

整体式立铣刀参数化设计研究 进展与发展趋势*

Research Progress and Development Trend of End Mill Parametric Design Technology

山东大学机械工程学院高效洁净机械制造教育部重点实验室 孙杰 李国超



孙杰

教授、博士生导师。主要研究方向为难加工材料高速切削机理、大型构件数控加工变形控制与校正、复合材料加工、再制造、激光加工等。

现代产品具有持续变化性、快速反应性及高质量的特点,对产品的的设计速度、研发周期提出了较高的要求。在传统的产品研发过程中,设计人员需浪费大量的时间和精力用于繁琐的重复计算和绘图中,严重制

约了产品设计效率的提升。为满足敏捷制造、集成制造等现代高效制造模式的需求,参数化设计技术应运而生。本文结合国内外整体式立铣刀参数化设计的现状,以参数化设计相关理论为基础,分析了立铣刀参数化设计主要研究内容以及参数化设计软件系统建立过程中存在的主要问题,指出了刀具参数化设计未来的研究方向:应向刀具模型结构复杂化、刀具模型结构特征细节化、系统集成化方向发展。

约了产品设计效率的提升。为满足敏捷制造、集成制造等现代高效制造模式的需求,参数化设计技术应运而生。

参数化设计本质是一种基于约束的产品描述方法,包括图形的几何约束和拓扑关系约束,其中几何约束为各种尺寸值,称为可变参数,几何元素间的各种拓扑关系信息,称为不变参数。在参数化设计系统中,可实现图形在可变参数的作用下,自动维护所有的不变参数,完成产品设计模型的快速构建。目前,国外的参数化设计软件主要包括:美国 Autodesk 公司的 AutoCAD、美国 PTC

公司的 Pro/Engineer、法国 Dassault Systems 公司的 CATIA、德国 Siemens PLM Software 公司的 Unigraphics NX。国内的包括:华中理工大学的开目 CAD、清华大学和高华公司共同开发的集成智能化 CAD 系统 GH-Inte CAD、中科院北京软件研究所的 PICAD、浙江大学开发的 ZDDS、深圳乔纳森科技有限公司开发的中国 CAD 等^[1-2]。

参数化设计求解算法及整体式立铣刀参数化设计的提出

1 参数化求解算法

设计人员利用参数化技术,可不

* 国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2012ZX04003-021)资助。

再关心设计模型的具体生成过程,摆脱繁琐的重复性工作而将主要精力用于新产品的研发,大大提高只有几何尺寸发生变化的零件的设计效率^[3]。针对参数化设计理论和实现方法,国内外学者进行了大量研究,形成了多种求解方法^[4-7]:基于几何约束的变量几何法、基于几何推理的人工智能方法、基于辅助线法、基于生成历程的方法等。

(1) 基于几何约束的变量几何法。

变量几何法是一种基于约束的代数方法,它将几何模型定义成一系列特征点,并以特征点坐标为变量形成一个非线性约束方程组,当约束发生变化时,利用迭代方法求解非线性方程组,就可以求出一系列的特征点,从而输出新的几何模型^[1]。但模型越复杂、约束越多、非线性方程组的规模越大,当约束变化时,求解方程组就越困难,而且构造具有唯一解的约束也不容易,故该法常用于较简单的平面模型。

(2) 基于几何推理的人工智能方法。

几何推理法是建立在专家系统的基础上,采用谓词表示几何约束,对图形中的几何关系和约束进行理解,运用几何原理推导出新的约束,这种方法可以检查约束模型的有效性,并具有局部修改功能,但由于在推理过程中要查询匹配规则,所以用这种方法建立的系统过于庞大,速度较慢。

(3) 基于生成历程的方法。

基于生成历程的方法是将模型生成过程中的所有信息进行记录,根据三维几何模型往往是通过一些简单的模型进行布尔运算获得的原理,将记录的定量信息作为变量化参数,当赋予参数不同值时,更新模型生成历程,即可得到不同大小或形状的几何模型。该方法无需求解非线性方程组,因此模型可以很复杂,故常用

于三维实体或曲面的参数化建模。

2 整体式立铣刀参数化设计的提出

随着现代材料科学技术的发展,具有高性能的材料不断涌现,如复合材料、钛合金、镍基合金、新型高强度钢等。这些材料大部分属于难加工材料,传统刀具已不能满足新材料加工对表面质量以及刀具寿命的高要求。整体式硬质合金立铣刀因其良好的切削加工性能,在高速切削领域以及航空航天、通用机械、汽车、医疗器械、模具等行业中得到了广泛应用。

