

基于衍射叠栅信号的超精密定位系统

张金龙¹ 徐 慧¹ 刘京南² 龚珊珊³

¹南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042
²东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096
³上海海事大学物流工程学院, 上海 200135

摘要 应用光学理论分析了一种纳米级位移分辨率的双级衍射光栅测量系统,建立了衍射叠栅信号与对应位移的数学模型,并通过计算机仿真对叠栅信号的位移特性进行了研究。为提高位移检测信号的灵敏度及定位精度,提出了差动式和修正式两种定位方法,差动式定位由于能消除同相噪声干扰及激光管本身光强的波动,因此定位精度高于修正式定位,但修正式定位结构比较简单。利用研究的两种定位方法,建立了精密定位的复合控制系统,通过粗定位和精定位相结合的两段式复合定位,可保证在较大的信号捕捉范围内,实现高速高精度定位,有效地解决了定位精度、定位速度与信号捕捉范围三者之间的矛盾。实验结果表明,复合式精密定位可在1 mm的信号捕捉范围获得±10 nm的定位精度。

关键词 测量;纳米分辨率;叠栅信号;超精密测量;超精密定位

中图分类号 TP274+.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100513

Ultra-precision Alignment System Based on Diffracting Moiré Signals

Zhang Jinlong¹ Xu Hui¹ Liu Jingnan² Gong Shanshan³

¹College of Electrical and Automatic Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210042, China
²Automatization College, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China
³College of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China

Abstract A double gratings displacement measurement system with the resolution of nanometer order is analyzed using optics theory. A mathematic model of the double gratings displacement measurement is established. The characteristics of laser Moiré signals is studied by numerical simulation of Moiré signals. To improve position detection signal sensitivity and positioning accuracy, two methods of precision positioning are brought forward: differential Moiré positioning method and modified Moiré positioning method. The positioning accuracy of the system using differential Moiré technique is better than that of the system using modified Moiré positioning technique. It is because that in-phase noise in the Moiré signals are cancelled and S/N ratio is improved. But modified Moiré positioning system is simple in construction because of only using one grating pair. The compound control system for precision positioning is set up using two kinds of the Moiré alignment technique, in which the modified Moiré alignment technique is used as the coarse alignment and the differential Moiré alignment technique is used as the fine alignment. By using the two-step alignment, the high alignment accuracy and quick alignment speed are obtained in large positioning range. The experimental result shows the two-step alignment can perform positioning accuracy of ±10 nm in ±500 μm positioning range.

Key words measurement; nanometer resolution; Moiré signals; ultra-precision measurement; ultra-precision alignment

OCIS codes 050.1940; 050.1950; 050.1970

1 引 言

精密定位技术是一项与许多生产实践密切相关

的高新技术,它在精密加工、半导体器件制造、电子产品组装线、高清晰显示器件制作及纳米技术研究

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-03-17

基金项目: 国家 863 计划(2005AA303610)和江苏省自然科学基金(BK2009406)资助课题。

作者简介: 张金龙(1965—),男,博士,副教授,主要从事超精密定位技术方面的研究。E-mail: ZJL0310@163.com

开发等领域具有广泛的应用。近年来随着精密定位技术的不断创新,利用激光叠栅信号来检测位置误差,从而实现高精度定位的方法已成为研究的重心^[1~12]。本文在研究应用激光叠栅信号实现超精密位移测量与定位的基础上,提出了精密定位的差动式、修正式两种控制方式,利用研究的两种定位方法建立了精密定位的复合控制系统,可保证在较大的信号捕捉范围内实现高精度定位。

2 精密定位原理

基于激光叠栅信号的精密定位原理如图 1 所示,两片衍射光栅平行设置,当激光光束垂直入射光栅 1 缝隙上时,由于光栅的衍射形成叠栅信号,由菲涅耳衍射积分公式,可得光栅 2 前面 P 点处在柱坐标下的衍射光复振幅为^[10]

$$U_1(P) = \frac{i}{2\lambda} \int_{-b_1/2}^{b_1/2} U_0(Q) r^{-1/2} (1 + \cos \theta) \exp(-ikr) dx_0,$$

