED 灯管替代安装时，只需将原来荧光灯支架中电子镇流器拆除，直接安装 LED 灯管即可完成替代。

四号线车辆客室照明 LED 替代改造需要满足与列车原有照明系统的灯管规格、电源规格、安装接口等要求。因此，本课题选择采用国内某厂商生产的 T8D20A1U 型和 T8D10A1U 的 LED 灯管，具体参数如表 2.5 所示，分别替代原有的 36W 灯管和 18W 荧光灯管，实现四号线车辆客室照明 LED 节能替代改造。其中，T8D20A1U 型灯管功率 20W，光通量不小于 2000lm，尺寸与安装方式与原有 36W 荧光灯管相同。T8D10A1U 型灯管功率 10W，光通量不小于 1000lm，外形尺寸与安装接口方式与原有 18W 荧光灯管相同。两种规格灯光均使用于交直流 DC/AC77-260V 电源，内置恒流电流源，功率因素大于 0.9，效率大于 0.85。

LED 灯管按普通荧光灯管的色温标准为 5000K，光束角为 120°。

表 2.5 T8 LED 灯参数表

基本信息	产品型号	T8D10A1U	T8D20A1U
灯体参数	尺寸规格 (mm)	Φ26*588	Φ26*1198
	安装方式	G13	G13
	额定寿命 (h)	≥50000	≥50000
	工作环境 (°C)	-20~40	-20°C~40
光学参数	光效/光通量 (lm)	≥1000	≥2000
	配光/光束角 (°)	120	120
	色温/光色 (K)	5000	5000
电气参数	系统功率 (W)	10	20
	输入电压 (V)	DC/AC 77-260	DC/AC77-260
	驱动电流 (mA)	240	480
	电源效率 (%)	>8	>85
	功率因数	≥0.90	≥0.90
	总谐波含量 (%)	≤10	≤10

因此，客室照明采用 LED 灯具后功率统计如表 2.5，常用照明功率为 2.24kW，紧急照明的功率为 1.44kW，列车客室照明的总功率为 3.68kW，如表 2.6 所示。

表 2.6 四号线列车客室荧光灯照明功率统计表

	功率 (W)	数量(根)	功耗 (kW)
常用照明	20	108	2.16
	10	8	0.08
紧急照明	20	72	1.44
合计			3.68

2.3.4.5 客室照度实测效果

根据利用系数法计算客室的理论照度后，还必须对改造后的客室实际照度数据进行测量。实测过程中，选择客室中的 9 个典型位置作为检测点如图 2.6 所示，在离地板面 0.8m 的位置，用照度计进行测量。A1、A2 位置为客室座位处，背靠客室窗；B1、B2 位置为两侧客室座椅中间位置；C1 和 C3 靠近端墙，C2 为客室的正中央位置；D1、D2 位置为靠近车门位置。

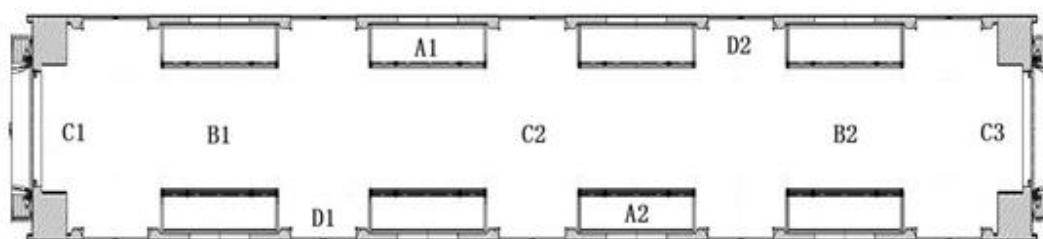


图 2.6 客室照度测试点示意图

由于测试是在实际应用环境条件即受到外界光源影响下进行的,因此客室照度高于理论计算值,同时满足《地铁车辆通用技术条件》的要求,如表 2.7 所示。

表 2.7 客室照度测量数据表(lx)

车辆号	测试点位置								
	A1	A2	B1	B2	C1	C2	C3	D1	D2
040011	411	386	387	385	328	433	427	417	424
040022	400	377	343	433	332	415	422	478	408
040033	386	425	413	457	420	407	412	390	388
040251	490	460	365	42	320	348	435	340	358
040262	340	390	376	414	460	432	441	450	450
040273	440	412	359	439	449	420	412	380	390

2.3.5 振动冲击要求及测试

2.3.5.1 振动冲击标准

轨道交通车辆车载设备必须经过严格的振动、冲击试验。按照《电工电子产品环境试验 第 2 部分:试验方法 试验 Fc: 振动(正弦)》(GB/T 242310-2008)的规定,灯具在经过振动测试后,不能发生零件脱落、结构损坏、点灯不亮等异常现象。《电工电子产品环境试验 第 2 部分:试验方法 试验 Ea 和导则:冲击》(GB/T 2423.5-1995)规定,灯具在经过常温常压冲击测试后,不能发生漏电、点灯不亮等电气异常现象。

2.3.5.2 测试结果

四号线采用的 T8D10A1U、T8D20A1U 灯管根据 GB/T 242310-2008 标准以 5Hz~150Hz 频率在垂直、横向、纵向三个方向各 10 分钟,LED 灯管外观无明显变化,通电工作正常,振动试验通过。

根据 GB/T 2423.5-1995 标准要求,对 LED 灯管以半正弦波对三个正交平面上正反方向各 3 次共计 18 次,LED 灯管外观无明显变化,通电工作正常,冲击试验通过(详见附录 A)。

2.3.6 电磁兼容要求及测试

2.3.6.1 电磁兼容标准

LED 灯管在轨道交通车辆客室内应用,应有良好的电磁兼容性和足够的抗干扰能力,符合轨道交通车辆车载设备《Railway applications-Electromagnetic compatibility-Part 3-2:Rolling stock-Apparatus》(EN 50121-3-2:2006)国际标

准或《电气照明和类似设备的无线电骚扰特性的限值和测量方法》(GB 17743-2007)国家标准, LED 灯管不可在工作过程中产生超过可以接受的向外电磁辐射电平, 影响电动列车车载、地面设备的正常工作。

2.3.6.2 测试结果

按照 GB 17743-2007 标准要求, 采用 EMC 测试接收机和人工电源网络, 进行电源端骚扰电压和辐射骚扰测试, 结果符合标准要求 (详见附录 B)。

2.4 节能计算

2.4.1 节能率计算

节能率是采用节能技术后, 降低的能耗占原能耗的比例。一般也可以通过计算降低的功率占原功率的比例得出节能率:

$$\eta = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100\% \quad (2.9)$$

其中, η ——节能率;

P_1 ——原功率 (W);

P_2 ——新功率 (W)。

按照全列车客室 LED 照明的额定功率 3680W, 与荧光灯管的全车额定功率 7000W 计算, 可实现 47.4%的节电率。

2.4.2 节电量计算

四号线列车客室照明现有客室照明灯具的总额定功率为 7kW, 根据《上海轨道交通 4 号线第 412-1 号工作日列车运行图有关规定》的要求, 全年中的 250 个工作日四号线每天开行载客列次 328 列次, 每列次开行时间 1 小时, 即全天开行共 328 小时。

根据《上海轨道交通 4 号线第 412-1 号节假日列车运行图有关规定》的要求, 全年中的 115 个节假日四号线每天开行载客列次 307 列次, 每列次开行时间 1 小时, 即全天开行共 307 小时。按照现有的客室照明灯具功率 7kW 及全开的控制方式, 全年开行 117305 小时, 则用电量为

$$\begin{aligned} E_{\text{荧光灯}} &= 7 \times 117305 \\ &= 821135 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (2.10)$$

采用 LED 灯具后, 四号线列车客室照明总额定功率为 3.68kW, 则根据以

上算法，全年用电量为

$$\begin{aligned} E_{LED} &= 3.68 \times 117305 \\ &= 431682.4 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (2.11)$$

因此，四号线车辆客室照明采用 LED 灯具替代荧光灯具后，全年可节约用电为荧光灯具年用电量与 LED 灯具年用电量的差值，即 389452.6kWh。

2.5 本章小结

本章介绍了 LED 照明灯具的工作原理、应用特点及节能优势。通过总结其它城市轨道交通车辆 LED 灯具的应用案例，分析其在上海地铁四号线车辆客室照明节能改造中应用的可行性。根据四号线列车客室照明的特点与技术要求，选择合适的 LED 灯管对原有荧光灯管进行节能替代改造。

使用利用系数法计算改造后客室照明在离地板面 0.8 米处规定平面的平均照度，计算结果符合国家标准《地铁车辆通用技术条件》的要求。同时，通过实测改造后客室内规定高度平面内的各点照度，同样符合标准要求。通过节能率计算，得出通过 LED 灯管节能替代改造后，可以实现 47.4%的节能率，节约用电 38 万度以上。因此，上海地铁四号线列车选用 T8D10A1U、T8D20A1U 型 LED 灯管替代原有荧光灯管进行客室照明节能改造，可实现良好的节能效果（详见附录 C）。

第3章 四号线车辆客室照明光敏节能控制电路改造设计

3.1 四号线线路条件及车辆概况

3.1.1 四号线运营线路条件

上海地铁四号线是上海轨道交通网络中唯一的一条环状线路，全线于2007年12月29日贯通运营，总运营里程为33.8公里，其中地面线路长度13.3公里，占总里程的39.3%。四号线与三号线采取“共线营运”方式的虹桥路站到宝山路站之间共有9座地面或高架车站，其余站点均为地下车站。9座地面车站中，由于建筑结构不同、站台形式不同、周边建筑物影响等原因，各站台内的自然采光效果各不相同。

3.1.2 四号线车辆概况

上海地铁四号线列车由德国西门子公司与株洲电力机车有限公司联合设计制造，采用六节编组的A型车。车辆采用1500V直流触网供电，牵引系统采用交流变频变压（VVVF）传动方式，能够实现再生制动与电阻制动，具有一定的节能效果。两节A车各配置一个辅助逆变器为辅助系统供电，辅助逆变器输出380V交流电，为空调机组、空压机、牵引设备冷却风机等设备供电。同时，蓄电池充电机输出110V直流电，为列车低压控制系统及列车照明等供电。列车控制系统采用德国西门子公司专为轨道交通动车控制而研制的专用微机控制系统SIBAS 32，它的全称为西门子铁路自动化系统(Siemens Bahn Automatisierung System)。SIBAS 32系统是一种高性能通用计算机系统，它通过标准和专用外围组件可与任意设备相连，能够完成列车基本的控制和监控任务。SIBAS 32系统可根据操作指令和牵引回路状态以及响应信号进行相应的处理，对各系统中的接触器、继电器、电磁阀、斩波器、发光二极管或数码管等发出控制信号。控制单元同时还能够完成多种监测功能，包括对自身功能的诊断和外部模拟量数值的监测。

为了减少传统的机车车辆布线，西门子设计列车控制系统时设有智能外围设备连接终端分站(SIBAS KLIP)。采用SIBAS KLIP分站，可以迅速地将综合控制指令和信息及时准确的传输给中央控制单元。SIBAS KLIP分站由可编程控制装置(由CPU和Simatic存储器组成)、输入端口及输出端口等组成。

3.1.3 四号线列车客室照明控制原理

四号线列车客室照明分为紧急照明和常用照明两部分，由自复位旋钮开关、SIBAS KLIP 分站、继电器及接触器等完成照明的开关控制，如图 3.1 所示。当任一司机室的主控钥匙接通，则司机室激活继电器 22-K153 得电，该司机室为主控司机室。此时，将位于主控司机室的客室照明控制旋钮开关 52-S01 转到“ON”位置，紧急照明接通接触器 52-K101 线圈吸合，其常开触点使接触器自保得电，全列车紧急照明打开。同时，KLIP 输入模块 41-A101.02 的 E112_14 收到开灯的高电平脉冲信号后，通过 SIBAS 32 总线控制 KLIP 电源模块 41-A101.06 输出 110VDC 电源，使常用照明接触器 52-K103 和 52-K104 得电，常用照明打开。

当客室照明旋钮开关 52-S01 转到“OFF”位置，紧急照明打开继电器 52-K102 线圈得电，其串联在 52-K101 前端的常闭触点断开，使 52-K101 失电，全列车紧急照明关闭。同时，KLIP 模块 41-A101.02 的 E112_15 收到关灯的高电平脉冲信号后，通过 SIBAS 32 总线控制 KLIP 电源模块 41-A101.06 停止输出 110VDC 电源，使常用照明接触器 52-K103 和 52-K104 失电，全列车的常用照明关闭。

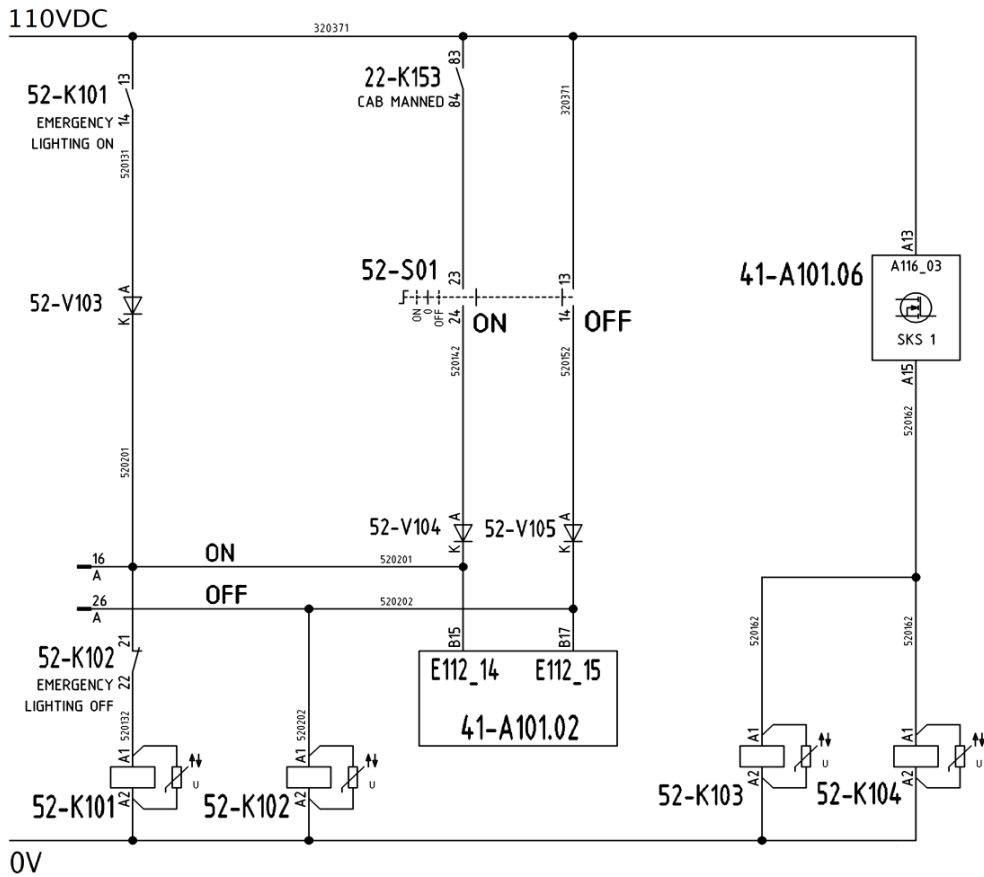


图 3.1 四号线列车客室照明控制电路图

3.2 三种典型客室照明光敏节能控制电路

3.2.1 三号线车辆客室照明光敏节能控制电路

目前,法国 ALSTOM 公司生产的城市轨道交通列车采用 LU1000 系列光敏控制器,安装于列车司机室右上方挡风玻璃内,如图 3.2 所示。

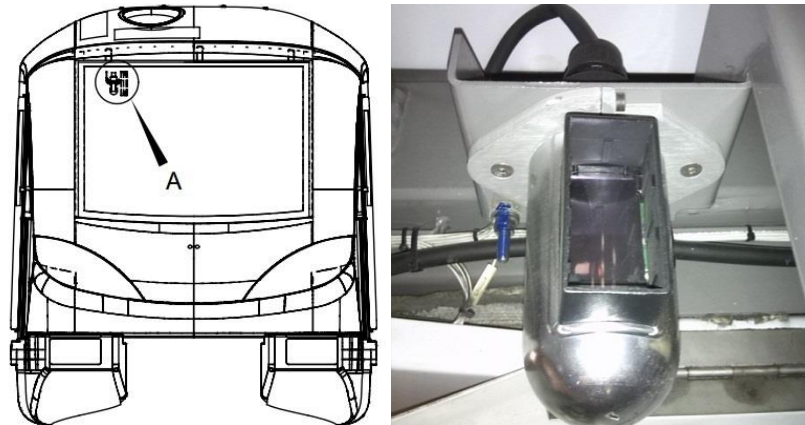


图 3.2 01A03 列车光控制器及安装位置示意图

03A01 型列车的客室照明控制系统由光敏传感器 LCELL、客室照明节能控制继电器 LCELLR、客室照明控制继电器 PLCK 及客室常用照明控制接触器 NLK 构成,如图 3.3 所示。

打开 01A03 型列车客室照明前,司机必须先打开主控制器钥匙,接通列车控制接通继电器 COR 并使其常开触点 COR1、COR2 闭合。其中常开触点 COR1 使光敏传感器 LCELL 得电,并根据外界照度的变化控制客室照明节能控制继电器 LCELLR 是否得电。

然后,通过客室照明控制方式选择开关 PLCS 选择照明控制模式。如外界照度较弱,应选择手动控制模式 M,则客室照明控制继电器 PLCK 线圈得电,则其串联在客室常用照明控制接触器 NLK 线圈前端的常开触点闭合,NLK 线圈得电后客室常用照明开启。如外界照度较强,应采用自动控制模式 A,则客室照明控制继电器 PLCK 的控制由客室照明节能控制继电器 LCELLR 的常开触点决定,LCELLR 的控制则由外界照度强弱决定。当外界照度大于阈值 250lx 时,延时 1 秒后为 LCELLR 线圈输出接通电源。当外界照度小于阈值 250lx 时,则无电源输出,LCELLR 线圈不得电,从而实现根据外界照度的强弱控制客室常用照明开关的功能。

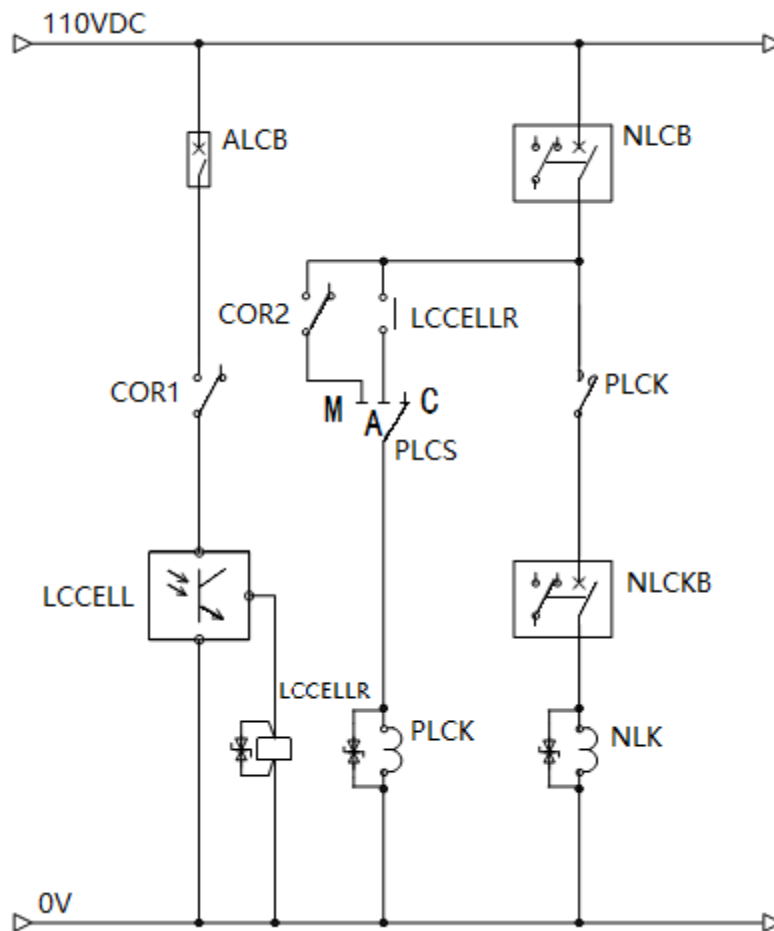


图 3.3 03A01 型电动列车客室常用照明控制原理图

根据 LU1000 系列光敏控制器的功能及其在 03A01 型电动列车客室照明电路中的作用，该型列车理论上具有在环境照度较高的情况下自动关闭列车客室常用照明，从而达到节能的目的。但是从阈值与延时的设置分析，可以发现该功能在实际应用中未考虑进出站台或隧道、天气变化等因素造成的环境照度的波动，以及带来对客室照明频繁开关的影响。

在实际运用中，列车在进出地面站台和长度较短的隧道与桥洞时，会出现客室照明短时间内频繁开启和关闭的现象，造成了荧光灯损坏和服务质量的降低。另外，列车驶出隧道时，主控司机室的光控制器检测到大于阈值的照度，1 秒后关闭客室常用照明。由于列车长度为 140 米，按照每小时 40 千米驶出隧道的速度计算，此时尚有 130 米列车处于隧道内，大部分处于隧道内的客室内照度将明显降低，影响乘客对照度的要求。因此，为了响应节能减排的要求，三号线列车在实际运营中要求司机采用人工操作的方法，根据当天的光照情况，判断是否开启或关闭客室照明。由于判断标准带有极大的主观性，因此很难实现节能与客室照度要求的平衡。

3.2.2 十一号线车辆客室照明光敏节能控制电路

上海地铁十一号线 11A01 型列车由南车株洲电力机车有限公司生产，所采用客室照明光控制器，如图 3.4 所示，控制阈值为 50lx，动作延时时间为 3 秒。



图 3.4 11A01 型列车光控制器及安装位置示意图

如图 3.5 所示，11A01 型列车在 110VDC 电源接通后，通过二极管 52-V103 和客室照明关闭继电器 52-K102 的常闭触点使紧急照明开继电器 52-K101 得电，客室紧急照明回路开启。客室常用照明则需要由司机室主控钥匙接通 22-K151、客室照明控制旋钮 52-S01、客室照明控制方式旋钮 52-S03 的不同组合，实现照明自动或手动控制。具体地，司机室主控钥匙接通后继电器 22-K151 得电，常开触点闭合，将客室照明控制旋钮 52-S01 切至“ON”位置。此时，若客室照明控制方式旋钮 52-S03 选择“手动”模式即触点闭合，则客室照明接通继电器 52-K103、52-K104 得电，客室常用照明打开；若 52-S03 选择“自动”模式即触点断开，则 52-K103、52-K104 的电源需经过客室照明光敏控制器 52-A101 的内部触点才能得电工作。光敏控制器 52-A101 的内部触点的闭合或断开则由外界照度强弱决定，当 52-A101 检测到外界照度大于 50lx，则断开触点；反之则闭合触点，触点动作延时 3 秒。

