

文章编号 1004-924X(2012)03-0514-06

## 谱学显微光束线光斑水平漂移分析与检测

马 磊<sup>1,2</sup>, 卢启鹏<sup>1\*</sup>, 彭忠琦<sup>1</sup>

- (1. 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;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**为提高上海光源搭建的国内首条软 X 射线谱学显微光束线站的整体性能,分析了其分光装置—变包含角平面光栅单色仪在波长扫描过程中影响谱学显微光束线光斑水平漂移的各个因素,推导出了各因素与光斑水平漂移的传递关系,并结合具体要求进行了误差分配。针对光斑水平角漂移重复精度的检测,采用自准直原理,构建了测试系统。利用该系统,完成了谱学显微光束线站光斑水平漂移重复精度的离线检测,其结果为 0.67",满足设计指标 1"的要求。对安装调试后的束线进行了总体性能测试,结果均满足谱学显微设计和使用要求。由此表明,提出的对谱学显微光束线光斑水平漂移误差来源的分析及检测方法,有效保证了束线性能的实现。

**关键词:**变包含角平面光栅单色仪;谱学显微光束线;光斑水平漂移;误差分析

**中图分类号:**TH744.1, TB92 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122003.0514

## Analysis and test of light spot transversal transfer of spectromicroscopic beamline

MA Lei<sup>1,2</sup>, LU Qi-peng<sup>1\*</sup>, PENG Zhong-qi<sup>1</sup>

- (1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)  
\* *Corresponding author, E-mail: luqipeng@126.com*

**Abstract:** With the aim to improve the unified performance of the first soft X-ray spectromicroscopic beamline built in Shanghai Synchrotron Radiation Facility(SSRF), This paper analyzes the main factors that effect the light spot transversal transfer of the spectromicroscopic beamline during wavelength scanning by a variable-included-angle plane grating monochromator. It deduces the relation between various factors and light spot transversal transfer, and solves the error distribution of the system to ensure the performance of the beamline. A test system for the repeatability of light spot transversal transfer is built by auto collimation principle and the off-line testing of the light spot transversal transfer is finished by using this test system. The result shows that the repeatability is 0.67", which satisfies the technical requirement of 1". The unified performance for the beamline is tested after it is assembled. Obtained results meet the requirements of design and application, and prove the effective-

收稿日期:2011-03-08;修订日期:2011-04-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11079035);应用光学国家重点实验室开放基金资助项目(No. O9Q33FQ091)

ness of error analysis and testing for the light spot transversal transfer.

**Key words:** variable-included-angle plane grating monochromator; spectromicroscopic beamline; light spot transversal transfer; error analysis

### 1 引 言

上海光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)是第三代同步辐射光源,由 100 MeV 电子直线加速器、3.5 GeV 增强器、3.5 GeV 电子储存环、沿环外侧分布的同步辐射光束线和实验站组成<sup>[1]</sup>。首批建造的软 X 射线谱学显微光束线站采用 EPU(Elliptically Polarized Undulator)作为插入件光源,其设计目标是在保证一定能量分辨能力的前提下,实现 250~2 000 eV 光子能量的高通量输出。

根据束线设计要求,采用国际上广泛使用的变包含角平面光栅单色仪(Variable-included-angle Plane Grating Monochromators, VAPGM)作为束线的分光装置<sup>[2-6]</sup>。该单色仪属于 SX700 改进型,两个光学元件同时转动,和其他类型单色仪相比,其自身结构及机械运动方式较为复杂<sup>[7-9]</sup>。谱学显微光束线光斑水平漂移受单色仪机械精度的影响,在很大程度上限制了光束线整体性能的提高。

本文以提高软 X 射线谱学显微光束线站整体性能为目的,分析单色仪机械精度对光斑水平漂移的影响;结合自准直原理,提出光斑水平漂移重复精度的检测方法。利用该方法完成了对 SSRF 软 X 射线谱学显微光束线站光斑水平漂移重复精度的检测。检测结果表明,该方法简单有效,可获得较高的检测精度,满足现场检测的要求。

