

文章编号 1004-924X(2017)10-2668-08

激光在机测量系统的实现

刘 勇*, 李 昆, 王帼媛

(北京航空精密机械研究所 精密制造技术航空科技重点实验室, 北京 100076)

摘要:为了能在加工航空发动机关键零部件(如叶片)等复杂曲面零件的过程中实现快速在机测量,研制了非接触式激光在机测量系统。分别介绍了测量系统的工作原理,机械结构和电控系统。该系统主要由激光测头、无线传输电路、可充电锂电池、转接基座、刀柄和外壳等部分组成。为了实现机床的加工模式与测量模式之间的快速切换,其采用刀柄式的安装方式,从加工叶片切换到在机测量时,机床只要运行换刀程序,即可实现叶片加工到叶片测量的转换。此外文中还针对在机测量系统的电控部分研制了通过无线传输的数据采集系统。为了验证所研制的在机测量系统的实用性和有效性,在五轴叶片加工中心上进行了叶片截面测量实验,结果显示其测量精度为 $20\ \mu\text{m}$,测量时间为 $10\ \text{min}$ 。验证结果表明所研制的激光在机测量系统能够高效精确地完成叶片型面的测量任务。

关键词:在机测量;激光测量;激光测头;航空发动机;叶片;数控机床

中图分类号:TH247; TG659 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172510.2668

Implementation of laser on-machine measuring system

LIU Yong*, LI Kun, WANG Guo-yuan

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Precision
Manufacturing Technology, Beijing Precision Engineering Institute
for Aircraft Industry, Beijing 100076, China)

* Corresponding author, E-mail: 13671176136@163.com

Abstract: A non-contact laser on-machine measuring system was developed to realize rapid on-machine measurement of complex curving parts such as blades in an aircraft engine. The mechanical structures and electronic controlling systems of the measuring system were introduced in detail. The laser on-machine measuring system is composed of laser sensors, wireless transmission circuits, a rechargeable lithium battery, transit bases, a handle and a shell *etc.* To rapidly switch the machining mode and measuring mode, the installation structure with a handle was adopted. When machining blade processing was switched into the on-machine measurement, the system could operate a tool change program, and the system might be taken out from the tool magazine to on-machine measuring mode. For the electronic control part of the measuring system, a data acquisition system of wireless transmission was developed. To verify the practicability and effectiveness of the on-machine measuring system, the experiment of scanning and measuring the blade section was executed on a 5-axis blade machining center. The experimental results show that the measuring precision is $20\ \mu\text{m}$ and the measuring time is 10

收稿日期:2017-06-01;修订日期:2017-07-02.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2013ZX04011031)

min. As the results, it indicates that laser on-machine measuring system established in the paper realizes the measuring assignment of blade surfaces in a rapid and accurate manner.

Key words: on-machine measurement; laser measurement; laser sensor; blade; numerical control machine

1 引 言

随着现代制造技术的发展,测量已不仅仅是产品质量的最终评定手段,而是要为产品设计和制造全过程服务的必要环节^[1]。从传统的独立测量发展到进入制造现场的在机测量,不仅能够实现加工制造过程中的及时反馈与可测可知^[2],而且是保证数控机床加工精度和加工效率的重要措施,同时也是实现智能制造的重要环节。

随着我国航空工业的发展,提升航空发动机的整体性能越来越重要,对发动机关键零部件如叶片加工质量的要求也越来越高^[3]。在加工叶片等复杂曲面零件时,如果能够在机床上实现在机测量,则不仅能够直接指导或修正加工过程,从而减少零件的加工与测量工作之间的准备时间,还可以减小因工件重新装夹带来的精度损失,这对于提高加工制造过程的自动化、信息化和降低废品率等都有着十分重要的意义^[4-5]。传统在机测量系统的检测装置主要由接触式测头和信号接收器等组成。接触式测头的触发信号以红外或无线电方式发送到安装在机床内的接收器,并传送到机床控制系统,从而锁存记录当前的机床各轴坐标值^[6]。然而,在进行叶片等复杂曲面零件的在机测量时,采用传统在机测量系统存在着检测效率低、易发生干涉及需要测头半径补偿等缺点,因而应用范围受到很大限制。而采用非接触式的激光在机测量方式,则具有如下独到的优点^[7-8]:(1)光斑直径小,无需测头半径补偿;(2)无接近和回退过程,采样速率可为接触式测头的数十倍,特别适合于高效获取数据点云;(3)具有一定的采样距离和采样范围,因而可根据情况规避对数控系统的调整和修改^[9-10]。

