

模拟红外星体角位置的高精度测量方法

何大华,段溪川

(华中光电技术研究所,武汉光电国家实验室,湖北 武汉 430223)

摘要:天文导航以其高精度、自主式、全天候的特点成为卫星导航、惯性导航和无线电导航之外的另一种重要的导航手段。由于受天气状况或环境因素的影响,实际星空的可见性不能得到保障,使得天文导航产品的研发测试受到严重制约,因此有必要利用高精度星模拟器开展相关研究。建立了一套基于平行光管的红外星模拟器,提出了以 Leica TM6100A 经纬仪为主要测量工具的高精度红外星体角位置测量方法,该方法的测量重复性优于 $5''$ 。

关键词:天文导航;星模拟器;经纬仪;平行光管;角位置

中图分类号:TN206 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.05.007

High precision measurement method for angular position of simulated infrared stars

HE Da-hua, DUAN Xi-chuan

(Huazhong Institute of Electro-Optics, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430223, China)

Abstract: With its high accuracy, autonomy and all-weather characteristics, astronomical navigation has become another important navigation means besides satellite navigation, inertial navigation and radio navigation. Due to the influence of weather conditions or environmental factors, the real sky visibility could not be guaranteed, and research and development tests of navigation products are severely constrained, therefore it is necessary to carry out relevant research with a high precision star simulator. A collimator based infrared star simulator was established, and a high precision measurement method for angular position of the simulated stars was proposed with Leica TM6100A theodolite as a main tool, the measurement method has a good repeatability of less than $5''$.

Key words: celestial navigation; star simulator; theodolite; collimator; angular position

1 引言

天文导航以其高精度、自主式、全天候的特点成为卫星导航、惯性导航和无线电导航之外的另一种重要的导航手段。天文导航可以利用星光进行独立导航,也可以与卫星导航或惯性导航形成组合导航系统,例如天文/GPS、天文/北斗或天文/惯性组合导航系统等。在不同的应用领域,人们进行了一些特殊的天文导航技术研究^[1-4],还发展了多种天文

导航定位算法^[5-7],使天文导航技术日趋成熟,应用领域不断扩大。

星敏感器或星体跟踪器是天文导航系统的关键设备,它的主要作用是获取自然星体的准确空间角位置,用于空间探测器高精度姿态解算和导航定位,其性能在很大程度上决定了天文导航系统的性能。星模拟器是星敏感器的地面标定设备,其精度水平直接影响星敏感器标定的准确性,进而决定空间探测器姿

作者简介:何大华(1973-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为红外成像技术及水下激光成像技术。E-mail: 470444534@qq.com

收稿日期:2017-09-19

态测量的精确性,故高精度的星模拟器是研制高精度星传感器的重要保证,而模拟星体角位置的高精度测量是其中的关键一环。虽然星模拟器的精度从理论分析角度可达数角秒甚至亚角秒的水平,但目前国内实际上能达到的精度约为 $10''^{[8-11]}$ 。

实践表明,在白天使用近红外波段测星实现导航定位比可见光波段效率高得多^[5],因此除可见光波段测星外,红外测星也成为重要的研究方向,这就对红外星模拟器提出了要求。然而,目前对星模拟器的研究主要集中在可见光波段,对红外星模拟器较少涉及。基于此,本文在建立一套红外星模拟器系统的基础上,提出了一种模拟红外星体角位置的测量方法,其高度角和方位角的测量精度均优于 $5''$ 。

2 红外星模拟器系统简介

我们为国内某大型企业的天文导航研究室研制了一套红外星模拟器系统,用于开展有关天文导航及天惯组合导航技术的研究工作,本文主要介绍该系统的星模拟器、方位基准镜、高精度双轴转台和计算机等几部分,如图 1 所示。

