

# 机匣件加工全过程多工序仿真及验证

## Multi-Process Simulation and Verification Throughout Engine Case Machining

■ 张露 李山 张思琪 陈冰 / 西北工业大学 杨毅 / 中国航发西航 朱宇 / 中国航发研究院

航空发动机机匣件的多工序连续工艺仿真技术的应用能够虚拟验证产品可制造性，有助于提前预判机匣件加工制造过程中的问题和对机匣件制造全过程的工艺路线和工艺参数实施全局优化，是突破传统制造模式、实现虚拟制造的重要手段。

航空发动机机匣的加工制造过程由多个工艺和工序组成，涉及机械加工和热处理等。其中，影响机匣变形的因素主要有切削过程中的切削速度、进给量、切削深度以及切削路径设置和工装夹具，尤其是加工过程中所产生的残余应力在工装夹具卸载后重新分布，是导致机匣件加工精度保持性差的主要原因，甚至会直接导致机匣件报废。因此，针对机匣件多工艺加工过程中残余应力变形预测与控制是航空发动机精密加工技术亟待解决的问题。

### 机匣件加工工艺性分析

以航空发动机外机匣前端典型件为例，总体结构由圆锥形体及端面安装边构成，采用数控车削加工，型面上多处异形凸台、安装座等采用数控铣削加工，机匣件材料为高温合金GH4169，最薄壁厚为2.2mm，最大直径为750mm，高度为220mm，属于典型的薄壁件。该机匣件多工序加工工艺流程如图1所示，制造过程中存在很大的变形风险。机匣件精加工大端及内型面上半部分时，机匣件小端变形最大，为控制其加工变形，改善零件超差问题，采取

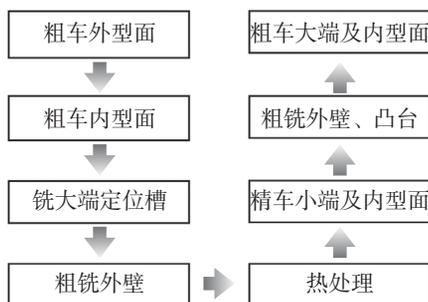


图1 机匣件加工工艺流程

增加内部辅助支撑的方法，增加机匣件内部刚性以抵抗加工过程中产生的变形，从而提高机匣件的工艺稳定性、质量合格率。

### 机匣件加工多工艺关键技术

采用基于空间映射的多工艺仿真方法，涉及仿真模型预处理、多工艺路线仿真、基于全流程仿真的工艺方案优化等多项关键技术。

模型预处理包括仿真模型构建和仿真环境处理。仿真模型构建是指机匣件加工多工艺仿真过程中需要构建每一道工序的零件模型和用于加工残余应力施加的片体文件模型，以便于分析每一道工序后零件模型在材料去除过程中的应力应变情况。仿真环境处理包括机匣件初始应力数据处理、材料切削性能参数确定、模型有限元网格参数调试，

使得仿真结果数据与实际加工数据相互贴合。

多工艺路线仿真包括材料去除过程中残余应力逐步释放后零件内应力分布的模拟技术、零件表面施加加工残余应力后应力的重分布以及上游工序与下游工序之间的应力应变传递方法。

全流程仿真工艺优化是指仿真过程中需要确定每道工序中机匣零件的切削参数、调整切削路径以及辅助支撑装夹方案、找出应力应变控制最优的工艺路线，改善由于实际加工过程中残余应力而造成的变形。

### 机匣件多工艺仿真流程

#### 机匣件仿真模型预处理

机匣件多工序仿真前，需要建立有限元分析模型，对模型文件进行预处理，材料切削参数赋予，模型参数的数量级的确定。参数数量级不仅会影响仿真效率，如果设置有误将导致仿真中断甚至无法进行仿真。机匣件多为薄壁件且外型面复杂多样，对模型文件进行有限元网格划分具有一定难度，有限元网格质量直接会影响仿真运算的效率和结果的有效性。因此需要对网格

质量进行检查,在复杂结构或变形梯度较大或关键模拟区域的网格应适当细化,不同单元尺寸网格的过渡区域变化应均匀、无突变、尖角。有限元仿真过程中,在保证不影响实际生产加工工艺特征的前提下,可以对模型进行适当简化以缩短计算量并保证仿真精度,处理后的工艺仿真模型如图2所示。

