

文章编号 1004-924X(2013)12-3066-06

反射式光电编码器

王显军

(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: 研制了反射式光电编码器。介绍了光栅自成像原理, 完善了高密度基准光栅的制作工艺, 研制完成了 32768 刻线对光栅和高集成度光电读数头, 最后制成了反射式高精度光电编码器。该编码器采用多参考点编码方式, 加快和简化了确定基准零点的操作, 初始化转动最大 5.625° 即可确定基准零点。采用自准直光管和 23 面棱体检测了编码器的测角精度, 其单边读数头均方根误差为 $1.11''$, 对径双读数头均方根误差为 $0.75''$; 反射式读数使光栅与读数头间隙提高 10 倍达到 2.0 mm。结果表明, 研制成功的高精度反射式光电编码器结构简单, 反射式读数头光电信号质量较高。该编码器为高精度测角应用提供了一种新的解决方案。

关键词: 高精度编码器; 反射式编码器; 光栅自成像; 高密度基准光栅

中图分类号: TP212.14; TN762 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132112.3066

Reflection photoelectric encoder

WANG Xian-jun

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
* *Corresponding author, E-mail: wangxianjun@ciomp.ac.cn*

Abstract: A reflective photoelectric encoder was developed. The grating self-imaging principle was introduced, the production process of a high-density reference grating was improved and a 32768 line grating and a highly integrated optical reading head were prepared. Then, the high-precision reflective optical encoder was completed. By using multi reference points, the encoder could confirm the absolute position easily and quickly, and its standard zero point was determined by the most initialize rotate angle of 5.625° . The angle measuring accuracy of the encoder was measured by a self collimating light tube and a 23 surface prism. The measuring results indicate that the Mean Square Root Error for single reading head is $1.11''$ and that for double reading head is $0.75''$. The gap between reflection grating and reading head is about 2.0 mm, which is ten times larger than that of tradition type encoders. The results demonstrate that the high-precision reflective optical encoder developed has simple structures and its reading head shows high quality photoelectric signals. It can provide a solution scheme for high precision angle measurement.

Key words: high precision encoder; reflection encoder; grating self-imaging; high-density reference grating

1 引言

光电编码器以圆光栅为测量基准,光栅采用光学加工完成,其精度较高。所以,高精度测角传感器以光电式编码器产品为主。随着技术的发展,光栅精度越来越高、刻线密度越来越大、反射式光电信号读取方式逐步趋于主流。

目前,光电编码器主要基于莫尔条纹原理^[1],采用透射方式获得光电信号,通过放大、整形后进行光电处理。该光电信号提取方式随着刻线宽度的减小要求动光栅和静光栅之间的距离成平方减小,而且,当刻线宽度较小(小于 15 μm)时,对光源的平行度、轴系端跳、径调的要求苛刻,只能在实验室中应用,刻线宽度低于 10 μm 时基本上无法获取光电信号。因此,要研制高精度适用于工程应用的光电编码器,必须采用新的光电信号提取方式。反射式信号提取方式是基于衍射的原理获取光电信号,其线宽越小衍射效果越好,而线宽的减小对动光栅和静光栅之间的间隙无明显影响,这个间隙大于透射式(10 倍甚至更高),可以适应较为恶劣的环境^[2-3]。

国内开展反射式光电编码器的单位较少,只有成都光电所和长春光机所,但可以应用到工程中的至今仍未见报道。而国外的产品较多,德国 Heidenhain 公司的编码器技术水平居世界领先地位,英国 Renishaw 公司的反射式光电编码器产品在国内应用较多。

