

机电学院

054 系

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
1	张臣 周儒荣 庄海军 周来水	讲师 教授 副教授 教授	054	基于Z-map模型的球头铣刀铣削力建模与仿真	航空学报	2006. 27. 2
2	张臣 周儒荣 庄海军 周来水	讲师 教授 副教授 教授	054	确定铣削力模型中刀具偏心参数的一种算法	机械科学与技术	2006. 25. 5
3	谭昌柏 周来水 安鲁陵	讲师 教授 教授	054	用于结构件模型重建的特征参数提取技术	中国机械工程	2006. 17. 5
4	张丽艳	教授	054	3D Face Authentication and Recognition Based on Bilateral Symmetry Analysis	ORIGINAL ARTICLE	2006. 22
5	张维中 张丽艳	博士 教授	054	基于标记点的图像特征匹配的鲁棒算法	中国机械工程	2006. 17. 22
6	张维中 张丽艳	博士 教授	054	一种基于标记点的近景摄影测量系统	东南大学学报	2006. 36. 5
7	张维中 张丽艳	博士 教授	054	基于标记点丢失的多幅自标定图像的3维重建和相机姿态恢复	中国图像图形学报	2006. 11. 9
8	张维中 张丽艳	博士 教授	054	基于标记点的多帧透视图像三维重建算法	中国机械工程	2006. 16. 17
9	刘浩 廖文和	讲师 教授	054	非均匀B样条曲面顶点及法向插值	数值计算与计算机应用	2006. 4
10	李迎光	副教授	054	Representation and Share of Part Feature Information in Web-based Parts Library	Expert Systems with Applications	2006. 31
11	黄翔	教授	054	Some Algorithms of the Tool Paths Generation for High Speed Milling		2006
12	王俊 黄翔 李迎光	硕士 教授 副教授	054	基于装配模型的快速设计方法研究	中国制造业信息化	2006. 35. 1
13	高申存 黄翔 李迎光	硕士 教授 副教授	054	基于知识熔接的标准件库的研究与实现	机械制造与自动化	2006
14	蒋红岩 黄翔	硕士 教授	054	基于CATIA的装配型架骨快速设计技术研究与实现	机电产品开发与创新	2006. 19. 5
15	戴宁 廖文和	讲师 教授	054	牙齿预备体颈缘线自适应提取算法的研究与实现	中国生物医学工程学报	2006. 25. 3
16	郭宇 廖文和 程筱胜	硕士 教授 副教授	054	A new simulation optimization system based virtual simulation for manufacturing system	Simulation Modelling Practice Theory	2006. 14
17	于长生 鲁世红 王静	硕士 副教授 教授	054	柔性滚弯成形的技术方案设计	新技术新工艺	2006. 3
18	鲁世红	副教授	054	Prediction of SpringBack of the Two-axle Rotary Shaping Based on Neural Network	Trans Tech Publications	2006
19	鲁世红	副教授	054	柔性滚弯技术在国外的应用进展	新技术新工艺	2006. 3
20	李小燕 鲁世红	硕士 副教授	054	AlMgSc合金板激光冲击成形实验研究	应用激光	2006. 26. 5

21	王静 鲁世红 于长生	硕士 副教授	054	基于ANN的冲裁合理间隙的预测研究	机械科学与技术	2006. 25. 8
22	王静 鲁世红 于长生	硕士 副教授	054	神经网络和有限元方法在两轴柔性滚弯中的应用	机械科学与技术	2006. 25. 9
23	李娜 金霞	硕士 讲师	054	光学应变测量系统的研究现状与展望	新技术新工艺	2006. 8
24	刘长毅	副教授	054	Machining feature recognition based on graph volume decomposition 基于图的体积分解的加工特征识别方法	计算机集成制造系统	2006 Vol.12 Issue7: p 1013-1017
25	刘长毅	副教授	054	Feature based Machining Process Planning Modeling and Integration for Life Cycle Engineering	1st International Symposium on Digital Manufacture	2006: p 633-636
26	刘长毅 张格伟	副教授 博士生	054	Internet based reconfigurable architecture for CAPP development and customization	Journal of Communication and Computer	3 Issue 1: p 84-91
27	周炜 刘长毅 胡文伟	硕士生 副教授	054	基于属性邻接图的轴类零件制造特征识别方法	机械科学与技术	2006 Vol. 25 Issue 6: p716-720
28	邱卫华 刘长毅	硕士生 副教授	054	基于ACIS-HOOPS的工序图设计 ActiveX控件开发	制造业自动化	2006 Vol. 28 Issue S1: p226- 229
29	谢兰生	副教授	054	The effect of strut geometry on the yielding behaviour of open-cell foams	International Journal of Mechanical Sciences	2006
30	谢兰生	副教授	054	Optimization of the die shape for high shrink flanging in hydraulic press rubber forming	Proceedings of the 7th ICFDM 2006	2006
31	谢兰生	副教授	054	金属塑性成形原理教学改革初探	南航社科学报	2006. 8. 1
32	谢兰生	副教授	054	非对称型材数控拉弯成形回弹研究	机械科学与技术	2006. 25. 7
33	赵亚西 童国权	硕士 教授	054	微型齿轮挤压成形	模具工业	2006. 32. 11
34	赵亚西 童国权	硕士 教授	054	尺寸效应对黄铜微粗微成形影响规律的研究	电加工与模具	2006. 6
35	童国权	教授	054	Comparative study of element formulation on simulation of superplastic forming	9th International Conference on superplasticity in Advanced Materials, ICSAM2006	2006

36	周清	副教授	054	Microstructural Modification in a Beta Titanium Alloy for Impant Applications	Materials Transactions	2006. 47. 1
37	周清	副教授	054	Tensile properties of AZ31 sheet/bar and effects of texture	Trans. Nonferrous Met. Soc	2006. 16
38	沈建新	教授	054	基于复曲面的准分子激光屈光矫正计算模型	东南大学学报	2006. 36. 4
39	沈建新	教授	054	人眼波前像差表示、测量及矫正研究	激光生物学报	2006. 15. 3
40	周铭丽 沈建新	硕士 教授	054	波前像差的矫正原理及工作流程研究进展	眼视光学杂志	2006. 8. 5
41	周铭丽 沈建新	硕士 教授	054	准分子激光眼科治疗机中激光器控制实现	激光生物学报	2006. 15. 3
42	刘泗岩 廖文和	博士 教授	054	基于改进MC算法的DIM格式CT图像三维重建	机械科学与技术	2006. 25. 12
43	唐鹰 沈建新 廖文和	硕士 教授 教授	054	基于UML的医疗保险信息门户网站的开发	计算机工程与设计	2006. 9
44	袁天然 戴宁 程筱胜 廖文和	硕士 讲师 高工 教授	054	高质量保形三角网格简化算法	系统仿真学报	2006. 18. 1
45	孙全平 廖文和	博士 教授	054	高速铣削加工工艺优化技术的研究	机床与液压	2006. 1
46	汤廷孝 廖文和 黄翔	博士 教授 教授	054	面向装配的适应性特征建模研究	机械科学与技术	2006. 25. 9
47	汤廷孝 廖文和 黄翔 刘永	博士 教授 教授 博士	054	产品设计过程建模及重组	华南理工大学学报 (自然科学版)	2006. 34 (2)
48	汤廷孝 刘勇 廖文和 黄翔	博士 博士 教授 教授	054	CBR系统中的实例修改研究	机械科学与技术	2006. 25. 4
49	张翔 廖文和 俞青 刘泗岩 焦益群	博士 教授 博士 博士 博士	054	CAD技术在牙齿上下颌模型 虚拟对位中的应用	南航学报	2006. 38 (2)
50	张翔 廖文和 俞青 戴宁 安涛	博士 教授 博士 博士 博士	054	口腔修复体咬合面虚拟调整	中国机械工程	2006. 17. 20
51	张翔 廖文和 俞青 戴宁 安涛	博士 教授 博士 博士 博士	054	基于OpenGL的复杂多面体模 型间距离计算及碰撞检测	东南大学学报 (自然科学版)	2006. 36 (2)
52	曹正林 廖文和 沈建新	博士 教授 教授	054	Zernike多项式拟合人眼 波前像差的一种新算法	光学精密工程	2006. 14 (2)

