

文章编号 1004-924X(2012)05-1134-07

基于信息融合实现的激光陀螺调腔检测

马 立^{1,2*}, 徐次雄¹, 欧阳航空¹, 荣伟彬², 孙立宁^{2,3}

- (1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;
2. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;
3. 苏州大学 机器人与微系统研究中心, 江苏 苏州 215021)

摘要: 考虑激光陀螺调腔人工检测耗时较长、易受干扰, 本文建立了激光陀螺自动调腔系统。在分析激光陀螺调腔工艺的基础上, 构建了一种由 CCD 相机和光电倍增管组成的多传感器信息融合体系结构, 提出了基于 D-S 证据理论的激光陀螺调腔检测方法。通过分析计算 CCD 相机和光电倍增管检测到的信号得出光斑、光阑中心点坐标差值及陀螺损耗值, 并由这些信息获得调腔质量的评价函数。然后, 根据 D-S 证据理论对评价函数进行融合处理, 分别获得陀螺调腔质量合格与不合格的信度函数, 应用最大支持度规则对调腔质量进行综合判断。实验结果显示, 基于 D-S 证据理论的激光陀螺调腔方法检测准确率为 91.14%, 有效提高了调腔质量, 验证了该方法的可行性。

关键词: 激光陀螺; 调腔; 检测; D-S 证据理论; 信息融合

中图分类号: TP391; V241.5 **文献标识码 A** **doi:** 10.3788/OPE.20122005.1134

Detection of laser gyro cavity adjustment using information fusion

MA Li^{1,2*}, XU Ci-xiong¹, OUYANG Hang-kong¹, RONG Wei-bin², SUN Li-ning^{2,3}

- (1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
 2. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;
 3. Robotics and Microsystem Center, Soochow University, Suzhou 215021, China)
- * Corresponding author, E-mail: malian@shu.edu.cn

Abstract: An automatic cavity adjustment system was established to improve the quality of laser gyro cavity adjustment and to overcome the drawbacks of manual detection such as low efficiency and low anti-interference capacity. According to the process of the cavity adjustment, a multi-sensor information fusion architecture was established by a CCD camera and a photomultiplier. A detection method of laser gyro cavity adjustment was proposed based on the D-S evidence theory. By analysis and calculation of the signals detected by the CCD camera and the photomultiplier, the center coordinate difference between facula and diaphragm and the loss value of the laser gyro were obtained and the evaluation function for each cavity adjustment result was deduced by these data. Furthermore, the qualified

收稿日期: 2011-12-06; 修订日期: 2012-03-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50905105); 机器人技术与系统国家重点实验室开放课题资助项目 (No. SKLRS-2010-MS-02); 上海大学创新基金资助项目 (No. SHUCX112200)

and unqualified belief functions of the cavity adjustment were obtained, respectively, and the quality of the cavity adjustment was verified based on the maximum support rule. The experimental result indicates that the accuracy of the detection method based on D-S evidence theory is 91.14%, which improves the quality of cavity adjustment effectively and validates the feasibility of the proposed method.

Key words: laser gyro; cavity adjustment; detection; D-S evidence theory; information fusion

1 引言

激光陀螺调控的目的是通过调节球面反射镜位置使激光陀螺腔体内激光回路与腔体毛细管中心轴线尽量重合,并使出射光的损耗达到要求,以满足陀螺使用性能需要,即调控过程中必须同时检验图像信息和损耗信息。而传统人工调控把图像信息和损耗信息的获得分为2个独立过程,分步进行。人工调控时先用人眼观察出射光以判断腔体内激光回路与毛细管中心轴线重合情况,如若图像重合度满足要求则固定反射镜;然后,通过示波器得到损耗信息,若损耗值满足要求则调控完毕,否则要切下反射镜重新调控。因此,人工调控质量低,耗时较长,易受外部环境干扰。

为解决上述人工调控的缺点和不足,有学者提出一种基于D-S证据推理的激光陀螺调控检测方法。D-S证据推理是贝叶斯推理的发展,它解决了贝叶斯估计对先验概率要求较高的缺点,可以在先验概率未知的情况下进行估计。调控时事先不需要知道各传感器单独作用时支持调控合格的概率到底有多大,也不需要知道多源传感器信息与目标的模型关系,采用 $[0,1]$ 区间某个值表示对结果的支持程度,这样即可以避免其它方法建立多源信息和目标输出映射关系模型的过程,同时也避免了对模型进行求解的复杂过程;另外,相比而言D-S证据理论推理计算较简单,很适合调控这种对实时性要求较高的系统。近年来,D-S证据推理在国内外得到了深入研究和广泛应用,涉及故障诊断^[1-2]、模式识别^[3-4]、灾情监控^[5]等多个应用领域。本文的研究采用CCD相机和光电倍增管同时对调控过程进行检测,然后利用D-S证据推理算法对采集的信息进行融合处理,从而得到调控是否合格的最终判断。

