

某型飞机舱门加工工艺研究

石增祥^{1,2}, 王哲^{1,2*}, 刘健³, 高航³

¹西安航空职业技术学院航空制造工程学院, 陕西 西安

²航空航天紧固件技术与应用陕西省高等学校重点实验室, 陕西 西安

³西安亚太菁英智能装备有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2025年9月28日; 录用日期: 2025年10月21日; 发布日期: 2025年10月28日

摘要

飞机舱门属于典型的飞机薄壁零件, 其加工质量直接影响飞机的装配精度和使用性能, 本文对某型飞机舱门类的薄壁腔体难加工零件进行了加工工艺分析和流程定制设计, 对切削刀具的切削原理进行分析并选型, 利用VERICUT软件优化切削参数, 对刀具轨迹和程序进行了优化。研究发现用优化应力释放槽的工件, 尺寸精度能够满足设计要求。优化后的程序有效地提高了加工效率, 为提升航空结构件的加工精度提供了实践参考。

关键词

飞机舱门, 7075铝, 应力释放, 工艺分析, 整体硬质合金圆弧铣刀

Research on Processing Technology of a Certain Type of Aircraft Cabin Door

Zengxiang Shi^{1,2}, Zhe Wang^{1,2*}, Jian Liu³, Hang Gao³

¹School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Provincial Key Laboratory of Aerospace Fastener Technology and Application, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an Shaanxi

³Xi'an Asia-Pacific Elite Intelligent Equipment Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: September 28, 2025; accepted: October 21, 2025; published: October 28, 2025

Abstract

The aircraft door is a typical thin-walled part of an airplane, and its machining quality directly affects the assembly accuracy and performance of the aircraft. This paper conducts an analysis of the

*通讯作者。

machining process and customized design of the workflow for a difficult-to-machine thin-walled cavity part of a certain type of aircraft door. It also analyzes the cutting principles of cutting tools and selects appropriate types, optimizes cutting parameters using VERICUT software, and refines the tool paths and programs. The study finds that workpieces with optimized stress-relief grooves meet the dimensional accuracy requirements. The optimized program effectively improves machining efficiency, providing practical reference for enhancing the machining precision of aerospace structural components.

Keywords

Aircraft Door, 7075 Aluminum, Stress Release, Process Analysis, Solid Carbide Arc Milling Cutter

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

7075 铝合金是一种高强度铝合金, 因其高强度与轻量比, 适用于需要高强度和低重量的结构应用, 包括航空航天部件、高性能汽车部件等[1]。在加工 7075 铝合金薄壁零件时, 热力耦合作用可能导致残余应力、疲劳失效和形状变形。铣削过程中的切削力可能对其形状和质量产生不利影响。需要考虑该材料由于其刚性低而易于变形的特性。正确的工具选择和工艺控制对于获得所需的表面粗糙度和尺寸精度至关重要。针对 7075 铝薄壁零件的切削加工, 学者们开展了广泛的研究。研究的主要方向包括: 工艺优化、工具研究等。由于航空铝合金 7075 薄壁件在加工过程中易受残余应力和切削力的影响, 国内学者通过改进工艺路线来降低变形。例如, 采用“粗加工→去应力热处理→半精加工→时效处理→精加工”的多阶段加工策略, 有效减少加工变形。部分研究还结合有限元仿真(如 ABAQUS、Deform)预测切削过程中的应力分布, 优化切削参数以减少变形。

在切削机理方面, 哈尔滨工业大学通过实验和仿真研究了 7075 铝合金的切削力、切削温度分布, 发现高速切削时易产生积屑瘤, 导致刀具黏着磨损。研究多聚焦于硬质合金刀具(如 YG 类)和涂层刀具(TiAlN、DLC 涂层), 但对超硬刀具(如 PCD、CBN)的系统性研究较少。切削过程中材料动态变形、绝热剪切带的形成机制尚未完全明确, 多尺度仿真与实验验证结合不够。缺乏针对 7075 铝合金高硅含量(约 0.4%)的专用刀具涂层设计, 涂层与基体结合强度问题未彻底解决。对于实时监测(如声发射、力信号)的自适应切削系统研究较少, 工艺参数动态调整能力不足。