目前,刀具企业在整体式立铣刀研发过程中通常采用“设计-试制-试切”的传统模式。由于立铣刀结构形状复杂,需用五轴联动数控工具磨床加工,单个新产品试制费用昂贵;刀具试切需对实际工件进行加工,试切周期长、成本高,尤其是对刀具寿命进行评价时,会大大增加刀具的研发周期。传统的刀具研发模式已不能满足现代刀具产品以多品种小批量为主的生产模式需求,严重制约了整体式立铣刀研发效率的提升和研发成本的降低。

借助于刀具参数化设计技术,采用“参数化设计-加工仿真”模式,设计者只需提供刀具结构参数,不必制造出原型产品,即可在计算机中实现对刀具的三维建模、二维图纸生成、切削仿真等一系列工作,大大降低了刀具研发成本,提高了刀具的设计效率以及刀具生产企业的竞争力。因此,对刀具参数化设计软件系统的研究具有重要意义。

刀具参数化设计的内容和研究现状

整体式立铣刀参数化设计是指保持立铣刀周刃、容屑槽、底刃等结构之间拓扑约束关系不变,将直径、芯径、刃长、前角、后角、螺旋角等几何信息变量化,使之成为可任意调整的参数,对其赋予不同数值,即可得

到不同大小和形状 of 立铣刀模型,实现立铣刀实际结构特征的计算机三维显示。为满足刀具切削仿真要输入刀具体或曲面模型的需求,整体式立铣刀参数化设计通常以刀具模型的生成过程“棒料建模-开槽-周刃后刀面-开齿-底刃后刀面”为基础,采用基于结构生成历程的参数化设计方法。

为实现计算机描述现实中的刀具体,首先需要将刀具体结构特征抽象为相应的数学模型,然后运用计算几何、计算机图形学等相关理论和方法实现刀具结构在计算机中的存储和显示。因此,整体式立铣刀参数化设计主要研究内容包括精确数学模型建立和三维实体模型软件实现两部分。

1 整体式立铣刀数学模型建立

整体式立铣刀数学模型是对其进行参数化建模的基础,其建立方法和精度决定了参数化建模的效率和精度。针对立铣刀数学模型的建立,国内外专家学者主要对棒料、螺旋刃线、容屑槽截面线3方面进行了研究。

(1) 棒料数学模型建立。

棒料作为整体式立铣刀的制造坯料,决定了立铣刀的直径、刃长等基本结构参数以及夹持刀柄的选择。棒料的数学模型主要包括柄部细节建模以及刀具回转轮廓建模两部分。

米蓉等^[8-11]将立铣刀刀体分为柄部、颈部和工作部分(包括杆部和头部),结合立铣刀柄部特征(锥柄、直柄、有无定位槽)、头部特征(圆角、球头、倒角),以通用回转体数学模型为基础,得到立铣刀棒料通用数学模型,如图1所示。

