

光电尺寸检测 及应用技术

徐熙平 张宁 姜会林 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

光电尺寸检测及应用技术

徐熙平 张 宁 姜会林 著



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是作者多年来科研与实践教学经验积累,内容丰富、技术前沿、理论联系实际;对光电尺寸检测所涉及的关键技术进行了深入的研究,建立了相应的数学模型,并对系统精度进行了分析;列举了典型实例,涉及内容均得到实际应用,经证明设计合理、分析正确;使读者在深入理解各种检测原理的同时,还能开拓设计思路。

本书具有实用参考价值,可作为研究生教材及相关工程技术人员设计光电检测系统的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光电尺寸检测及应用技术 / 徐熙平, 张宁, 姜会林著. —北京:
国防工业出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-118-09621-7

I. ①光… II. ①徐… ②张… ③姜… III. ①光电检测 IV.
①TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 177405 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 9¼ 字数 200 千字

2014 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 45.80 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

前 言

光电检测技术是现代测试计量技术的重要组成部分和发展方向,光电检测技术包含十分丰富的内容,从光信息的获得、光电转换,到电信号处理和智能化控制等方面,都有很大的差异,光电检测也没有固定的模式,同一个参数的测量也可以用不同的方法实现。应用的关键是根据具体要求,设计并选择能满足检测精度、检测范围、使用场合、自动化水平等诸方面要求的最合理的方案。目前,以非接触、高精度、高速度为特征的光电检测技术已成了检测技术发展的主要趋势,形成了规模庞大的光电检测仪器的产业,生产出用于各种场合的光电检测仪器,现在国际上利用光电检测进行各种几何尺寸、形状和形位误差等参数的测量,采用的原理和方法也是多种多样的。

本书主要对光电尺寸检测方面所涉及的关键技术——激光扫描检测技术、激光光三角检测技术、复色共焦检测技术、光栅位移检测技术和 CCD 成像检测技术等进行了深入的理论研究,对各测量系统的总体结构进行了设计,建立了数学模型,对影响测量系统误差的主要因素进行分析,并研制相应的检测系统。

本书采用激光检测系统、光栅位移检测系统、伺服控制系统及精密机械系统相结合,设计了二维光电测量系统、曲臂光电综合测量系统和激光圆度误差测量系统,书中对各测量的结构、参数测量原理及数据处理方法及测量误差进行了详细的分析;对采用激光光三角检测系统、精密轴系和伺服控制系统设计的形位误差光电综合测量系统的总体结构及测量原理进行了论述;对 CCD 成像检测系统、特殊光学系统与计算机处理技术对透明材料厚度及石英管综合参数的测量原理进行了论述。对各测量系统分别由主机系统闭环控制工件或测量系统直线、回转运动,在计算机控制下,可得到各被测量参数的结果,从而实现了零件多部位径向尺寸、轴向尺寸、径向圆跳动、平行度和圆度等多参数的非接触检测。

作为一种测试计量设备,对仪器的测量精度指标进行总体分析是十分必要的。本书还综合分析了测量系统误差产生的来源,建立了各种误差的数学模型,深入地分析了各种误差的性质及对测量结果的影响,给出了误差消除与修正方法。特别是对主体精密机械系统进行了详细的误差分析,对影响系统的误差来源和性质进行了讨论,推导出了误差修正公式,提出了改善系统精度的方法,在

此基础上编写了计算机控制与数据处理程序,并完成了综合测量系统的研制。

书中涉及激光扫描检测系统、激光三角位移检测系统、光栅位移检测系统和 CCD 成像尺寸检测系统及由此系统为测量单元设计的专用测量系统或设备,均有较高的实用价值。全部系统均得到实际应用,经证明方案设计合理,理论分析正确,测量工作稳定、可靠,精度满足设计要求。

本书由徐熙平教授编写,参加本书编写工作的还有张宁讲师、姜会林教授,他们对本书应用实例进行了深入总结,并对全书图表进行了修改与补充。同时,本书的编写还得到了安志勇教授、冯进良教授、乔杨讲师等的帮助与支持。

