

文章编号 1004-924X(2001)03-0260-06

采用衍射、干涉技术提高光电轴角编码器的测角精度和分辨率

孔智勇, 赵红颖, 熊文卓, 艾 华

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 光电轴角编码器广泛应用于精密角位置的测量、数控及数显系统中,是国内外研究的热点。采用衍射、干涉技术的光电轴角编码器(简称激光编码器)具有结构紧凑、小型化;分辨率和测角精度高;响应频率高等优点。通过对几种激光编码器的成功方案的深入分析,阐述了这项技术的最新进展和所面临的问题。

关键词: 光电轴角编码器; 激光编码器; 衍射干涉

中图分类号: TN366 **文献标识码:** A

1 引言

光电轴角编码器又称光电角位置传感器,是一种集光、机、电一体的数字测角装置,它采用光电技术将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。它包括光学技术、精密加工技术、电子处理技术等,其技术环节直接影响编码器的综合性能。利用它可以实现角度、转速以及其他物理量的测量。它具有精度高、稳定可靠等优点。应用于各种雷达、地炮指挥仪、光电经纬仪、数控机床、机器人、自动化仪表等领域。

目前的光电编码器是由固定在旋转轴上的光栅盘,以及相应发光、光学系统、光电接收器组成。其中光栅盘是核心部件,是测量的基准。它有单圈和多圈形式,单圈称为圆光栅,用于增量式编码器。多圈式又称为码盘,用于绝对式编码器。光电编码器的分类可以从测角原理和输出的形式两方面划分。前者有几何光学式、激光干涉式及光纤编码器等。前者分为增量式、绝对式和多圈旋转式^[1]。

增量式编码器是根据主轴转过的角度以脉冲的形式输出,通过计数器计量脉冲数,得到转角量。绝对式编码器是通过读取码盘上各码道上的

二进制编码并以并行输出方式来时时再现轴的现位置距原点位置的二进制角量。多圈编码器是在绝对式编码器基础上,以并行输出方式输出主轴转过的圈数。

几何光学式编码器主要以双光栅的结构为主,它是利用莫尔条纹放大光栅节距的原理。它结构简单,价格便宜,稳定性、可靠性高,对环境适应性强,易构成绝对式编码器。由于受光的衍射影响,提高原始信号分辨率必须加大光栅刻划直径。

采用衍射和干涉技术的光电轴角编码器称为激光编码器,其特点是:体积小;精度和分辨率高。但由于所采用的光栅的限制,采用该技术的高精度绝对式编码器尚未见报道。近年来,国外许多公司和研究机构,研制和开发了采用衍射和干涉技术的增量式光电轴角编码器。

2 国外激光编码器的发展概况

采用几何光栅形成莫尔条纹原理的光电轴角编码器有两个突出的问题^[2]。其一,为了达到高分辨率,当使用细线条光栅盘时,因为有光的衍射现象的影响,光敏元件的输出信号的信噪比降低,所以,采用粗光栅,因此,要实现高脉冲输出,就要增加光栅盘的直径,小型而又要达到高分辨率是

不可能的。其二,光敏元件输出的光电信号正交性、正弦性的影响,高精度、高分辨率电子学细分很困难。因此,国外多家公司和科研机构竞相研制开发了激光编码器。激光编码器从原理上分为两种,一种是利用光栅衍射干涉法,另一种是利用傅立叶成像法(如图 1 所示)。

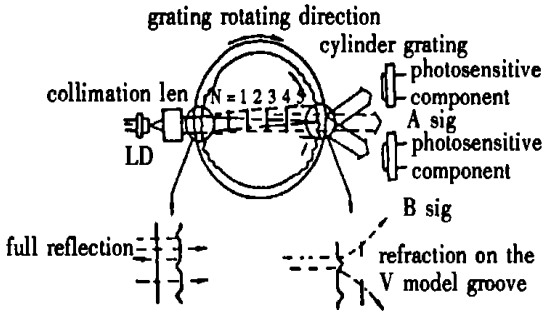


Fig. 1 Working principle of the laser encoder using Fourier imaging method

利用光栅衍射、干涉方法的激光编码器可分为单光栅式和双光栅式。

2.1 双光栅式编码器

双光栅式与利用几何光学式编码器结构相同,由于采用半导体激光器(LD)代替LED作光源,利用单色性好的激光照射主光栅,使其在指示光栅形成自身衍射像,从而得到放大的莫尔条纹。此种编码器的优点是提高了信号的质量,放宽了光栅副的间隙,提高了轴抗负载及冲击的能力,利于电机与传感器的联接^[3,4]。

