数控仿真

航空结构件数控程序的仿真及优化研究

高质量、高效率、低成本一直是制造企业的发展的关键。以提高生产效率、降低成本为目标，基于 Vericut 软件 Force 模块，综合分析数控程序，研究了航空结构件数控程序的仿真及优化。结果表明可以通过软件仿真对程序中的进给量及切削速度数据的优化，达到优化切削力、平衡负载、节约加工时间并减少刀具磨损的效果，最终提高数控生产效率并降低刀具成本。

更多精彩请扫描二维码

文 | 上海飞机制造有限公司 李正官 安秋娴 刘哨巡 刘吕果 周湧

目前，数控机加部门广泛使用 Vericut 仿真软件完成刀具路径的计算和仿真分析，主要目的是模拟数控程序在机床中的加工情况，对刀具、机床、工件及工装之间的干涉碰撞进行检查。但此类仿真只是在进行了刀具路径的几何仿真，加工过程中的各类物理特征，如切削力、切削温度、切削平稳性等无法得到。传统切削试验的方式能够得到切削过程中的切削力、切削温度和刀具磨损率等数值，却也有着高成本及低效率的缺陷，不能够满足大规模生产的需求。

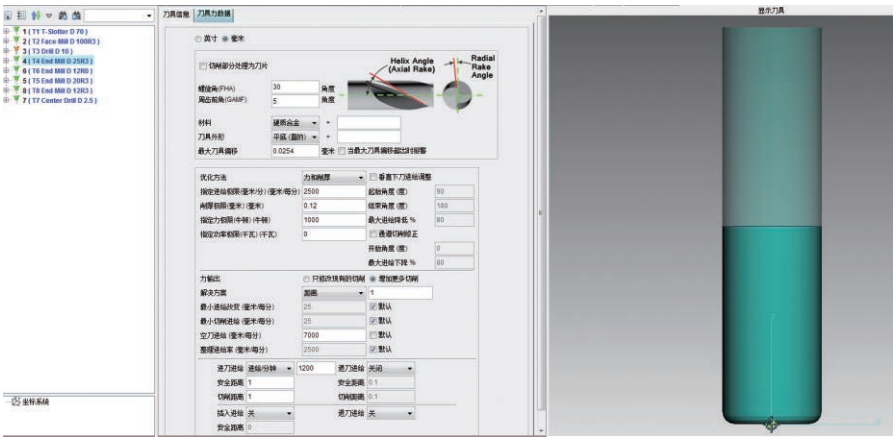

图 1 刀具力数据设置

通过 Vericut 软件的 FORCE 模块，综合分析工件、刀具、材料数据及 NC 程序，得出 NC 程序的切削力、进给力、材料去除率及温度峰值等数据。通过对 NC 程序中的进给量及切削速度数据的优化，可以使切削力、温度得到改善，平衡负载，降低振动，节约数控加工时间并且得到可以直接进行加工的优化 NC 程序。这对提高数控加工效率、减少刀具磨损具有重大的意义。

切削力优化原理

Force 功能使用的材料数据来源于真实的加工实验结果，它是基于工件材料属性，并进行过多次迭代验证，可以实时准确的采集每一行 NC 代码在加工过程中的切削总力、轴向力、径向力、*X/Y/Z* 矢量力及扭矩等信息。

得到一个有效而可靠的加工，需要优化的最重要参数包括了最大切削厚度。在整个机加切削过程中，使最大切屑厚度保持在一个固定的合理值上时，才能使之成为有效率的切削。

设计变量是在设计过程中可以进行调整和优选的独立参数，设计变量的多少，决定了设计的复杂程度。在保证设计条件的前提下，应当尽可能的减少设计参数的量。影响切削效率的最主要因素有切削深度、切削宽度、进给速度。所以在基于 VERICUT 软件的仿真优化设计数学模型里，优化设计变量为 X=[n，Ad,Rw,F]T，式中 n 为主轴转速，Ad 为切削深度；Rw 为切削宽度；F 为进给速度。

设计方案的评价指标称为目标函数，一般有单目标和多目标之分。基于 VERICUT 的数控程序优化设计数学模型以的前提为保证加工质量，同时提高加工效率，减少机械加工时间为本次优化设计的目标。其定义为：T（X）=T[n,Ad,Rw,F]T，式中：T（X）为目标函数，优化设计目标为优化以后机加时间减少 1/4 以上。约束设计变量的取值称为约束条件，一般有不等式和等式约束两种，本次设计变量需满足条件有：切削宽度约束为 g1（x）=D-Rw≥0，式中 D 为刀具直径；切削深度约束 g2（x）=Δ-Ad≥0，式中 Δ 为切

