

文章编号: 1003-501X(2010)02-0065-04

# 星模拟器星光颜色模拟的初步研究

胡宜宁<sup>1,2</sup>, 巩岩<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 针对当前星模拟器完全丢失恒星光谱信息的缺陷, 本文进行了星光颜色模拟方面的初步研究。首先, 选择合适的星表并确定要进行颜色模拟的恒星星号, 得到该星色指数等一系列信息; 同时, 根据有关资料, 推导出恒星星色指数与色温之间的函数关系; 至此, 确定该星色温。其次, 由黑体辐射公式, 计算出黑体在此温度下的辐射特性。然后, 根据色度学原理, 把黑体在此温度下的辐射量刺激值积分, 得到该色温的总刺激值, 归一化就可得到相应的色度坐标, 完成了恒星的星光颜色模拟。最后, 说明并解释了本研究方案的不足之处。模拟实验结果证明了星光颜色模拟的可行性。

**关键词:** 星模拟器; 颜色模拟; 黑体辐射; 普朗克轨迹

中图分类号: V351.37

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.02.012

## Preliminary Research on Color Simulation of Stars in a Star Simulator

HU Yi-ning<sup>1,2</sup>, GONG Yan<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** A preliminary research on color simulation of stars was done to overcome the limitation of lack of spectrum information of stars in a star simulator nowadays. First of all, choose the suitable star catalog, decide the star number which would be researched on color simulation, and find the color index of the star. Simultaneously, deduce the functional relationship between the color index and the color temperature. And the color temperature of the star was decided. Then, calculate the radiation property of the blackbody under the color temperature. After that, according to the theory of colourimetry, integrate the stimulus values of the blackbody and normalize the results to get the corresponding colourimetry coordinates. Therefore, the color simulation of stars is implemented. Finally, explain the limitation of the research program. The experimental results show the feasibility of color simulation of stars.

**Key words:** star simulator; color simulation; blackbody radiation; Planckian locus

## 0 引言

空间飞行器发展至今, 越来越趋向于采用空间姿态敏感器对飞行器进行实时姿态的捕获与测量。确定航天飞行器姿态的一般方法是选择一个可靠的参照系, 如地球、太阳或恒星等<sup>[1-2]</sup>。目前, 精度最高的姿态敏感器是星敏感器, 比惯性陀螺、地球敏感器、太阳敏感器的测量精度要高一个数量级<sup>[3-5]</sup>。

近些年来, 随着空间技术的发展, 星敏感器技术也有了长足的进步, 这也就对星敏感器的检测、标校技术和装置提出了更高的要求, 即对星模拟器提出了更高的技术要求, 如视场大, 精度高, 动态性能好, 设备小型化等。但是, 由于理论与技术上的复杂性, 截至目前为止, 研制成功的星模拟器显示模式几乎全是单色显示, 这样, 就完全丢失了恒星辐射光谱的一切信息。

针对如此情况, 本文对星模拟器中星光的颜色模拟展开了初步研究。根据恒星的色指数, 拟合出恒

收稿日期: 2009-06-15; 收到修改稿日期: 2009-08-28

基金项目: 国家重点实验室基金资助项目(06133FQ062)

作者简介: 胡宜宁(1982-), 男(汉族), 安徽安庆人。博士研究生, 主要研究工作是虚拟显示技术。E-mail: cheering82@163.com。

星的色温,进而模拟出恒星的颜色。实际上,影响恒星色温的因素,除去色指数外,还有金属丰度、表面重力等影响。由于这些因素过于复杂,本文并未对此加以考虑<sup>[6]</sup>。

### 1 星光颜色模拟基础

#### 1.1 模拟原理

可见,天文学中至少有两种与恒星光谱有关的系统划分标准。哈佛分类法直接根据恒星的谱线进行分类,直观性强,却很难进行定量分析<sup>[7]</sup>;测光系统利用恒星的色指数,如果能建立其与色温之间的函数关系,就为我们进一步研究星光颜色模拟提供了定量分析计算的条件<sup>[8-9]</sup>。

综上所述,我们选择恒星测光系统的色指数指标,作为星光颜色模拟方案的输入数据。为此,我们特地选用了耶鲁亮星星表(Bright Star Catalog, BSC)作为模拟软件数据。

#### 1.2 模拟思路

- 1) 推导出恒星色指数与色温之间的函数关系;
- 2) 根据黑体辐射公式,计算在可见光范围各个波长的辐射量;
- 3) 根据色度学原理,计算该色温的光谱轨迹色度坐标。