53	曹正林 廖文和 沈建新	博士 教授 教授	054	准分子激光切削角膜与飞点扫描算法的研究	激光技术	2006. 30. 6
54	俞烽 廖文和	博士 教授	054	基于XML的CAPP信息模型的集成	机械科学与技术	2006. 25. 9
55	童桂 廖文和	博士 教授	054	人眼波前像差及准分子激光手术矫正的研究	应用激光	2006. 26. 4
56	童桂 廖文和	博士 教授	054	应用Hartmann-Shack原理测量人眼波前像差的系统研究	应用激光	2006. 26. 3
57	孙全平 廖文和	博士 教授	054	叶轮流道5轴高速铣加工刀轨计算	南京航空航天大学学报	2006. 38. 5
58	陈晓兵 廖文和	博士 教授	054	敏捷制造环境下虚拟产品的协同设计模式	网络化制造	2006
59	张格伟 廖文和	博士 教授	054	基于摘要信息函数的工艺文档的电子签名	机械科学与技术	2006. 25. 9
60	王辉 高霖	博士 教授	054	凸模直径以及试件形状对成形极限图的影响	机械科学与技术	2006. 25. 11
61	王辉 高霖	博士 教授	054	一种基于有限元仿真的板料成形极限预测方法	山东大学学报	2006. 36. 2
62	李泂杲 高霖	博士 教授	054	基于管端轴向位移驱动的T型管液压成形	机械科学与技术	2006. 25. 8
63	李泂杲 高霖	博士 教授	054	金属板料渐进成形有限元仿真过程中复杂成形路径的构建方法	机械工程学报	2006. 42. 6
64	李泂杲 高霖	博士 教授	054	叉型件管端轴向位移驱动式液压成形技术	华南理工大学学报 (自然科学版)	2006. 34. 11
65	卫 炜 张丽艳 周来水	讲 师 教	05 4	一种快速搜索海量数据集K近邻空间球算法	航空学报	2006 年 27 卷 5 期
66	卫 炜 周来水 张丽艳	讲 师 教	054	海量STL文件的快速读取与显示	机械科学与技术	2006 年 25 卷 8 期
67	王 坚 周来水 张维中	博 士 教	054	基于三角片拼合的STL网格模型重建算法	计算机辅助设计与图形学学报	2006 年 18 卷 11 期
68	姬俊峰 周来水 张得礼	博 士 教	054	NURBS曲线插补过程中运动平滑处理	中国机械工程	2006 年 17 卷 21 期
69	李鲜花 周来水 陈文亮	硕 士 教	054	有限元网格的圆角过渡特征提取及网格修改	中国机械工程	2006 年 17 卷 18 期
70	陈 功 周来水 陈文亮	博 士 教	054	复合材料构件模具材料选择模糊决策研究	宇航材料工艺	2006 年 卷 5 期
71	邓冬梅 周来水	博 士 教	054	矩形件排样的研究进展	宇航材料工艺	2006 年 卷 5 期
72	王 坚 周来水 张丽艳	博 士 教	054	一种新的空间曲线匹配算法	中国机械工程	2006 年 17 卷 16 期
73	周 海 周来水	博 士	054	任意拓扑三角网格模型的Loop细分曲面重建系统	中国机械工程	2006 年 17 卷 16 期
74	汪 俊 周来水 安鲁陵	博 士 教	054	逆向工程中一种新的特征识别算法	南京航空航天大学学报	2006 年 38 卷 4 期

75	王玉国 周来水 安鲁陵	博士教	054	一种基于曲线拟合与采样的 点云数据压缩方法	机械科学与技术	2006 年 25 卷 8 期
76	汪 俊 周来水 安鲁陵	博士教	054	具有复杂轮廓特征的实体模型重建方法	中国机械工程	2006 年 17 卷 11 期
77	尹旺中 周来水 安鲁陵	硕士教	054	基于三角片法矢调整的三角网格模型光顺	机械科学与技术	2006 年 25 卷 4 期
78	朱延娟 周来水 安鲁陵	博士教	054	散乱点云数据配准算法	计算机辅助设计与图形学学报	2006 年 18 卷 4 期
79	神会存 周来水	博士	054	基于离散曲率计算的三角 网格模型优化调整	航空学报	2006 年 27 卷 2 期
80	张得礼 周来水 安鲁陵	博士教	054	数控加工运动的平滑处理	航空学报	2006 年 27 卷 5 期
81	安鲁陵 汪 伟 周来水	教授 副教授	054 052 054	WEDM oriented micro gear design and mesh simulation	东南大学学报	2006 年 22 卷 1 期
82	陈明和 高霖	教授 教授	054	Numerical Simulation of Stretch Bending Process and Spring Back for T Section Aluminum Extrusions	Key Engineering Materials	2006
83	陈明和	教授	054	Superplasticity and superplastic forming ability of Al-Mg-Sc alloy	Trans. Nonferrous Met. Soc	2006
84	陈明和 高霖	教授 教授	054	Establishing the forming limit diagram based on fem simulation	ICFDM	2006
85	陈明和	教授	054	大学工科专业课精品课程建设的几点思考	江苏高教	2006. 2
86	薛玉雷 陈明和	硕士 教授	054	基于数值模拟的应力成形极限图的应用研究	航空精密制造技术	2006. 42. 2
87	张杰刚 陈明和	硕士 教授	054	电磁技术在板材成形中的应用	新技术新工艺	2006. 9
88	张杰刚 陈明和	硕士 教授	054	板料激光成形技术	热加工工艺	2006. 35. 13
89	王喜 陈明和	硕士 教授	054	铍青铜零件弯曲工艺及模具设计	锻压技术	2006. 3

文章编号:1000-6893(2006)02-0347-06

基于 Z-map 模型的球头铣刀铣削力建模与仿真

张 臣, 周儒荣, 庄海军, 周来水

(南京航空航天大学 CAD/CAM 工程研究中心, 江苏 南京 210016)

Modeling and Simulation of Ball-end Milling Forces Based on Z-map Model

ZHANG Chen, ZHOU Ru-rong, ZHUANG Hai-jun, ZHOU Lai-shui

(Research Center of CAD/CAM Engineering, Nanjing University of Aeronautics
and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘 要: 对球头铣刀铣削力建模进行了研究。在 Z-map 仿真模型的基础上, 提出了识别加工中参与切削的切削刃单元的方法。通过考虑刀具偏心和刀具变形对瞬时切削厚度的影响, 推导出了瞬时切削厚度的表达式, 由铣削力和切削负载之间的关系, 建立了球头铣刀三轴铣削力仿真模型。铣削力仿真计算与铣削实验的对比表明在考虑刀具偏心和刀具变形后所建立的铣削力模型能够对铣削力进行准确的预测。

关键词: 计算机辅助制造; 铣削力模型; Z-map 模型; 球头铣刀; 刀具偏心; 刀具变形

中图分类号: V261.2⁺3; TP391

文献标识码: A

Abstract: The model of ball-end cutter milling forces is studied. The algorithm to identify the engaging cutting edges is proposed using Z-map simulation model in ball-end milling process. The expression of instantaneous chip thickness is discussed by analyzing the effects of cutter eccentricity and deflection. Then ball-end cutter milling forces simulation model is established on the basis of the relationship between milling force and chip load. At the same time, the simulation results agree well with those obtained from experiments and show that the presented milling forces model considering cutter eccentricity and deflection can predict milling forces correctly.

Key words: CAM; milling forces model; Z-map model; ball-end mill cutter; cutter eccentricity; cutter deflection

数控铣削加工广泛用于航空、汽车、机械等领域, 为了保证零件加工的质量, 通常选择保守的加工条件, 使生产时间和加工成本大大增加。近年来, 由于数控加工几何仿真得到了一些应用, 上述情况有所改善, 但数控加工物理仿真的研究和应用却远远落后于生产实际的需要, 从而引起人们的高度重视, 也使得作为物理仿真研究基础的铣削力建模备受关注。由于球头刀具铣削过程的复杂性, 以往在铣削力建模方面的研究多数集中在平头铣刀上, 球头铣刀铣削力建模方面的研究相对较少, 特别是基于仿真模型, 综合考虑刀具偏心和刀具变形情况的铣削力建模的研究就更少。Tai 和 Fuh^[1] 仅在刀具存在偏心情况下对球头铣刀铣削力建模进行了研究。Sim 和 Yang^[2] 则是通过考虑刀具变形, 建立了球头细长刀具的铣削

力模型。Altintas 和 Lee^[3,4] 对球头铣刀切削刃微分化分割后计算铣削力, 所提出的球头铣刀力学模型仅在单刃球头铣刀上进行了验证。Kim^[5] 等基于 Z-map 仿真模型, 建立了球头铣刀铣削力模型, 但模型中没有讨论刀具偏心和刀具变形对铣削力的影响。Ismail^[6] 通过离散球头铣刀切削刃和工件为合适的网格单元, 建立球头铣刀铣削力模型, 但对加工中参与切削的离散单元的判断依据不够准确。国内学者对球头铣刀铣削力建模进行了研究, 倪其民^[7] 等、马万太^[8] 等建立了考虑刀具变形的球头铣刀铣削力模型, 但未见综合考虑刀具偏心和刀具变形对铣削力影响的研究成果。