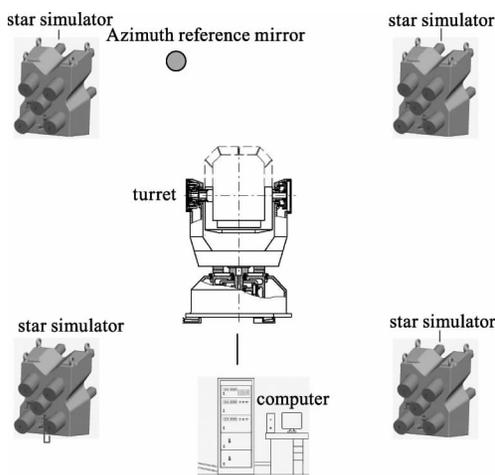


图 1 红外星模拟器系统的组成

Fig. 1 Composition of the infrared star simulator system

星模拟器一共 4 台,每台星模拟器由 5 根平行光管组成,每根平行光管模拟一颗恒星发出的平行光,一共可以模拟 20 颗恒星。每台星模拟器的 5 根平行光管的光轴交于一点,光轴与水平的夹角在 $25^\circ \sim 35^\circ$ 之间,这是通常测星的最佳高度角范围。

方位基准镜提供正北方位基准,其法线水平指向正北方向,作为模拟星方位角和俯仰角零位基准,方位基准镜的高度与转台中心一致。在测量红外模拟星角位置时需要利用 Leica TM6100A 经纬仪反复

与方位基准镜进行准直,Leica TM6100A 经纬仪的操作可见于公开的设备使用说明书。

双轴转台为外方位、内俯仰结构形式,台面上安装星传感器,用来对模拟红外星体进行成像,通过转台的转动可改变星传感器的姿态,以便观测不同的模拟红外星体。

计算机主要对转台的姿态进行控制。

在系统安装布置时,双轴转台、方位基准镜以及星模拟器均安装于隔振地基上。以转台中心为原点,方位基准镜处于正北方向并与转台中心等高,4 个星模拟器分别位于东北、东南、西南、西北方向,并置于高约 2 m 的隔振立柱上,20 根平行光管的光轴均通过原点,这样就形成了以原点为观察点的包含 20 颗恒星的模拟星空。由于平行光管与星传感器均具有一定口径,允许有数毫米的安装误差。

3 模拟红外星体角位置测量方法

3.1 准备工作

对于可见光模拟星体,可以直接利用经纬仪进行角位置测量,十分方便,对于模拟红外星体,可采用本文的方法进行测量,准备工作包括:

(1) 调整方位基准镜

方位基准镜安装在精密光学调整架上,高度与转台中心一致,利用 Leica TM6100A 经纬仪的调平和准直功能将方位基准镜的法线调整至水平方向。为说明方便起见,假定调整后方位基准镜的方位为正北方向(方位基准镜的实际方位角可通过陀螺经纬仪精确标定)。方位基准镜调整之后将长期保持姿态并用作测量的统一基准。方位基准镜调整完成后仍存在一定的系统误差。

(2) 星传感器背面贴反射镜

在星传感器背面贴一面反射镜,将反射镜法线方向作为星传感器光轴方向。

(3) 安装星传感器

星传感器安装在转台台面上,调整其高度,使星传感器光学系统的入瞳中心与转台中心重合(允许有一定误差)。

3.2 模拟红外星体俯仰角的测量方法

以某一颗模拟红外星体为例说明俯仰角的测量步骤如下:

(1) 将经纬仪 Leica TM6100A 调整至水平,并与方位基准镜准直。如图 2 所示。

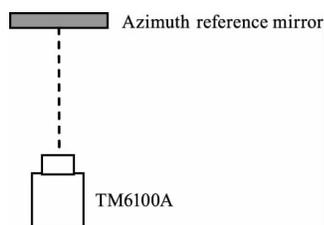


图2 TM6100A 与方位基准镜准直

Fig. 2 Collimation of TM6100A with azimuth reference mirror

(2) 将卡式光管放置在 TM6100A 与方位基准镜之间,并调整至与 TM6100A 准直,即卡式光管的十字丝像处于分划板中心,此时卡式光管模拟一颗处于正北方位的水平恒星。如图 3 所示。

