文章编号:1007-1180(2011)11-0068-07

高准直太阳模拟器的设计与仿真

陈家奇，陈兰峰，王 丽，高 雁
（中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033）

摘 要：给出了研制高准直太阳模拟器的设计技术指标，介绍了基本原理及组成，总结了模拟器光学系统外形尺寸计算方法，给出了计算通用公式。对光学系统进行了优化设计，提出了能量传输系统优化原则，指出了这种复杂的强光照明系统与其他成像系统的不同之处，然后对太阳模拟器的光机结构设计进行了阐述。最后，采用蒙特卡洛光线追迹技术对太阳模拟器进行仿真设计，仿真结果以图表形式定量给出。

关键词：太阳模拟器；光学系统；仿真设计
中图分类号：V524.2 **文献标识码**：A
DOI：10.3788/OMEI20112811.0068

Design and Simulation of High-collimating Solar Simulator

CHEN Jia-qi, CHEN Lan-feng, WANG Li, GAO Yan
(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)

Abstract: This paper gives the design specifications of high-collimating solar simulator, introduces basic principle and structure, summarizes the calculation method of the solar simulator's optical system size, and gives the general formula. This paper also optimizes the optical system, and presents the optimization principle of energy transfer system, points out the difference between the complex lighting system and other imaging systems. The design of the solar simulator's optical and mechanical structure is described. Finally, the simulation design on solar simulator using the Monte Carlo ray-tracing technique is conducted, and the simulation results are given quantitatively by diagrammatic form.

Keywords: solar simulator; optical system; simulation design

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引 言

航天器轨道姿态控制技术手段之一就是利用太阳敏感器通过对太阳光辐射的敏感来测量太阳视线与航天器某一体轴之间的夹角，进而来控制航天器轨道姿态。高准直太阳模拟器是在实验室进行试验、标定太阳敏感器的必备设备之一。太阳模拟器被用来模拟外层空间太阳光辐射特性，所谓高准直太阳模拟器指的是模拟器输出光束的准直角应与外层空间太阳光束准直角一致。高准直太阳模拟器与高精度三轴转台联用可给出相对于敏感器某一空间太阳光夹角[1]。

高准直太阳模拟器还可以作为空间有效载荷的杂光光源。由于卫星的轨道姿态控制系统配置有多种光学敏感器，同时卫星本体在太阳光的照射下会发生漫反射现象，因此，在进行轨道姿态控制系统地面实验时，利用太阳模拟器模拟和验证太阳光对光学敏感器在轨运行时产生的影响，进而验证控制系统的准确性和稳定性。此时要求太阳模拟器输出辐照度值应与外层空间太阳光辐照度一致，即1个太阳常数。

2 高准直太阳模拟器设计指标确定

由于在实验室内人工模拟太阳的辐照特性具有一定的局限性，也就是说太阳光束的准直角与光束输出的总辐照度是一对矛盾，在满足其中一项的情况下很难满足另一项。因此，在研制各种不同用途的太阳模拟器时其性能指标都应有相应的侧重。对高准直太阳模拟器来说侧重模拟太阳光束的准直角（±16′），因此，对光束总辐照度设计指标要求不做太多的苛刻要求。反之，应用于空间环境热真空实验的太阳模拟器，输出光束总辐照度指标必须要达到1个太阳常数（1 367 W/m^2），这样才能真实地模拟太空中的热真空环境。因此，这种类型的太阳模拟器输出光束的孔径角较之真实太阳的要大[2]。

高准直太阳模拟器设计指标如下：

（1）有效辐照面直径：ϕ300 mm；

（2）光束准直角：32′±2′；

（3）辐照度：0.2个太阳常数；

（4）辐照不均匀度：±4%；

（5）辐照不稳定度：±2%/h；

（6）光谱分布：氙灯光谱。

3 光学系统组成及工作原理

图1为一种高准直太阳模拟器光学系统，由椭球聚光镜、光源、平面反射镜、光学积分器组件、自准直瞄准系统和准直物镜组件组成。

基本原理：位于椭球镜第一焦点附近氙灯氙弧发出的光辐射通量，经椭球面聚光镜反射并以给定的包容角汇聚投影到椭球聚光镜第二焦面上，形成一个较大范围的辐照分布。这个较大范围的辐照分布被位于第二焦面上的由N个小元素透镜组成的光学积分器场镜阵列对称分割成N个小范围的辐照范围，并经光学积分器投影镜阵列中对应的元素透镜迭加成像到无穷远，形成一个较均匀的辐照范围。这N个被成像到无穷远的“辐照范围”再经准直系统以一定的照明孔径角（即准直角）投影到准直物镜的后焦面附近，形成一个较均匀的辐照面。这就是我们所要求的均匀辐照面[3]。

