文章编号:1001-5078(2018)06-0735-09

·光电技术与系统 ·

星模拟器多色温模拟技术研究

张晓娟¹,杨俊杰²,张 健²,张丽娜²

(1. 吉林电子信息职业技术学院,吉林 吉林 132000;2. 长春理工大学,吉林 长春 130000)

摘 要:针对星模拟器对多色温模拟的需求,提出了一种星模拟器多色温模拟方法。结合由氙 灯和卤钨灯组成的宽光谱光源灯阵,分析了不同波段数据和不同波段带宽数据变化对色温的 影响。基于多项式的拟合方法,利用遗传算法实现了色温模拟的反馈控制,实现了在 350~ 900 nm 光谱范围内对 3900 K、4800 K、6500 K 色温的光谱模拟,满足了星模拟器对多色温的模 拟要求。

关键词:星模拟器;色温模拟;光谱合成

文献标识码:A

中图分类号: V216.8

DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2018.06.013

Research on multi-color temperature simulation for star simulator

ZHANG Xiao-juan¹, YANG Jun-jie², ZHANG Jian², ZHANG Li-na²

(1. Jilin Technology College of Electronic Information, Jilin 132000, China;

2. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

Abstract: Aiming at the simulation requirement for multiple color temperatures of a star simulator, a simulation method of multiple color temperatures for a star simulator is put forward. Then, the influence of data and bandwidth data of different wave bands on color temperatures is analyzed with a combination of a broadband spectroscopic light source lamp array which is consisted of xenon lamps and halogen tungsten lamps. On the basis of polynomial fitting method, feedback control of color temperature simulation is realized by utilizing genetic algorithm. Therefore, spectrum simulation of 3900 K,4800 K and 6500 K color temperature within the spectral region between 350 nm and 900 nm is realized, which satisfies the simulation requirement for multiple color temperatures of a star simulator. **Key words**:star simulator;color temperature simulation;spectrum synthesis

1 引 言

星敏感器主要是利用电荷耦合器件(CCD)或 互补金属氧化物半导体(CMOS)经光学系统接收恒 星发出的光,将数据处理成观测星图和数据库中预 存的导航星图进行比较以得到航天器在星空中的位 置与姿态^[1-2]。在星敏感器技术中非常关键的一项 是对恒星发射光的接收,所以对星敏感器的标定就 尤为重要。常用的标定方法可分为在轨标定和地面 标定,在轨标定虽然具有和真实太空环境一样的精 度,但是费用异常昂贵,而且与地面定标设备相比, 在轨定标设备可维护性差。因此,研制高精度、性能 优良地面定标设备势在必行。

由于宇宙中恒星的温度和辐射光谱分布各不相同^[3],同时不同类型星敏感器的接收器的响应区间和响应曲线也不尽相同,因此要求星敏感器标定设备的色温和所探测恒星的色温相匹配,从而减小色温的不匹配的标定误差^[4]。针对上述情况,国内外的科研工作者均进行了色温模拟方面的研究。其中

作者简介:张晓娟(1970-),女,博士,教授,主要研究方向为仪器科学技术。E-mail:jlxj2008@126.com 收稿日期:2017-10-16

基金项目:吉林省"十三五"科学技术项目(No. 吉教科合字 2016 第 160 号)资助。

英国国家物理实验室设计以溴钨灯为发光介质的光 谱分布可调谐光源系统^[5];美国国家标准和技术研 究院研制了一种使用大量发光二极管(Light Emitting Diode,LED)的光谱分布可调积分球光源^[6];朱 继亦等提出一种改变 LED 点亮个数来调整合成光 谱的光源模型^[7];刘洪兴等在此基础上采用溴钨灯 和恒流驱动的 LED 混合光源作为积分球内部光源 进行了光谱范围 380~900 nm 分布及匹配研究^[8]。

