

测试技术

## 基于无定位基准压铸结构件的余量在机测量技术

毕星瑞<sup>1</sup>, 刘朝彤<sup>1</sup>, 张 星<sup>2</sup>

(1. 通用技术集团机床工程研究院有限公司西安分公司, 陕西 西安 710054; 2. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 针对传统压铸结构件余量检测依赖人工定位基准进而导致效率低、精度差的问题, 提出了一种基于无定位基准的在机测量方法。通过集成高精度接触式测头与五轴数控系统, 构建了具备在线测量功能的智能加工平台, 实现了加工-测量闭环控制。重点研究开发了测头动态轨迹规划算法、基于曲面特征拓扑关联映射实现测量路径的自主优化、自适应测量路径规划策略以及基于点云配准的余量补偿机制, 实现了加工余量的动态预测与智能修正。结果表明, 提出的特征驱动型虚拟基准构建方法, 以智能特征匹配替代了物理工装; 建立的工艺扰动下的误差传播抑制模型, 提升了复杂工况测量的稳定性。研究成果为智能制造提供了高柔性、高精度的余量控制解决方案, 具有显著工程应用价值。

**关键词:** 压铸结构件; 在机测量; 无定位基准检测; 智能修正; 智能匹配

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.06.025

**中图分类号:** TH161 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 06-0196-08

## On-machine measurement technology of allowance for die-cast structural components based on no-positioning reference

Bi Xingrui<sup>1</sup>, Liu Zhaotong<sup>1</sup>, Zhang Xing<sup>2</sup>

(1. China General Technology Group Machine Tool Engineering Research Institute Co., Ltd. Xi'an Branch, Xi'an 710054, China;  
2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of low efficiency and poor precision caused by the traditional die-cast structural components allowance detection relying on manual positioning reference, an on-machine measurement method based on no-positioning reference was proposed. Through the integration of high-precision contact probe and five-axis CNC system, an intelligent machining platform with online measurement function was constructed to realize the closed-loop control of machining and measurement. The research focuses on the development of a dynamic trajectory planning algorithm for probes, an autonomous optimization of measurement paths based on topological correlation mapping of surface features, an adaptive measurement path planning strategy and an allowance compensation mechanism based on point cloud registration to realize the dynamic prediction and intelligent correction of machining allowances. The results show that the proposed feature-driven virtual reference construction method replaces the physical tooling with the intelligent feature matching, the established error propagation suppression model under process disturbance effectively improves the measurement stability under complex working conditions. The research results provide a highly flexible and high-precision allowance control solution scheme for intelligent manufacturing, which has significant engineering application value.

**Key words:** die-cast structural components; on-machine measurement; no-positioning reference detection; intelligent correction; intelligent matching

### 1 研究背景

针对压铸结构件普遍存在的装夹基准缺失、表面几何畸变显著等技术难点, 当前基于物理基准的坐标定位方法在五轴加工中存在显著局限性。传统

工件位置补偿技术依托已加工基准面构建加工坐标系, 虽适用于精确定位急转特征, 但面对未加工毛坯时易因基准面形位偏差导致坐标定位失效。具体表现为: (1) 基准缺失场景下无法通过常规三点定位法建立初始坐标系; (2) 基准面变形超差时, 基于刚性对齐的坐标系构建将放大余量分布误差。为此, 本研究提出基于自适应配准的无定位基准坐标系构建方法, 通过接触式测头在线测量获取毛坯关键特征的三维点数据, 结合自适应误差点匹配算法实现加工模型与实测数据的动态匹配, 最终构建加

收稿日期: 2025-05-08; 修订日期: 2025-06-16

作者简介: 毕星瑞 (1985-), 男, 硕士, 中级工程师

**E-mail:** bixingrui@jcs.gt.cn

工面的最优加工坐标系。本技术从开发特征权重分配策略强化曲面匹配精度,到设计测头路径自优化算法提升特征捕捉效率,最终形成具有公差补偿能力的柔性定位机制,为解决压铸件无定位基准加工提供了新的技术路径。

## 2 国内外现状

目前,英国雷尼绍公司、瑞典海克斯康公司、日本大隈公司在在机测量方面的研究和发展比较前沿,在最近的2024上海展会上展示的在机测量与三坐标检测轮廓偏差 $\leq 2\text{ }\mu\text{m}$ 。这些技术采用的基本原理为:利用机床自带的高灵敏度接触式探头,通过程序驱动探头到达测量点,并自动实施法向测量动作,同时自动记录测量结果至机床文件。编程软件可自动读取测量结果,并分析偏差值,出具测量报告。其中,Cho M W等<sup>[1]</sup>开发了一种增强的误差检测和补偿方法,整个过程属于全自动测量,无需人工参与,效率和稳定性均有保障;测量点根据编程者意图由程序精确控制;接触式探头有超程保护,不存在损伤模具的风险;测量精度不受人工干预,精度高且稳定;测量过程的在线高效实施,可以节约机床占用时间,同时,若发现精度问题,可及时实施维修,避免二次装卡浪费时间,提高加工效率<sup>[2-4]</sup>。