### 2 软 X 射线谱学显微光束线站

光束线站布局如图 1 所示。从 EPU 出射的同步辐射光经过第一块柱面镜(M<sub>1</sub>)后在水平方向上偏转 3.44°,准直弧矢面上的入射光,同时兼作光子能量吸收器。准直后的平行光经前置平面镜(PM)反射,入射到平面光栅(PG)表面。单色化的光束从 PG 出射,以 1.5°的掠入射角打在超环面镜(M<sub>2</sub>)上。M<sub>2</sub> 将单色平行光聚焦于一个直径约 50 μm 的出射狭缝(S)。S 又作为波带片的

光源聚焦到样品,以实现扫描显微镜的高空间分辨。

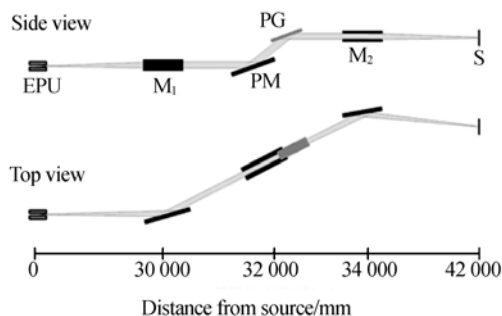


图 1 光束线示意图

Fig. 1 Schematic layout of the beamline

### 3 单色仪工作原理

光束线的主要部件是一台 VAPGM 单色仪,其工作原理及坐标定义如图 2 所示,主要光学元件由 PM 和 PG 组成。图中,φ 为平面镜的掠入射角,α、β 分别为光栅的入射角和衍射角<sup>[10]</sup>。

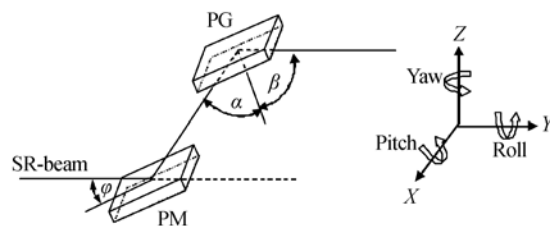


图 2 单色仪原理及坐标示意图

Fig. 2 Principle diagram of VAPGM and coordinate

通过光栅聚焦方程为

$$\frac{\cos^2 \alpha}{r} + \frac{\cos^2 \beta}{r'} = \frac{\cos \alpha + \cos \beta}{R}, \quad (1)$$

式中, r, r' 分别为光栅的入射臂长度和出射臂长度。取 R=∞, 得

$$r' = -r \cdot (\cos \beta / \cos \alpha)^2 = -r \cdot C_{ff}^2. \quad (2)$$

定义 C<sub>ff</sub> 为聚焦常数,其可在 1.8~2.5 间调节。若能满足式(2),则在 PG 后可得到一个固定位置的虚像,后经 M<sub>2</sub>,将光束聚焦在单色仪的出缝位置。扫描过程中为满足式(2),要求包含角必

须是变化的。工作时,PM、PG 通过各自驱动滑台在精密导轨上的移动,实现 PM 绕镜面外转轴转动,以及 PG 绕自身工作表面中心转动,进而改变包含角( $2\theta=\alpha-\beta, \beta<0$ ),实现波长扫描。

结合光栅衍射方程

$$d(\sin \alpha - \sin \beta) = m \lambda, \quad (3)$$

由式(2)、(3)可得

$$\lambda = d \{ \sin \alpha - \sin [\arccos(C_{ff} \cos \alpha)] \}, \quad (4)$$

式中, $d$ 为光栅刻线间距, $\lambda$ 为波长,取  $m=+1$ 。由式(4)可知,通过获得精确的角度位置,即可得到相应的波长<sup>[2]</sup>。

## 4 影响光斑水平漂移因素分析

### 4.1 谱学显微光束线光斑水平漂移

光斑水平漂移分析及检测是谱学显微实验的一个特殊要求。如图 3 所示,以主光轴为例,在单色仪进行波长扫描过程中,任何影响单色仪 Yaw(摆角)、Roll(滚角)方向的误差都会造成单色仪主光轴在出射方向存在角度为  $\delta$  的偏转,经  $M_2$  聚焦后,造成出射光斑在出射狭缝处的水平方向存在漂移量  $\Delta$ 。

