

球头铣刀瞬态切削力数学模型建立与仿真*

王启东¹ 刘战强¹ 汤爱民^{2,3} 王社权² 肖思来^{2,3}

(1. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061;

2. 株洲钻石切削刀具股份有限公司, 株洲 412007; 3. 湖南大学机械与运载工程学院, 长沙 410082)

【摘要】 针对球头铣刀在3轴数控铣床中应用的8种常见铣削情形,将铣刀轴向离散化为一系列微元切削刃,首先分析并建立局部切削力模型,进而通过积分运算求得铣刀整体切削力,建立了结合前刀面剪切效应与后刀面犁切效应双重机制的球头切削力预报模型。该模型考虑了走刀间距对切削区域的影响,采用几何分析方法求解瞬时参与切削的微元切削刃的分布,容易实现程序化,并利用 Matlab 对铣削力进行了数值仿真。最后,通过以45号钢为工件材料的铣削试验获得试验数据,数值仿真结果与试验结果对比,验证了球头铣刀切削力模型的有效性。

关键词: 球头铣刀 切削力 数学模型

中图分类号: TG714 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)08-0200-07

Mathematic Modeling and Simulation of Instantaneous Cutting Force for Ball End Milling

Wang Qidong¹ Liu Zhanqiang¹ Tang Aimin^{2,3} Wang Shequan² Xiao Silai^{2,3}

(1. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Shandong University,

Ji'nan 250061, China 2. Zhuzhou Cemented Carbide Cutting Tools Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China

3. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract

A dual-mechanism cutting force predicting modeling technique was proposed for eight ball end milling operations commonly applied on 3-axis CNC machine tools. The ball end milling was divided into a number of elementary cutting edges. Firstly, the local cutting forces within each elementary cutting edge were analyzed and modeled. Then, total cutting force could be calculated by integral operation. The effect of step-interval in cutting zones was taken into account for cutting force prediction. The number and distribution of the elementary cutting edges involved in cutting action could be instantaneously determined by geometric analysis. The numerical simulation was implemented by Matlab. Finally, the proposed model was validated through milling experiments of 45# steel. The results showed that there was a good agreement between the experimental results and the simulation ones.

Key words Ball end milling, Cutting force, Mathematic modeling

引言

球头铣刀是在立铣刀的基础上发展起来的^[1],在制造业(尤其在模具生产行业)中应用广泛,可用

于加工涡轮、冲模、压模、飞机零件、具有复杂外形的产品等,是数控加工复杂曲面(尤其是自由曲面)的重要刀具。

铣削过程的物理仿真,对于优选切削条件、保证

收稿日期: 2010-12-15 修回日期: 2011-02-14

* 国家自然科学基金资助项目(50975162、50935003)、国家科技重大专项资助项目(2009ZX04012-031、2010ZX04017-012)和山东省自然科学基金杰出青年基金资助项目(JQ200918)

作者简介: 王启东,硕士生,主要从事高速高效切削加工研究,E-mail: zhongshu1910@yahoo.cn

通讯作者: 刘战强,教授,主要从事高速高效切削加工研究,E-mail: melius@sdu.edu.cn

零件加工精度、提高切削过程稳定性、减少刀具磨损等十分重要。建立可靠的球头铣刀切削力模型是对铣削过程进行物理仿真的重要基础。

球头铣刀铣削加工过程非常复杂,存在相互关联的加工参数,并且球头铣刀球头部分的复杂几何形状、沿切削刃不断变化的切削特性、铣刀沿切削路径切削时刀具与工件之间不断变化的接触面、刀具与接触面的振动等,使得对球头铣刀切削力进行准确描述变得困难^[2]。

国内外许多学者对铣削力建模做了大量工作。Lee 等^[3]指出铣削力不但与切屑断面几何参数有关,而且与微元切削刃的弧长也有密切关系,建议将剪切机制与刃口犁切力作用分别考虑。Kim 等^[4]建立了基于 Z-map 仿真模型的球头铣刀铣削力模型,该类方法在精度要求较高时,计算量大,仿真效率低。Gradisek 等^[5]提出了一种通用立铣刀几何模型的描述方法,并建立了通用切削力预报模型,但未给出切削区域判断方法。Chung-liang Tsai 等^[6]建立了基于最小能量法的球头铣刀切削力预报模型,其预报精度较低。倪其民等^[7]提出了基于 UGII 实体造型技术的球头铣刀三维铣削力仿真方法,对切削区域判断精度提高,但是预报切削力前需要对有不同几何参数的刀具分别建立实体模型,费时费力。