在工艺优化方面, 研究者们对 7075 铝薄壁零件的切削参数, 如切削速率、进给速率、切削深度等进行了系统的研究, 以最大限度地提高加工效率和生产质量。学者们通过对切削速率、进给速率、切削深度等参数的实验研究, 试图找到最佳的加工参数。陈晓雨等[2]采用有限元分析软件 ADVANTEDGE FEM 软件建立了薄壁零件切削三维模型, 研究结果表明, 刀具的直径大小直接影响着零件的变形, 刀具直径越大和零件的变形越大, 切削力越大, 零件的变形量就越大, 并且零件的变形会随着切削深度的增加而增加。薄壁零件的中间位置是最容易发生变形的地方, 因此建议切削薄壁零件时, 应采用小的切削参数来降低切削力, 从而达到减小零件变形的目的[3]。赵凯等[4]利用有限元软件 DEFORM 建立了 7075-T7451 薄壁零件的切削模型, 仿真分析了该零件的变形结果, 最后采用试验验证的方式, 验证了仿真结构的可靠性, 仿真和试验的误差的主要来源为装夹误差。吴竹溪等[5]采用 ABAQUS 软件建立了 7075-T7451 有限元分析模型, 并且采用优化的人工神经网络方法, 建立了不同刀具后角和螺旋角对工件变形的预测模型,

预测误差小于百分之六,最后采用遗传优化算法得出当刀具后角为 6° 和螺旋角为 30° 时,薄壁零件的铣削表现最小。秦国华等[6]提出了基于残余应力释放的航空结构件加工变形模型与结构优化方法,针对存在毛坯内部的残余应力的等效转为施加在毛坯外侧的力,采用材料弯曲理论建立起毛坯变形的铝厚板内初始残余应力释放模型,并且采用有限元的方法验证数学模型的正确性,该方法能够预测零件整体结构的变形。岳彩旭等[7]指出在薄壁零件切削精加工阶段,往复走刀路径比单向走刀路径更能减小零件的应力变形。

飞机舱门是典型的 7075 铝薄壁航空结构件。对 7075 铝薄壁航空结构件进行铣削加工研究有助于提高加工效率和生产质量,增强航空结构的安全性,并提升航空制造业的竞争力。因此,研究 7075 铝薄壁航空结构件的铣削加工具有重要意义。

2. 工艺安排

2.1. 零件结构分析

飞机舱门属于典型的飞机零件之一,该零件材料为航空铝 7075,毛坯尺寸为 $1110\text{ mm} \times 650\text{ mm} \times 60\text{ mm}$,些结构件通常比较大,切削去除量也比较大,腹板薄壁,多为直边,因此在加工过程中要求切削工具具有较高的稳定性和切削效率。其结果如图 1 所示。

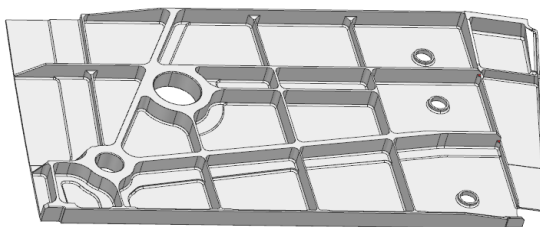


Figure 1. Aircraft door
图 1. 飞机舱门

综合各项特点,加工设备选用亚太菁英五轴高速龙门加工中心,如图 2 所示,型号为 MT1530,该机床搭载 AGA 高功率主轴,转速最高 24000 r/min ,功率可达 60 Kw ,在切削铝合金时具有高效率的特点。



Figure 2. Asia Pacific elite five axis high speed gantry machining center MT1530
图 2. 亚太菁英五轴高速龙门加工中心 MT1530

2.2. 残余应力释放工艺槽设计

毛坯残余应力是影响大型航空结构件加工精度的关键因素之一[8]。在材料成型、热处理及机械加工过程中，由于温度梯度、相变及塑性变形等因素，毛坯内部会形成不均匀的残余应力分布。这些应力在后续加工过程中逐步释放，导致工件产生翘曲、扭曲等变形问题，严重影响零件的尺寸精度和装配性能。因此，如何在加工前有效释放或均衡毛坯残余应力，成为提高航空结构件加工质量的关键技术难点。针对飞机舱门等大型铝合金结构件的加工需求，本研究提出了一种优化的应力释放槽设计方案。具体措施包括：在毛坯上加工 9 处半开式应力释放槽(如图 3 所示)，槽的深度设置为毛坯厚度的 1/2，以确保在粗加工阶段为材料内部应力提供充分的释放空间。应力释放槽采用两侧错开分布的形式，避免应力集中；同时在一侧角落断开工艺台，进一步增强应力释放效果。这种设计能够有效切断毛坯内部的应力传递路径，促使残余应力在粗加工阶段均匀释放，从而显著减少后续精加工时的累积变形。