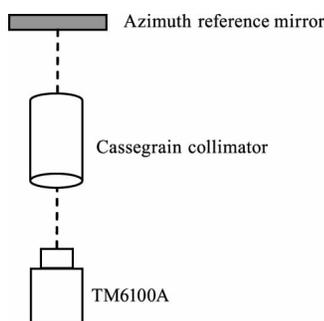


图3 TM6100A 与卡式光管准直

Fig. 3 Collimation of TM6100A with Cassegrain collimator

(3) 转台上电,将星敏感器安装到转台台面上,通过调节转台的方位角和俯仰角使 TM6100A 与星敏感器背面反射镜准直,此时靶面上出现卡式光管的十字丝像,计算出十字丝像中心的脱靶量 (x_0, y_0) ,该点对应星敏感器的视场中心。由于星敏感器背面反射镜的安装误差, (x_0, y_0) 不一定是星敏感器靶面的中心。当标定出 (x_0, y_0) 后,该值即作为星敏感器的固有参数,其误差属于系统误差。如图 4 所示。

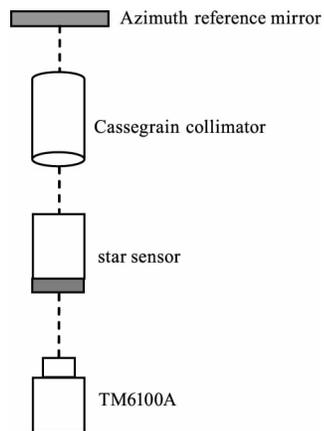


图4 水平状态下 TM6100A 与星敏感器背面的反射镜准直
Fig. 4 Collimation of TM6100A with reflector at the back of the star sensor in horizontal state

(4) 将转台的方位和俯仰各转过一个角度,使第一颗模拟星进入星敏感器视场,微调转台的方位角和俯仰角,使模拟星的脱靶量变为 x_0 和 y_0 。如图 5 所示。

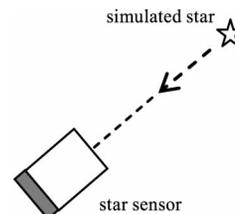


图5 星敏感器瞄准模拟星体

Fig. 5 Star sensor aiming at the simulated star

(5) 将 TM6100A 放置在较低的三脚架上,首先调平,然后调节俯仰轴,使 TM6100A 与星敏感器背面反射镜准直,读出 TM6100A 的俯仰角,即为模拟星体的高度角。如图 6 所示。

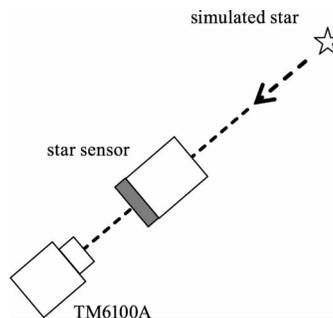


图6 测星状态下 TM6100A 与星敏感器背面反射镜准直
Fig. 6 Collimation of TM6100A with reflector at the back of the star sensor in aiming at the star state

3.3 模拟红外星体方位角的测量方法

以某一颗模拟红外星体为例说明方位角的测量步骤,方位角的测量需要两台 Leica TM6100A。

(1) 将经纬仪 TM6100A1 与方位基准镜准直,再将 TM6100A2 与方位基准镜准直。如图 7 所示。

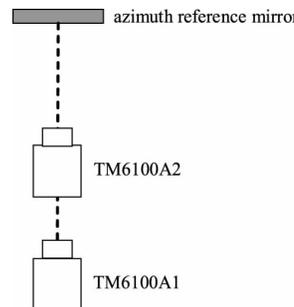


图7 两台 TM6100A 依次与方位基准镜准直
Fig. 7 Two sets of TM6100A collimating with azimuth reference mirror in turn

(2) 将卡式光管放置在 TM6100A2 与方位基准镜之间, 并调整至与 TM6100A2 准直。如图 8 所示。

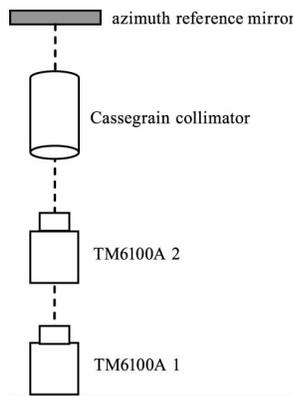


图 8 TM6100A2 与卡式光管准直

Fig. 8 Collimation of TM6100A2 with Cassegrain collimator

(3) 转台上电, 将星敏感器安装到转台台面上, 调整其光轴使 TM6100A2 与星敏感器背面的反射镜准直, 此时靶面上出现卡式光管的十字丝像, 计算出十字丝像中心的脱靶量 x_0 和 y_0 。如图 9 所示。