本文采用双重机制的铣削力建模方法,将前刀面剪切效应与后刀面的犁切效应明确分开。切削区域判断采用几何分析方法,便于程序化计算。

1 球头铣刀几何模型

球头铣刀分为恒定螺旋导程和恒定螺旋角两种,前者切削刃的螺旋角沿刀刃不断变化,节省刀具材料;后者螺旋导程沿刀刃不断变化,切削机理一致,但是制造过程复杂。生产实际中,恒定螺旋导程的球头铣刀更为常见,因此本研究以此类铣刀为例。

图 1 为球头铣刀的几何模型。球头铣刀的切削刃由两部分组成,分别位于球头面和圆柱面上,并在球头部分的顶点处相交。球头铣刀球头部分的切削刃可以视作将同等直径的平头铣刀上的螺旋切削刃投影到半球面上而得到。实际切削时主要通过球头部分的切削刃进行切削。

假设球头铣刀的公称螺旋角为 β_0 (即圆柱部分的螺旋角),右旋,刀具刃数为 N_f ,刀具半径为 R_0 ,以铣刀球头部分的刀尖 E 为原点建立铣刀坐标系。其中铣刀中轴线为 z 轴,竖直向上为正向。

依据铣削刃的微分思想,将球头铣刀的切削刃沿轴向离散为一系列微元切削刃,离散密度视预报精度要求而定。每个微元切削刃厚度为 dz (图 1)。

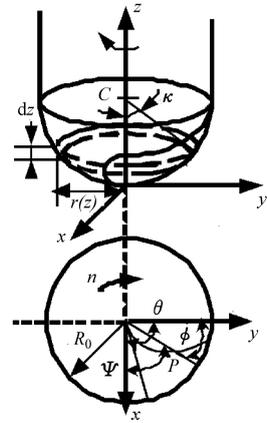


图 1 球头铣刀几何模型

Fig. 1 Geometry of ball-end mills

图 2 为微元切削刃的几何模型。

任意一个微元切削刃的空间位置均可以通过以下 3 个参数确定:轴向高度 $z(j)$,有效切削半径 $r(z)$ 和螺旋滞后角 $\psi(z)$,其中 j 为微元切削刃的编号,最靠近铣刀刀尖处的微元切削刃编号为 1,沿轴向

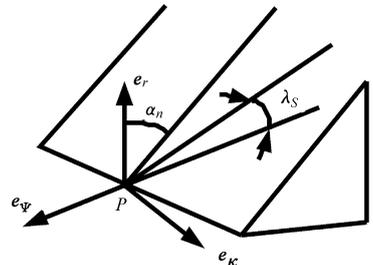


图 2 球头铣刀微元切削刃模型

Fig. 2 Geometry of elementary cutting edge for ball-end mills

依次增加至 N_z ;令 i 为铣刀刀刃编号,刀尖位于 y 轴上的刀刃为 1 号,最大编号为 N_f ,则第 i 个切削刃上,轴向高度为 $z(j)$ 处的微元切削刃的空间位置角 $\varphi(i, z)$ 及 $\psi(z)$ 、 $r(z)$ 可分别表示为

$$\varphi(i, z) = \theta - \psi(z) - (i - 1) \frac{2\pi}{N_f} \quad (1)$$

$$\psi(z) = \frac{z}{R_0} \tan \beta_0 \quad (2)$$

$$r(z) = \begin{cases} \sqrt{R_0^2 - (R_0 - z)^2} & (z \leq R_0) \\ R_0 & (z > R_0) \end{cases} \quad (3)$$

式中 θ ——从铣刀坐标系 y 轴正向开始的铣刀转动角度

高度为 z 的微元切削刃的轴向浸切角 $\kappa(z)$ (微元切削刃法线方向和刀具轴线方向夹角)可表示为

$$\kappa(z) = \begin{cases} \arccos \frac{R_0 - z}{R_0} & (z \leq R_0) \\ \frac{\pi}{2} & (z > R_0) \end{cases} \quad (4)$$

2 工件及刀具加工路径

球头铣刀多用于复杂曲面的精加工与半精加工。在3轴铣床中常用的铣削方式主要有两种,分别为沿坡铣削、逐层去除铣削(或称为等高线铣削)^[8],分别如图3和图4所示。图中, δ 为加工表面与水平面的倾斜角, L_0 、 W_0 分别为工件的加工长度与加工宽度, Z_0 为已加工表面在工件坐标系

