

数字化协同测量在飞机弱刚性零件加工中的应用*

赵建国,于思阳,黄 宁

(航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司,沈阳 110034)

[摘要] 针对飞机弱刚性蒙皮零件的高精度加工要求,通过机器人铣削系统协同标定、蒙皮边界提取与逆向建模、末端执行器定位修正等技术研究,实现飞机蒙皮、口盖、壁板类结构件边部余量检测及加工在线修正,边界测量精度0.1mm,末端执行器定位误差不大于0.2mm。经验证,本研究满足了四代机制造对数字化测量的要求,显著提高了飞机蒙皮壁板自动化铣削和数字化水平,促进了飞机制造从传统的手工装配向智能化装配模式的跨越。

关键词: 协同测量;弱刚性零件;蒙皮边界提取;定位修正;TCP 标定

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.05.046



赵建国
博士,高级工程师,研究方向为数字化测量与柔性装配。

发展先进战机提升国防能力是大国必由之路,四代机在性能、研制效率等方面均有大幅提高,隐身性作为重要指标,其对机身外形、表面

光洁度、阶差及间隙都有很高的要求。为满足设计要求,消除蒙皮制造、装配过程的误差积累,一般通过蒙皮上预留工艺余量进行补偿,在装配环节予以修除。传统手工去除余量质量稳定性差,效率低,随着制造技术的发展,世界各国将自动化、智能化制造作为发展方向,而数字化检测作为重要支撑技术更是必不可少。

飞机蒙皮的特点是产品种类多、规格尺寸变化大、批量小,零件修配占近一半的总加工量。蒙皮壁板属典型弱刚性零件,加工难度大,装配现场主要采用人工修配,存在修配精度低、质量一致性差等问题,特别是钛合金壁板具有难加工、黏性高等特点,修配难度更大,制约了飞机的制造质量提升和研制进度,随着数字化测量和自动化加工技术的长足进步,为飞机蒙皮余量在线测量及自动铣削技术奠定了基础。大量学者开展了相关工艺研究,如

弱刚性零件加工工艺优化^[1]和机器人制孔等。机器人转动灵活,适应性更强,适用于飞机蒙皮壁板铣削加工,但机器人绝对定位精度较低,无法适应高精度铣削,借助外部数字测量设备,通过机器人空间运动精度在线检测与修正^[2],解决了上述问题。智能制造的脚步越来越近,数字化测量技术将融入飞机制造的全流程,应用模式也由质量检测转变为工艺控制,以激光跟踪仪、激光雷达、摄影跟踪、关节臂测量等为代表的大尺寸测量技术获得了广泛应用^[3-4],显著提高了飞机制造精度,大大缩短了制造周期。

针对飞机弱刚性零件机器人铣削的测量工艺需求,通过基于光学跟踪和三维扫描的协同测量技术研究,突破面向加工现场的系统协同标定、蒙皮边界提取与逆向建模、末端执行器定位修正等关键技术,实现新型飞机蒙皮壁板(包括钛合金、复材和铝合金)外形的自动化修配,解决加工

* 基金项目: 智能制造专项综合标准化试验验证项目。

过程中质量一致性差、修配难度大等问题,减少繁重的体力劳动,提升飞机制造精度和效率。

数字化测量

飞机蒙皮铣削属于典型弱刚性零件加工,加工技术方案如图1所示。蒙皮铣削平台主要包括机器人、加工末端执行器、数字化测量和辅助工装等系统,由图1可知,数字化测量系统非常重要,主要用于系统坐标系的统一、蒙皮边界检测以及机器人空间位置测量,为整个系统运行提供数据支持和闭环控制手段。以下结合多种测量技术,满足飞机弱刚性零件余量加工对大尺度、差异化、高精度和快速测量的需求。

1 系统协同标定

蒙皮铣削平台中机器人、末端执行器、测量仪器和辅助工装均有各自的坐标基准,为实现各系统的协同工作,需确定各坐标系的相对位置关系,建立统一的工作坐标系。

1.1 TCP标定

末端执行器通过法兰盘与机器人第6轴刚性连接,工作前应标定刀具中心点TCP与机器人第6轴法兰盘的相对位置关系,如图2所示。由于刀具长短有差别,刀柄规格固定,本文TCP定义在刀柄刀具安装孔前