本文基于激光测头研制了非接触式的在机测量系统,以在叶片的加工过程中实现叶片的快速在机测量。为了验证所研制的激光在机测量系统的实用性和有效性,在 XKH800 型五轴叶片加工中心上进行了叶片截面测量的实际应用。

2 激光在机测量系统的工作原理

如图 1 所示,本文所研制的激光在机测量系统主要由激光测头、无线传输电路、可充电锂电池、转接基座、HSK63A 刀柄和外壳等部分组成。为了减少对原始数控系统的修改,本文在数控系统操作界面计算机之外,另外配备了一台专用的在机测量处理计算机。

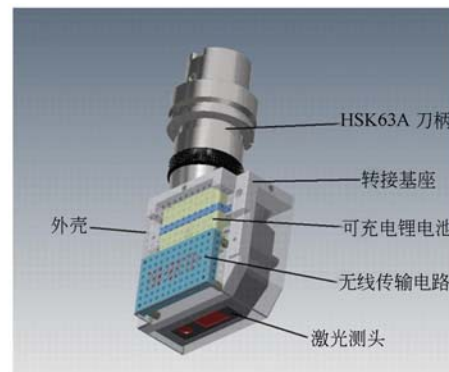


图 1 激光在机测量系统

Fig. 1 Laser on-machine measuring system

该激光在机测量系统的工作原理如图 2 所示。激光测头的的数据通过无线方式传输给数据接口模块(即信号处理模块);数据接口模块通过 USB 接口传输数据给测量计算机上的软件,同时能采集数控系统的状态信号以及发送触发信号给



图 2 激光在机测量系统工作原理图

Fig. 2 Working diagram of laser on-machine measuring system

数控系统;数控系统与测量计算机之间可以通过以太网传输文件。而测量计算机上运行着在机测量的软件系统,包括接口软件和 Autodesk 公司的 PowerINSPECT OMV 软件,前者负责接收测头数据、将测头数据与机床坐标合成测量点坐标以及测头标定计算等;后者负责轨迹规划、测量程序后置处理等。

3 机械结构

本文应用激光三角法测头作为前端传感器来实现对叶片的在机测量。在测量过程中,测头搭载于加工机床内,对被加工叶片进行参数测量,而测量结束后,机床要快速切换到叶片加工状态。为了实现叶片的在机测量和加工状态之间的快速切换,所研制系统采用了刀柄式的安装(刀柄 HSK63A)结构。在加工叶片时,在机测量系统随刀柄安置在刀库中,当需要切换到在机测量时,机床只需运行换刀程序,将在机测量系统从刀库中取出,即可对叶片进行测量。

本文所设计的激光在机测量系统具有以下优点:

(1)采用刀柄式安装方式,结构小巧,不仅提高了叶片加工和在机测量这两个过程的转换效率,而且叶片加工过程中整个在机测量系统安置在刀库内,不会额外占用机床空间;

(2)外壳采用封闭结构,在测头状态显示口利用透明塑料薄膜进行密封,这样整个测头装置可以避免加工切削液的污染,同时还能正常观测激光测头的测量状态;

(3)在靠近电池的部分进行了散热处理,能够有效对测量过程中产生的热量进行疏散,从而提高了激光测头模块使用的寿命;

(4)使用过程中确保了激光测头的光束矢量与加工机床主轴的平行,从而有利于激光测头的标定以及测量数据的处理。

4 电控系统

激光在机测量系统的电控系统设计如图 2 所示,主要包括激光测头中的信号发送板和数据接口模块中的信号处理板。激光测头信号发送板利用无线传输方式和数据接口模块信号处理板进行

