

文章编号 1004-924X(2019)08-1704-06

多面体塔差及其安装偏心 对光电编码器精度检测的影响

陈 贇*, 高胜英, 韩庆阳, 张 晰

(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:自准直仪对安放在光电编码器轴系上的多面体进行检测是目前检测光电编码器的测角精度的常用方法之一。为了提高检测效率,根据自准直仪检测原理,对多面体塔差对自准直仪读数的影响进行理论分析;其次,依据偏心产生的原理,分析了多面体安装偏心对检测光电编码器精度的影响,得出了多面体塔差或多面体安装偏心在光电编码器精度检测中,因自准直仪的读数方式不同造成的影响不同。用 23 面体检测某种型号 21 位绝对式光电编码器,采用沿自准直仪 y 轴读数的方式,多面体安装偏心造成的检测误差为 $V_{pp}=7.9''$,多面体塔差造成的检测误差 $V_{pp}=0.8''$ 。实验结果表明,自准直仪读数方式不同,多面体塔差和安装偏心造成的检测误差不同,为提高检测效率提供了一定的理论指导。

关键词:光电编码器;精度检测;塔差;偏心

中图分类号:TP212.12 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192708.1704

Impact of polyhedron pyramidal error and installation eccentricity on precision detection of photoelectric encoder

CHEN Yun*, GAO Sheng-ying, HAN Qing-yang, ZHANG Xi

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: tutorchy@163.com

Abstract: In a common method for precision detection of photoelectric encoders, a polyhedron is joined with a photoelectric encoder and light from an autocollimation setup is reflected by the polyhedron; the precision of photoelectric encoder is then measured by reading the numerical value of the autocollimation. A feasible method to improve measurement efficiency was investigated with respect to the main factors that affect photoelectric encoder detection. Firstly, according to the principle of autocollimator detection, a theoretical analysis was conducted by analyzing polyhedron pyramidal error as it effects the reading of the numerical value of autocollimation. Secondly, according to the principle of installation eccentricity of a polyhedron pyramidal, the impact factors that affect the measurement precision of a photoelectric encoder were analyzed in detail. Pyramidal error and installation eccentricity are the main external factors, which are determined by the numerical value reading of autocollimation. A 21-bit photoelectric absolute encoder was detected using a 23-sided polyhedron;

收稿日期:2019-05-21;修订日期:2019-06-17.

基金项目:中国科学院仪器设备功能开发技术创新项目(No. 0932JSHN90)

the numerical value of autocollimation is read along the y -axis, the detection error of polyhedron pyramidal error is $7.9''$, and the detection of installation eccentricity is $0.8''$. The testing results indicate the effects of pyramidal error and installation eccentricity on the precision are based on the reading of the numerical value of autocollimation, which offers an guidance to improve detection efficiency.

Key words: photoelectric encoder; precision detection; pyramidal error; eccentricity

1 引 言

光电编码器又称光电轴角编码器或光电角位移传感器,是以计量圆光栅为核心元件,把角位置信息通过光通量的变化转换成相应的数字代码,可直接连接计算机,实现数字测量和数字控制的集光、机、电于一体的高精度非接触角度计量传感器^[1-5]。它具有分辨率高、精度高、测量范围广、易于维护等优点,因而被广泛应用于雷达、光电经纬仪、地面指挥仪、机器人、数控机床和高精度闭环调速系统等诸多装置中^[6-7]。由于光电编码器的精度直接影响控制系统的精度,因此精度检测是控制光电编码器质量的重要一环。

光电编码器的精度检测分为动态法和静态法。在动态检测方面国外处于领先地位,德国的 Heidenhain、俄罗斯和日本的国立高级工业科技研究所等均开展了相关研究。圣彼得堡大学采用基准法,检测精度为 $0.1''$;国立高级工业科技研究所采用比较法,检测精度为 $0.05''$ 。国内部分科研院所也进行了动态法的研究,但多用于检测低精度光电编码器^[8-11]。目前,国内光电编码器的精度检测仍以静态法为主,以高精度自准直仪和多面棱体或高精度的光电编码器为基准进行检测。其中,以高精度光电编码器为基准进行检测,其误差来源主要是被检编码器和基准编码器之间的连接及安装,这种检测方法并不常用,因为要研制一台高精度基准光电编码器需要更高的检测基准。其它静态检测法的误差因素有读数误差、检测环境、多面体塔差和多面体安装偏心。本文主要对多面体的塔差和安装偏心两种外来误差对编码器精度检测的影响进行分析,并给出了二者作为主要影响因素的条件。

