

# 某型训练器材低成本设计改进及工艺优化

冯立臣<sup>1,2</sup>, 梁琦<sup>1,2</sup>

1. 长治凌燕机械厂, 山西 长治 046011

2. 山西省新能源航空智能保障装备技术创新中心, 山西 长治 046011

DOI:10.61369/ME.2025010021

**摘要 :** 针对某型航空训练器材吊耳、尾锥及尾筒三大关键部件的制造瓶颈, 在吊耳制造中通过将棱角部位增加 R5 过渡圆角, 既满足挂架适配需求又便于模具脱模; 尾锥制造采用旋压成形工艺替代传统卷焊工艺, 消除了卷锥中的工艺缺陷, 避免了焊接变形; 尾筒制造通过定制冷轧无缝钢管替代传统卷焊工艺。三项改进累计节约成本 30.56 万元, 工序减少 62%, 零件生产周期缩短 58%, 材料利用率提升 10%, 合格率均达 99% 以上。热挤压、旋压成形及定制化采购策略的应用, 构建了薄壁零件和复杂构件高效制造新范式, 为航空精密部件工艺升级提供了可复制路径, 具有显著的军事效益与工程推广价值。通过系统性工艺创新与设计优化, 实现了生产效率提升、成本降低与性能优化的多重突破, 为航空装备批量化生产提供了技术示范。

**关键词 :** 训练器材; 低成本设计; 工艺优化

## Low-cost Design Improvement and Process Optimization of a Certain Type of Training Equipment

Feng Lichen<sup>1,2</sup>, Liang Qi<sup>1,2</sup>

1. Changzhi Lingyan Machinery Factory, Changzhi, Shanxi 046011

2. Shanxi Province New Energy Aviation Intelligent Support Equipment Technology Innovation Center, Changzhi, Shanxi 046011

**Abstract :** Aiming at the manufacturing bottlenecks of the three key components of a certain type of aviation training equipment, namely the lifting lug, tail cone and tail tube, in the manufacturing of the lifting lug, by adding R5 transition rounded corners at the angular parts, it not only meets the adaptation requirements of the hanger but also facilitates mold demolding. The manufacturing of the tail cone adopts the spinning forming process instead of the traditional roll welding process, eliminating the process defects in the roll cone and avoiding welding deformation. The tailpipe manufacturing replaces the traditional coil welding process with custom cold-rolled seamless steel pipes. The three improvements have cumulatively saved 305,600 yuan in costs, reduced the number of processes by 62%, shortened the production cycle of parts by 58%, increased the material utilization rate by 10%, and all achieved a qualification rate of over 99%. The application of hot extrusion, spinning forming and customized procurement strategies has established a new paradigm for the efficient manufacturing of thin-walled parts and complex components, providing a replicable path for the process upgrade of aviation precision parts, and has significant military benefits and engineering promotion value. Through systematic process innovation and design optimization, multiple breakthroughs have been achieved in terms of production efficiency improvement, cost reduction and performance optimization, providing a technical demonstration for the batch production of aviation equipment.

**Keywords :** training equipment; low-cost design; process optimization

## 一、改进机械加工件方法

### (一) 提高机械加工件批生产效率方法

机械加工件批生产效率受到多种因素的影响, 其中设备性能、工艺流程、人员技能和管理水平是最关键的四个方面。设备性能直接影响加工速度、精度和稳定性, 高性能的数控机床和自动化设备可以显著提高生产效率。工艺流程的合理性决定了生产过程的顺畅程度, 优化的工艺流程可以减少不必要的工序和等待

时间。人员技能水平直接影响设备利用率和产品质量, 熟练的操作人员能够更好地发挥设备性能, 减少操作失误。管理水平则体现在生产计划、资源调配和质量控制等方面, 高效的管理能够协调各个环节, 确保生产顺利进行。这些因素相互影响、相互作用, 共同决定了机械加工件批生产的整体效率。因此, 提高生产效率需要从这些关键因素入手, 采取系统化的改进措施。提高机械加工件批生产效率需要采取多方面的策略。优化工艺流程是基础。通过价值流图分析等方法, 识别并消除生产过程中的浪

