



FUNDAMENTAL PRINCIPLES
OF ENGINEERING NANOMETROLOGY
(SECOND EDITION)

Richard Leach

工程纳米测量基础

(第二版)

[英] 理查德·利奇 著

袁道成 朱学亮 刘 乾 何华彬 译

岳晓斌 主审



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

Fundamental Principles of Engineering Nanometrology, Second Edition

工程纳米测量基础(第二版)

[英]理查德·利奇 著

袁道成 朱学亮 刘 乾 何华彬 译

岳晓斌 主审



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程纳米测量基础 / (英)理查德·利奇著;袁道成等译. —2版. —杭州:浙江大学出版社,2017.12

书名原文:Fundamental Principles of Engineering Nanometrology, 2e
ISBN 978-7-308-17563-0

I. ①工… II. ①理… ②袁… III. ①纳米技术—应用—精密工程测量 IV. ①TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 262310 号

This edition of *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology* by Richard Leach, is published by arrangement with ELSEVIER INC, a Delaware corporation having its principal place of business at 360 Park Avenue South, New York, NY 10010, USA.

浙江省版权局著作权合同登记 图字:11—2017—251 号

工程纳米测量基础(第二版)

[英]理查德·利奇 著

袁道成 朱学亮 刘 乾 何华彬 译

岳晓斌 主审

责任编辑 伍秀芳(wxfwt@zju.edu.cn)

责任校对 陈静毅 刘郡

封面设计 周灵

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路148号 邮政编码310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 浙江时代出版服务有限公司

印 刷 浙江印刷集团有限公司

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 19.5

字 数 340千

版 次 2017年12月第2版 2017年12月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-17563-0

定 价 98.00元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式:0571-88925591; <http://zjdxcs.tmall.com>

译者前言

纳米技术方兴未艾,纳米测量技术不断进步,工程纳米测量与精密测量技术的发展离不开基础理论与方法的支撑。《工程纳米测量基础》(*Fundamental Principles of Engineering Nanometrology*)顺应了这些需求,对发展制造强国是有益的。

本书作者理查德·利奇(Richard Leach)是诺丁汉大学测量学教授,他的研究方向包括表面形貌测量、精密增材制造 3D 结构测量方法、工业应用大型表面高分辨率控制方法、X 射线 CT 成像技术等。1990 年至 2014 年,他服务于英国国家物理实验室,是欧洲精密工程和纳米技术协会理事,美国精密工程协会、国际测量仪器委员会和一些国际标准委员会董事。他还是期刊《精密工程》欧洲主编,物理学杂志《表面形貌:测量与特性》的创始人。他出版了超过 240 种出版物,包括 3 本教材。

参与本书翻译的成员是从事精密测量的工程技术人员和高校教师,兼具实践经验和理论基础。全书共分 10 章,其中第 1、2、9 章由袁道成翻译,第 3、4、5、6 章由朱学亮翻译,第 7、8 章由刘乾翻译,第 10 章由何华彬翻译。希望本书对从事精密测量技术、机械设计与制造的工程技术人员以及高校师生的教学和研究工作有所助益。

在本书的翻译过程中,得到了中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室资助,在此表示衷心感谢。感谢西安交通大学赵惠英老师的支持指导,以及复旦大学张祥朝老师对第 8 章术语翻译的帮助。

书中难免存在错误和不妥之处,敬请读者指正。

▶▶▶ 作者致谢

本书作为我的第一本著作及其第二版的出版,得益于很多人的帮助。这项工作涉及我个人生活的一些重新安排。我感谢我亲爱的妻子雪伦对此所做的付出(尤其是我坚持用本书的写作为借口不那么顾及家务)。

最重要的是,我想表达对 Han Haitjema 博士(荷兰三丰欧洲研究中心)的感谢,感谢他对大部分章节草稿所提出的中肯意见,以及他无时不在的幽默感和大力支持!

