

真空热试验红外加热笼运动驱动系统设计

孙兴华, 周艳

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100029)

摘要: **目的** 解决在航天器真空热试验中, 单纯依靠红外加热笼自身设计, 无法兼顾高、低温工况外的热流模拟需求问题。 **方法** 设计一套运动驱动系统, 并应用于型号试验, 通过调整红外加热笼的相对位置, 调节不同工况下外热流模拟能力。 **结果** 该系统满足空间环境模拟器机械和电接口要求, 克服了真空热试验环境高真空、超低温等因素的影响, 实现了红外加热笼的平稳可靠移动, 使其最大、最小辐射热流密度等指标得到显著提升。 **结论** 真空热试验中, 通过运动驱动系统适时调整红外加热笼的相对位置, 可以使其更好地适应不同工况需求, 并提高外热流模拟整体能力。

关键词: 真空热试验; 红外加热笼; 外热流模拟; 运动驱动系统

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.02.008

中图分类号: V416.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)02-0038-05

Design of Movement Driving System for Infrared Heating Cage in Vacuum Thermal Tests

SUN Xing-hua, ZHOU Yan

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100029, China)

ABSTRACT: Objective To solve the problem that it is unable to satisfy both the high and low temperature condition needs for heat flux simulation solely depending on design of infrared heating cage in vacuum thermal tests. **Methods** A movement driving system was designed and successfully used in project tests. The capability of heat flux simulation was regulated by adjusting the relative position of infrared heating cage under different conditions during the tests. **Results** The application results indicated that this system could overcome the impact of high vacuum and ultralow temperature environment, satisfy the mechanical and electrical interface requirements for space environment simulator and drive the infrared heating cage to move steadily and reliably, and acquired an obvious improved index for heat flux simulation. **Conclusion** In vacuum thermal tests, by adjusting the relative position using movement driving system can make the infrared heating cage to satisfy the needs much better for different conditions and improve the synthesis ability for heat flux simulation.

KEY WORDS: vacuum thermal tests; infrared heating cage; heat flux simulation; movement driving system

收稿日期: 2013-12-11; 修订日期: 2014-01-12

Received: 2013-12-11; **Revised:** 2014-01-12

作者简介: 孙兴华(1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天器真空热试验技术。

Biography: SUN Xing-hua(1982-), Male, Master, Engineer, Research focus: technology of vacuum thermal tests for spacecraft.

外热流模拟是航天器真空热试验的一项关键技术,主要技术指标包括:最大辐射热流密度、最小辐射热流密度和热流均匀性。目前,红外加热笼凭借结构简单、加工容易、造价低等优点,成为我国航天器真空热试验最常用的外热流模拟装置之一。红外加热笼设计过程中,覆盖系数是一个非常重要的参数,它表征了加热带覆盖面积与红外加热笼整体面积的比值。这个参数决定了外热流模拟最大辐射热流密度和最小辐射热流密度,并且对热流均匀性有一定影响^[1-3]。通常情况下,为了满足最大辐射热流密度要求,覆盖系数选取往往留有较大裕量,而这在一定程度上会影响低温或低热流实现能力,有时会大大延长降温等待时间,无论从型号研制进度还是经济效益的角度都是非常不利的。尤其近年来,一些型号对于外热流模拟技术指标要求更加苛刻,最大、最小辐射热流密度跨度大,热流均匀性要求高,仅仅依靠覆盖系数的优化已经无法兼顾各项要求^[4-6]。解决这一矛盾的一种有效方法就是实现红外加热笼在高低温工况的位置变换,这样红外加热笼便可选择较大的覆盖系数,高温工况使红外加热笼尽量靠近航天器辐射面,从而快速达到最大辐射热流密度的要求,而低温工况使红外加热笼尽量避开辐射面,减少对低温热沉辐射的阻挡,从而快速满足最小辐射热流密度要求,并且这样对于高低温工况热