根据谱学显微实验要求,SSRF 软 X 射线谱学显微光束线站允许的光斑水平漂移范围为  $40 \mu\text{m}$ 。

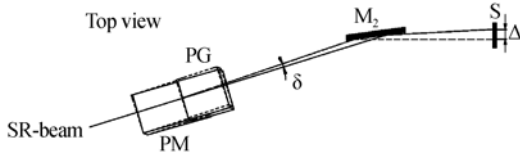


图 3 光斑水平漂移示意图

Fig. 3 Schematic diagram of light spot transversal transfer

### 4.2 光斑水平漂移误差分析

谱学显微光束线光斑水平漂移受单色仪机械精度的影响,可归结为 PM 表面与 PG 表面同各自转轴的平行度以及 PM 转轴与 PG 转轴之间的平行度等问题。

影响光斑水平漂移的误差主要由以下 8 个因素  $\eta_i (i=1, 2, \dots, 8)$  构成,利用几何光学和光学元件位置关系,可推导各项误差与光斑水平漂移量的传递关系如下:

(1) PM 表面与 PM 转轴不平行  $\eta_1$  引起的误差

$$\Delta_1 = \eta_1 \cdot r_3 \cdot \sin^2 \varphi \cdot \left[ 1 - \frac{2d}{R \sin \theta} \right]; \quad (5)$$

(2) PG 表面与 PG 转轴不平行  $\eta_2$  引起的误差

$$\Delta_2 = \eta_2 \cdot r_3 \cdot \sin^2 \beta \cdot \left[ 1 - \frac{2r_2}{R \sin \theta} \right]; \quad (6)$$

(3) PM 转轴与 PG 转轴不平行  $\eta_3$ 、 $\eta_4$  引起的误差  $\Delta_3$ 、 $\Delta_4$ :

其中:PM 转轴与 PG 转轴 Yaw 偏差  $\eta_3$  引起的误差

$$\Delta_3 = \sin \eta_3 \cdot \frac{r_1 \cdot r_3}{r_1 + r_2} \cdot \frac{2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta \cdot \tan^2 \varphi}{\sin^2 \beta \cdot \tan^2 \varphi - \cos^2 \beta}, \quad (7)$$

PM 转轴与 PG 转轴 Roll 偏差  $\eta_4$  引起的误差

$$\Delta_4 = \sin \eta_4 \cdot \frac{r_1 \cdot r_3}{r_1 + r_2} \cdot \frac{\cos^2 \varphi \cdot \sin^2 \beta - 2 \sin^2 \varphi \cdot \sin^2 \beta}{\sin^2 \varphi \cdot \sin^2 \beta - \cos^2 \varphi \cdot \cos^2 \beta}; \quad (8)$$

(4) 单色仪镜箱 Yaw 偏差  $\eta_5$  引起的误差

$$\Delta_5 = \sin \eta_5 \cdot \frac{r_1 \cdot r_3}{r_1 + r_2} \cdot \frac{2 \sin^2 \varphi - 2 \cos \beta \cdot \cos \alpha}{2 \cos \beta \cdot \cos \alpha - \cos^2 \varphi}; \quad (9)$$

(5) PG 工作区域切换机构 Yaw 偏差  $\eta_6$  引起的误差

$$\Delta_6 = \sin \eta_6 \cdot \frac{r_1 \cdot r_3}{r_1 + r_2} \cdot \frac{2 \sin^2 \varphi - 2 \cos \beta \cdot \cos \alpha}{2 \cos \beta \cdot \cos \alpha - \cos^2 \varphi}, \quad (10)$$

(6) Sin-bar 轴径向跳动  $\eta_7$ 、 $\eta_8$  引起的误差  $\Delta_7$ 、 $\Delta_8$ :

其中:PM sin-bar 轴径向跳动  $\eta_7$  引起的误差

$$\Delta_7 = \sqrt{2} \cdot \frac{\eta_7}{L_P} \cdot \frac{r_1 \cdot r_3}{r_1 + r_2} \cdot \frac{2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta \cdot \tan^2 \varphi}{\sin^2 \beta \cdot \tan^2 \varphi - \cos^2 \beta}; \quad (11)$$

