

两步法测量编码器测角误差

余琳^{1,2}, 冯长有¹, 丁林辉¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 由多面体和自准直仪组成的编码器角度检测系统测量编码器误差, 得到的编码器误差中不但包含编码器误差, 而且包含多面体检定误差。根据两步法的使用条件, 将两步法应用于光电轴角编码器测角误差数据的处理, 分别得到多面体检定误差和编码器测角误差, 误差分离的结果与采用其他方法得到的结果相近, 但用两步法计算需要的测量数据大大减少。比较结果证明, 与其他测量方法相比, 此方法可以提高测量效率 90% 以上, 缩短检测时间近 80%。

关键词: 光电编码器; 轴角编码器; 两步法; 误差分离; 离散傅里叶变换

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A

Measurement of encoder errors with two-step method

SHE Lin^{1,2}, FENG Chang-you¹, DING Lin-hui¹

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

Abstract: The encoder errors obtained by measuring the encoder errors with an encoder angular testing system consisting of polyhedrons and an autocollimator, include encoder errors and calibration errors of polyhedrons. According to the conditions for use of two-step method, the two-step method is applied to the processing of photoelectric rotary encoder errors, and the calibration errors of polyhedrons and the encoder errors are separately obtained. The results of error separation are close to the results obtained by other methods, but the volume of data to be measured for use of two-step method is dramatically reduced. The results of comparison show that, in comparison with other methods, this method can be used to improve the measurement efficiency by more than 90%, and shorten the measurement time by nearly 80%.

Key words: optoelectronic encoders; angle encoders; two-step method; error separation; discrete Fourier transform

1 引言

光电轴角编码器是一种可实时输出的数字测角装置, 该器件把轴角信息转换成数字代码, 与计算机和显示装置连接后可实现动态测量和实时控制, 因此在工业、科研、国防等部门有着广泛的应用。光电轴角编码器的精度检测有多种方法, 如: 直接比较法、排列互比法^[1]、组合比较法^[2]等, 本文在实践过程中提出将两步分离法应用于

由多面体和自准直仪组成的编码器角度检测系统中。两步法一直应用于分离测试零件的圆度误差和轴系回转误差, 如在精密轴系回转误差测量中, 所测得的数据中既包含被测基准件的圆度误差, 也包含轴系的回转误差, 两步法可将这两种误差分离, 提高测量精度。在编码器精度检测中, 测得的误差主要有多面体检定误差和编码器测角误差, 用两步法可将多面体检定误差从编码器测角误差中分离, 从而提高编码器测角精度。

收稿日期: 2003-06-17; 修订日期: 2003-11-12.

基金项目: 国防军工技改项目 (No. C02S01S)

2 两步法误差分离原理及方法

两步法误差分离原理基于傅氏变换的平移特性^[3]。若已知函数 $f_1(x)$ 为两个未知函数 $z(x)$ 、 $g(x)$ 的和函数, 同时已知函数 $f_2(x)$ 为 $z(x)$ 与 $g(x+p)$ 的和函数, $g(x+p)$ 为 $g(x)$ 平移函数, 式中 p 为常数, 通过傅氏变换便可求得 $g(x)$ 与 $z(x)$ 。

通常, 轴系精度的检测方法如图 1 所示, 在主轴上端同轴安装标准球, 电感测微仪测头置于标准球表面, 其位移方向通过标准球心并垂直于主轴旋转中心。主轴旋转时标准球与测微仪测头产生相对旋转运动, 与理想圆形相比较产生径向尺寸变量。

设被测截面理想圆形的半径为 r_0 , 实际的被测截面圆轮廓为 $r(\theta)$ (θ 为以任意点为原点的圆周上的角度), 则误差 $f(\theta)$ 可用下式表示^[4]:

$$f(\theta) = r(\theta) - r_0, \quad (1)$$

$f(\theta)$ 是电感测微仪实测值。 $f(\theta)$ 中包括: 被测标准球的形状误差 $g(\theta)$ 、仪器主轴回转误差 $z(\theta)$ 、某些测量环节的偏置分量 $e(\theta)$ 、电气漂移分量 $h(\theta)$ 和随机干扰 i 等, 可由下式表示:

$$f(\theta) = g(\theta) + z(\theta) + e(\theta) + h(\theta) + i, \quad (2)$$

其中, $e(\theta)$ 可预先精确调整消除或通过数据处理消除, 漂移量 $h(\theta)$ 也可按适当方法控制, i 是由于外界因素干扰造成的, 可由多次测量取平均值的方法减小或基本消除。式(2)可简化为:

$$f(\theta) = g(\theta) + z(\theta), \quad (3)$$

由式(3)可知, 该方法若不知道标准球的形状误差, 轴系回转误差的测量精度就不可能高。

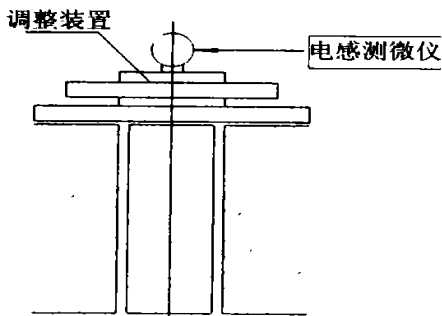


图 1 测量系统

Fig. 1 Measuring system

采用两步分离法可以将二者分离, 在测量轴系误差的同时求出标准球的形状误差。两步法测量过程^[5]如图 2 所示。

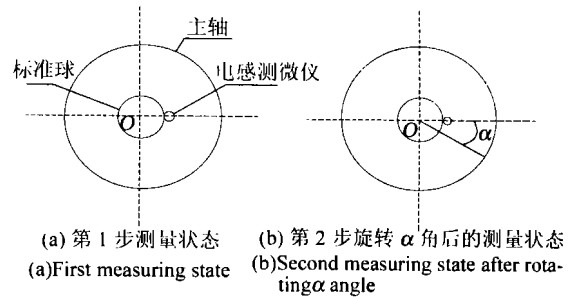


图 2 两步法测量原理

Fig. 2 Principle of two-step method

首先, 按通常测试方法进行第 1 次测量, 如图 2 (a), 则测头拾取的误差为:

$$f_1(\theta) = g(\theta) + z(\theta), \quad (4)$$

然后, 将标准球相对于主轴顺时针转一个固定的角 α (α 是测量角度间隔的整数倍), 如图 2 (b), 进行第 2 次测量, 则测头拾取的误差为:

$$f_2(\theta) = g(\theta + \alpha) + z(\theta), \quad (5)$$

它们的离散化形式为:

$$f_1(n) = g(n) + z(n), \quad (6)$$

$$f_2(n) = g(n + p) + z(n), \quad (7)$$

式中 p 为相对转位的间隔数, $p = N(\alpha / 2\pi)$, N 为等角采样点数(圆周均布)。

由式(6)可得

$$f_1(n + p) = g(n + p) + z(n + p), \quad (8)$$

由式(7)减式(8)消去 $g(n + p)$ 的影响后, 可得两步法基本方程:

$$y(n) = f_2(n) - f_1(n + p) = z(n) - z(n + p), \quad (9)$$

利用傅里叶变换的平移特性, 对式(9)两边做傅里叶变换, 得

$$Y(K) = Z(K) - Z(K) \times \exp(j2\pi pK/N) = Z(K)W(K), \quad (10)$$

式(10)中, $W(K) = 1 - \exp(j2\pi pK/N)$, 称为权函数; $j = \sqrt{-1}$ 。

则得到

$$Z(K) = Y(K) / W(K), \quad (11)$$

对 $Z(K)$ 作离散傅里叶反变换, 可得轴系回转误差为:

$$z(n) = F^{-1}[Z(K)], \quad (12)$$

实际工作中, 如有需要, 可以根据得到的回转误差求解圆度误差 $g(\cdot)$:

$$g(\cdot) = f_1(\cdot) - z(\cdot), \quad (13)$$

也可按上述方法先分离出圆度误差, 再求解回转误差。圆度误差和回转误差的分离孰先孰后对最后结果并无太大影响。

3 两步分离法的特性分析

由式 (11) 知, 主轴系统误差分离可表示为如下方程:

$$Z(K) = Y(K)/W(K)$$

式中: K 为谐波分量的阶数, $Z(K)$ 为轴系误差的频域表示, $Y(K)$ 为测量信号处理后的频域表示, $W(K)$ 是由 p 、 N 、 K 等参数决定的权函数。

权函数 $W(K)$ 的取值是影响分离精度的重要因素。权函数 $W(K)$ 在不同谐波分量上的取值不同。若 $Z(K)$ 中含有随机误差 (K) , 则由 (K) 引起的分离结果 Z 误差为 $(K)/W(K)$, 当 $|W(K)| > 1$ 时误差被衰减, 反之则误差被增大^[6]。

