

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.008

成型模具安装误差原位测量控制系统研究与开发

储祥宇, 叶文华, 杨高杰, 叶柳康

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:针对成型模具安装误差人工测量方式效率低、劳动强度大、耗时长等问题,设计一种基于 PLC 控制的成型模具安装误差原位测量控制系统。以台达 DVP50MC 多轴运动控制器为主控制器,结合伺服控制技术,通过三轴运动机构驱动线激光轮廓仪进行精确定位,实现对成型模具几何特征的自动测量。利用 Microsoft Visual Studio 平台开发上位机控制软件,实现对测量数据的处理与安装误差的自动计算。实验结果表明:该系统具有较高的测量精度,可满足实际测量中的快速、高精度要求。

关键词:成型模具; PLC; 安装误差; 自动测量; 控制系统

中图分类号: TP273 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)03-0043-05

Research and Development of In-situ Measurement and Control System for Installation Error of Forming Molds

CHU Xiangyu, YE Wenhua, YANG Gaojie, YE Liukang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To address the issues of low efficiency, high labor intensity, and long time consumption of manual measurement methods for installation errors of forming molds, a PLC controlled in-situ measurement and control system for installation errors of forming molds is designed. With the Delta DVP50MC multi axis motion controller being the main controller, and combined with servo control technology, precise positioning is conducted through a three-axis motion mechanism with a power line laser profilometer, and the automatic measurement of geometric features of forming Molds being achieved. The Microsoft Visual Studio platform is used to develop upper computer control software to accomplish automatic processing of measurement data and calculation of installation errors. The experimental results show that the system has high measurement accuracy and can meet the requirements of fast and high-precision in practical measurement.

Keywords: forming mold; PLC; installation error; automatic measurement; control system

0 引言

国内某航空复合材料制件具有型面复杂、尺寸大、质量大、加工精度要求高等特点。为了保证制件的质量和性能,需要安装在成型模具上用五轴联动数控机床进行分层多次重入式加工。因此,成型模具的定位与安装必须十分准确,这是确保制件多次重入式高精度加工的前提。

成型模具典型结构如图 1 所示。成型模具长度通常为 1 000~2 000 mm,宽度为 500~1 000 mm,最大高度可达 2 000 mm,最大质量(含复合材料制件)可达 2 000 kg。用于定位测量的特征面与特征孔主要分布在成型模具 4 个边的中点或 4 个角上。通常,工人需要在加工工位对成型模具特征面、特征孔进行反复测量和位姿调整来实现模具找正,其安装过程耗时长、劳动强度大,难以满

足航空工业快速发展的需要。为此,迫切需要开发成型模具安装误差原位自动测量技术。



图 1 典型的成型模具结构

随着光学技术的发展,光学非接触式测量技术应运而生,常见的测量方法主要包括激光干涉法、立体视觉法和激光三角法等^[1]。其中激光三角法作为典型代表,在工业测量领域得到了广泛应用^[2-5],线激光轮廓仪的基本原理就是激光三角法。

非接触式测量与 PLC 控制已经成为现代工业自动化测量领域的关键部分。非接触式测量技术可实现数字化采集^[6],方便用户进行后期的数据分析与处理。王正家等^[7]提出了一种基于线激光轮廓仪的 T 型焊件焊缝检测方法,测量误差最小可达 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。WANG 等^[8]提出一种基于线激光轮廓仪的圆锯片平面度误差测量方法,测量分辨率精度可达 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。张丽艳等^[9]提出了一种适用于在线激光测量的测头标定方法,使测量误差小于 0.05 mm 。基于 PLC 为控制核心的自动测量控制系统广泛应用于目前的各个工业控制领域。肖尧等^[10]通过三菱 Q 系列 PLC 控制设备带动激光轮廓仪对钢轨表面平直度进行检测,测量结果重复度精度在 $\pm 0.05\text{ mm}$ 以内。张书真^[11]通过西门子 S7-200 控制检测设备带动 CCD 相机对显示屏进行测量,实现了对显示屏表面缺陷的自动检测。郭程程^[12]利用三菱 FX3U 作为核心 PLC 控制单元,研发了一种基于 PLC 控制的表面粗糙度自动化测量系统,实现了对工件表面粗糙度的精确测量。

本文重点对成型模具安装误差原位测量控制系统进行研究与开发。通过设计成型模具安装误差原位自动测量总体方案,研究与开发自动测量控制技术与系统,控制测量机构的高精度、高稳定性,实现成型模具安装误差的自动精确测量。

