用于热控涂层性能原位测试的辐射计设计

邢 辉 赵慧洁 张 颖 张庆祥

(北京航空航天大学 精密光机电一体化教育部重点实验室, 北京 100191) (中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘 要: 针对空间环境中热控涂层性能退化的问题,提出一种模拟空间环境中利用测热法实现热控涂层太阳吸收率原位测试的辐射计设计方案. 结合模拟空间环境的测试要求,进行辐射计的原理设计与理论研究;对辐射计进行结构热分析,建立辐射计测试过程中各项换热的计算式,从而得到辐射计的瞬态计算模型. 恒温测试环境下利用辐射计对 SR107 热控涂层进行了测试. 实验结果表明:辐射计测试的 SR107 热控涂层太阳吸收率值与该涂层的标定值之间的相对误差在 2% 以内,测试的不确定度为 6.3%,实验结果验证了该测试方法的有效性.

关 键 词: 热控涂层; 辐射计; 原位测试; 太阳吸收率

中图分类号: V 416.8

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)12-1579-06

Design of radiometer for thermal control coatings in situ measurement

Xing Hui Zhao Huijie Zhang Ying

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Zhang Qingxiang

(China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: To solve the problem of thermal control coatings degradation in space environment, it is necessary to study coatings degradation law in simulated space environment, thus a radiometer design based on calorimetry was proposed for in situ measurement of thermal control coatings solar absorptance. The radiometer structure was designed according to the requirement of in situ measurement. By conducting thermal analysis on radiometer, the heat transfer equations were built and a calculation model based on transient thermal equilibrium was established by energy conservation principle. An SR107 thermal control coating was tested in isoperibol. The experiment result shows a within 2% relative error between the solar absorptance of SR107 and the coating calibration value, with a 6.3% measurement uncertainty. The result validates the effectiveness of the experiment.

Key words: thermal control coating; radiometer; in situ measurement; solar absorptance

卫星用关键材料及部件(如热控涂层、光学材料、太阳电池等)在轨服役过程中,将经受原子氧、太阳电磁辐射、等离子体等多种环境因素作用,空间环境因素对热控涂层的损伤是造成航天器的故障和事故的重要原因之一,严重影响着卫星的可靠性与寿命. 随着我国卫星设计寿命从 8 a 增加到 15 a,热控涂层等暴露材料性能的退化将成为制约其寿命的重要因素. 热控涂层的性能退化一般表现为后期太阳吸收率值的增加,使卫星等航天器温度升高,从而缩短了航天器的使用寿命[1].

为了研究热控涂层性能退化规律和寿命预示

收稿日期: 2010-08-06; **网络出版时间**: 2011-12-21 09:56; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111221.0956.007

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111221.0956.007.html

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0705)

作者简介: 邢 辉(1981 -),男,山东青州人,博士生,xinghui@aspe.buaa.edu.cn.

方法,确保我国地球轨道卫星达到设计寿命,需要开展空间辐照环境下热控涂层太阳吸收率性能变化的地面模拟实验研究[2-5].

针对热控涂层的辐射特性,本文提出了一种基于测热法来实现涂层太阳吸收率原位测试的方案,在此基础上设计一种用于热控涂层性能原位测试的辐射计. 通过机理分析与简化建立了计算模型,并对卫星用 SR107 热控涂层进行实验,在实验的基础上详细给出了辐射计测试涂层太阳吸收率的不确定度.

1 辐射计结构与测试原理

1.1 辐射计结构

结合模拟空间环境的要求,辐射计的结构设计主要由 3 个功能模块组成:

1) 试件板与测热腔组成辐射计的测试系统,探测器选择薄膜热探测器,分别置于试件板的下方和测热腔底部,实现热控涂层吸收率的测试;

2) 隔热腔为减小辐射计原位测试时的不确定度而设计,其目的是有效地减小空间环境对辐射计测试系统的热扰动;

3) 数据采集底座内置电子学采集控制系统,完成辐射计探测器的信号调理以及与上位机的数据通信(在进入模拟空间环境进行原位测试之前,辐射计需要在普通测试环境进行原理验证,目前设计的辐射计数据采集部分与测试部分做成一体),此外辐射计还包括支杆辅助结构,用于支撑试件板和测热腔. 辐射计结构如图 1 所示.

