文章编号 1004-924X(2004)05-0485-06

Φ25 mm 火炮身管直线度光电测量方法

张连存[1],张国玉[1],付秀华[1],杨立保[1],孙天祥[1],李清安[2],方 杨[1]
(1. 长春理工大学,吉林 长春 130022;2. 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:基于激光准直和光电探测原理与技术,并借鉴象限探测法、精密机械、伺服控制技术和计算机技术研制了一种用于Φ25 mm 火炮身管直线度的光电测量系统。给出了系统的总体结构,对系统的测量原理进行了理论分析,得到了身管直线度的计算公式,建立了解决光电靶偏心的数学模型。并将测量系统应用于长 1.15 m 的Φ25 mm 精加工孔标准件进行两组采样,每组采样步长为 100 mm。实测的结果表明:测量系统分辨率可以达到 0.005 mm,测量误差小于 0.015 mm,重复性测量精度优于 ±0.009 mm,说明测量方法是可行的。

关 键 词:火炮身管;直线度;激光准直;光电靶
中图分类号:TJ06 **文献标识码**:A

Optoelectronic method for measuring the straightness of the bore with a diameter of 25 mm

ZHANG Lian-cun[1], ZHANG Guo-yu[1], FU Xiu-hua[1],
YANG Li-bao[1], SUN Tian-xiang[1], LI Qing-an[2], FANG Yang[1]

(1. *Changchun University of Science and Technology, Chanchun* 130022, *China*;
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)

Abstract: Based on the principle and technology of laser collimation and optoelectronic inspection, an optoelectronic measuring method is presented to measure the straightness of the bore with a diameter of 25 mm by using the quadrant detection method, technique of laser collimation, optoelectronic detection, precision machine, servocontrol and computer for reference. The overall structure of system is discussed, and the measuring principle of the system is analyzed. Then, the corresponding formula to calculate the straightness of the bore and the mathematics model to solve eccentricity of the optical drone are obtained. Then the system is used to measure a hole standard piece with the length of 1.15 m and inner diameter of 25 mm, by sampling two groups of the data of straightness with the pedometer of 100 mm each. The results show that the system resolving power can reach 0.005 mm, the measuring error is not more than 0.015 mm, and the measuring repetition error superior to ±0.009 mm, Which indicates that the measuring method is applicable.

Key words: bore; straightness; laser collimation; optoelectronic target

收稿日期:2004-07-10;**修订日期**:2004-08-18.
基金项目:中国兵器工业集团技术改造项目(No. F102-030047)

1 引　言

火炮身管的直线度直接关系到火炮发射的可靠性、使用寿命以及炮弹的飞行姿态[1],必须对火炮身管直线度进行高精度测量。目前对火炮身管直线度的光电测量,国内外主要有激光多普勒法[2-4]、激光干涉仪测量法[5-9]、EST 测量法[10-13]和象限探测法[1,14-18]。其中,象限探测法是以激光束为理想直线,根据这一基准与象限探测器的相对位置来测量直线度。借鉴象限探测法,采用激光准直技术、光电探测技术、精密机械、伺服控制技术和计算机技术研制了一种Φ25 mm 火炮身管直线度光电测量系统,实现了小口径火炮身管直线度无损测量。

2 测量系统总体结构和组成

火炮身管直线度光电测量系统主要由半导体激光准直发射系统、光电靶、光电接收与变换电子学系统、光电靶移动与回转伺服控制系统与执行机构、计算机实时控制与数据处理系统等组成。测量系统总体结构如图 1 所示。