式中 b_1 为光栅缝隙宽度,设 $A_1 = \frac{i}{2\lambda} \cdot U_0(Q)$,则 P 点衍射光复振幅为

$$U_1(P) = A_1 \int_{-b_1/2}^{b_1/2} r^{-1/2} (1 + \cos \theta) \exp(-ikr) dx_0, \quad (1)$$

当激光光束所覆盖的光栅条数为 $2M+1$ 时,则由(1)式可得 P 点的衍射光复振幅 $U_1(x_1, G)$ 为

$$U_1(x_1, G) = A_1 \sum_{m=-M}^M \int_{-b_1/2}^{b_1/2} r^{-1/2} (1 + \cos \theta) \cdot \exp(-ikr) dx_0, \quad (2)$$

由图 1 可知 $\cos \theta = G/r$,代入(2)式得

$$U_1(x_1, G) = A_1 \sum_{m=-M}^M \int_{-b_1/2}^{b_1/2} r^{-1/2} (1 + G/r) \cdot \exp(-ikr) dx_0, \quad (3)$$

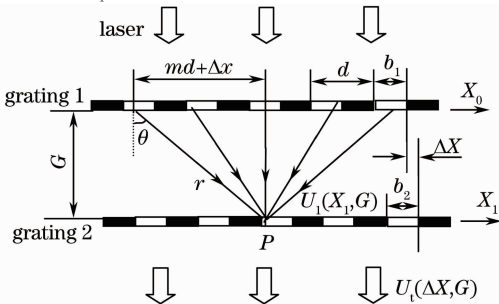


图 1 双级衍射光栅结构

Fig. 1 Structure of diffraction duo-gratings

式中 $r = [G^2 + (\Delta x + md)^2]^{1/2}$, $\Delta x = x_1 - x_0$ 为两片光栅之间的相对位移, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为激光波长, d 为光栅常数, G 为两光栅间距, b_1 为第一片光栅的光栅缝隙宽度。

经光栅 1 衍射形成的衍射光 $U_1(x_1, G)$, 再经光栅 2 二次衍射, 设光栅 2 的透光特性函数为 $T(x_1 - \Delta x)$, 则在光栅 2 出射处的二次衍射光复振幅为

$$U'_1(x_1, G) = U_1(x_1, G) \cdot T(x_1 - \Delta x),$$

在光栅 2 出射的远处(距离为 z_0 处), 第 n 级衍射光的复振幅可由夫琅禾费衍射公式计算^[10], 其大小为

$$U_t(\Delta x, G)_n = \frac{1}{i\lambda z_0} \cdot \exp(ikz_0) \exp\left(i \frac{kx_0^2}{2z_0}\right) \cdot$$

$$\int U'_1(x_1, G) \cdot \exp(-i2\pi f_x x_1) dx_1,$$

令 $A_t = \frac{1}{i\lambda z_0} \cdot \exp(ikz_0) \cdot \exp\left(i \frac{kx_0^2}{2z_0}\right)$, 并由傅里叶光学理论可得知空间频率 $f_x = n/p$, 可得

$$U_t(\Delta x, G)_n = A_t \int U(x_1, G) T(x_1 - \Delta x) \cdot \exp\left(-i \frac{2\pi n x_1}{p}\right) dx_1 = A_t \int_{-b_2/2+\Delta x}^{b_2/2+\Delta x} U_1(x_1, G) \cdot \exp\left(-i \frac{2\pi n x_1}{p}\right) dx_1, \quad (4)$$

式中 n 为衍射级次, b_2 为第二片光栅的光栅缝隙宽度。当 $n=0$ 时, 由激光衍射理论可知, 其光强最强, 其 0 次衍射光复振幅为

$$U_t(\Delta x, G)_0 = A_t \int_{-b_2/2+\Delta x}^{b_2/2+\Delta x} U_1(x_1, G) dx_1, \quad (5)$$

由菲涅耳公式得^[11], 其大小为

$$G = m \frac{d^2}{\lambda}, \quad (6)$$

式中 m 为非负整数。对(5)式采用高斯数值积分法和牛顿迭代法进行计算机数值运算和分析^[11], 并将仿真计算得到的数据再采用 Matlab 工具进行显示, 如图 2 所示。由图可见, 叠栅信号强度随两片光栅的相对位移呈周期性变化, 同时也随两光栅的间距呈周期性变化, 特别是当光栅距离 $G = d^2/\lambda$ 的整数倍时, 光强幅度变化最大。这说明经双光栅衍射后的 0 级光光强变化具有稳定的规律性, 且 0 级光在各级衍射光中光强最强, 非常适合于精密位移测量及控制。

