

室内 LED 照明控制策略与技术研究进展

敬舒奇¹ 魏 东¹ 王 旭² 李宝华²

(1. 北京建筑大学 电信学院 北京 100044; 2. 中国建筑设计研究院有限公司 北京 100044)

[摘 要] 对当前室内 LED 照明控制策略研究进展和技术发展进行了综述。分别针对 LED 调光、调亮度、调色温和调色,总结了目前 LED 调节方法的发展现状;并从 LED 驱动控制方法和驱动器研究开发两方面,对驱动控制的技术发展进行了阐述;此外,从提高控制精度和改善节能效果等方面,介绍了 LED 智能控制策略的研究进展;针对数据转换、通信冲突等问题,分析了目前照明控制通信协议改进方面的最新成果;最后,对 LED 照明控制发展趋势进行了总结和分析,并指出了未来室内照明控制系统的发展方向。

[关键词] 室内照明; LED 照明调节; LED 驱动控制; 照明智能控制; 照明通信协议

[中图分类号] TU119 **[文献标识码]** A

Research Progress of Indoor LED Lighting Control Strategies and Technologies

JING Shuqi¹, WEI Dong¹, WANG Xu², LI Baohua²

(1. Beijing university of civil engineering and architecture college of Electrical and Information Engineering, Beijing 100044;

2. China architecture design & research group Beijing 100044, China)

Abstract: In this paper, the current research progress and the technology development of indoor LED lighting control strategies were reviewed, and the development status of LED adjustment methods was summarized respectively for LED dimming, brightness adjustment, color temperature adjustment and color adjustment. The technical development of drive control was expounded from two aspects: LED drive control method and driver research and development. In addition, the research progress of LED intelligent control strategy was introduced from the aspects of improving control accuracy and energy conservation effect, and the latest achievements in the improvement of lighting control communication protocol were analyzed for data conversion, communication conflict and other issues. Finally, the development trend of LED lighting control was summarized and analyzed, and the future development direction of indoor lighting control system was pointed out.

Keywords: indoor lighting, LED lighting regulation, LED drive control, lighting intelligent control, lighting communication protocol

0 引言

智能照明系统主要由三部分组成,分别是照明灯具、传感器和照明控制系统。随着技术的进步和发展,LED 照明将会逐步取代传统的照明光源。与传统光源相比,LED 可控性强、响应速度快,为调光带来了可行性,在此基础上结合有线或无线控制装置,可形成照明控制系统。目前的室内智能照明系

统的组成方式还主要以总线式为主,使用的协议传输速度较慢,照明控制器也缺乏大范围实时性调节的能力,主要适用于室内静态照明控制。针对照明系统的以上主要问题,相关学者针对照明系统的改进进行了多方位的研究。本文主要对 LED 智能照明控制领域的最新研究进展进行总结和分析,包括调节方法、开关驱动控制、智能控制策略和通信协议的改进等,以期能够对相关领域的研究和开发人员提供一定的指导。

1 室内 LED 照明调节方法

目前,照明控制策略已从传统的单灯控制、群组控制,以及手动调色温、调光控制逐步发展为智能控

[收稿日期] 2019-10-10 [修回日期] 2020-01-06

[基金项目] 国家重点研发计划资助(2018YFC0705100)

[作者简介] 敬舒奇(1995-)男,在读硕士研究生

[通讯作者] 魏 东(1968-)女,博士,教授

[联系方式] jsq950118@qq.com; weidong@bucea.edu.cn

[编辑部收稿邮箱] bjb365@126.com

制,对灯的控制也更加多样化,比如用户可以自行设定不同的场景,并且可以根据需求对场景进行调节;此外还可以根据时间、天气等对灯具的色温、调光进行自动控制等。部分学者在相关研究中加入了神经网络、模糊控制等算法,以实现调光范围、灯具照度等的智能化调节。

1.1 调光

在调光控制方面,相关学者主要对调光精度、范围和效率等进行研究,以确保控制的准确性和快速性。

郑清良等对模拟和脉冲宽度调制(PWM)调光进行了组合,对电力电子开关变换器和调光策略进行研究,采用反激电路作为主电路,UC3842作为控制芯片搭建了实验板,设计了LED驱动电源与组合调光电路,实验证明所设计的电路调光效率在86%以上,纹波在4%以下^[1]。

宁效龙等提出了1种基于CIE色度图和PWM技术的LED照明系统控制方法,依据LED灯具的自身属性(峰值波长与半高宽等)对人眼可视光谱进行分组,再用分别调控的方法,减小了系统的复杂度。该方法不仅调控效率高,同时能够使照明系统的光谱、颜色及色温调节到所需要的目标值上,满足不同条件下的照明要求^[2]。

吕天刚等研究现有LED灯丝灯调光技术,对比分析不同调光技术优劣势。结合LED易与数字电路兼容的特性,对LED灯珠进行混光调色控制,从改进驱动硬件、设计混光软件等方面对现有LED灯丝灯调光技术进行改进,使之在保留原有优势的基础上,实现光通量调节和混色,并可实现色温、色调调节^[3]。

Tahan M等提出了1种可实现多组串联的LED驱动器,通过同步积分控制和变量调光频率相结合的方法,提高了驱动器的工作效率,并设计了独立的母线电压调节方案,以最大限度地减少功率损耗并改善效率和电流平衡精度;而且可变调光频率允许在很宽的范围内独立进行调光控制,所提出的调光方案能够将最小对比度降低到4%。实验和仿真分析结果表明,该驱动器能够实现低于1%的电流平衡误差,以及4%到100%之间的调光范围^[4]。

Liu P J等设计了1种由可调光电流平衡电路,以及具有漏极电压平衡功能的升压转换器组成的LED驱动器,并提出了相移PWM控制方案。对于

不同的LED电流,CBC的效率可以几乎保持不变且均超过95%。实验证明,所设计的电路是多路可串行的LED调光驱动器,且线路简单,易于实现^[5]。

Li S等提出了1种单电感多输出(single inductor multiple-output, SIMO) LED驱动器,能够实现字符串级和系统级调光;利用即时占空比恢复技术和多路输出可组合的低频和分时技术,可实现精确和全范围调光。所实现的SIMO LED调光系统可以克服现有SIMO驱动器输出电压不稳定的限制,具有更大的调光范围和更高的精度,调光精度可达0.8%,并且可以实现全范围调光^[6]。