近年来国内越来越多机床厂家开始重视在机测量技术。市面上相关研发公司数量在快速增长,且也已研制出不同的在机测量系统并推向市场。其中,北京精雕科技集团有限公司的在机测量系统是以精雕数控系统的数字处理能力为核心、以精雕CAM(Computer Aided Manufacturing)软件的检测编程和流程管理为平台,利用接触式测头的数据采集能力,对加工过程中工件的固有偏差进行在机测量与修正,为其下机即合格的加工理念提供关键支撑,可有效保证稳定、顺畅地实现微米级精密加工,在模具、3C、半导体等高精密领域不断提供具有强烈优势的解决方案。华中系统与国产千机CAM联合,在工艺与控制系统的融合开发上实现了良好的突破,打造了叶盘叶型轮廓在机测量功能模块、特征测量模块,是一个功能全面的快速测量和误差评定系统,能够提供在机测量、测量结果分析、误差评定、检测报告生成等功能。同时,为面向航空航天领域,该模块也提供了针对叶盘、叶环、叶片模型的测量、评价和补偿功能,并在多个机床厂商设备上应用验

证。其余国内机床厂商暂未宣传或者发布在机测量相关信息<sup>[5-7]</sup>。

然而,当前国内外针对无定位基准的压铸结构件在机测量技术仍面临多维技术瓶颈:传统接触式测头的离散点采样模式难以兼顾复杂曲面场景下的测量效率与精度平衡,大规模点云配准存在实时计算负荷过高的系统性矛盾;动态装夹误差补偿机制受限于静态建模框架,对材料残余应力释放、温度梯度形变等时变干扰缺乏有效跟踪能力;特征提取算法在应对表面缺陷干扰与几何畸变时泛化性不足,需依赖人工调校参数且难以适配多材质工艺特性;同时,现有系统集成方案存在高成本、低鲁棒性的应用壁垒,工业现场环境噪声与多源工艺数据的协同优化尚未形成闭环控制体系,制约了该技术向柔性化智能制造场景的深度渗透<sup>[8-9]</sup>。

## 3 基于UG二次开发的测头在机测量程序生成模块

基于UG软件二次开发生成在机测量程序,其中,测量点标记模块以特征和参数两个选项进行分级嵌套,特征为第1级、参数为第2级。特征有孔、薄壁、筋、立柱、耳片、弧面,每个特征需要测量的参数不同,标记测量点的时候特征为单选,但参数可以多选,例如孔特征可以测量孔径、孔距和同轴度。不同的测量参数有不同的测量点数量,因此,需要单独分析不同的参数组合需要的测量点数量以及标记测量点的位置顺序,需要在每次标记测量点的时候给出提示。

测量轨迹生成模块分为两部分:(1)特征内的路径测量,在完成测量点标记后,特征内的路径已经生成;(2)指定拾刀位置和特征间的路径生成。其中,法向矢量信息用于在CAD(Computer Aided Design)模型中展示测量点相对于所在面的法向矢量信息,安全平面按钮即为指定拾刀的高度,测量轨迹按钮用于生成最终的测量轨迹,生成的轨迹会展示在CAD模型中。在轨迹生成中会自动生成起测量点和偏移点,起测量点是测量中的变速点,会显示在CAD模型中;偏移点用于防止因过切导致测头无法触碰到工件,不会展示在CAD模型中,但是可在窗口的列表框中查看。

测量仿真模块主要是在CAD模型中模拟测量过程。如果在运动过程中测头与工件产生了碰撞,仿真会自动停止。此处利用体积碰撞进行干涉的判断,

干涉处的坐标会直接记录下来,在窗口显示。

测量程序生成模块首先考虑余量的设置,针对工序间的测量,CAD模型并不能给出粗加工或者半精加工后的模型,因此,需要针对每道工序设置对应的余量来生成不同工序中测量点的实际位置。其原理为:测量点相对于其所处平面沿法向进行移动,移动的距离取决于本道工序设置的余量。其次,重点设置的参数即测量坐标系,测量程序中的测量点位置会根据测量坐标系进行坐标变换,生成的测量程序即为变换好坐标的程序。窗口中的程序头和程序尾已设定默认值,但是其可以由工艺人员进行更改,原因是测量程序可能处于工序中也可能处于工序后,因此,工艺人员可以通过程序尾调整测量程序位置,程序头可用于设置测头更换以及测量速度等信息。生成的测量程序展示在窗口的右侧,检查无误后可以将文件以TXT的格式保存至本地。

