

计量测试技术手册

第2卷 几何量

《计量测试技术手册》编辑委员会



中国计量出版社

计量测试技术手册

第2卷 几何量

《计量测试技术手册》编辑委员会

中国计量出版社

(京)新登字 024 号

内 容 提 要

《计量测试技术手册》包括计量测试技术基础、几何量、温度、力学、电磁学、电子学、声学、光学、时间频率、电离辐射、化学等量的计量测试技术,全套共 13 卷。

本书为《计量测试技术手册》第 2 卷几何量。内容包括:几何量计量测试中的常用传感器;几何量计量器具的基本组件和系统;常用几何量计量器具及仪器;长度计量标准及其检定;长度尺寸和角度的测量;形状和位置误差及表面粗糙度测量;螺纹、齿轮测量;激光技术在几何量计量中的应用等。

本书供从事计量测试工作的科技人员、管理人员查阅使用,也可供其他有关人员参考。

Abstract

"Handbook of Measurement Technology" consists of the basic principle of measurement and measurement technology for geometrical quantity, temperature, mechanics, electromagnetism, electronics, acoustics, optics, time and frequency, ionizing radiation and chemistry etc.

The whole set contains 13 Volumes.

This book is Volume 2, Measurement of geometrical quantities. It includes: conventional transducers, basic units and systems for geometric measurement, conventional measuring instruments and gauges, standards and its verifications, size and angle measurements, shape and position measurements, surface roughness measurement, screw and gear measurement, laser technique and its application in geometric measurement. etc.

It is a valuable reference book for the metrologists, management staff and other persons associated.

图书在版编目(CIP)数据

计量测试技术手册 第 2 卷:几何量/《计量测试技术手册》编辑委员会编著. —北京:中国计量出版社,1997. 3

ISBN 7-5026-0747-1/TB·462

I. 计… II. 计… III. ①计量-测试技术-手册②几何量-计量-测试技术 N. ①TB9-62②TB92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 10412 号

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787×1092 毫米 16 开本 印张 55.25 字数 1881 千字

1997 年 3 月第 1 版 1997 年 3 月第 1 次印刷

*

印数 1—2000 定价:105.00 元

序

当人类文明的曙光照耀着历史长河的源头时,伴随着生产和社会活动的需要,计量就萌发了。我国古时秦始皇施行了度量衡制度,被看作是一项重要政绩,标志着社会的进步。本世纪欧洲各国也制定了计量单位,如英国的英尺、磅等。直至1898年,国际米制公约公布,号召各国采用统一的米制公斤计量标准,可说是顺应社会发展,时代进步的必然产物。随着科学技术和贸易的发展,大概始于本世纪与上世纪之交,计量又从传统的度量衡扩展到众多的新兴领域。各种计量要求的精确程度及实施的复杂性与日俱增,计量已成为一门独立的学科。特别是在今天高新技术迅速发展的时代,计量更是无所不在和不可缺少的科学手段。今天计量测试技术广泛应用于工农业生产、国防建设、科学研究、国内外贸易、医疗卫生,以及人民生活的各个领域。在现代社会中,人们把人、管理、原材料、工艺装备、计量测试技术列为工业生产的五大支柱。计量测试技术也是整个科学技术和国民经济的一项重要技术基础。

在原国家计量局和现国家技术监督局的支持下,由中国计量出版社组织编写的《计量测试技术手册》即将出版。这套手册由100多位长期从事计量测试工作的专家、教授,历经7年编纂而成。该套手册总结了我国40多年来计量科学研究和实践的经验,吸取了国外先进技术,内容丰富,实用性强。并保持了从事计量工作一向遵循的科学上的严谨性,是适用于各个领域科技人员的工具书。

可以指出,编写的手册是一项组织繁杂,集体辛勤劳动的果实,是对我国计量事业做出了一个卓有贡献。为此,谨向所有付出心血的编者表示敬意。



1995年10月18日

王大珩教授为中国科学院院士、中国工程院院士、中国高科技产业化研究会理事长、何梁何利基金优秀奖获得者。

《计量测试技术手册》编辑委员会

主任委员： 陈宽基

副主任委员： 倪伟清 徐孝恩 李绍贵 房景富 王东宝

委 员： (按姓氏笔画顺序排列)

于 渤	王朋植	王晓莹	史元明	孙维民
师克宽	刘宝兰	刘瑞清	陈小林	陈艳春
何 贡	何伟仁	林宗虎	林鸿初	金士杰
施昌彦	席德熊	徐 鹁	黄秉英	窦绪昕
谢 英	潘君骅	潘秀荣		

本卷编辑委员会

主 编： 何 贡

副 主 编： 陈允昌 花国梁

委 员： (按姓氏笔画顺序排列)

刘瑞清	陈允昌	陆伯印	花国梁	
何 贡	胡国琦	黄福芸		
撰 稿 人： 王承纲	王宝光	王轼铮	毛起广	毕连君
安国振	刘瑞清	陈允昌	陈耀煌	陆伯印
花国梁	何 贡	何晓葵	张万夫	张琳娜
胡国琦	徐孝恩	黄福芸	蒋 壘	樊玉铭

本卷责任编辑： 倪伟清

本卷责任编辑： 刘瑞清 王晓莹

版面设计： 席秀莲

插图设计： 倪 云

封面设计： 齐洪海

前 言

我国的现代计量测试工作,始于本世纪50年代初,经过40多年的积累和发展,已建成具有门类较为齐全,覆盖全国的计量测试技术网络,在生产、科研和经贸中发挥着生产力的作用。计量测试队伍也从计量行业扩展到各技术领域的计量、测试人员,形成宏大的专业大军。作为这一专业领域的知识积累——编写《计量测试技术手册》,既是广大计量测试人员的要求,也为推进计量测试技术转化为生产力所需要。

《手册》旨在成为计量测试人员和技术科研、设计人员案头技术咨询的必备工具书,力求以技术科学性、数据准确性、资料实用性、查阅方便性来组织书稿内容。全书按计量测试技术专业立卷,共13卷,覆盖了这一技术领域的全貌。各卷按各自专业特点,要求做到既独立完整,又相互协调统一。

《手册》是在原国家计量局和现国家技术监督局的支持和帮助下,由中国计量出版社组织编写的,并成立了各卷的编审委员会,得到了中国计量科学研究院和一些科研单位、大专院校的大力支持,有上百名计量测试技术专家、学者参与了编写工作,历经7个多寒暑,为此付出了艰辛的劳动。值此《手册》面世之际,我们谨向支持和参与《手册》编写、编辑出版的所有人员致以敬意!

