

飞机薄壁蒙皮镜像铣装备及加工工艺研究

何恩元

(上海拓璞数控科技股份有限公司, 上海 201108)

【摘要】镜像铣加工是解决飞机大型蒙皮厚度减薄加工难题的新兴技术, 目前上海拓璞已成功研制双五轴镜像铣设备, 并在飞机蒙皮和火箭贮箱箱底减薄加工中实现工程化应用。根据蒙皮加工特点分析了镜像铣研制难点及实施要点, 并对卧式双五轴镜像铣主机静力学、动力学特性、传动系统刚度进行有限元分析, 优化改进结构、动态特性及精度; 制定了C919铝锂合金蒙皮加工工艺优化方案, 得出合适的加工参数并验证合格。

【关键词】镜像铣削; 飞机薄壁蒙皮; 动态特性分析; 动刚度; 加工工艺

引言

蒙皮是飞机的外表零件, 包裹在飞机骨架外侧, 覆盖机身80%的面积, 维持飞机外形, 使之具有一定的空气动力特性, 并将作用力传递到机身和机翼骨架上, 承受着复杂的作用力。同等推力、同样燃料时, 自重低可提高飞机机动性、提升负载能力和飞行距离, 延长飞机服役寿命。因此, 飞机上自重“克克计较”, 且一般使用低密度材料, 也多为薄壁蒙皮结构^[1]。

大型薄壁蒙皮减薄加工是飞机零件制造的难点之一, 其技术水平直接影响我国大飞机等研制、制造水平以及产能^[2]。以C919中机身蒙皮为例, 蒙皮尺寸为 $6\text{m} \times 2.5\text{m}$, 最薄壁厚仅 0.8mm , 面积厚度比超过 1.125×10^{11} ; 整体变形可达 60mm , 是壁厚精度的60倍以上, 在铣削加工中受自重及切削力的作用易变性, 难以实现蒙皮外轮廓、装配定位孔和装配面轮廓的定位, 加工壁厚很难控制。

目前蒙皮常用的加工方式有化学铣削、平板铣后滚弯、仿形工装和五轴铣削、柔性工装和镜像铣削。

1. 化学铣削。化铣虽单次效率高, 但污染高、壁厚精度难保证、轮廓精度差、表面质量差、工艺一致性差。

2. 平板铣后滚弯。高筋蒙皮在平板滚弯时会出现应力集中, 易出现开裂、凸楞等缺陷; 双曲率蒙皮无法滚弯加工。

3. 仿形工装和五轴龙门铣削。大型网格蒙皮和

双曲率蒙皮加工时, 工装与工件的贴合率低使得壁厚精度难以精确控制; 工装成本高。

4. 柔性工装和镜像铣削。2005年, 法国杜菲和空客联合开发蒙皮镜像铣削, 摆脱了对工装的依赖, 通过刀具和局部支撑装置的同步运动控制壁厚, 加工时间和成本大幅降低, 成为大型铝合金蒙皮加工的最新技术和发展趋势^[3]。

