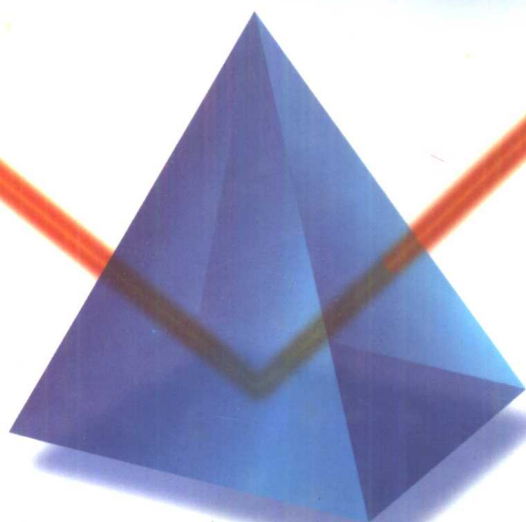


激光基准 高精度测量技术

The Technology of High Accuracy
Measurement Using Laser Beam
As a Straight Datum

万德安 编著

国防工业出版社



激光基准高精度测量技术

**The Technology of High Accuracy
Measurement Using Laser Beam
As a Straight Datum**

万德安 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

激光基准高精度测量技术/万德安编著. —北京: 国防工业出版社, 1999.6

ISBN 7-118-02010-9

I. 激… II. 万… III. 激光应用-技术测量-技术 IV. TG806

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 29382 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 6 $\frac{3}{4}$ 155 千字

1999 年 6 月第 1 版 1999 年 6 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 14.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成
(以姓氏笔划为序)

刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

前 言

进入 21 世纪, 科学技术、知识、信息更趋于世界化, 同时, 由于竞争日益激烈, 也就要求产品具有高性能、微型化和低成本的特点。为此, 零件加工的精密化和超精密化被紧迫地提到了各国的重大发展决策上。无论是制造技术本身, 还是材料科学、微电子与计算机、光子技术、信息技术、纳米技术、生物基因工程及能源与交通等科学的发展, 都迫切需要加工技术的高精度和产品的高性能。尤其是航天、航空技术领域中的零件加工技术要求更高, 已经进入到纳米级 (10^{-9}m) 加工精度, 即要达到原子级的加工精度极限。为了适应这种新时代发展的需要, 各种新的加工原理与方法不断涌现, 当然, 检测技术与保证超精密加工实现的高精度测量技术就显得倍加重要。

金刚石切削加工技术 SPDT (Single Point Diamond Turning) 最近获得了引人注目的成就, 即达到加工产品的形状精度 100nm、表面粗糙度 10nm 的高水平, 如日本大阪大学核反应堆中的大型激光反射镜, 采用了直径达 400mm 的大型光学零件, 在金刚石切削加工后, 其形状精度可达 $0.53\mu\text{m}$, 表面粗糙度为 4nm。可是, 即使这样高的精度, 还是难以满足今后发展的需要, 至少还应提高一个数量级, 才能满足未来高科技发展的要求, 例如, 最近加工直径为 1~2m 的大型激光反射镜, 形状加工精度要求达到 10nm 以上。这在目前是难以解决的技术难题^[1]。所以, 如何实现超高精度的加工和测量, 是目前迫切需要解决的关键技术。

SPDT 是目前公认的高精密加工技术之一。但是它的加工水平仍然不是十分理想, 其原因何在呢? 可以讲, 从 SPDT 发明以

来的 20 多年历史看, 几乎没有很大进步, 其原因归根结蒂是由于形状加工精度无法突破 $0.1\mu\text{m}$ 的界限^[2]。

零件的形状精度, 在 SPDT 中, 主要是由切削加工直接获得的, 它无法借助其它方法进一步改善。而表面粗糙度恰恰可以借助于研磨、抛光、电化学等方法来进一步降低。所以, 形状精度的提高, 主要是取决于加工设备的精度、刀具性能、被加工材料、加工环境及工人技术水平等。但是根据加工技术中的母性复映原理可知, 影响零件形状精度的第一因素是加工设备自身的精度, 即直接影响形状精度的主轴回转精度与切削刀具进给的直线运动精度。