目前,对于调光技术的研究主要集中在通过对驱动器及其相关电路进行改进,使调光设备具有更高的效率和更广的调光范围,部分研究成果聚焦于对灯丝和系统进行改进,从而在一定程度上简化了电路复杂性,提高了颜色调节的精度。但是,目前大多数研究成果是在硬件层面对调光系统进行性能提升,并没有充分考虑照度传感器、人员传感器的信息融合问题。所以,目前的调光系统还不能进行根据人员行为、天气等因素进行实时调光,未达到对现代照明系统个性化、精细化的要求。

未来照明调光的发展趋势是基于多传感器信息融合,实现精细化调光控制,通过布置在室内外的各种传感器和智能控制算法,对室外照度和室内人员进行实时的数据采集和分析,在此基础上对灯具进行调节。

1.2 调亮度和调色温

LED亮度和色温调整方面的成果主要集中于通过智能控制算法,结合时间、天气、人员行为模式等因素,使光照达到使人眼舒适的状态。

汤烨设计的1种基于改进具有噪声的基于密度的空间聚类方法(Density-Based Spatial Clustering of Application with Noise, DBSCAN)算法的智能照明控制系统。控制器利用传感器采集的室内人员位置信息和数据进行聚类分析,求出达到指定照度条件下需要开启的灯具位置及数量。系统通过减小照明区域面积的方式,在保证照明质量的前提下,减少了62.5%的灯具使用^[7]。

王伟基于自适应反步控制算法设计了一套智能照明系统,在反步控制方法的基础上针对含有未知参数的系统引入了自适应控制。所提出的方案不仅能够提升反步控制方法的性能,也可扩大反步控制

的应用范围。作者搭建了一个智能照明实验平台,将自适应反步算法运用到该平台,同时和PID算法进行了比较,证明了自适应反步算法能够更好地跟踪给定的参考输出^[8]。

Osorio R 等将模糊控制算法应用到照明控制系统中,模糊控制器由输入部分、处理部分和输出部分组成。输入部分主要是指光照传感器等输入装置;处理部分则通过调用合适的规则库和数据库输出相应的结果,然后将这些结果进行组合;输出部分将组合后的结果进行解模糊化,用于调节窗户的旋转角度,从而得到人工光源照度与自然采光照度的合理比例^[9]。

Malik R 等提出了1种采用双组分色彩混合的相关色温(Correlated Color Temperature, CCT)和LED灯照度的宽范围控制方案,使用格拉斯曼混色定律和McCamy的CCT公式实现了1种简单的控制算法,该算法使来自白色LED光源的光与来自蓝色LED或红色LED的光混合,以分别获得高于或低于白色CCT的值。该算法通过硬件实现进行实验验证,结果表明,虽然系统是开环系统,但设定点CCT控制和照度调节性能要优于传统控制方案^[10]。

Wong C S 等设计开发了完全电容控制的LCC谐振转换器,利用开关控制电容器(switch-controlled capacitor, SCC)替代传统LLC转换器谐振回路中的固定电容器,可以很容易地实现对该LED组的公共AC总线电压、电流平衡和单独电流控制的调节;单个LED驱动器通过调节在恒定开关频率下的SCC有效电容来使其工作。这种方式可以降低电路复杂性,同时可以改善电路性能。作者根据该原理设计并构建了用于室内农业应用的LED生长灯,该生长灯由LCC谐振网络开关电容控制,可用于独立控制多色-多串LED照明系统^[11]。

目前相关领域的研究成果已经能够通过模糊逻辑、神经网络预测等方法,初步实现根据室外环境和人员行为模式对亮度和色温进行调节,未来还需要引入大数据分析手段,通过云端进行数据采集和计算,分析不同场景下使用者的行为习惯,从而实现更加精确的预测调节。

1.3 调色

近年来,相关学者为了提高调色的范围和调色的准确性,对LED调色控制进行了建模和算法研究。

田会娟等提出了1种基于PWM的R/G/B/WW4LED调光、调色计算模型,通过该模型能对灯具进行亮度和色温控制。该模型根据二通道和三通道PWM的特点,采用黑体轨迹的Chebyshev方法^[12]确定合成光的色坐标和相关色温(CCT)关系。实验结果表明,R/G/B/WWLED模块可实现相关色温在2 900~7 600 K范围的白光调节。当光通量设定为300 lm时,相关色温的最大相对误差为0.99%,混合光一般显色指数(General color Rendering Index, CRI)最大相对误差为0.11%;当光通量值在[150, 800]范围内变化时,其最大相对误差为2.02%^[13]。

李楠等提出一种基于时间混色方式的照明光源系统控制算法,使两路PWM控制信号相位始终保持交错的关系,不允许驱动信号存在重叠;并且通过数学推导证明了使用光度系数、色度系数两个参量描述冷暖双色温白光PWM调光调色系统的可行性,从而可以实现混色光源色温与亮度的独立调制。实验结果表明,该算法在降低控制器运算量的同时,提高了调光调色的控制精度,并消除了电源瞬态过载现象,提高了照明系统的可靠性^[14]。

谷盈研究设计了1款基于PWM调光调色的LED驱动器,对RGBW混合光技术做了相关研究,并对LED灯的显色性能进行了优化设计。其中LED调光电路以CC2530为核心微处理器,通过MATLAB软件中Fmincon函数求解方程

$$f(D_r, D_g, D_b, D_w) = Ra \quad (1)$$

式中: D_r 为红光占空比; D_g 为绿光占空比; D_b 为蓝光占空比; D_w 为白光占空比; Ra 为平均显色指数的最大值及对应的占空比,并通过LED控制电路实现了自适应控制,使得LED灯的显色性能达到最高;且通过PWM调波方式实现了0~100%的调光范围,并可实现宽色域调节^[15]。

Shrestha R 等利用LED作为主动照明光源,通过计算机对LED发光面板和Canon 20D彩色数码相机进行实时同步控制,组成多光谱成像系统,其中LED面板由3组LED组成,这3组LED尽可能提供均匀照明。该系统把可见光谱区的相机光谱灵敏度分成2~3个区域,利用3组LED的不同组合分别覆盖以上波段的光谱灵敏度区域,作为主动照明光源照亮景物,通过2~3次拍照获取多光谱图像。实验结果表明,采用3组9个LED搭建的多光谱成