### 材料去除过程模拟

在切削加工过程中,材料的去除是一个动态过程。对于大多数静态和非线性瞬态分析来说,其基本过程与相应的分析过程是一致的。机匣件多工艺仿真过程中采用“单元生死”模拟各单工序中材料去除过程,将要去除的材料单元“杀死”。实现方式为计算时将该单元的刚度矩阵乘以很小的因子,将不再对其他单元的计算产生影响。实际的材料切削过程是一个连续的进给过程,在有限元仿真分析模型中,利

用“单元生死”模块将连续的切削进给分为一系列离散的“分析步”。在Abaqus有限元软件中,将每次要去除的单元放到同一层中,每去除一层单元,有限元将其作为一个分析步计算一次。随着分析步的建立与计算,工件材料将按照刀具轨迹依次按步被切除,随着模拟过程中材料的去除,残余应力逐层释放。

### 仿真过程中约束转换

在整个工艺流程中,上游工序和下游工序的机匣件的装夹方案以及装夹位置不同,因此在单工序仿真结束后需要释放机匣件的边界约束条件,使其回复到自由状态。但由于材料去除会导致机匣件内应力不再平衡,装夹状态下由于夹具的约束,夹持应力与零件内应力平衡,加工完成后释放夹具,零件内应力再平衡将会导致机匣件产生变形。

### 加工残余应力施加

基于工况映射与薄壳应力贴合

的加工残余应力施加,将加工表面划分为不同区域,然后用薄壳绑定贴合的方式对机匣件施加加工残余应力,利用薄壳单元的应力状态为平面应力状态的特性,实现曲面类零件的残余应力场的贴合,从而达到机匣件外型面复杂结构加工残余应力的施加。目前的有限元软件中,对实体单元的应力和应变分量定义都是基于全局坐标系,使得加工残余应力场向实体单元施加时难以灵活改变作用方向。与之不同的是,薄壳单元的应力和应变分量是基于薄壳本身的局部坐标系,且薄壳单元的正应力状态为平面应力状态,这与目前可有效测量的工件表层应力状态一致。另外,薄壳单元可以设定一定的厚度,成为带厚度的薄壳单元,这与残余应力场测定时电化学腐蚀应力层形成了对应,利用带厚度的壳体单元可在有限元分析中实现加工残余应力场的准确施加<sup>[1]</sup>。



