

# 壳体数字化工艺设计与制造应用

艾来旺, 丁巍

中国航发西安动力控制科技有限公司 陕西西安 710077

**摘要:** 零件加工工艺设计是一项非常重要的生产技术准备工作, 是生产过程中的关键环节。针对产品信息在全生命周期过程中产生的思维浪费和潜在错误, 基于壳体三维模型的工艺分析, 进行数字化工艺设计与制造应用, 使得工艺设计与制造、工装设计之间建立了紧密的联系。

**关键词:** 数字化; 工艺设计; 并行加工; 工序模型; 特征库

## 1 序言

二维平面工程图是制造业用于描述产品生产制造相关信息的重要依据, 且曾经是唯一依据。产品设计以三维的方式设计出产品, 将其转化为二维图样之后传递给工艺人员; 工艺人员拿到二维图样之后, 首先在思维中转化为三维模型以理解产品和进行工艺分析, 然后编制用于生产作业指导的二维工序卡片; 作业人员拿工序卡片之后, 通常首先要在思维中将其转化为三维模型以理解产品和工艺,

再比对零件实物进行编程加工。然而人的思维是多维的, 产品信息在全生命周期过程中流动时, 传递过程的二维需求和人们理解过程的三维需求产生巨大矛盾, 不断的转换造成了巨大的思维浪费, 同时也容易出现表达不清或表达错误的情况, 更谈不上与设计的协同工作、工序之间并行及工装设计的协同。产品描述信息传递与转化过程如图1所示, 过程中4次转换将产生4次不必要的浪费, 同时伴随着潜在理解错误的危险, 然而这种浪费和错误的代价却

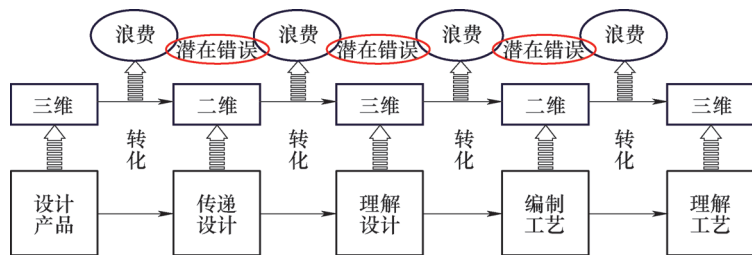


图1 产品描述信息传递与转化过程

一直在制造业存在<sup>[1]</sup>。

## 2 当前工艺设计分析

以壳体制造为例, 当前壳体工艺设计与制造模式为: 工艺人员接到产品设计图进行工艺分析, 根据生产资源编制用于生产现场的工序卡片, 然后再进行特殊的夹具、刀具和量具的工装选用与设计, 下发于生产现场; 操作人员依据工序卡片进行生产准备, 手工编程, 首件实物试切、计量和三检, 最

后正常加工。

此模式存在的问题主要为: 整个壳体工艺设计与制造各环节为串行, 工艺流程设计周期长, 制造过程中工艺错误和加工调试编制错误较难提前控制; 油路孔系加工的顺序和工序间加工时间不均衡, 限制生产计划的安排。

## 3 数字化工艺设计过程

数字化工艺设计技术复合程度较高, 是将技

术和生产准备工作前移至工艺设计阶段，实现工艺流程设计、数字化编程仿真和工装设计并行；基于壳体设计模型，建立统一工序模型，进行数字化编程，以孔系为最小单位编程，进行模块化组合，平衡各工序加工时间，提高生产计划管控效率，减少制造过程工艺编制和调试编程错误。

3.1 集智型工艺流程设计

在工艺流程设计阶段，由产品设计、工艺、生

产管理、工装设计和制造等人员对工艺流程进行集智型工艺设计，分别从产品功能、工艺可实现性、生产管控性、工装快速设计应用以及加工合理性方面综合考评，确定更全面合理的工艺流程（见表1）；识别加工制造中的风险点（存在问题及改进措施见表2），以及特殊的夹具、刀具和量具等，使得工艺流程设计符合生产现场需要，更具指导性和实用性。

