

秦树人著

磁栅及其 测量系统

重 庆 出 版 社

责任编辑 张镇海

封面设计 王庆伦

磁栅及其测量系统

秦树人著

重 庆 出 版 社 出 版 (重庆李子坝正街 102 号)
四 川 省 新 华 书 店 重 庆 发 行 所 发 行
重 庆 印 制 一 厂 印 刷

*

开本850×1168 1/32 印张11.125 插页6 字数246千
1984年6月第一版 1984年6月第一次印刷
科技新书目: 85—246 印数: 1—3,020

书号: 15114·6 定价: 2.50 元

内 容 提 要

本书介绍磁栅技术的原理及其测量装置,详细阐述其测量圆分度、长度和其它基本运动量的原理和方法。

全书共分八章,分别介绍磁栅刻制的原理和装置,圆分度误差的分析和补偿理论,录磁拾磁的原理和技术,相位测量以及磁栅测量系统在机床传动链、齿轮、角度、速度、扭矩、长度测量和位置检测中的应用。

本书可供从事非电量(机械量)电测和电子测试的技术人员,大专院校有关专业的教师、研究生和高年级学生参考。

前 言

磁栅是五十年代后期发展起来的一种新型基准测尺。磁栅技术和光栅、感应同步器技术在基本运动量的检测中称为三大测量技术，在工业、科研、国防等方面得到了广泛的应用并取得了显著的成效。

磁栅，最早是由捷克的K. Štěpánek 在一个磁性圆盘的外圆上，用类似录音的方法刻制成功的。利用圆磁栅和普通速度响应磁头，可构成圆分度精度和角度等机械量的动态模拟测量装置。六十年代中期，由于激光技术的广泛应用，借助相干光波长均匀稳定的特点，刻制成功高精度的长磁栅(即磁尺)。这样磁栅的应用范围扩大到长度和位置检测的领域中，并实现了动态模拟和静态数显两种检测方式，成为基本运动量检测的一项重要技术。

从磁栅问世至今的二十多年间，虽然在国内的一些文献和大专院校的教材中，对这门技术有过一些分散的报导和介绍，但尚无一本系统介绍这门技术的专著，因此本书正好弥补了这一不足。

磁栅技术作为一门综合性较强的技术，内容涉及机械、电子、电磁和光学等多方面的内容。因此本书除对直接从事磁栅技术的人员外，对于相近专业的计测人员和院校师生也不失为一本比较系统的参考书。由于磁栅和光栅、感应同步器的信号处理和检测系统十分类似，故本书对从事光栅和感应同步器技术的人员也有一定参考价值。

本书著者曾较长时期从事磁栅技术的研究和应用，故在写著本书时，比较重视理论联系实际。书中除对磁栅的刻制及其测量系统的原理作了详细的论述外，还用了几近一半的篇幅对各种磁栅式测量装置的应用作了介绍，并列举了大量的应用实例。这样，读者在读过本书后便能直接进入应用。

本书在写著过程中参阅过一些国内外有关的书籍和文献，凡本书参阅过的资料均列入书末的“参考文献”中，备读者查阅。

著者在写著本书期间，得到不少同志的关心和鼓励。这里特别需要提到的是广州机床研究所黄启达同志，他不仅对全书进行了认真的校阅，提出了不少宝贵的意见，而且还为本书增加了激光比长仪磁尺刻制系统等内容。为此，著者对黄启达同志表示衷心的感谢。限于著者水平，本书虽几经修订，但仍难免存在不妥之处，望读者不吝指正。

著者

一九八二年十二月于重庆

目 录

第一章 概论	1
1-1 发展基本运动量测量新技术的重要性	3
1-2 磁栅式动态测量装置	4
1-3 磁栅式静态测量装置	5
1-4 本书概貌	6
第二章 圆形磁栅的刻制	8
2-1 刻制原理	8
2-2 刻制装置	9
2-3 刻制整数条栅纹的方法	12
2-4 磁栅圆盘的制造	14
2-4-1 圆盘的机械加工	14
2-4-2 圆盘基体材料的选择	15
2-4-3 圆盘外圆磁性材料的电镀	16
2-5 栅纹刻制的误差分析	21
2-5-1 同步电动机作驱动源的优缺点	21
2-5-2 同步电动机的旋转分析	24
2-5-3 飞轮的旋转分析	26
2-5-4 引起刻制误差的其它原因	31
2-6 圆形磁栅的质量检查	34
2-6-1 拾磁信号电压振幅的检查	34
2-6-2 栅纹接头的检查	35
2-6-3 栅纹数的检查	35

