

轨道车辆车厢LED照明系统设计及可靠性分析

张邦成 尹晓静 高 智 王占礼 周志杰 著



轨道车辆车厢 LED 照明系统设计及可靠性分析

张邦成 尹晓静 高智 王占礼 周志杰 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在简要介绍轨道车辆车厢 LED 照明技术发展的基础上,对轨道车辆车厢 LED 照明外观结构进行总体设计;深入分析轨道车辆车厢 LED 驱动电源要求,设计了一种 LED 驱动器,输出电压和电流平稳,能够满足 LED 的驱动要求;深入研究轨道车辆车厢 LED 照明控制方法,应用集中式控制方法,设计了以 CAN 总线为通信方式的控制系统,并应用 PID 算法控制驱动电源的输出电流,实现对 LED 亮度的智能控制;在分析轨道车辆车厢 LED 照明系统故障机理的基础上,基于小波包能量熵进行特征提取,提出应用置信规则库的轨道车辆车厢 LED 照明系统故障诊断与预报方法;为了提高轨道车辆车厢 LED 照明系统的可靠性,提出一种带漂移参数的 Wiener 过程的剩余寿命预测方法,利用 Bayes 方法对参数进行估计。

本书可供复杂机电系统故障诊断与预报、可靠性研究等专业的研究生学习,也可供从事轨道车辆车厢 LED 照明相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

轨道车辆车厢 LED 照明系统设计及可靠性分析/张邦成等著. —北京:科学出版社,2019.8

ISBN 978-7-03-060287-9

I. ①轨… II. ①张… III. ①铁路车辆-车厢-发光二极管-照明设计
IV. ①U270.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 296900 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2019 年 8 月第一次印刷 印张:9 1/2

字数:188 000

定价:90.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着发光二极管(light-emitting diode, LED)照明技术的飞速发展和国内节能减排政策的深入实施,LED光源以其体积小、质量轻、寿命长、使用电压低等一系列优势,在轨道车辆车厢照明领域迅速崛起。目前,国内的轨道车辆车厢LED照明技术尚未成熟,许多问题亟待解决。本书针对轨道车辆车厢LED照明存在的问题进行深入分析与研究,并提出相应的解决办法,为轨道车辆车厢LED照明系统的开发及应用提供参考。

本书围绕轨道车辆车厢LED照明系统设计,以及可靠性分析展开。全书6章。第1章简述LED在轨道车辆车厢中的应用与发展,并总结现阶段轨道车辆车厢LED照明系统存在的问题。第2章对轨道车辆车厢LED照明系统的外观结构进行设计,包括散热装置、照明保护装置,以及一些新颖的灯具结构的设计,提高LED照明灯具的散热性能、防振性能等。第3章对轨道车辆车厢LED照明系统驱动电源进行设计,采用先进的闭环脉宽调制(pulse width modulation, PWM)方式,保证LED驱动电源能够提供稳定的恒流源。第4章对轨道车辆车厢LED照明控制方式进行研究,应用比例积分微分(proportion integration differentiation, PID)算法对PWM占空比进行控制,从而控制驱动电源的输出电流,使LED的发光达到预定值。第5章利用置信规则库理论对轨道车辆车厢LED照明系统进行故障诊断与预报研究,利用专家知识和表征故障的多个特征量的半定量信息实现故障诊断与预报,满足工程实际要求。第6章运用故障树分析法对轨道车辆车厢LED照明控制系统可靠性进行分析,提出一种带漂移参数的Wiener过程的剩余寿命预测方法,对系统薄弱环节进行剩余寿命预测,并通过实验验证理论方法的可行性与准确性。

本书的撰写得到长春工业大学、研奥电气股份有限公司的大力支持。同时,凝聚了吉林省智能制造技术工程研究中心步倩影、隋元昆、陈珉珉、姜艳青、徐燃等多位同学的汗水和付出。在此一并衷心感谢!

本书相关的研究工作得到国家自然科学基金项目(61374138)、吉林省教育厅“十二五”科学研究计划项目“轨道车辆 LED 照明系统设计与开发”(吉教科合字[2011]第 84 号)、吉林省科技厅重点科技成果转化项目“轨道车辆车厢 LED 照明系统产业化”(20160307003GX)的资助。

