

文章编号 1674-2915(2011)03-0264-07

300 mm 平面标准镜装卡结构的关键参数

田 伟,王汝冬,王 平,隋永新,王立朋

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033)

摘要:为了实现大口径平面标准镜的高精结构装卡,对其在重力作用下的面形变化进行了研究。首先,对结构胶的有限元建模进行了理论分析,建立了大口径平面标准镜胶结装卡结构有限元模型。然后,分析了不同胶点数量及分布、不同胶接面积以及不同镜框支撑方式等关键结构参数对参考面面形的影响。最后,设计了大口径平面标准镜胶结及支撑的结构。结果表明,采用胶点直径为 5 mm, 12×3 胶点分布形式胶结时,参考面面形的 PV 值为 24.06 nm, RMS 值为 6.78 nm, 满足了大口径平面标准镜面形精度的要求。

关键词:光学检测; 球面标准镜; 参考面; 有限元法

中图分类号: TN305.7; TH703 **文献标识码:** A

Key structural parameters of 300 mm aperture reference flat mirror

TIAN Wei, WANG Ru-dong, WANG Ping, SUI Yong-xin, WANG Li-peng

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics
and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to design the structures of large-aperture reference flat mirrors with high-precision, the shapes of a large-aperture reference flat mirror were studied under gravitational conditions. Firstly, the establishing method of the structure adhesive by finite element analysis was elaborated, and the finite element model of large-aperture reference flat mirror supported with adhered spots was established. Then, the influences of different number of adhered points and point distribution, different sizes of spots and support schemes on the shapes of large-aperture reference flat mirrors were researched. Finally, the structure for large-aperture flat mirror supported with adhered spots was designed. The experimental results indicate that by support scheme with 12×3 distributed and 5mm diameter adhered spots, the peak to valley (PV) value and RMS value of the reference surface is only 24.06 nm and 6.78 nm, respectively, which satisfies the requirement of shape precision of the large-aperture reference flat mirror.

Key words: optical test; reference sphere mirror; reference surface; finite element method

收稿日期:2011-01-15;修订日期:2011-03-15

基金项目:02 专项基金资助项目(No. 2009ZX02205)

1 引 言

集成电路(Integrated Circuit, IC) 技术的发展推进了对微电子加工设备的要求,研制新一代的光刻设备已成为目前微电子加工业的重要任务。分辨率是新的曝光光刻设备的主要技术指标,提高系统分辨率与大口径、超高精度光学表面的检测密切相关。大口径平面标准镜是光学元件面形检测中的重要测量器具,也是对大口径光学系统进行精密装调时的重要基准,因此,研制高精度大口径平面标准镜无论对于大口径光学元件的面形检测还是对大口径光学系统的装调都具有十分重要的意义^[1]。

大型参考镜在工作运行中的面形质量,不仅与参考镜本身的加工质量有关,而且与支撑结构合理与否密切相关,不同的支撑方式引起的变形差别非常大。在大口径立式光学系统中,参考平面自重引起的面形变化问题须严格控制^[2]。本文针对光刻镜头光学元件的检测需求,对大口径平面镜的装卡关键结构参数进行了研究。

2 大口径平面标准镜装卡结构设计

标准镜的镜坯选用口径为 300 mm、厚度为 80 mm 的进口熔石英平行平板。为避免参考平面和后表面的多重反射,标准镜后表面有个 10° 的楔角,背部反射面为平面。图1 给出了平面标准