此外，在模拟器光路中利用准直物镜与附加的光学组件组成了一套模拟器自准直瞄准系统，由LED光源、发射分划板、分光棱镜1、瞄准分划板、目镜、分光棱镜2及准直物镜组成，如图2所示。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

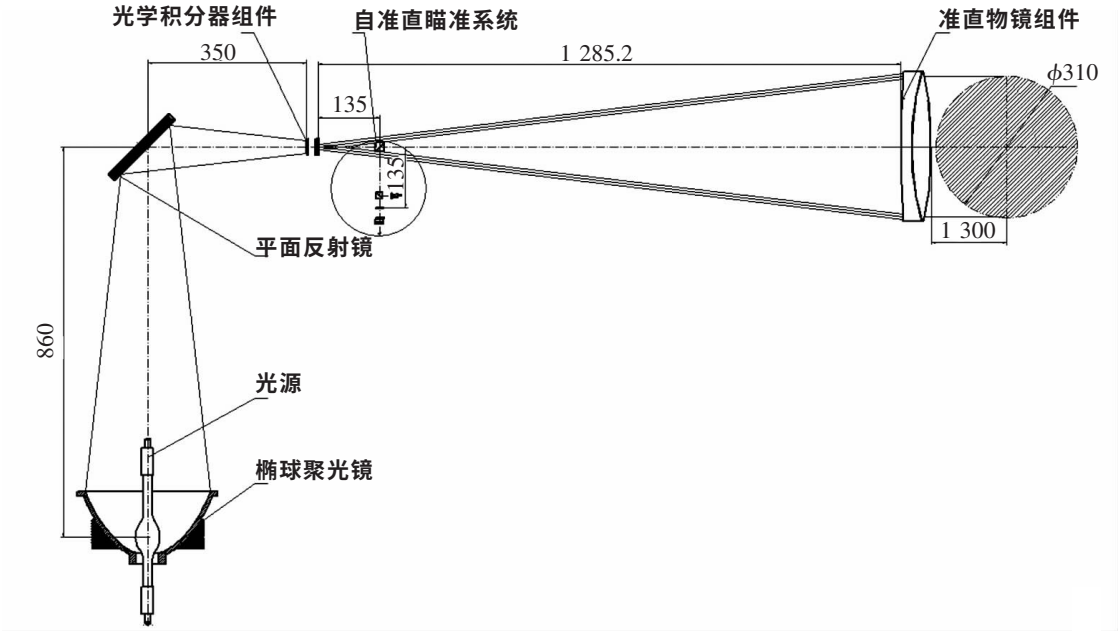


图1 准直型太阳模拟器光学系统

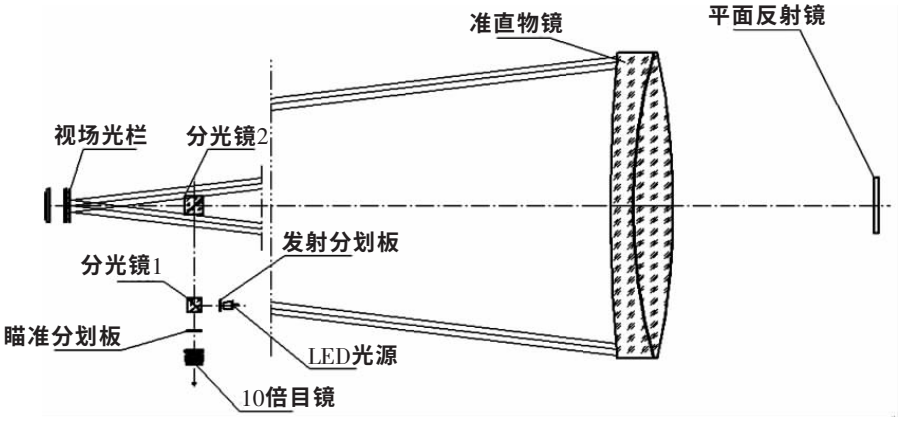


图2 自准直瞄准光学系统

4 光学系统外形尺寸

4.1 准直物镜参数

准直物镜的设计相对孔径要满足物镜的像差设计要求，即满足输出光束准直精度±2′要求。同时，设计相对孔径也是决定光学系统聚光效率因素之一。综合考虑，取辐照面积直径 ϕ 设计值是有效辐照面积直径的 α 倍。设计准直物镜相对孔经 $\phi f'=1/\lambda$。故准直物镜的焦距 $f'=\lambda\times\phi$。

取有效辐照面积直径 ϕ_0，准直物镜的有效不拦光孔径 ϕ'：

$$\phi'=\phi_0+2\times\tan\alpha\times l$$

式中：α 为光束准直角（0.266 7°）；l 为工作距离。这样可求得物镜有效相对孔径 ϕ'/f'。

图3 准直物镜组

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

选用双分离透镜结构形式设计准直物镜，如图3所示，利用两种光学玻璃材料校正色差，平凸透镜曲率半径的弯曲及间隔校正轴上及轴外单色像差[4]。在可见光0.40~0.75 μm波段范围内，校正系统像差达到要求的允限，使系统输出的平行光束满足±16′。

4.2 准直角光栏 ϕ_α

准直角光栏 ϕ_α 与光束准直角 α 和球面准直物镜焦距 f' 关系如下：

$$\phi_\alpha=2f'\tan\alpha \tag{2}$$

4.3 光学积分器镜组

光学积分器的设计相对孔径与准直反射镜的设计相对孔径相同，即为 ϕ/f'。

透镜阵列中正六边形小元素透镜数量 N 的取舍，主要从两方面考虑，一是辐照面上的不均匀度设计指标；二是光学加工实现的可行性。光学积分器每组由 N 个透镜组成，采用光胶工艺使小元素透镜拼凑在一起。