激光测头数据的交互与传输,上位机同时通过数据接口模块信号处理板完成对机床数控系统信息和状态信号的采集,从而实现对叶片在机测量过程中信息的数据采集。

4.1 激光测头信号发送板

激光测头信号发送板采用模块化、低功耗和可充电设计,如图 3 所示,主要负责将测头的测量信息发送给数据接口模块信号处理板,可以实现快速、长距离传送,并且能够有效节约电量,延长连续使用时间,其实物如图 4 所示。

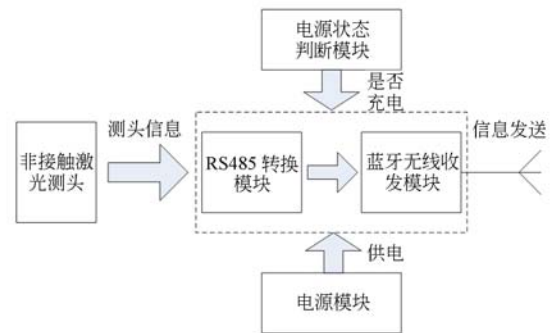


图 3 激光测头信号发送板原理图

Fig. 3 Diagram of Transmitting board of laser probe signal

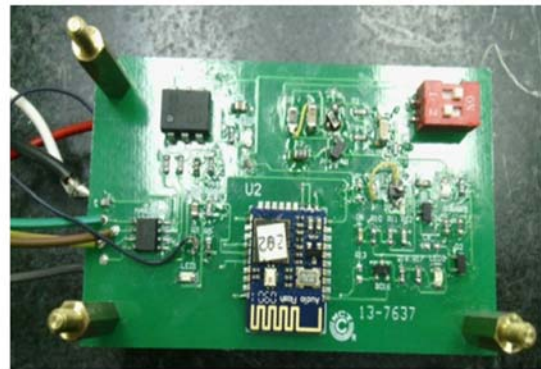


图 4 激光测头信号发送板

Fig. 4 Transmitting board of laser probe signal

4.1.1 电源模块

电源模块主要负责为激光测头信号发送板和激光测头供电。由于激光测头工作电压为 12~24 V,而在机测头信号电路板除了 12 V 电源,还需要 3.3 V 供电,因而本系统采用了 12 V 的聚合物锂电池对系统供电,在满足了测头的工作需求的同时,还通过 MIC5235 芯片将 12 V 转化为 3.3 V,供信号发送板使用。

由于采用无线模块对测头信息进行传输,测

头和信号发送板的供电都是通过锂电池来实现,因而需要合理地使用电源,否则锂电池电量将较快耗尽。通过芯片 AQV251A 对电源进行控制,当蓝牙模块之间建立连接传输数据时,该芯片才对非接触测头进行供电,而蓝牙模块之间断开连接时,该芯片则不对测头供电。同时,该模块还通过指示灯对锂电池电源电量进行显示,当指示灯为绿色时说明电量充足,可正常工作;当指示灯为黄色或熄灭时,说明电池电量较低或已耗尽,应尽快充电。

4.1.2 蓝牙无线收发模块

蓝牙无线收发模块负责通信的建立、取消以及信息的发送和接收。该模块采用了 CSR 公司的 AUDIO-FLASH 蓝牙芯片,附加 Atmel 公司 T7024 蓝牙专用前端芯片,扩展成标准的 1 级蓝牙模块,通信距离达到 100 m。其外围主要元器件选型采用工业级标准,模块电路板为 0.8 mm 四层板,采用激光盲孔加工工艺,引脚采用半孔加工工艺,贴片式设计,体积尺寸紧凑,最适合工业数据和语音传输,是高质量的 CLASS2 蓝牙模块。同时该模块采用 16 MHz 晶振,频段为 2.40 GHz~2.48 GHz、功率等级为 Class1(+20 dBm)、接收灵敏度为-85 dBm、参考功耗为待机 0~6 mA,数据通信约为 100 mA,语音通讯约 120 mA。该模块传输数据可靠、抗干扰性强、消耗功率低,能够实现数据长距离快速传输。