在无定位基准压铸结构件的在机测量中,测头运动速度与自适应抬刀高度的选取需综合考虑测量精度、效率、设备动态性能及工件几何特征。测头运动速度的优化需基于机床动态响应特性,通常在低速段( $2 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ )优先保证测量精度,避免因惯性导致的过冲误差;高速段( $10 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ )则用于非关键路径的空行程以提升效率,同时需通过加速度-加加速度参数平滑控制加减速过程。自适应抬刀高度需根据工件局部曲率、表面粗糙度及测量路径拓扑关系动态调整,可采用基于点云数据的实时插补算法,设定抬刀安全余量为测针直径的1.2~1.5倍,并结合工件坐标系下相邻测量点的法向矢量变化率(如曲率半径 $< 50 \text{ mm}$ 时,抬刀增量提升30%),利用机床PLC(Programmable Logic Controller)的实时反馈修正参数,最终实现碰撞概率低于0.1%、测量周期缩短20%~30%的优化目标。对于复杂自由曲面,还可采用分区域变参数策略,将工件划分为高精度区(速度 $\leq 3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,抬刀高度 $\leq 3 \text{ mm}$ )和快速扫描区(速度为 $8 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,抬刀高度为 $5 \sim 8 \text{ mm}$ ),并通过有限元仿真验证路径规划的合理性,其中优化算法由Python编制,基于动态参数调整的在机测量部分路径规划如下:

```
class InProcessMeasurement:
```

```
    def __init__(self, workpiece_cloud):
```

```
        self.cloud = workpiece_cloud(工件点云数据)
```

```
        self.speed_low = 3.0(基础低速( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ))
```

```
        self.speed_high = 15.0(基础高速( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ))
```

```
        self.lift_base = probe_diameter * 1.3(基准抬刀高
```

```
度)
```

```
        self.bayesian_model = load_optimization_model()
```

```
(预训练多目标优化模型)
```

```
    def calculate_curvature(self, point) (基于局部点云计
```

```
算曲率),本文采用PCA(Principal Component Analysis)法:
```

```
        neighbors = self.cloud.get_neighbors(point, radius = 5 mm)
```

```
        eigenvalues = np.linalg.eigvals(neighbors.covariance_matrix())
```

```
        return eigenvalues[0]/(eigenvalues[0]+eigenvalues[1]+eigenvalues[2])
```

```
    def dynamic_speed_control(self, point, next_point) (速度决策: 曲率阈值+区域类型):
```

```
        if self.zone_type == "high_precision":
```

```
            return min(self.speed_low, 3.0) (高精度区强制限速)
```

```
        curvature = self.calculate_curvature(point)
```

```
        distance = norm(next_point - point)
```

```
        return self.bayesian_model.predict(inputs = [curvature, distance, surface_roughness])
```

```
    def adaptive_lift_height(self, current_point, next_point) (抬刀高度动态计算):
```

```
        normal_vector = self.cloud.get_normal(current_point)
```

```
        angle = acos(dot(normal_vector, next_point.normal))
```

```
        safety_factor = 1.2 + 0.3 * (angle/30°) (角度越大抬刀越高)
```

```
        dynamic_lift = self.lift_base * safety_factor (有限元碰撞检测)
```

```
        if FEM_check_collision(path = current_point → next_point, height = dynamic_lift):
```

```
            dynamic_lift *= 1.5
```

```
        return clamp(dynamic_lift, min = 2 mm, max = 10 mm)
```

该算法的时间复杂度主要集中于点云遍历和动态参数计算,整体呈现 $O(N \times M)$ 特性( $O$ 为算法的渐进时间复杂度, $N$ 为点云数量, $M$ 为平均邻域计算量)。其中时间复杂度主要参数如下:

(1) 主循环遍历点云为 $O(N)$ ;

(2) 曲率计算涉及PCA特征值分解( $O(k^3)$ ,  $k$ 为邻域点数);

(3) 有限元碰撞检测(FEM\_check\_collision)若采用迭代求解器可达 $O(n^{1.5})$ ,其中 $n$ 为网格单元数;

(4) 贝叶斯模型预测在参数维度 $d$ 下为 $O(d^2)$ 。

综合最坏情况达 $O(N \times (k^3 + n^{1.5}))$ ,但通过



区域化策略和邻域半径限制可将  $k$  控制在  $10 \sim 20$ ,  $n$  通过 LOD (Level of Detail) 简化至  $10^3$  量级。其中算法在未加速时时间复杂度达  $10^9$  量级, 需通过 GPU (Graphics Processing Unit) 将曲率计算 (并行邻域处理) 和 FEM 检测 (有限元求解器) 加速 100 倍以上方可实用; 空间复杂度可通过压缩控制在  $10^5$  量级, 适用于工业级工控系统。