N 个正六边形元素透镜所组成的可能的通光口径应满足准直角光栏 ϕ_α。由下式计算正六边形小元素透镜的内接圆直径 $2r_{内}$：

$$2[0.582\times(2r_{内})]+3\times(2r_{内})=\phi_\alpha \tag{3}$$

外接圆直径 $2r_{外}$：

$$2r_{外}=2r_{内}/\cos30° \tag{4}$$

小元素透镜光学参数计算公式：

小元素透镜焦距 $f'_{积}$：

$$f'_{积}=2r_{内}\frac{f'}{\phi} \tag{5}$$

平凸型元素透镜光学参数如下：

$$r_1=\infty \qquad r_2=f'_{积}(n-1) \tag{6}$$

式中：n 为光学玻璃的光折射率。

取元素透镜厚度 d，光胶板厚度 d_1，积分器场镜像方主面与投影镜物方主面之间隔为焦距 $f'_{积}$，透镜间隔 L：

$$L=f'_{积}-\frac{2(d+d_1)}{n} \tag{7}$$

4.4 椭球聚光系统

取第一焦距 f_1，近轴放大倍率 $M_0=n$，第二焦距 $f_2=nf_1$。

子午面内椭圆截线方程式为：

$$y^2=2rx-(1-e^2)x^2 \tag{8}$$

式中，$2r=4\frac{f_2f_1}{f_2+f_1}$，$e=\frac{f_2-f_1}{f_2+f_1}$。

利用下列关系式求解聚光镜的出瞳：

$$\frac{y}{f_2-x}=\frac{r_{内}}{f'_{积}} \tag{9}$$

椭球聚光镜对氙灯氙弧的包容角 Δu：

$$\Delta u=u_1-u_0 \tag{10}$$

式中：u、u_0 为椭球镜大小开口与焦点连线所形成的角度，即包容角。

可估算出聚光系统的聚光效率。

5 光学系统优化设计

太阳模拟器光学系统是一种复杂的强光照明系统。与其他成像系统不同，在光学系统设计中，重点关注以下两个方面：一是选择合理的光学系统，优化光学设计参数，尽可能地提高试验空间的辐照均匀度；二是优化聚光系统，提高对光源辐射能量的利用率[5]。