虽然目前常用 LED 混合光源色温模拟方法中 所用的 LED 光源具有体积小、寿命长、发光效率高、 发光强度稳定等一系列优点,但是可变电流驱动 LED 会引起半峰全宽的变化和峰值波长的漂移,而 且有些波段 LED 难以配齐,降低了光谱匹配算法的 效率和准确度。因此,针对上述情况,基于对宇宙中 恒星光谱的研究,设计了一种氙灯和卤钨灯混合的 色温模拟照明系统,实现星敏感器宽光谱、高准确度 的光谱探测能力的标定,解决星敏感器在地面标定 实验过程中光谱不匹配对星敏感器光信号标定准确 度产生的影响,并提高星敏感器的定标准确度。

2 色温模拟照明系统设计

2.1 多色温星模拟器的组成

多色温多星等星模拟器主要由准直光学系统、 星图显示系统、色温模拟照明系统和多维光学调整 架等组成。多色温多星等星模拟器各主要组成部分 如图1所示。





Fig. 1 Composition of multi-color temperature star simulator

其中准直光学系统用来模拟无穷远的星光出射 特性,星图显示系统用来提供星敏感器所需的恒星 位置信息,色温模拟照明系统用对提供星敏感器所 需的恒星色温信息,多维光学调整架用于调整星模 拟器与星敏感器之间的位置关系。

多色温星模拟器对光谱匹配的要求为:在光谱 范围 350~900 nm 内对的三个典型色温 3900 K、 4800 K、6500 K 的光谱进行模拟,模拟精度优 于10%。

2.2 宽光谱光源灯阵系统

色温模拟照明系统系统由宽光谱光源灯阵、色

温模拟与控制模块、积分球与光谱辐射计组成。其 中宽光谱光源灯阵为色温模拟照明系统的核心组成 部分。

宽光谱光源灯阵为整个多色温星模拟器提供光 辐射通量;同时提供与模拟星图相接近的光谱分布。 由于色温模拟照明系统波段覆盖 360~900 nm,在 此波段内卤钨灯具有较强的发光强度,具有很好的 稳定性和比较长的使用寿命,但卤钨灯在短波波段 能量相对偏低,单独使用不能满足要求,其光谱分布 曲线图如图 2 所示;氙灯的光、电参数一致性好,在 寿命期内光谱能量分布几乎不变,工作状态受外界 条件变化的影响小,辐射光谱能量分布与日光相接 近,但氙灯在 700~820 nm 附近不稳定,单独使用也 难以满足要求,其光谱分布曲线图如图 3 所示。











通过反复试验对比,选用3个氙灯和3个卤钨 灯组成5个发光组元为光源,配合使用椭球聚光镜, 保证光束经过汇聚作用后进入积分球,采用分波段 控制的方法获得宽光谱光源。其中,5个发光组元 有两种组成形式,第一种为单独使用氙灯或卤钨灯, 配合滤光片及电控可变光阑,如图4所示,此时可提 供的光谱工作范围为 350~530 nm(单独使用氙灯) 和 610~900 nm(单独使用卤钨灯);第二种为同时 使用氙灯和卤钨灯,并配合滤光片、电控可变光阑、 椭球反射镜和合光棱镜,如图 5 所示,此时可提供的 光谱工作范围为 530~610 nm。



图 4 单一光源灯阵结构图

Fig. 4 Light array structure diagram with single light source



图 5 两种光源灯阵结构图

Fig. 5 Light array structure diagram two kinds of light source $% \left({{{\left[{{{\left[{{{\left[{{{c_{1}}} \right]}}} \right.} \right]}_{\rm{c}}}}} \right)$

3 色温模拟与控制技术研究

为了实现色温模拟要求,需要合理划分宽光谱 光源灯阵光源的光谱区间,研究微小波段光强的控 制方法,进而实现星模拟器的多色温模拟要求。

3.1 色温模拟光谱区间的划分

由于不同波段光谱数据的改变对色温计算的影 响不同,因此需要对权重比较大的位置进行更精确 的控制,同时权重比较小的位置控制精度要求也相 对低。为了更好的划分每组灯对应的光谱区间,下 面仿真不同波段数据和不同波段带宽数据变化对色 温的影响。

在1 nm、5 nm、10 nm 和 20 nm 四种带宽改变理 想的黑体辐射数据,除了1 nm 分辨数据以外,其他 的带宽均以线性插值的方式填充到1 nm 分辨再进 行色温计算,一次考虑光谱能量变化分辨率1%、 2%、5% 和 10% 增幅的四种情况。