实际加工验证表明，该应力释放槽设计具有以下优势：首先，半开式结构在保证应力释放效果的同时，避免了因完全开槽导致的毛坯刚性下降问题；其次，错开分布的槽位布局可均衡应力释放过程，防止局部变形过大；最后，工艺台的断开设计进一步提升了应力释放效率。采用三坐标测量仪器对加工后产品(如图 4 所示)进行检测，零件产生的最大的变形误差为 0.3mm，在设计范围 0.8mm 内。这一研究成果为大型航空结构件的低应力加工提供了可靠的技术方案。

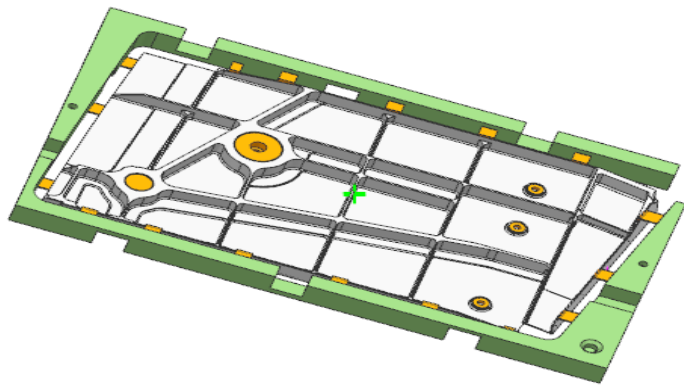


Figure 3. Stress relief tank design
图 3. 应力释放槽设计

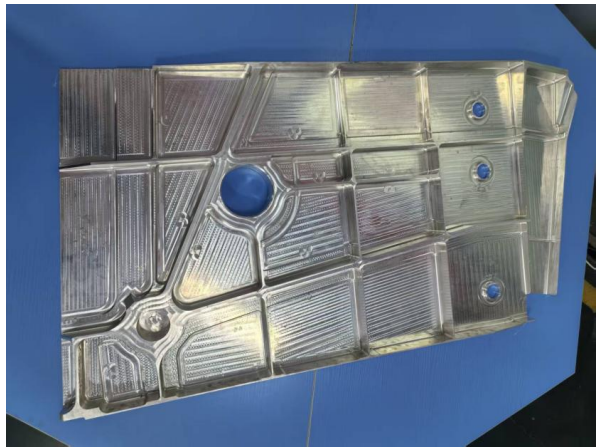
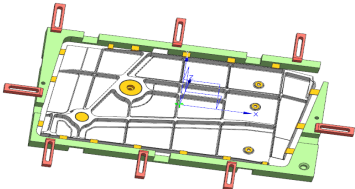