在对高准直太阳模拟器光学系统设计中采取的具体优化措施如下：

（1）考虑到对有效辐照面均匀度的要求，在光学加工工艺可行的情况下，选用了由两组 N 个元素透镜组成的光学积分器镜组；

（2）由于光学材料和结构的限制，光学积分器本身不能校正像差，为尽量减小像差的影响，选用使之形成最小球差值“最优良形式”的光学积分器镜透镜形式及结构安排；

（3）参考氙灯配光曲线，优化椭球聚光镜设计参数，获取聚光系统对光源辐射能量的最大利用率。

6 太阳模拟器光机结构

高准直太阳模拟器光机结构如图4所示。由底座、下箱体、椭球聚光镜及调整机构、光源调节机

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

构、转接箱体、上箱体、平面反射镜及调节机构、出风口、光学积分器组件及换热机构、镜筒、准直物镜组件、支撑杆、水平调节仪和自准直瞄准系统组成。

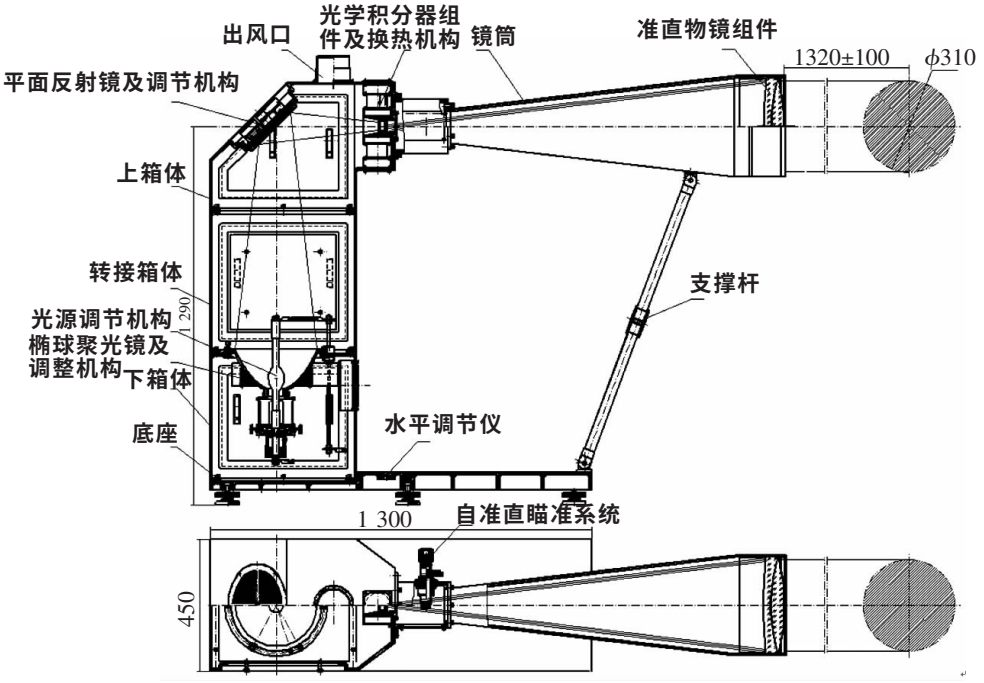


图4 太阳模拟器光机结构

氙灯光源是系统中的热辐射源，当氙灯电功率部分地转换成光辐射功率时，系统中产生两种形式的热：电功率转换为热能；光功率产生的热辐射。前者主要是对氙灯的阴极和阳极而言，一般采用风冷却换热。除被系统有效利用的光辐射外，其余散落在系统各处的光辐射全部通过热传导、对流和热辐射转换为热能。

对高准直太阳模拟器来说，由于要求的光束准直角的原因，视场光栏的通光口径小，导致大部分的光辐射被阻隔在系统中，形成有害的热能。因此，对太阳模拟器系统中各光学零部件的换热结构设计显得格外重要。

