摘　要

随着人们对光的非视觉效应了解逐步加深，在光源设计时越来越注重光源对人体的非视觉影响。经过非视觉通道的传递，光源不仅能影响激素分泌的情况，进而影响人体的昼夜节律，还能影响体征参数，如血压、心率、体温等。LED(Light Emitting Diode)凭借其节能环保、使用寿命长、价格低廉等优点，在各领域得到广泛应用。LED 光源所处的电流、温度均会极大地影响光源照明质量。当光源的光谱辐射强度变化时，其产生的视觉和非视觉效应均会受到影响。如何设计出既满足人体健康又光效高的光源，是光源设计的重要研究内容。本文针对 LED 电流和温度光谱二维模型、照明方案的设计、照度补偿以及常用的非视觉参数间的关系展开研究。

本文研究内容分为以下两个部分：第一部分从基于 LED 芯片发光材料中原子能级分布规律的光谱模型出发，对 RGBY 四色 LED 建立电流和温度模型，拟合的 R-square 可达到 0.99。接着搭建实验的光源驱动系统和数据测试平台，将各个单色光谱依照光谱线性叠加原理，得到 LED 混合光源的电流和温度光谱二维模型，定量描绘了 LED 光谱模型和电流、温度之间的关系，并通过光源系统设计出 D50 和 D65 光源，以此作为参考来验证模型的可靠性，经过分析计算发现，光源的视觉和非视觉参数的最大绝对误差不超过 6.21%，表明此二维模型是可行的。

第二部分通过遗传算法对昼夜节律因子和辐射发光效率进行多目标优化，得到照度在 300lx 的 8 组照明方案，建立了色温在 2500 K~8000 K 内的优质照明方案。接着在 8 组照明方案中选取 3 组，探究两种非视觉参数（昼夜节律因子与昼夜节律刺激）和温度之间的关系，由于照度随着温度的增加而线性递减，拟合的 R-square 可达到 0.987，同时两种非视觉参数均受到照度的影响，导致昼夜节律因子均随温度的增加而升高，但昼夜节律刺激却随温度的增加而减小。对照度进行补偿后，发现两种非视觉参数均随温度的升高而增大，结果表明两种非视觉参数呈现较强的线性相关性，说明温度的增加对非视觉效应有积极作用。在照度补偿后，方案 1（最小色温方案）昼夜节律因子/昼夜节律刺激绝对误差比分别由 10.62%/13.66%减小到 5.58%/6.52%，方案 8（最大色温方案）昼夜节律因子/昼夜

节律刺激绝对误差比分别由 9.27%/8.25%减小到 5.55%/4.66%，结果表明照度补偿后可以减小温度对光源光谱的影响，为 LED 照明光源设计中非视觉效应的考虑提供参考依据。

关键词：电流和温度光谱模型；昼夜节律刺激；照明方案设计；照度补偿；遗传算法

ABTRACT

With the deepening of people's understanding of the non-visual effects of light, people pay more and more attention to the non-visual effects of light sources on human body when designing light sources. Through the transmission of non-visual channels, the light source can not only affect the secretion of hormones, and then affect the circadian rhythm of the human body, but also affect the physical parameters, such as blood pressure, heart rate, body temperature, etc. LED(Light Emitting Diode) is widely used in various fields because of its advantages of energy saving, environmental protection, long service life and low price. The current and temperature of the LED will greatly affect the lighting quality of the light source. When the spectral radiation intensity of a light source changes, its visual and non-visual effects will be affected. How to design a light source that meets human health and has high light efficiency is an important research content of light source design.This paper studies the relationship between the two-dimensional model of LED current and temperature spectrum, the design of lighting scheme, illumination compensation and common non-visual parameters.