一、镜像铣加工技术

镜像铣系统主要由镜像铣加工主机、矩阵工装、翻转工装、输送工装、旋转工装等组成。

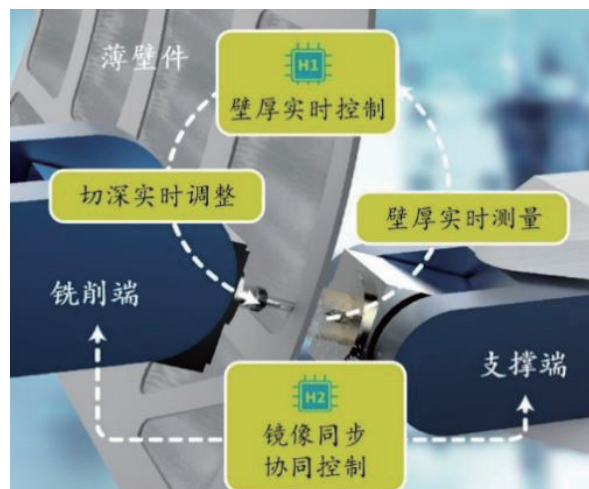


图 1. 镜像铣削概念

镜像铣加工系统原理如图1所示, 类似于两台同步运动的五轴加工机床组合而成, 两侧主轴头分别铣削、支撑; 铣削和支撑装置沿工件两侧镜像对称移动, 依靠随动支撑改善薄壁件加工区域的局部动态特性, 在支撑装置中加入实时测量壁厚的超声传

感器,根据壁厚数据实时调整切削深度,实现加工过程中壁厚精度的闭环控制及五轴铣削加工^[4]。镜像铣亦可实现蒙皮制孔、切边、开窗等。

国内对镜像铣研究起步较晚,大连理工大学、南京航空航天大学等对刀轨优化、顶撑装置和仿震颤支撑装置、装夹流程、特定零件镜像加工工艺方面进行了研究;江西洪都航空公司在2013年引入西班牙M.Torres双五轴镜像铣系统,并制定了相应的规范,完成了C919等多种蒙皮的合格制造。

上海拓璞数控科技股份有限公司联合上海交通大学等单位,对镜像铣原理、双五轴联动运动控制、双五轴空间精度、壁厚测量与补偿、加工过程振动抑制等多方面进行了研究,将镜像铣技术应用到运载火箭燃料贮箱箱底、筒段、飞机蒙皮的高精绿色加工,研制了3种构型的镜像铣机床,包括全球如图2所示,首台多头筒段镜像铣装备、首台异构立式箱底镜像铣装备、卧式双五轴镜像铣装备,并实现工程化应用。



a. 多头筒段镜像铣 b. 异构立式箱底镜像铣



c. 卧式双五轴镜像铣装备

图 2. 上海拓璞三类镜像铣削装备

据最新消息,C919大型客机订单需求为1400

架,镜像铣蒙皮加工需求超过14万张。《<中国制造2025>重点领域技术路线图》中将“五坐标蒙皮镜像加工机床”列为航空航天装备大型结构件制造的发展重点。

二、镜像铣研制难点

(一) 大跨度大行程双五轴高速卧式主机

大行程、高速运动、高动态、多轴联动、高精度、高转速的要求对机械结构、传动系统刚度、动力学特性等设计及优化是一个极大的挑战。

需开展动力学研究,确定其主要结构件的动态特性、各结构件装配面连接刚度与阻尼,机床动态特性与伺服系统动态特性的匹配关系,研究仿真模拟与工程化测量方法,实行对机床动态特性与动态精度的快速预测与测量。

(二) 工件壁厚实时测量装置

薄壁蒙皮工件的壁厚实时控制精度要求为 $\pm 0.1\text{mm}$ 。高精度铣削要求双五轴镜像铣设备配备高精度壁厚实时测量装置,为保证壁厚实时测量数据的准确性及可靠性,需保证铣削主轴与实时测厚装置法向一致,选用何种传感器实现壁厚测量及法向调整,研究测厚耦合腔体结构对耦合剂流线分布对测厚数据的影响是实时测厚装置设计的技术难点。

(三) 双五轴联动控制数控系统

双五轴镜像运动是指5自由度的顶撑头随5自由度切削铣头同步随动顶撑。多数数控系统只能采用单五轴联动,很难保证铣削端与支撑端的双五轴镜像运动。

外部铣削轴进行RTCP控制,内部支撑轴执行后处理过的刀路。加工时,数控系统在每行加工程序中同时控制内外刀尖点,保持刀尖点运动同步^[5]。

三、主机静/动力学分析与直线传动系统匹配

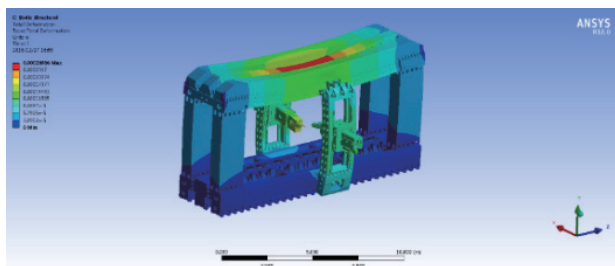
为保证双五轴镜像铣削主机满足大型复杂蒙皮零件的高精度加工要求,需校验优化机床是否符合设计要求,确保整机结构设计合理,具有足够的静态、动态、热态刚度。

