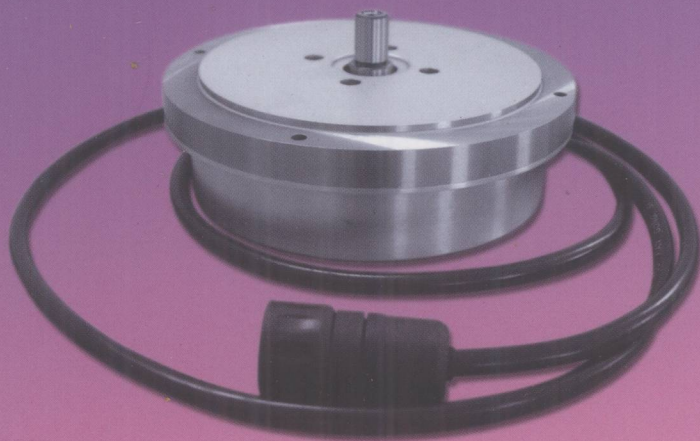


彭东林 著

时栅位移传感器 与新型机床动态检测系统



科学出版社

www.sciencep.com

时栅位移传感器与新型 机床动态检测系统

彭东林 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以作者二十多年从事智能仪器与智能传感器科学研究的体会和成果为基础,阐述了作者关于精密位移测量的一些独立的观点、开展研究工作的思路,以及最后取得的效果。全书共分5章。第1章从“时空转换”的角度对一些众所周知的常识和事例进行分析,从而建立起一套比较独特的思维方式。第2、3章介绍作者发明的时栅、差线栅和激光栅的原理和 design 思想,其中时栅的应用开发工作做得最好,也是介绍的重点。第4、5章对机床传动误差动态测量的方法、技术和仪器原理进行全面分析,重点介绍了作者研制的智能化机床动态测量系统的原理和应用情况。

本书可供相关专业的研究生、工程技术人员和研究人员作为研究工作的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

时栅位移传感器与新型机床动态检测系统 / 彭东林 著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-025881-6

I. 时… II. 彭… III. 机电-检测-研究 IV. TH822-53 TP212-53
TG659-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 196667 号

责任编辑:余 丁 潘继敏 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕 者

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2010年1月第一次印刷 印张:12 1/2

印数:1—2 500 字数:240 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

作者简介

彭东林,1952年生,1982年于重庆大学电气工程学院电工学专业获学士学位,后留校到机械工程学院机械传动国家重点实验室从事科学研究工作。其间先后获机械设计及理论专业硕士、博士学位。1996年被评为教授,1999年被评为博士生导师。2001年起到重庆理工大学工作,任电子信息与自动化学院院长至今。长期从事计算机辅助测试技术与仪器、智能传感器等方向的研究工作。作为项目负责人,曾先后六次承担国家自然科学基金项目、两次国防科工委重大项目、国家863项目、科技部中小型企业创新基金和其他省部级项目,另有十几项企业横向课题等。研究成果之一“机床传动误差检测系统”,1995年获国家教育委员会(现教育部)科技进步二等奖,1996年被国家科学技术委员会(现科技部)列为“国家级科技成果重点推广计划项目”;研究成果之二“时空坐标转换方法与时栅位移传感器”,2004年通过国家自然科学基金委员会当年组织的唯一一次成果鉴定会,获得“国际先进水平、国内外首创”的高度评价,2005年获得重庆市技术发明一等奖、中国电子学会电子信息科学技术二等奖,2007年获中国专利金奖;研究成果之三“无线式数字远程智能专家评审系统”,2004年获重庆市科技进步二等奖(以上获奖均排名第一)。作为第一作者,先后发表论文90余篇,其中发表在《仪器仪表学报》、《机械工程学报》等重要期刊17篇,SCI、EI收录25篇,获发明专利4项。为重庆市首批学术技术带头人、重庆市杰出专业技术人才、国务院政府津贴专家。