2 调控系统及检测方法

2.1 调控系统

为了解决人工调控带来的各种缺点,提高调控质量,建立了一套自动调控系统,图1所示为自动调控系统硬件实物图。调控时,机械手移动待装配球面镜调整腔体内闭合光路的路径,使其尽可能与腔体毛细管中心轴线重合。从陀螺射出的光经过分光棱镜后分为两路,分别由光电倍增管和CCD相机检测,得到的信号送入计算机后,通过计算可以得出陀螺腔体损耗及光斑和光阑的中心点坐标信息。

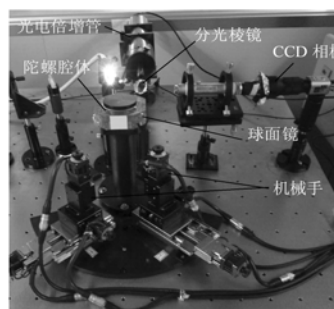


图1 自动调控系统

Fig. 1 Automatic cavity adjustment system

CCD相机将检测到的图像信号传送到上位机,形成光阑-光斑图像,如图2所示,图中两个椭圆分别表示光阑和光斑的边缘。

光阑图像由腔体毛细管光阑成像形成,光斑图像由腔体内激光回路形成。由于腔体毛细管光阑由固定的参考光源成像形成,因此调控过程中,光阑图像形状及位置始终不变。调控也就是要调整陀螺上球面反射镜的位置使光斑图像中心与光阑图像中心尽量重合,重合度越高表示陀螺腔体内激光回路与腔体毛细管中心轴线重合得越好。

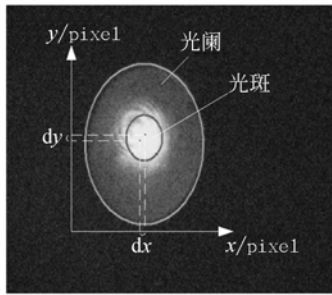


图 2 光阑-光斑图像

Fig. 2 Image of facula and diaphragm

与此同时,光电倍增管检测另一路出射光,将检测到的信号送到上位机后,经计算处理可得到陀螺损耗值。

调控时,机械手移动球面反射镜可以同时调节光斑、光阑图像的重合情况及陀螺损耗值。将 CCD 检测到的信息和光电倍增管检测的信息在上位机上融合处理,就可以得到调控是否合格的最终判断。

2.2 检测分析方法

为便于判断光阑图像中心与光斑图像中心重合度是否满足要求,在光阑-光斑图像中,以视频窗口的左下角为坐标原点,建立如图 2 所示直角坐标系。

由于光阑图像亮度均匀,形状规则,对称性好,采用最大类间方差法对光阑图像进行分割,并使用重心法对光阑图像中心进行识别,可得中心点坐标 x_1, y_1 。针对光斑图像闪烁特点,采用序列图像方差分析方法获得光斑图像的中心点坐标 x_2, y_2 。由此可计算出光阑、光斑 x, y 轴的坐标差值 dx, dy 。由于试验中 dx, dy 的变动对调控质量的影响不同,因此研究中把 dx, dy 作为独立影响因子考虑,而不是通过两者计算出光阑、光斑中心距来考虑。

损耗是评价激光器谐振腔质量的一个重要指标,在激光陀螺的生产装配和质量检测过程中,都需要对谐振腔的损耗进行测量。其损耗定义为:

$$s = 2\pi \cdot \frac{\omega'}{T}, \quad (1)$$

其中: ω' 为谱线的半高宽度, T 为频谱曲线的间隔。

损耗信息由光电倍增管提供,光电倍增管检测到光信号后将其转换为电信号,该信号经过

AD 转换后送入上位机,得到信号频谱分布曲线。根据频谱分布曲线的特点,提出一种基于谱线的快速自相关算法对 T 进行估计,算法如下:

$$r(m) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-m} x(n)x(n+m), & \forall n \in F_{k_1}, n+m \in F_{k_2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2)$$