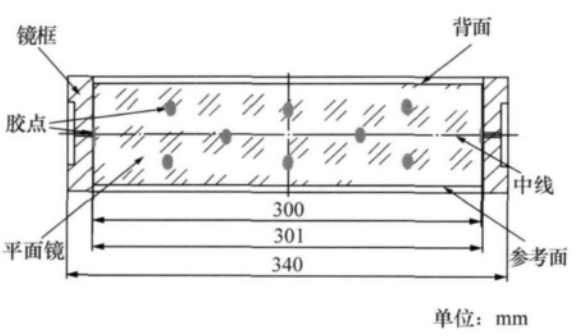


图 1 胶粘点支撑示意图

Fig. 1 Sketch of support scheme with adhered spots

镜的装卡结构。为了使镜子固定在镜框上,采用圆周为均布的胶点,保证所有的胶点质心与镜子质心在同一个平面上。图中胶结结构平面镜圆周均布 12 个胶点,在镜子的厚度上分布 3 层,共 36 个胶点(标记为 12 × 3 胶点分布) 。相对于传统的机械连接方法,采用粘接方法不但可以改善粘接件的应力分布状况,实现其它连接方式难以解决的各种不同材料之间的连接,而且适当粘合剂的选择可达到耐温和抗震等性能要求^[3]。

综合考虑光学元件的机械性能、对工作环境的适应性、加工工艺性、采购渠道,选择进口合成熔石英作为标准镜的光学玻璃材料,铝合金作为镜框材料,性能参数见表 1 。

表 1 透镜、镜框材料参数表
Tab. 1 Martial parameters of lens and frame

材料	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E / GPa	ν
熔石英	2.201×10^3	72.7	0.16
胶粘剂	1.1×10^3	20	0.49
铝合金	2.7×10^3	70.6	0.33

3 理论计算及有限元仿真分析

3.1 理论计算分析

根据材料力学相关理论,当参考面放置在与参考平面同样半径的环上时,中层面的变形可由下式给定^[4]：

$$W(r) = \frac{\rho t \alpha^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{\alpha^2} \right) \left(\frac{5 + \nu}{1 + \nu} - \frac{r^2}{\alpha^2} \right), \quad (1)$$

式中: $D = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)}$ 为抗弯刚度, r 为计算位置到中心的距离, α 为半径, t 为厚度, E 为杨氏模量, ν 为泊松比, ρ 为材料的密度。

上式一般用于薄板(厚径比 $< 1/10$) 中间层面变形的计算。而本文平面标准镜厚径比为 0.375, 因此通过该公式计算的变形与实际的变形将会有一定的差别。分析时需要把透镜作为中厚板,此时应用弹性力学的三维问题来求解。应用由 Reissner 模型建立的极坐标中厚板弯曲的基

本微分方程,在轴对称情况下的形式为^[4,5]:

$$-\frac{D}{a^3} \frac{d}{d\rho} \Delta \omega + \frac{D}{Ca^2} \left[\frac{d^2 Q(\rho)}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dQ(\rho)}{d\rho} - \frac{Q(\rho)}{\rho^2} \right] - Q(\rho) + \frac{vt}{10(1-v)a} \frac{dq(r)}{d\rho} = 0$$

$$\frac{dQ(\rho)}{d\rho} + \frac{Q(\rho)}{\rho} + aq(r) = 0, \quad (2)$$

式中: $C = \frac{5Et}{12(1+v)}$, $Q(\rho)$ 为单位长度上的径向剪力,算子 $\Delta = \frac{d^2}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho}$ 。

中厚板的 Reissner 模型公式(2) 是非线性问题,不能像公式(1) 一样得到有效的解析解,需要通过给定的边界条件,应用数值分析计算的方式

求解。

3.2 有限元模型的建立

3.2.1 结构胶的建模方法

结构胶有很高的体积模量,在受压或受拉时体积基本保持不变。应用有限单元法分析、预测结构胶的性能,体现胶的特性的最明显和直接的方法是在胶的实体有限元网格中使用足够的细节^[6]。一个单层单元不允许胶独立的膨胀和收缩,因为它的所有节点和基底相连,因此胶模型在厚度方向至少需要3个单元^[7]。当胶点采用较多的单元时,在与胶相连的基镜框和镜子上将会产生大量的单元,此时模型的单元数量会很多,计算时间很长。

