

基于蒙特卡罗方法的直角切削切削力概率特性分析

黄贤振, 曹 辉, 张义民

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 考虑随机因素的影响, 采用蒙特卡罗数值模拟方法, 研究金属切削过程中切削力的统计分布规律. 建立非等分平行面剪切区模型, 求解切削速度、剪应变以及剪应变率. 构建金属切削材料控制方程和温度控制方程, 求解剪切区剪切应力及切削力. 根据切削参数的分布信息抽取样本, 代入切削力模型进行计算, 获取切削力, 并统计切削力的概率特性, 从而提出一种基于蒙特卡罗方法的直角切削切削力预测方法.

关 键 词: 直角切削; 切削力预测; 蒙特卡罗; 概率特性

中图分类号: TH 112

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)02-0254-05

Probabilistic Analysis for Cutting Force in Orthogonal Cutting Using Monte-Carlo Method

HUANG Xian-zhen, CAO Hui, ZHANG Yi-min

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: HUANG Xian-zhen, associate professor, E-mail: xzhhuang@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Considering the effect of random factors, Monte-Carlo numerical simulation method was used to study the statistical distribution of cutting force in the process of metal cutting. The model of parallel shear zones unequally divided was established to solve the cutting velocity, shear strain rate and shear strain. Control equation of metal cutting materials and temperature control equation for shear zone were constructed to calculate shear stress and cutting force. Extracted samples from the distribution information of cutting parameters were substituted into the cutting force model to calculate the cutting force and its probability characteristics. Thereby an orthogonal cutting force prediction method was presented based on Monte-Carlo method.

Key words: orthogonal cutting; cutting force prediction; Monte-Carlo; probability characteristics

近年来,国内外学者对金属切削的基本理论与方法进行了深入研究和广泛探讨,建立了多种金属切削物理力学模型,试图提出一种有效的金属切削过程热力耦合模拟分析方法,用以准确描述金属切削过程中材料的去除机理. 根据金属切削变形区性质的不同,金属切削物理力学模型大体上可以分成两类:单一平面剪切区模型^[1]和平行平面剪切区模型^[2-3]. 总体来说,平行面剪切模型的构建与求解过程要比单一面剪切模型复杂得多,但平行面剪切区模型在推导过程中考虑了材料的加工硬化和热软化效应,与金属切削实验的结果吻合得更好. 因此,平行平面剪切区模型得到

了更加广泛的关注和系统深入的研究,其理论体系也相对较为完善;不足之处是,在金属切削力预测过程中,设计人员通常将切削参数信息视为精确、无误差的,而在实际工程问题中,可以完全、精确描述的信息因素却是极少的,大部分因素都是非完全、非精确的^[4]. 这种信息的不完全和不精确性可以称为不确定性. 比如,在机床制造过程中,加工和装配误差会造成几何尺寸的不确定性;在金属切削过程中,工作环境中的偶然因素会使荷载及工程材料的力学性能具有不确定性. 显而易见,上述不确定因素是工程实际中所固有的,对金属切削有着不可忽视的影响. 确定性模型忽略

收稿日期: 2014-01-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105062, 51135003); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-13-0103); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N120503001); 沈阳市科技计划项目(F12082200).

作者简介: 黄贤振(1982-),男,山东定陶人,东北大学副教授,博士;张义民(1958-),男,吉林长春人,东北大学教授,博士生导师,教育部“长江学者奖励计划”特聘教授.

的分析结果,首先要确定工件材料的属性. 在切削条件下,材料屈服流动行为的描述较常采用 Johnson – Cook (JC) 本构关系模型. 工件切削的剪应力 τ 的表达式为

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[A + B \left(\frac{\gamma}{\sqrt{3}} \right)^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right) \right] \times \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right]. \tag{12}$$

式中: A 为工件材料的屈服强度; B 为工件材料的硬化模量; γ 为剪应变; $\dot{\gamma}$ 为剪应变率; $\dot{\gamma}_0$ 为参考剪切应变率; T_r 为待加工零件的初始温度(通常为加工车间的环境温度); T_m 为工件材料的熔点; C 为应变率敏感系数(黏性); n 为硬化指数; m 为热软化指数; T 为切削加工过程中工件的表面温度.