针对上述研究存在的不足, 本文以作者所在的课题组研发的数控加工仿真原型系统为基础^[9], 基于 Z-map 仿真模型, 提出了识别加工中参与切削的切削刃单元, 通过综合考虑刀具偏心和刀具变形对瞬时切削厚度的影响, 建立了球头铣刀铣削力仿真模型, 为零件加工表面质量的预

收稿日期: 2005-03-11; 修订日期: 2005-07-20

基金项目: 国家重点科技攻关专题(96-A01-01-05)、江苏省重大科技攻关项目(G98017-3)和教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划(教人司[2002]123号)资助项目

测和工艺参数优化的研究提供基础。

1 加工中参与切削的刃单元的确定

参与切削的切削刃单元的分布和数目是影响铣削力的一个关键因素,为此基于 Z-map 仿真模型,首先确定切削瞬时刀具和工件的接触区域,判断刀具离散的切削刃单元是否在接触区域内,从而获得参与切削的刃单元的分布和数目。

1.1 接触区域的表示

设球头铣刀的螺旋角为 β ,右旋,切削刃数为 N_t ,刀具半径为 R ,以刀尖点为原点建立的刀具坐标系如图 1。其中 z 轴为刀具轴线,将刀具切削刃离散为一系列单元的集合,离散密度视加工精度要求而定,图中 ϕ 为刀具切削刃离散单元相对 z 轴的位置角,由 ϕ 决定切削刃离散单元距离刀尖的位置; i 为切削刃序号; θ 为刀具转角; $\varphi(i, \theta, \phi)$ 为铣刀转角为 θ 时,第 i 个切削刃和 z 轴位置角为 ϕ 处切削刃离散单元的转角。

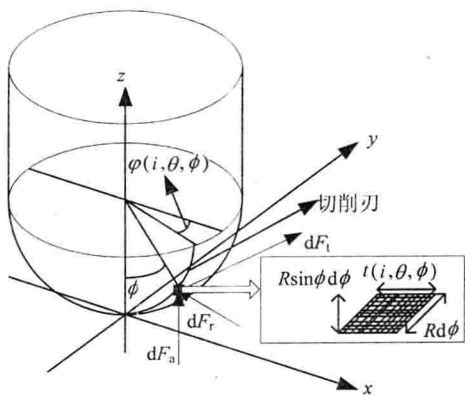


图1 球头刀具坐标系及受力分析

Fig. 1 Reference frame and force analysis of ball-end milling cutter

如图 2 所示,在 Z-map 离散法仿真中,以工件毛坯离散网格点的高度表示三维曲面,在每一仿真瞬时,离散网格点高度发生变化的网格点构成这一瞬时刀具和工件的接触区域 $A(\theta)$,瞬时采用刀具转角 θ 表示。

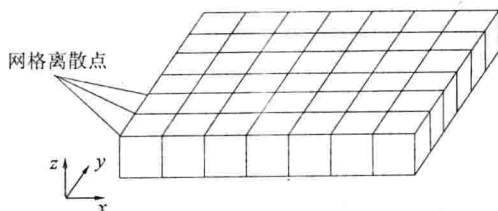


图2 仿真毛坯的 Z-map 表示

Fig. 2 Z-map model of simulation

$$A(\theta) = \{Q_w(n) \mid Q_w(x_{wn}, y_{wn}, z_{wn})\} \quad (1)$$

式中: $0 \leq n \leq N_\theta$; N_θ 为该瞬时接触区域包含的 Z-map 数据点个数; x_{wn}, y_{wn} 为数据点在 Z-map 表示中的 x, y 方向的离散索引; z_{wn} 为数据点的 z 方向坐标值。

1.2 参与切削的刃单元的确定

由 1.1 节接触区域的表示可知接触区域是一个有界的三维区域、不会存在空洞,依据这一特点结合 Z-map 离散法仿真,提出了 PEEM (pick-up edge of engaging in cutting process method) 方法确定参与切削的切削刃离散单元。该方法通过几何仿真系统获得每一瞬时刀具和工件的接触区域,接触区域采用 Z-map 数据点的格式进行保存,按一定精度离散刀具切削刃,获得切削刃离散单元的坐标表示,通过比较切削刃离散单元是否处在该瞬时接触区域内,确定参与切削的切削刃离散单元。算法的流程如图 3,其中 N_t 为切削刃数; E_n 为切削刃上划分的离散单元数; $X_{\min}, X_{\max}, Y_{\min}, Y_{\max}$ 为接触区域在 x, y 方向的极值; S_x, S_y 分别为接触区域在 x, y 方向以步长 step 划分的区间数目。

2 铣削力建模

通过将球头铣刀切削刃平行地分割为许多很小的切削单元,刀具受到的切削力为参与切削的切削单元的受力之和,分析切削单元的切削力特性以及参与切削的切削单元的分布,就可以建立起整个刀具的基本切削力模型。

如图 1 所示,将球头铣刀沿轴向划分成许多很小的离散单元,作用在刀刃单元上的空间铣削力可以分解为单元径向力 dF_r 、单元切向力 dF_t 和单元轴向力 dF_a 。对刀刃单元 (i, θ, ϕ) 有

$$\left. \begin{aligned} z &= R(1 - \cos\phi) & 0 \leq \phi \leq \pi/2 \\ z &= R(1 - \cot\phi) & \pi/2 \leq \phi \leq \pi \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式(2), (i, θ, ϕ) 的单元面积 dA 为

$$\left. \begin{aligned} dA &= t(i, \theta, \phi) dz = t(i, \theta, \phi) R \sin(\phi) d\phi & 0 \leq \phi \leq \pi/2 \\ dA &= t(i, \theta, \phi) dz = t(i, \theta, \phi) R \csc^2(\phi) d\phi & \pi/2 \leq \phi \leq \pi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

根据式(3)以及铣削力与切削负载的内在关系,有下面的公式成立

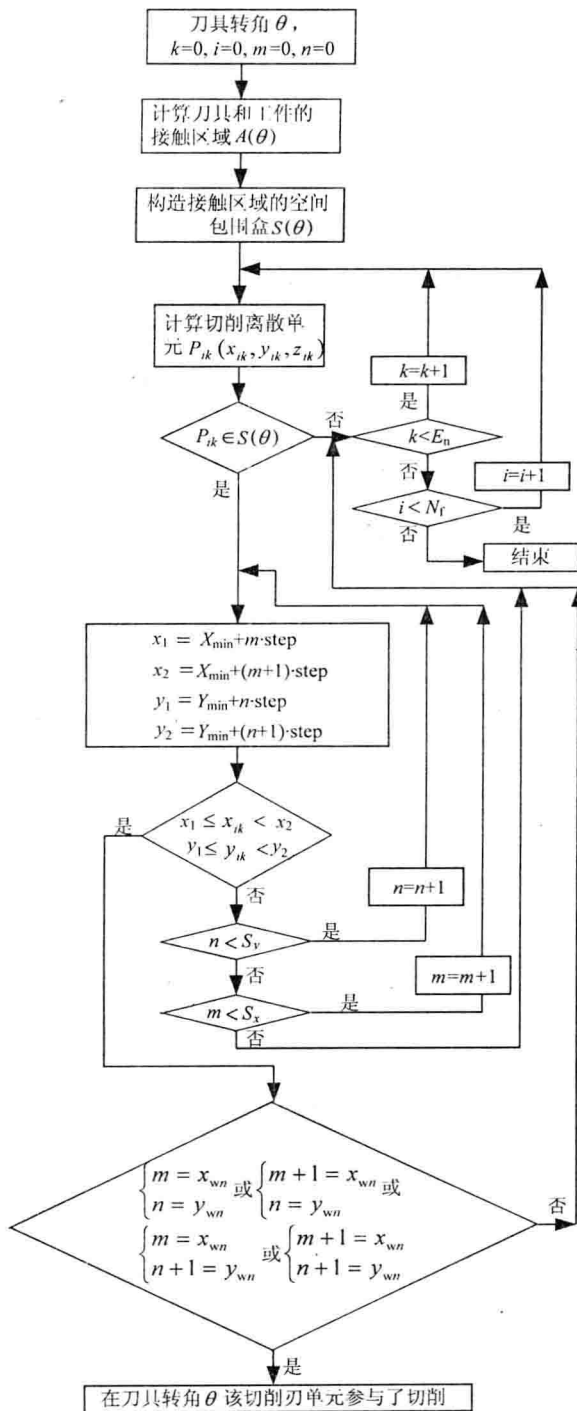


图3 PEEM算法流程

Fig. 3 PEEM algorithm flow chart

$$\left. \begin{aligned} dF_t(i, \theta, \phi) &= K_t(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_t} R \sin(\phi) d\phi \\ dF_r(i, \theta, \phi) &= K_r(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_r} R \sin(\phi) d\phi \\ dF_a(i, \theta, \phi) &= K_a(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_a} R \sin(\phi) d\phi \end{aligned} \right\} \quad 0 \leq \phi \leq \pi/2 \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} dF_t(i, \theta, \phi) &= K_t(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_t} R \csc^2(\phi) d\phi \\ dF_r(i, \theta, \phi) &= K_r(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_r} R \csc^2(\phi) d\phi \\ dF_a(i, \theta, \phi) &= K_a(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_a} R \csc^2(\phi) d\phi \end{aligned} \right\} \quad \pi/2 \leq \phi \leq \pi \quad (5)$$

