

高精度编码器细分误差分析及快速评估方法

刘春霞◆著

高精度编码器细分误差分析及快速评估方法

刘春霞◆著



黑龙江科技大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

高精度编码器细分误差分析及快速评估方法 / 刘春霞著. -- 哈尔滨: 黑龙江大学出版社, 2015.11
ISBN 978-7-81129-951-9

I. ①高… II. ①刘… III. ①编码器-误差分析②编码器-评估方法 IV. ①TN762

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 235754 号

高精度编码器细分误差分析及快速评估方法

GAOJINGDU BIANMAQI XIFEN WUCHA FENXI JI KUAI SU PINGGU FANGFA

刘春霞 著

责任编辑 高 媛

出版发行 黑龙江大学出版社

地 址 哈尔滨市南岗区学府路 74 号

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 720×1000 1/16

印 张 9

字 数 117 千

版 次 2015 年 11 月第 1 版

印 次 2015 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-81129-951-9

定 价 27.00 元

本书如有印装错误请与本社联系更换。

版权所有 侵权必究

黑龙江省地方属本科高校
战略后备人才出国研修资助项目

前 言

光电轴角编码器是一种集光、机、电为一体的数字测角装置,已广泛应用于工业、国防等领域的自动化测量和控制中。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电传感室的研究人员,几十年致力光电轴角编码器的研制和生产,本书是笔者在该研究所从事科学研究工作取得成果的基础上编写而成的。本书主要介绍了高精度光电轴角编码器细分误差的产生原理、检测和快速评估的方法,共分为7章。

第1章主要介绍了光电轴角编码器国内外的动态,编码器误差检测技术的发展现状,本书研究工作的重要意义。

第2章介绍了莫尔条纹的形成,细分误差的产生,莫尔条纹信号质量对细分误差的影响,以及高精度编码器细分误差的计算方法。

第3章在理论上分析了细分误差、向径偏差与信号波形参数之间的关系,运用仿真软件,对理论分析结果进行验证。

第4章介绍了高精度编码器细分误差的快速评估方法——图形直接推导法和图形拟合法。

第5章介绍细分误差评估系统的组成,系统软、硬件的主要功能及实现。

第6章运用本书提出的细分误差评估方法分析采集的莫尔条纹信号,绘出细分误差曲线,与传统方法采集的静态细分误差数据进行对比,对本书提出的方法进行验证,并分析了系统误差。

第7章对整体工作进行总结,包括研究工作的主要研究成果及创新点,并对进一步的工作进行了展望。

本书可以作为机械电子类本科生和研究生的辅导书,也可作为科

研人员及工程技术人员的参考书。

感谢中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的万秋华研究员、龙科慧研究员,以及所有支持此书编写的老师。

由于笔者水平有限、经验不足,有错误及不当之处在所难免,诚请读者指正。

刘春霞

2015年3月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 光电轴角编码器的发展及现状	2
1.3 光电轴角编码器误差检测技术的现状	5
1.4 研究意义	14
第2章 高精度编码器细分误差分析	16
2.1 引 言	16
2.2 莫尔条纹的形成及特点	16
2.3 光电轴角编码器细分误差产生的原因	24
第3章 图形法评估细分误差的算法研究	35
3.1 引 言	35
3.2 传统的图形观察法	35
3.3 图形中隐含的莫尔条纹参数信息	38
3.4 细分误差与向径偏差之间的关系	43
3.5 仿真分析	55
3.6 小 结	72
第4章 细分误差快速评估方法	74
4.1 引 言	74
4.2 光电信号主要参数求解及细分误差评估依据	74

4.3 图形直接推导法	82
4.4 图形拟合法	86
4.5 小 结	88
第5章 细分误差快速评估系统	89
5.1 引 言	89
5.2 细分误差快速评估系统介绍	89
5.3 系统硬件	91
5.4 系统软件	94
5.5 小 结	101
第6章 实验及数据分析	102
6.1 引 言	102
6.2 实 验	102
6.3 数据分析	103
6.4 系统误差分析	116
6.5 小 结	122
第7章 结 论	123
7.1 主要研究成果及创新点	123
7.2 结 果	124
7.3 展 望	125
参考文献	126
附录: $u_a \sin \theta + u_b \cos \theta \approx 1 + d\rho$ 的推导过程	133

