

数字化制造条件下的大型结构件产品质量控制

卢彦卓, 李辉, 林海鹏

沈阳飞机工业(集团)有限公司 辽宁沈阳 110850

摘要: 探索数字化技术在设计、制造和检验领域的综合运用, 解决了大型结构件快速测量、精准验收的瓶颈问题, 在研制阶段采用“首件鉴定”全面尺寸要素检测法, 验证产品可制造性、工艺可操作性、设备精度及生产能力等要素, 在批量生产阶段采用“首、中、尾”典型尺寸要素测量法, 进行全面质量管控, 在保证产品优质交付的基础上, 提升检验工作效率。

关键词: 大型结构件; 数字化制造; 质量控制; 精准检测

1 序言

随着数字化技术在飞机设计、制造和检验领域的应用愈加深入和广泛, 对飞机产品的制造和装配精度有了更高的要求。大型结构件(框、梁、壁板和接头等)作为飞机的主要承力构件, 具有加工周期长、制造工艺复杂、检测要素多及检测精度等级高等特征。目前的检测手段仍采用传统检验方式进行常规性产品验收, 严重制约了产品验收的工作效率, 不能满足生产计划需求。为了解决产品检验的精准度和检测效率问题, 在三维设计环境及数字化制造条件下, 探索产品验收的新方法, 进一步提升产品检测精准度与检测效率。

2 大型结构件质量控制要素分析

大型结构件是飞机机体骨架和气动外形的重要组成部分^[1], 有复杂的装配协调关系, 加工精度要求高, 具有结构尺寸大、形状复杂及材料多样等特点, 加工制造技术和过程质量控制难度大。在飞机制造过程中, 为便于组织生产, 大型结构件按结构特点进行分类, 划分为壁板、框、梁、肋、缘条、长桁、骨架和接头等典型结构件。壁板构成飞机气动外形, 是飞机的主要承力构件。壁板结构形式如图1所示, 主要包括槽腔、筋条、下限、通孔和凸台等形状。零件外廓尺寸相对较大, 筋条、腹板厚度相对较小, 零件最终状态一般形成曲面或局部与理

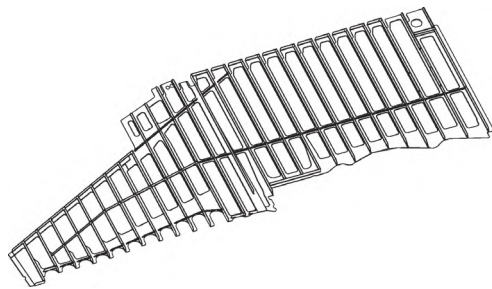


图1 壁板结构形式

论外缘相关, 除对合孔、连接孔外, 其他部位公差较大。壁板零件采用铝合金预拉伸板材毛坯, 通常先经数控铣床完成结构要素加工, 再经过塑性加工获得最终零件形状。

(1) 工艺特点 大型结构件由于其使用的特殊要求, 具有结构大型化、复杂化, 材料多元化和制造精确化的特点, 其工艺特点如下。

1) 零件结构形式复杂, 其外形多数与飞机的气动外形相关, 周边轮廓与其他零件还存在复杂的装配协调关系, 不易装夹, 加工技术难度大。

2) 零件毛坯可采用模锻和预拉伸厚板材, 为减少模具费用, 缩短生产周期, 一般采用板材毛坯, 其切削加工余量大, 加工过程易产生应力。

3) 加强筋结构复杂, 壁厚最薄部位不足1mm, 刚性弱, 加工过程易变形。

4) 精密装配需求对零件尺寸、几何公差都提出了更高的要求, 如腹板尺寸公差精度为 $\pm 0.1\text{mm}$,

加工精度要求高。

5) 随着新一代飞机性能的逐步提高, 新型高性能材料不断应用, 以钛合金、超高强度钢材料和低密度轻质材料为代表的难加工材料所占比重越来越多, 切削困难, 刀具磨损严重。