式(4)与式(5)中: i 为切削刃序号; θ 为刀具转角; ϕ 为切削刃离散单元的位置角; $t(i, \theta, \phi)$ 为瞬时切削厚度; K_t, K_r 和 K_a 为切向、径向和轴向铣削力系数; m_t, m_r, m_a 为瞬时切削厚度尺寸影响指数。

分解单元径向力、单元切向力和单元轴向力至 x, y, z 方向, 得

$$\begin{bmatrix} dF_x(i, \theta, \phi) \\ dF_y(i, \theta, \phi) \\ dF_z(i, \theta, \phi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\varphi(i, \theta, \phi) & -\cos\varphi(i, \theta, \phi) & 0 \\ \cos\varphi(i, \theta, \phi) & -\sin\varphi(i, \theta, \phi) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_t(i, \theta, \phi) \\ dF_r(i, \theta, \phi) \\ dF_a(i, \theta, \phi) \end{bmatrix} \quad (6)$$

给定刀具转角 θ , 作用在刀具上的切削合力可通过对所有参与切削的切削刃离散单元的受力进行累加得到, 其各向分力如下

$$\left. \begin{aligned} F_x(\theta) &= \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_i} \int_{\phi_1}^{\phi_2} dF_x(i, \theta, \phi) \\ F_y(\theta) &= \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_i} \int_{\phi_1}^{\phi_2} dF_y(i, \theta, \phi) \\ F_z(\theta) &= \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_i} \int_{\phi_1}^{\phi_2} dF_z(i, \theta, \phi) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: N_f 为刀具刃数; N_i 为刀具处于转角 θ 时, 第 i 个切削刃上参与切削的切削刃段数; ϕ_1, ϕ_2 为第 j 个参与切削的切削刃段的最小和最大位置角。

从式(7)可以看出, 除了切削刃段影响铣削力的分布和数目外, 瞬时切削厚度也对铣削力产生影响, 而瞬时切削厚度又与刀具偏心和刀具变形有密切关系。下面从刀具偏心和刀具变形对瞬时切削厚度综合影响确定瞬时切削厚度的计算模型。

3 瞬时切削厚度的计算模型

3.1 刀具偏心和刀具变形的计算

如图4所示, 定义球头铣刀圆柱底面上由主

轴旋转中心指向刀具几何中心的方向为偏心方向, oo' 的距离为 ρ , oo' 的延长线与圆柱底面母线交于 o_r , 令沿着逆时针方向距离 o_r 最近的切削刃编号为 1, 定义切削刃 1 在圆柱底面的交点 m 和 o' 的连线与 oo' 的夹角为初始偏心角 α_r 。

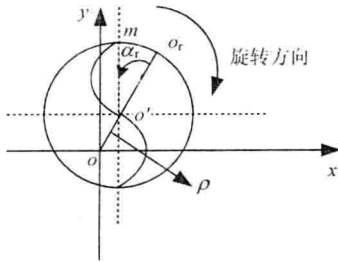


图4 刀具偏心计算示意图

Fig. 4 Sketch map of cutter eccentricity calculation

对于第 i 个切削刃, 刀具转角为 θ , 相对 z 轴的位置角为 ϕ 的离散单元 (i, θ, ϕ) , 其偏心角计算如下

$$\alpha_r(i, \theta, \phi) = \begin{cases} a_r + \cos\phi \tan\beta + (i-1) \frac{2\pi}{N_t} & 0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2} \\ a_r + \cot\phi \tan\beta + (i-1) \frac{2\pi}{N_t} & \phi \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (8)$$

切削刃离散单元 (i, θ, ϕ) 的实际切削半径为

$$R_r(i, \theta, \phi) = R(i, \theta, \phi) + \rho \cos(\alpha_r(i, \theta, \phi)) \quad (9)$$

$$\text{式中, } R(i, \theta, \phi) = \begin{cases} R \sin\phi & 0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2} \\ R & \phi \geq \frac{\pi}{2} \end{cases}.$$

同时在铣削加工中, 铣削系统的弹性变形不可忽略。铣削系统的弹性变形由刀具产生的变形和刀具夹头产生的变形组成, 产生的变形

$$\delta = \delta_t + \delta_c \quad (10)$$

式中: δ 为总的刀具变形; δ_t 为刀具体产生的变形; δ_c 为刀具夹头的变形。

刀具体部分产生的变形可以通过将其简化为一悬臂梁, 计算该悬臂梁在不同位置产生的弯曲变形即可; 刀具夹头部分产生的变形通过将其简化为一线形弹簧计算产生的弯曲变形^[2], 然后两者叠加即可获得总的刀具变形。

3.2 瞬时切削厚度的确定

切削刃离散单元的瞬时切削厚度实际上就是

当前切削刃的切削路径和前一切削刃的切削路径在切削刃转角 $\varphi(i, \theta, \phi)$ 处的径向距离。图5为切削刃离散单元 $p(i, \theta, \phi)$ 的瞬时切削厚度计算示意图, 进给速度矢量与 y 方向的夹角为 α , 进给速度矢量在 xz 平面内的投影与 z 方向的夹角为 γ 。由于存在刀具偏心, 图中刀具轴线中心 c_i 和 c_{i-1} 偏离了主轴旋转中心 o_i 和 o_{i-1} , 同时, 刀具变形后轴线中心为 o'_i 和 o'_{i-1} , 主轴旋转中心分别在 x , y 方向偏离了 $f_t \sin\alpha \sin\gamma$ 和 $f_t \cos\alpha$ 。

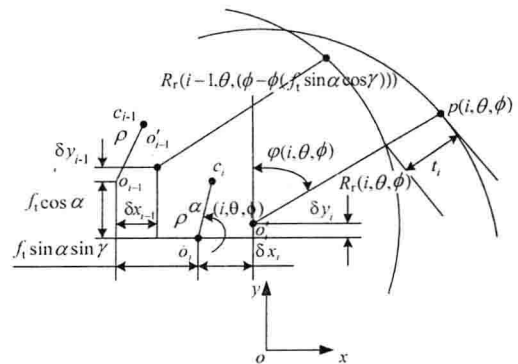


图5 瞬时切削厚度计算示意图

Fig. 5 Sketch map of instantaneous chip thickness

假设在刀具转角位置 θ 时, 刀具轴线中心 o_i 的坐标为 $(0, 0)$, 则切削离散单元 $p(i, \theta, \phi)$ 在切削刃转角 $\varphi(i, \theta, \phi)$ 处, 径向切削半径可以表示为

$$r(i, \theta, \phi) = R_r(i, \theta, \phi) + \delta x_i \sin\varphi(i, \theta, \phi) + \delta y_i \cos\varphi(i, \theta, \phi) \quad (11)$$

式中: $R_r(i, \theta, \phi)$ 定义见式(9)。

相应地在切削刃转角 $\varphi(i, \theta, \phi)$ 处, 前一切削刃对应的离散单元的径向切削半径为

$$r_1(i-1, \theta, \phi) = R_r(i-1, \theta, (\phi - \phi(f_t \sin\alpha \cos\gamma))) + \delta x_{i-1} \sin\varphi(i, \theta, \phi) + \delta y_{i-1} \cos\varphi(i, \theta, \phi) - f_t \sin\alpha \sin\varphi(i, \theta, \phi) + f_t \cos\alpha \cos\varphi(i, \theta, \phi) \quad (12)$$