图2 机匣工艺仿真模型

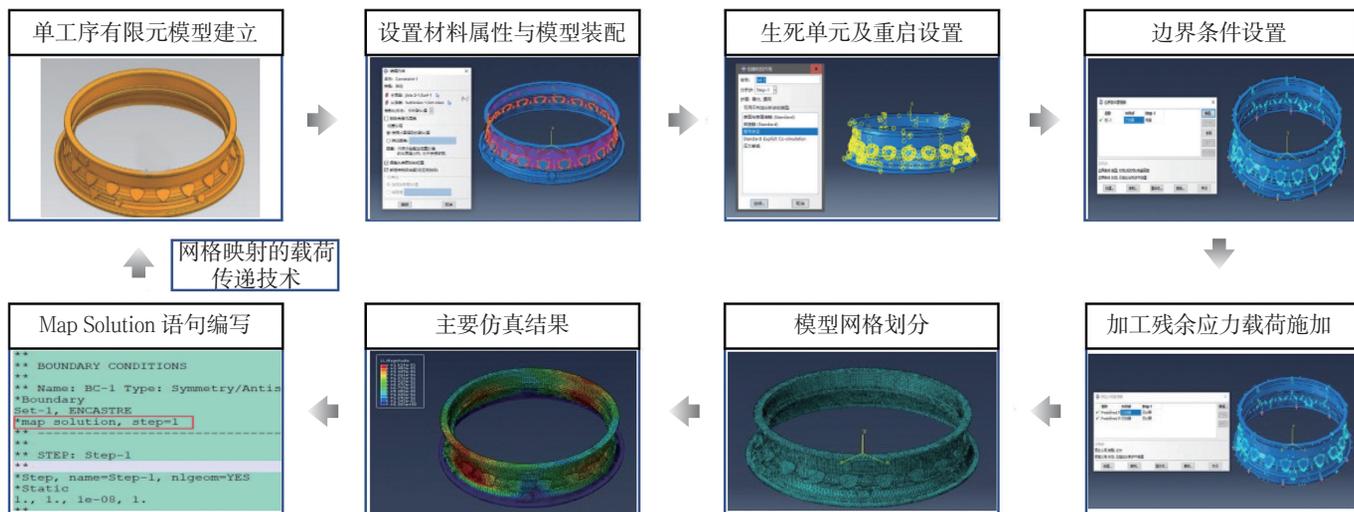


图3 空间映射技术流程

### 基于网格映射的载荷传递

机匣件加工的多工艺仿真中需要将上游工艺仿真得到的应力应变传递到下游工序中，依此类推得到零件最终工序的变形情况。为有效解决不同网格模型之间的数据传递，提出基于空间的网格映射技术，利用理论模型与相邻工序间网格模型的差异，基于统一的几何模型与工序位置，依据空间插值关系将网格节点及其包含的几何信息、物理信

息向仿真模型一一映射。其中包含不同工序模型间的残余应力、变形等仿真参数，实现中间工序模型的传递，形成统一化的仿真模型与仿真数据。

基于网格映射的空间载荷传递技术主要原理是利用网格与网格之间的数据传递方法。网格数据传输方法大体上可划分为距离法、加权余量法以及径向基函数法等。数据传递具体实现方式为首先利用特定

的搜索方法进行预接触搜索，将网格信息以一定的方式进行处理，加快关联过程的求解，接着为每一个节点或单元寻找匹配的网格，网格数据传输将发生在各自的匹配网格间，最后在匹配的网格间进行满足特定规则的数据交互。在Abaqus软件中空间映射技术具体流程如图3所示。

### 机匣件加工多工艺仿真验证 基于仿真模型试验验证

在基于全流程仿真的工艺验证当中，选用精铣外壁工序进行重点分析和评估。机匣件关键尺寸参数  $H_1$ （机匣件径向尺寸）、 $H_2$ （机匣件轴向尺寸）如图4所示，精铣外壁前和精铣外壁后的径向尺寸和轴向尺寸仿真模拟结果和试验验证对比如表1所示。经过比较，可以看出仿真模拟的几何形状与试验结果具有较好的一致性，机匣件在加工结束后发生轴向拉伸和径向压缩，从表1可以看出仿真得到的结果与试验结果较为接近，仿真模型预测精度可达到80%以上，符合实际加工过程技术指标要求。试验验证仿真模拟效

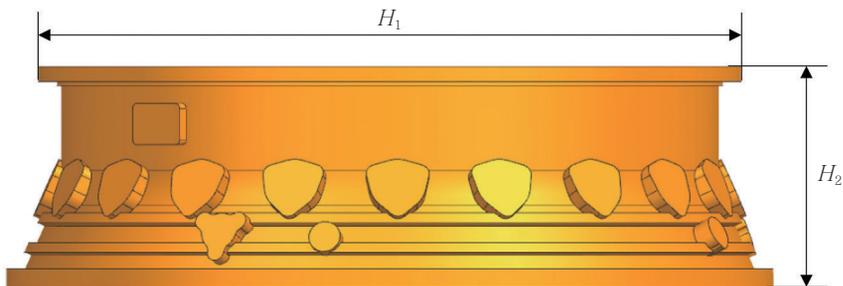


图4 机匣关键尺寸

表1 工艺验证数据对比

关键尺寸参数	仿真结果测量值/mm		验证试验测量值/mm		预测精度
	精铣前	精铣后	精铣前	精铣后	
H1	$\phi$ 683.8	$\phi$ 683.688	$\phi$ 683.8	$\phi$ 683.7	89.2%
H2	214.25	214.236	214.25	214.238	85.7%

表2 工艺试验数据对比

关键尺寸	公差范围/mm	仿真结果测量值/mm		变形减少值	验证试验测量值/mm		变形减少值	预测精度
		无支撑	有支撑		无支撑	有支撑		
径向尺寸	$\phi 683.8-0.2$	$\phi 683.688$	$\phi 683.71$	0.022	$\phi 683.7$	$\phi 683.718$	0.018	81.8%
轴向尺寸	$214.2+0.05$	214.236	214.218	0.018	214.238	214.217	0.021	85.7%