$O-XYZ$ 内的最小轴向高度, ΔP 为走刀间距,逆铣时为正,顺铣时为负, f 为刀具进给方向, C 为作为铣刀坐标系原点的刀尖。

图5为球头铣刀铣削加工时,刀具与工件加工区的几何关系示意图。图中, C 为铣刀球头部分的球心, P_C 为已加工工件表面与铣刀球头部分的接触点(切点), P 为当前切削点, z_P 为当前切削点在铣刀坐标系 xyz 上的轴向高度, dn 为已加工工件表面

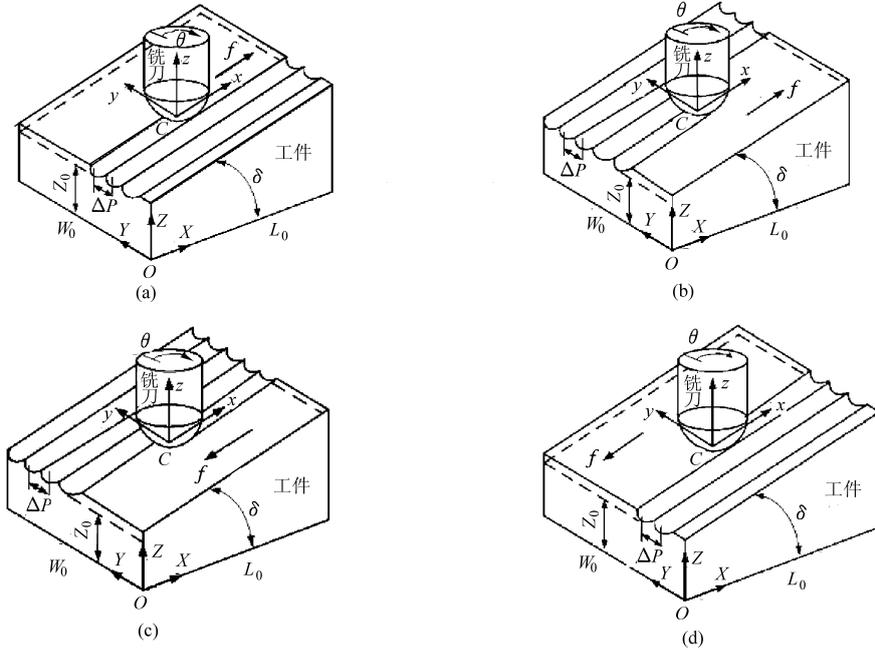


图3 沿坡铣削方式

Fig.3 Ramping milling

(a) 上坡逆铣 (b) 上坡顺铣 (c) 下坡逆铣 (d) 下坡顺铣

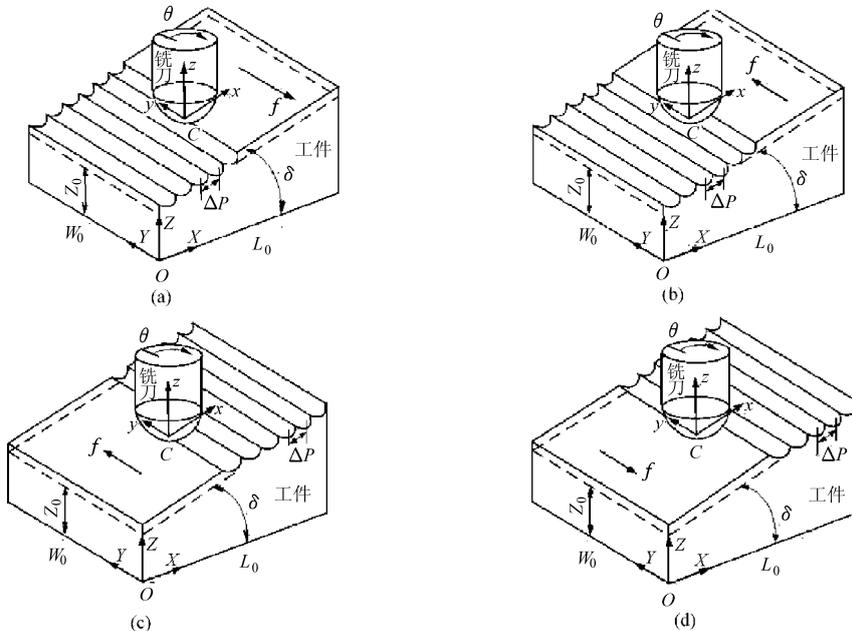


图4 逐层去除铣削方式

Fig.4 Contouring milling

(a) 逐层上坡逆铣 (b) 逐层上坡顺铣 (c) 逐层下坡逆铣 (d) 逐层下坡顺铣

其中

$$dA = t_0 db \quad db = \frac{dz}{\sin\kappa}$$

$$ds = \sqrt{1 + \tan^2\beta_0 \left[\frac{z(j)}{R_0} \left(2 - \frac{z(j)}{R_0} \right) \right]} db \quad (10)$$

