



国防科技图书出版基金

回转体的 结构光测量原理

Principles of Geometrical Measurement of
Rotational Parts with Structured Light

徐春广 肖定国 郝娟 ■ 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

回转体的结构光测量原理

Principles of Geometrical Measurement of
Rotational Parts with Structured Light

徐春广 肖定国 郝娟 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

回转体的结构光测量原理/徐春广,肖定国,郝娟著.

—北京:国防工业出版社,2017.1

ISBN 978-7-118-11111-8

I. ①回… II. ①徐… ②肖… ③郝… III. ①旋转
体-光学测量 IV. ①TB96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 302597 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 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 190 千字

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

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。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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,原国防科工委于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. 在国防科学技术领域中,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,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备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,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,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,由总装备部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,原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和武器装备建设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 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

深孔类零件和复杂形状轴类工件等回转体零件应用非常广泛,几乎遍布所有工业领域的各种装备,如枪管、炮管、输油管道、炮弹弹体、弹丸、汽车发动机曲轴、汽轮机转子、机床主轴、轧机轧辊和挤压设备螺杆等。回转体零件是影响各种设备整体运行性能的关键零件,在加工和使用过程中需要对其精确测量。

深孔类零件的长径比较大,以火炮身管为例,通常管径为 25~155mm,但长度却可达 10000mm 以上,这对测量系统的结构尺寸、定位、驱动和测量信息传输都提出了较高甚至苛刻的要求,使得常规测量技术很难应用到深孔测量的领域之中。现有的深孔测量方法大多是单一参数检测,甚至采用手工方式,效率低,操作者易于疲劳出错,因此,研究高效、高精度的复杂深孔综合参数自动测量理论、方法和技术具有重要的理论和现实意义。对深孔类零件的测量主要是测其孔内轮廓的几何量和表面形状缺陷。几何量是指深孔的几何特性,如直径、容积、槽宽、槽深、螺旋线转角等;表面形状缺陷主要是指在深孔加工和使用过程中,在内表面上产生的擦伤、划痕、裂纹、点蚀和锈斑等。深孔的几何精度和表面状态对相关产品质量有重要影响,是制造领域急需解决的实际工程问题。

炮弹弹体和机床主轴是典型的复杂形状轴类工件,弹体廓形对炮弹飞行的姿态稳定性和非线性气动特性有直接影响,进而决定了炮弹飞行的动态品质和射击性能,机床主轴廓形是决定主轴转动平稳性的主要因素之一。因此,也需要及时测量轴类工件的廓形是否满足设计的精度要求。目前对轴类工件廓形,主要采用专用样板、投影仪器或三坐标测量机测量。专用样板测量以手工操作为主,精度和效率低、测量工具容易磨损、重复性不好,而且测量结果只能判定零件合格与否,无法提供相应的测量数据。投影法虽然不需要制造样板,但也需要人工判断,且不能提供完整测量数据。三坐标

测量机虽然解决了测量精度和数据处理等问题,但由于是接触式测量,耗时长,速度慢,只适合首检或抽检,无法满足大批量、现场生产条件下的测量要求。

随着现代设计和制造技术对回转体零件精度要求的不断提高,原来只需要测量零件的几个重要位置尺寸,现在需要对其各部分尺寸进行全面测量,原来只需要测量零件单类几何尺寸误差,现在需要对其多类加工误差同时测量。传统测量方法和设备由于功能单一、测量效率低或精度差而远远落后于回转体零件加工技术的发展,无法满足现场测量的技术要求,严重制约了生产企业数字化制造和管理的发展。

本书结合高速发展的新型传感器技术、数控技术和计算机图像处理技术等,针对国防工业领域特种回转体零件的快速、现场、精密测量需求,提出了基于结构光的光回转体几何参数测量技术,讲述了基于点、线、面等不同形式结构光的测量原理、方法、实现途径等。