测量程序 G 代码的常用基本格式和代码注释如下:

```

N10 G54 G90
G01 F3000 (定义初始速度, 直线运动)
N20 T=CE M6 (更换刀具为测头, 可以自定义)
DEF INT RESULT (定义整形变量)
N30 X123.581 Y79.1502 Z-20 (移动至第 1 个测量点上方的安全平面位置)
N40 X123.581 Y79.1502 Z-20 (移动至第 1 个测量点的起测量点位置)
N50 MEAS=1 G01 F200 X116.56 Y82.9856 Z-20 (使用 MEAS 指令开启测头出发命令, MEAS 值为 1 时, 删除多余行程, 测头触发后自动返回)
STOPRE (加入该命令, 给时间用于读取触发数值)
N60 R1= $AA_MW [X] R2= $AA_MW [Y] R3= $AA_MW [Z] (通过 R 变量暂存测头触发的数据值, $AA_MW [ ] 用于读取主轴刀尖点的坐标)
WRITE(RESULT, "123", <<R[1]) (通过 WRITE 写指令将 R 变量的值写入名为 "123" 的子程序文件中, 该文件与测量程序文件处于同一目录下)
WRITE(RESULT, "123", <<R[2])
WRITE(RESULT, "123", <<R[3])
N70 F1000 X123.581 Y79.1502 Z-20 (测量结束, 返回起测量点)
N80 X130.35 Y56.0811 Z-20 (移动至下一个测量点, 如果在同一特征内, 则不需要移动至安全平面, 否则需要先移动至安全平面)
N90 MEAS=1 G01 F200 X126.514 Y49.0604 Z-20 (开始第 2 个测量点的测量)
STOPRE
N100 R1= $AA_MW [X] R2= $AA_MW [Y] R3= $AA_MW [Z] (R 变量中的数值读取后可以覆盖, 重复使用, 减少 R 变量的使用数量)
WRITE(RESULT, "123", <<R[1]) (重复写入变量存储的测量点坐标)
WRITE(RESULT, "123", <<R[2])
WRITE(RESULT, "123", <<R[3])
N110 F1000 X130.35 Y56.0811 Z-20 (重复下一个点的测量直至结束)
N120 X153.419 Y62.8498 Z-20

```

```

⋮
N560 X128.268 Y-7 Z-20 (最后一个点测完退回安全平面)
M30 (测量结束)

```

## 4 零件加工精度在机测量与误差判断

在机床上进行实际测量时, 首先在数控系统界面打开测量程序, 如果是在工序中进行测量, 则无需进行对刀, 直接运行测量程序。测量完成后, 生成带有测量点坐标的子程序文件。该文件中包含了所有的测量点坐标, 可用于直接查看或者后续计算特征参数<sup>[8-10]</sup>。

将机床实测坐标点导入测量软件, 计算出零件的关键特征参数, 包括孔径、孔距等孔特征参数, 壁厚和壁厚等薄壁特征参数, 腹板厚度参数以及尺寸误差、孔同轴度误差、孔垂直度误差、面平面度误差、面轮廓度误差等误差参数。进而, 采用误差计算模块计算实际测量点与理想测量点之间的偏差, 具体为实际测量点与应属平面之间的距离, 通过距离可以判断是否有超差, 并且可以将误差标记在 CAD 模型中。在本模块中如果制定了误差上限, 则可以通过误差大小判断哪里有超差。

本文以面轮廓度 (实际轮廓形状与理论轮廓形状一致的程度) 为例, 使用最小区域法进行评定。由于实际轮廓可能在理论轮廓的两侧, 如图 1 所示, 在机测量只能测量有限的点数, 将测得的坐标值与理论轮廓上的坐标进行差值计算, 取其最大差值的绝对值 2 倍作为最终的轮廓度误差。

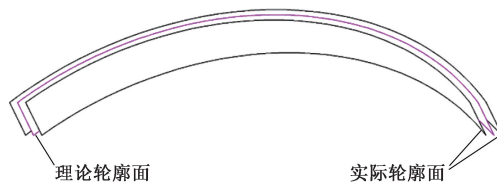


图 1 弧面轮廓度误差示意图

Fig. 1 Schematic diagram of arc profile tolerance error

## 5 测量点自适应匹配及补偿技术

测量点自适应匹配及补偿技术通过设置待优化元素的每个待加工面余量范围, 软件自动计算出加工坐标系的偏差, 进而满足这类工件对待加工特征的余量分布要求, 其原理是通过对理论测量点进行

旋转变换和平移变换组合，使理论点测量点与实际测量点之间的余量平方和最小，并且满足各测量点的余量约束条件。接着对工件表面测量后进行精确的偏差识别，并结合空间点云数据，记录每个加工区域的具体补偿值。随后，系统根据对比分析的结果，自动生成各区域的补偿参数，并实时传输至数控系统。数控系统根据补偿参数动态调整加工路径规划和加工参数（切削量、位置偏移等），从而确保加工过程中的高精度要求。在加工过程中，系统通过闭环控制机制实现实时测量与补偿的动态调整。另外，对于整个测量流程中的数据采集、数据处理补偿计算、补偿指令下发、执行机构响应等耗时数据进行测量分析，如表 1 所示。