The research content of this paper is divided into the following two parts: In the first part, based on the spectral model of atomic energy level distribution in LED chip luminescent materials, the current and temperature models of RGBY four-color LED are established, and the fitted R-square can reach 0.99. Then, the experimental light source driving system and data testing platform are built. According to the principle of linear superposition of each monochromatic spectrum, the two-dimensional model of current and temperature spectrum of LED mixed light source is obtained, and the relationship between LED spectrum model and current and temperature is quantitatively described. D50 and D65 light sources are designed through the light source system, which can be used as reference to verify the reliability of the model. Through analysis and calculation, it is found that the maximum absolute error of visual and non-visual parameters of light sources is less than 6.21%, which indicates that the two-dimensional model is feasible.

In the second part, the circadian rhythm factor and radiation luminous efficiency are optimized by genetic algorithm, and eight groups of lighting schemes with illumination of 300lx are obtained, and a high-quality lighting scheme with color temperature of 2500 K~8000 K is established. Then, three groups were selected from eight groups of lighting schemes to explore the relationship between two non-visual parameters (circadian rhythm factor and circadian rhythm stimulus) and temperature. As the illuminance decreases linearly with the increase of temperature, the fitted R-square can reach 0.987. At the same time, both non-visual parameters are affected by the illuminance, which causes the circadian rhythm factor to increase with the increase of temperature, but the circadian rhythm stimulus decreases with the increase of temperature. After compensating the illumination, it was found that the two non-visual parameters increased with the increase of temperature. The results showed that the two non-visual parameters showed a strong linear correlation, indicating that the increase of temperature had a positive effect on the non-visual effect. After illumination compensation, the absolute error ratio of circadian rhythm factor/circadian rhythm stimulation in scheme 1 (minimum color temperature scheme) decreased from 10.62%/13.66% to 5.58%/6.52%, and that in scheme 8 (maximum color temperature scheme) decreased from 9.27%/8.25% to 5.55%/4.66%. The results show that the influence of temperature on the light source spectrum can be reduced after illumination compensation, which provides a reference for the consideration of non-visual effects in LED lighting source design.

Keywords: current and temperature spectral model; circadian stimulation; lighting scheme design; illumination compensation; genetic algorithm.

目 录

摘 要.....I

ABTRACT.....III

第一章 绪论.....1

1.1 研究背景和意义.....1
1.2 国内外研究动态.....2
1.3 研究内容与目的.....6

第二章 非视觉效应与 LED 的基本特性.....8

2.1 感光细胞种类及其功能.....8
2.1.1 视觉感光细胞.....9
2.1.2 第三类感光细胞.....11
2.2 光照的非视觉生物效应.....12
2.2.1 人眼非视觉通道.....12
2.2.2 非视觉光生物效应评价模型.....13
2.3 LED 调光原理.....15
2.3.1 LED 的基本工作原理.....15
2.3.2 LED 的调光技术.....20
2.4 本章总结.....22

第三章 LED 光源电流、温度光谱模型的建立.....24

3.1 引言.....24
3.2 基于原子能级分布规律的 LED 光谱模型.....25
3.2.1 单色 LED 的光谱模型.....25
3.2.2 实验平台的设计.....27
3.3 RGBY 四通道电流、温度光谱的拟合.....29
3.3.1 实验测试与光谱模型的建立.....29
3.3.2 电流、温度光谱模型的验证.....35
3.4 本章小结.....37

第四章 照明方案的设计与照度补偿.....39

4.1 引言.....39
4.2 照明方案的设计.....40
4.3 照度补偿.....44
4.3.1 照度补偿的必要性.....44
4.3.2 照度补偿的结果分析.....45
4.4 本章小结.....49

结论与展望.....50

1.结论.....50
2.展望.....51

参考文献.....53

攻读硕士学位期间取得的研究成果.....59

致谢.....60

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

人类认识世界最主要的方式是光的传播。自然界中正因为光的存在，人们才能发现、认识并揭开一系列科学奥秘。太阳光是最原始的照明方式，人们对光的研究始于太阳光谱。太阳光谱包含红外、可见以及紫外光谱，只有波长范围在380nm 到 780nm 的才是可见光。可见光通过人眼视网膜成像，在大脑视觉皮层产生视觉效果。随着人造光源的出现，弥补了只有白天才能有光的缺憾，人们可以通过灯具在夜晚工作学习，丰富了生活，更进一步地促进社会产能的提高。