Gregory 给出了建立胶的有效模型的方法。令胶在厚度方向(“3”的方向)上存在应变,而使其它方向(“1”和“2”方向)上的应变为0,所得到胶的有效模型胡克定律为^[8]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11}M & \frac{k_{12}k_{11}vM}{1-v} & \frac{k_{13}k_{11}vM}{1-v} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{21}k_{22}vM}{1-v} & k_{22}M & \frac{k_{23}k_{22}vM}{1-v} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{31}k_{33}vM}{1-v} & \frac{k_{32}k_{33}vM}{1-v} & k_{33}M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

式中的校正因子 k_{ii} 可表示为:

$$k_{ii} = \sum ii/M, k_{ij} = \sum ij/M, i \neq j, \quad (4)$$

式中: $M = (1-v)E/(1+v)(1-2v)$, σ 为正应力, τ 为剪应力, ε 为正应变, γ 为剪应变, $\sum ii$ 是由第 i 个方向的单位应变(其它方向的应变为0)引起的 i 向的应力, $\sum ij$ 是由第 j 个方向(其余应变为0)的应变引起的 i 向的应力。

3.2.2 有限元单元划分

图2给出了标准镜结构的有限元模型,一共划分了103474个单元。在UG NX NASTRAN中利用4面体单元对镜子、胶点和镜框进行划分,在镜框的底部对镜框施加固定约束,对整个结构施

加重力场。



图2 标准镜有限元模型

Fig. 2 Finite element model of large aperture reference flat mirror

4 装卡结构关键参数分析

4.1 不同胶点数量及胶点分布对镜子面形的影响

传统方法和粘接方法对光学件的变形影响的差别较大,特别是粘接方法产生的面形变化的RMS(均方根)值比传统方法产生的RMS值要小

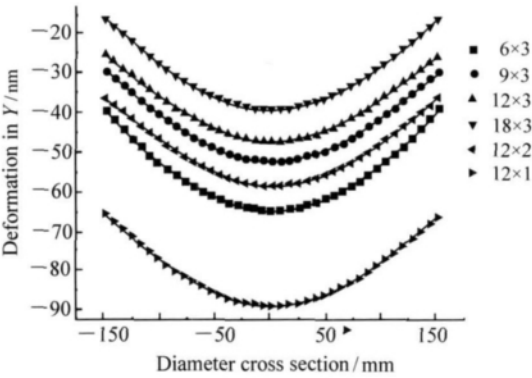


图 3 横截面的自重变形

Fig. 3 Sag deformation of diameter cross section

得多^[9]。在使用结构胶对镜子进行粘接时,胶点的数量及其分布形式将会对镜子参考面的面形产生较大的影响。下面对不同胶点数量及分布对镜子参考面形的影响进行仿真分析,分析时分别对6×3、9×3、12×3、18×3、12×1、12×2的胶点分布进行了研究对比。图3给出了以上各种情况镜子横截面的自重变形。从图中得出,镜子变形量最大点在中心,胶点数量越多镜子的刚性位移越小。

镜子的变形主要引起光学性能的降低,可采用光学性能的降低程度来评价。对于高精度、小像差系统通常计算变形引起的波面误差大小,其指标为峰谷(PV)值和均方根(RMS)值^[10]。对于平面镜面形通常由轴向变形的大小、PV值和RMS值,即表面各点相对于某一“最佳拟合平面”的轴向偏差的均方根值来描述。

将有限元分析得到的镜面节点信息输入到自编 Matlab 程序中进行面形计算。在对平面变形后面形计算时,假设镜面变形量较小,变形后仍然是平面,采用最小二乘法进行平面拟合,求变形后

