

文章编号 1004-924X(2016)11-2699-06

## 光电编码器误差检测转台的动态精度标定

于海\*, 万秋华, 卢新然, 赵长海, 梁立辉

(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:** 由于光电编码器动态检测转台的分辨率、精度和转速都比较高, 传统检测手段很难精确标定该类转台的动态精度, 故本文开展了转台动态精度标定方法的研究。首先, 分析动态转台工作原理, 指出了影响转台动态精度的主要因素。然后, 研究了动态误差的主要特性, 提出了一种基于动态重复性的转台动态精度标定方法。最后, 设计了 FPGA+USB 的数据采集电路, 实现了对转台动态精度的标定。对自行研制的转台进行了动态精度标定。标定结果显示: 提出的动态精度标定方法能够实现对转台的标定, 验证了该转台能够实现对被检编码器的动态检测, 解决了研制动态转台时缺少动态检测精度标定方法的难题。

**关键词:** 动态转台; 光电编码器; 误差检测; 动态误差标定

**中图分类号:** TP212.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162411.2699

## Calibration of dynamic precision for measurement platform of photoelectric encoder

YU Hai\*, WAN Qiu-hua, LU Xin-ran, ZHAO Chang-hai, LIANG Li-hui

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

\* Corresponding author, E-mail: yuhai5158@163.com

**Abstract:** The dynamic measurement platforms for photoelectric encoders are characterized by higher resolution, higher accuracy, and higher rotation speeds, and traditional measurement methods are difficult to calibrate its dynamic measurement accuracy. So, this paper proposes a calibration method for the measurement platforms. The working principle of the platforms was analyzed, and some factors effecting the measuring accuracy of the platforms was pointed out. The main characteristics of dynamic errors were researched and analyzed and a dynamic calibration method for the platforms was introduced based on its dynamic repetition characteristics. Finally, a FPGA+USB data collection circuit was designed to use in the calibration method. The method was successfully utilized to calibrate some self-developed dynamic platforms. The results show that the method proposed is capable of calibrating dynamic rotation platforms, and verify that the measurement platform can implement the dynamic measurement of photoelectric encoders. The method solves the problem of dynamic calibration for dynamic rotation platforms.

**Key words:** dynamic platform; photoelectric encoder; error measurement; dynamic error calibration

收稿日期: 2016-03-29; 修订日期: 2016-05-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51605465)

## 1 引言

随着科学技术的发展,光电编码器作为一种角度传感器在航空航天领域的应用越来越重要<sup>[1-4]</sup>。光电编码器不仅要在静态下保持高精度输出,还要在高转速下保证高精度输出。为了检测光电编码器的动态精度,本课题组设计了高精度动态转台。该转台采用高精度基准编码器实现对低精度小型光电编码器的动态检测,分辨率为 $1.23''$ ,静态检测精度优于 $2''$ ,转速为 $0.5\sim 8\text{ rad/s}$ 。

由于转台的分辨率和精度需优于被检编码器 $3\sim 5$ 倍以上才能实现对被检编码器的误差检测<sup>[5-6]</sup>,所以为了证明所设计的转台能够满足要求,并实现对转台的标定,需要首先对该转台的精度进行检测。目前,转台精度的静态精度标定通常采用多面棱体与激光自准直仪来完成,而动态检测精度的标定研究尚属空白。传统方法只能实现转台的静态精度检测,很难实现动态精度的检测。其原因在于:在检测该转台的动态精度时,传统方法不能在转台转速为 $8\text{ rad/s}$ 的状态下对它进行精度标定,无法给出该转台能够实现被检编码器动态精度检测的重要证据。因此,转台动态精度检测方法的研究,是研制光电编码器动态转台和实现编码器动态检测的关键。

本文对转台动态精度标定方法进行了研究。首先对动态转台进行分析,提出影响动态精度的几点因素;然后,提出转台的动态检测精度标定方法;最后,设计了动态精度检测电路,并对某型号自研转台进行了动态精度标定。该动态精度检测电路成功实现了对该转台的动态精度标定,为提高动态转台的检测精度和光电编码器的批量生产提供了重要依据。