第1章 绪 论

1.1 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、电为一体的数字测角装置。它采用光电转换技术将轴角信息转换成数字代码,与计算机连接后可实现动态测量和实时控制。用它可实现角度位移、直线位移、速度、加速度及其他物理量的精确测量。与其他同类用途的传感器相比,光电轴角编码器具有精度高、测量范围广、体积小、质量轻、使用可靠、易于维护等优点,具有较高的性能价格比,因此广泛应用于雷达、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领域,是自动化设备理想的角速度传感器。

航天、航空技术对空中目标的快速、精确跟踪与定位的要求,以及对光电轴角编码器的测角精度和分辨率的要求,使得高精度编码器的精度检测成为亟待解决的关键技术之一。

在高精度编码器中,细分误差是影响高精度编码器准确度的主要因素。高精度编码器细分误差的检测和评定方法是当前国内高精度编码器制造和检测部门研究的热点,对提高高精度编码器的研究水平及检测效率、促进编码器在各领域的应用具有积极意义。

1.2 光电轴角编码器的发展及现状

衍射光栅用于光谱分析和光波波长测量已有一百多年的历史,而包括衍射光栅和几何光栅在内的计量光栅用于直线测量及角度测量则是二十世纪发展起来的。特别是 1950 年以来,随着数控机床的出现和电子技术的发展,计量光栅技术已经成为一项专门的工程技术,以计量光栅为核心元件的光电轴角编码器就是随着计量光栅技术的发展而发展起来的。

1.2.1 国外发展及现状

计量光栅技术的基础是莫尔条纹。莫尔(Moire),法文原意表示水波纹或波状花样。几百年前,法国人发现一种现象:两层被称为莫尔丝绸的绸子叠在一起时将产生复杂的水波状图案,薄绸间相对挪动,图案也随之挪动,这种图案当时被称为莫尔图案或莫尔条纹图案。1874 年,瑞利首次将莫尔图案作为一种计量测试手段,从而开拓了莫尔计量学。

从 1874 年到 1950 年,由于光栅价格较昂贵及电子计数技术还处于初级阶段,计量光栅在位置测量中的实际应用很少。1950 年,英国国家物理实验室(NPL)的 Merton 提出了著名的叫作 Merton - NPL 法的塑料复制工艺,可以生产便宜的明胶光栅。1960 年,NPL 的 Burch 和 Sayce 及稍后的英国皇家工程实验室(NEL)的 Kilbrede 提出了用母光栅制造任意长度光栅的照相复制法,由于莫尔条纹的平均作用,制造出的照相光栅精度要比母光栅的精度高。

由于制造工艺的限制,单纯依靠提高码盘刻画精度来提高编码器精度和分辨率已不能满足科技发展对编码器精度的要求。1953 年美国的 Ferranti 公司研究并提出了四相信号系统,它可以在一个莫尔条

纹周期实现四倍频细分,并能辨别位移方向,这在开发与计量光栅相对应的电子系统方面取得了突破性进展。此后的二十年间,各国对光电系统在栅距细分上提出了更高要求,并做出了长期的努力,先后研究发展了机械细分系统、光电扫描细分系统、光学细分系统及电子学细分系统,为提高计量光栅及光电轴角编码器的分辨率做出了贡献。

伴随计量光栅精度的提高和细分技术的发展,从二十世纪八十年代开始,以机电一体化产品的出现为标志,光电轴角编码器已成为人们普遍认可的精密测角装置,它在控制系统的位置反馈测量及传动误差的比较测量方面发挥着越来越大的作用。