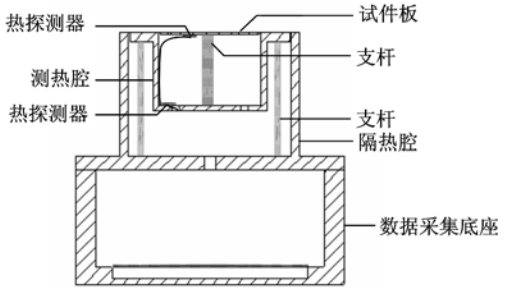

图 1 辐射计结构图

1.2 辐射计测试原理

热控涂层可供热控设计的参数主要为:太阳吸收率 α_s 和表面发射率 ε. 太阳辐射的能量主要集中在紫外与可见光近红外波段,因此 α_s 是指此波段范围内的平均吸收率:

$$\alpha_s = \frac{\int_{0.2}^{3} \alpha_\lambda E_s(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda}{\int_{0.2}^{3} E_s(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda} \tag{1}$$

涂层的发射率为长波红外波段内的平均发射率:

$$\varepsilon = \frac{\int \varepsilon(\lambda) M_0(\lambda, T)\,\mathrm{d}\lambda}{\sigma T^4} \tag{2}$$

式中,λ 为波长;E_s 为太阳辐照;T 为温度;σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数;M_0 为热控涂层辐射出射度.

通常热控涂层的性能评价是利用 α_s/ε 来表示. 通过对热控涂层的辐射性能在轨测试发现:空间环境辐照对 ε 影响很小,甚至可认为是不变的,因此热控涂层性能的退化可通过实时监测 α_s 的变化来实现.

辐射计的工作原理是:将试件板表面涂有待测涂层的辐射计放到特定的辐射环境下,利用 2 个热探测器分别探测热控涂层试件板下方和测热腔热沉端的温度,根据测试温度的变化得到通过热控涂层热通量的变化,再由热通量的变化计算得到 α_s 的变化.

地面模拟空间环境中,α_s 变化的测试方法为:试件板表面的热控涂层接受模拟环境外太阳模拟器提供的一个太阳常数的辐照,热控涂层将与模拟空间环境进行辐射换热,试件板表面热控涂层吸收了辐照热量后将产生内能的增加,同时试件板与测热腔内部将会发生换热损失,根据能量守恒式:

$$Q_I = Q_R + Q_E + Q_L \tag{3}$$

式中,Q_I 为待测涂层所吸收的辐照量; Q_R 为辐射换热量;Q_E,Q_L 分别为内能增加和测热腔内部的热损失. 通过实时探测试件板与测热腔的温度,计算得到涂层的 α_s. 再对热控涂层施加具有退化效应的辐照,由于涂层的 ε 不受退化效应的影响,根据式(3)中 Q_I 计算可得到 α_s 变化值,从而完成热控涂层性能的原位测试.

2 计算模型

辐射计在地面模拟空间环境中进行原位测试,由于整个测试系统处在真空环境内,辐射能的交换基本上是辐射传输,而内部的热交换还包括支杆热传导引起的损失;若测试环境不是真空环境,则在计算模型中必须考虑对流换热对辐射计的影响,此时式(3)可表示为

$$Q_I = Q_R + Q_{Cond} + Q_{Cov} + mc\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

式中,Q_{Cond},Q_{Cov}分别为热传导和对流换热引起的热损失;$mc\dfrac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}$为系统内能增加,$m$,$c$ 为试件板的质量和热容. 辐射计的设计应遵循减小热损失的准则,设计良好的隔热措施,提高测试的精度.

2.1　辐射计吸收的热量

辐射计在进行原位测试时,由太阳模拟器提供外热流模拟航天器在空间接受的太阳辐照. 太阳模拟器位于模拟空间环境的外部,通过环境的石英窗口对辐射计施加辐照,此时辐射计吸收的热量计算式为

$$Q_1 = \alpha_s A_s E \tag{5}$$

式中,A_s 为试件板面积;E 为太阳模拟器提供的一个太阳常数的辐照.

2.2　辐射计辐射换热

辐射换热包括:热控涂层与模拟空间辐射换热和测热腔内部的辐射换热. 热控涂层向空间辐射的能量为

$$Q_{R1} = \varepsilon\sigma F_1 A_s (T_s^4 - T_e^4) \tag{6}$$

式中,T_s,T_e 分别为试件板底部探测器温度和空间环境温度;F_1 为辐射换热角系数. 由于模拟空间环境为一个冷黑体环境,而且它的面积远大于涂层面积,所以涂层与空间环境的 $F_1 \approx 1$.

