

数控铣削加工物理仿真 关键技术的研究

Research on Technology of Physical Simulation of NC Milling

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 李海滨 周长军 张卫龙 高天宇 唐小波



李海滨

西北工业大学副教授, 硕士生导师, 航空宇航制造工程国家重点学科团队成员及中法并行工程实验室团队成员, 美国UG软件公司CAM方向的理事及UG软件培训高级教师。研究方向: CAD/CAM。主持并参与国防科研项目10余项; 获省部级科技进步奖一等奖1项; 发表学术论文(第一作者)17篇; 技术总负责国防重点型号科研项目1项。

随着制造技术和信息化技术的发展, 虚拟加工技术在航空、航天、汽车、造船、模具等行业得到了越来越广泛的应用, 成为自动化、柔性化、敏捷化和数字化制造加工的基础和关

加工物理仿真的关键技术是加工过程的参数分析与建模。加工仿真过程是通过仿真模型在仿真环境中运行来实现的, 其中物理仿真主要研究的模型有切削力模型、振动模型、表面粗糙度模型、切削过程的温度场模型、刀具磨损模型等。

键技术。为了保证零件的加工质量, 降低生产成本, 提高生产效率, 特别是满足航空航天等领域对关键零件的高精度要求, 虚拟加工仿真技术成为现代制造技术研究中不可缺少的重要内容^[1-2]。

虚拟加工仿真是虚拟制造的底层关键技术, 也是虚拟数控加工到实际数控加工的重要检查校正环节, 它能够保证所生成的NC代码的正确性、无过切和碰撞等干涉现象以及能有效减少实际加工时间, 提高生产效率^[3]。虚拟数控加工仿真按物理因素是否介入可划分为几何仿真(Geometric Simulation)和物理仿真(Physical Simulation)。国内外对于几何仿真技术理论研究相当全面深入, 并且出现了Catia、UG、Pro/E、MasterCAM等较成熟的商业软件^[4]。

目前, 物理仿真方面的研究还比

较少。由于数控加工向高速高精度的方向发展, 迫切需要对加工过程的物理现象进行深入研究。在数控加工几何仿真基础上进行物理仿真关键技术的研究, 对提高数控加工效率和质量具有重要意义。

物理仿真内容

加工过程物理仿真是利用仿真技术来研究加工过程中的物理现象及其规律, 也就是将实际切削过程中的各种物理因素的变化, 映射到虚拟的数控加工系统中, 在实际数控加工过程进行之前, 分析预测各切削参数的变化及其干扰因素对加工过程的影响^[5]。加工仿真的核心就是切削过程中的动态性能仿真。由于物理仿真存在切削机理复杂、建模难度大等客观原因, 这方面的研究还不够深入。

加工过程实质就是材料的成型

过程,在这个过程中伴随着许多复杂的物理现象的发生。物理仿真研究的主要内容应包括:(1)切削力。它通过仿真切削过程的动态力学特性来预测刀具破损、刀具振动、控制切削参数,从而达到优化切削过程的目的;(2)切屑生成过程。主要包括切屑的形成过程、切屑的形状以及断屑的研究;(3)刀具磨损。主要是研究刀具与工件、刀具与切屑接触面的情况;(4)数控切削机床的振动和温度。主要研究材料剪切过程中的应力、应变、应变率以及温度场的变化情况;(5)加工表面完整性。通过建立表面粗糙度、表面残余应力以及影响他们的物理因素的关系模型来预测表面质量;(6)加工误差和加工精度。通过建立尺寸精度与影响尺寸精度的物理因素的关系模型,仿真预测工件加工后的尺寸精度^[6]。其虚拟加工物理仿真体系的基本框架,如图1所示。

铣削加工物理仿真的分析与研究

加工物理仿真的关键技术是加工过程的参数分析与建模。加工仿

真过程是通过仿真模型在仿真环境中运行来实现的,其中物理仿真主要研究的模型有切削力模型、振动模型、表面粗糙度模型、切削过程的温度场模型、刀具磨损模型等^[7]。加工过程的动态力学的建模分析是物理仿真的重要内容。下面以铣削加工为例,对加工过程中的动态力学性能和切削温度进行分析和研究。