通过常用照明接通继电器 52-K103、52-K104 的自保触点，使两端司机室的光敏控制器内部触点并联在全车客室照明接通继电器线圈前端。客室常用照明只有在两端司机室的光敏控制器均检测到外界照度大于控制阈值时即全列车驶出隧道后才会关闭。同时，只要有一个司机室的光敏控制器检测到外界照度小于控制阈值时，就会立即打开客室常用照明，即列车驶入隧道时，保证开灯的及时性。但是，由于光敏控制器内部触点的动作延时仅为 3 秒，十一号线列车未能彻底解决列车进出地面站台（需 10 秒以上）时出现客室照明频繁开关的问题。因此，

十一号线列车在实际运营中也未开启光敏节能功能。

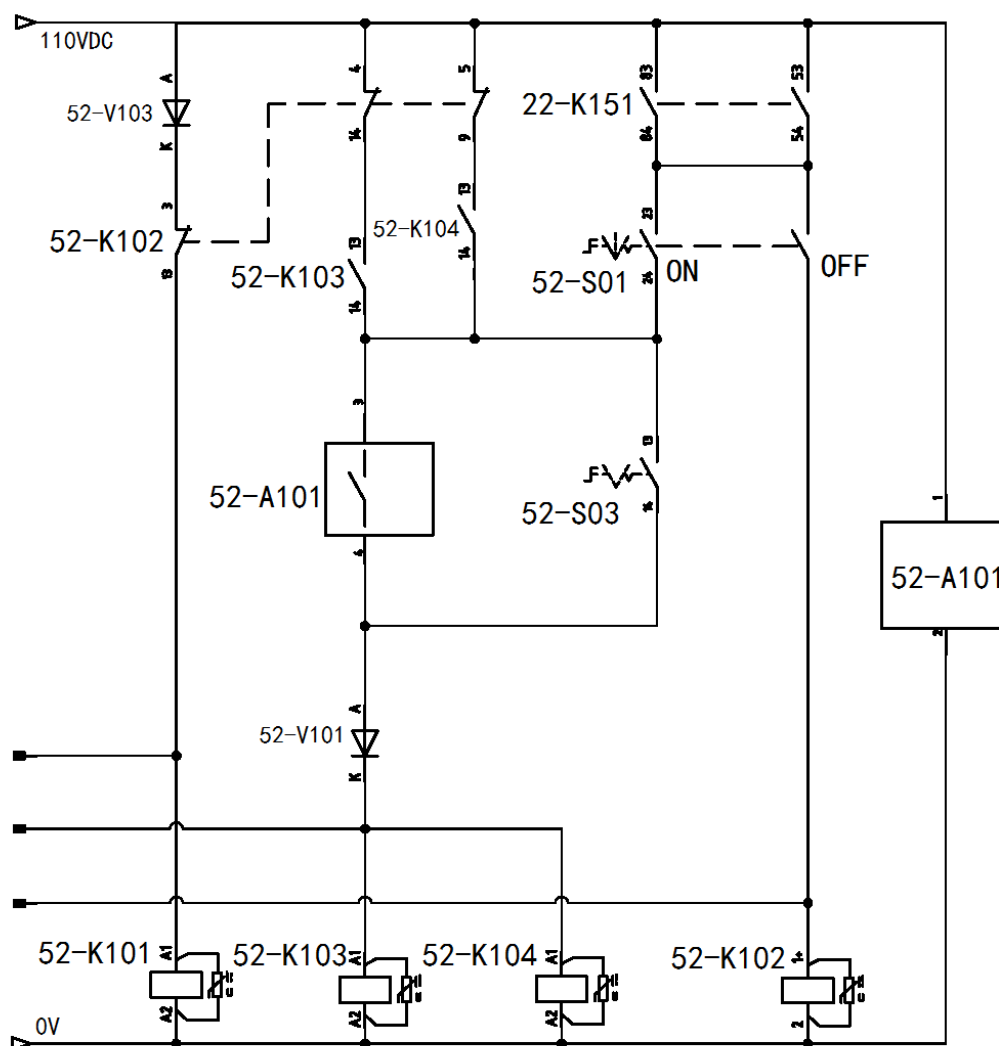


图 3.5 11A01 型列车客室照明控制电路原理图

3.2.3 十六号线车辆客室照明光敏节能控制电路

2013 年底建成通车的上海地铁十六号线列车由南车株洲电力机车有限公司生产，采用与十一号线列车同样型号的客室照明光敏节能控制器。

如图 3.6 所示，十六号线列车客室照明接通首先需要激活主控司机室即 22-K151 常开触点闭合，同时将 52-S01 选择到“ON”位置，则列车客室照明继电器 22-K103、22-K104 线圈得电，常开触点闭合，使其自保工作。其中，22-K103 的另一副常开触点闭合，使客室照明驱动电源模块 52-G101 工作，列车客室照明接通。

十六号线客室照明采用 LED 作为灯具，根据光敏传感器 52-A101 提供的调

光信号，驱动电源模块 52-G101 对 LED 灯的照度进行调节。调光信号回路是由主控司机室 22-K151 常开触点、照明模式开关 52-S03、串联的两头司机室 52-A101 内部触点和非主控司机室 22-K151 常闭触点构成的。当任一司机室的光敏传感器检测到照度大于控制阈值 50lx，则其内部触点断开，则驱动电源模块 52-G101 收到的调光信号为低电平，则驱动电源模块输出正常电流，使 LED 保持较高亮度。反之，当两个司机室的光敏传感器同时检测到照度小于控制阈值，则其内部触点闭合，驱动电源模块收到的调光信号为高电平后自动降低输出电流，使客室 LED 灯具亮度降低，实现节能。

相比十一号线与三号线的的设计，十六号线列车的照明节能设计已有很大的进步。首先，客室照明采用 LED 作为光源，可以大幅降低照明用电的能耗。其次，通过光敏控制和集中驱动电源的方式，列车可以根据外界照度的强弱实现对 LED 灯具电流大小的自动调节，从而实现节能与客室照度需求的平衡。因此，16A01 型列车是目前上海地铁唯一一种客室照明光敏节能控制功能投入实用的车型。但是，由于采用十一号线列车同型号光敏传感器，16A01 型列车同样存在延时过短造成进出站台过程中客室照明亮度频繁切换的现象。

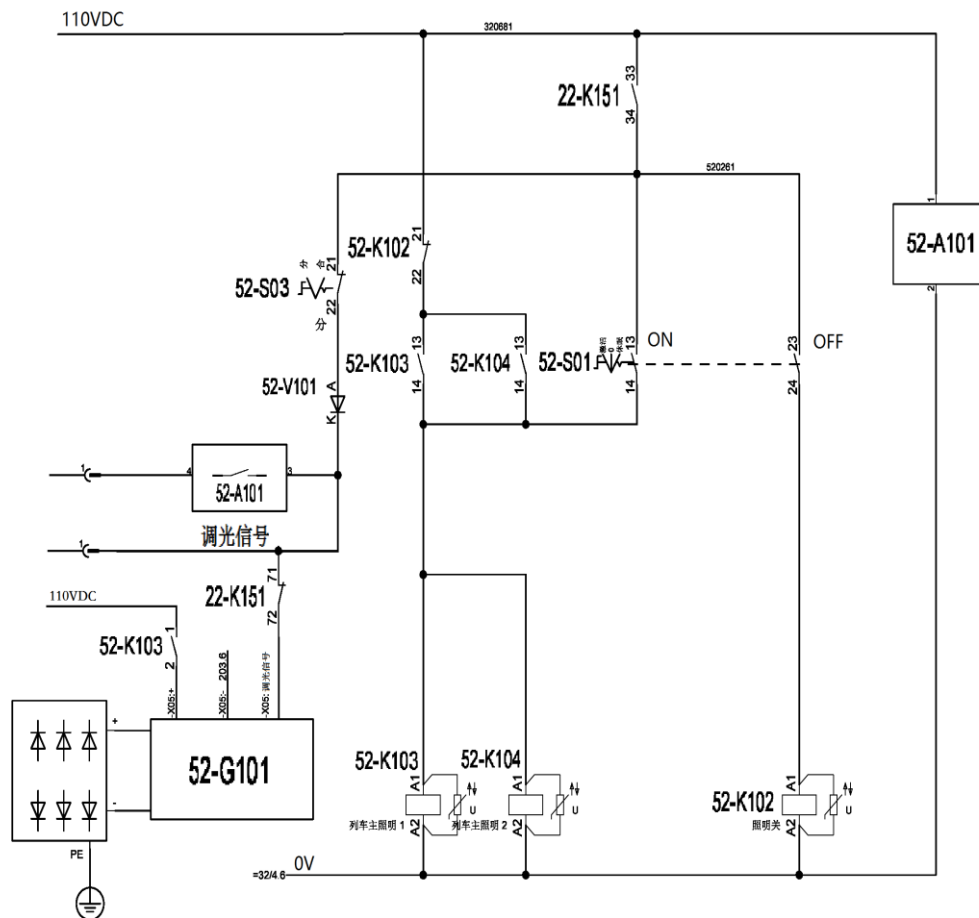


图 3.6 16A01 型列车客室照明控制电路原理图

3.2.4 三种车辆客室照明光敏节能控制功能分析

目前,三号线、十一号线列车虽具有客室照明节能控制设计,但是由于存在各种影响乘客照度需求的问题,因此均不具备实际使用的条件。其中,三号线列车采用最简单的光控方式,阈值单一、延时不够,进出站台或涵洞等出现照明频繁开关,影响照明舒适度。同时,造成大量灯管损坏,增加维护成本。十一号线与三号线一样,通过光控关闭客室常用照明实现节能,虽解决了全列车出隧道即关灯的问题,但其它三号线存在的问题依然未解决。

十六号线则采用全新的节能设计,应用平板式 LED 灯具,使客室照度更均匀。同时,电源采用集中驱动且电流可调的方式,实现了对 LED 的照度进行调节。这一设计,既保证了客室的照度要求,又达到了较好的节能效果。但是,由于采用与十一号线同样型号的光控制器,因此依然存在列车在每次进出站台时,都会出现 LED 亮度变化的现象,未实现最佳控制效果。但是这一现象在照度较高的白天出现,乘客不会有明显感觉,因此不影响该功能投入使用。

3.3 四号线车辆客室照明控制电路节能改造的可行性分析

全面分析三号线、十一号线、十六号线列车的客室照明节能控制方案可知,十六号线方案较为完善,采用了节能率高的平板式 LED 灯具和集中供电驱动方式,实现很好的节能效果的同时,保证了客室照度要求,满足运营需求。

因此,在设计四号线列车客室照明节能方案时,可以参考十六号线方案,结合四号线车辆及其运营环境的特点,综合考虑实现的技术难度、节能效果、改造成本等因素,设计最佳方案。

3.3.1 集中调光节能方案

十六号线列车在设计与制造过程中,充分考虑了照明控制系统的功能需求与结构布局要求,实现的理想照明和节能效果。通过采用平板式 LED 灯具,使客室照度更均匀。根据光敏传感器检测到的外界照度变化,调节 LED 灯具驱动电源输出电流大小,实现客室 LED 照明的亮度调节,如图 3.7 所示。

电路结构上,两端司机室的光敏传感器通过硬线连接和逻辑判断,实现了调光信号的输出。同时,调光信号可以通过列车线传送至驱动电源,实现客室 LED 灯具亮度调节。另外,十六号线列车对客室紧急照明的定义与传统定义不同,紧急照明与常用照明的区别仅在于驱动电源输出电流大小不同,即紧急照明输出电流小,常用照明输出电流大。

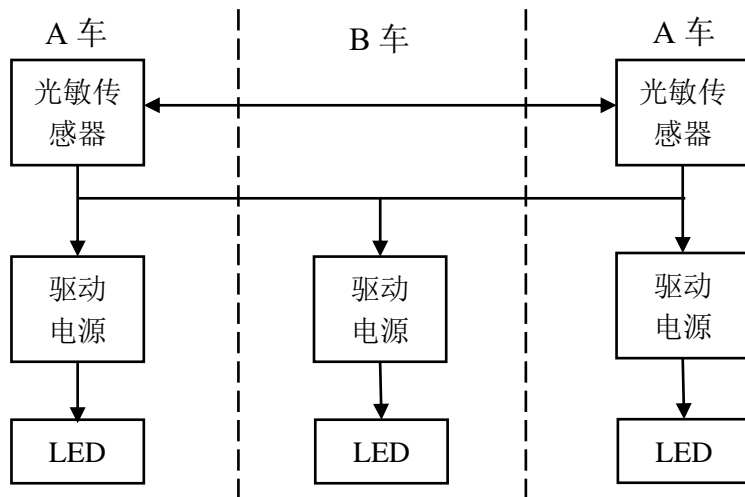


图 3.7 集中调光节能方案拓扑图

四号线列车等传统设计则将客室照明分为三路独立供电，一路为紧急照明，另外两路为常用照明。紧急情况下，两路客室常用照明被关闭，仅保留紧急照明。四号线列车采用西门子 SIBAS 32 系统控制，KLIP 分站采集了主控端 A 车司机室发出的开关客室照明信号，通过 SIBAS 总线控制传输至列车控制单元 VCU 后，再通过 SIBAS 总线控制每节车的 KLIP 电源模块输出电源接通常用照明接通或断开接触器，实现了远程控制客室常用照明。紧急照明则是由硬线控制，直接由照明控制旋钮开关给出的接通信号使接触器得电或失电，如图 3.8 所示。

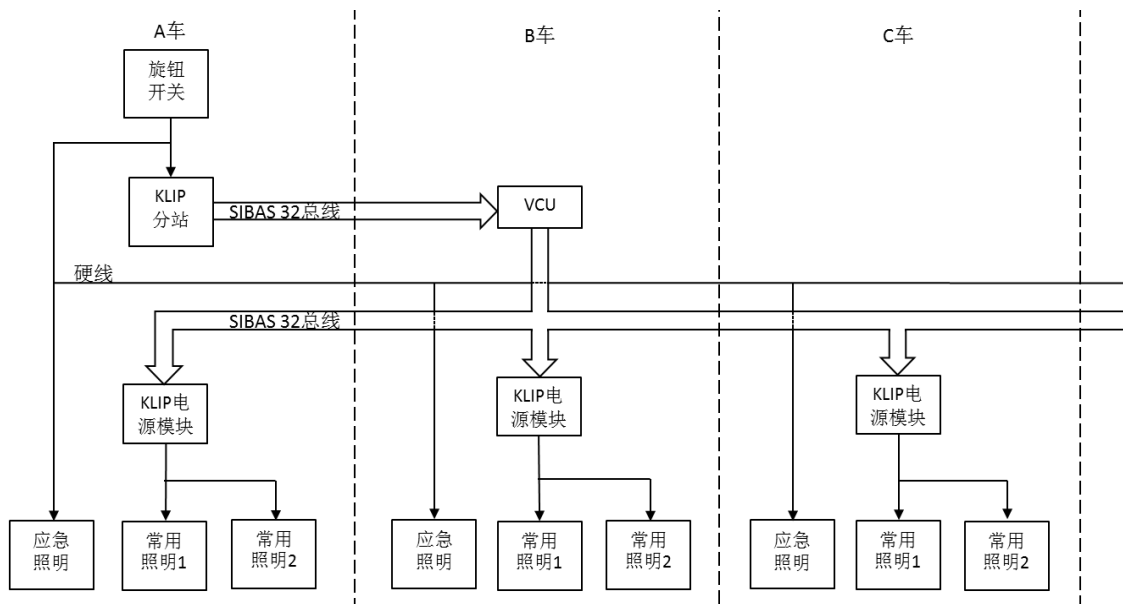


图 3.8 四号线客室照明原有控制拓扑图

如图 3.9 所示，若按照节能效果较好的十六号线方案，采用集中调光的节能控制方式，则四号线列车客室照明须更换为 LED 灯具。其次，在照明控制回路中

增加光控环节即照度传感器。第三，每节车厢的照明电源须增加三路分别控制常用照明与紧急照明的电流可调的 LED 驱动电源，且该电源需能接收照度传感器发出的调光信号。要实现照度传感器对 LED 驱动电源的控制，则必须额外布置贯穿全车的列车线。唯有此，才能实现与十六号线客室照明相同的节能效果。

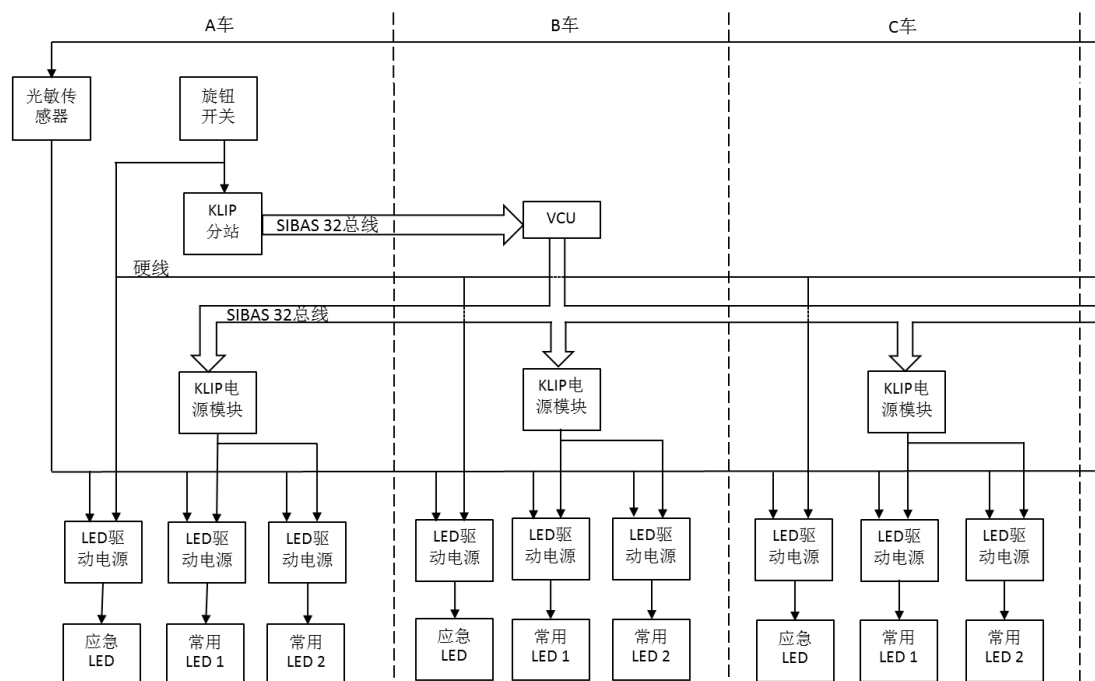


图 3.9 四号线客室照明集中调光式节能控制拓扑图

从改造的成本与实现的节能效果来看，采用集中调光的节能控制方式不仅改造成本较高，且对列车原有系统的改造较大，实现难度大、效费比低，不宜在四号线列车上采用。

3.3.2 四号线列车客室照明节能控制改造方案设计

根据目前十六号线列车客室照明节能的成功案例，采用光敏控制是实现节能的有效途径。由于无法采用集中式驱动电源调节电流的方式实现节能，因此需采用关闭常用照明的方式实现节能，故光控节能改造不涉及紧急照明控制回路。

因此，技术可行且成本可控的办法是在原有的 KLIP 分站采集的照明控制信号端口上并联接入光敏开关控制信号，从而实现客室常用照明根据光敏开关检测到的外界照度进行开关控制，起到节能作用。同时，光敏传感器在故障状态下是可以切除的，从而恢复改造前的控制方式，保证列车客室照明功能完好。

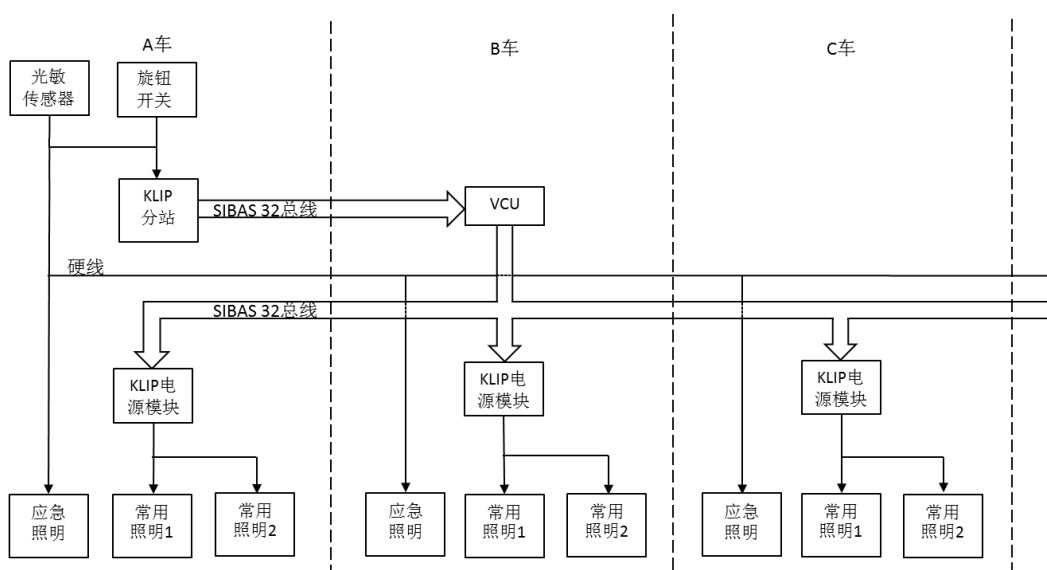


图 3.10 四号线客室照明节能控制方案拓扑图

从结构拓扑图 3.10 来看，本方案硬件上改造简单易行，既能达到节能目的，又能最大限度的降低改造难度与工作量。但是由于四号线列车的客室照明控制是通过 SIBAS 32 控制软件来实现的，因此必须考量硬件改造对软件控制产生影响，最终导致列车功能变化。

图 3.11 为 SIBAS 32 软件中关于客室照明控制部分的逻辑图。该部分由 1 个 RS 触发器功能块 LITERSFF、2 个或门功能块 LITER_OR 和四个与门功能块 LITEAND 组成。

1) 开灯控制时，A1 车须同时满足主控制钥匙激活 (KEY SWITCH ON_A1)、照明控制旋钮接通 (LIGHT ON SWITCH_A1)、A1 车 KLIP 正常 (Klip A1 ok) 三个条件，与门功能块 LITEAND1 输出“1”作为或门功能块 LITER_OR1 的输入变量“IN1”的值。同理可知，A2 车同样满足上述三个条件时，与门功能块 LITEAND2 输出“1”作为或门功能块 LITER_OR1 的输入变量“IN2”的值。或门功能块 LITER_OR1 经过运算，只需满足输入变量中的一个为“1”，即可输出“1”作为 RS 触发器功能块 LITERSFF 的输入变量“SET”的值。