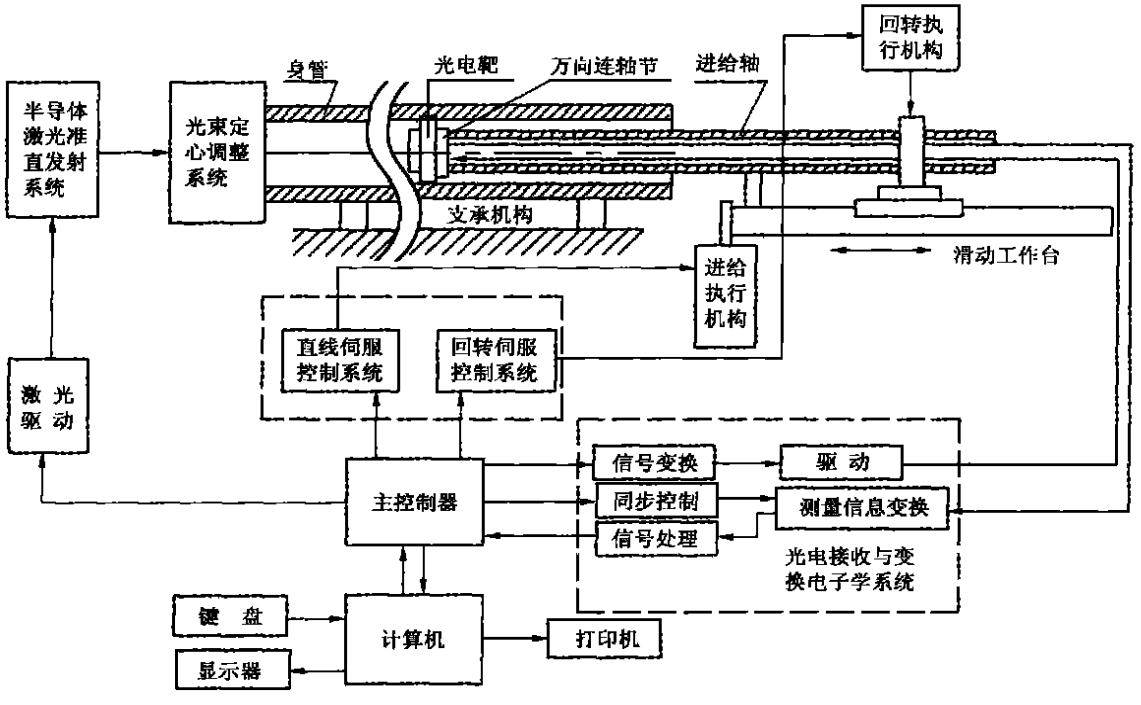


图 1　火炮身管直线度测量系统总体结构图
Fig. 1　Overall structure of measuring system for straightness of bore

光电靶在伺服系统的控制下进行直线和回转运动来完成对火炮身管直线度的测量,计算机系统通过对各系统和测量过程的控制,对测量数据采集与数据处理,并且与外部设备进行通讯和数据交换,这样就可以得到整个身管的直线度测量值,并形成数据文件、存储、显示和打印输出。

根据身管直线度测量要求,系统以光线基准,建立身管理论中心线,同时此光线也是测量直线度的信息载体。测量系统采用美国 Powertechnology 公司生产的 LD1338 型激光器及 CPM 准直模块,其准直性好,在 3 m 范围内形成直径不大于Φ1 mm,能量密度分布均匀的圆形光斑。为使系统基准光线调整方便并能达到较高的定心精度,系统采用弹性三爪锥形定心机构和多自由度球形微调结构[18]来实现激光准直发射光学系统的固定与调整。

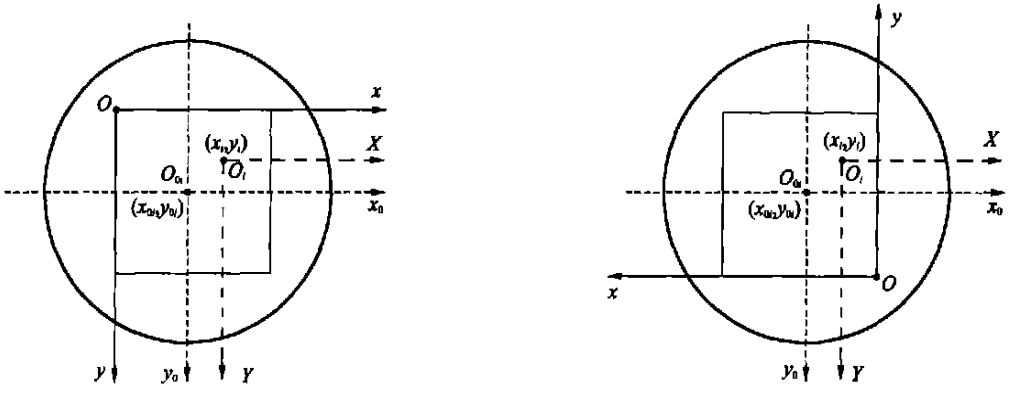
光电靶靶体光电接收器件选用 JAI 公司 CV-M2350 型 CCD 相机,摄像头直径 12 mm,像敏区面积 4.9 mm(H) ×3.7 mm(V),像元尺寸为 7 μm ×7 μm,在保证 CCD 像面的像点产生均匀像散的前提下,根据 CCD 阵列上各像元对应灰度之间的相关性,应用九点四线曲面拟和面阵 CCD 细