2-6-4 磁栅的精度检查	37
第三章 误差理论和提高刻制精度的方法	40
3-1 刻制误差的理论分析	40
3-2 误差补偿理论	48
3-2-1 误差补偿问题的提出	48
3-2-2 误差补偿的理论分析	49
3-2-3 误差补偿和磁头电压振幅比的关系	59
3-3 提高刻制均匀性的方法——翻刻法	63
3-3-1 磁栅的翻刻	63
3-3-2 简易翻刻装置	66
3-4 误差补偿在提高磁栅测量精度中的应用	67
第四章 录磁与拾磁	71
4-1 基本原理	71
4-1-1 录磁原理	71
4-1-2 拾磁原理	73
4-1-3 磁头的结构和工作原理	75
4-2 铁磁材料的磁化特性	78
4-2-1 磁化过程和磁化曲线	78
4-2-2 磁滞现象和磁滞回线	78
4-2-3 剩磁特性	81
4-3 录磁方法	83
4-3-1 无偏磁录磁	83
4-3-2 直流偏磁录磁	84
4-3-3 高频偏磁录磁	84
4-4 录磁的电流特性	86
4-4-1 录磁的波长特性曲线	86
4-4-2 录磁的频率特性曲线	88
4-5 录磁畸变的谐波分析	88

4-6	拾磁分析	93
4-6-1	拾磁磁头的感应电压	93
4-6-2	磁头的安装位置对拾磁电压的影响	97
4-6-3	拾磁信号的极限频率	99
4-7	录磁与拾磁的损耗	100
4-7-1	去磁效应	100
4-7-2	表面磁化效应和磁性材料的厚度损耗特性	100
4-7-3	磁头气隙的宽度效应	101
4-7-4	磁头与磁层的间隔效应	103
4-8	磁栅对录磁的要求	104
第五章 相位计与误差分离滤波器		106
5-1	触发式相位计的测量原理	107
5-1-1	恒定相位差的测量	107
5-1-2	变化相位差的测量	110
5-1-3	鉴相触发器线路的改进	113
5-2	测量误差	116
5-2-1	触发器输出电压的前后沿误差	116
5-2-2	触发器两管输出电压不对称引起的误差	119
5-2-3	整形电路的幅相误差	120
5-2-4	谐波误差	123
5-3	提高相位计的工作频率	126
5-4	相角定标	128
5-4-1	移相定标法	128
5-4-2	差频定标法	134
5-4-3	分压定标法	136
5-4-4	分频定标法	138
5-5	数字式相位测量	146
5-5-1	数字式测相原理	147

5-5-2 逻辑电子门的工作分析	149
5-6 误差分离滤波器	154
5-6-1 误差分离原理	154
5-6-2 RC低通滤波器	156
5-6-3 RC高通滤波器	161
5-7 磁栅式测量装置中的相位计线路	165
5-8 相位计的品质评定	168
第六章 磁栅式机床传动链动精度测量装置	173
6-1 绝对式测量装置	173
6-1-1 工作原理	173
6-1-2 装置在机床传动链动精度测量中的应用	176
6-1-3 磁栅安装偏心对测量精度的影响	206
6-1-4 消除偏心误差的方法	212
6-2 分频绝对式测量装置	216
6-2-1 装置的工作原理	217
6-2-2 装置在机床传动链动精度测量中的应用	224
6-3 差频模拟式测量装置	224
6-3-1 装置的工作原理	225
6-3-2 装置的结构和应用实例	230
6-4 带辅助挂轮的新型差频式测量装置	236
6-4-1 装置的工作原理	236
6-4-2 装置的简单结构和应用实例	242
6-5 提高机床传动链和分度蜗轮副精度的途径	244
6-5-1 机械校正装置	245
6-5-2 自动校正装置	247
6-5-3 机床传动链误差的频谱分析	251
第七章 磁栅在测量技术中的其它应用	260
7-1 齿轮测量	260