依据上述关系, 通过光电二极管将透射的 0 级叠栅光转换为电信号, 并由计算机检测 0 级叠栅光信号强度, 从而确定两片光栅间的相对位移 Δx 。

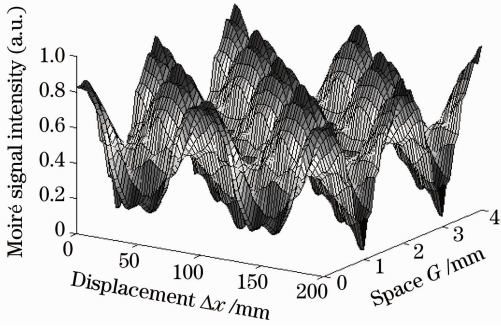


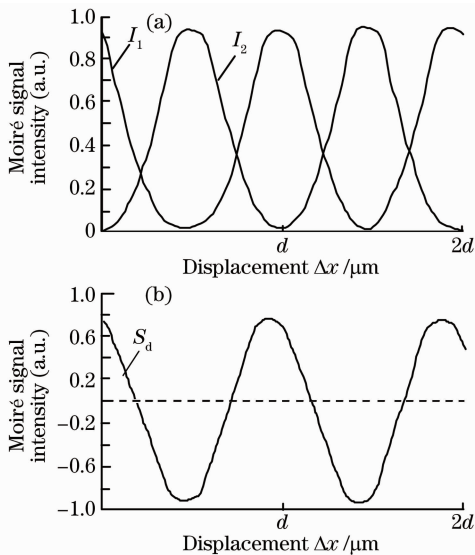
图2 0级叠栅信号的仿真曲线

Fig. 2 Simulation curve of 0th order Moiré signal

3 精密测量与定位技术

3.1 差动叠栅技术

差动式叠栅技术设置两组光栅,两组光栅分别错开 $+d/4$ 和 $-d/4$,当激光经过这两组光栅时,可以获得相位相差 180° 的两个叠栅信号 I_1 和 I_2 ,取两个叠栅信号的差值 $I_1 - I_2$ (即差动叠栅信号)为控制信号。图3为实验测得的叠栅信号和差动叠栅信号,可以看出差动叠栅信号将反映位移变化的光强值有效地放大了一倍,特别是在零点附近差动叠栅信号的变化率很陡,微小位移便会导致大的光强变化,极大地提高了位置检测信号的灵敏度,且在零点附近光强变化与光栅移动的位移量成线性关系,可以定量地获得位置偏差的大小及位置偏离的方向。

图3 差动叠栅信号系统曲线。(a)叠栅信号 I_1 和 I_2 ,
(b)差动叠栅信号 S_d Fig. 3 Differential Moiré signal system. (a) Moiré signal I_1 and I_2 , (b) differential Moiré signal S_d

差动叠栅信号随两光栅的相对位移呈周期性变化,在一个位移周期内,差动信号为零的点(即两组

叠栅信号的交点)设置为定位点,此时位移偏差为零。精密定位控制时一片光栅固定,另一片光栅由工控机根据差动叠栅信号的大小和正负精密驱动,控制范围为精密定位点两侧 $\pm d/2$ 。

3.2 修正叠栅技术

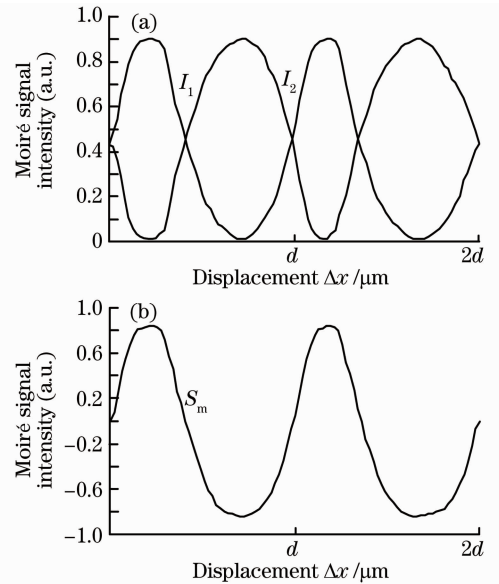
修正叠栅技术的结构比较简单,只需使用一组衍射光栅,通过检测0级叠栅信号的瞬时值 I_1 、最大值 I_{\max} 及最小值 I_{\min} 来计算出反相信号 I_0 ,反相信号 I_0 可表示为

