

MODERN INTERFEROMETRIC MEASURING TECHNIQUE

现代干涉 测量技术

殷纯永 主编

天津大学出版社

现代干涉测量技术

殷纯永

主编

袁惠孚

主审



天 津 大 学 出 版 社

责任编辑：张 颖 赵淑梅

封面设计：庞恩昌

责任校对：刘清娥

图书在版编目 (CIP) 数据

现代干涉测量技术/殷纯永主编. —天津：天津大学出版社，1999. 7

ISBN 7-5618-1004-0

I. 现… II. 殷… III. 干涉测量法-教材 IV. 04-34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 29608 号

出 版 天津大学出版社

出版人 杨风和

地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内 (邮编：300072)

电 话 发行部：022—27403647 邮购部：022—27402742

印 刷 深圳市雅昌印刷有限公司

发 行 新华书店天津发行所

开 本 880mm×1230mm 1/32

印 张 18.75

字 数 602 千

版 次 1999 年 7 月第 1 版

印 次 1999 年 7 月第 1 次

印 数 1—1 500

定 价 50.00 元

现代测试技术丛书

编辑委员会

主任委员： 赵克功 中国计量科学研究院

副主任委员： E. Seiler 德国联邦物理技术研究院
潘必卿 中国计量科学研究院
殷纯永 清华大学
张国雄 天津大学
徐 毅 中国计量科学研究院
胡小唐 天津大学

秘 书 长： 胡小唐

委 员：

中方(按姓氏笔划排序)

方仲彦	王为农	王东生	刘庆纲
刘安伟	刘书桂	朱若谷	汪 燕
陈耀煌	张国雄	张增耀	陆伯印
胡小唐	赵克功	高思田	郭彦珍
郭俊杰	郭继华	徐 毅	徐毓娴
殷纯永	黄文浩	裘惠孚	潘必卿

德方(按姓氏字母排序)

P. Becker	K. Busch	D. Hueser
H. Kunzmann	H. Kupsch	W. Lotze
J. Stuempel	E. Trapet	K. Wendt
G. Wilkening		

序

在中华人民共和国对外经济贸易部(MOFTEC)的领导和组织下,中国计量科学研究院(NIM)于1984年至1990年间得到了德意志联邦共和国联邦经济技术和发展部(BMZ)两个经济技术合作项目的无偿援助。这两个项目是“扩建长度单位实验室”和“扩建电能单位实验室”。德方的合作单位是联邦物理技术研究院(PTB)。

通过中德(NIM与PTB)科学家的合作,在NIM建立的电能与电功率单位国家基准达到了国际先进水平;合作发展了新型稳频激光器和稳频激光技术;NIM从PTB得到了两台碘稳频633 nm激光器、两台碘稳频612 nm激光器、一台碘稳频515 nm氙离子激光器和稳频激光比对的整套测量装置。特别是碘稳频515 nm激光器采用了当代最新的稳频技术,使稳定性提高到 10^{-13} ,复现性提高到 10^{-12} 。当时国际计量大会通过实现米定义的稳频激光参考标准谱线仅有5种,在NIM扩建的长度单位实验室具备了4种。因此,当时我国的长度基准达到了国际领先水平。

为了将已建立的长度基准更好地和迅速地为我国的工业发展服务,1989年国家技术监督局批准中国计量科学研究院再次申请德国无偿援助项目——改善中国机械制造中的计量测试技术。这一项目是“扩建长度单位实验室”的继续。提出这一项目的目的是:(1)将按新米定义建立的我国长度单位“米”的基准迅速地和更好地为我国的工业发展服务;(2)建立我国纳米级的计量标准和大长度计量标准,弥补我国长度计量领域的空白。

在我国对外经济贸易部的领导及支持下,两国政府经济合作混合委员会于1992年批准了此项目,并于1994年9月开始启动。项目中方由国家技术监督局(SBTS)领导,中国计量科学研究院(NIM)执行;德方由联邦物理技术研究院(PTB)领导和执行。项目执行中得到了中国国家自然科学基金委员会和中国国家教育委员会的资助和大力支持。