分技术[19]对该型号面阵 CCD 进行四细分,可以使该型号面阵 CCD 分辨率优于 2 μm。

3　系统直线度测量原理与数学模型

将半导体激光准直发射系统置于炮膛处,将其发射的准直激光束作为基准轴线,照射到身管炮口处光电靶上的面阵 CCD 像敏面上,经过光电转换,确定光斑的行、列位置信息。经计算机解算出光斑的几何中心坐标值,并以此作为坐标原点,构成炮膛理论中心线。通过设定步长,直线伺服控制系统移动光电靶在身管内运动至某一截面时,面阵 CCD 可接收到该截面处携带有被测直线度信息的光信号,经信号处理可测出该截面身管中心的偏离坐标值;通过回转伺服系统将光电靶旋转 180 °,应用直线度测量的数学模型可测同一截面另一方向偏离坐标值,可得到该截面的实际中心偏离坐标。同样方法可测出多个被测截面的实际中心偏离坐标。由此可得到被测身管的直线度,通过数据拟合,可图形显示身管内膛轴线直线度曲线。

建立的数学模型如图 2 所示:圆形代表身管内截面,方形代表面阵 CCD 长方形的有效光敏面。



(a) 光电靶初始坐标分析图

(a) Analysis about coordinate of optoelectronic taraget at initial position

(b) 光电靶旋转 180 °坐标分析图

(b) Analysis about coordinate of optoelectronic taraget after circumgyrating 180 °

图 2　光电靶坐标分析图

Fig. 2　Analysis of the coordinates of optoelectronic target

为便于理论分析,建立 3 个直角坐标系:

一是在面阵 CCD 长方形有效光敏面上建立的坐标系 xoy,其坐标原点为面阵 CCD 长方形有效像敏面的一个角,x、y 轴方向如图 2(a) 所示;二是测量坐标系 XOY,其原点为被测光点位置,X、Y 轴分别平行于 x、y 轴;三是身管截面坐标系 $x_0o_0y_0$,其原点为身管被测截面孔心,x_0、y_0 轴分别平行于 x、y 轴。

在身管直线度测量中,以起始点 $O_{00}(x_{00},y_{00})$ 为基准,将测出的其它截面的孔心位置坐标 $O_{0i}(x_{0i},y_{0i})$ 与之相比较($i=1,2,3\cdots N$,N 为被测截面数),便可得到直线度测量值。

孔心坐标 $O_{0i}(x_{0i},y_{0i})$ 可通过将光电靶旋转 180 的方法求取。首先,面阵 CCD 测出光点坐标 $O_i(x_i,y_i)$,图 2(a) 所示。将 x_{0i}、y_{0i} 转换到 XOY 坐标系中,此时 O_{0i} 坐标为 (X_i,Y_i)。则:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{0i}-x_i \\ y_{0i}-y_i \end{bmatrix}, \tag{1}$$

式中 x_i、y_i 可由面阵 CCD 测出。将光电靶绕孔心 O_{0i} 旋转一个角度 α,再测出光点在面阵 CCD 上的坐标 $O_i'(x_i',y_i')$,如图 2(b) 所示。则

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha, & \sin\alpha \\ -\sin\alpha, & \cos\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{0i}-x_i \\ y_{0i}-y_i \end{bmatrix}', \tag{2}$$

由(1)和(2)式可得:

$$X_i = \cos\alpha(X_i + x_i - x_i') + \sin\alpha(Y_i + y_i - y_i'), \quad (3)$$

$$Y_i = -\sin\alpha(X_i + x_i - x_i') + \cos\alpha(Y_i + y_i - y_i'), \quad (4)$$

为消除身管自重产生的弯曲与光电靶偏心对测量的影响,取 $\alpha = 180°$,此时 $\cos\alpha = 1$, $\sin\alpha = 0$,则有:

$$X_i = \frac{1}{2}(x_i' - x_i), \quad (5)$$

$$Y_i = \frac{1}{2}(y_i' - y_i). \quad (6)$$

当 $i = 0$ 时,为身管炮口处起始测量截面,即 (X_0, Y_0) 为起始点基准位置坐标,且

$$X_0 = \frac{1}{2}(x_0' - x_0), \quad (7)$$

$$Y_0 = \frac{1}{2}(y_0' - y_0). \quad (8)$$

各截面的实际中心与基准中心的偏心距为:

$$f_i = \sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2} \quad (i = 1, 2, 3\cdots), \quad (9)$$