式中 K_{tc} 、 K_{rc} 、 K_{ac} ——切向、径向和轴向剪切力系数

K_{tp} 、 K_{rp} 、 K_{ap} ——切向、径向和轴向犁力系数

dA ——微元切削刃剪切面积

t_0 ——未变形切屑厚度

db ——微元切削刃切削宽度

ds ——微元切削刃长度^[9]

螺旋角 β_0 小于 30° 的球头铣刀为工业上常用的,此时式(10)满足关系式

$$\frac{ds}{db} \approx 1 \quad (11)$$

为了分析和测量的方便,将作用在微元切削刃上的瞬时切向力 dF_t 、瞬时径向力 dF_r 和瞬时轴向力 dF_a 统一转换到铣刀坐标系 xyz 下,得到 x 、 y 、 z 方向的瞬时铣削力分量 dF_x 、 dF_y 、 dF_z 为

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\varphi & \sin\varphi\sin\kappa & -\sin\varphi\cos\kappa \\ \sin\varphi & \cos\varphi\sin\kappa & -\cos\varphi\cos\kappa \\ 0 & \cos\kappa & \sin\kappa \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dF_t \\ dF_r \\ dF_a \end{bmatrix} \quad (12)$$

参与切削的微元切削刃数目和分布对于铣刀整体切削力有重要影响。对于任意一个微元切削刃 P ,要判断其在某一瞬时是否参与切削,需要 5 个判定条件。对于当前切削点 P ,当在工件坐标系 $O-XYZ$ 内满足以下 5 个条件时,可认定相应的微元切削刃该瞬时正在参与切削。

条件 1:

$$0 \leq X_p \leq L_0 \quad (13)$$

其中 $X_p = X_C + x_p$ $x_p = r(z) \sin(\varphi(i, z))$

条件 2:

$$0 \leq Y_p \leq W_0 \quad (14)$$

其中 $Y_p = Y_C + y_p$ $y_p = r(z) \cos(\varphi(i, z))$

式中 x_p 、 y_p ——铣刀坐标系上 P 点坐标值

X_C 、 Y_C ——工件坐标系下,铣刀球头部分球心 C 的坐标值

X_p 、 Y_p ——工件坐标系下 P 点坐标值

条件 1、条件 2 表示当前切削点坐标位置在工件大小范围内。

条件 3:

$$0 \leq Z_p \leq Z_{p_s}(X_p) \quad (15)$$

其中 $Z_p = Z_C - R_0 + z_p$ (16)

$$Z_{p_s}(X_p) = Z_{0p_s} + X_p \tan\delta \quad (17)$$

$$Z_{0p_s} = Z_0 + \frac{dn}{\cos\delta} \quad (18)$$

$$X_p = X_{p_c} - R_0 \sin\delta + R_0 \sin\kappa \quad (19)$$

式中 $Z_{p_s}(X_p)$ ——当前切削点 P 处相应的未加工表面上的高度

$Z_{p_s}(X_p)$ 的计算可通过式(17)得到。

联立式(6)、(12)~(16)可将条件 3 改写为

$$R_0(1 - \cos(\kappa - \delta)) \leq dn \quad (20)$$

条件 3 表示当前切削点 P 的高度值小于相应位置处未加工表面的高度值。

条件 4:

$$l_{p_c p} > R_p \quad (21)$$

其中 $l_{p_c p} = |\Delta P - x_p \sin\varphi_x + y_p \sin\varphi_x|$ (22)

$$R_p = r(z_{c_p}) = r(z_p - \tan\delta(x_p \cos\varphi_x + \Delta P \sin\varphi_x)) \quad (23)$$