1 铣削加工过程的动态力学性能分析

目前,铣削过程中的动态力学分析,主要集中在加工中的切削力建模

和颤振模型分析上。刀具和所加工零件的变形与颤振对工件的轮廓误差有很大影响。因此,必须对铣削力和颤振进行建模分析研究。

1.1 铣削加工切削力建模分析与仿真

对于不同铣刀的不同加工方式,铣削过程中的切削力模型也是不同的。现以典型的平头立铣刀为例,对其加工的铣削力模型进行分析建模,为铣削加工物理仿真的实现提供理论分析基础。立铣刀铣削加工的几何特征如图2所示。

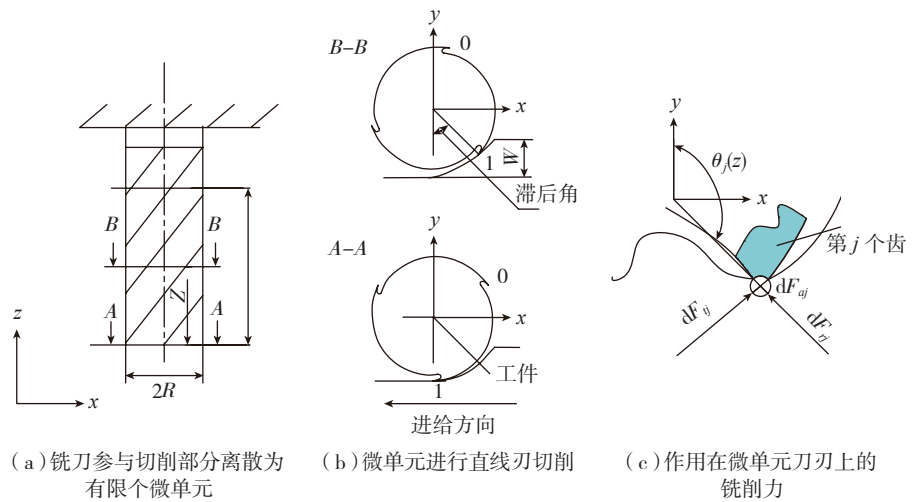


图2 立铣刀铣削加工的几何特征

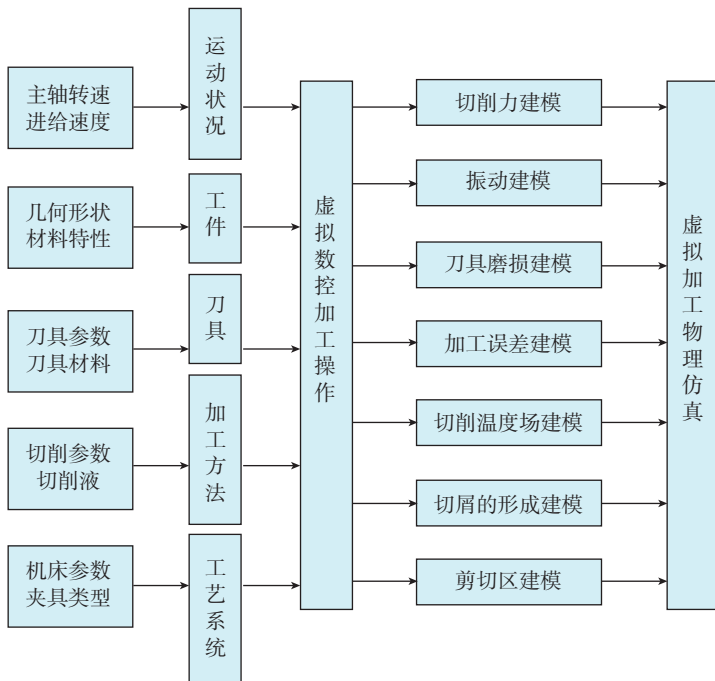


图1 虚拟加工物理仿真体系框架结构

其基本思路是沿刀具轴线将铣刀参与切削部分离散为有限个微单元,如图2(a)所示。把每个微单元刃看作是一个进行直线刃切削的刀具,如图2(b)所示。再将作用在每一个微单元刀刃上铣削力的空间向量,可以分解为径向力 dF_{rj} 、切向力 dF_{tj} 和轴向力 dF_{aj} ,如图2(c)所示。则第 j 个切削刃在高度为 z 处的微单元刃上的作用力可以表示为:

$$\begin{cases} dF_{rj} = [K_{rc}t_j(\theta, z) + K_{re}] dz \\ dF_{tj} = [K_{tc}t_j(\theta, z) + K_{te}] dz \\ dF_{aj} = [K_{ac}t_j(\theta, z) + K_{ae}] dz \end{cases}, (1)$$