$$I_0 = I_{\max} + I_{\min} - I_1, \quad (7)$$

取两信号 I_1 、 I_0 的差值 S_m 为修正控制信号,其大小为

$$S_m = I_1 - I_0 = 2I_1 - (I_{\max} + I_{\min}), \quad (8)$$

图4为实验测得的叠栅信号 I_1 及计算出的修正叠栅信号 S_m ,可以看出修正叠栅信号同样将反映位移变化的叠栅信号值有效地放大了一倍,并且在零点附近修正叠栅信号的变化率很陡。修正式定位中,取原始叠栅曲线与反相叠栅曲线的交点(即修正叠栅曲线为零处)为定位点,控制范围为精密定位点两侧 $\pm d/2$ 。

图4 修正叠栅信号系统曲线。(a)叠栅信号 I_1 和 I_2 ,
(b)修正叠栅信号 S_m Fig. 4 Modified Moiré signal system. (a) Moiré signal I_1 and I_2 , (b) modified Moiré signal S_m

3.3 定位特性

在修正式定位系统中,由于定位点取的是原始曲线与反相曲线的交点,因此定位点的光强为

$$I_d = (I_{\max} + I_{\min})/2, \quad (9)$$

式中 I_{\max} 、 I_{\min} 为所检测的叠栅信号的最大值与最小值,通常 I_{\max} 、 I_{\min} 会随激光管光强波动而变化,因此

定位点会发生漂移,如图 5(a)所示,定位点的漂移值 d_{drift} 可表示为^[1]

$$d_{\text{drift}} = \frac{d}{2\pi} \frac{\Delta I}{I}, \quad (10)$$

式中 d 为光栅常数, I 为激光管光强, ΔI 为激光管光强波动值。

另一方面,在差动式定位系统中,由于差动法取得是两组叠栅信号的交点为精密定位点,而两组叠栅信号按相同的比例变化,因此即使激光源的光强变化,其精密定位点的位置也不会受到影响,如图 5(b)所示。此外,当两种系统受到噪声 $\Delta I'$ 干扰时,修正叠栅信号产生的噪声误差 ΔS_m 为

$$\Delta S_m = 2(I_1 + \Delta I') - 2I_1 = 2\Delta I', \quad (11)$$

由(11)式可见修正定位系统不但无法消除噪声干扰,而且将噪声放大了一倍;而在差动定位系统中,由于两组叠栅信号中含有同相的噪声成份,因此在差动叠栅信号中得到最大程度的削弱,使控制信号具有良好的信噪比,有利于定位精度的提高。

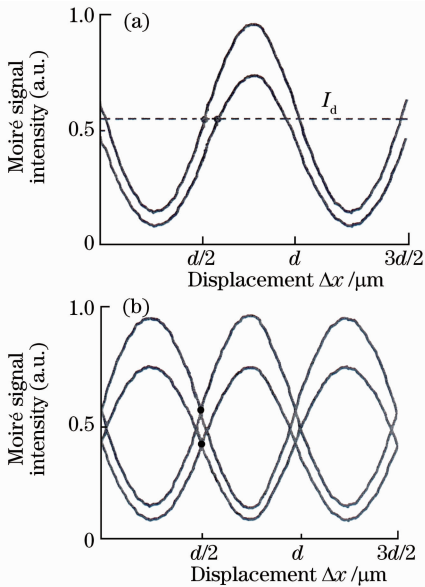


图 5 定位点的变化。(a)修正定位,(b)差动定位
Fig. 5 Change of the positioning point. (a) modified positioning, (b) differential positioning

