

# 高精度零部件智能装配的位姿偏差检测与自适应补偿技术

熊涛

贵州航天控制技术有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21093

**[摘要]** 以导弹电动伺服机构等典型航空航天零部件为研究对象,围绕智能装配过程中的位姿偏差检测与自适应补偿两大核心环节展开分析。在位姿偏差检测层面,梳理偏差类型与误差传递规律,阐述机器视觉成像标定方法与多源传感融合采集方案,明确偏差参数提取与精度评定的实现路径;在自适应补偿层面,构建补偿机理与数学模型,提出实时反馈下的补偿量动态解算方法,结合柔顺控制策略完成执行端调整,并通过实例验证系统性能。研究结果可为航空航天高精度零部件的智能装配实际应用提供技术参考。

**[关键词]** 高精度零部件; 智能装配; 位姿偏差; 自适应补偿

**中图分类号:** TB381 **文献标识码:** A

## Position deviation detection and adaptive compensation technology for intelligent assembly of high-precision components

Tao Xiong

Guizhou Aerospace Control Technology Co., Ltd.

**[Abstract]** Taking typical aerospace components such as missile electric servo mechanisms as the research objects, this paper analyzes the two core aspects of the intelligent assembly process: pose deviation detection and adaptive compensation. At the pose deviation detection level, the types of deviations and error transmission rules are sorted out, the machine vision imaging calibration method and multi-source sensing fusion acquisition scheme are expounded, and the implementation path for deviation parameter extraction and accuracy evaluation is clarified. At the adaptive compensation level, the compensation mechanism and mathematical model are constructed, the dynamic calculation method of compensation quantity under real-time feedback is proposed, the execution end adjustment is completed by combining the compliant control strategy, and the system performance is verified through examples. The research results can provide technical references for the practical application of intelligent assembly of aerospace high-precision components.

**[Key words]** High-precision components; Intelligent assembly; Pose deviation; Adaptive compensation

航空航天装备的性能迭代,对核心零部件的装配精度提出了更严苛的要求。以导弹电动伺服机构为例,精密配合面的位姿偏差一旦超出0.02mm的公差阈值,就可能导致装配出现干涉导致无法装入或者因应力集中缩短部件使用寿命。传统装配模式多依赖熟练工人的操作经验,借助塞尺、百分表等工具反复调试,不仅装配周期长,批次间的质量稳定性也难以保障<sup>[1]</sup>。随着智能制造技术向航空制造领域渗透,以工业机器人为核心的智能装配方案逐渐得到应用,但位姿偏差的精准检测与动态补偿,仍是阻滞装配精度进一步提高的关键环节。

### 1 高精度零部件智能装配的位姿偏差检测技术

#### 1.1 装配位姿偏差的类型与误差传递机理

航空航天高精度零部件的装配位姿偏差,可拆解为三个平

移方向的线位移偏差与三个旋转方向的角位移偏差,对应空间内的六自由度位姿误差。弹上电动伺服机构精密传动部件装配、伺服机构入舱对接装配这类典型场景,偏差的来源并非单一环节,而是从零部件加工阶段就开始累积,经工装定位、机器人末端夹持、装配进给等环节逐层传递,最终反映在配合面的相对位姿上。以某型电动伺服机构为例,舵轴安装孔加工公差控制在IT6级,舵轴的加工精度与之匹配,但实际装配中仍会出现0.02mm左右的位姿偏差,其中约三成来自机器人末端的重复定位误差,两成来自工装夹具的装夹变形,剩余部分则由变形、车间环境振动等随机因素叠加构成。误差传递的过程并非简单的线性叠加,当零部件存在薄壁、异形等结构特征时,装夹力与装配接触力会引发弹性形变,让偏差的传递规律出现非线性偏移。

大尺寸的舱段类零部件,误差传递还会受自身重力形变的影响,不同吊装点位下的舱体翘曲量存在差异,进一步增加了偏差预判的难度。

### 1.2 机器视觉位姿检测的成像与标定方法

机器视觉是当前位姿偏差检测的主流技术路径,在航空航天零部件的装配场景中,考虑到零部件多为钛合金、高温合金材质,表面金属光泽强,普通的面阵相机成像容易出现局部过曝,丢失关键的轮廓特征,因此多采用线结构光扫描结合双目视觉的成像方案。线结构光投射到零部件表面后,会随表面轮廓形成变形的光条,双目相机从不同角度采集光条图像,即可通过三角测量原理还原出零部件的三维点云数据<sup>[2]</sup>。针对弹上电动伺服机构精密传动部件这类带有高精度啮合齿面与定位配合面的零部件,通常会调整结构光的投射角度,让光条垂直于轮齿齿向与配合面棱边的延伸方向,确保每一处齿面轮廓与配合面形位特征都能被完整采集。成像系统的标定精度直接决定最终的检测结果,常规的张氏标定法在实验室恒温环境下能达到较高精度,但放到生产车间的实际场景中,昼夜温差带来的相机基座形变、设备运行产生的微振动,都会让标定参数出现漂移。实际应用中,通常会在装配工位旁设置固定的标准标定靶,每次开机装配前先完成一次现场标定,对相机的内参与手眼转换参数进行修正。部分舱段的装配场景,单组双目视觉的边缘精度会下降,一般会采用多组视觉单元拼接的方式覆盖全检测范围,拼接过程中借助公共标定靶的特征点完成坐标系统一,拼接后的整体检测精度能控制在0.02mm以内<sup>[2]</sup>。