当前世界上生产光电轴角编码器的厂家主要有:德国的 Heidenhain 公司、OPTON 公司;美国的 Itek 公司、B&L 公司、GPI 公司、Micro-E 公司、Arizona 大学;日本的尼康公司、三丰公司、佳能公司、双叶公司、东北大学、奥林巴斯公司、电报电话公司(NTT)等。此外,英国、瑞士、俄罗斯的一些厂家和科研单位也在光电轴角编码器的研制方面做出了很多贡献。

其中 Heidenhain 公司生产的编码器系列以其优良的性能和多样的品种誉满全球,居国际领先水平。该公司研制的绝对式和增量式混合的光电轴角编码器独具特色,为意大利伽利略望远镜控制系统设计制作的绝对式和增量式混合的光电轴角编码器已达 27 位,分辨率 $0.01''$ (角秒),精度为 $0.036''$,是当今精度最高的编码器。2002 年又推出了 27 位绝对式编码器。

2000 年,因航天发展的需要,美国 NASA 的 Goddard 航天飞行中心研制成 27 位“超高分辨率的绝对式编码器”。它采用全新的光学图形识别技术完成绝对式编码。

近年来,美国、日本等国家的一些公司采用伪随机编码、游标式编码,其中伪随机编码仅用一圈 M 系列码道就可以生成 10 位以上的绝对式的二进制代码,从代码的编制方法上为编码器小型化奠定了基础。为了使光电轴角编码器不仅能够记录一周内的角度信息,而且可

以记录圈数信息,并且能对多圈进行编码,他们研制出了通用性很强的绝对式智能多圈编码器。

针对那些不仅要求高精度、高分辨率、高频响,而且对于编码器体积和质量也有苛刻限制的场合,国外许多公司和研究机构开发了利用光栅衍射干涉法和傅里叶成像法构成的位移传感器,如采用半导体激光器(LD)的双光栅式编码器,利用衍射光相干涉原理的单光栅式激光编码器,增量式与绝对式混合的激光编码器,点光源衍射式激光编码器以及集成微型激光编码器。

为了提高编码器的可靠性,许多公司研制了金属码盘的光电轴角编码器,其中包括采用金属衍射光栅的编码器。随着光纤技术和光刻技术的发展,人们研制出了采用变间距光栅的光电轴角编码器、微型编码器及光纤编码器。

为了适应工业自动化及航天、航空技术发展的需要,国外对光电轴角编码器元器件展开了广泛而深入的研究:采用新工艺、精密加工技术,研制发光器件和接收器件的阵列、精密光栅等元件,使编码器的性能得到进一步的提高,应用也更为广泛。

1.2.2 国内发展及现状

从二十世纪五十年代起,我国开始研制光电轴角编码器,对计量光栅的研究始于1960年左右,由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(以下简称“长春光机所”)率先进行光电轴角编码器的研制,现已有增量式和绝对式等数十种型号的产品。此外,中国科学院光电技术研究所、南京天文仪器厂、重庆大学、中国计量科学研究院、清华大学、哈尔滨工业大学等数十家科研单位和高校也都先后进行了光电轴角编码器的开发与研制,在编码器结构和原理,精密轴系加工、设计、分析,光栅制造、检测,电子学处理,以及编码器误差测量方法的研究等方面做了很多工作,为提高编码器性能打下了基础,同时也取

得了一定的成果。

目前国内绝对式编码器的分辨率已由 8 位提高到 25 位。长春光机所在二十世纪八十年代末率先研制出的 23 位绝对式光电轴角编码器,采用单片机软件细分技术,实现了对莫尔条纹原始信号的 512 细分,分辨率达 $0.15''$,精度为 $0.51''$,代表了国内当时绝对式光电轴角编码器的最高精度。目前其研制生产的 23 位、24 位高精度编码器已经广泛应用于工程任务中。二十世纪九十年代,中国科学院光电技术研究所研制的 25 位光电轴角编码器,分辨率达 $0.04''$,精度为 $0.71''$,也具有较高水平,后来又研制了八圈码道的 25 位绝对式编码器。