试件板与测热腔组成一个近似的封闭腔,因此试件板与测热腔内部辐射换热量为

$$Q_{R2} = \frac{\sigma A_s (T_s^4 - T_c^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_p} - 1\right) + \frac{1}{F_2} + \frac{A_s}{A_c}\left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1\right)} \tag{7}$$

式中,ε_p 为试件板发射率;ε_c,T_c 分别为测热腔表面的发射率和温度;A_c 为测热腔面积;F_2 为试件板与测热腔之间的辐射换热角系数. 试件板与测热腔组成封闭腔,$F_2 = 1$,从而根据式(7)可计算辐射计内部的辐射换热量. 测热腔内部的试件板支杆为聚四氟乙烯材料,其热传导率极低,因此它不影响内部辐射换热的计算.

2.3　辐射计传导热损失

用于热控涂层性能原位测试的辐射计支杆选用的是聚四氟乙烯材料,传导热损失可忽略. 然而目前开展热控涂层性能在轨测试时,试件板支杆通常选择机械性能良好,热传导率相对较低的 6Al4V 钛合金支杆,因此计算模型中需考虑传导热损失带来的影响.

试件板设计的很薄,其上下端能迅速达到热平衡,可忽略其内部热阻. 在任意时刻整个试件板能迅速地达到均匀的温度,因此试件板在任意时刻传导损失的热量完全传递给了支杆. 对支杆列出导热微分方程[6-7],图 2 所示为测热腔支杆的热传导示意图. 由于设计的支杆直径尺寸远小于其长度,可认为温度只沿 x 方向传播,此时任意时刻支杆在垂直于 x 轴界面上的温度都相等.

在某一时刻,可列出支杆带有边界条件和初始条件的微分方程为

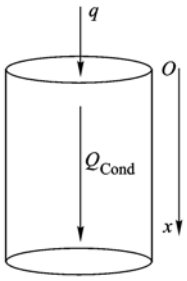

图 2　测热腔支杆热传导示意图

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ &T(x,0) = T_0 \\ &K \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0} = q(t) \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

式中,x,t 分别为热量在支杆内部传导的位移和时间;$\alpha = K/\rho c$ 为热扩散系数,K,ρ 分别为支杆材料的热传导系数和密度.

导热微分方程边界条件中的 $q(t)$ 实际为试件板接收均匀辐照后传递给支杆的热量损失. 将试件板与支杆看作一体,并各取二者交界面处的一部分组成微元 dx,如图 3 所示. 在任意时刻 t,试件板传递给支杆的热流密度为 $q(t) = K\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}$.

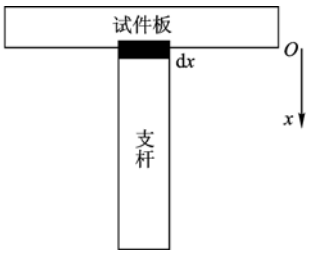

图 3　试件板与支杆热传导微元

对辐射计的支杆进行 ANSYS 热仿真,仿真条件为:空间中辐射计支杆与试件板具有相同的初始平衡温度 20℃;涂有热控涂层的试件板在空间接受 1 376 W/m^2 的辐照,并假设辐射计位置不变始终接受均匀辐照. 支杆与试件板交界处的温度,即支杆 $x = 0$ 界面的 T-t 仿真曲线如图 4 所示.

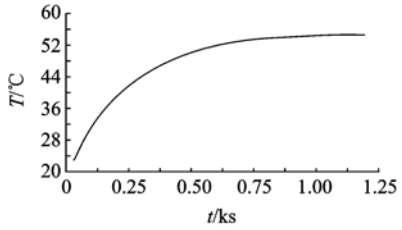

图 4　辐射计支杆 T-t 仿真变化曲线

仿真结果表明:支杆 $x = 0$ 界面的温度 $T(0, t)$ 随时间变化曲线可近似为线性,而在施加载荷

860 s 后达到近似热平衡,因此该界面处支杆的温度变化率可近似为常数$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}\approx C$. 试件板与支杆共有的微元 d$x$ 足够小,微元中试件板部分的温度可以迅速传递给支杆部分,因此整个微元的温度变化 dT 可看作是 $T(0,t)$ 温度变化,因此热流密度满足:

$$q(t)=K\left.\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}\right|_{x=0}=K\frac{C\Delta t}{\mathrm{d}x} \tag{9}$$

选取相同的热探测器采样时间,因此在相同的采样时间中支杆 $x=0$ 处的热流密度可看作是常数,满足方程(8)分析解的求解条件.