4.1.3 RS485 转换模块

激光在机测量系统采用了 2300 型激光测量模块,其传输的测量信息采用的格式是 RS485 串口信号,而蓝牙无线收发模块只能接收 RS232 串口格式的信号。因此,需要 RS485 转换模块通过 MAX3490 芯片实现 RS485 格式与 RS232 格式的信号转换。

4.2 数据接口模块信号处理板

数据接口模块信号处理板的功能是通过无线收发模块接收激光测头发送的测量数据以及完成对数控机床系统坐标采集同步信号的发送,并可上传测量数据至上位机接口软件。其原理如图 5 所示,实物如图 6 所示。

4.2.1 蓝牙无线收发模块

蓝牙无线收发模块同样采用 CSR 公司的 AUDIO-FLASH 蓝牙芯片,附加 Atmel 公司 T7024 蓝牙专用前端芯片。该模块主要负责无线

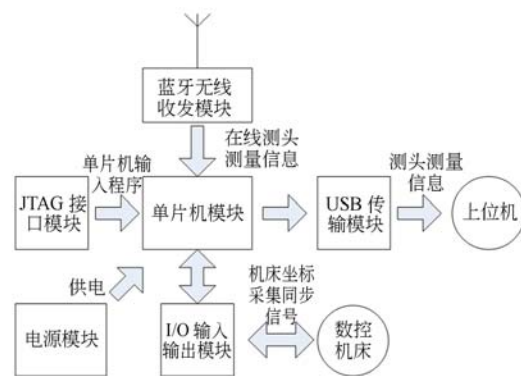


图 5 信号处理板原理图

Fig. 5 Diagram of signal processing circuit board

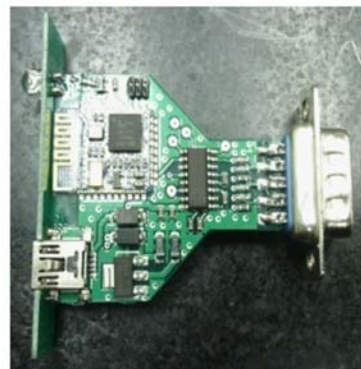


图 6 信号处理板

Fig. 6 Signal processing circuit board

通信的建立,接收激光测头信号发送板传送来的测头信息,并传给单片机模块,从而完成测头信息的采集和计算。

4.2.2 单片机模块

单片机模块是通讯触发板的核心,其负责对从串口接收到的测头信息进行解码计算,通过 USB 传输模块向上位机发送测头信息,并通过 I/O 输入输出模块发送数控机床采集坐标同步信号。

该模块采用的是 Silicon Labs 公司的 C8051F342 单片机,具有 4 kB 的 RAM 和 64 kB 的 FLASH,片上集成了丰富的外围模块(包括串口、SPI、10 位 A/D 转换器等),很好地满足了本系统对微控制器的要求;支持快速唤醒和最低 0.9 V 的供电;有多种电源管理模式(如正常模式、空闲模式、休眠模式等),内部集成的 2 个内建欠压检测器分别适用于休眠模式和正常模式,典型休眠模式下电流仅为 50 nA。C8051F342 包含 1 个高效率直流升压转换器,最多提供 65 mW 给

内部微控制器和其他元器件,为了减少正常模式下的电池耗电,C8051F342 的省电架构能将操作模式下的电流减小到 $170 \mu\text{A}/\text{MHz}$ 。

4.2.3 USB 模块

单片机将处理计算得到的测头数据通过 USB 模块发送给上位机,该模块传输速度快、可靠性高,满足测头在机测量信息高速采集及传输的要求。同时,上位机能够通过 USB 模块对通讯触发板提供 5 V 电源,避免了额外的电源供给,从而精简了通讯触发板结构。

4.2.4 I/O 输入输出模块

为了保证测量信息的准确性,数控加工机床搭载激光在机测量系统对叶片进行扫描测量时需要对得到的机床坐标和测头测量值进行同步,即在同一时刻完成机床坐标和测头测量值的采集。本系统采用脉冲同步的方式来实现对测量信息的采集,即单片机通过 I/O 模块向加工机床发送同步脉冲,同时锁存该时刻的测头信息,而机床数控系统完成对同一时刻机床坐标的锁存,从而达到同步采集。同时,加工机床数控系统也能够通过 I/O 模块完成在机测头测量功能的开启和关闭。