式中, K_{re} 、 K_{te} 、 K_{ae} 描述了工件材料在刃口处的分离作用; K_{rc} 、 K_{tc} 、 K_{ac} 3个系数是用来描述铣削加工过程中剪切面与前刀面的摩擦作用对径

向、切向和轴向切削力的作用。但对于确定了铣削刀具-加工材料组合,这6个系数是常量。这些系数可由实验获得的相关数据通过数学处理获得^[8]。其中 $t_j(\theta, z)$ 为加工中的瞬时切削厚度。则有:

$$t_j(\theta, z) = f_z \sin \theta_j(z), \quad (2)$$

式中, f_z 为每齿进给量(mm/tooth), θ 、 $\theta_j(z)$ 分别为刀具的转角($^\circ$)和第 j 条切削刃在高度为 z 处的微单元的角度位置,由刀具转角 θ 、铣刀齿数 N 、铣刀的螺旋角 β 决定。则将式(1)转化到坐标系 x 、 y 、 z 3个方向的切削力可以表示为:

$$\begin{cases} dF_{xj} = \begin{bmatrix} -dF_{tj}(\theta, z) \cos \theta_j(z) - \\ dF_{rj}(\theta, z) \sin \theta_j(z) \end{bmatrix} dz \\ dF_{yj} = \begin{bmatrix} dF_{tj}(\theta, z) \sin \theta_j(z) - \\ dF_{rj}(\theta, z) \cos \theta_j(z) \end{bmatrix} dz \\ dF_{zj} = -dF_{aj}(\theta, z) dz \end{cases}, \quad (3)$$

那么,很容易得到,对于具有 N 个齿数的螺旋立铣刀,在 x 、 y 、 z 3个方向总的切削力为:

$$\begin{cases} F_x = \sum_{j=0}^{N-1} \int_{z_{j1}(\theta)}^{z_{j2}(\theta)} dF_{xj}(\theta) \\ F_y = \sum_{j=0}^{N-1} \int_{z_{j1}(\theta)}^{z_{j2}(\theta)} dF_{yj}(\theta) \\ F_z = \sum_{j=0}^{N-1} \int_{z_{j1}(\theta)}^{z_{j2}(\theta)} dF_{zj}(\theta) \end{cases}, \quad (4)$$

所以,切削合力可以表示为:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}. \quad (5)$$

由以上分析可知,加工过程的铣削力学模型,不仅与轴向铣削深度有关,还与径向铣削宽度(或切入角、切出角)有直接的关系。当进行铣削力模型仿真时,输入变量有刀具螺旋角,刀具切入角和切出角,轴向切削深度,刀齿数,进给量,主轴转速,刀具直径,以及切削因子。这时给刀具以微小的增量角旋转,切削力就会在轴向不断累加,从而得到总的切削力仿真结果。还可以通过仿真过程实时显示提供的切削力、铣削宽度和铣削深度等参数,在较大的金属去除率

下,选择出最优的轴向切深-径向切深-螺旋角组合,从而得到最优的切削力仿真结果。

1.2 铣削加工中的颤振模型分析

多刃断续切削、半封闭式加工以及变厚度加工是铣削加工的最大特点,很容易产生颤振现象。在实际加工过程中,颤振是影响加工表面质量和机床稳定性的主要因素^[9]。加工过程的颤振主要由2种因素引起:一种是强迫振动,由于刀具周期性地冲击工件而使系统产生的;另一种就是自激振动,由于铣削厚度的变化引起切削力的变化从而产生的。在加工过程中,上次切削所形成的振纹,与本次切削振动位移之间的相位差,导致刀具切削厚度不同而引起的再生效应。因此,铣削加工过程的振动一般属于再生型。