## 2 转台误差特征分析

误差是指实际测量结果与被测量真值之差<sup>[7]</sup>,其一般表达式为:

$$\Delta x(\theta) = x(\theta) - x'(\theta), \quad (1)$$

式中: $x(\theta)$ 为实际测量结果, $x'(\theta)$ 是被测量的真值。在光电编码器动态转台的标定中,测量误差是指转台输出的角度值 $x(\theta)$ 与真实转过角度 $x'(\theta)$ 的差。

传统方法采用式(1)的原理对转台进行误差标定。这种标定手段多采用角度基准或多面棱体代替角度真值,可以实现较高的标定精度。但是,无论采用角度基准还是多面棱体检测法,都难以实现较高转速下的误差检测。

动态误差与静态误差的区别主要体现在动态性、时变性、随机过程性和自相关性等性质上<sup>[9]</sup>。

时变性:本质上来说,动态误差是一个动态量,它随着检测时间的不同而变化,因此动态误差具有时变性;而静态误差是一个静态量,不具有时变性。

动态性:动态误差是指被测系统输入量为动态量时,输出结果产生的误差具有随时间而变化的性质;而静态误差是当被测系统的输入量为静态量时产生的误差,所以不具有动态性。

自相关性:动态误差包含大量的随机信息,这些信息具有自相关性,因此在不同时刻的动态误差的概率分布并非是独立的,而是彼此相关的;而在不同时刻重复测得的静态误差一般具有独立性。

随机过程性:动态误差是一个随机过程,所以可以采用处理随机过程的方法来处理动态误差。

根据动态误差的性质,这里将动态误差作为一个随时间变化的量。那么,在动态条件下的同一时刻内,动态误差是指在这个时刻测量到的值与真实值的差,即:

$$\Delta x(t) = x(t) - x'(t), \quad (2)$$

式中: $x(t)$ 是 $t$ 时刻读取到的数据, $x'(t)$ 是 $t$ 时刻的真值, $\Delta x(t)$ 是动态误差, $t$ 是时间变量。

设转台转速为 $v$ ,那么 $t$ 时间处转台所转过的角度值 $\varphi(t)$ 可以表示为:

$$\varphi(t) = vt. \quad (3)$$

所以 $t$ 时刻真值 $x'(t) = \varphi(t)$ ;  $t$ 时刻的数据 $x(t)$ 可以直接读出。

为了消除读数误差,采用多次测量取平均值的方法来估计 $x'(t)$ ,即:

$$x'(t) = \frac{\sum_{i=1}^N x_i(t)}{N}, \quad (4)$$

式中: $x_i(t)$ 为 $t$ 时刻第 $i$ 次测量的数值, $N$ 为测量次数。 $N$ 越大,式(4)越能反映真实误差值。

### 3 动态转台检测精度的标定方法

在检测转台的动态检测精度时,将转台旋转一周所用的时间分为  $n$  等份,每一份的时间间隔为:

$$T_v = \frac{360^\circ}{vn}, \quad (5)$$

式中  $v$  为当前转台的旋转角速度。

重复测量  $N$  次,记录下每一周旋转过程中各个时间节点转台的输出数据。为了消除读数误差,对每次测量中相同时间节点的读数取平均值,即:

$$\bar{e}_n = \sum_{i=1}^N e_{in}, \quad (6)$$

式中:  $\bar{e}_n$  是第  $n$  个时间节点的角度数据的平均值;  $e_{in}$  是第  $i$  次旋转时第  $n$  个时间节点的数据。

将每一个时间节点的数据平均值  $\bar{e}_n$  减去第  $n$  个时间节点的真正角度数据,可以得到每个时间节点数据的偏差值,如式(7)所示:

$$E_n = \bar{e}_n - \varphi(n), (n=1, 2, \dots, N), \quad (7)$$

$$\varphi(n) = v \cdot T_v \cdot n. \quad (8)$$

为了进一步表征转台的动态检测精度,对  $E_n$  做标准差得到:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{n-1}}, \quad (9)$$

式中:  $\bar{E}$  为  $E_n$  的平均值,  $E_i$  是第  $i$  个时间点的平均值。标准差  $\sigma_v$  可以表征转速为  $v$  时转台的动态检测精度。

