

基于快速扫描的飞机大型蒙皮自适应加工技术

康晓军¹, 向兵飞^{1,2}, 李迎光², 郝小忠², 张云飞²

(1. 航空工业江西洪都航空工业股份有限公司数控机加厂, 南昌 330024;

2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 飞机蒙皮零件具有外形复杂、尺寸大、刚性小、加工难度大等特点, 近年来出现的蒙皮镜像铣技术可以实现蒙皮零件的高精度绿色加工。由于蒙皮毛坯存在成形误差, 且其刚度小, 装夹力和毛坯自身的重力也会引起变形, 导致其实际型面与设计型面会存在一定的偏差。针对以上问题, 提出了基于快速扫描的飞机大型蒙皮自适应加工技术, 即通过在机激光扫描快速获取蒙皮实际型面, 然后基于特征映射移植加工程序, 快速生成适用于实际型面的加工程序的技术, 并将该技术成功运用于实际生产。所提出的自适应加工技术解决了蒙皮镜像铣技术的关键难题, 能够高效生成加工程序并满足蒙皮零件的厚度精度和外形精度要求, 有效提升了蒙皮的生产效率, 为国产大飞机量产奠定了技术基础。

关键词: 蒙皮零件; 镜像铣技术; 自适应加工; 蒙皮数控铣

Adaptive Machining Technology of Large Aircraft Skin Based on Rapid Scanning

KANG Xiaojun¹, XIANG Bingfei^{1,2}, LI Yingguang², HAO Xiaozhong², ZHANG Yunfei²

(1. NC Machining Workshop, AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Co., Ltd., Nanchang 330024, China;

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

[ABSTRACT] Aircraft skin parts are characterized with complex shape, large size, weak rigidity, difficult to machine and so on. Recently, the skin mirror milling technology appeared as a high precision green machining technology. Due to the weak rigidity of the skin blank, the gravity of the blank and the clamping force will cause deformation, which will result in the deviation between the actual surface and the design surface of the blank. To solve the above problem, an adaptive machining technology of aircraft large skin based on rapid scanning was proposed. The actual surface of the skin blank could be obtained quickly by laser scanning on machine, and then the machining program was transplanted based on a feature mapping method. The transplanted machining program has been successfully applied to practical production. The proposed adaptive machining technology solves the key problem of the skin mirror milling technology, can generate the machining program efficiently and satisfy the requirements of the form accuracy and thickness accuracy of the skin parts, and improve the production efficiency of the skin effectively, which will bring significant advancement to the mass production of domestic large aircraft.

Keywords: Aircraft skin parts; Mirror milling technology; Adaptive machining; NC milling of skin

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.06.085

蒙皮是构成飞机气动外形的外表零件, 是保证飞机空气动力学性能的重要零件^[1]。飞机蒙皮零件具有外形复杂、尺寸大、刚性弱等特点, 且多为双曲率零件, 曲率变化较大, 因此蒙皮加工一直是工业界难题^[2-3]。

传统的飞机蒙皮加工方法主要有化学铣切(简称化铣)和数控铣。

目前在航空制造领域, 化铣是蒙皮加工的主要方法^[4], 是将蒙皮待加工表面浸没在化学溶液中进行腐蚀, 从而获得所需形状和尺寸的一种无刀具、无切屑、无应力的加工方法^[5-6], 但是它需要经过十几道工序, 工艺繁杂^[6], 存在突出的环境污染问题, 并且铝屑不可回收。

蒙皮数控铣又分为实体模具数控铣以及采用柔性夹具的蒙皮精确铣。实体模具数控铣是用实体模型配合多轴数控铣削机床进行加工的方法。该方法需要为每种规格的蒙皮分别制造专用实体模具,制造该模具所耗时间占零件研制周期的60%以上,严重影响了蒙皮加工的总效率^[1],并且增加了生产成本。蒙皮精确铣是由真空吸附柔性夹具与多轴数控铣削机床配合加工的方法。相比实体模具数控铣,该方法大幅提高了蒙皮加工的总效率,同时降低了生产成本,但是由于柔性夹具对蒙皮零件多点离散夹持,当刀具对夹持点之间的悬空区域进行加工时,蒙皮零件会发生弹性变形甚至颤振,影响铣切深度和蒙皮表面粗糙度^[7]。