作 者 序

我在过去二十多年的研究历程中,做了两件事:前十年搞了一套“机床传动误差检测智能系统”(FMT 系统);后十年搞了一套“时栅传感器”。前者得到一项国家自然科学基金资助,后者得到五项。其中始终保持一条研究思路的主线:思想上,时间域和空间域交叉考虑问题;技术上,用时间分度去补充乃至代替空间分度,即时空转换。

1986 年读研究生时开始研究 FMT 系统,采用每周 10800 线的磁栅传感器,没有使用常规的细分电路,而是琢磨利用高频时钟脉冲去插补磁栅信号,其科学理念思想可归纳为“空间脉冲对时间脉冲的瞬时标定,时间脉冲对空间脉冲的实时细分”。而为解决采样实时性问题采用的关键技术其思想可归纳为“仿照软件程序在时间域循环嵌套的思路,设计电路在空间域循环嵌套,从而实现以无限的电路空间去换取有限的程序时间”和“设计者必须同时考虑某一段程序在某一段时间要在某一段电路里执行,从而不同于常规的程序设计员和电路设计员”。这些思想让我获准了第一项基金“机械传动计算机测控超强实时型新方法”。本阶段工作的标志性成果是 1995 年国家教育委员会(现教育部)科技进步二等奖,1996 年被国家科学技术委员会(现科技部)列入“九五国家级科技成果重点推广计划”。FMT 系统在数十家大型机床厂应用取得的大量成功案例至今让人难以忘怀,可惜当时势单力薄,未能及时实现产业化,后来又忙于更新、更高的追求,一直无暇回过头去重拾旧题,对此事我至今仍耿耿于怀。

1996 年提出“时栅”的概念,申报基金项目,这是在上述思想上的一次本质性的跨越,即彻底摒弃磁栅(或光栅)等沿空间均匀刻线的位移传感器原理,而改由时钟脉冲来构成新的位移传感器,起名为时栅,可实现对以任意变速度运动的物体的位移测量,简言之就是“用时间测空间”。当提出这个思想时据说曾引起很大争议,最后国家自然科学基金委员会是出于保护创新而以“非共识项目”同意我们的第二项基金“圆分度静态精密测量新方法 & 微型计算机装置研究”立项,这个微型计算机装置就是后来的时栅。微处理技术是很容易与时间(时钟)联系的。因此时栅从一开始就是一个基于信息处理技术的智能传感器。

1999 年项目结题时,我们做出了精度为 $\pm 34''$ 的“机械式时栅”。在正式提交结题报告之前,我们先自行组织了一次通信评审,获得相当好的反响。这个结果引起了基金委的注意和重视,于当年发文组织成果鉴定。后考虑到测量精度尚未达

到一定水平,故推迟了鉴定时间。

时栅的思想是要有一个匀速运动的参照坐标系,而当时的技术实现是用同步电机带动一个匀速旋转的机械体。匀速 V 的误差直接影响测量误差,因此可以说时栅是将分度的刻划误差难题转移到了运动坐标系匀速性的难题上。为了提高匀速性,只有加大旋转机械惯量,于是又引起振动、体积、安装等一系列问题。学术思想再怎么新颖,技术上难以实现或不具备先进性,这种发明是没有什么价值的,这时我们想到了“场”。场是自然界的一种特殊形式的特殊物质,看不见摸不着,但是客观存在。光场、电磁场、声场、引力场……只要能够实现匀速运动,就能构成时栅所需的运动坐标系。而最现成、最方便使用的场,就是电机里的旋转磁场。于是我们于 2000 年申报并获准了第三项自然科学基金“场式时栅位移传感器研究”。

我们在长期研究中形成的一种观点是:“机械运动总是与空间联系在一起的,电气现象总是与时间联系在一起的。”而人类用电子技术解决时间问题的手段比起用机械技术解决空间问题的手段要多得多,先进得多。例如世界上目前测量时间的精度要比测量空间的精度高出三个数量级,且成本很低。因此我们一旦采用电的方法解决旋转磁场的稳定性,结果是传感器精度大幅度提高,没有振动,体积大大缩小,因无旋转体而安装方便。还有很重要的一点:利用直线电机原理,我们实现了直线式时栅,而采用机械方式是不可能的。