## 4 检测实验

### 4.1 光电编码器动态转台的工作原理

待标定的自研动态误差转台如图 1 所示。动态转台采用高精度基准光电编码器对低精度被检编码器进行角度数据对比,从而实现被检编码器的误差检测。按下计算机软件中的“开始检测”按钮,并设置好相应的转速,驱动电机将带动被检编码器和基准编码器同轴转动;系统机箱采集的两编码器的角度数据通过 USB 总线传输到计算机

中;计算机软件对角度数据进行计算处理,得到被检编码器的精度数据。

该动态检测转台具有低成本、便捷化、多样本、快速化、全自动化等优点。



图 1 光电编码器动态误差检测转台

Fig. 1 Dynamic error measurement platform of photoelectric encoder

### 4.2 采集电路设计

动态精度数据采集电路由现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)+USB 组成,其原理如图 2 所示。

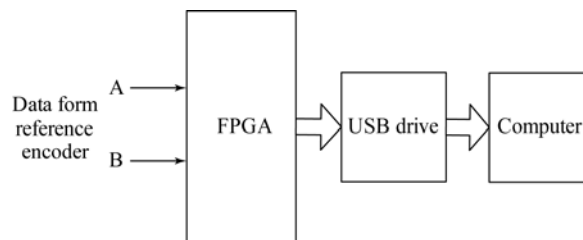


图 2 数据采集电路原理图

Fig. 2 Principle schematic of data collection circuit

采集电路的 FPGA 芯片采用 XILINX 公司生产的 XC3S400。USB 传输芯片采用 Cypress 公司生产的 CY68013A。在数据传输时,电路为 Slave FIFO 模式,所以固件程序并不控制数据的传输,这样可以达到最大的传输速度,即 48 Mb/s。

转台中的角度输出由同轴转动的基准编码器给出。基准编码器输出的两路正交方波信号 A、B 是相位相差 1/4 周期的两路正交方波信号,当基准编码器转过一个角度分辨率时正交方波信号变化 1/4 周期。同时在 FPGA 内部设计时间计算器,每隔时间  $T_v$  就对基准编码器的计数数据进行一次数据锁存,每一圈锁存  $n$  个数据。锁存

完毕后,将数据传输给 USB 芯片的 FIFO 中进行上传,并在 PC 软件中进行处理。

### 4.3 采集实验

采用该数据采集卡检测本课题组设计的某型

号动态转台的动态精度。实验时,只检测转速为 8 rad/s 时的动态精度。每个圆周内取 23 个时间节点,那么时间间隔  $T_v \approx 0.0054$  s。共进行 10 次采集实验,实验数据如表 1 所示。

表 1 动态误差检测结果(16 进制)

Tab. 1 Data of dynamic error measurement (hexadecimal)

Time	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
0	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
1	0B209	0B21C	0B225	0B235	0B22B	0B21C	0B231	0B21D	0B22B	0B222	0B223
2	16421	16430	1643A	16464	16455	16432	1654B	16429	16436	16426	1643B
3	21625	21634	21670	21687	2166B	21634	21677	2162D	21639	21625	2164B
4	2C878	2C841	2C881	2C8AD	2C882	2C839	2C891	2C83B	2C849	2C82D	2C863
5	37A79	37A45	37A89	37ACC	37A96	37A3A	37A9F	37A3A	37A48	37A2A	37A6B
6	42C70	42C45	42C78	42CCF	42C96	42C2F	42CA2	42C38	42C3F	42C1F	42C65
7	4DE6D	4DE56	4DE68	4DED1	4DE97	4DE2A	4DEAC	4DE46	4DE47	4DE24	4DE69
8	5905A	59068	59055	590CD	59089	5901A	59093	5903E	59042	59016	5905E
9	64247	6426D	64244	642C1	6427E	64214	64367	6423B	64240	6420A	6426B
10	6F448	6F487	6F44A	6F4C1	6F481	6F420	6F570	6F44B	6F448	6F3FD	6F472
11	7A64C	7A6A2	7A652	7A6BC	7A676	7A626	7A766	7A650	7A650	7A5ED	7A674
12	85851	858B1	85868	858BB	8586F	85837	85960	8585E	858D1	857EA	85886
13	90A83	90AD9	90A9E	90AD4	90A80	90A62	90B6D	90A7A	90ADA	909E4	90AA2
14	9BCBC	9BCFC	9BCC9	9BCE1	9BC7E	9BC80	9BD72	9BC8C	9BCE8	9BBE0	9BCB7
15	A6EF2	A6F24	A6F09	A6EB5	A6EC0	A6EDC	A6F89	A6EF1	A6F0A	A6DF1	A6EE3
16	B2141	B2159	B215C	B20CB	B20F2	B2127	B21A9	B20FF	B212C	B1FFE	B2111
17	BD392	BD389	BD3A7	BD2D9	BD323	BD36D	BD3D3	BD30F	BD34B	BD204	BD33C
18	C85D4	C85BC	C85F6	C855B	C85BA	C85FD	C85FD	C851F	C856A	C840A	C8568
19	D3816	D37EF	D3845	D3703	D3793	D3807	D3833	D373D	D379A	D361A	D379A
20	DEA43	DEA23	DEA80	DE919	DE9C0	DEA3B	DEA5E	DE94E	DE9BE	DE820	DE9C0
21	E9C65	E9C56	E9CB8	E9B3A	E9BF1	B9C72	E9C96	E9B6F	E9BF0	E9A3D	E9BED
22	F4E95	F3E91	F4EDE	F4D59	F4E17	F4E98	F4ECC	F4D91	F4D91	F4E1D	F4E16