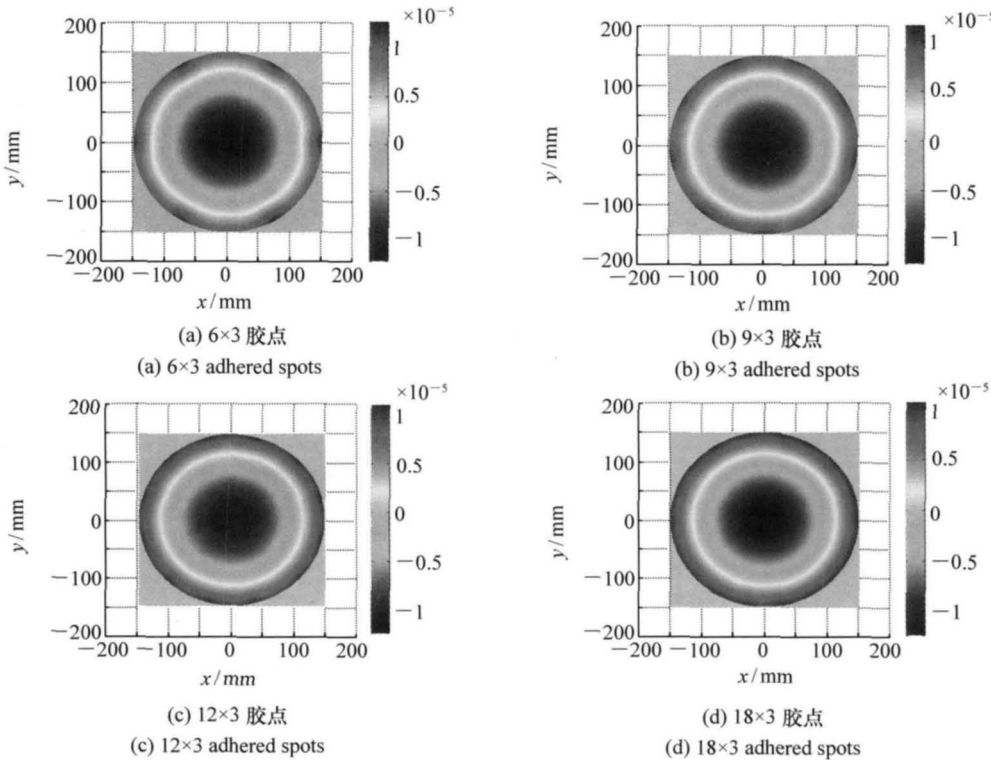


图 4 不同胶点分布的参考面面形

Fig. 4 Reference surface shapes of support scheme with different distributed adhered spots

各节点与最佳拟合平面间的 PV 值和 RMS 值。图 4 给出了镜子变形后去除“最佳拟合平面”的残余面形。

参考面面形起伏分布在胶点粘接位置。随着胶结点数的减少,最大变形量和应力逐渐增大,采用胶结点数越多,镜子变形曲线的影响越来越趋向于同心圆环。表 2 给出了不同胶点分布与数量胶结时参考面的面形变化情况。从表中可以分析得出胶点的分布对表面的影响大于胶点数量对面形的影响。综合比较,当粘接胶点分布为 12×3 点均匀分布时,参考面面形变化较小。选择该胶点分布方式粘接不但可以很好地减小镜子的变形量,而且可以简化粘接的工艺过程。

表 2 不同胶点分布的参考面面形
Tab.2 Reference surface shapes of support scheme with different distributed spots

胶点分布	PV/nm	RMS/nm
6×3	25.45	6.72
9×3	23.98	6.72
12×3	21.30	6.24
18×3	22.84	6.63
12×1	26.46	6.94
12×2	24.00	6.75

4.2 不同胶结面积对镜子面形的影响

对于高精度、大口径光学元件,在对镜子进行胶结固定时,不同胶结面积将会对镜子面形产生一定的影响。为了保证镜子胶结结构的精度,对不同的胶结面积参数进行了详细的计算分析。表 3 列出了在 12×3 胶点分布情况下,使用不同直径的圆形胶点时,镜子参考面产生的面形变化。

表 3 不同胶点直径的参考面面形
Tab.3 Reference surface shapes with different adhered spot diameters

胶点直径/mm	PV/nm	RMS/nm
3	21.58	6.48
5	21.30	6.24
8	21.15	6.18
10	21.04	6.06

从表 3 可以看出,参考面的面形变化并不是随着胶点直径的增加而单一的增加或减少。因此在对胶结面积进行设计时,应在胶结结构满足强度要求的前提下,根据实际结构胶黏度和注胶工艺综合选取。