PG sin-bar 轴径向跳动  $\eta_8$  引起的误差

$$\Delta_8 = \sqrt{2} \cdot \frac{\eta_8}{L_G} \cdot \frac{r_1 \cdot r_3}{r_1 + r_2} \cdot \frac{2 \cos^2 \beta - \sin^2 \beta \cdot \tan^2 \varphi}{\sin^2 \beta \cdot \tan^2 \varphi - \cos^2 \beta}, \quad (12)$$

式中, $\varphi$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 分别为 PM 掠入射角、PG 入射角以及衍射角(如图 2),选取  $C_{ff}=1.8$ ,当  $E_1=275 \text{ eV}$  时, $\varphi_{\max}=5.5717^\circ$ , $\alpha=86.0248^\circ$ , $\beta=82.8317$ ;当  $E_2=2000 \text{ eV}$  时, $\varphi_{\min}=2.0671^\circ$ , $\alpha=88.52372^\circ$ , $\beta=87.3420^\circ$ 。其他参数如表 1 所示。

表 1 参数表

Tab.1 Table of parameters

| 参数                          | 数值      |
|-----------------------------|---------|
| EPU 光源与单色仪之间距离 $r_1/m$      | 32      |
| 单色仪与 $M_2$ 之间距离 $r_2/m$     | 2       |
| $M_2$ 与 S 之间距离 $r_3/m$      | 8       |
| PM 与 $M_2$ 之间距离 $d/m$       | 2.3     |
| $M_2$ 子午曲率半径 $R/m$          | 494.801 |
| $M_2$ 掠入射角 $\theta/(\circ)$ | 1.5     |
| PM 转轴与轴承座之间距离 $L_P/m$       | 0.165   |
| PG 转轴与轴承座之间距离 $L_G/m$       | 0.15    |

根据设计要求以及目前国内加工及装配水平,结合误差分配原理计算出上述各项的加工精度。在利用等作用原则进行均分处理的基础上,根据具体情况,对误差分配进行调整、验算。各项误差确定后,利用误差合成原理计算出总误差,验证其整体精度是否满足给定的精度指标<sup>[11]</sup>。重复上述过程,直至找到最佳误差分配方式。

具体误差分配结果如表 2 所示,其中 1,2 项为主要影响因素。利用表 2 中的分配结果,结合式(5)~(12),分别计算出  $\varphi$  上限和下限  $E_1、E_2$  两个能量点的光斑水平漂移量,其差值即为各项误差引起的光斑最大水平漂移量。

表 2 误差分配结果和光斑水平漂移量

Tab.1 Results of error distribution and light spot transversal transfer

| $i$                    | 1     | 2     | 3    | 4    | 5    | 6    | 7                 | 8                 |
|------------------------|-------|-------|------|------|------|------|-------------------|-------------------|
| $\eta_i$               | 7"    | 7"    | 5"   | 1.5" | 10"  | 10"  | 0.5 $\mu\text{m}$ | 0.5 $\mu\text{m}$ |
| $\Delta_i/\mu\text{m}$ | 21.21 | 29.08 | 2.73 | 4.73 | 0.51 | 0.51 | 0.48              | 0.56              |

由于上述各项误差相互独立,总误差  $\Delta_{\text{SUM}}$  取矢量和为

$$\Delta_{\text{SUM}} = \sqrt{\sum_{i=1}^8 \Delta_i^2} = 36.42. \quad (13)$$

由此得出,波长扫描过程中总的光斑水平漂移为 36.42  $\mu\text{m}$ ,能够满足设计指标 40  $\mu\text{m}$  的要求。

## 5 检测方法及其结果

### 5.1 检测方法

由上述内容可知,谱学显微光束线光斑水平漂

移的检测主要是针对单色仪的出射光斑,检测原理如图 4 所示,采用高精度光电自准直仪配合平面反射镜构建测试系统进行检测。图 5 为现场检测示意图。由于要求光斑水平漂移误差范围为 40  $\mu\text{m}$ ,光束线中  $M_2$  与 S 之间的距离为 8 m,由几何关系可知角漂移重复精度需优于 1"。