表1 工艺流程

| 某壳体工艺方案 |         |        |                                                                                                                                                                      |
|---------|---------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 工序号     | 工序名称    | 设备     | 加工内容                                                                                                                                                                 |
| 0       | 领取锻件    | 生产准备   | 领取方坯200mm×230mm×260mm                                                                                                                                                |
| 5       | 粗铣外形    | 三轴加工中心 | 铣方坯两侧夹紧面及上平面见光，以上平面定位，两侧见光面使用虎钳夹紧，加工以下内容<br>1) 铣3处工艺凸台和外形至图样要求，铣削深度90mm<br>2) 镗2处定位孔 $\phi 11\text{mm}$ 、 $\phi 9\text{mm}$<br>3) 攻2处M12×1.5mm拉紧螺纹                   |
| 10      | 粗铣外形    | 三轴加工中心 | 以5工序的3处工艺凸台面和孔 $\phi 11\text{mm}$ 、 $\phi 9\text{mm}$ 定位，反向拉紧夹具A，加工以下内容<br>1) 铣外形及3处工艺凸台<br>2) 镗2处定位孔 $\phi 12\text{mm}$ 、 $\phi 10\text{mm}$<br>3) 攻2处M12×1.5mm拉紧螺纹 |
| 15      | 去应力     | 自动工业烘箱 | 将壳体装入自动工业烘箱，升温至 $100\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，保温不短于6h，空冷                                                                                                               |
| 20      | 精铣外形及钻孔 | 五轴加工中心 | 以3处工艺凸台面和孔 $\phi 12\text{mm}$ 、 $\phi 10\text{mm}$ 定位，反向拉紧夹具B，加工以下内容<br>1) 精铣外形<br>2) 大孔系铣出比各最小孔直径预留4mm余量的孔，共7处孔系<br>3) 钻各油路孔，共21条油路孔                                |
| 25      | 精铣外形及钻孔 | 五轴加工中心 | 以3处工艺凸台面和孔 $\phi 11\text{mm}$ 、 $\phi 9\text{mm}$ 定位，反向拉紧夹具A，加工以下内容<br>1) 精铣外形<br>2) 其余4处大孔系铣出比各最小孔直径预留4mm余量的孔<br>3) 钻其余15条油路孔                                       |
| ...     | ...     | ...    | ...                                                                                                                                                                  |

表2 加工风险点

| 编号       | 存在问题                                                                        | 改进措施                               | 完成日期     | 责任人 |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------|-----|
| 1        | 锻件使用五轴加工中心2次铣外形，材料去除率达90%，加工余量大，五轴设备瓶颈                                      | 调整为三轴加工中心2次粗铣外形，再用五轴加工中心精铣外形和加工油路孔 | 4月10日    | A   |
| 2        | 某页某视图 $\phi 5\text{mm}$ 孔深200mm，长径比40；某页某视图 $\phi 2\text{mm}$ 孔深120mm，长径比60 | 超细长非标刀具提前采购订制                      | 5月10日    | B/C |
| 3        | 油路块孔底是带钻尖还是平底                                                               | 识别特殊部位，改进工艺模型                      | 4月20日    | A   |
| 4        | 夹具设计                                                                        | 依据编程仿真结果出设计图样                      | 6月1日     | A/D |
| 5        | 电加工电极设计                                                                     | 10处结构需要出电极设计图样                     | 6月10日    | E   |
| 6        | 夹具、电极试验和冲洗工装设计实物制造                                                          | 按生产计划提前完成                          | 7月10日    | F   |
| 编制       |                                                                             | 校对                                 | 批准       |     |
| A x年x月x日 |                                                                             | B x年x月x日                           | C x年x月x日 |     |

### 3.2 并行式工艺规程编制

依据工艺流程对工艺规程分段：粗加工外形→半精加工加工中心部分→电加工、清洁度控制→精加工。4组加工人员按阶段并行进行编制，如图2所示。

(1) 数字化工序卡片编制 基于设计模型的数字化工序卡片需要有以下加工信息：①定位装夹图示，包括定位面、定位孔及XY向坐标尺寸信息。②坐标系设定，包括夹具、压紧点和程序零点信息。