2) 关灯控制时，A1 车须同时满足照明控制旋钮关断 (LIGHT OFF SWITCH_A1)、A1 车 KLIP 正常 (Klip A1 ok) 两个条件，与门功能块 LITEAND3 输出“1”作为或门功能块 LITER_OR2 的输入变量“IN1”的值。同理可知，A2 车同样满足上述两个条件时，与门功能块 LITEAND4 也可输出“1”作为或门功能块 LITER_OR2 的输入变量“IN2”的值。或门功能块 LITER_OR2 经过运算，只需满足输入变量中的一个为“1”，即可输出“1”作为 RS 触发器功能块 LITERSFF 的输入变量“RES”的值。

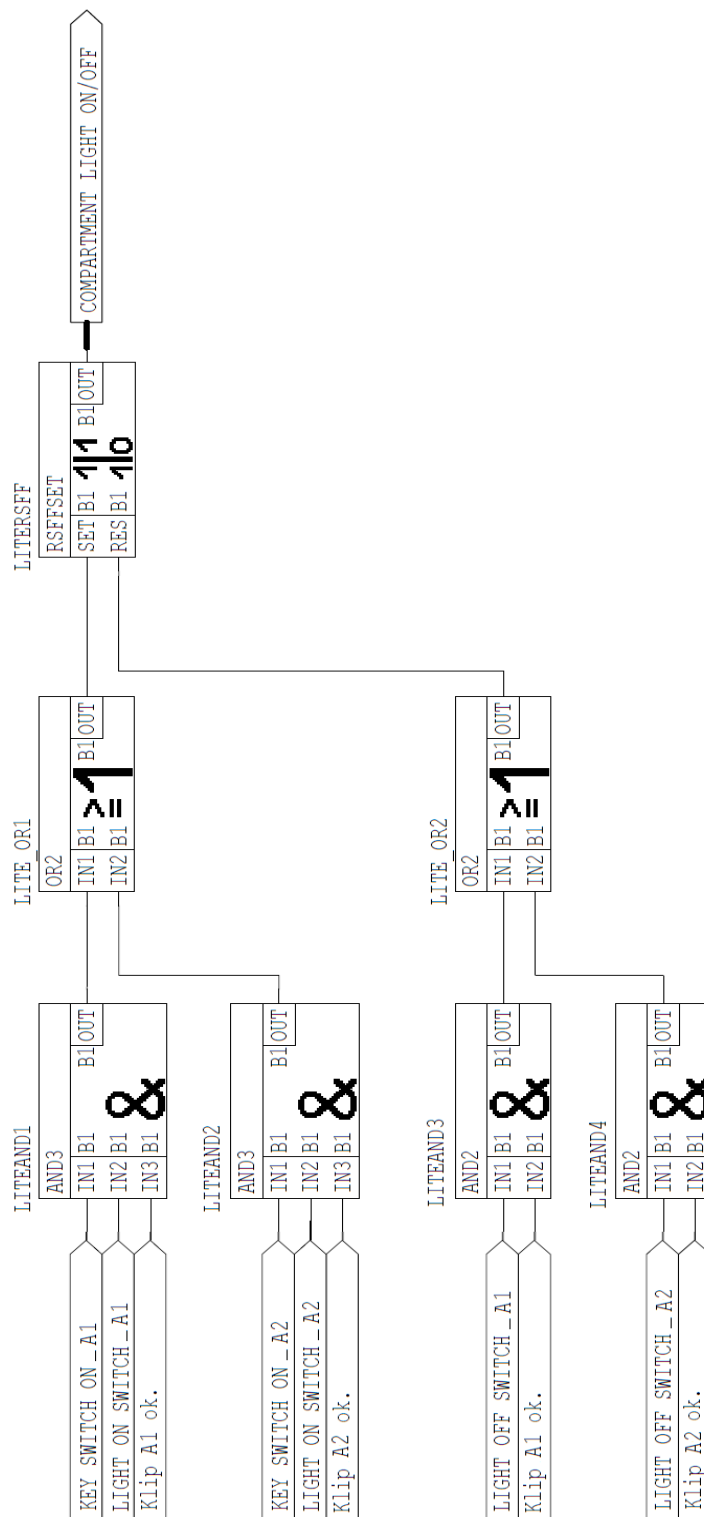


图 3.11 四号线列车客室照明控制逻辑图

3) 根据 RS 触发器功能块 LITERSFF 的运算逻辑, 当开灯信号 SET 为“1”, 关灯信号为“0”时, RS 触发器输出为“1”, 即开灯信号“COMPARTMENT LIGHT ON”有效; 开灯信号 SET 为“0”, 当关灯信号为“0”时, RS 触发器输出为“1”,

即关灯信号“COMPARTMENT LIGHT OFF”有效；当开灯信号 SET 为“1”，关灯信号为“1”时，RS 触发器输出为“1”，即开灯信号“COMPARTMENT LIGHT ON”有效；开灯信号 SET 为“0”，关灯信号为“0”时，RS 触发器输出为“1”，即开灯信号“COMPARTMENT LIGHT ON”有效。

对 SIBAS 32 软件的逻辑图进行分析可以发现，列车的控制单元 VCU 主要采集了主控制钥匙激活、照明控制旋钮状态、A 车 KLIP 状态等参数，经过与门、或门、RS 触发器运算即可得到列车客室照明的控制需求。本节能改造方案无需修改列车软件对客室照明的控制逻辑，因此不必对软件语句进行重新修改或编译，保证列车控制软件的完整性，降低了改造风险。只需在照明开通和关断的触发条件由原来的单一来源“照明控制旋钮”状态的基础上，接入光敏控制器输出的开灯或关灯信号，即可实现客室照明节能控制。逻辑控制上，只需将照明控制旋钮接通（KEY SWITCH ON）与光敏控制开灯信号（LIGHT SENSITIVE SWITCH ON）或照明控制旋钮关断（KEY SWITCH OFF）与光敏控制关灯信号（LIGHT SENSITIVE SWITCH OFF）进行或门逻辑运算即可实现光控节能功能。

但是，由于照明控制旋钮关断无须“主控钥匙激活”配合，而光敏控制器只有在主控钥匙激活端司机室才有效，因此逻辑图须作相应修改。如图 3.12 所示。

1) 开灯控制时，当 A1 车照明控制旋钮接通（LIGHT ON SWITCH_A1）与光敏控制开灯信号（LIGHT SENSITIVE SWITCH ON_A1）任一有效，LITER_OR3 的输出值为 1，即与门功能块 LITEAND1 的输入变量“IN3”。如 A1 车主控钥匙激活（KEY SWITCH ON_A1）和 A1 车 KLIP 正常（Klip A1 ok）同时有效，则与门功能块 LITEAND1 输出“1”作为或门功能块 LITER_OR1 的输入变量“IN1”的值。A2 车同理工作。只要或门功能块 LITER_OR1 其中的一个输入变量为“1”，即可输出“1”作为 RS 触发器功能块 LITERSFF 的输入变量“SET”的值。

2) 关灯控制时，A1 车主控制钥匙激活（KEY SWITCH ON_A1）与光敏控制关灯信号（LIGHT SENSITIVE SWITCH OFF_A1）同时有效，与门功能块 LITEAND5 输出“1”。此变量与 A1 车照明控制旋钮关断（LIGHT OFF SWITCH_A1）进行或门运算输出“1”后，再与 A1 车 KLIP 正常（Klip A1 ok）进行与门运算输出“1”作为或门功能块 LITER_OR2 的输入变量“IN1”的值。A2 车同理工作。只要或门功能块 LITER_OR2 其中的一个输入变量为“1”，即可输出“1”作为 RS 触发器功能块 LITERSFF 的输入变量“RSE”的值。

3) RS 触发器功能块 LITERSFF 经过对“SET”和“RES”两个变量的逻辑运算，最终输出列车客室照明是否开启的指令“COMPARTMENT LIGHT ON/OFF”。

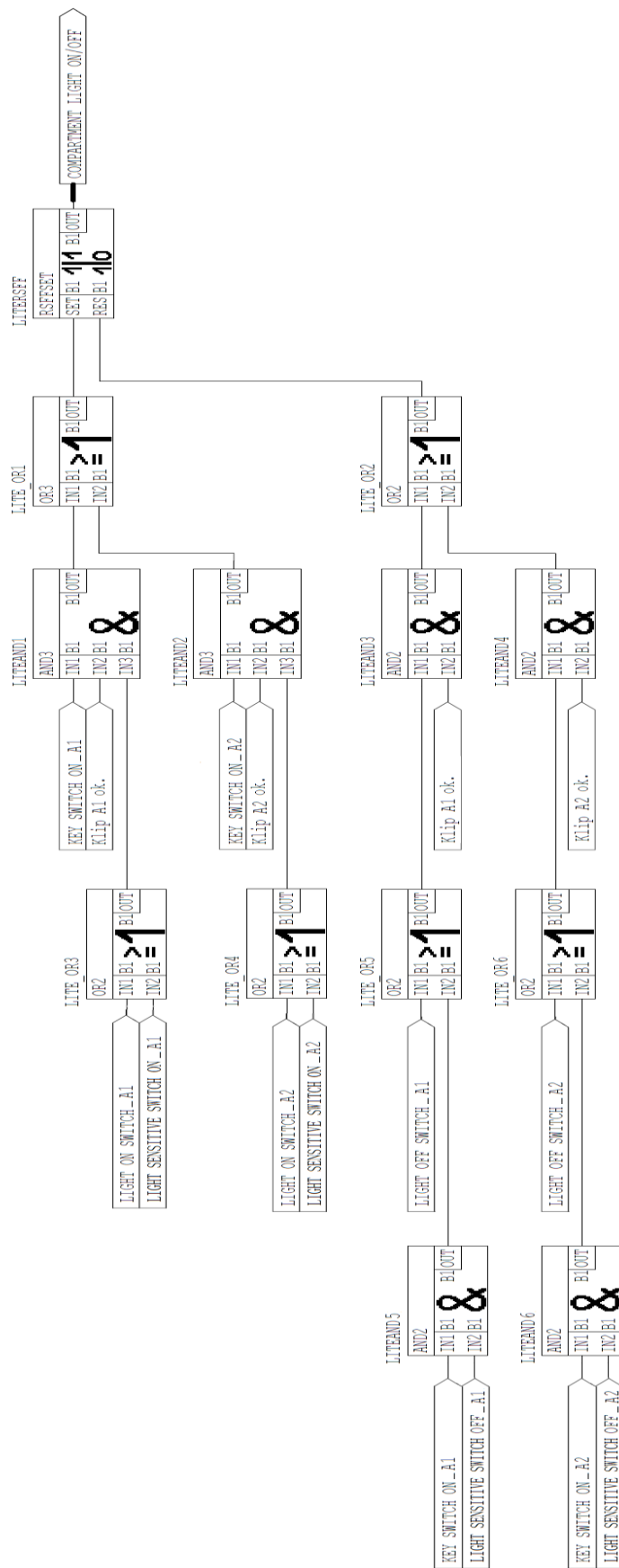


图 3.12 四号线列车客室照明节能改造方案控制逻辑图

由分析逻辑图可知，要实现列车客室照明的节能控制，必须在在原有控制电路基础上增加光敏控制环节，如图 3.13 所示，控制对象为 KLIP 分站采集的照明控制信号。当主控司机室激活继电器 22-K153 吸合，工作模式开关 52-S02 选择在“自动”档即触点闭合，光敏节能控制器 52-A101 为光敏节能控制器才能得电工作。其中，T 为光敏传感器，K1 为开灯信号 MOSFET，K2 为关灯信号 MOSFET。司机通过旋钮开关 52-S01 选择“ON”接通，紧急照明始终保持开启状态，常用照明则由 52-A101 控制，即照度大于控制阈值，K1 关断、K2 导通，关闭常用照明。反之，则 K1 导通、K2 关断，打开常用照明。

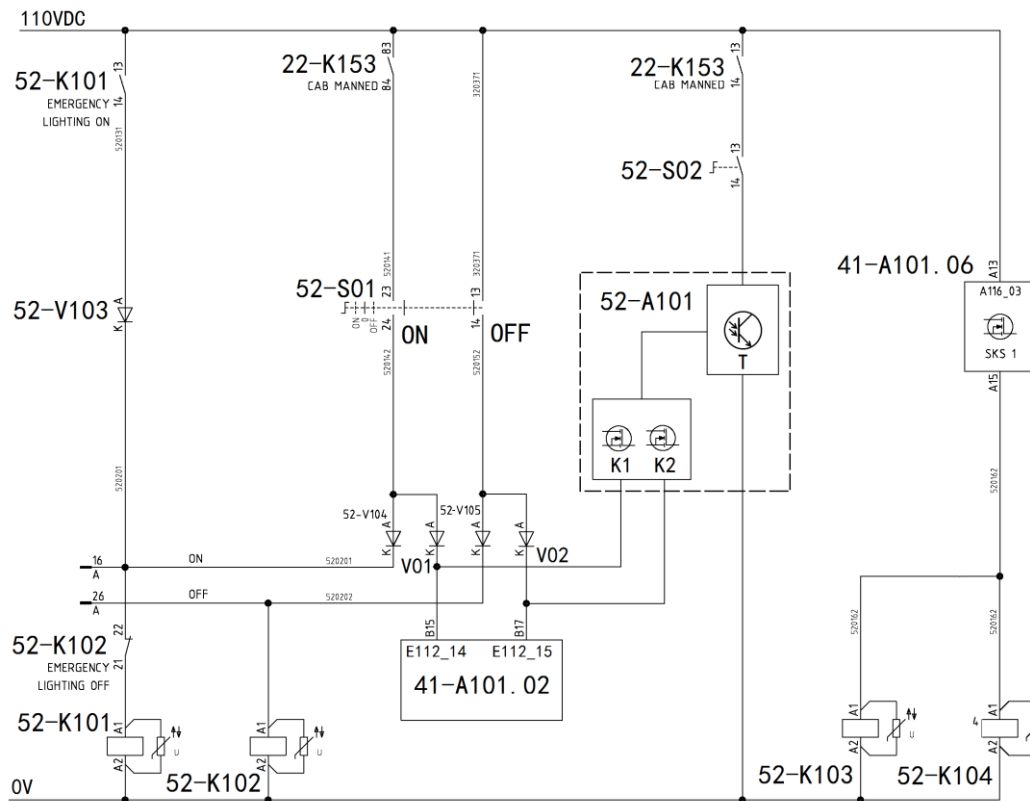


图 3.13 四号线列车客室照明节能改造方案电路图

由于本改造方案通过关闭客室常用照明实现节能，光控信号不对紧急照明进行控制。因此，在设计电路时需为紧急照明控制接触器 52-K101、52-K102 设置隔离二极管 V1、V2。另外，如光敏节能控制器故障或失效，可将工作模式开关 52-S02 转换至“手动”档位置即触点断开，将光敏控制电路隔离，恢复客室照明原有控制模式。

如图 3.14 所示，四号线列车车体设计时在司机室副驾驶台上方、左前额位置预留了光敏传感器及相关设备的安装空间，该位置可以使光敏传感器很好地接受光照度信号，同时要避免传感器安装在车外产生的漏水、积灰等情况对灵敏度的影响。十一号线列车的司机室设计参考了四号线的司机室的布置，在相同位置

安装了光敏传感器，并实现了对客室照明的节能控制。因此，利用该位置完全可以实现为四号线列车光敏传感器的安装及客室照明节能控制功能的实现。



图 3.14 光敏传感器安装位置

作为运营列车的设备，四号线车辆客室照明节能控制器需要定期检查与维护，同时避免阳光暴晒造成环境温度过高影响系统稳定性，因此将光敏控制装置安装在副驾驶台设备柜内，如图 3.15 所示。该位置空间充裕，有利于设备散热，同时便于日常检查与维护。

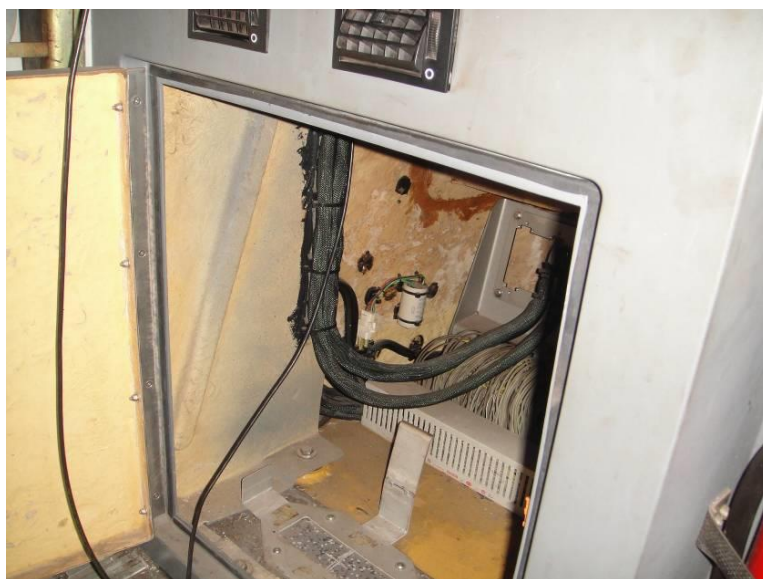


图 3.15 光敏节能控制器安装位置

客室照明工作模式开关 52-S02 可安装在司机主驾驶台背后的设备柜内，使司机可以进行操作，如图 3.16 所示。



图 3.16 客室照明工作模式开关安装位置

通过上述对四号线列车客室照明控制电路改造及相关硬件安装的方案设计，四号线列车完全可以通过改造实现节能控制的目的，具有较好的可行性。

3.4 光敏控制节能改造节电量计算

四号线目前配属 28 列 04A01 型列车，6 节编组列车。根据《上海轨道交通 4 号线第 412-1 号工作日列车运行图有关规定》的安排，工作日早、晚高峰时段投运列车 26 列，低峰时段投运 18 列。早高峰时段结束后，列车从上午 9 点 50 分至 10 点 45 分，8 列列车陆续退出运营。晚高峰时段开始，列车从 16 点 20 分至 17 点 35 分，8 列列车陆续上线运营。为了方便计算，仅计算全天运营的 18 列列车光敏节能时间。假定白天平均日照时间即露天照度大于 650lx 且客室正常照明关闭的时间为 11 小时。根据四号线列车运行时刻表，地面线路行驶时间占全线行驶时间的比例平均为 40%。按照常用照明荧光灯具的额定功率 4.264 kW ，全年工作日客室照明光敏节能控制节电量为

$$\begin{aligned} E_1 &= 4.264 \times 11 \times 18 \times 250 \times 40\% \\ &= 84427.2 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (3.1)$$

根据《上海轨道交通4号线第412-1号工作日列车运行图有关规定》的安排，节假日开行列车数量为22列，无早、晚高峰运营列车。按照常用照明荧光灯具的额定功率4.264 kW，四号线列车全年节假日客室照明光敏节能控制节电量为

$$\begin{aligned} E_2 &= 4.264 \times 11 \times 22 \times 115 \times 40\% \\ &= 47466.8 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (3.2)$$

因此，全年客室照明光敏节能控制节电量为

$$\begin{aligned} E_{\text{光控}} &= E_1 + E_2 \\ &= 131894 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (3.3)$$

3.5 本章小结

本章介绍了四号线运营线路的条件及运营车辆的技术特点，分析了客室照明的控制原理及实现方式。同时，介绍了目前上海地铁既有车辆上存在的三种典型的室照明光敏控制节能控制的原理和使用情况，分析了三号线、十一号线车辆光敏控制节能控制存在的问题及未投入使用的原因，以及十六号线光敏控制节能控制的特点及应用情况。在此基础上，分析了四号线车辆客室照明光敏控制节能的可行性和技术方案，设计了客室照明控制电路及控制逻辑，确定光敏传感器、节能控制装置、工作模式开关等硬件的安装位置。最后，计算了实施光敏节能控制改造后四号线列车客室照明全年可节约的用电量。

第4章 四号线车辆客室照明光敏节能控制器设计与实现

除了采用 LED 作为发光灯具外,轨道交通车辆客室照明节能的另一个有效途径是通过感光装置控制照明灯具根据外界的照度强弱进行开关或调节亮度。根据第3章的分析可知,四号线列车完全可以通过在原有客室照明控制电路的基础上加装光敏传感器及相应的电路改造,实现照明的光敏控制,从而达到节能的目的。

综合对三号线、十一号线、十六号线光敏节能功能的分析,可以发现三种光敏节能控制器均不具备判断地面站点、隧道、建筑物、天气变化等因素对光照度的影响,因此需要开发一种具有一定智能化的光敏节能控制器,实现节能与客室照度需求间的平衡。

设计新型客室照明智能光敏节能控制器的关键在于标定可量化的照度判断指标,摸索正线光照强度变化规律,制定出可实现节能的客室照明控制策略。

智能光敏节能控制器的硬件设计方面,可根据目前通用的电力电子技术、单片机应用技术、自动控制理论等原理为基础,开发一种由单片机控制,采用电子式触点、通过专用软件控制,适应复杂光照环境的光敏节能控制器。同时,新控制器必须能够利用列车提供的 110V 直流电源,控制对象为 KLIP 输入信号、结构紧凑、安装方便,兼容四号线列车的客室照明控制电路。

4.1 光敏节能控制原理

光敏节能控制方式是指根据外界照度的强弱对客室照明进行开关或亮度调节控制,从而起到节能减排的作用。光敏节能控制方式一般采用光敏二极管或者光敏三极管等作为光电传感器,检测外界照度的强弱变化,并将照度信号转换成电信号传送给控制器,实现客室照明节能控制。

4.1.1 光敏二极管原理

光敏二极管,又叫光电二极管,是一种能够将光信号转换成电信号的光电传感器件。管芯为一个具有光敏特征的 PN 结,对光的变化非常敏感,具有单向导电性。光敏二极管在光线的照射下,所产生的电流叫光电流。如果在外电路上接上负载,负载上就可以获得了电信号,而且这个电信号随着光的变化而相应变化。因此,可以根据电路中的电信号的大小变化检测光照强弱程度。

光敏二极管广泛应用于消费电子产品领域,如各类光驱、CD 播放器、红外

线遥控设备、以及烟雾探测器等。除此之外，光敏二极管常被用于测量光照强度领域，如照相机的感光元件、路灯亮度自动调节等场合。三号线、十一号线、十六号线列车的照明节能控制器尽管生产商不同，但是均采用光敏二极管作为光敏传感器。

4.1.2 光敏三极管原理

光敏三极管又称光电三极管，它是一种光电转换器件，其基本原理与光敏二极管类似，当光照射到三极管的 PN 结上时，吸收光能并转变为电能。当光敏三极管加上反向电压时，管子中的反向电流随着光照强度的改变而改变，光照强度越大，反向电流越大。光敏三极管和普通三极管相似，也有电流放大作用。

与光敏二极管相比，光敏三极管具有宽广的光谱响应范围、较高的响应灵敏度、良好的线性度、低噪声及暗电流小等特点，能够在近紫外—可见光—近红外光谱范围内获得应用。适用于分光光度计、辐射检测系统，激光光功率计、电子分析天平、电子快门及其它光学仪器和自动控制系统等方面，是一种应用广泛的光敏传感器。

