

文章编号 1004-924X(2010)01-0045-07

SX-700 单色器光栅正弦机构转角 重复精度的模拟分析与测量

吴 坤^{1,2}, 薛 松¹, 卢启鹏³, 彭忠琦³, 陈家华¹, 刘 楷^{1,2}

(1. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;
3. 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:为了使上海光源(SSRF)研制的SX-700单色器的主要设计指标——波长扫描转角重复精度满足优于 $0.43''$ 的要求,研究了单色器的波长扫描组件—光栅正弦机构的转角精度误差来源。设计单色器结构时,运用有限元分析软件ANSYS对光栅正弦机构进行数值模拟计算,并根据模拟结果对光栅正弦机构的转角重复精度进行了误差分析,得到的转角重复精度为 $0.28''$ 。依据分析结果制定了工程设计方案,并成功加工、装配了SX-700单色器。利用作者建立的一套由光电自准直仪组成的测试系统对光栅正弦机构的转角重复精度进行测试,实测精度为 $0.15''$ 。结果表明,设计的SSRF的SX-700单色器光栅正弦机构的转角重复精度满足设计要求。

关键词: SX-700单色器; 正弦机构; 转角精度; 数值模拟

中图分类号: TH744.1 **文献标识码:** A

Simulation analysis and measurement of rotation angle repeatability for grating sine mechanism of SX-700 monochromator

WU Kun^{1,2}, XUE Song¹, LU Qi-peng³, PENG Zhong-qi³, CHEN Jia-hua¹, LIU Kai^{1,2}

(1. *Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: To design a SX-700 monochromator for Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) and to enable its main design index, the rotation angle repeatability of scanning photon energy, to be less than $0.43''$, the error sources affecting the rotation angle repeatability of the grating sine mechanism are investigated and then the grating sine mechanism is simulated numerically by using the finite element software ANSYS. The errors for the rotation-angle-repeatability of the grating sine mechanism are analyzed according to the results of the numerical simulation, which shows that the rotation-angle-repeatability is $0.28''$. Based on the analysis, a SX-700 monochromator is designed, and the angle repeatability of the grating sine mechanism is measured with an autocollimator system designed by us.

收稿日期: 2009-02-23; 修订日期: 2009-06-01.

基金项目: 国家大科学工程上海光源工程资助项目 (No. SS-06; No. 7093XQ070)

Measured results indicate that the rotation angle repeatability of the designed monochromator is $0.15''$, which meets the requirements of the grating sine mechanism for the rotation-angle-repeatability.

Key words: SX-700 monochromator; sine mechanism; rotation angle repeatability; numerical simulation

1 引言

SX-700 单色器是平面光栅单色器,最早由 Petersen^[1]提出,1982年由法国的 Zeiss 公司组织实施,成功研制出了著名的 SX-700 单色器^[2-3]。经过国外科学家的多年研究优化,SX-700 单色器出现了很多不同的版式^[4],虽基本元件依然是前置平面镜和平面光栅,但性能得到大幅度改善。该单色器可以采用多种交替的运行模式,具有光子输出通量高、能量分辨率、光谱纯度和像斑质量好,能量工作范围宽,光束传输效率高等诸多优良特性^[1-7],也越来越多地运用于同步辐射光束线中,但其设计和制造难度也非常大。上海光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)软 X 射线谱学显微光束线站主要用于以材料、环境、生物、有机地球化学、陨星为研究对象的研究中。光源采用 EPU(Elliptically Polarized Undulator)插入件,能够提供各种各样极化状态的软 X 射线。由于 SX-700 单色器的优良特性,故被采用作该条光束线的分光设备。该单色器距离光源 32 m,工作在平行光模式下,无入射狭缝,出射狭缝固定,光学放大倍数在 1.8~2.5 可调节,通过改变包含角来选择波长,工作量程为 250~2 000 eV。根据波长扫描分辨率的要求,光栅正弦机构在全量程(250~2 000 eV)内转角重复精度要优于 $0.43''$ 。