本文介绍了作者已制作出的超薄型大内孔高精度反射式光电编码器。通过原理分析、研制过程描述和新旧传感器对比,给出了反射式编码器研制的关键技术。

2 干涉扫描原理

干涉扫描原理利用了精细光栅的衍射和干涉^[4]形成位移的测量信号,如图 1 所示。

当用单色平面波垂直照明周期性衍射屏(如光栅)时,将会在衍射屏后的菲涅耳衍射区内某些距离上出现该周期物体的几何像,如图 2 所示。

该效应称为泰伯(Talbot)效应或泰伯自成

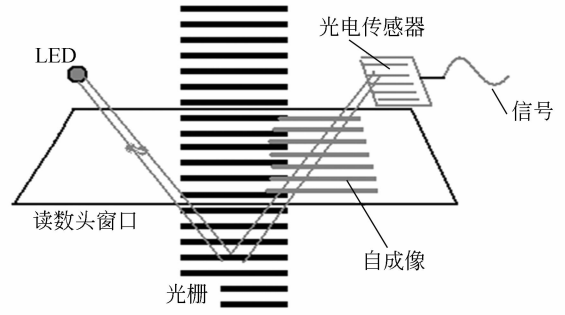


图 1 干涉扫描原理示意图

Fig. 1 Theory schematic diagram of interference scan

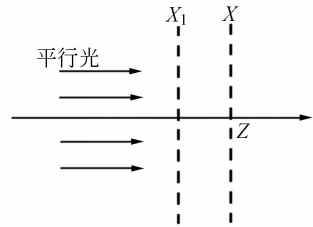


图 2 光栅自成像原理示意图

Fig. 2 Theory schematic diagram of grating self-imaging

像,其本质就是菲涅耳衍射自成像^[5]。

设光栅的振幅透射系数为:

$$t(x_1, y_1) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\pi \frac{1}{d} x_1, \quad (1)$$

式中: d 为光栅常数,如果用单位振幅平面波垂直照射光栅,则透过光栅的光场为:

$$\tilde{E}(x_1, y_1) = t(x_1, y_1). \quad (2)$$

被光栅调制后的光场 $\tilde{E}(x_1, y_1)$ 传播到菲涅耳衍射区,离光栅的距离为 z 的平面上光场的复振幅分布为:

$$\tilde{E}(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\pi \frac{1}{d} x_1 \right) e^{\frac{ikz}{2} [(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2]} dx_1, \quad (3)$$

作变量代换及积分运算,化为:

$$\tilde{E}(x, y) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} e^{-i\pi z (\frac{1}{d})^2} \cos 2\pi \frac{1}{d} x. \quad (4)$$

式(4)中已略去括号前对强度分布没有影响的常数相位因子 e^{ikz} 。可见正弦光栅菲涅耳衍射的复振幅分布 $E(x, y)$ 与光栅的振幅透射系数只相差一个与位置 z 有关的相位因子,当:

$$z = \frac{2md^2}{\lambda} \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots)$$

时,菲涅耳衍射的复振幅分布与光栅的振幅透射系数完全相同,为光栅自身的像,满足自成像的距

离 z 称为泰伯距离。

当 $m=3, d=20 \mu\text{m}, \lambda=0.9 \mu\text{m}$ 时 $z=2.66 \text{ mm}$ 。在此泰伯距离处采用栅状光电传感器可获得与栅距等周期的正弦信号。

采用干涉扫描,有利于密度高的光栅信号提取,实现了反射读数,同时,具有间隙大的优点。

3 反射式编码器研制过程

3.1 反射式光栅盘的制作工艺

光栅元件是光电编码器的测量基准,按理论设计的光栅图案制作成光栅元件的过程与结果,表明了在该行业技术基础的能力。传统的基于光学玻璃为基础材料的光栅制作,涉及到母版掩模版光刻、复制曝光、蚀刻技术等。属于微细加工技术^[6-7]领域,一直是制作集成电路的主流技术。元件的质量取决于这些技术的水平。

为研制高精度反射式新编码器,首先要解决高密度光栅元件的制作。长春光机所研制了许多高精度 24 位编码器,基准光栅栅距最高 $40 \mu\text{m}$ 。也制作过栅距为 $20 \mu\text{m}$ 或更密的光栅,均采用透射光作用从光栅读取信号,不适合采用反射光作用从光栅读取信号的方式。完善高密度基准光栅的制作工艺,是实现反射读数的先决条件。

目前,以 K9 光学玻璃为基片的计量圆光栅的光刻胶制作工艺^[8]为:真空镀膜—涂胶—前烘—曝光—显影—后烘—腐蚀—去胶—检验。若按照该种工艺制作反射式圆光栅,反射效果不理想。因为 Cr 的反射率较低,为 50% 左右,因此须采用新的制作工艺。

Al 是一种性价比较高的反射材料,在不镀增透膜的情况下,反射率可达 80% 以上,但 Al 比较软,不耐擦拭,而且随着时间的推移,反射率下降,因此,若采用 Al 作为反射材料,必须镀一层保护膜。