(一) 双五轴镜像铣削设备整机静、动态模拟分析

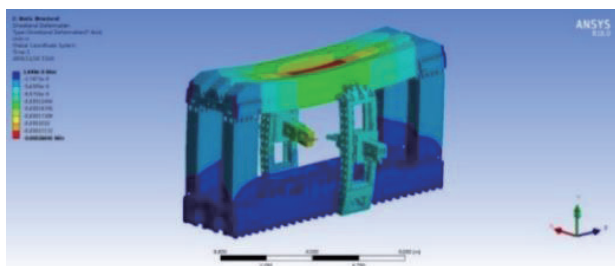
这里以7000mm级卧式蒙皮镜像铣机床进行分析。

1. 机床静力分析

铣削侧移动立柱及支撑侧移动立柱分布位于横梁中部，铣削侧滑鞍及支撑侧滑鞍位于移动立柱中部时，且铣削侧滑枕及支撑侧滑枕位于Z轴悬伸长最大时，为极限工作状态。



a. 整体静态总变形图



b. 整机静态Y向变形图

图 3. 静态变形图

机床整体总变形如图3所示，为X、Y、Z三向的变形合成值，横梁变形最大，达到0.26mm；整机的Y向变形图数值与总变形图一致。

2. 机床整机模态分析

模态分析可以得到振动系统的固有频率和振型，但卧式双镜像铣设备一般转速约12000rpm，因此激励力频率不高，只有最低几阶的固有频率才有可能引发共振，这里只研究机床的前三阶模态。

模态分析如图4所示，主机第一阶模态主要是横梁沿X轴摆动，整机固有频率为10.557Hz；第二阶模态主要是两侧横梁支撑立柱绕Y轴扭转，整机固有频率为15.743Hz；第三阶模态横梁沿Z轴摆动，整机固有频率为17.504Hz。由结果分析，前三阶主振系统均是横梁，固有频率主要取决于横梁；其固有频率大于系统允许最小固有频率的1.3倍，符合设计要求。

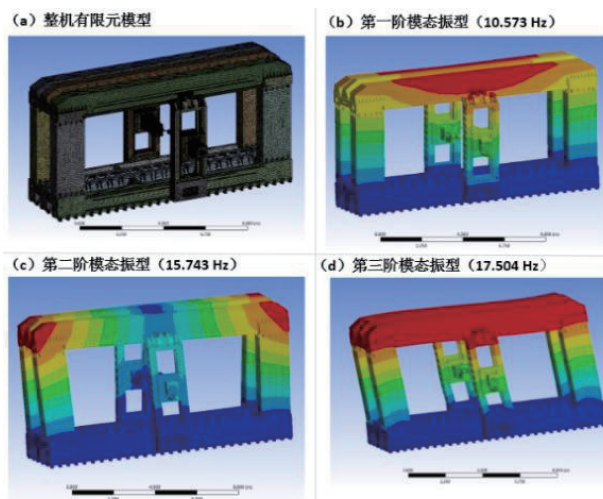


图 4. 模态分析

主机龙门框的整体刚性较好，考虑到高阶局部振型表现出的龙门框局部刚度较低、各部位存在刚度不均的现象，对各部分壁厚及筋板布置进行改进，使局部刚度得到提高，各部位刚度趋于接近。