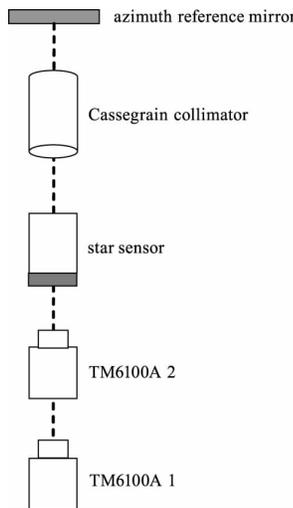


图 9 水平状态下 TM6100A2 与星敏感器背面反射镜准直

Fig. 9 Collimation of TM6100A2 with reflector at the back

of the star sensor in horizontal state

(4) 将转台的方位和俯仰各转过一个角度, 使模拟红外星体进入星敏感器视场, 微调转台的方位角和俯仰角, 使模拟星的脱靶量变为 x_0 和 y_0 。如图 10 所示。

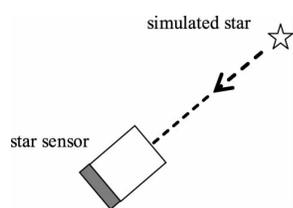


图 10 星敏感器瞄准模拟星体

Fig. 10 Star sensor aiming at the simulated star

(5) 将 TM6100A1 放置在较低三脚架上, 首先调平, 然后调节俯仰轴, 使 TM6100A1 与星敏感器背面的反射镜准直。如图 11 所示。

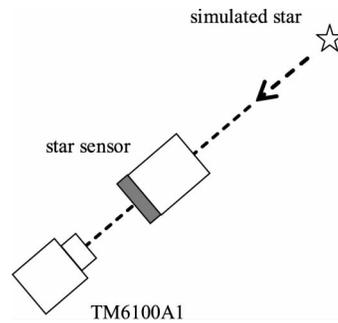


图 11 测星状态下 TM6100A1 与星敏感器背面反射镜准直

Fig. 11 Collimation of TM6100A1 with reflector at the back of the star sensor in aiming at the star state

(6) 星敏感器瞄准模拟红外星体后系统的位置关系俯视图如下。如图 12 所示。

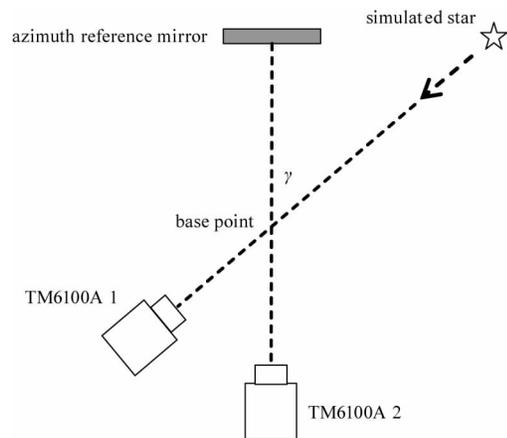


图 12 星敏感器瞄准模拟红外星体后系统俯视图

Fig. 12 System top view after star sensor aiming at the simulated infrared star

(7) 将 TM6100A1 和 TM6100A2 互准直, 分别记录下各自转过的角度 α 和 β , 则模拟红外星体的方位角 $\gamma = \pi - \alpha - \beta$ 。如图 13 所示。