长春光机所在“八五”期间研制的 LRE-58 型激光编码器,输出 162 000 p/r,外径 58 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 2.5 nm。

对图像式绝对式编码器,国内也有研究。

1.3 光电轴角编码器误差检测技术的现状

纵观国内外光电轴角编码器的发展现状,其发展趋势是高精度、高频响、智能化、小型化、高分辨率。伴随航空、航天技术的飞速发展,对光电轴角编码器精度的要求越来越高,并且要求编码器能够在恶劣的环境和复杂的条件下,实时进行精密角度测量。进一步提高编码器的精度是各个研制单位不断追求的目标。因此,如何有效地对高精度编码器进行精度检测,就成为日益突出的重要问题。

编码器误差主要包括长周期误差、细分误差及量化误差,而细分误差是编码器误差的主要分量,在高精度编码器中,它是影响编码器准确度的主要因素。

因此,细分误差的检测是目前编码器生产、研制单位研究的热点问题。

1.3.1 国外光电轴角编码器误差检测技术现状

俄罗斯圣彼得堡国立大学研究的编码器测角误差动态检测装置采用激光准直仪、激光环和多面体进行检测,如图 1-1 所示。该系统的精度为 $0.1''$, 转速可达 10 r/s , 可以实现对编码器误差的动态检测。利用该装置测量了 Heidenhain 公司的 RON-905 型编码器, 当转动速度为 $250^\circ/\text{s}$ 时, 该编码器的系统误差在 $-0.22'' \sim +0.32''$ 范围内。采用这种方法可以实现编码器误差的动态检测, 测量精度高。但是, 该方法实验装置复杂, 只能在实验室条件下进行, 无法实现工作现场的检测。

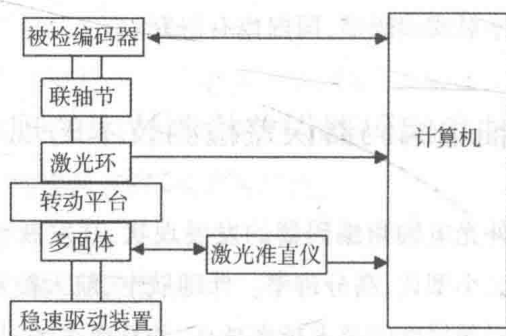


图 1-1 编码器误差动态检测装置

Heidenhain 公司用于检测编码器细分误差的角度比较仪, 采用小角度光学测量原理, 测量步距约为 $0.001''$, 如图 1-2 所示。此装置由高精度自准直仪、多面棱体及转台等组成, 可以实现编码器细分误差检测, 但这种检测方法对于环境要求非常严格, 实验的机械装调部分要求精度高, 整个系统制造成本高, 且只能在实验室的严格条件下进行, 不适合应用在工作现场检测。



图 1-2 Heidenhain 公司的角度比较仪

1.3.2 国内光电轴角编码器误差检测技术现状

目前国内光电轴角编码器误差检测方法主要有以下几种:一种是以高精度编码器检定低精度编码器;一种是利用由自准直仪及多面棱体组成的检测装置;还有一种是采用联轴节将被检编码器的轴与度盘式转台的轴头相连,调整同心后,用转台对编码器进行角度误差检测。