具体步骤如图 1 所示。

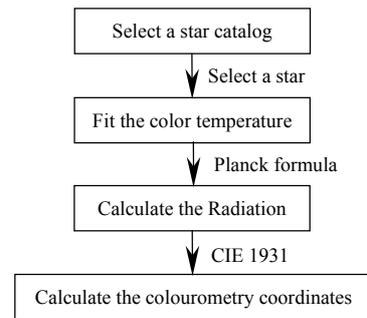


图 1 颜色模拟步骤

Fig.1 Steps of color simulation

### 2 星光颜色模拟步骤

#### 2.1 色指数到色温的推导

根据辐射度学的相关知识,颜色反映了辐射中不同频率的光子所占的比例。色温低,则长波(低频)成分多,辐射体偏红;反之,色温高,则短波(高频)成分多,辐射体偏蓝色。另一方面,由于 B 波段比 V 波段短,对于温度较高的恒星,测得的 B 星等比 V 星等小,则该星的色指数  $B-V < 0$ ;反之,对于温度较低的恒星,测得的 B 星等大于 V 星等,色指数  $B-V > 0$ 。这是色指数可以表征天体颜色的原理,也是色指数推导色温的定性分析。

画出色指数-色温关系图<sup>[10]</sup>,见图 2。

对于色指数-色温之间的关系,一般计算时,有个大致的经验公式:

$$T_c = \frac{7900}{(B-V) + 0.72} \tag{1}$$

见图 3。可见,在色指数较大时( $B-V > 0.4$ )时,经验公式与所给数据符合较好。而在色指数较小( $B-V < 0.4$ )时,误差较大。因此,需要拟合一个新的色指数-色温公式。

由图 2 可看出,曲线在  $B-V=0$  左右有个拐点,因此取分段函数拟合曲线。

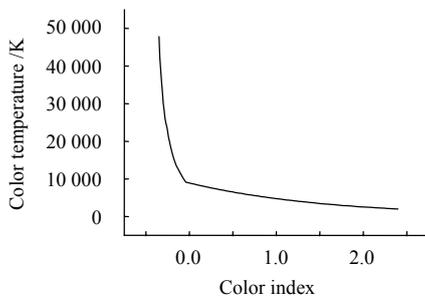


图 2 色指数-色温关系图

Fig.2 Relationship between color-index and temperature

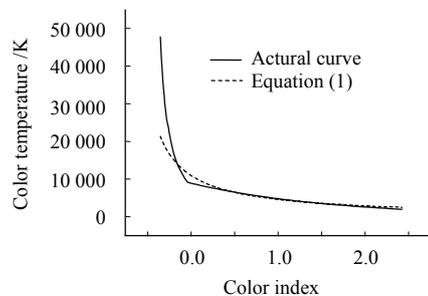


图 3 经验公式曲线

Fig.3 Empirical formula curve

设色指数  $B-V$  为自变量  $x$ , 色温为因变量  $y$ 。

当  $B-V < 0$  时,为使拟合方程形式简单,采用一阶指数衰减拟合。拟合曲线方程为

$$y = Ae^{-x/t} + y_0 \tag{2}$$

其中:  $A=1\ 079.206\ 44$ ,  $t=0.098\ 24$ ,  $y_0=8\ 180.594\ 19$ 。相关系数平方  $R^2=0.996\ 58$ 。函数曲线见图 4。

当  $B-V \geq 0$  时, 仍采用一阶指数衰减拟合。拟合方程为

$$y = Ae^{-x/t} + y_0 \tag{3}$$

其中:  $A=8\ 906.094\ 11$ ,  $t=1.597\ 61$ ,  $y_0=3.633$ 。相关系数平方  $R^2=0.999\ 98$ 。函数曲线见图 5。