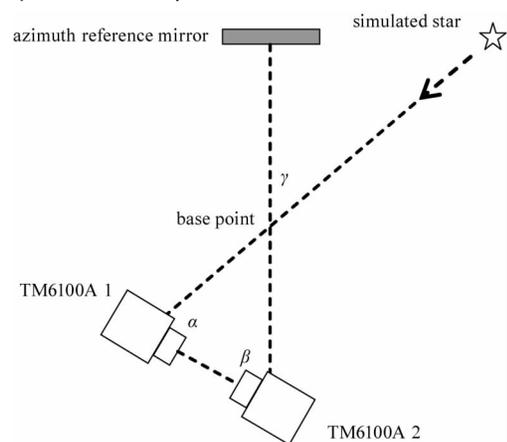


图 13 经纬仪互准直时系统俯视图

Fig. 13 System top view after theodolites mutual collimation

3.4 测量方法说明

(1) 关于星敏感器的视场中心 (x_0, y_0)

通过在星敏感器背面贴反射镜的方法获得星敏感器的视场中心 (x_0, y_0) , 该参数为星敏感器的固有参数, 一次标定后将固定不变, 因此在俯仰角和方位角测量步骤中取相同值。

(2) 卡式光管的作用

卡式光管是反射式平行光管, 其光路特性与光波波长无关, 因此, 从经纬仪中观察到的可见光十字丝像与星敏感器中观察到的红外十字丝像是同轴的。通过卡式光管标定基准星的角位置后, 即可将经纬仪与红外星敏感器结合起来对模拟红外星体的角位置进行测量。

4 测量误差分析

本文只分析随机误差, 并用测量的重复性来检验测量精度, 暂不分析系统误差。根据所选仪器的精度, 设 TM6100A 调平误差为 $1''$, 与反射镜的准直误差为 $1''$, 与卡式光管的准直误差为 $1''$, 星敏感器的单像素视场为 $4''$ 。

4.1 高度角的测量误差分析

根据测量步骤, 高度角测量误差主要包括以下几项:

- (1) TM6100A 与方位基准镜准直误差: $1''$
- (2) TM6100A 与卡式光管准直误差: $1''$
- (3) TM6100A 与星敏感器背面反射镜准直误差: $1''$
- (4) 星敏感器测星误差: $4''$
- (5) TM6100A 调平误差: $1''$
- (6) TM6100A 与星敏感器背面反射镜准直误差: $1''$

可假定这些误差互不相关且正交, 则高度角测量误差的理论值为:

$$\delta_h = \sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2 + 4^2 + 1^2 + 1^2} \approx 4.6''$$

4.2 方位角的测量误差分析

根据测量步骤, 方位角测量误差主要包括以下几项:

- (1) TM6100A1 和 TM6100A2 与方位基准镜准直误差: 各为 $1''$
- (2) TM6100A2 与卡式光管准直误差: $1''$
- (3) TM6100A2 与星敏感器背面反射镜准直误差: $1''$

(4) 星敏感器测星误差: $4''$

(5) TM6100A1 调平误差: $1''$

(6) TM6100A1 与星敏感器背面反射镜准直误差: $1''$

(7) TM6100A1 与 TM6100A2 的互准直误差: 各为 $1''$

可假定这些误差互不相关且正交, 则高度角测量误差的理论值为:

$$\delta_h = \sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 4^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2} \approx 4.9''$$

4.3 测量结果

对 20 颗模拟红外星体的俯仰角和方位角分别进行了 5 次测量, 对 20 组俯仰角数据 (每组 5 个) 以及 20 组方位角数据 (每组 5 个) 进行统计分析, 发现其标准差均在 $3'' \sim 5''$ 之间, 因此俯仰角和方位角测量误差均小于 $5''$, 与理论分析值吻合。有一部分数据的测量误差在 $4''$ 以内, 小于理论分析值, 这可解释为尽管星敏感器的单像素视场角为 $4''$, 但由于采用了高精度星像中心提取算法, 使得测星精度实际上已经达到亚像素水平。