此外,许多外界同仁也给予了帮助,我要向他们表达我诚挚的谢意。包括: Franz Helm 博士和 Stefan Lehmann 先生(奥地利 Alicona 公司), Andreas Freise 博士(英国伯明翰大学), Paul Shore 教授(英国克兰菲尔德大学), Francois Blateyron 博士(法国 Digital Surf 公司), John Hannaford, Leigh Fleming 博士、Liam Blunt 教授、Paul Scott 教授和蒋向前教授(英国哈德斯菲尔德大学), Geoff Hunt 教授(英国圣玛丽大学学院), Gert Jäger 教授(德国伊尔梅瑙科技大学), Roy Blunt 博士(英国 IQE 公司), Don Martin 和 Mark Kretschmar 博士(美国莱恩精密公司), Tristan Colomb 博士(瑞士 LynceeTec 公司), Jon Petzing 博士(英国拉夫堡大学), Katsuhiko Miura 博士和 Atsuko Nose 女士(日本 Mitaka Kohki 公司), Georg Wiora 博士(德国 Nanofocus 公司), James Johnstone 博士(英国 NanoKTN 公司), Ted Vorburger 博士和 Ron Dixon 博士(美国国家标准与技术研究院), Jonathan Ellis 博士(美国罗切斯特大学), Lars Lindstrand 博士(英国 Scantron 公司), Mike Conroy 博士、Daniel Mansfield 先生和 Darian Mauger 先生(英国泰勒霍布森), Rob Bermans 博士和 Marijn van Veghel 博士(荷兰国家计量院), Derek Chetwynd 教授(英国华威大学), Christopher Brown 教授(美国伍斯特理工学院), Ernst



Treffers 博士(荷兰 Xpress Precision Engineering 公司),Chris King 博士(英国 Zeeko 公司)和 Roland Roth 博士(德国蔡司)(以上排名不分先后)。

英国国家物理研究所(NPL)的许多友人一直支持着我,为本书作出了贡献。他们包括:James Claverley 博士,Alex Cuenat 博士,Stuart Davidson 博士,David Flack 先生,Mark Gee 教授,Claudiu Giusca 博士,Peter Harris 博士,Charlie Jarvis 先生,Christopher Jones 博士,Andy Knott 博士,Andrew Lewis 博士,Simon Reilly 和 Andrew Yacoot 博士。特别感谢 Julian Game 先生对书中图片所做的细致处理。

这本书献给已故的 Albert Franks 教授,他是我在英国国家物理研究所的第一位指导人,在该研究领域给了我很多灵感。谢谢您,Albert。

我还要感谢我的父母和姐妹们,他们是最希望取悦的人。此外,我想提一提我深爱的儿子 Marcus。

理查德·利奇

▶▶▶ 目 录

第 1 章 微纳米和先进制造中的测量技术	(1)
1.1 工程纳米测量的定义	(3)
1.2 本书主要内容	(4)
参考文献	(4)
第 2 章 测量基础知识	(7)
2.1 测量技术简介	(7)
2.2 测量单位和国际单位制	(8)
2.3 长度	(9)
2.4 质量	(13)
2.5 力	(14)
2.6 角度	(15)
2.7 可溯源性	(15)
2.8 准确度、精密度、分辨力、误差和不确定度	(17)
2.9 激光	(23)
参考文献	(30)
第 3 章 精密测量仪器设计原则	(35)
3.1 几何问题	(35)
3.2 运动学设计	(36)
3.3 动力学	(39)