式中, N 为信号的长度, F_{k_1} 为第 k_1 条谱线, F_{k_2} 为第 k_2 条谱线。

$r(m)$ 分别在 $T, 2T, \dots, kT$ 处存在极大值,因此,通过快速自相关算法即可估计出 T 。对每条基模谱线,求取其极大值 V_{\max} ,进而得到 $V_{\max}/2$ 处的谱线宽度 ω' ,即可按式(1)得到谐振腔的损耗。

损耗值 s 和 CCD 相机提供的光阑、光斑中心坐标差值 dx, dy 作为 3 个独立证据送入 D-S 证据推理融合中心,经过信息融合后得到检测的最终结果。图 3 所示为 CCD 相机和光电倍增管所组成的基于 D-S 证据推理的信息融合检测系统。

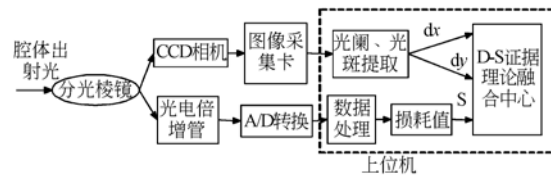


图 3 检测系统结构图

Fig. 3 Architecture of detection system

3 基于典型值的 D-S 证据理论方法

3.1 典型值的确定

CCD 相机和光电倍增管所提供的检测值包括 dx, dy, s 3 种,则球面反射镜每一个位置对应这样一组数据: $Dat = \{dx, dy, s\}$,每一种数据即是 D-S 证据理论中的一条证据。根据调控质量不同,典型值分为合格条件下的典型值 and 不合格条件下的典型值两种。

记 $T_{y_1} = \{D_{x_1}, D_{y_1}, S_1\}$ 为合格条件下的典型值, $T_{y_0} = \{D_{x_0}, D_{y_0}, S_0\}$ 为不合格条件下的典型值,则, $T_y = \begin{bmatrix} T_{y_1} \\ T_{y_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{x_1} & D_{y_1} & S_1 \\ D_{x_0} & D_{y_0} & S_0 \end{bmatrix}$ 即为所求的典型值。

设 dx_1, dx_2, \dots, dx_n 为调控合格条件下 n 次

检测光阑、光斑 x 轴坐标差值,则典型值 D_{x_1} 可由以下步骤计算:

(1)计算 n 次检测光阑、光斑 x 轴坐标差值的平均值

$$\bar{dx} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dx_i, i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

(2)计算标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (dx_i - \bar{dx})^2}, \quad (4)$$

(3)典型值 D_{x_1} 可表示为

$$D_{x_1} = \bar{dx} + \alpha\sigma, |\alpha| \leq 1, \quad (5)$$

式中, α 为修正系数(常数)。可根据实际情况适当调整 α 值,对典型值 D_{x_1} 做适当调整。同理,可计算出典型值 $D_{y_1}, S_1, D_{x_0}, D_{y_0}, S_0$ 。即可按此方法求出 T_y 。

3.2 各传感器对调控质量的评价

为综合利用 CCD 相机和光电倍增管检测信息,避免单一传感器检测时的缺点,研究中采用 D-S 证据合成方法^[6-8]对来自 CCD 相机和光电倍增管的信息进行融合处理,最终得到调控质量是否合格的综合判断。根据传感器检测到的信息,对调控质量做出判断,这种评价通过概率函数值表示,值越大表示该传感器支持调控质量合格的概率越大。D-S 证据理论中基本概率分配函数表示传感器信息对某识别模式的支持度。调控检测过程中,根据 CCD 相机和光电倍增管检测到的信息 dx, dy, s , 分别得到每条信息对调控模式的基本概率分配函数,即调控质量的评价函数。

记 u_1 :“调控质量合格”; u_2 :“调控质量不合格”。则 $\Theta = \{u_1, u_2\}$ 为识别框架。 Θ 的所有子集组成的集合称为 Θ 的幂集^[9-10], 记作 2^Θ , 则

$$2^\Theta = \{\emptyset, \{u_1\}, \{u_2\}, \{u_1, u_2\}\}.$$

由基本概率分配函数定义知 $m(\emptyset) = 0$, 又因研究中调控质量要么合格要么不合格,而两者必选其一,所以有 $m(\{u_1, u_2\}) = 0$ 。所以由 D-S 证据理论基本原理可知

$$m(u_1) + m(u_2) = 1. \quad (6)$$

对于调控质量的两种模式 u_1, u_2 , 由 3.1 节方法计算出该模式下 CCD 相机和光电倍增管检测信息的典型值 T_y 。这样对于传感器任意检测值 $Dat_i, i = 1, 2, 3$, 计算它与模式 u_i 中对应典型