像系统的光谱重建精度可达到 2.18 CIELAB 色差单位^[16-17]。

Zhan X 等提出了 1 种用于多色 LED 系统的新型色彩控制方法,该方法可以通过近似黑体的光谱功率分布(spectral power distribution, SPD)来实现高显色指数。LED 系统的 SPD 控制通过组合传感模块和控制模块来实现。传感模块对多个颜色传感器数据进行线性组合,并将其输出映射到 LED 通道。控制模块在反馈回路中利用这些数据来控制每个通道的光功率。实验结果验证了所提出的控制方法对环境温度的有效性和鲁棒性,该方法可以实现近似相同的颜色,显色指数达到 92.6^[18]。

对于灯具颜色的调节,目前的研究成果多集中于硬件设备和硬件控制算法的改进,旨在使颜色表达更加精确、调节范围更加广泛。未来色温调节相关技术发展的趋势是将灯具颜色调节与其他领域相结合,如在医学研究上,可通过改变灯具的颜色和色温,减缓人类视觉疲劳从而实现健康照明,或者通过调节房间颜色促进患者心理康复。

就 LED 智能照明控制系统的应用而言,调光应用与智能控制是未来的发展热点。这里的调光不仅仅指调节照度,还包括颜色、色温甚至光谱。由于 LED 的高度灵活性,结合智能控制系统的光谱组装技术可被广泛应用于农业照明、标准及计量、机器视觉、医疗和生理学及通用照明领域^[19-23]。

2 LED 开关驱动控制

在 LED 开关驱动控制方面,研究工作主要集中在电源功率和稳定性上,围绕提升功率因数和效率展开。

2.1 驱动控制方法

驱动控制方法的研究主要集中在对驱动器各个组成部分的硬件设计与性能改进方面。

赵春胜等针对单级功率因数校正和恒流控制的 LED 驱动芯片,提出了 1 种控制其内部功率 MOS 管开关频率和占空比的电路,可以实现 PWM 模式和混合调制模式的切换,省去了误差放大器。实验结果表明,该控制电路可获得较高的功率因数($PF > 0.9$),恒流输出误差 $< 5\%$ ^[24]。

刘琳等提出 1 种高压动态测量下的数字式 LED 开关电源设计方法,利用二阶格型陷波器组建数字式 LED 驱动的供电信号解析模型,从而得出开关电

源的最佳发射功率。在此基础上,作者根据电源的动态载波值,拟合失真补偿方程,提取开关电源的特征参量,融合 LLC 原理设计出 LED 开关电源的主要磁芯元件,完成了高压动态测量下的数字式 LED 开关电源的设计。仿真实验证明,该方法的电流峰值增益比反激式提高了 10%,输出电流有效值提高了 65%,并且降低了 50% 左右的能耗,可以延长 LED 开关电源的使用寿命^[25]。

曹世杰基于中功率民用照明 LED 驱动电源各项指标要求,设计了 1 款 30 W LED 驱动电源,根据电源的性能指标要求,研究了 LED 驱动电源的效率和新型拓扑与控制技术。作者在软件 Saber 的 Sketck 环境下搭建电路并完成仿真,通过波形的计算和分析验证了系统的可行性。实验结果表明,所设计的电路功率因数 $PF > 0.9$,效率 $\eta > 0.9$,纹波率 $r < 2\%$ ^[26]。

Liu X 等提出了 1 种具有高功率因数和无源电流平衡的谐振单级单开关四输出 LED 驱动器,这种驱动器的特点是可以控制 1 个输出支路的电流,即可实现对无源电流平衡控制四输出 LED 驱动器的其他输出电流的控制,使其控制简单,易于实现。当磁化电感器电流以临界导通模式工作时,能够达到单位功率因数;而且所提出的 LED 驱动器仅使用 1 个有源开关和 1 个磁性元件实现,具有成本低、体积小和重量轻的优点;此外,其单级功率转换和软开关特性提高了系统的工作效率。作者通过 2 个 110 W 四输出隔离 LED 驱动器实验,验证了该驱动器的性能^[27]。

Lee S W 等提出了 1 种升压集成双开关正激 AC-DC LED 控制驱动器,具有高功率因数和能够提供无纹波输出电感电流的特点。该驱动器采用双开关正向结构,能防止磁化电感器饱和。此外,输出电容器可以利用相对小的电容,通过附加电路使电感器电流纹波显著减小,从而降低了输出级 LC 滤波器的复杂性^[28]。

Pinto R A 等提出了 1 种均衡多阵列 LED 发光二极管电流控制技术。电流控制由可变电感器执行,可以使 LED 各支路的电流相互独立,实现了电感与直流控制电流的近似线性响应。该技术允许整个转换器中仅使用一个受控开关,可以解决传统线性稳压器高成本的问题^[29]。

随着通讯技术在照明系统中的大范围应用和驱

动器件本身向着高效化、小部件化、集成化发展,驱动模块和通信模块融合将成为未来的发展趋势。此外,芯片的高集成化也是未来的发展方向,高集成度的芯片将会带来更小的电源体积,用于驱动的智能算法也将集成在芯片中,如何开发集成在高性能芯片上的、和通讯模块进行集成控制的控制方法将是未来的研究方向之一。

2.2 驱动器研究开发

LED 具有长寿命、高光效、可控性强等特点,所以对驱动电源提出了有别传统开关电源的若干新要求^[30]。在开关驱动器方面,目前的研究热点主要集中在对效率、功率因数的提高和结构简化上^[31]。

2.2.1 交流 LED 驱动器

为降低开关电路的复杂性,降低成本,提高系统的可靠性,用 AC 电源直接驱动 LED 也是目前的研究热点,部分文献对 AC 电驱动下的 LED 特性进行了研究^[32]。

分段式 LED 控制是 1 种较为新颖和有效的技术,可以改善 AC LED 应用中出现的 LED 导通时间较短、谐波含量高、功率因数较低等问题,目前市场上也已出现相关成熟的驱动产品^[33]。

游方研究了无电解电容的两级 AC LED 驱动器,对驱动器中的 BuckPFC、半桥 LCC 谐振电路的参数及控制电路设计进行了详细分析,仿真实验验证了该 AC LED 驱动器能够实现输入功率因数校正,其输出电压、电流频率为 100 Hz,解决了 50 Hz 情况下 LED 频闪问题^[34]。