3.4	阿贝原则	(40)
3.5	弹性压缩	(41)
3.6	力回路	(42)
3.7	材料	(43)
3.8	对称	(45)
3.9	隔振	(45)
	参考文献	(49)
第4章	干涉法长度溯源	(53)
4.1	长度溯源	(53)
4.2	量块:既是量具又是溯源工具	(54)
4.3	干涉测量技术简介	(56)
4.4	干涉仪设计	(60)
4.5	干涉法量块测量	(67)
	参考文献	(76)
第5章	位移测量	(79)
5.1	位移测量概述	(79)
5.2	基本术语	(80)
5.3	干涉法位移测量	(80)
5.4	应变传感器	(94)
5.5	电容位移传感器	(95)
5.6	涡流和电感位移传感器	(96)
5.7	光学编码器	(98)
5.8	光纤传感器	(99)
5.9	其他光学位移传感器	(101)
5.10	位移传感器校准	(101)
	参考文献	(105)
第6章	表面形貌测量仪器	(111)
6.1	表面形貌测量简介	(111)
6.2	空间波长范围	(112)
6.3	经典表面形貌测量仪器的历史背景	(113)

6.4	表面轮廓测量	(115)
6.5	面域表面形貌测量	(116)
6.6	表面形貌测量仪器	(118)
6.7	光学仪器	(121)
6.8	电容式仪器	(143)
6.9	气动仪器	(144)
6.10	表面形貌测量仪器校准	(144)
6.11	表面形貌测量不确定度	(151)
6.12	计量特性	(153)
6.13	表面形貌测量仪器比对	(155)
6.14	空间频率响应确定	(156)
6.15	软件测量标准	(157)
	参考文献	(158)
 第 7 章 扫描探针与粒子束显微镜		(171)
7.1	扫描探针显微镜	(172)
7.2	扫描隧道显微镜	(173)
7.3	原子力显微镜	(174)
7.4	原子力显微镜测试物理量的实例	(188)
7.5	测量纳米颗粒的扫描探针显微镜	(189)
7.6	电子显微镜	(190)
7.7	其他粒子束显微镜技术	(196)
	参考文献	(196)
 第 8 章 表面形貌表征		(201)
8.1	表面形貌表征概况	(201)
8.2	表面轮廓表征	(202)
8.3	表面形貌的面域表征	(217)
8.4	分形方法	(235)
8.5	轮廓和面域表征的比较	(240)
	参考文献	(241)
 第 9 章 坐标测量		(247)

9.1	坐标测量机简介	(247)
9.2	坐标测量机的误差来源	(251)
9.3	坐标测量机的可溯源性、校准和性能验证	(252)
9.4	微坐标测量机	(254)
9.5	微坐标测量机测头	(257)
9.6	微坐标测量机的验证和校准	(264)
	参考文献	(268)
第 10 章 质量和力的测量		(275)
10.1	传统质量测量的可溯源性	(275)
10.2	小质量测量	(282)
10.3	小力值测量	(283)
	参考文献	(292)
附录 A: 测量的国际单位及其在 NPL 的实现		(297)
附录 B: SI 导出单位		(299)

微纳米和先进制造中的测量技术

自从人类文明的开端,我们的社会就是基于商业的社会,人们生产物品并卖给其他人。相对简单的开端导致了工业革命以及现在的科技时代。为了能够以具有成本效益的、环境可持续的方式制造商品,质量控制程序必不可少;而质量控制需要有合适的测量溯源基础。本书的主题正是这种测量基础的一个子集。虽然本章着重于纳米技术,但一般来说许多论点也适用于先进制造领域。

纳米技术的商业化开发将带来许多有关新机器和生活方式改变的故事^[1-5]。纳米技术(和纳米科学)是一个通用的技术学科,相关生产厂家通过使用纳米级的新尺寸以及化学、材料、机械和电磁特性来设计产品的功能。基于纳米技术的各种产品例如防晒乳膏或运动器材,越来越多地进入商业市场。在制造过程中必须有质量控制,特别是当纳米产品特性引人关注时,例如潜在的健康风险或其他性能要求。

在未来十年,纳米技术有望接近成熟,该技术会占据主导地位并获得广泛应用。纳米技术发展的主要驱动力很可能从总体重心“发现的快乐”,转向满足社会需求^[6]。有关节约用水、能源管理和人口老龄化的挑战需要解决^[7],还有类似于《欧洲 2020》中需要解决的那些问题(这是欧盟在 2010 年提出的对未来十年的一个智能、可持续和包容性经济的增长战略)^[8]。