近些年来，LED 凭借节能环保、绿色低碳、高效可控等优点，逐渐成为最常用的照明工具。由 LED 制造出来的灯具在车载照明、道路照明、医疗器械等[1]诸多场合广泛应用，正是 LED 的出现，将灯具的作用提升到全新的高度，为绿色照明时代的到来奠定坚实基础。

在早期的科研工作中，由于对人眼结构认知的不足，人们往往只关注视觉层面的体验。对人体健康有益的光环境必须从视觉和非视觉两个维度考虑。光的视觉参数主要包括显色性指数、有无眩光现象、亮度、光通量等等。视觉健康直观地影响人们对光的感受，会影响人们的工作学习效率。随着研究的不断深入，直至 2002 年 Berson 等人[2]在哺乳动物视网膜实验中发现了第三类感光细胞，即本征感光视网膜神经节细胞 ipRGC，这种细胞同样有光敏性。研究发现[3-6]，神经节细胞不同于视锥、视杆细胞等传统视觉细胞，它通过人体内的神经通路，将收集到的信号经瞳孔括约肌再传送至松果体。它与体征参数、身心健康的调节，产生光的生物效应，也叫光的非视觉效应。为了能够更直观地表征非视觉效应对人体影响强弱，科研人员相继提出多种用于评价生物效应的模型[7-11]，用以量化抽象的非视觉影响。

光源的节能与否，也是照明系统研究的重要方面[12]。LED 的出现，本身就是人们为了降低能耗，节约能源的成果。以前的节能工作中，主要是把光源能量分布集中化，将大部分能量放在可见光的波段，尽管从节能方面考虑这么做毫无问题，但因为非视觉的客观存在，这样的作法必然存在健康隐患，比如蓝光危害。因此兼顾视觉和非视觉来设计照明系统，是新一代智能照明的调光方向，也只有

这样才符合健康照明的理念。

在 LED 光源工作时，除了电能和光能之间的相互转换，更有一部分未被充分利用的能量转化为热能，产生能源浪费的情况，同时这些热能还会造成 LED 芯片所处的温度过高，从而影响光源的光谱辐射强度[13,14]。当温度升高时，LED 光谱的绝对功率逐渐衰减，其中波长越长，衰减的越严重。因此对光谱和电流、温度的研究就显得十分重要，只有将光谱同电流、温度之间产生量化的关系[15-17]，才能深刻分析它们之间的关系。尤其在建设智能城市的指引下，LED 光源的可调节性和稳定性不言而喻。本论文总结前人的科研成果，建立了 LED 光源光谱同电流、温度的模型，验证了此模型的可靠性。接着以昼夜节律因子和发光效率为目标，进行多目标优化，得出 8 组适宜的照明方案，在满足人体健康照明要求的基础上，实现了光源的节能优化。同时在补偿照度后，分析了两种非视觉参数随温度变化的关系，为 LED 照明光源设计中非视觉效应的考虑提供参考依据。

1.2 国内外研究动态

人体内的感光细胞有三种类型，分别是视锥细胞、视杆细胞和神经节细胞 ipRGCs。在 2002 年 Berson 发现 ipRGCs 之前，人们仅仅能认识到视觉效应。视觉效应包括明视觉和暗视觉，其中视锥细胞在接受光刺激后将光能转化为神经冲动，通常在明视觉时工作；视杆细胞可以在弱光刺激下分辨黑白物像，常在暗视觉状态下工作。ipRGCs 通过褪黑素（Melanopsin）来感光，褪黑素的分泌对人体昼夜节律有着较大影响，而且其分泌量呈现出和 24 小时生物钟相同的周期性变化。在 24 小时周期往复过程中，人体体温、褪黑素分泌量和皮质醇分泌量的变化曲线，白天时，由于光线较强会对褪黑素有抑制作用，人们更容易集中注意力，保持警觉，提高日常工作学习效率。到了晚上褪黑素含量会增加，促进人类睡眠，维持正常的昼夜效果。2001 年 Brainard 等[18]通过单色光的照明，探究光源对褪黑素的抑制效果。通过比照实验前后褪黑素含量大小来分析光源的影响。结果发现光源对褪黑素抑制率与照度值和波长值均有关，并建立了光生物效应的响应曲线 $C(\lambda)$，其峰值波长为 464nm。Chellappa 等[19]通过三种色温不同的照明光源（2500K 的低色温荧光灯、6500K 的高色温荧光灯和 3000K 的白炽灯），实验照度设置为 40lx，测量 16 位实验对象夜间被照射 2 小时后体内褪黑素含量的变化