编写如此浩大又涉及众多学科的《手册》,是一项系统而又细致的工程实践,要做到全面、完整、准确、统一是十分困难的,虽经共同努力,层层把关,也难免存在术语上的不统一,内容上有一定交叉重复,符号不太一致等问题。还会有错漏和不足,诚请广大读者批评指正,以便在《手册》再版和修订中改正。

《计量测试技术手册》编辑委员会

1995年9月

编者的话

人们认识客观世界,是从认识客观物体的几何特征开始的。在现代计量测试中,几何量计量具有基础性,占有重要位置。在各级计量测试部门,几何量的计量所占比重较大,尤其是在机械工业等生产领域,更是如此。

“工欲善其事,必先利其器”。本卷在第1章“绪论”之后,分三章介绍几何量的基本计量器具及有关问题。第2章专门介绍传感器,传感器是拾取各种物理量(不限于几何量)信息的直接手段,是近代计量技术发展的一个重要方面。本章内容对手册的后续各卷,也有参考价值。

在第4章“常用几何量计量器具及仪器”的前面,安排了第3章“几何量计量器具的基本组件和系统”,简要介绍了几何量计量器具中的典型机构和光学系统,以及常用电路,以帮助有关人员更好地了解各种计量仪器,能有所比较、鉴别,从而能更好地使用仪器进行测试工作。工作中有时需要自行设计一些测量装置和器具,本章对此亦有参考价值。

第5章介绍长度计量基准及尺寸传递,包括光波波长、量块和线纹尺等及其检定。这是几何量计量的基础。

几何量包括长度与角度,实用中常分为长度尺寸、形状、相互位置和表面粗糙度。本卷第6章至第9章分别介绍了长度,包括大尺寸和小尺寸;角度,包括圆分度;形状和位置及表面粗糙度的测量方法和一些专用测量器具。

书中将几何量测试中最主要的典型件——螺纹(包括丝杠及管螺纹)和齿轮(包括圆锥齿轮及蜗轮蜗杆)的测量,列为第10章和第11章。

第12章介绍激光技术在几何量测试中的应用。在各种较新的测试技术中,激光技术应用面较广,也比较成熟。其他一些新技术的应用,则分散在本卷各有关章节中介绍。

由于我们水平有限,书中不妥和谬误之处在所难免,尚望读者不吝指正。

编者

1995年8月

目 录

第1章 绪 论

- 1 长度计量基准及其沿革 (1)
- 2 长度计量的量值传递 (4)
- 3 我国几何量计量测试概况 (4)

第2章 几何量计量测试中常用的传感器

- 1 电感式传感器 (6)
 - 1.1 类型与转换电路示例 (6)
 - 1.2 结构示例 (9)
- 2 电容式传感器 (9)
 - 2.1 电容式传感器类型与转换电路 (9)
 - 2.2 结构示例与使用注意问题 (13)
- 3 电触点式传感器 (13)
 - 3.1 类型与配用电路 (13)
 - 3.2 主要误差及其测定方法 (15)
- 4 压电式传感器 (15)
 - 4.1 压电效应与压电材料 (15)
 - 4.2 压电式传感器的晶片连接与等效电路 (16)
 - 4.3 结构示例及使用特点 (17)
- 5 光电式传感器 (18)
 - 5.1 几种常用的光电传感器 (18)
 - 5.2 光电传感器常用的转换电路 (20)
- 6 光栅式传感器 (21)
 - 6.1 计量光栅的类型与常用光学系统 (21)
 - 6.2 莫尔条纹的特性及种类 (23)
 - 6.3 应用光栅式传感器需要注意的问题 (25)
- 7 感应同步器 (26)
 - 7.1 类型与绕组结构 (26)
 - 7.2 工作原理与输出信号处理方式 (28)
 - 7.3 安装与接长 (29)
- 8 磁栅式传感器 (30)
 - 8.1 磁栅 (31)
 - 8.2 磁头 (32)
 - 8.3 信号处理方式 (32)

- 9 激光式传感器 (34)
 - 9.1 激光器与激光特性 (34)
 - 9.2 各种激光传感器 (34)
- 10 射线式传感器 (36)
 - 10.1 射线测厚原理和方式 (37)
 - 10.2 常用的射线源 (38)
 - 10.3 常用的探测器 (39)
- 11 光纤传感器 (39)
 - 11.1 光纤的结构和种类 (39)
 - 11.2 光纤传感器的分类 (40)
- 12 其他传感器 (41)

第3章 几何量计量器具的基本组件和系统

- 1 量仪的机械构件 (43)
 - 1.1 导轨 (43)
 - 1.2 支承 (49)
 - 1.3 轴系 (53)
 - 1.4 传动放大机构 (53)
 - 1.5 测力机构 (61)
- 2 量仪的光学系统 (63)
 - 2.1 准直及望远系统 (63)
 - 2.2 显微系统 (65)
 - 2.3 干涉系统 (66)
 - 2.4 投影系统 (67)
 - 2.5 瞄准定位系统 (68)
 - 2.6 光学机械细分系统 (70)
- 3 量仪的基本电路 (73)
 - 3.1 模拟式电路 (74)
 - 3.2 数字式电路 (83)
 - 3.3 抑制干扰技术 (99)
 - 3.4 量仪基本电路的发展趋势 (102)