则 f_i 中的最大值即为被测身管的直线度:

$$f = \max\{f_i\} \quad (i = 1, 2, 3\cdots). \quad (10)$$

4 实验结果与分析

利用火炮身管直线度测量系统对经计量部门检定的长为 1.15 m 的Φ25 mm 精加工孔标准件直线度进行了实测。采样两组,每组采样点 10 个,步长 100 mm,实测的结果及测量误差如下表 1 所示。

表 1　Φ25 mm 孔标准件直线度实测数据及测量误差

Tab. 1　Test data of straightness of Φ25 mm hole and measuring results of error

采样点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
第 1 组实测值 f_i	0.045	0.040	0.035	0.035	0.040	0.040	0.035	0.045	0.040	0.045
第 2 组实测值 f_i	0.040	0.045	0.040	0.035	0.035	0.040	0.035	0.040	0.045	0.045
直线度 f $f = \max\{f_i\}$	0.045									
标准件标定值 F	0.03									
测量误差 $\delta = \lvert f - F \rvert$	0.015									

数据应用 MATLAB 软件,采用最小二乘曲线平滑函数,通过计算机进行数据拟合,Φ25 mm 孔标准件直线度拟合曲线如下图 3 所示:其中 x 轴代表采样点截面中心与理论中心的偏心距; y 轴代表采样个数和采样长度。

实测的结果表明,测量系统分辨率可以达到 0.005 mm,测量误差不大于 0.015 mm,重复性测量精度优于 ±0.009 mm。

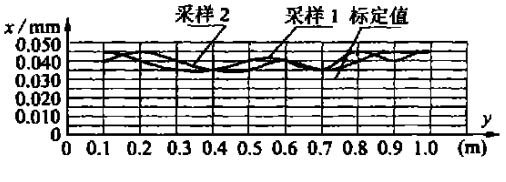


图 3　Φ25 mm 孔标准件直线度拟合曲线

Fig. 3　Curve of straightness of Φ25 mm hole standard piece

5 结　论

本文提出用于Φ25 mm 火炮身管直线度测量系统,解决了小口径火炮身管直线度的无损测量问题,保证了武器装备的可靠性。测量系统测量速度较快(可以达到 0.2 m/1 min),精度较高(测量精度可以达到 0.02 mm/3 m),并且系统对测量过程实时控制和数据处理,能够满足身管直线度无损自动测量要求。该测量系统可广泛应用于国防和民用工业,能够满足和适用于实际生产的需要,具有一定的应用和推广价值。

参考文献:

[1] 中国兵器工业标准化研究所. WJ2096-92 炮身测量[S]. 中国兵器工业总公司部标准 ,1992.
Institute of weapon industry standardization of China. WJ2096-92. *the Measurement of bore*[S]. Criterion of CNGC, 1992. (in Chinese)

[2] 朱小平 ,池晓红. 激光多普勒技术与直线度测量[J]. 现代计量测试 , 1995 ,(5) :17-19.
ZHU X P ,CHI X H. Laser doppler technique and straightness measurements[J]. *Modern Metrology and Test* ,1995 , (5) :17-19. (in Chinese)

[3] WANG C P. Laser doppler displacement measurement[J]. *Laser and Optronics* ,1987 ,6(9) :69-71.

[4] WANG C P. Using the laser doppler displacement meter for precision position and motion control[C]. *Proceedings of the First Annual Motion Control Technology Conference West* , 1990 :143-149.

[5] 张国玉 ,安志勇 ,姜会林 ,等. 直线度误差的光电非接触测量方法[J]. 光学技术 ,1999 ,25(1) :41-43.
ZHANG G Y ,AN ZH Y ,JIANG H L , *et al*. Optoelectronic non-contact measuring method for straightness error[J]. *Optical Technology* , 1999 ,25(1) :41-46. (in Chinese)

[6] 于瀛洁 ,张之江. 激光束角漂移对双频激光直线度测量的影响[J]. 光电工程 , 1998 ,25(4) :55-61.
YU Y J ,ZHANG ZH J. The influence of beam angle shift on the measurement of straightness with double-frequency laser [J]. *Opto-Electronic Engineer* , 1998 ,25(4) :55-61. (in Chinese)