Figure 4. Machining result
图 4. 加工结果

2.3. 加工工艺流程设计

零件分为正反两面加工，为降低翻面次数，提高加工效率。加工工艺流程流程为第一面粗加工，第二面粗和精加工，第一面精加工。零件加工程序单如表 1 所示。

Table 1. Processing program list
表 1. 加工程序单

零件名称	舱门	生产阶段	S				
设备名称	APEC-MT1530	生产批次	1				
材料牌号	7075	工装号	YT-037				
加工数量	2	原点号	1				
工步	加工内容	刀具类型	刀具规格	转速	进给	切深	运行时间
1	正面开粗	可转位刀片刀具	D50R3.1	20,000	11,000	5	40 Min 59 S
2	正面二粗	整体硬质合金	D20R3	18,000	6000	3	30 Min 27 S
3	铣基准孔	整体硬质合金	D16R0.5	16,000	3000	0.5	1 Min 21 S
4	反面开粗	整体硬质合金	D16	18,000	6000	3	20 Min 27 S
5	侧壁精	整体硬质合金	D16	18,000	5000	8	5 Min 26 S
6	侧壁圆角精	整体硬质合金圆弧铣刀	D6	15,000	5000	0.5	1 Min 31 S
7	侧壁弧面精	整体硬质合金	D12R3	18,000	4500	0.2	18 Min 48 S
8	侧壁直边精	整体硬质合金	D12	18,000	5000	2	32 S
9	修基准孔	整体硬质合金	D16R0.5	16,000	3000	0.5	1 Min 22 S
10	正面筋位精	整体硬质合金	D16	16,000	5000	1	6 Min 24 S
11	壁角开粗及精	整体硬质合金	D12R3	18,000	5000	0.3	30 Min 55 S
12	清圆角	整体硬质合金	D10	17,000	5000	2	11 Min 53 S
13	腹板半精	整体硬质合金	D16	18,000	5000	1	26 Min 39 S
14	腹板精	整体硬质合金	D10R1	15,000	5000	0.2	16 Min 49 S
15	侧壁半精	整体硬质合金	D16	18,000	6000	16	3 Min 16 S
16	侧壁精	整体硬质合金	D16	18,000	5000	16	3 Min 36 S
17	壁角圆角半精及精	整体硬质合金	D6R3	18,000	4500	0.2	11 Min 20 S
18	直边跟部圆角精	整体硬质合金	D16R3	18,000	6000	0.5	8 Min 23 S
19	侧壁精	整体硬质合金	D6	16,000	3500	0.5	1 Min 4 S
20	孔开粗及精	整体硬质合金	D20	18,000	5000	3	5 Min 07 S
21	工艺筋切断	整体硬质合金	D20	18,000	5000	0.5	5 Min 28 S

2.4. 加工程序编制

以 NX2007 软体为平台，根据工艺流程编制每一步的加工程序，其中选取的策略、编程模板，刀轨参数如表 2 所示。

Table 2. Knife track strategy
表 2. 刀轨策略

工步	编程模板	策略	刀轴矢量	余量
1	mill_contour	型腔铣	0, 0, 1	3
2	mill_contour	型腔铣	0, 0, 1	3
3	hole_making	孔铣	0, 0, 1	0
4	mill_contour	型腔铣	0, 0, 1	3
5	mill_planar	平面轮廓铣	0, 0, 1	0
6	mill_contourr	深度轮廓铣	0, 0, 1	0
7	mill_contourr	深度轮廓铣	-0.25, 0.036, -0.966	0
8	mill_planar	平面轮廓铣	0, 0, 1	0
9	hole_making	孔铣	0, 0, 1	0
10	mill_contour	固定轮廓铣	0, 0, 1	0
11	mill_contourr	深度轮廓铣	0.219, 0, -0.97	0
12	mill_contourr	深度轮廓铣	0, 0, 1	0.1
13	mill_planar	底壁铣	0, 0, 1	0.1
14	mill_planar	底壁铣	0, 0, 1	0
15	mill_planar	平面轮廓铣	0, 0, 1	0.1
16	mill_planar	平面轮廓铣	0, 0, 1	0
17	mill_contour	引导曲线		0
18	mill_planar	平面轮廓铣	0, 0, 1	0
19	mill_planar	平面轮廓铣	0, 0, 1	0
20	mill_contour	型腔铣	0, 0, 1	0
21	mill_planar	平面轮廓铣	0, 0, 1	0.2

3. 侧壁精加工刀具整体硬质合金圆弧铣刀的选用

传统的球头铣刀由于刀具悬伸长，刀体刚性不佳，排屑不畅，切削振动较大，容易导致薄壁零件出现“过切”或“欠切”现象，并且刃口磨损较快，易发生崩刃和破损，甚至会导致刀具折断。整体硬质合金圆弧铣刀的刀部为圆弧形状，适用于对工件进行曲面铣削，具有高强度、高硬度、高耐磨性等特点，能够有效提高加工效率和加工质量。刀刃部位的半径大于刀尖半径可以有效的提高刀具刚性和减少振动，允许更大的切削深度可以有效的提高加工效率，并且能够有效的降低表面粗糙度，图 5 所示。