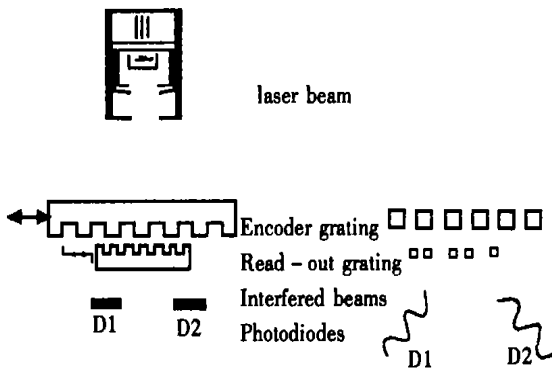


Fig. 2 Optical system of wide grating and fine grating

为了使光学系统具有更高的倍频数,编码器采用粗细光栅栅距组合的光学系统^[5],如图 2 所示。这一系统采用一块细光栅作为指示光栅,一

块粗光栅作为标尺光栅,标尺光栅的节距是指示光栅的 2 倍(即粗光栅的节距是细光栅节距的整数倍),读数头拾取 1 级衍射条纹。采用这一光学系统的编码器不用电子学细分全周可输出 480000 脉冲。

2.2 单光栅式激光编码器

它是利用衍射光相干涉的原理,得到位移信息,它突破了双光栅系统的光栅密度极限,加之系统本身具有光学倍频,因此原始信号分辨率提高 20 倍^[6]。如图 3 所示。

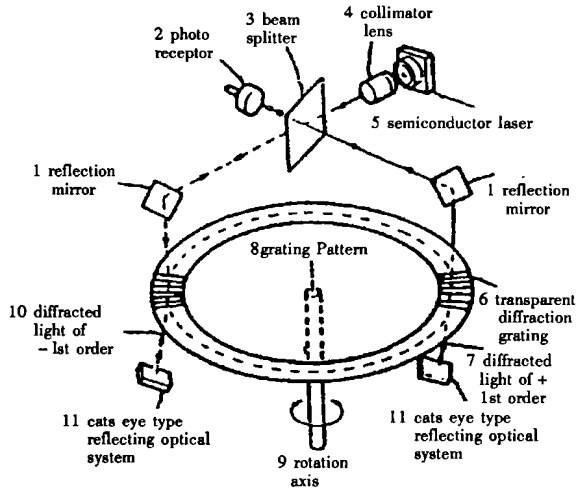


Fig. 3 Principle of the grating laser encoder

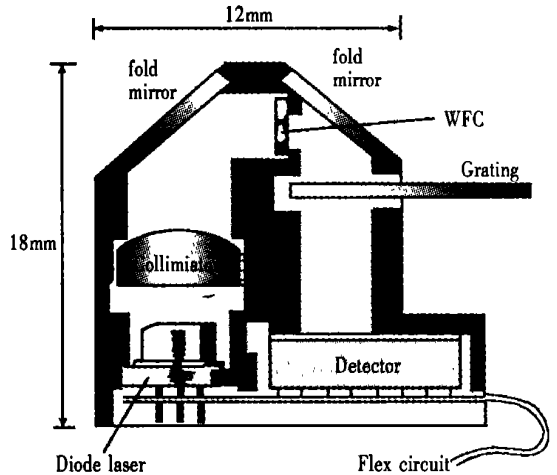
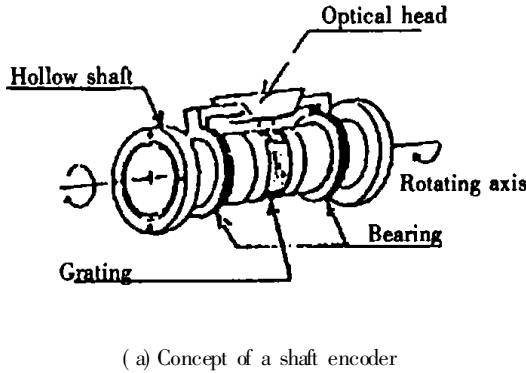