1 系统方案设计

根据模具安装位姿误差控制要求,需要通过自动测量分布在模具四周 4 个特征面的高度和 2 个特征孔的孔心位置,并分别计算它们之间 z 轴方向高度差与 z 轴转动方向的角向偏差,要求偏差均不大于 0.03 mm 。

根据上述模具特征的测量要求,设计了模具安装误差原位测量控制系统的总体方案:在数控机床加工工位上以直角坐标式三轴运动机构驱动线激光轮廓仪对模具测量特征进行无接触式自动扫描测量并计算位姿误差。具体包括设计一套三轴运动机构,把线激光轮廓仪安装在三轴运动机构上,PLC 控制三轴运动机构及线激光轮廓仪对模具特征面进行无接触式扫描测量,采集测量数据并传输给上位机,上位机完成测量数据处理与误差计算。系统总体方案如图 2 所示。

模具安装误差原位测量控制系统主要由线激光轮廓仪、三轴运动机构及其驱动控制系统、安装误差测量控制系统软件等部分组成,如图 3 所示。

1) 线激光轮廓仪

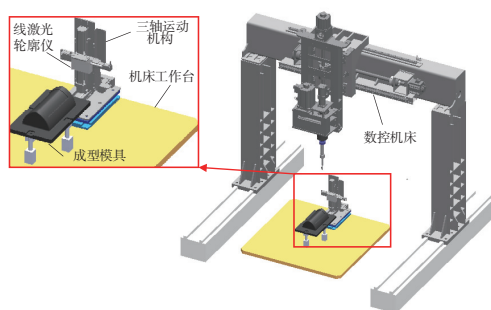


图2 安装误差原位测量系统总体方案

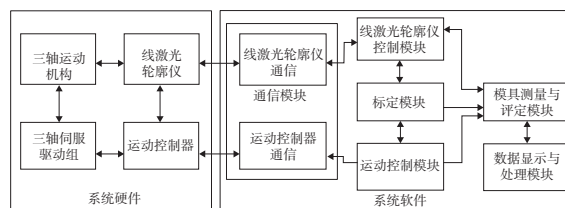


图3 安装误差原位测量控制系统原理与组成

根据测量系统的要求,测量对象是模具测量特征面和特征孔,测量环境为工业生产现场,可能会有各种类型的信号干扰,同时测量系统要求具备在运动过程中快速、准确、稳定测量的能力。为此,确定采用非接触式的光学测量方式,即选择线激光轮廓仪作为测量传感器。

2) 三轴运动机构及其运动控制系统

三轴运动机构用于搭载线激光轮廓仪实现 x 轴、 y 轴、 z 轴 3 个轴向运动,配合线激光轮廓仪完成对被测区域的扫描运动过程。为了满足高精度与快速测量要求,三轴运动机构应采用伺服控制,并具有单轴运动控制以及多轴联动控制的功能。同时其结构及行程应可避让吊装过程的模具,避免发生碰撞或妨碍模具的吊装。

3) 安装误差测量控制系统软件

安装误差测量系统软件主要负责三轴运动机构的运动控制、自动测量的运动控制、系统的标定、误差数据采集与处理、误差计算与评定等。软件系统由运动机构控制模块、自动测量模块、系统标定模块以及数据管理模块等组成。

2 控制系统硬件设计

模具安装误差原位测量控制系统硬件框架如图 4 所示。整个系统分二级控制^[13],上位机是模具安装误差原位测量总控系统,对整个测量与标定过程进行控制;下位机是基于 PLC 的三轴运动机构运动控制系统,它根据上位机的测量规划与指令控制三轴运动机构的运动,包括启停、速度、位置等。

上位机与下位机之间通过交换机进行以太网通信。为提高控制的实时性,下位机与伺服驱动器间的通信也应采用实时工业以太网技术^[14]。为提高3个数控轴的定位精度,要采用光栅尺进行实时位置的反馈,并进行闭环控制^[15]。上位机与线激光轮廓仪之间通过以太网通信,同时伺服电机编码器对线激光轮廓仪进行测量触发^[16]。