4.2.5 嵌入式软件开发

通讯触发板中单片机模块中烧录嵌入式软件,完成对测头信息的处理计算,通过 USB 模块向上位机发送信息以及同步采集信号的发送。该软件采用 Keil $\mu\text{Vision4}$ 作为软件开发工具,语言为 keil c51。软件编程采用模块化思想,系统中各主要功能模块均采用独立的函数实现供主函数调用。功能模块包括:MCU 初始化、SPI 写寄存器、SPI 读寄存器、串口初始化、串口发送数据和 GC-02-DIP 蓝牙模块初始化等。

无线接收程序流程如图 7 所示。程序完成 C8051F342、串口接收、SPI 接口和 GC-02-DIP 的初始化后,配置寄存器写入相应的初始化 RF 控制字。通过访问寄存器 7fh 从 RX FIFO 中读取接收到的数据。相应的控制字设置好之后,若引脚 IRQ 变成低电平,则表示 GC-02-DIP 准备好接收数据。完成这些初始化配置后,通过寄存器 4bh 读取包长度信息。然后,打开有效包中断和同步字检测中断,将其他中断都禁止。引脚 IRQ 用来检测是否有有效包被检测到,若引脚 IRQ 变为低电平,则表示有有效的数据包被检测到。本系统用 0x2DD4 作为同步模式的标志码,接收模

块通过检测这个同步字来同步接收数据。最后,使能接收功能,数据开始接收。等待 IRQ 引脚因中断产生而使电平拉低,读取中断标志位复位 IRQ 引脚,使 IRQ 恢复至初始的高电平状态以准备下一次中断触发的检测。通过 SPI 读取 RX FIFO 中的数据,将数据报送至主机,之后进入下一次数据接收状态。

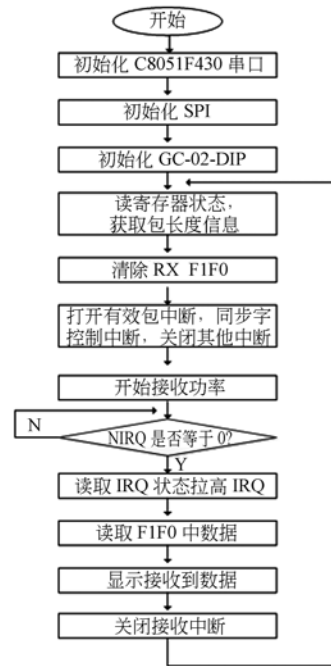


图 7 无线收发嵌入式程序流程图

Fig. 7 Flow chart of wireless transceiver embedded program

5 在五轴叶片加工中的实验应用

将所研制的激光在机测量系统搭载在北京机电院生产的叶片五轴数控加工机床 XKH800 上,并对某型叶片进行了测量应用,实验现场如图 8 所示。首先用 PowerInspect 软件进行 5 轴路径规划,通过软件模块进行轨迹优化后,放入加工中心数控系统中。运行测量程序后,软件模块根据测头数据和数控系统数据,得到叶片的表面点坐标,最后通过 UG 软件对测量结果进行评估。

在机测量叶片的结果在 UG 中的显示和局部放大图如图 9 所示,图中的点是在机测量测得的点,4 片曲面是通过高精度测量机获取的叶片实际表面模型(模型未进行测量机测头半径补偿)。实验对叶片露出夹具的进气边附近叶盆和叶背以