7-1-1	分频式齿轮单面啮合测量装置的一般讨论	260
7-1-2	HYQ-02A型磁栅式齿轮单啮仪	267
7-2	角度测量	274
7-2-1	角度测量原理	274
7-2-2	角度测量的应用	277
7-3	其它测量技术中的应用	282
7-3-1	速度、转速和旋转均匀性的测量	282
7-3-2	电动机同步特性的测量	284
7-3-3	长轴扭转变形的测量	285
7-3-4	特殊齿轮箱动精度的测量	285
7-3-5	自动校正研磨蜗轮	286
7-3-6	简易齿轮副配对检查	288
第八章	磁尺(长磁栅)及其应用	289
8-1	磁尺栅纹的刻制	289
8-1-1	基圆-直尺滚动翻刻法	289
8-1-2	标准丝杠传动翻刻法	291
8-1-3	激光比长仪刻制法	292
8-2	磁尺在机床传动链精度测量中的应用	294
8-2-1	螺纹加工机床传动链动精度的测量	294
8-2-2	直线运动均匀性的测量	296
8-3	磁尺-数显长度检测装置	297
8-3-1	磁通响应磁头	298
8-3-2	鉴幅型磁尺-数显长度检测装置	303
8-3-3	鉴相型磁尺-数显长度检测装置	306
8-4	磁尺-数显角度检测装置	311
8-4-1	单磁头测角装置	311
8-4-2	双磁头测角装置	313
8-5	鉴相检测的误差分析	316

8-5-1	两磁头间距不等于 $(m \pm \frac{1}{4})\lambda$ 引起的误差	316
8-5-2	两磁头输出信号振幅不等引起的误差	317
8-5-3	磁头剩磁引起的误差	317
8-5-4	90° (或45°) 移相不准引起的误差	319
附录一	串联多磁头等幅电压平均法补偿圆形磁栅分度 误差的富里哀分析	321
附录二	式(4-8)、(4-9)、(4-12a)和式(4-24)的详细 推导	336
参考文献		344

第一章

概 论

一九五八年，在布达佩斯举行的第四届国际计量与测试大会 (4th. IMEKO) 上，捷克工程师 K. Štěpánek 宣读了题为“用磁性标尺测量齿轮传动的转角和旋转精度” (Измерение Углов и Равномерности Передачи Посредством Магнитных Масштабов) 的论文，第一次介绍了一种新型的基准测尺——磁栅及其在测量技术中各种应用的试验研究情况。次年秋，在布尔诺举行的国际博览会上，展出了由捷克布拉格机床研究所和TOS公司共同研制成功的用于测量齿轮和机床传动链动态精度的磁栅式测量仪。自此，作为一种新型的测量技术——磁栅技术便正式宣告问世。

六十年代初，英国 Syeks 公司宣布该公司已从捷克取得磁栅式测量装置的专利，并生产出了与捷克IMO装置类似的 Temac 系统，包括测量机床传动链精度的 Temac MM 装置，测量齿轮、蜗轮副动精度的 Temac80 和 Temac32 型测量装置。IMO 装置和 Temac 装置在六十年代作为最新型的测量装置，被许多工业发达国家和一些发展中国家所采用，并在提高圆分度精度和角度测量技术方面取得显著成绩。

最初，由于受到刻制技术和磁头结原理的限制，磁栅主要用作精密的圆分度测尺，并且只能在动态的情况下，用模拟电子系统进行检测。但在工程与机械测试中，位置和长度检测往往比角度

和圆分度精度测量应用得更加广泛。因此工业发达国家在继圆形磁栅之后又发展了一系列可用来测量长度的长形测尺。其中长形磁栅（又称磁尺）就是这些测尺中的一种典型的测长元件。捷克虽然在圆形磁栅的刻制和应用方面取得较大的成就，并且也是发展长形磁栅最早的国家，但他们在长形磁栅的制造和应用方面却没有取得什么显著的进展。从六十年代初期以来，以日本 Sony 公司为首的一批日本工业公司，对长形磁栅的刻制技术、检测系统和工业应用等方面都进行了系统而深入的研究，并生产出一系列圆形和长形磁栅检测装置，在生产制造、应用范围等方面把磁栅技术提高到一个新的水平。