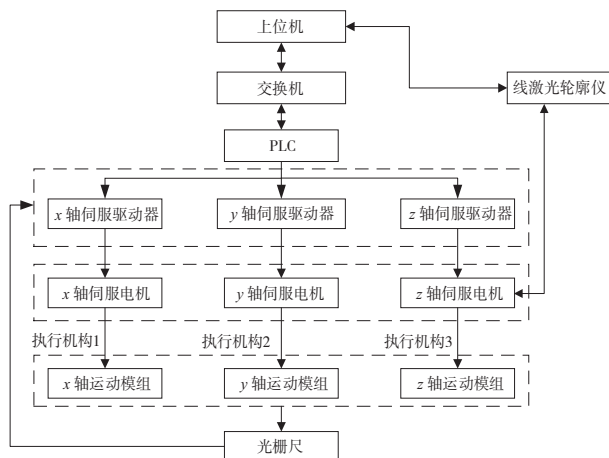


图4 测量控制系统硬件总体框架

硬件选型如下:PLC控制器采用基于EtherCAT现场总线的台达DVP50MC11T多轴运动控制器,其集PLC与运动控制器功能于一体,总线传输速率100 Mbps,可同时控制24个轴。伺服驱动器采用台达ASDA-A2系列伺服驱动器,该系列驱动器内置EtherCAT通信接口,通过总线通信来对伺服驱动器进行控制,相对于传统的脉冲指令,具有更快的动态响应速度以及更好的多轴同步性能。伺服电机采用带20位增量型编码器、最高转速5 000 r/min的台达ECMA系列永磁同步电机。线激光轮廓仪采用加拿大LMI公司Gocator 2420,其z向分辨率达0.003 mm。

3 系统软件设计

3.1 软件总体框架

控制系统软件主要分为下位机的PLC运动控制软件和上位机的测量系统控制软件,其总体框架如图5所示。

3.2 PLC程序设计

PLC运动控制软件负责测量系统运动控制及相应的参数配置,包括总线PLC的同步周期、原点回归模式、运动任务、伺服轴的伺服齿轮比等。PLC执行运动如表1所示,其中“执行动作标识符”为上位机软件发送给PLC软件的各种动作的

标识符,共设计了18种具体动作(表1),图6为轴使能PLC程序。

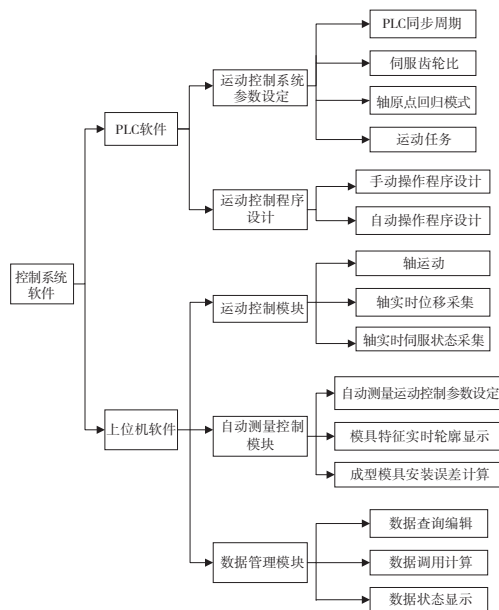


图5 测量控制系统软件总体框架

表1 动作规划

执行动作标识符	动作描述	执行动作标识符	动作描述
1	暂停	10	轴3反转点动
2	原点回归	11	点动数值设定
3	安全等待点	12	轴1单轴运动
4	报警复位	13	轴2单轴运动
5	轴1正转点动	14	轴3单轴运动
6	轴1反转点动	15	多轴联动
7	轴2正转点动	16	正向扫描运动
8	轴2反转点动	17	反向扫描运动
9	轴3正转点动	18	自动测量运动

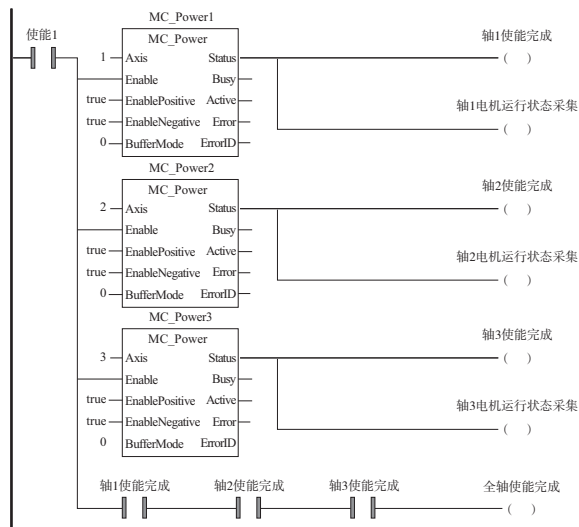


图6 轴使能PLC程序

3.3 上位机程序设计

上位机测量系统控制软件主要实现模具安装误差原位测量过程的总体控制,主要包括运动控制模块、自动测量控制模块和数据管理模块。运动控制模块主要通过 ModbusTCP 协议实现上位机对 PLC 的数据读写,完成对测量系统各轴的运动控制、实时位移数据采集和显示、实时伺服状态采集。

