

大型锻件窗框加工变形及工艺方案研究

Research on Deformation and Process Plan of Large Forging Frame

中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司数控加工厂 李青 罗育果 尹成 张林

[摘要] 窗框零件作为民用飞机上的重要承力构件,具有结构复杂、曲率大、难加工部位多、加工变形控制难等特点,而且采用锻件加工受毛坯初始残余应力影响较大。通过对典型窗框零件工艺特点以及加工关键技术进行研究,从毛坯残余应力分布、加工变形仿真预测、加工工艺过程优化等多方面进行研究,解决该类零件加工过程中变形处理的瓶颈问题,提出工程化解决方案,并形成窗框类零件加工典型工艺方案。

关键词: 窗框 飞机结构件 变形控制 有限元仿真 加工方案

[ABSTRACT] The window frame part which is important bearing member for the civil aircraft has a complex structure, large curvature, and is difficult for machining and controlling the deformation, also is influenced by initial residual stress of forging stock. Through the study on typical frame part process characteristics and key technologies of processing, research on the residual stress distribution, the machining deformation simulation and prediction, machining process optimization and other aspects is carried out to solve the bottleneck problem of deformation processing during the parts machining process, the engineering solutions are proposed and a typical process scheme of window frame parts machining is formed.

Keywords: Window frame Aircraft structural part Deformation control Finite element simulation Processing scheme

驾驶舱风挡系统处于机头部位,作为主承力构件在飞机起降及飞行中承受和传递巨大的载荷,而且需要具备良好的抗鸟撞性能,风挡结构抗鸟撞性能是确定民用客机能否通过适航验证的一个重要标准。风挡结构位于飞机的一级气动区,理论外形复杂、零件的协调准确度及精度要求高。图1为我国正在研制的C919大型客机机头窗框示意图,采用流线型外形设计,主风挡为部分单曲加部分双曲面,侧风挡为双曲面,另外为保证驾驶舱的光学质量,风挡开口尺寸较大。窗框零件作为风挡系统部件支撑骨架,是C919项目研制的重要零

部件之一。

为保证飞机安全性及风挡系统的强度和刚度,风挡系统中窗框零件尺寸大、骨架截面设计复杂、装配协调关系要求高。窗框零件设计结构特性导致零件加工工艺性差,因此给零件的制造工艺提出了更高的要求。目前针对大型客机窗框骨架零件相关加工制造技术,国外各大飞机制造厂商已有较为成熟的经验,由于国外技术封锁,几乎没有可以借鉴的资料。成飞公司一直承担着国内民用飞机机头研制工作,从ARJ21研制初期,逐步探索着天窗骨架零件加工技术,在前期ARJ21窗框零件的技术攻关当中,解决了该机型天窗骨架复杂结构的加工问题,为ARJ21飞机的顺利研制作出了贡献,但由于国内研制民用飞机机型较少,在窗框零件的加工技术方面研究不深,与国外技术差距明显。C919飞机研制中,天窗骨架零件设计为整体结构,尺寸更大,结构更为复杂,天窗骨架零件的制造难度尤为突出,因此,对窗框类飞机结构件加工工艺技术进行研究,探索出典型窗框类零件加工技术方案显得尤为重要。

1 窗框类零件加工工艺特点

现代飞机广泛应用大型整体结构件,飞机驾驶舱风挡骨架窗框零件通常也设计为整体形式,整体式结构在强度方面刚性好、比强度高,相对传统铆接式能减重15%~20%,气密性也好;在装配工艺性方面,减少了装

