

文章编号 1004-924X(2012)04-0851-07

光束平差在激光跟踪仪系统精度评定中的应用

周维虎^{1*}, 丁 蕾^{1,2}, 王亚伟³, 张滋黎¹

(1. 中国科学院 光电研究院, 北京 100094; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;
3. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要:对自主研发的激光跟踪仪的精度评定进行研究,以期解决大尺寸空间坐标测量系统的空间坐标精度难于评定的问题。考虑现场环境条件、仪器状态和操作者技能等因素对测量精度影响都很大,提出了基于光束平差原理对激光跟踪仪系统进行精度评定的方法。通过 Matlab 软件对激光跟踪仪的精度评定进行了仿真,仿真结果显示光束平差法能客观地反映激光跟踪仪的测量精度。另外,使用 Faro 生产的激光跟踪仪进行了实物实验,实验结果显示其水平角精度 σ_H 为 $1.97''$,垂直角精度 σ_V 为 $2.61''$,测距精度 σ_D 为 3.75×10^{-6} ,对比 Faro 生产的激光跟踪仪精度($\sigma_H=2.0''$; $\sigma_V=2.0''$; $\sigma_D=4 \mu\text{m}$)可证明采用光束平差法评定自主研发的激光跟踪仪测量精度是正确、可行的。该方法为探索激光跟踪仪新的应用技术、开展面向对象的测量不确定评定奠定了基础。

关键词:激光跟踪仪;空间坐标测量;精度评定;光束平差

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122004.0851

Application of bundle adjustment to accuracy evaluation of laser tracker

ZHOU Wei-hu^{1*}, DING Lei^{1,2}, WANG Ya-wei³, ZHANG Zi-li¹

(1. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

* Corresponding author, E-mail: zhouweihu@aoe.ac.cn

Abstract: The accuracy evaluation methods for a laser tracker developed by ourselves are investigated to solve the problem that the coordinate precision in a large-size space coordinate measuring system is difficult to be evaluated. In consideration of the great impacts of environmental conditions, equipment status, operator skills and other factors on measurement accuracy, this paper proposes a bundle adjustment method to evaluate the accuracy of the laser tracker under practical conditions. The Matlab is used to simulate the accuracy evaluation, and results show that the bundle adjustment can generally reflect the measurement accuracy of laser tracker measurement system. Furthermore, a practical experiment is performed on a laser tracker made from Faro company, and results show that the measuring accuracies of horizontal angle σ_H and vertical angle σ_V are $1.97''$ and $2.61''$, respectively, and meas-

收稿日期:2011-11-10;修订日期:2011-11-30.

基金项目:中国科学院科研装备研制项目(No. 090206A01Y)

uring accuracy σ_D for the distance is 3.75×10^{-6} . As compared with the instrument accuracy of the Faro ($\sigma_H = 2.0''$, $\sigma_V = 2.0''$, $\sigma_D = 4 \mu\text{m}$), It proves that using bundle adjustment to evaluate the performance of the laser tracker developed is feasibility and correctness. The method will be useful to broaden application of laser tracker technology and to open a way to task-oriented uncertainty evaluation.

Key words: laser tracker; space coordinate measurement; accuracy evaluation; bundle adjustment

1 引言

激光跟踪仪是一种新型的工业测量系统,具有便携性、精度高、测量速度快等特点,已广泛应用于航空、航天、造船、汽车、机械制造、水电等领域^[1-4],国内的需求正以每年 20% 的速度增长。目前,国际上激光跟踪仪的主要生产厂家有 Leica 公司、Faro 公司和 API 公司,国内使用的激光跟踪仪全部依赖进口^[5-6]。

对于激光跟踪仪的使用者来说,仪器性能的好坏、测量精度的高低是至关重要的。精度评定可反映现场的环境条件、仪器的状态及操作者的技能等情况,并用于描述测量的质量^[7]。不同精度等级的仪器,其可靠性、费用、效率等指标各不相同,这对测量方案的设计与实施具有很大影响。一般而言,在选定仪器后,其测量精度指标也随之确定。由于激光跟踪仪主要用于现场测量,除了仪器状态以外,现场条件和操作者技能等因素对测量精度影响很大^[8]。为保证测量质量,采取适当评判指标及办法评定仪器系统在实际测量环境下的测量精度是非常必要的。