面与刀具轴线的交点处,并作为末端执行器坐标系 O_E 的原点,且安装孔前面为 $x_E O_E y_E$,刀具轴线为 Z_E 轴。TCP标定误差对最终加工精度影响较大,考虑到标定工作通常在工作现场进行,现场条件复杂、测量范围大、精度要求高,可选用激光跟踪仪作为标定工具。

首先需将激光跟踪仪坐标系转换至机器人基坐标系 O_B 。按照文献[5]方法,将2个激光跟踪仪靶球安装在机器人本体不同高度处(应考虑测量方便性),调整机器人处于初始位置,转动机器人一轴(其他轴锁定),每间隔一定角度测量2个靶球位置,测量点轨迹形成2个圆环,通过两圆环中心的直线作为 Z_B 轴。仿照前述过程,再将靶球安装在机器人左右2个不同位置,转动机器人二轴(其他轴锁定),测量点轨迹也形成2个圆环,把两个圆心连线作为 Y_B 轴。基于获得的 Y_B 和 Z_B ,根据右手定则,可得 X_B 轴:

$$X_B = Y_B \times Z_B \quad (1)$$

再根据机器人二轴与基座的相对几何位置关系,将上述坐标系转换至机器人基坐标系 O_B ,实现了激光跟踪仪和机器人基坐标系 O_B 的统一。以下标定机器人法兰盘坐标系 O_P 和末端执行器坐标系 O_E 转换

关系。

TCP标定前,在末端执行器上安装3个靶球,利用激光跟踪仪测量3个靶球在坐标系 O_E 的坐标。

$$O_P = T O_E \quad (2)$$

$$T = \begin{bmatrix} c\Phi c\theta & c\Phi s\theta s\varphi - s\Phi c\varphi & c\Phi s\theta c\varphi + s\Phi s\varphi a \\ s\Phi c\theta & s\Phi s\theta s\varphi + c\Phi c\varphi & s\Phi s\theta c\varphi - c\Phi s\varphi b \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\theta c\varphi & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

符号具体详见文献[6],其中 T 为转换矩阵, s 表示 \sin , c 表示 \cos , Φ 、 θ 、 φ 分别为横滚角、俯仰角和偏转角; a 代表 x 向偏移; b 代表 y 向偏移; c 代表 z 向偏移。

以机器人自身坐标系 O_B 为基准,坐标系 O_P 可由 O_B 获取,末端执行器上3个靶球坐标通过激光跟踪仪获取,转换矩阵 T 由式(2)可解。但实际工程应用时,由于机器人受关节空间的编码器偏差、机器人几何参数、运动惯性、关节和连杆的柔性、齿轮间隙等因素影响,重复定位精度0.07mm,但绝对定位精度为0.7mm左右(现场测试),对TCP标定精度影响较大。为此,可在工作空间内,机器人取不同姿态,采集多组数据,再通过最小二乘法拟合转换矩阵 T ,进而降低机器人自身误差对TCP标定的影响,为保证加工精度奠定基础。