限于水平,不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者

2018 年 11 月于长春

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 LED 照明在轨道车辆中的应用与发展	1
1.2 轨道车辆车厢 LED 照明存在的问题	4
1.3 本章小结	5
第 2 章 轨道车辆车厢 LED 照明结构设计	6
2.1 新型旋轴式轨道车辆车厢 LED 照明结构设计	6
2.2 轨道车辆车厢 LED 照明散热装置结构设计	8
2.3 轨道车辆车厢 LED 照明保护装置结构设计	12
2.4 本章小结	13
第 3 章 轨道车辆车厢 LED 照明系统驱动电源设计	14
3.1 轨道车辆车厢 LED 驱动方式的选择	15
3.1.1 恒流式 LED 驱动器	15
3.1.2 稳压式 LED 驱动器	16
3.2 轨道车辆车厢 LED 照明驱动电源基本原理	17
3.2.1 DC/DC 变换器原理	17
3.2.2 PWM 调制技术	19
3.2.3 闭环反馈	19
3.3 轨道车辆车厢 LED 照明驱动电源的设计	19
3.3.1 驱动芯片的选择	19
3.3.2 EMC 电路设计	21
3.3.3 整流滤波电路设计	22
3.3.4 PFC 电路设计	23
3.3.5 降压稳压电路设计	24
3.3.6 DC/DC 变换器电路设计	25
3.3.7 LED 驱动电源整体电路设计	26
3.4 轨道车辆车厢 LED 照明驱动电源电路仿真分析	28
3.4.1 仿真电路的设计	28

3.4.2	整流滤波电路的仿真分析	29
3.4.3	DC/DC 变换器的仿真分析	29
3.4.4	LED 驱动芯片的仿真分析	30
3.4.5	LED 驱动电源电路仿真分析	32
3.5	本章小结	35
第 4 章	轨道车辆车厢 LED 照明控制系统设计	36
4.1	轨道车辆车厢 LED 照明控制系统研究现状	36
4.2	轨道车辆车厢 LED 照明控制方法分析	37
4.2.1	分散式控制方法	37
4.2.2	集中式控制方法	38
4.3	轨道车辆车厢 LED 照明控制系统总体方案	38
4.4	轨道车辆车厢 LED 照明控制系统总体原理	40
4.5	控制系统亮度采集模块的设计	41
4.6	控制系统通信方式的选择	43
4.6.1	RS232 通信方式	43
4.6.2	RS485 通信方式	44
4.6.3	CAN 总线通信方式	44
4.6.4	三种通信方式的比较	45
4.7	轨道车辆车厢 LED 照明控制系统通信接口电路设计	45
4.7.1	基于 SJA1000 的控制电路设计	46
4.7.2	基于 PCA82C250 的收发电路设计	48
4.8	轨道车辆车厢 LED 照明控制算法研究	49
4.8.1	车厢亮度变化因素分析	49
4.8.2	亮度处理数据融合算法	49
4.8.3	PID 控制算法	54
4.9	轨道车辆车厢 LED 照明亮度智能控制仿真分析	55
4.9.1	置信距离矩阵的计算	56
4.9.2	支持度关系矩阵的计算	57
4.9.3	融合结果的计算	59
4.9.4	总体结果分析	59
4.9.5	PID 仿真分析	61
4.10	本章小结	64

第 5 章 轨道车辆车厢 LED 照明系统故障诊断与预报	65
5.1 轨道车辆车厢 LED 照明系统故障机理分析	65
5.1.1 LED 控制电路模块故障机理分析	66
5.1.2 LED 驱动电源模块故障机理分析	69
5.1.3 LED 灯板模块故障机理分析	70
5.1.4 亮度传感器采集模块故障机理分析	71
5.2 基于置信规则库的系统故障诊断研究	72
5.2.1 故障特征提取方法研究	73
5.2.2 置信规则库理论	82
5.2.3 桥式整流滤波电路故障诊断	85
5.3 基于置信规则库的系统故障预报研究	88
5.3.1 基于置信规则库的故障预报	88
5.3.2 亮度传感器故障预报仿真分析	90
5.4 本章小结	94
第 6 章 轨道车辆车厢 LED 照明控制系统可靠性分析	96
6.1 LED 照明产品可靠性问题	96
6.1.1 LED 照明产品可靠性技术研究现状	96
6.1.2 可靠性定义与度量	97
6.1.3 可靠性实验	100
6.2 LED 照明控制系统可靠性建模与分析	101
6.2.1 可靠性模型	101
6.2.2 可靠性分析	104
6.3 LED 照明产品可靠性因素分析	108
6.3.1 故障树理论与分析方法	109
6.3.2 故障树的建立	109
6.3.3 故障树的数学描述	110
6.3.4 故障树的评定	111
6.3.5 可靠性影响因素分析	112
6.4 LED 照明控制系统剩余寿命预测	117
6.4.1 加速退化实验的分类及模型	117
6.4.2 基于 Wiener 过程的轨道车辆车厢 LED 照明控制系统剩余寿命预测	121
6.4.3 实验准备	126
6.4.4 实验设备	128