对于一般的切削加工过程来说,整个切削过程可以简化为一个闭环系统,如图3所示。其中 $F(t)$ 为动

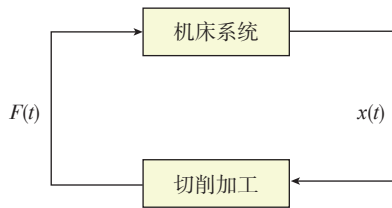


图3 机床切削加工系统

态切削力, $x(t)$ 为振动位移。

其振动数学模型可表示为:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t), \quad (6)$$

式中, m 、 c 、 k 、 $\ddot{x}(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 、 $x(t)$ 和 $F(t)$ 分别为系统的模态质量系数、阻尼系数、刚度系数、 x 方向上的振动加速度、振动速度、振动位移和系统所受的外力。

铣削加工过程的特点和加工经验表明,在铣床切削部位 x 和 y 坐标方向测得的相对动柔度曲线中,其主轴上的振型最为突出,其他方向的振型都是比较小的,即 z 轴方向振型可以忽略。这样,更有利于铣削加工

中的颤振分析。因此,将实际的铣削加工动力学切削模型进行简化,可用2个相互垂直自由度的弹性阻尼系统来表示,如图4所示。

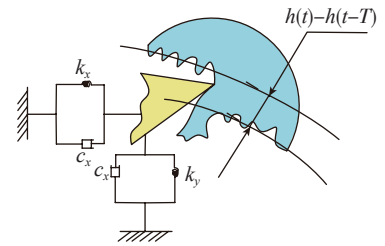


图4 铣削加工动态切削模型

根据式(6),可以进一步将铣削加工振动模型写为:

$$m_x\ddot{x}(t) + c_x\dot{x}(t) + k_x x(t) = F_x(t), \quad (7)$$

$$m_y\ddot{y}(t) + c_y\dot{y}(t) + k_y y(t) = F_y(t), \quad (8)$$

式中, $\ddot{x}(t)$ 、 $\ddot{y}(t)$ 分别为 x 、 y 方向上的振动加速度; $\dot{x}(t)$ 、 $\dot{y}(t)$ 分别为 x 、 y 方向上的振动速度; $x(t)$ 、 $y(t)$ 分别为 x 、 y 方向上刀具振动的位移; m_x 、 c_x 、 k_x 分别为系统在 x 轴方向上的模态质量系数、阻尼系数、刚度系数; m_y 、 c_y 、 k_y 分别为系统在 y 轴方向上的模态质量系数、阻尼系数、刚度系数; $F_x(t)$ 、 $F_y(t)$ 为 t 时刻在 x 、 y 方向上的切削分力。

对式(7)、式(8)进行拉氏变换,可得到:

$$\begin{bmatrix} x(s) \\ y(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_x s^2 + c_x s + k_x} & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_y s^2 + c_y s + k_y} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_x(s) \\ F_y(s) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

考虑到加工过程中切削厚度的变化,直接引起切削力变化,从而就产生切削振动,由图4可知,切削厚度应由两部分组成:一部分是固定切削厚度,另一部分是动态切削厚度。则切削厚度可以表达为:

$$h_c(\theta) = f_z \sin \theta + h(t) - h(t - T), \quad (10)$$

式中, T 为2次加工相隔的时间延迟。

将式(10)经过拉氏变换可得:

$$h_c(s) = f_c \sin \theta + h(s) [\exp(-Ts) - 1]. \quad (11)$$

根据式(9)、式(11)分析,可以将铣削加工过程简化为一个闭环反馈系统,如图5所示。

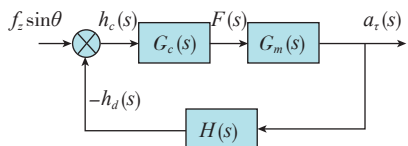


图5 铣削加工系统反馈图

输入切削厚度信息,通过切削过程传递函数 $G_c(s)$,产生的切削力为 $F(s)$,而切削力通过加工系统传递函数 $G_m(s)$ 作用于机床,将产生振动的激力,从而导致刀具的振动 $a_r(s)$ 。然而刀具的振动 $a_r(s)$ 又通过反馈函数 $H(s)$ 导致动态铣削厚度 $h_d(s)$ 的变化,进而使 $h_c(s)$ 发生变化,使这样铣削加工就构成了一个闭环系统。

以上分析可知,加工过程中颤振的发生直接与系统结构参数 m 、 c 、 k 有关。对铣削加工颤振的模型分析,为铣削加工物理的实时仿真进一步研究,提供了理论基础,可以应用于表面粗糙度的预测,也可以作为提供避免或减少振动的依据,合理地选择加工条件。