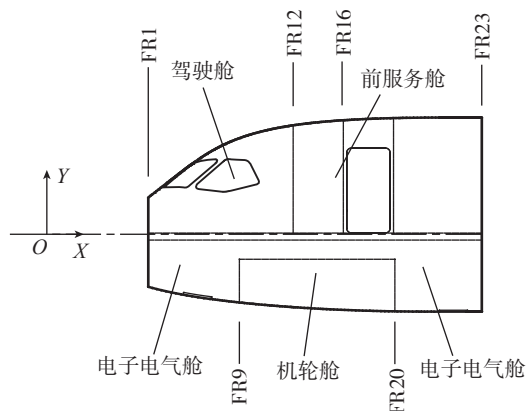


图1 C919客机驾驶舱设计模式

Fig.1 Design pattern of C919 aircraft cockpit

配零件和连接件数量,装配后变形小。但整体结构材料去除率高、形状复杂,零件自身刚性差,所涉及整体结构件变形控制的关键技术仍有待解决^[1]。

1.1 窗框类零件结构特点

窗框零件作为机头驾驶舱风挡系统的主承力结构件安装于机头部位,该处为飞机一级气动区,理论外形面复杂,各种异型切面多,零件正反面均为曲面,曲率变化大。

目前我国 C919 飞机机头设计为流线型外形以及承载式风挡,风挡玻璃开口仅 4 个,使得天窗骨架零件轮廓尺寸达到 1800mm×1600mm,零件毛坯拱高达到 305 mm,并且复杂结构多、形位公差要求高。为保证风挡系统结构刚性及强度,减少零件重量,零件截面设计大量采用“Z 型”、“U 型”、“工型”等复杂剖面,部分截面上设计加强筋结构,窗框零件的风挡玻璃安装面及窗框之间的对合面上存在有大量的定位连接精孔,装配协调要求高,外形面及对合面形位公差要求高。

1.2 窗框类零件加工工艺难点

1.2.1 加工变形控制难

窗框零件根据零件结构大小,毛坯的选择也各有不同,如 ARJ 窗框选择的是预拉伸厚板机加,而大型客机的整体结构窗框多采用锻件毛坯机加。尽管毛坯选择各有不同,但其共同特点为:从毛坯到最后零件加工完成,金属材料去除率非常高。如 C919 主风挡窗框零件材料去除率高达 99.33%,主风挡窗框零件毛坯重量为 1565.7kg,而加工完成后的零件重量仅为 10.49kg。零件材料去除率可由材料的体积比来算出:

$$\text{材料去除率} = \frac{\text{毛坯体积} - \text{零件体积}}{\text{毛坯体积}} = \frac{0.549\text{m}^3 - 0.004\text{m}^3}{0.549\text{m}^3} \times 100\% = 99.33\%。$$

天窗骨架零件材料去除率大,正反面材料去除量不对称,零件自身刚性差,机加铣切后必然存在着内应力和残余应力释放产生的变形,由于材料在不同的加工技术条件下变形各不相同,这使得变形控制更加困难。而现有的各种校正技术不适合对骨架类零件进行校正,因此选择合理的工艺方案及变形控制措施,成为窗框类零件加工工艺的一大难点^[2]。

1.2.2 装夹定位复杂

窗框类零件属于空间曲面零件,曲率大,零件上没有任何可供选择的垂直和平行关系的面,也没有能够作为定位基准的定位孔。由于零件结构特性,必须两面加工,并且粗精加工必须分开进行多次转换基准装夹加工,所以定位基准如何定义并保证多次装夹中基准的

重合性非常重要,直接影响到后续工序的装夹和顺利加工的实现。定位基准的选取受到原材料规格的限制,既要考虑到设计基准和工艺基准尽可能一致,又必须考虑到装夹、定位的方便、安全,同时要保证数控机床摆角加工的可实现性。另外装夹方式的确定需要考虑对零件加工变形的影响,工件在装夹力的作用下易发生变形,在内部形成装夹应力场并产生相应的位移,必须确保在有限的变形范围内,装夹定位系统仍能保证零件加工质量,因此窗框零件的装夹定位在加工工艺中成为较为复杂的一个环节^[3]。

2 窗框类零件加工变形仿真模拟

大型整体窗框骨架零件多采用锻件毛坯,锻件具有良好的综合力学性能和机械性能,纤维组织合理、材料利用率高,但锻件材料经过固溶-淬火处理后毛坯内部存在相当大的内应力。经过后续机加,内应力释放,引起零件加工尺寸不稳定。

测定零件的毛坯件残余应力分布情况,用于零件的加工变形预测,为实际生产中的工艺方案制定和优化提供科学指导。毛坯残余应力测试可采用剥层法,在毛坯不同部位设置剥层测试试块,通过剥层法测量残余应力分布情况,利用线性插值,拟合出毛坯其余部分残余应力分布,通过参数化形成毛坯残余应力供仿真软件调用。

2.1 变形仿真模型建立

ANSYS 是一款大型通用有限元仿真软件,可进行结构分析、热分析、流体分析、电磁场分析和耦合场分析,它支持线性、非线性、动态等不同的分析类型。残余应力变形仿真是一个状态高度非线性的过程,本文使用 ANSYS 作为加工变形仿真的软件,分析过程如图 2 所示^[4]。