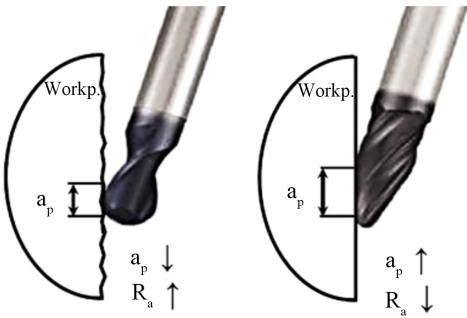


Figure 5. Cutting comparison between ball cutter and solid carbide arc milling cutter
图 5. 球刀和整体硬质合金圆弧铣刀切削对比

4. 刀具轨迹的优化

4.1. 开粗功法优化

针对零件加工过程通过刀轨优化,在保证零件的加工质量的同时能够提高加工效率改善和提高。深度优先(Depth First)路径规划方式是指,在加工型腔时,刀具首先沿着一个型腔的切削深度方向深入工件,直到达到所需深度,在跳转到另外一个型腔进行加工,直到加工任务的完成。

在进行型腔铣开粗加工加工时,路径规划应遵循最短路径原则,并尽量减少切削次数和刀具停留时间,以提高加工效率和保护刀具。开粗采用 D50R3 刀具进行大切深开粗,采用功率计算来进行开粗,深度优先的策略提高开粗效率,减少抬刀。传统的工艺采用层切小切深,跳刀多增加加工时间。如图 6 大切深跳刀少,图 7 小切深跳刀多。优化过后加工时间为 1 H 03 Min 37 S 缩短为 40 Min 39 S,效果显著提升。

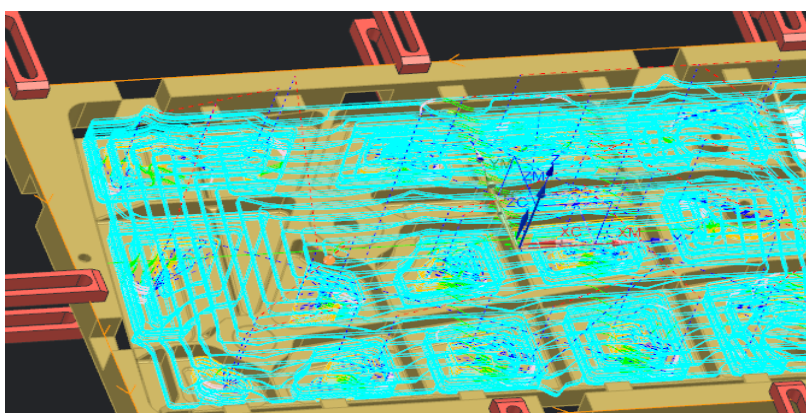


Figure 6. Large cut depth

图 6. 大切深

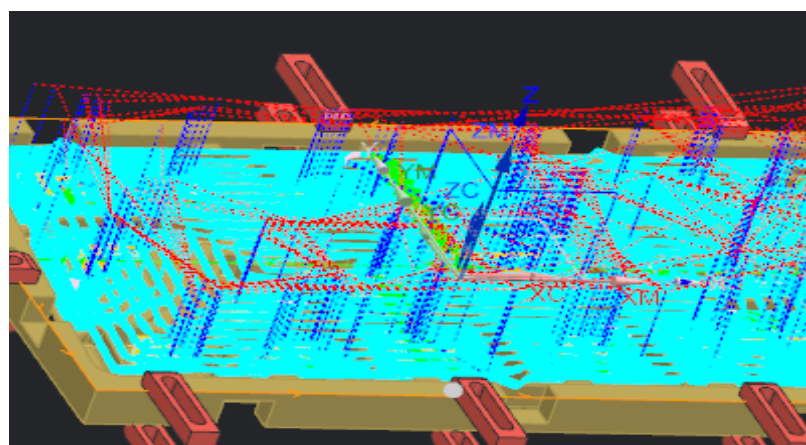


Figure 7. Subcut

图 7. 小切深

4.2. 侧壁精加工优化

由于侧壁为直壁,没有圆弧面,故采用大切深进行半精,改变传统少量层切,如图 8 少量层切。在满足加工精度条件下,将少量层切改为大切深,在配合刀具的加持长度短,刚性强,转速高等特点进行

优化,如图9所示。优化过后时间由 55 Min 52 S 缩短为 18 Min 30 S,效果显著提升。轮廓切削用于创建一条或者指定数量的刀轨来完成零件侧壁或轮廓的切削。可以用于敞开区域和封闭区域的加工。轮廓切削加工方式通常用于零件的侧壁或者外形轮廓的精加工或者半精加工。