式(8)的分析解为

$$T(x,t)=T_0+\frac{2q\sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}}}{K}\exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right)-\frac{qx}{K}\left[1-\mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)\right] \tag{10}$$

式中,T_0 为支杆的初始温度,与试件板的初始温度相等;$\mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right)$为误差函数,$x=0$ 界面处此项为 0. 试件板温度为实时测试量,因此根据分析解可计算得到试件板的传导热损失[8].

2.4 辐射计对流换热

模拟空间环境中进行原位测试时是真空状态,可忽略对流换热引起的热损失. 但是辐射计在地面进行恒温环境下的原理验证时,需将对流换热引起的热损失在数据处理过程中填加进去.

试件板与周围空间对流换热的热量为

$$Q_{\mathrm{Cov}}=hA_{\mathrm{s}}(T_{\mathrm{s}}-T_{\mathrm{e}}) \tag{11}$$

试件板与环境对流换热的计算主要是换热系数 h 的计算. 恒温实验环境中,辐射计与太阳模拟器距离为 2 m,并由太阳模拟器提供一个太阳常数的辐照 E,太阳模拟器光源为准直的均匀光源,具有很高的稳定性和均匀性,因此满足试件板上的热控涂层接受均匀的辐照热流密度,即 $Q=\alpha_{\mathrm{s}}E$. 此时试件板还将与测热腔内部换热,通过计算,试件板与测热腔内部的辐射换热量与试件板接收的一个太阳常数的辐照相比可以忽略,可以根据文献[9]中描述的只有平板上表面接受均匀热流密度时实验关联式计算对流表面传热系数:

$$\left.\begin{aligned}Gr&=\frac{g\alpha_v Qd^4}{\lambda v^2}\\Nu&=m(GrPr)^n\\h&=Nu\frac{\lambda}{d}\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

式中,Gr 为无量纲格拉晓夫常数;Nu 为努塞尔常数;α_v 为体胀系数,为定性温度的倒数,定性温度为试件板温度和环境温度的平均值;λ,v,Pr 为根据定性温度得到的空气的物理参数; d 为试件板直径;m,n 为根据 Gr 数确定的常数.

测热腔内部由于温差的存在,流体的密度随温度增加而减小,此外由于聚四氟乙烯支杆不会引入热扰动,内部将不出现自然对流,热量的传递依靠空气导热,因此该部分热损失可根据热传导公式计算.

2.5 辐射计内能增加

测试系统的试件板很薄,可以迅速地达到热平衡,系统内能增加可根据实时测试的试件板温度和采集时间通过计算温度变化率求得.

3 实验结果

辐射计在进入模拟空间环境中进行热控涂层原位测试之前需在实验室恒温环境中进行涂层性能测试的原理验证实验. 实验的目的是验证辐射计原理设计的正确性以及结构与隔热设计的合理性,并验证辐射计的测试精度. 为进入真空模拟环境进行原位测试提供可靠性保证,实验布局如图 5 所示,辐射计位于太阳模拟器出口 2 m 处接收辐照.



图 5 热控涂层 α_{s} 测试实验布局

实验中,外热流由太阳模拟器提供 1 353 W/m^2 的辐照,并在进行涂层性能测试前对太阳模拟器的辐照度进行了标定.

3.1 SR107 热控涂层太阳吸收率的标定

在实验室中利用美国分析光谱仪器公司的光谱仪,对 SR107 热控涂层的光谱反射率进行了测试,其光谱反射率曲线如图 6 所示. 利用式(1)对 SR107 的光谱反射率在整个可见光-近红外波段进行积分,积分方式采用 Romberg 数值积分的方法,得到 SR107 的合成反射率为0. 821 1,热控涂层的透射率近似为 0,求得 SR107 的太阳吸收率为