表 1 反馈时长分析  
Table 1 Feedback duration analysis

阶段	耗时/ms	影响因素
测量数据采集	80~120	扫描速度、点云分辨率
数据处理与补偿计算	50~80	算法复杂度（如迭代优化、模型预测）
补偿指令下发	10~20	通信协议（EtherCAT vs 传统 I/O）
执行机构响应	20~30	伺服电机动态特性
总延时	160~250	—

这种自适应控制策略能够有效应对加工过程中可能出现的工件变形、材料异质性等不确定因素，确保加工终端的高精度和高质量。同时，系统还可以通过卡尔曼滤波器等算法对实时测量数据进行优化，进一步提高补偿精度，确保加工过程的稳定性和一致性<sup>[11-13]</sup>。

6 CAM 与 CNC 通讯与数据传输技术

本研究基于西门子数控系统，研发了一套数控机床在机测量的外挂系统，包括硬件和软件两大核心部分。硬件部分采用工控机作为机床边缘计算设备，具备高性能的数据采集与处理能力，同时支持与 CNC 机床的实时通讯接口，确保测量数据的可靠传输与高效处理。该硬件系统具备良好的抗干扰性、稳定性和可扩展性，能够满足复杂工况下的测量需求。

软件部分在硬件基础上，采用 UG 进行深度二次开发，形成了一套完整的测量解决方案。软件系统主要包含以下功能模块：首先，实现了测量程序

文件的自动生成与优化功能，能够根据工件的三维模型自动生成高效的测量路径，并支持从 CAM 端直接传输至 CNC 系统，减少人工干预；其次，建立了被测量点数据文件的实时传输机制，能够将测量数据从 CNC 端传回 CAM 端，实现测量数据的闭环管理；此外，软件还具备友好的人机交互功能，包括测量任务的可视化配置、实时监控、数据分析与报表生成等，方便操作人员快速理解与处理测量结果。

通过外挂系统与 CNC 的高效通讯机制，实现了测量数据的可靠传输与实时更新。系统采用先进的数据通讯协议，确保数据传输的高效性与安全性，同时支持多种数据格式的兼容与转换。通过该外挂系统，实现了测量与加工的无缝衔接，显著提高了加工效率与产品质量。该系统的研发不仅解决了传统测量方法在效率与精度上的局限性，还为智能制造中的在机测量与补偿技术提供了新的解决方案，具有广阔的应用前景。

软硬件系统包含颤振监测硬件及人机交互友好的监测软件。其中，硬件包括：3 个电流钳、1 个三向加速度计、1 台采集工控一体机和 1 台显示器。电流钳和加速度计采集信号数据通过线路传至一体机上，数控系统内部数据通过网线连接至一体机上，一体机对传感器采集的和数控系统内部读取的信号进行处理并输出显示于显示器界面。

7 实验测试

无定位基准在机测量技术采用接触式测头对标准球实施精密标定，通过高精度数据拟合算法获得球度参数优于 0.1  $\mu\text{m}$  的标定结果，最终实现亚微米级（0.1  $\mu\text{m}$  量级）的测量精度保障体系，加之因自动化流程减少了人为干预，其均值误差等同于传统三坐标测量机的微米级精度，但覆盖范围更广，适用于复杂曲面全尺寸检测，尤其适合复杂压铸件的高效全检；传统三坐标测量方法虽精度高，但效率与适应性不足。下面针对某型号铝合金发动机缸盖铸件（尺寸为 400 mm×300 mm×150 mm），进行无定位基准在机测量技术与传统三坐标测量技术的测量效率对比分析，结果如表 2 所示。

以实际机床加工的 3 款压铸件为例，进行效果验证。验证采用球心点数据，测头探测半径为 5 mm，将理论模型曲面等距所得的偏置曲面作为理论面进行摆正。由于铸件来料余量不可控导致不具备基准进行摆正，因此，通过无定位基准在机测

表 2 数据测试对比

Table 2 Comparison of data test

对比维度	传统三坐标测量技术	无基准在机测量技术
测量效率	单件测量耗时 120 min（含搬运、定位、基准校准）； 需停机转移至测量室	单件测量耗时 25 min（加工完成后原位测量）； 机床无需停机，测量与加工无缝衔接
定位适应性	依赖人工设定 6 个基准点；基准偏移会导致数据失效	基于点云特征自动匹配理论模型； 允许±15°姿态偏差（模拟实际装夹误差）
精度验证	分辨率为±0.1 μm；实测测量精度为 2 μm	分辨率为±0.1 μm；实测测量精度为 2 μm
工艺反馈时效性	检测结果滞后 4~6 h；发现问题需重新上机返修	实时生成补偿加工代码；关键尺寸超差时 10 min 内完成迭代修正
多型号兼容性	换型需重新编程定位基准；调试耗时每型≥2 h	通过三维模型快速识别工件特征；首次调试时间每型≤30 min