然而激光跟踪仪的精度评定通常是由国外的

生产厂家来完成的,国内目前还没有相应的规程来检测仪器的测量精度,关于激光跟踪仪的论文大部分为应用型文章,其精度主要是根据厂家提供的技术参数确定^[9]。2008 年起草的 GJB/J 6201-2008 中,也只对激光跟踪仪的校准方法做出了规范,并未提及如何评定激光跟踪仪的精度。近年来,本课题组展开了自主激光跟踪仪系统的研制工作,如何评定自主研发的激光跟踪仪的精度是必须解决的问题,它不仅对于评定仪器研制质量,而且对提高仪器系统的性能也具有十分重要的意义^[10]。因此,本文引入光束平差原理对激光跟踪仪系统性能进行评定。

2 光束平差原理及计算过程

2.1 光束平差原理

光束平差法(Bundle Adjustment, BA)是测量学中最重要理论和方法。由于激光跟踪仪具有高精度测距等特点,利用相邻测站观测空间公共点,对所有测站的数据进行公共点误差最小二乘解,求各观测点仪器姿态参数和待定点坐标(包括公共点坐标和非公共点坐标)^[9],如图 1 所示。

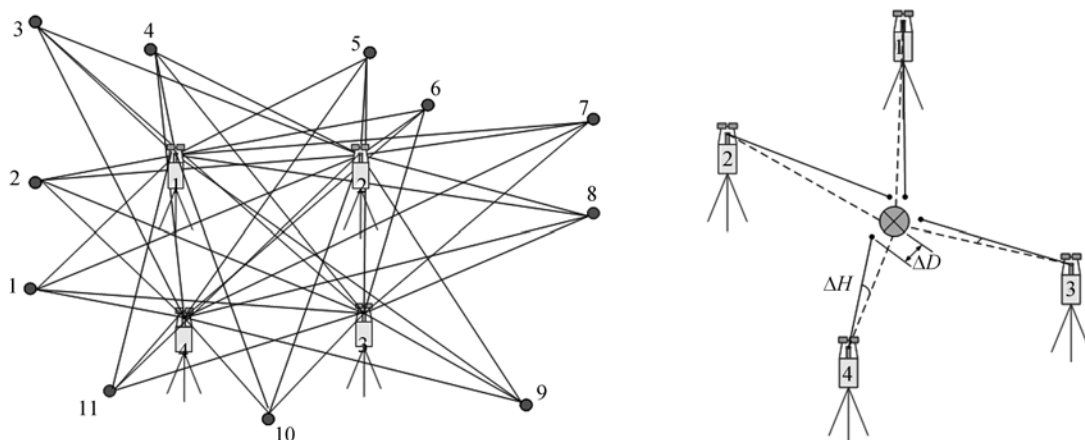


图 1 激光跟踪测量系统空间坐标测量精度校准示意图

Fig. 1 Calibration of space coordinate measuring accuracy using laser tracking measurement system

每个跟踪仪测站在空间有 6 个参数:相对坐标系的平移量 T_x, T_y, T_z 和绕三坐标轴的旋转角度 R_x, R_y, R_z , 确定这 6 个参数须满足一定的条件:设 n 为测站数, m 为测量固定点数, 每个测点有 3 个测量值:水平角 H 、俯仰角 V 、距离 D 。根据共线性方程, 每个站与每个测点之间可以有 3 个方程。因此求解条件: $3mn > 6(n-1) + 3m$ 。

根据激光跟踪仪空间姿态求解条件: $3mn > 6(n-1) + 3m$, 本文选择了在空间均布 11 个目标测量点, 设置 4 个测站。为了在求解非线性方程时收敛且收敛速度快, 应尽量保证任意 3 点不共线, 4 点不共面。设 4 个均匀分布在测量点包围线内的测站 1、测站 2、测站 3、测站 4。分别在不同测站测量 11 个目标点, 可以得到 44 组数据, 设第一测站为基准站, 将其它测站的目标测量值转换到 1 站。计算各站之间的最优转换参数, 从而得到其他测站转换至 1 站后测量点的误差, 图 2 为激光跟踪测量系统光束法平差精度检测流程图。

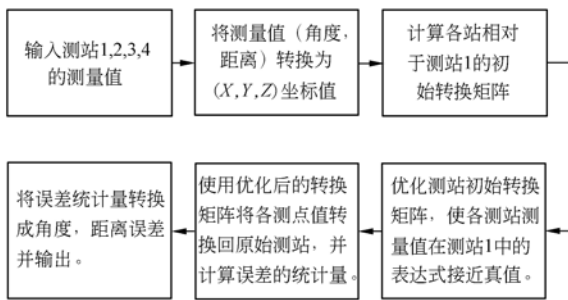


图 2 激光跟踪测量系统光束法平差精度检测流程图
Fig. 2 Flow chart of bundle adjustment precision testing