第4章 常用几何量计量器具及仪器

- 1 机械式计量器具 (103)
 - 1.1 游标计量器具 (103)
 - 1.2 螺旋副计量器具 (105)
 - 1.3 机械式测微仪 (110)

2	光学计量仪器	(118)
2.1	显微镜类光学计量仪器	(118)
2.2	投影类光学计量仪器	(133)
2.3	自准直与光学杠杆类光学计量仪器	(138)
2.4	光波干涉类光学计量仪器	(144)
3	电动量仪	(152)
3.1	电动测微仪	(152)
3.2	圆度仪	(160)
3.3	光电瞄准装置	(164)
3.4	测厚仪	(168)
3.5	主动测量仪	(171)
3.6	自动分选机	(172)
4	气动测量技术	(172)
4.1	气动测量原理和仪器的工作特性	(172)
4.2	几种常见气动量仪的结构和工作原理	(176)
4.3	气动测量头结构和一般设计	(183)
4.4	气动测量应用示例	(191)
4.5	气动量仪使用注意事项和一般故障排除	(192)
5	三坐标测量机	(194)
5.1	概述	(194)
5.2	测量系统	(203)
5.3	三坐标测量头	(206)
5.4	数据处理及程序编制	(212)
5.5	坐标测量机的准确度	(218)
5.6	坐标测量机的检定	(222)
5.7	三坐标测量机的应用	(222)
6	利用微机改造现有量仪示例	(232)
6.1	现有量仪的改造	(232)
6.2	量仪改造示例	(233)

第5章 长度计量标准及其检定

1	波长检定	(237)
1.1	波长标准	(237)
1.2	空气折射率	(240)
1.3	拍频测量波长	(241)
1.4	用法布里-珀罗干涉仪检定波长	(244)
1.5	用直接计数干涉条纹检定波长	(246)
1.6	波长检定的准确度	(248)
2	量块及其检定	(248)
2.1	基本概念	(248)
2.2	量块的技术要求	(254)
2.3	量块的检定	(258)

3	线纹尺及其检定	(266)
3.1	概述	(266)
3.2	标准线纹尺的类型、用途及技术要求	(267)
3.3	标准线纹尺的检定	(269)

第6章 长度尺寸的测量

1	常用尺寸段的尺寸测量	(276)
1.1	尺寸及其精度	(276)
1.2	用光滑极限量规检验轴、孔尺寸	(278)
1.3	用通用计量器具测量长度尺寸	(284)
1.4	交点尺寸和相关尺寸的测量	(301)
1.5	长度尺寸的自动检测	(311)
2	大尺寸测量	(315)
2.1	概述	(315)
2.2	大尺寸的直接测量	(316)
2.3	大尺寸的间接测量	(322)
2.4	用极限量规检验大尺寸	(332)
2.5	大尺寸计量器具的选择	(334)
3	小尺寸测量	(335)
3.1	小尺寸件及其测量的特点	(335)
3.2	细丝直径测量	(336)
3.3	小孔直径测量	(343)
3.4	薄膜厚度测量	(347)
3.5	镀层与涂层厚度测量	(352)
3.6	小宽度测量	(365)
3.7	小尺寸测量技术的发展简介	(371)

第7章 角度与圆分度测量

1	基本概念	(374)
1.1	角度单位与换算	(374)
1.2	平面角计量器具检定系统	(375)
2	圆分度误差及其测量方法	(375)
2.1	圆分度误差表示法	(375)
2.2	圆分度误差基本测量法	(378)
3	平面角工作计量器具	(397)
3.1	圆分度计量器具	(397)
3.2	常用角度计量器具	(411)
4	平面角主要计量标准器具及检定	(425)
4.1	面角度类	(425)
4.2	线角度类	(450)
4.3	小角度类	(460)
5	角度测量	(464)

5.1 零件平面间夹角的测量	(464)
5.2 圆锥角测量	(465)
5.3 光学零件角度测量	(469)

第8章 形状和位置误差测量

1 形状误差测量	(476)
1.1 形状公差与形状误差	(476)
1.2 直线度误差的测量	(477)
1.3 平面度误差的测量	(493)
1.4 圆度误差的检测	(502)
1.5 圆柱度误差的检测	(513)
1.6 轮廓度误差的检测	(518)
2 位置误差测量	(527)
2.1 位置公差与位置误差	(527)
2.2 平行度误差的测量	(529)
2.3 垂直度误差的测量	(534)
2.4 倾斜度误差的测量	(539)
2.5 同轴度误差的测量	(543)
2.6 对称度误差的测量	(545)
2.7 位置度误差的测量	(549)
2.8 跳动的测量	(552)
2.9 位置量规	(554)

第9章 表面粗糙度测量

1 基本概念	(561)
1.1 表面微观几何形状的特性	(561)
1.2 评定基准	(561)
1.3 取样长度和评定长度	(563)
1.4 评定表面粗糙度的参数	(565)
1.5 表面粗糙度测量方法综述及测量的基本原则	(571)
2 针描法测量表面粗糙度	(573)
2.1 针描法的测量原理和特点	(573)
2.2 触针式测量仪器(轮廓仪)的主要类型	(576)
2.3 触针式仪器的调整和使用	(578)
2.4 粗糙度参数的测量及处理方法	(580)
3 显微干涉法测量表面粗糙度	(582)
3.1 显微干涉法的测量原理和类型	(582)
3.2 干涉显微镜的使用和调整	(584)
3.3 测量粗糙度的方法	(585)
4 光切法测量表面粗糙度	(587)
4.1 光切法测量原理	(587)
4.2 仪器放大倍率的确定	(588)