量技术，检测余量分布，继而模拟出实际轮廓，进行工件位置摆正，此零件的摆正要求为：余量分布范围为以 0 点为中心、0.05 mm 内，且分布均匀。

其中，3 款零件各进行 6 组数据测量，实际测量图、相关测试数据和补偿前后偏差对比分析结果分别如图 2、表 3 和图 3 所示。

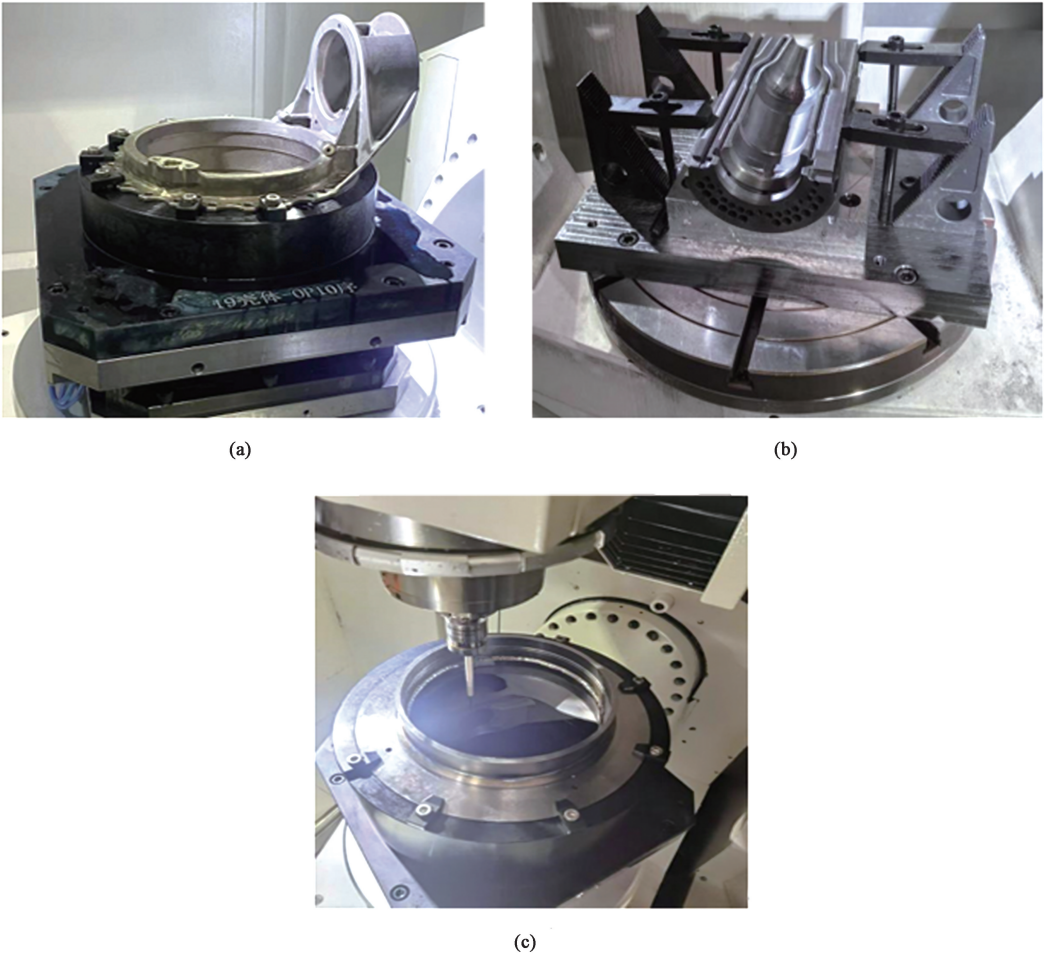


图 2 零件实际测量图

(a) 零件 1 (b) 零件 2 (c) 零件 3

Fig. 2 Actual measurement drawings of parts

(a) Part 1 (b) Part 2 (c) Part 3

表 3 零件测量偏差结果 (mm)

Table 3 Measurement deviation results of parts (mm)