本书的研究工作得到了国家计委项目、教育部高等学校骨干教师资助计划项目、吉林省科技厅项目以及十几家企业单位委托项目的支持,谨向这些单位和部门表示衷心的感谢。本书还得到了长春理工大学学科建设处王延明处长等的支持,并提出了宝贵的建议,在此一并致谢。

编者

2014 年 5 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 光电检测技术在现代生产中的地位和作用	1
1.2 光电尺寸检测技术的现状和新发展	3
第 2 章 激光扫描检测技术及系统	5
2.1 激光扫描测量原理	5
2.2 检测系统主要组成部分设计	8
2.2.1 扫描速度分析	8
2.2.2 扫描发射系统设计	11
2.2.3 激光扫描接收系统设计	16
2.2.4 精密机械系统设计	17
2.2.5 电子学与微机实时数据处理系统	17
2.3 几种特殊激光扫描检测系统设计	20
2.3.1 双向激光扫描检测系统	20
2.3.2 双路激光扫描检测系统	22
2.3.3 反射式激光扫描检测技术	23
第 3 章 激光位移检测技术及系统	29
3.1 光三角工作原理	29
3.1.1 位移量与光学系统参数之间的关系	30
3.1.2 PSD 上像点位置 S 的确定	31
3.1.3 PSD 与光轴的夹角关系	32
3.2 测量系统的工作过程	33
3.3 位移检测系统主要组成部分设计	34
3.3.1 位置敏感器(PSD)及光源的选择	34
3.3.2 PSD 数据采集处理电子学系统设计	35
3.3.3 计算机实时控制与数据处理系统设计	36
3.4 误差因素	37
3.5 内径激光位移检测系统设计	38

第 4 章	复色共焦检测技术及系统	40
4.1	复色共焦检测原理	40
4.1.1	共焦成像的原理	40
4.1.2	复色共焦测厚原理	41
4.2	典型的共焦检测系统	43
第 5 章	CCD 成像检测技术及系统	49
5.1	CCD 尺寸检测原理	49
5.2	CCD 输出信号的二值化处理	50
5.3	线阵 CCD 物体尺寸测量系统	53
5.3.1	线阵 CCD 微小尺寸的检测	54
5.3.2	线阵 CCD 小尺寸的检测	56
5.3.3	线阵 CCD 大尺寸的检测	57
第 6 章	光栅位移检测及伺服控制系统	59
6.1	光栅线位移检测系统	59
6.1.1	光栅位移测量的基本原理	59
6.1.2	光栅位移检测系统设计	60
6.2	光电轴角编码器	61
6.2.1	光电编码器工作原理	61
6.2.2	编码器代码分类	61
6.3	闭环伺服控制系统	63
6.3.1	闭环伺服控制系统组成	63
6.3.2	闭环伺服控制方法	64
第 7 章	光电多功能二维自动检测系统	66
7.1	检测系统的总体结构	66
7.2	同轴度误差测量	67
7.2.1	同轴度误差的测量方法	68
7.2.2	实验结果与分析	69
7.3	环距测量	70
7.3.1	环距测量原理	70
7.3.2	轴向截面斜角 β 的测量	72
7.3.3	环距测量实时算法	72
第 8 章	曲臂光电综合测量系统	75
8.1	系统的组成与总体结构布局	76
8.1.1	系统的组成	76

8.1.2	总体结构布局	78
8.2	被测参数测量原理	79
8.2.1	直径测量原理	79
8.2.2	径向圆跳动误差测量原理	80
8.2.3	花键内径定心圆柱面径向圆跳动误差测量原理	83
8.2.4	平行度误差测量原理	85
第 9 章	激光扫描圆度误差测量系统	90
9.1	圆度测量原理	90
9.2	工件安装偏心误差的分离	92
9.3	实验结果与分析	92
第 10 章	飞轮齿圈总成跳动误差非接触检测系统	94
10.1	理论基础	94
10.2	测量系统原理	96
10.3	实验结果和分析	97
10.3.1	测量精度	97
10.3.2	测量能力指数 C_g	97
第 11 章	透明材料厚度非接触检测系统	99
11.1	反射式透明材料厚度检测系统	99
11.1.1	反射式透明材料厚度检测原理	99
11.1.2	反射式透明材料厚度检测系统设计	100
11.1.3	测量结果与分析	101
11.2	复色共焦透明材料厚度检测系统	102
11.2.1	系统组成及原理	103
11.2.2	共焦光学系统设计与优化	104
11.2.3	光谱数据采集系统	106
11.2.4	光谱数据分析系统	108
11.2.5	实验测试和分析	109
第 12 章	基于机器视觉的远距离目标尺寸测量系统	113
12.1	机器视觉检测方法	113
12.2	远距离随机目标检测原理	114
12.3	图像处理	115
12.4	精度分析	116
12.5	测量结果分析	118

