

基于 ANSYS 的参数化薄壁件加工变形分析与计算

Analysis and Calculation on Machining Deformation of Parameterized Thin-Wall Workpiece Based on ANSYS

北京航空航天大学 李光 陈五一
中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 张平

[摘要] 随着对航空产品性能要求的进一步提高,现代航空工业中广泛使用薄壁件零件。由于薄壁件零件刚度差,在加工过程中极易发生变形。建立了参数化薄壁件加工过程有限元模型,借助有限元软件 ANSYS10.0 对薄壁件加工变形量进行分析计算研究。由于 ANSYS 本身功能有限,不能提供较为友好的图形化界面输入,所以基于 C# 环境完成了 ANSYS 的二次开发软件的研究,建立了友好的操作界面,用户可以直接在操作界面上输入参数,软件即可在后台调用 ANSYS 进行计算,从而极大地提高了分析效率。

关键词: 参数化建模 ANSYS 薄壁件 加工变形量 C#

[ABSTRACT] With higher demanding to reduce the weight of aviation products, many components used in the aviation industry usually adopt thin-wall structures. But, because of its poor stiffness, thin-wall workpiece deforms easily in machining process. So finite element model of parameterized thin-wall workpiece in machining process is established and the machining deformation of thin-wall workpiece is calculated by using FEM software ANSYS 10.0. Because ANSYS can't provide a relatively friendly graphical interface, a secondary development of ANSYS is made based on C#, and a friendly interface is developed. The software developed could call ANSYS to calculate in background after the users enter the parameters, so the efficiency of analysis could increase in a large degree.

Keywords: Parameterized modeling ANSYS Thin-wall workpiece Machining deformation C#

在现代航空航天工业及雷达通信等领域中,为了减轻结构重量,提高结构强度、加工精度及生产效率,薄壁型整体结构件占有相当比重,如整体框、梁、壁板等。这类零件不仅形状复杂,精度要求高,而且具有静刚度弱的特征。因此,在加工过程中极易因切削力、切削热、工件装夹、加工路径等因素的作用而产生加工变形。

目前,国内外对薄壁件加工变形的研究^[2-5]很多,主要是借助有限元模拟技术对切削过程中薄壁件侧壁、

腹板、整体变形进行加工仿真。但只是针对某一种薄壁件运用有限元分析,得到薄壁件的加工变形规律或加工变形量。这个过程中需要一定的有限元知识背景——有限元建模、施加载荷及求解等,并且在有限元建模时会消耗一定的时间,一旦模型参数有所改变,就需要重新建模,势必消耗大量时间和精力。本文通过建立三种参数化薄壁件加工过程有限元模型,节省了因有限元建模而消耗的大量时间,用户只需在图形界面输入各种参数,软件即可在后台启动 ANSYS 完成有限元建模并进行计算,进而求解加工变形量。

1 参数化薄壁件变形分析模型

1.1 薄壁筒

薄壁筒的参数化实体模型如图 1 所示,其参数如表 1 所示,其中几何参数包括外径 ϕD 、长度 L 及壁厚 t 。薄壁筒有限元模型选用 SOLID186 三维实体模型,采用自由网格划分实体模型,网格精度 n 为参数。通过参数弹性模量和参数泊松比定义工件的材料属性。约束方式为三爪卡盘夹紧,参数为三爪卡盘角度 ω ,三爪卡盘

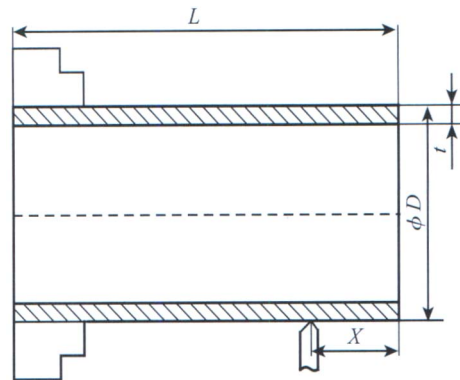


图1 薄壁筒参数化实体模型

Fig.1 Parameterized solid model of thin-wall tube

表1 薄壁筒参数化实体模型参数

几何参数		性能参数		其他	
外径	ϕD	弹性模量	E_x	刀具位置	X
长度	L	泊松比	PRXY		
壁厚	t	网格精度	n		

高度 H 。

1.2 细长轴

细长轴的参数化实体模型如图 2 所示,其参数如表 2 所示,其中几何参数包括外径 ϕD 、长度 L 。细长轴有限元模型选用 SOLID186 三维实体模型,采用自由网格划分实体模型,网格精度 n 为参数。通过参数弹性模量和参数泊松比定义工件的材料属性。对细长轴施加一底面全约束的约束条件来模拟加工条件。