粗加工完后的锻件毛坯存在多处开孔、辅助工艺凸台以及大量圆角,这些特征给后续的网络划分工作带来许多问题,然而这些细小特征对整个零件的加工变形影响较小,所以在导入 ANSYS 软件分析之前,对几何模型进行简化尤为必要。模型简化的一般原则是:

- (1) 删除特征尺寸小于指定阈值的细节特征,如模型上的小孔、倒角和过渡圆角;
- (2) 删除由于制造和装配考虑增加的辅助特征,如加工工艺孔、密封槽、装夹压紧孔等;
- (3) 删除对全局模拟影响较小的其他无规则的几何特征,如缘条上的槽口等,因此简化后的粗加工完窗框如图 3 所示。

模型简化后,具体仿真实施步骤如下:

- (1) 分别导入原始毛坯和粗加工完成后的 CAD 几

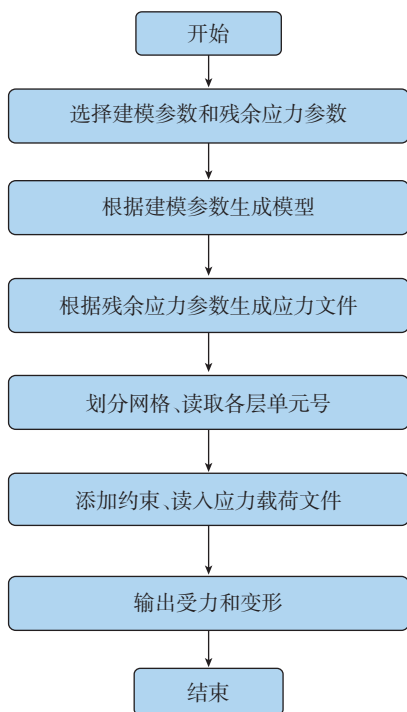


图2 有限元加工变形分析过程
Fig.2 Finite element analysis of deformation

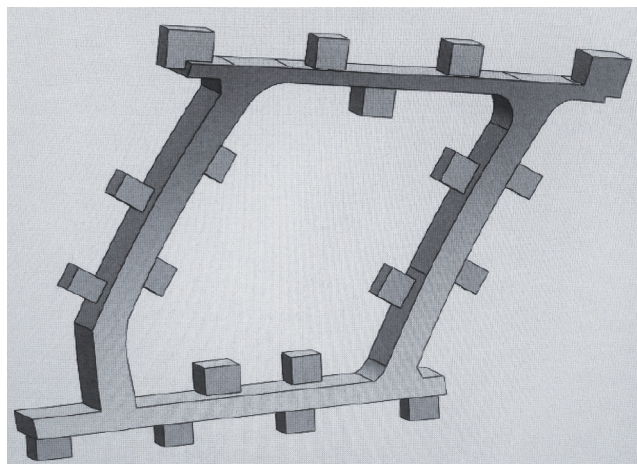


图3 模型简化
Fig. 3 Model simplification

何模型;

(2) 根据残余应力区域切分几何体;

(3) 设置单元类型和材料属性,使用 SOLID9210 节点四面体单元格,材料为铝合金,弹性模量 720GPa,泊松比 0.33;

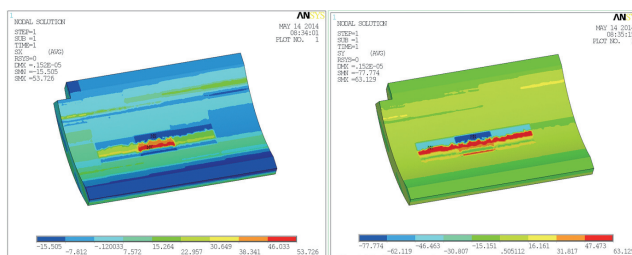
(4) 单元格尺寸设置为 15mm,使用智能网格划分,划分完成后的模型如图 4 所示;