2004 年 5 月,第一台“场式时栅”样机经国家法定检定机构——中国测试技术研究院检定精度达到 $\pm 0.8''$,同年 9 月,项目通过了国家自然科学基金委员会当年组织的唯一一次成果鉴定会,检定精度为 $\pm 0.6''$,评价为“国际先进水平、国内外首创”。2005 年“时空坐标转换方法与时栅位移传感器研究”获重庆市技术发明一等奖,2007 年获中国专利金奖。

从 2006 年开始,进入第三个十年期,课题组在经过“提出思想并做出原理样机,做出高精度样机”两步工作后,现在进入第三个阶段:时栅的产品化和产业化。为此已相继获得国家 863 计划项目、科技部“中小企业创新基金”项目、国家质检总局项目和国防科工委“军品配套”、“民技军用”等重大项目的支持,正在同时推进时栅向国家各级计量检定部门、制造业和军工行业的推广应用。

原始创新和一般创新(集成创新、消化创新等)的区别之一是:后者是延续一个已有的创新周期,而前者是开创一个新的创新周期。在这两年的应用实践中,时栅经过不断的创新性改进,越来越显示其在高精度、低成本、抗干扰(耐摔打)和智能化方面的技术优势和发展潜力,从而得到许多企业尤其是军工企业技术人员的认同。

现有的各种角位移传感器,包括光栅、磁栅、电栅(感应同步器)、容栅、球栅、齿栅、多齿分度盘、多面棱体、旋转变压器、自整角机……全是由外国人发明的,全是

按空间均匀分度。我们团队的理想和口号是：我们将以中国人原创发明的时栅，向任何一种现有角位移测量技术挑战，并以此为毕生的追求。

在进入第三个十年期后，我们的研究团队已扩大到有一二十个人了。这时萌生了写一本专著的念头，主要是想对自己多年的工作进行比较系统的总结。回想自己所做的工作、所写的文章，有两个特点。一是方向的延续性，始终围绕两个主题不变：机床传动误差动态测量和新型栅式传感器。这就决定了以前写的几十篇文章关联度很强，像连续剧一样，现在要串起来梳理成书，并不是很难。二是研究思维始终有一条主线，就是时间和空间的相互转换和借用，一般没有人这么提，故而可以引发出一连串的“创新思想”。如果把它们加以集成和系统化，并抽象提升一下，很可能引起一些研究者的共鸣。

本书共分为5章，如果是按作者的研究工作时间顺序，首先应该是第4、5章，再是第1~3章，因为正是第4、5章反映的工作为后面的研究打下了基础。

本书分5章共25节，若干小段。写作时作者试图让每一节或段讨论一个具体问题，可视为一篇独立文章，便于读者在了解本书整体思想的前提下，重点了解自己关注的问题。

参考文献中罗列了作者这些年来发表的与本书相关的40余篇论文，获得的四项发明专利和一项实用新型专利的题目和编号，正是这些文献构成了本书的骨架。

第1章是谈“思想”，跳出传统教科书条规，以时空转换的观点看待各种具体问题。这么多年的研究，有几件工作自己感觉很满意：用时钟脉冲去插补空间脉冲(1.2节)；建立预处理循环控制流思想(1.3节)；用时空转换观念把差频电路“解释得天衣无缝”(1.4节)；建立时空坐标转换理论(1.5节)；明确地把行波分为时空两大类(1.6节、1.7节)等。把这些思想集中成为一章来写，但读的时候要结合后4章的内容，或者看完后4章后再回过头来看第1章，才容易理解。

第2~5章是谈技术和应用。第2、3章介绍本人发明的几种新型传感器，有的已付诸实践，有的尚在试验阶段。第4、5章则更多的是介绍实际应用。有关机床传动链传动精度的文献是比较少见的，本书中介绍的FMT系统是我亲手研制的，各种机床测试曲线是我亲手测绘的，其间的感觉和体会，不吐不快。

本书是我一生中第一本也很可能是最后一本“专著”。如上所述，写出的内容基本上全是自己从读研究生开始这二十多年来的心得体会，怎么理解的就怎么写。这一方面可以保证书中90%以上的内容都是自己的观点；但另一方面肯定会导致书中存有浅薄、错漏甚至谬误。除郑重要求读者以批判的眼光对待书中的观点以外，还真心希望得到各界智者的指正和点拨，推进学术交流和学科进步。