(2) 尺寸要素 主要包括以下几个方面。

1) 零件内、外形控制要素, 主要指对零件整体配合关系尺寸的约束, 通常由单曲面或双曲面构成。检测手段多采用三坐标测量机进行接触式测量。

2) 零件筋条、缘条及腹板厚度尺寸控制要素, 主要指对零件本体中结构尺寸的约束, 通常由平行尺寸或过渡尺寸构成。检测手段基本采用常规量具(游标卡尺、千分尺)进行逐个点位测量。

3) 零件形位尺寸控制要素, 主要指对零件结构中的筋条、下陷及基准孔等位置尺寸的约束, 一处位置通常由两条以上的尺寸约束构成。检测手段主要基于设计基准、制造基准和检验基准来制定, 通过直接测量或间接测量等手段达成。

4) 零件套合区、基准面及交点孔控制要素, 主要指对零件具有装配关系的结构尺寸的约束, 该类别尺寸为直接影响零件装配质量的重要因素。检测手段多采用三坐标测量机进行接触式测量。

5) 零件的表面质量控制要素, 主要包含零件表面粗糙度、表面残余应力及加工接刀差的平整度。主要采用目视和触摸方式进行检测。

(3) 检测难点 主要包括以下三方面。

1) 零件结构复杂, 需要采取多种检测方式才能满足零件的检测要求, 对检验人员的技能等级要求较高。

2) 零件尺寸要素众多, 并且典型尺寸居多, 检验人员反复操作频率较高, 易产生视觉或感知疲劳, 容易出错, 工作效率低。

3) 零件尺寸精度高, 对检测的环境、测量设备和方法要求较高。检验人员需要考虑测量环境, 制定优化测量方法, 熟练应用高精度检测设备进行尺寸检测。

3 数字化制造加工方案

数字化制造是指采用数字化仿真手段对制造过程进行数字化描述的产品制造技术。随着计算机数

字技术、网络信息技术和制造技术的不断融合、发展与应用, 制造企业、制造系统和过程管理不断实现智能化控制, 数字化制造技术在航空、航天和汽车制造等领域得到广泛应用。

(1) 仿真软件应用 基于三维设计环境, 采取计算机编程软件辅助制定加工方案, 通过仿真模拟软件在计算机上模拟零件加工全过程, 可以有效预防零件在加工过程中出现质量问题。

(2) 数控程序鉴定控制 对加工零件所使用的数控程序进行鉴定, 主要从7个方面对其进行检查: ①编程的依据确定。②建立工艺模型。③定义加工操作, 生成刀位轨迹。④后置软件处理。⑤数控加工程序仿真验证。⑥数控加工程序校对核查。⑦数控程序现场试加工及加工程序定型, 形成鉴定有效的加工程序, 从而固化数控加工流程, 保证数控加工的稳定性。

(3) 数字化检测 随着数字化测量设备的广泛应用, 对大型结构件的检测过程中, 充分利用测量机的检测精度和应用范围, 在一次测量工位、稳定的测量环境下, 尽可能多地利用数字化测量设备(三坐标测量机、影像测量仪及三维扫描仪等)对零件进行检测, 减少人工测量可能产生的测量误差, 提高检测质量。

(4) 数字化制造的优点 与传统制造相比, 数字化制造是在“人、机、料、法、环”之外增加了数字化虚拟控制体(计算机、网络、软件、模型、报表和图形组成部分), 将生产过程中的信息转变为数字、数据, 建立一定的数学模型, 进行智能化管理。数字化制造可以帮助制造企业提高制造规划和生产流程两方面的生产管理能力, 其显著特点如下。