以色温 6500 K 理想黑体辐射为例进行详细分析。首先分析 4 种带宽下不同光谱能量增幅 1% 对 6500 K 理想黑体辐射度色坐标的影响,其结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出带宽增加对色温的影响

也增加,基本上呈线性变化,意味着带宽是对单一波 长影响效果的累加。



分析色温 6500 K 时 5 nm 带宽下,光谱能量增 幅 1%、2%、5%、10% 对色坐标的影响,其结果如 图 7 所示,最终的影响效果是带宽和幅值的总体 线性累加,而不同波长处的影响是具有非线性权 重,单独的任意波长处增幅即使是 10%,对色度的 影响并不大。



图 7 5 nm 带宽下,光谱能量增加对色度坐标的影响 Fig. 7 The effect of chromaticity coordinates with the increase of spectral irradiance values with bandwith of 5nm

色温 6500 K 时 5 nm 带宽下,不同波长幅值增加对色温影响的权重如图 8 所示。







光谱能量增幅对色度坐标影响以及色温影响的权重 分别如图9、图10所示。



Fig. 9 The effect of weight of color temperature with increase of spectral irradiance values at different wavelengths with 4800 K

3900 K、4800 K 和 6500 K 不同波长处光谱能量 增幅色温影响的权重如图 11 所示。





图 10 3900 K 时光谱能量增幅对色度 坐标影响以及色温影响的权重

Fig. 10 The effect of weight of color temperature with increase of spectral irradiance values at different wavelengths with 4800 K



图 11 3900 K、4800 K 和 6500 K 不同波长下的权重系数

Fig. 11 The weighing coefficient of 3900 K 4800 K and 6500 K

根据图 11 可以看出,不同色温下的权重曲线 不同,有三处峰值(两个正峰和一个负峰,基本上 对应于配色函数 xbar,ybar,zbar),权重曲线有在波 长为 460 nm 和 530 nm 附近有两个正峰,随着色温 的增大,第二个正峰逐渐向第一个正峰转移,随着 色温减小,则反向变化;而负峰则基本没有明显的 变化。即色温越低的时候 ybar 越起主要作用,第 二个正向峰值位置也就越接近 ybar 的峰值位置。 色温越高时,zbar 越起主要作用,第一个正向峰值 位置也就越接近 zbar 的峰值位置,是普朗克轨迹 上的点在色度坐标中移动时,在马蹄形 3 个维度 投影分量变化所致。

因此光谱区间在 460 nm、530 nm 和 600 nm 附 近处需要进行精细的划分。由于氙灯在 700 ~ 820 nm处辐射的不稳定性,而卤钨灯在短波波段能 量偏低,因此氙灯选取辐射最稳定的发光范围350 ~ 610 nm,卤钨灯选取 530 ~ 900 nm。之前的分析可 知,当划分光谱范围取 20 nm 时,带宽幅值在 10% 范围内变化时对色温的影响在可控范围之内,根据 图 11 不同波长处幅值增加对色温的影响权重可知, 在需要精细模拟的光谱范围处,光源灯阵光谱区间 划分结果如表 1 所示。

表 1 光源灯阵光谱区间的划分 Tab. 1 The division of the spectrum interval

C .1

	OI	tne	lamp	array	y
_					

灯组	区间 I	区间II	区间 III	区间 IV
氙灯第一组	350 ~ 380	380 ~ 410	410 ~430	430 ~450
氙灯第二组	450 ~470	470 ~490	490 ~ 510	510 ~ 530
混合光源	530 ~ 550	550 ~ 570	570 ~ 590	590 ~610
卤钨灯第一组	610 ~ 630	630 ~ 650	650 ~ 680	680 ~730
卤钨灯第二组	730 ~ 780	780 ~ 820	820 ~ 860	860 ~ 900