章勇高等设计了 1 种 PFC + Buck/Boost 的无电解电容 LED 驱动电源方案。PFC 采用常用的 Boost 型电路结构,控制方法采用临界导通 (Critical Conduction Mode, CRM) 控制方式, Buck-Boost 双向变换器与 LED 负载并联,解决了电源交流输入侧和直流输出侧的瞬时功率不平衡问题,并建立了 saber 仿真电路模型。实验证明该驱动电路的功率因数能够达到 0.9 以上^[35]。

杨斌等提出了 1 种基于 CLL 谐振的多路输出 LED 驱动方案。驱动电路前级采用临界模式下的 Boost 拓扑实现功率因数校正功能,后级采用 CLL 谐振拓扑实现 LED 负载恒流。该电路能够实现开关管的开关零电压开通和整流二极管的零电流关断,提高了整机效率。各 LED 串之间能够实现精确均流,达到较高的功率因数。实验证明在正常工作区

间,该驱动器的效率在 90% 以上^[36]。

Hwu K I 等提出了 1 种基于 FPGA 的分段式 AC LED 控制方法,通过检测 AC 电源端的线电压,控制 LED 负载中导通的 LED 个数,扩大导通角,使其能够模拟电阻负载特性,从而达到降低谐波、提高功率因数的目的,并且能够更好地兼容可控硅调光^[37]。

2.2.2 直流 LED 驱动器

罗全明等提出了 1 种直流电流母线型多路恒流输出 LED 驱动电源,该驱动电源包括 1 个源变换器及多个负载变换器。作者根据两种基本电流源型变换器推演出驱动电源主电路拓扑结构,然后推导出其交流小信号模型,并采用 III 型补偿网络进行电流控制器设计与开发。实验证明在不同负载的情况下,电路整体效率接近 90%^[38]。

苏艺俊等设计了 1 种新型的分段线性恒流 LED 驱动电源,该驱动电源利用整流之后的高压脉动直流电压的变化,采用自适应控制方法实现了 LED 灯珠分阶段恒流工作。除整流桥和采样电阻外,整个驱动电路可实现单芯片集成,有效缩小了电路的体积。实验证明在恒流阶段,电流的瞬态精度误差为 0.031%,满足设计要求^[39]。

吴娜等设计开发 1 种基于原边反馈反激变换器的数字恒流源作为驱动电路。该驱动电路采用数字软启动的方式,以消除电路浪涌电流,避免了输出电压过冲,使得系统在整个恒流范围内的平均效率高达 80.49%。仿真结果表明,该 LED 驱动电路可根据用户需求,通过调整电路参数,在提高输出电流稳定性的基础上实现 400 ~ 1 000 mA 的恒流输出,输出电流纹波仅为 0.28%^[40]。

2.2.3 其他驱动器

张兵设计了 1 种基于射频通信方式的智能照明系统,系统中的 LED 模块能够根据光照强度的变化启动不同占空比的 PWM 调光功能,实现灯具照度的实时调节。系统采用基于 PFC 控制芯片 L6561 的 LED 驱动电源,并加入了 EMI 滤波功能,以削弱 LED 电源工作时的差模和共模干扰。样机测试结果表明,LED 驱动电源的输出电压能够保持相对稳定,电源效率最高可达 86.8%,功率因数最高可达 97.6%^[41]。

Mazaheri B 开发了 1 种新型基于自激振荡软开关变换器的 LED 驱动器,该驱动器不需要进行额外的输出电流反馈即可实现驱动功能。驱动器自激振

荡部分采用了3个低功耗晶体管,以维持软开关状态,同时利用少量附加原件产生自激振荡,使得电路鲁棒性强,且具有成本低、效率高的特点,实验表明在外加电源达到21 V以上时,效率大于90%^[42]。

Yan-Cun Li等提出了1种单级交直流LED驱动电路,该电路将降压-升压功率因数(PF)校正器与反激式转换器集成在一起,同时建立回收路径以恢复感应泄漏能量。该驱动电路可以提高PF和转换效率,降低总谐波失真和开关电压尖峰值。作者采用8 W LED灯驱动器进行实验验证,获得了高于0.95 PF和90%的效率^[43]。

对驱动器的研究目前主要以LED驱动器硬件改进为主,改进目的在于提高驱动器效率,减少线路复杂程度和提高稳定性。随着智能照明系统的逐步发展,对LED驱动器的要求也在逐渐提高,未来LED驱动器的相关研究应该通过选择更优的拓扑结构、进一步优化设计大容量电容和满足实时性要求的电路等手段,使驱动器能满足实时调节、高功率、高可靠性等要求。

3 室内照明智能控制策略

近年来,多位学者考虑采光、时间等因素,基于神经网络、模糊逻辑等开展智能控制方法研究。

3.1 室内照明和自然光相结合控制

近年来,多位学者针对室内照明与自然光结合的控制方法进行了研究,通过建立照明系统的模型,配合智能控制算法,实现既满足用眼舒适要求且节能的目的。

自然光是人类感觉舒适的光源。为了充分利用自然资源,实现节能,在避免直射造成人员眩晕的前提下,魏青设计了1套百叶窗模糊控制器,通过调节百叶窗开度,以最大限度地利用自然光实现照明需求。百叶窗开度与太阳高度角、天空光模式等因素有关,控制器采用模糊控制方法解决了天空模式很难用精确量描述的问题。仿真结果验证了该模糊控制器的有效性^[44]。

苏宝珠采用以自然光和人工照明相结合的“昼光补偿控制”方式,通过研究天空照明模型和人工照明特性建立了室内照度模型。在此基础上,利用DIALux和Lingo软件确定室内最佳的单点传感器位置;再天空照明模型和人工照明进行匹配,利用最小二乘法对相关的数据进行分析处理,确定相应的

光通传递函数矩阵系数;利用神经网络的方法训练得出室内控制信号与室内桌面照度间的关系;随后将神经网络的实际输出与理想输出的匹配度作为适应度函数,然后利用遗传算法得出最优的灯具控制信号,从而使桌面照度能够最接近于标准值^[45]。

冯冬青等将粒子群算法应用到室内智能照明系统中,建立了照度模型,并利用神经网络基于改进粒子群算法对照度模型进行训练,以实现对室内人工光源亮度的调节。改进粒子群算法能够较快地搜索出最佳灯具亮度组合模式,使灯具能耗减小。该成果不仅可以保证人员的照明需求,同时也能够合理应用室外自然光照,从而降低了照明系统的能耗^[46]。