国家重大科学工程上海光源(SSRF)在国内首次采用 SX-700 光栅单色器,由于该单色器的精度要求很高,国内加工制造水平有限,在缺乏工程经验的情况下自行研制并保证按期完成是有风险的。为了保证单色器研制成功,并达到要求的精度指标,本文从机械精度误差的角度,分析了影响光栅正弦机构波长扫描精度的主要因素,并运用有限元软件 ANSYS 对光栅正弦机构进行了数值模拟计算和分析,在此基础上针对各主要误差来源,制定了工程设计解决方案。最后,通过测试验证了模拟计算值的可靠性。

2 光栅正弦机构的转角精度误差源分析

SSRF 的 SX-700 单色器由波长扫描机构、驱动机构以及调节结构^[8]等组成,通过对几种常用的波长扫描方式进行比较^[9-10],SX-700 单色器波长扫描采用正弦机构,该机构主要由平面镜正弦机构和光栅正弦机构组成。光栅正弦机构包括:滑台、光栅扫描驱动杆、光栅驱动平台、顶点机构、正弦杆、光栅扫描机构底板等,光栅正弦机构示意图如图 1 所示。光栅正弦机构由步进电机驱动滑台滚珠丝杠做直线运动,通过柔性波纹管密封将外部直线运动传递到真空室内,经过驱动杆推动正弦杆,使得光栅绕转轴转动。

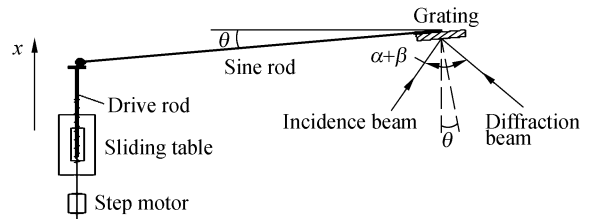


图 1 光栅正弦机构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grating sine mechanism

根据光栅衍射方程 $m\lambda = d(\sin \alpha - \sin \beta)$,式中 m 为衍射级次(这里 m 取 1),单色光波长 λ 与光栅转角 θ 的关系^[8]为

$$\lambda = 2d \cos\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \sin \theta, \quad (1)$$

式中 d 为光栅常数, α 为入射角, β 为衍射角。设正弦杆长度为 L ,滑台的直线位移为 x ,正弦杆的转角为 θ ,则应满足

$$x = L \sin \theta, \quad (2)$$

可见影响转角精度是滑台的直线位移 x 和正弦杆长 L ,这也是最终影响波长 λ 分辨率的因素;而影响 x 和 L 的因素则表现为机械结构的误差,主要误差源为:(1)丝杠螺距累计误差 δS ;(2)正弦杆有效杆距误差 δL ;(3)零位时正弦杆与

丝杠不垂直,表现为驱动杆水平挠度 ux ; (4) 顶点机构轴承套与驱动平台接触滑动面的倾斜(由于偏心距存在),表现为驱动杆轴向变化量 δl ; (5) 正弦杆挠度变化量 δv ; (6) 转动轴和正弦杆末端滚动轴的径向跳动; (7) 线性编码器精度; (8) 轴系误差。

第(1)项具有周期变化的特点;而(2)(3)(4)(5)项主要是由于光栅扫描驱动杆和正弦杆的变形引起的,因此除了提高加工精度要求外,要求正弦杆和驱动杆有较好的抗弯曲能力; (6)项是由制造精度和装配精度决定,可以通过提高加工精度和装配精度降低其影响; (7)项的精度取决于编码器的精度; (8)项的精度取决于加工制造误差。