“改善中国机械制造中的计量测试技术”项目的重点技术内容有以下三方面。

(1)坐标测量技术:重点探索我国坐标测量机计量检定标准的建立

和坐标测量中误差评定方法。

(2)大尺寸形体测量技术:利用当代电子经纬仪探索大尺寸形体测量及其计量校准。

(3)表面和超精细结构测量技术:重点是纳米测量技术及其计量校准。

我们编写的由《现代干涉测量技术》、《三坐标测量机》和《纳米测试技术》组成的现代测试技术丛书,是“改善中国机械制造中的计量测试技术”项目中子项目——“改善中国大学中工业测量技术教材”中的任务。中国多所大学近30余位教授和专家参加了本丛书的写作;德国Aachen大学、Ilmenau大学、Dresden大学、Kassel大学和PTB的多位专家和教授也参加了本丛书的写作。许多德国专家、教授从各方面给予了大力无私的支持,如Aachen大学Tilo Pfeifer教授、Ilmenau大学Gerd Jaeger教授和Kassel大学Wolfgang Holzapfel教授等提供了十分有价值的讲义和论文。另外,PTB的多位专家和教授,如Horst Kunzmann、Franz Waeldele、Klaus Harsch等,都对本丛书的编写和具体内容提出了宝贵意见,提供了有价值的资料,并组织PTB专家及德国大学的教授参加了本丛书的写作。

为了写好本丛书,我们先后召开了5次编委会。编委会确定的丛书写作原则为:(1)丛书应可供大学教学之用和大学以上文化程度的专业技术人员阅读;(2)丛书的重点,应编写80年代和90年代本领域内的新科技成果和作者的新研究成就,避免与国内外同一专业书籍多篇幅的重复;(3)丛书应对本专业的发展方向提出参考建议。德国联邦经济技术和发展部及PTB为写好丛书,还先后两次邀请各书主编和多位作者共14人到德国Aachen大学、Ilmenau大学、Kassel大学、PTB本部(布伦瑞克)和分部(柏林)等考察与访问,目的是了解有关专业技术的现状和发展趋势,并搜集资料。这两次考察对写好这套丛书帮助很大,并对中德大学间交流起到了良好的促进作用。

显然,本丛书在编写中得到了国内外多方面的支持与帮助。但由于我们水平有限,肯定还存在不少缺点和错误,恳望同行及读者给予指正。

赵克功

1999年5月 于北京

Preface

From 1984 to 1990, under the leadership and organization of the Ministry of Foreign Trade and Economic Cooperation of the People's Republic of China the National Institute of Metrology (NIM) of China received disinterested assistance from two projects of economic-technical cooperation of the Ministry of Economic Cooperation and Development of the Federal Republic of Germany. The two projects are "Expansion of the Length Unit Laboratory" and "Expansion of the Electric Energy Unit Laboratory". The German cooperation partner is the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).

Through the cooperation of both Chinese (NIM) and German (PTB) scientists, the national standards of the units of electric energy and electric power have reached the advanced international level; stable-frequency laser and stable-frequency laser technology of a new type have been developed; NIM received from PTB two iodine stable-frequency 633 nm lasers, two iodine stable-frequency 612 nm lasers, one iodine stable-frequency 515 nm argon ion laser and a complete set of measuring apparatus for stable-frequency laser comparison. In particular, the iodine stable-frequency 515 nm laser based on the most sophisticated technology in the world can raise the stability to 10^{-13} , and the reproducibility to 10^{-12} . There were only five kinds of stable-frequency laser reference spectral lines when the definition of the metre was adopted the International Conference on Measurement and Metrology, but there were four kinds of such lines of NIM, and therefore China took the lead in the measurement of length in the world.

