

T/CMEEEA

团 体 标 准

T/CMEEEA XXXX—2026

飞机机体结构件数控加工工艺策略规范

Specification for CNC machining process strategy of aircraft structural components

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

2026 - XX - XX 发布

2026 - XX - XX 实施

中国机电设备工程协会 发布

目 次

1	范围	1
2	规范性引用文件	1
3	术语和定义	1
4	通用原则	1
4.1	基准先行原则	1
4.2	先粗后精原则	2
4.3	变形控制原则	2
4.4	刚性优先原则	2
5	核心特征加工策略与刀具选用	2
5.1	腹板加工策略	2
5.2	筋板 / 缘板加工策略	4
5.3	薄壁结构刀具直径选用准则（刚性 - 力平衡原则）	5
6	单面与双面结构加工策略的核心差异	5
6.1	单面结构零件	5
6.2	双面结构零件	5
7	其他特征结构加工要点	6
7.1	倒角加工（圆角 / 斜角）	6
7.2	转角加工（内角 / 外角， $R \leq 5\text{mm}$ ）	7
7.3	加强凸台加工（承载型凸台，直径 $\geq \phi 20\text{mm}$ ，高度 $\geq 10\text{mm}$ ）	7
8	质量检验与验收	7
8.1	检验分类与频次	7
8.2	关键检验项目与方法	8
8.3	不合格品处置	8
9	异常处理与工艺优化	8
9.1	常见异常及应对措施	8
9.2	工艺优化流程	9

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由西安市康铖机械制造有限公司提出。

本文件由中国机电设备工程协会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

引 言

本规范的核心目标是：在确保产品尺寸精度、形位公差和表面质量的前提下，实现加工效率最大化、加工变形最小化和刀具成本最优化。

本规范建立了基于“特征—工况—结构类型”的三维工艺决策模型，并引入了刀具直径选用的量化准则。实际应用中，技术人员须据此规范，结合具体零件、设备和材料进行工艺设计，所有新策略必须经过工艺试验验证方可纳入正式流程。

飞机机体结构件数控加工工艺策略规范

1 范围

本文件规定了飞机机体结构件（梁、肋、框、壁板等）数控铣削加工的术语定义、通用原则、核心特征加工策略、刀具选用标准、单面/双面结构加工差异、质量检验及异常处理等内容。

本文件适用于公司采用高强度铝合金（7075、7050、2024等）、钛合金预拉伸板料制造的飞机机体结构件数控加工，其他类似航空航天结构件可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1804-2000 一般公差 未注公差的线性和角度尺寸的公差

GB/T 1184-1996 形状和位置公差 未注公差值

HB 5800-2021 一般公差

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

飞机机体结构件

构成飞机机身、机翼、尾翼等核心部位的承载构件，主要包括梁（承受纵向载荷）、肋（维持截面形状）、框（传递横向载荷）、壁板（构成气动外形），具有复杂型腔、薄壁、高筋等特征。

3.2

动态铣削

基于高速加工理念的铣削方式，通过刀具路径的动态调整（如变半径圆弧运动），使切削刃始终保持恒定切削负载，适用于复杂形状及内腔粗加工，可提升加工效率与刀具寿命。

3.3

摆线加工

刀具以固定半径做圆周运动的同时沿工件轮廓进给的加工方式，切削力分散且恒定，适合高硬度材料（如钛合金）及薄壁结构的粗加工，可减少工件变形。

3.4

悬伸倍径比（L/D）

刀具悬伸长度（L，从刀柄夹持面到刀具切削刃的距离）与刀具直径（D）的比值，是衡量刀具刚性的关键指标，比值越小，刀具刚性越强，加工振动风险越低。

3.5

工艺凸台

为满足加工定位或支撑需求，在零件非关键区域设计的临时凸起结构，加工完成后根据图纸要求保留或去除，用于双面结构件翻面后的刚性支撑。

4 通用原则

4.1 基准先行原则

4.1.1 优先加工定位基准，包括工艺凸台、基准孔（通常为 $\Phi 10H7/\Phi 12H7$ ）及基准平面，基准平面的平面度公差 $\leq 0.02\text{mm}/100\text{mm}$ ，基准孔的位置度公差 $\leq 0.015\text{mm}$ 。