5 结论

可见光模拟星体的角位置可以用经纬仪方便地标定, 但对模拟红外星体的角位置测量目前还缺乏有效手段。为提高模拟红外星体的角位置测量精度, 建立了一套基于平行光管的红外星模拟器, 提出了以 Leica TM6100A 经纬仪为主要测量工具的高精度红外星体角位置测量方法, 该方法的测量重复性优于 $5''$ 。从误差分析可以看出, Leica TM6100A 经纬仪对测量误差的影响很小, 主要取决于星敏感器的测星误差, 如果适当提高星敏感器的测星精度, 则模拟红外星体角位置的测量精度将进一步提高。从测量方法中星敏感器的使用来看, 只用到了星敏感器的光学系统和探测器部分, 而这部分的测星精度远优于星敏感器整机的精度, 因此, 测量环节中的星敏感器并非提高测量精度的瓶颈所在。

本文仅对模拟红外星体角位置测量的随机误差进行了分析, 对系统误差的分析是下一步的工作。

参考文献:

- [1] LI Xiaojun, YIN Zhixiang, CAI Shunzhong. On the celestial navigation of the lunar probe on the lunar surface[J]. Journal of Geomatics, 2015, 40 (4): 26 - 28. (in Chi-

- nese)
- 李小军,殷志祥,蔡顺中. 月面探测器天文导航研究[J]. 测绘地理信息, 2015, 40(4): 26 - 28.
- [2] RUI Zhenfeng, YING Rongrong. Problems and solutions of celestial navigation in the arctic ocean[J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(2): 8 - 13. (in Chinese)
芮震峰, 应荣榕. 北冰洋航行应用天文导航的问题及对策[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(2): 8 - 13.
- [3] LI Hailin, WU Dewei. Study on the autonomous celestial navigation of near space vehicles with hypersonic speed based on non-keplerian orbits [J]. Chinese Journal of Space Science, 2012, 32(6): 874 - 880. (in Chinese)
李海林, 吴德伟. 基于非开普勒轨道的高超声速临近空间飞行器自主天文导航研究[J]. 空间科学学报, 2012, 32(6): 874 - 880.
- [4] WANG Guanghui, GUO Zhengdong, ZHU Hai, et al. Capability analysis of polarized light celestial positioning[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(1): 11 - 14. (in Chinese)
王光辉, 郭正东, 朱海, 等. 偏振光天文导航定位能力分析[J]. 光子学报, 2012, 41(1): 11 - 14.
- [5] WANG Haojing. Study on celestial navigation by three fields of view star recognition [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
王昊京. 三视场恒星识别天文导航方法研究[D]. 北京: 中科院研究生院, 2012.
- [6] ZHAN Yinhu, ZHENG Yong, LUO Yabo, et al. Novel celestial navigation algorithm without initial values and iterative calculations [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2015, 32(5): 445 - 454. (in Chinese)
詹银虎, 郑勇, 骆亚波, 等. 无需初值及迭代的天文导航新算法[J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(5): 445 - 454.
- [7] LI Chonghui, LI Zhuyang, ZHENG Yong, et al. Celestial positioning analysis based on multi-star vector observation information [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013, 1(3): 62 - 65. (in Chinese)
李崇辉, 李铸洋, 郑勇, 等. 利用多星矢量观测信息进行天文导航定位技术的研究[J]. 导航定位学报, 2013, 1(3): 62 - 65.
- [8] SUN Gaofei. Study on key technique of very high precision star simulator [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
孙高飞. 甚高精度星模拟器及其关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [9] CHEN Qimeng, ZHANG Guoyu, SUN Xiangyang, et al. Optical system design of LCOS-based and high precision dynamic star simulator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(7): 1 - 7. (in Chinese)
陈启梦, 张国玉, 孙向阳, 等. 高精度 LCOS 动态星模拟器的光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 1 - 7.
- [10] SUN Gaofei, ZHANG Guoyu, JIANG Huilin, et al. Design of very high accuracy star simulator [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1730 - 1735. (in Chinese)
孙高飞, 张国玉, 姜会林, 等. 甚高精度星模拟器设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1730 - 1735.
- [11] JIANG Wenzhang, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, et al. Design of star simulator's star position measurement system combing high-precision theodolite with CCD [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2017, 40(1): 68 - 71. (in Chinese)
姜文璋, 张国玉, 孙高飞, 等. 高精度经纬仪与 CCD 相结合的星模拟器星点位置测量系统设计[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2017, 40(1): 68 - 71.