流均匀性也都是有利的。因此,研究如何实现真空热试验工况期间红外加热笼在空间环境模拟器中的运动,具有非常积极而现实的意义,文中重点介绍一种红外加热笼运动驱动系统。

1 系统组成

如图1所示,红外加热笼主要由支撑框架和加热带构成,框架上布有电缆,用于给加热带通电。根据红外加热笼的结构特点、工作环境和移动要求,设计了如图2所示的驱动系统。该驱动系统主要包括动力系统、传动系统、热控系统以及控制系统等4部分,其中控制系统位于空间环境模拟器外,其它3部分则安装在空间环境模拟器内。

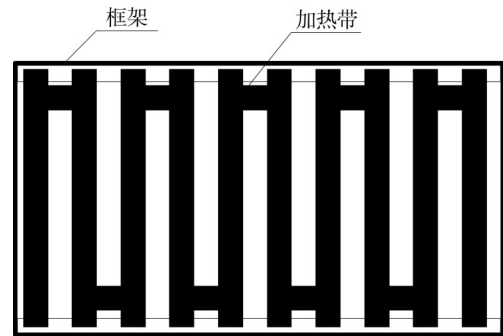


图1 红外加热笼结构示意图

Fig.1 Structure block of infrared heating cage

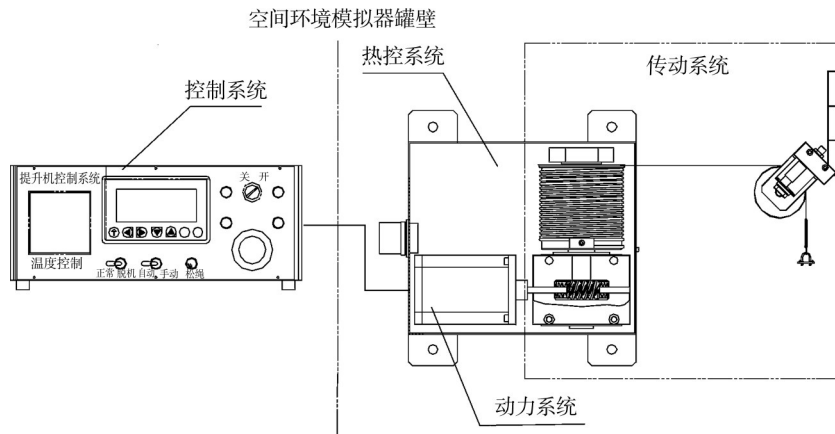


图2 系统组成示意

Fig.2 Sketch map of system composition

该驱动系统中,控制系统分别与动力系统、传动系统和热控系统进行通信连接。一方面,驱动动力系统实现动力输出,从而通过传动系统实现红外加热笼的运动控制,并根据位移、速度和限位等反馈

信号确保红外加热笼定位精确,安全可靠;另一方面,根据温度反馈,通过调节电流输出,实现动力系统和传动系统的环境温度控制,确保系统正常运行,系统原理如图3所示。

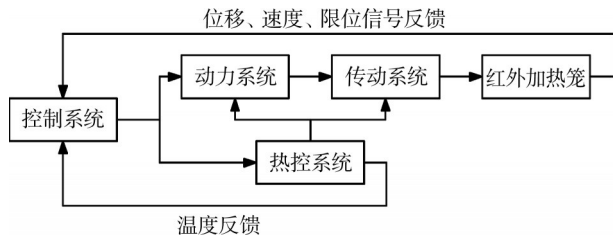


图3 系统原理

Fig.3 Schematic diagram of the system

1.1 动力系统

动力系统作为整个驱动系统的动力源,在试验工况期间,由于所驱动的红外加热笼距离航天器较近,稍有差错就会造成整个试验的失败,甚至于损伤航天器,因此必须具有高精度、高可靠性。三相混合式步进电机定位精度高,无位置积累误差,通过特有的开环运行机制即可获得接近闭环控制的良好性能,并且在结构上采用特殊的机械设计,配合相应驱动器,可以有效减少转矩波动,提高步距分辨率^[7-10]。因此,动力系统采用三相混合式步进电机,驱动器按1000脉冲/转细分,步距角 θ 即为 0.36° 。

此外,考虑到真空热试验环境超低温会引起电机定子和转子过度变形,高真空环境会造成普通润滑油的挥发,这些都会使电机无法正常工作。由此,一方面需要对电机进行热控,确保电机在正常工作温度范围内;另一方面需要对电机的润滑方式进行改造,将普通润滑油改为难以挥发的真空专用润滑脂。