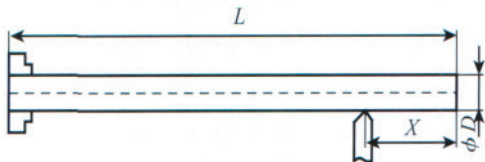


图2 细长轴参数化实体模型

Fig.2 Parameterized solid model of slender shaft

表2 细长轴参数化实体模型参数

几何参数		性能参数		其他	
外径	ϕD	弹性模量	E_x	刀具位置	X
长度	L	泊松比	PRXY		
		网格精度	n		

1.3 筋板

筋板的参数化实体模型如图 3 所示,其参数如表 3 所示,其中几何参数包括长度 L 、宽度 W 及厚度 T 。筋板有限元模型选用 SOLID186 三维实体模型,采用自由网格划分实体模型,网格精度 n 为参数。通过参数弹性模量和参数泊松比定义工件的材料属性。筋板的参数约束方式见表 4。

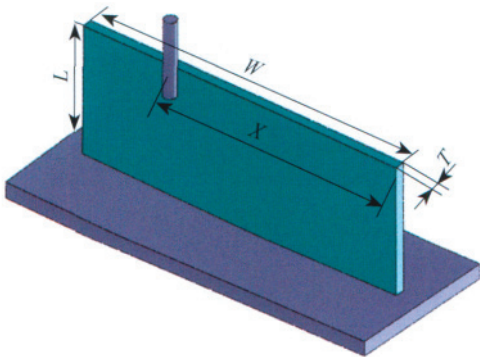


图3 筋板参数化实体模型

Fig.3 Parameterized solid model of web-plate

2 切削力模型与变形计算

切削力模型的合理性是弱刚度薄壁件加工变形过程分析与控制成功与否的关键。半个多世纪以来,国内外许多学者对切削机理和切削力建模的研究取得了许

表3 筋板参数化实体模型参数

几何参数		性能参数		其他	
长度	L	弹性模量	E_x	刀具位置	X
宽度	W	泊松比	PRXY		
厚度	T	网格精度	n		

表4 筋板的参数约束方式

约束方式	示意图	约束方式	示意图
仅底边约束		两侧边约束	
底边和侧边约束		三边约束	

多重要成果。切削力建模的方法很多^[6]。本文采用的是经验切削力模型。所谓经验切削力模型就是基于大量切削实验,将影响切削加工的不易模型化的因素采用系数和指数的形式来表征。

车削时,径向力是影响工件变形的主要因素,所以要计算出径向力,然后施加于薄壁件上。车削径向力经验公式为^[7]

$$F_p = C_{F_p} a_p^{x_{F_p}} f^{y_{F_p}} v^{n_{F_p}} K_{F_p}$$

其中, C_{F_p} 为系数; a_p 、 f 、 v 分别为背吃刀量、进给量和切削速度; x_{F_p} 、 y_{F_p} 、 n_{F_p} 分别为背吃刀量、进给量和切削速度的指数; K_{F_p} 为修正系数。

公式中系数 C_{F_p} 和指数 x_{F_p} 、 y_{F_p} 、 n_{F_p} 可以在切削用量手册中查到。针对不同切削条件,用修正系数 K_{F_p} 进行修正。切削用量背吃刀量 a_p 、进给量 f 和切削速度 v 为参数,用户需输入。

薄壁件实体模型网格划分后,把一个连续体近似地用有限个在节点处相连接的单元组成的组合体代替,从而把连续体的分析转化为单元分析以及对这些单元组合的分析。网格精度 n 越小,网格划分越细,计算精度就越高,但同时会占用大量的分析时间。

薄壁件实体模型经过网格划分生成有限元模型后,假定力是通过节点从一个单元传递到另一个单元上的。但是对于实际的连续体,力是从单元的公共边传递到另一个单元中去的。因而,这种作用在单元边界上的表面力、体积力和集中力都需要等效到节点上去,也就是径向力 F_p 施加到薄壁件有限元模型上,将用等效的节点力代替径向力。

利用结构的平衡条件和外界条件把各个单元按原来的结构重新连接起来,形成整体的有限元方程式,包括整体结构的刚度矩阵、节点位移列阵和载荷列阵。

ANSYS 通过求解有限元方程式得出位移,也就是变形量^[8]。

3 软件开发平台与程序的整体设计思路

软件功能包括三方面,即参数化建模、变形分析计算和计算结果处理。单从功能上讲,ANSYS 都可以完成。利用 APDL 的程序语言与宏技术组织管理 ANSYS 的有限元分析命令,就可以实现参数化建模、施加参数化载荷与求解及参数化后处理结果的显示,从而实现参数化有限元分析的全过程^[9]。但由于 APDL 本身功能有限,不能提供图形化界面输入,所以用其开发的界面并不友好。同时,在 ANSYS 软件里进行后处理还要求分析人员掌握 ANSYS 的各项使用功能,这显然不利于软件的推广。