4.1.2 加工过程中应保护基准，避免基准面划伤、变形，若基准受损需重新加工基准并验证精度，合格后方可继续加工。

4.2 先粗后精原则

4.2.1 明确划分粗加工、半精加工、精加工阶段，各阶段余量分配如下：

- 粗加工：去除 80%~90% 余量，留取半精加工余量 2~5mm（铝合金取大值，钛合金取小值）；
- 半精加工：留取精加工余量 0.3~0.5mm（正常结构）、0.1~0.2mm（薄壁结构）；
- 精加工：加工至图纸最终尺寸，保证精度与表面质量。

4.2.2 避免跨阶段加工，防止粗加工的大切削力导致精加工后的精度回退。

4.3 变形控制原则

4.3.1 装夹方案应采用“多点分散夹紧”，避免单点过度夹紧导致的局部变形，夹紧力应通过试算确定（铝合金夹紧力 $\leq 5\text{kN}$ ，钛合金 $\leq 8\text{kN}$ ），软质材料（如 2024 铝合金）装夹面需垫 0.5mm 厚紫铜片。

4.3.2 加工路径应符合对称结构采用对称加工路径，非对称结构采用“从内向外、从薄到厚”的路径，避免应力集中；薄壁件加工需控制每道工序的材料去除率 $\leq 50\%$ ，防止应力释放过快。

4.3.3 切削参数：通过低温切削液（铝合金切削液温度 $\leq 25^\circ\text{C}$ ，钛合金 $\leq 20^\circ\text{C}$ ）降低加工温升，减少热变形。

4.4 刚性优先原则

4.4.1 刀具选择应在保证加工可达性的前提下，优先选用大直径（ $\geq \phi 20\text{mm}$ ）、短悬伸（ $L/D \leq 3:1$ ）刀具，如可转位机夹铣刀；深腔加工需使用缩杆刀具，控制 $L/D \leq 5:1$ ，必要时采用刀具振动抑制装置。

4.4.2 薄壁件特殊要求应遵循“刚性 - 力平衡原则”，在保证刀具刚性（ $L/D \leq 4:1$ ）的前提下，选用小直径刀具（ $\leq \phi 16\text{mm}$ ）降低切削力，切削力控制在 0.5~1kN 范围内（通过测力仪实时监控）。

5 核心特征加工策略与刀具选用

5.1 腹板加工策略

腹板加工应兼顾效率与变形控制，按面积与厚度划分为三类工况，具体要求见表1。

表 1 腹板加工策略与刀具选用表

工况分类	结构参数	加工策略	刀具选用	切削参数（参考）
工况 A: 小面积腹板	面积 $\leq 60\text{mm} \times 60\text{mm}$ ，正常 / 超厚度（ $\geq 20\text{mm}$ ）	1. 粗加工：采用螺旋铣削或动态铣削策略，一次性去除大部分余量。由于面积小，刀具路径转弯频繁，需关注刀具在转角处的负载。 2. 精加工：采用单向或往复式平行铣，步距可适当加大（通常为刀具直径的 50%~70%）。	粗加工：3-4 刃整体硬质合金立铣刀（ $\phi 10\text{mm}-\phi 20\text{mm}$ ，容屑槽深度 $\geq 5\text{mm}$ ）； 精加工：4-6 刃整体硬质合金立铣刀（ $\phi 8\text{mm}-\phi 16\text{mm}$ ，刃口圆角 $R0.1-R0.2\text{mm}$ ）。	铝合金：粗加工 $S=3000-4000\text{r/min}$ ， $F=800-1200\text{mm/min}$ ， $A_p=5-8\text{mm}$ ； 精加工 $S=4000-5000\text{r/min}$ ， $F=1200-1500\text{mm/min}$ ， $A_p=0.3-0.5\text{mm}$ 。
工况 B: 中等面积腹板	面积 $60\text{mm} \times 60\text{mm} \sim 120\text{mm} \times$	1. 粗加工：采用高效动态铣削或插铣开粗，快速去	粗加工：选用大直径可转位机夹式铣刀	铝合金：粗加工 $S=2500-3500\text{r/min}$ ，