4.3 测量粗糙度的方法	(588)
5 比较法检验表面粗糙度	(589)
5.1 表面粗糙度比较样块	(589)
5.2 比较样块的检定	(594)
6 表面粗糙度的其他检测方法	(594)
6.1 印模法间接测量	(594)
6.2 光散射技术	(595)
6.3 电容测量法	(597)
6.4 三维表面形貌测量	(598)
7 表面波纹度的评定和测量	(600)
7.1 表面波纹度的评定	(600)
7.2 表面波纹度的测量方法	(602)

第10章 螺纹的检验与测量

1 概述	(603)
2 普通螺纹的标准系列、基本牙型和基本尺寸	(603)
2.1 普通螺纹的标准系列	(603)
2.2 普通螺纹的基本牙型和基本尺寸	(603)
3 梯形螺纹新标准系列、基本牙型和基本尺寸	(604)
3.1 梯形螺纹新标准系列	(604)
3.2 梯形螺纹的基本牙型和基本尺寸	(604)
4 锯齿螺纹的标准和牙型尺寸	(604)
4.1 锯齿螺纹的标准	(604)
4.2 牙型尺寸	(605)
5 管螺纹的标准和基本尺寸	(606)
5.1 概述	(606)
5.2 圆锥管螺纹的标准和基本尺寸	(607)
5.3 圆锥管螺纹的公差	(609)
5.4 GB 7306—87管螺纹的标记	(610)
6 螺纹检测的基础知识	(611)
6.1 螺纹检测与作用中径	(611)
6.2 普通螺纹公差带位置、公差等级和旋合长度	(613)
6.3 螺纹牙底形状	(613)
6.4 螺纹的标记	(614)
7 用螺纹量规检验螺纹	(615)
7.1 螺纹极限量规在螺纹检验中的作用	(615)
7.2 普通螺纹量规标准的分类	(615)
7.3 螺纹量规的名称、代号、功能及特征	(615)
7.4 检验梯形螺纹的螺纹量规	(618)
7.5 螺纹量规的使用	(623)

8	圆柱外螺纹参数的机械接触测量法	(624)
8.1	大径和小径的测量	(624)
8.2	中径的测量	(626)
9	圆柱外螺纹参数的光学测量法	(638)
9.1	中径的测量	(639)
9.2	螺距的测量	(640)
9.3	牙型半角的测量	(640)
10	内螺纹的测量	(640)
11	管螺纹的检验和测量	(649)
11.1	圆锥管螺纹的检验	(649)
11.2	圆锥管螺纹单参数的测量	(657)
12	精密丝杠的测量	(665)
12.1	梯形丝杠的标准	(665)
12.2	丝杠测量仪器结构选择的一般原则	(667)
12.3	丝杠螺距的测量	(668)
12.4	螺旋线误差的离散采样测量	(669)
12.5	用精密丝杠动态检查仪测量丝杠	(669)
13	滚珠丝杠的测量	(671)
13.1	滚珠丝杠的牙型种类及参数定义	(671)
13.2	滚珠丝杠副主要测量项目的公差要求	(672)
13.3	滚珠丝杠的测量	(673)

第11章 齿轮测量

1	圆柱齿轮的测量	(677)
1.1	齿圈径向跳动的测量	(684)
1.2	齿距偏差和齿距累积误差的测量	(685)
1.3	基节偏差的测量	(697)
1.4	齿形误差的测量	(699)
1.5	齿向、螺旋线和接触线的测量	(712)
1.6	齿厚的测量	(717)
1.7	公法线长度的测量	(731)
1.8	圆柱齿轮的综合测量	(737)
1.9	齿轮整体误差测量法	(742)
2	圆锥齿轮的测量	(756)
2.1	圆锥齿轮的基本参数、几何尺寸的计算和精度规范	(756)
2.2	圆锥齿轮的单项测量	(774)
2.3	圆锥齿轮的综合测量	(784)
2.4	圆锥齿轮的滚动检查	(789)

3	蜗杆与蜗轮的测量	(794)
3.1	蜗杆蜗轮传动的基本知识	(794)
3.2	蜗杆的测量	(804)
3.3	蜗轮的测量	(811)
3.4	精密蜗杆副传动的测量	(813)
3.5	蜗杆副接触斑点的检查	(813)

第12章 激光技术在长度计量中的应用

1	激光的基本概念	(816)
1.1	激光器的组成	(816)
1.2	激光器的工作原理	(816)
1.3	激光器的分类	(816)
1.4	激光的特性	(817)
2	长度计量中的常用激光器件及其控制技术	(821)
2.1	气体激光器(表12-7)	(821)
2.2	固体激光器(表12-8)	(822)
2.3	半导体激光器(表12-9)	(822)
2.4	激光控制技术	(823)
3	激光准直测量	(828)
3.1	激光准直仪	(828)
3.2	提高准直精度的主要方法	(833)
3.3	激光准直仪的特点及类型	(835)
3.4	激光准直仪的扩展应用	(835)
4	激光干涉测量技术	(837)
4.1	激光干涉仪的种类及特点	(837)
4.2	单频激光干涉仪	(841)
4.3	双频激光干涉测量	(847)
4.4	干涉仪的精度改善及检验	(852)
4.5	剪切干涉测量	(854)
4.6	全息测量	(859)
4.7	散斑干涉测量	(862)
5	激光衍射测量	(865)
5.1	光衍射	(865)
5.2	波带板	(866)
5.3	衍射测量的基本方法	(867)
5.4	衍射测量精度与量程	(869)
6	激光测距	(869)
6.1	脉冲测距技术	(869)
6.2	相位测距技术	(869)
	主要参考文献	(871)