经过多年努力, 在利用高精度空气轴承等技术与圆周运动的封闭性和平均效应等特点的基础上, 主轴回转运动已经可以制造出小于 10nm 回转误差的高精度。可是, 对于直线运动机构, 由于零部件的加工误差, 运动副耦合件配合间隙的变化、受力变形及热变形等影响, 其直线运动精度始终在低精度下徘徊。例如, 即使采用当前最高精度的空气导轨或液压静压导轨制成的直线运动机构, 也难以稳定地获得 $0.1\mu\text{m}/100\text{mm}$ 的直线运动精度, 它比回转运动精度要低一个数量级以上, 为此直线运动精度不高也是造成零件形状加工精度无法提高的重要原因。为了提高零件的形状加工精度, 突破 $0.1\mu\text{m}$ 的形状加工精度界限, 应该设法减少直线运动的误差, 这是近年来机械加工技术方面迫切需要解决的紧急课题^[3]。

要想使直线运动机构的精度提高, 首先, 应该在硬件加工上下功夫, 即尽量提高零部件的加工与装配精度, 保证良好的加工质量与使用条件和环境。但是, 硬件加工质量的提高, 也有一定的难度, 它不仅需要花费大量的时间、精力和费用, 而且在目前的技术水平下, 它主要是依赖加工设备的精度, 即设备自身的加工精度极限, 例如 $0.1\mu\text{m}/100\text{mm}$ 直线运动精度的界限。

近年来, 借助于控制技术, 即在直线运动机构上安装检测传感器, 将自身的运动不断与参照物进行对比、修正并实时补偿,

力图获得高精度运动机构的研究十分盛行。例如,日本青山等人设计、制造的直线运动机构中,以一根特制的高精度的样板直线尺作为参照物,工作台在运动过程中,不断将自身的运动与样板尺进行比较,随时检测运动机构的某一固定部位与样板尺的间距变化,并实行定距离反馈补偿控制,这样能够达到 $0.06\mu\text{m}$ 的控制精度。但是系统中仍然使用了标准样板尺作为参照,而参照物自身由于加工误差、热变形等影响,精度难以无限提高,所以仍然存在误差,同时,由于参照物与运动方向的空间安装误差等,直接影响了运动机构的直线精度。为此,即使利用反馈控制技术,这种直线运动机构的绝对精度也只能达到 $2\mu\text{m}/2\text{m}^{[4]}$ 。

从以上的分析可知,无论是硬件加工,还是利用参照物进行对比、校正的控制补偿法,均难以获得理想的高精度。其主要原因是由于直接采用了机械零件表面形貌的直线或平面为基准而造成的。我们称此类基准为几何基准。几何基准精度十分重要,它直接决定了运动机构的精度。在目前的加工技术水平下,这种以物体形貌为基准的几何基准法并不理想,因为它难以避免加工误差、受力变形及热变形等影响。也就是说,几何基准反过来又取决于加工设备的精度和水平。由此我们说几何基准自身的误差影响了目前的直线运动精度的提高。

为了解决利用几何基准法无法使直线运动精度提高的这一缺陷,这里提出一种全新的物理基准法,即利用激光束的直线性为直线运动机构的基准以消除几何基准精度不高而引起的误差。本书从激光束作为物理基准的基本概念出发,逐步阐明了激光束作为直线运动基准的条件、基本原理及系统构成,并介绍了实现激光基准法的高精度直线运动机构,以及以此直线运动机构来进行检测工件形状误差的各种难点和解决办法,最后又以实际制作的激光基准法高精度直线运动机构为例,说明了这种全新的激光基准法已经完全攻克了传统几何精度难以达到 $0.1\mu\text{m}/100\text{mm}$ 高精度的这一难题。本书作者以多年来的研究成果为基础,总结了激光高精度基准法这一新兴技术,志在向国内广大读者介绍,希望