目前,制药、电子和材料是纳米技术的重点应用市场。对于这些新兴或同化市场,竞争优势要求严格理解纳米技术的原理和方法。这要求测量的分辨



率和精度要比以前设想的更高。从根本上说,必须开发新的测量技术和标准以支持这样的理解。

现有的测量基础必须延伸到纳米级及更小量级,使基于纳米技术的产品或制造过程,成功而安全地进入市场^[9]。这种测量基础必须提供高分辨率大面积三维测量的能力。对于工业应用,必须以合适的速度或生产能力来实现^[10-11]。

微米和纳米级测量应溯源到国际认可的计量单位(如米)。这需要通用有效的测量方法、校准的仪器和合格的参考样本,在一些领域甚至需要一个公共词汇定义^[12]。纳米范围内所要求的测量只在少数特殊情况下建立了可溯源链,通常仅适用于非常具体的测量条件^[10]。

2011年已经完成的欧盟项目 Co-nanomet,其主要成果是欧洲纳米测量的共同战略^[13],这使得欧洲可以基于目前的许多优势构建未来的纳米测量发展项目。以这种方式,欧洲纳米技术可以得到支持以发挥其充分的、最激动人心的潜力。Co-nanomet 设立了一套欧洲未来十年纳米测量的目标。

美国的国家纳米技术计划(NNI)于2001年设立,以协调美国政府在纳米技术领域的活动。2011年,NNI公布了一个战略计划^[14],其目的是确保肩负着使命以及更广泛国家利益的纳米技术研发的进步和应用,并持续增加指导机构的领导人、项目经理,以及规划实施纳米技术研发的投资和活动的研究团体。2013年,NNI的预算为18亿美元,有26家联邦机构参与,包括研究和监管机构。

纳米技术和先进制造的进步不只是学术层面的利益。新的设备和材料有相当大的优势达到足够的市场数量以支付开发成本,因此在这一领域不仅有装置和材料的发展,还有最大化市场应用和研究阶段技术转移。在许多情况下,对那些阻止新技术成功应用障碍的检查提示了一些急需研究的测量领域。此外,测量不只涉及生产控制,还有法律、道德和安全问题^[15,16],要以定量和可知晓的方式去解决。

许多国家和地区大力推动微纳米技术(MNT)标准化的活动。国际标准化组织(ISO)的ISO技术委员会(TC)229自2005年开始持续运行。国际电工委员会(IEC)也大约在同一时间建立了TC 113,以补充与电相关的活动。认识到物质和辐射之间在微纳米量级的交集,ISO和IEC合作设立了几个工作组。联合工作组(JWG)分为名词和术语工作组(JWG1),测量和表征工作组(JWG2),两个独立的健康、安全和环境工作组(WG3),以及产品规格和性能工作组(WG4)。委员会目前完成的主要工作是确定纳米技术的通用定义(已发布9个标准,还有几个在编制中),并发布了处理工作场所工程纳米材料的评论回顾。测量和表征的标准目前正在编制中,特别是对于碳纳米管的分



析,也可用于纳米气溶胶的生产和测量。此外,还出版了一个人工纳米光栅定义与表征的标准。

近年来有定义和分类微纳米技术预先管控行动的趋势。欧盟委员会最近发布了纳米材料(2011/696/EU)定义的建议,一些国家(尤其是法国)推出了研发和产业领域强制性报告要求,这可以理解为管控的开始。为了支持这一行动,欧盟委员会已通过 CEN TC 352 授权(授权 M461)欧洲地区的标准制定工作。

有许多其他行之有效且与 ISO 相关的委员会,虽然不是专门针对工程纳米测量,但涵盖了工程纳米测量的许多方面;例如,ISO TC 213 负责表面形貌的标准(见第 6 章),ISO TC 201 负责扫描探针显微镜(见第 7 章)的许多标准化问题,以及 ISO TC 209(洁净室技术)组建了纳米技术关注问题工作组(WG10)。ISO TC 24/SC4(颗粒表征)正在积极与 ISO TC 229 联络以制定新标准。未来的发展趋势,在于关注有趣的新材料和纳米结构系统,比如石墨烯和超微气泡。