4.2 光照度检测电路设计

要解决现有轨道交通车辆客室照明节能控制器在运营中存在的问题，首先必须对光敏控制的关键参数——照度进行研究，选择科学的检测方法对列车运行沿线的光照强度进行量化检测与分析。照度即光照强度，是指单位面积上所接受可见光的能量。照度用于指示光照的强弱和物体表面积被照明程度的量，以勒克斯 (lx) 作为单位。1 勒克斯等于 1 流明 (Lumen) 的光通量均匀分布于 1 平方米面积上的光照度。常用的光照强度检测设备为手持式数字照度计。本课题采用 TES 1332A 型手持数字式照度计，其量程范围为 0—200000lx，可用于大多数环境的照度检测。

4.2.1 照度检测范围

为了设计合适的光照强度检测电路，必须确定四号线列车运营线路照度变化的大致范围及关键位置照度变化的规律。使用 TES-1332A 型手持数字式照度计，选取照度相对高的露天、照度相对低的地面与地下站台以及照度极低的地下隧道区间作为典型位置进行照度现场测试。为了将测试数据尽量接近改造后的照度采集环境，测试中将照度计置于如图 3.14 所示的四号线列车司机室左侧顶板内接

近挡风玻璃的位置，即设计方案中安装光敏传感器的位置。经过反复测量，典型区间的照度范围基本稳定。测试结果如表 4.1 所示，地面区间内照度在 831—1153lx 范围内，地面站台照度在 327—816lx 范围内，地下区间照度在 0—201lx 范围内，地下站台照度在 259—547lx 范围内。

表 4.1 典型区间照度

区间	照度 (lx)
地面区间	831—1153
地面站台	327—816
地下区间	0—201
地下站台	259—547

因此，照度检测电路只需能够分辨最低照度及节能控制阈值即可。从上表中可知，光敏传感器能够分辨的最低照度为四号线地下区间内，照度基本低于 200lx，最大照度则应结合客室照度的要求进行测试。根据《地铁车辆通用技术条件》的要求，客室照明最低照度在离地 0.8m 高度不低于 250lx。将四号线列车停放于开阔的露天条件位置，关闭客室常用照明，自然光照度在 650lx 以上时，客室照度满足标准要求，即 650lx 可作为列车节能控制阈值，大于 650lx 的照度即使传感器能够检测也不作为控制参数。因此，从理论上讲，光敏传感器的量程只需在 0 到 650lx 即可满足列车客室照明的节能控制的需求。

4.2.2 照度检测电路设计

为了更加精确的检测和记录四号线沿线照度数据，需要设计专用的检测电路并实现数据的记录，以便分析照度变化规律。由于光敏三极管相对光敏二极管具有光照度检测范围宽、灵敏度高、良好的线性度、电路结构设计简单等优势，因此选用光敏三极管作为照度检测电路的感光元件。

理论上，只需为光敏三极管的基极施加+5V 直流电源，射极接一个阻值合适的电阻并记录其输出电压，经过换算即可得到相对的光照强度。但是，由于轨道交通车辆的牵引、辅助电源、控制、车门、乘客信息等电气系统在工作时均会产生不同电压范围的电磁干扰，因此车辆设备必须具有电磁兼容能力才能正常工作。因此，必须对照度检测电路做抗干扰处理。

如图 4.1 所示，在传感器端先利用运算放大器将光敏三极管产生的电压值转换成电流值，通过 2.5 米的屏蔽导线将电流信号传输至信号接收端，防止在传输过程中列车上的其它电气系统的电压信号对其产生干扰。

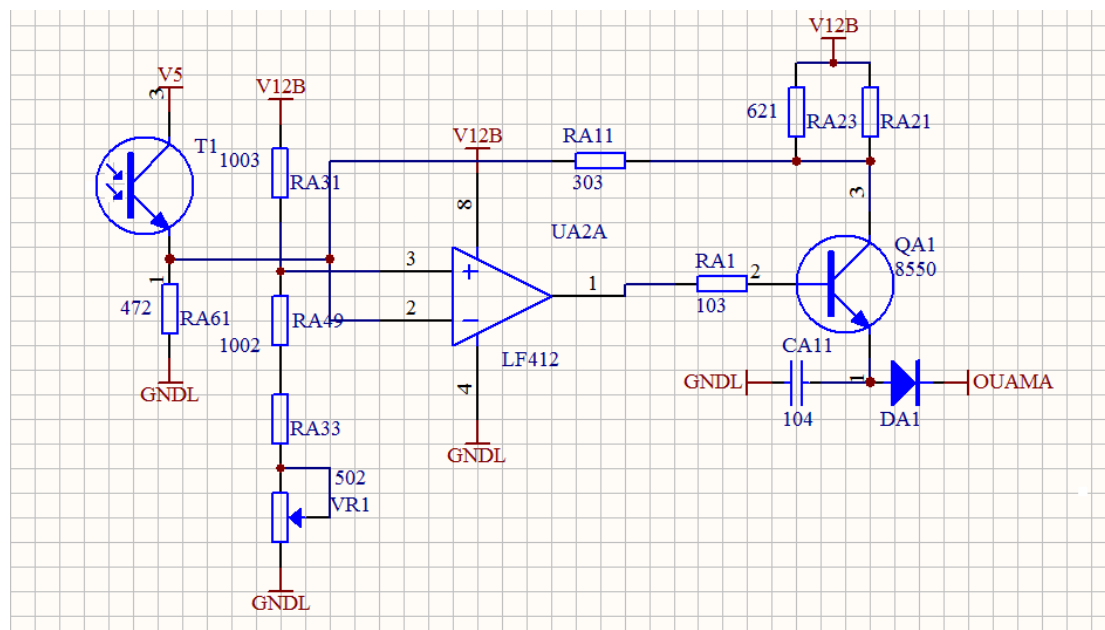


图 4.1 光敏传感器电流转换电路

如图 4.2 所示，在信号的接收端，先经过运算放大器将电流信号转化为电压信号，并进行光耦与单片机进行电气隔离。采集到的照度数据，通过单片机进行记录并由 485 接口电路输出至便携式电脑存储。

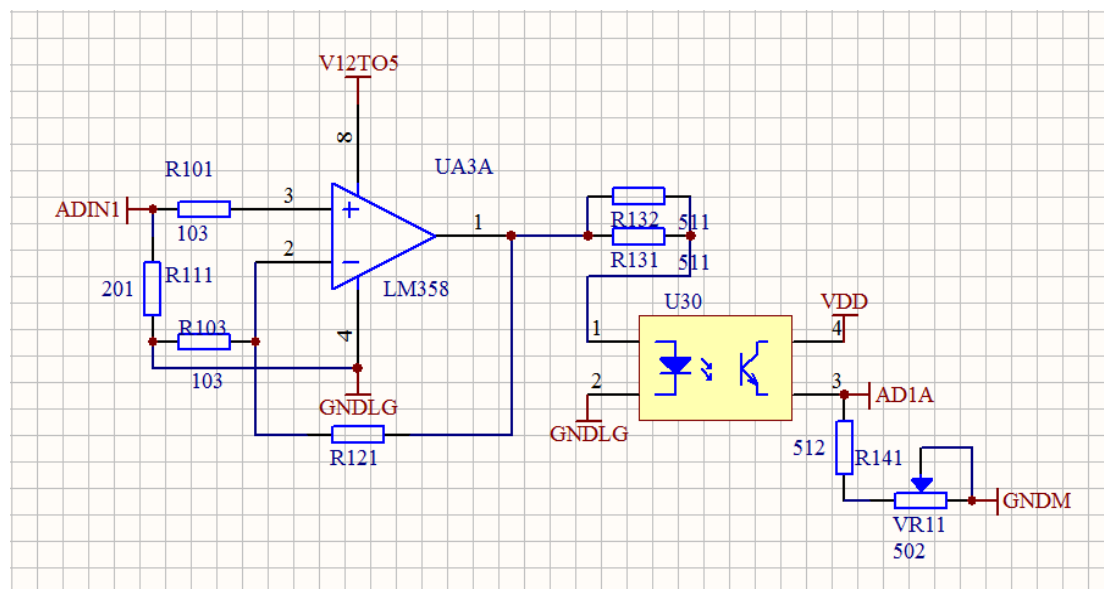


图 4.2 光敏传感器电压转换电路

4.3 四号线沿线光照度分析

利用上述设计的照度检测电路，将光敏传感器安装于手持式照度计检测时安

装的司机室左侧顶板内接近挡风玻璃的位置,信号传输线将采集的照度数据传至接收电路并用 485 接口与便携式电脑相连,以 1 秒为采样周期进行数据采集并保存。

测试当天为多云天气,下午 15 点 30 分左右,列车从四号线蒲汇塘基地出发经宜山路站上正线,沿内圈进行运行。从采样的照度数据分析,可以发现四号线线路的照度变化主要在地面区间、地面站台、地下区间、地下站台四种基本区间之间进行转换。

4.3.1 地面区间照度分析

列车在地面区间行驶时,线路采光条件最好,传感器检测到的光照强度基本稳定在 800 至 900lx 左右,如图 4.3 所示。但是,在地面区间的部分位置,由于列车经过高架桥或周边建筑物的遮挡,照度会有瞬间下降的现象。比如,列车在共和新路高架路下经过时,照度会下降至 443lx。

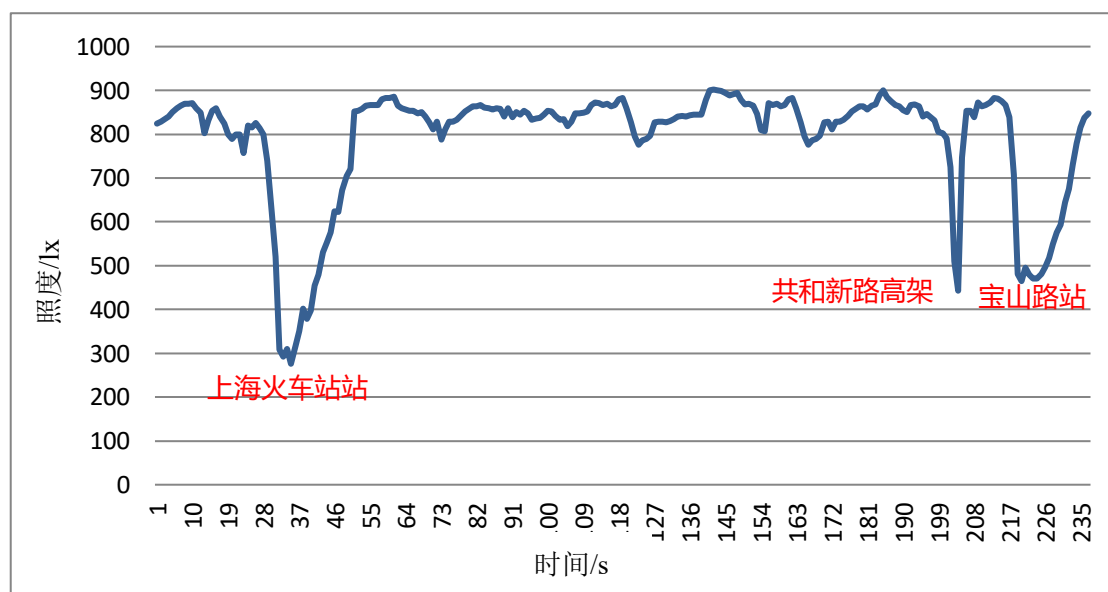


图 4.3 上海火车站站至宝山路站区间照度曲线

4.3.2 地面站台照度分析

当列车进入地面站台范围后,照度会有明显的跳变,从露天条件下的 800 至 900lx 迅速下降至 200 到 500lx 之间。随后受到站台采光及照明设施的影响,照度又逐渐上升至 800 至 900lx,直至列车停稳,照度变化曲线呈 V 字型,如图 4.4 所示。由于四号线地面 9 座站台的建筑结构及采光方式各不相同,因此每一站的最低照度差别较大,其中曹杨路站最暗,最低照度为 230lx。中山公园站如图 4.5

所示，由于采用双侧开放式站台采光条件最好，最低照度为 776lx，接近露天照度。

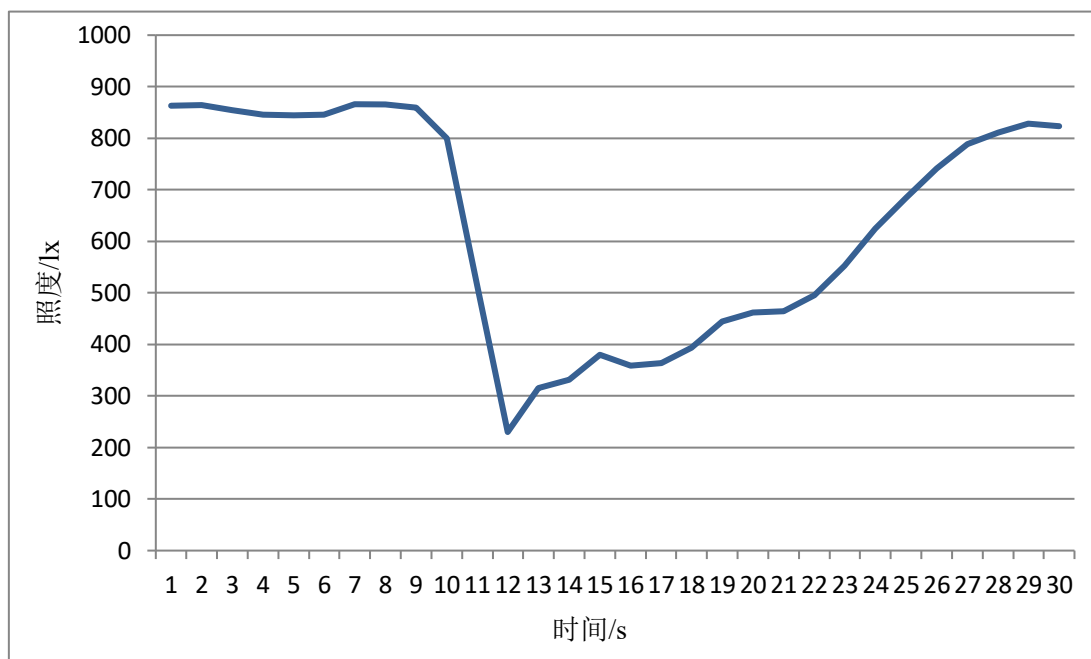


图 4.4 曹杨路站照度曲线

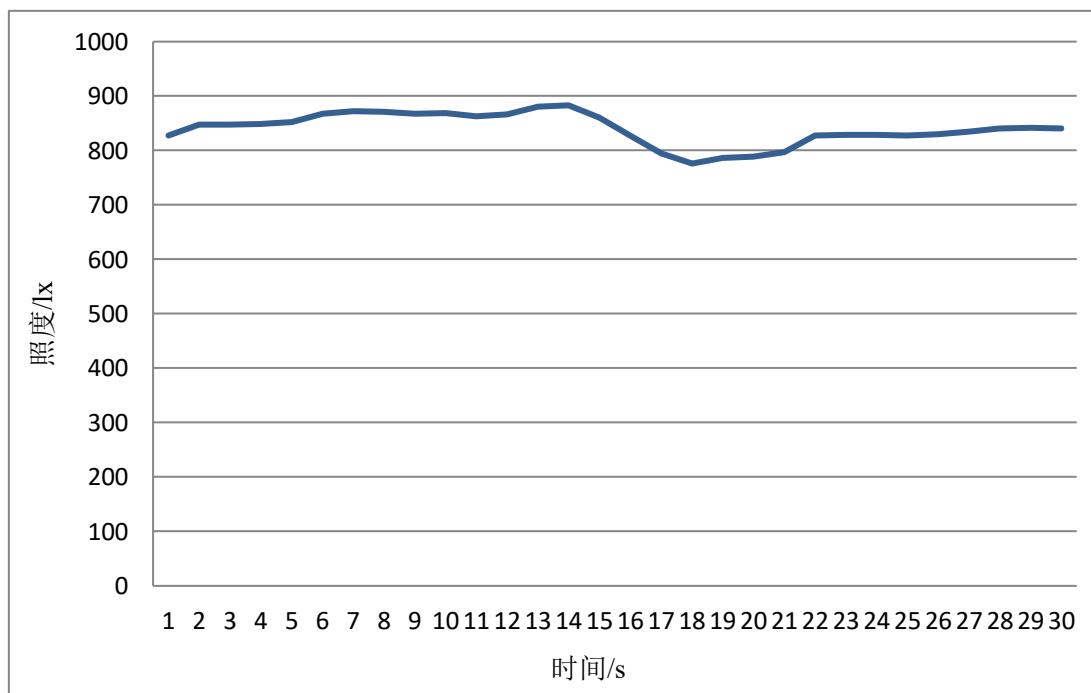


图 4.5 中山公园站照度曲线

纵观四号线 9 座地面站台的照度曲线数据如图 4.6 所示，S1 至 S9 依次为虹桥路站、延安西路站、中山公园站、金沙江路站、曹杨路站、镇坪路站、中潭路站、上海火车站站、宝山路站。除中山公园站以外，所有站台的最低照度均低于

节能 650lx。

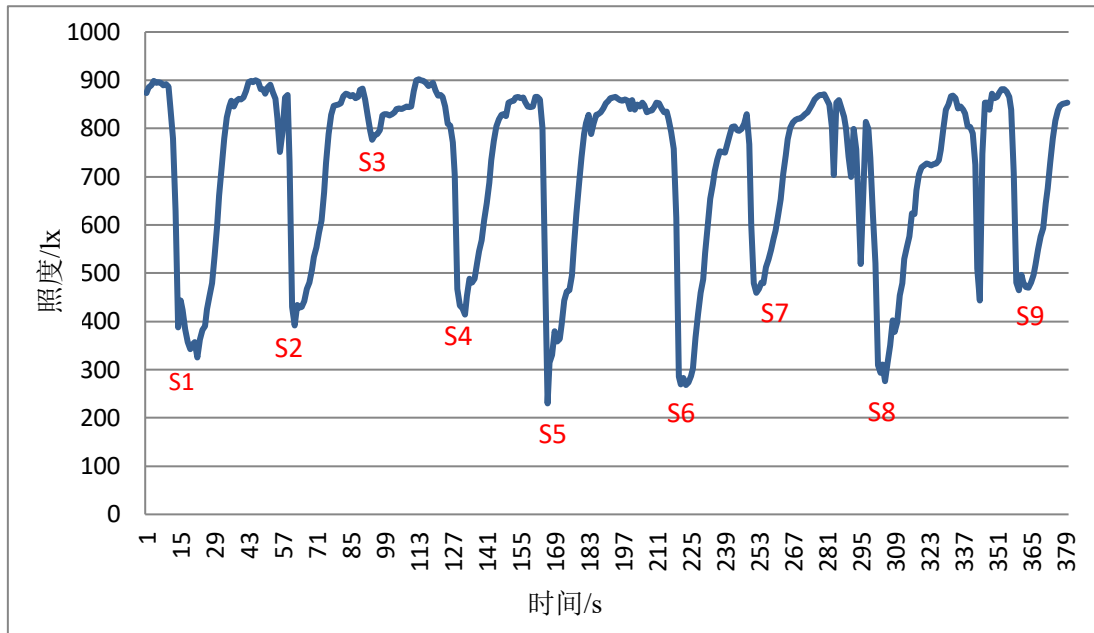


图 4.6 地面站台照度曲线

4.3.3 地下区间照度分析

在地下区间内，传感器检测的照度基本保持在 100lx 以下，只有在经过部分位置时，受到隧道内特殊设备所用的照明影响，短时上升至 200lx 左右，持续时间小于 2 秒。图 4.7 所示为海伦路站至临平路站区间的照度曲线，其中两头照度较高的部分为站台位置，中间照度数值小于 100lx 的为两站之间的隧道区间。

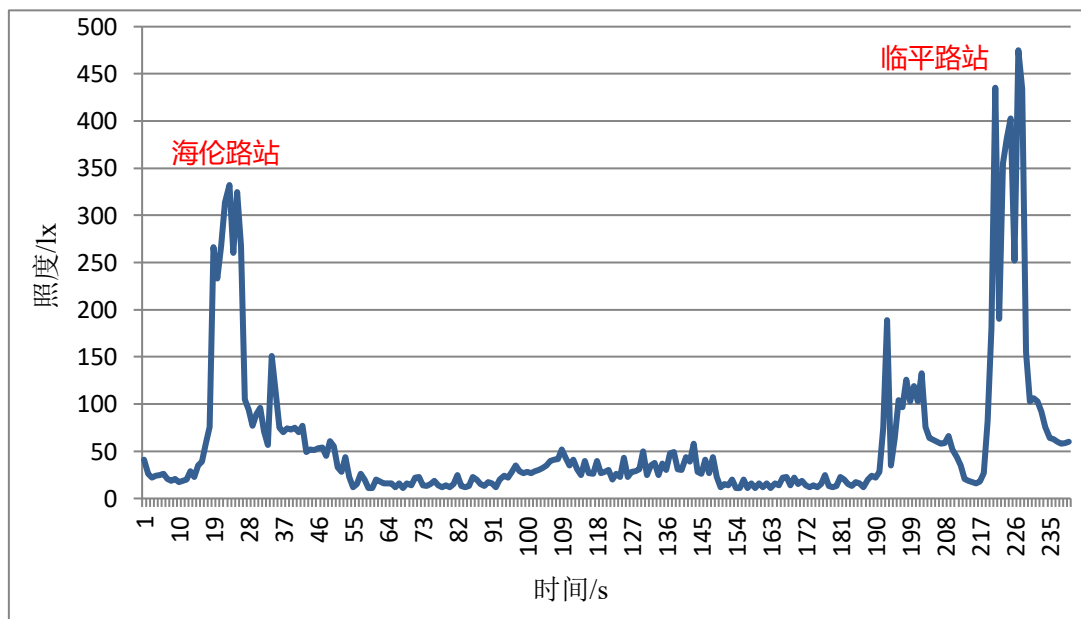


图 4.7 海伦路站至临平路站区间照度曲线

4.3.4 地下站台照度分析

图 4.7 为一个典型的两个地下站台夹一个隧道区间的例子。当列车进入地下站台范围内时，由于受到站台照明及隧道内广告灯箱等光源的影响，传感器检测到照度明显上升，最高达为 500lx 左右。随后列车车头进入隧道区间，照度又明显下降至 100lx 以下，直至列车停稳，照度变化曲线呈尖峰状。由于四号线地下 17 个站台的建筑结构及采光方式基本相同，因此每一站的最低照度差较小，其中上海体育馆站最亮如图 4.8 所示最高照度为 501lx，大木桥站最暗如图 4.9 所示最低照度为 359lx。

