切削力仿真快速精确优化技术应用

张永岩，方芳，王振林，王庆有，李福春，杨双
哈尔滨飞机工业集团有限责任公司　黑龙江哈尔滨　150066

摘要： 针对当前使用VERICUT软件中的数控仿真优化功能，在进行切削力优化时工作效率低的问题，提出了一种能快速标识不同加工工况、调用相应参数进行NC代码优化的方法，结合加工经验、切削参数以及切削试验数据，系统建立了典型场景的切削优化参数库，实现了仿真优化过程的快速调用，提高了优化效率和加工准确性。

关键词： 数控仿真；切削力优化；快速调用；快速识别

1　序言

在目前的航空零件数控加工中，普遍采用CAM软件进行数控编程，该软件仅能根据进退刀以及抬刀速度等固定加工参数、结合加工策略定义生成加工程序，不具备在恒定切削量、切削力条件下进行瞬时切削参数调整的能力。数控程序无法根据每一条加工刀路所在状态下的切削余量及受力状态不同进行进给速度的适应性调整，在实际加工中经常会出现因局部位置的切削余量过大造成主轴负载过高，从而导致零件加工精度受到影响，甚至出现刀具折断、崩刃或主轴闷停、受力保护等现象。为保证所有加工部位能够顺利完成加工，有时设定的切削参数会趋于保守，复杂腔体在加工中会出现大量的空走刀路径，此类空走刀路径多以加工速度运行，这类情况会造成加工时间显著增加，虽然主轴运转率很高，但机床平均材料去除率低，低效率切削易造成数控设备资源的浪费，增加生产成本[1]。

针对此情况，在数控加工领域出现了两种提高数控程序加工效率的方法：①根据实时采集的主轴功率等参数进行进给速度优化，使用安装在机床端的OMATIVE自适应控制系统[2]。②通过离线优化软件进行仿真优化[3]，如国际上主流的数控仿真软件VERICUT和NC SIMUL等，均推出了基于原有切削仿真功能基础上的数控程序优化功能，仿真优化功能在切削加工领域得以应用[4]。以VERICUT软件为例，最新的FORCE优化功能针对设定好的材料、刀具和加工条件，通过保持现有的刀具轨迹和最大切削厚度，合理计算出当前每一条程序段的进给速度值，同时要保证将切削力及优化程序中的空切行程速度控制在限定范围内，优化完成后还可以查看进给速度、切削力、材料去除率、功率、扭矩以及刀具偏摆情况，评估当前优化状态，最终得到运行更安全、加工更高效的数控程序[5-9]。在使用FORCE优化功能时，需要预先对加工材料和刀具信息进行准备，并对刀具可承受的最大切削力、切削厚度等加工条件进行评估，在基础优化参数库不完善的情况下，重复性工作量大、优化效率低且优化参数选择合理性差。FORCE优化功能虽然将每把刀具的优化参数管理并形成优化参数库，并提供了区别粗、精加工，不同材料等条件的管理及调用优化方法，但便利性和直观性不足。

本文以刀具种类、刀具号等及切削性能基本保持不变的典型柔性生产线应用场景为研究对象，研究VERICUT软件中基于刀具优化参数库构建方法的FORCE优化功能，以及在不同切削材料、加工状态下自动识别及直观显示的方法。目标通过系统构建优化参数库并优化调用方法的方式，提升工艺优化效率和优化结果准确性。

2　VERICUT刀具库的优化参数及管理调用方法

在VERICUT软件的FORCE功能中，已提供了

大量的常用材料基础优化库，可以结合当前特定数控设备中的各类材料和规格的刀具切削参数积累加工经验，在FORCE功能中经过分析、筛选并结合必要的针对性切削试验，可筛选形成刀具的初步优化参数推荐值，在实际编程优化应用中，对参数进行不断的迭代优化。VERICUT软件将这些优化参数与刀具库中的刀具关联，既能管理这些优化参数，又方便调用[10]。

当使用的机床、刀具规格、切削材料以及加工状态等工况发生变化时，相应优化参数都会不同。VERICUT软件中的管理优化参数如图1所示，对应T10号刀具，可在其下管理7075、 2024铝合金在粗、精加工时的优化参数，其他刀具均可按照此方法在同一刀具库中进行管理。在激活优化功能时，可在数控程序中通过定义VERICUT软件专用的命令调用指令来控制优化过程。例如定义注释性语句：（VERICUT-OPTIPATH DESC= T10 End Mill D 10R1_AF1250-rough）来选择激活调用4组优化参数中的第1组优化参数。

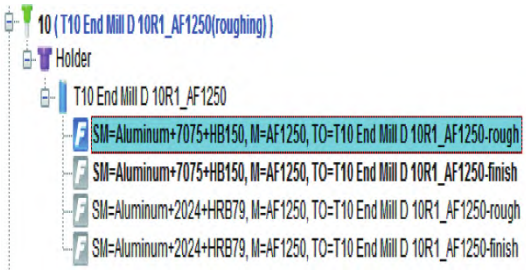


图1　VERICUT软件中的管理优化参数

特殊情况下，如工艺人员希望关闭某条精加工优化程序时，可用VERICUT-OPTIPATH中的on或off语句来开启或关闭优化过程。

在这种管理方式下，存在的不足之处是：当零件的加工程序较多、工序较复杂时，在结果显示界面，粗、精加工均通过相同的刀具号来显示，很难从标识上明确区分，工艺人员无法准确识别每条程序的状态、判断当前的优化结果，特别是单条程序使用同1把刀具进行粗、精加工时更难区分。VERICUT软件中的优化参数管理如图2所示。