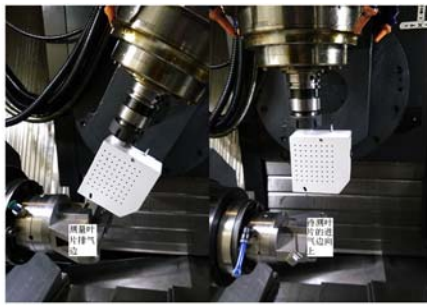


图 8 叶片测量现场
Fig. 8 Blade measurement field

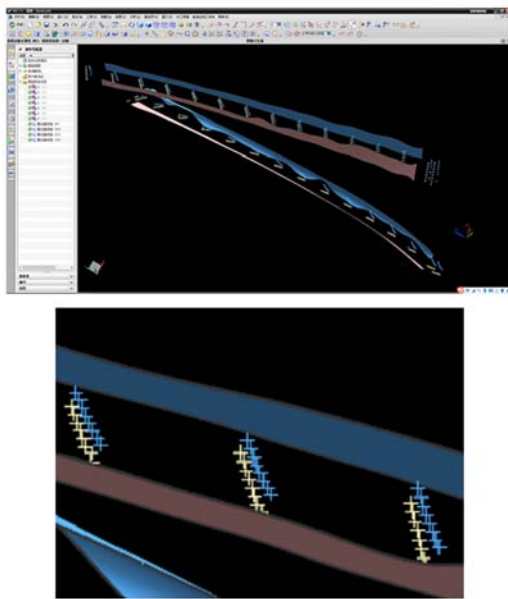


图 9 测量结果
Fig. 9 Measurement result

及排气边附近叶盆和叶背分别进行了测量。整个叶片取了 15 个截面,每个截面包含 4 段数据(分别为进气边叶盆、进气边叶背、排气边叶盆以及排

表 1 部分测量点

Tab. 1 Partial measuring points (mm)

序 号	测头 数据	点 X 坐标	点 Y 坐标	点 Z 坐标	误差
1	0.160 4	70.887 7	-49.600 1	-17.020 4	0.007
2	0.140 2	70.898 9	-49.600 1	-17.666 3	0.003
3	0.143	70.890 7	-49.600 1	-18.271 4	0.006
4	0.112 1	70.889 5	-49.600 1	-18.861 6	-0.004
5	0.076	70.896 7	-49.600 1	-19.422 8	-0.007
6	0.077	70.905 1	-49.600 1	-19.973 4	-0.01
7	0.015 9	70.924 6	-49.600 2	-20.521 4	-0.016
8	0.006	70.942 2	-49.600 2	-21.068	-0.013

气边叶背),每段数据 8 个点。用 UG 测量每个点与三坐标测量机实测曲面的距离,减去测量机测头半径,得到的值为在机测量各个点的误差。表 1 所示为节选的第 6 个截面中进气边叶盆部分的 8 个在机测量数据点,作为测点数据的示例。所有测点的最大误差为 20 μm ,整个叶片测量用时约 10 min。

将通过激光在机测量系统测得的数据用于叶片的自适应加工,既避免了工件的重复装夹,也无需进行测头半径补偿,使得加工流程中的测量步骤更为便捷。

6 实验结果分析及改进方法

在机测量叶片中的单点最大误差为 20 μm ,分析其误差来源,包括以下因素:

(1) 机床五轴定位误差

机床定位误差会完全传递给在机测量结果,而实验中机床的 X、Y、Z、A、B 共 5 个轴均参与了测量运动,因此该机床的五轴误差是实验误差的重要组成部分。实验前对机床进行了精度补偿和参数修正,受条件所限,机床依然存在约 10 μm 的五轴定位误差。

(2) 光学测头误差

光学测头的误差可分解为测头矢量方向的标定误差和测头示值误差。测头矢量标定带来的误差在光学测头满量程使用时为 15 μm ,实际测量使用了量程的 1/5,误差约为 3 μm 。

产生测头示值误差的重要原因是叶片表面微小起伏对激光测头的示值影响,该值远大于测头规格说明中的理论值,经实验测量约为 10 μm 。

(3) 环境扰动误差

环境扰动因素中,温度、振动是比较常见的因素,可以对机床和测头产生影响,从而间接增加在机测量误差。上述实验中,由于测量总用时较短,仅为 10 min,加上实验现场有隔震地基,所以可以认为环境扰动误差较小。

(4) 测量机实测曲面误差

测量机对叶片建模时不可避免引入少量误差。

后续改善激光在机测量系统精度可以从以下几方面入手:

(1) 对机床精度和相关补偿参数进行进一步的优化,并为机床添加温度补偿;

(2) 采用更高精度或者不同原理的光学测头,并增加用于测头矢量标定的数据;

(3) 优化软件数据处理算法。

7 结 论

本文基于激光测头、无线传输电路、可充电锂电池、转接基座、HSK63A 刀柄和外壳等研制了

非接触式激光在机测量系统,从而实现了叶片激光在机测量。为了实现机床的加工模式与测量模式之间的快速切换,该在机测量系统采用了刀柄式的安装方式。针对激光在机测量系统的电控部分,本文研制了通过无线传输的数据采集系统。为了验证所研制的在机测量系统的实用性和有效性,本文在 XKH800 型五轴叶片加工中心上进行了叶片截面测量的实验验证。通过激光在机测量得到了叶片的测量结果,并与三坐标测量机上的测量结果进行了对比,测量精度约为 $20\ \mu\text{m}$,测量用时共 10 min,结果表明了本文所研制的激光在机测量系统的实用性和有效性。

参考文献:

- [1] 张建明, 罗松保, 庞长涛, 等. 现代机床在机测量技术研究与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016(9): 43-49.
ZHANG J M, LUO S B, PANG C T, *et al.*. Research and development trends of on-machine measurement technology on modern machine tools[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016(9): 43-49. (in Chinese)
- [2] 刘军. 航空发动机研制中的叶片加工工艺探讨[J]. 航空发动机, 2000(3): 66-69.
LIU J. Research on leaf processing in aviation engine development[J]. *Aeroengine*, 2000(3): 66-69. (in Chinese)
- [3] 王森安. 光学测头在飞机发动机叶片检测中的应用[J]. 航空制造技术, 2010(13): 32-35.
WANG M A. Application of optical probe in aircraft engine blade inspection[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010(13): 32-35. (in Chinese)
- [4] 任如飞, 陆兵, 张世亮, 等. 实物样件非接触测量技术综述[J]. 装备制造技术, 2010(2): 125-128.
REN R F, LU B, ZHANG SH L, *et al.*. A review of non-contact measurement technology for samples of material objects[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2010(2): 125-128. (in Chinese)
- [5] 龙志林. 数控激光三维测量关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
LONG ZH L. *Research on key techniques of NC laser three-dimensional measurement* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2004. (in Chinese)
- [6] 李建广, 张利, 王扬, 等. 数控机床在线测量技术研究[J]. 航空制造技术, 2014(13): 38-42.
LI J G, ZHANG L, WANG Y, *et al.*. Online inspection technology integrated with NC machine tools[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014(13): 38-42. (in Chinese)
- [7] 毕超, 房建国, 刘京亮, 等. 基于球形目标的激光位移传感器光束方向标定[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 678-685.
BI CH, FANG J G, LIU J L, *et al.*. Calibration of beam direction of laser displacement sensor based on spherical target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 678-685. (in Chinese)
- [8] 孟书广. 航空发动机复杂零部件的新型测量技术[J]. 航空制造技术, 2014(13): 32-35.
MENG SH G. New metrology technique for complex components of aero-engine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014(13): 32-35. (in Chinese)
- [9] XIE Z X, WANG X M, CHI S K. Simultaneous calibration of the intrinsic and extrinsic parameters

of structured-light sensors[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 58:9-18.

[10] BI C, LIU Y, FANG J G, *et al.*. Calibration of

laser beam direction for optical coordinate measuring system[J]. *Measurement*, 2015, 73: 191-199.

作者简介:



刘 勇(1980—),男,山西临县人,本科,高级工程师,1999年于北方交通大学获得学士学位,现为北京航空精密机械研究所项目经理,主要从事精密坐标测量技术方面的研究。E-mail: 13671176136@163.com



李 昆(1986—),男,江西丰城人,工程师,2007年、2011年于北京工业大学分别获得学士、硕士学位,现为北京航空精密机械研究所研发人员,主要研究方向是数控系统技术和在机测量技术。E-mail: sunnyleeqq@163.com