由表1可以看出,在对光谱权重影响比较敏感 的三个峰值460 nm、530 nm 和600 nm 处的光谱带 宽均是20 nm,而在680~900 nm 处,由于光谱的权 重对色温的影响较小,可以适当的增加光谱带宽,该 光谱范围内的光谱带宽取值在40~50 nm,光谱划 分区间分别为680~730 nm、730~780 nm、780~ 820 nm、820~860 nm 和860~900 nm,而在其他光 谱和权重的关系近似于线性变化,因此在这部分光 谱范围内光谱带宽取值在30~40 nm。

3.2 各光谱区间微小波段多项式拟合方法

由于每一个微小光谱范围对应一个滤光片和可 变光阑,其中滤光片对光谱的透过率进行修正,可变 光阑调节该波段光谱的能量。为了方便以后对各个 微小光谱区间应用最小二乘法求解,同时因为氙灯 和卤钨灯光谱曲线光滑且连续,故可以将每个光谱 区间曲线用多项式拟合,得到每段光谱曲线的数学 表达式。

首先对第一组元和第二组元进行微小波段的

光谱拟合多项式求解,并对其归一化。第一组元 和第二组元的光源均为氙灯,将两组元合并进行 光谱模拟仿真,第一组元的光谱范围为 350 ~ 450 nm,四个光谱区间 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 分别为 350 ~ 380 nm、380 ~ 410 nm、410 ~ 430 nm、430 ~ 450 nm,第二组元的光谱范围为 450 ~ 530 nm,四 个光谱区间 $\lambda_5 \sim \lambda_8$ 分别为 450 ~ 470 nm、470 ~ 490 nm、490 ~ 510 nm、510 ~ 530 nm。求解出的光 谱拟合多项式组如式(1)所示。 $S_1(\lambda) = 0.04186\lambda^2 - 15.07663\lambda + 1805.06877$

$$\begin{split} S_{2}(\lambda) &= -0.01861\lambda^{2} + 6.68746\lambda - 797.02062 \\ S_{3}(\lambda) &= 0.00212\lambda^{2} - 1.82739\lambda + 394.54058 \\ S_{4}(\lambda) &= 0.00172\lambda^{2} - 1.45999\lambda + 310.52703 \\ S_{5}(\lambda) &= -0.00864\lambda^{2} + 7.93946\lambda - 1821.95783 \\ S_{6}(\lambda) &= -0.00432\lambda^{2} + 4.0998\lambda - 971.01992 \\ S_{7}(\lambda) &= -0.00254\lambda^{2} + 2.58569\lambda - 658.16829 \\ S_{8}(\lambda) &= 0.0039\lambda^{2} - 4.0029\lambda + 1027.86461 \end{split}$$

第一组元和第二组元归一化的各光谱区间的 光谱曲线如图 12 所示。由图可以看出,各谱段之 间在光谱上限和下限处会出现不连续的情况,在 光谱曲线模拟的时候容易造成光谱曲线出现尖峰 的情况。



Fig. 12 Normalized spectral curve of xenon lamp group band

第三组元是氙灯和卤钨灯混合光源,由于是 混合光源,在对各光谱区间进行最小二乘法求解 时,对不同的色温具有不确定性,因此需要对混合 光源组在 3900 K、4800 K 和 6500 K 三种色温的拟 合多项式进行求解。在色温 3900 K、4800 K 和 6500 K 时,光谱范围 530~610 nm 的四个光谱拟 合多项式组如式(2)~(4)所示,归一化的光谱曲 线如图 13 所示。



第四组元和第五组元的光源均为卤钨灯,同样 也将两组元合并进行光谱模拟仿真,第四组元的四 个光谱区间 $\lambda_{13} \sim \lambda_{16}$ 分别为 610~630 nm、630~ 650 nm、650~680 nm、680~730 nm,第五组元的四 个光谱区间 $\lambda_{17} \sim \lambda_{20}$ 分别为 730~780 nm、780~ 820 nm、820~860 nm、860~900 nm。其光谱拟合多 项式组如式(5)所示,归一化的各光谱区间的光谱 曲线如图 14 所示。 $S_{13}(\lambda) = 0.11669\lambda - 51.1687$