和工业发达国家比较，我国也是发展磁栅技术比较早的国家。早在一九六一年我国上海磨床研究所就试制成功刻制圆形磁栅的大型录磁机，并能刻制精度 ± 1 角秒的圆形磁栅。两年之后一机部机床研究所和重庆机床厂联合研制成功类似捷克IMO-S型或英国Temac MM型的DZ-1型差频模拟式机床传动链动精度测量装置。六十年代中期，由于激光技术的推广应用，我国上海磨研所、汉江精密机床研究所、临江机床厂等一批厂、所先后刻制出在一米长度上累积误差不大于1微米的磁尺和与之配套的磁尺数显测量机。近几年来，国内有更多的厂、所先后研制成功一批圆形和长形磁栅式测量装置，这些装置对于促进我国工业、科研、国防和教学的发展都起到了积极的作用。

一种新原理和一门新技术的出现，总是和不断发展着的科学技术与实际生产紧密相联的。在大多数情况下，都是由于实际生产首先有了某种要求，以后才出现为满足这些要求的某些新技术。和所有的新技术一样，磁栅技术就是在这种背景下出现的。本章将根据这一观点，并围绕磁栅作如下的概述。

1-1. 发展基本运动量测量

新技术的重要性

基本运动量——位移和速度——的测量，是技术测量的基本问题，在机械工业和其他许多工业领域内都占有很重要的地位。

例如在机床制造业中，要提高产品的制造精度和工作精度，首先取决于测量技术的发展水平，尤其与基本运动量测量技术的完善程度密切相关，因为机床的精度正是由这些基本运动量的精确性来表现的。对于机械运动中的平移（即直线运动）而言，要求能精确地测量出位移的长度和直线运动的速度；对于旋转运动则要求能精确地测出旋转的角度（即旋转角位移）、角速度、线速度以及转数。在电子技术和激光技术得到广泛应用之前，经典的测量方法中已有不少量仪和量具，如机械式的齿条测微仪、千分表；光学式的万能工具显微镜、经纬仪；电学传感器式测量仪等等，都能在窄量程内或多或少地满足上述精确测量的要求。迄今为止这些量仪和量具仍然在测量中广泛地使用着。但是在宽量程内，仍用上述那些仪器和量具来高精度的测量基本运动量时，便不能满足要求了。这主要是由于受机构学原理的限制，使得制造上述那些仪器和量具要适于在宽量程内作高精度的测量非常困难。因为测量仪器的精度等级取决于它对量程的相对误差，量程越宽相对误差越大，从而精度等级越低。例如，用测量仪检查1米的长度，要求测量误差不大于0.01毫米，那么这种测量仪的相对精度需达到 10^{-5} ；如果检查0.05毫米的长度，要求其测量误差不大于0.001毫米，则这种测量仪的相对精度只需要 2×10^{-2} 就行了。显然，后者由于量程窄其相对精度虽比前者低得多，但测量精度却比前者高十倍！故后者的制造复杂性和操作的劳动强

度都比前者大得多，因而使这类量仪和量具的发展受到很大的限制。

经典的测量仪不仅在制造上精度等级受相对误差的影响，并且在测量方式上都是非连续的，因而测量过程冗长、缓慢、稳定性差，极易受外界因素(如温度、震动)和人为因素(如技术高低、眼力好坏)的影响。由于这些缺陷的存在，经典的方法越来越不能满足日益发展起来的高精度、宽量程的测量对象的要求了。例如对于精密机床长导轨的直线位移测量，它不仅要求在很宽的量程内要有很高的测量精度，而且还要求具有方向判别、快速自动读数(或显示)的功能。对于这类测量，过去几乎没有什么正规的方法和测量装置。又如对于机床的传动链精度，过去是通过测量尚未装配的单件精度间接评定它的质量，至于在机床处于实际运转状态时，其负荷的变化、轴承的间隙、震动、温升等等，使传动链的综合运动误差变得十分复杂的情况下，如何来测量它的动态工作精度，同样没有什么正规的方法。五十年代以来，由于航天等尖端技术的迅速发展，对机床的加工精度要求越来越高，迫切要求制造出高精度、特高精度的各类加工机床和各种精密机械，因此研究和发展直接检测机器和机床精度的新型基本运动量测量技术，便成为一个十分重要而迫切的问题被提了出来。