孙飞龙开发了1套DALI(数字照明可寻址接口,Digital Addressing Lighting Interface,DALI)调光系统,基于BP神经网络模型,实现了根据室外自然光强度,自动控制照明灯具输出强度及遮阳设备百叶窗遮光角度的功能,并且能够使输出调光等级最大误差低于0.38%,百叶窗的开合角度误差低于0.16%^[47]。

王猛基于DALI协议设计了充分利用天然采光的办公照明节能控制系统,采用基于分层多规则集结构的模糊控制器进行天然采光控制。在保证照明质量的前提下,作者分别在供暖、日常、制冷3种不同工况下,设计了相应的天然采光和室内照明相结合的控制策略,并通过MATLAB仿真验证了该方法的可行性^[48]。

春江锋将天然采光和人工照明相结合,建立了舒适性评价指标量化模型,研究了相应的照明控制算法,建立了双模糊控制器,主模糊控制器以外界太阳高度角、天空光模式作为输入量进行开度角控制,实现快速响应;从模糊控制器以开度角和照度偏差值为输入进行角度微调校正,以提高控制精度;作者在MATLAB和DIALux环境下,基于不同天空光模式和太阳高度角,对补光前后光环境的舒适度,以及仅采用人工照明和结合天然采光的节能效果进行了对比,证明所提出的控制方法能够取得良好的照明效果,且与传统方法相比节能效果达到47%^[49]。

张峰针对目前高校教室普遍存在的“长明灯”问题,设计开发了以STM32为核心芯片,基于ZigBee无线网络技术的高校教室智慧照明系统,在调光系统中加入了模糊自适应PID算法,将室内光

照强度与预设光照强度的偏差 e 和偏差变化率 ec 作为输入,输出为 PID 参数 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d ,将偏差 e 和偏差变化率 ec 经过模糊推理和模糊运算后送至模糊控制器。利用实验和经验得出的模糊规则对 PID 参数进行在线整定,以满足不同情况下 e 和 ec 对控制参数的要求,并能够充分利用自然光采光^[50]。

目前,室内照明和自然光结合的研究成果大多处于仿真阶段,相关技术还未满足成熟应用的条件。未来的研究需要对自然光照度进行大量的预测和仿真,绘制精确的自然光照度模型,以便更加精确地对室内设备进行控制和调节;此外,自然光的影响因素需要结合房间区域类型和光照产生的热效应进行研究,通过研究不同房间区域类型的照明舒适性评价标准和自然光与光照热效应之间的关系,为室内照明和自然光结合控制提供进一步的参考。

3.2 基于用户行为的控制

目前照明控制领域正朝着满足用户个性需求的方向发展,因此基于用户行为的照明控制方式研究正日益成为研究热点。

孙文响提出了基于用户行为模式的光环境智能控制系统,开发了相应的网络平台,并利用神经网络和加权理论对多传感信息进行处理,以实现用户行为识别和光学传感器数据的融合,利用模糊控制理论实现了照明光环境的有效控制。该系统充分利用了 WSN(Wireless Sensor and Actor Network,无线传感器执行网络,WSN)和移动终端配置方便的优势,易于实现办公照明光环境的灵活配置,具有适应性强并且便于优化的特点^[51]。

卫邦强研究并设计了1款智慧学习灯。作者分析了健康照明和照明人体工效学原理,依据不同人的年龄、褪黑素、个体特征等因素和所处自然环境,建立了智慧学习灯的双向学习模型。该模型通过对人体生理参数和自然光环境参数进行分析处理,由学习灯自动完成光线相对光谱功率分布和光通量的调节。实验分析表明,学习灯在不同时段的昼夜刺激评价、节律影响因子评价和 B/P 评价方面符合生理指标,能够为用户提供健康光环境^[52]。

Kumar A 实现了1种基于 ZigBee 的智能 LED 照明系统,并通过 WSN 收集使用者对楼内灯具的个性化使用情况,并通过神经网络学习实现使用者偏好的自动预测,在此基础上进行控制,获得了更好

的视觉舒适度,并使能耗降低 60% ~ 70%,提高了现有建筑物的能源利用率^[53]。

目前该领域相关研究成果主要基于传感器对用户行为进行数据采集,通过采集到的数据对用户行为进行建模,从而实现照明系统的预测控制。未来的行为模式控制将更加基于用户视觉评价实验,通过采集某一区域内的用户视觉数据和照明数据,建立用户视觉数据模型,采用优化控制的算法对系统进行整体调控。

3.3 基于智能算法的控制

智能算法作为照明控制系统的核心部分,目前的研究热点集中于使系统具有更高的调节精度,并实现更好的节能效果。

吕东岳提出了1种无中心的照明网络方案,设计了芯片和各个模块的硬件,采用模糊 PID 作为单灯控制器恒照度调光算法,中央处理器将传感器采集到的信息进行处理并进行模糊 PID 运算后驱动 LED 灯,从而实现室内恒照度调光控制。所提出的控制方案不需要中央上位机,智能节点能够协同工作,具有自我配置、自我识别、抗损坏、易改造、易扩展等功能^[54]。

Chew I 等设计了1种可调谐的智能照明系统,该系统具有8个 LED 通道,并提出了一种新的闭环控制算法,该算法可以计算目标光谱的峰值和波长,从而将输出光谱调整为目标光谱。作者利用无线网络进行了实验研究,结果表明所开发的照明控制系统输出光谱可以近乎复制目标光谱,相关色温精度小于 5%^[55]。

Viani F 提出了1种基于进化算法的自适应控制的智能照明系统,通过 ZigBee 组网,实现了传感器的实时探测和数据传输;并通过粒子群算法进行学习控制,分析使用者的行为方式、所在位置,对照明系统进行调整,实时控制灯光的强度。该系统使用 WIFI 和 ZigBee 无线技术实现,成本较低,并获得了高达 37% 的节能效果^[56]。

Sun B 等研究了1种 LED 系统的预测模型,通过分析 LED 长期运行的条件,利用贝叶斯网络、粒子群滤波等方法,构建了高功率白色 LED 预测模型。该模型可以通过评估偏离预期正常运行条件的程度,来预测其可靠性和剩余的使用寿命,以降低 LED 灯具开发、保养和维修的成本^[57]。