式中 $l_{p_c p}$ ——当前切削点 P 与上次切削路径的距离

R_p ——上次切削路径上在 $z = z_p$ (铣刀坐标系 xyz 上)时的有效切削半径

条件 4 表示当前切削点 P 在上次切削过程中未被切除,如图 8 所示。

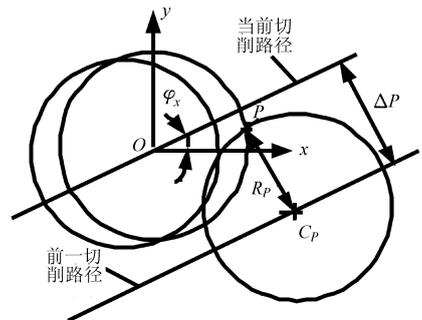


图 8 在 $z = z_p$ 水平面上,当前切削点 P 与上次切削路径的相对位置

Fig. 8 Relative position between current cutting point P and one of the previous path in the horizontal plane for $z = z_p$

条件 5:

$$t_0 > 0 \quad (24)$$

其中

$$t_0 = f_z e_r = f_{z_x} \sin\psi_j \sin\kappa + f_{z_y} \cos\psi_j \sin\kappa + f_{z_z} \cos\kappa \quad (25)$$

式中 f_z ——每齿进给量

e_r ——在当前切削点 P 处铣刀包络线的法向量,如图 2、6 所示

切削过程中,根据式(12)~(14)、(19)、(23)对每个微元切削刃的切削状态进行判断,从而确定球头铣刀上每个瞬时参与切削的微元切削刃的数目与分布。将所有参与切削的微元切削刃上的受力求和,即可得到铣刀的整体切削力。当刀具处于转角

位置 θ 时,铣刀整体切削力可以表示为

$$\begin{cases} F_x = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_z} dF_x(\theta) \\ F_y = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_z} dF_y(\theta) \\ F_z = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_z} dF_z(\theta) \end{cases} \quad (26)$$

式中 $F_x(\theta)$ 、 $F_y(\theta)$ 、 $F_z(\theta)$ ——球头铣刀铣削过程中受到的整体切削力在 x 、 y 、 z 方向的分力

4 试验验证

为验证模型的有效性,进行了球头铣刀切削力试验。铣削力测量系统如图 9 所示。试验过程中,机床为 DAEWOO-510 型三轴立式加工中心,刀具为直径 8 mm、螺旋角 30° 的两刃硬质合金球头铣刀,工件材料为硬度 30HRC 的 45 号钢,测力仪型号为 Kistler 9257A,电荷放大器型号为 Kistler 5007;两组试验轴向切削深度分别为 0.5 mm(图 10)和 1.5 mm(图 11),进给速度 160 mm/min,转速 800 r/min,径向切削宽度 8 mm,槽铣,平面铣削($\delta = 0^\circ$),上坡顺铣,干切削。轴向切削深度为 0.5 mm 和 1.5 mm 下试验铣削力和相应的预测结果(预测用铣削力系数见表 2^[10])分别如图 10、11 所示。

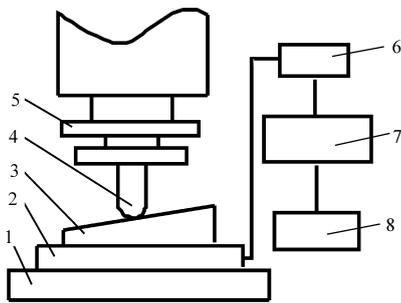


图 9 铣削力测量系统

Fig.9 Measurement system for milling force

1. 工作台 2. 测力仪 3. 工件 4. 球头铣刀 5. 机床主轴
6. 电荷放大器 7. 数据采集装置 8. 计算机

从仿真结果与试验测量结果中,可知本文模型预测的切削力和铣削试验测量的切削力具有很好的一致性。

参 考 文 献

- 1 孙孟琴,翁泽宇. 球头铣刀切削力模型的研究进展[J]. 工具技术,2006, 40(9):7~9.
Sun Mengqin, Weng Zeyu. Development of study on cutting force model of ball-end milling cutter[J]. Tool Engineering, 2006, 40(9): 7~9. (in Chinese)
- 2 李带娣. 基于铣削力预报模型的加工进给率优化研究[D]. 大连:大连理工大学,2007.
Li Daidi. Feedrate scheduling based on predictive force model for NC machining[D]. Dalian: Dalian University of

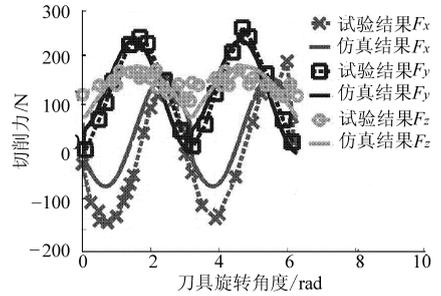


图 10 轴向切削深度 0.5 mm 试验结果与仿真结果对比
Fig.10 Comparison between test results and simulation results for axial cutting depth of 0.5 mm