工况分类	结构参数	加工策略	刀具选用	切削参数（参考）
	120mm，厚度 5mm~20mm	除余量。可分区加工，避免刀具长距离空跑。 2. 半精加工：必须进行，为精加工留取均匀余量（通常 0.3~0.5mm），用于消除粗加工后的变形应力。 3. 精加工：采用从内向外的偏移铣削或螺旋铣削，有利于应力释放，保证平面度。	（ $\phi 25\text{mm} - \phi 50\text{mm}$ ）或高效粗皮铣刀，实现高金属去除率。 半精/精加工：选用 4-6 刃整体硬质合金立铣刀（ $\phi 12\text{mm} - \phi 25\text{mm}$ ）或可转位机夹铣刀。大面积精加工时可考虑使用飞刀盘（带修光刃）提高效率。	F=1000-1500mm/min, Ap=8-12mm; 半精加工 S=3000-4000r/min, F=1200-1800mm/min, Ap=0.5mm; 精加工 S=4000-6000r/min, F=1500-2000mm/min, Ap=0.3mm。
工况 C: 大面积腹板	面积 $\geq 120\text{mm} \times 120\text{mm}$ ，正常 / 超薄 / 薄壁（ $\leq 5\text{mm}$ ）	1. 粗加工：必须采用分区、分层的策略。优先使用可转位玉米铣刀进行“剥皮”式开粗，再处理中间区域。严格控制每层切削深度，避免让刀。 2. 半精加工：至关重要。采用 Z 向分层或 XY 向分区的方式，逐层、逐区域释放应力。推荐使用摆线加工（刀具做圆周运动、适合高硬度材料）或动态铣削（基于高速加工理念、适合复杂形状及内腔加工），保持恒定负载。 3. 精加工（含薄壁）：采用分区域、多刀路的精加工策略。对于正常厚度，刀路轨迹应避免长直线连续切削，可采用波浪形或	粗加工：首选可转位机夹铣刀（ $\phi 40\text{mm} - \phi 80\text{mm}$ 或更大），刀片需有断屑槽。 半精加工：选用长刃型可转位机夹铣刀或大直径整体硬质合金立铣刀（ $\phi 25\text{mm} - \phi 40\text{mm}$ ）。 精加工：大面积平面精铣首选飞刀盘（带修光刃刀片）。对于薄壁区域或根部清角，需准备小直径的整体合金立铣刀（如 $\phi 10\text{mm}$ 、 $\phi 8\text{mm}$ ）。	铝合金：粗加工 S=1500-2500r/min, F=800-1200mm/min, Ap=3-5mm; 半精加工 S=2000-3000r/min, F=1000-1500mm/min, Ap=0.5mm; 精加工 S=3000-4000r/min, F=1500-2000mm/min, Ap=0.2-0.3mm; 钛合金：粗加工 S=800-1200r/min, F=300-500mm/min, Ap=2-3mm。