设备的可靠性设计是我们在研制过程中十分重视的问题，对模拟器这种强光照明系统的可靠性设计除需考虑光学系统零部件外，在整体的结构设计中首先要考虑的是系统换热。设计中系统换热采用风冷强制对流换热形式。采用这种换热形式可满足3个需求：氙灯光源的风冷却要求（风速）；排除有害气体臭氧；排除系统内部由于热辐射产生的热空气。这种风冷换热的方式可靠性高，且效果非常好。

7 系统仿真

将优化后得到的光学系统外形尺寸设计参数代入照明系统仿真设计软件。一方面，可对上述计算得到的光学系统设计参数进一步认证；另一方面，对系统进行模拟仿真设计。在对光学系统建模、集成基础上，通过调整系统中各光学零部件的光学参数，寻求满足设计指标的系统仿真结果。仿真计算给出如下设计指标：

（1）有效辐照面积；

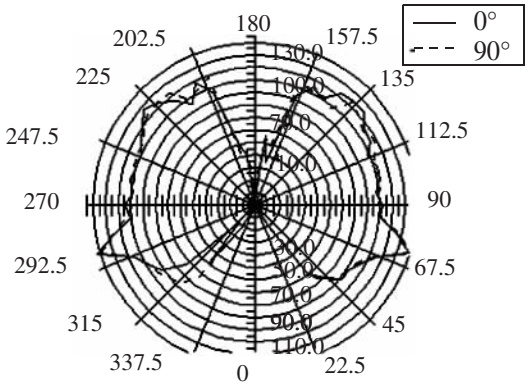
（2）有效辐照面积上的辐照不均匀度；

（3）有效辐照面积上的总辐照度。

7.1 影响仿真精度的因素

除仿真软件使用中对仿真精度的影响外，光源配光曲线仿真精度是决定系统辐照度仿真精度的主要因素之一，仿真度越高，仿真计算结果越精确。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



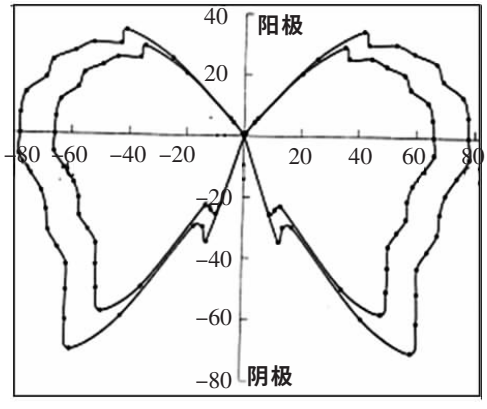


图 5　氙灯配光曲线比较

图 5 是仿真短光源配光曲线与实际测试光源配光曲线结果的比较。决定辐照度仿真计算精度的另一个重要因素是光源的光电转换效率，通常情况下取经验数据。

7.2　系统集成

将建模后的各光学零部件设计参数代入并集成仿真系统，如图 6 所示。太阳模拟器光学系统的光线追迹是一种非连续的光线追迹，也就是说，光线将按照传播定律在它遇到的光学元件中传播，直到遇到一个停止传播的条件。照明仿真计算中光线追迹是基于蒙特卡洛随机光线追迹。追迹光线的数量决定系统仿真的精确度。

