

基于光盘数据系统和圆分度全息技术的激光 栅角位移测量装置^{*}

万文略, 彭东林, 王先全, 董 淳
(重庆工学院电子信息与自动化学院 重庆 400050)

摘 要: 本文研究基于光盘数据系统的角位移测量装置。硬件方面, 研究如何依赖光盘系统的自动寻迹和激光聚焦而不是依赖昂贵的精密机械加工和微调来实现精密定位。软件方面, 研究如何利用光盘极大的数据存储能力和各种压缩、纠错、编码技术来将已有的各种误差分离、误差抵消和误差衰减技术融合在一起而形成可以不断补充完善的圆分度多信息融合技术(其极限就是圆分度全息技术)。而硬件和软件结合在一起, 就构成一种基于现有成熟技术的新型圆分度测量系统——激光栅角位移传感器及系统。

关键词: 光盘; 圆分度; 全息; 激光栅; 传感器

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Laser grating angular displacement measurement sensor based on CD data system and circular division holographic technology

Wan Wenlve, Peng Donglin, Wang Xianquan, Dong Chun

(Dept. of Electronic Engineering, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China)

Abstract: One novel displacement measurement sensor is presented in this paper. The study aim is to realize high precision positioning by utilizing the technology of auto-guiding and laser focusing of CD system, not by utilizing high precision machining and micrometer adjustment technologies on the hardware aspect, and is to use various advanced compression, correction, and coding technologies of CD system to develop a new circular division multi-information fusion technology based on error separation, error compensation and error attenuation technologies on the software aspect. A new advanced circular division measurement system - laser grating angular displacement measurement sensor and system can be developed based on mature technologies.

Key words: CD; circular division; holographic; laser grating; sensor

1 引 言

长期研究工作表明, 各种圆分度传感器精度最终受限于机械加工精度。这是因为目前关于几何量精密测量的理论、方法和技术都是建立在精密机械基础上的。时栅是早在 1996 年就提出的思想, 其理论创新已经得到承认, 但直到今天, 在完成两项基金项目以后, 才得以将精度做到 ± 1 以内。其间在机械精密加工上花费了大量的

时间、精力和经费。

在继续完善时栅传感器研究和产品化开发的同时, 沿袭已有的研究思路, 再次探索新的途径。借助于“用现代信息技术提升和改造传统产业”的思想, 可以把机械制造和几何量计量学科视为传统学科, 由此我们意识到, 要单纯靠机械加工去获得更高的测量精度, 其代价始终降不下来。而与此同时, 以计算机技术为代表的现代信息技术却突飞猛进, 日新月异, 用于视听设备的 CD、VCD、超级 VCD、DVD 等光盘数据系统已经深入千家万户。一