表 1 中,20 位角度数据是采用 5 位 16 进制数据表示的,最后一列是 10 次数据采集的平均值。每一个时间节点处的读数平均值和真实角度值分别如图 3 和表 2 所示。

根据式(9)得到本次检测转台的动态精度为:

$$\sigma_v = 72.1''.$$

由此可知,转台的动态检测精度  $\sigma_v$  远远优于被检编码器的动态精度指标,因此该转台可以用来实现此类编码器的动态精度检测。

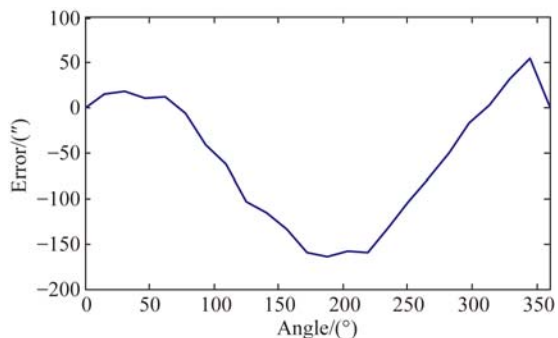


图 3 转台检测误差图

Fig. 3 Error curve of rotation platform

表 2 转台检测误差

Tab. 2 Measurement error of rotation platform (")

Time	Average	True data	Error
0	0	0	0
1	56 363.57	56 347.83	15.75
2	112 713.55	112 695.65	17.89
3	169 053.63	169 043.48	10.16
4	225 403.61	225 391.30	12.31
5	281 733.81	281 739.13	-5.32
6	338 046.71	338 086.96	-40.25
7	394 371.96	394 434.78	-62.82
8	450 678.68	450 782.61	-103.93
9	507 015.06	507 130.43	-115.37
10	563 344.02	563 478.26	-134.24
11	619 666.81	619 826.09	-159.28
12	676 009.37	676 173.91	-164.54
13	732 364.29	732 521.74	-157.45
14	788 710.56	788 869.57	-159.01
15	845 085.25	845 217.39	-132.14
16	901 462.42	901 565.22	-102.80
17	957 835.88	957 913.04	-77.17
18	1 014 210.57	1 014 260.87	-50.30
19	1 070 592.68	1 070 608.70	-16.01
20	1 126 959.96	1 126 956.52	3.44
21	1 183 335.89	1 183 304.35	31.54
22	1 239 706.88	1 239 652.17	54.70

## 参考文献:

- [1] 左洋,龙科慧,刘兵,等.高精度光电编码器莫尔条纹信号质量分析方法[J].红外与激光工程,2015,44(1):260-265.  
ZUO Y, LONG K H, LIU B, et al.. Method of analysis based on quality of Moiré fringe signals for high precision optical encoder[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015,44(1):260-265. (in Chinese)
- [2] 董静,万秋华,赵长海.光电编码器故障诊断技术研究及展望[J].中国光学,2015,10(8):757-765.  
DONG J, WAN Q H, ZHAO CH H. Current situ-