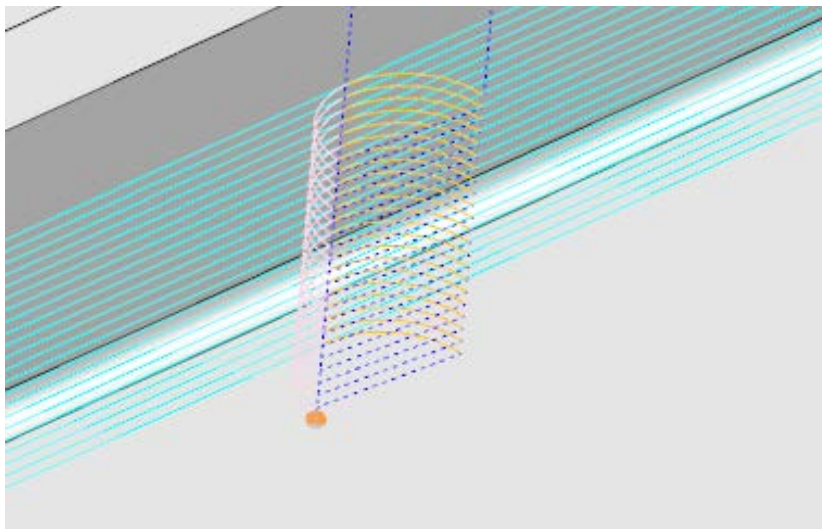


Figure 8. Small layer cut

图 8. 少量层切式

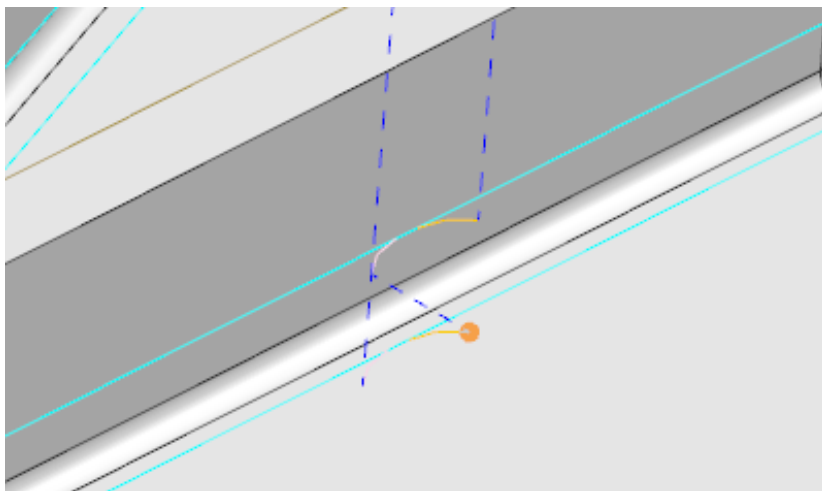


Figure 9. Large cut depth

图 9. 大切深

5. 程序的优化

VERICUT Force 能够在指定的切削材料、切削刀具和加工条件优化出高效的 NC 程序。本次优化方法采用屑厚和力组合方法,通过最可能的保证切屑厚度和限制最大切削力的方式,来不断的调整程序中的进给率[9] [10]。如图 10 优化节省时间器所示,原始的加工时间是 39 Min 22 S,优化的切削时间为 31 Min 27 S,时间节省了 20.1%。时间节省的原因是,在最大切削厚度为零或者切削厚度没有达到预设定的最大值时,可以通过提高进给率,程序优化结果如图 11 所示,从而达到节省加工时间的目的。

√ 优化节省计算器

工件节省

原始时间 (hh:mm:ss)0:39:22

优化时间 (hh:mm:ss)0:31:27

节省时间百分比 (%)20.1

工件数1

机器每小时估价(\$/hour)100

工件节省的时间(hh:mm:ss)

工件节省的金额(\$)

计算工件的节省

车间节省

车间每小时估价 (\$/hour)100

机器数5

每班加工时间(hours)8

轮班数2

每年的工作天数220

节省的时间(h)

计算车间年节省

重置VERICUT切削模型和用已优化文件替换当前的数控程序文件吗?