零件	实验	不摆正, 直接检测		运用本文技术摆正后检测	
		最大偏差	最小偏差	最大偏差	最小偏差
1	1	1.3942	-0.1573	0.0495	0.0134
	2	1.2735	-0.1369	0.0364	0.0027
	3	0.5734	-0.4431	0.0473	0.0008
	4	0.8975	-0.1347	0.0383	-0.0017
	5	1.3820	0.0136	0.0476	0.0097
	6	2.9821	0.1413	0.0283	0.0241
2	1	1.1934	-0.8642	0.0341	-0.0011
	2	2.2645	-2.1369	0.0394	0.0131
	3	1.3784	-1.4314	0.0483	0.0097
	4	2.7355	-2.5379	0.0411	-0.0047
	5	1.8870	-1.6647	0.0258	-0.0130
	6	2.0121	-2.6478	0.0349	-0.0040
3	1	0.9934	-0.8642	0.0424	-0.0061
	2	1.6786	-2.1369	0.0246	0.0211
	3	1.7363	-1.4314	0.0379	0.0127
	4	2.1357	-2.5379	0.0113	-0.0347
	5	2.9643	-1.6647	0.0071	-0.0361
	6	1.7897	-1.2467	0.0183	-0.0293

由表 3 和图 3 可知, 采用传统方法进行加工前处理, 不摆正, 直接检测余量存在较大正负偏差, 不满足加工要求; 使用无定位基准压铸结构件的余量优化技术后, 单点偏差在 0.05 mm 内, 满足摆正需要。

无定位基准压铸件的余量在机测量技术抗环境干扰能力强, 可在粉尘、油雾及动态光照条件下保持数据完整性, 结合自动化流程显著降低人为误差, 重复性标准差低, 尤其适用于压铸件、异形曲面工件的高效高稳定性在机测量, 为压铸结构件提供了高效、全尺寸、高一一致性的在机检测解决方案, 显著提升了质量控制可靠性。

8 结语

本研究针对无定位基准压铸结构件的余量在机测量技术难题, 提出了一套集成智能化程序生成、动态检测与闭环补偿的解决方案。通过 UG/NX 二次开发构建测头测量程序自动生成模块, 基于特征识别算法与参数化驱动引擎, 实现复杂曲面测量路

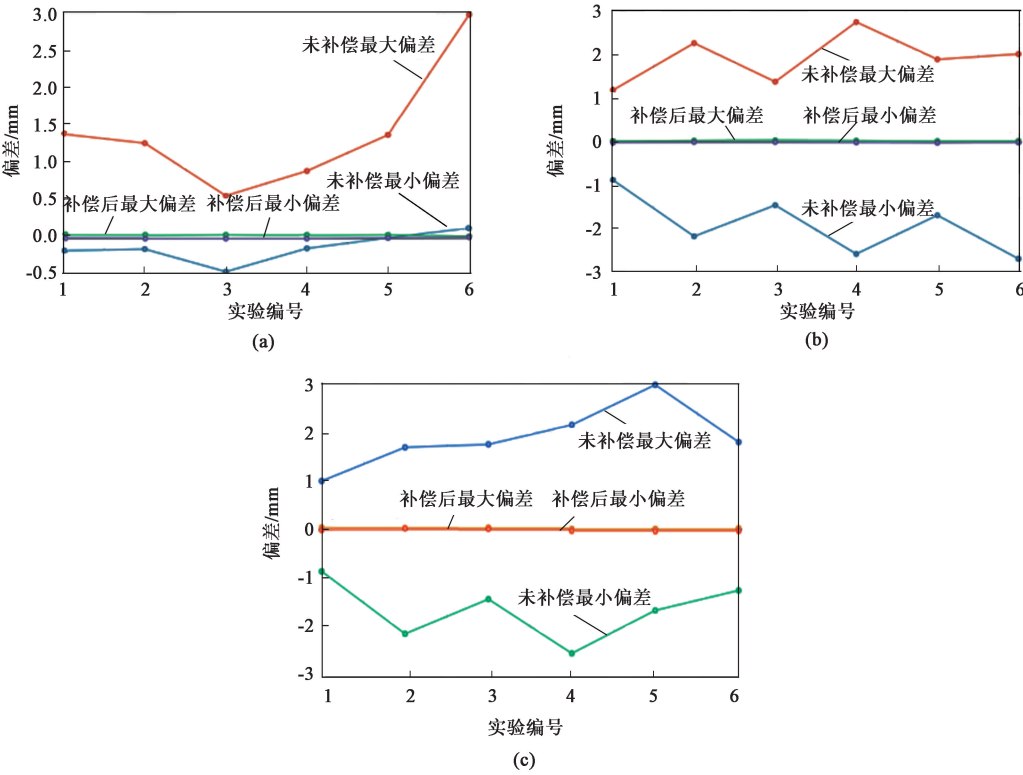


图 3 补偿前后零件偏差对比分析  
(a) 零件 1 (b) 零件 2 (c) 零件 3

Fig. 3 Comparative analysis of deviation for parts before and after compensation  
(a) Part 1 (b) Part 2 (c) Part 3