工况分类	结构参数	加工策略	刀具选用	切削参数（参考）
		螺旋形路径分散应力。对于薄壁腹板，精加工应优先选用大直径刀具（如飞刀盘）以保证平面度和效率。		

5.2 筋板 / 缘板加工策略

筋板 / 缘板加工核心是保证高度与垂直度，按高度划分为三类工况，具体要求见表 2。

表 2 筋板 / 缘板加工策略与刀具选用表

工况分类	高度参数	加工策略	刀具选用（遵循 4.4 刚性原则）	切削参数（参考）
工况 D: 矮筋 / 缘板	高度 ≤ 30mm, 正常 / 薄壁（壁厚 ≥ 3mm）	1. 粗加工：与腹板一同开粗，留足余量。 2. 半精/精加工：由于刚性较好，可采用较大的侧向切深（步距）。通常从顶部向下铣削。对于薄壁，可采用对称加工策略（如左右两侧筋交替加工），平衡切削力	刀具刚性良好，直径选择范围宽。主要选用 3-4 刃整体硬质合金立铣刀，直径通常为 ϕ 8mm - ϕ 16mm	铝合金： S=3500-4500r/min, F=1000-1400mm/min, Ap=1-2mm（正常） /0.5mm（薄壁）。
工况 E: 中高筋 / 缘板	高度 30mm~60mm, 正常 / 薄壁（壁厚 2-3mm）	1. 粗/半精加工：必须采用 Z 向分层铣削，每层切深不宜过大（如 0.5~2mm，取决于刀具和壁厚）。 2. 精加工：分层精铣是关键！绝不能一刀从底铣到顶。应采用小切深（如 0.1~0.3mm）、高转速、高进给的轻切削策略。刀路采用“之”字形或单向顺铣。	必须使用长刃、细颈（缩杆）设计的整体硬质合金立铣刀。直径按 $D \approx H/3 \sim H/5$ 初选（如 H=50mm，选 D=10mm~16mm），并控制悬伸倍径比（L/D）在 3:1 ~ 5:1。	高度 30mm~60mm, 正常 / 薄壁（壁厚 2-3mm）
工况 F: 高筋 / 缘板	高度 ≥ 60mm, 正常 / 薄壁（壁厚 ≤ 2mm）/ 超薄壁（壁厚 ≤ 1mm）	1. 加工策略核心：“像加工薄壁一样加工高筋”。所有步骤均需采用微米级的分层铣削。 2. 精加工：该结构极易发生变形。策略包括：二次翻面加工（见第 5 章）；采用“插铣”方式进行筋顶部的精加工，插铣的径向力小，有	必须使用专用高刚性超长铣刀。直径按 $D \approx H/6 \sim H/10$ 初选（如 H=80mm，选 D=8mm~13mm），控制 L/D 比在 5:1 ~ 8:1。对于超薄壁，必须使用	高度 ≥ 60mm, 正常 / 薄壁（壁厚 ≤ 2mm）/ 超薄壁（壁厚 ≤ 1mm）

工况分类	高度参数	加工策略	刀具选用（遵循 4.4 刚性原则）	切削参数（参考）
		利于保证垂直度和防止让刀。	PCD 铣刀或极锋利的硬质合金专用薄壁铣刀。	

5.3 薄壁结构刀具直径选用准则（刚性 - 力平衡原则）

5.3.1 初选直径（D）：根据筋 / 缘板高度（H）按表 3 初选，确保刀具刚性与切削力平衡。

表 3 薄壁结构刀具直径初选表

筋 / 缘板高度（H）	推荐精加工立铣刀直径（D）	目标悬伸倍径比（L/D）	最大允许切削力（kN）
$H \leq 30\text{mm}$	$D \geq 10\text{mm}$	$\leq 4:1$	≤ 1.2
$30\text{mm} < H \leq 60\text{mm}$	$D \approx H/3 \sim H/5$	$3:1 \sim 5:1$	≤ 0.8
$H > 60\text{mm}$	$D \approx H/6 \sim H/10$	$5:1 \sim 8:1$	≤ 0.5

5.3.2 刚性验证应符合计算实际悬伸长度 L ($L = \text{刀具夹持长度} + \text{加工深度} - \text{刀柄高度}$)，若 L/D 超出目标范围，需更换更大直径刀具或缩短悬伸（如使用加长刀柄），验证合格后方可加工。

5.3.3 试切优化：首件试切时监控刀具振动（振动加速度 $\leq 0.5g$ ），若振动超标，优先降低进给速度（每次降低 10%），无效则增大刀具直径（每次增大 1-2mm），直至振动达标。