蒙皮镜像铣技术能够解决传统蒙皮加工方法中存在的问题,蒙皮镜像铣机床如图1所示^[7]。镜像铣加工系统主要是由真空吸附柔性夹持系统和两台同步运动的五轴卧式加工机床组成。两台同步机床的主轴头分别为加工主轴头和局部随动支撑,在加工过程中二者始终在同一法矢方向同步运动,如图2所示^[3]。通过调整局部随动支撑和加工主轴头之间的间距即可控制蒙皮零件的剩余厚度^[7]。在用镜像铣机床加工蒙皮零件时,局部随动支撑可以保证零件加工区域的刚性,从而有效



图1 蒙皮镜像铣机床

Fig.1 Mirror milling machine tool

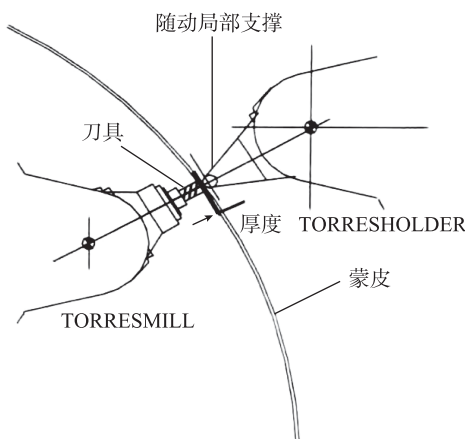


图2 蒙皮镜像切削原理

Fig.2 Principle of skin mirror milling

减小该区域的变形、防止颤振,保证了蒙皮零件的表面质量和加工精度,同时又不需要制造额外的装备,也不会污染环境。此外,镜像铣机床还集成了实时厚度监测及误差补偿等功能。

但蒙皮镜像铣也引出了新的问题,由于蒙皮毛坯存在成形误差,且其刚度小,装夹力和毛坯自身的重力也会引起变形,所以待蒙皮毛坯在机床上装夹完成后,它的实际待加工表面(以下简称实际型面)与蒙皮理论模型的待加工表面(以下简称理论型面)会存在一定的偏差。如果使用依据理论型面规划的刀轨进行加工,就可能使零件的形状精度和位置精度变差,发生过切或者欠切,如图3所示,甚至铣穿零件,导致零件报废。

要解决上述问题,就必须测量蒙皮毛坯得到其实际型面,然后根据实际型面得到新刀轨。

在零件的测量方面,研究人员做了大量研究,测量方法主要分为离线测量和在线测量两类。

离线测量主要是用三坐标测量机测量,可以达到很高的测量精度,但是这种测量方法需要将零件移动到三坐标测量室再进行测量,所以并不适用于蒙皮实际型面的测量。

在线测量是指将测量设备集成到机床上,在机床上进行测量的方法。在线测量又分为接触式测量(如触发式测量等)和非接触测量(如激光扫描测量等)。

触发式测量是目前最成熟的测量方法,其数字化程度高、重复性好,对被测面色泽、光洁度等均无特殊要求,尤其适合对中小型曲面的测量^[8],其测量精度一般为微米或亚微米量级^[9]。但是目前在机触发式测量只

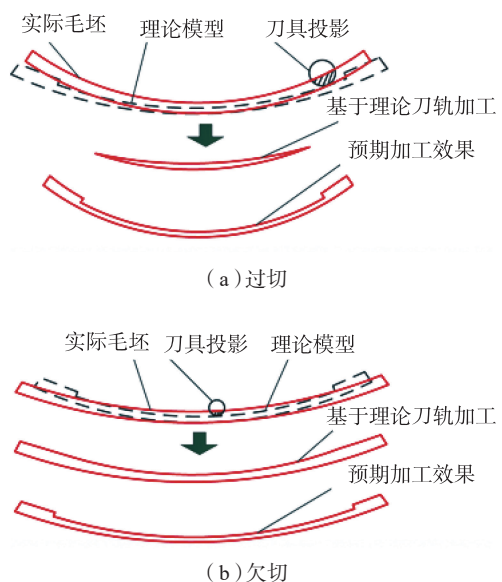


图3 理论、实际型面存在偏差导致的过切和欠切

Fig.3 Overcutting and undercutting caused by deviation between actual surface and theoretical surface