3　VERICUT刀具优化参数改进

为便于工艺人员进行优化参数调用，可将不同机床和材料的优化参数独立形成刀具优化参数库。

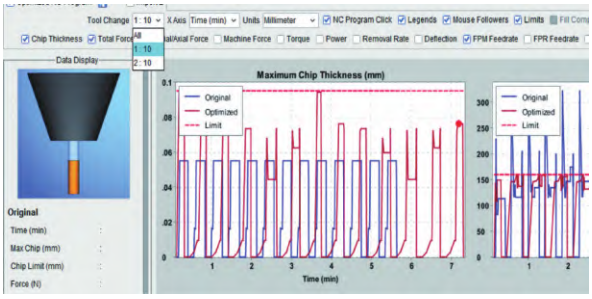


图2　VERICUT软件中的优化参数管理

对于优化工况的便捷识别，由于常规数控机床一般只需几十个刀具位置，可将刀库位置号分成3类，在优化仿真时，粗加工使用1～100刀位，半精加工使用101～200刀位，精加工使用201～300刀位，这样就可以将同一规格刀具的不同加工工况对应到不同刀具号中。为实现以上管理方式，需要结合VERICUT软件中的指令定制开发功能，并在数控程序中增加必要的注释性辅助指令。

3.1　发那科数控系统优化参数改进

（1）刀具库中刀具定义　在刀具库中，每把刀具由定义1个刀具号改为定义3个刀具号，现需定义T1（半精加工刀具）、T101（精加工刀具）和T201（粗加工刀具）3个刀具号，不同工况下的优化参数在不同刀具号中的管理如图3所示。将粗加工、半精加工及精加工的优化参数分别设定在各刀具号的相应参数中。



图3　不同工况下的优化参数在不同刀具号中的管理

（2）程序标识　一般情况下，数控程序中没有明确的粗、精加工工况标识，为了正确调用不同加工工况的优化参数，需要在仿真优化前对数控程序进行必要的优化指令定义。为不影响后续数控程序在机床上的正常运行，需将优化指令以注释行的方式定义，且定义越简化越便于工艺编程人员使用。

为此，分别用（ROUGHING）（SEMI-FINISHING）和（FINISHING）3种注释命令来标识粗、半精及精加工状态，并在刀具调用指令后单

独一行定义，可以根据需要定义ROUGH、rough、roughing及ROUGHGING等多种形式的关键字来模糊识别工艺人员的优化意图。

（3）同一把刀具根据工况标识处理为不同刀具号的方法　在数控程序的刀具调用指令中仅有最初的刀具号，需要对当前定义的粗、精加工状态将当前刀具解析为对应的刀具号，将ROUGHING等指令转换为子程序调用，并在子程序中实现对刀具号的转换。以粗加工为例，当程序中出现类似（FINISHING）的命令时，系统会自动转换为M98P9103的子程序调用指令，激活对子程序O9103的调用，不同工况替代为子程序调用的处理方式如图4所示。

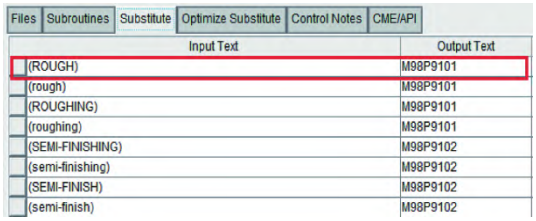


图4　不同工况替代为子程序调用的处理方式

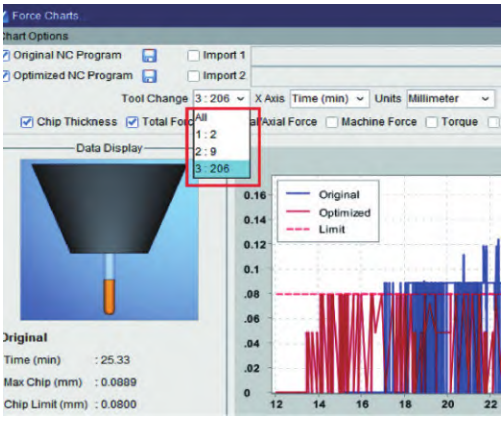
在O9103子程序中，将全局变量TOOLNO_BASE初始化=200（该全局变量可在系统环境中通过类似CGTech_Var NCK INT TOOLNO_BASE = 0方式定义），并进行一系列必要的参数赋值和数值传递，实现新刀具号的正确调用，代码示例如下。

```
O9103
TOOLNO_BASE = 200
#4120=#4120+TOOLNO_BASE
#4320=#4120
M06T#4120
H#4120
D#4120
M99
```