结构光(Structured Light)是已知空间方向的投影光线的集合,照射在被测物体上,可投影出不同形状的几何图形,利用数字摄像机将该几何图形信息采集到计算机中,采用不同算法对几何图形的特征进行提取识别,从而得到被测对象的几何廓形。这是一种非接触测量方法,优点是速度快,精度高,抗干扰能力强,对测量环境没有特殊要求,非常适合现场使用,是实现特种回转体现场、快速、高精度几何量测量的有效方法,有广泛的应用前景。

本书是作者对多年来利用结构光开展回转体零件几何量测量研究工作的总结和提炼,也是作者多年来带领科研团队和指导研究生进行大量理论研究和工程实践的科研成果。书中主要内容来自于研究团队已发表的学术论文、会议论文、博士研究生和硕士研究生的毕业论文、科研项目研究报告和工作总结,以及本领域相关的重要学术论文和专著,有些内容在本书中是首次公开。

本书第1章由徐春广编写,第2章由郝娟编写,第3~6章由徐春广、肖定国编写,第7章由徐春广、孟凡武编写,全书由徐春广统筹、定稿。

由于时间仓促和水平有限,疏漏之处在所难免,敬请读者指正!

作者

2017年1月于北京

致 谢

书中的理论和方法研究是在 2003 年“教育部优秀青年教师资助计划项目”支持下开始的,后来又陆续得到了中央军委装备发展部(原总装备部)某试验基地、国家国防科技工业局(原国防科工委)、火炮和炮弹生产企业、火炮试验和应用单位以及石油钻具生产企业的项目资助,才使得原始创新设想和方法能从原理实验到理论方法,再到实践应用,一步步地完善起来。书中论述的许多理论和方法经过实践验证后,已经转化为技术和装备,在生产 and 实践中推广应用。没有国家各部委的科研计划和应用企业的支持,这些原始创新的想法是无法转化为技术为工业和国防建设服务的。在此,本书作者对支持、帮助和关心过本项技术发展的各部门和企业表示衷心的感谢!

本书内容是作者所在科研团队十多年科研积累的成果,是许多博士和硕士研究生们潜心研究和艰苦攻关的学术和技术成果。在此对已经毕业的郑军、朱文娟、冯忠伟、冷慧文和孟凡武等博士研究生,以及尚研、刘中生、曹辉、刘成刚、张双双、郝龙、盛东良、康驭涛和贺亚洲等硕士研究生们付出的辛勤劳动表示衷心的感谢!

感谢在本书编著过程和试验研究过程中给予过大力支持和帮助的周世圆副教授、贾玉平高级实验师、潘勤学博士和赵新玉博士等各位教师。

特别感谢国防工业出版社周敏文编辑在本书出版过程中的悉心指导和帮助。

感谢国防科技图书出版基金对本书出版的资助。

本书文图编辑整理工作由康驭涛和贺亚洲研究生完成,校对工作由王宏甫教授完成,在此表示衷心的感谢!

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 回转体廓形测量技术	1
1.2 结构光三维测量技术	6
1.2.1 点结构光法	7
1.2.2 线结构光法	7
1.2.3 面结构光法	9
1.3 结构光测量技术发展趋势	9
1.4 回转体廓形测量发展趋势	11
参考文献	12
第 2 章 内孔几何参数的点结构光测量原理	16
2.1 点结构光的内孔轮廓测量原理	16
2.1.1 激光传感器	16
2.1.2 角度传感器	18
2.1.3 测量原理	19
2.1.4 测量头装置固有参数标定原理	21
2.2 数据采集与预处理	23
2.2.1 数据采集方法	23
2.2.2 数据预处理	26
2.3 轮廓分段方法	30
2.3.1 概述	30
2.3.2 曲率法	32
2.3.3 弦到曲线的面积和法	35
2.4 内孔几何参数计算方法	38