因此, 切削离散单元 $p(i, \theta, \phi)$ 在切削刃转角 $\varphi(i, \theta, \phi)$ 处的径向切削厚度为

$$t_1(i, \theta, \phi) = r(i, \theta, \phi) - r_1(i-1, \theta, \phi) \quad (13)$$

由于当前切削刃是在前一切削刃加工过的表面上作后继切削, 切削厚度反映了切削刃切除工件表面上材料的多少, 由于刀具偏心的存在, 当前切削刃切除的可能不是上一相邻切削刃切削过的工件材料, 而是上 m ($1 \leq m \leq N_t$) 个切削刃留下的工件材料。此时切削离散单元 $p(i, \theta, \phi)$ 的切削厚度应是当前切削刃产生的切削圆弧路径和上 m 个切削刃通过时产生的工件表面之间在切削角度 $\varphi(i, \theta, \phi)$ 时的径向距离中的最小者 $m=1, 2, \dots, N_t$ 。因此, 式(13)修正为

$$t(i, \theta, \phi) = \min(t_1(i, \theta, \phi), \dots, t_m(i, \theta, \phi)) \quad (14)$$

若式(14)计算的瞬时切削厚度 $t(i, \theta, \phi)$ 小于 0, 则取 $t(i, \theta, \phi) = 0$ 。

如图 6 所示, 如果进给速度的 z 方向分量沿着 z 轴负向时, 在接近球头部分的离散单元 $p(i, \theta, \phi)$, 即在 y_1 线和 y 线之间, 该单元对应的前 m ($1 \leq m \leq N_t$) 个切削刃上的相应离散单元不存在, 此时, 瞬时切削厚度应该是该切削离散单元对应的实际切削半径和工件边界表面的差值, 即如图 6 中的 a 点和 b 点之间的距离。由于在每齿进给量不大的情况下, z 向进给分量很小, 此时的切削厚度的计算可以不考虑工件边界表面的影响, 而以该点实际径向切削半径作为切削厚度, 即有

$$t(i, \theta, \phi) = r(i, \theta, \phi) \quad (15)$$

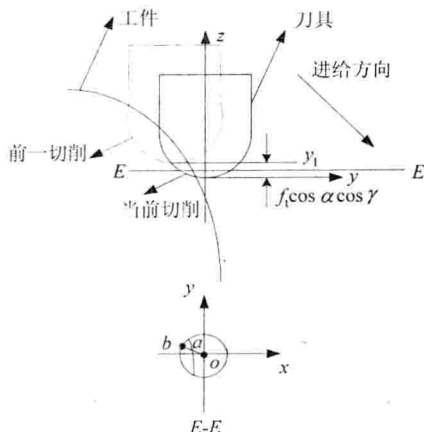


图 6 进给速度有 z 轴负方向分量时切削厚度分析

Fig. 6 Analysis of chip thickness in feed velocity along z axis in negative direction

4 参数确定及实验验证

4.1 铣削力系数与偏心参数的确定

采用直径为 10 mm、切削刃数 $N_t=2$ 、右旋、螺旋角 $\beta=30^\circ$ 的高速钢球头铣刀, 在主轴转速为 1 000 r/min, 无冷却液情况下, 选用铝合金 LY12, 通过水平半槽切(half-slot)试验确定偏心参数为 $\rho=0.009$, $\alpha_r=60^\circ$ 。采用不同的进给率进行 30 组槽切(slot)铣削试验, 计算的铣削力系数为

当 $0 \leq \phi \leq \pi/2$ 时,

$$\begin{cases} K_t(\phi) = -219.5 - 1479\phi + 1766.8\phi^2 - 395.9\phi^3 \\ K_r(\phi) = 93.98 + 219.2\phi - 281.3\phi^2 + 142.8\phi^3 \\ K_a(\phi) = -598.2 + 1085.7\phi - 746.9\phi^2 + 246.9\phi^3 \end{cases}$$

当 $\pi/2 < \phi < \pi$ 时,

$$\begin{cases} K_t(\phi) = 282.3 \\ K_r(\phi) = 293.8 \\ K_a(\phi) = 221.3 \end{cases}$$

$$m_t = 0.656\ 327; m_r = 0.564\ 054; m_a = 0.481\ 998.$$

4.2 实验验证

基于以上铣削力模型和算法, 在本课题组研发的数控加工仿真系统上采用 Visual C++ 开发了一个球头铣刀三轴铣削力仿真软件。加工仿真系统为铣削力仿真软件提供加工中参与切削的刃段信息和瞬时切削厚度信息, 用于铣削力的计算。在切削深度为 3.2 mm, 主轴转速为 1 000 r/min, 每齿进给量为 0.06 mm/z, 不使用切削液的情况下, 在五轴数控加工中心上由加工实验获得的铣削力和采用本文上述方法开发的仿真软件获得的铣削力的对比如图 7 和图 8 所示。图 7 为不考虑刀具偏心和变形情况下铣削力仿真值和实验值在一个周期内的对比, 从中可看出在不考虑刀具偏心和刀具变形情况下, 铣削力仿真曲线的波峰与波峰之间和波谷与波谷之间都差别不大, 但实际测量到的铣削力曲线表明与仿真获得的铣削力曲线有较大差别, 尤其在波峰波谷处差别很大。

图 8 为考虑刀具偏心和变形情况下的铣削力仿真值和实验值的对比, 从图中可以看出, 考虑了刀具偏心和刀具变形后, 仿真的铣削力波形无论在形状还是数值以及波形变化趋势上都与实际测得的铣削力较为一致, 这说明在铣削力研究中, 考虑刀具偏心和刀具变形是必要的。

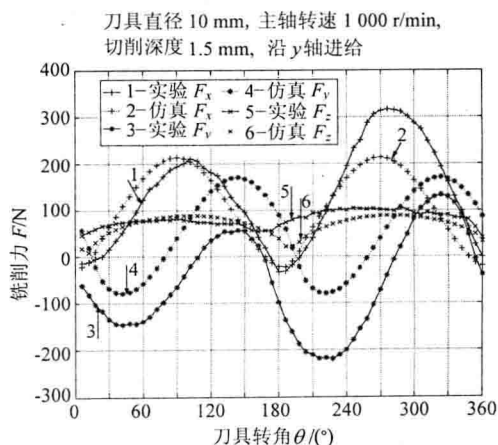


图 7 铣削力实验值和仿真值的比较(不考虑刀具偏心和刀具变形)

Fig. 7 Comparisons of milling forces between experiment and simulation (without considering cutter eccentricity and cutter deflection)

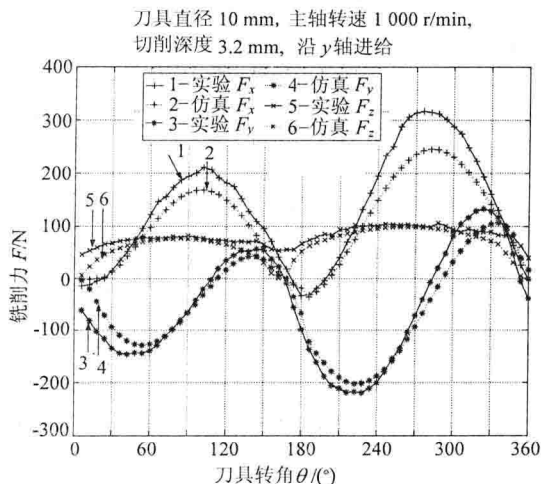


图8 铣削力实验值和仿真值的比较(考虑刀具偏心和刀具变形)

Fig. 8 Comparisons of milling forces between experiment and simulation (with considering cutter eccentricity and cutter deflection)

5 结 论

基于 Z-map 模型,提出了识别数控加工中参与切削的切削刃单元的 PEEM 方法,通过考虑刀具偏心和刀具变形对瞬时切削厚度影响的研究,建立了球头铣刀铣削力模型,在本课题组的数控加工仿真系统上开发了考虑刀具偏心和刀具变形的球头铣刀三轴加工过程铣削力建模和仿真功能,并集成到该系统中,提高了系统的完整性和先进性。铣削力仿真与实验验证的结果表明了所提出模型和算法的正确性。