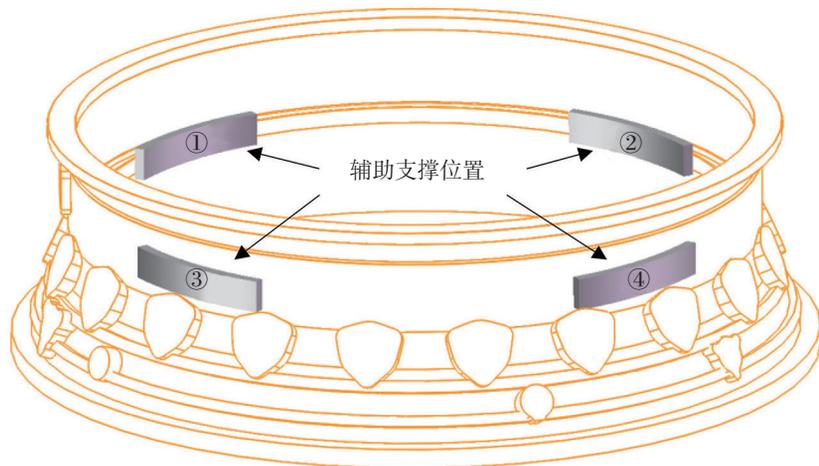


图5 机匣件精铣外壁辅助支撑优化布局位置

果良好，可以精确地描述试验结果，所做的仿真模拟可以为实际加工提供理论与科学指导。

### 基于仿真的装夹布局优化与验证

机匣件装夹布局优化往往以工件的受载变形作为布局优劣的评价指标，也即优化目标函数。由于机匣件形状复杂、切削过程多态耦合、工件刚度变化，极难建立起装夹参数与工件加工变形之间的解析模型。因此，常用可行的方法是采用有限元方法建立静态或准静态的机匣仿真模型，然后通过仿真得到机匣在不同装夹方案下的加工最小变形，以此作为目标函数，最后采用智能算法对装夹方案进行优化<sup>[2]</sup>。

基于Matlab联合Abaqus进行机匣件精铣外壁、凸台有限元仿真，采用遗传算法对该数目下的支撑布局进行优化。若该支撑数目下经过

布局优化后能够充分满足加工精度要求，则逐步调整支撑位置，重新进行布局优化，直至获得能够满足加工精度要求的最佳支撑布局。若机匣件切削仿真计算速度过慢，也可考虑采用代理模型的计算方法，加快优化速度。通过开展精铣外壁、凸台夹具的辅助支撑优化试验，发现支撑数目为4时、支撑位置为圆形对称且均匀分布时，控制机匣的变形效果最优，辅助支撑布局位置如图5所示，有无辅助支撑仿真模拟结果与试验结果见表2。

从表2数据可以看出，仿真模拟得到的参数值与试验结果较为接近，并且预测精度高达80%以上，满足实际加工过程中技术指标要求，表明仿真模拟效果良好，可以精确描述试验结果，所做仿真模拟可以为试验提供理论与科学指导。同时，

通过工艺试验可看出，经过精铣外壁夹具（辅助支撑）优化，提高机匣件结构刚性，有效抵抗切削加工中的变形，从而提高机匣件的关键尺寸加工精度，改善加工质量，提高产品的工艺稳定性，提高产品合格率。

## 结束语

航空发动机机匣件属于典型的环形薄壁件，如何通过仿真进行薄壁件加工变形预测与控制是工程技术领域亟待解决的关键问题。实践表明，利用多工艺仿真联合仿真技术进行实践能够实现机匣件工序方案在仿真环境下的工艺仿真，并通过试验验证了仿真精度，且以仿真驱动实现了装夹布局优化，有效地解决了机匣件加工制造中产生的变形问题，提升了航空发动机关键构件工艺设计水平。

航空动力

（张露，西北工业大学，硕士研究生，主要从事航空发动机薄壁件加工变形仿真与控制技术研究）

## 参考文献

- [1] 王骏腾. 薄壁件铣削残余应力变形预测与控制方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
- [2] 郑志阳. 基于GA-SVR的薄壁件叶片辅助支撑布局优化方法[D]. 西安: 西北工业大学, 2022.