能进行单点非连续测量,对于蒙皮这种大型曲面零件,就需要较长的测量时间;同时,在测量前蒙皮毛坯的实际型面无从得知,这就影响了在机测量路径规划,进一步降低了测量效率,影响了机床的利用率。

接触式跟踪扫描测量技术利用接触式三维扫描测头对零件廓形进行连续数字化采集,其测量精度可达微米甚至亚微米量级,且点云数据采集速度较快,每秒可获取成百上千离散数据点^[10]。与触发式测量与非接触光学测量相比,接触式跟踪扫描测量技术在测量精度及效率上取得良好平衡,更适用于大型零件整体面形的精密、高效数字化测量^[11]。但是目前接触式跟踪扫描测量技术在在机测量方面的应用还不够成熟。

随着激光等技术的发展,非接触光学测量已成为曲面零件测量方法中极具发展前景的测量技术。目前,适用于曲面零件光学测量的方法主要为点线激光扫描测量。这种方法测量效率很高,但是测量精度容易受到被测表面粗糙度、反光程度等条件的影响。综上,点线激光扫描测量具有远高于接触式测量的测量效率,可是其测量精度却没有接触式测量好。

新刀轨规划方面,在大型航空薄壁件和航空发动机叶片等低刚度工件加工领域,加工变形导致了与蒙皮加工近似的需要修正刀轨的问题,对于该问题国内外研究人员进行了大量研究。

加工变形的误差补偿方法主要分为离线补偿和在线补偿两种。离线补偿是指在加工前通过预测手段得到零件加工变形,然后建立误差补偿模型对刀轨进行修正。在线补偿是指对零件的加工变形进行在线测量,根据测量结果实时修正刀轨。其中离线补偿法具有成本低、可操作性强等特点,被广泛应用在低刚度工件加工中。许多国内外研究人员对离线补偿法的发展做出了贡献,目前预测零件变形的方有有限元仿真^[12]、神经网络^[13]、递归方法^[14]和试验手段^[15]等,修正刀轨的方法有:误差完全补偿法和误差多次迭代补偿法^[16]等,另外优化加工参数也可以控制加工变形^[17]。

然而,这些方法解决的问题都是由加工变形导致的需要进行刀轨补偿的问题,并不适用于蒙皮镜像铣技术的实际加工刀轨规划。

诸如液体火箭发动机喷嘴一类零件也存在和蒙皮加工相似的问题,Liu等^[18]针对这类零件的加工提出了一套可行性方案,即用激光在线测量得到液体火箭发动机喷嘴外表面轮廓,然后用超声测厚仪器对其进行测厚,进而计算得到该零件内表面的实际型面,最后再根据实际型面重新设计内表面的冷却剂通道。这个方案也可以解决蒙皮镜像铣技术的实际加工刀轨规划问题,但是它需要根据每个零件的实际形状重新设计刀轨,无

法满足飞机蒙皮零件的高效加工和批量生产的需求。

为了进一步改善蒙皮零件的加工,本文经过反复比较,综合效率、精度、经济成本、可行性以及操作难易程度等各方面因素,提出了一个适用于镜像铣技术的、可以高效生产合格蒙皮产品的加工技术:基于快速扫描的飞机大型蒙皮自适应加工技术,即待蒙皮毛坯在镜像铣机床上装夹完成后,用线激光扫描仪器对其进行在机测量,然后根据测量数据得到蒙皮毛坯的实际型面,最后将根据理论型面规划的刀轨移植到实际型面上得到最终加工刀轨。

1 基于快速扫描的飞机大型蒙皮自适应加工技术

如图4所示,基于快速扫描的飞机大型蒙皮自适应加工技术主要包含以下内容:基于线激光扫描系统的蒙皮型面快速扫描,蒙皮外形测量路径规划,测量数据处理,基于特征匹配的刀轨自适应移植以及软件系统集成。