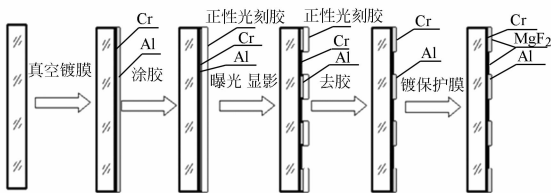


图 3 新光栅制作工艺示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fabrication technology for new grating

具体制作工艺如如图 3 所示。真空镀膜—涂胶—前烘—曝光—显影—后烘—去胶—真空镀膜—检验。

按照上述工艺制作完成反射式成品光栅盘如图 4 所示。光栅盘外直径为 220 mm ,刻线数为 32 768,线条周期为 $20 \mu\text{m}$ 。

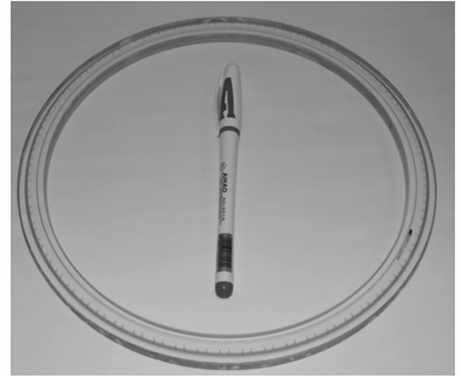


图 4 成品 32768 刻线基准光栅

Fig. 4 Grating production of 32768 lines

3.2 多参考点编码原理

以往,典型的增量式编码器码盘由 2 条码道构成^[9],一条是主光栅条码,另一条是参考点条码。参考点有的也称作零位信号或索引信号,零点只有一个。所以,早期的增量式编码器使用有局限性,寻零操作比较复杂。

多参考点光栅盘局部放大图如图 5 所示。

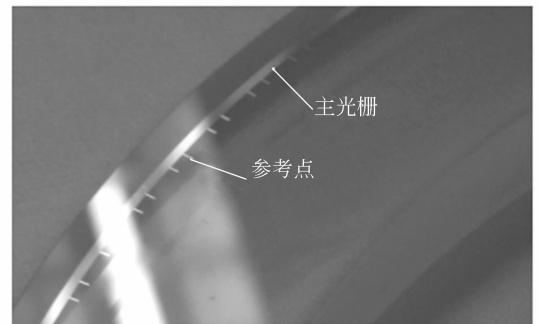


图 5 多参考点编码码盘

Fig. 5 Reference point coding disk

多参考点的设计原理为在参考点条码设置多个零点,设置原则是每相邻的两个参考点角距离互不相等,转动码盘,配合主光栅,测得相邻两个参考点距离,获得唯一的距离数,即可求得当前绝对位置。多参考点编码加速了寻零操作。

3.3 读数头电路设计

扫描光栅获得的光电信号与传统的增量式编码器获得的信号效果相似。按照传统的增量编码器电路方法进行设计,会造成光电分家、体积较大。

新编码器的电处理部分采用了‘读数头’的概念,目的即是要集成、小型、功能全,这样才更有利于应用。研制完成的成品读数头,如图 6 所示,外型尺寸为 42 mm×18 mm×10.5 mm。光电信号扫描、处理电路、接口电路均集成在读数头内。

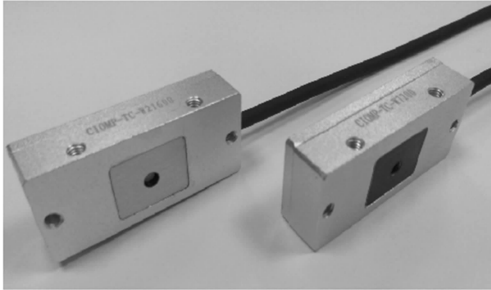


图 6 成品读数头
Fig. 6 Reading heads

读数头内部电路采用了 AD 直通处理的方法^[10],经 RS422 接口直接串行输出角度代码数据。其原理如图 7 所示。

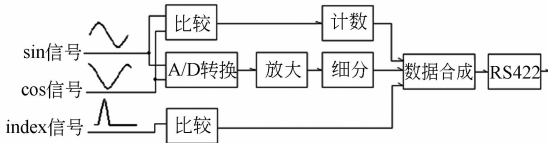


图 7 电路原理框图
Fig. 7 Block diagram of circuit schematic

比较判别、放大运算、细分处理、计数、数据合成均由软件计算完成,故电路结构简单,实现了小型化。

3.4 研制结果

为验证新编码器,用图 4 所示基准光栅和图 6 所示读数头,配合设计轴系和外壳支撑系统,制成整装编码器如图 8 所示。其外径为 240 mm、内孔径为 134 mm、轴向为 40 mm。产品测角分辨力为 27 位(0.01")。