收稿日期: 2007-09 Received Date: 2007-09

* 基金项目: 国家自然科学基金 (50575235) 资助项目

张光盘录制费用低廉,且不需要任何“安装精度”,随便放进碟片仓,就可以精确地读取上面大量精密刻制的信息,这是一个很好的启示。

2 激光栅设计思想

每张光盘上的信息是按螺旋线从中心向外圈形成的轨道录制的,类似盘旋状的蚊香。轨道之间的距离 $0.74 \sim 1.6 \mu\text{m}$,由凹凸的坑点 (pit) 形成 0、1 信息,而坑点间的距离 $<0.5 \mu\text{m}$ 。从机械刻划来看,其精度与分辨力已达到或优于精密光栅系统。从信号的存储量来看,CD、VCD 均为 750 MB,而 DVD 已猛增到 4.7 GB,双面 DVD 更是增到 $2 \times 4.7 \text{ GB}$ 。如此精密的数据系统,数据的存(写盘)和取(读盘)不是依赖于精密和超精密的机械加工和安装,而是依赖于精密自动控制寻迹系统和光学聚焦定位系统。此项技术发展至今,整套装置(包括电机、自动控制系统和激光读数头)的价格才 200 元左右。显然,如果能将光盘数据系统的成套技术移植到以圆分度为代表的几何量测量上来,就可能形成又一种新型角位移传感器——激光栅传感器。判断光驱质量优劣有 2 项指标:纠错性能和稳定性,保证这 2 项指标依赖于 2 项技术:寻迹和聚焦。因此,激光栅传感器的精度、稳定性和抗干扰力也是依赖于寻迹和聚焦,而不是传统栅式传感器的精密机械制造和安装,例如,120 mm 的 DVD 光盘在保证信号正确读取时,对其机械系统的精度要求为:垂直度 $<6 \text{ mrad}$,轴向跳动 $<50 \mu\text{m}$,径向跳动 $<70 \mu\text{m}$ ^[1],这是一个相对很低的精度要求。仅以径向跳动为例,同样为 120 mm 的栅式传感器(如光栅、磁栅),若精度达到 1 (不含刻线误差),按照公式换算:

$$m = \frac{R_{\text{mm}}}{206.3}$$

$= \frac{1 \times 60}{206.3} = 0.29 \mu\text{m}$,即径向跳动必须小于 $0.3 \mu\text{m}$,这在生产线上是很不容易达到的,并且在使用中很可能因碰撞而超差,丧失精度。激光栅则不同, $0.3 \mu\text{m}$ 和 $70 \mu\text{m}$ 相比,完全不在一个数量级,二者的区别就像火炮和导弹的区别。炮弹射击精度由出膛那一瞬间决定,因此对其制造精度和调整精度要求非常高,“差之毫厘,失之千里”,且目标不能动、不能有风雨等干扰。而导弹发射时并不强调瞄准精度,只要大概对准就行了,其命中率取决于发射以后在飞行过程(使用过程)中的跟踪制导和锁定目标的能力,不怕干扰、不怕目标移动,总之,“不怕有误差,修正就是”,这是完全不同的精度控制思想。以 DVD 为代表的光盘系统所实现的“低加工要求、低安装调整要求、低成本、高精度信息获取,高智能化”为今后的传感器仪器发展方向提供了借鉴。

光盘数据系统技术在硬件上为激光栅的诞生提

供了可能,而在软件上还要依赖于另一项新兴技术——多信息融合技术。圆分度测量中的一个重要原则——圆周封闭原则及其包含的深邃内涵,为人们的研究思想提供了无限的启迪:平均效应、误差分离、误差折算、周期信号频谱等,在近代研究中,利用多信息融合来提高圆分度测量精度的研究更是层出不穷。文献[7]讨论了多个传感器同时测量多个等分位置点的方法;文献[8]认为多数头对径读数的必要前提是各读头的特性完全一致,这一点很难实现,并且仍残留读数头个数整数倍的谐波误差,因而提出一种新的圆分度测量方法和误差分离修正法;文献[9-11]提出了利用数据处理消除各周期误差成份和减小谐波失真影响的方法;文献[12-13]提出的“动态全积分法”更是称能在理论上全部消除光栅刻划误差、安装偏心、主轴晃动和随机误差的影响。但是无论多么先进、有效和巧妙的数据处理方法,其实用效果最终受限于硬件实现。依靠传统的测量分析方法和仪器,先用仪器测量数据,再输入计数机进行处理,其实时性、体积、适用领域都会受到很大限制。事实上,这么多年来这些方法都未能得到很好的利用,其关键在于缺少一个能够综合这些方法的硬件载体。而激光栅传感器则可以利用极大的信息存储量和高度智能化,充分发挥前人研究的各种数据处理方法,进而形成一套全新的技术——圆分度全息技术。它既可总结、吸纳和包容以前的成功技术,又可以被将来更新更先进的研究成果所补充和完善。