### 1.3 多源传感融合的位姿信息采集方案

单一的机器视觉检测存在天然的局限,当装配进入配合阶段后,零部件的相对位置逐渐靠近,配合面会被彼此遮挡,视觉传感器无法再采集到完整的轮廓信息,检测精度会出现明显下滑。针对这个问题,智能装配系统通常会搭配多源传感器,结合不同装配阶段的特点切换采集方式,补齐视觉检测的能力短板。初始对位阶段,零部件间距较大,主要依靠机器视觉完成粗定位,把位姿偏差缩小到毫米级;进入接近阶段后,周向布置的激光位移传感器开始工作,实时采集配合面之间的间隙数据,判断当前位姿的偏斜程度,这个阶段的检测精度能达到微米级;等到配合面正式接触,视觉与激光传感器都失去作用空间,六维力传感器会接管检测工作,通过接触力的大小与方向反推位姿偏差,避免硬接触刮伤精密的配合表面。不同传感器的输出信号存在频率、坐标系上的差异,需要通过统一的时间戳完成数据同步,再经过滤波处理去除车间电磁干扰、设备振动带来的噪声。实际应用中可采用加权融合的方式处理多源数据,根据装配阶段的不同调整各传感器的权重,比如粗对位阶段给视觉数据更高权重,精配合阶段提升力传感器数据的权重。

### 1.4 位姿偏差参数的提取与精度评定

采集到的原始点云与传感数据,需经过处理才能得到可用于补偿的位姿偏差参数,核心步骤是将实测的零部件轮廓与理论数模进行配准,通过配准变换矩阵计算出实际位姿与理论位

姿的差值。传统的迭代最近点算法在处理航天航空零部件这类带有大量重复特征的结构时,很容易陷入局部最优,得到错误的配准结果。实际操作中会先提取零部件上的关键特征,比如啮合齿面的定位棱边、安装配合面上的定位销孔,以特征点作为配准的初始基准,再进行整体点云的精细配准,既能加快配准速度,也能避免局部滞后的问题。对于弹上电动伺服机构精密传动部件这类结构紧凑、形位精度要求高的零部件,通常会选取三个以上的特征齿面作为配准基准,配准完成后提取部件回转中心的坐标与三个方向的转角,作为最终的位姿偏差参数;大尺寸舱段则会选取法兰端面上均匀分布的八个测量点,通过多点的位置偏差拟合出整体的位姿偏移与翘曲量。位姿检测的精度评定,一般会以三坐标测量机的检测结果作为真值参照,对比同一零部件在两种检测方式下的位姿参数差值,计算系统的绝对精度与重复精度。需要注意的是,当零部件表面带有热障涂层、防护膜层时,点云数据的噪点会明显增多,偏差参数提取的稳定性会有所下降,需提前对涂层表面的光学特性进行测试,调整结构光的功率与采集参数。

## 2 高精度零部件智能装配的位姿偏差自适应补偿技术

### 2.1 位姿偏差自适应补偿的机理与数学模型

位姿偏差自适应补偿的核心逻辑,是根据实时检测得到的位姿偏差量,调整装配执行机构的位姿,让零部件的实际配合位姿回到公差允许的范围内。和传统的一次性预补偿不同,自适应补偿会跟随装配进程动态调整补偿量,能抵消装配过程中出现的随机偏差与形变偏差。针对航空航天高精度零部件的装配场景,首先要建立位姿偏差与补偿量之间的数学映射模型,明确检测得到的六自由度偏差,对应到机器人末端执行器需要调整的位移与转角。早期的补偿模型多基于刚体假设构建,只考虑几何层面的位姿偏差,放到薄壁零部件的装配场景中误差较大,刚性模型计算出的补偿量无法抵消这类形变带来的间隙不均。实际应用中,会在模型中加入结构形变的修正项,通过有限元仿真提前得到不同位姿下的零部件形变规律,再结合实时的力反馈数据修正补偿量。这类补偿模型的精度和零部件的加工一致性有直接关联,如果批次间的加工误差离散度较大,模型的补偿效果会打折扣,通常需要针对每个批次的首件进行试装调试,微调模型的修正系数,才能达到最佳的补偿效果。