6.4.5	实验步骤	129
6.4.6	轨道车辆车厢 LED 驱动电源剩余寿命预测	131
6.5	本章小结	134
参考文献		136
附录		139

第 1 章 概 述

1.1 LED 照明在轨道车辆中的应用与发展

LED 是一种将电能直接转换成光能的半导体固体照明器件。LED 具有驱动电压低、工作电流小、抗振动和冲击能力强、体积小、可靠性高、耗电少和寿命长等特点,广泛应用于信号指示、照明、背光源等^[1]。

随着 LED 照明技术的飞速发展和节能减排政策的深入实施,LED 光源开始应用于道路照明和地铁照明^[2,3]。2007 年,日本首次大规模采用 LED 照明设备^[2]。该设备由东芝照明技术公司研发,应用在新型 Romancecar 50000 型电车内,如图 1-1 所示。Romancecar 50000 型电车内照明设备安装位置包括坐席上部行李架下方、瞭望室天花板、车门上部和驾驶席天花板等处,一列电车大约使用 1900 根直线状模块,100 部专用电源。



图 1-1 Romancecar 50000 型电车

从 2008 年开始,我国多个地区的地铁采用 LED 照明灯具。香港地铁携九洲光电在国内率先引入 LED 光源作为地铁车厢内部照明(图 1-2),拉开了地铁 LED 照明时代的序幕。2011 年,国家相关部门出台《地铁场所照明用 LED 灯具技术规范》,明确了地铁 LED 照明灯具的采购规范,为地铁 LED 照明灯具打开标准化之路。

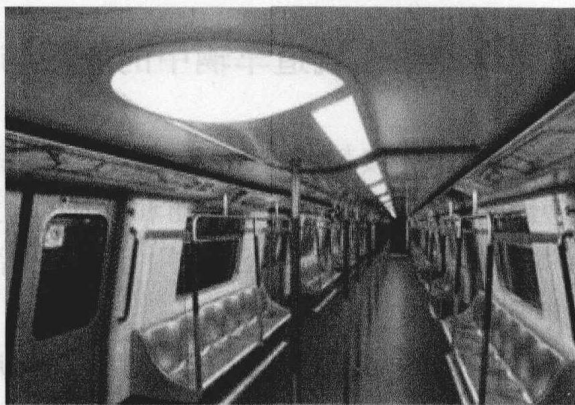


图 1-2 香港地铁车厢 LED 照明

从 2014 年开始,我国在地铁建设中,普遍使用 LED 作为照明首选。深圳地铁 1 号线的新车厢中,车内照明采用中国中车股份有限公司拥有的 LED 集中供电专利技术,相对于常规照明节电 30%以上,如图 1-3 所示。上海也在 2014 年 9 月为地铁 3、4 号线引进 LED 照明技术,采用自动感光式 LED,根据外部光照度来自动调节光照度,以便降低能耗,如图 1-4 所示。



图 1-3 深圳地铁 1 号线



图 1-4 上海地铁 3 号和 4 号线车厢内部图

2015 年,英国最大的火车公司——维珍火车,选用 Aura Light 的 LED 照明,并装设在潘多利诺(Pendolino)列车上(图 1-5)。每列火车的车厢都装有 Aura Light 的 A-LED 白、蓝色聚光灯。Aura Light 的灯具替换掉的是色温只有 2700K 的 20W 低压卤素灯和白炽灯。这些传统灯具无法提供足够照度,且相对昂贵。替换掉旧式灯具后,维珍火车不但降低能耗和电费,同时减少 75% 的维修费用。



图 1-5 潘多利诺列车车厢 LED 照明

1.2 轨道车辆车厢 LED 照明存在的问题

LED 光源以其诸多优势在国内外轨道车辆车厢照明领域迅速崛起,在城轨车辆领域的应用越来越受到关注。但是,LED 应用于轨道车辆车厢照明还存在许多难题,如 LED 的散热问题、LED 的恒流恒压源驱动问题、LED 的故障诊断与预报问题、LED 控制系统的寿命评估问题等。本书主要针对以上几个问题开展研究及分析。

1. 轨道车辆车厢 LED 照明散热问题

长期以来,LED 的散热问题是制约 LED 照明在轨道车辆车厢广泛推广应用的难题之一。LED 照明不同于传统的辐射光源,它将大约 32% 的能量转化为可见光,剩余的 68% 则以热的形式通过其背部的散热底座传导出去,如果散热不好,LED 芯片的温度就会急剧上升。由于 LED 芯片对温度的敏感性,当温度上升时,其可靠性将大幅度降低,严重时导致 LED 损坏。因此,解决散热问题已成为高亮度 LED 照明应用的先决条件。