4.3 镜框的支撑方式对镜子变形的影响

由于标准镜质量较大,在对镜框进行固定和支撑时镜框会产生一定的局部变形。对高精度 (nm 级) 镜子装卡,镜框的变形会传递到镜子上从而会影响镜子的面形精度。因此对如图 5 所示镜框的支撑方式进行了研究。在 12×3 胶点分布方式下,分别分析了底面均匀支撑、底面 3 点支撑底、底面 6 点支撑、中间面均匀支撑、中间面 3 点支撑底、中间面 6 点支撑时镜子的面形。

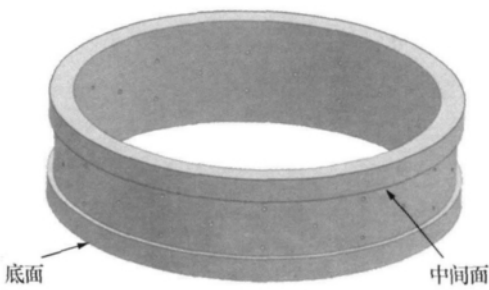


图 5 镜框结构
Fig.5 Structure of lens frame

图 6 给出了对镜框底面进行不同方式支撑下的参考面面形的分布情况。从图中可以得出,镜框的支撑方式的不同对标准镜变形的均匀性影响比较大,支撑点越多参考面变形分布越趋于同心圆环。

表 4 镜框在不同支撑方式下的参考面面形
Tab.4 Reference surface shapes with lens frame in different support schemes

镜框支撑	PV/nm	RMS/nm
底面均匀	21.30	6.24
中面均匀	22.87	6.63
底面 3 点	35.27	8.34
中面 3 点	39.52	9.59
底面 6 点	24.06	6.78
中面 6 点	24.88	7.14

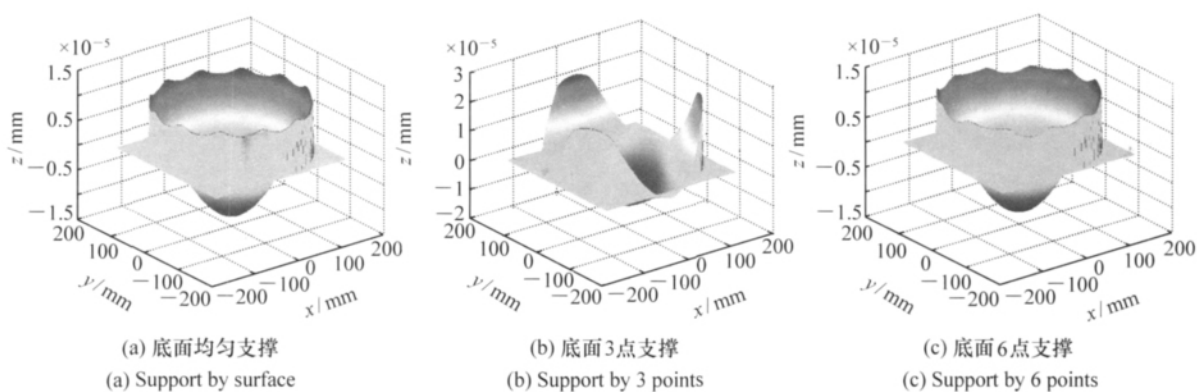


图6 镜框在不同支撑方式下的面形

Fig. 6 Reference surface shapes with lens frame in different support schemes

表4详细列出了上述6种镜框支撑方式下,参考面面形的PV值和RMS值。计算分析的结果表明,镜框的不同支撑方式下参考面的面形变化较大,采用多点支撑可以明显减小参考面的面形变化和曲率半径的变化。对于参考面面形而言,镜框底面支撑要比镜框中面支撑面形变化小。