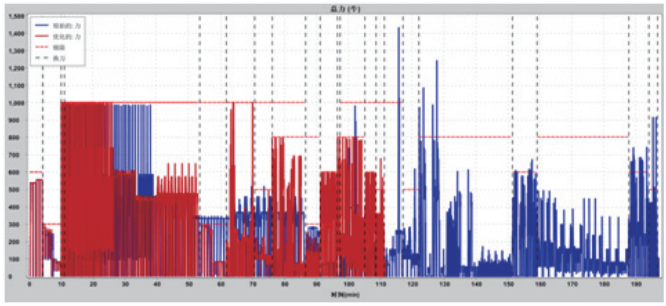

图 2 切削力时间历程图

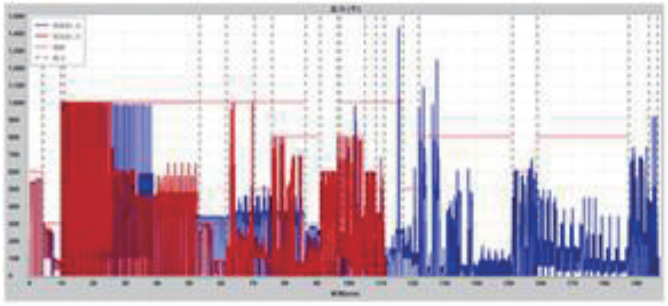

图 3 最大削厚程序步历程图

削余量；

3、进给速度约束 g3（x）=F-Fmin ≥ 0,g4（x）=Fmax-F ≥ 0, 式中 Fmax、Fmin 为机床允许的最大、最小进给速度。

航空结构件仿真及优化实例

加强肋是航空零件中比较典型的零件，其主要作用起到加强和支撑的作用。加强肋具有典型的框架类特征，这类零件在编程时并不复杂，仅靠 CATIA 编程很难进行优化、提升加工效率。利用 Vericut 软件对零件数控程序进行仿真，并设定提高生产效率为目标，通过最大切削力、最大进给、最大切削厚度及空刀进给速率等约束条件，优化进给参数，最终减少切削时间，提高生产效率。通过 VERICUT 对数控程序行仿真优化，设定恰当的约束条件和目标值是关键点。VERICUT 仿真时需使用与编程时相同的刀具、加工坐标系，来保证仿真时的数控程序真实有效可加工。

Force 功能以设定的最大力值和切屑厚度为目标，通过分析刀具和材料的接触面积，考虑摩擦和温度的影响，以最大切削力极限、最大进给速度和最大切削厚度为约束，采用单目标或多目标优化算法，计算最大的可靠进给速度，并插入到 NC 程序中来改善程序质量。

基于 force 模块优化分为两个步骤：建立优化刀具库；调用优化刀具库进行 NC 程序优化。VERICUT 优化刀具库用于设置不同刀具在不同切削情况下的进给速度和主轴转速等优化数据。本文结合现场加工经验并通过对优化参数的不断调整，仿真加工确定了最佳优化参数。如图 1 所示，对 4# 刀具进行的仿真优化参数设置，其中将最大进给极限设置为 2500 mm/min，最大削厚为 0.12 mm，最大切削力为 1000 N，优化空刀进给设置为 7000 mm/min。依次完成刀具库中其他刀具的参数设置，就建立了优化刀具库，调用优化刀具库就可进行该零件曲面加工程序的优化。

当切削力未到达最大切削力极限时，提升每齿进给（相当于改变进给速度），使切削力趋向于最大切削力，直到约束条件限制（最大切削力、最大进给速度）；当切削力超过最大切削力极限时，则降低每齿进给（相当于改变进给速度），使切削力趋向于最大切削力，直到约束条件限制（最大切削力、最小进给速度）。

仿真优化的结果如图 2 和图 3 所示。在图 2 中，原始程序所仿真出的切削力为蓝色曲线，优化程序所仿真出的力为红色曲线，从图中可以看出，原始程序（蓝色曲线表示）所用加工时间为 197min，而优化后程序（红色曲线表示）所用的加工时间为 112min，时间效率上提高了 43%。

图 3 为切削力程序步历程图，既每一个程序步的切削力值对比图表，从表里可以看出，优化前程序的切削力峰值明显大于优化后的切削力峰值，且优化后的切削力峰值降低到限定的最大切削力。峰值切削力的降低可以降低刀具在某一时刻的受力突变，减少震动，从而降低刀具磨损。

仿真验证对象试验件（图 4）采用 VDL 1200 三轴数控机床（图 5）进行数控加工，试验分为两步：第一步用 Catia 编制的原程序进行试验件加工，记录原程序加工时间；第二步更换同种类型的新刀具，采用 Vericut 优化后的新程序进行试验件的加工，记录优化后程序的加工时间。

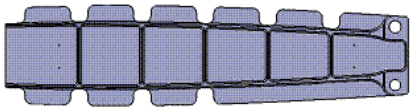

图 4 试验件

图 5 VDL 1200 机床

通过数控仿真软件进行优化后，典型肋试验件的优化前后的加工时间有明显的减少，加工效率提升了 41%。通过对程序优化前后的零件加工，对 3 个试验件的刀具使用情况进行测量和分析，从而验证数控程序的仿真优化对刀具磨损量的影响。综上所述，刀具在优化后的磨损量明显小于优化前，这就大大的可以增加了刀具的寿命。

通过对航空结构件的数控程序进行模拟仿真优化，得到加工过程中的物理参数（如切削力、切削厚度、功率等），设定优化值，优化数控程序，能够提高加工效率。通过对航空结构件的数控程序进行模拟仿真优化，降低数控加工中设备的切削力峰值，减少震颤，提高刀具使用寿命，降低制造成本。MM