6 单面与双面结构加工策略的核心差异

6.1 单面结构零件

6.1.1 毛坯底面为天然刚性支撑（平面度 $\leq 0.03\text{mm}/100\text{mm}$ ），无需额外支撑，加工稳定性高。

6.1.2 加工策略：

- 粗加工：采用高金属去除率策略，可转位机夹铣刀（ $\phi 40\text{mm} - \phi 60\text{mm}$ ）每层切深 5-8mm，进给速度 1500-2000mm/min；
- 应力释放：粗加工后静置 2-4 小时（铝合金）或 4-6 小时（钛合金），释放内应力；
- 半精 / 精加工：按 5.1、5.2 节执行，重点控制表面粗糙度与形位公差。

6.2 双面结构零件

6.2.1 核心挑战为加工第二面（B 面）时，第一面（A 面）已加工成型，存在悬空区域，刚性显著下降，易出现振刀（振动加速度 $> 0.5g$ ）、让刀（尺寸偏差 $> 0.03\text{mm}$ ）及变形（平面度超差 $> 0.02\text{mm}/100\text{mm}$ ）问题。

6.2.2 刚性支撑方法（按优先级排序）：

a) 工艺凸台/支撑枕位法（首选，批量生产适用）

——设计要求：在 A 面非关键区域（如零件边缘、非承载面）设计工艺凸台，凸台高度 $\geq 5\text{mm}$ ，直径 $\geq \phi 15\text{mm}$ ，数量按零件面积确定（每 100 cm^2 至少 1 个），凸台与零件本体的连接强度需能承受装夹力（ $\geq 3\text{kN}$ ）。

——加工要求：A 面加工时同步完成凸台精加工，凸台顶面平面度 $\leq 0.01\text{mm}$ ，定位孔（若有）位置度 $\leq 0.015\text{mm}$ ；翻面后通过凸台定位，采用专用夹具压紧凸台，压紧力控制在 2-4kN（铝合金）、4-6kN（钛合金），避免凸台变形。

b) 可调式多点支撑夹具（多品种小批量适用）

- 夹具要求：采用 3-6 点可调支撑（支撑点材质为黄铜或硬质橡胶，避免划伤零件表面），支撑精度 $\leq 0.005\text{mm}$ ，可通过千分尺微调支撑高度。
- 操作要求：翻面后先通过基准孔定位，再调整支撑点与 A 面贴合，贴合度需用百分表检测（接触压力 $\geq 0.5\text{N}$ ，无间隙），支撑点应避开薄壁区域（壁厚 $\leq 3\text{mm}$ ），防止局部受压变形。
- c) 可剥离介质填充（复杂内腔结构适用）
- 介质要求：选用石膏基填充料（抗压强度 $\geq 15\text{MPa}$ ，固化时间 $\leq 24\text{h}$ ）或可溶性合金（熔点 $\leq 150^\circ\text{C}$ ，冷却后收缩率 $\leq 0.5\%$ ），填充前需在 A 面涂覆脱模剂（如硅基脱模剂），便于后续剥离。
- 填充要求：填充需饱满，无气泡（可通过真空脱泡处理），填充面与 A 面平齐度 $\leq 0.02\text{mm}$ ；B 面加工完成后，通过机械剥离（石膏）或加热熔化（可溶性合金）去除介质，残留量 $\leq 0.1\text{mm}$ （需通过砂纸打磨清理）。