本书认为,在不久的将来,支持纳米技术和先进制造业等诸多领域标准基础的一个测量技术分支将是必不可少的。如果零件互换性成为现实,那么制造工厂需要摆脱“内部”或“黄金”标准,迈向可溯源到国家或国际计量单位^[17]的测量标准和技术体系。

1.1 工程纳米测量的定义

工程测量领域涉及制造技术的测量和标准化需求。在过去,工程测量主要涵盖尺寸度量,即长度测量的科学和技术^[18-19]。现代工程测量通常包括尺寸、质量及相关量的测量。一些作者将材料测量并进来^[20],这是一个重要的包容。然而,本书将聚焦在更传统的尺寸和质量领域。这种选择部分是为了将本书的范围保持在一个可控的水平,还因为这些都是作者一直在积极研究的领域。

因此,工程纳米测量技术是纳米量级的传统工程测量。注意,虽然纳米技术是 0.1~100nm 不同尺寸结构的科学和技术,但纳米测量不限于这个尺寸范围。纳米测量涉及准确度或不确定度在这个尺寸范围内(以及更小)的测量,例如,一个 1m 望远镜镜面精确到 10nm 精度的测量。

重要的是,要认识到有许多微纳测量领域与尺寸和质量测量同样重要(参见文献[10,13]在所有领域的应用)。本书没有包括的其他领域有电子、化学和生物相关量,以及丰富的材料性能测量和粒子性质的测量。一些领域可以



很好地当作工程纳米测量,但尚未纳入本书的范围,包括圆度^[21]测量、薄膜(主要是厚度)测量、X射线计算机断层扫描^[22]和振动结构的动态测量。这再次表明,前述对内容选择的疑问是有道理的。

1.2 本书主要内容

工程纳米测量领域正在快速发展,关于这个主题的任何教材几乎在出版的时候就已过时。本书第二版的产生就缘于此。第二版更新了研究文献,并在适当章节提供了与标准有关的最新信息,而且引入了新的测量和表征技术。一些基本内容的补充信息也包括在内。

本书共分10章。第2章是对测量的介绍,包括简要历史以及对长度、角度、质量和力的最新定义;基本测量术语介绍,包括非常重要的测量不确定度主题;第2章也介绍了激光,因为它是本书描述的许多仪器的关键元素。第3章综述了设计分析精密仪器所需要的最重要概念。第4章介绍了使用光学干涉测量长度,并讨论干涉相关的概念,其中包括许多误差源。第5章概述了位移测量,并介绍了最新的位移传感器。表面形貌测量领域在接下来的三个章节中介绍,因为它是一个非常巨大且重要的主题。第6章介绍触针式和光学表面测量仪器,第7章介绍扫描探针和粒子束仪器。第6章和第7章包括仪器的描述、局限和校准方法。第8章介绍表面的表征方法,包括线轮廓和面轮廓技术。第9章介绍坐标测量,概述了微型三坐标测量机的最新发展。最后,第10章概述了小质量和力测量的最新进展。

参考文献

- [1] Storrs Hall J., Nanofuture: What's Next for Nanotechnology. Prometheus Books, 2005.
- [2] Mulhall D., Our Molecular Future: How Nanotechnology, Robotics, Genetics and Artificial Intelligence Will Transform Our Future. Prometheus Books, 2002.
- [3] Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties. Royal Society and Royal Academy of Engineering, 2004.
- [4] Binns C., Introduction to Nanoscience and Nanotechnology: Tiny Structure, Big Ideas and Grey Goo. Wiley-Blackwell, 2010.
- [5] Ramsden J., Nanotechnology: An Introduction. Elsevier, Amsterdam, 2011.
- [6] Nanotechnology Research Directions 2020. NSF, WTEC report, September 2010.
- [7] MacLurcan D., Nanotechnology and Global Sustainability. CRC Press, 2012.
- [8] Europe 2020, A strategy for smart, sustainable and inclusive growth, European Commission. ec.europa.eu/eu2020/index-en.htm.