由上可见,光栅正弦机构要达到较高的转角精度,设计时除了选购合理的部件外,其主要部件必须具有较好的刚度特性。

3 光栅正弦机构主要部件的数值模拟计算

设计单色器时,为获得较好刚度特性的正弦机构,运用有限元分析软件 ANSYS 对正弦杆进行了数值模拟计算,以获得在自重状态下最佳的正弦杆(正弦杆挠度变化量 δv 最小);同时对光栅扫描驱动杆进行静力分析,获得了光栅正弦机构零位时的驱动杆水平挠度和驱动杆轴向变化量 δl 。这些计算值是单色器光栅正弦机构转角精度分析的依据。

3.1 正弦杆受力的数值模拟

SX-700 单色器工作在 6.67×10^{-8} Pa 的真空环境下,波长扫描过程中由于步进机驱动滑台的速度很低,可以近似认为正弦杆处于稳定的平衡状态,只受重力作用。对正弦杆进行材料和截面的优化是基于有剪切变形的 Timoshenko 梁弯曲理论^[11]。由于正弦杆在厚度方向没有受到外力作用,假设在厚度方向不发生任何变形,可以将模型简化为受均布载荷平面剪切弯曲梁简支梁,一端只有一个自由度(ROTZ,即绕转轴的转动),另一端有两个自由度(UX、ROTZ,即水平滑动和绕转轴的转动)。

由于不同的材料和截面形状,其抗弯截面系数和力学性能不同,杆的变形会产生不同的结果。

因此计算时,正弦杆的截面采用了如图 2 所示的 7 种截面,杆长取为 693 mm,材料分别采用较常用的 4Cr13 不锈钢和 2A12 硬铝;计算了正弦杆处于 0° 到 8° 之间每隔 0.5° 位置处的有效杆距变化量,采用 BEAM188 单元,沿梁的纵向划分为 231 个单元,分析结果如图 3、4 所示。