情况，并分析认知和警觉程度。结果表明较高色温时，褪黑素被抑制的效果更明显，同时认知和警觉程度也快于低色温。

神经节细胞不仅可以调节褪黑素的分泌，还和瞳孔收缩[20-22]存在密切关系。Berman 等人探究不同光环境下瞳孔的收缩情况，并在此基础上建立起与瞳孔大小相关的光谱响应曲线 $C(\lambda)$，其峰值波长是 491nm。徐蔚[23]着重研究以瞳孔收缩为参数的生物效应，从视网膜区域上的光照情况、人体昼夜节律特性等方面展开分析。罗达等[24]选用 6 种彩色 LED 以及 5 种低照度的光照情况，对多位测试者进行低照度的瞳孔收缩分析实验，同时讨论了模拟调光和 PWM 调光作用下对脉搏跳动和瞳孔的影响，研究表明高色温蓝光波段的瞳孔收缩率变化最明显，在同种光源作用下，瞳孔收缩率随着照度的增大而增加，在 10~70 lx 照度范围内，瞳孔稳定收缩率和瞳孔恢复收缩率具有一定的线性相关性，其相关系数大于 0.95，说明瞳孔收缩率能作为表征非视觉效应的参数。陈仲林等[25,26]分析了不同波长时人眼瞳孔收缩率的变化情况，结果表明波长越短，瞳孔收缩效果越明显，非视觉效应越显著，视觉聚焦效果越好。Higuchi 等人[27]研究瞳孔大小与褪黑素抑制率的变化关系，研究结果指出无论是光照还是黑暗的条件下，褪黑素抑制率均与瞳孔大小呈现一定的相关性。严永红等[28]人对在校大学生进行脑波测量实验，分析不同照度、色温参数的照明对脑波指数的影响情况，研究表明光源的不同的确会对大脑皮层产生刺激，高色温、高照度的照明条件均会导致脑波指数的增加，进而使大脑处在较高兴奋性的状态下。饶丰等通过研究人眼瞳孔直径和照度的关系，建立了亮度在 50-300 cd/m^2 范围内的瞳孔直径预测模型。

光照同样会对人体体征参数造成影响，比如血压、心率、体温等。Cajochen 等人[29]在 2005 年在波长不同的单色光作用下，探究人体体温、警觉度、心率等参数的变化情况。Figueiro 等人[30,31]在 2009 年把脑波 α 波衰减系数和诺里斯情绪量级设为参考对象，分析了人体在不同窄带蓝光作用下受到的影响，结果发现当辐照度增加时，α 波衰减系数和警觉度均与褪黑素抑制率预测模型在不同光作用下的变化情况相近。鲁玉红等[32]研究不同波长的蓝光对人体心率造成的影响，实验结果表明 468nm 的蓝光对人体心率影响最大。Hubalek 等人[33]通过对办公室工作人员长达一周的实验测量，发现白天摄入人眼的光可以促进夜间睡眠。居家奇研究了基于人体心率的非视觉效应，建立起峰值参数为 497 nm 的光谱响应曲