3.4 复合式精密定位

精密定位的定位信号捕捉范围与定位精度是一对矛盾。由于定位信号的捕捉范围处于精密定位点附近的一个光栅常数范围内,因此光栅常数越大,则定位信号的捕捉范围就越大。但光栅常数的增大,会引起定位精度的降低。因此如何实现大范围信号捕捉条件下的超精密定位是精密定位技术研究的难点。本文提出超精密定位的复合控制技术,采用粗定位与精定位相结合的两段式复合定位。考虑到修

正式定位结构比较简单,粗定位采用修正式定位技术,并使用粗光栅,光栅常数 $d=1000 \mu\text{m}$,信号捕捉范围为定位点两侧 $\pm 500 \mu\text{m}$ 。而差动式定位技术具有较高的定位精度,因此精定位采用差动式定位技术,使用细光栅,光栅常数 $d=25 \mu\text{m}$ 。定位时工控机先在 $\pm 500 \mu\text{m}$ 的范围内大步驱动粗定位机构,快速完成粗定位。然后再通过精定位机构驱动微动台进行细控,实现超精密定位。这样使精密定位装置在较大的信号捕捉范围内实现高精度定位。此外,采用两段式复合定位,实现了大步快速驱动与细分步精密驱动相结合的定位,从而使精密定位装置在实现高精度的同时,又能大大缩短定位时间,实现高速高精度定位。

4 实 验

实验装置如图 6 所示。实验所用激光光源为半导体激光,波长 $\lambda=633 \text{ nm}$,功率 1.8 mW ,两片光栅间的间距 $G=1 \text{ mm}$ 。微机的采样及控制循环时间设定为 0.2 s 。定位时,激光器发出的激光束经过分光镜两次分光被分成 8 束,垂直透过光栅,产生透射的 0 级叠栅信号,由光电二极管转换为电信号,并经 I/V 转换、放大、滤波等处理后,输入工控机,工控机根据粗光栅产生的叠栅信号大小和极性发出相应的驱动脉冲信号,使步进电机驱动粗动台运动,达到粗定位的定位精度,粗动台由电机通过精密丝杆驱动,工控机每发出一个脉冲,对应步进电机旋转 0.36° ,驱动微动台移动 $2 \mu\text{m}$ 。粗定位完成后,工控机再根据细光栅产生的叠栅信号发出相应的驱动信号,通过压电陶瓷精密驱动微动台运动,达到所要求的位置定位精度。图 7 示出了复合式精密定位的实验结果,粗定位精度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$,精定位精度为 $\pm 10 \text{ nm}$ 。

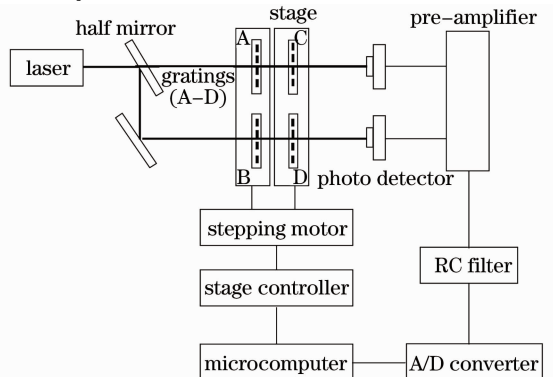


图 6 精密定位实验装置
Fig. 6 Apparatus of precision alignment

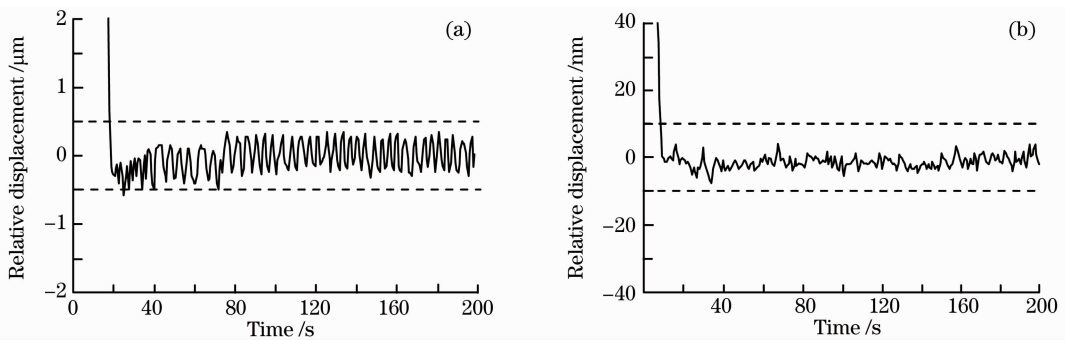


图7 精密定位实验结果。(a)粗定位精度,(b)精定位精度

Fig. 7 Result of precision alignment. (a) coarse positioning accuracy, (b) fine positioning accuracy