基于线激光扫描系统的蒙皮型面快速扫描:包括线激光扫描设备与机床的集成、数控机床实时位置数据的获取、扫描设备与机床信号的处理和传输等。

蒙皮外形测量路径规划:包括初始测量方向确定、基于理论模型确定测量初始位置、测量轨迹规划等,实现蒙皮零件型面测量路径的快速生成。

测量数据处理:包括数据采集、数据拼合、数据分析与处理等,将机床坐标系与扫描设备坐标系进行坐标变换,将测量数据点进行拟合,得到飞机蒙皮实际型面。

基于特征匹配的刀轨自适应移植:包括特征分类研

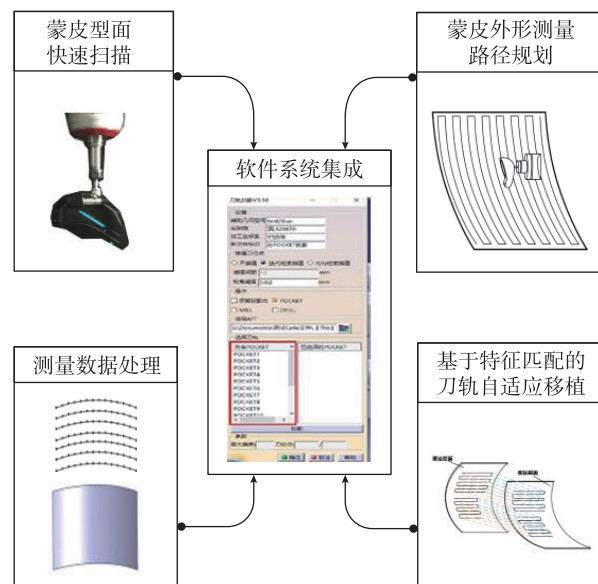


图4 基于快速扫描的飞机大型蒙皮自适应加工技术内容
Fig.4 Components of adaptive machining technology of large aircraft skin based on rapid scanning

究、理论型面与实际型面映射模型的建立、刀轨的快速移植等。

系统集成：包括测量路径规划系统、数据采集与处理系统、数控刀轨自适应移植系统的集成，实现飞机蒙皮外形自适应加工系统的集成。

本文已经开发出了一套可以和机床集成的线激光扫描硬件系统和飞机蒙皮外形自适应加工软件系统。

1.1 线激光扫描硬件系统

如图 5 所示，线激光扫描硬件系统由线激光扫描测头、控制器、电脑以及各种数据传输线等组成。机床的运动信号从机床驱动器中读取，工件到主轴的距离信号由安装在主轴上的线激光扫描测头得到，最后由控制器接受运动信号和距离信号，再由电脑软件系统将这些信号处理并得到最终扫描结果。

1.2 飞机蒙皮外形自适应加工软件系统

飞机蒙皮外形自适应加工软件系统包括 3 大模块：基于线激光扫描系统的蒙皮型面快速扫描功能模块、数据处理功能模块和刀轨自适应移植功能模块。

基于线激光扫描系统的蒙皮型面快速扫描功能模块是和硬件系统配套的软件部分，作用是将线激光扫描测头采集到的数据收集、计算，从而得到扫描点云数据结果。

数据处理功能模块是对测量得到的扫描点云数据进行处理的软件子系统，此模块作用是对扫描点云数据进行剪切、稀释、拼接等处理，然后将其拟合成曲面，将该曲面作为蒙皮毛坯实际型面待用。

刀轨自适应移植功能模块使用 CATIA 二次开发实现，界面如图 6 所示。该模块作用主要是将理论加工刀轨从蒙皮理论型面上移植到实际型面上去，从而得到实际加工刀轨。为了实现此模块的功能，本文提出了基于特征匹配的刀轨移植方法。



图5 线激光扫描硬件系统示意图
Fig.5 Schematic diagram of scanning system

在蒙皮零件中存在大量的阶梯槽特征，对于这种复杂相交特征，在实际加工时，需要根据所余厚度对该特征进行分层，进而根据每层的特征信息规划刀轨。例如如图 7 中零件的特征分层为 3 层，那么据此规划的刀轨也有 3 个部分。在蒙皮毛坯理论型面上根据特征分层生