径的智能规划。系统创新性地将零件加工精度在机测量与误差判别相结合, 开发多模态数据融合分析模型: 通过离散式接触式测头实时采集表面形位数据, 采用多尺度分析模型实现加工误差的成因判别。在测量点自适应匹配及补偿技术方面, 提出特征驱动的双层补偿机制: 宏观层面基于改进的误差剔除算法实现毛坯实际测量点与 CAD 模型理论测量点的快速配准; 微观层面构建包含自适应补偿的模型。为解决 CAM 与 CNC 系统间的数据孤岛问题, 研发基于 OPC UA 协议的实时通讯架构, 通过特征编码压缩技术提升刀轨数据传输效率。技术突破体现在: (1) 开发 NX/Open API 驱动的参数化程序生成模块, 实现测量路径与加工特征的动态关联; (2) 建立加工误差的工艺-设备多源追溯模型, 支持常见误差模式的智能诊断; (3) 提出基于工艺自补偿策略选择机制, 实现补偿参数的自动优化匹配。综上所述, 本研究通过基于 UG 二次开发的测量程序生成、精确的误差判别、自适应的测量点匹配与补偿, 以及高效的 CAM-CNC 数据通讯技术, 构建了一套完整的基于无定位基准压铸结构件的在机测量与补偿系统。该系统在理论层面取得了显著成果, 为复杂曲面零件的高精度加工提供了新的技术路径。

#### 参考文献:

- [1] Cho M W, Seo T I, Kwon H D. Integrated error compensation method using OMM system for profile milling operation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 136 (1-3): 88-99.
- [2] 王磊. 在机测量技术在数控机械加工中的应用 [J]. *数字农业与智能农机*, 2020 (15): 62-63.  
Wang L. Application of on-machine measurement technology in CNC machining [J]. *Digital Agriculture and Intelligent Agricultural Machinery*, 2020 (15): 62-63.
- [3] 吴艳芳. 数控机械加工中在机测量技术的应用研究 [D]. 淄博: 山东理工大学, 2022.  
Wu Y F. Research on Application of On-machine Measurement Technology in NCN Machining [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022.
- [4] 曹新航. 基于在机测量的工件自适应加工技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.  
Cao X H. Research on Adaptive Machining Technology Based on On-machine Measurement [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [5] 韩阳, 余启辉. 基于 PC-DMIS NC 的航空零件在机测量应用 [J]. *金属加工 (冷加工)*, 2023 (12): 70-73.  
Han Y, Yu Q H. Application of in-machine measurement of aviation parts based on PC-DMIS NC [J]. *MW Metal Cutting*, 2023 (12): 70-73.
- [6] 洪斯. 数控机械加工中的在机测量技术应用 [J]. *上海轻工业*, 2023 (6): 147-149.  
Hong S. Application of on-machine measurement technology in CNC machining [J]. *Shanghai Light Industry*, 2023 (6): 147-149.
- [7] 张永岩, 方芳, 陈铁, 等. 机械加工智能生产线在机测量及仿真技术应用 [J]. *金属加工 (冷加工)*, 2022 (12): 77-81.  
Zhang Y Y, Fang F, Chen T, et al. Application of on-machine measurement and simulation technology on machining intelligent production line [J]. *MW Metal Cutting*, 2022 (12): 77-81.
- [8] 白克, 黎智, 吴立辉. 数控机床在机检测中触发式测头误差变速补偿 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2021 (2): 91-94, 98.  
Bai K, Li Z, Wu L H. Triggered probe error speed compensation in on-machine measurement of machine tool [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2021 (2): 91-94, 98.
- [9] 张双双, 杨洪涛, 马群, 等. 数控机床在机测量系统最佳测量区确定方法 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31 (4): 490-502.  
Zhang S S, Yang H T, Ma Q, et al. Determination method of optimal measurement area of CNC machine tool on-machine measurement system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31 (4): 490-502.
- [10] 潘子月. 基于在机测量的航发叶片精密加工过程质量管控数字化方法研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2022.  
Pan Z Y. Research on Digital Method of Quality Control of Precision Machining Process of Aeroengine Blade Based on On-machine Measurement [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [11] 万能, 庄其鑫, 郭彦亨, 等. 拟合精度约束下航发叶片在机测量采样策略 [J]. *航空学报*, 2023, 44 (7): 283-294.  
Wan N, Zhuang Q X, Guo Y H, et al. Sampling strategy for on-machine measurement of aero-engine blade under constraint of fitting accuracy [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44 (7): 283-294.
- [12] 张莹, 刘敏, 张定华, 等. 基于在线检测的叶片加工余量自适应优化方法 [J]. *计算机技术与发展*, 2014, 24 (11): 226-229, 233.  
Zhang Y, Liu M, Zhang D H, et al. An adaptive approach for machining allowance balancing for blade based on online measurement [J]. *Computer Technology and Development*, 2014, 24 (11): 226-229, 233.
- [13] 刘孝龙. 自由曲面匹配技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.  
Liu X L. Free-form Surface Matching Technology Research [D]. Changchun: Jilin University, 2015.