本文的“激光栅”是一种新的提法,它有与光栅相类似的特点,但不同于传统意义上的光栅。

3 激光栅设计方案

图 1 是设计的一种方案的硬件结构原理图,图 2 是光盘系统激光聚焦读数头的结构图,图 3、图 4 分别是光盘系统自动寻迹系统和聚焦伺服系统原理框图。

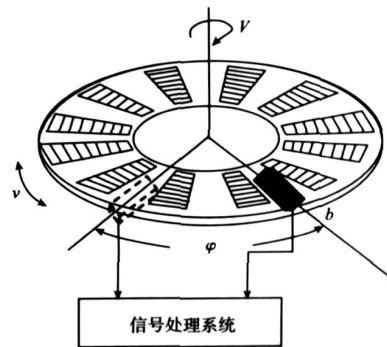


图 1 硬件结构

Fig 1 Hardware structure

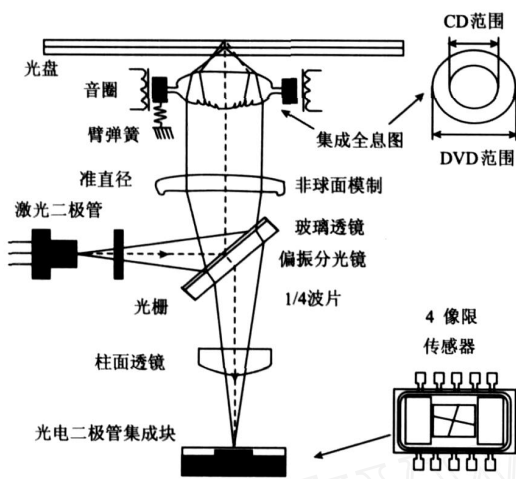


图 2 读数头结构

Fig. 2 Structure of the reading head

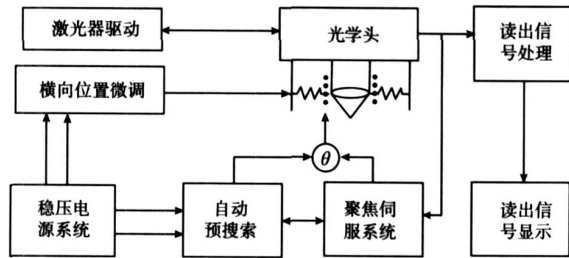


图 3 自动寻迹系统原理

Fig. 3 Principle of automatic track finding system

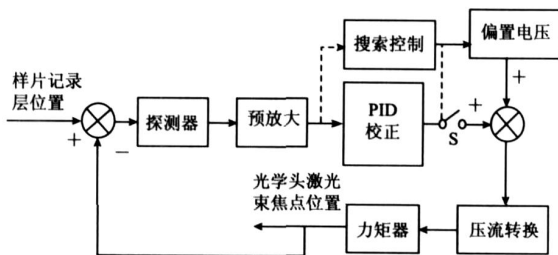


图 4 聚焦伺服系统原理

Fig. 4 Principle of focus servo system

有了如图 1 所示的基本结构,就可以在光盘上设计各种编码,以满足各种设计要求。以下通过 3 个实例,重点表述解决精度、分辨力和与前期时栅研究接轨 3 个问题的技术路线和研究方案。

例 1:如图 1 所示,为了解决刻划误差问题,设计电机带动光盘作恒角速度 (V) 转动 (通常 VCD 等是作恒线速度运动,即角速度是内快外慢),利用双面双头 DVD 技术,在光盘两面分装两套独立的激光读数头 (及控制电路),按“动态全积分法”^[12-13]设计圆分度测量。此时两个读数头处于相同的半径圈 (录制有均分栅线信息),一