1.2 工作坐标系标定

飞机制造流程复杂,涉及多种工艺(如机加、钣金和装配等),零件需在多个设备、工装上多次定位,为保证零件质量,制造过程中定位方式采

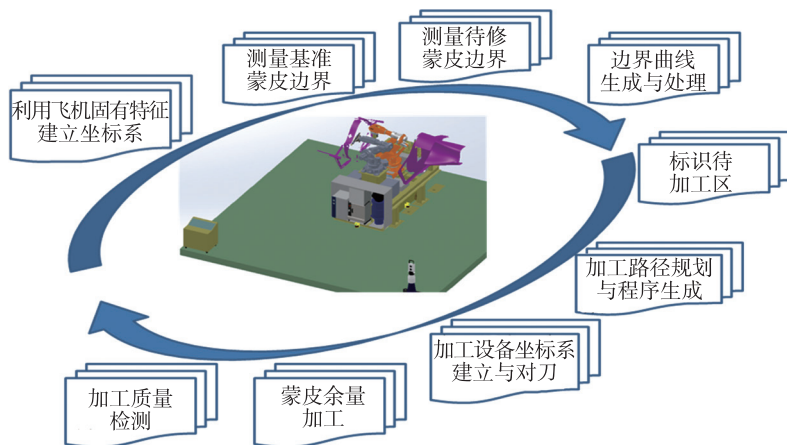


图1 飞机蒙皮余量机器人铣削工艺

Fig.1 Process of robot milling for machining allowance on aircraft skin

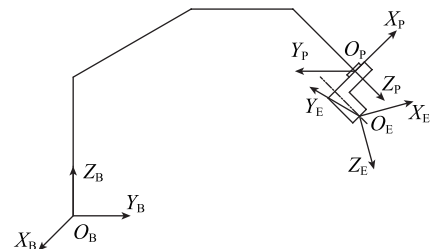


图2 TCP标定

Fig.2 TCP calibration

用数字量协调 取消了大量传统的标准工装。数字量协调以产品数模为依据,各工艺环节协调基准均采用设计数模,实现零部件的尺寸、形状等制造信息传递,从源头上消除了刚性工装的形误差累积。数字量协调的生产模式必须有数字化的测量手段作为支撑。

基于机器人的自动化铣削系统,蒙皮余量加工需在装配现场开展,测量系统不仅需要自动化,还要满足大尺度、高精度、复杂环境、局部差异化、快速测量和便于集成度等需求,单一设备无法满足全部测量需求。在建立全局基准时,一般选用激光跟踪仪、激光雷达和室内GPS等大尺度测量仪器,通过采集零部件、工装上的定位孔等特征建立工作坐标系(即飞机坐标系);蒙皮边界等局部细节可采用光学扫描仪测量;动态定位采用双相机跟踪系统。多系统协同测量技术已通过了实践验证^[7-8],本文测量设备采用Leica激光跟踪仪进行全局基准的建立和精确标定,Aicon三维扫描仪用于蒙皮边界的测量与提取,Metronor双相机用于跟踪定位。

高精度的基准网是铣削工作的前提,工作坐标系标定基于USMN(Unified Spatial Metrology Network)技术^[9-11],利用激光跟踪仪测距的优点(激光跟踪仪内置的干涉仪测距精度较高,测量误差主要是两个角度编码器),采用多站位闭合测量,通过不同权重分配,经加权平差优化处理,有效提高系统标定精度。蒙皮边界测量范围大,三维扫描仪需进行图像缝合,缝合基准由双相机跟踪系统提供,其协同工作方式和系统标定技术详见文献^[7-8]。

2 蒙皮边界提取与逆向建模

飞机零件多、刚性弱、配合关系复杂,加上各工序的误差累积,为保证蒙皮装配后间隙精度要求,蒙皮上通常留有工艺余量,蒙皮边界余量在

装配时去除。飞机表面接缝处涉及两张或以上蒙皮配合,如图3所示,蒙皮B作为配合基准,蒙皮B实际边界与数模有差异,且偏差随机分布,无法预先补偿,在实际装配中采用主动控制模式,按蒙皮B实际边界去除蒙皮A余量,保证最终对缝间隙精度。

在飞机坐标系下,基准侧和待加工侧分两次测量。基于Aicon三维扫描仪和Metronor双相机跟踪系统,逐段扫描蒙皮配合边界区域,获取整个边界的点云数据,结合设计模型,建立蒙皮实际三维数模,提取配合区边界曲线。结合虚拟装配技术和空间曲面的布尔操作,建立边界轮廓的误差比较与分析模型,通过空间投影与求交运算,确定待加工区域的加工余量,反馈至机器人铣削系统作为加工依据。

点云是边界区域的离散表征,受扫描相机像素限制,点云间距较大(达到0.2mm以上),有效点很难落在实际边界上,根据点云数据直接提取的边界多为锯齿形。为提高边界提取精度和光顺性,经大量工艺试验,对边界提取算法进行优化。其过程结合边界区域点云数据拟合出曲面