第 1 章 绪 论

1 长度计量基准及其沿革

计量单位是人们选定用于计量某类可测量大小的一种尺度,它的量值由该单位的定义决定。体现单位定义所给定量值的具有最高准确度的实物标准,叫做该单位的计量基准。

为了保证计量单位的量值固定不变,在确定计量单位的定义时,应当采用客观存在的固定量作为赋值的标准。通常可供选用的固定量,有以某一实物所具有的量作为标准,称为实物量标准,以及以自然界天然存在的量作为标准,称为自然量标准。

“米”是长度量的计量单位,按米定义复现米量值的实物标准就是长度计量基准。

历史上米的定义曾有过多次改动,因而长度计量的实物标准也有过多次变动,但米的量值大小基本上没有改变,只是体现这一量值的依据有所不同而已。

表 1-1 是米定义及长度计量基准的沿革情况。

表 1-1 米定义及长度计量基准的沿革

定义年分	定 义 内 容	定义性质	计 量 基 准 名 称
1790 年	经过巴黎的地球子午线自北极至赤道这一段弧长的一千万分之一	自然量标准	档案米尺
1889 年	米的长度等于在冰点温度下米原器两端刻线间的距离	实物量标准	国际米原器
1960 年	米的长度等于 ⁸⁶ Kr 原子的 2p ₁₀ 和 5d ₅ 能级之间跃迁所对应的辐射在真空中的波长的 1 650 763.73 倍	自然量标准	由 ⁸⁶ Kr 同位素光谱灯及专用装置所产生谱线的波长
1984 年	米是光在真空中在 1/299 792 458 秒的时间间隔内所行进的路程长度	基本物理常数	由五种激光辐射或两类同位素光谱灯辐射所产生谱线的波长

1790 年法国国民议会采纳了达特兰提出的“以经过巴黎的地球子午线自北极至赤道这一段弧长的一千万分之一为 1 米”的建议。1799 年巴黎科学院完成了从法国的敦尔克经巴黎到西班牙的巴尔雪隆纳这一段子午线的实测工作,并按测量结果所得的 1 米长度制作了一支米尺,作为长度计量基准,这就是第一个米定义的实物标准——档案米尺。

1889 年第一届国际计量大会通过按档案米尺长度制作的国际米原器取代档案米尺,作为国际长度计量基准。同时,将米定义改为:“米的长度等于在冰点温度下,米原器两端刻线间的距离”。

这次米定义的更改,是因为档案米尺年久受损,难于继续用作长度计量基准的缘故。考虑到档案米尺的受损原因,国际米原器在材料选用和米原器的结构上采取了一系列的措施,以使米原器具有更为优越的性能。

国际米原器由 90% 铂和 10% 铱的合金制成,这种合金具有良好的分子稳定性、较高的硬度、弹性和异常高的抗氧化性能。米原器的横断面呈 X 形结构(图 1-1)。这种截面结构的特点是可用最少的材料取得最大的刚度,而且它与周围空气有最大的接触面积,可使温度迅速达到平衡状态。为了保证米的长度不受尺杆自重变形的影响,标志“米”的线条就刻在尺杆两端的中性面 O—O 上(见图 1-1),并规定米原器应支承在尺中部相距为 0.559 38 倍尺长的两个位置对称的白塞尔点上。

但是用实物量标准定义的“米”,还存在着许多问题,不仅因为米原器这样的实物仍然有如档案米尺那样存在着遭受损坏和丢失的可能,而且由于刻线工艺和测量方法等方面的不尽完善,使得米原器的不确定度最多只能保

持在 $\pm 1.1 \times 10^{-7}$ 量级(即 $\pm 0.11 \mu\text{m}$)。这样的基准精度根本不能满足现代科学技术的要求。因此,寻找新的自然量标准取代现有的实物量标准重新定义米就显得非常必要。

1952年国际计量委员会设立了米定义咨询委员会,从事新的米定义的研究工作。远在1927年,人们就发现在原子结构中,两个固定能级之间的能量差是一个常数。当光的辐射频率 f 和光速 c 一定时,它所产生的光波波长 λ 也是一个定值,即

$$\lambda = c/f$$

可见,利用光波波长这一自然量标准,取代米原器的实物量标准来定义米,是很有前途的。

到1960年,研究取得显著成果:已探明 ^{86}Kr 橙黄谱线具有最窄的和最对称的辐射谱线,它能在最小扰动下产生,并可用其它方法进行测量,而且这一单色光谱线的波长值只与其辐射频率和真空中的光速有关。如果光速为一定值,则波长就是一个不随时间变化的值,因而可以在任何时间、任何地点按其产生的条件加以复现,适于作为新定义的自然量标准。故而在1960年第十一届国际计量大会上通过了“米的长度等于 ^{86}Kr 原子的 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射在真空中的波长的1 650 763.73倍”这一定义。

根据上述定义,该谱线在真空中的波长值为 $\lambda_{\text{真空}} = 1\text{m}/1\ 650\ 763.73 = 0.605\ 780\ 201 \mu\text{m}$ 。复现米这一定义的计量基准是 ^{86}Kr 同位素光谱灯装置(图1-2)。