第 13 章 光电综合测量系统误差分析	120
13.1 误差来源及分析	120
13.1.1 导轨误差分析	121
13.1.2 测量线、导向线、传动线之间的相对关系误差分析	124
13.1.3 其他误差分析	126
13.2 各误差因素对测量结果的影响	127
13.2.1 各误差因素对直径测量的影响	127
13.2.2 各误差因素对径向圆跳动测量的影响	128
13.2.3 各误差因素对平行度测量的影响	133
参考文献	138

第 1 章 绪 论

随着科学技术的发展,先进制造技术不断出现。例如,CAD/CAM/CAPP、FMS、CIMS、准时生产、并行工程及敏捷制造等都是近几年发展起来的先进制造系统,它们不仅适合于产品大批量的自动化生产,同时也适用于小批量多品种的柔性化生产,这对于提高生产的应急能力、应变能力,实现快节奏、高精度、高性能、高可靠性产品的生产是极为有利的。然而加工只是一个方面,另一方面就是不能忽略与之相配套的检测技术,它是质量保证系统中必不可少的一环。为了监视、检查和控制某个生产过程与运动对象,使之处于所选工况的最佳状态,必须掌握描述它们特性的各种参数,如测量这些参数大小、方向、变化等。通常把这种工艺过程中含有的检查、测量等比较宽广意义的测量称为检测。检测技术要实现与先进制造技术的配套,就离不开光电技术,故称为“光电检测技术”,这是从事检测方面科研人员多年来普遍予以关注,并潜心钻研的科研领域,在先进制造技术中占有极其重要的地位。

1.1 光电检测技术在现代生产中的地位和作用

光电检测技术是一种非接触测量的高新技术,它以光信号为载体,以光电器件为基础,通过载有被测参数信息的光信号进行检测,即通过光电检测器件接收光信号并转换为电信号,由输入电路、放大滤波等检测电路提取有用信息,再经 A/D 变换接口输入计算机进行运算和处理,最后显示或打印输出所需检测物体的几何量或物理量等参数。它综合了现代光学、精密机械、电子学、计算机等多学科的科技成果,是目前迅速发展的光电技术的核心和重要组成部分,是现代检测技术最重要的发展方向之一。由于其具有非接触、精度高、易于数字化、智能化、自动化、集成化、柔性化等显著特点,已广泛深入到军事技术、空间技术、环境科学、生物医学及工农业生产等许多领域中,并得到了日益广泛的应用。

随着激光技术、电子学技术和计算机技术的迅速发展,以及各种光电传感技术的渗透,出现了一个新的精密计量测试仪器——光电尺寸检测仪器。适应

近代计量检测技术发展方向和需要而发展起来的光电检测仪器涉及光学、激光技术、精密机械、电子学、自动控制、光电传感技术和计算机技术等多学科技术领域,是光、机、电、算一体化的检测仪器和设备。具有高速度、高精度、非接触,便于数字化,便于计算机实时数据处理和控制,抗干扰能力强,可实现在线检测等特点。可满足现代工业生产发展的需要,其应用领域几乎可以覆盖所有制造业,应用前景十分广阔。广泛采用先进的光电检测仪器,对提高产品质量、提高生产效率、降低劳动强度、提高经济效益具有重要意义。