For the established standards of length to serve the industrial development in China better and more rapidly, with NIM the approval of the State Bureau of Technical Supervision (SBTS), applied for disinterested assistance from Germany to fund the improvement of the metrical and measuring techniques for the manufacture of machines in China. This project is the continuation of the expansion of the Length Unit Laboratory. The aim of this project is: (1) to have the standards of length unit "metre" established on the basis of the new definition of the metre serve the industrial development quicker and well; (2) to establish the measuring standards at the nm level and the measuring standards of great lengths to bridge the gap in the field of length measurement .

Under the leadership and with the support of the Ministry of Foreign Trade and Economic Cooperation, the mixed committees of economic cooperation in China and Germany approved the project in 1992 and implemented it in September 1994. The executing agency in charge of this project on the Chinese side is the National Institute of Metrology (NIM) under the leadership of the State Bureau of Technical Supervision (SBTS), and the German executing agency is the Physikalisch-Technische Bundesanstalt. The project has been funded and supported by the National Natural Sciences Foundation and the State Education Commission of China in the course of execution.

The major techniques in the project of the "improvement of the metric and measuring techniques in the manufacture of machines in China" are: (1) coordinate measuring techniques, with emphasis placed on the establishment of standards for examination and determination of the measurement by coordinate measuring machines and the methods of evaluation of the errors in the coordinate measurements; (2) measuring techniques for large-sized bodies to study the measurement and calibration of large-sized bodies by modern electronic theodolites; (3) measuring techniques for surfaces and super-fine structures with

emphasis being placed on the measuring technique at the nm level and calibration.

The modern measuring and testing technique series written by us consists of ***Modern Interferometric Measuring Technique***, ***Coordinate Measuring Machines***, and ***Nanometrology***. They are the results of "improving the textbooks of the industrial measuring technique for college students" — a sub-project of the "improvement of the metric and measuring techniques in the manufacture of machines in China". Nearly 30 professors and experts from Chinese universities took part in the writing of this series; also working on this series are German professors and experts from the universities of Aachen, Ilmenau, Dresden and Kassel and PTB. Large numbers of German experts and professors rendered their generous help in many ways, such as Professor Tilo Pfeifer from Aachen University, Professor Gerd Jaeger from Ilmenau University, Professor Wolfgang Holzapfel from Kassel University, and others. They offered their extremely valuable lectures notes and papers. In addition, experts and professors from PTB, such as Horst Kunzmann, Franz Waeldele, Klaus Hasche, gave valuable suggestions for the contents of the textbooks, and provided useful materials. PTB arranged for experts and professors from universities to join in the writing of this series.

In order to make the series perfect, the compiling board held five meetings. The guidelines set at the meetings are: (1) the series should be designed for use as textbooks in colleges or for professionals having undergone college education or more; (2) the subject matter of the series should be the results obtained in their respective fields of science and technology in the 1980s~1990s, trying to avoid repeating what is contained in the books of the same disciplines at home and abroad; (3) the series should propose the reference suggestions about the orientation of development of the respective disciplines. For this purpose 14 editors

and writers of the books had been invited by the Federal Ministry of Economic Cooperation and Development and PTB to visit Aachen University, Ilmenau University, Kassel University and PTB Headquarters (in Braunschweig) and its branch (in Berlin) with the objective of acquainting themselves with the state of art and the trend of development of the technologies concerned, and collecting material. The visits and investigations helped the series greatly and promoted the intercourse between universities in Germany and China.

We are greatly obliged for the support and assistance from abroad and at home in the preparation of the series, but we are only too well aware of our fallibility. So all comments and suggestions are welcome.