1.2 传动系统

传动系统是传递动力并实现驱动对象红外加热笼运动的关键,其设计主要考虑红外加热笼的运动速度和运动形式。真空热试验中,环境模拟器空间非常有限,而且周围分布了各种辅助工装、线缆,传动系统应尽量简单。此外,红外加热笼的运动对速度要求不高,出于安全性和可靠性的目的,应选择减速比大、运行平稳的传动形式^[11-12]。因此,传动部分选用了传动比大、结构紧凑、冲击载荷小、传动平稳、噪声低、有自锁性特点的蜗轮蜗杆减速器,配合卷筒、钢丝绳、滑轮器、张紧器和吊具,实现红外加热笼的移动,如图4所示。

蜗轮蜗杆减速器输入轴(蜗杆)与电机相连,输出轴(蜗轮)与卷筒相连,减速比 I 为50,润滑方式同

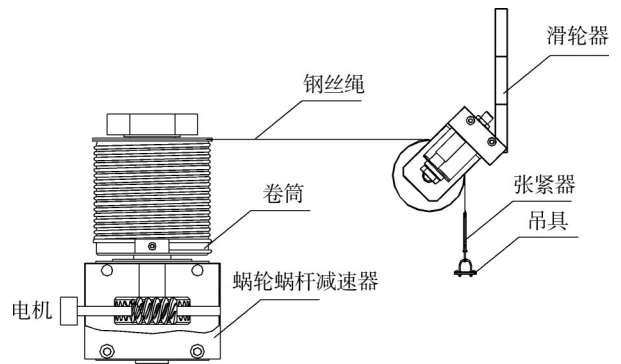


图4 传动系统组成示意

Fig.4 Sketch map of transmission system composition

样采用真空润滑脂。卷筒名义直径 ϕ 为100 mm,容量为4000 mm,电机单位脉冲驱动移动距离即位移精度为: $\pi \cdot \phi \cdot \theta / 360 \cdot I = 6.28 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。

钢丝绳选用无油、防扭的不锈钢材质。滑轮器主要由安装板、定滑轮、压紧弹簧和微动开关等组成(如图5所示),一般通过安装板固定在航天器支架横梁上。定滑轮采用轴颈和轴套配合方式,轴颈和轴套分别采用不锈钢和黄铜材料,并使用耐真空和低温环境的二硫化钼润滑。压紧弹簧和微动开关是为了感应负载变化而专门设计的,当钢丝绳绕过定滑轮牵引红外加热笼运动时,产生斜向 45° 合力将压紧弹簧压紧,同时触发微动开关;当红外加热笼移动到位时,压紧弹簧恢复,同时微动开关释放,这样就可以通过微动开关信号判断负载变化。

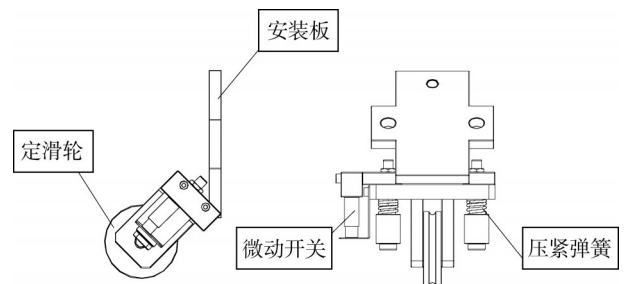


图5 滑轮器结构

Fig.5 Structure block of pulley device

为了避免红外加热笼移动到位时钢丝绳松动摇摆,设计了如图6所示的张紧器。张紧器两头分别通过钢丝绳固定环和吊具固定环连接钢丝绳和吊具。当吊具拉动红外加热笼运动时,将通过其中导杆将张力弹簧压紧;当红外加热笼移动到位时,弹簧慢慢恢复,仍保持钢丝绳的绷紧状态,避免了摆动。