张光辉教授作为我的硕士、博士学位指导教师，引导我走上了机电一体化和精密机械测量的道路。他对我的精心栽培和长期的关怀支持，以及他做人和做学问

的严谨态度,直接影响了我的学术生涯。课题组成员刘小康、陈锡侯、张兴红、朱革、杨继森、王先全、万文略等为本书提到的研究内容作出了创造性贡献。和子康高工作为我的良师益友,二十多年来一直伴随着我的成长,对我的帮助难以描述。研究生刘成康、谭为民、戴政远、王彦刚、郑方燕等都曾不同程度地参与过上述工作,在此一并表示感谢!

我先后六次得到国家自然科学基金委员会的资助,可以说,本书是这些资助的直接结果,因此,在此特别表示感谢!

彭东林

目 录

作者序

概述	1
第 1 章 精密位移测量中的时空观	6
1.1 时空转换与机电转换	6
1.2 时间脉冲与空间脉冲	11
1.2.1 现有主要细分方法分析	12
1.2.2 时间脉冲对空间脉冲的细分新方法	15
1.2.3 细分方法误差分析	18
1.3 计算机硬件与软件——电路空间换取程序时间	24
1.4 差频测量系统——空间位移放大测量转换为时间周期放大测量	33
1.5 相对运动双坐标系——空间位置差测量转换为时间差测量	40
1.6 时间行波与空间行波	48
1.7 时域 FFT 与空域 FFT	52
第 2 章 时栅位移传感器	56
2.1 时栅位移传感器及其系统	56
2.2 差频式时栅	57
2.3 单齿式时栅	58
2.4 场式时栅	65
2.5 混激型时栅	70
2.6 变耦变压器式时栅	72
2.7 桥式时栅	75
2.8 增量式时栅	77
2.9 光栅、电栅、时栅的统一——增量光栅转化为绝对时栅	83
2.10 时栅的技术原理总结及与传统方法的比较	86
第 3 章 差线栅与激光栅	92
3.1 差线栅位移传感器	92
3.2 激光栅位移传感器	98
第 4 章 传统机床传动误差检测技术与仪器	105
4.1 机床传动误差的基本概念	106

4.1.1	传动误差的定义	106
4.1.2	机床传动误差的数学模型	109
4.1.3	传动误差的分类	113
4.1.4	用切齿法考核齿轮机床精度的弊端	115
4.2	传统的机床传动误差量仪	116
4.2.1	传动误差测量及量仪原理	116
4.2.2	实用传动误差测量仪器	120
第5章	新型传动误差检测分析系统	122
5.1	FMT 系统工作原理与特色	122
5.1.1	两种测量传动误差方法的比较	131
5.1.2	用数值拟合法实现误差信息分离的研究	133
5.1.3	用微型计算机实现运动方向的判别	138
5.1.4	对非整数传动比的处理	143
5.1.5	实时性问题研究	145
5.1.6	极低速大传动比测量	147
5.2	FMT 系统的误差分析、实验与检定	149
5.2.1	系统环节误差分析	149
5.2.2	一种智能信号发生器及应用	151
5.2.3	传动误差测量仪器的检定	158
5.2.4	鉴定结果及分析	163
5.3	应用于各种齿轮机床的 FMT 系统	164
5.3.1	滚齿机传动链检测分析系统	164
5.3.2	滚齿机差动链检测分析系统	168
5.3.3	插齿机传动链检测分析系统	171
5.3.4	磨齿机传动链检测分析系统	176
5.3.5	铣齿机传动链检测分析系统	178
5.4	FMT 系统实用例	185
参考文献		187