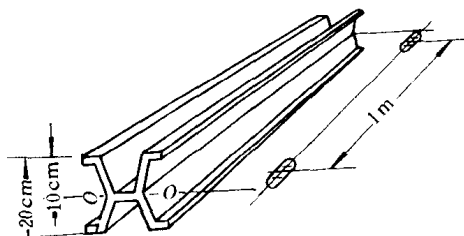


图 1-1 国际米原器的结构

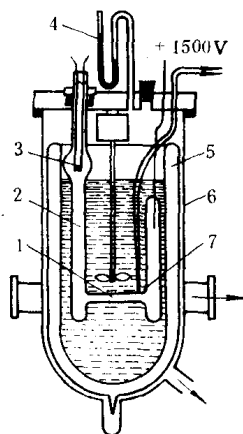


图 1-2 ^{86}Kr 同位素光谱灯装置

1—管的发光毛细管;2—氮气放电管;3—加热板;
4—压力计;5—杜瓦瓶;6—几何密封腔;7—热电偶

为了保证米量值的复现,在1960年国际计量大会通过的决议中指出,应以 ^{86}Kr 同位素光谱灯为光源,在专用的装置上用干涉法来进行,并对辐射条件做了严格的规定。只有满足这些规定时,有关原子谱线的位移、多普勒增宽和自吸收等一系列影响稳定性和复现性的各种效应将相互抵偿,从而使所发射出的辐射波长与米定义规定波长的符合性优于 1×10^{-8} 。如果能分辨谱线轮廓的极大值和重心值,总的不确定度将可提高到 $\pm 4 \times 10^{-9}$ 。

^{86}Kr 同位素灯管及专用装置的制作方法是:首先将 ^{86}Kr 充入灯管的毛细管1(图1-2),然后用液氮8冷却至 $50 \sim 60 \text{K}$ 。 ^{86}Kr 原子的激发是在电流通过同位素时发生的。为了冷却,将灯管浸于充满液态氮的杜瓦瓶5中,将发光气体管的电极通以1500V的直流电,用电机带动叶片搅动液氮,以改善冷却条件。整个装置用外壳6加以密封,用真空装置保持壳内的真空度,同时用热电偶7测量发光气体管的管壁温度,以满足规定的温度条件。

1982年,国际计量委员会鉴于原有的米定义已不能适应一些测量工作的准确度要求,在当年6月召开了第七届米定义咨询委员会和第八届单位咨询委员会,审议及通过了这两个委员会组成的联合工作组所提出的更改米定义的具体建议。

早在1962年,米定义咨询委员会就曾号召有能力的国家进行有关用激光取代现行长度基准的研究。这是因为自激光问世以来,由于激光具有方向性好、单色性好和光强大的特点,特别是激光辐射的光谱宽度可以小到 0.000lm^{-1} (相当于 30kHz),在用干涉法测量长度时,即使光程差大至几千米的距离,仍然可以观察到对比非常清晰的干涉图像。这样一些特点显示出激光比 ^{86}Kr 原子辐射谱线要优越得多。但是在当时,激光频率的稳定性和

复现性问题尚未得到解决。经过几年的努力,已经掌握了激光的一些稳频技术,包括利用兰姆凹陷稳频、甲烷吸收稳频、信号发生器与压电陶瓷调制稳频以及利用放大器控制第二个压电陶瓷调制稳频等方法。1973年,米定义咨询委员会建议可用碘或甲烷饱和吸收稳定的氦氖激光的波长作为长度计量的副基准,它们的波长分别为632 991 398.1 fm和3 392 231 397.1 fm。这一建议已为1975年第十五届国际计量大会所采纳。1979年,米定义咨询委员会又建议推荐用碘稳定的0.612 μm 氦氖激光和碘稳定的0.515 μm 氩离子激光的波长作为长度测量的参考波长或工作标准,它们的波长值分别为514 673 466.2 fm和611 970 769.8 fm。

至此,米定义咨询委员会认为,利用现有的秒定义的高度准确性和固定的光速值(真空中的光速值已被推荐为: $c=\lambda f=299\,792\,458\text{ m/s}$)重新定义米,将会使长度计量基准的准确度进一步提高。因此,在1984年召开的国际计量大会上,批准了米的新定义是:“米是光在真空中在 $1/299\,792\,458\text{ s}$ 的时间间隔内所行进路程的长度”。同时规定了米定义的三种复现方法是:

①用于天文、大地等测量工作的复现方法,应根据 $l=ct$ 关系式,由所测出的时间 t 与给定的光速值 c 复现长度 l ;

②用于实验室计量工作的复现方法是根据 $\lambda=c/f$ 关系式,由所测出的频率 f 与给定的光速值 c 复现波长值 λ ;

③用于一般测量工作的复现方法是可直接使用米定义咨询委员会推荐使用的五种激光辐射和两类同位素光谱灯辐射的任一种来复现。

所推荐的五种激光辐射是:

①甲烷吸收稳频的氦氖激光辐射($\text{CH}_4, \nu_3, \text{P}(7), \text{F}_2^{(2)}$)

$$f=88\,376\,181\,607\text{ kHz}$$

$$\lambda=3\,392\,231\,297.0\text{ fm}$$

总的相对不确定度为 1.3×10^{-10} 。

②碘吸收稳频的染料激光或1.15 μm 氦氖激光的倍频辐射($^{127}\text{I}_2, 17-1, \text{P}(62), \text{o}$)

$$f=520\,206\,808.53\text{ kHz}$$

$$\lambda=576\,294\,760.25\text{ fm}$$

总的相对不确定度为 6×10^{-10} 。

③碘吸收稳频的氦氖激光辐射($^{127}\text{I}_2, 11-5, \text{R}(127), i$)

$$f=473\,612\,214.8\text{ MHz}$$

$$\lambda=632\,991\,398.1\text{ fm}$$

总的相对不确定度为 1×10^{-9} 。

④碘吸收稳频的氦氖激光辐射($^{127}\text{I}_2, 9-2, \text{R}(47), \text{o}$)

$$f=489\,880\,355.1\text{ MHz}$$

$$\lambda=611\,970\,769.8\text{ fm}$$

总的相对不确定度为 1.1×10^{-9} 。

⑤碘吸收稳频的氩离子激光辐射($^{127}\text{I}_2, 43-0, \text{P}(13), a_3$)

$$f=582\,490\,603.6\text{ MHz}$$

$$\lambda=514\,673\,466.2\text{ fm}$$

总的相对不确定度为 1.3×10^{-9} 。

所推荐使用的两类同位素光谱灯辐射是:

①对应于 ^{86}Kr 原子在 $2p_{10}$ 及 $5d_5$ 能级之间跃迁的辐射

$$f=494\,886\,516.5\text{ MHz}$$

$$\lambda=605\,780\,210.2\text{ fm}$$

总的相对不确定度为 4×10^{-9} 。

② ^{198}Hg 和 ^{114}Cd 原子的辐射

从上述可知,1984年通过的米定义是一个开放型的、废除单一计量基准的、把定义与单位的复现方法相分离的新型定义。这样做,可以避免米的复现受某一基准的准确度或某种基准物质的性能影响,而且复现的准确度与

定义本身无关,有利于根据测量的需要选择最合适的复现方法。

2 长度计量的量值传递

量值传递是法制计量的主要工作内容,也是依法进行管理的一个重要项目。

量值传递管理包括国家法定计量基准和各级法定计量标准的管理;计量检定系统的管理和计量器具检定规程的管理。

为了保证计量单位量值的准确可靠,国家采用法律的形式,明确规定各项计量单位的量值如何从国家计量基准经各级法定计量标准传递到工作用计量器具的量值传递路线,这就是计量检定系统。计量检定系统通常用图表的形式来表示,这样的图表称之为计量检定系统表。

为了保证量值传递的准确可靠并符合要求,国家采用法律的形式,把实现量值传递的检定工作也给予明确的规定,包括应达到的计量特性指标、操作的步骤和方法,以及检定结果的处理等内容,这就是检定工作必须遵循的技术规范——计量器具检定规程。

我国将计量器具按其用途和准确度的不同,划分为三个层次,即:计量基准器具、计量标准器具和工作计量器具。

计量基准器具是在我国计量器具中具有最高量值复现准确度等级的计量器具,不论该单位是否属于基本单位,只要其复现准确度为国内最高,都可以向国家计量行政主管部门提出作为计量基准器具的申请,经国家计量行政主管部门审定认可,即可获得国家计量基准器具的法律地位。我国计量法规定:根据需要的不同,有的计量基准要设立副基准或工作基准,有的则可以不予设立。

我国已建立的长度计量基准有线纹、量块、平面角、表面粗糙度、平面度、圆锥量规锥度、齿轮渐开线、螺旋线和锥螺纹等9项国家计量基准。为了保证这9项计量单位量值传递的准确可靠,我国计量行政主管部门已分别批准建立线纹计量器具检定系统(JJG 2001—87)、圆锥量规锥度计量器具检定系统(JJG 2002—87)、表面粗糙度计量器具检定系统(JJG 2018—89)、平面度计量器具检定系统(JJG 2019—89)、长度计量器具(量块)检定系统(JJG 2056—90)、齿轮螺旋线计量器具检定系统(JJG 2055—90)和平面角计量器具检定系统(JJG 2057—90)。

3 我国几何量计量测试概况

我国有光辉灿烂的古代文明,计量测试技术就是这个文明的重要组成部分,而作为计量测试技术重要组成部分的几何量计量测试,更有着悠久的发展历史。早在商代,我国即开始有象牙尺。秦始皇统一度量衡制,已有互换性生产的萌芽,这从西安秦兵马俑出土的箭簇和弩机(远射箭簇的扳机)已得到证实,而这又是要有相当水平的几何量测试技术为依托的。但由于长期封建统治和帝国主义的侵略和压迫,计量测试技术和其他科学一样,未能得到应有的发展,到近代,已远落后于西方的发达国家。

新中国成立后,经过40多年的努力,我们的计量测试工作,已走完西方国家100余年的发展历程,取得了很大成就。就几何量计量测试来看,主要的基准和标准(包括“米”定义的复现)已经建立,经国际对比,已达一般国际水平,有的项目还处于先进地位。全国建立了比较完善的计量机构,有统一的量值传递网。我国不仅可生产国民经济所需的一般检测仪器,还先后研制成功了许多先进量仪,有的已达国际先进水平。近年我国各工矿企业的计量测试工作也有很大发展,解决了生产中的许多重大难题,取得了显著的经济效益,对保证产品质量,扩大对外贸易,都起了很好的作用。1985年我国颁布了计量法,使计量测试工作走上了法制的轨道。

但与先进国家相比,我们仍有差距。在几何量计量测试领域,我国虽有一些项目达到国际先进水平,但从生产第一线全面来看,检测工作仍较薄弱。测量范围多集中在一般通用的中间量程,对大尺寸、小尺寸(包括重型机械制造的几何量检测和纳米技术等等),仍有较大困难。新技术的应用面有待扩大,水平也有待提高,动态检测技术及其应用,还处于初级阶段等等。因此,大力发展包括几何量在内的计量测试技术,实为当务之急。

第2章 几何量计量测试中常用的传感器

本章所介绍的传感器,是一种把被测工件的几何量转换为与之有确定对应关系的电信号的测量装置。这种电信号应具有一定精度,且便于进行处理。

传感器是各种测量仪器和自动控制系统中的关键部件。它一般由敏感元件、变换元件和转换电路3部分组成。敏感元件是直接感受被测量,并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。变换元件是将敏感元件输出的某一物理量,变换成便于转换的电路参数量的元件。转换电路是把变换元件输出的电路参数量,转换成电量的电路。