 $S_{14}(\lambda) = 0.00288\lambda^2 - 3.63326\lambda + 11496.85519$

 $S_{15}(\lambda) = -0.63503\lambda^2 + 420.17923\lambda - 92654.18913$

 $S_{16}(\lambda) = -0.01096\lambda^2 + 8.17233\lambda - 2025.45047$

 $S_{17}(\lambda) = 0.00827\lambda^3 - 9.30069\lambda^2 + 4649.83315\lambda - 871523.11034$

 $S_{18}(\lambda) \ = \ 0.\ 000181 \lambda^2 \ - \ 0.\ 26197 \lambda \ + \ 94.\ 07232$

 $S_{19}(\lambda) = 0.02441\lambda^3 - 30.62035\lambda^2 + 17067.14851\lambda - 356692$ $S_{20}(\lambda) = 0.02531\lambda^3 - 3327739\lambda^2 + 19438.65328\lambda - 425736$





3.3 色温模拟的控制方法

宽光谱光源灯阵发出的光经过滤光片组滤波 后,再由电控可变光阑组对其光通量进行调整,经过 积分球后将光谱曲线输入至星模拟器准直光学系统 中。其中由于可变光阑的透过系数误差具有不确定 性,因此引进遗传算法^[9]作为色温匹配算法。基于 最小二乘解的前提下,为每个微小光谱区间的可变 光阑的透过系数设置解的范围^[10],基于遗传算法的 求解步骤为:

(1)采用最小二乘法求解多色温多星等星模拟器色温匹配透过系数的非负最小二乘解,以此为遗传算法的初始群体^[11];

(2)根据非负最小二乘解确定透过系数的取值

741

区间;

(3)以最小二乘法残差平方和为目标,建立适 度函数,遗传算法根据适度函数值的大小选定一组 解,适度函数越大,目标值较大的解被选择的可能性 就越大^[11],相应解的质量也越好;

(4)在适度函数的基础上,反复对群体进行交 叉组合和变异运算,最后求得最优透过系数组合。

利用 matlab 中的遗传算法工具箱求解目标光 谱的最优可变光阑的透过系数,其中所设计的适度 函数为:

$$\min\{F(k_1, k_2, \dots, k_n)\} = \sum_{i=1}^{m} (b_i - \sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j)^2$$
(6)

基于遗传算法模拟光谱曲线补偿的流程图如图 15 所示。



图 15 遗传算法光谱曲线补偿的流程图

Fig. 15 The flow chart of spectral curve compensation with genetic algorithm

4 多色温星模拟器实验

将光谱辐射计置于积分球内用于光谱分布的检测,在多色温模拟器使用之前,需要对光谱辐射计进行标定。为了验证星模拟器的模拟光谱曲线是否符合精度要求,绘制多色温多星等模拟器模拟色温为3900 K 时的光谱曲线如图 16 所示。将 3900 K 黑体的色温曲线和黑体辐射的 ± 10% 误差曲线也绘制在图中,可以看出:星模拟器的模拟 3900 K 光谱的分

布曲线在 350~900 nm 区间满足曲线模拟精度 10% 的要求。



Fig. 16 The spectral curve of 3900 K

应用同样的方法,可绘制出多色温多星等星模 拟器 4800 K 的模拟光谱曲线和 6500 K 时的模拟光 谱曲线,如图 17 和图 18 所示。可以看出星模拟器 的模拟 4800 K 、6500 K 光谱的分布曲线在 350 ~ 900 nm 区间满足曲线模拟精度优于 10% 的要求,符合 技术指标的要求。



为了进一步验证多色温多星等模拟器模拟光 谱的情况,以 4800 K 为例,按照目前比较普遍的 相对面积法的评价方法,即为了描述光谱曲线的 偏差程度,令标准黑体色温曲线包围面积为 S_1 和 星模拟器的光谱曲线与标准黑体色温曲线的最小 偏差量包围面积 S_2 ,如图 19 所示,则模拟误差为 $\Delta = S_2/S_1$ 。







Fig. 19 Spectral curve simulation deviation

按照相对面积法可以得出:星模拟器模拟 4800 K 色温曲线的模拟误差为 3.44%。同理得到星模 拟器模拟 3900 K 色温曲线的模拟误差为 3.73%, 模拟 6500 K 色温曲线的模拟误差为 2.01%,满足 技术指标要求。