$$\alpha_{\mathrm{s}}=0.1789$$

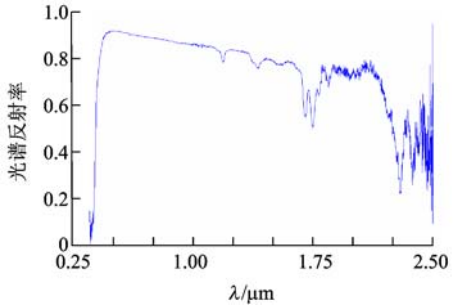

图 6　SR107 光谱反射率曲线

3.2　辐射计测试的 SR107 太阳吸收率值

表 1 为实验 1 h 内选取几个时间节点的 α_s 测试值. 测试数据与利用美国分析光谱仪器公司标定得到的 α_s 值比较,可计算得辐射计的测试精度. 在评定测试精度时对辐射计测试初期、瞬态、稳态 3 个不同时期的实验数据分别计算.

表 1　热控涂层 α_s 测试值及测试精度

采样时间/min	α_s	精度/%
100	0.171 3	
200	0.173 5	
300	0.175 3	1.8
400	0.176 4	
500	0.176 6	
600	0.176 8	
800	0.176 9	
1 000	0.176 9	0.85
1 200	0.177 2	
1 500	0.177 8	
1 800	0.178 2	
2 100	0.178 4	
2 400	0.178 3	
2 700	0.178 2	0.52
3 000	0.178 3	
3 300	0.178 3	
3 600	0.178 4	

图 7 为测试时间内辐射计测试的热控涂层温度曲线,图 8 表示辐射计获取的 SR107 热控涂层 α_s 曲线.

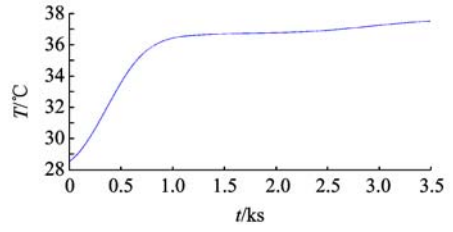

图 7　辐射计测试的热控涂层温度曲线

由图 7 可知,辐射计在实验的前 1 ks 是处于非稳态,1 ks 后辐射计探测器的温度缓慢增加,处于一种近似稳态,而此时计算的 α_s 值更精确. 图 8 曲线表示实验 1.5 ks 后,辐射计获取的 α_s 值,该曲线表明辐射计具有良好的测试重复精度.

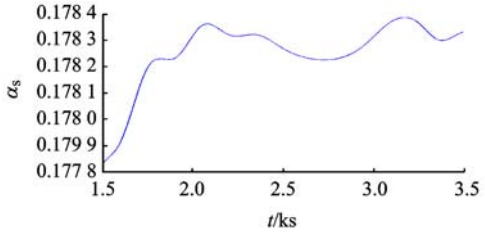

图 8　SR107 热控涂层 α_s 曲线

4　不确定度分析

辐射计在实验过程中,在忽略系统内能部分后,根据式(4),热控涂层的太阳吸收率可表示为

$$\alpha_s = (\varepsilon\sigma T^4 + q_L)/E \tag{13}$$

式中,q_L 为辐射计内部损失的热流密度. 此时热控涂层太阳吸收率的变化可表示为

$$\frac{\Delta\alpha_s}{\alpha_s} = \frac{(\Delta\varepsilon/\varepsilon) + (4\Delta T/T)}{1 + q_L/\varepsilon\sigma T^4} + \frac{\Delta q_L/q_L}{1 + \varepsilon\sigma T^4/q_L} - \frac{\Delta E}{E} \tag{14}$$

式(14)中,由于涂层的 ε 和 E 可近似为常数,其相对不确定度 $\Delta\varepsilon/\varepsilon$,$\Delta E/E$ 大约在 1% 和 2%,因此不确定度主要来自于 T 的测量以及 q_L. 其中 T 的不确定度由探测器精度与数据采集电路的精度共同决定,通过计算大约在 2%,而辐射计的热损失在结构设计过程中通过表面处理和合理的结构设计来减小内部热传导和辐射换热的损失,其引起的不确定度在 3% 左右,各项不确定度因子如表 2 所示.