2.2 计算过程

2.2.1 角度转换坐标方程

将数据采集和处理单元传来的测量值 (V, H, D) 转换为直角坐标系下的 (X, Y, Z) 坐标值, 如图 3 所示。

$$\begin{cases} X = D \cdot \sin V \cdot \cos H \\ Y = D \cdot \sin V \cdot \sin H \\ Z = D \cdot \cos V \end{cases} \quad (1)$$

2.2.2 坐标转换关系

设点 P 在 1-XYZ 中的坐标为 (x, y, z) , 对应于测站 1, 2, ..., n 的像平面坐标为 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2) \dots (x_n, y_n, z_n)$, 测站 i 坐标系 i -XYZ 相对于测站 1 坐标系 1-XYZ 的关系如图 4 所示, 其转换方程为:

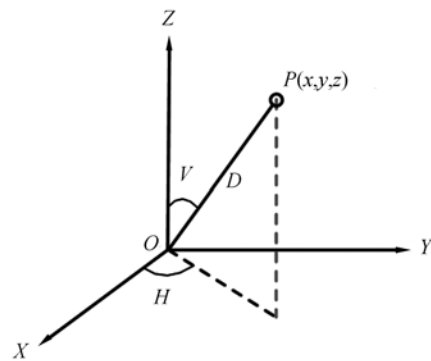


图 3 极坐标转换成直角坐标

Fig. 3 Transformation of polar coordinates into rectangular coordinates

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中: $(x \ y \ z)^T$ 为旧测站的测量值; \mathbf{R} 为 3×3 旋转矩阵; $(x' \ y' \ z')^T$ 为新测站的测量值; $(\Delta x \ \Delta y \ \Delta z)^T$ 为两坐标系之间的平移系数。

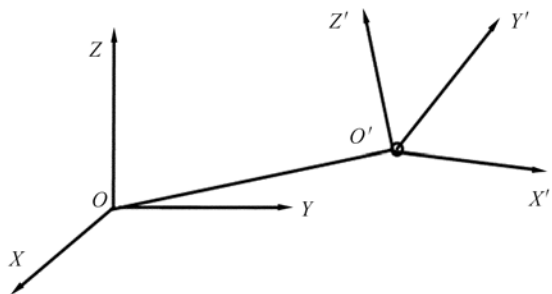


图 4 新旧坐标系坐标转换

Fig. 4 Coordinate transformation for two coordinate systems

2.2.3 利用三点建立坐标系

设已有三点数据值 $P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2), P_3(x_3, y_3, z_3)$, 用三点构造相互垂直的 3 个向量 $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_3, \mathbf{V}_4$, 即可构建直角坐标系, 通过 3 个单位正交向量即可求出旋转的 3 个参数 (α, β, γ) , 进而求得 3 个平移参量 (T_x, T_y, T_z) , 从而得到光束法平差的初值。使用 Matlab 软件进行仿真, 使用其函数库中的非线性优化函数 lsqnonlin 进行优化, 最终得到激光跟踪仪的测量精度。

$$\begin{cases} \mathbf{V}_1 = \overline{P_1 P_2} \\ \mathbf{V}_2 = \overline{P_1 P_3} \\ \mathbf{V}_3 = \mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2 \\ \mathbf{V}_4 = \mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_3 \end{cases} \quad (3)$$

3 Matlab 仿真实验

为了验证算法的正确性,本文使用 Matlab 模拟数据进行仿真。仿真数据如下:表 1 为初始测

表 1 测站 1 的原始测量值

Tab. 1 Original measurement of station 1

序号	原始测站值		
	V/rad	H/rad	D/mm
1	1.1071 0	0.664 06	5 678.900
2	-0.463 65	-0.323 62	4 717.000
3	0.785 40	0.259 20	5 852.300
4	0.785 40	1.266 30	4 717.000
5	-2.356 20	-0.339 84	3 000.000
6	0.832 98	0.607 43	5 431.400
7	1.249 00	-0.306 28	3 316.600
8	0.404 89	0.256 81	3 937.000
9	0.321 75	-0.156 82	3 201.600
10	-1.107 10	0.841 07	3 354.100
11	-2.034 40	-0.323 62	2 358.500