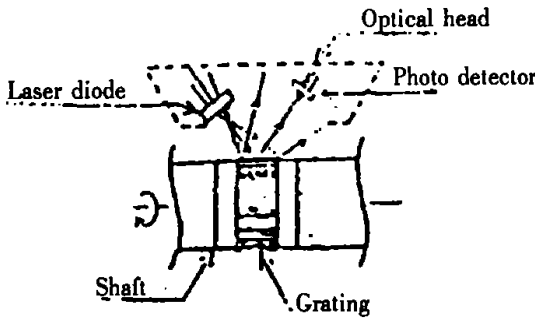
Fig. 4 Fabric of MicroE rotary laser encoder

利用衍射光相干涉原理的激光编码器可以采用多种多样的光学系统和结构。图 4 为 MicroE 公司研制的激光编码器结构图。美国 MicroE 公司,美国宇航局喷气动力实验室研制的激光编码器^[7],其直线型编码器分辨率可达 0.6nm,量积为 0.25m 或更大,旋转编码器分辨率可达 9.5nrad,量程为 360°。

该编码器由功率为 10mW, 波长 780nm 砷化镓二极管激光器, 自准直光学系统, 和专门的波前补偿器组成。MicroE 公司研制的激光编码器为了提高测角精度、减轻重量、减小体积采用了一种波前补偿器(WFC wavefront compensator), 波前补偿器是光学衍射标准探测器件。该编码器所采用的自准直光学系统采用非球面镜校准, 使光沿着码盘的轴线传播, 可以免除温度对光的平行性影响。



(a) Concept of a shaft encoder



(b) Structure of an optical head

Fig. 5 Principle of point light source diffraction and its use in laser encoder

此类编码器具有体积小, 重量轻, 高精度, 高分辨率的特点, 代表了当今光电编码器的发展趋势。尤其在精密装配机器人行业, 为其在各关节上无需任何减速机构, 实现直接驱动, 达到电机与反馈元件的一体化, 提供了理想传感元件。佳能公司研制开发的激光编码器中, M-1 型是耐恶劣条件长距离传输型, X-1M 型, 其本体输出正弦信号可达 225000P/R, 其利用偏振分光原理的线性编码器分辨率可达 0.01 μm ^[8]。

2.3 增量式与绝对式混合的激光编码器

Canon 公司研制成功的 R-ZA 与 R-2L 型准绝对式激光编码器, 是利用一个 LED 照明 8 个粗码道, 从而得到 $2^0 \sim 2^8$ 格雷码, 利用另外一个 LD

分别提取 2^8 校正位和 2^{16} 增量码, 其中 2^{16} 即为 65536 正弦波。

2.4 点光源衍射式激光编码器

在旋转轴上刻制高密度衍射光栅, 如图 5 所示^[9], 在无透镜的条件下, 通过调节 LD 与光栅的距离, 以及光电接收器件与光栅的距离, 得到放大的衍射像, 当光栅移动时, 其点光源的衍射像也随之移动。根据这一构想, 目前已经研制出空心轴式激光编码器样机, 它的外径为 $\Phi 30\text{mm}$, 刻线节距 $1\mu\text{m}$, 全周输出 94200 正弦波^[9]。