光电检测仪器作为光电子科学技术和产业之一,在促进国家经济和科学可持续发展中起着巨大的作用,国际上一些发达国家对其发展给予了充分重视,纷纷列入国家科学技术发展规划并投入巨大财力。目前,我国对光电检测仪器的研究随着高新技术发展的需要,已进入了一个崭新阶段。这是因为:

第一,光电尺寸检测仪器应用范围极广。光电检测仪器与设备几乎应用到加工业的所有部门。如以激光扫描原理研制的光电检测系统实现了回转体类零件的外径尺寸及特殊零件长度、宽度、间距与特定空间量等参数的测量;以激光三角检测原理研制的光电位移检测系统实现了位移、高度、厚度、距离等参数的测量;以上述激光扫描检测系统作为光电传感器并配以径向回转与轴向进给伺服系统实现了回转体类零件的圆度、平行度、同轴度、直线度、垂直度、圆柱度、锥度、轴间距等形位误差的测量;以上述光电位移检测系统作为光电传感器并配以精密回转轴系伺服系统实现了径向圆跳动、端面圆跳动、平面度、粗糙度等形位误差的测量;配以二维运动伺服系统实现了曲面形状、角度等参数的测量。目前,工业发达的国家已有许多公司从事光电检测仪器的生产。日本的“KEYENCE”公司生产“VG”系列“CCD 雷射微测计”用于外径、间隙及边缘的测量,“LK、LC”系列“位移计”采用 CCD 和 PSD 作为光电传感器件实现位移、厚度、高度、跳动等参数的测量;美国特思(TSI)公司也生产了测试仪器与传感器,其中的 HOLIX 直径检测仪表已用于金属线材、光纤、光缆、电缆和管材的直径在线监测。

第二,检测精度和速度不断提高。社会进步的重要体现就是科技的进步,科技进步主要体现使用劳动工具的进步。从 18 世纪工业革命以来,科学技术以前所未有的速度在突飞猛进地发展,特别是近 50 年来,随着现代化生产和加工技术的发展,对于加工零件的检测速度与精度有了更高的要求,即向着高速度、高精度、非接触和在线检测方向发展。为此,工业发达国家对于检测仪器与设备速度与精度一直作为检测仪器主要指标。日本的“KEYENCE”公司以线阵 CCD 为传感器件,采用远心光学系统研制的外径测量仪,其测量范围为 $\phi 2 \sim \phi 35\text{mm}$,测量精度为 $\pm 0.05\mu\text{m}$,测量速度为 2400 次/s;美国特思(TSI)公司生产

的测试仪器,在径向尺寸测量上,最大测量范围为 $\phi 2 \sim \phi 145\text{mm}$,测量精度为 $\pm 5\mu\text{m}$,测量速度为 800 次/s;美国 BETA LASERMIKE 公司的 ACCUSCAN 3TM 型单光束和双光束在线直径测量仪器,其测量范围为 $\phi 0.5 \sim \phi 40\text{mm}$,重复性精度为 $\pm 1\mu\text{m}$;英国 AEROEL 公司生产的 ALS40/200/A 型激光在线检测仪器测量范围为 $\phi 0.06 \sim \phi 30\text{mm}$,测量精度为 $\pm 0.5\mu\text{m}$,测量速度达 200 次/s。

第三,采用的检测技术不断丰富与更新。可以说检测工具从人类从事劳动活动开始就一直存在,并不断发展。早在原始社会,人类的祖先就用动物骨头做的器具进行度量,随着社会的发展出现了木头、金属的各种尺子、卡规等工具,到了近代,以光学原理与器件为主的显微、干涉和瞄准仪器应用到了检测设备中。20 世纪中期以来,随着电子技术的发展,新器件不断的产生,特别是激光技术、半导体技术、光电传感技术和大规模集成电路的出现,使检测技术有了飞速发展,如光电二极管(PIN)、光电倍增管(PMT)、热释电器件光电耦合器件(CCD)、光电位置传感器(PSD)和光电二极管阵列等器件,均应用于检测技术中,极大地丰富了检测仪器的内容。现代化的检测仪器不再由单一技术实现,而是多学科技术的融合,现代光电检测仪器及系统已是光学、精密机械、电子学、现代传感、自动控制 and 计算机技术等多学科技术有机结合的整体。