随着智能照明系统在不同种类楼宇中的广泛使

用,导致智能照明系统的应用场合越来越多,不同使用者个体化差异也越来越大,传统的控制方式已经难以满足现在对系统控制更加精确、更加稳定的需求。未来新型的照明控制系统应该具有大数据采集、大数据分析和预测的功能,通过布置在楼宇内的各种传感器采集相关数据信息,并接入云平台进行大数据分析和建模,分析使用者的使用习惯和行为方式,从而对使用者的行为方式进行预测,达到对系统更加精细的调节和控制。

随着网络技术的进一步发展,未来照明系统可以接入楼宇自动控制系统,与能源监控、智能家居等进行信息交互,从而在更高层面上满足人的用眼舒适性和实时性要求,并减少能源消耗。

4 照明控制通信协议改进

在通信协议改进方面,多位学者针对不同协议之间的数据转换、通信冲突等问题开展研究。

吴安在 DALI 通信机制的研究基础上,分析了多种冲突机制的解决方案,提出通过指令检测、指令优先级设置及总线监听、竞争延时退避等方法,解决 DALI 系统中存在多个主控设备同时争用总线造成的通信冲突问题,通过对 DALI 协议栈和优先级的设计避免了通信碰撞^[58]。

孙淑燕设计了基于 CC2530F256 芯片的 ZLL-DALI 网关硬件,与传统网关采用的双芯片硬件构架相比,该单芯片解决方案更有助于节约成本和减小网关体积。在此基础上,作者构建了 ZLL-DALI 照明控制系统,并从 ZLL 入网、数据传输两方面对网关功能和性能进行了验证测试和优化。测试结果表明,经过优化后的 ZLL-DALI 网关能够实现 ZLL 系统和 DALI 系统之间的数据转换,并且具有一定的抗 Wi-Fi 干扰能力^[59]。

Kaminska A 设计了 1 种用于家庭自动化和智能电网控制的多功能 KNX-RF 模块,用于在多协议条件下,解决不同协议之间相互干扰的问题。作者通过 MATLAB / Simulink 进行了仿真实验,基于信噪比计算误码率,验证该模块能够降低不同无线协议网关之间相互干扰问题^[60]。

Oudji S 等为了解决不同无线通信协议互相干扰的问题,开发了 1 种由 NX-RF 模块、报警模块和控制单元组成的抗干扰工具。作者利用 MATLAB / Simulink 进行了仿真实验,根据信噪比计算误码率,

以推导出不同干扰情况下的无线电覆盖范围,在此基础上对所开发工具进行了优化,使之能够与常用 KNX-RF 设备的特定收发器特性相匹配。此外,该工具还可以用于模拟其他类型的收发器^[61]。

王伟光设计了 1 款基于 KNX 的智能网关,该网关连接 KNX 智能家居网络与以太网、无线网等网络,实现 TCP/IP 协议与 KNX 协议的相互转换,达到了智能家居网络化、智能化控制的目的;同时该网关还具有管理 KNX 智能家居网络设备、存储设备信息、提供外部网络访问、查询、控制等功能^[62]。

贾小芙设计了 1 款 KNX-BACnet/IP 协议转换网关,用以实现 BACnet 控制网络对底层 KNX 设备的数据集成和控制,主要设计并实现了网关的软件系统,包括固件程序和系统配置软件两部分^[63]。

目前,通信协议的改进主要通过网关实现,研究目标是解决两个或几个协议之间不兼容的问题,并不能从根本上解决目前照明通信协议众多且各自为政的难题,未来需要推出能够在应用层通过网关兼容底层的协议,从而真正达到解决协议冲突、不兼容的目标。

5 总 结

目前照明控制领域的研究热点主要围绕硬件和软件两个方面开展。在硬件方面,相关研究主要集中在相关模块,如驱动电路、电源模块等的性能改进和提升方面,以获得更宽的调光范围、更高的稳定性、更好的显色性,但是还缺乏和现代通讯技术、现代照明控制技术相结合的研究,未来应该把通讯模块、传感器模块和照明驱动电路进行集成,并且对电路和其器件进行进一步的设计,使其满足实时性、高功率等要求;在软件方面,相关研究主要集中于智能照明策略以及现有照明协议的改进(如抗干扰和多协议数据转换)等方面,在一定程度上能够实现智能照明控制,并在一定程度上解决了部分协议不兼容问题。

照明控制相关领域近年来虽然取得了大量的研究成果,但还有一些问题有待解决,主要包括:1) 各厂家制定的协议相互之间兼容性仍然较差;2) 照明系统投入使用后的大量数据并没有被储存和利用,造成资源浪费;3) 照明系统智能程度仍然不足,无法充分满足用户个性化要求。目前可以通过云计算和大数据分析等手段解决上述问题,通过云平台对

照明系统进行整体控制和调节,并制定基于云平台的照明通讯协议,在云平台上对底层的各个协议进行数据兼容,从而真正解决协议相互之间不兼容的问题;同时可通过大数据分析实现满足不同人员用眼健康、提高工作效率并且节能的控制目标。

总结目前国内外研究和技术发展现状,智能照明控制系统未来可以从以下几个方面进行发展:

1) 基于云的智能照明控制协议和标准

通过发展基于云的智能照明控制协议和标准,在应用层制定统一的照明标准化协议,对各个厂家的协议进行有效衔接,使不同厂家的灯具、控制器可以通过网关完成数据的交换,不必再单独敷设总线,利用网络线路,即可完成数据信息的交换任务。

2) 一体化灯具和5G物联网

随着LED照明技术和控制原件的发展,灯具将逐渐向着高集成化的方向发展,最终发展为融合照明功能、传感设备、控制设备、信号交换设备为一体的一体化LED灯具。一体化灯将具有自行探测外接环境,并通过通讯模块,通过物联网和云平台取得通讯,从而根据环境变化做出相应的调整。

3) 和其他系统的互联互通

随着网络技术的进步和发展,智慧城市将会是未来城市的发展方向,而各种云系统是智慧城市的重要组成部分。智能照明系统作为未来城市云平台系统的重要组成部分之一,将会和能源监控系统、智能家居系统等,共同构成智慧城市云平台系统。

近年来,随着神经网络控制、模糊控制、机器学习技术的不断进步,智能照明正在逐步向智慧照明的方向发展,未来的照明系统将会变得更加具有学习能力,也会更加智能化和人性化。随着我国芯片和人工智能技术的发展,相信在不久的将来,我国将会开发出标准化的智慧照明控制协议,从而占据照明和人工智能交叉领域的制高点。