2 塔差和偏心对光电编码器精度检测的影响

多面体检测法是静态法检测光电编码器测角

精度的主要方法之一,一般是用高精度自准直仪作为检测工具,通过对安装在光电编码器轴上的多面体作为反射面进行读数,其结构示意图如图 1 所示。

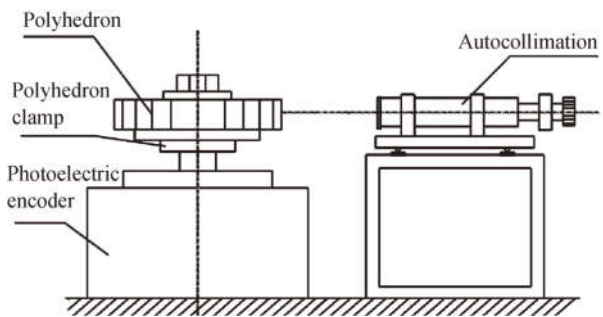


图 1 多面体检测法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of polyhedron detection method

2.1 自准直仪测试原理

自准直仪一般由光源、物镜、十字分划板、分光棱镜、反射镜、目镜和刻度分划板等组成,如图 2 所示。光源发出的光线通过位于物镜焦平面上的十字分划板后,经分光棱镜、反射镜 2、物镜成为一束平行光射出。若平面反射镜 1 的反射面垂直于光轴,光线仍按原路返回,经物镜、反射镜 2 和分光棱镜成像在位于其焦平面上的刻度分划板上,人眼通过目镜进行读数。因此,反射镜 1 是否垂直光轴会影响测量结果。有的自准直仪的结构和图 2 有所区别,但原理类似,不再一一赘述。

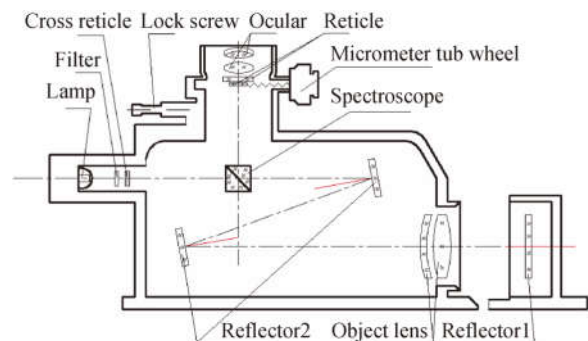


图 2 自准直仪原理

Fig. 2 Principle diagram of autocollimation

2.2 塔差对光电编码器精度检测的影响

塔差通常指棱镜的各个工作面对某一公共假想面垂直度的偏差^[12-13]。在多面体法检测光电编码器精度时,塔差有两种,一种是多面体自身的固有塔差,即每个面对底面的角误差,可以通过修正的方式进行消除;一种是随机塔差,即多面体本身和多面体放置面之间的不垂直度,这是本文中要分析的。若反射镜 1 不垂直光轴,和光轴有一个 α 角,由图 3 可知,十字线的反射光线有 2α 的偏角,在目镜中的十字线像将对刻度分划板有一个距离 y 。 α 角和距离 y 的关系式如下:

$$y = 2f' \cdot \alpha, \quad (1)$$

其中: f' 为物镜焦距, α 为平面反射镜倾斜角度 (rad)。

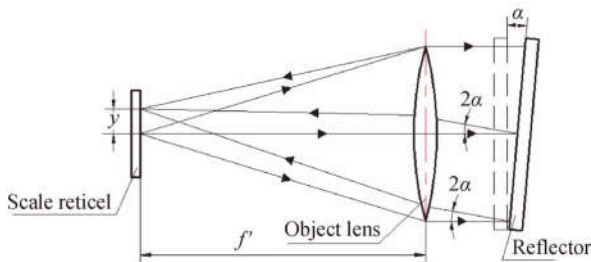


图 3 塔差影响的光路图

Fig. 3 Impact of pyramidal error on light path

在光电编码器精度检测过程中,图 2 中的平面反射镜 1 由多面体代替(见图 1),多面体的塔差(即倾角)引起的十字分划板像移会沿 x 轴左右移动,而检测光电编码器精度时,读数是沿 y 轴读数(图 2 中的测微鼓轮旋转 90°),因此,塔差对光电编码器精度检测没有影响。但检测光电编码器精度时需要调整多面体的塔差,一般控制在 $5'$ 左右,目的是使十字线在视场范围内的位置不变,减少读数误差。若检测光电编码器精度时,读数是沿 x 轴读数,多面体的塔差是影响编码器精度的一个主要因素。