线 $C(\lambda)$。牛萍娟等[34]选用 9 种色温、照度不同的 LED 光源，在不同光照下分析 10 名学生的体征参数情况，结果发现， 4500 K 色温、500 lx 照度下的光照条件下，人体的学习效率会显著提高，可在教室、办公室等地使用此类光源。周晓明等[35,36]研究了不同年龄状态的人群，心率和血压受不同色温的光源影响的大小。研究发现当使用同种光源时，年轻人会比老年人的心率、血压等体征参数变化更明显。饶丰等人[37]通过比较年轻人与老年人在同一光源下的心率变化情况，发现年轻人的心率变化率相对较高，且同一人群在高色温光源下心率变化要高于低色温光照条件。

光源在多方面都对人体产生影响，如果使用不当，就会危害人体健康。蔡建奇等[38]通过研究人体视网膜色素上皮细胞以及小鼠光感受器受到的光化学损伤，发现较强烈的光刺激持续一定时间，会对细胞造成危害。此外，蓝光危害也不容忽视。当人眼受到波长较小的蓝光辐射而造成视网膜的损伤。刘婕等[39]提出一种利用成像亮度计来测试光源蓝光危害的方法，根据光谱和最大亮度来计算蓝光危害效率和安全的照度、亮度上限，结果表明色温小于 6500 K 的光源，当其照度小于 1000 lx，亮度小于 100 $kcdm^{-2}$ 时，蓝光危害可以忽略不计。饶丰等[40]提出一种亮度结合色温评估荧光粉转换型 LED 的蓝光危害方法，并依据此方法发现同型号的 LED，当光源色温小于 7500 K，亮度小于 100000 cd/m^2 时，不会产生蓝光危害。杨超普等[41]提出一种用于光源蓝光危害和节律效应可视化的评估方法，研究结果表明光源的蓝光危害因子、昼夜节律因子均与色坐标 Z 值、透过钴蓝玻璃的主波长成正相关。Obayashi 等人[42,43]通过探究室内 LAN 和老年群体的不良状况之间的联系，研究表明夜晚光暴露会加重患抑郁症的可能，进而增加患糖尿病的风险性。

光的非视觉效应带来的健康风险愈发严重，因此对光源非视觉效应的量化评估就显得尤为重要。由于非视觉效应影响因素众多，量化统一就变得十分困难。在非视觉光谱响应函数的建立过程中，许多科研工作者基于不同的体征参数，提出了形态各异的非视觉光谱响应函数。Gall 等人从光诱导褪黑激素抑制率的角度出发，拟合得到峰值为 450 nm 的响应曲线，并因此提出了至今为止仍影响深远的 a_{cv} 评价非视觉效应模型。Rea 等人考虑视觉细胞的光转导现象，建立了考虑更为周全的光谱响应曲线，同时提出 CL_A 模型和 CS 预测模型来评估非视觉效应。

居家奇等人从光照时长的角度出发，提出峰值波长为 497 nm 的非视觉光谱响应，该模型从光剂量因子出发来优化对非视觉效应的模型。康玉柱等人[44]以光转导影响褪黑素的含量为切入点，介绍了黑视素通量、M/P 等节律参数的计算公式。在众多非视觉评价模型中，a_{cv} 模型和 CL_A 模型是应用最广泛的。

由于 LED 光源是新一代的绿色光源，已经在道路照明、办公学习、科学睡眠等领域广泛应用。日常生活中对照明需求变得更为多样性，既要满足人体健康需要，又要尽可能节约能源。在非视觉研究不断深入的作用下，照明设计方法在不断更新。Oh 等人[45]以目前投入商用的人工照明光源为参考，采用不同波长混合的多 LED 封装构造，通过该结构设计的混合光源无论在视觉特性还是在非视觉特性上，均好于商用光源，可以提供更优质的照明条件。黄海静等人[46]探究不同光照时长对老年人心电指标的响应效果，结果发现当照度和色温交互作用对人体 ECG 影响较大，这种情况只有当照射时间较长时才会出现。Guo 等人[47]通过研究光源的不同使用场景，包括工作状态和休息状态，根据实际需要考虑光源对物体的色彩还原度，通过遗传算法计算出在 2700 K 到 6500 K 范围内内，能满足两种场景的三峰白光 LED 光源。熊晨雨等[48]通过使用 RGBW 四色 LED 混合光源来模拟太阳光亮度及色温在一天的变化情况，同时采用遗传算法优化光源的显色性指数，得到既满足太阳光亮度和色温效果，又有良好显色性能的目标光源。曾伟森等人[49]通过建立四通道的光谱重构模型，设计出可远程调控且光谱可重构的混合光源，并通过实验验证证明此模型能精确地指导光谱重构。