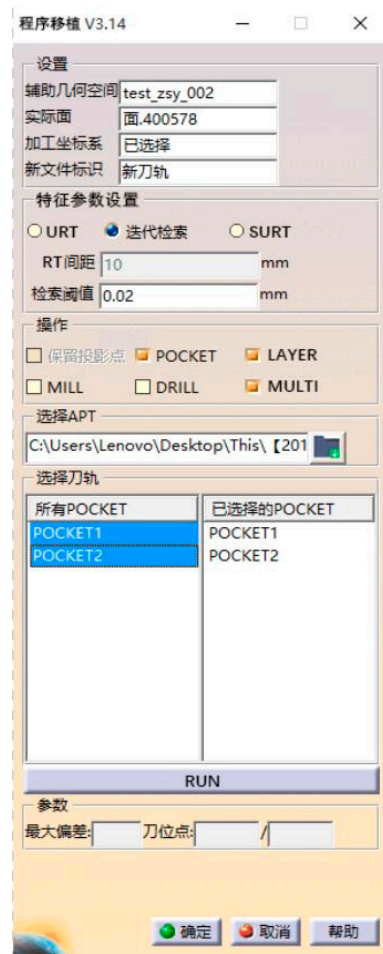


图6 飞机蒙皮外形自适应加工软件系统界面
Fig.6 Software system interface for aircraft skin shape adaptive machining

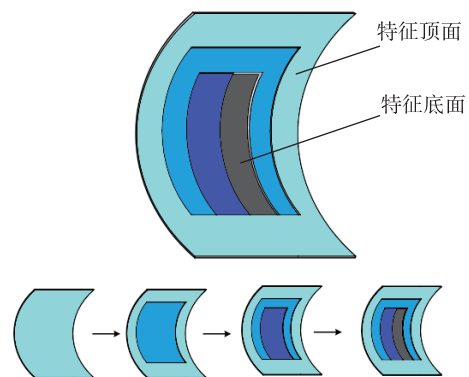


图7 特征分层
Fig.7 Different layers of feature

成理论加工刀轨后,要将理论加工刀轨移植到实际型面上成为实际加工刀轨,就需要建立映射关系:

$$s_t \rightarrow s_r$$

其中, s_t 表示蒙皮理论型面; s_r 表示蒙皮实际型面。

该映射关系需保证蒙皮零件上各个特征的位置精度,满足特征匹配。该映射关系原理如图 8 所示,根据测地线保证蒙皮实际型面上刀位点的位置精度。以图 8 理论刀轨中 D 点为例,在理论型面上,过 D 做蒙皮理论型面边界 L_1 和 L_2 的法线,并分别交 L_1 和 L_2 于 A 和 B 两点,分别测量点 A 和 D ,以及点 B 和 D 的弧长距离 L_{AD} 和 L_{BD} 。然后,在实际型面上作点 d ,使其到边界 l_1 和 l_2 的法向弧长距离 l_{ad} 和 l_{bd} 分别和理论型面上的 L_{AD} 和 L_{BD} 相等。此时认为实际型面上的点 d 和理论型面上的点 D 满足所提映射关系。

按照这个映射关系将理论加工刀轨进行移植,即可得到实际加工刀轨。

1.3 工艺流程

如图 9 所示,基于快速扫描的飞机大型蒙皮自适应加工技术的具体工艺流程如下:

首先工艺人员需要用该零件的理论型面规划理论加工刀轨以及线激光扫描测量路径。待毛坯在镜像铣机床上装夹完毕,从刀库调出线激光测头,用数据线连接测头和控制器,并打开软件系统的蒙皮型面快速扫描功能模块,配置各项软件参数并进行扫描测量。

得到扫描点云数据之后,打开软件系统的数据采集与处理功能模块,进行去噪点、衔接和稀释点云等操作,然后将其拟合曲面,得到的曲面就是该蒙皮毛坯的实际型面。

再进入软件系统的刀轨自适应移植功能模块,将理论加工刀轨移植到实际型面上得到实际加工刀轨,最后用实际加工刀轨加工零件。

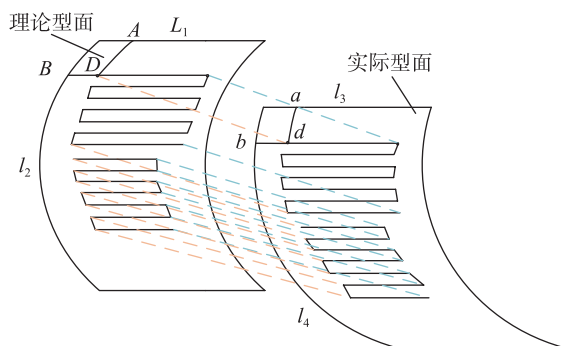


图8 理论型面和实际型面之间建立映射关系

Fig.8 Mapping relationship between theoretical and actual surface

经过近 3 年的论证和实践,基于快速扫描的飞机大型蒙皮自适应加工技术不断完善,其工艺流程已经固定化,软件硬件系统操作简单,经过简短培训之后工艺人员可以很快掌握,目前该技术已经成功应用并加工了一批合格零件。