2.4.1	径截面参数计算原理	40
2.4.2	轴截面参数计算原理	42
2.4.3	螺旋线参数计算原理	45
2.4.4	容积计算原理	48
参考文献		50
第3章 内孔几何参数的线结构光测量原理		53
3.1	一般线结构光的几何参数测量模型	53
3.1.1	理想测量模型	54
3.1.2	相机镜头畸变模型	57
3.1.3	相机参数标定方法	59
3.2	内孔三维几何参数的环形线结构光测量原理	65
3.2.1	环形线结构光形成原理	66
3.2.2	简单同轴环形线结构光测量头装置工作原理	67
3.2.3	带锥镜同轴环形线结构光测量头装置工作原理	70
3.2.4	同轴环形线结构光测量头装置固有参数标定原理	74
3.3	内孔三维几何参数的弧形线结构光测量原理	80
3.4	线结构光图像处理	85
3.4.1	线结构光图像的特征	85
3.4.2	线结构光图像的滤波	87
3.4.3	感兴趣区域的设定	88
3.4.4	线结构光光条中心提取原理	92
参考文献		98
第4章 内孔疵病特征的面结构光测量原理		101
4.1	内孔表面特征的面结构光测量原理	101
4.1.1	内孔表面特征的面结构光测量装置与工作原理	101
4.1.2	面结构光测量图像的展开变换	106
4.1.3	展开图像的拼接	111
4.2	孔内表面疵病参数计算原理	116
4.2.1	图像分割的基本原理	117
4.2.2	基于区域分割-合并的疵病提取原理	118

4.2.3 疵病表征及特征计算	119
参考文献	122
第5章 内孔疵病特征的线结构光测量技术	124
5.1 孔腔内轮廓三维测量数据图像化原理	124
5.2 图像区域分割及阳线/阴线区域识别	129
5.2.1 基于灰度阈值的并行区域分割算法	129
5.2.2 模板法阳线/阴线区域识别	131
5.3 基于ITD图像的火炮身管内膛疵病检测方法	134
5.3.1 阳线断脱、蚀坑、裂纹和烧蚀网疵病检测	134
5.3.2 阴线挂铜和锈蚀疵病检测	141
5.3.3 其他疵病检测	142
5.3.4 疵病位置与几何参数计算	142
5.3.5 疵病检测精度评价	144
5.4 复合疵病检测法	145
参考文献	148
第6章 内孔几何参数和疵病特征的结构光测量系统	149
6.1 测量系统总体构成	149
6.1.1 点结构光测量系统	150
6.1.2 线结构光测量系统	156
6.1.3 面结构光测量系统	160
6.2 误差分析	161
6.2.1 机械系统误差分析	162
6.2.2 光学系统误差分析	163
6.2.3 被测表面特性的影响	165
6.2.4 其他影响因素	167
6.3 减小误差的措施	167
6.3.1 减小机械系统误差的措施	167
6.3.2 减小光学系统误差的措施	169
6.3.3 减小图像处理误差的措施	169
6.4 测量精度验证	172

6.4.1 孔径测量精度验证	172
6.4.2 旋转角度验证	172
参考文献	175
第7章 轴类外轮廓几何参数的线结构光测量技术	176
7.1 光幕式线结构光测量原理	176
7.2 几何参数计算方法	179
7.3 测量系统	181
参考文献	185

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Profile Measurement Technology of Rotational Parts	1
1.2	3D Measurement Technology with Structured Light	6
1.2.1	Point Structured Light Method	7
1.2.2	Line Structured Light Method	7
1.2.3	Surface Structured Light Method	9
1.3	Development of Structured Light Measurement Technology	9
1.4	Development of Profile Measurement Technology of Rotational Parts	11
	References	12
Chapter 2	Fundamentals of Inner Hole Geometry Parameter- Measurement Based on Point Structured Light	16
2.1	General Introduction	16
2.1.1	Laser Sensor	16
2.1.2	Angular Sensor	18
2.1.3	Measurement Principle	19
2.1.4	Calibration	21
2.2	Data Acquisition and Preprocessing	23
2.2.1	Data Acquisition	23
2.2.2	Data Preprocessing	26
2.3	Contour Segmentation	30
2.3.1	Introduction	30