站 1 的仿真实验数据,表 2 为测站 2、3、4 与测站 1 之间的转站参数。顾及自主研发的激光跟踪测量系统的测角精度 $2''$ 和测距精度 $3 \mu\text{m} + 1 \mu\text{m}/\text{m}$,加入服从正态分布的随机误差(测角:期望为 0,方差为 $2''$;测距:期望为 0,方差为 $4 \mu\text{m}$)后所得的数据见表 3 所示。

表 2 各站相对测站 1 的转站参数

Tab. 2 Stationing parameters of other stations relative to station 1

转站标号	$R_x/$ ($^\circ$)	$R_y/$ ($^\circ$)	$R_z/$ ($^\circ$)	$T_x/$ (mm)	$T_y/$ (mm)	$T_z/$ (mm)
第二站	1	3	80	1 500	10	30
第三站	3	2	200	-10	-1 200	-40
第四站	1	1	150	-1 300	-1 400	35

表 3 转站后所得 4 个测站实验数据

Tab. 3 Experimental data of four stations after stationing

测站 1			测站 2				
序号	V/rad	H/rad	D/mm	序号	V/rad	H/rad	D/mm
1	1.107 10	0.664 05	5 678.900	1	-0.147 77	0.693 17	5 371.900
2	-0.463 66	-0.323 61	4 717.00	2	-2.103 50	-0.351 03	3 927.700
3	0.785 40	0.259 20	5 852.400	3	-0.576 99	0.300 72	5 199.700
4	0.785 40	1.266 30	4 717.00	4	0.266 54	1.329 00	4 563.700
5	2.356 20	-0.174 99	2 872.300	5	1.034 40	-0.203 50	3 641.000
6	0.927 31	0.540 42	5 830.900	6	-0.376 20	0.591 70	5 352.800
7	1.325 80	-0.237 95	4 242.600	7	0.037 67	-0.273 22	4 124.600
8	0.358 77	0.337 68	4 527.700	8	-1.039 90	0.448 59	3 652.000
9	0.244 98	-0.120 67	4 153.300	9	-1.205 10	-0.126 51	3 205.800
10	-1.107 10	0.841 09	3 354.100	10	3.127 80	0.900 46	3 172.900
11	-2.034 40	-0.323 61	2 358.500	11	2.425 10	-0.297 56	2 944.800

测站 3			测站 4				
序号	V/rad	H/rad	D/mm	序号	V/rad	H/rad	D/mm
1	2.756 00	0.544 84	6 447.600	1	-2.097 30	0.530 02	6 782.800
2	1.276 90	-0.292 73	4 383.100	2	2.940 10	-0.271 83	5 325.100
3	2.443 60	0.216 40	6 591.800	3	-2.351 20	0.204 23	7 221.200
4	2.741 40	1.078 50	5 062.800	4	-2.317 40	1.005 70	5 285.500
5	-2.591 70	-0.190 00	3 629.300	5	-1.251 20	-0.189 65	3 207.200
6	2.592 30	0.452 57	6 580.400	6	-2.234 40	0.430 80	7 056.300
7	2.897 00	-0.230 21	5 190.500	7	-1.955 90	-0.199 56	5 483.700
8	2.113 00	0.316 34	4 970.100	8	-2.671 90	0.264 04	5 778.900
9	1.991 50	-0.094 22	4 504.600	9	-2.763 40	-0.089 27	5 411.700
10	0.780 38	1.122 10	2 910.600	10	2.686 70	0.857 43	3 328.100
11	-0.785 69	-0.453 72	1 576.100	11	1.584 00	-0.647 97	1 271.300

通过光束法平差后得到的精度为: $\sigma_H=2.1''$,
 $\sigma_V=1.97''$, $\sigma_D=4.0366 \times 10^{-6}$ (相对误差)。对比
 之前所加的误差: $\sigma_H=2.0''$, $\sigma_V=2.0''$, $\sigma_D=4 \mu\text{m}$,
 说明模拟实验得到的测量系统精度评定结果与加
 入误差的量级是相吻合的,可以满足研制的激光
 跟踪测量系统测量精度指标评定的要求。