对传感器的一般要求是:可靠性、静态精度、动态特性、长时间工作的稳定性、温度稳定性、抗干扰能力均应符合要求,此外还应结构简单、使用维修方便、低成本和低能耗等。

传感器的种类很多,有各种不同的分类方法,而几何量计量测试中常用的传感器按物理原理可分为:电感(互感)式、电容式、电触点式、压电式、光电式、光栅式、磁栅式、激光式、感应同步器和射线式等,如表2-1所列。

表 2-1 几何量测试中常用的传感器

类型	示值范围 (mm)	示值误差 ^①		对环境的要求	特 点	应用场合
		长度(μm)	角度			
电感 互感	$\pm(0.003\sim 1^{②})$	示值范围在 0.1mm以下; $\pm(0.05\sim 0.5)$		要求低,抗干扰能力 强;有密封结构	使用方便;信号可进行各 种运算处理;能给出示值和发 出分组信号;有零点残余电压	静、动态测量
电 容	$\pm(0.003\sim 1^{②})$	与电感传感器 相似		易受外界干扰,要有 良好的屏蔽;有密封结构	高放大倍数,灵敏度高;频 率特性好;信号处理与电感传 感器相似;零点残余电压小	可用于自动测 量;测带磁工件或 电缆芯偏心等特殊 参数;可不接触 测量
电触点	0.2~1	$\pm(1\sim 2)$		对振动较敏感,一 般应有密封结构	结构和电路简单;反应速 度快;测力大;只能指示被测参 数是否达到某一定值	自动分选机和 主动测量仪
光 电	按应用情况而定			易受外界杂光干 扰,要有防护罩	便于实现非接触测量;反应 速度快	检测外观、小 孔、复杂形状等特殊 场合,或与其他 原理结合应用
光 栅	大位移	$\pm(0.2+2\times 10^{-6}L^{③})$	$\pm 0.5''$	油污、灰尘影响工 作可靠性,应有防护 罩	信号易数字化;大量程长度 测量仪准确度低于激光传感 器,角位移测量准确度很高	大位移静态与 动态测量,程控数 控机床中用作测 量元件
激 光	大位移	$\pm(0.1+0.1\times 10^{-6}L^{③})$	$\pm 0.1''$	环境温度、湿度、 气流等对稳定性有 影响	信号易数字化,准确度很高	大位移静态与 动态测量;准确度 要求高,测量条件 好
感 应 同步器	大位移	$\pm 2.5/250\text{mm}$	$\pm 1''$	对环境要求低	信号易数字化;结构简 单;接长方便	同光栅
磁 栅	大位移	$\pm(2+5\times 10^{-6}L^{③})$	$\pm 5''$	易受外界磁场影 响,要有磁屏蔽	信号易数字化;结构简 单;录磁方便;成本低	同光栅
射 线	0.005~300	$\pm(1+1\times 10^{-2}L^{③})$		受温度影响大(指 电离室)	非接触测量	轧制板材、带材 和镀(涂)层厚度 的自动测量

①指利用该原理的测量装置可能达到的示值误差;

②特殊设计,示值范围可达到100mm以上;

③L指被测长度,以毫米计。

1 电感式传感器

电感式传感器按照变换方式的不同可分为自感式和互感式两种类型。它们是利用线圈自感 L 和互感 M 随被测参数变化而变化的特性,将自感量 L 或互感量 M 接入一定的转换电路便可输出电信号的一种传感器。因自感常称电感,故自感式传感器常称为电感式传感器。互感式传感器常做成差动变压器形式,故互感式传感器又称为差动变压器式传感器。

线圈自感 L 和线圈间互感 M 可分别按下式计算(见表 2-2 中的自感传感器和互感传感器气隙型的原理图):

$$L = N^2 / R_m$$

$$M = N_1 N_2 / R'_m$$

式中, N 、 N_1 、 N_2 为各线圈的匝数; R_m 、 R'_m 为各磁路的总磁阻。

$$R_m = R_F + 2\delta / \mu_0 S$$

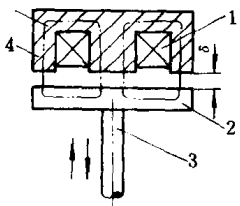
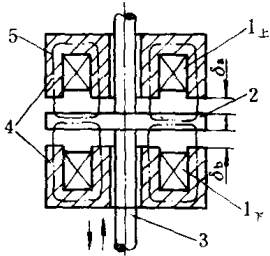
其中, R_F 为磁路中导磁材料的磁阻,其值很小,可忽略不计; δ 为空气隙厚度; S 为空气隙面积; μ_0 为空气导磁率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-9} \text{H/cm}$ 。

电感式传感器的特点是准确度高,抗干扰能力强,性能稳定,存有零点残余电压;非线性误差在 1% 左右时,示值范围一般在几十微米至几毫米;是长度测量技术中应用最成熟最广泛的一种传感器,也广泛用于能变换成直线位移的各种物理量的测量中。

1.1 类型与转换电路示例

电感式传感器的类型列于表 2-2。与电感传感器配用的转换电路如表 2-3 所列。

表 2-2 电感式传感器的类型

类型	原理图	工作原理	灵敏度	线性范围 (非线性 误差 1%)	总行程	应用
自感式传感器	单线圈式 	被测量引起测杆移动时,气隙厚度 δ 变化引起线圈电感 L 变化	较高 (δ_0 取值小,一般为 0.1 ~ 0.5mm)	$\frac{\delta_0}{10}$ (几十微米)	小 (受 δ_0 限制)	使用逐渐减少,特殊情况还使用
	差动式 	被测量引起测杆移动时,气隙厚度 δ_a 、 δ_b 变化引起上、下线圈的电感 L_a 、 L_b 同时变化	高 是单线圈的二倍	$\frac{\delta_0}{5}$ (几十微米)	小 (受 δ_0 限制)	实际中常用