2.3 偏心对光电编码器精度检测的影响

多面体旋转中心和编码器旋转中心由于安装无法重合而有一定的偏离量,称为多面体安装偏心^[14]。如图 1 所示,光电编码器精度检测时,多面体放在工装上,而工装直接和光电编码器的轴连接在一起,多面体在实际安装时,由于加工的原因,无法使自身的旋转中心和光电编码器的旋转

中心重合。当转过 180° 时,多面体的直径 $P'Q'$ 并不落在直径 PQ 上,而有一段距离 $2e$,即光电编码器转动,虽然主轴转过 180° ,但读数却不是 180° ,而是 $180^\circ + \Delta\theta$,因而不能正确地反应主轴的实际转角,其读数误差为:

$$\Delta\theta = 360^\circ \cdot e / \pi R_0, \quad (2)$$

其中: $\Delta\theta$ 为读数误差, e 为偏心量, R_0 为多面体直径。

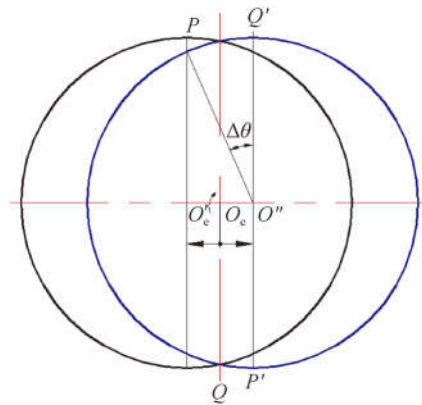


图 4 偏心原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of deceleration principle

因此,当多面体放置存在偏心时,误差 $\Delta\theta$ 会引起自准直仪内的十字分划板像沿 y 轴移动,而光电编码器精度值是沿 y 轴读数,从而造成检测精度误差,而对沿 x 轴读数的精度测量方式理论上会造成误差。若想去除因多面体安装偏心引起的误差,需要在对径再放置一台自准直仪,多面体必须为偶数面,这样可以同时读取两组数据:

$$y'_1 = y_1 + \Delta y, \quad (3)$$

$$y'_2 = y_2 - \Delta y, \quad (4)$$

其中: y_1 为自准直仪 1 的读数, y_2 为自准直仪 2 的读数, Δy 为偏心引起的读数误差。

以上两式获得的是偏心对读数的影响,两式相加便可以消除 Δy 。这就证明,采用双边读数可以消除偏心带来的误差,但实际操作中会增加工作量和装调难度,这也是光电编码器精度检测目前只采用单个自准直仪读数的原因。

3 实验

按照上述分析,对某型号的 21 位绝对式光电编码器进行了精度检测,检测设备采用型号为

MC030-1401 双向精密自准直仪,读数方式为沿 y 轴读数即垂直于塔差引起的出差方向,多面体采用 23 面体,如图 5 所示。由于塔差和安装偏心在实际检测过程无法消除,只能调整到检测结构的最佳位置,表 2 第二列是塔差和偏心都是该结构下的最佳数值。为了比较明显地分析塔差和偏心对检测精度的影响和读数方式有关,在 MC030-1401 视场范围内,最大限度地加大塔差和偏心。表 2 第二列是在塔差为 $2.5'$ 、偏心为 0.01 mm 的条件测得的精度值,第三列是在塔差为 $100'$ 、偏心为 0.01 mm 的条件测得的精度值,第四列是在塔差为 $2.5'$ 、偏心为 0.4 mm 的条件测得的精度值。