[7] 赵辉 ,浦昭邦. 基于双频激光干涉技术的高精度直线度基准装置[J]. 中国激光 ,2001 ,28(7) :587-590.
ZHAO H ,PU ZH B. High precision straightness device based on double-frequency laser interferences technique[J]. *Chinese Journal Lasers* ,2001 ,28(7) :587-590. (in Chinese)

[8] 刘国淦 , 张学军. 光纤点衍射干涉的技术研究[J]. 光学 精密工程 ,2001 ,9(2) :142-145.
LIU G J , ZHANG X J. Fiber point diffraction interferometer[J]. *Optical and Precision Engineering* , 2001 ,9(2) :142-145. (in Chinese)

[9] 王权陡 , 余景池. 像移干涉技术在小角度及直线度测量中的应用[J]. 计量学报 ,2002 ,23(1) :6-9.
WANG Q D , YU J CH. Application of phase shift interferometry to the measurement of small angle and linearity[J]. *Acta Metrological Sinica* ,2002 ,23(1) :6-9. (in Chinese)

[10] 王宪平 ,李圣怡. 直线度误差组合分离方法及其误差分析[J]. 光学 精密工程 ,1999 ,7(4) :124-130.
WANG X P , LI SH Y. Straightness measurement with a new combination method and its error analysis[J]. *Optical and Precision Engineering* , 1997 ,7(4) :124-130. (in Chinese)

[11] 徐永凯. EST 法测量深孔母线直线度的方案及其误差分析[J]. 北京理工学报 , 2000 ,20(4) :431-434.
XU Y K. Scheme and error analysis of generatrix straightness measurement for deep holes with EST[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology* , 2000 ,20(4) :431-434. (in Chinese)

[12] CHANGKU S , RONGSHENG L. A Laser version test method for seamless steel pipe straightness[C]. *In 1st International Symposium on Instrumentation Science and Technology. Luoyang , China* ,1999 :594-597.

[13] ZHANG L , ZHANG Y. Imitation analysis of the effect of initial-value error on straightness EST method in time-domain [C]. *Proceedings of the ICPE'96 and 6th SJSUT* ,1996 :401-403.

[14] 陈海燕 ,海洁. 直线度自动检查仪的研究[J]. 工具技术 ,2002 ,36(5) :34-35.
CHEN H Y , HAI J. Development of straightness automatics tester[J]. *Tool Engineering* , 2002 ,36(5) :34-35. (in Chinese)

[15] 史伟 ,廖俊必. 基于图像处理的炮管轴线直线度检测方法[J]. 兵工自动化 , 2002 , 21(6) :496-499.
SHI W , LIAO J B. A measurement method of gun barrel axes straightness based on image processing[J]. *Ordnance Industry Automation* , 2002 , 21(6) :496-499. (in Chinese)

[16] 叶声华 ,杨学友. 大直径钢管直线度在线测量研究[J]. 仪器仪表学报 , 2001 , 22(3) :55-57.
YE SH H , YANG X Y. Study on real-time linearity measurement of steel pipe with large diameter[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* , 2001 ,22(3) :55-57. (in Chinese)

[17] 李佳列 ,丁国清. 采用 CCD 的非接触测量中提高精度的一种方法[J]. 光学 精密工程 , 2002 ,10(3) :241-243.

LI J L ,DING G Q. Method for improving precision in non-contact measurement by linear CCD[J]. *Optical and Precision Engineering* , 2002 ,10(3) : 241 -243. (in Chinese)

[18] 马宏 ,潘毓学 ,车英. 炮管直线度激光检测设备研究[J]. 兵工学报 , 2003 , 24(2) :261-263.
MA H ,PAN YU X ,CHE Y. A study on a laser inspection device for the straightness of bore[J]. *Acta Armamentarii* , 2003 , 24(2) :261-263. (in Chinese)

[19] 吕海宝 ,湛廷政. CCD 细分技术方法研究及应用[J]. 光学学报 ,2002 ,22(11) :1396-1399.
LU H B , ZHAN T ZH. CCD subdivision method and application[J]. *Acta Optica Sinica* , 2002 ,22(11) :1396-1399. (in Chinese)

作者简介:张连存(1977 -) ,男 ,河北唐山人 ,长春理工大学测试计量技术及仪器专业硕士研究生 ,主要研究方向为光电和激光检测技术; Email :tseer @sohu. com

张国玉(1962 -) , 男 ,吉林松原人 ,长春理工大学研究员 ,博士生导师 ,主要研究方向为光电和激光检测技术。