(二) 运动部件动力学分析

建立X向部件的有限元分析模型，网格、材料、接触对设置与整机模态分析时相同，网格节点数为63.2w，放开滑块面的Z向移动，限制X、Y向的移动，计算12阶模态。

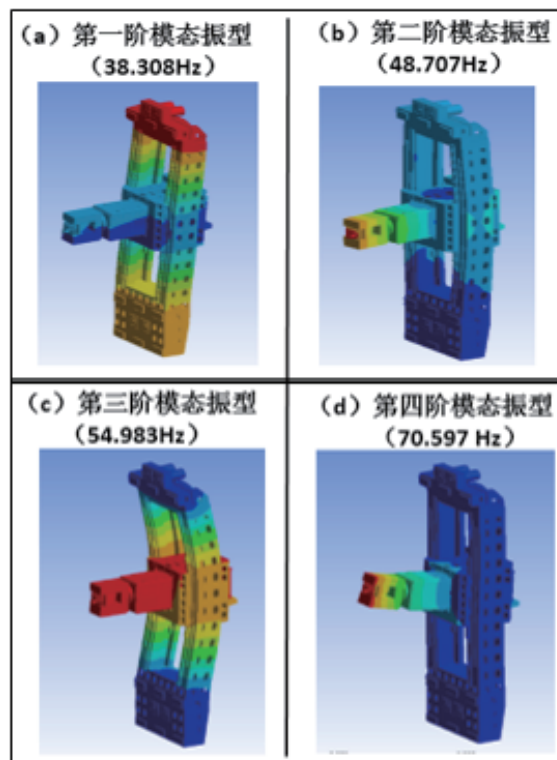


图 5. 镜像铣X向部件的模态振型

前四阶模态分析如图5所示, X向运动部件第一阶模态主要是立柱上下两端绕X轴扭转, 固有频率为38.308Hz; 第二阶模态主要是滑枕沿Z轴摆动, 固有频率为48.707 Hz; 第三阶模态回型滑鞍沿x轴摆动, 固有频率为54.983Hz; 其中第一阶立柱的固有频率是影响X向运动部件动态特性的主要参数。

同理分析Y向运动部件前八阶模态, 其中第一阶模态主要是滑枕沿Z轴移动, 固有频率为83.951Hz; 第二阶模态主要是滑枕沿Y轴移动, 固有频率为95.416 Hz; 分析Z向运动部件前八阶模态, 第一阶模态滑枕沿z轴移动, 固有频率为80.053Hz; 第二阶模态主要是滑枕沿Y轴移动, 固有频率为82.641Hz。表明滑枕的固有频率是影响Y向运动部件、Z向运动部件动态特性的主要参数。

(三) 直线轴传动系统的动刚度分析匹配研究

动刚度设计时, 考虑整个系统承受的横向、轴向和弯矩载荷, 建立丝杠动力学模型, 并推导出其轴向及扭转刚度; 将电机的电动势等参数进行重新变换得到其总扭矩、惯量等, 建立直线轴传动系统的动刚度模型; 在匹配设计中, 采用惯量灵敏度进行检验, 对每一部分的惯量进行验证, 将静刚度的选型范围中按照扭矩选型, 对其进行刚度计算, 校验最后得到的固有频率是否满足条件, 充分检验其动刚度的匹配; 重复此过程, 直至满足动刚度即固有频率要求为止。

1. 灵敏度计算

(1) Z向电机转动惯量计算

设定选取西门子1FT7105-5AF71电机, 轴高为100, 转动惯量 J_m 为0.0178kg·m²。

(2) Z向滚珠丝杠计算

Z向丝杠的转动惯量 $J_s = \frac{\pi \rho d^4 l}{32}$ (1)

$$J_s = \frac{3.14 \times 7.8 \times 10^{-3} \times 5^4 \times 176}{32}$$

$$\approx 0.0084 \text{ Kg/m}^2$$

(3) 联轴器转动惯量 J_l

联轴器型号选用35DK38-38, 联轴器转动惯量 J_l 为0.00118Kg/m²。

(4) 移动部件转动惯量 J_g

$$J_g = M \left(\frac{t}{2\pi} \right)^2 \quad (2)$$

$$\text{即 } J_g = 3000 \times \left(\frac{0.016}{2\pi} \right)^2 \approx 0.00487 \text{ Kg/m}^2$$