针对 LED 的散热问题,第 2 章设计了一种新的 LED 散热装置,采用四周开通风孔的可拼接结构以满足不同尺寸大小的 LED 灯具的设计需求,充分利用风力降温法,使温度下降更加明显。与此同时,灯具外壳散热效果良好,可以有效降低 LED 工作温度。

2. 轨道车辆车厢 LED 照明驱动电源设计

LED 具有单向导通性,电压-电流(V-I)曲线具有非线性,压降随温度变化较大,发光强度随电流变化较大等特点,导致 LED 照明不能直接使用轨道车辆的交流电,必须使用专门的电源将轨道车辆中的交流电转换成特定电压的直流电。

针对轨道车辆车厢 LED 照明的驱动问题,第 3 章设计了一种新型轨道车辆车厢 LED 照明驱动电源,采用闭环控制原理和 PWM 方式,具有浪涌保护功能,可以增强其稳定性和可靠性。

3. 轨道车辆车厢 LED 照明系统故障诊断与预报

针对 LED 照明的特点,第 4 章设计了轨道车辆车厢 LED 照明控制系统。整个轨道车辆车厢 LED 照明系统复杂,电子元器件多,在实际应用中,任何一部分电路或者任何一个元器件出现故障,都会导致轨道车辆车厢 LED 照明系统不能正常工作,同时有可能造成局部,甚至整车照明系统的瘫痪,影响行车安全。因此,及时发现已有故障或对可能出现的故障进行预报,对轨道车辆的安全运行具有重要意义。

为了解决轨道车辆车厢 LED 照明系统的故障诊断与预报问题,第 5 章基于置信规则库专家系统对轨道车辆车厢 LED 照明系统进行故障诊断与预报的研究。

4. 轨道车辆车厢 LED 照明系统可靠性分析

轨道车辆车厢 LED 照明系统可靠性是衡量系统先进性的重要指标,也是 LED 照明在轨道车辆车厢推广的重要参考。

为了提高轨道车辆车厢 LED 照明系统的可靠性,第 6 章提出一种带漂移参数的 Wiener 过程的剩余寿命预测方法,并基于 Bayes 方法对参数进行估计,可以提高预测精度,降低预测的不确定性。同时,也可为其他同类产品的剩余寿命预测提供参考。

1.3 本章小结

本章简要介绍 LED 照明在轨道车辆车厢中的应用与发展,并分析现阶段存在的问题。在此基础上,介绍本书的重点研究内容和主要方法。

第 2 章 轨道车辆车厢 LED 照明结构设计

随着轨道车辆车厢照明技术的发展,LED 照明无论节能、环保,还是经济效益等方面都优于荧光灯等传统轨道车辆车厢照明方式,逐渐成为取代传统光源的新型车厢照明装置。目前,LED 车厢照明在结构设计方面存在散热不理想、维修安装不方便等问题。本章设计了一种轨道车辆车厢 LED 照明新型结构,用于解决轨道车辆车厢 LED 照明在散热、结构等方面的问题。

轨道车辆车厢 LED 照明结构包括灯体、上灯罩、下灯罩、灯罩板、支架、螺钉、LED 散热型材、LED 光源板等。LED 灯的主体结构由上灯罩和下灯罩构成。其内部的光源模块为光源板和散热型材。散热型材可以对光源板起到良好的保护作用。为了光源模块能够持续在合适的温度下工作,我们选用散热性能较好的铝型材,并加装散热片。此外,为了确保支架不会因车辆高速行驶时的振动产生形变,支架采用型材。

2.1 新型旋轴式轨道车辆车厢 LED 照明结构设计

新型旋轴式轨道车辆车厢 LED 照明结构包括灯体、反光板、罩板、灯罩、LED 驱动器和 LED 光源板。反光板设置在灯体的下方并通过折页与灯体连接在一起。LED 驱动器放置在反光板与灯体构成的空间内。LED 光源板设置在反光板的下面。罩板一端通过旋轴式挂钩与灯体连接在一起,另一端通过安装钉与灯体连接。罩板可便捷拆卸,悬挂在灯体上。灯罩安装在罩板上。其整体结构如图 2-1 所示。