个作静止的定测头 b,一个作绕圆周运动的动测头 a。当 a 绕过某一夹角时,两个测头会对其间包含的栅线数作计数测量。在一般的静态增量式光栅测量中,光栅不动,只能从一次测量中对光栅在这个夹角内的栅线计数,而这里的光盘作恒速转动 (速度可达 7 500 r/min,还可以更高),因此栅线数是经积分平均读数的结果。若光栅刻线数为 N ,光盘旋转圈数为 K ,则每次采样值是 KN 次平均读数的结果。由于光盘刻划的圆周封闭性,在理论上,这种动态积分平均结果的误差为零^[12]。于是,解决精度问题有比较大的把握。

例 2:为了解决分辨力问题,再提出一套细分编码方案,也就是文献 [6] 提出的“差线栅”方案。

利用这种原理设计的一种“差线栅编码”,假设外圈的定光盘刻线为 101 线/周,内圈的动光盘刻线为 100 线/周,设某一时刻,仅线 1 和线 1 对齐,则其他所有线均不能对齐,当内盘转动 1/100 外栅距时,线 2 和线 2 对齐;再转动 1/100 外栅距,仅线 3 和线 3 对齐。如此转动 100 次即 1 个外栅距后,线 1 和线 101 对齐,完成一次小循环;而 101 次小循环后,即内盘转动 101 个外栅距也就是一个整圆周后,完成一个大循环,在这一周中,共发生 $101 \times 100 = 10\ 100$ 次对齐状态。如果 1 次 0、0 对齐,或 1、1 对齐发一个脉冲,一周将发出 10 100 个脉冲。于是,这里用大约 100 线/周的刻划密度,获得了 10 100 线/周分度效果。以此类推,只要在两个光盘上分别刻 1 139 条和 1 138 条刻线,每周就能得到 $1\ 139 \times 1\ 138 = 1\ 296\ 182$ 个等效脉冲,已经优于 1 的分辨力。而按照光盘 $0.5\ \mu\text{m}$ 的信息点间距,沿 120 mm 的圆周上,可以刻制 376 800 个 0、1 信息。换言之,这里还有非常大的分辨力储备。(以上描述只是“差线栅编码”的原理思想,在实际研制过程,用两张盘作动、定盘还是一张两面盘加动、定测头,要在研制过程中视具体情况而定)。因此,激光栅可以实现很高的分辨力。

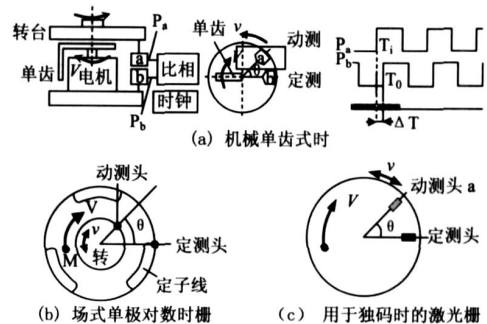


图 5 三种时栅结构

Fig 5 Structure of three kinds of time gratings

例 3:为了和以前关于时栅^[2-5]的研究工作联系起来,只需要在盘中某一半径一圈的轨迹上刻一个点,就构

成一个“独码”(可以说,再也找不到比这种码更简单的编码了),于是时栅的研究思想完全可以照搬过来。图 5 描述了有关时栅的 3 个发展阶段:(a)“单齿式时栅”,设计电机带动一颗齿转动,在动、定测头上感应信号,360°电角度(时间)移相与 360°空间角度转动对应,实现了用时间测空间;(b)“场式时栅”,取消了旋转机械,改由电机内的旋转磁场构成运动坐标系,在转子和定子轴向各埋一根线构成动、定测头,和(a)是一个原理,但是消除了旋转机械引起的振动、体积缩小,尤其是借用直线电机的原理,可将测量范围扩展到直线测量。(c)是本文提出的基于光盘数据系统的激光栅。采用单线(点)的独码时,一个圆周上只有一道刻线,按照圆周封闭原则,就没有刻划误差。因此在原理上和(a)、(b)是一样的,但是在技术实现方案上是不一样的。(c)图激光栅不再在乎机械制造和安装带来的偏心、不垂直、不同轴等机械误差,而改为依赖电子精确制导。具体地说,图 5(c)激光栅采用旋转直流电机构成运动坐标系统,对直流电机转速采用脉宽调制(PWM)方式,运用数字 PD 校正和环技术实现闭环控制,保证转速的恒定,这一点相对于(a)采用开环同步电机构成的运动坐标系,速度的稳定性能得到很好的改进。并且采用 PWM 控制方式直流电机的转速很容易达到 9 000 r/min(目前市场上的 CD-ROM、DVD-ROM 均能达到或超过这一参数)相对于采用(a)转速为 3 000 r/min 的同步电机(方案(b)的旋转磁场也是这个速度),能更好地利用平均效应。这么高的转速,借用光驱等采用的动态悬浮结构,可大大减低震动的影响,这相对于(a)的机械刚性联结,又是一个大的进步。并且激光栅体积可设计的很小(如光驱大小),这是(a)和(b)都没能达到的。