测量参数选择不当, 会使误差分离中某些谐波分量被抑制, 最终导致分离结果的失真。当权函数 $W(K) = 0$ 时, 轴系回转误差的第 K 阶谐波分量难以分离, 从而导致轴系回转误差测量和分离结果的谐波失真。 $K = 0$ 时, 权函数 $W(0) = 0$ 成立, 轴系回转误差的零阶分量难以分离。由于零阶分量对误差的影响可以用适当的方法去掉, 所以它不影响分离出的轴系回转误差。 p 取不同值, 对误差分离结果的影响也不同。所以, p 应取素数, 并且 p/N 不可约。否则, 第 n 次谐波分量失真。

$$n = i \times \frac{N}{x} \quad i = 1, 2, \dots, (x - 1), \quad (14)$$

式 (14) 中, x 为 p 与 N 的最大公约数。一般情况下, 除零阶谐波分量为零外, 总可以使 $W(K) \neq 0$, 因此谐波失真应是完全可以消除的。

在实际测量中, 测量过程中的随机干扰会引起误差分离结果的失真。设第 1 次测量数据为 $f_1(n) + z_1(n)$ 、第 2 次测量数据为 $f_2(n) + z_2(n)$, 于是下列关系式:

$$f_1(n) + z_1(n) = g(n) + z(n), \quad (15)$$

$$f_2(n) + z_2(n) = g(n + p) + z(n), \quad (16)$$

相减后得:

$$y(n) = f_1(n) - f_2(n) =$$

$$z(n) - z(n + p) - (z_1(n) - z_2(n)), \quad (17)$$

由傅里叶的平移特性, 傅里叶变换后得:

$$Y(K) = Z(K) - Z(K) \times$$

$$\exp(j2\pi pK/N) - (K), \quad (18)$$

则

$$Z(K) = Y(K)/W(K) =$$

$$Z(K) \times (1 - \exp(j2\pi pK/N))/$$

$$(1 - \exp(j2\pi pK/N)) -$$

$$(K)/(1 - \exp(j2\pi pK/N)) =$$

$$Z(K) - (K)/(1 - \exp(j2\pi pK/N)), \quad (19)$$

由式 (18) 可见, 随机误差也参加变换, 在任一位置产生的随机误差, 通过变换会分配到其他位置上, 因此, 使用两步分离法必须尽可能减小随机误差。

根据权函数的特点, 可以对得到的数据进行判断, 看数据中是否随机误差过大而影响计算结果^[5]。当 $K = 0$ 时, 权函数 $W(0) \neq 0$ 成立, 必有 $Y(0) = 0$ 。若测量信号中含有使 $Y(0) \neq 0$ 的成分, 可以肯定测量信号中混入了较大的随机误差, 有理由断定该次测量数据是无效的。但是, 这种检验只是必要的, 而不是充分的。实际测量时, 测量信号中总是有误差存在的, 因此零次谐波分量 $Y(0)$ 不可能精确为零。一般可根据实际情况设零次谐波分量幅值小于某一给定的小量 ϵ 来检验测量数据是否有效, 即 $Y(0) < \epsilon$ 。若 $Y(0) > \epsilon$, 则这组数据不符合要求, 应重新测量或采取相应措施减小随机误差, 以提高误差分离精度。为了抑制测量信号过程中混入的随机误差, 应对测量信号集合平均^[7]。集合平均有两种方法, 一种是对同一误差信号进行多次重复测量, 然后对其进行平均; 另一种是多组测回, 将相同位置处的误差信号平均。

4 数据分析对比

将两步法应用在由多面体和自准直仪组成的编码器角度检测系统中, 检测方法如图 3 所示。

将编码器与多面体固结同心安装, 并调整多面体工作面与编码器轴线平行, 自准直仪十字反射像与指标线平行。用光电自准直仪瞄准多面体

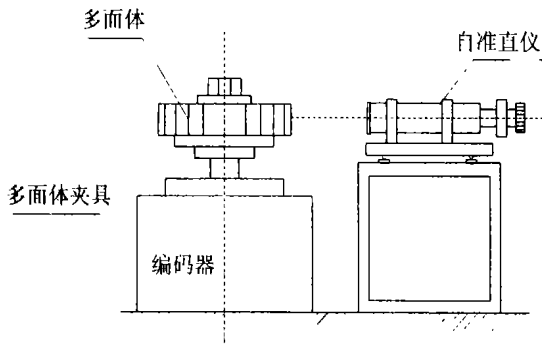


图 3 编码器检测系统

Fig. 3 Measuring system of encoder

第 1 面, 编码器置零, 此点作为测量起始点 $f_1(\theta_1)$, 转动编码器使多面体第 2 面对准自准直仪, 记录自准直仪示值为第 2 点数据 $f_1(\theta_2)$, 顺次测量完一周后得到第 1 测回 n 个数据 (n 为多面体