通过以上处理，在仿真优化界面的刀具换刀列表中，可显示出不同类型工况下的刀具号，并通过切换不同刀具号直观地显示优化对比，更利于工艺人员进行针对性地分析判断。新处理方式下的优化结果及刀具使用情况显示如图5所示。

3.2　海德汉数控系统优化参数改进

在海德汉系统中，在刀具库中刀具定义和程序标识的处理方式与发那科数控系统中的处理方式基本一致，采用海德汉CALL PGM的调用方式实现，



a）新处理方式下的优化结果



b）刀具使用情况显示

图5　新处理方式下的优化结果及刀具使用情况显示

海德汉系统子程序调用如图6所示。

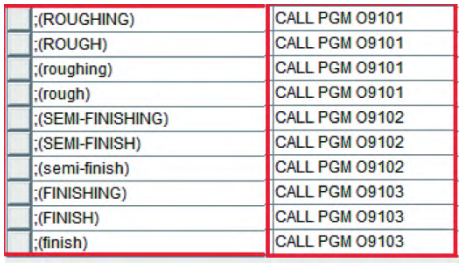


图6　海德汉系统子程序调用

将同一把刀具根据工况标识处理为不同刀具号时，海德汉数控系统的仿真环境无法直接按照发那科数控系统的方式实现。

在海德汉系统中运行刀具调用指令TOOL CALL时，当前调用的刀具号被赋值到VERICUT软件内部的自定义变量CGT_SELECTED_TOOL中，由于该变量被定义为字符串类型，并不能直接用于数值计算，因此，通过将CGT_SELECTED_TOOL的变量类型由CGTech_Var NCK STRING更改为CGTech_Var NCK INT，即可获取当前刀具号。但由于TOOL

CALL换刀指令无法通过变量方式传递刀具号，因此，需采用在子程序中进行逻辑判断的方式，实现不同刀具号的调用处理。用O9103子程序实现精加工刀具的调用处理，程序如下。

```
BEGIN PGM O9103 MM
Q1 = 200
FN 1: Q2 = Q1+CGT_SELECTED_TOOL
FN 9: IF +Q2 EQU 201 GOTO LBL 1
FN 9: IF +Q2 EQU 202 GOTO LBL 2
......
FN 9: IF +Q2 EQU 215 GOTO LBL 15
......
LBL 1
TOOL CALL 201 Z
GOTO LBL 100
LBL 0
LBL 2
TOOL CALL 202 Z
GOTO LBL 100
LBL 0
......
LBL 15
TOOL CALL 215 Z
GOTO LBL 100
LBL 0
......
LBL 100
END PGM O9103 MM
```

4　结束语

基于切削力的仿真优化是一种提升数控加工效率、提高加工过程安全性和稳定性的先进的物理仿真优化技术，目前机械加工行业中的各制造企业都在关注该技术的发展，一些企业已经开展了初步应用。

针对在数控加工中使用VERICUT软件中的FORCE功能，进行切削力仿真优化时的实际应用需求，探讨了结合刀具库的切削力仿真优化参数库的构建和快速调用、便捷分析的实现方法，实现了刀具优化参数的系统化管理以及不同加工工况下仿真优化结果的直观显示，可有效提高工艺人员的工作效率，助力切削力仿真优化技术在数控加工中的应用，可广泛应用于机械加工柔性生产线，具有一定的应用推广价值。

参考文献：

[1] 任宇强，李国剑，白浩. 大型薄壁硬质铝合金零件加工技术研究[J]. 工具技术，2020，54（4）：58-60.

[2] 陈亚莉，周代忠，年鹏，等. 自适应加工技术在数控加工中的应用[J]. 中国新技术新产品，2016（20）：78-79.

[3] 刘楚辉. 自适应控制的应用研究综述[J]. 组合机床与自动化加工技术，2007（1）：1-4.

[4] 李正官，安秋娴，刘哨巡，等. 航空结构件数控程序的仿真及优化研究[J]. 现代制造， 2020（11）：74-75.

[5] 胡伟锋，刘楚生，暴志芳，等. 基于VERICUT切削优化五轴加工铝合金零件的应用分析[J]. 工具技术，2022，52（12）：102-106.

[6] 李春雷，倪俊芳. 针对表面粗糙度和刀具振幅的切削用量优化研究[J]. 机床与液压，2019，47（20）：51-54.

[7] 李华睿. 应用VERICUT软件优化数控程序[J]. 工具技术，2020，54（9）：60-64.

[8] 杨大奎，曹川川，艾存金. 基于MBD技术的Vericut数控仿真应用[J]. 机床与液压，2020，48（21）：166-170，175.

[9] 彭美武，吴伟，武友德. 汽轮机叶片型面加工进给速度的优化策略研究[J]. 机床与液压，2015，43（3）：160-163，178.

[10] 杨之宝，舒启林，陈尔涛. 基于VERICUT的刀具切削参数优化[J]. 工具技术，2017，51（7）：52-55.

MW 20250611

欢迎关注“机工机床世界”
微信公众号