1) 采用高性能加工设备, 基于程序控制和刀具转换, 一次装夹定位, 完成多个加工工序, 实现一次加工成形, 减少工装数量, 降低制造成本。

2) 进行数字化制造管理, 减少人为控制或干扰, 加工质量稳定性好, 重复加工精度一致性高, 适应航空航天领域对高精度产品的加工要求。

3) 能够适应多品种、小批量生产过程的快速切换, 减少零件生产准备和工序周转时间, 提高生产效率, 缩短研制周期。

4) 运用数字化加工仿真技术可以对数控加工过

程进行仿真验证, 检验数控加工程序是否正确、切削参数的选择是否合理, 预测刀具寿命, 为在线精度补偿提供支撑, 在实际加工前修正数控程序中的错误, 优化工艺参数, 从而提高加工准确性, 减少废品率。

4 研制过程质量控制方案

首件鉴定是对生产中的第一件(批)零部件(组)件进行全面的把控和成品检查, 以确保生产出符合设计要求的产品^[2], 是对产品试制、复产、生产过程控制及工艺策划有效性评价的常用质量管理方法。对于外形复杂的大型结构件, 结合数字化加工准确性高的特点, 可实施首件鉴定法进行产品质量管控。通过对首批首件加工的全过程质量控制及质量结果判定^[3], 可以有效地判定零件的符合性, 即是否满足设计要求。

(1) 首件鉴定实施过程质量控制记录 主要包括以下几个方面。

1) 过程记录。首件制造过程中发现问题时, 由操作、检验等发现问题的人员填写首件生产过程问题记录表, 对工艺文件、工装和设备等提出存在的问题及改进建议, 工艺技术人员填写处理意见, 检验人员对存在的问题及处理意见进行确认。

2) 尺寸检测记录。按照零件数模及技术条件要求, 检验人员会同工艺技术人员梳理检验质量要素, 通过对零件加工工序产生的尺寸要素(过程尺寸仅测量可不记录, 若对后续加工有影响则需记录)进行逐一测量并记录要素实测值, 填写首件检验报告, 记录图样中技术要求识别的检验要素、涉及的量具等测量设备、测量结果、测量人员及是否具有特性标识等, 直至完成零件所有加工工序流程。

3) 鉴定记录。零件所有加工工序完成后, 将首件生产过程问题记录表、首件检验报告、产品图样以及技术条件等文件资料准备齐全, 提交单位首件鉴定小组进行鉴定审查, 主要从6个方面对生产过程进行检查: ①生产过程是否按章操作。②特殊过程事先是否经过确认。③使用器材是否合格。④生产条件是否处于受控状态。⑤生产过程文实不符现象是否已解决。⑥产品质量特性是否与数模图样相符。单位首件鉴定小组可由技术负责人任组长, 由

设计、技术、检验、生产、热处理和表面处理技术或检验等相关人员组成, 必要时邀请客户代表参加。

(2) 首件鉴定实施过程检验和质量审查控制要点 在首件鉴定具体实施最终阶段^[4], 应依据设计模型和图样要求, 基于生产过程中“人、机、料、法、环、测”等各个环节质量控制记录, 对产品质量特性的形成过程和检验结果与其策划的结果一致性进行全面的审查。

1) “人”为产品制造记录中的操作及检验人员, 应具有相应的岗位资质, 按工艺文件要求进行生产操作和零件测量, 并记录生产过程信息和质量要素实测值, 严格落实自检、互检和专检过程, 以保证生产过程中的质量追溯性要求。

2) “机”指制造所使用的设备、工具等辅助生产用具, 应完好无损且能良好运行, 按要求进行过程和日常使用保养、维护及管理。

3) “料”为所使用的原料、半成品及配件等用料, 所有材料牌号及状态正确, 必要时设置工序(如光谱分析或化学成分分析等)进行复验。

4) “法”即生产过程所使用的设计文件、工艺文件、质量文件及基础性管理文件等文件要求, 文件须完整、清晰且有效, 当生产过程与文件要求不一致时, 应按规定办理更改手续, 进行记录并确认是否落实。

5) “环”指生产现场所处的环境控制, 配套基础设施和工作环境中的温湿度等条件是否符合要求并处于受控状态。

6) “测”指过程检测的质量要素需要选取合适的量具精度和量程, 经过计量部门或测量机构的检定确认和校验, 且在有效期内。特殊测量人员还应具备相应岗位资质, 按照一定测量方法进行检测并规范记录其实测值。