(5) 调用 ANSYS APDL 参数化语言编制残余应力文本文件,并导入有限元模型中,最终残余应力变形仿真模型如图 5 所示。

2.2 变形仿真结果



图4 网格划分
Fig.4 Mesh generation



(a) X方向残余应力 (b) Y方向残余应力

图5 毛坯施加初始残余应力效果图
Fig.5 Effect drawings initial residual stress on stock

材料去除采用 ANSYS 的死亡单元功能。为了使工件自由翘曲,在内轮廓选择 4 个点并约束 3 个方向位移,不考虑材料去除顺序,一次性去除全部余量,使毛坯内部初始残余应力释放,零件粗加工完成后的最终变形如图 6 所示。

根据仿真结果,粗铣轮廓后的零件最大变形为 0.87 mm,出现在底部横梁附近,工艺凸台的最大变形量为 0.75mm,同样发生在底部横梁的工艺凸台上。因此,需要对底部横梁的变形进行监测,并对工艺方案进行优

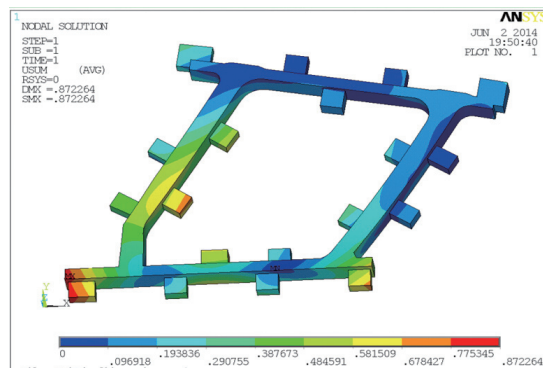


图6 粗加工完成后变形图
Fig.6 Deformation diagram after roughing

化,使得变形量控制在合理范围内。

3 典型窗框零件整体加工工艺方案工程应用

图7为国产大型客机C919主风挡窗框零件,采用了整体结构设计方案,最大轮廓尺寸为(1924×1110×230)mm,零件形位公差要求高,外形轮廓度要求最高为±0.15mm,两处长达1360mm对接面平面度要求0.1mm;四周截面采用“U型”槽结构设计方案,内形设计有加强筋,零件侧面有4个φ4.5H9定位孔,4组4-φ7.938连接精孔,毛坯为美铝7085-T7452(自由锻),尺寸为(2161×1534×δ163.5)mm,弓高为305mm的等厚曲面毛坯。

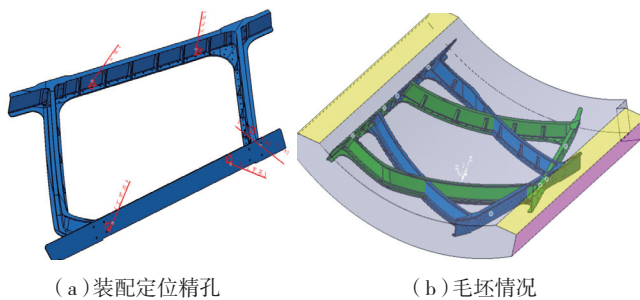


图7 C919主风挡窗框零件及锻件毛坯

Fig.7 Main windshield window frame parts of C919 and forging stock

3.1 余量递减多次粗加工

已有研究表明毛坯初始内应力释放和重分布是引起航空整体结构件加工变形的重要原因之一。对于窗框类零件,加工过程中,随着材料的不断去除,内应力发生释放与重分布,原来的应力自平衡状态遭到破坏,零件只有通过变形才能达到新的平衡状态。窗框零件由于曲面结构特征、材料去除率高、锻件毛坯的初始应力分布各异等因素导致加工过程中变形更为明显,因此可以通过安排多次粗加工,并且每次加工完成后通过对零件变形进行分析的方式确定毛坯内应力释放程度是否允许零件进入精加工,如图8所示,其中, R_n 为第 n 粗加工参数, T_n 为第 n 粗加工零件余量,随粗加工次数余量递减, Δ_n 为第 n 粗加工后零件变形量, $T_n \geq 1.5\Delta_n$, k 为允许零件进入精加工变形量判定值。

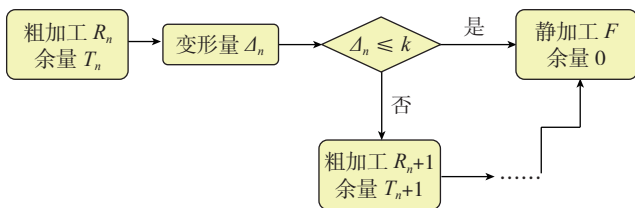


图8 窗框粗加工变形控制原理

Fig.8 Deformation control principle of window frame roughing

$$V_{\text{正面去除}} \approx V_{\text{反面去除}}$$

另外粗加工窗框类零件时,需根据零件结构特征,合理分配窗框零件正反两面的余量,尽可能保证正反两面材料去除体积相当,减小零件变形量。图9为C919主风挡粗加工余量分配方法,零件特征为凸面为外形面,材料去除较少、凹面特征多、材料去除量大。为使正反面应力释放相当,两面材料去除体积、凸面余量分配较凹面多。