(5) 总转动惯量 J_z

$$J_z = J_g + J_s + J_l \quad (3)$$

$$\frac{1}{3} J_z < J_m = \frac{1}{3} \times (0.0084 + 0.00118 + 0.00487) = 0.00482 < 0.0178 \text{ Kg/m}^2$$

符合要求。

2. 固有频率校核

根据刚度模型及灵敏度选型, 得出Z向选型参数, 计算传动系统总的刚度 R , 根据公式 $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R}{m}}$,

算出固有频率。

$$1/R = 1/R_m + 1/R_s + 1/R_l \quad (4)$$

式中, R_m ——电机轴刚度; R_s ——丝杠总刚度; R_l ——联轴器刚度。

可得到丝杠总刚度为 $R_s = 2364 \text{ N/}\mu\text{m}$, 联轴器选为35DK38-38。

$$\text{联轴器刚度 } R_l = \frac{T_c}{\varphi} \quad (5)$$

式中, T_c ——联轴器的计算扭矩; φ ——相对扭转角度;

$$\varphi = \frac{512 l^3 T_c}{3 \pi E d^4 Z D_0^2} \quad (6)$$

式中, l ——弹簧固定端至联轴器对称面的长度, 可取 $l = (0.26 \sim 0.27) D_0 \text{ mm}$; d ——弹簧直径, $d = \frac{8[\sigma_F] l^2}{3 E \varphi D_0}$,

$$\text{mm}; \quad Z \text{——弹簧杆数, } Z = \frac{64 l T_c}{\pi [\sigma_F] d^3 D_0}; \quad D_0 = (1.5 \sim 1.8) \sqrt[3]{T_c}.$$

或者, $D_0 = (2 \sim 3.5) d_1$ (d_1 为轴的直径)。

可得 $R_l = 14352 \text{ N/}\mu\text{m}$ 。

电机轴刚度较好, 抗扭转能力强, 其刚度为 $R_l = 124000 \text{ N/}\mu\text{m}$ 。

故总刚度 $1/R = 1/R_m + 1/R_s + 1/R_l$, $R = 1996.9923 \text{ N/}\mu\text{m}$, $M = 3000 \text{ Kg}$ 。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R}{m}} = 129.9175 \text{ Hz} > f_s = 36.4 \text{ Hz}, \text{ 满足刚性}$$

要求。

多次重复优化, 确定各部件型号。

(四) 镜像铣加工工艺研究

通过对C919铝锂合金蒙皮件加工工艺参数的研

究,提高产品加工后尺寸精度,减少手工修整量,提高产品质量。根据不同厚度的刚性差异,采用多因素实验方法,对加工数据的稳定性评价,确定各加工区域的工艺参数。

铝锂合金蒙皮毛坯厚度从6-12mm减到1mm,材料去除率高,选用PCD刀具可有效提高效率、降低成本;配HSK63A热缩刀柄,减少振动,提高动平衡精度。

在选择加工参数时要兼顾效率、精度,调整切宽及进给量,用控制变量法得出所需要不同加工工序对应的加工参数。

在下刀阶段,为防止刀具损伤、蒙皮损坏,选择较小的进给(600mm/min);进入稳定铣削阶段时,增大至8000mm/min以提高加工效率。在精加工时,为保证加工质量,选择较小的进给到2500mm/min。为了控制加工过程中壁板的受力变形,需要严格控制螺旋铣削深度,在粗加工和半精加工时,采用较大的切深,精加工时采用较小的切深。