在光源调控的过程中，温度是一个容易忽视但却十分重要的因素。LED 光源在工作过程中，有些能量转化为热能，并未全部转化为光能，致使温度升高。对于温度的研究，主要集中在光谱特性上，诸如光谱的半峰全宽、峰值波长以及实际光功率值等。随着 LED 所处的结温升高，当前光谱的峰值波长开始向长波段偏移，光功率也会随之降低。在非视觉参数方面，研究就相对较少。沈雪华等通过建立温度光谱实验的方法，测试分析了白色 LED 光谱分布和电流、所处温度的关系，在此基础上总结出白光光谱蓝白比预测模型，成功将昼夜节律因子 C_{AF} 和温度系数建立联系。之后又研究电流、温度和不同色温白光 LED 的关系，但并未涉及其余非视觉参数的研究，比如昼夜节律刺激。I. Chew 等[50]通过光谱传感器建立起对光源的反馈通道，可以更精确调节光谱，实验结果表明选取光源和

目标光源的峰值波长越接近，所需要的收敛时间就相应减少。Aleix 等[51]在先前研究的基础上，构造了一个闭环负反馈系统来实现消除温度的影响效果，尽管实验设计周密，但由于微型光谱仪造价太高，所以此方法很难大面积地使用。

随着对非视觉领域的日益重视，在保证光源可用性的前提下，如何全面考虑非视觉影响是光源设计的重点。通过混合多光谱器件的调光技术来实现光源在不同照明场景的应用，是光源往高品质照明前进的重要方向。

1.3 研究内容与目的

高精度的调光是照明发展的前进方向，在调光过程中消除无关因素的影响十分重要。本文在现有的非视觉研究基础上，从 LED 混合光源的调节方面展开研究，通过建立 RGBY 四通道混合光源系统来完成视觉和非视觉参数的分析。为了更真实地模拟光源的实际光谱，以 LED 芯片发光材料中原子能级分布规律的光谱模型为基础，通过改变各通道 LED 所处的电流、温度来模拟光谱，进而确定 RGBY 各通道光源的绝对光谱和电流、温度之间的关系。本文主要从以下三方面展开研究。

（1）设计出 RGBY 四色混合光源系统和电流、温度、光谱的测量系统，通过恒温加热台 V-0505 对光源系统进行温度调节，温度范围从 30-120℃，以 15℃为间隔。通过脉冲宽度调节（PWM 调节）来改变各通道的占空比进而实现电流调节，驱动电流的范围从 0-350 mA，这样就得到了不同色光在任意电流、温度下的实际光谱。之后根据原子能级分布规律的光谱模型，通过 1stopt 软件来模拟 RGBY 在不同电流、温度下的实际光谱，以此确定单通道光源的光谱参数同电流、温度之间的变化函数，进而得到 LED 的电流、温度光谱模型。

（2）利用得到的 LED 的电流、温度光谱模型进行健康节能照明方案设计，方案需要兼顾视觉参数（辐射发光效率、蓝光危害效率、显色性指数、相关色温和照度）和非视觉参数（昼夜节律因子和昼夜节律刺激）。通过遗传算法来对昼夜节律因子和辐射发光效率进行多目标优化，得到的 8 组 Pareto 解集就是既有较高昼夜节律刺激又有较高发光效率的照明方案，通过比较 8 种方案的实际光谱和模型光谱，进而证实了电流、温度光谱的可靠性。

（3）探究两种非视觉参数值（昼夜节律因子和昼夜节律刺激）受温度的影

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：https://d.book118.com/395040142102011130