2.2 温度控制方程

把工件作为一个半无限大二维问题物体进行处理^[5]. 假设塑性变形的功转化成热量的比例为 μ , 热传导方程为

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \rho c v_n \frac{\partial T}{\partial y} + \mu \tau \dot{\gamma} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \tag{13}$$

式中: ρ 为工件的材料密度; λ 为工件的热导率; c 为工件的比热容; v_n 为剪切区的法向速度.

通常情况下若切削速度较高,热传导往往可以忽略,即 $\lambda = 0$. 此外,稳态切削时,切削温度对时间的偏导数为零. 所以可将式(13)进一步简化为

$$\frac{dT}{dy} = \frac{\mu}{\rho c v_n \sin \varphi} \tau \dot{\gamma}. \tag{14}$$

此外,始剪切线处的温度等于工件温度 T_w , 即

$$T|_{y=0} = T_w. \tag{15}$$

式(14)为工件材料在剪切区的热力控制方程. 由式(6)和(12)可知, $\dot{\gamma}$ 是关于 y 的函数,而 τ 是关于 y 和 T 的函数. 所以可知,式(14)是 T 关于 y 的一阶常微分方程. 在满足边界条件式(15)的前提下,求解微分方程(14),就可得到剪切区的温度关于切削深度的分布,然后再代入式(12)中,即可得到切削过程中剪切区内剪应力的分布情况.

3 金属切削过程中切削力的计算

剪切力 F_s 可由主剪切面上的流动应力得到^[8]:

$$F_s = \frac{ab\tau_s}{\sin \varphi}. \tag{16}$$

式中: τ_s 为剪切应力; a 为工件的切削厚度; b 为工件的切削宽度.

根据图 2 所示直角切削的力模型,刀具对工件的切削力为

$$F = \frac{F_s}{\cos(\varphi + \beta - \gamma_0)}. \tag{17}$$

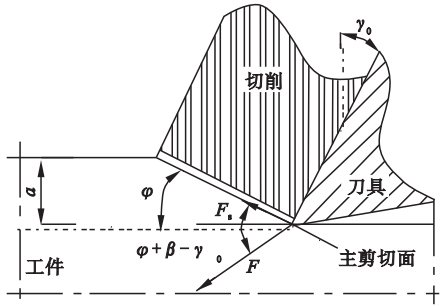


图 2 直角切削的切削力示意图
Fig. 2 Schematic of orthogonal cutting force

计算切削力时,涉及到剪切角 φ 和摩擦角 β . 本文用 Merchant 公式计算剪切角:

$$\varphi = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} + \frac{\gamma_0}{2}, \tag{18}$$

摩擦角:

$$\beta = \arctan f. \tag{19}$$

式中 f 为刀具/切屑面的平均摩擦系数,可由 Schulz^[9] 经验公式表示为

$$f = f_0 v_c^p. \tag{20}$$

式中 f_0 为常数, $p < 0$. 联立式(3), (18), (19) 和 (20), 通过求解方程, 即可得到剪切角和摩擦角.

4 切削力概率特性蒙特卡罗模拟

蒙特卡罗模拟 (Monte – Carlo simulation) 又称统计试验法, 是一种利用统计抽样理论近似求解数学问题或物理问题的方法^[10]. 它的主要理论基础是概率论与数理统计中的大数定律与中心极限定理, 主要研究手段是通过每一个随机变量进行大量抽样, 并将样本数据代入到分析模型中进行计算, 从而获取随机响应的样本值. 采用蒙特卡罗模拟方法预测直角切削切削力概率统计特性的具体步骤如图 3 所示. 首先根据随机参数的概率分布信息独立抽取足够数量的样本, 然后将随机参数样本代入到切削力计算模型中, 得到切削力样本数据. 由此确定直角切削切削力的概率分布特征(如概率分布情况、均值、方差等).