概 述

位移(直线位移或角位移)测量是最基本、最普遍的测量。在大量程位移测量中,为了兼顾分辨力和量程,许多传感器采用了栅式结构,如光栅、磁栅、容栅、齿栅、感应同步器等,利用其运动过程中某些物理量有规律的周期性变化而形成沿空间均匀分布的“栅线”,从而可以通过对栅线的计数而得到位移量。光栅是目前应用最广泛的栅式传感器,精度高,技术成熟。但以“完美”的眼光去挑剔,仍有一些缺点,其根本原因在于栅线数难以进一步提高,只能依靠电子细分,从而引起成本、可靠性、抗干扰力等方面的问题。例如圆分度测量,一个圆周有 1296000 角秒,通常刻线 32400 线/周的光栅已经比较难做了,每线仍有 40 角秒的当量。要达到工程上 1"以下的分辨力要求,就要靠复杂的电子倍频细分电路。除结构复杂、成本提高外,还对光栅的运动速度还附加了限制,必须运行平衡、无突变和相对低速等。如果想进一步加大刻线密度,除工艺变得更复杂、成本提高外,还更容易受到生产现场微小的粉尘、油污和水汽的污染,抗干扰能力、运动速度的上限和可靠性更难保证。

问题的症结在于:现有的栅式位移传感器,依赖的是基于超精密机械加工的高精度空间刻划技术。例如代表世界最高刻划技术水平的德国海德汉公司建造的一座巨大的地下精密加工车间(图 0-1),由多层钢筋水泥外壳构成,壳与壳之间由弹簧支撑,并且抽成真空。他们以这种匪夷所思的方式来构建一个“超净、超静、超微振

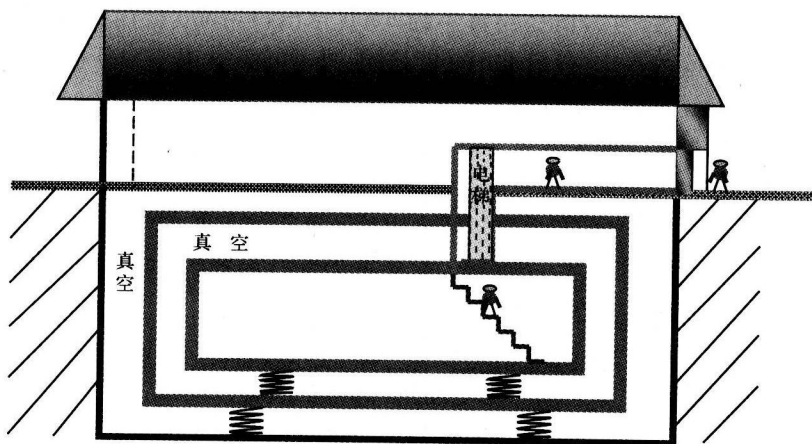


图 0-1 海德汉公司的地下加工车间示意图

动”的刻划环境,为此花费了十几亿欧元(据估算这笔钱可以建造 4 座国家体育场,即“鸟巢”)。从此例可以看出,光栅所代表的刻划技术原理早已为世人掌握,大家比拼的就是看谁刻得更细、更精,但这已经逼近了极限。发达国家就是靠资金优势和基础设施设施的优势,来保持对发展中国家的产品质量优势,进而形成价格优势,使我们很难赶超。同时空间细微刻划原理所引起的成本、抗干扰能力和速度限制等问题,是传统栅式传感器进一步发展的原理性死结。图 0-2 所示为光栅数显系统。

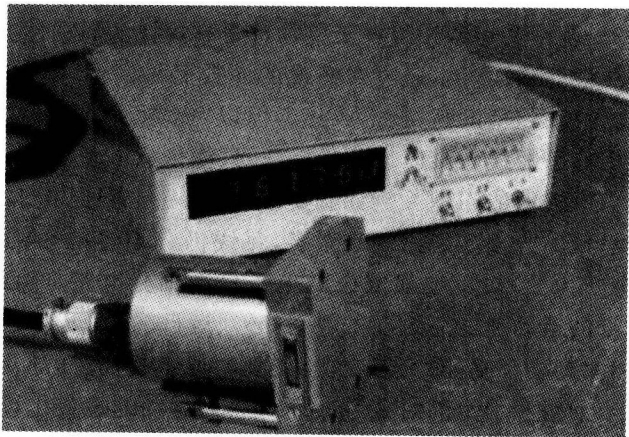


图 0-2 光栅数显系统(售价 2~6 万元)