的法矢和切向方程,基于数理统计方法制定工艺补偿策略(将测量边界外延一定距离),通过高次曲线拟合,得到优化的边界曲线,最终建立面向不同材料和规格边界提取与逆向建模的补偿参数库。

3 末端执行器定位修正

机器人串联结构,耦合关节多,定位精度较低,大量学者开展了机器人绝对定位精度的标定与误差补偿研究^[2-5],经优化补偿后可满足铣削加工需求。但加工现场条件复杂,末端执行器结构复杂,为保证机器人铣削质量,需对末端执行器进行在线检测,提高铣削系统工艺稳定性。

借助Metronor跟踪系统,在末端执行器上预置光学接收器,加工过程中,Metronor跟踪器实时监控末端执行器位置和姿态,并反馈至控制系统,控制系统依据偏差情况,修正末端执行器运动路径,保证铣削加工精度。

飞机零部件大都为高价值产品,为提高质量稳定性,避免过切造成的产品报废,在蒙皮余量铣削过程中,采用增量加工(分粗切和精切等工序)方式,逐渐逼近最终加工状态,使测量、加工、检查形成一个工艺闭

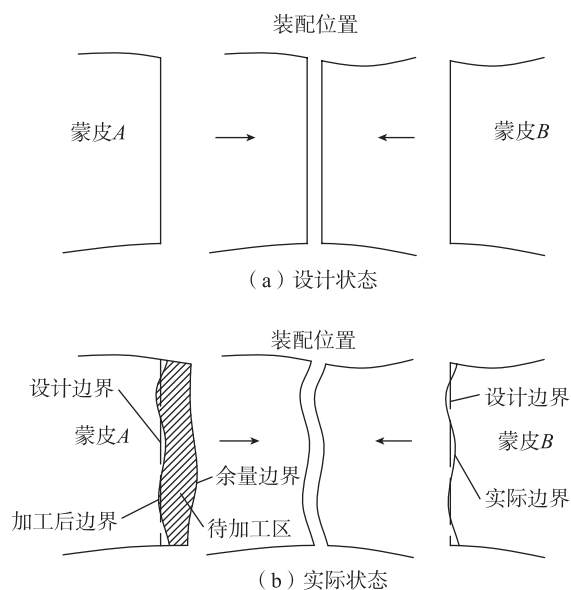


图3 蒙皮余量加工示意图

Fig.3 Machining allowance for aircraft skin

环。通过 Metronor 跟踪系统监控末端执行器实际位置与目标位置偏差,反馈到集成控制系统中,控制系统对两组数据进行信息融合、处理,控制机器人根据反馈的相关位置偏移数值进行修正,再次进行测量并计算调整,控制机器人修正加工路径,反复迭代多次,直至末端执行器位置和姿态精度满足使用要求,实现加工偏差的智能控制。

工程应用验证

1 工艺验证

飞机蒙皮机器人铣削平台如图4所示,主体包括两台机器人(一个用于铣削和测量,另一个用于大件加工的辅助夹持和吸振)、测量系统、加工末端执行器、平台框架、夹持平台(小件加工)和AGV运输车,其中 Metronor 跟踪相机用于动态定位, Aicon 扫描仪和加工末端执行器通过标准接头与机器人连接,能实现测量与铣削的快速切换。下面通过工艺试验验证数字化测量的有效性。

如图5所示,选一件具有圆弧、直线、高次曲线等特征的标准工件(其轮廓经三坐标测量机标定),取一同规格铝合金板进行工艺试验。首先建立工作坐标系,结合 Metronor 跟踪仪(2.5m 范围测量精度 0.04mm)和 Aicon 扫描仪(测量精度 0.03mm),按本文方法测量标准工件轮廓,作为试验件的加工基准。然后扫描试验件轮廓,提取边界曲线,通过计算得到加工余量,反馈