值的 Hamming 距离^[11]:

$$H_{ij} = |Dat_i - T_{y_{ji}}|, \text{ 其中 } j = 1, 2, \quad (7)$$

与模式 u_1, u_2 的 Hamming 距离之和为:

$$H_i = \sum_{j=1}^2 H_{ij}, \quad (8)$$

则对于任意证据 Dat_i , 其对模式 u_i 的基本概率分配函数可按下式计算:

$$m_i(u_j) = \frac{H_i - H_{ij}}{H_i}. \quad (9)$$

通过式(9)的计算,可以得到基本概率分配函数数组:

$$M = \begin{bmatrix} m_1(u_1) & m_2(u_1) & m_3(u_1) \\ m_1(u_2) & m_2(u_2) & m_3(u_2) \end{bmatrix}.$$

3.3 D-S 证据理论合成

求出调控质量的评价函数后,可应用 D-S 证据理论合成规则求出各模式的信度函数^[12-13] $m(u_i)$, 合成规则^[14-15]如下:

$$m(u_i) = \frac{1}{1-K} \sum_{j=1}^3 \prod_{i=1}^3 m_j(u_i), \quad (10)$$

式中 K 为冲突系数,可由下式计算

$$K = \sum_{i=1, j=1 \text{ 且 } i \neq j}^3 m_i(u_1) m_j(u_2). \quad (11)$$

式(10)计算出来的各模式的信度函数值 $m(u_1), m(u_2)$ 分别表示信息融合后对调控质量合格与不合格的支持程度,值越大表示支持程度越高。根据 D-S 证据理论的最大支持度决策规则^[16,1], 即 D-S 证据理论融合后的决策结果由最大信度函数值所表示的模式决定。

4 调控检测实验验证

4.1 排除粗大误差位置处的信息

实验中由机械手移动球面反射镜寻找合适的装配位置,对于球面镜的每一个位置 CCD 相机和光电倍增管检测到一组数据 Dat , 由于机械手操作球面反射镜按“回”字形路径移动,而光斑中心可能合适位置在一个半径为 r_0 的圆内,如图 4 所示,因此落在圆外的点是粗大误差点。研究中应首先排除粗大误差点,以免这些位置的信息进入融合中心而影响对调控结果的判断。

调控时,由于光斑为椭圆形,长半轴与短半轴之差较大,短半轴长度基本被包括在半径为 r_0 的

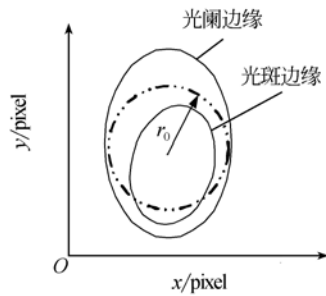


图 4 光斑中心移动范围

Fig. 4 Moving area of the facula center

圆内,因此要限定的主要是球面反射镜沿长半轴范围内的移动,即

$$\Delta y < r_0, \quad (12)$$

其中 r_0 为球面反射镜可能位置的最大圆半径。根据调控实际情况,试验中取 r_0 为 35 pixel。即当 $\Delta y > 35$ pixel 时认为是粗大误差点,予以排除。

4.2 D-S 证据融合处理

试验中,根据采集的 25 组合格数据和 25 组不合格 Dat 数据计算出典型值 T_y 为:

$$T_y = \begin{bmatrix} 9.731 & 14.242 & 0.645 \\ 18.142 & 29.474 & 0.885 \end{bmatrix}.$$

利用此典型数据,对来自传感器的多种信息进行 D-S 证据理论融合处理并做出决策判断,表 1 为球面反射镜处在某位置时融合处理结果及决策结果。

表 1 D-S 证据理论融合处理结果

Tab. 1 Fusion result of D-S evidence theory

	CCD 相机		光电倍增管	D-S 证据理论融合
	$dx/\mu\text{m}$	$dy/\mu\text{m}$	$s/(\%)$	
$m(u_1)$	0.771 8	0.789 9	0.069 38	0.966 4
$m(u_2)$	0.228 2	0.210 1	0.030 62	0.033 6
	决策判断			合格