作为现行技术,光栅在生产现场尚未得到推广应用的一个典型例子是:我们制造业工厂大量使用的回转分度转台,至今采用的基本上都是机械刻线读数定位。工人靠手摇快速粗定位,再目测游标,手微动精密定位。烟台机床附件厂是我国最大的回转分度转台生产厂,前些年每年约 6000 台出口,1000 台内销,绝大部分是机械刻线加游标读数方式,极少采用光栅或感应同步器(这说明国外也大量存在这种情况)。原因很简单:一是价格不匹配,一台机械转台在 1000~3000 元,而一套德国精密光栅数显系统要约 6 万元;二是光栅经不起恶劣的生产环境干扰,尤其是不适应手摇转台忽快忽慢、忽左忽右、忽动忽停的运动方式。在现代信息技术如此高速发展的今天,还有这么多生产领域采用如此落后的生产工艺方式,这是我们相关科技工作者的动力和压力。事实上,自光栅面世以后的约 50 年时间里,人类在圆分度技术上再无原理上的重大突破。

在这种背景下,我们注意到目前人类对时间的测量要比空间的测量精密得多,精度要高三个数量级以上,测量方法更简单,价格更低廉(一块高精度石英表成本不过几元钱),且不易受温度和重力等周边物理环境变化的干扰。于是萌生了“用时间测量空间”的思想,即不依赖超精密加工去形成各种栅式测量基准尺,而改用另一个基本物理量——时间量来形成测量的基准。具体地讲,就是用按时间等分的时钟脉

冲信号来代替按空间等分的栅式传感器信号成为测量计数的基准,从而构成一种全新原理的“栅”式传感器。“栅”就是空间刻划,这里本来没有空间刻划,但是我们借助了这个为人们所熟知的词,而把它命名为“时栅位移传感器”,简称时栅。图 0-3 所示为国产手摇分度转台,图 0-4 所示为昆明机床厂感应同步器数显分度转台。

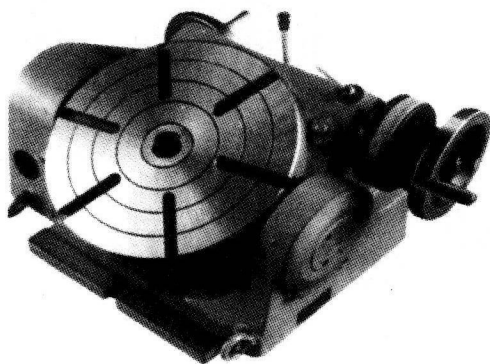


图 0-3 国产手摇分度转台(售价 1000~3000 元)

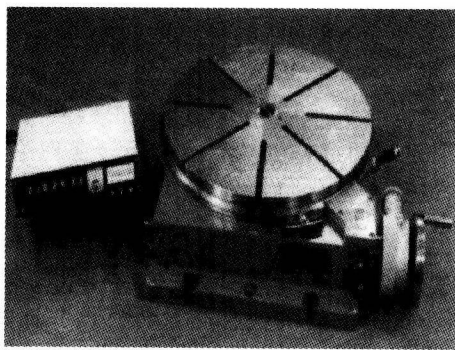


图 0-4 昆明机床厂感应同步器数显分度转台(售价 12 万~30 万元)

事实上,“用时间测量空间”的思想久已有之。在古时候,就有“跑马圈地”的做法,即用一匹马跑一炷香的时间,代表对所需要距离的丈量。而在现代社会,更是大量存在时间和空间的统一换算。首先,在国际单位制(SI)中,长度和时间都是基本单位,速度、角速度和频率是导出单位。长度单位和时间单位都可用高准确度的频率表示,二者可以统一。其次,从“微”的观念上,人们已对长度基准米定义为光在真空中于 $1/299792458\text{s}$ 的时间间隔内所经路径的长度。这就是依据在真空中光速是一常数这一物理特性,用时间作为长度基准。而从“宏”的观念上,人们在天文学中更是习惯用光年来表示距离的量度。图 0-5 所示为光栅信号与时钟信号在示波器上的显示图像。