费，重新设计更高效的工艺流程。采用并行工程理念，尽可能将串行工序改为并行工序，缩短生产周期。引入先进设备和技术是关键，投资高精度、高效率的数控机床和自动化生产线，可以大幅提高生产速度和一致性。采用计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助制造（CAM）技术，可以实现设计与制造的无缝衔接，减少试制时间。实施精益生产理念是提高效率的重要途径，通过5S管理、标准化作业、持续改进等方法，消除各种形式的浪费，提高生产系统的整体效率。加强生产计划与调度也至关重要。采用先进的生产计划系统，如制造执行系统（MES），可以实现生产过程的实时监控和动态调度，提高设备利用率和订单交付准时率。提升员工技能是保证效率提升的基础，通过系统的培训和技能认证，提高操作人员的专业水平，同时培养多技能工人，增强生产线的灵活性。优化工具和夹具管理可以显著提高加工效率，采用高性能刀具和智能刀具管理系统，可以减少换刀时间和刀具损耗。设计专用夹具可以提高装夹效率和定位精度。强化质量管理是提高整体效率的保障。通过统计过程控制（SPC）和全面质量管理（TQM）等方法，减少返工和废品率，提高一次合格率。优化供应链管理有助于提高整体生产效率。与供应商建立战略合作伙伴关系，实施准时制（JIT）采购，可以减少库存积压和物料短缺对生产的影响。数据驱动决策是现代制造企业提高效率的重要手段。通过工业物联网（IIoT）技术收集生产数据，利用大数据分析和人工智能算法进行生产优化和预测性维护，可以显著提高设备利用率和生产效率。重视环境与能源管理也是提高效率的重要方面。通过节能设备改造、余热回收利用等措施，降低能源消耗，同时改善工作环境，提高员工工作效率。

### （二）机械加工件降低成本的设计方法

机械加工件的成本受到多种因素的影响，其中材料选择、加工工艺、结构设计和生产批量是最关键的四个方面。材料选择直接影响原材料成本和加工难度，高性能材料往往价格昂贵且加工困难，而普通材料虽然成本较低但可能影响产品性能。在满足使用要求的前提下，合理选择材料是控制成本的关键。加工工艺决定了生产效率和加工成本，复杂的工艺需要更精密的设备和更长的加工时间，从而增加成本。结构设计影响材料的利用率和加工难度，优化设计可以减少材料浪费和加工工序。生产批量则通过规模效应影响成本，大批量生产可以摊薄固定成本，但同时也增加了库存压力。这些因素相互影响、相互作用，共同决定了机械加工件的最终成本。降低生产成本需要从这些关键因素入手，采取系统化的设计方法。降低机械加工件成本的设计方法主要包括面向成本的设计（DFC）方法、价值工程分析、模块化设计、标准化设计、轻量化设计、可制造性设计和可装配性设计。面向成本的设计（DFC）方法是一种系统化的设计方法，它要求在设计阶段就充分考虑成本因素，通过权衡产品性能、质量和成本，找到最优的设计方案。DFC方法包括目标成本法、功能成本分析和生命周期成本分析等工具，可以帮助设计人员在满足功能要求的前提下，选择最经济的材料和工艺。价值工程分析是一种通过分析产品功能与成本的关系，寻求以最低成本实现必要功能的方法。它通过功能定义、功能评价和方案创新等步骤，识别并消除不必要的功能和过剩质量，从而降低成本。模块化设计通过将产品分解为若干个标准模块，可以提高设计效率，减少零部件种类，降低生产和库存成本。模块化设计也便于产品的维修和升

级，延长产品生命周期。标准化设计通过采用标准零部件和通用结构，可以减少设计工作量，降低生产成本。标准化设计还有利于提高产品质量和可靠性，减少售后服务成本。轻量化设计通过优化结构和使用轻质材料，可以减少材料消耗，降低加工和运输成本。轻量化设计也有助于提高产品的能效和环保性能。可制造性设计（DFM）强调在设计阶段就考虑制造工艺的要求，通过简化结构、减少加工难度和提高材料利用率来降低生产成本。可装配性设计（DFA）则关注产品的装配过程，通过减少零件数量、简化装配工序和提高装配精度来降低装配成本。这些设计方法相互补充，可以综合运用以达到最佳的成本控制效果。