6.2.3 优化加工流程，应符合下表。

表 4 优化加工流程

工序	加工内容	关键控制要求
1. A 面加工	粗加工→半精加工→A 面特征精加工（含工艺凸台 / 定位基准）→A 面质量检验	精加工后 A 面平面度 $\leq 0.015\text{mm}$ ，关键尺寸公差 $\pm 0.02\text{mm}$ ，表面粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$ ；检验合格后标记基准点（用激光打标机标注，精度 $\pm 0.005\text{mm}$ ）。
2. 翻面准备	清洁 A 面→安装支撑装置→定位校准→夹紧验证	用酒精清洁 A 面，去除切削液残留；通过三坐标测量仪验证定位精度（X/Y/Z 向偏差 $\leq 0.005\text{mm}$ ）；夹紧后用百分表检测工件跳动（ $\leq 0.005\text{mm}$ ），确认无松动。
3. B 面粗加工	分层粗铣（每层切深 $\leq 3\text{mm}$ ）→去除余量 80%→应力释放（静置 1-2h）	切削参数比 A 面粗加工降低 20%-30%（如 A 面 $S=3000\text{r/min}$ ，B 面取 $2400-2100\text{r/min}$ ）；避免在同一区域连续切削超过 5min，防止局部温升过高（ $> 40^\circ\text{C}$ ）。
4. B 面半精加工	轻量化半铣（留余量 0.1mm）→分区应力释放（每区加工后静置 10min）	采用动态铣削或摆线加工，切削负载波动 $\leq 5\%$ ；半精加工后检测 B 面关键尺寸（如孔径、壁厚），偏差需 $\leq 0.01\text{mm}$ ，否则调整后续精加工参数。
5. B 面精加工	小切深（0.05-0.1mm）→高转速（比半精加工高 10%-15%）→单向顺铣	薄壁区域（壁厚 $\leq 2\text{mm}$ ）需采用“多次走刀”（2-3 次，每次切深 0.03-0.05mm），避免一次性切削力过大；精加工后检测 B 面平面度 $\leq 0.01\text{mm}/100\text{mm}$ ，垂直度 $\leq 0.005\text{mm}/100\text{mm}$ 。
6. 应力平衡	翻回 A 面→无余量“光刀”（可选，高精度零件适用）（切削量 $\leq 0.1\text{mm}$ ）→最终检验	光刀路径与 A 面精加工路径一致，用于修正 B 面加工导致的微变形（通常变形量 $\leq 0.005\text{mm}$ ）；最终检验需覆盖 A/B 面所有关键特征，合格率需达到 100%。

7 其他特征结构加工要点

7.1 倒角加工（圆角 / 斜角）

7.1.1 圆角加工

7.1.1.1 刀具选择：选用与圆角半径（R）匹配的球头铣刀，刀具半径偏差 $\leq 0.005\text{mm}$ （如 R3mm 圆角选用 R3 $\pm 0.005\text{mm}$ 球头铣刀），避免“过切”或“欠切”。

7.1.1.2 加工策略：采用“环绕铣削”路径，步距 = 刀具直径的 10%-15%，进给速度比平面精加工降低 20%，确保圆角表面粗糙度 $R_a \leq 1.6 \mu\text{m}$ ；对于内圆角（如筋板根部 R 角），若 $R \leq 1\text{mm}$ ，需使用长颈球头铣刀（L/D=5:1-6:1），避免刀柄干涉。

7.1.2 斜角加工（角度 $15^\circ - 45^\circ$ ）

7.1.2.1 刀具选择：优先使用专用倒角铣刀（角度偏差 $\leq 0.5^\circ$ ，刃口锋利度 $R_a \leq 0.02 \mu\text{m}$ ），若为非标准角度，可采用立铣刀通过两轴联动加工。

7.1.2.2 加工策略：从斜角底部向顶部铣削，切深 = 0.1-0.2mm，进给速度 = 800-1200mm/min（铝合金）、300-500mm/min（钛合金）；斜角与相邻表面的过渡需平滑，无台阶（台阶高度 $\leq 0.005\text{mm}$ ）。

7.2 转角加工（内角 / 外角， $R \leq 5\text{mm}$ ）

7.2.1 粗加工

7.2.1.1 内角：采用摆线加工（摆线半径 = 刀具半径 + 0.1mm），避免刀具中心与转角圆心重合导致的“过载切削”（切削力 $> 2\text{kN}$ ）；外角：采用圆弧过渡加工（过渡半径 \geq 刀具直径的 1/2），减少转角处的刀具磨损（后刀面磨损量 $\leq 0.05\text{mm}$ ）。

7.2.1.2 刀具选择：粗加工用 3-4 刃立铣刀（容屑槽大，排屑顺畅），刀具直径 $\leq 2R$ （如 R3mm 转角选用 $\leq \phi 6\text{mm}$ 刀具）。