参 考 文 献

- [1] Tai C C, Fuh K H. A predictive force model in ball-end milling including eccentricity effects[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1994, 34(7): 959-979.
- [2] Sim C, Yang M. The prediction of the cutting force in ball-end milling with a flexible cutter[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1993, 33(2): 267-284.
- [3] Altintas Y, Lee P. Mechanics and dynamics of ball end milling[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 1998, 120(4): 684-692.
- [4] Lee P, Altintas Y. Prediction of ball end milling forces from orthogonal cutting data[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1996, 36(9): 1059-1072.
- [5] Kim G M, Cho F 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.
- [6] Ismail L. Sculpture surface machining: a generalized model of ball-end milling force system[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(5): 453-462.
- [7] 倪其民, 李从心, 吴光琳, 等. 考虑刀具变形的球头铣刀铣削力建模与仿真[J]. 机械工程学报, 2002, 38(3): 108-112.
Ni Q M, Li C X, Wu G L, et al. Modeling and simulation of milling forces for flexible ball-end milling cutters[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(3): 108-112. (in Chinese)
- [8] 马万太, 王宁生. 考虑弹性变形时的球头铣刀切削力模型的研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1998, 30(6): 633-640.
Ma W T, Wang N S. Research on cutting force model of ball-end mill with considering spring deflection[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 30(6): 633-640. (in Chinese)
- [9] 余湛悦, 周来水, 张臣, 等. 提高数控加工仿真速度和效果的关键技术研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(5): 642-647.
Yu Z Y, Zhou L S, Zhang C, et al. Key step toward improving the speed and the quality of NC verification[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(5): 642-647. (in Chinese)

作者简介:



张 臣(1976—) 男, 新疆人, 南京航空航天大学机电学院博士研究生, 主要研究方向为 CAD/CAM 及仿真验证, 已发表论文 4 篇, E-mail: zhangtochen@sina.com.cn, 联系电话: 025-52933303.



周儒荣(1935—) 男, 福建人, 南京航空航天大学机电学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字化设计与制造技术, 获国家及省部级科技进步奖 19 项, 发表论文 200 余篇. E-mail: zhoururong@yahoo.com

庄海军(1970—) 男, 河北人, 南京航空航天大学机电学院副教授, 主要研究方向为数控加工编程、协同设计。

周来水(1962—) 男, 河北人, 南京航空航天大学机电学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字化设计与制造技术, 获国家及省部级科技进步奖 10 余项, 发表论文 50 余篇。

(责任编辑: 蔡 斐)



文章编号:1003-8728(2006)05-0509-04

确定铣削力模型中刀具偏心参数的一种算法

张 臣, 周儒荣, 庄海军, 周来水

(南京航空航天大学 CAD/CAM 工程研究中心, 南京 210016)

张 臣

摘 要:对数控加工中球头铣刀铣削力建模时刀具偏心参数的确定进行了研究。在铣削力模型的建立中考虑了刀具偏心的影响,推导出刀具偏心参数的表达式,考虑到刀具单边切削条件,提出了刀具偏心参数的确定算法。在通过铣削力试验数据计算铣削力系数的过程中,采用上述算法确定了刀具的偏心参数,用于铣削力的仿真预测中,仿真结果和铣削力试验的结果表明,算法效果良好。

关 键 词:铣削力模型;刀具偏心;仿真;铣削力系数

中图分类号:TP391

文献标识码:A

An Algorithm for Determining Cutters' Eccentricity Parameters During Modeling Their Milling Force

Zhang Chen, Zhou Rurong, Zhuang Haijun, Zhou Laishui

(Research Center of CAD/CAM Engineering, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: The paper studies the determination of cutters' eccentricity parameters during modeling the milling force of a ball-end milling cutter. The influence of cutter eccentricity parameters is considered and their expressions are deduced. Then the algorithm for determining cutter eccentricity parameters is presented with the condition of single edge cutting taken into account. Cutter eccentricity parameters decided by using the above algorithm in the process of calculating milling force coefficients according to the experimental data of the milling force. The comparison between the simulation results and the experimental results of the milling force shows that the algorithm is effective.

Key words: milling force model; cutter eccentricity; simulation; milling force coefficient

数控铣削加工广泛用于航空、汽车、机械等领域,对数控铣削加工中的铣削力进行建模与仿真一直是国内外研究的热点^[1-4]。铣削力模型的建立不仅对机床的结构设计提供帮助,而且对零件加工表面质量的预测和工艺参数优化的研究提供基础。在铣削力建模的研究中,需要考虑刀具偏心对铣削力的影响,以往对于刀具偏心参数的确定,一般都采用直接测量的方法获得,如文献[5,6]对球头刀具偏心进行了研究,通过实际测量确定了偏心距和偏心角这些偏心参数。文献[7]对平头铣刀铣削力建模中刀具偏心参数进行了研究,通过试验手段确定了刀具偏心参数,但仅对平头铣刀有效。本文对球头铣刀铣削力建模中刀具偏心进行了研究,在确定铣削力模型中铣削力系数的过程中,考虑到单边切削条件,提出了球头刀具偏心参数确定算法,用于本单位研发的数控加工仿真系统^[8]的铣削力仿真软件中,

提高了所建立的铣削力模型的实用性和完整性。

1 刀具偏心参数模型

铣削加工中由于制造和安装误差以及刀柄和主轴锥孔接触刚度的影响,不可避免地存在着刀具回转中心(机床主轴旋转中心)和几何中心不重合的现象,进而引起实际切削厚度、切入切出状态和无偏心时的差别,因而使得在铣削力建模中难于用无偏心模型精确描述。为建立刀具偏心参数模型,首先建立球头铣刀的工作坐标系,确定切削刃离散单元,然后针对切削刃离散单元给出刀具偏心参数的表达式。

设球头铣刀的螺旋角为 β ,右旋,切削刃数为 N_f ,刀具半径为 R ,以刀尖点为原点建立的刀具坐标系如图1。其中 z 轴为刀具轴线,将刀具切削刃离散为一系列单元的集合,离散密度视加工精度要求而定,图中 ϕ 为刀具切削刃离散单元相对 z 轴的位置角,由 ϕ 决定切削刃离散单元距离刀尖的位置; i 为切削刃序号; θ 为刀具转角; $\varphi(i, \theta, \phi)$ 为铣刀转角为 θ 时,第 i 个切削刃和 z 轴位置角为 ϕ 时切削刃离散单元的转角。

收稿日期:2005-03-15

基金项目:国家重点科技攻关专题(96-A01-01-05),江苏省重大科技攻关项目(G98017-3)和教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助

作者简介:张 臣(1976-),男(汉),新疆,博士研究生

E-mail: zhangtochen@sina.com.cn

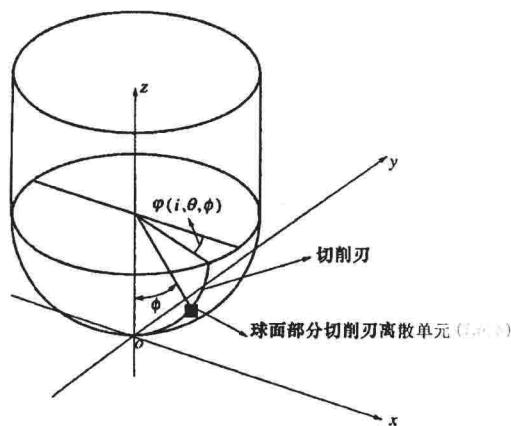


图 1 球头刀具坐标系

如图 2 所示,定义球头铣刀圆柱底面上由主轴旋转中心指向刀具几何中心的方向为偏心方向, oo' 的距离为 ρ , oo' 的延长线与圆柱底面母线交于 o_r , 令沿着逆时针方向距离 o_r 最近的切削刃编号为 1, 定义切削刃 1 在圆柱底面的交点 m 和 o' 的连线与 oo' 的夹角为初始偏心角 α_r 。对于第 i 个切削刃, 刀具转角为 θ , 相对 z 轴的位置角为 ϕ 的离散单元 (i, θ, ϕ) , 其偏心角为

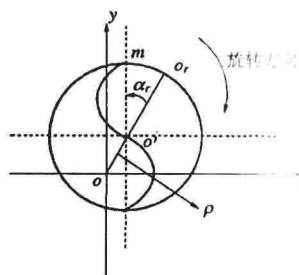


图 2 刀具偏心计算示意图

$$\alpha_i(i, \theta, \phi) = \begin{cases} \alpha_r + \cos\phi \tan\beta + (i-1) \frac{2\pi}{N_f} & 0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2} \\ \alpha_r - \cot\phi \tan\beta + (i-1) \frac{2\pi}{N_f} & \phi \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (1)$$

切削刃离散单元 (i, θ, ϕ) 的实际切削半径为

$$R_i(i, \theta, \phi) = R(i, \theta, \phi) + \rho \cos(\alpha_i(i, \theta, \phi)) \quad (2)$$

$$\text{式中: } R(i, \theta, \phi) = \begin{cases} R \sin\phi & 0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2} \\ R & \phi \geq \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