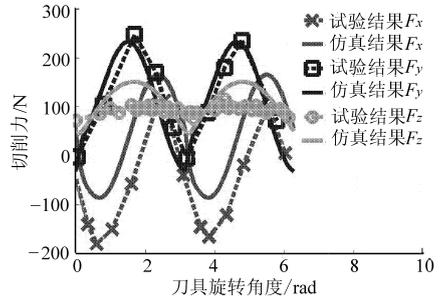


图 11 轴向切削深度 1.5 mm 试验结果与仿真结果对比
Fig.11 Comparison between test results and simulation results for axial cutting depth of 1.5 mm

表 2 球头铣刀切削力系数

Tab.2 Cutting force coefficients of ball-end milling

$K_{te}/N \cdot mm^{-2}$	$K_{re}/N \cdot mm^{-2}$	$K_{ae}/N \cdot mm^{-2}$
2 577.00	1 575.60	386.27
$K_{tp}/N \cdot mm^{-1}$	$K_{rp}/N \cdot mm^{-1}$	$K_{ap}/N \cdot mm^{-1}$
18.41	29.22	-6.34

5 结束语

提出了球头立铣切削力预报的方法。把前刀面剪切效应与后刀面的犁切效应分别考虑,并应用于球头立铣切削力的建模过程,通过将球头铣刀轴向离散,将铣刀切削过程视为一系列微元切削刃的斜角切削的综合作用过程。采用几何判断的方法求解了球头铣削过程参与切削的微元切削刃分布。应用提出的切削力预报模型,通过在 Matlab 环境下编程,实现了切削力模型的程序化计算与数值仿真,仿真结果和球头立铣试验结果对比,验证了提出模型的有效性。

- Technology, 2007. (in Chinese)
- 3 Lee P, Altintas Y. Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36(9): 1 059 ~ 1 072 .
 - 4 Kim G M, Cho P J, Chu C N. Cutting force prediction of sculptured surface ball end milling using Z-map[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(2): 277 ~ 291.
 - 5 Gradisek J, Kalveram M, Weinert K. Mechanistic identification of specific force coefficients for a general end mill [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(4): 401 ~ 414.
 - 6 Chung-liang Tsai, Yunn-shiuan Liao. Prediction of cutting force in ball-end milling by means of geometric analysis [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1 ~ 3): 24 ~ 33.
 - 7 倪其民,李从心,阮雪榆. 基于实体造型的球头铣刀三维铣削力仿真[J]. 上海交通大学学报, 2001, 7: 1 003 ~ 1 007. Ni Qimin, Li Congxin, Ruan Xueyu. Cutting forces simulation of ball-end milling based on solid modeling[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 7: 1 003 ~ 1 007. (in Chinese)
 - 8 Fontaine M, Moufki A, Devillez A, et al. Modeling of cutting forces in ball-end milling with tool-surface inclination part I : prediction force model and experimental validation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 189(1 ~ 3): 73 ~ 84.
 - 9 Wang J J, Zheng C M. Identification of shearing and ploughing cutting constants from average forces in ball-end milling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(6): 695 ~ 705.
 - 10 李英松. 基于傅里叶级数的铣削力建模及实验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009. Li Yingsong. Milling force modeling and experiment research based on the Fourier series[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
-

(上接第 188 页)

- 6 Senturia S D. 微系统设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
- 7 Colibrys (Switzerland) Ltd. MEMS capacitive accelerometers[EB/OL]. (2009-03-30) [2010-07-05]. <http://www.colibrys.com/e/page/109/>.
- 8 Abhishek Kumar, Shibu Clement, Agrawal V P. Structural modeling and analysis of a effluent treatment process for electroplating - a graph theoretic approach [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 179(3): 748 ~ 761.
- 9 Prince A A, Agrawal V P. Structural modelling and integrative analysis of microelectromechanical systems product using graph theoretic approach [J]. Microsystem Technologies, 2009, 15(7): 1 083 ~ 1 096.
- 10 楼少敏,许沧粟. 车载式拖拉机座椅舒适性测试系统的研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(2): 35 ~ 36, 61. Lou Shaomin, Xu Cangsu. Measurement system for ride comfort of tractor seats[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 35 ~ 36, 61. (in Chinese)