基于 C# 功能强大并且使用了面向对象的可视化编程技术,易于开发出友好的交互界面^[10]。因而本文选用它作为参数化建模及主控界面的开发工具,用户仅需输入一些相关参数即能建立不同的参数化有限元模型,程序即可调用后台的 ANSYS 命令进行分析计算,分析完成后用户可在结果查询程序中直接查看结果。

此软件共包括参数输入模块、切削力计算模块、APDL 文件生成模块、调用 ANSYS 计算模块、后处理模块。软件总体架构如图 4,各模块功能如下。

(1) 参数输入模块。

该模块通过图形界面获取所需的参数,为 ANSYS

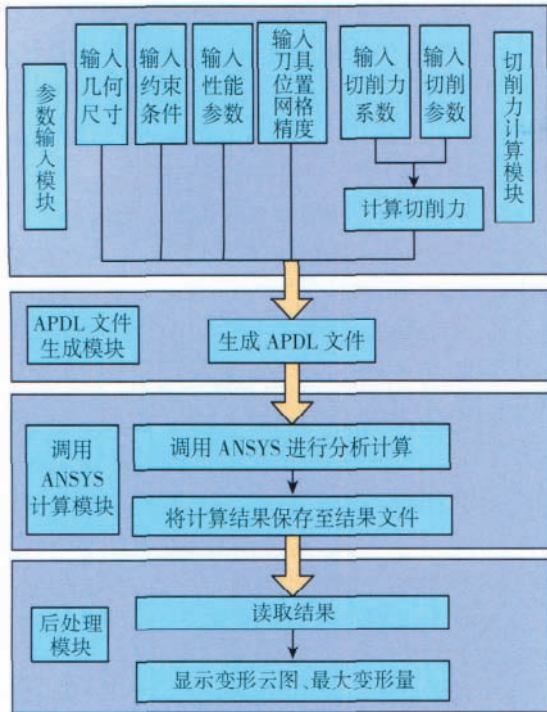


图4 软件总体架构

Fig.4 Overall framework of software

计算提供数据。

(2) 切削力计算模块。

该模块通过输入的切削力系数与切削参数,计算出切削力,作为有限元模型的力载荷。

(3) APDL 生成模块。

该模块通过 C# 语言将输入的各参数,自动生成模型的 APDL 文件。

(4) 调用 ANSYS 计算模块。

该模块在后台调用 ANSYS 命令,读入已经生成的 APDL 文件进行有限元计算,并将结果保存至结果文件。

(5) 后处理模块。

该模块调用结果文件和 ANSYS 自带的 Display Program 来显示变形云图和最大变形量。

4 界面与接口设计

本文采用 APDL 来实现 ANSYS 的二次开发。通过 C# 语言处理输入参数,自动生成模型的 APDL 文件,然后通过进程调用技术控制 ANSYS 内核执行模拟过程,最后采用文件共享的方式实现 C# 专有程序与 ANSYS 的数据接口,完成了后处理数据的显示。

4.1 C# 实现 ANSYS 的后台运行接口设计

C# 通过程序的进程在后台启动运行 ANSYS,其核心命令如下:

```

ProcessStartInfo startInfo = new ProcessStartInfo();
// 声明一个程序信息类
startInfo.Arguments = "-b nolist -i D:/2/IN.txt -o Out.out";
//IN.txt 为 APDL 文件
startInfo.FileName="E:/ProgramFiles/ANSYSInc/v100/ANSYS/bin/intel/ansys.exe";
//ANSYS 所在工作目录
startInfo.WorkingDirectory = "D:/2";
// 当前工作目录
System.Diagnostics.Process.Start(startInfo);
// 后台启动 ANSYS 进行计算。
  
```

4.2 进程通信

只有当 ANSYS 程序运行结束,后处理查询程序才可以通知用户查询运行结果。ANSYS 并没有提供一种有效的进程通信模式实现有限元专有程序与其通信。一种可行的办法是通过文件监控的方式来实现。因为当 ANSYS 软件在运行时, file.err 是不可写的,只有当 ANSYS 软件运行完毕, file.err 文件才可写。因此,我们可以用 C# 的 FileSystemWatcher 类来监控文件 file.err 的属性。