4 实物实验

本文使用 Matlab 模拟数据进行仿真,验证算
 法的正确性后,使用 Faro 生产的激光跟踪仪进行
 了实物实验,Faro 生产的激光跟踪仪长期使用得
 到的精度统计值为 $\sigma_H=2.0''$, $\sigma_V=2.67''$, $\sigma_D=4$
 μm 。实验数据如下:表 4 为测站 1、2、3、4 对 11
 个测量点的测量值。

表 4 四个测站实际测量数据

Tab. 4 Experimental data of four stations after stationing (mm)

序号	测站 1			序号	测站 2		
	X	Y	Z		X	Y	Z
1	-1 771.171	-489.892	1 777.409	1	-4 747.492	-472.048	1 791.117
2	850.707	-2 284.434	1 499.441	2	-4 177.504	-3 598.211	1 519.472
3	6 914.450	1 023.432	1 031.068	3	2 439.486	-5 579.201	1 049.120
4	2 722.867	4 709.610	999.317	4	2 108.356	-7.270	1 005.572
5	1 166.282	5 191.502	-745.040	5	1 353.568	1 433.928	-741.267
6	3 004.491	4 017.256	-1 440.975	6	1 812.323	-699.898	-1 432.984
7	4 959.061	3 328.327	-1 430.462	7	2 698.465	-2 573.25	-1 419.247
8	4 356.498	1 204.875	-1 438.272	8	765.833	-3 639.601	-1 422.878
9	3 433.480	-2 113.988	-1 438.723	9	-2 241.572	-5 319.593	-1 416.797
10	-1 515.381	336.570	15.244	10	-3 982.067	-75.951	27.388
11	-853.437	2 471.604	136.230	11	-1 999.301	956.593	144.266

序号	测站 3			序号	测站 4		
	X	Y	Z		X	Y	Z
1	4 419.674	1 876.600	1 660.067	1	-1 507.910	-5 481.161	1 629.059
2	2 133.063	4 081.442	1 373.693	2	787.205	-3 285.785	1 338.542
3	-4 400.188	1 829.089	956.700	3	-1 203.171	3 326.757	845.341
4	-883.340	-2 505.638	946.284	4	-5 672.786	-16.947	834.164
5	562.455	-3 256.202	-798.592	5	-6 467.195	-1 448.437	-903.066
6	-1 057.121	-1 797.524	-1 499.610	6	-4 940.914	105.977	-1 607.740
7	-2 869.072	-791.742	-1 489.226	7	-3 864.666	1 876.994	-1 606.230
8	-1 920.369	1 201.051	-1 519.183	8	-1 910.558	850.454	-1 612.578
9	-456.037	4 318.965	-1 554.235	9	1 147.408	-735.491	-1 610.852
10	4 020.990	1 088.987	-93.300	10	-2 266.605	-5 068.287	-133.734
11	3 012.337	-904.278	50.161	11	-4 219.639	-3 980.813	-14.403

通过光束法平差后得到的测量精度为: $\sigma_H=$
 $1.97''$; $\sigma_V=2.61''$; $\sigma_D=3.75 \times 10^{-6}$ (相对误差)。
 对比仪器使用的精度: $\sigma_H=2.0''$; $\sigma_V=2.67''$; $\sigma_D=$
 $4 \mu\text{m}$,说明实验得到的测量系统精度评定结果与
 加入误差的量级是相吻合的,证明光束法平差对
 激光跟踪仪测量精度的评定是有效可行的。

5 结 论

本文采用光束平差原理,通过 Matlab 软件对
 激光跟踪仪的精度评定进行了仿真,仿真结果显
 示,光束平差法能在一定范围内准确地反映激光

跟踪仪的测量精度,同时本文还使用 Faro 生产的激光跟踪仪进行实物实验,证明光束法平差可以满足对自主研制激光跟踪测量系统测量精度设计指标($\sigma_H = 2.0''$; $\sigma_V = 2.0''$; $\sigma_D = 3 \mu\text{m} + 1 \mu\text{m}/\text{m}$)

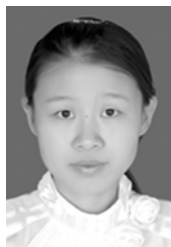
参考文献:

- [1] 马骊群. 大尺寸计量校准技术研究及在量值传递中的应用[D]. 大连:大连理工大学,2006.
MA L Q. *Research on large-scale dimensional calibration and its application in measurement transfer chain* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [2] 于成浩,柯明,赵振堂. 激光跟踪仪测量精度的评定[J]. 测绘工程,2006,15(6):39-42.
YU C H, KE M, ZHAO Z T. The accuracy assessment for the measurement of laser tracker [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2006, 15(6):39-42. (in Chinese)
- [3] 周维虎,费业泰,李百源,等. 激光跟踪仪几何误差修正[J]. 仪器仪表学报,2002,23(1):56-59.
ZHOU W H, FEI Y T, LI B Y, *et al.*. The correction of geometric error for laser tracker [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, 23(1):56-59. (in Chinese)
- [4] 刘万里,曲兴华,欧阳健飞,等. 激光跟踪测量系统角度自动校正装置设计[J]. 光学精密工程,2008,16(9):1695-1700.
LIU W L, QU X H, OUYANG J F, *et al.*. Design of angular automatic calibration mechanism for laser tracker system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9):1695-1700. (in Chinese)
- [5] 周维虎. 大尺寸空间坐标测量系统精度理论若干问题的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2000.
ZHOU W H. *Research on the precision theory of large-scale coordinate measuring systems* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2000. (in Chinese)
- [6] 于成浩,董岚,柯明,等. 大尺寸激光跟踪仪三维控制网平面精度研究[J]. 测绘科学,2008,33(2):42-44.
YU C H, DONG L, KE M, *et al.*. The plane accuracy research of 3D control network based on laser tracker in large-scale space [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(2):42-44. (in Chinese)
- [7] 张曦,陈五一. 激光跟踪仪测量曲面的测量不确定度研究[J]. 计量学报,2006,27(2):107-112.
ZHANG X, CHEN W Y. The contour measurement uncertainty in the measurement of curve surfaces with a laser tracker [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2006, 27(2):107-112. (in Chinese)
- [8] 张福民,曲兴华,叶声华. 面向对象的大尺寸测量不确定度[J]. 光学精密工程,2008,16(11):2239-2243.
ZHANG F M, QU X H, YE S H. Uncertainty estimation of large-scale measurement for special fitting task [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2239-2243.
- [9] 罗涛. 激光跟踪仪光束法平差模型和软件实现研究[D]. 武汉:武汉大学,2009.
LUO T. *Research on bundle adjustment model and its software realization for laser tracker* [D]. Wuhan: Wuhan University, 2009. (in Chinese)
- [10] JOSEPH M. *Quantifying coordinate uncertainty fields in coupled spatial measurement systems* [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.

作者简介:



周维虎(1962—),男,安徽无为,研究员,硕士生导师,2000年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事光电测量系统总体技术研究及光电精密测量技术研究。E-mail:zhouweihu@aoe.ac.cn



丁蕾(1986—),女,吉林珲春人,硕士研究生,2009年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光电测量技术、精密仪器方面的研究。E-mail:dinglei09@163.com



王亚伟(1983—),男,河南许昌人,博士研究生,2007年于西安建筑科技大学获得硕士学位,2011年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事光电测量技术方面的研究。E-mail: wangya-wei436@gmail.com



张滋黎(1983—),女,博士,助理研究员,2010年于天津大学获得博士学位,主要从事大尺寸测量方面的研究。E-mail: bme_zzl@126.com

●下期预告

压电驱动器记忆特性迟滞非线性建模

张桂林,张承进,赵学良

(山东大学控制科学与工程学院,山东 济南 250061)

迟滞特性为压电陶瓷驱动器主要的非线性特性。由于压电驱动器固有的迟滞特性,使得驱动器定位精度不高。为了精确描述压电驱动器的迟滞非线性特性,根据迟滞曲线的运动规律,并且考虑迟滞曲线的记忆更新特性,本文给出一种新的迟滞数学模型,修正了单纯采用抛物线拟合时的建模误差。为了验证模型的有效性,针对 PST150/7/40VS12 型压电陶瓷驱动器进行试验研究。采用抛物线迟滞模型时,对一阶反转输入信号进行预测,最大误差为 $0.1413\ \mu\text{m}$,均方误差为 $0.0604\ \mu\text{m}$,对复杂信号模型预测最大误差为 $1.3960\ \mu\text{m}$,均方误差为 $0.8566\ \mu\text{m}$,采用修正后的模型对文中复杂信号建模,最大误差为 $0.2370\ \mu\text{m}$,均方误差为 $0.09\ \mu\text{m}$,实验结果表明,修正后的模型不仅能够满足迟滞曲线的运动规律,还能够满足迟滞非线性的记忆更新特性,可以比较精确地描述复杂输入信号下的迟滞非线性特性。