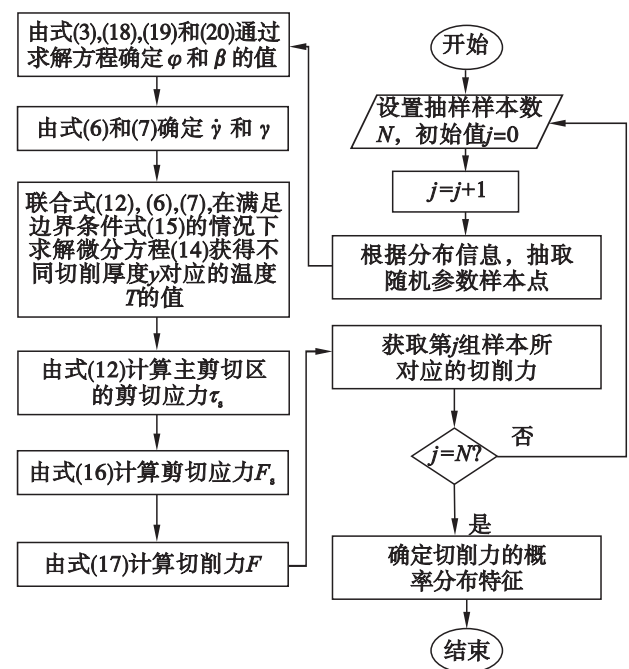


图 3 基于蒙特卡罗模拟的切削力预测流程图

Fig. 3 Flow chart of the cutting force prediction based on Monte-Carlo simulation

5 数值算例

通过实验可得 42CrMo4 钢的切削参数为： $f_0=0.704$, $p=-0.248$, $\gamma_0=3^\circ$, $h=0.025\text{ mm}$, $A=612\text{ MPa}$, $B=436\text{ MPa}$, $C=0.008$, $n=0.15$, $m=1.46$, $\dot{\gamma}=0.001\text{ s}^{-1}$, $T_m=1\,800\text{ K}$, $T_r=300\text{ K}$, $\mu=0.85$, $\rho=7\,800\text{ kg/m}^3$, $c=500\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, $T_w=300\text{ K}$, $a=0.015\text{ mm}$, $b=3\text{ mm}$ ^[7]. 估算切削速度为 $v=120\text{ m/min}$ 时切削力的概率分布特性.

随机参数的方差的取值应通过测试或者实验数据的统计分析获得, 如果没有相关数据可以通过以下原则估算. 金属材料的机械性能参数的标准差, 可以根据变差系数来确定, 一般取 0.05 ^[11]. 随机变量如果受到大量的独立因素的影响(无主导因素), 则它一般服从正态分布^[12].

采用确定性方法计算切削力为 $F=1\,240\text{ N}$. 按照图 3 所示步骤, 采用 10^5 次蒙特卡罗抽样模拟直角切削过程, 获取切削力 F 的样本. 采用统计频数直方图的方法获取切削力的概率密度和概率分布图(如图 4 和 5 所示). 切削力的均值和方差分别为 $\mu_F=1\,242\text{ N}$, $\sigma_F=116.8\text{ N}$. 由切削力的均值和标准差可计算获得其变差系数 0.094 .

计算结果表明, 蒙特卡罗模拟所得切削力的均值与确定性计算的结果基本一致, 即模拟所得均值为切削力的无偏估计. 切削力具有较强的分

散性, 切削力的变差系数远大于随机参数的变差系数. 切削力正态分布检验图如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 散点并不聚集在直线上, 因此虽然切削参数服从正态分布, 计算出来的切削力并不服从正态分布.