### （三）机械加工件工艺改进方法

机械加工件的工艺受到多种因素的影响，其中材料特性、加工设备、刀具选择、工艺参数和操作人员技能是最关键的五个方面。材料特性直接影响加工难度和加工质量，不同材料具有不同的硬度、韧性、导热性等特性，需要采用不同的加工工艺和参数。加工设备的性能和精度决定了加工能力和加工质量，高精度、高效率的数控机床可显著提高加工精度和生产效率。刀具选择对加工质量和效率有重要影响，合适的刀具材料和几何参数可以提高切削效率，延长刀具寿命。工艺参数包括切削速度、进给量、切削深度等，合理的工艺参数可以提高加工效率，减少刀具磨损。操作人员技能水平直接影响设备利用率和加工质量，熟练的操作人员能够更好地发挥设备性能，减少操作失误。这些因素相互影响、相互作用，共同决定了机械加工件的工艺水平和加工效果。改进工艺需要从这些关键因素入手，采取系统化的改进措施。机械加工件工艺改进方法主要包括高速加工技术、精密加工技术、复合加工技术、智能制造技术、绿色制造技术以及工艺优化与仿真。高速加工技术通过提高切削速度和进给量，可以显著提高加工效率，减少加工时间。高速加工还可以减少切削力，提高表面质量。精密加工技术通过采用高精度机床和精密刀具，可以实现微米甚至纳米级的加工精度，满足高精度零件的加工需求。复合加工技术将多种加工工艺集成在一台设备上，如车铣复合、磨削复合等，可以减少装夹次数，提高加工精度和效率。智能制造技术通过引入工业互联网、大数据分析和人工智能算法，实现加工过程的智能化控制和优化，提高生产效率和产品质量。绿色制造技术通过采用干式切削、微量润滑等环保加工方法，减少切削液的使用，降低环境污染。工艺优化与仿真技术通过计算机仿真和优化算法，对加工工艺进行虚拟验证和优化，可以减少试切次数，缩短工艺开发周期。这些工艺改进方法相互补充，可以综合运用以达到最佳的工艺改进效果。

## 二、设计改进

### （一）吊耳设计改进

吊耳是训练器材与飞机挂架的连接部分，应具有足够的高的强度和韧性，并且适配对应挂架。原吊耳设计虽然满足强度和韧性要求，但在地面挂架投放验证过程中，吊耳与挂架锁钩接触面存在刮痕，不仅影响锁钩使用寿命，而且飞行过程中受空气阻力影响，有导致脱钩异常的可能。对此需对吊耳棱角处进行圆弧过渡。设计改进前后见图1。

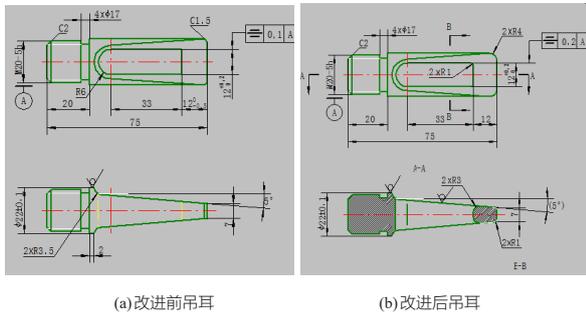


图1 吊耳设计改进

## (二) 某型训练器材尾椎设计改进

尾椎为薄壁锥桶结构，是训练器材主体与稳定器连接过度部分，两端口部同轴度影响训练器材整体气动外形。传统加工方法是切割扇形毛坯，通过卷锥机卷成锥桶结构，之后焊接接口。卷锥机卷制钢板时，起始端和尾端往往存在平直边，需要额外增加校形工序才能满足圆度要求。传统工艺生产效率低，无法满足生产线节拍要求。对此生产线上需要引入旋压工艺。旋压工艺利用旋压机，将金属板材固定在旋转的模具上，通过旋轮或辊子施加压力，使板材逐步贴合模具形状，形成轴对称零件，如筒形、锥形或曲面零件。利用旋压工艺生产尾椎去除了校形工序，避免了焊接变形。

## (三) 某型航训器材尾筒设计改进

尾筒是训练器材稳定器的一部分与机翼和中心管焊接形成稳定器总成，小批量生产可用板材卷形后焊接成型。大批量生产为提供生产效率应选用冷拔无缝管，使用激光切割取长。对此设计上删除了板材焊接搭边。

## 三、工艺改进

### (一) 吊耳工艺改进

由于吊耳增加了圆角，原加工工艺采用圆钢车铣工艺加工，工序长（工序流程为备、车、铣、钳、铣、插等），生产效率低，无法满足生产节拍要求。因此吊耳加工工艺应首选热挤压锻造工艺，该工艺主要用于制造高强度、复杂形状的零件。热挤压工艺在高温下进行，通过模具将金属坯料挤压成形。金属坯料加热至再结晶温度以上，以提高塑性，降低变形抗力。吊耳热挤压工艺提高了加工效率，降低了生产成本，更适合批量生产改进后的吊耳。热挤压后的吊耳应增加了磁粉探伤检测，避免热挤压过程中出现裂纹。该工艺适合批量生产复杂外形零件，具有生产效率高，成本较低，质量稳定的特点。新工艺的加工的吊耳经过拉力试验、外形尺寸检验、磁粉探伤、材料分析、挂架适配性验证。结果均满足要求。