灯体由铝型材机加工制成,质量轻、强度高,可以满足车体减重的要求。反光板端部设有端板,四周与罩板通过密封胶条紧密压实,可以达到密封等级 IP40(防止大于 1.0mm 的固体外物侵入,防止直径或厚度大于 1.0mm 的工具、电线及类似的小型外物侵入而接触到电器内部

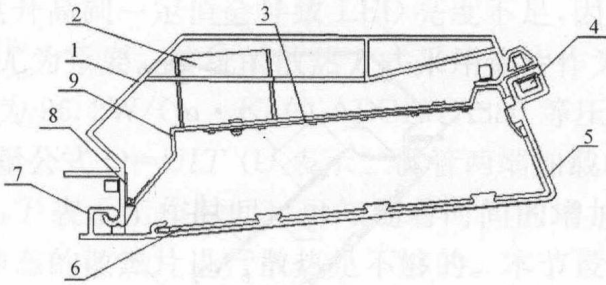


图 2-1 整体结构示意图

- (1. 灯体 2. LED 驱动器 3. LED 光源板 4. 安装钉 5. 罩板
6. 灯罩 7. 旋轴式挂钩 8. 折页 9. 反光板)

的零件,对水或湿气无特殊的防护)。灯罩采用注塑工艺,外表面与罩板齐平,美观大方。罩板与灯体用旋轴式挂钩安装在一起,旋轴处加工留有间隙,使旋转时不会出现卡滞,旋轴处尺寸设计合理,使旋转角度最大化。反光板与灯体之间的折页材质为不锈钢,可在反光板自然旋下后承受较大重量,使之不会松动脱落。维护时,先打开罩板与灯体之间的安装钉,将罩板自然旋下(图 2-2)并勾住灯体。若需维护 LED 驱动器,可以将灯体与反光板间的安装钉拆卸掉,反光板自然旋下(图 2-3),即可维护背部线束和相关器件。该旋轴式 LED 照明系统立体结构如图 2-4 所示。

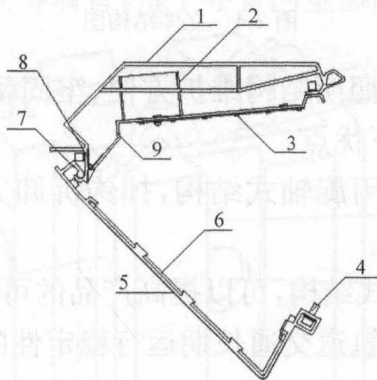


图 2-2 罩板旋下结构示意图

- (1. 灯体 2. LED 驱动器 3. LED 光源板 4. 安装钉 5. 罩板
6. 灯罩 7. 旋轴式挂钩 8. 折页 9. 反光板)

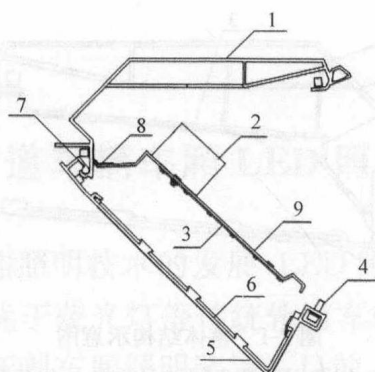


图 2-3 反光板旋下结构示意图

(1. 灯体 2. LED 驱动器 3. LED 光源板 4. 安装钉 5. 罩板
6. 灯罩 7. 旋轴式挂钩 8. 折页 9. 反光板)

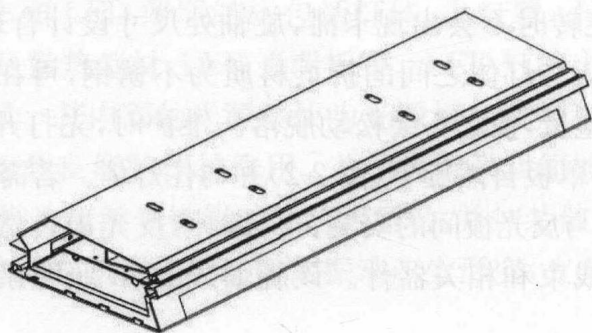


图 2-4 立体结构图

新型旋轴式 LED 照明结构维护方便、牢固耐用、稳定性好、使用寿命长。该结构具有以下优点。

① 灯体与罩板采用旋轴式结构，挂钩拆卸方便，维护时可自然悬挂，不需操作人员手扶。

② 采用新型旋轴式结构，可以提高产品的可操作性和可维护性，整体结构牢固可靠，满足轨道交通长期运行稳定性的需要。

2.2 轨道车辆车厢 LED 照明散热装置结构设计

散热问题是轨道车辆车厢 LED 照明的一个关键问题。LED 受温