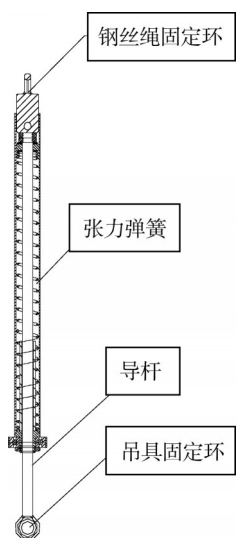


图6 张紧器结构

Fig.6 Structure block of tensioner

1.3 热控系统

热控系统是为了使动力系统和传动系统克服超低温环境,以及温度交变因素的影响而设计的,确保它们始终保持在正常的工作温度范围内^[13-15]。需要采取热控措施的部件主要包括:电机、蜗轮蜗杆减速器和卷筒,如图7所示。在这些部件外围加装了控温罩,控温罩采用铝合金材料,表面粘贴真空热试验专用的薄膜加热片和铂电阻温度传感器,配合控温仪进行温度的测量和控制。

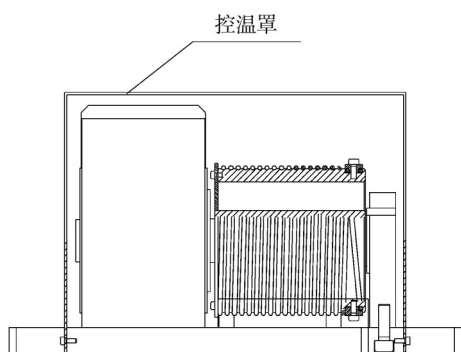


图7 控温罩示意

Fig.7 Sketch map of temperature control cover

1.4 控制系统

控制系统是整个驱动系统的操作和监控平台,界面包括温度控制和运动控制等2部分,如图8所示。温度控制界面主要是进行目标温度设置并显示

当前温度和施加电流情况;运动控制界面除了能够驱动电机实现机械系统的起停外,还集成了速度控制、位移监测、负载感应、限位报警、急停等功能,用以调整红外加热笼的移动速率,监视位移量,感应负载是否移动到位,以及紧急情况下的制停。

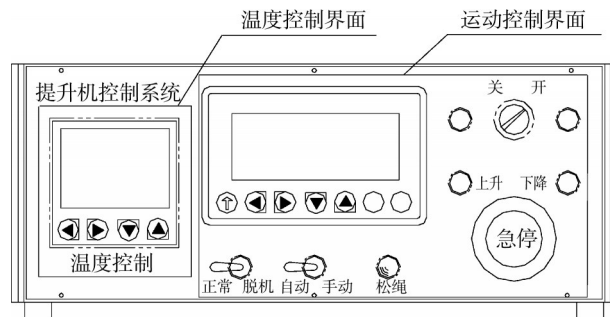


图8 控制系统界面

Fig.8 Interface of control system

2 安装与调试

使用系统时,除了控制系统位于空间环境模拟器外,其它都要安装在空间环境模拟器内。首先要根据所驱动红外加热笼的位置,将滑轮器通过安装板固定在卫星支架横梁上,并将电机、蜗轮蜗杆减速器、钢丝绳及卷筒连带控温罩通过底板安装在合适位置。然后将钢丝绳绕过滑轮器定滑轮与张紧器钢丝绳固定环相连,张紧器吊具固定环连接吊具后,接入红外加热笼。接着根据红外加热笼移动需求确定起始和终点位置,并在相应位置安装限位微动开关。最后将热控系统加热与测温线缆、电机和各微动开关的供电和信号线缆通过专用电连接器穿过空间环境模拟器罐壁与控制系统相连完成安装。

安装完成后需要进行系统调试,可分为温度控制和运动控制等2部分进行。温度控制调试要确保温度测量数据准确、加热回路导通绝缘正常、控温仪工作状态良好,并设置目标温度为20℃。运动控制调试需要在控制系统运动控制界面上完成起点零位设置,并分别进行手动、自动模式移动操作,观察速度和位移显示是否正常,各限位微动开关能否及时发出报警信号,还要验证急停开关能否紧急制动,并且密切注意运动过程中,电机和传动系统各部件是否有异响或异常,确保各机械部件运行平稳、可靠。