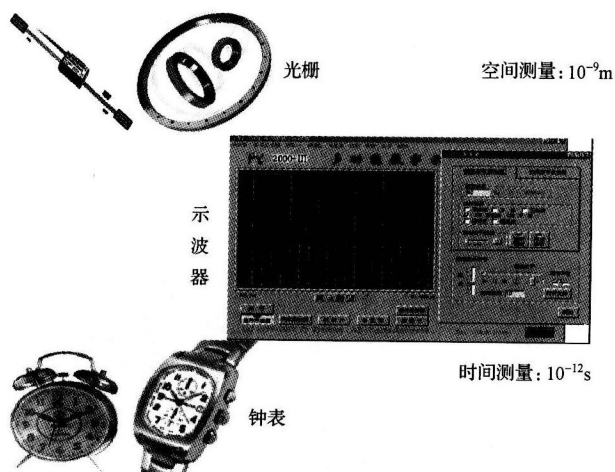


图 0-5 光栅信号与时钟信号在示波器上的显示图像

在工程实践中,本质为“用时间测量空间”的技术应用大量存在。任何一种 $x-t$ 的坐标显示方式,无论是示波器、记录仪、打印机、计算机屏幕等,都可以理解为是以时间的形式表现空间,都隐含着时空转换的概念。只是人们一般没有从这个角度去意识罢了。

面对人们熟知的大量客观事实,“谁采用与众不同的思维方式,谁就可得到新的认识”。本项研究在理论层面上,提出“时空坐标转换理论”(简称 TST 理论),从时空转换的角度去重新认识各种调制式位移传感器的测量原理,以“用时间测量空间”的观点对已有的技术重新进行科学总结,从中抽象出新的对调制式位移传感器具有普遍意义的时空转换数学模型或理论,指导我们创新发明出各种充分利用时间测量的高精度高分辨力优势的新的位移测量传感器。而在技术层面上,一是提出“用电路空间换取程序时间”的方法,解决了计算机测试系统的可编程性与实时性的矛盾;二是提出“用运动的场来构成运动体系”的方法,解决了时栅传感器从理论到产品的关键技术问题;三是在产品化层面上,研制出“机床传动误差计算机测试系统”,发明了时栅传感器,并在制造业、国防和计量检定部门获得很好的推广应用效果。

总之,“用时间测空间”这个概念是不是新思想并不重要。重要的是用什么方式去实现它?它适用于什么范围?它能达到什么样的精度?采用光年是因为光速恒定,非恒速的运动就不能用,应用范围太窄,几乎没有实用场合。“跑马圈地”代表的是一种统计的、平均的概念,精度太差,太宏观。我们要解决的是用一种新型的传感器去代替光栅,用在类似工作转台那样的变速、变向、动停不定的运动物体,实现角秒或微米级的精密测量,这才是发明的价值和意义所在。

本项研究主要围绕回转运动即角位移的测量而进行,其基本结论对直线位移测量也是成立的。为了叙述简洁,无论是直线运动或回转运动,恒速用 V 表示,变速用 v 表示。

应该提到,“时空转换”的思想不是从天而降的,事实上,作者先是在有关机床传动误差测量仪器 FMT 系统的研制与开发过程中,使用了用时钟脉冲插补光栅(或磁栅)的空间脉冲的新技术,又在解决采样实时性问题时,使用了“电路空间换取程序时间”的新技术。这些思想在第 1 章中进行了描述,并引导出第 2 章时栅的概念。最后在第 4、5 章,再回顾当初研究 FMT 系统的体会,重温新技术、新系统给我们带来的令人兴奋的测试诊断效果。

第 1 章 精密位移测量中的时空观

位移测量是一个空间范畴的问题,几何量测试技术是一个古老的偏重于机械方向的传统学科。在以往的学术研究中,很少有人将自己的研究思路有意识地与“时间”相联系。本章各节则分别提出一个独立的观点,以时空转换的观点去分析传统的机械问题,或以时间为辅助手段去解决空间测量问题。