根据上述对大口径平面标准镜关键结构参数的分析,设计了大口径平面镜装卡与支撑结构。该结构的胶结部分采用直径为5 mm, 12×3的胶点分布方式粘接,对镜框的支撑采用底面6点支撑结构。

5 结论

本文从工程实际出发,建立了大口径光学元件用胶固紧系统的有限元模型,并介绍了胶结构建模的关键问题。研究了不同胶点数量及分布、不同胶接面积以及不同镜框支撑方式等关键结构参数对参考面面形的影响。对粘接工艺成本和面形综合分析选择12×3胶点分布形式和镜框底面6点支撑结构,此时参考面面形PV为24.06 nm, RMS值为6.78 nm,满足了大口径平面标准镜面形精度的要求。

参考文献:

- [1] 苗二龙,张健,谷勇强,等. 用于光刻投影物镜检测的高精度菲佐干涉仪误差分析[J]. 中国激光,2010,37(8):2029-2034.
MIAO E L, ZHANG J, GU Y Q, et al. Measurement error analysis of high precision fizeau interferometer for lithography projection objective[J]. Chinese J. Lasers, 2010, 37(8): 2029-2034. (in Chinese)
- [2] 武旭华,陈磊,王磊. Φ300 mm 干涉仪参考镜的设计及测试[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1235-1240.
WU X H, CH L, W L. Design and test of reference mirror in Φ300 mm interferometer[J]. Optics and Precision Eng., 2007, 15(8): 1235-1240. (in Chinese)
- [3] YODER P R Jr. 光机系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
YODER P R Jr. Opto-Mechanical Systems Design[M]. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
- [4] 孙天祥,杨力,吴永前,等. 基于弹性力学的应力加工方法有限元分析[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(2): 361-364.
SUN T X, YANG L, WU Y Q, et al. Finite element analysis of stressed mirror polishing based on elasticity mechanics[J]. High Power Laser Particle Beams, 2010, 22(2): 361-364. (in Chinese)
- [5] 李婧. 变厚度圆板轴对称非线性分析[D]. 天津: 天津大学, 2004.
LI J. Nonlinear analysis of spherical shells with arbitrarily variable thickness[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese)

- [6] 李福,阮萍,赵葆常,等. 胶紧固平面反射镜的有限元分析 [J]. 光学技术,2006,32(6):896-899.
LI F, RUAN P, ZHAO B CH, *et al.*. Finite element analysis of the plane mirror fastened by adhesive [J]. *Opt. Technique*, 2006,32(6):896-899. (in Chinese)
- [7] BLAKE J N, FETH J R, SZAFRANICE B. Control of mode coupling errors: US,5377283 [P]. 1994-12-27.
- [8] BLAKE J N, FETH J R. Configuration control of mode coupling errors: US,5327213 [P]. 1994-7-5.
- [9] 蒋世磊,陈华强. 环氧树脂胶在光学部件粘接上的应用 [J]. 中国胶粘剂,2004,14(3):1-4.
JIANG SH L, CHEN H Q. Application of epoxy resin adhesive in optical instruments [J]. *China Adhesives*, 2004,14(3):1-4. (in Chinese)
- [10] 徐荣伟,刘立人,刘宏展,等. 大型干涉仪镜子的支承设计与温度变形分析 [J]. 光学学报,2005,25(6):809-815.
XU R W, LIU L R, LIU H ZH, *et al.*. Support schemes and thermal deformation analysis of large aperture interferometer mirrors [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2005,25(6):809-815. (in Chinese)

作者简介:田 伟(1983—),男,河北秦皇岛人,硕士,研究实习员,主要从事光学仪器结构设计方面的研究。

E-mail: tw_919@163.com

《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

* 美国工程索引 EI 核心期刊

* 中国精品科技期刊

* 中文核心期刊

* 百种中国杰出学术期刊

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址: 长春市东南湖大路 3888 号

邮编: 130033

电话: 0431-86176855

传真: 0431-84613409

电邮: gxjmgc@sina.com

网址: <http://www.eope.net>

定价: 50.00 元/册