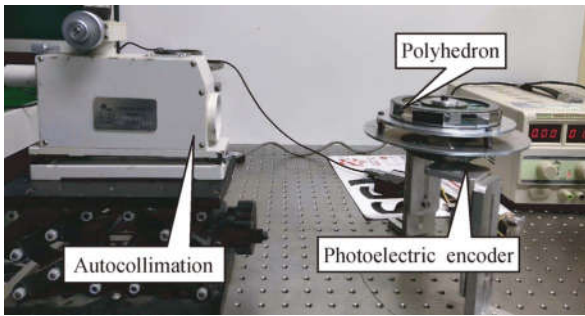


图 5 编码器精度检测实物图

Fig. 5 Physical map of photoelectric encoder detection

通过图 6 和表 2 可以看出,在沿自准直仪 y 轴方向读数时,多面体安装偏心引起的误差为 $11.3''$,是最佳状态下的 2 倍多,远远大于塔差对光电编码器精度造成的影响。为了提高检测效率,在该读数方式下仅精调多面体安装偏心即可。

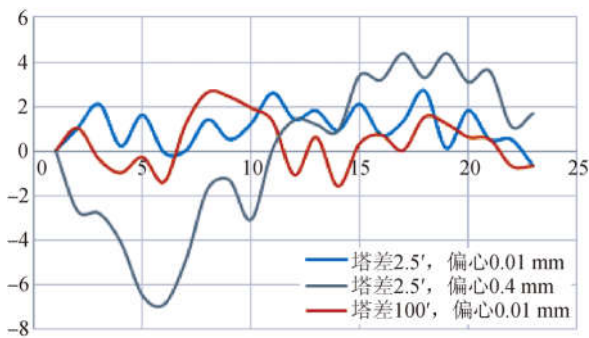


图 6 光电编码器精度检测数据对比

Fig. 6 Comparison of photoelectric encoder detection data

表 2 光电编码器精度检测数据

Tab. 2 Detection data of photoelectric absolute encoder

面数	误差/ $(''$)	误差/ $(''$)	误差/ $(''$)
1	0.0	0.0	0.0
2	1.0	1.0	-2.7
3	2.1	-0.4	-2.8
4	0.2	-1.0	-4.1
5	1.6	-0.3	-6.5
6	-0.1	-1.4	-6.9
7	0.0	1.2	-4.9
8	1.4	2.6	-1.7
9	0.5	2.4	-1.3
10	1.2	1.9	-3.1
11	2.6	1.3	0.1
12	1.4	-1.1	1.4
13	1.8	0.6	1.2
14	0.9	-1.6	0.9
15	2.1	0.3	3.4
16	0.7	0.7	3.2
17	1.3	0.0	4.4
18	2.7	1.5	3.3
19	0.1	1.2	4.4
20	1.8	0.6	3.1
21	0.5	0.5	3.6
22	0.5	-0.7	1.1
23	-0.7	-0.7	1.7
V_{PP}	3.4	4.2	11.3

4 结 论

本文理论分析了多面体塔差及其安装偏心对自准直仪读数造成的影响,并给出采用静态法检测光电编码器精度的过程中,二者对光电编码器精度检测结果的影响,得出了多面体塔差和安装

偏心对光电编码器精度检测结果的影响和采用何种方式读取自准直仪数值有关。实验结果表明,在垂直塔差的方向上读数,塔差对检测数据的影响极小,而偏心对检测精度的影响是检测机构最