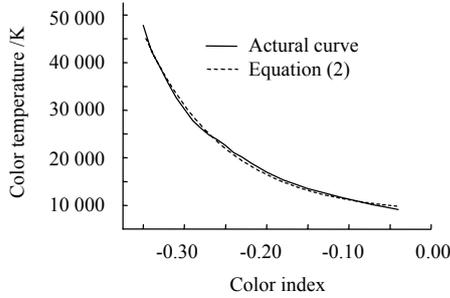


图 4  $B-V \leq -0.04$  时的拟合曲线

Fig.4 Fitting curve when  $B-V \leq -0.04$

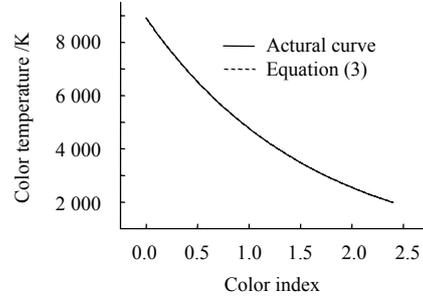


图 5  $B-V \geq 0$  时的拟合曲线

Fig.5 Fitting curve when  $B-V \geq 0$

因此, 恒星色指数与色温之间的函数关系为

$$y = \begin{cases} A_1 e^{-x/t_1} + y_{01}, & x < 0 \\ A_2 e^{-x/t_2} + y_{02}, & x \geq 0 \end{cases} \tag{4}$$

其中:  $A_1=1\ 079.206\ 44$ ,  $t_1=0.098\ 24$ ,  $y_{01}=8\ 180.594\ 19$ ;  $A_2=8\ 906.094\ 11$ ,  $t_2=1.597\ 61$ ,  $y_{02}=3.633$ 。

## 2.2 黑体辐射公式

物理学家发现, 任何固体或液体在任何温度下都能以电磁波形式向周围辐射能量。在一定时间内, 辐射能量的大小以及辐射状态按波长的分布都与温度有关。这种辐射在量值方面和按波长分布方面都取决于辐射体的温度, 因此叫做热辐射。用普朗克(Planck)公式可描述黑体辐射分布

$$W(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \tag{5}$$

式中:  $W(\lambda, T)$ 代表黑体在绝对温度  $T$ 下, 波长 $\lambda$ 时的辐射出射度;  $h$ 为普朗克常数, 值为  $6.626\ 196 \times 10^{-34}$  J·s;  $c$ 为光速, 值为  $2.997\ 925 \times 10^8$  m/s;  $k$ 为波尔兹曼常数, 值为  $1.380\ 622$  J/K<sup>[10]</sup>。

根据黑体辐射公式, 可算出绝对黑体在任一温度条件下, 在各个波长的辐射量。

## 2.3 光谱轨迹色度坐标

在 CIE 1931xy 色度图中, 系以  $x$  和  $y$  对颜色定义。  $x$  色度坐标相当于红原色的比例, 即  $R/(R+G+B)$ ,  $y$  色度坐标相当于绿原色比例, 即  $G/(R+G+B)$ 。光谱轨迹上的各点代表 380 nm(紫色)到 780 nm(红色)之间的所有单色光, 从紫端到红端的连接直线则是光谱上不存在的颜色, 直线与光谱轨迹组成的闭合曲线就是色三角。在色三角内包括一切物理上能实现的颜色。

接着, 在 CIE 1931xy 色度图中画出黑体辐射的普朗克轨迹。首先, 根据黑体辐射公式(式(5))计算出一定温度范围内(如 1 000~50 000 K)的黑体在不同可见光波段(380~780 nm)的辐射量。在每个具体的可见光波长区, 都有对应红绿蓝的光谱三刺激值。将一个特定的温度在各个波长的辐射量对应的光谱三刺激值积分, 就计算出该温度黑体辐射出的色度学指标。对其进行归一化处理, 得到黑体辐射的普朗克轨迹<sup>[11]</sup>。

## 2.4 模拟结果

经过以上步骤, 星表的原始测光数据转化为 CIE 色度坐标。结合耶鲁亮星星表(BSC)的其它信息, 如历元 2000 的赤经赤纬、自行、视差等, 再结合星模拟器技术指标, 就可设计出具有星光颜色模拟功能的星图软件。用户指定当前的光轴位置与卫星旋转角, 星敏传感器标定所需要的模拟星图就可完全由软件提供。

通过自行研发的星图软件, 可以达到模拟星光颜色的要求。在星敏传感器方面, 色温可能会因此成为星图识别算法的一个重要参量, 从而引发星敏传感器 CCD 和识别算法的技术发展; 即使就对于目前的星敏感

器而言, CCD 本身也具有光谱响应特性, 若是在导航星位置匹配基础上, 再加上其颜色信息, 就更接近星敏感器的太空工作环境, 这在星图模拟方面是长足的进步<sup>[12]</sup>。

这种星光颜色模拟方案原理简单, 计算复杂度较低, 误差较大。导致误差的原因有:

1) 现实世界中, 并不存在绝对的黑体。因此, 把恒星当作黑体考虑, 只是一种近似, 当前也没有其它更好的办法。如果把恒星看作现实存在的选择性辐射体, 势必要对所有恒星进行具体的建模, 需要分析恒星的物理、化学性质, 计算量将是一个天文数字。

2) 恒星的色指数能反映恒星的温度, 但除此以外, 恒星温度还受到恒星的金属丰度、表面重力等因素的影响。本文在有关数据的基础上, 拟合出色指数-色温之间的函数关系。实际上, 因为有数据的保障, 所以此方法还是可行的。

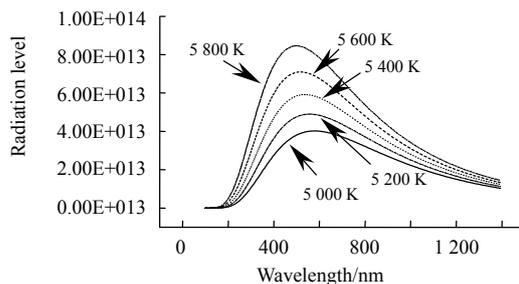


图6 不同温度下的黑体辐射曲线

Fig.6 Blackbody radiation curve with different temperatures

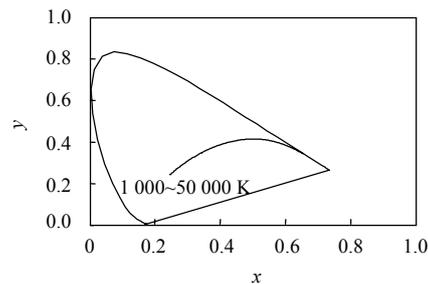


图7 普朗克轨迹

Fig.7 Planckian locus

### 3 结论

本文以当前星模拟器软件缺陷为切入点, 提出了进行恒星颜色模拟的研究。先推导出恒星色指数与色温之间的函数关系, 再根据黑体辐射公式计算黑体在各个温度下的辐射特性, 由色度学知识进而计算出其光谱三刺激值。归一化后, 得到色指数与 RGB 坐标之间的关系, 完成了恒星颜色模拟的初步研究。包含有星光颜色模拟内容的星图生成软件采用 Visual Basic 6.0 中文版开发, 在 Windows XP 中文版下运行良好。

#### 参考文献:

- [1] 巩岩, 胡宜宁, 赵阳. 基于 DLP 的小型星模拟器设计 [J]. 光学 精密工程, 2007, **15**(11): 1698-1703.  
GONG Yan, HU Yi-ning, ZHAO Yang. Design of a mini star simulator based on digital optical processing [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2007, **15**(11): 1698-1703.
- [2] 何灵娜, 崔维鑫, 裴云天. 基于 CMOS APS 的星敏感器光学系统结构与优化 [J]. 光电工程, 2007, **34**(11): 24-30.  
HE Ling-na, CUI Wei-xin, PEI Yun-tian. Design and optimization of the optical system of the star sensor based on CMOS APS [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2007, **34**(11): 24-30.
- [3] 袁家虎, 张建荣, 贺善金. 导航星敏感器探测灵敏度研究 [J]. 光电工程, 1999, **26**(6): 1-6.  
YUAN Jia-hu, ZHANG Jian-rong, HE Shan-jin. A Study on Detection Sensitivity of Navigation Star Sensor [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 1999, **26**(6): 1-6.
- [4] 陈元枝, 郝志航. 适用于星敏感器的星图识别方法 [J]. 光电工程, 2000, **27**(5): 5-10.  
CHEN Yuan-zhi, HAO Zhi-hang. A Stellar Map Identification Method Suitable for Star Sensor [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2000, **27**(5): 5-10.
- [5] 胡宜宁, 巩岩. 动态星图显示算法的设计与实现 [J]. 宇航学报, 2008, **29**(3): 849-853.  
HU Yi-ning, GONG Yan. Design and Realization of a Dynamic Display Algorithm for Star Map [J]. **Journal of Astronomy**, 2008, **29**(3): 849-853.
- [6] Maki Sekiguchi, Masataka Fukugita. A Study of the B-V Color-Temperature Relation [J]. **The Astronomical Journal** (S0004-6256), 2000, **120**(8): 1072-1084.