本章的内容分别与第 2~5 章的研制工作相关。如果读者前后反复参考,可能会更容易领会、理解。

1.1 时空转换与机电转换

本节提出:机械现象总是与空间联系在一起的,电气现象总是与时间联系在一起的。按照这种观点,所谓“机电转换”也就是“空时转换”。

当我们读到“机电转换”时,通常所联想到的是“机电能量转换”,例如发电机、电动机就是最常见的机电能量转换工具。还有一种机电转换的概念,是指机械物理模型与电气物理模型——对应的“对偶关系”转换。

为了对以电机为代表的机电系统进行研究,首先要建立系统的运动方程。

对具有集中参数的机电系统而言,运动方程一般由两部分组成:一部分是机械方程,也就是系统的转矩(力)方程;另一部分是电路方程,也就是系统的电压方程。

推导运动方程的方法通常有两种:

(1) 使用众所周知的法拉第电磁感应定律、基尔霍夫定律列出电路部分的方程;使用牛顿定律和达朗贝尔原理列出机械部分的方程;然后通过能量守恒定律把两部分方程联系起来,从而建立系统的运动方程,这种方法即所谓的微分原理法。

(2) 虽然从物理本质看,机械系统和电气系统中的运动过程不同,并且它们分别用两类物理量描述,服从不同的物理定律,但是,对它们建立的运动微分方程即数学模型在形式上却相同,这说明这两种不同运动形态的物理量和物理定律之间有相似的对应关系(即对偶关系)。因此,为了建立机电系统的运动方程,我们完全可以不去区别系统各对应量的物理含义,而是使用某个特定的状态函数,通过求出系统函数的积分函数(泛函数)极值来确定系统的运动方程,这种方法叫做变分原理法。

微分原理法所凭借的物理定律描述的是系统真实运动的普遍规律,变分原理法则只是提供一种准则,根据这种准则,把系统的真实运动从在同样条件下运动学

上可能的其他运动中区别开来,从而找出真实的运动规律。

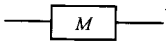
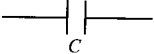
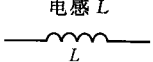
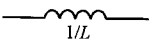
普遍认为:建立机电系统运动方程的第一种方法的物理概念易于理解和掌握,电气工作者对它也比较熟悉,但是这种方法也有缺点,这就是当系统复杂时,工作人员必须有洞察能力和直观能力。第二种方法用了很多数学知识,“机械地”处理问题,故容易忘掉具体的物理,但是,系统越复杂越能发挥其作用。因此,在系统复杂的情况下,这种方法就成为一种有效的方法。由于使系统状态函数的积分函数达到极值时所应满足的条件是拉格朗日方程,因此,用第二种方法建立系统的运动方程时,实际上是应用拉格朗日方程。

用于建立机电系统运动方程的拉格朗日方程,最早应用于力学领域,后来该方程的应用范围不断扩大,它除扩展应用到机电系统以外,还应用于水力系统、热力系统和音响系统等。由于拉格朗日方程在机电系统中的应用越来越普遍,所以在已出版的一些关于机电能量转换的书籍中往往采用这种方法。

有的文献认为:若两个相似系统属于同一类型(如同为电系统或同为机械系统),则称两个系统之间具有对偶关系(简称对偶);若为不同类型(如一个为机械系统,另一个为电系统),则称两个系统之间具有类比关系。本书只讨论机械系统和电系统两种不同类型的系统,并且统一称之为对偶关系。

有关机电对偶关系的分类很多,现在从几个不同角度进行类比,如表 1-1~表 1-4 所示。

表 1-1 机械系统与电系统的类比

序号	名称	机械系统	电系统	
			类 比	类 比
1	坐标	位移 x (角位移 ϕ)	磁链 ψ	电荷 q
2	速度	速度 v (角速度 ω)	电压 u	电流 i
3	力	力 F (转矩 T)	电流 i	电动势 e
4	惯性元件	质量 M (转动惯量) 	电容 C 	电感 L 
5	弹性元件	刚性系数 K (扭转 刚性系数 K_s) 	电感的倒数 $1/L$ 	电容的倒数 $1/C$ 