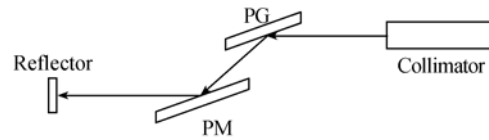


图 4 光斑水平漂移重复精度检测原理

Fig.4 Schematic diagram for testing repeatability of light spot transversal transfer

调节自准直仪光轴,使其与 PM 转轴或 PG 转轴垂直。由自准直仪发出的光束,顺次经 PG、PM 反射,到达反射镜;手动调节反射镜,使光束沿原路返回,经 PM、PG 反射后,返回自准直仪。检测时,包含角可在 168°~176°间调节,步长为 0.5°。使 PM、PG 在全量程内各个角度附近小幅度对扫;参考自准直仪读数,调节 PM、PG,将出射光斑水平漂移重复性调节到最佳检测状态。



图 5 光斑水平漂移重复精度现场检测

Fig.5 Field test diagram of repeatability for light spot transversal transfer

在现场检测过程中,规定滑台由下向上移动为正向,反之为反向。由于驱动滑台垂直放置,受自身重力影响,从正、反两个方向到达测试点的位置不同,因此需要对正、反两个方向的重复精度进行检测,具体检测步骤如下:

(1) 选定一个测试点,平行联动 PM 和 PG 到其他位置,再返回该测试点,每次返回时均沿同一方向,记录此时自准直仪读数;

(2) 重复测量多次,取测量值的标准偏差作为该测试点的重复精度;

(3) 选取多个测试点进行检测,测量完成后,取所有测试点重复精度的最大值为光斑水平角漂

移重复精度。

## 5.2 检测结果

在上述分析及检测方法的基础上,完成了 SSRF 软 X 射线谱学显微光束线站光斑水平角漂移重复精度的检测。根据设计要求,使用了 EL-COMAT 3000 型高精度光电自准直仪作为检测设备(如图 5)<sup>[12]</sup>。该自准直仪在其量程任意 20" 内的测试精度可达 0.1", 显示分辨率为 0.005"。

表 3 光斑漂移重复精度

Tab. 3 Repeatability of light spot transversal transfer

| 检测角度/(°) | 重复精度/(") |         |
|----------|----------|---------|
|          | 正向       | 反向      |
| 5.0      | 0.420 6  | 0.667 2 |
| 5.5      | 0.435 8  | 0.356 5 |
| 6.0      | 0.400 9  | 0.303 8 |
| 6.5      | 0.389 3  | 0.258 0 |

VAPGM 工作在掠入射模式下,根据实际使用要求,平行联动平 PM 和 PG, 选取 5, 5.5, 6,

6.5° 4 个角度作为测试点,对光斑水平角漂移重复精度进行正、反两个方向的测试,每个测试点重复测量 5 次。结果如表 3 所示,光斑水平角漂移重复精度为 0.67", 满足技术指标 1" 的要求。

## 6 结 论

分析了影响谱学显微光束线光斑水平漂移的各个因素,并合理分配误差,为保证软 X 射线谱学显微光束线整体性能提供理论支撑。利用自准直原理构建检测系统,结合具体测试方法及步骤,完成了谱学显微光束线光斑水平角漂移重复精度的检测,结果满足技术指标。

整条束线现场安装调试后,对其总体性能进行了测试,并已通过国家验收。结果显示其空间分辨率优于 30 nm, 能量分辨能力优于 17 900@244 eV, 满足谱学显微光束线设计和使用要求。得到的结果表明,对谱学显微光束线光斑水平漂移误差来源分析以及检测方法的研究,有效地保证了光束线总体性能的实现。