美国 Arizona 大学也研制了利用在旋转轴上刻制高密度衍射光栅的激光编码器^[10], 如图 6 所示。

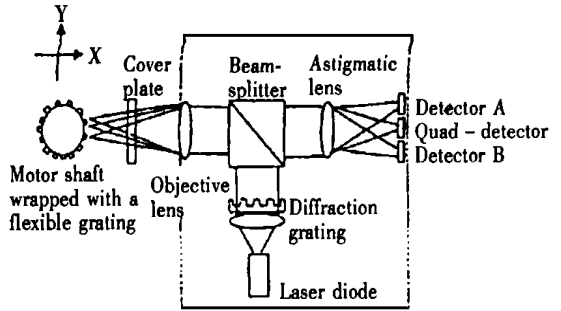


Fig. 6 Principle of point light source diffraction and its use in laser encoder

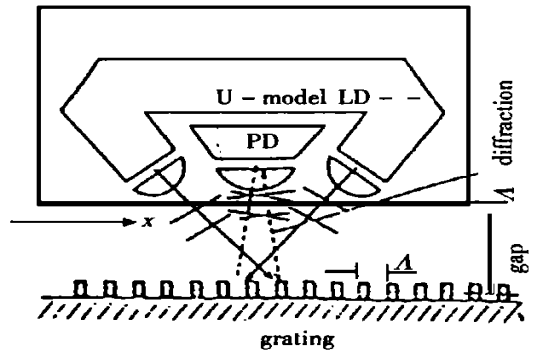


Fig. 7(A) Principle of the integrated laser encoder

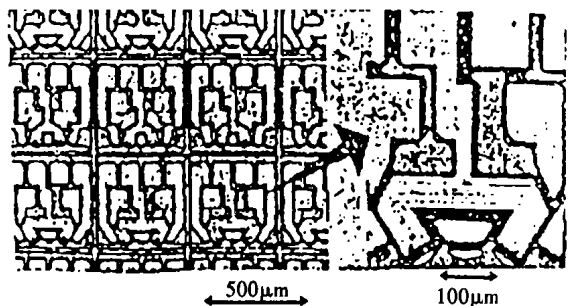


Fig. 7(B) Picture

2.5 集成微型激光编码器^[11-12]

随着微机械研究的深入,国外已将微型机器人传感器的基础性研究列入了研究日程。日本的电信电话公司(NIT)电子应用研究所,正在研制集成式光学微型编码器,其工作原理也是利用衍射光的干涉,它是通过光刻以及积层刻蚀工艺,在GaAs衬底上制作光学零件、半导体激光器、光电接收器,其中微透镜的制作是技术的难点。图7(A)为原理图,图7(B)为在显微镜下观察到的硅片上编码器样品的放大照片。此编码器的优点是

超小($0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$)、超轻($5 \times 10^{-5}\text{g}$),不需要昂贵的光学元件,而是采用光刻法来制作这些光学元件,干涉系统不需调整,分辨率极高,一个正弦波的线量 0.52nm 。

综上所述,国外编码器发展比较先进的公司主要集中在德国、日本和美国,如德国的Heidenhain公司,日本的Canon公司、MITSUTOYO公司,美国的Micro-E公司等,表1和表2分别是国外和国内线性和旋转激光编码器的性能。

Table 1 Performance of the linear laser encoder

performance product	Measuring range (mm)	Grating pitch (μm)	Signal pitch (μm)	Interpolation	Resolution (nm)	Accuracy (μm)
Heidenhain LIP301	80	4	2	200	10	± 0.25
Canon L-104	100	1.6	0.4	40	10	± 0.3
MITSUTOYO LH21	225	2	0.5	50	10	± 0.4
Micro-E	32	4	2	4096	0.5	± 0.1
CIOM LLE-100	100	2.4	0.6	256	2.5	± 0.15

Table 2 Performance of the rotary laser encoder

performance product	Measuring range (degree)	Grating pitch (sec.)	Signal pitch (sec.)	Interpolation (sec.)	Resolution (sec.)	Accuracy (sec.)	Size (mm)
Canon X-1	360	23.04	5.76	80	0.072	1	$\varnothing 110$
Canon K-1	360	48	16	16	1	6.6	$\varnothing 36 \times 48$
Micro-E	360	16	8	4096	0.00195		$\varnothing 133.5$
CIOM LRE-58	360	32	8	256	0.031	2.7	$\varnothing 58 \times 75$