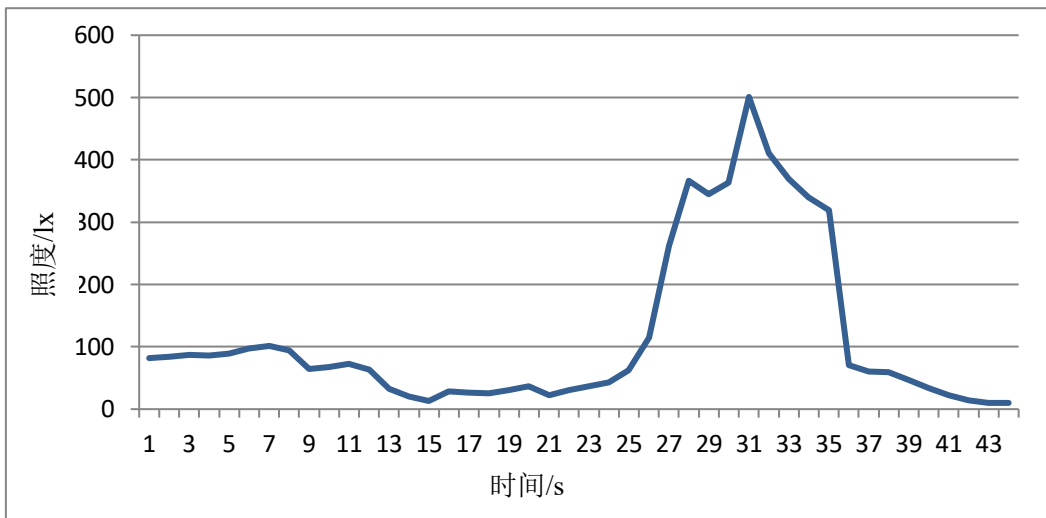


图 4.8 上海体育馆站照度曲线

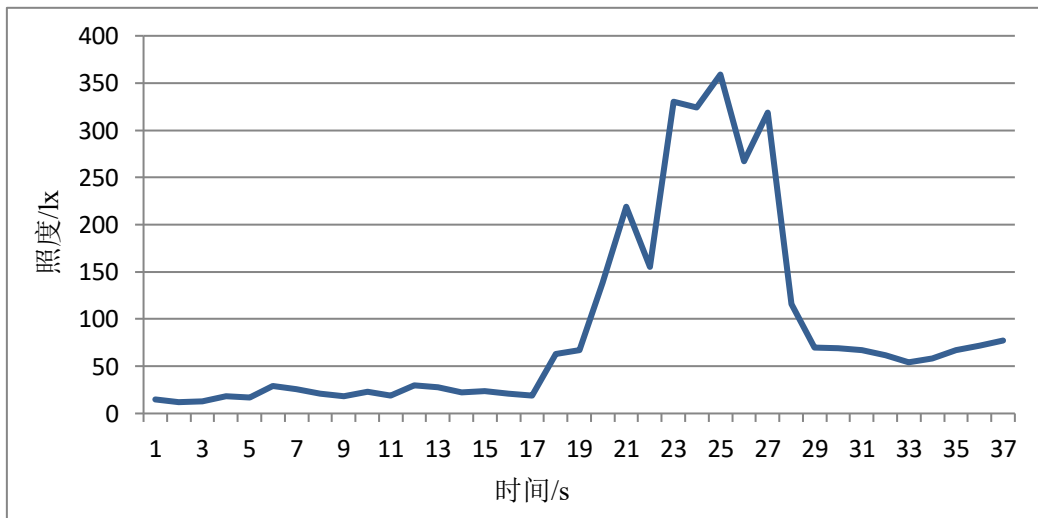


图 4.9 大木桥站照度曲线

纵观 17 座地下站台的照度曲线如图 4.10 所示，S10 至 S26 依次为海伦路站、

临平路站、大连路站、杨树浦路站、浦东大道站、东方路站、浦电路站、蓝村路站、塘桥站、南浦大桥站、西藏南路站、鲁班路站、大木桥路站、东安路站、上海体育场站、上海体育馆站、宜山路站。列车在经过地下站台的过程中，照度会从隧道内的 100lx 以下上升至 300—500lx 的范围内，持续时间 10 到 20 秒。地下站台的最高照度均未超过 650lx，因此列车客室照明无需进行节能控制。

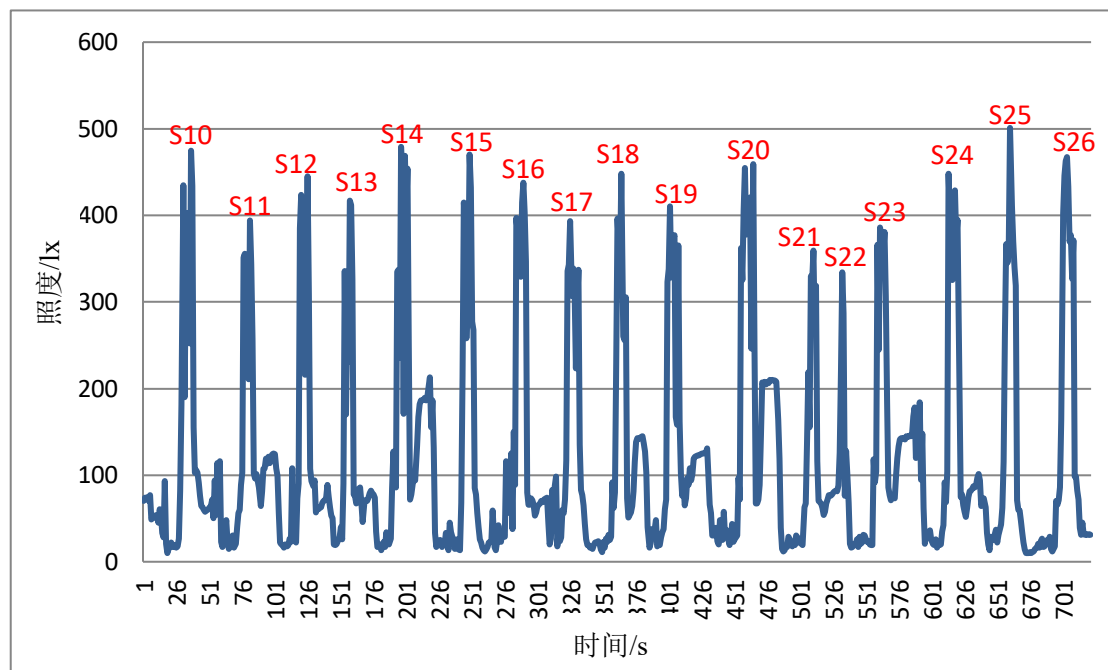


图 4.10 地下站台照度曲线

4.3.5 照度数据分析

从正线检测的照度数据分析可知，正线上由于列车运营的位置不同，环境照度会随之变化。如需根据不同位置设定列车的节能策略，则节能控制设备需有定位功能。如采用卫星定位方式，则无法实现地下区间列车定位，且成本较高、经济性差。如通过在站台上安装位置发生信号设备或列车报站系统的站台码确认位置，则需要增加投入和施工难度，经济性差。因此，通过抓住各关键位置照度变化的特征，将光敏节能控制器实时监测的参数与控制阈值进行比较和判断，即可实现节能控制。

从上一节的分析中发现，结合照度的大小及持续的时间可以判断列车所处的运营位置或工况。由于客室照明节能控制的主要参数为照度值与时间，因此控制策略需围绕这两个参数进行制定。

因此，必须确定列车进出隧道或站台的速度规律，从而计算照度变化过程所用的时间。目前，上海地铁四号线已实现 Automatic Train Operation (ATO) 即

自动驾驶模式，列车在运营过程中行驶速度不受司机人工控制，完全按照 ATO 系统的速度码自动行驶。因此，在 ATO 模式下列车进出隧道或站台的速度是基本确定的，即通过计算可以得到进出隧道或站台的时间。

ATO 模式下列车进站速度为 40km/h，以 0.8m/s^2 的平均减速度进行制动，站台长度为 150m，计算可得进站到列车停稳时间约为 20s。

通过对正线采集的照度变化曲线进行分析，发现照度在进站过程中的变化时间基本在 20 秒左右，符合计算结果。

四个基本区间中，地下区间与地下站台的照度基本不变，不会随外界照度的变化而变化。地下区间照度连续 2 秒以上低于 100lx，地下站台特点为列车驶入站台区间后，连续 10 秒以上照度大于 200lx。

地面区间的照度直接随外界照度变化而变化，地面站台则由于站台顶棚的遮挡而间接随外界照度变化而变化。地面站台特点为列车驶入站台区间后，连续 10 秒以上照度小于 500lx。

四号线线路是既有地面区段又有地下区段的环线，因此每运营一周必然会进出隧道各一次。此时，由于照度变化较明显，因此要有合理的节能控制策略才能平衡客室照度与节能之间的关系。ATO 模式下，列车以 40km/h 的速度驶入或驶出隧道。长度为 140m 的四号线列车要完全驶入或驶出隧道需要的时间为 15 秒。从实测照度数据看，列车驶入隧道时传感器检测的照度在 2 秒内从外界照度 900lx 左右下降至 100lx 以下。驶出隧道时，照度从 100lx 以下上升到外界照度大约需要 3 秒左右。

4.3.6 控制策略

4.3.6.1 地下线路

如图 4.10 所示，包括地下区间与地下站台的整个地下线路的照度基本稳定，两个站台之间的隧道区间内，照度基本处于 100lx 以下，个别隧道内设备的照明设施对照度影响有限，最高不超过 200lx，持续时间不超过 5 秒。在此照度环境下，列车客室照明优先满足照度需求，故无需输出节能控制信号关闭常用照明。

当列车进入站台范围内，照度在站台照明及广告灯箱的作用下，上升至 350—500lx 左右。根据实验证明，客室照度仍无法满足 250lx 的最低照度要求。

因此，在整个地下线路区域内，为了满足客室的照度要求，需要打开客室常用照明。相应的控制策略为，当列车驶入隧道后，开启客室常用照明，直至列车驶出隧道进入地面区间。

4.3.6.2 地面线路

如图 4.6 所示,包括地面区间与地面站台在内的地面线路照度相对复杂,特别是列车在进站时照度的变化,可能出现节能与照度需求之间的矛盾,因此需要深入研究合适的控制策略。

当列车在地面的站台间的露天线路运营时,传感器检测到的照度基本稳定在 900lx 左右,客室内仅打开紧急照明仍能满足最低照度标准,因此可以关闭常用照明进行节能控制。

列车在进入地面站台过程中,除中山公园站照度较为稳定始终保持在 650lx 以上外,其它地面站台均出现照度从露天条件下的下降至低于 650lx,持续 30 秒左右以后又重新恢复到 900lx 左右的现象。如为了满足客室最低照度标准的要求,这种情况下需要开启客室常用照明,那么除中山公园站以外的 8 座地面站台在列车进站过程中都要进行一次开关常用照明的控制。虽然,通过这种方式可以满足客室在最低照度要求,但是短时间内开关灯容易引起乘客视觉感观的不适。从运营服务质量及考核指标的角度看,容易引起乘客的投诉。鉴于进站过程加上停站时间一般在 90 秒之内,因此决定在此工况下即使照度下降至 650lx 以下,不做节能控制处理。

从地面照度数据分析可知,地面线路的个别位置有高架桥或公路涵洞等建筑物,会使检测到的照度短时内明显下降。但是,照度数据显示其照度最低下降至 440lx,持续时间小于 2 秒。因此,不会明显影响列车客室内的照明舒适度。

另外,地面线路相比地下线路,还会受到天气变化的影响,如阴雨天(照度持续较低)、短时强对流天气(照度短时明显降低)等。因此,在制定列车地面运营时的节能控制策略时,必须考虑如何克服天气因素的影响。通过对相关气象情况下的照度的测量,可以将照度低于 350lx 持续 60 秒以上,视为天气因素造成的照度下降,需要打开客室常用照明,保证客室照度要求。

日间,随着太阳光照射角度随着时间变化而变化,光照强度从日出后缓慢增强,中午时分达到最高后逐渐降低,直至日落。在照度变化过程中,自然光照度接近控制策略中设置的阈值时,可能由于路灯等其它光源的影响造成控制的不稳定,出现反复开关灯的现象,因此可以通过设置日历及 24 小时计时的方法,根据季节或月份的日出日落时间,使控制器自动进入或退出节能模式。这样,可以保证的节能控制的精确性与减少人工控制带来的主观判断误差。

4.3.6.3 过渡工况

在地面线路与地下线路转换时,传感器检测到的照度变化最大,即在露天的相对最高照度与隧道内的相对最低照度之间短时变化。此时,也是客室照明节能

与照度需求最突出的工况。因此，必须解决好列车驶入或驶出隧道时客室常用照明控制的策略。

从地面的宝山路站至地下的海伦路站之间采集的照度数据看，当列车驶入隧道时，照度由露天的 827lx 在 2 秒内下降至隧道内的 41lx。通过分析内、外圈测得的多组驶入隧道的照度数据，可以将照度连续 2 秒以上低于 100lx 判断为列车驶入隧道的工况。此时，客室常用照明应立即开启，保证客室照度。

从地下的宜山路站至地面的虹桥路站之间采集的照度数据来看，当列车驶出隧道时，照度由隧道内的 50lx 在 3 秒内上升至露天的 770lx。由于安装传感器的位置是列车中最先接收到露天照度的位置，因此如列车车头刚驶出隧道即关闭客室的常用照明，则位于司机室后面的六节客室内的最低照度无法保证。ATO 模式下，列车以 40km/h 的速度驶出隧道，140m 长的车身要完全驶出隧道需要 15 秒。因此，将节能控制延时设置为传感器检测到照度大于 650lx 以上 30 秒后，关闭客室常用照明。此时，六节编组的列车已完全驶出隧道，外界的自然光照度及客室的紧急照明可以满足最低照度要求。

4.3.6.4 客室照明节能控制策略

根据实测的正线照度变化曲线，可以总结照度变化规律并制定有效的节能控制策略。日间通常天气情况下，四号线列车地面站台之间线路上运营时仅保留客室紧急照明可以达到最低照度要求。即照度大于 650lx 时，可以进行节能控制，关闭客室常用照明。列车在驶入地面站台过程中，照度会出现明显下降，但持续时间较短，为保证乘客的视觉舒适度，通过设置延时保持节能控制信号输出。

列车驶入隧道后，照度短小时内下降至 100lx 以下，此时需要立即关闭节能信号，打开客室常用照明。进入地下站台过程中，照度有明显上升，但照度未达到可以进行节能控制的阈值，因此整个地下线路运营过程中无需进行节能控制。

当列车驶出隧道时，由于车身完全驶出需要一定的时间，因此即使照度达到节能控制阈值，也需进行延时控制，保证列车完全驶出隧道后再关闭常用照明。

图 4.11 为照度与时间曲线与节能控制信号的关系图，图中“Light ON 1”为列车驶出隧道工况下，检测到照度大于 650lx 持续 30 秒之前保持的开启客室常用照明的信号。“Light OFF 1”为地面线路行驶过程中，检测到天气变化引起的照度明显下降至 350lx 以下持续 60 秒之前的客室常用照明保持关闭的信号。期间，由于经过高架桥等建筑等的影响，照度出现小于 2 秒的低于 100lx，通过延时 2 秒的设置，保持原有关灯信号。“Light ON 2”为照度恢复到大于 650lx 持续 30 秒之前客室常用照明保持开启的信号。“Light OFF 2”为列车驶入隧道（照度迅速下降至 100lx 以下并持续 2 秒以上）前保持的常用照明关闭信号。“Light ON 3”则为列车驶入隧道后的常用照明开启信号。

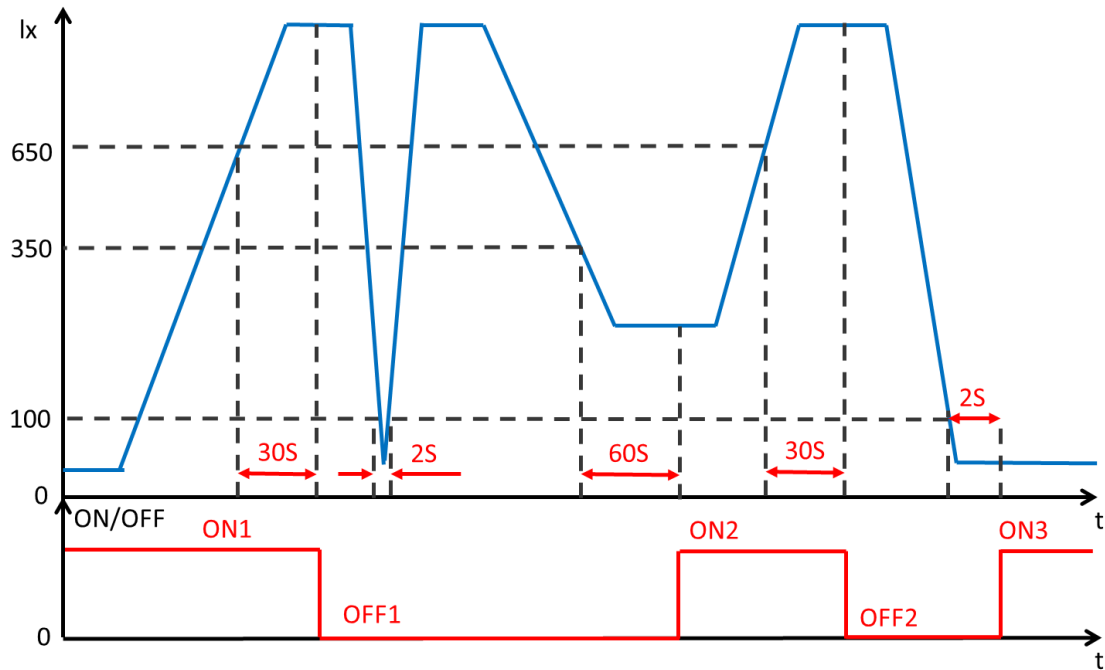


图 4.11 照度-时间曲线与常用照明开关信号图

4.4 客室照明光敏节能控制器设计与实现

为了实现四号线车辆客室照明节能控制策略，设计光控制器时必须考虑以下功能的实现和相关问题的解决。

- 1) 照度实时检测与记录；
- 2) 计时功能；
- 3) 可编程控制；
- 4) 可靠性与安全性；
- 5) 与列车控制系统的兼容性；
- 6) 可维护性；
- 7) 符合轨道交通车载设备的相关标准要求。

4.4.1 照度传感器电路设计

为了使根据正线实测的照度数据制定的节能控制阈值有效，光敏节能控制器的光照强度必须与原始照度数据采用同样的检测方法，即一致的安装位置、一致的传感器感光器件、一致的数据传输电路等。

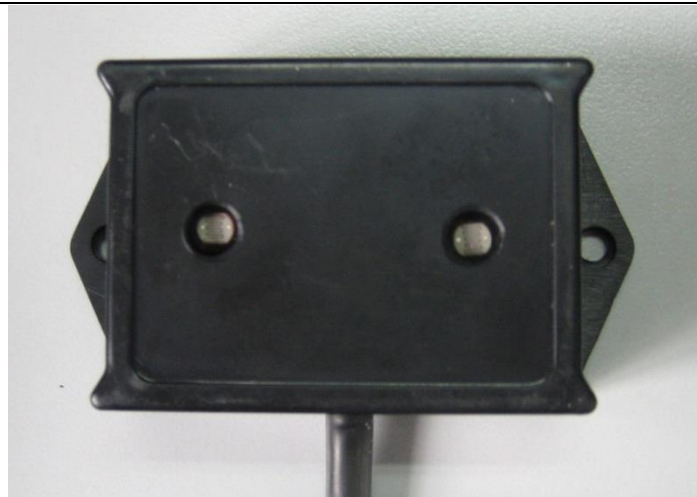


图 4.12 照度传感器

光敏传感器如图 4.12 所示，由 2 个光敏三极管组件组成，互为冗余备份，提高传感器的可靠性。光敏传感器体积小、重量轻，能够方便地安装于便于接受列车客室外界光线的位置，根据光照度强度进行光电转换，将相应电信号传输给主控制器。

理论上，只需为光敏三极管的基极加上+5V 直流电源，射极接一个阻值合适的电阻并记录其输出电压，即可得到相对的光照强度。但是，由于轨道交通车辆的牵引、辅助电源、控制、车门、乘客信息等电气系统在工作时均会产生电磁干扰，因此车辆设备必须具有电磁兼容能力才能正常工作。因此，必须对照度检测电路做抗干扰处理，如图 4.13 与图 4.14 所示。

在传感器端如图 4.13 所示，为了防止在传输过程中列车其它电气系统的电压信号对其产生干扰，先利用 LF412 运算放大器将光敏三极管产生的电压值转换成电流值，通过导线将电流信号传输至信号接收端。

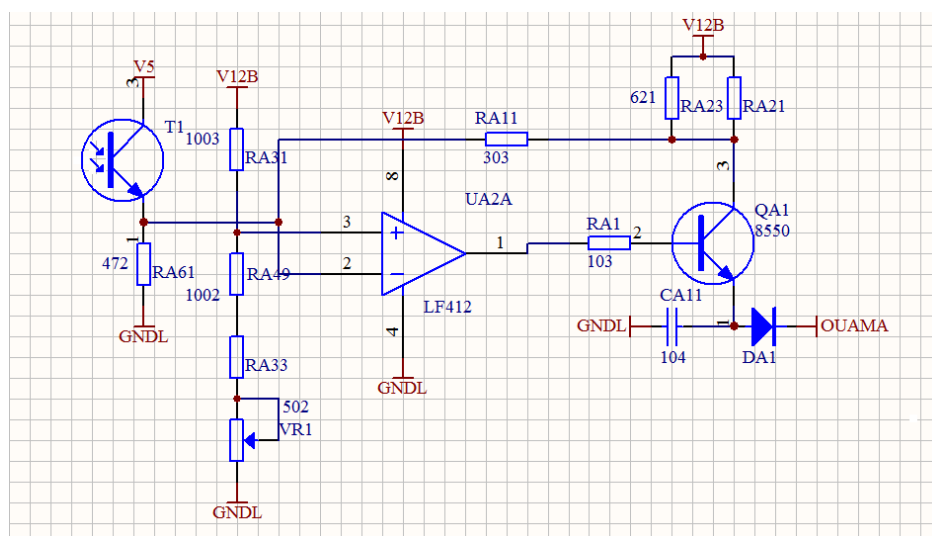


图 4.13 光敏传感器检测电路

在信号的接收端如图 4.14 所示,先经过 LM358 运算放大器将电流信号转化为电压信号,并将电压信号经过光耦隔离发送给单片机。

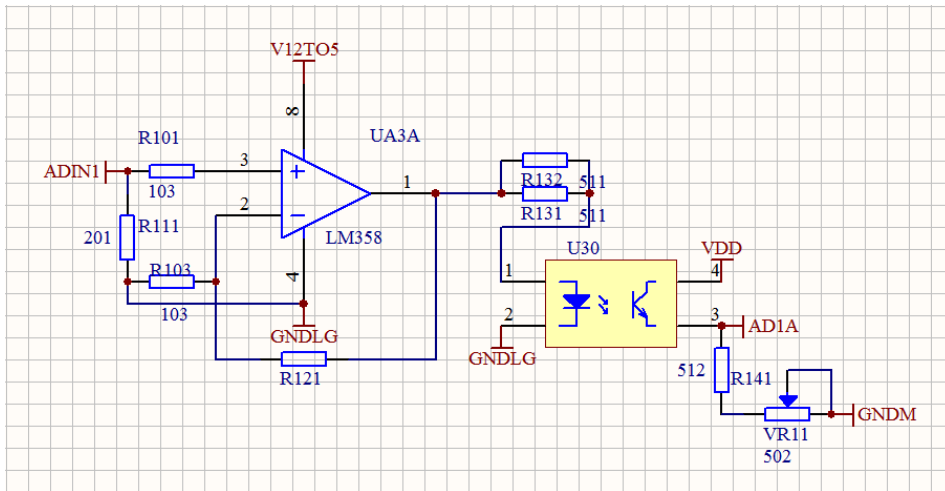


图 4.14 光敏传感器传输电路

4.4.2 计时功能

为了应对正线复杂的光照环境做出不同的判断与控制,在设计光敏节能控制器功能结构时,在主电路中增加时钟电路,并通过计时功能实现其它衍生功能。利用时钟电路,一方面可以通过日期和时间开启和关闭节能工作模式,另一方面可以通过计时功能计算节能时间从而换算节能量。