第四,检测技术对其他科学技术的发展影响重大。检测技术水平的提高直接受益者是加工制造业,不但使加工的精度和速度有了极大的提高,也使废品率大大降低,同时也保证了加工对象的质量,从而生产出更精密的仪器,推动了工业自动化生产的发展。由于检测技术的深入,不断提出新的问题,从而促进了与之相关的光学技术、电子技术、自动控制理论、传感技术及计算机技术的发展,如新兴的纳米技术的发展,必须有与之相应的检测技术作为检测基础。总之,现代光电尺寸检测技术是一个综合学科,它应用广泛,是加工质量和精度的重要保障,都能对其涉及到的领域起到促进和推动作用。

1.2 光电尺寸检测技术的现状和新发展

目前,国内外的光电尺寸检测主要还是采用扫描法、光栅法、光三角法、共焦法、和成像法等方法。其中径向尺寸多采用激光扫描技术进行测量,位置尺寸一般采用光三角检测技术来完成。光电尺寸检测技术具有高速、高精度、非接触等特点,已成为加工、生产部门的行业标准,并形成了一个新兴的高技术产业。加工技术的发展和现代化生产速度的提高,对检测技术又有许多新的要求,其表现在:第一,检测速度要求不断提高。从尺寸与位移检测要求上,在满

足静态、动态检测基础上,已提出了快速变形、瞬变量的检测需求。第二,尺寸检测精度要求不断提高。由于人类研究领域不断扩大和加工设备不断的发展,零件加工精度不断提高,一些微小的变形量、尺寸及形位误差都提出了检测要求。第三,检测仪器向小型化、工程化及多功能化发展。随着生产技术和产业技术工人素质的提高,要求检测仪器设备应适应各种生产条件,并能有多种自主检测功能以适应生产多品种、变批量的生产需求。第四,通用检测设备与专用检测设备并存。

综上所述,以激光扫描检测技术、激光三角检测技术、复色共焦检测技术、自动控制技术、精密机械和计算机技术研制开发了多种尺寸、形状和形位误差测量的综合测量机及专用设备,已在机械制造、电线电缆、石英管、航天材料、国防等多个生产和研究部门进行了有效的应用。随着科学技术的进一步发展,高性能的光电检测仪器必将取代传统的检测手段而成为我国检测仪器的主要发展趋势。

第 2 章 激光扫描检测技术及系统

本章主要论述激光扫描检测技术的原理、工作方式及系统结构。激光扫描检测系统主要用于回转体工件直径和形位误差检测,还可用于特殊情况下宽度、高度、厚度、轴间距等项目的检测。检测系统具有高速、高精度、非接触在线测量等特点,既可作为独立的激光几何尺寸测量仪使用,也可作为一种通用的激光测头与其他不同机构或系统结合形成具有多功能的测量系统,从而实现对零件的多部位、多尺寸或形位误差等参数的自动测量。

2.1 激光扫描测量原理

激光扫描检测原理如图 2.1 所示,激光光束入射到以固定角速度旋转的转镜反射面上,反射光束经发射光学系统变成平行于光轴的扫描光束,再通过接收光学系统被光电传感器接收。由于转镜的旋转使激光光束在发射与接收光学系统之间形成一个扫描区域,在此区域中,被测工件对扫描光束的遮挡起到了激光信号调制作用。当扫描光束对被测工件进行高速连续扫描时,就可以形成一个光强调制信号,这个光强调制信号携带被测量径向尺寸信息。接收器采集到这种光强调制信号后,经光电转换系统变成电信号,由微机实时数据处理,便可得到工件被测部位的直径测量结果。

激光光束是由半导体激光器发出并经准直、缩束光学系统进行整形,形成一束光斑直径较小的准直光束。光扫描借助于一个由同步电机带动的正多面体棱镜完成。其中时钟电路由高频(大于 30MHz)晶体振荡器组成,分两路应用:一路分频后作为电机的驱动信号;另一路作为计数脉冲,对测量信号进行计数。由于采用同一个时钟源的控制方案,可以消除由于频率变化引起的测量误差,使系统具有较高的精度。