1-2. 磁栅式动态测量装置

作为一类测量技术的新发展，欧洲工业发达国家在五十年代末至六十年代初，陆续研制成功一系列机床传动链动态精度测量装置。在这些新型的装置中，最早研制成功并最先用于科研和生产实际的是捷克人发明的磁栅式测量装置。这种装置是按照同频率电信号间的相位比较原理建立的。与经典的测量仪器相比，它

的基准测尺——磁栅具有很高的刻制精度；改变栅纹数或测尺的几何尺寸控制栅距的大小，可以获得从很窄至很宽的动态量程（可从零点几微米至几毫米，或从零点几角秒至几百角秒）；测量仪器采用电子放大器、 $0\sim 2\pi$ 相位比较仪，读数装置采用自动记录仪，因此它具备了高精度、高灵敏度，能在很宽的量程内高速、连续、自动测量出机床传动链的运动精度以及其它基本运动量的性能。必须强调指出，应用磁栅式动精度测量装置，其被测对象都处于实际工作的运行状态，因此测量结果能最真实地反映被测对象的实际工作精度，而且由于测量过程极为迅速，几乎可以完全排除外界条件变化对测量精度的影响。这样，磁栅式动态精度测量装置的出现，不仅克服了经典方法的缺陷，而且解决了这一领域中过去无法解决的问题，对于提高机床的工作精度起到了很大的促进作用。根据初步统计的资料来看，凡是采用了动精度测量装置的厂家，其机床精度都提高了二至三级。

1-3. 磁栅式静态测量装置

由于数字控制机床的发展，用以测量机床某些平移部分（如导轨）运动位置的高精度位置检测装置，成为数控机床不可缺少的重要组成部分。以磁栅为基准测尺的数字显示静态检测装置，是近年来发展起来的新型测量装置。它具有精度高、灵敏度高、量程宽（比动态测量装置宽得多，可从几微米至几米或 $0\sim 2\pi$ 角度）、结构简单，调整方便、易于复制等等优点，特别还因为磁栅具有能在条件恶劣（如有油污、尘埃）的环境中正常工作的特点，因此它能固定在被测对象上长期使用。

磁栅式位置检测装置，不仅能检测对象移动的位置和转过的角度，对于凡能用长度和角度表示的各种机械量，如高度、厚

度、深度、不规则厚度、表面凸凹度、电视显象管的形状、两轴运行的同步控制以及建筑结构变形等等，都可以用磁栅式静态检测装置进行精确的测量。

从六十年代至今，在日本、捷克、我国和英国等磁栅技术发达的国家，已先后研制成功数十种用于测量基本运动量、机床传动链和其它机械量的磁栅式测量装置。这些装置在科研和生产中的广泛应用，对于机械工业和其他相近工业技术的发展，起到了积极的推动作用。随着磁栅技术的进一步提高和完善，它必将在更多的领域内显示它的作用。

1-4. 本书 概 貌

希望了解或掌握磁栅技术的人员，必须先对测量系统的基本测尺——磁栅有一个清楚的了解。因此本书正是从磁栅的加工和刻制这一基本问题入手的。为了便于读者全面地或有选择地阅读本书，下面对本书的内容安排作一简要介绍。

第二章介绍圆形磁栅的加工、电镀、刻制原理及装置。

第三章讨论圆形磁栅的误差理论和提高磁栅刻制和测量精度的方法。这些方法对于传感式圆分度测量元件，如光栅、感应同步器和齿栅等都同样适用。

第四章讨论录磁及拾磁的原理与技术。这是为希望更深入了解磁栅的刻制原理的读者准备的。而这一基本理论和技术对于从事录音技术的读者也有一定的参考价值。

第五章讨论磁栅测量技术的基本方法——相位测量法及其线路、误差分析和品质评定。同时还讨论了相角定标的原理、方法和一系列实用线路。另外，本章还讨论了动态误差的分离原理和误差分离滤波器的基本理论和线路设计。本章的内容对于从事电