采用上述工艺方案和参数设置得到图6所示C919蒙皮零件加工结果。

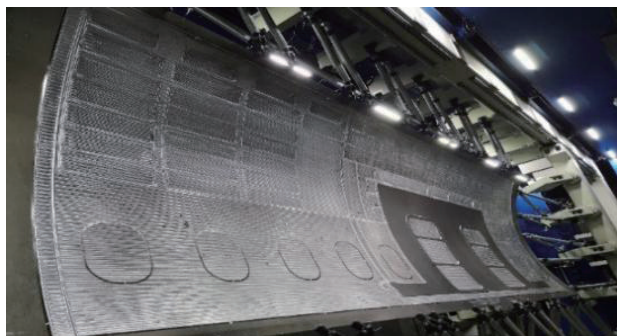


图 6. C919蒙皮加工样件

优化参数后加工,采用在机超声测厚仪对比2.8mm2个不同区域壁厚,如图7、图8所示,蒙皮实际厚度分别为2.775mm-2.862mm、2.761-2.835mm,可以达到 ± 0.1 mm的壁厚加工精度,加工合格。

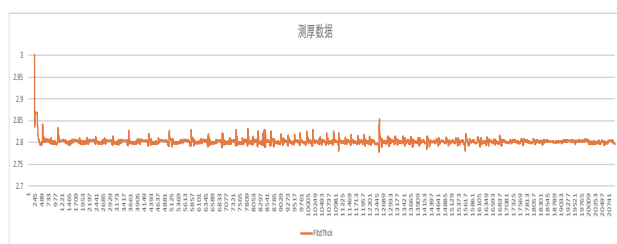


图 7. 2.8mm-1区域壁厚数据

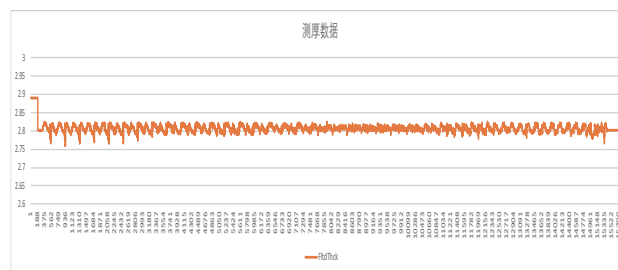


图 8. 2.8mm-2区域壁厚数据

四、结语

本文以用于薄壁飞机蒙皮减薄、开窗、铣边等加工的卧式双五轴镜像铣装备为研究对象,对其研制的难点进行了分析,并通过有限元仿真方法对镜像铣主机静力学、动力学特性以及直线传动系统进行优化设计;从C919铝锂合金蒙皮加工实验效果看,镜像铣主机拥有足够的动态特性及精度,可以将大变形蒙皮加工合格,满足 ± 0.1 mm壁厚要求。

国内镜像铣装备的发展处于快速迭代升级阶段,由于对新工艺的认可度及苛刻的应用场景暂未能实现大批量应用,但其拥有精度高、绿色、柔性化及批量成本低等优势,是飞机蒙皮减薄加工的必由之路。

参考文献:

- [1]郝新超,徐志才.铝锂合金机身蒙皮与镜像铣技术[J].中国科技信息,2019,(20):29+31.
- [2]何恩元,任松,龙新华.薄壁结构件铣削变动态特性分析[J].噪声与振动控制,2019,39(04):70-74.
- [3]张志国,徐学民.MMS:新型绿色蒙皮加工系统[J].航空制造技术,2010,(19):84-86.
- [4]章绍昆,毕庆贞,王宇晗.镜像铣削加工奇异区域刀具路径优化[J].航空学报,2021,42(10):247-255.
- [5]Kun X ,XinYu T ,QingZhen B , et al.Dynamic synchronous motion accuracy measurement and estimation for a five-axis mirror milling system[J].Science China(Technological Sciences),2023,66(03):689-705.

作者简介:

何恩元(1988.5-),男,汉族,湖北随州人,硕士研究生,工程师,现供职于上海拓璞数控科技股份有限公司,长期从事五轴数控加工机床研发工作。