从上述 3 个例子还可以看出几点:

(1)每套方案只用了光盘的 1 圈或 2 圈信息,而光盘 60 mm 的半径,1.6 μm 的轨距,可以有 37 500 圈编码,因此还可以设计:频谱、纠偏、容错、压缩……等多种信息编码依次读取,以满足各种算法要求。换言之,还有几乎是无限的信息空间可用于设计新的编码方案。

(2)采用了双激光头双面光盘,根据功能需要也可以设计成单面单头,或有时只用其中的单面单头。

自动控制寻迹和激光头光学聚焦定位的机电结构技术是现成的,但是控制程序和运动方式要变,光盘编码要专门设计,所以根据所采用的方案去设计控制程序、光盘编码和数据处理程序是本项目要解决的关键问题之一。

4 结 论

针对各种原理的传感器,其先进性和精度最终受限于机械加工和机械安装误差的事实,提出用现代信息技

术改造基于精密机械技术的几何量计量学科和提高传感器测量精度的几点新思维:

(1)依赖自动控制精度而不是机械制造精度(包括机械加工精度和机械安装精度)来保证传感器精度;

(2)依赖电子反复跟踪制导而不是机械一次性安装定位,传感器容错力和抗干扰力更强,不怕有误差(不管是制造、安装时产生的误差,还是使用不慎或由干扰引起的误差),纠正就是;

(3)依赖电子手段而不是机械手段,提高传感器精度的措施更多;

(4)依赖误差平均、折算、抵消等多信息融合手段同时使用来提高精度,而不是单纯靠代价高昂的精密机械加工去“硬拼”精度或单一的误差处理提高精度。

上述“依赖”并不意味着“取代”,机械手段仍然必要,只是可以降到次要位置。

提出用以 VCD、DVD 为代表的光盘数据系统的机电硬件,配合圆分度全息技术的软件,共同构成高性能低成本的新型圆分度(角位移)传感器——激光栅传感器。将光盘系统的读数头运动由单一的径向直线运动扩展为绕轴心的回转运动,使之能满足激光栅作圆分度测量的特殊要求,满足各种不同信息融合技术对读取数据方式的特殊要求。

针对前人研究的各种数据处理方法因缺少一个高性能硬件载体而未能得到充分发挥的事实,在研制新型激光栅传感器的同时,提出圆分度全息技术的新概念,与激光栅互为软硬件支撑。所谓圆分度全息技术,就是在激光栅上实现(已有的和将有的)各种误差处理的多信息融合技术,其极限就是全息技术。

参考文献

- [1] 徐端颐. 高密度光盘数据存储[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
XU D Y. High density optical disc data storage[M]. Beijing Tsinghua University Press, 2003.
- [2] 彭东林. 时空坐标转换理论与时栅位移传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(4): 338-342.
PENG D L. Study on the theory of time-space coordinate transformation and the grating displacement sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(4): 338-342.
- [3] 彭东林. 场式时栅位移传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(3): 321-323.
PENG D L. Study on the time grating displacement sensor of the field type[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(3): 321-323.
- [4] 彭东林. 混激型时栅位移传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(1): 113-115.