4.4.2.1 延时控制

客室照明节能控制实现的关键参数为照度与时间,因此计时功能成为控制器实现节能控制必需的功能。图 4.15 为控制器中的时钟电路,单片机可以通过其计算照度持续的时间,并结合照度阈值对客室常用照明进行开关控制。

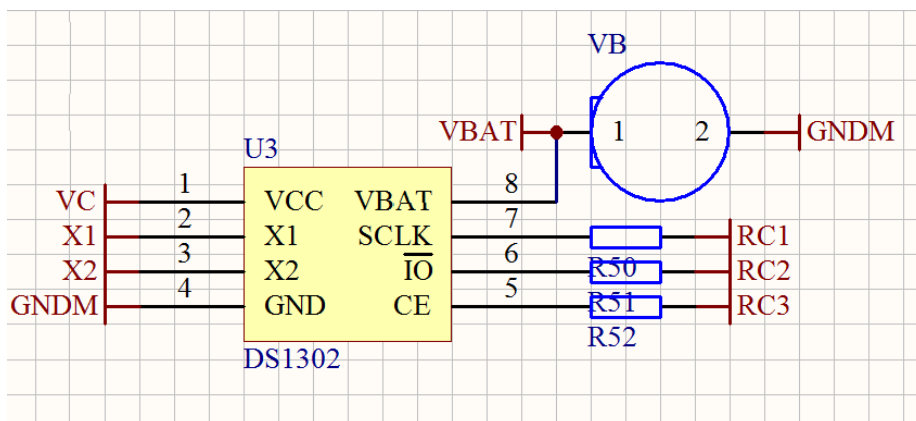


图 4.15 时钟电路

4.4.2.2 工作模式

单片机通过时钟电路的计时功能，可以实现万年历功能，从而使节能控制器根据不同日期和时间，选择启用节能模式或普通模式。节能模式下，控制器根据光敏传感器接受的外界光照强度判断是否开启或关闭列车客室照明。普通模式下，列车默认打开列车客室照明，光敏节能控制器被隔离于列车客室照明控制电路之外。这样，可以避免在照度变化过程中，自然光照度接近控制器中设置的阈值时，可能由于路灯等其它光源的影响造成控制的不稳定，出现反复开关灯的现象。

上海地处北纬 31 度位置，四季分明，日出日落时间随着季节的变化有明显差别。因此，为了减少司机的主观判断失误与操作，根据上海地区的日出和日落时间，利用时钟电路分别设置节能模式启用时间和关闭时间即普通模式的关闭与开启时间。具体时间如表 4.2 所示。

表 4.2 节能模式工作时间

月份	开启时间	关闭时间
1	7:00	16:00
2	7:00	16:00
3	7:00	17:00
4	6:30	17:30
5	6:00	18:00
6	6:00	18:00
7	6:00	18:00
8	6:00	18:00
9	6:30	17:30
10	6:30	16:30
11	7:00	16:00
12	7:00	16:00

4.4.2.3 节能时间记录

为了有效的统计节能效果，利用控制器的时钟电路，控制器中增加了节能时间记录功能。利用该功能，可以对当前时间前的十二个月节能时间进行记录，并随时进行调用或记录，结合关闭的照明功率，可以方便地计算节约的能耗。

4.4.3 可编程控制

由于客室照明智能光敏节能控制器需要根据传感器检测的照度和相应阈值持续时间来做出逻辑判断，因此控制器必须具备可编程控制功能。可以通过编程语言将控制策略编制成可执行的程序，使控制器具备一定的智能，能够根据程序预设的条件实现控制输出。

4.4.3.1 单片机

客室照明智能光敏节能控制器选用是美国 Microchip 公司生产的 PIC16F877 单片机如图 4.16 所示，它具有高速数据处理的特性、8 路 10 位 AD 转换功能、2 个脉宽调制 CCP 模块、具有 256Bytes 的 EEPROM、8k 空间的 FLASH 存储器、在线烧录调试（ISP）功能、宽电压工作、可靠性高等特点，广泛应用于各种控制集成电路场合。

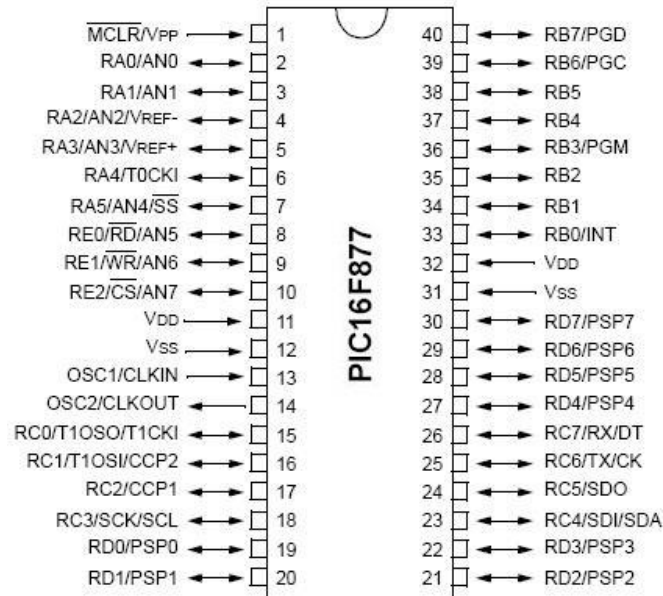


图 4.16 PIC16F877 引脚图

图 4.17 为以 PIC16F877 单片机为核心的客室照明节能控制器的功能拓扑图。单片机的 31 脚与 32 脚为电源的正极与接地端。1 脚为单片机程序的读写口，进行程序的写入和修改等操作。2 脚与 3 脚为两个光敏传感器的照度数据输入端，4 脚至 6 脚为接地端。11 脚至 20 脚与控制器的时钟电路连接，对照度相关阈值的持续时间进行计时和进行时钟、日期等运算。36 脚和 37 脚分别为客室照明开灯和关灯信号的输出端，直接与控制 KLIP 分站的 MOSFET 的栅极相连，控制 MOSFET 的导通与关断。34、35 脚为开灯和关灯信号 MOSFET 的工作反馈信号。22 脚至 26 脚为 485 通讯端口，利用该端口可以对控制器的日历时间进行修改及对存储的节能数据进行读取。

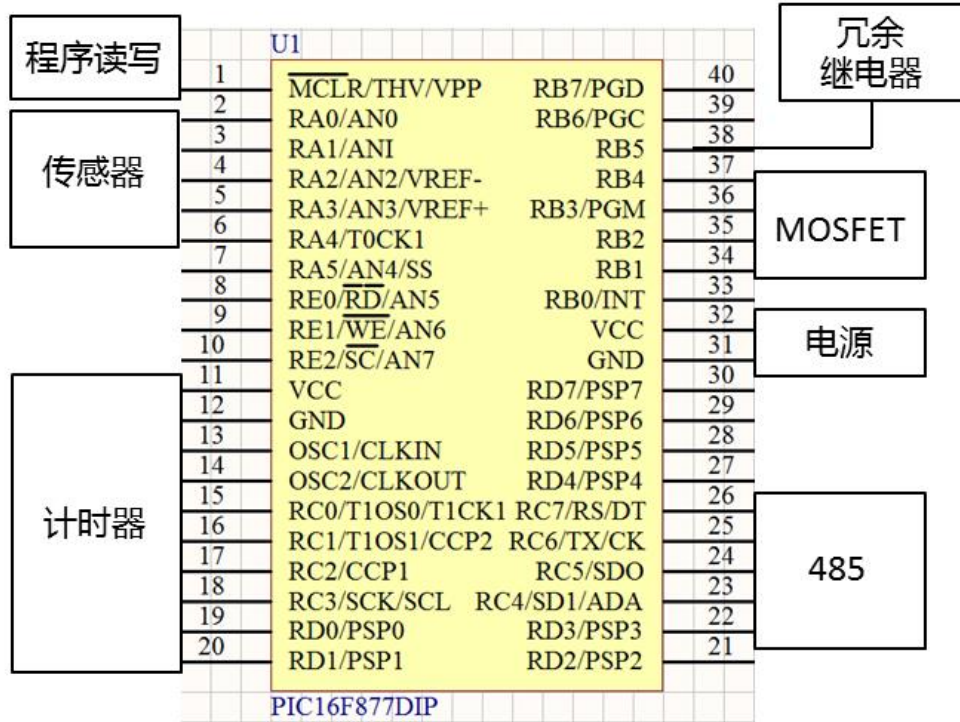


图 4.17 光敏节能控制器功能拓扑图

4.4.3.2 编程语言

C 语言和汇编语言是 PIC16F877 单片机常用的编程语言，两种语言编程语言均可被 PIC16F877 单片机支持。由于 C 语言具有能以简易的方式编译、处理低级存储器、产生少量的机器码以及不需要任何运行环境支持便能运行的特点和优势。因此，智能光敏节能控制器选用 C 语言作为编程语言。

4.4.3.3 接口电路

智能敏节能控制器采用 RS-485 接口电路如图 4.18 所示，采用 RS-485 标准进行收发数据，可以实现最大 10Mbit/s 的传输速率、最远 300m 的传输距离，为接口电路提供良好的电气特性，保证收发数据的可靠性和发生错误的处理功能。本控制器采用 MAX487 接口控制芯片，该芯片是 MAXIM 公司生产的一种差分平衡型收发器芯片，用于 TTL 协议与 485 协议转换的小功率收发器，它包括一个驱动器和一个接收器。为了防止 MAX487 与其它电路的电气不兼容和干扰，在传输过程中利用光耦 U15、U16、U17 进行电气隔离。

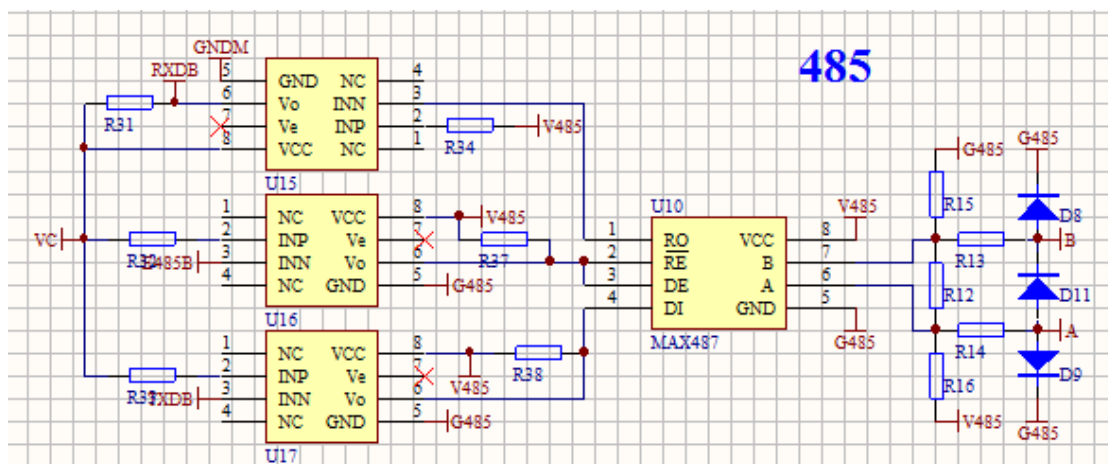


图 4.18 485 接口电路

4.4.4 兼容性设计

作为城市轨道交通车辆的车载设备，客室照明光敏节能控制器必须与列车其它系统实现兼容，同时满足轨道交通车载设备相关标准的要求。

4.4.4.1 控制器电源

首先，控制器的电源必须由车载电源提供，车载电源分为 110VDC 低压电源和 220/380VAC 中压电源。由于控制器内使用的均为 12VDC 或 5VDC 低压电源，因此应采用列车的 110VDC 作为控制器电源。

图 4.19 为光敏节能控制器电源输入电路部分，主要为输入的车载 110VDC 电源进行滤波和整流。

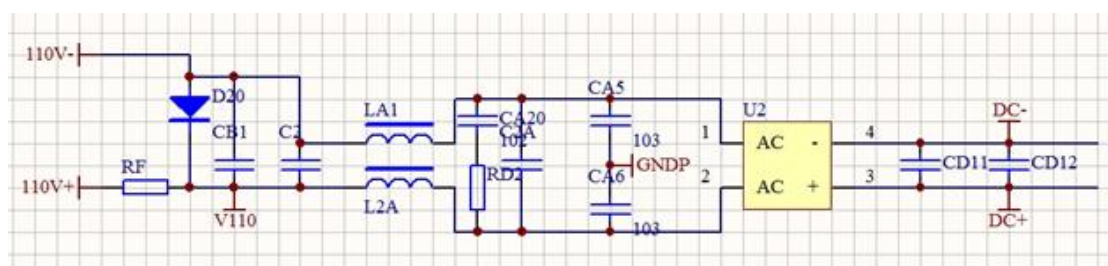


图 4.19 光敏节能控制器电源输入电路

图 4.20 所示电路图则将经过整流的 110VDC 电源经过基于 VIPer 22A 芯片的开关稳压电源电路，将电压降至 12VDC 和 5VDC。为控制器内的各部分电路提供电源。

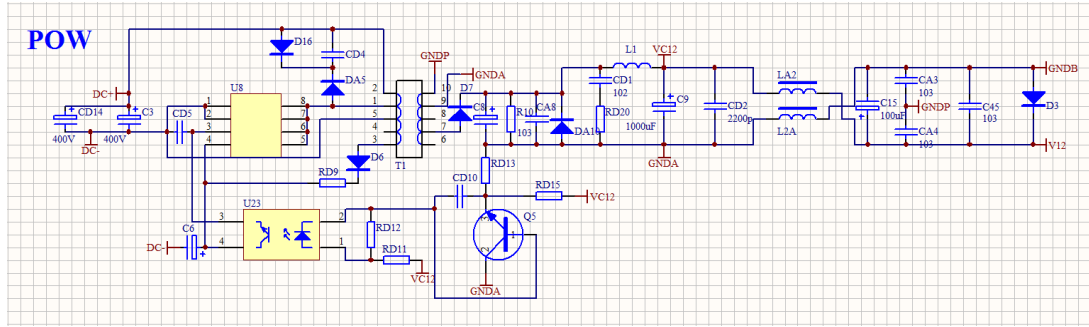


图 4.20 光敏节能控制器电源降压电路

4.4.4.2 固态继电器

由第 2 章可知，客室照明节能控制器直接的控制对象为 SIBAS KLIP 分站输入模块，输入信号为 110VDC 高电平。由于 MOSFET（金属-氧化物场效应管）与单片机控制相结合，具有控制灵敏、控制功率小、快速转换、电磁兼容性好、寿命长、可靠性高等特点。因此，控制器中采用 2 路 MOSFET 作为客室照明开关信号的输出机构，如图 4.21 所示。

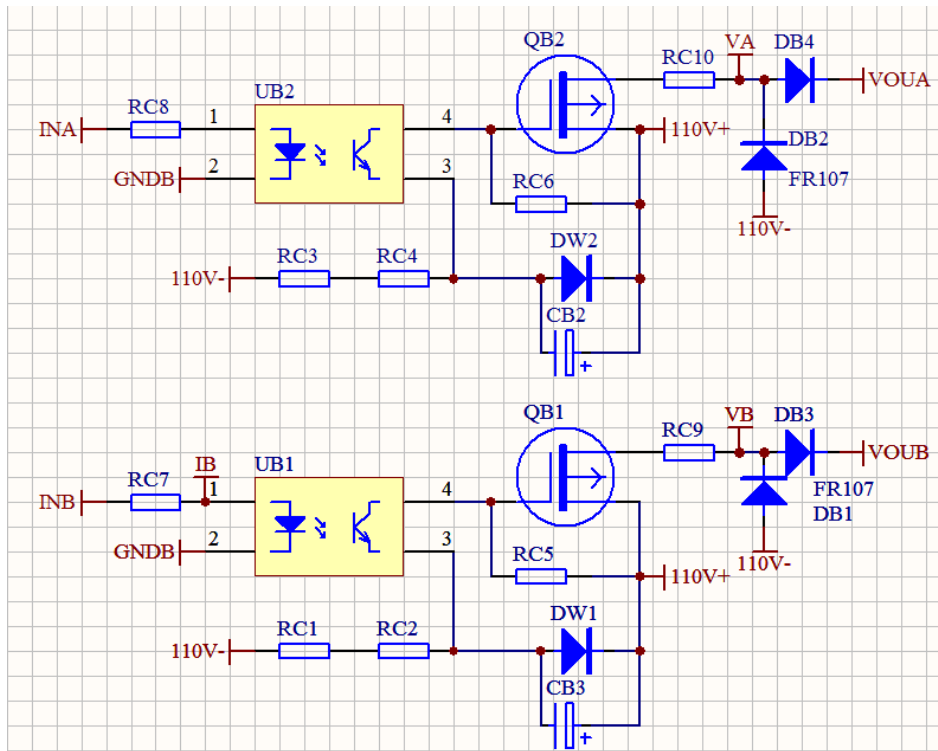


图 4.21 光敏节能控制器输出电路

INA 为单片机根据传感器检测的照度与持续时间判断常用照明开灯信号的输出信号，经过光耦 UB2 隔离后输入到场效应管 QB2 的栅极。MOSFET 的漏极连接车载的 110VDC 电源，当 QB2 栅极得到触发信号时，漏极与源极导通，源极 VOUA 为 KLIP 分站的开灯信号输入高电平。

INB 为单片机根据传感器检测的照度与持续时间判断常用照明关灯信号的输出信号,经过光耦 UB1 隔离后输入到场效应管 QB1 的栅极。MOSFET 的漏极连接车载的 110VDC 电源,当 QB1 栅极得到触发信号时,漏极与源极导通,源极 VOUB 为 KLIP 分站的关灯信号输入高电平。

同时,利用控制器中的时钟功能,可以实现固态继电器触点的延时动作。与机械式继电器相比,可以减少延时继电器的应用,降低应用成本。

4.4.4.3 外形尺寸与安装

光敏节能控制器外形尺寸为 120mm×150mm×100mm,体积较小,且背面设计有标准的 35mm C 型卡槽,可以方便地固定在列车设备柜的 C 型导轨上,如图 4.22、图 4.23 所示)。光敏节能控制器接收光敏传感器发出的电信号,并根据程序设定判断外界光照度变化情况,输出相应的开灯或关灯信号给列车客室照明控制回路,实现对客室照明的自动开关控制。



图 4.22 光敏节能控制器正视图



图 4.23 光敏节能控制器侧视图

4.4.4.4 冲击和振动要求

根据《铁路应用 机车车辆设备冲击和振动试验》(IEC61373-2010)、《电工电子产品环境试验 第2部分-试验方法 试验 Fh: 宽带随机振动和导则》(GB/T2423.56-2006)及《电工电子产品环境试验 第2部分: 试验方法 试验 Ea 和导则: 冲击》(GB/T2423.5-1995)标准中对于轨道交通车载设备必须进行功能性随机振动试验、模拟长寿命试验和机械冲击试验。

经过由国家认证的专业检测机构进行的功能性随机振动试验、模拟长寿命试验和机械冲击试验后,客室照明光敏节能控制器外观完好、无脱落、无破损开裂,符合轨道交通车载设备的冲击和振动试验要求(详见附录D)。

4.4.4.5 电磁兼容要求

根据《Railway applications-Electromagnetic compatibility-Part 3-2:Rolling stock-Apparatus》(EN 50121-3-2: 2006)、《电磁兼容 试验和测量技术 工频磁场抗扰度试验》(GB/T17626.8-2006)及《电磁兼容试验和测量技术脉冲磁场抗扰度试验》(GB/T17626.9-2011)标准中对于轨道交通车载设备必须进行静电放电抗扰度试验、射频电磁场辐射抗扰度试验、浪涌(冲击)抗扰度试验、工频磁场抗扰度试验和脉冲磁场抗扰度试验。

经过由国家认证的专业检测机构进行的静电放电抗扰度试验、射频电磁场辐射抗扰度试验、浪涌(冲击)抗扰度试验、工频磁场抗扰度试验和脉冲磁场抗扰度试验后,客室照明光敏节能控制器各项试验均为A级即“在规范极限值内功能正常”,符合轨道交通车载设备的电磁兼容试验要求(详见附录E)。

4.4.5 可靠性与安全性设计

4.4.5.1 自检功能

光敏节能控制器每次开机均对单片机、固态继电器、光敏传感器、等主要硬件进行自检扫描,如发现故障则红色故障指示灯亮。

4.4.5.2 自动复位功能

光敏节能控制器设计了软件出错或死机时自动复位功能,保证控制器的工作状态。另外,如发生单片机故障等工况,利用控制器内的红外信号一体收发器保证开灯信号处于有效状态,即客室常用照明打开。

具体地,图4.24中的LED为红外发射二极管,其信号源为单片机正常工作时30脚发送的1kHz频率的基波。其接收器FR接收到该信号时,三极管Q2处于截止状态。当单片机故障时,FR未接收到该基波,则三极管Q2被导通,其

发射极 INA1 输出触发信号至开灯 MOSFET_QB2 的栅极 INA, 如图 4.21 所示。即单片机故障时, 控制器可以强制打开客室常用照明, 故障导向安全。