7.2.2 精加工清根

7.2.2.1 刀具选择：使用比转角 R 小 10%-20% 的立铣刀（如 R3mm 转角选用 R2.4-R2.7mm 刀具），刀具刃长 \geq 转角深度 + 5mm，避免刀柄干涉。

7.2.2.2 加工策略：采用“分层清根”（每层切深 0.05-0.1mm），进给速度 = 500-800mm/min，清根后转角表面需无刀痕（目视无明显台阶），粗糙度 $R_a \leq 3.2 \mu\text{m}$ 。

7.3 加强凸台加工（承载型凸台，直径 $\geq \phi 20\text{mm}$ ，高度 $\geq 10\text{mm}$ ）

7.3.1 加工参考：结合 4.1 节工况 A（腹板）和 4.2 节工况 D（筋板），凸台底面按腹板加工（保证平面度 $\leq 0.01\text{mm}$ ），凸台侧壁按筋板加工（保证垂直度 $\leq 0.005\text{mm}/100\text{mm}$ ）。

7.3.2 关键要求：

——根部圆角：凸台与腹板连接处需加工 R1-R2mm 圆角，采用球头铣刀分层加工（每层切深 0.1mm），圆角表面无接刀痕；

——顶部平面：精加工后平面度 $\leq 0.008\text{mm}$ ，表面粗糙度 $R_a \leq 1.6 \mu\text{m}$ ，若为装配面，需进行表面抛光（抛光后 $R_a \leq 0.8 \mu\text{m}$ ）。

8 质量检验与验收

8.1 检验分类与频次

检验类别及频次应符合下表。

表 5 检验分类与频次

检验类型	检验时机	检验范围	检验频次
首件检验	新程序、新批次、更换刀具 / 夹具后	所有关键特征（孔径、壁厚、平面度、位置度等）	100% 全检，合格后方可批量生产
过程检验	批量加工中	关键尺寸（每 20 件抽检 1 件）、表面质量（每 5 件抽检 1 件）	抽检比例 $\geq 5\%$ ，连续 3 件不合格需停机调整
最终检验	零件加工完成后	全尺寸、形位公差、表面粗糙度、外观缺陷	100% 全检，出具检验报告

8.2 关键检验项目与方法

关键检验项目与方法应符合下表。

表 6 关键检验项目与方法

检验项目	检验要求（参考）	检验设备	检验方法
孔径尺寸	公差 H7（如 $\phi 10H7$ ： $\phi 9.992 - \phi 10.012\text{mm}$ ）	内径千分尺（分度值 0.001mm ）、气动量仪（精度 $\pm 0.0005\text{mm}$ ）	测量 3 个截面（上、中、下），取平均值，偏差需在公差范围内
壁厚尺寸	公差 $\pm 0.03\text{mm}$ （薄壁件 $\pm 0.02\text{mm}$ ）	壁厚千分尺（分度值 0.001mm ）、超声测厚仪（精度 $\pm 0.005\text{mm}$ ）	每 10mm 长度测量 1 点，至少测量 5 点，最大偏差 \leq 公差值
平面度	$\leq 0.01\text{mm}/100\text{mm}$ （关键面）、 $\leq 0.02\text{mm}/100\text{mm}$ （非关键面）	大理石平台（平面度 $\leq 0.005\text{mm}/\text{m}^2$ ）、百分表（分度值 0.001mm ）	采用“网格法”测量（每 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 1 个点），计算平面度误差
位置度	$\leq \phi 0.015\text{mm}$ （关键孔）、 $\leq \phi 0.03\text{mm}$ （非关键孔）	三坐标测量机（精度 $\pm 0.002\text{mm}$ ）	每孔测量 3 个点（孔口、孔中、孔底），计算位置度偏差
表面粗糙度	$Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$ （精加工面）、 $Ra \leq 3.2 \mu\text{m}$ （半精加工面）	粗糙度仪（测量范围 $Ra 0.025 - 12.5 \mu\text{m}$ ）	每个特征测量 2 个位置，取最大值，需 \leq 标准值
外观缺陷	无裂纹、划痕（深度 $\leq 0.05\text{mm}$ ）、毛刺（高度 $\leq 0.02\text{mm}$ ）	目视（放大 10 倍）、裂纹检测仪（灵敏度 $\geq 0.1\text{mm}$ ）	全表面目视检查，关键区域（如焊缝、圆角）用裂纹检测仪验证