## 5 标定精度分析

本文进行的转台动态检测精度检测是基于式(2)实现的。经过分析,该方法的检测精度主要受转速不稳定的影响。

采用时间  $t$  为动态检测误差的变化方向,会引入由于转速不稳定而产生的读数误差。在  $v$  转速下,设第  $i$  次检测时转台旋转  $t$  时刻后转过的角度读数值为  $A_i(t)$ ,那么  $i$  与  $i-1$ 、 $i+1$  与  $i$  检测的读数值偏差分别为:

$$\Delta A_i(t) = A_i(t) - A_{i-1}(t), \quad (10)$$

$$\Delta A_{i+1}(t) = A_{i+1}(t) - A_i(t). \quad (11)$$

由于读数偏差具有随机性,当检测点数足够多时,对所有误差的偏差取平均值得到:

$$\Delta \overline{A_n(t)} = \sum_{i=1}^n [\Delta A_{i+1}(t) - \Delta A_i(t)]. \quad (12)$$

此时,  $\Delta \overline{A_n(t)}$  趋近于零。实验中取 10 次读数值做平均值,足够消除误差偏差。

## 6 结 论

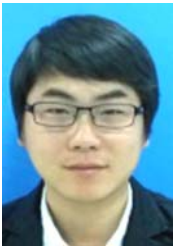
本文通过分析动态误差,提出了光电编码器动态检测转台动态检测精度的测量方法。基于该方法设计了 FPGA+USB 的数据采集电路,实现了对某型号自研转台的动态检测精度测量。实验结果表明,转台的动态检测精度为  $72.1''$ ,能够实现被检编码器的动态检测。

ation and prospect of fault diagnosis for photoelectric encoder[J]. *Chinese Optics*, 2015,10(8):757-765. (in Chinese)

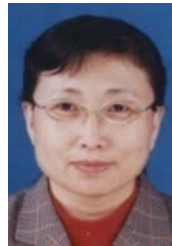
- [3] 孙树红,赵长海,万秋华,等.小型光电编码器自动检测系统[J].中国光学,2013,8(6):601-605.  
SUN SH H, ZHAO CH H, WAN Q H, et al.. Automatic detection system for miniature photoelectrical encoder[J]. *Chinese Optics*, 2013,8(6):601-605. (in Chinese)
- [4] 冯英翹,万秋华,孙莹,等.小型光电编码器的高分辨力细分技术[J].红外与激光工程,2013,42(7):1825-1829.

- FENG Y Q, WAN Q H, SUN Y, *et al.*. High resolution interpolation techniques of small photoelectric encoder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (7): 1825-1829. (in Chinese)
- [5] DENG F, CHEN J, WANG Y Y, *et al.*. Measurement and calibration method for an optical encoder based on adaptive differential evolution-Fourier neural networks [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24:055007.
- [6] 佟丽翠, 李晨阳, 赵柱, 等. 编码器自动检测过程的虚拟仪器化设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2010(2): 31-33.
- TONG L C, LI CH Y, ZHAO ZH, *et al.*. Virtual instrument design of encoder automatically detection process [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2010(2):31-33. (in Chinese)
- [7] 赵柱, 续志军, 王显军. 基于运动控制技术的编码器自动检测系统[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(2):134-138.
- ZHAO ZH, XU ZH J, WANG X J. An automatic detection system of encoder error based on motion control technology [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(2):134-138. (in Chinese)
- [8] 王宏禹. 随机数字信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- WANG H Y. *Random Digital Signal Processing* [M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese)
- [9] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- FEI Y T. *Theory of Error and Data Processing* [M]. Beijing: Science press, 2000. (in Chinese)

#### 作者简介:



于海(1987—),男,吉林郭化人,博士,助理研究员,2009年于东北电力大学获得学士学位,2014年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事光电位移精密测量技术的研究。E-mail: yuhai5158@163.com



万秋华(1962—),女,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,主要从事光电位移精密测量技术及高精度光电轴角编码器等方面的研究。E-mail: wanqh@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:曹 金)  
(版权所有 未经许可 不得转载)