### 2.2 基于实时反馈的补偿量动态解算方法

补偿量的解算速度直接决定装配的效率与流畅度,尤其是在连续进给的装配过程中,解算延迟过高会导致补偿滞后,出现过调或者卡滞的问题。针对航空零部件的装配节奏,补偿量解算通常采用增量式的动态解算策略,不需要每次都计算完整的位姿补偿量,而是根据当前时刻与上一时刻的偏差差值,计算出小步长的增量补偿值,逐步将位姿调整到目标状态。这种增量解算的计算量更小,单步解算时间能控制在10毫秒以内,完全满足实时装配的反馈需求。在弹上电动伺服机构精密传动部件的齿副啮合插接装配过程中,执行机构每推进 0.5mm就触发一次位姿

检测与补偿解算, 全程保持小步频的动态调整, 避免了一次性大幅调整带来的卡滞风险。<sup>[3]</sup>针对不同类型的零部件, 解算的步长与触发频率需要做对应调整, 大尺寸装配进给速度慢, 可适当拉长检测间隔, 减少不必要的计算; 小尺寸精密部件的配合间隙小, 就要缩短检测间隔, 提高补偿的响应速度。解算过程中还会加入限位约束, 避免补偿量超出零部件的配合公差范围, 损伤精密的配合表面。

### 2.3 装配执行端的柔顺补偿控制策略

航空航天高精度零部件的配合面精度极高, 表面粗糙度通常在Ra0.8以下, 刚性的位置控制很容易因为微小的位姿偏差造成配合面刮伤, 影响装配质量。因此执行端的补偿控制不能只追求位置精度, 还要加入柔顺控制机制, 让执行机构在接触到配合阻力时, 能主动做出顺应性调整。当前应用较多的是基于六维力传感器的阻抗控制策略, 通过设定目标接触力与阻抗参数, 让执行机构的接触力始终维持在合理范围内, 同时结合位姿偏差的检测结果完成位置补偿。在弹上电动伺服机构精密传动部件的最终精密配合阶段, 执行机构会切换为恒力进给模式, 将轴向接触力控制在5N以内; 一旦接触力超出阈值, 便自动减慢进给速度并调整位姿, 直至接触力回落至设定范围。柔顺控制的参数匹配需结合具体装配场景进行调整, 刚度参数设置过高时, 柔顺补偿效果偏弱, 仍易出现配合面表面刮伤问题; 刚度参数设置过低时, 执行机构的位置精度会受到影响, 反而拖累位姿补偿的准确性。针对不同材质的零部件, 控制参数也存在差异, 淬硬合金钢材质的传动配合面硬度较高, 可适当提高刚度参数以保障装配精度; 铝合金材质的舱段法兰质地偏软, 就要降低刚度参数, 避免接触压力过大压伤法兰密封面。部分对装配力要求极高的场景, 还会在执行末端加装被动柔顺机构, 和主动柔顺控制形成互补, 进一步提升装配过程的安全性。

### 2.4 自适应补偿系统的性能验证与优化

为验证整套自适应补偿系统的实际效果, 选取某型弹上电动伺服机构精密传动部件的丝杠副和拨叉舵轴装配作为测试场景, 搭建对应的智能装配实验平台, 分别测试人工装配、普通视觉定位装配与自适应补偿装配三种模式的装配效果。测试选取同一批次的50件精密传动部件与对应配合基座作为实验对象, 统计单件装配时间与装配合格率, 合格率以轮齿啮合接触面积占比、位姿偏差是否在公差范围内作为判定标准。测试数据显示, 熟练工人的单件平均装配时间约为12分钟, 装配合格率为87%, 不合格项多为位姿偏斜导致的接触面积不足; 普通视觉定位装配的单件平均时间为5分钟, 合格率提升至94%, 但仍有部分工件因为装配过程中的形变偏差出现卡滞或接触不良; 加入自适应补偿系统后, 单件装配时间缩短至3.5分钟左右, 装配合格率达到99.2%, 配合面的接触面积占比也有明显提高。

## 3 结语

航空航天高精度零部件的智能装配, 是航空制造领域提质增效的重要方向, 位姿偏差的精准检测与自适应补偿则是其中的核心技术环节。本文结合弹上电动伺服机构精密传动部件等的装配特性, 梳理了位姿偏差检测的技术路径与补偿控制的实现方案, 通过实例验证了相关技术的实际效果。

### [参考文献]

- [1]曹鹏霞,李文新,黄羿博.基于边云协同和增强现实的智能装配方法[J].计算机工程与科学,2025(10):1867-1876.
- [2]刘培,蒋群艳,杨嘉华,等.基于数字孪生的大型天线阵面装配位姿快速调控方法[J].机械工程学报,2024(22):415-426.
- [3]惠记庄,雷景媛,张金龙,等.装配机器人位姿误差建模与补偿研究[J].机械工程与技术,2016(04):391-399.

### 作者简介:

熊涛(1993—),男,汉族,贵州省贵阳市人,工程师,本科,主要从事精密制造,智能制造技术研究。