从而可以通过切削刃离散单元的偏心角和实际切削半径来描述铣削力建模中刀具偏心对铣削力产生的影响。

2 刀具偏心参数的确定算法

建立了切削刃离散单元 (i, θ, ϕ) 的偏心角和实际切削半径的表达式后, 需要通过一定的方法确定刀具的偏心参数 α_r 和 ρ , 以往的文献[5]研究中刀具偏心参数是通过实际测量获得, 但是实际测量中往往存在很多干扰因素, 测量的精度, 使用时也不够方便。本文采用铣削力试验手段, 在确定铣削力系数的过程中, 根据刀具旋转一周切削的

过程中某一切削刃同一位置上的铣削力系数保持恒定的特点计算刀具的偏心参数, 方便快捷。下面首先建立铣削力模型, 求解模型中的铣削力系数, 进而通过获得的铣削力系数确定刀具偏心参数。

2.1 铣削力模型

将球头铣刀沿轴向划分成许多很小的离散单元, 作用在刀刃单元上的空间铣削力可以分解为单元径向力 dF_r 、单元切向力 dF_t 和单元轴向力 dF_a 。

根据铣削力与切削负载的内在关系, 则有

$$\text{当 } 0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$$

$$\begin{cases} dF_r(i, \theta, \phi) = K_r(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_r} R \sin(\phi) d\phi \\ dF_t(i, \theta, \phi) = K_t(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_t} R \sin(\phi) d\phi \\ dF_a(i, \theta, \phi) = K_a(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_a} R \sin(\phi) d\phi \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{当 } \frac{\pi}{2} \leq \phi \leq \pi$$

$$\begin{cases} dF_r(i, \theta, \phi) = K_r(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_r} R \csc^2(\phi) d\phi \\ dF_t(i, \theta, \phi) = K_t(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_t} R \csc^2(\phi) d\phi \\ dF_a(i, \theta, \phi) = K_a(\phi) t(i, \theta, \phi)^{m_a} R \csc^2(\phi) d\phi \end{cases} \quad (4)$$

式中: i 为切削刃序号; θ 为刀具转角; ϕ 为切削刃离散单元的位置角; $t(i, \theta, \phi)$ 为瞬时切削厚度; K_r, K_t, K_a 分别为切向、径向和轴向铣削力系数; m_r, m_t, m_a 分别为瞬时切削厚度尺寸影响指数。

式(2)中切削刃的实际切削半径通过影响瞬时切削厚度 $t(i, \theta, \phi)$ 而影响铣削力。分解式(3)与式(4)中的单元径向力、单元切向力和单元轴向力至 x, y, z 方向, 在给定刀具转角 θ 处, 作用在刀具上的切削合力可通过对所有参与切削的切削刃离散单元的受力进行累加得到, 其各向分力如下

$$\begin{cases} F_x(\theta) = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_i} \int_{\phi_1}^{\phi_2} (-\sin(\varphi(i, \theta, \phi)) dF_r(i, \theta, \phi) - \cos(\varphi(i, \theta, \phi)) dF_t(i, \theta, \phi)) \\ F_y(\theta) = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_i} \int_{\phi_1}^{\phi_2} (\cos(\varphi(i, \theta, \phi)) dF_r(i, \theta, \phi) - \sin(\varphi(i, \theta, \phi)) dF_t(i, \theta, \phi)) \\ F_z(\theta) = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_i} \int_{\phi_1}^{\phi_2} dF_a(i, \theta, \phi) \end{cases} \quad (5)$$

式中: N_f 为刀具刃数; N_i 为刀具处于转角 θ 时, 第 i 个切削刃上参与切削的切削刃段数; ϕ_1, ϕ_2 分别为第 j 个参与切削的切削刃段的最小和最大位置角。

2.2 单刃切削条件

研究发现, 在球头铣刀铣削加工中一个切削刃参与切削的条件(即单刃切削条件)可以表示为

$$\eta_{diff} < (\phi_r - \frac{d_s}{R} \tan\beta) \quad (6)$$

式中: η_{diff} 为球头刀具铣削工件时切入角和切出角的差值;

$\phi_p = \frac{2\pi}{N_f}$ 为球头刀具切削刃之间的夹角; N_f 为球头刀具的螺旋刃数; $\frac{d_a}{R} \tan \beta$ 为轴向切削深度为 d_a 时, 球头刀具的切削刃上最大的螺旋滞后角; β 为球头刀具切削刃螺旋角。

2.3 偏心参数的确定

球头铣刀由于球头部分的存在, 其切向、径向和轴向切削力系数在球头部分是变化的, 随着切削刃从球头部分向圆柱部分的扩展, 切向、径向和轴向切削力系数趋向于常数。因此, 为了求解式(5)的铣削力系数, 对球头部分采用切削刃位置角划分, 获得每一个位置角处的铣削力系数, 最后以三次多项式拟合, 获得位置角和铣削力系数的关系。

如图3所示, 沿轴向将刀具球头部分以 $\Delta\phi = \pi/18$ 的角度间隔划分, 得到一系列的圆盘面, 这些圆盘面分别和切削刃相交, 将切削刃分为一系列的刃段, 分别以 $\phi_{m,n} = \frac{\pi}{36} + \frac{\pi}{18}m$, ($m = 0, 1, \dots, 8$)

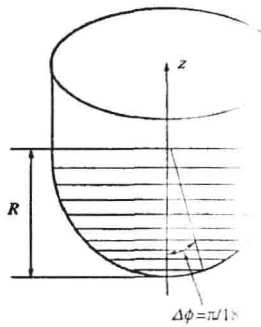


图3 球头铣刀切削刃圆盘面划分示意图

表示各个切削刃段的位置角。不管切削条件如何变化, 可以近似认为每个刃段上的铣削力系数保持不变, 利用这一条件首先确定每个刃段上的铣削力系数, 再提高铣削力系数的计算精度, 把上述每一个刃段沿刀具进给方向再离散为9个单元, 各个离散单元的位置角为

$$\phi_{m,n} = \frac{\pi}{18}m + \frac{\pi}{180}n$$

$$(m = 0, 1, \dots, 8; n = 0, 1, \dots, 9)$$

这样, 对于每一个离散单元 $(i, \theta, \phi_{m,n})$ 的铣削力可以表示为

$$\begin{cases} dF_t(i, \theta, \phi_{m,n}) = K_t(m)t(i, \theta, \phi_{m,n})^m R \sin(\phi_{m,n}) \\ dF_r(i, \theta, \phi_{m,n}) = K_r(m)t(i, \theta, \phi_{m,n})^m R \sin(\phi_{m,n}) \cos\theta \\ dF_a(i, \theta, \phi_{m,n}) = K_a(m)t(i, \theta, \phi_{m,n})^m R \sin(\phi_{m,n}) \sin\theta \\ m = 0, 1, \dots, 9 \text{ 时} \end{cases}$$

式中: $K_t(m), K_r(m), K_a(m)$ 分别为切削刃划分后第 m 个刃段对应的切向、径向和轴向铣削力系数; $t(i, \theta, \phi_{m,n})$ 为第 i 个切削刃上的第 m 个刃段上的切削厚度, 偏心参数将反映在其中。

将式(8)转换为 x, y, z 方向得

$$\begin{cases} dF_x(i, \theta, \phi_{m,n}) = dF_t(i, \theta, \phi_{m,n})(-\sin\varphi(i, \theta, \phi_{m,n})) + \\ dF_r(i, \theta, \phi_{m,n})(-\cos\varphi(i, \theta, \phi_{m,n})) \\ dF_y(i, \theta, \phi_{m,n}) = dF_t(i, \theta, \phi_{m,n})(\cos\varphi(i, \theta, \phi_{m,n})) + \\ dF_r(i, \theta, \phi_{m,n})(-\sin\varphi(i, \theta, \phi_{m,n})) \\ dF_z(i, \theta, \phi_{m,n}) = -dF_a(i, \theta, \phi_{m,n}) \end{cases}$$

则作用在第 i 个切削刃上的第 m 个刃段上的合力表示为

$$\begin{cases} F_x(i, \theta, \phi_{m,n}) = \sum_{n=0}^9 (dF_t(i, \theta, \phi_{m,n})(-\sin\varphi(i, \theta, \phi_{m,n})) + \\ dF_r(i, \theta, \phi_{m,n})(-\cos\varphi(i, \theta, \phi_{m,n}))) \\ F_y(i, \theta, \phi_{m,n}) = \sum_{n=0}^9 (dF_t(i, \theta, \phi_{m,n})(\cos\varphi(i, \theta, \phi_{m,n})) + \\ dF_r(i, \theta, \phi_{m,n})(-\sin\varphi(i, \theta, \phi_{m,n}))) \\ F_z(i, \theta, \phi_{m,n}) = \sum_{n=0}^9 (-dF_a(i, \theta, \phi_{m,n})) \end{cases} \quad (10)$$