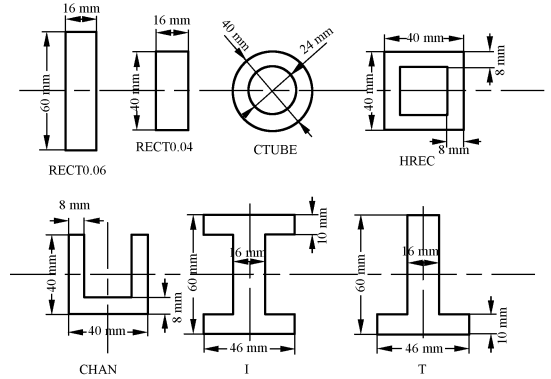


图 2 7 种不同截面尺寸

Fig. 2 Seven kinds of different cross-section dimensions

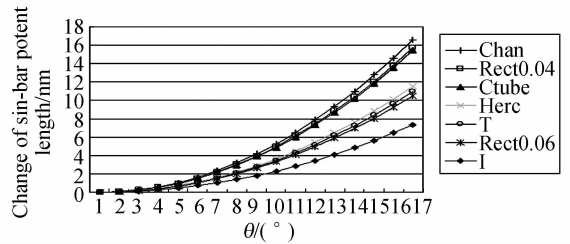


图 3 材料为 2A12 硬铝时正弦杆有效杆距变化量曲线图

Fig. 3 Change of potent length deflection of sin-bar of aluminum alloy

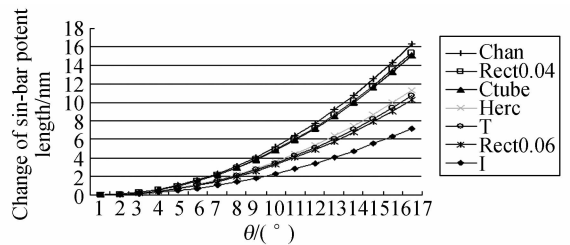


图 4 材料为 4Cr13 不锈钢时正弦杆有效杆距变化量曲线图

Fig. 4 Change of potent length deflection of sin-bar of stainless steel

从图 3 和图 4 可以看出,光栅正弦杆自重情况下,无论是哪种材料,I 型和 T 型以及 RECT

0.06型截面的正弦杆挠度变化量相对于其他截面形状都较小。在整个转角范围不同位置处,材料为 4Cr13 不锈钢时的正弦杆挠度变化量比 2Al2 硬铝的变化量小约为 0.2 nm;考虑到加工和装配的方便,截面形状选用 RECT0.06 型,且材料选用 4Cr13 不锈钢。经计算得:材料为 4Cr13 不锈钢,截面形状为 RECT0.06 的正弦杆,在光栅正弦机构 0° 到 8° 转动过程中,其挠度变化量 δv 为 $0.075 \mu\text{m}$,有效杆距变化量 δL 为 $0.01 \mu\text{m}$ 。图 5 列举了光栅扫描角度为 8° ,材料为 4Cr13 不锈钢,截面形状为 RECT0.06 时的正弦杆轴向形变云图。

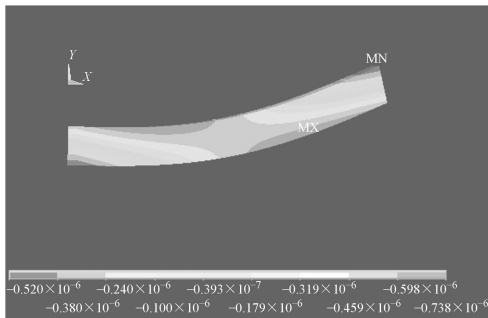


图 5 正弦杆轴向形变云图

Fig. 5 Contour display of sin-bar axial deflection

3.2 驱动杆受力的数值模拟

单色器工作时,在步进电机驱动下,滑台滚珠丝杠带动驱动杆做直线运动,柔性波纹管密封将驱动杆分隔在 6.67×10^{-8} Pa 的真空环境和大气环境下。单色器扫描过程中,驱动杆速度很低,整个运动过程非常稳定,要求无抖动,因此近似认为驱动杆处于平衡状态下。根据结构特点,设计时使负压和驱动组件部分重力相抵消,认为驱动杆受到顶点机构的压力和重力作用。光栅转角从 0° 到 8° 扫描过程中,正弦杆顶点机构轴承套在驱动杆顶面会产生 $0 \sim 6.74$ mm 的滑移,因此简化驱动杆受力模型为偏心受压,顶端偏心受压(无自由度限制),底部固定。

由于驱动杆是变截面杆,截面尺寸与部分段杆长相差不大,因此选用实体单元 SOLID185,材料为 4Cr13 不锈钢。按照驱动杆实际装配关系对驱动杆施加边界条件和载荷,分析了光栅角 0° 、 2° 、 4° 、 6° 和 8° 时的驱动杆形变。ANSYS 分析结果见表 1。图 6 列举了光栅扫描角度为 8° ,材料为 4Cr13 不锈钢的驱动杆受压形变云图。

表 1 ANSYS 分析结果

Tab.1 Results of ANSYS calculation

光栅角度位置/ $^\circ$	驱动杆的压缩量/mm
0	0.035 727
2	0.035 776
4	0.035 956
6	0.036 274
8	0.036 972

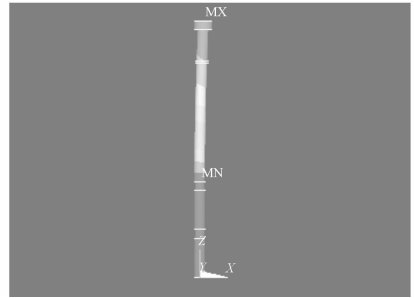


图 6 驱动杆受压形变云图

Fig. 6 Contour display of drive rod deflection

经过计算得零位时水平挠度 $u_x = 0.1 \mu\text{m}$;根据表 1,可算得驱动杆的轴向变化量均方差 $\delta l = 0.3 \mu\text{m}$ 。