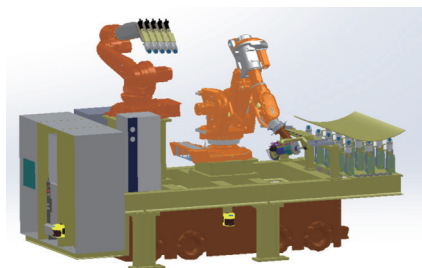


图4 飞机蒙皮机器人铣削平台
Fig.4 Robot milling for aircraft skin

至铣削控制系统,参照现场工装夹具和 TCP 数据进行加工路径规划和仿真。初始余量较大,经多次走刀至余量 1mm 时,再分为粗加工、精加工和光整加工工序走刀,加工过程中,每完成一个工序就进行扫描测量,计算偏差值,对下一个工序进行修正,直至完成加工。

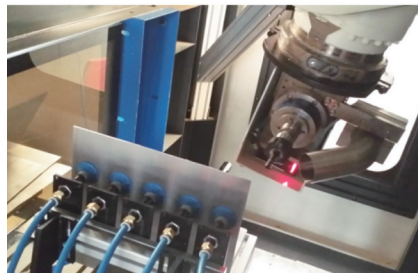
将测试试验件与标准工件对比,轮廓测量误差不大于 0.1mm,最终加工误差不大于 0.2mm,可满足飞机蒙皮余量铣削工艺需求。通过对标准工件的扫描测量,提取边界曲线,并与三坐标测量机数据进行对比,最大偏差 0.1mm,发生在小圆角处,这是由于小圆角处有效点云数据少,拟合误差大造成的。机器人铣削加工后,通过三坐标测量机检测加工轮廓,最大误差 0.19mm,位于过渡圆角和尖顶处,主要受测量和加工参数影响。

2 工程应用

以某型飞机口盖余量铣切为例,首先建立飞机坐标系,对机身口框和口盖待装配部位蒙皮进行扫描,生成点云文件并转化为 CAD 文件,然后



(a) 标准工件



(b) 测试试验件

图5 铣削工艺验证试件
Fig.5 Test specimen for robot milling

按照工艺要求进行虚拟装配,通过布尔运算求得口框和口盖重叠区,即为铣削加工余量。经实际验证,铣切后对缝质量一致性较人工修配显著提高,间隙均匀满足设计要求,表面粗糙度可达 $R_a 1.6$ 。传统修配方式需大量工人,劳动强度大,通过本技术的应用,解放了体力劳动,特别对复合材料加工,显著改善了工作环境。

本技术可用于钛合金、复合材料、铝合金等材料高精度铣削的过程控制,实现飞机蒙皮、口盖、壁板类结构件边部余量检测及加工在线修正,边界测量精度 0.1mm,末端执行器定位误差不大于 0.2mm。应用本技术为飞机弱刚性零件加工过程检测和质量的综合评估提供了有效方法和数据支持,满足四代机隐身、长寿命、高可靠性技术要求,显著提升了飞机蒙皮壁板自动化铣削和数字化水平,促进了飞机制造从传统的手工装配向智能化装配模式的跨越。

结论

机器人铣削系统的应用,解决了传统手工去除余量质量稳定性差、效率低的问题。为满足机器人铣削的数字化测量需求,本文开展了基于光学跟踪和三维扫描的协同测量技术研究,保证了机器人铣削的顺利应用,实现飞机蒙皮、口盖、壁板等弱刚性零部件边部余量检测及加工在线修正,显著提高了飞机蒙皮壁板铣削系统的适用性,促进了飞机智能制造技术的发展。

(1) 机器人铣削系统协同标定技术。基于激光跟踪仪,统一了机器人、末端执行器、测量仪器和辅助工装坐标基准,完成了 TCP 的高精度标定,实现各系统的协同工作,保证了机器人铣削系统的精度。

(2) 蒙皮边界提取与逆向建模技术。飞机蒙皮边界为空间曲线,常规三维扫描仪测量边界时曲线呈锯齿状,通过工艺试验对测量误差进

行补偿,优化了边界提取方法,边界测量精度达到 0.1mm。

(3)末端执行器定位修正技术。末端执行器上预置光学接收器,借助光学跟踪测量系统实时监控末端执行器空间位置和姿态,并反馈至控制系统,对末端执行器运动轨迹进行补偿,定位误差不大于 0.2mm,显著提高了加工精度和质量稳定性。