2 试验验证

本文选用尺寸为 2843mm × 2078mm 的飞机蒙皮毛坯为示例,分别做了 3 组对比试验:

(1) 用点接触式测头和所提技术中选用的线激光扫描测头分别对该蒙皮毛坯进行在线测量,并比较两者的测量效率、精度以及测量的数据点数量,对比结果如表 1 所示。

(2) 得到实际型面之后,分别使用根据理论型面规划的刀轨和经过所提技术中软件系统移植得到的刀轨对实际型面进行加工仿真,并比较两者的仿真结果,对比结果如表 2 所示。

(3) 得到实际型面之后,分别通过 CATIA 刀轨重算和软件系统中刀轨自适应移植功能形成实际加工刀轨,并比较两者的耗时,对比结果如表 3 所示。

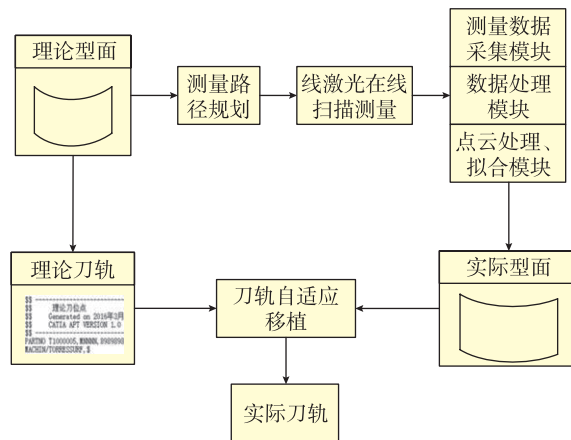


图9 基于快速扫描的飞机大型蒙皮自适应加工技术的工艺流程
Fig.9 Process diagram of adaptive machining technology of large aircraft skin based on rapid scanning

表1 点接触式测量和线激光扫描测量结果对比

Table 1 Comparison of point contact measurement and line laser scanning measurement

零件	测量方法	耗费时间/min	测量精度/mm	测量数据点数量
	点接触式测量	120	± 0.005	560
	激光扫描测量	5	± 0.1	30000

表2 理论型面规划的刀轨和软件系统移植刀轨仿真结果对比
Table 2 Comparisons of simulation results of tool path planning for theoretical profile and transplantation of software system




零件	刀轨	仿真结果
	理论型面规划刀轨	
	软件系统移植刀轨	

表3 通过CATIA刀轨重算和刀轨自适应移植功能得到实际加工刀轨所用时间对比

Table 3 Compares actual processing time of tool paths by CATIA tool path recalculation and tool path self-adapting transplantation

零件	获得刀轨方法	耗时 /min
	CATIA 刀轨重算	>240
	刀轨自适应移植功能	10.5

由表 1 的对比可见,相对于点接触式测量法,激光扫描测量法具有极高的测量效率,测量数据点数量很大,且其精度满足实际需求。

由表 2 的仿真结果可见,使用根据理论型面规划的刀轨会铣穿零件(仿真结果右上角的黑块表示零件被铣穿),导致零件报废,而用软件系统移植得到的刀轨加工出来的零件是合格的。

由表 3 可见,软件系统中的刀轨自适应移植功能得到实际加工刀轨的时间远小于通过 CATIA 刀轨重算得到实际加工刀轨的时间。

据某企业调研,蒙皮零件验收标准如下:

蒙皮零件厚度精度要求是 $-0.1\sim 0.2\text{mm}$ 。

在许用压力下,蒙皮零件和凹模外形误差 $<0.1\text{mm}$ 。

最后用本文所提技术对示例毛坯进行加工,经检测,得到的蒙皮零件厚度误差在 $\pm 0.1\text{mm}$ 之内,并且在许用压力下,蒙皮零件和凹模外形误差 $<0.1\text{mm}$,满足各项指标要求,最终零件如图 10 所示。