为验证所建立的 D-S 证据理论检测系统,利用所提出的检测方法实时地检测调控质量,对采集的数据进行融合处理。对某个激光陀螺调控过程中提取若干组数据,去除粗大误差点后剩下 158 组数据,应用所提出的 D-S 证据理论方法处理这 158 组数据,并做出调控质量是否合格的判断,表 2 所示为其中 10 组数据处理结果。由表 2 可知,所提出的激光陀螺调控检测方法具有很好

的检测效果。

表 2 检测数据及结果

Tab. 2 Detection data and results

样本序号	样本数据		D-S 证据理论融合			D-S 决策判断
	dx μm	dy μm	s $/(\%)$	$m(u_1)$	$m(u_2)$	
1	25.253	2.542	0.065 6	0.957	0.043	合格
2	9.662	9.912	0.065 7	1.000	0.000	合格
3	10.891	11.709	0.065 9	0.999	0.001	合格
4	13.998	13.230	0.066 2	0.995	0.005	合格
5	12.319	3.116	0.066 3	0.985	0.015	合格
6	14.742	7.188	0.089 7	0.096	0.904	不合格
7	25.742	34.847	0.090 2	0.008	0.992	不合格
8	22.591	23.313	1.004 5	0.086	0.914	不合格
9	20.389	7.604	1.009 0	0.242	0.758	不合格
10	23.455	32.210	0.088 8	0.001	0.999	不合格

为比较单一传感器检测和多传感器检测效果,用 D-S 证据理论融合方法检测上述 158 组数据的同时,每种传感器也单独对调控质量的检测结果做出判断,3 种不同方式的检测判断结果如表 3 所示。

表 3 单一传感器检测和多传感器检测比较

Tab. 3 Comparison of single sensor detection with multi-sensor detection

	CCD 相机	光电倍增管	CCD 相机 + 光电倍增管
检测误判数	22	19	14
准确率($\%$)	86.08	87.97	91.14

由表 3 可知,单一 CCD 相机检测与单一光电倍增管检测时的准确率分别为 86.08% 和 87.97%,而同时采用 CCD 相机和光电倍增管检测,并用 D-S 证据理论融合处理时的准确率为 91.14%。

5 结 论

建立了由 CCD 相机和光电倍增管构成的调控检测系统,提出了一种基于 D-S 证据理论信息融合调控检测方法。由检测系统得到光阑和光斑中心点的坐标差值 dx 、 dy 及损耗值 s ,并将这 3

种信息送入 D-S 证据理论融合中心进行信息融合,以得到调控质量的综合判断。阐述了典型值的计算方法,并在此基础上计算各条证据对调控质量的评价函数,应用 D-S 证据理论融合这些结果分别得到调控质量合格与不合格的信度函数,利用最大信度函数决策法则对最终检测结果做出

判断。由调控检测实验结果可知,应用提出的调控检测方法准确率为 91.14%,比单一 CCD 相机或光电倍增管检测时分别提高了 5.06% 和 3.17%。由此可知,所提出的检测方法不仅可以解决传统人工调控检测时的缺点,而且比单一传感器检测效果好。

参考文献:

- [1] OTMAN B, YUAN X H. Engine fault diagnosis based on multi-sensor information fusion using Dempster-Shafer evidence theory[J]. *Information Fusion*, 2007, 8(4):379-386.
- [2] GUO H Y, LI Z L. A two-stage method to identify structural damage sites and extents by using evidence theory and micro-search genetic algorithm [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(3):769-782.
- [3] MADHI T, REZA G, REZA E. Knitted fabric defect classification for uncertain labels based on Dempster-Shafer theory of evidence [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(5):5259-5267.
- [4] 龚卫国,王林泓,贺莉芳. 基于特征子模式典型相关分析的热释电红外信号识别[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4):884-891.
- GONG W G, WANG L H, HE L F. Pyroelectric infrared signal recognition based on feature sub-pattern canonical correlation analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):884-891. (in Chinese)
- [5] ERVAS E, MPIMPOUDIS A, ANAGNOSTOPOULOS C, et al.. Multisensor data fusion for fire detection [J]. *Information Fusion*, 2011, 12(3):150-159.
- [6] GUO K H, LI W L. Combination rule of D-S evidence theory based on the strategy of cross merging between evidences [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(10):13360-13366.
- [7] LIN T CH. Decision-based fuzzy image restoration for noise reduction based on evidence theory [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(7):8303-8310.
- [8] AYTUNC P, MEHMET G. Information fusion with dempster-shafer evidence theory for software defect prediction [J]. *Procedia Computer Science*, 2011, 3:600-605.
- [9] MOHAMED A B, YVES D S, AHMED F, et al.. A ranking model in uncertain, imprecise and multi-experts contexts: The application of evidence theory [J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2011, 52(8):1171-1194.
- [10] AI L M, WANG J, WANG X L. Multi-features fusion diagnosis of tremor based on artificial neural network and D-S evidence theory [J]. *Signal Processing*, 2008, 88(12):2927-2935.
- [11] 马巍. 基于证据理论信息融合的电站锅炉故障诊断[D]. 北京:华北电力大学, 2010.
- MA W. *Fault diagnosis of the power plant boiler based on the evidence theory of information fusion*[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010. (in Chinese)
- [12] LAURENCE B, SOPHIE M. Pedestrian crossing detection based on evidential fusion of video-sensors [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2009, 17(5):484-497.
- [13] AHMAD O, VALÉRIE K, UIF H. Improvement of X-ray castings inspection reliability by using Dempster-Shafer data fusion theory [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2011, 32(2):168-180.
- [14] 陈谋,谭晓宇,姜长生. 基于信息融合的空中红外小目标识别[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8):2032-2039.
- CHEN M, TAN X Y, JIANG C SH. IR small target recognition in sky background based on information fusion[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):2032-2039. (in Chinese)
- [15] LATIFA O, ALEXANDRA D, THIERRY D, et al.. Fault diagnosis in railway track circuits using Dempster-Shafer classifier fusion [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2010, 23(1):117-128.
- [16] 高晶,孙继银,刘婧,等. 基于区域模糊阈值的前视红外目标识别[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12):3056-3063.

GAO J, SUN J Y, LIU J, *et al.*. FLIR target recognition based on local fuzzy threshold [J].

Opt. Precision Eng., 2011, 19(12):3056-3063. (in Chinese)

作者简介:



马立(1977—),女,黑龙江佳木斯人,博士,副教授,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事微操作机器人技术方面的研究。E-mail: malian@shu.edu.cn



荣伟彬(1972—),男,黑龙江绥化人,博士,教授,博士生导师,2002年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为哈尔滨工业大学机器人研究所党委书记,主要从事纳米微驱动机器人及微操作机器人的研究。E-mail: rwb@hit.edu.cn



徐次雄(1985—),男,湖北咸宁人,硕士研究生,主要从事检测技术,多传感器信息融合方面的研究。E-mail: xucixiong4599@163.com



孙立宁(1964—),男,黑龙江鹤岗人,教授,博士生导师,国家杰出青年基金获得者,长江学者,1993年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为苏州大学机器人与微系统研究中心主任,主要从事纳米微驱动及微纳操作机器人、医疗与康复机器人、微小型与仿生机器人等方面的研究。E-mail: lnsun@suda.edu.cn



欧阳航空(1976—),男,湖南郴州人,博士研究生,助理工程师,2005年于上海大学获硕士学位,主要从事机电控制技术方面的研究。E-mail: hankow@shu.edu.cn

●下期预告

大口径 SiC 轻量化主镜热变形的定标

吴小霞,王鸣浩,明 名,王富国

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

为了准确地预算出大口径 SiC 轻量化主镜镜面的温度变形,为望远镜光机系统的调节和热控参数的确定提供可靠的理论参考,本文将 SiC 轻量化主镜上的温度传感器在轴向厚度方向上进行分层处理,对每层上的温度分布采用准 Zernike 多项式进行拟合,并以 4 m SiC 轻量化主镜为例,采用有限元法分别对准 Zernike 前 9 项温度模式(18 种温度场)下的镜面变形进行定标计算,计算出各种单位载荷作用下轻量化主镜镜面的最大变形 Max 以及面形误差 PV 值和 RMS 值,计算结果表明,准 Zernike 第一项模式、单位载荷作用下镜面变形最大,其面形误差 RMS 为 278.3 nm。采用最小二乘法对各种温差场下的镜面误差进行准 Zernike 多项式拟合,从而获得准 Zernike 像差项的系数。采用最小二乘法拟合计算出镜面变形误差产生的准 Zernike 像差项的系数,结果表明 18 种温度场下产生的像差形式主要有:平移、倾斜、离焦、彗差和像散。