2.3.2	Segment by Curvature	32
2.3.3	Segment by Surrounding Area of Chord and Curve ...	35
2.4	Geometry Parameter Calculation	38
2.4.1	Radial Geometry Parameter Calculation	40
2.4.2	Axial Geometry Parameter Calculation	42
2.4.3	Spiral Geometry Parameter Calculation	45
2.4.4	Body Volume Parameter Calculation	48
References		50

Chapter 3 Fundamentals of Inner Hole Geometry Parameter

	Measurement Based on Line Structured Light	53
3.1	General Introduction	53
3.1.1	Ideal Measurement Conditions	54
3.1.2	Camera Lens Distortion	57
3.1.3	Camera Parameter Calibration	59
3.2	Measurement Fundamentals with Circle Structured Light	65
3.2.1	Producing Circle Structured Light	66
3.2.2	Circle Structured Light Probe without a Cone Mirror	67
3.2.3	Circle Structured Light Probe with a Cone Mirror	70
3.2.4	Probe Calibration	74
3.3	Measurement Fundamentals with Arc Structured Light	80
3.4	Image Processing	85
3.4.1	Image Characterizing	85
3.4.2	Image Filtering	87
3.4.3	ROI(Region of Interest) Selection	88
3.4.4	Center Line Extraction of Light Stripe Image	92
References		98

Chapter 4 Fundamentals of Inner Hole Surface Defects Measurement

	Based on Surface Structured Light	101
4.1	General Introduction	101

4. 1. 1	Measurement Principle	101
4. 1. 2	Image Transformation	106
4. 1. 3	Image Mosaic	111
4. 2	Defects Parameter Calculation	116
4. 2. 1	Image Segmentation	117
4. 2. 2	Defects Extraction Based on Region Split and Merge	118
4. 2. 3	Defects Size Calculation	119
	References	122
Chapter 5 Fundamentals of Inner Hole Defect Measurement Based on Line Structured Light		
		124
5. 1	Transformation of 3D Measurement Data to Image	124
5. 2	Image Region Segmentation and Concave/Convex Line Identification	129
5. 2. 1	Parallel Region Segmentation Based on Gray Threshold	129
5. 2. 2	Concave Line/Convex Line Identification Based on Template	131
5. 3	Defect Measurement Based on ITD Image	134
5. 3. 1	Defects (Disconnection, Pits, Cracks and Erosion) on Convex Rifling Land	134
5. 3. 2	Defects (Copper, Rust) on Concave Rifling Land...	141
5. 3. 3	Other Defects	142
5. 3. 4	Defect Position and Geometric Parameter Calculation	142
5. 3. 5	Defect Measurement Accuracy Evaluation	144
5. 4	Defect Measurement Based on Compound Methods	145
	References	148
Chapter 6 Inner Hole Geometry Parameter and Surface Defect Measurement Systems		
		149
6. 1	Overall Structure of the Measurement System	149

6. 1. 1	Measurement System Based on Point Structured Light	150
6. 1. 2	Measurement System Based on Line Structured Light	156
6. 1. 3	Measurement System Based on Surface Structured Light	160
6. 2	Measurement Error Analysis	161
6. 2. 1	Factors from Mechanical System	162
6. 2. 2	Factors from Optical System	163
6. 2. 3	Factors from the Characteristics of the Surface to Be Measured	165
6. 2. 4	Other Factors	167
6. 3	Measures to Minimize Measurement Error	167
6. 3. 1	Measures to Minimize Mechanical System Error	167
6. 3. 2	Measures to Minimize Optical System Error	169
6. 3. 3	Measures to Minimize Image Processing Error	169
6. 4	Measurement Accuracy Verification	172
6. 4. 1	Diameter Measurement Accuracy Verification	172
6. 4. 2	Angle Measurement Accuracy Verification	172
	References	175

Chapter 7 Fundamentals of Shaft Geometry Parameter Measurement Based on Line Structured Light

7. 1	Measurement Principle	176
7. 2	Geometry Parameter Calculation Method	179
7. 3	Measurement System Introduction	181
	References	185