5 结 论

研究了透射式激光叠栅信号的位移特性,建立了衍射叠栅信号与对应位移的数学模型,并进行了计算机仿真。为提高位置检测信号的灵敏度及定位精度,提出了差动式和修正式两种精密定位方法,差动式定位方法由于能消除同相噪声干扰及激光管本身光强的波动,因此定位精度高于修正式定位,但修正式定位结构比较简单。利用研究的两种定位方法,建立了精密定位的复合控制系统,通过粗定位和精定位相结合的两段式复合定位,可保证在较大的信号动态范围内,实现高速高精度定位,有效解决了定位精度、定位速度与信号动态范围三者之间的矛盾。实验结果表明,精密定位装置可获得纳米级的超定位精度,对精密加工工程领域具有一定的实用价值。

参 考 文 献

- 1 H. Furuhashi, L. Z. Zhou, J. N. Liu *et al.*. Influences of the inclination of gratings on the alignment accuracies in Moiré alignment systems[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2002, **139**(2): 46~51
- 2 G. Y. Zhou, V. J. Logeeswaran, F. S. Chau. An open-loop nano-positioning micromechanical digital-to-analog converter for grating light modulation[J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2005, **17**(5): 1010~1012
- 3 L. N. Sun, J. G. De, Y. J. Liu *et al.*. Investigation on a novel dual-grating macro-micro driven high speed precision positioning system for NEMS[C]. In: Proceedings of 1st IEEE International Conference on Nano Micro Engineered and Molecular Systems, 2006, 644~648
- 4 J. L. Zhang, L. L. Yu, J. N. Liu. Ultra-precision positioning

- control technique based on neural network[J]. *J. Southeast University (English Edition)*, 2006, **22**(1): 1~4
- 5 Y. Wang, Z. G. Liu, F. Bo *et al.*. Design and control of an ultraprecision stage used in grating tiling [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering (English Edition)*, 2007, **20**(1): 1~4
- 6 L. Z. Zhou, H. Furuhashi, Y. Uchida. Sensing characteristics of a precision aligner using Moiré gratings for precision alignment system[J]. *Chinese J. Lasers B (English Edition)*, 2001, **10**(4): 257~262
- 7 Zhang Yinxin, Liu Jingnan, Cheng Congyan. Research on high-accuracy position detection and alignment technology [J]. *J. Southeast University (Natural Science Edition)*, 2003, **33**(4): 495~497
- 张迎新, 刘京南, 陈从颜. 高精度位置检测及定位技术研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2003, **33**(4): 495~497
- 8 Zhang Jinlong, Yu Lingling, Liu Jingnan. Ultra precision positioning control based on fuzzy neural network [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2006, **27**(2): 113~116
- 张金龙, 余玲玲, 刘京南. 超精密定位的模糊神经网络控制[J]. *计量学报*, 2006, **27**(2): 113~116
- 9 Zhang Jinlong, Liu Jingnan, Qian Junbo *et al.*. Research on ultra-precision angular displacement measurement and control technique[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2006, **27**(12): 1738~1741
- 张金龙, 刘京南, 钱俊波等. 超精密角位移测量与控制技术的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(12): 1738~1741
- 10 Liang Quanyan. *Physical Optics*[M]. Beijing: High Education Press, 1987
- 梁铨廷. *物理光学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987
- 11 Shi Duanhu, Gang Tie, Huang Chuanhui *et al.*. Spatial locating and visualization of defects in precision weldments with complex structure[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2393~2398
- 石端虎, 刚 铁, 黄传辉等. 复杂结构精密焊件中缺陷空间定位及可视化[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2393~2398
- 12 Zhu Jigui, Guo Lei, Ye Shenghua. Principle and implementation method of three-dimensional precision positioning in large field working space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1872~1876
- 郝继贵, 郭 磊, 叶声华. 现场条件下大空间三维精密定位原理与方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1872~1876