这几种方法都是在实验室严格的条件下将编码器与角度标准器进行比较测定误差。例如,由自准直仪及多面棱体组成的检测装置如图 1-3 所示。

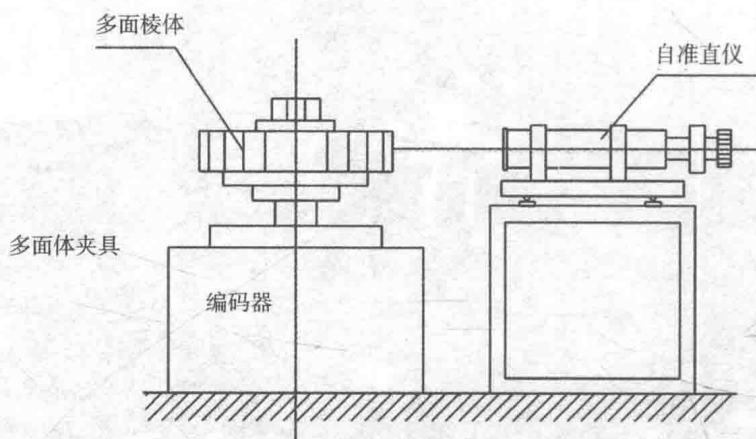


图 1-3 常用编码器误差检测系统装置图

哈尔滨工业大学所做的编码器动态检测装置与前面提到的俄罗斯圣彼得堡国立大学研究的测角误差动态检测装置原理基本一样,采用正十二面体作为角度基准,其测量的随机误差的标准差为 $3\sigma < 2.25''$,动态回零误差为 $3''$ 。实验装置复杂,只能在实验室条件下进行,无法实现工作现场的检测。

1998年,长春光机所用桥式移相器,将莫尔条纹信号细分成所要求的测量间隔,再用相位计或动/静态激光小角度测量仪作为标准器,测量莫尔条纹动态细分误差。图 1-4 中的 θ 为圆光栅的角位移, u_1, u_2, u_3, u_4 为各路信号的交流分量幅值,调整到尽量相等。以相位计作为标准,介绍其测试过程。测角仪运转后,合成莫尔条纹信号 $u_1 \sin \theta$ 、 $-u_2 \sin \theta$ 、 $u_3 \cos \theta$ 、 $-u_4 \cos \theta$ 输入桥式电位器移相网络,移相信号再经初步放大后分成三路,其中两路分别送入相位计和细分器。进入相位计的移相信号和其中一路合成信号 ($u_1 \sin \theta$) 鉴相,得到相位值 φ_i 。移相信号经整形、单稳变成一定宽度的采样脉冲去采集细分器,读出对应的细分值 θ_i 。如果 $0 \sim 2\pi$ 范围内等间隔测 20 个点,则相位计每隔 18° 测一点,得出一组细分误差值。最后按光栅栅距的对应关系统一为弧度或角秒。

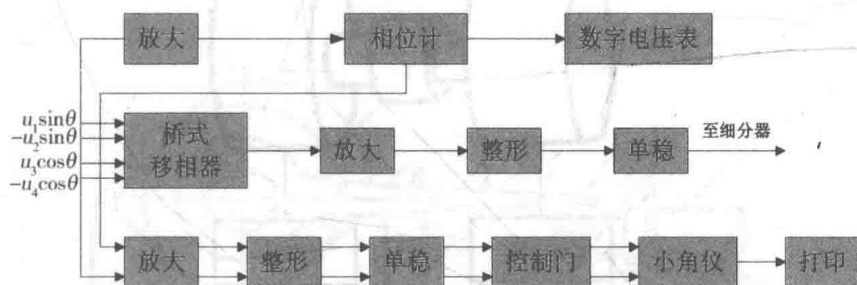


图 1-4 用相位计测量动态细分误差

西安交通大学提出了一种计量圆光栅动态精度检测技术,用数字滤波的方法分离系统误差,对多相位拾取的组合信号用谐波分析法进行分离。新的动态检测方法的原理如图 1-5 所示。通过两只圆光栅同轴转动进行互检,其中一只为待检光栅 A,另一只 B 最好与待检光栅具有相同的圆周刻线数(否则,还需要分频或倍频处理),但不要求有更高的精度。以光栅 B 的零位脉冲作为测量的起始标准,对两路光栅信号进行比相处理,得到两者的转角差函数。然后松开待检光栅 A 壳体的夹持,并将壳体相对于光栅轴转过 $\Delta\theta$ 角重新夹紧,用同样方法再进行一次回转测量,得到另一个转角差函数。用计算机对两个转角差函数进行离散化、傅里叶变换等综合处理,最终得到待检光栅 A 的误差函数。同样,通过处理还可得到光栅 B 的误差函数。