3 结论

针对蒙皮毛坯在镜像铣机床上的实际型面和其理论型面存在偏差的问题,本文提出了一个适用于镜像铣技术的、可以高效生产合格蒙皮产品的加工技术:基于快速扫描的飞机大型蒙皮自适应加工技术。

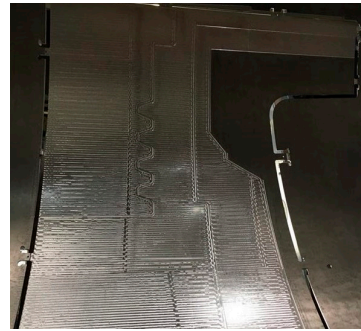


图10 蒙皮零件成品
Fig.10 Experimental skin parts

(1)该技术解决了蒙皮镜像铣技术存在的关键难题,能够满足蒙皮零件的厚度精度和外形精度要求。

(2)该技术可以高效地得到蒙皮毛坯在机床上的实际型面和实际加工程序,大幅缩短了加工准备工作的耗时,提高了机床利用率。

参考文献

[1] 甄瑞,周亮,高栋.飞机蒙皮加工柔性夹具系统的研制[J].机械制造,2009,47(11):68-70.
ZHEN Rui, ZHOU Liang, GAO Dong. Research on flexible fixture system for processing aircraft skin[J]. Machinery, 2009,47(11): 68-70.

[2] 张新娟,段雪峰.飞机蒙皮零件的柔性装夹及数控铣切技术[J].航空制造技术,2015,58(S1):42-44.
ZHANG Xinjuan, DUAN Xuefeng. Flexible clamping and CNC milling technology of aircraft skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(S1): 42-44.

[3] 徐明,向兵飞,李响,等.蒙皮镜像铣切系统及先进制造工艺的应用[J].制造技术与机床,2014(11):40-43.
XU Ming, XIANG Bingfei, LI Xiang, et al. Application of mirror milling system and advanced machining technology for aircraft skin[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2014(11): 40-43.

[4] 范玉青,梅中义,陶剑.大型飞机数字化制造工程[M].北京:航空工业出版社,2011.
FAN Yuqing, MEI Zhongyi, TAO Jian. Digital manufacturing engineering of large aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011.

[5] 北京航空制造工程研究所.航空制造技术[M].北京:航空工业出版社,2013.
Beijing Aviation Manufacturing Engineering Research Institute. Aeronautical manufacturing technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013.

[6] 林翠,蔡剑,曾丰光,等.LY12铝合金铣削工艺及加工质量影响因素[J].失效分析与预防,2010(1):8-12.
LIN Cui, CAI Jian, ZENG Fengguang, et al. Chemical milling technology and influencing factors of processing quality of LY12 aluminum alloy[J]. Failure Analysis and Prevention, 2010(1): 8-12.

[7] 鲍岩,董志刚,朱祥龙,等.蒙皮镜像铣削支撑技术的研究现状和发展趋势[J].航空学报,2018,39(4):1-14.
BAO Yan, DONG Zhigang, ZHU Xianglong, et al. The research (下转第94页)

板作为附件长期放置在机床台面,而对应的零件应全部按照该方式进行工艺标准化改进,统一定位原点及压紧孔位,这样能实现不同零件的高效更换。其次,装夹辅助工具采用电动、低转速六方扳手替代手动扳手能进一步缩短装夹时间。

3 结论

本文结合一种新型的反拉方式,分别提出了嵌入式和单元式的反拉通用工装设计方案,总结了一套适用于飞机结构件的高效数控铣削工艺方案,并针对典型航空结构件进行了加工验证,试验结果显示,反拉类通用工装在工装管理、装夹效率等方面都体现出了一定的优势,可以在航空结构件的加工中进行推广应用。成飞公司已在试验加工的基础上针对肋类零件进行了初步工程化应用,在装夹效率提升、毛坯成本降低等方面都有明显效果。后续针对工艺标准化、辅助工具等方面的改进也将继续开展研究,进一步完善基于反拉方式的高效工艺方案。

参考文献

[1] 高鑫,龚清洪,孙超,等. 飞机结构件智能制造关键技术研究[J]. 制造技术与机床, 2017(8): 45-49.