在每个刃段上, $K_t(m), K_r(m), K_a(m)$ 认为是常数, 依据2.3节的单刃切削条件采用轴向切深为刀具半径的半槽切(half slot)铣削, 此时 $\eta_{dir} = 90^\circ$, 保证切削过程为单刃切削, 获得各个刀具转角位置处的瞬时铣削力, 与式(10)联立求得各个刃段处对应的瞬时铣削力系数 $K_t(m), K_r(m), K_a(m)$, 联立后的方程为

$$\begin{cases} F_x(1, \theta_1, \phi_{1,n}) = F_{x,1} \\ F_x(1, \theta_1, \phi_{1,n}) + F_x(1, \theta_2, \phi_{2,n}) = F_{x,2} \\ \vdots \\ F_x(1, \theta_1, \phi_{1,n}) + F_x(1, \theta_2, \phi_{2,n}) + \dots + F_x(1, \theta_8, \phi_{8,n}) = F_{x,8} \\ F_y(1, \theta_1, \phi_{1,n}) = F_{y,1} \\ F_y(1, \theta_1, \phi_{1,n}) + F_y(1, \theta_2, \phi_{2,n}) = F_{y,2} \\ \vdots \\ F_y(1, \theta_1, \phi_{1,n}) + F_y(1, \theta_2, \phi_{2,n}) + \dots + F_y(1, \theta_8, \phi_{8,n}) = F_{y,8} \\ F_z(1, \theta_1, \phi_{1,n}) = F_{z,1} \\ F_z(1, \theta_1, \phi_{1,n}) + F_z(1, \theta_2, \phi_{2,n}) = F_{z,2} \\ \vdots \\ F_z(1, \theta_1, \phi_{1,n}) + F_z(1, \theta_2, \phi_{2,n}) + \dots + F_z(1, \theta_8, \phi_{8,n}) = F_{z,8} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $n = 0, 1, \dots, 9; F_{x,n}, F_{y,n}, F_{z,n} (n = 0, 1, \dots, 8)$ 为参与的切削刃上划分的刃段中前 m 个刃段同时参与切削时通过试验获得的瞬时铣削力值; $\theta_1, \dots, \theta_8$ 为刀具转角。

设半槽铣试验中刀具从 $\theta = 0$ 的位置开始切削, 则对式(11)需要获得 θ 等于以下转角位置时的瞬时铣削力: $\theta = (1 - \cos(k \frac{\pi}{18})) \tan \beta$, 其中 $k = 1, 2, \dots, 8$; 利用式(11)解

方程可以得到各个刃段上的铣削力系数。采用不同的切削刃利用式(11)确定的各个刃段上的铣削力系数应该相等, 因此, 计算同一刃段上不同切削刃上的铣削力系数之间的标准偏差, 采用迭代的方法使不同刃段上的标准偏差的平方和最小时的偏心参数即为实际加工中刀具的偏心参数, 算法流程如图4所示。

图4中: N_f 为刀具切削刃数, N_s 为刀具划分的刃段。采用直径为10 mm的球头铣刀, 在主轴转速为1000 r/min、每齿进给量为0.0175 mm/z的切削条件下进行半槽切铣削试验。对获得的铣削力数据, 用上述算法确定的刀具偏心参数为: $\rho = 0.009, \alpha_r = 60^\circ$ 。

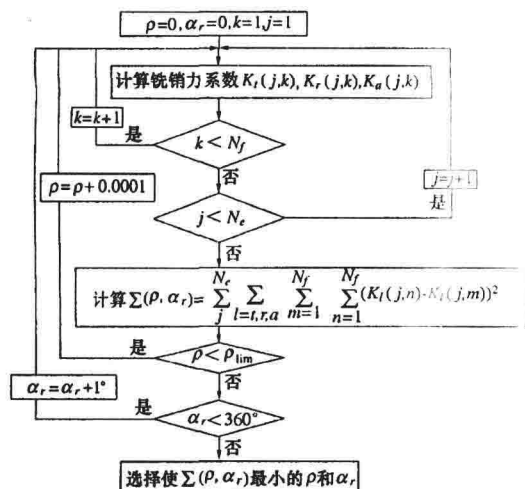


图 4 球头铣刀偏心参数确定算法

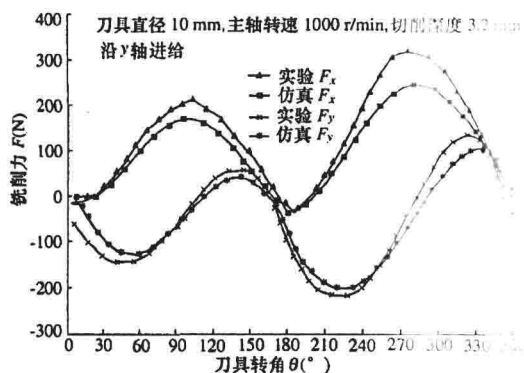


图 5 铣削力实验值和仿真值(计刀具偏心)的比较

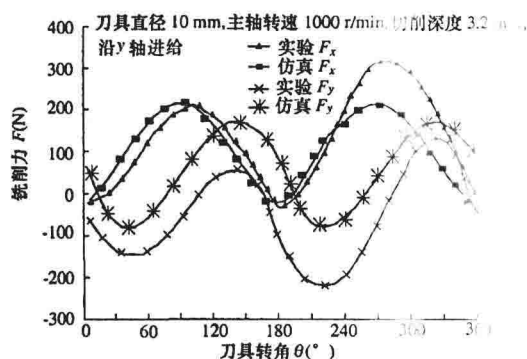


图 6 铣削力实验值和仿真值(不计刀具偏心)的比较

3 试验验证

为了验证上述算法计算偏心参数的正确性,在切削深度为 3.2 mm,主轴转速为 1000 r/min,每齿进给量为 0.06 mm/z,不使用切削液的条件下,将在五轴数控加工中心上由加工实验得到的铣削力曲线,和采用本文上述方法确定的刀具偏心参数通过所开发的铣削力仿真软件计算得到的

铣削力曲线进行比较,在一个周期中的对比如图 5 所示,从图 5 中可以看出,采用上述确定的刀具偏心参数,仿真的铣削力波形无论在形状还是数值以及波形变化趋势上都与实际测得的铣削力较为一致,这说明上述算法确定偏心参数的可靠性和有效性。图 6 为 $\rho = 0, \alpha_r = 0$ 情况下(即铣削力的计算中不考虑刀具偏心)开发的铣削力仿真软件计算得到的铣削力曲线和由加工试验获得的铣削力曲线在一个周期中的对比,从图 6 中可看出,加工实验得到的铣削力曲线与仿真获得的铣削力曲线有较大差别,尤其在波峰波谷处差别很大,从而说明了上述算法确定偏心参数的必要性。

4 结论

本文在球头铣刀铣削力建模中,根据单刃切削条件求出铣削力系数,利用获得的铣削力系数提出了确定刀具偏心参数的方法,可以方便地用于铣削力建模中刀具偏心参数的确定,提高了铣削力模型的系统性和完整性。该算法已成功应用于本单位研发的数控加工仿真系统的铣削力仿真软件中,试验和仿真结果表明了提出算法的正确性。

【参考文献】

- [1] Li Z, Yun S. Three dimensional cutting forces analysis in end milling[J]. *International Journal of Mechanical Science*, 1996,38(3):259~269
- [2] Shriase K, Altintas Y. Cutting force and dimensional surface error generation in peripheral milling with variable pitch helical end mills[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002,36(65):567~584
- [3] Lee T S, Lin Y J. A 3D predictive cutting-force model for end milling of parts having sculptured surfaces[J]. *Advanced Manufacturing Technology*, 2000,16(11):773~783
- [4] Bao X W, et al. Prediction of cutting force distribution and its influence on dimensional accuracy in peripheral milling[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002,42(7):791~800
- [5] Ching-chinTAI, Kung-Hua Fuh. A predictive force model in ball-end milling including eccentricity effects[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1994,34(7):959~979
- [6] Fong H S, Menq C H. The prediction of cutting forces in the ball end milling process model-I. formulation and model building procedure[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1994,34(5):697~710
- [7] Jeong Hoon Ko, et al. Development of a virtual machining system, part 1: approximation of the size effect for cutting force prediction[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002,42(15):1595~1605
- [8] 王德悦,周来水,张臣等. 提高数控加工仿真速度和效果的关键技术研究[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004,16(6):642~647