自动测量控制模块主要实现对线激光轮廓仪的控制、扫描轮廓的显示、模具安装误差的计算与评定。数据管理模块主要实现线激光轮廓仪对特征面、特征孔的轮廓数据的读取、保存及删除,为后续的数据处理提供帮助,方便进行数据的管理。

上位机测量系统控制软件基于 Microsoft Visual Studio 平台开发,其主界面如图 7 所示。



图 7 测量系统控制主界面

3.4 安装误差解算

模具安装误差以特征面之间的 z 轴向高度差、特征孔心在 x 轴、 y 轴方向之间的偏差来表示。如图 8(a) 所示,4 个特征面记为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 ,特征孔心记为 C_1 、 C_2 。特征面 P_1 与特征面 P_2 、 P_3 、 P_4 在机床 z 轴方向的高度差记为 Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 ,孔心 C_1 和 C_2 在机床 xOy 平面上投影点连线对 y 轴产生的偏角,该偏角在 x 轴方向的偏距记为 Δ_4 ,如图 8(b) 所示。

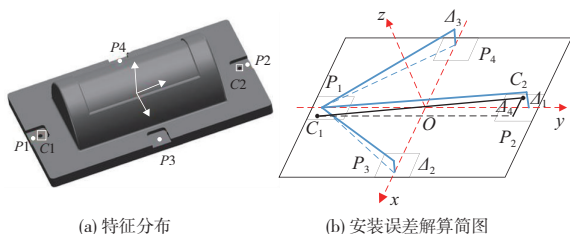


图 8 成型模具安装误差示意图

特征面 P_1 与 P_2 、 P_3 、 P_4 在机床 z 轴方向的高度差 Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 由每个特征面测量区域的几何中心位置的 z 向差值计算得到,几何中心位置的 x 、 y 坐标计算公式为

$$\begin{cases} x_{mi} = \frac{(x_{Pi})_{\max} - (x_{Pi})_{\min}}{2} \\ y_{mi} = \frac{(y_{Pi})_{\max} - (y_{Pi})_{\min}}{2} \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

式中: i 表示特征面的位置; 参数 $(x_{Pi})_{\max}$ 与 $(x_{Pi})_{\min}$ 、 $(y_{Pi})_{\max}$ 与 $(y_{Pi})_{\min}$ 分别代表特征面测量数据点中的 x 坐标最大值和最小值、 y 坐标最大值和最小值。同时,通过所有特征面的数据点进行基于最小二乘法的平面拟合以及圆拟合得到成型模具的基准平面方程 $Ax + By + Cz + D = 0$ 和孔心坐标 $C_1(x_{c1}, y_{c1}, z_{c1})$ 、 $C_2(x_{c2}, y_{c2}, z_{c2})$ 。

将 x_{mi} 和 y_{mi} 分别代入基准平面方程 $Ax + By + Cz + D = 0$ 可得到各个特征面的位置几何中心 z 坐标:

$$z_{mi} = -\frac{Ax_{mi} + By_{mi} + D}{C} \quad (2)$$

则各个特征面的高度差 Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 和孔心 C_1 和 C_2 在机床 xOy 平面上投影点的 x 轴或 z 轴方向的偏差 Δ_4 (这里以 x 轴为例) 可表示为

$$\begin{cases} \Delta_1 = z_{m2} - z_{m1} \\ \Delta_2 = z_{m3} - z_{m1} \\ \Delta_3 = z_{m4} - z_{m1} \\ \Delta_4 = x_{c2} - x_{c1} \end{cases} \quad (3)$$

4 系统实验验证

为了验证安装误差原位测量控制系统的精度,参考 GB/T 17421.2—2016 标准要求的方法进行重复定位精度测试。 x 轴、 y 轴、 z 轴的单向重复定位精度分别为 0.004 mm、0.003 mm、0.003 mm,特征面法向矢量夹角变化量小于 0.01° ,孔心位置坐标 x 、 y 、 z 的重复测量变化量分别小于 0.005 mm、0.006 mm、0.005 mm。