佳状态下的 2 倍多。根据读数方式放宽塔差或多面安装偏心,在光电编码器检测数据影响极小的情况下,检测效率可以提高 25% 以上,对批量检测起到一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 于海,万秋华,赵长海,等. 基于后验误差拟合的角位移测量误差补偿[J]. 光学精密工程,2019, 27(1):51-57.
YU H, WAN Q H, ZHAO C H, *et al.*. Error compensation of angular displacement measurement based on posteriori error fitting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019,27(1):51-57. (in Chinese)
- [2] 陈赞,张红胜. 光电轴角编码器的编码方式及其发展趋势[J]. 中国光学与应用光学,2009,2(2):126-133.
CHEN Y,ZHANG H SH. Coding modes of photoelectric shaft encoders and their developing trend [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*,2009,2(2):126-133. (in Chinese)
- [3] 王显军. 基于 SOC 单片机的高集成度光电编码器电路设计[J]. 光学精密工程,2011, 19(5):1082-1087.
WAN X J. Circuit design for high integrated photoelectric encoder based on SOC singlechip [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5):1082-1087. (in Chinese)
- [4] 徐桂成. 光电编码器精度分析[J]. 电脑知识与技术,2018,14(8):49-51.
XU G CH. Analysis of photoelectric encoder's precision [J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2018,14(8):49-51. (in Chinese)
- [5] 万秋华,孙莹,王树浩,等. 双读数系统的航天及绝对式光电编码器设计[J]. 光学精密工程,2009, 17(1):52-57.
WAN Q H, SUN Y, WANG SH J, *et al.*. Design for spaceborne absolute photoelectric encoder of dual numerical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019,27(1):52-57. (in Chinese)
- [6] 贾兴丹,万秋华,赵长海,等. 光电编码器测速方法现状与展望[J]. 仪表技术与传感器,2018(3): 102-107.
JIA X D, WAN Q H, ZHAO CH H, *et al.*. Status and prospect of velocity measurement method with optical encoder [J]. *Instrument Technique and Sensor*,2018(3):102-107. (in Chinese)
- [7] 王涛,赵建科,田留德,等. 光电编码器与棱体轴线平行度对转角误差的影响[J]. 红外与激光工程, 2018,47(2):225-232.
WANG T, ZHAO J K, TIAN L D, *et al.*. Influence of parallelism between photoelectric shaft encoder axis and polyhedron one on the rotation angle error [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 225-232. (in Chinese)
- [8] 孙树红,赵长海,万秋华,等. 小型光电编码器自动检测系统[J]. 中国光学,2013,6(4):600-606.
SUN SH H, ZHAO CH H, WAN Q H, *et al.*. Automatic detection system for miniature photoelectrical encoder [J]. *Chinese Optics*,2013,6(4):600-606. (in Chinese)
- [9] 姜铁征,万秋华,于海,等. 小型绝对式光电编码器精度自动检测装置[J]. 仪表技术与传感器,2019(3):1-4,10.
JIANG T ZH, WAN Q H, YU H, *et al.*. Automatic error detection system for small absolute photoelectric encoder [J]. *Instrument Technique and Sensor*,2019(3):1-4,10. (in Chinese)
- [10] 董凯炎,史妹倩,刘杰,等. 一种光电编码器精度自动检测系统[J]. 传感技术学报,2019,32(3): 463-468.
DONG K Y, SHI SH Q, LIU J, *et al.*. An automatic error detection system for photoelectric encoder [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*,2019,32(3):463-468. (in Chinese)
- [11] 卢欣然,宋路,万秋华,等. 基于空间位置的增量式光电编码器误差检测系统[J]. 红外与激光工程, 2017,46(10):233-238.
LU X R, SONG L, WAN Q H, *et al.*. Error measurement system of incremental photoelectric encoder based on space position [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017,46(10):233-238. (in Chinese)
- [12] 蒋留杰,王新杰,翟玉生,等. 棱镜塔差的高精度检测[J]. 激光杂志,2017,38(7):60-63.
JIANG L J, WANG X J, ZHAI Y SH, *et al.*. High-precision measuring the second optical parallelism error of prism [J]. *Laser Journal*,2017,38(7):60-63. (in Chinese)
- [13] 田留德,刘朝晖,赵建科,等. 利用坐标变换分析塔差对编码器测角精度测试的影响[J]. 光学学报, 2015,35(5):0512003-1-6.

TIAN L D, LIU ZH H, ZHAO J K, *et al.*. Analysis the influence of pyramidal error on the encoder accuracy test by using coordinate transformation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35 (5): 0512003-1-6. (in Chinese)

[14] 周月明,曹向群,黄胜军. 偏心对光栅副性能的影响[J]. *光学仪器*, 1993, 15(1): 4-8.

ZHOU Y M, CAO X Q, HUANG SH J. The effect of eccentricity on the performance of a grating pair [J]. *Optical Instruments*, 1993, 15(1): 4-8. (in Chinese)

作者简介:



陈 贇(1976—),男,山东郓城人,副研究员,博士,1999年于长春光学精密机械学院(现为长春理工大学)获得学士学位,2002年、2006年于长春光学精密机械学院分别获得硕士、博士学位,主要从事光电编码器设计、计量光栅精密刻划、真空镀膜和检测方面的工作和研究。E-mail:tutorchy@163.com



高胜英(1986—),男,河南郑州人,助理研究员,2012年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光学设计及计量光栅真空镀膜方面的研究。