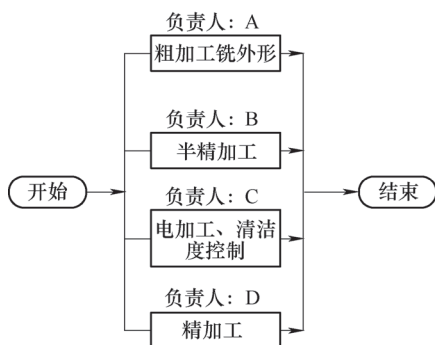
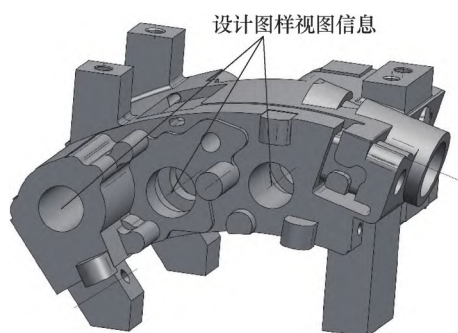
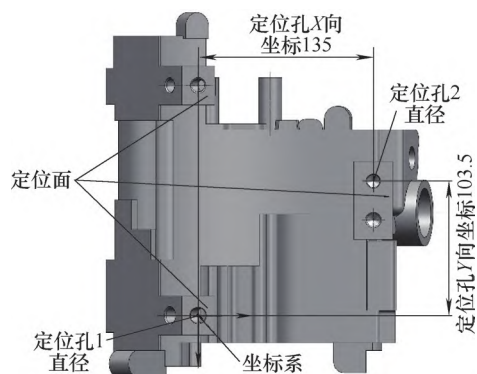


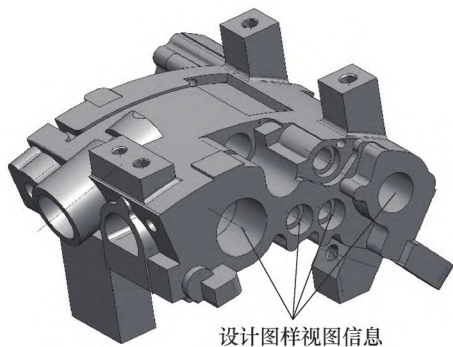
图2 并行式编制



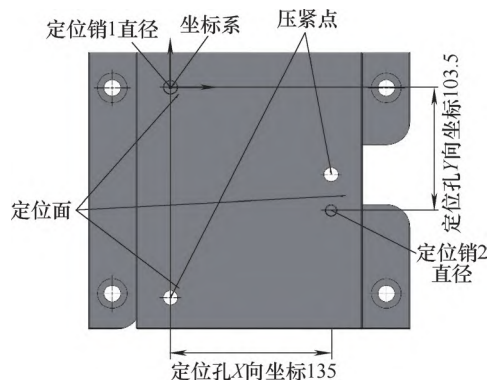
a) 示例1



b) 示例2



c) 示例3



d) 示例4

图3 数字化工序卡片

③加工工步及加工内容包含设计图样视图信息（剖视位置及视图名称）的模型通透显示（见图3），其中刀具清单可在数字化编程阶段由UG编程软件按装夹信息自动输出。

(2) 工序检验单编制 数字化卡片编制时还需要编制工序检验单，编制工序卡片时一并识别出实物检测尺寸，可以汇总输出测量单（见表3）和尺寸检验单（见表4）供实物检测使用。

### 3.3 协同式数字化编程及仿真

(1) 数字化编程 工艺人员进行工艺设计时，可以基于设计三维模型关联设计工艺，对于机械加工工艺，工序模型包含毛坯模型粗加工模型、半精加工模型、精加工模型及其他下游工装设计的模型，分段建立多个工序模型可以实现多人协同编程。目前工序模型的建立有两种方法，一种是减材建模，首先建立毛坯，然后在这个特征上运用布尔运算中的相减生成工序模型；另一种是增材建模，运用直接建模建立实体模型，然后结合加工步骤和