扫描激光束在发射光学系统与接收光学系统之间被被测件(回转体工件的外径)遮挡,形成了有高低电平的原始脉冲信号,这个信号经过放大及半峰值检出器检出,便输出一个代表待测量的标准脉冲信号,此脉冲信号和晶体振荡器脉冲信号经过电路复合后,就得到了代表工件尺寸的高频脉冲信号,信号的检出

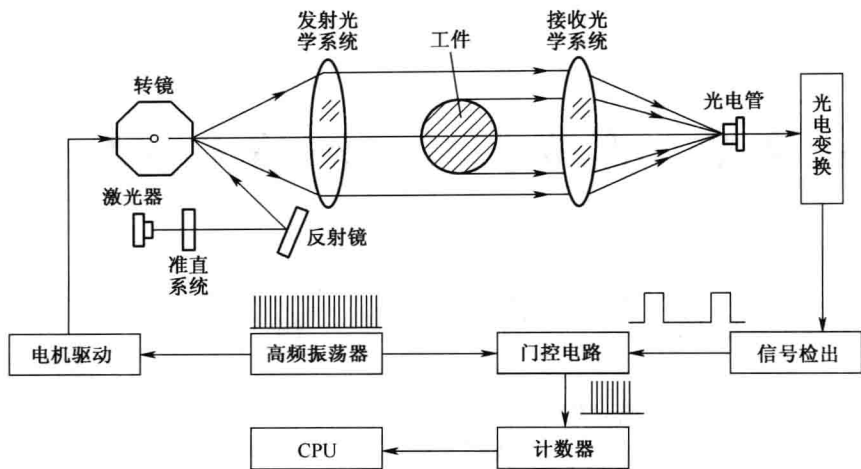


图 2.1 激光扫描检测系统原理图

和计数过程如图 2.2 所示。这个数由可逆计数存储器计数后经计算机处理可以得到被测件外径尺寸。如果测量过程中预置被测件的标准值及上下偏差量，使其和实测结果进行加减运算，并取出误差值输入数模转换器，变成超差信号去控制执行机构，用来控制被测件的加工过程，能够实现对被测件的在线检测与闭环控制。