为验证本系统的可行性,对加工车间现场实际成型模具安装误差进行了测量。成型模具安装误差原位测量控制系统的自动测量与测试过程为:1)通过标定技术完成测量系统的全局标定。在此基础上,移动测量系统位置,分别对 4 个特征面和 2 个特征孔进行扫描测量;2)将数据统一至机床坐标系下,进行数据处理与安装误差解算,得到成型模具安装误差的 4 个误差参数值 Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 、 Δ_4 。同时,用百分表按人工测量方式进行测量,所得对应的安装误差数据,通过对比两种方法测量结果,来评价与验证成型模具安装误差测量控制系统的测量准确性。两种方法测量结果对比如表 2 所示。

表 2 成型模具安装误差测量结果对比 单位:mm

测量设备与方法	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4
系统自动测量	-0.232	-0.173	-0.445	-1.640
百分表人工测量	-0.25	-0.18	-0.46	-1.66

由表 2 的安装误差测量数据可知,本文设计的成型模具安装误差原位测量控制系统能够实现成型模具的安装误差测量。测量系统与百分表的测量结果偏差均小于 0.03 mm,两种测量方式所得结果偏差小,可见成型模具安装误差原位测量控制系统能够进行成型模具安装误差自动测量,测量结果满足要求。

5 结语

针对成型模具传统的人工安装误差测量与找正方法存在效率低等问题,本文设计并开发了成型模具安装误差原位测量控制系统。对成型模具安装误差自动测量总体方案进行设计,介绍了系统组成;根据总体方案,设计了系统硬件总体框架,详细介绍了系统硬件的选型;根据自动测量所需功能,设计了系统软件总体框架,完成了自动测

量的上位控制以及安装误差解算。最后通过实验室以及加工现场测试,验证了本文所开发系统的有效性。

参考文献:

- [1] 冯福星,张滋黎,程智,等. 激光三角测量技术综述[J/OL]. 激光与光电子学进展, (2025-04-09) [2025-04-29]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1690.TN.20250409.1017.026>.
- [2] 梁鑫瑞. 基于激光三角法的小型复杂形面多维测量系统研究[D]. 长春:长春工业大学,2024.
- [3] 张子怡. 小口径深孔类零件高精度内径测量技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2024.
- [4] 夏长久,王远洋,江磊. 螺旋丝锥几何参数快速非接触测量方法研究[J]. 仪器仪表学报,2024,45(8): 235-245.
- [5] 殷秀龙. 基于激光三角法的化工物料体积在线测量系统设计[D]. 淮阴:淮阴工学院,2024.
- [6] 彭光健,唐星宇,邢同振,等. 基于线激光传感器阵列的 PVC 地板锁扣测量方法研究[J]. 北京理工大学学报,2025,45(4):418-428.
- [7] 王正家,朱泽文,朱钦森,等. 基于线激光传感器的 T 型焊件焊缝检测及误差修正[J]. 激光杂志,2023,44(9):48-54.
- [8] WANG Q, JING G C. Circular saw flatness on machine measurement using a point laser displacement sensor[J]. Electronics Letters,2022,58(23):879-880.
- [9] 张丽艳,夷宏明,刘胜兰. 在机测量激光测头位姿的线性标定[J]. 光学精密工程,2016,24(4):681.
- [10] 肖尧,刘瑾,杨海马,等. 非接触式钢轨类大构件平直度检测算法研究[J]. 传感器与微系统,2020,39(9):56-59.
- [11] 张书真. 表面缺陷检测实验装置 PLC 运动控制的实现[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.
- [12] 郭程程. 基于 PLC 控制的粗糙度自动化测量系统设计与应用[D]. 上海:上海第二工业大学,2022.
- [13] 石磊,刘超. 基于机器视觉的衔铁组件质量检测系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2022(11):65-68.
- [14] 马梦意,徐建明. 基于 XMC4800 的 EtherCAT 总线伺服控制系统设计[J]. 计算机测量与控制,2020,28(4):89-94.
- [15] 刘海涛,原昊,山显雷,等. 一种基于光栅传感器反馈的混联机器人动态精度控制策略[J]. 航空制造技术,2023,66(12):40-45.
- [16] 苑河南. 基于三维视觉的机器人加工轨迹智能规划研究[D]. 长沙:湖南大学,2021.

收稿日期:2023-09-19