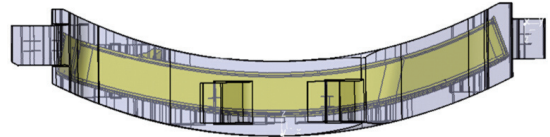


图9 C919窗框粗加工余量分配

Fig.9 Allowance distribution of C919 window frame roughing

3.2 精加工切削方法控制

当零件进入精加工阶段,大的变形在粗加工时已经释放掉,但由于仍有材料的去除加工,精加工工件的变形表现为切削过程中切削力以及切削热二者应力耦合的结果,加工过程最大的影响因素是加工参数,包含加工转速(S)、每齿进给量(f_z)、切深(a_p)、切宽(a_e)等^[5]。研究表明,加工参数对加工应力的影响显著性依次为: $S > f_z > a_p > a_e$,具体表现为加工转速越高,加工应力越小;每齿进给量越大,加工应力越大;切深越大,加工应力越大;切宽越大,加工应力越大。因此,在窗框零件的精加工阶段,应尽量采用高速机床加工,同时控制每齿进给量,采取合适的切深和切宽参数组合,减少切削过程切削力及切削热的产生,控制精加工后零件的变形。

3.3 窗框机加典型工艺流程

按粗精加工分开,采用多次粗加工并设置时效工序,翻面加工时重修基准,合理分配加工余量,控制零件加工顺序等控制变形原则,制定该零件的加工工艺流程(图10),并在工艺流程的关键部位安排变形分析环节,测量并提取实时的变形数据信息,为工艺的优化提供基础数据支持。

4 窗框零件加工情况

C919窗框目前已加工完成4架份,图11为零件加工情况:零件表面质量方面,表面质量好,钳工打磨量小;零件变形方面,零件加工完后,翘曲变形量小,目前自由状态下,外形贴膜间隙主风挡0.8mm,侧风挡0.4mm,合理加压检查均能达到0.25mm以内,外形符合设计要求。经过对窗框类结构件工艺技术研究,攻克了C919窗框的加工难题,并已总结出大型复杂窗框零件加工工艺方案,为今后其他机型大型复杂窗框零件的加