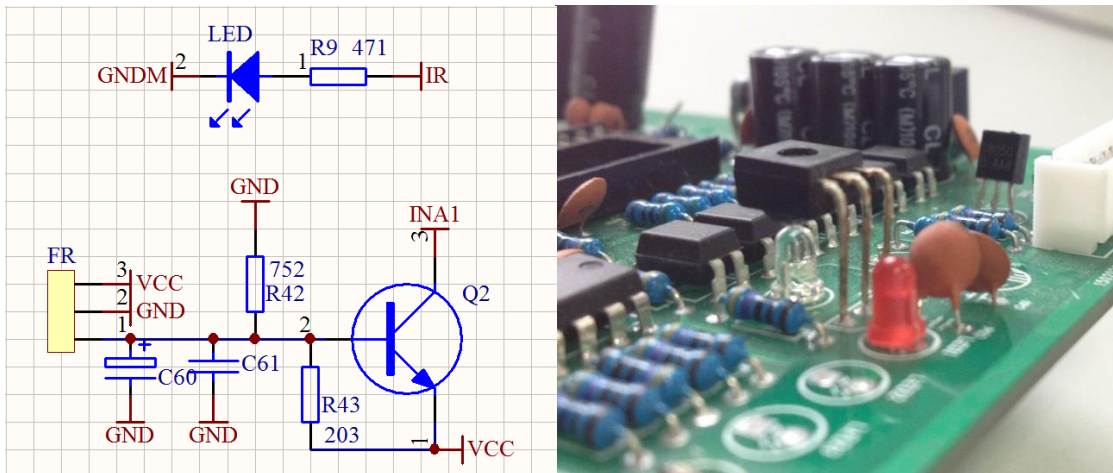


图 4.24 红外信号收发器

为验证该功能是否实现, 只需在控制器正常工作时, 在红外信号发生器与接收器中间插入金属隔板阻断红外信号后, 观察开灯信号是否为高电平。试验证明, 为光敏传感器施加大于 650lx 照度的光源, 使控制器的关灯信号为高电平, 开灯信号为低电平。此时, 在红外信号发生器与接收器中间插入如图 4.25 所示金属隔板, 控制器的关灯信号变为低电平, 而开灯信号则变为高电平, 证明该功能实现。

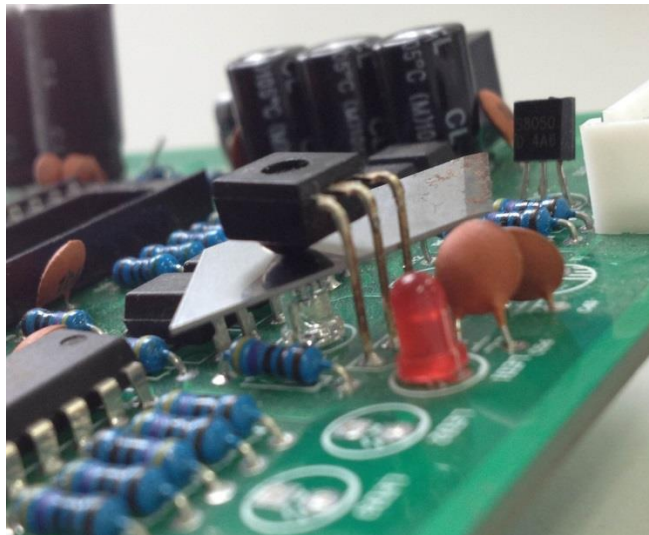


图 4.25 自动复位功能验证实验

4.4.5.3 继电器冗余

基于故障导向安全的原则, 如图 4.21 所示, 通过 VA 端对控制开灯的 MOSFET_QB2 进行状态监控, 单片机的 34、35 脚即开灯或关灯信号 MOSFET

的监控信号。当单片机检测不到该信号时，在 38 脚输出高电平至图 4.26 的 O1A 脚，导通三极管 Q3，接通冗余继电器线圈 K1 电源，常开触点 3/5 闭合后位 KLIP 输出 110VDC 开灯信号。这样，可以保证 QB2 开路失效的情况下，客室常用照明开启。由于控制关灯 QB1 若故障无法接通，仅会造成地面区间失去节能效果，不影响乘客的照明需求。因此，不对 QB1 进行冗余设计。当控制器重新启动时，则通过程序对 MOSFET 自检扫描，可发现控制器输出故障，此时机械式继电器不进行冗余保护操作，便于及时发现故障。

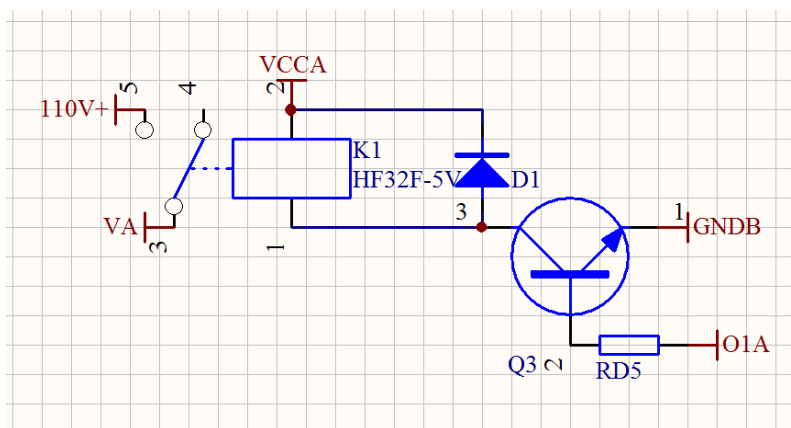


图 4.26 冗余继电器

为验证该功能，在控制器输出开灯信号时即 QB2 导通输出 110VDC 时，截断 QB2 源极与电阻 RC10 如图 4.27 所示，观察控制器是否仍能输出开灯信号。试验证明，当单片机未收到检测点 VA 反馈信号时，单片机会发出接通冗余继电器信号，保证客室照明开灯信号有效。

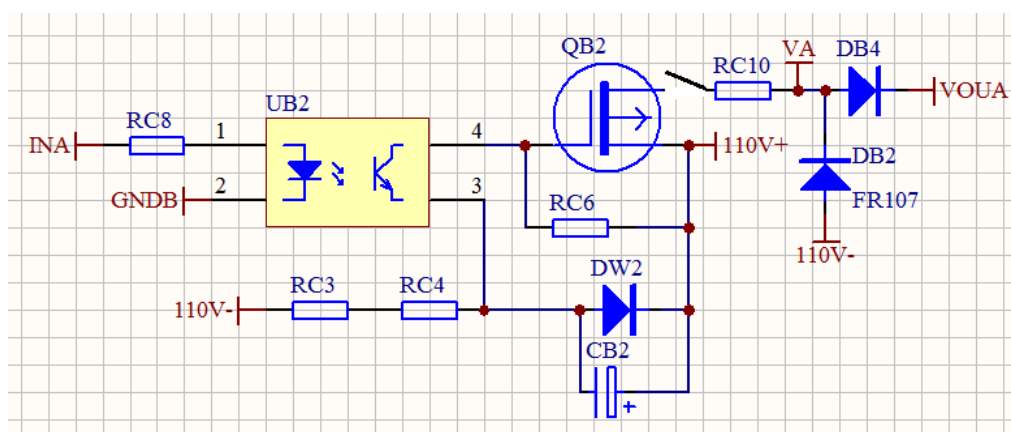


图 4.27 继电器冗余功能验证电路

4.5 光敏节能控制器装车试验与功能验证

上一节从客室照明节能控制的需求出发,根据光敏节能控制器连接的列车外围硬件、接口等要求,重新制定了适合四号线运营环境的节能控制策略,设计了新型的智能光敏节能控制器。为了验证控制器的功能是否符合设计要求,需进行一系列的功能验证试验,并在四号线 04A01 型 405 号列车上装车试验,检验光敏节能控制器的功能是否满足正线运营要求。

4.5.1 控制逻辑功能验证

为了验证根据四号线列车客室照明节能控制策略是否实现,需要将光敏传感器置于规定的照度阈值下,观察控制器输出的开灯、关灯信号的变化。为了保证实验的准确性,首先需要建立一个简易的暗室,使用不透光材料制成如图 4.28 所示中空圆柱形,一端安装接近自然光的亮度可调的光源后封闭,另一端放置照度计或光敏传感器。验证每一个开灯或关灯逻辑时,需要在两端放置照度计,调节光源的亮度,使其达到控制策略中某一控制阈值后关闭电源。然后再用光敏传感器替代照度计,打开光源电源并开始计时,观察控制器输出信号的变化。试验结果如表 4.3 所示,光敏控制器能够实现设计的节能控制逻辑。



图 4.28 光敏节能控制器功能验证试验

表 4.3 光敏节能控制器功能试验数据

项目	控制阈值 (lx)	测试照度 (lx)	延时 (s)	开灯信号	关灯信号
开灯测试	< 100	50	2	1	0
	< 350, > 100	300	60	1	0
关灯测试	> 650	700	30	0	1

4.5.2 装车功能验证

按照 3.3.3 节内容所述位置，将光敏传感器安装于光敏传感器选择安装于司机室右上角、前窗玻璃顶部，如图 4.29 所示。光敏控制装置安装在副驾驶台设备柜内如图 4.30 所示。司机室背后的设备柜安装客室照明模式转换开关如图 4.31 所示。按照 3.3.2 节内容所述方式，连接所有接线与接口，光敏节能控制器通电后状态指示灯显示设备正常。



图 4.29 光敏传感器位置



图 4.30 光敏节能控制器位置



图 4.31 模式转换开关位置

对光敏节能控制器进行基本功能测试即控制客室照明开关功能的测试。将列车主控钥匙打开，打开客室所有照明。由于此时列车处于检修库内，照度偏低，小于 650lx 的光灯阈值，因此将客室照明模式转换开关切换至自动模式，客室常用照明保持打开状态。打开手电筒对光敏传感器进行近距离照射并计时，反复试验，平均 32 秒后常用照明关闭。

在客室常用照明关闭的情况下，使用不透光材料完全遮挡光敏传感器并计时，反复试验，平均 8 秒后客室常用照明依次全部打开。试验结果与设计“持续 2 秒照度超过 650lx 常用照明打开”的逻辑不符。在分析该现象后发现，四号线列车的客室常用照明是在 A 车的 KLIP 分站收到开灯的高电平信号后，由主控端车厢的列车控制单元 VCU 依次向后面的 5 节车厢的 KLIP 分站传递开灯信号，传递到第 6 节车厢的时间平均为 6 秒。因此，8 秒后客室常用照明全部打开的现象属于正常现象，光敏节能控制器的控制逻辑正确，控制功能实现。

4.5.3 正线运营功能验证

光敏节能控制器在库内完成基本功能测试后，安排 405 号列车投运正线运营，分别在四号线的内圈与外圈运营线路上验证客室照明是否实现节能控制。试验开始前，列车启动后打开客室所有照明，将节能工作模式转换开关切换至节能模式。

1) 内圈运行过程中，405 号列车从车库出发，第一次停站为地下车站宜山路站，出站后不就即驶出隧道区间进入地面区间，然后沿内圈依次经停虹桥路站、延安西路站、中山公园站、金沙江路站、曹杨路站、镇坪路站、中潭路站、上海火车站站、宝山路站等 9 座地面车站，期间客室紧急照明始终保持打开状态，常用照明在驶出隧道后 30 秒关闭后，并在整个地面线路上始终保持关闭状态。

2) 列车在离开宝山路站向海伦路站行驶过程中进入隧道，此时 6 节客室常用照明在 8 秒钟内依次打开。随后列车在地下区间内依次经停海伦路站、临平路站、大连路站、杨树浦路站、浦东大道站、东方路站、浦电路站、蓝村路站、塘桥站、南浦大桥站、西藏南路站、鲁班路站、大木桥路站、东安路站、上海体育场站、上海体育馆站、宜山路站等 17 座地下车站，期间客室紧急照明及常用照明均始终保持打开状态。

405 号列车在外圈做验证试验时，除了行驶方向与内圈相反，进出地面站台、地下站台及隧道的过程中，均与内圈试验结果一致。

据此，客室照明光敏节能控制器的节能控制逻辑得到实现，符合四号线列车正线运营需求，可以实现节能控制功能（详见附录 F）。

4.5.4 节能数据

自 2013 年 5 月四号线 405 号列车完成客室照明光敏控制节能改造，跟踪列车运营过程中的智能光敏节能控制器的各项功能正常。因此，四号线于 2013 年 9 月全面实施了客室照明光敏控制节能改造。

四号线为环线，列车出入蒲汇塘基地仅有唯一的一个出入场线。因此，列车从上线运营到回库，必完成若干完整的整数运营圈数。由于地面线路长度占四号线全线里程的 39.3%，假定列车以平均速度行驶则理论上光敏节能方式可以使客室照明节能率达到 39.3%。根据四号线列车运行时刻表，地面线路行驶时间占全线行驶时间的比例平均为 40%。

但是，根据控制器的节能时间统计表明，平均每列车每日的节能时间为 3.1 小时。按每天的平均日照时间为 11 小时计算，则平均节能率为 28%。造成列车的实际节能率低于理论节能率的原因是，四号线的运营图分为工作日运营图与节假日运营图，且工作日运营图有早晚高峰的运营时段，不同的运营图或不同的运营时段，正线的运营列车数量不同。另外，40%的节能率是在天气良好、光照充足的条件下根据地面运营时间占四号线运营总时间的比例确定的。如遇气象变化，光敏节能控制器也无法发挥节能功能。因此，平均每列车每日的节能时间 3.1 小时，符合实际情况，光敏控制节能改造的节能率应修正为 28%。

4.5.5 节电量计算

按照 3.4 节的计算方法，节能率修正为 28%，常用照明荧光灯具的额定功率 4.264 kW，四号线列车全年工作日客室照明光敏节能控制节电量为

$$\begin{aligned} E_1 &= 4.264 \times 11 \times 18 \times 250 \times 28\% \\ &= 59099 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (4.1)$$

四号线列车全年节假日客室照明光敏节能控制节电量为

$$\begin{aligned} E_2 &= 4.264 \times 11 \times 22 \times 115 \times 28\% \\ &= 33226.8 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (4.2)$$

全年客室照明光敏节能控制节电量为

$$\begin{aligned} E_{\text{光控}} &= E_1 + E_2 \\ &= 92325.8 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (4.3)$$

4.6 综合节能效果评估

2.4 节和 3.4 节分别单独计算了 LED 替代荧光灯具、光敏节能控制改造的节能效果，4.5 节通过正线记录的节能时间数据，修正了光敏节能控制改造的节能率。实际运营中，列车的节能率及节能量是综合 LED 替代和光敏节能改造共同作用的结果。因此，需对四号线列车客室照明节能改造的综合节能率及综合节电量进行计算，以科学地评价节能效果。

4.6.1 综合节能率计算

本课题中，综合节能率为客室照明节能改造后新功率与原功率之比。但是，四号线列车在运行过程中情况复杂，不能简单地采用改造前后的灯具功率直接计算。必须根据外界不同照度条件下，分别计算常用照明打开或关闭时，采用 LED 灯具比荧光灯具下降的功率。

根据 4.5 节所述，光敏节能模式下的 28% 时间内常用照明关闭，其余 72% 时间内客室照明全部打开。列车运行在大于照度阈值的地面线路时，由于光敏节能模式作用而降低的用电功率为两部分，一部分为采用荧光灯具的常用照明用电功率

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{常用}} &= 4.264 \times 28\% \\ &= 1.194 \text{ kW}\end{aligned}\quad (4.4)$$

另一部分为紧急照明替换为 LED 灯具后比荧光灯具降低的用电功率

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{紧急}} &= (2.736 - 1.44) \times 28\% \\ &= 0.363 \text{ kW}\end{aligned}\quad (4.5)$$

列车运行在小于照度阈值的地下线路时，即光敏节能模式未起作用的 72% 时间内，客室照明处于全部打开状态。此时，只需计算全列车 LED 灯具与荧光灯具的用电功率差

$$\begin{aligned}\Delta P &= (7 - 3.68) \times 72\% \\ &= 2.39 \text{ kW}\end{aligned}\quad (4.6)$$

根据节能率计算公式，四号线列车客室照明在完成 LED 灯具替代和光敏控制改造后的综合节能率为

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{\Delta P_{\text{常用}} + \Delta P_{\text{紧急}} + \Delta P}{P_{\text{总}}} \times 100\% \\
 &= \frac{1.194 + 0.363 + 2.39}{7} \times 100\% \\
 &= 56.4\%
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

综合节电率计算结果表明，本课题实现了预期的节能目标，即经过节能改造后客室照明用电功率与改造前灯具和控制方式用电功率相比，节能率达到 50% 以上。

4.6.2 综合节能量计算

要计算两项节能改造全年的综合节电量，同样需要以光敏节能控制功能是否启用作为条件分别计算。

光敏节能控制器根据时钟设置的节能控制功能启用时间内，平均的节能率为 28%，故在此时间内的常用照明全年节电量为工作日与节假日列车开行时间内荧光灯的用电量之和

$$\begin{aligned}
 \Delta E_{\text{常用}} &= T \times \Delta P_{\text{常用}} \\
 &= (11 \times 18 \times 250 + 11 \times 22 \times 115) \times 1.194 \\
 &= 92332 \text{ kWh}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

同理，紧急照明全年节电量为工作日与节假日列车开行时间内荧光灯与 LED 灯的用电量差值之和

$$\begin{aligned}
 \Delta E_{\text{紧急}} &= T \times \Delta P_{\text{紧急}} \\
 &= (11 \times 18 \times 250 + 11 \times 22 \times 115) \times 0.363 \\
 &= 28070.8 \text{ kWh}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

则光控功能全年在启用期间并在地面区间关闭常用照明实现节能的电量为

$$\begin{aligned}
 E_{\text{光控1}} &= \Delta E_{\text{常用}} + \Delta E_{\text{紧急}} \\
 &= 92332 + 28070.8 \\
 &= 120402.8 \text{ kWh}
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

而光敏节能功能启用的 72% 时间内，即由于天气气象等原因未能关闭常用照明即客室照明全开的时间内，节电量应为全年工作日与节假日列车开行时间内，客室照明荧光灯与 LED 灯的用电量差值之和

$$\begin{aligned}
 E_{\text{光控2}} &= T \times \Delta P \\
 &= (11 \times 18 \times 250 + 11 \times 22 \times 115) \times 2.39 \\
 &= 184818.7 \text{ kWh}
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

故光敏节能功能全年在启用期间的节电量为

$$\begin{aligned}
 E_{\text{光控}} &= E_{\text{光控1}} + E_{\text{光控2}} \\
 &= 120402.8 + 184818.7 \\
 &= 305221.5\text{kWh}
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

光敏节能控制功能停用时间为,全年工作日与节假日列车开行时间减去光敏节能控制功能启用时间,节电量则为该时间内客室照明 LED 替代荧光灯节约的电能,即

$$\begin{aligned}
 E_{LED} &= T \times \Delta P_{\text{客室}} \\
 &= [(328 - 11 \times 18) \times 250 + (307 - 11 \times 22) \times 115] \times (7 - 3.68) \\
 &= 132717\text{kWh}
 \end{aligned}
 \tag{4.13}$$

因此,本课题完成的四号线车辆客室照明节能改造后的综合节电量为

$$\begin{aligned}
 E_{\text{节电}} &= E_{\text{光控}} + E_{LED} \\
 &= 305221.5 + 132717 \\
 &= 437938.5\text{kWh}
 \end{aligned}
 \tag{4.14}$$

4.7 本章小结

本章介绍了光敏节能控制原理,并以此为基础设计了照度检测电路采集四号线正线照度数据。重点分析了四号线运营线路上各个位置的照度数据及其持续时间规律,并在此基础上制定了客室照明节能控制策略。由于目前既有的光敏节能控制器均无法实现新的客室照明节能控制策略,因此本章重新设计了一款具有一定智能化功能的控制器。根据新型光敏节能控制器使用的电源、控制的对象、控制的策略及其它功能要求,详细阐述了控制器的设计过程。通过功能试验及专业机构的测试,新型光敏节能控制器各项功能均符合设计要求,能够实现四号线车辆客室照明的节能控制,并成功实现装车应用。通过下载节能控制器内储存的节能时间及计算,最终得出通过光敏节能控制可实现平均 28% 的节能率。最后,本章对四号线列车在 LED 灯具替代和光敏节能控制改造后的综合节能率和全年的综合节电量进行了计算。计算结果表明,本课题实现了预期的节能目标。

第5章 结论与展望

5.1 结论

本文旨在研究能够有效提高轨道交通车辆客室照明节能效率的实用方案。本文选择上海地铁四号线及其运营车辆作为研究对象,结合线路运营条件与车型的特点,针对现有车辆客室照明节能技术存在的问题,提出有效的解决方案,大幅提高了四号线车辆客室照明节能率,节约了可观的用电量。

本文主要通过以下途径克服了不利于提高车辆客室照明节能率的问题,实现了四号线列车客室照明节能方案的实用化。

1) 本文选用合适的 LED 灯具应用于四号线车辆客室照明的节能改造方案。通过解决 LED 灯具在四号线列车上遇到的照度要求、电源选型、接线改造、电磁兼容等问题,使 LED 灯具顺利在所有四号线列车上替代了原有荧光灯管。

2) 从实用性需求出发,设计开发了一种符合正线运营各种光照强度变化工况的节能控制器。根据照度变化规律制定了节能控制策略,使光敏节能控制器具备一定的智能化功能,实现了客室照明节能与乘客照明需求之间的平衡。在设计时充分考虑了控制器的可靠性、电磁兼容、振动与冲击等要求。通过对四号线车辆客室照明控制回路的改造,在客室照明控制电路中嵌入了新型智能光敏控制器,使列车具备了根据外界照度强弱调节客室常用照明开关实现节能的功能。

目前,四号线所有列车已完成客室照明 LED 灯具替代及光敏控制改造,综合节能率到达 56.4%,并实现全年 40 万千瓦时以上节电量,达到了本课题预期节能目标。

5.2 展望

随着轨道交通在全国各大城市大力发展,运营里程与投运车辆数逐年快速增长,相应的能耗也随之增加。同时,近年来雾霾等污染天气在全国各个区域进入高发期,人们对于节能减排的要求也越来越高。客室照明作为轨道交通车辆运营过程中不可或缺的功能贯穿于整个运营时段,产生的能耗不容小觑。目前,国内轨道交通车辆客室照明节能技术研究处于起步阶段,仅少量新购车辆具备节能功能,且存在缺陷。本文所述的技术路线与实践方案在四号线车辆客室照明节能改造中的成功,为既有线路列车的客室照明节能改造提供了成功的案例参考。

本课题为四号线车辆开发的新型智能光敏节能控制器能够实现基于正线光

照强度变化规律制定的适用于各种工况的控制策略，具有很好的应用前景。只须采集所需改造的线路的照度数据，调整照度阈值与时间阈值，即可实现控制策略的精确性。另外，由于新型光敏节能控制器采用单片机控制，理论上可以根据不同线路条件任意修改控制程序，具有很好的适用性。

目前，上海地铁四号线全线列车已完成新型智能光敏节能控制器的装车应用，节能效果良好。上海地铁十一号线列车也已完成装车试验和项目验收，即将进行全面推广应用。未来，本文所述的轨道交通车辆客室照明节能方案将在上海地铁全网络各种车型中进行推广应用。

随着“十三五”规划的推进，上海轨道交通将有 5 条现有地铁线的延伸段和 4 条新建地铁线共 250 公里在 2020 年前建成通车运营。目前已经启动新线或延伸线新购车辆共 233 列，所有列车均将客室照明采用 LED 灯具及光敏节能控制方式作为重要的技术规格之一，列入新车招标合同。同时，上述技术要求也已被正式纳入最新版的《上海城市轨道交通工程技术标准》，作为新购车辆的技术标准执行。未来，将有越来越多采用本文所述节能方案的轨道交通列车投入运营，为轨道交通行业的节能工作做出贡献。