### (二) 尾椎工艺改进<sup>[1]</sup>

训练器材尾椎作为气动外形关键构件，其锥度精度与表面质量直接影响训练器材的飞行稳定性。传统制造工艺采用分段成形法：首先使用 Q235B 冷轧钢板经剪板机下料获得扇形板料，随后在 300T 液压机完成冲压落料形成锥面展开件，经三辊卷锥机卷制成锥筒后，采用 TIG 焊接纵向接缝，再经砂带磨削消除焊缝余高，最后通过机械校形保证锥角公差。该工艺存在明显局限：卷制过程产生 0.5~0.8mm 的锥度偏差，焊接热变形导致圆度超差

率达 18%，且需 5 道主工序和 4 次装夹定位，单件加工耗时达 150 分钟，材料利用率仅为 65%。针对传统工艺瓶颈，本工艺改进创新采用旋压成形整体制造技术。改进工艺选用 2A12 铝合金预退火板材作为原料，首先通过激光切割获得  $\phi 600\text{mm}$  环形毛坯，在 CNC 数控旋压机上实施三步成形，初旋阶段以 800rpm 转速完成锥体预成形，精旋阶段采用渐进式旋轮路径控制壁厚分布。该工艺利用金属塑性流动特性实现无焊缝整体成形，旋压过程中产生的冷作硬化效应使构件强度提升 20%，同时省略后续热处理工序。工艺革新带来显著技术优势，工序链由 6 道压缩至 2 道，生产节拍缩短至 45 分钟/件；锥度误差从  $\pm 0.5^\circ$  优化至  $\pm 0.15^\circ$ ，壁厚均匀性偏差由 0.3mm 降至 0.1mm；材料利用率提升至 88%，单件成本降低 42%。经激光跟踪仪检测，批量产品锥体轮廓度  $\leq 0.3\text{mm}$ ，表面粗糙度  $Ra 0.8\mu\text{m}$ ，较原工艺提升两个精度等级。消除焊缝结构使构件疲劳寿命提高 4 倍，批次合格率稳定在 99.5% 以上。此项旋压成形技术的成功应用，标志着薄壁锥形构件制造实现从离散加工到整体成形的跨越式发展。其高度自动化的生产模式使人工干预减少 70%，特别适合年产万件级的大批量生产需求，为航空训练装备的高效制造提供了新的技术路径，对航空精密构件加工工艺升级具有重要推广价值。

### (三) 尾筒工艺改进<sup>[2]</sup>

训练器材尾筒作其制造质量直接影响训练器材的气动性能与飞行稳定性。该零件原采用传统板材卷形焊接制造工艺，首先通过剪板机下料获得矩形板材，随后在专用模具上进行压形加工形成接口结构，再经三辊卷板机卷制成筒状，最后通过压力焊完成纵向接缝焊接。此工艺虽能实现基本结构成形，但存在显著质量缺陷，卷制过程中板材回复导致圆度误差达 0.8mm，焊接热影响区易产生变形，成品合格率仅为 82%。且工艺流程涉及 4 道主工序和 3 次工装转换，单件生产成本高。经过工艺优化论证，采用冷拔无缝管替代传统卷焊工艺。改进方案选用冷轧精密无缝管作为基材，根据设计尺寸定制管材规格（外径  $\Phi 65 \pm 0.1\text{mm}$ ，壁厚  $1 \pm 0.2\text{mm}$ ），采用激光切割机下料，保证端面切口平整。经三坐标检测，改进后产品圆度误差控制在 0.3mm 以内，较原工艺提升 62.5%，表面粗糙度 Ra 值由  $3.2\mu\text{m}$  优化至  $1.6\mu\text{m}$ 。

## 四、结语

吊耳改进，原工艺单件成本 75.54 元（工时  $1\text{h} \times 74\text{元/h} +$  原材料 1.54 元），优化后降至 20.9 元（工时  $0.1\text{h} \times 74\text{元/h} +$  热挤压毛坯 13.5 元），单批 1.7 万件节约 92.88 万元；尾椎改进，原单件成本 17 元（工时  $0.2\text{h} \times 74\text{元/h} +$  原材料 2.2 元），优化后为 8.42 元（工时  $0.08\text{h} \times 74\text{元/h} +$  原材料 2.5 元），单批 1.7 万件节约 14.58 万元；尾筒改进，原单件成本 7.81 元（工时  $0.1\text{h} \times 74\text{元/h} +$  原材料 0.41 元），优化后采购单价 2.8 元，单批 1.7 万件节约 14.47 万元。三项改进累计节约成本 121.93 万元，通过缩短工时、优化材料工艺及采购策略，大幅提升生产经济效益。

## 参考文献

- [1] 牛步钊, 王杰. 某铸件吊耳开裂失效分析 [J]. 中国设备工程, 2021(10).
- [2] 詹伟强. 精密零部件加工中的表面处理与工艺控制 [J]. 产品可靠性报告, 2024(12).