采用多参考点编码方式,加快和简化了确定基准零点的操作。全周零位参考点共计 128 个,初始化转动最大 5.625°即可确定基准零点。

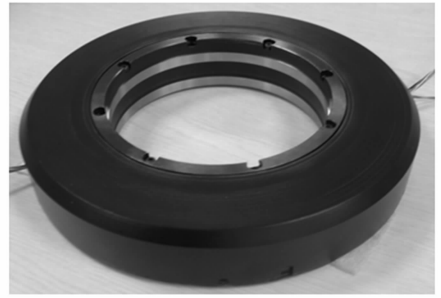


图 8 高精度反射式新编码器
Fig. 8 High reflection encoder

读数头外壳与基准光栅间隙大到 2.0 mm,如图 9 所示。



图 9 读数头与光栅间隙达到 2 mm
Fig. 9 Gap between reading head and grating is about 2 mm

允许的间隙变化为±0.1 mm,信号质量无明显变化,优势比较明显。

4 精度检测

采用自准直光管和 23 面棱体检测新编码器测角精度。单边读数头均方根误差为 1.11",对径双读数头均方根误差为 0.75"。检测数据如图 10 所示。

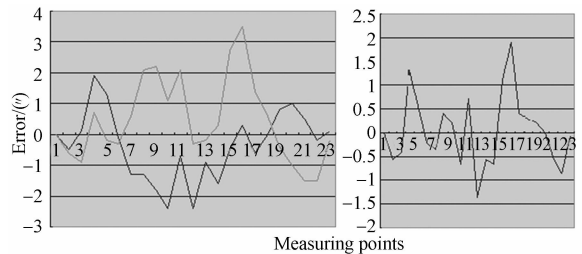


图 10 测角精度检测数据分布图
Fig. 10 Charts of angle accuracy measuring datum

精度指标是编码器的重要内容,新编码器的特点在于反射式读数,间隙较大。

5 透射式与反射式对比

透射式光电扫描原理如图 11 所示,光线经过扫描光栅和基准光栅组成的光栅副,产生莫尔条纹,在接收器端光电信号呈正弦规律。

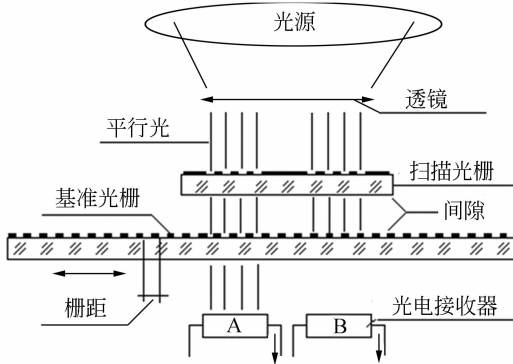


图 11 透射式光电扫描结构原理示意图

Fig. 11 Theory schematic diagram of refraction photoelectric scan

实践中,平行光不够理想,如果栅距较大,莫尔条纹作用到接收器的光电信号比较好。当栅距较小时,对平行光、间隙的要求较高,同时对影响间隙变化的晃动、形差的要求提高。当栅距为 $40\ \mu\text{m}$ 以下时,较难获得高质量的光电信号,工程应用一般不采用。

光电编码器精度指标首先取决于所采用的码盘的基本栅距精度。同等尺寸条件下,栅距越小精度越高。显然,采用透射光作用从光栅读取信号,仪器精度受限。采用反射光作用从光栅读取信号,可以使栅距更小,仪器精度可以更高。

决定光电编码器精度指标的另一关键因素是‘细分精度’^[11],采用透射光作用从光栅读取信号,精码信号质量受到码盘、轴系、狭缝、间隙、光电器件等各环节影响的因素较多,致使精码信号不够高。而且,编码器结构复杂,如不采取特殊办

参考文献:

[1] 叶盛祥. 光电位移精密测量技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.