[参考文献]

- [1] 郑清良,林维明.一种LED驱动电源组合调光策略与实现[J].电源学报,2013,7(4):71-75
- [2] 宁效龙,张昕昱,何子力,等.基于CIE色度图与PWM的LED照明系统的控制方法[J].照明工程学报,2019,30(01):64-68
- [3] 吕天刚,吕鹤男,王跃飞,等.LED灯丝灯调光控制技术[J].照明工程学报,2019,30(01):69-74
- [4] Tahan M, Hu T. Multiple String LED Driver with Flexible and High Performance PWM Dimming Control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(12): 9293-9306
- [5] Liu P J, Hsu Y C, Hsu S R. Drain-Voltage Balance and Phase-Shifted PWM Control Schemes for High-Efficiency Parallel-String Dimmable LED Drivers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6168-6176
- [6] Li S, Guo Y, Tan S C, et al. An Off-Line Single-Inductor Multiple-Outputs LED Driver with High Dimming Precision and Full Dimming Range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(6): 4716-4727
- [7] 汤烨.基于改进DBSCAN算法的智能照明控制系统[J].苏州科技大学学报(工程技术版),2017,4(4):70-75
- [8] 王伟.分布式智能照明系统及其控制算法的研究[D].成都:电子科技大学,2014
- [9] Osorio R, Alonso J M, Vazquez N, et al. Fuzzy Logic Control with Improved Algorithm for Integrated LED Drivers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 6994-7003
- [10] Malik R, Ray K K, Mazumdar S. Wide range, Open-loop, CCT and Illuminance Control of an LED Lamp using Two-component Colour Blending[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9803-9818
- [11] Wong C S, Loo K H, Iu H C, et al. Independent Control of Multicolour-Multistring LED Lighting Systems with Fully Switched-Capacitor-Controlled LCC Resonant Network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 4293-4305
- [12] Krystek M. An algorithm to calculate correlated color temperature[J]. Color Research and Application, 1985, 10(1): 38-40
- [13] 田会娟,柳建新,洪振,等.基于脉冲宽度调制的R/G/B/WW 4色发光二极管调光调色方法[J].光学学报,2018,38(4): 305-311
- [14] 李楠,潘永雄,苏成悦,等.基于时间混色方式的冷暖双色LED调光调色光源[J].广东工业大学学报,2016,4(1): 77-82
- [15] 谷盈.基于ZigBee智能照明LED调光调色的关键技术研究[D].合肥:安徽理工大学,2016
- [16] Shrestha R, Hardeberg J Y. How Are LED Illumination Based Multispectral Imaging Systems Influenced by Different Factors[C]//International Conference on Image and Signal Processing. Springer, Cham, 2014: 61-71
- [17] Shrestha R, Hardeberg J Y. Multispectral imaging using LED illumination and an RGB camera[C]//Proceedings of the 21st Color and Imaging Conference (CIC). 2013: 8-13
- [18] Zhan X, Wang W, Chung H. A Novel Color Control Method for Multi-Color LED Systems to Achieve High Color Rendering Indexes[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(10): 8246-8258
- [19] Grubisic M, Van Grunsven R H A, Manfrin A, et al. A transition to white LED increases ecological impacts of nocturnal illumination on aquatic primary producers in a lowland agricultural drainage ditch[J]. Environmental Pollution, 2018,

- 240: 630-638
- [20] 周益民,周国泉,徐一清. 基于单片机的温室植物LED补光系统设计[J]. 激光生物学报, 2013, 22(3): 214-219
- [21] Xiaojun W, Guangming G. LED light design method for high contrast and uniform illumination imaging in machine vision[J]. Applied Optics, 2018, 57(7): 1694-1704
- [22] Han L, Liu B, Chen X, et al. Activation of Wnt/ β -catenin signaling is involved in hair growth-promoting effect of 655-nm red light and LED in in vitro culture model [J]. Lasers in Medical Science, 2018, 33(3): 637-645
- [23] Morgan Pattison P, Hansen M, Tsao J Y. LED lighting efficacy: Status and directions [J]. Comptes Rendus Physique, 2018, 19(3): 134-145
- [24] 赵春胜,卢星,张国俊. 一种用于LED驱动开关控制电路设计[J]. 微电子学, 2015, 45(3): 303-306
- [25] 刘琳. 高压动态测量下数字式LED开关电源设计[J]. 现代电子技术, 2017, 4(07): 150-153
- [26] 曹世杰. 一种新型高效LED驱动电源的研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018
- [27] Liu X, Yang Q, Zhou Q, et al. Single-Stage Single-Switch Four-Output Resonant LED Driver With High Power Factor and Passive Current Balancing[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4566-4576
- [28] Lee S W, Do H L. Boost Integrated Two-Switch Forward AC-DC LED Driver with High Power Factor and Ripple-Free Output Inductor Current [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5789-5796
- [29] Pinto R A, Alonso J M, Marina S. Perdigão, et al. A new technique to equalize branch currents in multiarray LED lamps based on variable inductor[C] // Industry Applications Society Meeting. IEEE, 2016
- [30] Sinan Li, Siew-Chong Tan, Hui S. Y. R, et al. A review and classification of LED ballasts [C] // Energy Conversion Congress & Exposition. IEEE, 2013: 3102-3109
- [31] 江磊,刘木清. LED驱动及控制研究新进展[J]. 照明工程学报, 2014, 4(2): 1-9
- [32] 杨光. 交流电直接驱动白光LED的特性研究[C] // 海峡两岸第十九届照明科技与营销研讨会论文集. 2012: 120-127
- [33] 李云霞,云永利. LED照明AC电源驱动[C] // 海峡两岸第十九届照明科技与营销研讨会专题报告暨论文集. 2012
- [34] 游芳. 新型LED驱动电源与控制技术的研究[D]. 成都: 西华大学, 2016
- [35] 章勇高,史献冰,高海文. 一种具有功率耦合电路的无电解电容LED驱动电源[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 4(17): 58-64
- [36] 杨斌,陶雪慧,沈黎韬. 基于CLL谐振的大功率多路输出LED驱动器[J]. 电子技术应用, 2016, 42(012): 134-138
- [37] Hwu K I, Tu W C. Controllable and Dimmable AC LED Driver Based on FPGA to Achieve High PF and Low THD. Industrial Informatics, IEEE Transactions on, 2013, 9(3): 1330-1342
- [38] 罗全明,黄健,马坤,等. 一种直流电流母线型多路恒流输出LED驱动电源[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6202-6209
- [39] 苏艺俊,马奎,胡锐,等. 智能化分段线性恒流LED驱动电源设计[J]. 电子技术应用, 2017, 4(11): 44-48
- [40] 吴娜,冯全源,邱志雄. 一种宽恒流范围数字控制LED驱动电路[J]. 微电子学, 2018, 48(2): 203-206
- [41] 张兵. LED智能照明系统与驱动电源的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015
- [42] Mazaheri B, Arabi M, Adib E, et al. Introducing Self-Oscillating Technique for a Soft-Switched LED Driver[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6160-6167
- [43] Yan-Cun Li, Chen Chern-Li. A Novel Single-Stage High-Power-Factor AC-to-DC LED Driving Circuit With Leakage Inductance Energy Recycling. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2012, 59(2): 793-802
- [44] 魏青. 小区域控制在办公建筑电气节能中的性能分析[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013
- [45] 苏宝珠. 智能照明系统控制技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2012
- [46] 冯冬青,潘磊. 基于改进粒子群算法的智能照明控制策略研究[J]. 郑州大学学报, 2013, 34(3): 14-17
- [47] 孙龙飞. 基于DALI协议的智能照明系统的研究与设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013
- [48] 王猛. 基于天然采光的办公照明节能控制系统设计与研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015
- [49] 春江锋. 舒适性节能照明控制策略的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2018
- [50] 张峰. 基于STM32的高校教室智慧照明系统的设计与实现[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018
- [51] 孙文响. 基于用户行为的光环境智能控制系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016
- [52] 卫邦强. 智慧学习灯的功能设计[D]. 大连: 大连工业大学, 2017
- [53] Kumar A, Kar P, Warriar R, et al. Implementation of Smart LED Lighting and Efficient Data Management System for Buildings [J]. Energy Procedia, 2017, 143: 173-178
- [54] 吕东岳. 基于无中心网络的公共建筑智能照明控制系统[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018
- [55] Chew I, Kalavally V, Tan C P, et al. A Spectrally-Tunable Smart LED Lighting System with Closed-Loop Control [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(11): 4452-4459
- [56] Viani F, Polo A, Garofalo P, et al. Evolutionary Optimization Applied to Wireless Smart Lighting in Energy-Efficient Museums [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(5): 1213-1214
- [57] Sun B, Jiang X, Yung K C, et al. A Review of Prognostic Techniques for High-Power White LEDs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(8): 6338-6362
- [58] 吴安安. 基于DALI协议的照明系统关键技术研究及设备开发[D]. 西安: 陕西科技大学, 2016