4 正弦机构转角重复精度分析

根据正弦机构的运动关系和光栅衍射方程,可推出前 4 项误差源对波长读数精度的影响遵循以下公式^[9]:

$$\delta \lambda_1 = 2d \cos\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \times \frac{1}{L} \delta S, \quad (6)$$

$$\delta \lambda_2 = 2d \cos\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \times \frac{1}{L} \delta l, \quad (7)$$

$$\delta \lambda_3 = 2d \cos\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \times \frac{nS}{L} \delta L, \quad (8)$$

$$\delta \lambda_4 = 2d \cos\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \times \cos \theta \times \delta \theta_1, \quad (9)$$

$$\sin(\theta + \delta \theta_1 + \varphi) = \sin \theta + \sin \varphi, \text{ 且 } \varphi = \arcsin\left(\frac{u_x}{L}\right). \quad (10)$$

其中, φ 为 0 位时正弦杆与丝杠的夹角 90° 之差,即 0 位误差。取 $d = 1/1200$ mm, $\alpha + \beta = 174.15377^\circ$, $\theta = 3.75986^\circ$, 全量程 $\delta S = 0.01$ mm, $S = 2$ mm, $n = 153$;把模拟得到的数值代入

式(6)、(7)、(8)、(9)、(10),得 $\delta\lambda_1 = 1.227 \times 10^{-3}$ nm, $\delta\lambda_2 = 3.70 \times 10^{-6}$ nm, $\delta\lambda_3 = 1.083 \times 10^{-7}$ nm, $\delta\lambda_4 = 0.364 \times 10^{-3}$ nm。由于各项误差相互独立,它们对波长读数的影响应取矢量和,则波长读数误差为:

$$\delta\lambda_{1-4} = \sqrt{\delta\lambda_1^2 + \delta\lambda_2^2 + \delta\lambda_3^2 + \delta\lambda_4^2} = 1.280 \times 10^{-12} \text{ m}, \quad (11)$$

根据式(1),可得前四项误差源对转角精度的影响为:

$$\partial\theta_{1-4} = \frac{\partial\lambda}{2d \cos(\frac{\alpha+\beta}{2}) \cos\theta} = 0.054'' \quad (12)$$

δv 标准方差为 $0.004 \mu\text{m}$,转动轴和正弦杆末端滚动轴的径向跳动均取 $0.5 \mu\text{m}$,线性编码器精度为 $0.5 \mu\text{m}$,轴系误差取 $\Delta\theta_8 = 0.1''$,则由几何学知识得 $\Delta\theta_5 = 0.004 \times 2 \mu\text{m} / 693 \text{ mm} = 0.002''$; $\Delta\theta_6 = 0.5 \mu\text{m} \times \sqrt{2} / 693 \text{ mm} = 0.210''$; $\Delta\theta_7 = 0.5 \mu\text{m} / 693 \text{ mm} = 0.149''$ 。最后得六项误差源对转角精度的影响为:

$$\delta\theta = \sqrt{\delta\theta_{1-4}^2 + \Delta\theta_5^2 + \Delta\theta_6^2 + \Delta\theta_7^2 + \Delta\theta_8^2} = 0.28'' \quad (13)$$

可见光栅正弦机构转角重复精度计算值为 $0.28''$,优于设计要求的精度指标 $0.43''$,理论上验证了设计满足要求。

5 结构设计方案考虑

由上面精度分析可知: $\delta\lambda_1, \delta\lambda_4 \gg \delta\lambda_2, \delta\lambda_3$;且 $\Delta\theta_6, \Delta\theta_7$ 和 $\Delta\theta_8$ 较大,可见丝杠螺距累计误差、驱动杆的刚度、轴承径向跳动误差、线性编码器的精度以及轴系误差对光栅正弦机构转角精度影响较为明显,结构设计时应尽量降低上述误差源的影响。