2 铣削加工温度场建模

铣削加工过程实际上应属于冷加工的范畴,但从切屑形成过程来看,却具有变形大、应变率高并伴随产生有大量热量生成等特点。在铣削过程中,其切削温度的分布主要由工件塑性变形和切屑-刀具界面之间的摩擦产生的热量来决定。目前,切削温度场的仿真多是在数学模型的基础上采用有限元法,利用 ANSYS、ABAQUS 等仿真软件来实现的^[10]。

对于铣削加工温度场仿真和建模一般遵循“确定其切削热的分布→确定热传导方程及边界条件→有限元软件仿真→分析仿真结果”这

样一个过程。

根据能量守恒定律和傅里叶定律可建立三维的热传导方程:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = Q', \quad (12)$$

式中, k 为导热率, c 为比热容, ρ 为材料密度, Q' 为单位体积热量。为了方便有限元法对仿真对象的网格化处理,在上述模型的基础上将其离散化,可得温度计算的有限元基本公式:

$$Q = K_T T + C \dot{T}, \quad (13)$$

其中, Q 为热通量向量, K_T 为热传导矩阵, T 为节点温度矩阵, C 为比热容矩阵, \dot{T} 为节点温度变化率向量。再考虑铣削加工过程中的热弹性塑性变形^[11],其变形场的有限元基本公式为:

$$\Delta R = K \Delta u. \quad (14)$$

根据式(13)、式(14),再利用有限元法对仿真对象进行网格化处理,可得铣削加工温度场计算的基本方程:

$$\begin{bmatrix} F \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{T} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

其中, F 为力向量, u 为节点位移向量; \dot{u} 为节点速度向量。

因此,在仿真关键技术研究,加工温度场建模分析是十分重要的,加工温度直接影响着铣削过程的进给速度、切削深度、刀具磨损变形等。

结束语

本文通过对数控加工物理仿真内容讨论,深入分析了动态力学性能和加工温度场在铣削加工过程中的影响,并进行了关键物理因素的建模分析,从而可以对其他物理因素进行类似分析建模。这对于提高切削加工过程的自动化和工件加工的质量

都具有十分重要的意义。但物理仿真涉及到切削力作用所引起的刀具变形、磨损的影响,工件因刚性不足、装夹不当、内应力重新分布等原因引起的变形,这些方面仍然存在许多理论和实际问题亟待解决。再者,由于加工过程的复杂性和加工形式的多样性,物理仿真的研究远远满足不了工程实际的需要。只有综合考虑实际切削中的各种因素,建立与实际切削拟合程度一致的数学模型,才能从真正意义上实现虚拟加工与实际加工的“无缝连接”。

参考文献

- [1] 张定华,汪文虎.难加工材料切削机理研究的新进展.力学进展,2004,34(3):373-378.
- [2] 黄雪梅,赵明扬,王启义.虚拟数车削物理仿真系统的研究与开发.中国机械工程,2002,13(15):1336-1339.
- [3] 金艳丽.球头刀铣削过程物理仿真的研究[D].河北:河北工业大学,2004.
- [4] 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中的应用研究[D].浙江:浙江大学,2007.
- [5] 张臣,周儒荣,庄海军,等.基于 Z-map 模型的球头铣刀切削力建模与仿真.航空学报,2006,27(2):347-352.
- [6] 梅文涛,武文革,黄美霞.虚拟数控加工过程物理仿真模型的研究.机械设计与制造,2010(5):193-195.
- [7] 虚拟数控加工过程物理仿真模型的建立.计算机仿真,2003,20(3):88-91.
- [8] Wan Min,Zhang Wei-hong. Overviews of technique research progress of form error prediction and error compensation in milling process. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(5): 1340-1349.
- [9] A-P.Xu. Simulation and experimental investigation of the end milling process considering the cutter flexibility. International Journal of Machine Tools&Manufacture, 2003,43(3):283-292.
- [10] 张臣,周来水,安鲁陵,等.基于切削力仿真的离线进给速度优化技术.南京航空航天大学学报,2009,41(3):358-363.
- [11] 叶天麒,周天孝.航空结构有限元分析指南.北京:航空工业出版社,1996.

(责编 夏宛)