图6　光学系统集成

7.3　仿真结果

系统仿真过程是在给定光学系统设计参数的基础上，通过 200 万条进行蒙特卡洛光线追迹，并不

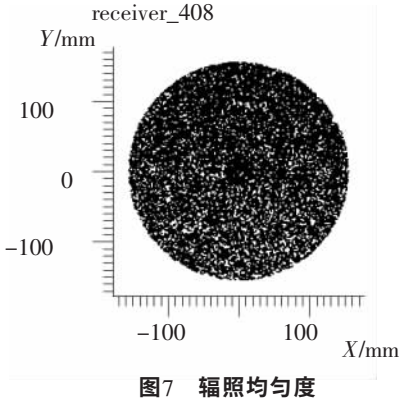


图7　辐照均匀度

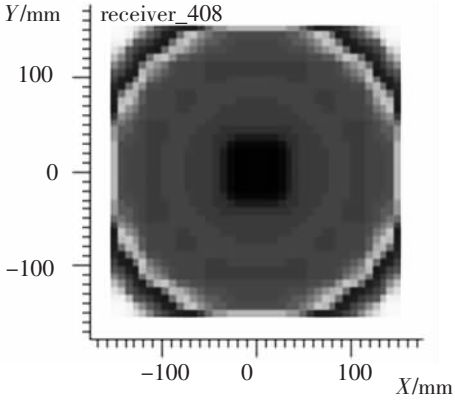
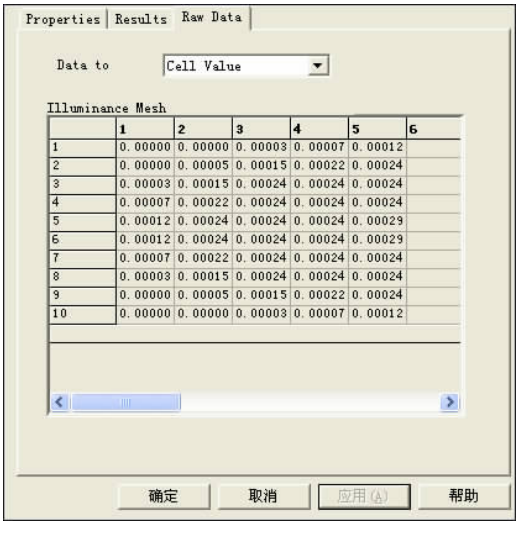


图 8　有效辐照面积



	1	2	3	4	5	6
1	0.00000	0.00000	0.00003	0.00007	0.00012	
2	0.00000	0.00005	0.00015	0.00022	0.00024	
3	0.00003	0.00015	0.00024	0.00024	0.00024	
4	0.00007	0.00022	0.00024	0.00024	0.00024	
5	0.00012	0.00024	0.00024	0.00024	0.00029	
6	0.00012	0.00024	0.00024	0.00024	0.00029	
7	0.00007	0.00022	0.00024	0.00024	0.00024	
8	0.00003	0.00015	0.00024	0.00024	0.00024	
9	0.00000	0.00005	0.00015	0.00022	0.00024	
10	0.00000	0.00000	0.00003	0.00007	0.00012	

图 9　总辐照度/(W/mm²)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

断地对设计参数进行仿真调试，达到满足设计指标要求的仿真结果。

系统仿真结果如图7、8、9所示。根据图中给出的数据，得到仿真结果如下：

（1）有效辐照面直径

（2）辐照不均匀度

（3）平均总辐照度

仿真结果满足设计要求。

8 结束语

通过蒙特卡洛光线追迹的仿真结果显示在直径310 mm的圆形辐照面上，太阳模拟器的辐照度达到0.3个太阳常数，相应的辐照不均匀度为3.2%，光束准直角±16′，各项指标均满足设计要求。

采用蒙特卡洛光线追迹设计太阳模拟器光学系统，是目前我们在进行各种类型、规格太阳模拟器系统研制过程中不可缺少且非常重要的方法。这种仿真方法可对光学系统外形尺寸计算以及设计参数进一步进行验证；仿真设计手段加上实践经验，太阳模拟工程与技术研究水平一定会得到提高。

参考文献

[1] Ulmer S, Reinalter W, Heller P, *et al.* Beam characterization and improvement with a flux mapping system for dish concentrators[J]. *Sol. Energy Eng.*, 2002, 124: 182-188.

[2] Kenney S, Davidson J. Design of a multiple-lamp large scale solar simulator[J]. *Sol. Energy Eng.*, 1994, 116: 200-205.

[3] 李刚，周彦平. 卫星仿真测试用太阳模拟器和地球模拟器设计[J]. 红外技术，2007, 29(5): 283-287.

[4] 向艳红，张容，黄本诚. KFTA太阳模拟器灯单元的方案设计[J]. 航天器环境工程，2005，22(2): 120-123.

[5] 王元，张林华. 一种新型全光谱太阳模拟器设计[J]. 太阳能学报，2006，27(11): 1133-1136.

作者简介：陈家奇（1971-），男，吉林长春人，学士，副研究员，主要从事太阳模拟器的研究。E-mail: ynogg@163.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net