表3 测量单

|      |                                                                                                                                                                                                   |       |        |         |                                          |      |                |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|---------|------------------------------------------|------|----------------|
| 委托单位 | ***                                                                                                                                                                                               | 委托人   | G      | 委托日期    | x年x月x日                                   | 测量日期 | x年x月x日         |
| 零件名称 | 壳体                                                                                                                                                                                                | 产品型号  | ****   | 零件号     | ****                                     | 数量   | 1              |
| 批次号  | 23-01                                                                                                                                                                                             | 测量设备  | 三坐标测量机 | 测量者     | H                                        | 校对者  | K              |
| 定温   | 2h                                                                                                                                                                                                | 温度    | 20~22℃ | 湿度      | 40%~60%                                  | 测量依据 | GB/T 1958—2017 |
| 零件标识 | 23-01-01                                                                                                                                                                                          | 工序号   | 20     | 测量基准    | 定位孔 $\phi$ 10mm, $\phi$ 8mm (135, 103.5) |      |                |
| 加工状态 | <input type="checkbox"/> 对刀件 <input checked="" type="checkbox"/> 正品第一件 <input type="checkbox"/> 试验新程序 <input type="checkbox"/> 更换工艺加工 <input type="checkbox"/> 更换机床加工 <input type="checkbox"/> 其他 |       |        |         |                                          |      |                |
| 序号   | 气泡编号                                                                                                                                                                                              | 图样区域  | 标准值/mm | 公差上限/mm | 公差下限/mm                                  | 测量结果 | 备 注            |
| 1    | 73                                                                                                                                                                                                | 1页主视图 | 48     | +0.3    | −0.3                                     |      |                |
| 2    | 51                                                                                                                                                                                                | 1页主视图 | 14.7   | +0.1    | −0.1                                     |      |                |
| 3    | 74                                                                                                                                                                                                | 1页主视图 | 74.5   | +0.3    | −0.3                                     |      |                |
| 4    | 52                                                                                                                                                                                                | 1页主视图 | 21.9   | +0.1    | −0.1                                     |      |                |

表4 尺寸检验单

|      |      |       |        |          |         |        |      |      |
|------|------|-------|--------|----------|---------|--------|------|------|
| 产品号  |      | ***   | 零件名称   | 壳体       | 设备型号    | 五轴加工中心 | 工序版次 | II   |
| 零组件号 |      | ***   | 零件标识   | 23-01-01 | 批次号     | 23-01  | 工序号  | 20   |
| 序号   | 气泡标号 | 图样区域  | 标准值/mm | 公差上限/mm  | 公差下限/mm | 检验频次   | 工具   | 实测结果 |
| 1    | 189  | 1页俯视图 | 250    | +0.5     | -0.25   | 首件     | 高度尺  |      |
| 2    | 172  | 1页俯视图 | 164.5  | +0.5     | -0.5    | 首件     | 卡尺   |      |
| 3    | 107  | 1页左视图 | 200    | +0.5     | -0.5    | 首件     | 高度尺  |      |
| 4    | 158  | 1页俯视图 | 20     | +0.2     | -0.2    | 首件     | 卡尺   |      |

加工余量逆向建立工序模型。本文运用增材建模建立壳体的工序模型。在实际的生产加工过程中，应遵循先粗后精、先主后次和先面后孔等顺序原则，建模也需要遵循相应的顺序<sup>[2]</sup>。

为实现工装设计与工艺设计的并行和协同，最佳的关联关系是工装数模与工艺模型都是基于产品模型进行设计，因此工装设计与数字化编程一同进行<sup>[3]</sup>，使得制造环境更加真实可靠。

壳体毛坯为方坯，外形铣削材料去除率达70%，共有油路孔36条。粗加工阶段先粗铣外形，整体留余量1mm，进行一次去应力；再进行精铣外形、36条油路孔和大孔系开粗的加工，再进行二次去应力。