参考文献

- [1] 夏磊,何薇,王志坚.弱刚性零件高效加工工艺研究及实践[J].航空制造技术,2015,58(S1):52-54.
- XIA Lei, HE Wei, WANG Zhijian. Research and practice of high-efficiency processing technology on weak rigid part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(S1): 52-54.
- [2] NUBIOLA A, BONEV I A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(1): 236-245.
- [3] ESTLER W T, EDMUNDSON K L, PEGGS G N, et al. Large-scale metrology—an update[J]. Annals of the CIRP, 2002, 51(2): 587-609.
- [4] PEGGS G N, MAROPOULOS P G, HUGHES E B, et al. Recent developments in large-scale dimensional metrology[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(6): 571-595.
- [5] 刘洋.机器人标定关键技术研究[D].武汉:华中科技大学,2016.
- LIU Yang. Key technology of industrial serial robot calibration[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [6] 朱永国,黄翔,方伟,等.机身调姿方法及误差分析[J].南京航空航天大学学报,2011,43(2):229-234.
- ZHU Yongguo, HUANG Xiang, FANG Wei, et al. Fuselage automatic position and pose adjustment method and its error analysis[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(2): 229-234.
- [7] 赵建国,刘新宇,于思阳.飞机大型复杂构件三维数字化协同测量方法研究[J].航空制造技术,2018,61(5):55-59.
- ZHAO Jianguo, LIU Xinyu, YU Siyang. Research of three dimensional collaborative measurement of aircraft large complicated components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(5): 55-59.
- [8] 赵建国,邓春利,郭洪杰,等.飞机装配协同测量技术应用[J].航空制造技术,2018,61(13):55-59.
- ZHAO Jianguo, DENG Chunli, GUO Hongjie, et al. Application on cooperative measure technology for aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(13): 59-62.
- [9] 马骊群,曹铁泽,王继虎,等.大尺寸坐标测量技术在大型部件装配应用中的若干问题[J].计测技术,2013(2):7-11.
- MA Liqun, CAO Tieze, WANG Jihu, et al. Discussion on inspecting the assembling components by using large volume metrology instruments[J]. Metrology & Measurement Technology, 2013(2): 7-11.
- [10] American Society of Mechanical Engineers. ASME B89. 4.19—2006. Performance evaluation of laser based spherical coordinate measurement systems[S]. Gaithersburg: U.S. Department of Commerce, 2006.
- [11] 周闻青,冷建兴,叶欣,等.基于USMN的大型操纵性水池基础轨道空间位置测量方法研究[J].计测技术,2016,36(3):10-13.
- ZHOU Wenqing, LENG Jianxing, YE Xin, et al. A measurement method of maneuvering tank rotary bridge based on USMN[J]. Metrology & Measurement Technology, 2016, 36(3): 10-13.

通讯作者:赵建国,E-mail:zjg_5352@163.com。

Digital Collaborative Measurement Used to Processing Weak Rigid Parts on Aircraft

ZHAO Jianguo, YU Siyang, HUANG Ning

(AVIC Shenyang Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Shenyang 110034, China)

[ABSTRACT] Aiming at the high precision machining for weak rigid parts of aircraft, the digital measure technologies including collaborative calibration for robot milling system, edge extracting and reverse modeling of skins, and positioning correction of end-effector were developed. Based on the above measure of edge machining allowance and on-line correction of machining process, the measurement error of skin edge was 0.1mm and end-effector positioning error was no more than 0.2mm for skin, cover and panel of aircraft. The digital collaborative measure in this paper meets the requirements of digital measurement for advanced aircraft manufacture, improves level of automatization and digitization for skin and panel milling of aircraft, and accelerates the progress from handwork assembly to intelligent assembly.

Keywords: Collaborative measurement; Weak rigid parts; Skin edge extraction; Positioning correction; Tool center point (TCP) calibration

(责编 铃兰)