8.3 不合格品处置

8.3.1 标识与隔离：发现不合格品后，立即贴“不合格”标签（标注零件编号、不合格项目、发现日期），放置于专用隔离区，避免与合格品混淆。

8.3.2 原因分析：组织技术、操作、检验人员成立分析小组，通过“5Why”法定位原因（如尺寸超差可能源于刀具磨损、参数错误、装夹松动等），并记录分析过程。

8.3.3 处置方式：

——返工：若不合格项可修复（如表面划痕、尺寸偏小），制定返工工艺（如抛光、补铣），返工后重新检验，合格后方可入库；

——报废：若不合格项不可修复（如裂纹、位置度超差），填写《报废单》，经技术负责人审批后，按公司废品处理流程处置，严禁流入下道工序；

——让步接收：仅适用于非关键特征（不影响零件性能），需经客户书面确认，填写《让步接收单》，并记录使用批次，便于追溯。

9 异常处理与工艺优化

9.1 常见异常及应对措施

常见异常及应对措施应符合下表规定

表 7 常见异常及应对措施

异常类型	表现形式	可能原因	应对措施
振刀	加工中出现明显噪音 ($>80\text{dB}$), 表面出现波纹刀痕, 尺寸偏差 $>0.03\text{mm}$	刀具刚性不足 ($L/D>8:1$)、切削参数过高、支撑松动	1. 更换短悬伸刀具 ($L/D\leq 5:1$); 2. 降低转速 / 进给速度 (每次降 10%); 3. 检查支撑装置, 重新夹紧
让刀	实际尺寸比程序尺寸大 $0.02-0.05\text{mm}$, 侧壁垂直度超差	切削力过大、刀具磨损 (后刀面磨损量 $>0.1\text{mm}$)、工件刚性差	1. 减小切深 (每次降 0.2mm); 2. 更换新刀具; 3. 增加支撑点, 提升工件刚性
表面粗糙度超标	$Ra>1.6\mu\text{m}$, 表面出现毛刺、啃刀痕迹	刀具刃口钝化、切削液不足、进给速度过高	1. 刃磨或更换刀具 (刃口锋利度 $Ra\leq 0.02\mu\text{m}$); 2. 检查切削液流量 ($\geq 20\text{L}/\text{min}$) 与浓度 (乳化液 8%-10%); 3. 降低进给速度 (每次降 15%)
工件变形	平面度超差 $>0.02\text{mm}/100\text{mm}$, 薄壁件出现翘曲	应力释放不充分、加工顺序不合理、夹紧力过大	1. 增加粗加工后静置时间 (延长 1-2h); 2. 调整加工顺序 (从内向外、对称加工); 3. 降低夹紧力 (每次降 10%), 重新验证装夹

9.2 工艺优化流程

9.2.1 数据收集: 记录加工过程中的关键数据 (切削参数、刀具寿命、尺寸偏差、异常次数), 建立工艺数据库, 每月统计分析 1 次。

9.2.2 优化触发条件: 当出现以下情况时, 需启动工艺优化:

- 异常发生率 $>5\%$ (如振刀、让刀次数每月超 10 次);
- 刀具寿命低于行业平均水平 (如铝合金加工刀具寿命 <500 件);
- 客户提出新的精度要求 (如位置度从 $\phi 0.03\text{mm}$ 提升至 $\phi 0.015\text{mm}$)。

9.2.3 优化实施: 由技术部牵头, 制定优化方案 (如调整切削参数、更换刀具类型、改进装夹方式), 通过小批量试切 (试切数量 ≥ 10 件) 验证效果, 试切合格后更新工艺文件, 并对操作员进行培训。