- PENG D L. Study on the time grating displacement sensor of mix-motivating type[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(1): 113-115.
- [5] 彭东林. 高精度时栅位移传感器研究 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 126-129.
- PENG D L. Research on high-precision time-grating displacement sensor[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 126-129.
- [6] 彭东林. 差线栅位移传感器原理 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(6): 376-378.
- PENG D L. The principle of differential grating displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(6): 376-378.
- [7] 刘裕光. 误差总和分度原理与技术的研究 [J]. 钻镗床, 1998(1): 1-3.
- LU Y G. Research on the theory and technology of the total error division [J]. Drilling and Boring Machine, 1998(1): 1-3.
- [8] 刘文文. 一种高精度的圆分度测量原理 [J]. 工具技术, 1999, 33(3): 33-35.
- LU W W. A precise measuring principle of angular indexing[J]. Tool Engineering, 1999, 33(3): 33-35.
- [9] 杨进堂. 含有中周期误差表征圆分度件刻划误差的评定方法 [J]. 计量技术, 1997(7): 16-19.
- YANG J T. Evaluation on graduation error of circular division with middle periodic error[J]. Measurement Technique, 1997(7): 16-19.
- [10] 杨进堂. 用直径全中误差表征圆分度件刻划误差 [J]. 计量技术, 1997(5): 10-12.
- YANG J T. Presentation graduation error with the diameter grating division error[J]. Measurement Technique, 1997(5): 10-12.
- [11] 张红胜. 常角法检测圆分度刻划误差谐波量失真的研究 [J]. 计量技术, 2002(10): 3-6.
- ZHANG H SH. Study of the harmonic distortion in testing circular division ruling error using constant angle method [J]. Measurement Technique, 2002(10): 3-6.
- [12] 叶大华. 用动态全积分法提高圆分度精度 [J]. 光电工程, 1994, 21(2): 27-33.
- YE D H. An improvement of circle graduation accuracy with the dynamic perfect integration method[J]. Opto-Electronic Engineering, 1994, 21(2): 27-33.
- [13] 叶盛祥. 动态扫描法提高圆分度精度 [J]. 激光与光电子进展, 1995(7): 109-109.
- YE S X. An improvement of circle graduation accuracy with the dynamic scan method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 1995(7): 109-109.
- [14] 马建设. DVD光学头误差探测器性能参数检测 [J]. 光电子·激光, 2002, 13(3): 237-239.
- MA J SH. Test and evaluation of characteristic parameters in error detectors of DVD pickup[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2002, 13(3): 237-239.
- [15] 卢国纲. 现代光栅测量技术 [J]. 世界制造技术与装备市场, 2002(5): 10-13.
- LU G G. Modern grating measuring technology [J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2002(5): 10-13.

作者简介



万文略, 1987年于南开大学获得学士学位, 1994年于重庆大学获得硕士学位, 重庆工学院副教授, 主要研究方向为计算机测控技术与智能传感器。

E-mail: wanwenlue@cqit.edu.cn

Wan Wenlue received B. S degree from Nankai University, Tianjin, China in 1987, and M. S from Chongqing University, Chongqing in 1994. He is currently an associate professor in Chongqing Institute of Technology. His current research interests are computer control system and sensor.

E-mail: wanwenlue@cqit.edu.cn



彭东林, 博士, 博士生导师, 重庆工学院教授, 主要研究方向为计算机辅助测试技术与仪器、智能传感器。

E-mail: pdl@cqit.edu.cn

Peng Donglin received his B. S and PhD degrees from Chongqing University. He is a professor and supervisor for doctoral students in Chongqing Institute of Technology. His main research fields include intelligent sensor and computer-aided test.

E-mail: pdl@cqit.edu.cn