YE SH X. *Photoelectric Displacement Precision Measuring Technology* [M]. Chengdu: Sichuan Sci-

法, 细分精度很难超过精码周期的 1%。

基于透射光作用基准光栅读取角度信号, 信号精度不够高, 完成的编码器结构复杂。

透射式编码器, 对狭缝间隙和光栅副相对位置精度要求较高, 读数狭缝位置变动, 容易产生较大误差, 如图 12(a) 所示。当光栅受到污染, 信号变化较大。如图 12(b) 和 (c), 是由头发丝遮挡的效果, 污染造成信号幅度下降, 更严重的后果是直流分量变化, 对细分的影响严重。

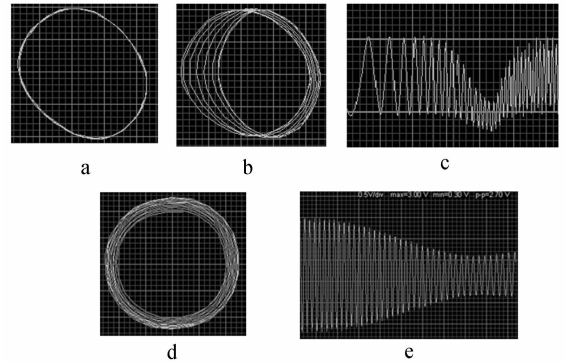


图 12 光电读数波形及污染效果波形图

Fig. 12 Wave diagrams of polluting grating signal

同样, 由头发丝遮挡新编码器信号波形如图 12(d) 和 (e) 所示, 直流分量未见影响, 圆心未动, 细分精度影响较小, 信号质量较高, 有利于高倍细分, 适用于高分辨率和高精度应用^[11]。

6 结 论

本文研究了光栅自成像原理, 完善了高密度光栅的制作工艺, 研制完成了 32768 刻线对光栅, 和成高集成度光电读数头。采用多参考点编码方式, 初始化转动最大为 5.625° 即可确定基准零点, 编码精度为 $0.75''$, 反射式读数使光栅与读数头间隙达 2.0 mm。

结果表明, 研制的反射式光电编码器结构简单, 信号质量好, 测量精度高, 为高精度测角应用提供了一种新的解决方案。

ence and technology press, 2003. (in Chinese)

[2] 张景旭. 国外地基光电系统空间目标探测的进展[J]. 中国光学, 2009, 2(1): 10-16.

ZHANG J X. Progress in foreign ground-based optoelectronic detecting system for space target detection[J]. *Chinese Optics*, 2009, 2(1): 10-16. (in

Chinese)

- [3] 付强,姜会林,王晓曼,等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2012,5(2): 116-125.
FU Q, JIANG H L, WANG X M, *et al.*. Research status and development trend of space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 116-125. (in Chinese)
- [4] 盖竹秋,程志峰. 钢圈反射式光栅信号的补偿[J]. 光学精密工程, 2011,19(12):2947-2953.
GAI ZH Q, CHENG ZH F. Compensation of signal for reflective grating engraved on steel ring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(12):2947-2953. (in Chinese)
- [5] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing:China Machine Press,2007. (in Chinese)
- [6] 刘明,谢常青,王从舜,等. 微细加工技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
LIU M, XIE CH Q, WANG C SH, *et al.*. *Minuteness Machining Technology* [M]. Beijing:Chemical Industry Press,2004. (in Chinese)
- [7] 刘洪兴,张巍,巩岩. 光栅参数测量技术研究进展[J]. 中国光学, 2011,4(2): 103-110.
LIU H X, ZHANG W, GONG Y. Progress in grating parameter measurement technology[J]. *Chinese Optics*, 2011,4(2): 103-110. (in Chinese)
- [8] 马宏. 精密刻划工艺[M]. 北京:兵器工业出版社, 1994.
MA H. *Manufacture of Precision Ruling* [M]. Beijing:Enginery Industry Press, 1994. (in Chinese)
- [9] 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, 2009,2(2):126-133.
CHEN Y, ZHANG H S. Coding modes of photoelectric shaft encoders and their developing trend [J]. *Chinese Optics*, 2009,2(2):126-133. (in Chinese)
- [10] 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):1082-1086.
WANG X J. Circuit design for high integrated photoelectric encoder base on SOC singlechip [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(5):1082-1086. (in Chinese)
- [11] 王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J]. 光学精密工程, 2012,20(2):379-386.
WANG X J. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(2):379-386. (in Chinese)

作者简介:



王显军(1965—),男,吉林长春人,研究员,主要从事光电传感器、电子技术应用方面的研究。E-mail: wangxianjun@ciomp. ac. cn