3 结论

该系统已经多次在型号试验中得到应用,结果表明,该系统具有结构紧凑、操作简单、速度和位移控制精度高等优点,完全满足真空热试验中红外加热笼运动驱动需求。

通过该系统,一方面可以最大限度地提高红外加热笼设计中覆盖系数的选择范围,在这之前为保证低温工况需求,选择的覆盖系数往往不得大于0.5。使用该系统后,理论上覆盖系数可以达到1,而覆盖系数决定了最大辐射热流密度,因此这大大提升了红外加热笼高热流模拟能力。另一方面,在低温工况下,可以通过该系统调节红外加热笼的相对位置,最大限度地减少自身遮挡,使试验对象直接面对热沉冷背景,从而有效降低最小辐射热流密度,提升红外加热笼的低热流模拟能力。此外,红外加热笼自身热流模拟能力的提升也为加快热流控制速度、降低平衡稳定时间提供了保证,从而可以有效缩减试验时间,无论对于型号研制进度,还是在节约成本的角度上,都有着积极的意义。

总之,该系统解决了红外加热笼单纯依靠自身设计无法兼顾高、低温工况外热流模拟需求问题,并大大提升了其整体能力,为型号试验乃至整个型号研制任务的圆满完成奠定了基础,同时也为真空热试验环境下机电系统设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 黄本诚,童靖宇.空间环境工程学[M].北京:中国科学技术出版社,2010.
HUANG Ben-cheng, TONG Jing-yu.Space Environment Engineering [M].Beijing: China Science & Technology Press, 2010.
- [2] 徐福祥.卫星工程概论[M].北京:中国宇航出版社,2003.
XU Fu-xiang.An Introduction to Spacecraft Engineering [M].Beijing: China Space Navigation Press, 2003.
- [3] 杨晓宁.热真空试验用红外加热笼的热设计[J].航天器环境工程,2004,21(1):19-24.
YANG Xiao-ning.Thermal Design for Infrared Heating Cage in Thermal Vacuum Tests[J].Spacecraft Environment Engineering, 2004, 21(1): 19-24.
- [4] 杨晓宁,孙玉玮.红外加热笼覆盖系数对热流均匀性的影响研究[J].航天器工程,2008,17(5):38-41.
YANG Xiao-ning, SUN Yu-wei.Influence of Infrared Heating Cage Coverage Coefficient on Flux Uniformity [J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(5): 38-41.
- [5] 杨晓宁,孙玉玮.利用红外加热笼进行低热流模拟的设计方法研究[J].航天器环境工程,2007,24(6):374-376.
YANG Xiao-ning, SUN Yu-wei.Simulating Low Flux on Spacecraft Surface by Using Infrared Heating Cage [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2007, 24(6): 374-376.
- [6] 杨晓宁,龚洁,路朝霞.加热带双面涂黑漆对热真空试验中低温实现的作用[J].航天器环境工程,2004,21(3):16-22.
YANG Xiao-ning, GONG Jie, LU Chao-xia. Approach of Facilitating Low Temperature Mode Using Heat Strips Black-coated on Two Sides in Thermal Vacuum Tests [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2004, 21(3): 16-22.
- [7] 易长松.新型三相混合式步进电机驱动器[J].机电一体化,2001,(6):30-33.
YI Chang-song.Novel Three-phases Hybrid Stepper Motor Driver[J].Mechatronics, 2001,(6):30-33.
- [8] 顾苗,刘晓磊,李娜,等.Labview平台下电源测控系统的实现[J].装备环境工程,2012,9(3):23-26.
GU Miao, LIU Xiao-lei, LI Na, et al. Development of Power Control System Using Labview Platform [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 23-26.
- [9] YANG Sheng-ming, SU Pei-de.Active Damping Control of Hybrid Stepping Motor[C].Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive System, 2001: 749-754.
- [10] PULLE D W J, HUGHES A.High-speed Performance of Variable-reluctance Stepmotors [J].IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, 35(1): 80-84.
- [11] 向树红.环境工程在卫星研制生产中的应用[J].装备环境工程,2006,3(3):15-18.
XIANG Shu-hong.Application of Environmental Engineering in the Developing and Manufacturing of Satellite [J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(3): 15-18.
- [12] 沈玉梅.环境工程在航天型号研制中的应用[J].装备环境工程,2005,2(6):13-16.
SHEN Yu-mei. Application of Environmental Engineering in Aerospace Research [J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(6): 13-16.