5 结 论

本文根据星模拟器对多色温模拟的需求结 合星模拟器工作原理,设计了一种以由氙灯和卤 钨灯组成的宽光谱光源灯阵为核心的色温模拟 照明系统,分析了不同波段数据和不同波段带宽 数据变化对色温的影响,对宽光谱光源灯阵各波 段进行多项式求解,进而通过遗传算法实现了色 温模拟的反馈控制,实现了在350~900 nm 光谱 范围内对3900 K、4800 K、6500 K 色温的光谱 模拟。

参考文献:

- [1] LI Xuekui, HAO Zhihang, LI Jie, et al. The research on the method of the star's position determination of the star sensor[J]. Electron Devices, 2004, 27(4):571 - 574. (in Chinese)
 李学夔,郝志航,李杰,等. 星敏感器的星点定位方法 研究[J]. 电子器件,2004,27(4):571 - 574.
- [2] LI Deliang, RUAN Jin. Method adapting to the star sensor's star extraction[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(12): 1348 1350. (in Chinese)
 李德良, 阮锦. 一种适用于星敏感器的星点提取方法
 [J]. 激光与红外, 2009, 39(12): 1348 1350.
- [3] WANG Fengfei, LUO Ali, ZHAO Yongheng. The radial velocity measurement accuracy of different spectral type low resolution stellar spectra at different signal-to-noiseratio [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34 (02):565 - 568. (in Chinese)

王凤飞,罗阿理,赵永恒.不同光谱型的低分辨率恒星 光谱在不同信噪比条件下视向速度测量精度的分析 [J].光谱学与光谱分析,2014,34(02):565-568.

[4] LIU Haibo, TAN Jichun, SHEN Benjian, et al. Effect of color temperature on position accuracy of star sensor[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(11):35 - 38, 42. (in Chinese)
刘海波,谭吉春,沈本剑,等. 色温对星敏感器恒星定位精度的影响[J]. 光电工程, 2009, 36(11):35 -

位精度的影响[J]. 光电工程, 2009, 36(11): 35-38,42.

- [5] Wall C F, Hanson A R, Taylor J A F. Construction of a prommable light source for use as a display calibration artifact[J]. SPIE, 2001, 4295:259 – 266.
- Brown Steven W, Santana Carlos, Eppeldauer George P.
 Development of a tunable LED-based colorimetric source
 J. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2002, 107(4):363 - 371.
- [7] ZHU Jiyi, REN Jianwei, LI Baoyong, et al. Synthesis of spectral distribution for LED-based source with tunable spectra[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2010, 31 (06):882-887. (in Chinese)
 朱继亦,任建伟,李葆勇,等. 基于 LED 的光谱可调光

743

源的光谱分布合成[J].发光学报,2010,31(06): 882-887.

- [8] LIU Hongxing, SUN Jingxu, LIU Zexun. Design of integrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20 (07):1447-1454. (in Chinese) 刘洪兴,孙景旭,刘则洵,等. 氙灯和发光二极管作光 源的积分球太阳光谱模拟器[J]. 光学 精密工程, 2012,20(07):1447-1454.
- [9] ZHENG Shaolin, WANG Xia, JIN Weiqi, et al. Research of night sky radiation spectral matching method based on genetic algorithm [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45 (3):133 137. (in Chinese)

郑少林,王霞,金伟其,等.基于遗传算法的夜天光光

谱匹配方法研究[J]. 光子学报, 2016, 45(3):
133-137.

- [10] TU Zhenhua, JI Baoping, MENG Chaoying, et al. Analysis of NIR characteristic wavelengths for apple flesh firmness based on GA and iPLS[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(10):2760 2764. (in Chinese) 屠振华,籍保平, 孟超英,等. 基于遗传算法和间隔偏 最小二乘的苹果硬度特征波长分析研究[J]. 光谱学 与光谱分析, 2009, 29(10):2760 - 2764.
- [11] Liebe C C, Alkalai L. Miero APS based star tracker[J]. IEEE,2002,5(3):9-16.
- [12] ZHANG Yimo. Applied optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2008. (in Chinese)
 张以谟.应用光学[M].北京:电子工业出版社,2008.