3 电编码器的电子处理技术

编码器的电子处理技术近年来发展很快,其特点是传感器本体的前置处理电路具有高的动态特性,可以长距离传递位移信息;传感器细分及记数电路具有在高速动态下完成电信号的细分和记数,如在前置电路处理方面,Canon公司的X-1型输出正弦波的最高频响可以达到 670Hz ,M-1型输出的方波最高频响可达 2000kHz 。松下公司的LRE-1型输出的正弦波最高频响应可达 250kHz ,LRE-2型输出方波最高频响 1000kHz 。在国内,增量式编码器的频响:正弦输出为 50kHz ,方波输出 200kHz 。我所研制的LRE-58编码器经电路改进后,输出正弦波最高频响为 500kHz ,方波输出为 1500kHz 。而在高速细分和记数电路方面,我国与先进国家的差距比较大,如20细分的电路最高输入频率不到 50kHz ,而日本的Canon公司的IU-80细分电路板,能在输入 670kHz 情况下,完成80细分和记数的任务。

4 国内激光编码器发展概况

国内由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在“八五”期间研制的LRE-58激光编码器,输出 162000P/R ,外径 $\varnothing 58\text{mm}$ 。目前,研制的旋转激光编码器分辨率可以达到 $0.01''$,线性激光编码器分辨率可以达到 2.5nm 。采用粗细栅距组合的光学系统的编码器国内曾经也有研究^[13-14]。

5 结束语

在光电编码器中,光栅是编码器的核心元件,它的制作水平是衡量一个国家编码器制造水平的基础。此项工作属于超微细加工技术领域,它涉及光刻设备、光刻材料、工作环境等等一系列工艺性、技术性要求极高的条件。

随着科学技术的进步,人们不仅对玻璃光栅展开深入研究,例如:用拼接法获取大面积衍射光

栅^[15],也对金属光栅进行了研究^[16],为光电轴角编码器向高精度、高分辨率、小型化发展奠定了基础。同时,出现的采用干涉技术的新的测量装置,如:激光干涉仪数字测角装置^[17]。这就要求光电轴角编码器的研究要不断推陈出新,以满足科学技术发展的需要和激烈的市场竞争。

高精度绝对式光电轴角编码器采用几何光栅,具有很多的优点^[18],为了减小体积可以采用不同的编码方式。

例如,日本尼康公司研制的 M 系列的绝对式编码器,采用随机编码的方法,每圈可输出 3600 万脉冲,其样机体积外径 $\Phi 200\text{mm}$,高 60mm。

参考文献:

- [1] 艾华.光学式轴角编码器的研究现状与发展分析[A].智能机器人传感器实验室学术论文年报[C].1993,(1):130-134.
- [2] 金珍裕.日本编码器的动向[J].计量技术,1997,(11):2-5.
- [3] 孔智勇,艾华.采用光栅自成像技术的小型绝对式编码器[J].仪器仪表学报,已录用。
- [4] 奥谷宪男.光学式エンコータの高分解化技法[J].光技術コンタクト,1987,25(4):12-19.
- [5] Voirin G. Performance of interferometric rotation encoders using diffraction gratings[C]. Proc. SPIE, 1997, 3099: 166-174.
- [6] 艾华.单光栅计量系统的研究[A].全国第二届机器人学术论文集[C].1989.
- [7] Bruce Horwitz. Diffractive technique improve encoder performance[J]. Laser Focus World, 1996,(10):143-148.
- [8] Arnold Frank. Laser encoder provides super resolution for high precision applications[J]. PCIM, 1990,(2):26-32.
- [9] Akedo J. Point source diffraction and its use in an encoder[J]. Appl. Opt, 1988,27(22):4777-4781.
- [10] Yeh Wei Hung. High resolution optical shaft encoder for motor speed control based on an optical disk pick up[J]. American Institute of Physics, 1998,69(8):3068-3071.
- [11] 田中一郎. News[J]. O plus E, 1991,(3):76.
- [12] 泽田廉士.集积形光学式アイクローエンコータの制作[J].机械设计,1991,35(6).
- [13] 陈文彦,等.炫耀光栅及其在精密测长应用中的基本原理[J].科技与情报,1980,(1).
- [14] 张绍宗,等.双级炫耀光栅在长度测量中的试验[J].计量技术,1975,(2).
- [15] 赵博,郝德阜.用拼接法获取大面积衍射光栅[J].光学精密工程,2000,8(5):503-507.
- [16] 樊叔维.任意槽形金属光栅衍射特性的矢量理论分析与计算[J].光学精密工程,2000,8(2):101-104.
- [17] 王贵甫.激光干涉仪数字测角的新方法及应用[J].光学精密工程,2001,9(1):85-88.
- [18] 董莉莉,熊经武.光电轴角编码器的发展动态[J].光学精密工程,2000,8(2):198-202.