方的交流,反馈到产品的设计环节。

4 结语

针对可靠性试验中没有成熟的软硬件联合测试理论问题,在考查软件与硬件测试结合的基础上,提出了两层结构立体测试运行剖面,利用子剖面与环境剖面的对应关系建立软件测试与硬件测试的联系,将2种测试统一在统一时间轴上,得出了软硬件联合测试的流程,对产品的可靠性鉴定试验具有重要的意义。

参考文献:

- [1] GJB 899A—2009,可靠性鉴定和验收试验[S].
GJB 899A — 2009, Reliability Design and Acceptance Testing[S].
- [2] 赵川,徐涛,孙晓光.软硬件协同设计方法的研究[J].计算机工程与设计,2003,24(7):7—9.
ZHAO Chuan, XU Tao, SUN Xiao-guang. Research of Methodology of Hardware/Software Co-design[J].Computer Engineering and Design, 2003, 24(7): 7—9.
- [3] 丁健.基于软/硬件协同设计的嵌入式系统的性能测试[J].电子质量,2007,(5):27—30.
DING Jian. Performance Testing Based on the Embedded System of Software/Hardware Co-design [J].Electronics Quality, 2007,(5): 27—30.
- [4] 熊光泽,詹瑾瑜.嵌入式系统软/硬件协同设计技术综述[J].计算机应用,2006,26(4):757—760.
XIONG Guang-ze, ZHAN Jin-yu. Survey on Techniques of SoC Hardware/Software Co-design [J].Computer Application, 2006, 26(4): 757—760.
- [5] 刘砚菊,高有华.电磁继电器、接触器可靠性试验系统的硬件设计[J].沈阳航空工业学院学报,2001,18(2):66—67.
LIU Yan-ju, GAO You-hua. Hardware Design on Reliability Testing System for Electric-Magnetic Relays and Contactors [J].Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2001, 18(2): 66—67.
- [6] 杨军.装备可靠性试验分析与评价软件[D].长沙:国防科学技术大学,2008.
YANG Jun. The Design and Development of Software for Equipment Reliability Test and Evaluation [D].Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [7] 艾骏,陆民燕,阮镰.面向软件可靠性测试数据生成的剖面构造技术[J].计算机工程,2006,32(22):7—9.
AI Jun, LU Min-yan, RUAN Lian. Usage Profile Construction Technique for Generation of Software Reliability Test Data[J].Computer Engineering, 2006, 32(22): 7—9.
- [8] 周海芳,陈虎,杨学军.嵌入式系统软硬件联合设计方法研究[J].计算机科学与工程,2001,(6):97—100.
ZHOU Hai-fang, CHEN Hu, YANG Xue-jun. Study of Hardware-Software Co-design Methodology Based on Embedded Systems [J].Computer Engineering & Science, 2001, (6): 97—100.
- [9] 黄维明,徐清.可靠性试验的程序和方法[J].国防技术基础,2007,(3):22—25.
HUANG Wei-ming, XU Qing. The Procedure and Method of Reliability Testing[J].Technology Foundation of National Defence, 2007,(3): 22—25.
- [13] 赵保平,孙建亮,庞勇.航天产品环境适应性问题研究[J].装备环境工程,2011,8(3):51—57.
ZHAO Bao-ping, SUN Jian-liang, PANG Yong. Research on Environmental Worthiness Problems of Aerospace Product [J].Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(3): 51—57.
- [14] 樊雪松,王晓耕.CAST2000平台下卫星环境剖面分析[J].装备环境工程,2008,5(6):28—34.
FAN Xue-song, WANG Xiao-geng. Environmental Profile Analysis of Satellite on CAST2000 Platform[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 28—34.
- [15] 赵保平,张韬.系统级产品环境试验与评估若干问题探讨[J].装备环境工程,2012,9(6):58—59.
ZHAO Bao-ping, ZHANG Tao. On Environmental Test and Evaluation of System Grade Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 58—59.

(上接第42页)