- [59] 孙淑燕. ZLL-DALI 照明控制网关的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学 2013
- [60] Kaminska A, Ozadowicz, Andrzej. Lighting Control Including Daylight and Energy Efficiency Improvements Analysis [J]. Energies, 2018, 11(8): 2166
- [61] Oudji S, Courreges S, Paillard J N, et al. Radio interference challenges in a multiprotocol compact RF hardware platform for home and building automation applications [J]. International journal of communication systems, 2018, 31(8): e3535. 1–e3535. 15
- [62] 王光伟. 基于 KNX 总线的智能家居体验中心研究与设计[D]. 天津: 天津职业技术师范大学 2016
- [63] 贾小芙. KNX_BACnet_IP 协议转换网关软件系统的设计与实现[D]. 北京: 北京交通大学 2016

(上接第 111 页)

2) 在通风口总面积相等的前提下, 通风口形状的改变不仅导致进出风口的压力差不同, 而且影响了气流进入建筑室内的角度。采用竖向长条形洞口使进入室内的气流向下流动并在体育馆的主要功能空间上方形成风速较高的通流区。气流方向的改变成为提高体育馆自然通风有效性的关键因素。

3) 3 种工况下气流流场具有一定的相似性: 气流在运动过程中在建筑中轴线两侧形成风速较高的通流区, 在建筑两侧边缘形成回流区, 风速较低。采用竖向长条形洞口使通流区宽度大幅增加从而提升自然通风效果。

4) 由于本研究中通风窗水平分布相对集中, 3 种工况下建筑边缘的功能空间上方风速均较低, 不利于该区域污染物的散发, 为避免这种情况, 尽量增加通风口总宽度应该是可以采取的措施之一, 而通风口位置对体育馆风压通风效果的影响也将是下一步我们将要继续深入研究的课题。

[参考文献]

- [1] 李静. 基于系统优化的高校体育馆自然采光和通风节能设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2010
- [2] 李晋. 体育馆形态非对称性对运动场地自然通风及热舒适性的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版) 2013, 41(8): 84-89
- [3] 赵洋, 梅洪元. 严寒地区体育馆建筑的通风窗位置优化设计研究[J]. 建筑科学 2014, 30(3): 83-88
- [4] Peren J I, van Hooff T, Ramponi R, et al. Impact of roof geometry of an isolated leeward sawtooth-roof building on cross ventilation: straight, concave, hybrid or convex? [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2015, 145: 102-114
- [5] Van Hooff T, Blocken B. Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modeling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam Arena stadium [J]. Environmental Modelling & Software 2010, 25: 51-65
- [6] Cheng Z, Li L, Bahnfleth W P. Natural ventilation potential for gymnasiums—Case study of ventilation and comfort in a multisport facility in northeastern United States [J]. Building and Environment 2016, 108: 85-98
- [7] 程征. 基于自然通风模拟的体育馆设计策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2017
- [8] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality [S]. Atlanta 2013, 18.
- [9] 庄智, 余元波, 叶海, 等. 建筑室外风环境 CFD 模拟技术研究现状[J]. 建筑科学 2014, 30(3): 108-144
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社 2012
- [11] 王莹. 大跨度空间结构风荷载数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学 2012
- [12] 顾磊, 齐宏拓, 刘红军, 等. 奥运网球中心赛场风荷载和风环境数值模拟分析[J]. 建筑结构学报 2009, 30(3): 134-143
- [13] Kang J H, Lee S J. Improvement of natural ventilation in a large factory building using a louver ventilator [J]. Building and Environment 2008, 43: 2132-2141