Zhao Kegong

Beijing

May 1999

现代测试技术丛书编辑委员会

主任委员 赵克功 简历



赵克功,男,1936年12月9日生,河北省固安县人。1956年至1962年在民主德国伊尔门脑技术大学精密仪器系光学测量专业学习,获特许工程师学位。回国后,先后在中国计量科学研究院长度处精密测量室、激光室、量子室工作,任实验室副主任。1979年至1984年两次被聘为德国联邦物理技术研究院(PTB)长度单位实验室客座科学家。1981年任中国计量院激光室主任。1985年5月至1993年12月任中国计量科学研究院院长。1994年至今为中国计量科学研究院顾问;国际米定义咨询委员会委员;天津大学、清华大学、华中理工大学、西安理工大学、北京机械学院和中国计量学院客座教授;中国仪器仪表学会、中国计量学会和中国光学学会的常务理事和理事;中国光学学报和中国机械工程学报编委。

60年代初开始从事激光技术应用于计量科学的研究和利用激光建立计量基本单位基准的研究。为了获得计量科学所需要的高性能激光器,系统地研究了气体(氦,氖)激光物理、分子饱和吸收光谱和稳频技术,对中国和世界计量科学的发展作出了贡献。由于对计量科学的特殊贡献,于1997年获德国伊尔门脑技术大学的荣誉博士学位。在国内和国外共发表了140余篇论文。取得的科研成果主要有下述几方面。(1)研制成功了甲烷稳频 $3.39\mu\text{m}$ 激光器。它促进了物理学中真空光速值作为一个唯一恒定的和不受精度限制的基本物理常数的确定和1983年国际新米定义的建立。1984年国家计量局批准该激光器作为我国国家长度单位基准。(2)研制成功了碘(127和129)稳频612 nm激

光器。在研制中首先发现了碘(129)和 612 nm 波长范围内的 24 条超精细结构谱线,进行了分类计算,改进了多个碘分子的物理常数。研制成功的两台碘(127 和 129)稳频 612 nm 激光器都被 1983 年国际计量大会通过作为国际执行新米定义的国际基准和我国国家计量局批准的国家长度单位基准。(3) 研制成功了碘(127)640 nm 稳频激光器。在研制中,首先发现 15 条碘(127)在 640 nm 波长范围内超精细结构谱线,进行了分类计算,改进了多个物理常数。研制成功的碘(127)640 nm 稳频激光器,于 1986 年国家计量局批准作为国家长度单位,并于 1992 年被国际计量委员会通过作为实现米定义国际新的标准谱线。(4) 研制成功了同时辐射六种可见光的 CW-氦氖激光器及其稳频。这是国际上第一台同时辐射六种可见光 CW-氦氖激光器。为此,进行了大量物理实验和理论计算。特别是 650 nm 谱线,这是腔内受激 Raman 辐射,在国际上也是第一次发现。对该激光器进行了稳频,稳定性可达 10^{-10} 和 10^{-12} 。(5) 参加研制成功了两台半导体稳频激光器。它们分别是分子泛频谱稳频 822 nm 半导体激光器和铷饱和吸收稳频 780 nm 半导体激光器。稳定性达到 10^{-10} 和 10^{-11} 。(6) 早期研制成功的兰姆凹陷稳频氦氖激光器,被国家计量局批准作为国家长度副基准,并利用它研制成功了居世界领先水平的多种大型计量测试仪器。(7) 与德国合作研制成功了国际上第一台计量型原子力显微镜。(8) 在计量科学中还做出了其他贡献。如 1972 年提出利用约瑟夫森效应建立我国电压基准,并在 1993 年组织完成;1987 年提出研制高温超导量子干涉器,并于 1992 年完成;组织国际 90 温标的建立和在我国开展实现 90 温标的工作等。

获得的奖励主要有:(1)兰姆凹陷稳频氦氖激光器获 1978 年全国科学大会重大贡献者奖;(2)甲烷稳频 3.39 μm 激光器和碘(127 和 129)稳频 612 nm 激光器获 1987 年国家科学技术进步奖一等奖;(3)碘-127 分子在 640 nm 波长范围内的新超精细结构谱线和碘稳频 640 nm 激光器获 1986 年国家发明展览会金奖和 1988 年国家自然科学进步奖二等奖;(4)从事与参加的多谱线稳频氦氖激光器、全国基础性研究科学现状调查与发展战略研究等 6 项研究,分别获得部委级二等奖。