各个科学领域中的科研工作者能够借此新的构思有较大发展，获得令人欣喜的进步。

万德安

一九九八年六月于上海

目 录

第一章 激光基准直线运动系统的组成	1
1.1 激光束的物理基准	2
1.1.1 单色性及波长稳定性	2
1.1.2 相干性	2
1.1.3 单一方向性	3
1.1.4 亮度及稳定性	3
1.2 直线运动误差的定义	4
1.3 激光基准直线运动误差检测原理	8
1.3.1 双向运动误差检测原理	9
1.3.2 双向位移检测与反馈系统	10
1.3.3 高精度信号处理原理	14
1.3.4 光电检测传感器 QPD 的灵敏度检测	14
1.3.5 压电晶体性能测试	15
1.4 激光基准测量精度的模拟实验	17
1.5 多自由度误差补偿系统	20
第二章 激光源热变形对光束方向稳定性影响及消除 对策	23
2.1 He-Ne 激光器的结构特点	24
2.1.1 内腔式激光器	25
2.1.2 外腔式激光器	26
2.1.3 半内腔式激光器	27
2.2 激光器热变形理论分析及实测方法	27
2.2.1 谐振腔内反射镜变形对光束稳定性的影响	28
2.2.2 激光器热变形的有限元分析方法	31
2.2.3 热像仪法激光器温度场测定及热变形的有限元分析	35

2.2.4 热敏电阻法对激光器温度场分布的测量与分析方法	38
2.3 激光束方向稳定性的测量	42
2.4 消除激光源热变形影响的对策	44
2.4.1 环境温度控制法	44
2.4.2 选用热变形小的材料	45
2.4.3 水冷降温法	45
2.4.4 激光装置整体温漂控制法	45
2.4.5 光束方向稳定性专用装置的开发	50
第三章 环境波动对激光束稳定性影响及防止对策	58
3.1 空气波动对光束影响的理论分析	58
3.2 空气波动对光束稳定性影响的测量	67
3.3 空气密度变化及激光束方向稳定性模拟分析	69
3.4 真空光路的制作	74
第四章 激光基准高精度直线运动系统的开发	79
4.1 激光基准直线运动误差的高精度分离测量理论	80
4.2 两束平行激光基准的调整原理	83
4.3 两束平行激光基准的直线运动装置的开发	90
4.3.1 直线运动误差测量装置的试制	90
4.3.2 试制机构的性能测试	95
4.3.3 直线运动系统误差的分离测试	106
第五章 激光基准法高精度测量技术	115
5.1 两束激光基准法零件形状误差的测量	115
5.1.1 两束激光基准形状误差的测量装置	116
5.1.2 电涡流位移传感器分辨率的测定	117
5.1.3 光盘形状误差的测量	118
5.2 单束激光基准形状误差的测量	119
5.2.1 激光基准法形状误差的测量原理	120
5.2.2 激光基准法形状误差的测试装置	125
5.3 激光基准法零件形状误差的高精度测量	136
5.3.1 光学平晶表面形状误差的测量	137
5.3.2 块规表面形状误差的测量	137

5.3.3 多棱镜表面形状误差的测量	138
第六章 激光干涉基准法测量技术	141
6.1 激光干涉法精密位移测量原理	144
6.1.1 位移变化引起干涉的原理	144
6.1.2 光相位调制的检测原理	147
6.1.3 激光干涉测长仪的工作原理	148
6.1.4 提高激光干涉测长仪测量精度的方法	151
6.1.5 干涉条纹计数及判向原理	152
6.1.6 影响干涉信号的因素	155
6.2 激光干涉法直线基准运动误差的检测原理	157
6.2.1 横向错位干涉测量法	157
6.2.2 激光方向干涉仪	162
6.2.3 两束激光干涉直线基准法	165
6.3 两束激光干涉直线基准法的测量误差分析	171
6.4 双频激光干涉测量技术	174
参考文献	181