致谢

本文的研究及撰写工作是在我的导师魏学哲老师的精心指导和悉心关怀下完成的。在我完成硕士论文期间，魏老师一直在学术上为我提供悉心的指导与无私的帮助。魏老师对学术认真负责的态度和对教学科研敬业的精神深深感动了我。同时，他渊博的学识、严谨的治学态度、求实的科研作风给我留下了深刻的印象，使我终身受益。同时，我还要感谢企业导师吴浩博士对我的指导和大力支持。

同时，我要感谢班主任武建军老师对我们学业的关心和支持，感谢所有支持我完成学业的家人、老师、领导和同学，是你们的鼓励与支持使我能够顺利的完成学业。

本次课题的研究工作即将告一段落，但是后续还需要进行推广和应用才能实现本次课题的应用价值。在魏老师的指导下，通过本课题具体技术细节的研究，使我大大提高了发现问题、分析问题和解决问题的能力，培养了我作为一名合格的工程技术人员所需的基本能力和科研作风。在以后的工作与学习中，我一定秉持工程硕士学习阶段养成的严谨的科研作风和治学态度，努力攻克一个个技术难题，为企业和社会创造财富，体现个人价值。

2016年7月

参考文献

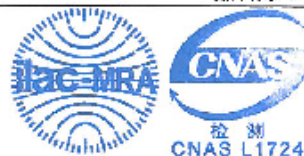
- [1] 孙立权, 熊军. 地铁车辆节能探讨. 城市建设研究(电子版), 2012(31)
- [2] 杨颖. 城市轨道交通低碳技术应用研究. 机车电传动[J], 2010(6): 1-6
- [3] 柳晓峰. 上海轨道交通 11 号线南段车辆设计. 电力机车与城轨车辆[J]. 2014, Vol. 37(5): 16-21
- [4] 王亚陆. 轨道交通耗能分析及节能措施探讨. 城市道桥与防洪[J]. 2014(9): 44-49
- [5] 蔡昌俊, 钟素银. 轨道交通节能减排分析与实施. 铁路技术创新[J]. 2011(5): 5-11
- [6] 赵鹏. 轨道交通系统的节能减排应用研究. 交通节能环保[J]. 2013(1): 15-18
- [7] 李娜, 杨俭, 方宇等. 城市轨道交通车辆制动能量回收系统的储能装置与辅助电源控制研究. 城市轨道交通研究[J]. 2011(2): 64-67
- [8] 孙延焕. 再生制动吸收设备的应用介绍. 城市轨道交通[J]. 2005(3): 40-41
- [9] 傅冠生, 曾福娣, 阮殿波. 超级电容器技术在轨道交通行业中的应用. 电力机车与城轨车辆[J]. 2014, Vol. 37(2): 1-6
- [10] 曾先光, 徐志荣, 奚华锋. DC1500V 供电的城市轨道交通车辆超级电容储能技术分析. 城市轨道交通研究[J]. 2013(10): 87-89
- [11] 赵立峰, 张发明. 北京地铁 5 号线再生电能吸收装置. 现代城市轨道交通[J]. 2008(1): 6-8
- [12] 连鹏飞. 深圳地铁 2 号线工程再生制动能量吸收装置设置方案研究. 铁道工程学报[N]. 2007(6): 85-89
- [13] 黄海界, 李晓龙, 尹力明等. 浅谈地铁车辆并网供电及其节能优势. 装备机械[J]. 2010(2): 51-56
- [14] 李铁斌. 中压交流并网供电技术在地铁列车上的应用. 城市轨道交通研究[J]. 2012(6): 121-132
- [15] 李耘茏. 上海轨道交通 11 号线北段工程车辆辅助供电系统. 机车电传动[J], 2010(5): 57-61
- [16] 张永利, 孟胜军. 轨道车辆变频空调机组在轨道交通中的节能分析. 现代城市轨道交通[J]. 2012(6): 19-22
- [17] 周志雄. 客车空调的新风控制与节能. 电力机车与城轨车辆[J]. 2004, Vol. 27(4): 45-46
- [18] 宋丹辉, 臧建彬, 陈佳等. 上海地区轨道交通车辆空调系统新风节能分析. 中国制冷学会学术年会[C], 2009
- [19] 王亚伟, 臧建彬, 王芳等. 上海地铁车辆空调机组新风节能分析. 城市轨道交通研究[J], 2011(9): 34-37
- [20] 马文, 程祖国. 上海轨道交通列车空调系统节能方法探讨. 城市轨道交通研究[J], 2014(11): 54-58
- [21] 张国富, 方宇, 郭谦等. 上海地铁 3 号线列车客室照明节能方案设计. 上海工程技术大学学报[N], 2011(3)
- [22] 上海申通集团运营管理中心. 上海轨道交通 4 号线第 412-1 号工作日列车运行图有关规定. 2015
- [23] 上海申通集团运营管理中心. 上海轨道交通 4 号线第 412-1 号节假日列车运行图有关规定. 2015

- [24] 曹民, 丁坤. 外部车灯智能控制系统的设计及试验. 上海交通大学学报[N], 2008, 42(4)
- [25] 李芊. 智能车灯控制系统的设计:[硕士学位论文]. 上海: 交通大学电气工程学院, 2007
- [26] 于晓良. 汽车自适应照明控制系统的研究:[硕士学位论文]. 辽宁: 大连理工大学机械工程学院, 2009
- [27] 郑志军. 带 CAN 总线的汽车智能前照灯系统设计:[硕士学位论文]. 上海: 交通大学电气工程学院, 2007
- [28] 彭晓峰. 论新型 LED 照明在轨道车辆照明上的应用. 科技资讯[J], 2008(26)
- [29] 胡冬. LED 照明灯具在地铁内的应用分析. 科技视界[J], 2012(19)
- [30] 杜振涛. 北京地铁 14 号线车内照明中 LED 的应用. 科技创新导报[N], 2013(7)
- [31] 刘军良, 钟碧羿. 城轨车辆客室 LED 照明的特点及灯具设计选型分析. 电力机车与城市车辆[J], 2010, 33(2):55-57
- [32] 柳晓峰, 曹增明, 周利等. 上海轨道交通 11 号线南段工程车辆照明系统设计与研究. 电力机车与城市车辆[J], 2011, 34(4):9-11
- [33] 李强. 城市轨道交通照明设计节能措施探讨. 铁道勘测与设计[J]. 2012(1):17-19
- [34] 兰永霞, 刘权, 朱发平. LED 灯具在城际动车组客室照明系统中的应用. 电源技术应用[J]. 2013(3):23-24
- [35] 赵丽娜、孙应东、张杰. LED 平面光源照明灯具在地铁车辆上的应用. 轨道交通装备与技术[J]. 2014(7):31-33
- [36] 苏丹. LED 在地铁车厢照明中的应用及光学设计案例浅析. 照明工程学报[N]. 2014, 25(6):46-49
- [37] 赵振江. LED 照明技术在南京地铁的应用. 节能[J]. 2009(4):52-53
- [38] 王庆峰. LED 照明在地铁车辆中的应用. 节能[J]. 2013(5):57-59
- [39] 唐鹏飞. 广州地铁四号线列车客室照明控制的改进. 轨道交通装备与技术[J]. 2014(3):22-23
- [40] 张绍宗, 徐健, 朱建华等. 客车车内照度调查报告. 铁道车辆[J]. 1982(8):23-26
- [41] 马洪杰. 关于照度测定. 铁道标准设计. 1985
- [42] 罗静华. 大功率 LED 智能化照明控制系统设计. 单片机与嵌入式系统应用[J]. 2010(1):50-56
- [41] 骆祖国, 陈渊睿. 高效 LED 照明驱动及智能调光电路设计. 微处理机[J]. 2011(2):84-87
- [43] 周伟. EIB 智能照明控制系统在地铁中的应用. 现代城市轨道交通[J]. 2011(1):40-42
- [44] 廖世文. LED 照明产品功率变换与智能控制系统的研究与开发:[硕士学位论文]. 广东: 中山大学电气工程学院, 2010
- [45] 李晓明, 刘长荣, 杨志峰. 光控自动照明控制器. 一重技术[J]. 2007(4):83-84
- [47] 田园. 轨道车辆 LED 照明控制系统设计. 科技创新导报[J]. 2014(22)
- [48] 周芳, 刘美根. 智能照明控制系统在电气照明节能设计中的应用. 低压电器(现代建筑电气篇[J]). 2007(16):20-23
- [49] 戴杰. 基于单片机的节能调光控制器. 电脑知识与技术[J]. 2008. Vol. 4(8):2258-2267
- [50] 李德超. 基于单片机的地铁车厢 LED 照明系统设计. 轻工科技[N]. 2015(1):53-54
- [51] 王保华, 靳尚宇, 汤钰鹏等. 新型列车智能 LED 照明控制系统的设计. 城市轨道交通研究[J], 2015(3):51-56
- [52] 姜艳青. 轨道车辆车厢 LED 照明控制系统研究:[硕士学位论文]. 吉林: 长春工业大学机械工程学院, 2013
- [53] 范静静. 中国高速列车内室照明设计研究:[硕士学位论文]. 四川: 西南交通大学工业设

- 计, 2010
- [54] 饶鹏飞. 中国高速列车室内照明环境设计研究:[硕士学位论文]. 四川:西南交通大学工业设计, 2012
- [55] Siemens AG. Metro Shanghai Perl Line Phase 2 CCU 3.0. 2002
- [56] Siemens AG. Metro Shanghai Perl Line Phase 2 Circuit Diagram. 2006
- [57] 南车株洲电力机车有限公司. 上海轨道交通 11 号线北段工程车辆电气原理图 (Version C). 2009
- [58] 南车株洲电力机车有限公司. 上海轨道交通 11 号线南段项目车辆电气原理图. 2014
- [59] 张洪润. 单片机原理及应用[M]. 科学出版社, 2002
- [60] 安毓英, 曾晓东, 冯喆珺. 光电探测与信号处理[M]. 科学出版社, 2010
- [61] 刘丁. 自动控制理论[M]. 机械工业出版社, 2006
- [62] 华平, 唐春林. 城市轨道交通车辆电气控制[M]. 机械工业出版社, 2013
- [63] 张立常. 城市轨道交通车辆电路分析与电气故障处理[M]. 机械工业出版社, 2012

附录 A LED T8 灯管振动与冲击试验报告

报告编号: CJSEETI-2011071-29010



检 验 报 告

苏州市电子产品检验所

产品名称: LED T8 灯管

委托单位: 江苏天樾之光光电科技有限公司

检验类别: 委托检验

苏州市电子产品检验所有限公司



报告编号: CJSET1-2011F112901C

产品名称	LED T8 灯管	商 标	—
型号规格	T8D10A1U; T8D20A1U		
检验类别	委托检验	产品序号	—
委托单位	江苏天楹之光光电科技有限公司	联系电话	18202186587
地 址	江苏省南通市海安县海安镇西园大道 69 号		
生产单位	江苏天楹之光光电科技有限公司	联系电话	18202186587
地 址	江苏省南通市海安县海安镇西园大道 69 号		
取样方式	送样	收样日期	2011-11-29
样品数量	各 2 个	检验日期	2011-11-29~2011-12-02
检验环境	温度(°C): 20~21 相对湿度(%): 56~61 大气压力(kPa): 102.4~102.6		
检验依据	1. 电工电子产品环境试验 第 2 部分: 试验方法 GB/T 2423.10-2008 试验 Fc: 振动 (正弦) 2. 电工电子产品环境试验 第 2 部分: 试验方法 GB/T 2423.5-1995 试验 Ea 和导则: 冲击 3. 企业技术条件 (参考: 铁路应用 机车车辆设备冲击和振动试验 TB/T 3058-2002 等同采用 IEC 61373:1999)		
检验结论	样品经检验, 所检项目符合 GB/T 2423.10-2008、GB/T 2423.5-1995 标准及企业技术条件规定的要求。本次委托检验合格。  签发日期: 2011 年 12 月 02 日		
备 注	—		
批 准:	 (袁志敏)	审 核:  (黄天飞)	主 检:  (张 伟)

有限

附录 B LED T8 灯管电磁兼容试验报告

报告编号: CJSEII-2015W021901C



检 验 报 告

产品名称: 18 LED 灯管
Product Name

委托单位: 江苏天楹之光光电科技有限公司
Applicant

检验类别: 委托检验
Test Classification

苏州市



苏州市电子产品检验所有限公司
SUZHOU ELECTRONIC PRODUCT TEST INSTITUTE CO., LTD.

报告编号: CJSETI-2015W031902C

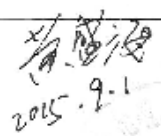


产品名称	T8 LED 灯管		商 标	—	
型号规格	T8D10A1U				
检验类别	委托检验		产品序号	—	
委托单位	江苏天楹之光光电科技有限公司		联系电话	—	
地 址	江苏省南通市海安县海安镇西园大道 69 号				
生产单位	—		联系电话	—	
地 址	—				
取样方式	送样		收样日期	2015-03-19	
样品数量	1 个	检验日期	2015-03-19		
检验环境	温度 (°C): 20		相对湿度 (%): 25	大气压力 (kPa): 102.5	
检验依据	电气照明和类似设备的无线电骚扰特性的限值 和测量方法 GB 17743-2007				
检验结论	<p>样品经检验, 所检项目符合 GB/T 17743-2007 标准规定的要求。本次委托检验合格。</p> <p style="text-align: right;">(检测专用章) 签发日期: 2015 年 3 月 20 日</p>				
备 注	—				
批 准 :	 (袁志敏)	审 核 :	 (黄天飞)	主 检 :	 (沈 凯)

五口

附录 C 《上海申通地铁四号线列车客室 LED 节能改造项目》

竣工报告

竣工报告

改造单位：天橙（上海）光电科技有限公司			
工程编号		开工日期	2014年11月3日
		竣工日期	2015年3月18日
工程名称	上海申通地铁四号线列车客室LED照明节能改造项目	结构类型	
建设单位	上海轨道交通明珠线(二期)发展有限公司 上海地铁维护保障有限公司	建设地点	上海市虹汇港基地
工程造价	89687.65元	改造单位联系人	黄盛涛
<p>本项目于2014年5月天橙（上海）光电科技有限公司参与上海地铁维护保障有限公司组织的上海地铁一、二、四号线列车客室LED照明节能改造项目的招标工作，凭借技术、产品、价格等相关优势并顺利中标，2014年9月天橙（上海）光电科技有限公司与上海轨道交通明珠线(二期)发展有限公司和上海地铁维护保障有限公司签订了《上海申通地铁四号线列车客室LED照明节能改造项目》的合同，项目于2014年9月开始产品生产，2014年11月3日正式启动开始列车改造，并对列车样车LED灯管进行了跟踪，对列车改造前及改造后的客室照度进行了实测及对比，相关数据合格，2014年11月底对4号线其余列车进行了全面改造，于2015年3月完成所有列车改造安装，经过4个月的试运行，整体运行良好，符合验收规定。</p>			
方 改 单 位 签 字	 	改 造 单 位 签 章	

089

附录 D 列车客室照明光敏节能控制器振动与冲击试验报告

编号	CEPREMREC-SZ-2015-0526
总页数	共 12 页

检 测 报 告

产品名称: 列车客室照明智能控制器

型号规格: SSF-2000K-

检测类别: 环境试验

生产单位: 上海申海机电科技有限公司

委托单位: 上海申海机电科技有限公司




中国计量科学研究院
(工业和信息化部电子第五研究所)

可靠性与环境工程研究中心

检测报告

TEST REPORT

产品名称	列车客室照明智能控制器	商 标	/
型号规格	SSF-200GK-	检测类别	环境试验
生产单位	上海申涪机电科技有限公司	委托单位	上海申涪机电科技有限公司
地 址	上海市松江区文翔路5192号 文翔商厦D座502室	地 址	上海市松江区文翔路5192号 文翔商厦D座502室
样品数量	1件	检测地点	中国赛宝（华东）实验室
接样方式	自送	抽样方式	/
样品等级	/	抽样日期	/
接样日期	2015年5月19日	完成日期	2015年5月23日
检测依据	按客户要求方法按照 IEC61373-2010 GB/T 2423.56-2006 GB/T 2423.5-1995	检测项目	功能性随机振动试验 模拟长寿命试验 机械冲击试验
检测条件	<p style="text-align: center;">功能性随机振动试验、模拟长寿命试验、机械冲击试验 （方法参照 IEC61373-2010 中 1 类 B 级方法，详见第 4-12 页试验程序）</p>		
检测结果	<p>上海申涪机电科技有限公司委托检测的列车客室照明智能控制器样品，按检测要求进行功能性随机振动试验、模拟长寿命试验、机械冲击试验。 检测结果：试验后样品外观完好，无脱落，无破损开裂。</p> <div style="text-align: right; margin-top: 10px;"> 签发日期：2015年6月20日  </div>		

试验负责人 张培跃
 签 名：张培跃

审核人 顾峰
 签 名：顾峰

批准人 高工
 签 名：高工
 职 务：高工

附录 E 列车客室照明光敏节能控制器电磁兼容试验报告



2014002246H

报告编号	E1505CR8888-00581
总页数	共 14 页

检 验 报 告

(本报告未经许可不得部分复制)

产品名称: 列车客室照明智能控制器

型号规格: SSF-200GK-

检验类别: 委托检验

生产单位: 上海中涪机电科技有限公司

委托单位: 上海中涪机电科技有限公司



工业和信息化部电子第五研究所
中国赛宝实验室 赛宝质量安全检测中心

工业和信息化部电子第五研究所
中国赛宝实验室 赛宝质量安全检测中心
检 验 报 告

报告编号: E1505CR8888-00591

第 3 页 共 14 页

产品名称	列车客室照明智能控制器			型号规格	SSF-200GK-
				商 标	/
生产单位	上海申涪机电科技有限公司			检验类别	委托检验
委托单位	上海申涪机电科技有限公司			检验地点	本实验室
生产方地址	上海市松江区文翔路 5192 号文翔商厦 D 座 502 室				
委托方地址	上海市松江区文翔路 5192 号文翔商厦 D 座 502 室				
送样数量	壹套	送样者	委托单位	送样日期	2015-05-19
抽样地点		基 数		生产日期	
检验环境	温度 15~35℃ 相对湿度 45~75% 气压 86~106kPa				
检验项目	电磁兼容特性				
检验依据	1)EN 50121-3-2:2006 2)GB/T 17626.8-2006 电磁兼容 试验和测量技术 工频磁场抗扰度试验 3)GB/T 17626.9-2011 电磁兼容 试验和测量技术 脉冲磁场抗扰度试验 4)委托方要求:工频磁场抗干扰度 试验场强: 3A/m ,脉冲磁场抗扰度: 30A/m ; A 级判定*				
检验结果	被测样机符合检验依据要求。				
检验结论	合格。 				
说 明	带“*”的检验依据不在本实验室 CNAS 认可和 CMA 计量认证范围内。				

主检:

审核:

批准:

日期: 2015 年 6 月 25 日

日期: 2015 年 6 月 25 日

职务:

日期: 2015 年 6 月 25 日

附录 F 列车客室照明光敏节能控制器功能试验记录表

四号线客室照明光控器正线功能验证记录表					
站台方式	站名	常用照明	紧急照明	延时 (S)	备注
地下站台	宜山路站	✓	✓		
	上海体育馆站	✓	✓		
	上海体育场站	✓	✓		
	东安路站	✓	✓		
	大木桥路站	✓	✓		
	鲁班路站	✓	✓		
	西藏南路站	✓	✓		
	南浦大桥站	✓	✓		
	塘桥站	✓	✓		
	蓝村路站	✓	✓		
	浦电路站	✓	✓		
	东方路站	✓	✓		
	浦东大道站	✓	✓		
	杨树浦路站	✓	✓		
	大连路站	✓	✓		
	临平路站	✓	✓		
	海伦路站	✓	✓		
	驶出隧道	X	✓	31	6节同时关闭
地面站台	宝山路站	X	✓		
	上海火车站站	X	✓		
	中潭路站	X	✓		
	镇坪路站	X	✓		
	曹杨路站	X	✓		
	金沙江路站	X	✓		
	中山公园站	X	✓		
	延安西路站	X	✓		
	虹桥路站	X	✓		
	驶入隧道	X	✓		
地下站台	宜山路站	✓	✓	8	6节先打开

注：1、列车上线运营前，合52-S01打开客室照明，将52-S02置于“自动”档位。
2、记录时，以“✓”和“X”表示照明的开启和关闭状态，如有延时情况，利用计时器记录延时时间并记录。

日期：2013.6.18

记录人：董晓春

天气：多云



附录 G 列车客室照明光敏节能控制器专家评审意见

上海地铁列车客室照明节能光控改造方案

专家评审意见

2013年7月18日，上海申通地铁集团有限公司技术中心组织专家对上海地铁列车客室照明节能光控改造方案进行了评审。与会专家听取了项目组对方案的介绍，经认真讨论，形成如下意见：

1. 项目组提出的列车客室照明节能光控改造方案，在现有照明控制方式的基础上实现了列车不同运行区段照明的智能控制，设计合理，方案可行。

2. 新增列车客室照明智能控制技术以实际运营环境光照度变化规律为基础，可实现针对复杂环境的控制策略，具有一定的节能效果，性价比较高。

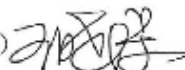
3. 列车客室照明智能光控制器具有安装灵活、接口简单、改造工作量小等优点，易于推广应用。

专家组一致同意列车客室照明节能光控改造方案通过技术评审。

建议：

在四号线已改造一列车的基础上，进一步优化智能光控改造方案，可在四号线全线扩大试点实施改造，并跟踪改造后的应用效果。

专家组组长（签名）



2013.07.18

附录 H 列车客室照明光敏节能控制器用户报告

《04A01 型列车客室照明智能光控节能改造》

用户报告

04A01 型电动列车客室照明智能光控节能改造项目，由上海申浩机电科技有限公司于 2013 年 9 月底前，在 4 号线 28 列车上成功改造完成，在半年多的装车运营过程中经过多次跟踪检查，功能正常，智能光控器在露天线路段能自动根据外界光照强度进行客室照明节能控制，在地下线路段能自动采取全开客室照明的控制，既保证了乘客的舒适度又达到节能减排的目的。

车辆分公司维修三部四号线



车辆分公司设备管理部



上海地铁维护保障
有限公司车辆分公司



2014-5-15

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

顾耀君, 男, 1980 年 9 月生。

2003 年 7 月毕业于同济大学 机械制造及其自动化(机电一体化)专业 获学士学位。

2012 年 3 月入同济大学读硕士研究生。

已发表论文:

- [1] 顾耀君. 地铁列车牵引设备冷却风机供电回路的改造研究. 城市轨道交通研究, 2014, Vol. 17 (6) :59-62
- [2] 顾耀君, 余佑民, 季凌云, 褚敏娟. 一种高压大功率 IGBT 综合参数测试设备的研究与实现. 电源技术应用, 2014 (10) :21-26
- [3] 顾耀君. 上海轨道交通 4 号线列车客室照明节能改造研究. 城市轨道交通研究, 2017, Vol. 20 (7) :112-116