所有油路孔在粗加工完成后，半精加工阶段可以5个矢量方向的加工特征并行加工，互不干涉，且每工序加工时间均衡，差异不大于20%，方便生产计划管控。

（2）仿真验证 数字化编程完成后，用VERICUT软件进行多工位仿真验证（见图4），提

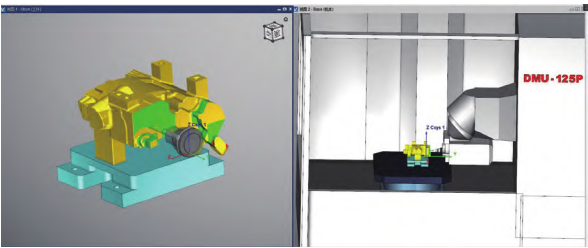


图4 仿真验证

前规避错误及风险，然后再上机完成实物试切验证。

#### 4 应用成果固化

提取粘胶密封堵头类油路孔特征（见图5）编入制造特征库，固化加工方法：①用铣刀划窝1.5倍径深度，作为钻头引导孔。②用短钻头预钻，钻孔深度为总深度的1/3。③用长钻头钻至总深度。④用铣刀铣沉头孔，留余量0.2mm。⑤用铰刀铰沉头孔。⑥用倒角刀铣倒角。

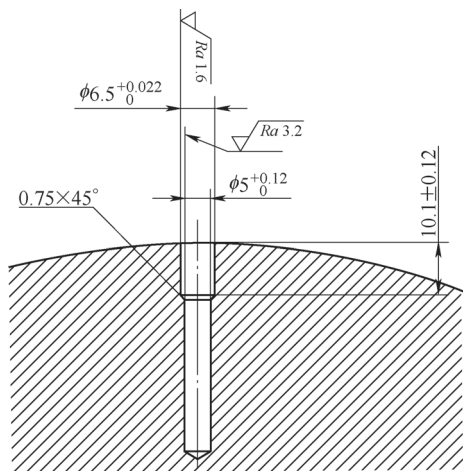


图5 制造特征

提取特征加工方法形成编程模版。基于生产现场设备刀具库实物在UG中建立DMU 60FD、DMC 64V和C42U共3台设备刀具库；经过实物试切验证，修改完善了DMU 60FD、DMC 64V和C42U共3台设备的后处理程序；完成一本结构化工艺规程，10道工序的数字化编程及仿真，4套夹具设计。

#### 5 结束语

通过集智型的工艺流程设计-流程评审-流程合理化改进，确定壳体整体工艺流程。改善设计模型工艺性，分段建立机械加工工艺模型，多模块协同进行数字化工艺设计，实现了多人协作多模块并行处理，可推广至壳体高效加工工艺技术应用。

##### 参考文献：

- [1] 惠巍，王彦，陶剑，等. 航空制造领域中三维工艺技术的应用[J]. 航空制造技术，2013（13）：43-46.
- [2] 曾芬芳，郑志镇. 基于特征的三维工序模型自动生成技术的研究与应用[J]. 制造技术与机床，2022（10）：152-156.
- [3] 马伟，孙彦锋. 基于三维模型的数字化工艺建设与实践考虑[J]. 黑龙江科技信息，2016（16）：96-98.

MW 20241027

（上接第63页）

G90G0Z100.  
M05  
M30

#### 4 加工结果说明

经过不断优化加工数控程序，轮毂主轴孔 $\phi 1520H7^{+0.125}_0$ mm加工完成，经过测量，该轮毂内孔止口X、Y方向直径公差为0.10mm，未超出公差要求0.125mm，零件加工合格。

#### 5 结束语

本文以某3.0MW风力发电机组轮毂主轴孔 $\phi 1520H7^{+0.125}_0$ mm内孔止口铣削加工为例，介绍了一种降低铣削大直径内孔圆度误差的一种新思路、新方法。并基于R参数程序、双刀补，对内孔止口采

用多段式铣削方式，进行修正，降低圆度误差，从而保证产品加工质量。同时对解决类似的铣削内、外圆误差问题有很好的借鉴意义。

##### 参考文献：

- [1] 李行雨. 5MW风力发电机组变桨轴承性能分析及轮毂结构优化设计[D]. 郑州：河南工业大学，2024.
- [2] 沈建峰，虞俊. 数控铣工/加工中心操作工（高级）[M]. 北京：机械工业出版社，2007.
- [3] 王佳伟，聂申成，赵素荣. 偏心等距螺旋曲线在大直径内孔铣削加工中的应用[J]. 金属加工（冷加工），2016（S1）：127-130.
- [4] 弋博. 加工中心圆度误差的原因分析及调整方法[J]. 金属加工（冷加工），2020（8）：75-77.

MW 20241009