为了降低上述误差源的影响,设计时特别引入了光栅尺,因此丝杠螺距累计误差和线性编码器的精度将由光栅尺决定,通过光栅尺的闭环补偿系统降低了上述两项误差。为了增强驱动杆的抗变形能力,在考虑特殊的热处理工艺同时,让正弦杆顶点机构轴承套在驱动杆顶面有一 3 mm 的预先偏置距离,同时用两根弹簧把顶点机构和驱动组件拉在一起。单色器设计课题组特别设计了一个偏心轴机构,来降低轴系误差影响。

6 光栅正弦机构转角重复精度测试

根据具体情况本文采用精度优于 $0.1''$ 的光电自准直仪对光栅正弦机构转角重复精度进行测量。光栅正弦机构转角重复精度的测量示意图如图7所示,考虑回程误差的影响,从正向和反向分别到达待测点的误差不同,因此需要测量正反两个方向的误差。这里规定滑台从下往上走时为正向,从上往下走时为反向。

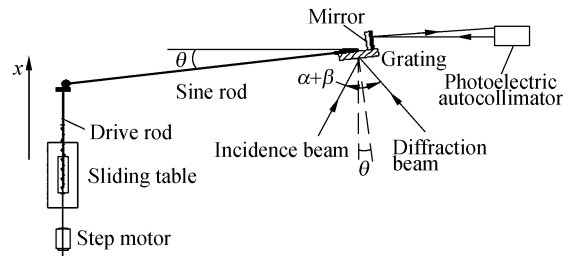


图7 光栅正弦机构转角重复精度测试示意图

Fig. 7 Schematic diagram of angle-repeatability measurement for grating sine mechanism

在相同条件下,对 10 mm 到 90 mm 之间的任一位置点进行 10 组测量,每组测量 10 次,取每组 10 次测量的算术平均值,从而得到一系列算术平均值,把测量列算术平均值的标准偏差作为光栅正弦机构的转角重复精度,光栅转角精度的重复性测试结果如表2所示。由测量结果可知,光栅正弦机构的转角重复精度最大为 $0.15''$,优于设计要求的精度指标 $0.43''$ 。

表2 光栅正弦机构转角重复精度

Tab. 2 Angle repeatability of grating sine mechanism

	正向	反向
10 mm	0.097	0.068
20 mm	0.056	0.081
30 mm	0.084	0.073
40 mm	0.038	0.082
50 mm	0.068	0.069
60 mm	0.096	0.064
70 mm	0.149	0.139
80 mm	0.086	0.063
90 mm	0.098	0.090
最大误差/($''$)	0.149	0.139

7 结 论

对 SSRF 首次采用的软 X 波段分光仪器 SX-700 平面光栅单色器进行了研究,为达到要求的设计指标,在结构设计时,运用有限元分析软件 ANSYS 对单色器的关键组件正弦机构进行了数

值模拟,基于模拟结果对光栅正弦机构的转角重复精度进行了误差分析,结果为 $0.28''$ 。根据数值模拟结果制定了单色器工程设计方案,最后在上海光源实验大厅对单色器进行了现场测试,测试结果为 $0.15''$,远远优于设计指标要求,表明 SX-700 单色器光栅正弦机构的设计满足转角精度重复性设计要求。

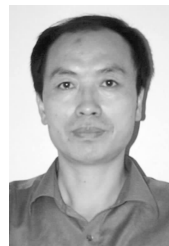
参考文献:

- [1] PETERSEN H. BESSY technical report T1329 [R]. Berlin: BESSY, 1980.
- [2] PIMPALÉ A V, DESHPANDE S K, BHIDE V G. Design considerations for the rotation of a plane premirror of a monochromator for reflecting synchrotron radiation onto the same spot of the dispersing grating of the XUV beamline[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(13): 1591-1594.
- [3] RIEMER F, TORGE R. Bessy SX-700 UHV monochromator: design features and kinematic concept[J]. *Nucl. Instrum. Methods*, 1983, 208(1-3): 313-314.
- [4] PETERSEN H, JUNG C, HELLWING C, et al.. Review of plane grating focusing for soft x-ray monochromators[J]. *Rev. Sic. Instrum.*, 1995, 66(1): 1-14.
- [5] PETERSEN H. The plane grating and elliptical mirror: a new optical configuration for monochromators[J]. *Opt. Commum.*, 1982, 40(6): 402-406.
- [6] BRAUN W, PETERSEN H, FELDHAUS J, et al.. Soft-x-ray monochromators at Bessy [J]. *SPIE*, 1984, 447: 117.
- [7] PETERSEN H. The high energy plane grating monochromators at Bessy[J]. *Nucl. Instrum. Methods*, 1986, 246(1-3): 260-263.
- [8] 卢启鹏, 李勇军, 彭忠琦, 等. 六杆并联机构运动学正解研究及其在同步辐射光束线中的应用[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 1874-1879.
- LU Q P, LI Y J, PENG ZH Q, et al.. Forward kinematics of six-bar parallel mechanism and its applications in synchrotron radiation beam-line[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1874-1879. (in Chinese)
- [9] 徐朝银, 同步辐射光学与工程[M]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005: 102-108; 231-233.
- XU CH Y. *Synchrotron Radiation Optics and Engineering* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2005: 102-108; 231-233.
- [10] 王勳成, 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 309-320.
- WANG X CH. *Finite Element Method* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 309-320.

作者简介:



吴 坤(1982—),男,安徽肥东人,博士研究生,2005年于合肥工业大学获学士学位,研究方向为精密机械设计和工程 CAE 分析。E-mail: wukun@sinap.ac.cn



卢启鹏(1964—),男,黑龙江人,研究员,博士生导师,主要从事同步辐射光束线关键技术的研究。E-mail: luqp@ciomp.ac.cn



彭忠琦(1957—),男,吉林榆树人,高级工程师,主要从事精密机械设计方面的研究。E-mail: pengzhongqi@126.com



陈家华(1982—),男,浙江嘉兴人,助理工程师,2005 年于中国科学技术大学获学士学位,主要从事精密机械结构设计方面的研究。E-mail: chenjiahua@sinap.ac.cn



刘 楷(1981—),男,湖北荆州人,硕士研究生,2003 年于武汉工程大学获学士学位,主要从事光学精密机械准直及检测方面的研究。E-mail: liukai@sinap.ac.cn

导师简介:



薛 松(1962—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1984 年于东北大学获得学士学位,研究方向为同步辐射光学工程、精密机械和光谱仪器设计等。E-mail: xuesong@sinap.ac.cn

● 下期预告

机械感生长周期光纤光栅的可调谐环形光纤激光器

姜明顺¹,冯德军²,隋青美¹

(1. 山东大学 控制科学与工程学院 光纤传感技术研究中心, 山东 济南 250061;

2. 山东大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250100)

将采用机械感生法写制的长周期光纤光栅 (MLPFG) 串入环形腔中,设计了一种新颖的 L 波段可调谐环形掺铒光纤激光器 (EDFL)。抽运光源为 980 nm 半导体激光器,使用掺铒浓度 500×10^{-6} 的铒纤 12 m 作为增益介质,通过调整待写制光纤与周期性压力槽之间的夹角,改变 MLPFG 的写制周期,调谐 MLPFG 透射谱,进而影响环形腔增益最高点,光纤激光器波长可调谐范围可达 42 nm (1 562.465 ~ 1 604.280 nm),激光光谱 3 dB 带宽 < 0.04 nm, 20 dB 带宽 < 0.08 nm,边模抑制比 > 45 dB。长时间观测,激光功率稳定性优于 0.2 dBm。实验表明,该光纤激光器具有易调谐,成本低,带宽较宽,线宽窄及性能稳定等特点。