( 下转第 73 页 )

- XU Ke-jun. **Research and Application of Capacitive Transducer** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994: 1-12.
- [2] 张银芳. 容栅位移传感器的工作原理及其特点[J]. 航空精密制造技术, 2005, **41**(4): 58-59.  
ZHANG Yin-fang. Principle and Characteristic of Capacitive Displacement Transducer [J]. **Aviation Precision Manufacturing Technology**, 2005, **41**(4): 58-59.
- [3] Kim M, Moon W, Yoon E, *et al.* A New Capacitive Displacement Sensor with High Accuracy and Long-range [J]. **Sensors and Actuators A: Physical**(S0924-4247), 2006, **130/131**: 135-141.
- [4] Andermo N I. Capacitance-type measuring device for absolute measurement of positions: US, 5053715 [P]. 1991-10-01.
- [5] 刘伟广, 王永明. 一种新颖的容栅数显位移传感器[J]. 计量技术, 1996(8): 7-9, 30.  
LIU Wei-guang, WANG Yong-min. A New Digital Display Capacitive Displacement Transducer [J]. **Measurement Technique**, 1996(8): 7-9, 30.
- [6] 毛谦敏, 刘安坤, 沈为民, 等. 纳米级光栅容栅融合测量系统研究[J]. 传感技术学报, 2006, **19**(5): 1519-1522.  
MAO Qian-min, LIU An-kun, SHEN Wei-min, *et al.* Research on Fusion Measurement System of Grating and Capacitive Grating with Nanometer Resolution [J]. **Chinese Journal of Sensors and Actuators**, 2006, **19**(5): 1519-1522.
- [7] 张增耀, 骆家贤. 容栅技术 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2002: 4-13.  
ZHANG Zeng-yao, LUO Jia-xian. **Capacitive Grating Technology** [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2002: 4-13.
- [8] 王习文, 齐欣, 宋玉泉. 容栅传感器及其发展前景[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2003, **33**(2): 89-94.  
WANG Xi-wen, QI Xin, SONG Yu-quan. Capacitive Transducer and its Development Prospect [J]. **Journal of Jilin University of Technology: Natural Science Edition**, 2003, **33**(2): 89-94.
- [9] Mohan N M, Shet A R, Kedarnath S, *et al.* Digital Converter for Differential Capacitive Sensors [J]. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**(S0018-9456), 2008, **57**(11): 2576-2581.
- [10] 乐秋红, 王百鸣, 洪岳炜, 等. 一种 12 位双斜积分式 A/D 转换器[J]. 微电子学, 2008, **38**(4): 558-561.  
YUE Qiu-hong, WANG Bai-ming, HONG Yue-wei, *et al.* A 12-Bit Dual-Ramp Analog-to-Digital Converter [J]. **Microelectronics**, 2008, **38**(4): 558-561.

~~~~~  
( 上接第 68 页 )

- [7] Jesus Hernandez, Nuria Calvet, Cesar Briceno, *et al.* Spectral Analysis and Classification of Herbig Ae/Be Stars [J]. **The Astronomical Journal** (S0004-6256), 2004, **127**(3): 1682-1701.
- [8] Bessell M S. UBVRI Passbands [J]. **Astronomical Society of the Pacific** (S0004-6280), 1990, **102**(10): 1181-1199.
- [9] Arlo U Landolt. UBVRI Photometric Standard Stars around the Sky at  $-50^\circ$  Declination [J]. **The Astronomical Journal** (S0004-6256), 2007, **133**(6): 2502-2523.
- [10] Holberg J B, Pierre Bergeron. Calibration of Synthetic Photometry Using DA White Dwarfs [J]. **The Astronomical Journal** (S0004-6256), 2006, **132**(9): 1221-1233.
- [11] 符泰然, 程晓舫, 钟茂华, 等. 基于辐射光谱的相关色温与热力学温度相关性分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2006, **26**(11): 1984-1987.  
FU Tai-ran, CHENG Xiao-fang, ZHONG Mao-hua, *et al.* Correlativity Analysis Based on Radiation Spectrum of Correlated Color Temperature and Thermodynamic Temperature of a Radiating Source [J]. **Spectroscopy and Spectral Analysis**, 2006, **26**(11): 1984-1987.
- [12] 陈元枝, 郝胜国, 郝志航. 连通聚类星识别方法 [J]. 光学 精密工程, 2000, **8**(3): 217-220.  
CHEN Yuan-zhi, HAO Sheng-guo, HAO Zhi-hang. Method for star identification using connection cluster [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2000, **8**(3): 217-220.