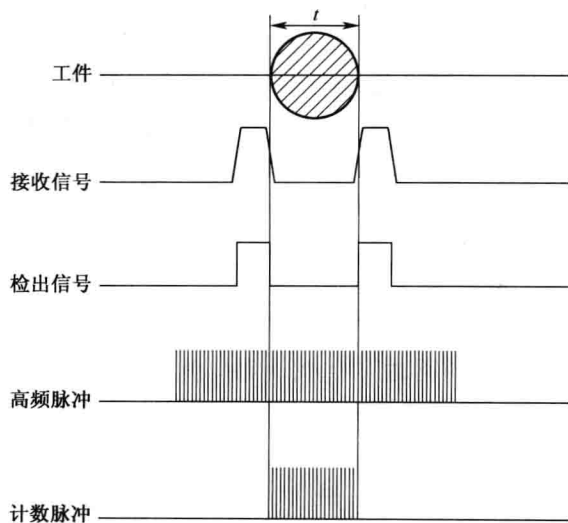


图 2.2 信号检出过程

由图 2.1 的光路部分可知，同步电机的转速为 n_j ，则其转动的角速度 ω_j 由

数学知识可知

$$\omega_j = 2\pi n_j \quad (2.1)$$

而由光学入射光线和反射光线的关系可知,光束转动的角速度 ω_g 应为电机转速 ω_j 的 2 倍,即

$$\omega_g = 2\omega_j \quad (2.2)$$

假设光束扫描过发射透镜的轨迹以发射透镜的焦距 f 为半径的圆弧,且是均匀的,则在发射透镜上,光速移动的速度 v 不变,有

$$v = 4\pi n_j f \quad (2.3)$$

速度 v 近似等于在整个测量区间的光束平移速度。设被测件外径为 D ,其对应的信号脉冲宽度为 T ,则

$$T = \frac{D}{v} \quad (2.4)$$

将式(2.3)代入式(2.4),整理得

$$D = 4\pi n_j f T \quad (2.5)$$

假如高频振荡器的脉冲周期为 T_0 ,频率为 f_0 ,则在 T 时间内所包含的高频脉冲个数 n 为

$$n = \frac{T}{T_0} \quad (2.6)$$

由式(2.5)和式(2.6)可得每个高频脉冲代表的数值是

$$\frac{D}{n} = \frac{4\pi n_j f}{f_0} \quad (2.7)$$

如果令 $N = \frac{f_0}{n_j}$ 为分频比,则上式变为

$$\frac{D}{n} = \frac{4\pi f}{N} \text{ 或 } D = \frac{4\pi f}{N} n \quad (2.8)$$

从式(2.8)可以看出, n 和 $\frac{4\pi f}{N}$ 的积就是被测件外径的大小。从公式表面看,结果与旋转棱镜速度无关,但在推导过程中,首先假设了光束由焦点出发,速度均匀、等速。而实际上扫描速度是非均匀、非等速的,由于采用多面体转镜,扫描光束在转镜上的反射点、回转中心和发射透镜焦点三者不重合,产生离焦现象。光束不是从焦点射出,这样经过扫描发射光学系统射出的光线,不和主光轴平行,存在准直误差。所以激光扫描检测系统是一个动态光学系统,想要获得微米级的测量精度,就必须采用具有良好动态特性的特殊光学系统,一般采用 $f\theta$ 透镜作为扫描发射光学系统,能够很好地解决这一问题。

由上面分析可知, $\frac{4\pi f}{N}$ 的大小就决定激光扫描检测系统的理论分辨精度,

要使系统达到 $1\mu\text{m}$ 的测量精度, 就必须使 $\frac{4\pi f}{N} = 1\mu\text{m}$, 可以选取焦距 f 小的光学系统或增大分频比 N 。但是, 光学系统焦距过小会影响系统的线性, 增大分频比 N 就必须提高高频振荡器的振荡频率 f_0 或降低同步电机的转速 n_j 。提高 f_0 需要有更高频率影响的数字电路, 而 n_j 的大小受到同步电机本身性能的限制, 不能太小, 否则测量速度太低, 不适应测量快速运动被测物体的需要。因此, 在实际应用时, 根据不同的精度、速度的要求, 要选择 f 和 N 的最佳值。这种高精度激光扫描检测系统测量范围一般为 $\phi 0.1 \sim \phi 25\text{mm}$ 。

2.2 检测系统主要组成部分设计

2.2.1 扫描速度分析

在前面分析中, 系统测量原理是以扫描速度恒定为基础的, 事实上由于系统本身固有的性能, 扫描速度不是固定不变的, 它是扫描光学系统主平面上激光束的光点移动速度, 即像高随时间的变化率。扫描转镜一般采用正多面体结构, 以增加扫描次数, 从而提高系统的测量速度。其扫描速度可根据光学、机械特性计算出来, 如图 2.3 所示。

为了获得扫描速度的公式, 在图 2.3 的几何关系中, 点 A 是转镜表面上的反射点, F 是扫描光学系统的焦点, θ 是激光束射到转镜上的入射角, ϕ 是转镜从垂直位置转过的角度。

很明显, 反射点 A 随着转镜沿着入射光方向旋转而变化, 也就是沿着 \overline{FA} 方向而变。假设反射点 A 沿着 \overline{FA} 方向移动的速度是 V' , 则 V' 可由下面的方法求出:

因为转镜的内切圆半径是已知的, $\overline{FD} = \overline{OD} - R$, $\overline{OD} = R/\cos\phi$ 。所以, 有

$$\overline{FD} = (1 - \cos\phi)R/\cos\phi$$

在 $\triangle FAD$ 中, 由正弦定理得

$$\frac{\overline{FA}}{\sin(90^\circ - \phi)} = \frac{\overline{FD}}{\sin[90^\circ - (\theta - \phi)]} \quad (2.9)$$

将 \overline{FD} 代入式(2.9), 有