表 2　辐射计不确定度因子

不确定度因子	数值/%
太阳模拟器标定用探测器	2
太阳模拟器辐射稳定性	2
辐照均匀性	3
辐射计热探测器	2
结构热损失	3
对流换热计算	2
数据处理	2.5
合成不确定度	6.34

5　结 束 语

本文提出了一种可以实现热控涂层性能原位测试的辐射计设计方案,并应用能量守恒原理建立了该辐射计的数学模型. 实验结果表明:辐射计具有较低的测试不确定度,同时该仪器体积小、重量轻,满足星载要求,可实现热控涂层性能的在轨测试,为进一步掌握典型热控材料在轨性能退化趋势和我国中高轨卫星的长寿命设计提供数据保证.

参考文献（References）

[1] 侯增祺,胡金刚. 航天器热控制技术——原理及其应用[M]. 北京:中国科学技术出版社,2007:419 - 445
Hou Zengqi, Hu Jingang. Thermal control of spacecraft—theory and applications[M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press,2007:419 - 445 (in Chinese)

[2] Spanjers G G, Schilling J H, Bromaghim D R, et al. Radiometric analysis from the 26-kilowatt electric propulsion space experiment flight[J]. Journal of Propulsion and Power,2002,18(4): 777 - 780

[3] Kelley L R, Luedke E E, Hall D F. Damage of thermal control properties by energetic mercury ion bombardment[R]. AIAA-72-445,1972

[4] 沈自才,孔伟金,冯伟泉,等. 热控涂层光学性能退化模型研究[J]. 物理学报,2009,58(2):860 - 863
Shen Zicai, Kong Weijin, Feng Weiquan, et al. Degradation model of the optical properties of the thermal control coatings [J]. Acta Physica Sinica,2009,58(2):860 - 863(in Chinese)

[5] 李运泽,魏传峰,袁领双,等. 卫星热控系统的动态特性建模与仿真[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(3):372 - 374
Li Yunze, Wei Chuanfeng, Yuan Lingshuang, et al. Dynamical modeling and simulation of satellite thermal control system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005,31(3):372 - 374 (in Chinese)

[6] 张洪济. 热传导[M]. 北京:高等教育出版社,1992:217 - 223
Zhang Hongji. Heat conduction[M]. Beijing: Higher Education Press,1992:217 - 223 (in Chinese)

[7] Hsieh C K, Yang S L. Chart for estimation of conduction heat leak from specimens used in the measurements of properties by the transient calorimetric technique[J]. Review of Scientific Instruments,1983,54:600 - 603

[8] 邢辉,赵慧洁,张颖,等. 热控涂层性能在轨测试用辐射计原理样机的设计与仿真[J]. 仪器仪表学报,2011,32(2): 241 - 245
Xing Hui, Zhao Huijie, Zhang Ying, et al. Design and simulation of a radiometer principle prototype for thermal control coatings on-orbit test[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2011, 32(2):241 - 245(in Chinese)

[9] Chambers B, Lee Tien-Yu T. A numerical study of local and average natural convection nusselt numbers for simultaneous convection above and below a uniformly heated horizontal thin plate [J]. Journal of Heat Transfer,1997,119(1):102 - 108

（编　辑:刘登敏）

（上接第 1556 页）

[6] 陈辉,纪友哲,祁晓野,等. 前馈模糊免疫算法在泵阀联合 EHA 压力环控制中的应用[J]. 四川大学学报:工程科学版,2010,42(3):184 - 188
Chen Hui, Ji Youzhe, Qi Xiaoye, et al. Application of feed forward fuzzy immune algorithm to pressure loop control of pump and valve combined EHA[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition,2010,42(3):184 - 188(in Chinese)

[7] Kang R J, Jiao Z X, Wang S P, et al. Design and simulation of electro-hydrostatic actuator with a built-in power regulator[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2009,22(5):700 - 706

[8] 纪友哲,祁晓野,裘丽华,等. 泵阀联合 EHA 低温升设计研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(7):1950 - 1952
Ji Youzhe, Qi Xiaoye, Qiu Lihua, et al. Research on low temperature rise design of pump and valve combined EHA[J]. Journal of System Simulation,2009,21(7):1950 - 1952(in Chinese)

[9] 王占林. 近代电气液压伺服控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005:139 - 169
Wang Zhanlin. Modern electric-hydraulic servo control[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005:139 - 169(in Chinese)

[10] Mileti J A, Lawhead P M. Controlled pressure pumps for more efficient hydraulic systems[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale, PA: SAE,1986:144 - 161

[11] Lawhead P M. Electro-modulated control of supply pressure in hydraulic systems[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale, PA: SAE,1991:1 - 17

（编　辑:文丽芳）