GAO Xin, GONG Qinghong, SUN Chao, et al. Key technologies research of intelligent manufacturing for aircraft structural parts[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(8): 45-49.

[2] 黄军军,张保林,王雪岭,等. 五轴加工中心用通用加工工装结构的设计与夹具选型[J]. 机械制造, 2013, 51(10): 76-78.

HUANG Junjun, ZHANG Baolin, WANG Xueling, et al. Design and fixture selection of universal machining tooling for five axis machining center[J]. Machinery, 2013, 51(10): 76-78.

[3] 王继均,康志文,刘卫武,等. 基于DMC125U机床的方箱工装多件柔性加工技术[J]. 制造技术与机床, 2016(4): 102-105, 110.

WANG Jijun, KANG ZHIWEN, LIU Weiwu, et al. Quad-faces multiple parts flexible machining technology based on DMC125U machine[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(4): 102-105, 110.

[4] 黄军军,王立夫,勾波,等. 通用加工工装结构的模块化设计[J]. 机械制造, 2013, 51(2): 67-69.

HUANG Junjun, WANG Lifu, GOU Bo, et al. Modular design of general machined tooling structure[J]. Machinery, 2013, 51(2): 67-69.

[5] 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司. 一种板类结构件压紧工装, CN201220253206.1[P]. 2012-12-19.

AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd. A kind of plate structure part press assembly: china, CN201220253206.1[P]. 2012-12-19.

通讯作者: 陈代鑫, 高级工程师, 研究方向为航空结构件高效加工及工艺标准化, E-mail: dysonchen@126.com。

(上接第90页)

status and development trend of the support technology of mirror milling[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(4): 1-14.

[8] MELI F, KUENG A, THALMANN R. Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe[J]. Measurement Science & Technology, 2007, 18(2): 319-327.

[9] HOLLOWAY A J, JONAS K B, WRIGHT D A. Surface sensing device with optical sensor: U.S. Patent 6,633,051[P]. 2003-10-14.

[10] LUMMES S E, MCMURTRY D R. Touch probe: U.S. Patent 7, 281, 336[P]. 2007-10-16.

[11] 陶冶. 大型零件在机接触式跟踪扫描测量方法及关键技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.

TAO Ye. Methods and key technologies of on-machine contact scantracking measurement for large-scale parts[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.

[12] 朱建伟. 薄壁曲面加工变形分析与补偿方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

ZHU Jianwei. Research on deformation analysis and compensation method of surface machining on thin-walled parts[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[13] ZHANG Y, YANG J, JIANG H. Machine tool thermal error modeling and prediction by grey neural network[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(9-12): 1065-1072.

[14] HUNG T C, DING C H, DING C H, et al. Improvement of residual error in hydrodynamic polishing by recursive error compensation strategy[J]. Microelectronic Engineering, 2012, 93(5): 27-34.

[15] WEI Z C, WANG M J, CAI Y J, et al. Form error estimation in ball-end milling of sculptured surface with Z-level contouring tool path[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(1-4): 363-369.

[16] 樊建勋, 徐仁乾, 胡自化, 等. 基于直纹曲面重构的铝合金薄壁件加工变形误差补偿方法[J]. 航空制造技术, 2017, 60(11): 99-104.

FAN Jianxun, XU Renqian, HU Zihua, et al. Compensation method for machining deformation error of aluminum alloy thin wall based on straight line surface reconstruction[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(11): 99-104.

[17] 武凯, 何宁, 廖文和, 等. 薄壁腹板加工变形规律及其变形控制方案的研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(8): 670-674.

WU Kai, HE Ning, LIAO Wenhe, et al. Study on deformation rule and deformation control scheme of thin-walled webs[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(8): 670-674.

[18] LIU H B, WANG Y Q, JIA Z Y, et al. Integration strategy of on-machine measurement (OMM) and numerical control (NC) machining for the large thin-walled parts with surface correlative constraint[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(9-12): 1721-1731.

通讯作者: 向兵飞, 博士研究生、工程师, 研究方向为数控加工技术, E-mail: x8375987@126.com。

(责编 古京)

(责编 古京)