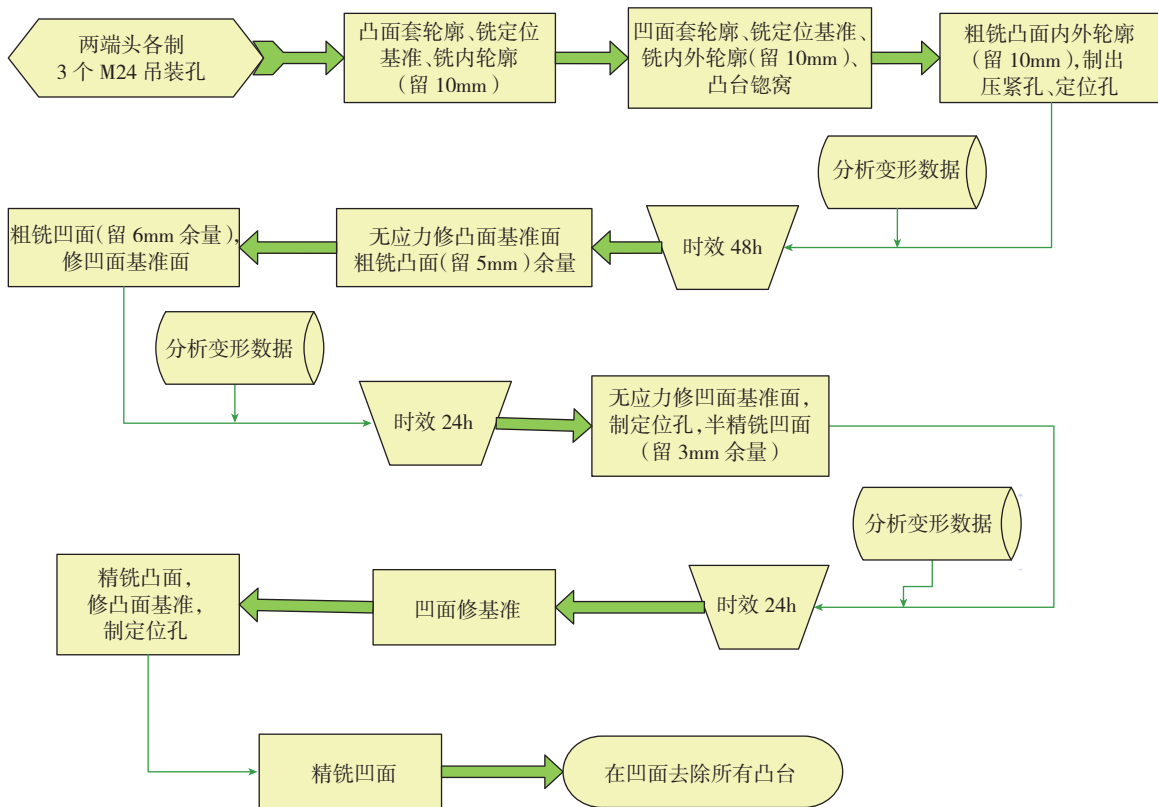


图10 C919窗框机加工艺流程

Fig.10 Machining process flow for window frame of C919

工工艺方案制定给出了相应的工艺技术支持和经验积累,具有很大的推广应用价值。

5 结束语

窗框零件零件结构复杂,整体结构设计给加工带来了很大挑战。通过仿真及工艺方法的改进,基本能够达到设计要求,但工艺准备工作量大,加工周期过长,质量稳定性不高,加工中不可控因素犹存。所以窗框零件设计应尽量简单,零件设计应更多考虑该零件的加工工艺性,尽量避免深腔、尖角、大闭角、深孔等难加工的部位,降低零件的加工难度,以降低整个飞机的研制成本。近些年,随着3D打印技术迅猛发展,国内已能使用3D打印技术打印出C919钛合金窗框,但目前3D打印产品外形粗糙不精细,内部抗疲劳强度存在很大问题,目前尚难以取代成熟工业生产,因此窗框类飞机结构件加工工艺仍需开展进一步的研究。

参考文献

[1] 孙杰,李剑峰,王中秋,等. 航空整体结构件加工变形控制与校正关键技术. 航空制造技术, 2009(23):62-66.

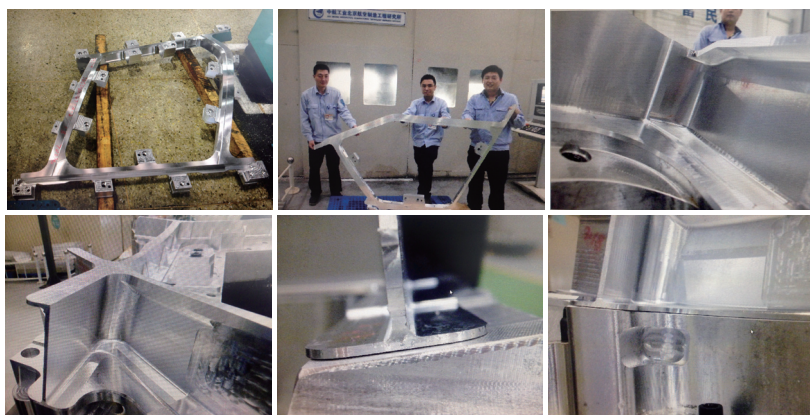


图11 零件加工完情况

Fig.11 Actual parts after machining

[2] 何宁,杨吟飞,李亮,等. 航空结构件加工变形及其控制. 航空制造技术, 2009(6):32-35.

[3] 张焜州,戎斌,陈洁,等. 航空铝合金整体结构件数控加工变形控制现状分析. 航空制造技术, 2012(12):58-61.

[4] 张洪伟,张以都,赵晓慈,等. 航空结构件加工变形仿真关键技术. 北京航空航天大学学报, 2008,34(2):239-243.

[5] 夏斌,苏卫华,黄官平. 高速切削参数优化加工技术的应用. 航空制造技术, 2011(23/24):68-71.

(责编 亿霖)