## 参考文献:

- [1] CHEN S Y, XU H J. Current status of the proposed shanghai synchrotron radiation facility [J]. KEK. , 1998, 98(10): 631-635.
- [2] PETERSEN H. The plane grating and elliptical mirror: A new optical configuration for monochromators [J]. *Opt. Comm.*, 1982, 40(6): 402-406.
- [3] YOUNG A T, FENG J, ARENHOLZ E, et al.. First commissioning results for the elliptically polarizing undulator beamline at the advanced light source [J]. *Nucl. Instr. Met.*, 2001, 467: 549-552.
- [4] NYHOLM R, ANDERSEN J N, JOHANSSON U, et al.. Beamline I311 at MAX LAB; a VUV/soft X ray undulator beamline for high resolution electron spectroscopy [J]. *Nucl. Instr. Meth.*, 2001, 467: 520-524.
- [5] MATSUSHITA T, MAEZAWA H, ISHIKAWA T, et al.. New multipole wigglet /undulator beamline (BL-16) at the photon factory [J]. *Sci. Instr.*, 1989, 60(7): 1874-1876.
- [6] KAZNACHEYEV K V, BLOMQUIST I, HALLIN E, et al.. Principles of optical design of the SM beamline at the CLS [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 705: 1303-1307.
- [7] 卢启鹏, 李勇军, 彭忠琦, 等. 六杆并联机构运动学正解研究及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 beamline [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1874-1879. (in Chinese)
- [8] 吴坤, 薛松, 卢启鹏, 等. SX700 单色器光栅正弦机构转角重复精度的模拟分析与测量 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 45-51.
- WU K, XUE S, LU Q P, et al.. Simulation analysis and measurement of riation angle repeatability for grating sine mechanism of SX700 monochromator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 45-51. (in Chinese)
- [9] 吕丽军. 极紫外、软 X-射线变线距平面光栅单色仪的研究 [J]. *光学学报*, 2005, 25(1): 141-144.
- LU L J. Study of ultraviolet and soft X-ray varied line-space planegrating monochromator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(1): 141-144. (in Chinese)

- [10] 卢启鹏,马磊,彭忠琦,等.变包含角平面光栅单色器波长扫描机构转角精度的检测方法研究[J].光学精密工程,2010,18(7):1548-1553.  
LU Q P, MA L, PENG ZH Q. Rotation-angle-accuracy measurement of VAPGM wavelength scanning mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1548-1553. (in Chinese)
- [11] 费业泰.误差理论与数据处理[M].4版.北京:机械工业出版社,2000:58-80.  
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing* [M]. 4th ed. Beijing:China Machine Press, 2000: 58-80. (in Chinese)
- [12] The instruction manual of ELCOMAT 3000 auto-collimator [OL]. [www.opticaltest.com](http://www.opticaltest.com)

## 作者简介:



马磊(1982—),男,吉林长春人,博士研究生,2005年于长春理工大学获得学士学位,主要从事同步辐射束线单色仪关键技术及性能检测方面的研究。  
E-mail: malei215@126.com



彭忠琦(1957—),男,吉林长春人,高级工程师,1984年于长春工业大学获得学士学位,主要从事精密机械设计方面的研究。E-mail: pengzhongqi@126.com

## 导师简介:



卢启鹏(1964—),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士生导师,1987年、1990年分别于浙江大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得学士和硕士学位,主要从事同步辐射光束线关键技术方面的研究。E-mail: luqipeng@126.com

## ●下期预告

## 接触式大型非球面镜面形测量中测量点分布的研究

李杰<sup>1,2</sup>,伍凡<sup>1</sup>,吴时彬<sup>1</sup>,匡龙<sup>1</sup>,林常青<sup>1</sup>

(1.中国科学院光电技术研究所,四川成都610209;2.中国科学院研究生院,北京100049)

为准确有效地检测加工过程中大型非球面光学元件的面形,对接触式测量的测量点分布方式进行了研究。用Zernike多项式代表各种形式的面形偏差,使用不同密度的径向分布及均匀分布的测量点分别对以各Zernike多项式表示的面形偏差进行采样。计算采样所得面形相对给定面形PV值及RMS值的最大相对误差,并对计算结果进行了分析。1.8 m抛物面镜加工过程中面形实测结果表明:在镜面加工的成型及粗磨阶段,由于面形偏差主要呈旋转对称分布,低密度径向分布测量点即可满足继续加工的检测需求;在精磨及初抛阶段,面形偏差主要为像散或其它非对称面形偏差,采用测量点均匀分布是提升测量精度的有效手段。此分析方法可以指导测量点的排布方式,从而确保由测量点分布引入的测量误差小于镜面本身面形误差的1/5,提高检测效率。