激光编码器具有体积小、结构紧凑;响应频率高;可通过控制光栅设计参数,使要求的衍射级次发生在光强最高的方向(即通过控制光栅设计参数,拾取任意级次干涉条纹);拾取的光电信号精度高,有利于实现高倍数的电子学细分,获得高分辨率等突出的优点。因此,它的应用前景十分广阔。但是该研究成果要进入商品市场,还有许多艰苦工作。除了光栅制造工艺、电路集成化之外,还要解决一些相关的技术问题。但是,目前该研究工作在原理、技术等方面的突破性进展以及初步现场应用的结果,特别是在航天领域的应用,已经展开了激光编码器的光明前景。

Improving angle measuring precision and resolution of photoelectric rotary encoders using diffraction interference technology

KONG Zhi-yong, ZHAO Hong-ying, XIONG Wei-zhuo, AI Hua

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: Photoelectric rotary encoder, which is also called photoelectric angle position sensor, is a kind of digital angle measuring device combining with optics, mechanics and electronics. The photoelectric rotary encoder has been used widely in the systems of fine angle position measurement, digital control and digital display. The photoelectric rotary encoders using diffraction interference technology (shortened form laser encoder) is characterized by compact structure, miniaturization, high accuracy and high resolution, and high frequency response. This paper analyzes a few kinds of successful schemes of laser encoders, and also expounds new headway and the technology problems concerned.

Key words: photoelectric rotary encoders; diffraction interference; laser encoders

作者简介:孔智勇(1969-),男,吉林榆树人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事光电位置位移传感器和惯性技术的研究工作。

征订启事

愿《液晶与显示》成为您的良师益友 欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登产品信息

《液晶与显示》是中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国光学光电子行业协会液晶专业分会及石家庄实力克液晶材料有限公司联合主办的专业性学术期刊。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报、综合评述和产品信息等栏目集中报道国内外液晶学科和显示领域中最新理论研究、科研成果和创新能力,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态。《液晶与显示》被英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)和《中国物理文摘》等国内外著名检索刊物和文献数据库摘引和收录。《液晶与显示》已入编“中国科学核心期刊全文数据库”、“中国学术期刊(光盘版)”和“中国期刊网”(《液晶与显示》网址:<http://yjys.Chinajournal.net.cn>),及“万方数据资源系统(ChinaInfo)”(《液晶与显示》网址:<http://www.Chinainfo.gov.cn/periodical/yjyxs/index.htm>),向国内外读者提供网络信息。

《液晶与显示》以创新性、综合性、实用性为办刊特色,内容丰富,信息量大,涵盖面广,可读性强。既是启迪科技人员开拓创新思路的参考期刊,又是从事液晶和显示技术研究的广大科技人员、大专院校师生及相关领域的科技工作者进行学术交流的良好园地,也是图书、情报等部门必不可少的信息来源。《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿,将您的科技创新、产品信息、企业风貌通过这一窗口展示出来。

《液晶与显示》为季刊,16开本,80页,国内定价34.00元,国内外公开发行。邮发代号,国内:12-203;国外:4868Q。同时,《液晶与显示》编辑部将竭诚为广大读者服务,随时办理破年、破季订阅。

单 位:中科院长春光学精密机械与物理研究所

《液晶与显示》编辑部

邮 编:130021

地 址:吉林省长春市工农大路61号

电 话:(0431)5684692转2534

E-mail: yjys@ciomp.ac.cn