5 批量生产过程质量控制方案

在批量生产阶段, 由于设计定型工作已完成, 设计变更相对较少, 生产线较为平稳, 故在零件首件鉴定合格、数控加工程序固化后, 可利用首件鉴定所检测的合格内外形作为代表性依据^[5], 对后续零件内外形典型显著特征尺寸进行抽查检测。结合数字化加工稳定性高的特点, 对于同一零件, 在制造条件“人、机、料、法、环、测”要素均未发生

变化的前提下,可以采取只验证数控程序“首、中、尾”加工的尺寸要素的方式进行大型结构件产品的检测,该方法可极大提高加工检测效率,减少检验人员的重复操作。

某框产品质量要素分段控制应用实例如图2所示,产品加工工序共由5个数控程序段组成,每个加工程序段需形成100个尺寸要素,整体框共形成500个尺寸要素。以制造条件不变为原则,结合数字化测量设备的检测精度及应用范围,仅对每个程序段中的首段、中段和尾段形成的尺寸选取典型尺寸来验证产品质量,不仅能够满足质量控制要求,还能大幅加快零件生产进度。

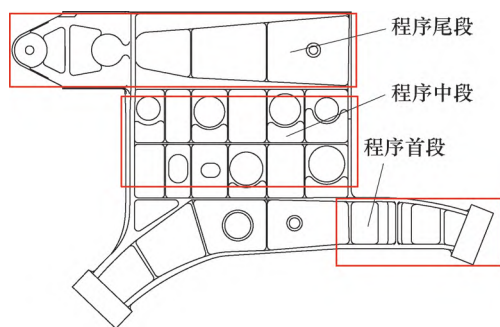


图2 某框产品质量要素分段控制应用实例

6 结束语

通过对多项大型结构件零件的检测方法进行验证及与传统检测方法得出的结果对比,发现数字化制造条件下的大型结构件产品质量控制所实现的产品质量效果稳定,不仅可以验证生产过程具备满足设计要求的加工能力,确保工艺设计、工装设备、操作人员及环境等生产要素持续有效地制造出符合设计要求的产品,而且能针对生产过程的关键点和薄弱点实施重点监控,及时解决生产过程中发现的问题,避免后续生产中出现更大的技术风险和经济损失,提高生产和检测效率,确保产品质量的稳定性和可靠性。

在三维设计环境下摸索产品制造特点而优化传统检验方式,可以保证产品质量的稳定性,提升产品检测效率,规范产品加工环境标准,满足数字化产品制造与检测技术进一步向智能化、高速化、精准化及高质量发展的需求。

参考文献:

[1] 袁立. 飞机数字化制造技术及应用[M]. 北京: 航空

工业出版社, 2018.

- [2] 国防科学技术工业委员会. 首件鉴定: GJB 908A—2008[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2008.
- [3] 姚玉欣, 黄琪. 首件鉴定在柴油机新机型零部件开发中的应用探究[J]. 内燃机与配件, 2022 (17): 14-16.
- [4] 吴瑕, 李开. 浅谈首件鉴定在实践中的应用[J]. 中国科技纵横, 2022 (8): 66-68.
- [5] 万舒玫, 王会东. 首件鉴定管理在试制、试生产和批产过程的应用[J]. 中国新技术新产品, 2014 (2): 171.

MW 20250418

专家点评



文章基于大型结构件的产品质量进行分析,运用数字化制造和质量控制方案,在首件研发和批量生产阶段进行全面质量管控,解决了大型结构件精准检验的瓶颈问题。

文章的亮点是数字化制造条件下的检测模式与质量控制过程,全面分析、深入研究,在三维设计环境下摸索产品制造特点而优化传统检验方式,形成了以信息驱动的数字化加工和检测技术,提升检测精度与检测效率。