前 言

由于科学技术的进步,干涉测量技术已经得到相当广泛的应用。一方面因为微电子、微机械、微光学和现代工业提出了愈来愈高的精度和更大的量程,其它方法难以胜任;另一方面因为当代干涉测量技术本身具有灵敏度高、量程大、可以适应恶劣环境、光波和米定义联系而容易溯源等特点,因而在现代工业中应用非常广泛。

目前已经有几个著名厂家的成熟的干涉仪产品,覆盖了相当大的应用范围。但是干涉仪毕竟不是一个简单的工具,没有一定的理论基础难以正确使用,何况还有许多新的应用领域有待研究,需要更加深入的理论知识。

全国统编教材不可能有很大的篇幅介绍干涉测量技术。本书可作为光学仪器、计量测试、精密仪器等专业的高年级学生及研究生的教学参考书,同时也可供从事计量测试、仪器设计的工程技术人员参考。

参加本书各章编写的专家和教授都长期在该领域从事科研和教学工作,许多章节成稿后又请了有关专家审阅。本书是中国计量科学院前院长赵克功博士提出,并取得德国政府和中国国家教育委员会资助的三本教材之一。参编人员曾分两批赴德参观访问和收集资料。

本书第二章由张增耀副教授编写,第三章由朱若谷副教授编写,第四章由方仲彦教授编写,第五章一至四节由郭彦珍教授编写,第六章由陈耀煌研究员编写,第七章由徐毓娴副教授编写,第九章由徐毅研究员编写,第十章由王东生教授编写,第十一章由德国联邦物理研究院的P. Becker 博士和J. Stuempel 博士编写、徐毓娴副教授翻译、郭彦珍教授校对,第十二章由郭继华副教授编写,第一章、第八章、第五章的五至六节、第九章的第二节由殷纯永教授编写,全书由殷纯永教授统稿。最后裘惠孚教授审阅了全书并提出修改意见。

因为时间紧迫,本书采用的符号要求每位作者独立决定,保证每章内部的一致性。这样,不影响读者的理解。

限于水平,本书定有不少缺点和错误,恳请读者指正。

编 者

1999年5月

现代干涉测量技术



主编 殷纯永 简历

殷纯永,男,1937年3月生于辽宁省大连。1961年毕业于清华大学精密仪器系光学仪器专业(六年制)。1984年~1985年在英国国家物理实验室(NPL)作访问学者,1992年~1993年在加拿大多伦多大学和女皇大学作高级访问学者。现任清华大学精密仪器与机械学系教授、博士生导师、SPIE国际光学工程学会会员、《航空计量技术》编委、仪器专业委员会副主任委员。一直从事光电精密仪器的科研和教学。曾七次获得省部委以上奖励,三次获得国家级奖励。1980年“自动补偿双频激光测量装置”获国家发明三等奖;1992年“运动姿态测量方法和装置”获国家发明三等奖;1993年“磁盘测试设备”获国家科技进步三等奖。发表文章50余篇,主编《光电精密仪器设计》。



主审 裘惠孚 简历

裘惠孚,男,浙江宁波人。1951年毕业于上海交通大学。长期从事精密计量测试仪器的教学和科研工作。现任北京机械工程学院教授。70年代初与中国计量科学研究院合作研究激光双频、外差干涉仪,干涉信号位相检测技术等。发表论文40余篇,获国家发明专利一项。曾任中国计量测试学会常务理事兼计量仪器专业委员会主任。

目 录

1 绪论	(1)
1.1 历史的简单回顾	(1)
1.2 现代干涉仪	(3)
1.3 未来干涉仪的发展	(5)
2 经典干涉理论	(7)
2.1 光的干涉	(8)
2.1.1 光干涉的基本理论	(8)
2.1.2 光干涉的基本技术	(13)
2.2 干涉仪中的瞳和窗	(54)
2.2.1 干涉仪和干涉仪中瞳和窗的特点	(54)
2.2.2 干涉仪中瞳和窗的分析	(55)
3 相干性——现代相干理论	(63)
3.1 经典相干性理论	(64)
3.1.1 多色场的解析函数表示	(64)
3.1.2 一阶相干性	(67)
3.1.3 空间相干度及其测量方法	(68)
3.1.4 时间相干度及其测量方法	(74)
3.1.5 部分相干性	(75)
3.1.6 二阶相干性及其典型实验	(76)
3.1.7 高阶相干性	(78)
3.2 量子相干性理论	(80)
3.2.1 相干态	(80)
3.2.2 一阶量子相干度	(83)
3.2.3 二阶量子相干度	(86)
3.3 影响相干性的因素	(90)