CONTENTS

Chapter 1	The Constitution of the straight movement	
	system with the laser datum	1
1.1	The physical datum of a laser beam	2
1.1.1	The monochromaticity and stability	2
1.1.2	The coherency	2
1.1.3	The singular-direction character	3
1.1.4	The brightness and stability	3
1.2	The definition of the straight movement error	4
1.3	The measuring principle of straight movement	
	error with laser datum	8
1.3.1	The measuring principle of bi-directional movement error	9
1.3.2	The bi-directional displacement measuring and	
	feedback system	10
1.3.3	The high-precision signal processing principle	14
1.3.4	The detection of Quadrantal Photodiode 's sensitivity	14
1.3.5	The piezoelectric crystal 's performance	15
1.4	The simulated test of measuring accuracy with	
	laser datum	17
1.5	The compensating system of multiple degrees of	
	freedom error	20
Chapter 2	The influence of laser source 's thermal deformation for	
	laser beam stability and eliminating methods	23
2.1	The construction of the He-Ne laser device	24
2.1.1	The laser device with inner cavity	25
2.1.2	the laser device with outer cavity	26

2.1.3	The laser device with semi-inner cavity	27
2.2	The theoretical analysis and the test method of laser device 's thermal deformation	27
2.2.1	The influence of resonance cavity reflector 's deformation for the laser beam stability	28
2.2.2	The finite element analysis of the laser device 's thermal deformation	31
2.2.3	The temperature determination of thermal imaging tube laser device and the finite element analysis of the thermal deformation	35
2.2.4	The temperature determination and analysis of a heat-variable resister laser device	38
2.3	The test of laser beam direction stability	42
2.4	The methods of eliminating the laser source thermal deformation 's influence	44
2.4.1	The method of controlling ambient temperature	44
2.4.2	Choosing the small thermal deformation material	45
2.4.3	The method of water cooling	45
2.4.4	The control method of laser device 's ensemble temperature drift	45
2.4.5	The development of special device which can stabilize laser beam 's direction	50
Chapter 3	The influence of environmental undulation for bean stability and eliminating methods	58
3.1	The theoretical analysis of influence of the air undulation	58
3.2	The measurement of air undulation 's influences for beam stability	67
3.3	The analysis of air density variance and beam direction stability	69
3.4	Making vacuum optical path to eliminate the air disturbance	74

Chapter 4 The development of high-precise movement system	
with laser datum	79
4.1 The high-precise error separate measurement	
theory of straight movement with laser datum	80
4.2 The adjustment method with two parallel light	
beams datum	83
4.3 The development of straight movement error	
measurement device with two parallel beams	
datum	90
4.3.1 The trial-production of measurement device	90
4.3.2 The developing mechanism performance test	95
4.3.3 The separate measurement results of straight motion	106
Chapter 5 The laser datum high-precise measurement technology	115
5.1 The shape error measurement of two laser beams	
datum	115
5.1.1 The shape error measurement device of two laser beams	
datum	116
5.1.2 The resolution determination of electric vortex eddy	
displacement transducer	117
5.1.3 The optical disk shape errors measurement	118
5.2 The shape error measurement with one laser beams	
datum	119
5.2.1 The principle of shape errors measurement with laser	
datum	120
5.2.2 The shape errors measurement device	125
5.3 The surface shape errors high-precise measurement	
with laser datum	136
5.3.1 The surface shape errors measurement of optical flat	137
5.3.2 The surface shape errors measurement of optical flat	
block gauge	137
5.3.3 The surface shape errors measurement of multiple edge	
glass	138

Chapter 6 The laser interference datum measurement technology	141
6.1 The high-precise displacement measurement principle of laser interference method	144
6.1.1 The interference principle caused by the displacement variation	144
6.1.2 The detecting principle of the laser phase modulation	147
6.1.3 The operational principle of the length measurement instrument using the laser interference	148
6.1.4 The method of enhancing measurement accuracy of the length measurement instrument using the laser interference	151
6.1.5 The principle of counting the interference stripe and distinguishing direction of it	152
6.1.6 Factors influencing on interference signals	155
6.2 The measurement principle of the movement error using laser interference as straight datum	157
6.2.1 The interference measurement method of the crosswise difference	157
6.2.2 The laser direction interference instrument	162
6.2.3 The method of using two laser beams interference as straight datum	165
6.3 The analysis of the measurement error using two laser beams interference as datum	171
6.4 The measurement technology using the bi-frequency laser interference	174
Reference	181