FileSystemWatcher 可以监控特定的文件夹或者文

件,比如在文件夹中删除一个文件,某文件的内容、大小、属性等被改变时,FileSystemWatcher 都可以发现文件和文件夹的变化,并引发对应的事件。监控 file.err 文件的核心代码如下:

```
FileSystemWatcher watcher=new FileSystem
Watcher();
// 声明一个程序信息类
watcher.Path = "D:/2"; // 文件路径
watcher.NotifyFilter = NotifyFilters.Attributes;
// 监控文件属性变化
watcher.Filter = "file.err";
// 仅监控 file.err 文件
watcher.Changed+=new FileSystem
EventHandler(watcher_changed);
// 添加事件句柄
watcher.EnableRaisingEvents = true; // 开始监控。
```

5 实例计算

本文以硬质合金 YT14 刀具外圆纵车 40Cr 工件为例,工件几何参数包括外径为 100mm,长度为 150mm,壁厚为 2mm,刀具位置为 20mm;工件性能参数包括弹性模量 210GPa,泊松比 0.3,网格划分精度 3;三爪卡盘角度为 30°,三爪卡盘高度 10mm(图 5)。在切削用量手册中查到硬质合金 YT14 刀具外圆纵车 40Cr 工件的切削力经验公式中的系数和指数,然后再输入切削参数,就可以计算出径向力 F_p ,如图 6 所示,用户每输入一种刀具材料切削某一种工件材料时的切削力经验公式中的系数和指数,可以保存以便下次使用。求解结果见图 7。

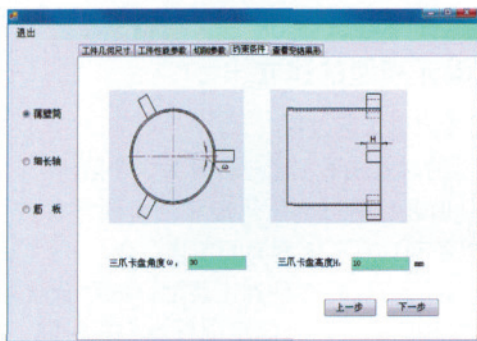


图5 工件约束方式输入界面

Fig.5 Input interface of workpiece constraints

6 结论

本文针对薄壁件零件加工变形的问题,建立了参数化薄壁件变形分析模型,并开发出此款集成软件系统。本软件操作简单,界面友好,不会使用 ANSYS 的人员亦

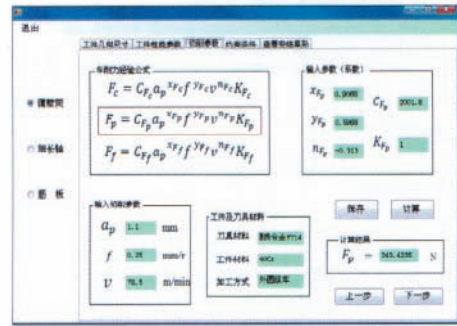


图6 切削参数输入界面

Fig.6 Input interface of cutting parameters

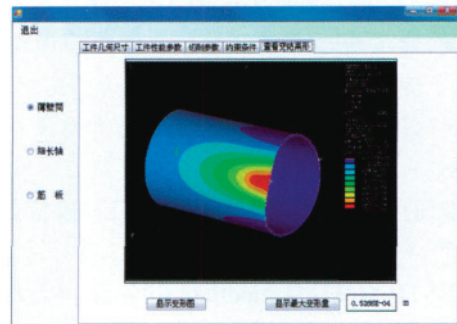


图7 求解结果

Fig.7 Solving result

可使用此软件,从而极大的提高了分析效率。

通过此软件计算分析得到的薄壁件加工最大变形量,为进一步优化切削参数提供了有效数据。

参考文献

- [1] Budak E, Altintas Y. Modeling and avoidance of static for errors in peripheral milling of plates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995, 35 (3): 459-476.
- [2] Tsai J S, Liao C L. Finite-element modeling of static surface errors in the peripheral milling of thin-walled workpieces. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 94 (2): 235-246.
- [3] 万敏,张卫红. 薄壁件周铣切削力建模与表面误差预测方法研究. *航空学报*, 2005, 26 (5): 598-603.
- [4] 武凯,何宁,廖文和,等. 薄壁腹板加工变形规律及其变形控制方案的研究. *中国机械工程*, 2004, 15 (8): 670-674.
- [5] 毕运波. 铣削加工过程物理仿真及其在航空整体结构件加工变形预测的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [6] Smith S, Tlustý J. An overview of modeling and simulation of the milling process. *ASME Journal of Engineering for Industry* 1991, 113 (5): 169-175.
- [7] 卢秉恒,赵万华,洪军. 机械制造技术基础. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [8] 商跃进. 有限元原理与 ANSYS 应用指南. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [9] 博弈创作室. APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [10] 刘先省,陈克坚,董淑娟,等. Visual C# 程序设计教程. 北京: 机械工业出版社, 2006.

(责编 良辰 岭雾)