z 在优化结束时显示对话框

关闭

Figure 10. Optimize the time saver
图 10. 优化节省时间器

Q395=+3 ;Tuning Mode ~	Q395=+3 ;Tuning Mode ~
Q396=+0 ;Tolerance ~	Q396=+0 ;Tolerance ~
Q397=+0 ;TA	Q397=+0 ;TA
42 L X+142.6596 Y+20.0049 Z+128.25 F20000.	42 L X+142.6596 Y+20.0049 Z+128.25 F20000.
43 L Z+31.25	43 L Z+31.25
44 L X-7.4135 Z+23.385 F11000.	44 L X+90.91 Z+28.538 F20000
	44 L X+80.56 Z+27.996 F11000
	44 L X+75.385 Z+27.724 F20000
	44 L X+70.211 Z+27.453 F17400
	44 L X+65.036 Z+27.182 F15400
	44 L X+59.861 Z+26.911 F14250
	44 L X+54.686 Z+26.639 F13400
	44 L X+49.511 Z+26.368 F12800
	44 L X+44.336 Z+26.097 F12425
	44 L X+39.161 Z+25.826 F12175
	44 L X+33.986 Z+25.555 F12025
	44 L X-7.413 Z+23.385 F12000
45 L X-236.9893	45 L X-236.9893
46 CC X-236.9595 Y+15.005	46 CC X-236.9595 Y+15.005
47 C X-241.9317 Y+15.5313 DR+	47 C X-241.932 Y+15.531 DR+
48 CC X+11537.6098 Y-1160.4607	48 CC X+11537.6098 Y-1160.4607
49 C X-244.973 Y-15.341 DR+	49 C X-244.973 Y-15.341 DR+
50 CC X-239.9936 Y-15.7951	50 CC X-239.9936 Y-15.7951
51 C X-240.0233 Y-20.795 DR+	

Figure 11. Program optimization result
图 11. 程序优化结果

6. 结论

针对大型飞机结构件飞机舱门的加工工艺，本研究从毛坯预处理、切削策略、刀具选择及程序优化等方面进行了系统分析，并提出了相应的优化方案。通过实际加工验证，优化后的工艺显著提高了加工精度和效率。未来可进一步研究自适应加工技术，结合在线监测系统，实现加工参数的实时调整，以应对更复杂的航空结构件制造需求，本研究为大型航空结构件的高效精密加工提供了可行的工艺方案，对类似零件的制造具有参考价值。

基金项目

2024 年西安航空职业技术学院教改课题, 校企合作典型生产实践项目建设与实践研究——以高端制造特训班为例(24XHJG17)。

参考文献

- [1] 胡子晖, 金成哲, 杨梓荆. 微细铣削 7075 铝合金的切削力研究[J]. 工具技术, 2022, 56(12): 97-101.
- [2] 陈晓雨, 王仲民, 张本松. 7075 铝合金薄壁件高速切削变形仿真分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2021, 39(1): 77-81.
- [3] 梅中义, 王运巧, 范玉青. 飞机结构件数控加工变形控制研究与仿真[J]. 航空学报, 2005(2): 234-239.
- [4] 赵凯, 刘战强, 吴远晨. 航空铝合金薄壁件铣削变形预测研究[J]. 工具技术, 2014, 48(5): 20-23.
- [5] 吴竹溪, 秦国华. 基于进化神经网络的薄壁件加工变形预测与抑制方法[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2020(3): 80-87.
- [6] 秦国华, 林锋, 叶海潮, 侯源君, 陈雪梅, 韩雄, 王华敏. 基于残余应力释放的航空结构件加工变形模型与结构优化方法[J]. 工程力学, 2018, 35(9): 214-231.
- [7] 岳彩旭, 张俊涛, 刘献礼, 陈志涛, 等. 薄壁件铣削过程加工变形研究进展[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 99-104.
- [8] 林锋, 姚婉, 秦国华, 等. 飞机整体结构件加工变形的初始残余应力-初始几何误差耦合影响与控制[J]. 兵工学报, 2021, 42(12): 2731-2742.
- [9] 佛新岗. 基于 UG 和 VERICUT 的维纳斯四轴数控加工研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(12): 64-67+157.
- [10] 宋育红. 基于 UG 软件的复杂型腔数控编程与铣削加工仿真研究[J]. 粘接, 2020, 41(4): 176-179.