- [9] Bogue R., Nanometrology: a critical discipline for the twenty-first century. *Sensor Rev.* 27 (2007) 189—196.
- [10] Leach R.K., Boyd R., Burke T., Danzebrink H.-U., Dirscherl K., Dziomba T., et al. The European nanometrology landscape. *Nanotechnology* 22 (2011) 062001.
- [11] Leach R.K., Jones C.J., Sherlock B., Krynski A., The high dynamic range surface metrology challenge. *Proc. ASPE*, St Paul, MN, November 2013, 149—152.
- [12] PAS 133: 2007 Terminology for Nanoscale Measurement and Instrumentation. British Standards Institute.
- [13] Burke T., Leach R.K., Boyd R., Caneiro K., Danzebrink H.-U., Depero L.E., et al. European nanometrology 2020 (Co-nanomet Report), 2012.
- [14] Postek M.T., Lyons K., Instrumentation, metrology and standards: key elements for the future of nanotechnology. *Proc. SPIE* 6648 (2007) 664802.
- [15] Hunt G., Mehta M., *Nanotechnology: Risk, Ethics and Law*. Earthscan Ltd, 2008.
- [16] Hunt G., Lynch I., Cassee F., Handy R., Fernandes T., Berges M., et al. Towards a consensus view on understanding nanomaterials hazards and managing exposure: knowledge gaps and recommendations. *Materials* 6 (2013) 1090—1117.
- [17] National Nanotechnology Initiative Strategic Plan. National Science and Technology Council, 2011.
- [18] Hume K.J., *Engineering Metrology*, second ed. Macdonald & Co., 1967.
- [19] Thomas G.G., *Engineering Metrology*. Newnes-Butterworth, London, 1974.
- [20] Anthony D.M., *Engineering Metrology (Materials Engineering Practice)*. Pergamon, 1986.
- [21] Smith G.T., *Industrial Metrology: Surfaces and Roundness*. Springer, 2002.
- [22] Kruth J.P., Bartscher M., Carmignato S., Schmitt R., De Chiffre L., Weckenmann, A. Computed tomography for dimensional metrology. *Ann. CIRP* 60 (2011) 821—842.

第 2 章

测量基础知识

2.1 测量技术简介

在过去的几千年中,重大技术的进步可以追溯到测量技术的提高。不论是欣赏埃及金字塔,或是人类二十世纪登月所代表的工程壮举,我们应该认识到,这种进步的很大部分是由于测量的进步。人们清醒地认识到,不论是要几十人到数十万人共同参与操作,还是这些人在许多不同地方生产不同零件最后组装在一起,使得这些成为可能的技术主体是采用测量技术和标准^[1](见本章参考文献[2]关于测量的历史记录)。

埃及人使用皇家腕尺(图 2.1)作为长度测量(这是从法老的肘部到指尖的距离,再加上手掌的宽度)的标准,而阿波罗太空计划最终依靠氪 86 辐射波长复现的米定义。

在古埃及,标准保存在寺庙,如果没有及时对其重新校准,祭司就会被斩首。如今,有全球性认证机构和实验室,如果不按时对工作标准进行重新校准,它们会失去认可。原始标准保存在每个国家的国家计量机构(NMI),有很高的地位,并代表着国家荣誉。古埃及人认为,只要一个四边形的四条边具有相同的长度且两条对角线相等,则该四边形内角相等,都是 90° 。他们通过比较两条对角线和检查两个测量之间的微小差异来确定金字塔的基座是否为正方形。

人类已经登月,是因为几个胆大的人愿意坐在通过低价投标制造组装的、由三百万个零件构成的、充满数百吨的爆炸性氢气和氧气推进剂装置的顶部。