面数)。再调整多面体使第二面对准自准直仪, 编码器置零, 作为第 2 测回起始点 $f_2(\theta_1)$, 重复第 1 测回测量过程, 得到第 2 测回 n 个数据。将这两组数据按两步法原理进行处理, 可得到编码器测角误差, 与排列互比法进行比较列于表 1。由表 1 可知, 两步法计算得到的编码器测角误差 $P-V$ 值为 3.23, 给定的用排列互比法计算得到的编码器测角误差 $P-V$ 值为 3.24, 二者相同位置处的最大差值不超过 0.05, 与单次测量精度相当。但是单次测量中必须假定多面体的实际角度与标称值一致, 事实上多面体的安装塔差、同轴度误差、面形变化都可能改变实际检测条件下多面体的误差值。将测得的第 1 测回数据减去计算得到的编码器误差, 可以同时获得多面体检定误差, 这一特点在多面体误差未知或多面体误差随安装条件变化的情况下是很有用的。

表 1 测量数据及计算结果的比较

Tab. 1 Comparison of the measured data with calculated results

i	测量数据 (")		计算结果 (")		
	$f_1(\theta_i)$	$f_2(\theta_i)$	两步法	排列互比法	差值
1	2.6	1.8	0.000	0.000	0.000
2	2.0	1.6	-0.633	-0.625	-0.008
3	2.1	1.5	-0.866	-0.892	0.025
4	2.0	2.8	-1.300	-1.267	-0.033
5	2.9	1.5	-0.333	-0.283	-0.050
6	1.4	1.5	-1.566	-1.541	-0.025
7	1.3	0.5	-1.300	-1.266	-0.033
8	0.6	2.5	-1.933	-1.933	0.000
9	3.1	4.1	0.133	0.133	0.000
10	4.5	1.8	1.300	1.308	0.008
11	1.9	1.5	-1.233	-1.258	0.025
12	1.5	2.8	-1.467	-1.483	0.017

5 结束语

两步法误差分离技术是一种新的高精度测量技术, 仅用多面体的一次转位和两组测回就可将多面体误差和编码器测角误差分离。在数据处理方面, MATLAB 软件可以很方便地对数据进行

傅氏变换或反变换, 不需要编制程序, 使用简单、方便、容易理解。两步分离法主要应用在测量用标准器和被测装置误差相近, 测量过程随机误差较小, 测试环境稳定, 外界干扰小, 检测仪器或传感器精度较高的条件下。

参考文献:

- [1] 李谋. 位置检测与数显技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
LI M. *Position detection and digimatic techniques* [M]. Beijing: China Machine Press, 1993. (in Chinese)
- [2] HAN X D. Combinational comparative method for determining precision of a digital incremental photoelectric rotary encoder [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9 (6): 80-84.
- [3] 孙仲康. 快速傅里叶变换及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1982.
SUN ZH K. *Fast Fourier transform algorithm and application* [M]. Beijing: People Telecommunication Press, 1982. (in Chinese)
- [4] 谭久彬. 精密测量中的误差补偿技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1995.
TAN J B. *Error compensation techniques for precision measurement* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1995. (in Chinese)
- [5] 曹麟祥. 圆度检测技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
CAO L X. *Roundness measurement and verification techniques* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [6] 洪迈生. 三点法误差分离技术中的两个基本问题 [J]. 计量技术, 1994, (1): 5-6.
HONG M SH. Two base problems about three points method for error separation [J]. *Measuring Technique*, 1994, (1): 5-6. (in Chinese)
- [7] 毛英泰. 误差理论与精度分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
MAO Y T. *Error algorithm and accuracy analysis* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982. (in Chinese)

作者简介: 余琳 (1978 -), 女, 吉林松原人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士研究生, 主要研究方向为光电传感技术; E-mail: shelin242@sohu.com
冯长有 (1963 -), 男, 吉林长春人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员, 主要研究方向为光电传感技术。E-mail: fengcy@ciomp.ac.cn