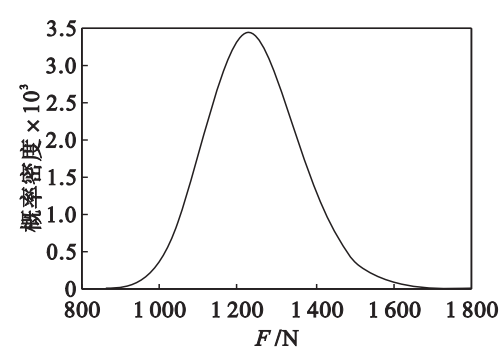


图 4 切削力概率密度函数

Fig. 4 Probability density function of cutting force

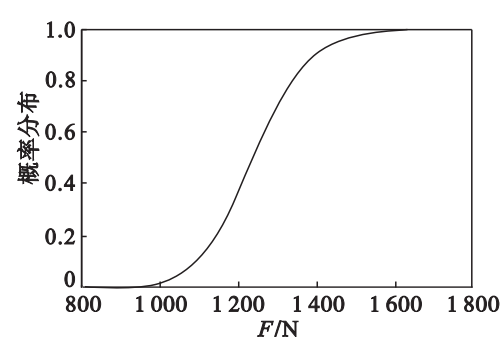


图 5 切削力概率分布函数

Fig. 5 Probability distribution function of cutting force

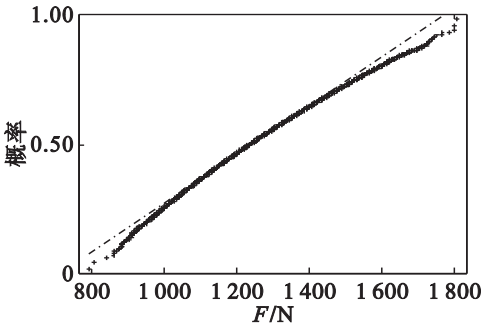


图 6 正态分布检验
Fig. 6 Normal distribution test

6 结 语

基于蒙特卡罗模拟,提出了一种直角切削切削力的预测与概率统计分析方法. 与传统切削力预测方法相比,本文方法考虑了刀具参数、材料参数、加工工况等随机参数对金属切削过程的影响,更加符合工程实际状况. 采用本文方法可以迅速获取金属切削过程中切削力的概率分布特性(均值、方差、概率密度和概率分布等). 上述信息对提高工件的加工精度、保证刀具的使用寿命,以及控制切屑的形成等均具有重要指导意义和参考价值.

参考文献:

[1] Molinari A, Moufki A. The Merchant's model of orthogonal cutting revisited: a new insight into the modeling of chip formation[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2008, 50(2): 124 – 131.

[2] Adibi-Sedeh A H, Madhavan V, Bahr B. Extension of Oxley's analysis of machining to use different material models [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2003, 125(4): 656 – 666.

[3] Lalwani D I, Mehta N K, Jain P K. Extension of Oxley's predictive machining theory for Johnson and Cook flow stress model [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(12/13): 5305 – 5312.

[4] 张义民. 机械可靠性设计的内涵与递进[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(14): 167 – 188.

(Zhang Yi-min. Connotation and development of mechanical reliability-based design [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(14): 167 – 188.)

[5] Astakhov V P, Osman M O M, Hayajneh M T. Re-evaluation of the basic mechanics of orthogonal metal cutting: velocity diagram, virtual work equation, and upper bound theorem[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 2001, 41(3): 393 – 418.

[6] Tounsi N, Vincenti J, Otho A, et al. From the basics of orthogonal metal cutting toward the identification of the constitutive equation [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 2002, 42(12): 1373 – 1383.

[7] Li B L, Wang X L, Hu Y J, et al. Analytical prediction of cutting forces in orthogonal cutting using unequal division shear-zone model [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 54(5/6/7/8): 431 – 443.

[8] Dudzinski D, Molinari A. A modelling of cutting for viscoplastic materials[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1997, 39(4): 369 – 389.

[9] 陈日曜. 金属切削原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

(Chen Ri-yao. Theory of metal cutting [M]. Beijing: China Machine Press, 1993.)

[10] Zio E. The Monte Carlo simulation method for system reliability and risk analysis[M]. London: Springer, 2013.

[11] Zhang Y M, He X D, Liu Q L, et al. Robust reliability design of banjo flange with arbitrary distribution parameters [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology: Transactions of the ASME*, 2005, 127(4): 408 – 413.

[12] O'Connor P D T, Kleyner A. Practical reliability engineering [M]. 5th ed. Chichester: Wiley, 2012.

(上接第 253 页)

[4] Thite A N, Thompson D J. The quantification of structure-borne transmission paths by inverse methods. part 1: improved singular value rejection methods [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 264(2): 411 – 431.

[5] Thite A N, Thompson D J. The quantification of structure-borne transmission paths by inverse methods. part 2: use of regularization techniques [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 264(2): 433 – 451.

[6] Gunduz A, Inoue A, Singh R. Estimation of interfacial forces in time domain for linear systems [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(13): 2616 – 2634.

[7] Singh R, Kim S. Examination of multi-dimensional vibration

isolation measures and their correlation to sound radiation over a broad frequency range [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 262(3): 419 – 455.

[8] 赵薇, 张义民. 频域内振动传递路径系统的传递率研究 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2008, 29(sup2): 56 – 59.

(Zhao Wei, Zhang Yi-min. Transfer ratio of vibration transfer path systems in frequency range [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2008, 29(sup2): 56 – 59.)

[9] Zhao W, Zhang Y M. Path transfer probability for vibration transfer path systems with translational and rotational motions in time range [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 121/122/123/124/125/126: 4532 – 4536.