3.3.1	光源线型宽度与时间相干度	(90)
3.3.2	光源大小与空间相干度	(90)
3.3.3	量子极限噪声	(91)
3.4	改善相干性措施	(97)
3.4.1	空间滤波	(98)
3.4.2	选模	(98)
3.4.3	锁模	(99)
3.4.4	稳频	(102)
3.5	干涉测量中常用的激光器及其相干性	(107)
3.5.1	氦氖激光器	(108)
3.5.2	二氧化碳激光器	(109)
3.5.3	半导体激光器	(113)
4	光波长和频率的测量与复现	(118)
4.1	长度计量基准的发展	(118)
4.1.1	长度单位米的定义	(119)
4.1.2	米定义的复现	(123)
4.2	激光光谱的分析与测量	(125)
4.2.1	分子饱和吸收谱线稳定的氦氖激光系统	(126)
4.2.2	分子饱和吸收谱线的测定	(130)
4.2.3	计算机控制的偏频跟踪激光光谱仪	(132)
4.2.4	原子饱和吸收谱稳定的半导体激光	(133)
4.3	激光波长测量	(135)
4.3.1	用迈克尔孙扫描干涉仪测量波长	(135)
4.3.2	用平面 F-P 频率锁定干涉仪测量激光波长	(137)
4.3.3	真空波长拍频检测	(138)
4.4	绝对频率测量	(138)
4.4.1	激光频率测量链	(138)
4.4.2	光频测量的非线性器件	(145)
5	测量长度和位移的干涉仪	(148)
5.1	激光偏振干涉仪	(149)
5.1.1	偏振干涉测长原理	(149)

5.1.2	偏振干涉仪的细分方法	(150)
5.1.3	激光偏振干涉仪的光学结构	(155)
5.1.4	激光偏振干涉仪的误差与调整方法	(156)
5.2	激光外差干涉仪	(162)
5.2.1	外差干涉测长原理	(162)
5.2.2	激光外差干涉仪的光源	(164)
5.2.3	激光外差干涉仪的细分方法	(169)
5.2.4	激光外差干涉仪的光学结构	(171)
5.2.5	外差干涉仪的误差	(174)
5.3	半导体激光干涉仪	(177)
5.3.1	半导体激光器的工作原理及特性	(178)
5.3.2	线性调频半导体激光干涉仪	(182)
5.3.3	线性调频半导体激光测距	(184)
5.3.4	自混频现象及其应用	(185)
5.4	激光光栅干涉仪	(188)
5.4.1	激光光栅偏振干涉仪	(188)
5.4.2	激光光栅外差干涉仪	(190)
5.4.3	线性调频半导体激光光栅干涉仪	(192)
5.5	激光多波长无导轨测量	(193)
5.5.1	多波长测量的原理	(194)
5.5.2	3.39 μm 多波长激光干涉仪的原理	(200)
5.5.3	多波长 CO_2 激光干涉仪测量绝对距离	(206)
5.5.4	连续波调频绝对距离测量	(213)
5.6	现代商品干涉仪	(226)
5.6.1	第一代激光干涉仪	(226)
5.6.2	第二代激光干涉仪	(227)
6	波面和面形的测量	(237)
6.1	棱镜透镜干涉测量	(237)
6.1.1	棱镜透镜综合性能的测量	(237)
6.1.2	像差的计算	(240)
6.1.3	激光棱镜干涉仪	(243)