(2) 刃线数学模型建立。

整体式立铣刀螺旋形刃刀曲线可改变切屑流向、增加实际切削前角以及同时参与切削的切削刃长度,从而提高工件表面加工质量和刀具寿命,因此,刃形曲线设计在立铣刀设

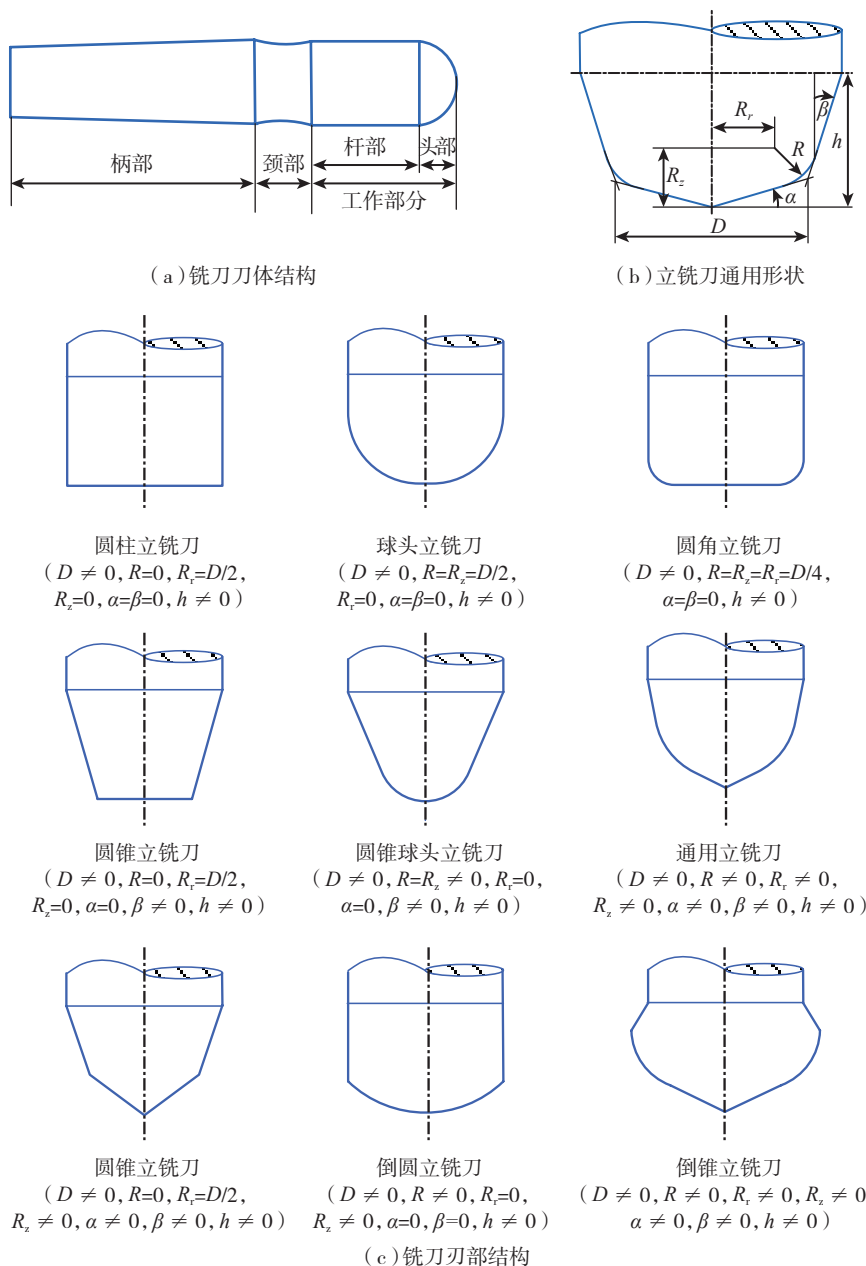


图1 立铣刀棒料通用数学模型

计中起到非常关键的作用。整体式立铣刀刀刃曲线主要包括周刃曲线和底刃曲线(球头铣刀)两部分。

立铣刀周刃螺旋线主要有3种形式:等导程螺旋刃线、与母线夹角为定值的等螺旋角螺旋刃线、与轴线夹角为定值的等螺旋角螺旋刃线。柳克辛^[12]基于螺旋运动概念,论述了常螺旋线几何方程的建立方法。龚智辉、何耀雄、Chen等^[13-16]利用速度法,根据任意回转面上的点和线的

广义螺旋运动理论,提出了作螺旋运动的点的切向速度与回转体母线夹角的广义螺旋角以及广义螺旋线数学模型,并进一步推导了圆锥面、球

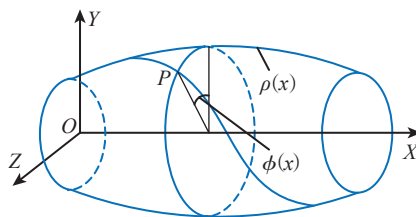


图2 刀具刃线通用数学模型

面、平面上的等导程、等螺旋角、一般螺旋线刃形曲线数学模型,如图2所示。

由图2可得螺旋刃线通用数学模型。

$$r(x) = r(x, \phi(x)) =$$

$[x, \rho(x) \cdot \cos(\phi(x)), \rho(x) \cdot \sin(\phi(x))]$, 其中, $\rho(x)$ 可根据铣刀外轮廓形状获得, $\phi(x)$ 根据螺旋线类型的不同, 取不同值。

等导程刃线:

$$\phi(x) = \phi_0 + x/P,$$

式中, ϕ_0 为初始角度, P 为导程。

等螺旋角刃线:

$$\phi(x) = \tan \beta \cdot \int \frac{\sqrt{1 + (d\theta/dx)^2}}{\rho(x)} \cdot dx,$$

式中, β 为螺旋线与刀具回转体母线之间的夹角。

球头立铣刀底刃曲线主要包括直线刃、等螺旋角刃、正交螺旋形刃(等导程刃)3种形式^[17]。直线刃是指沿刀具轴向球头部分切削刃为“直线”形。直线刃刃形简单,易于刃磨加工,但在加工中由于切入切出比较突然、刃顶部切削速度为零等原因,导致切削稳定性差,切削刃顶部易产生积屑瘤。因此,在实际生产中,球头立铣刀底刃往往使用螺旋形刃线,如图3所示。

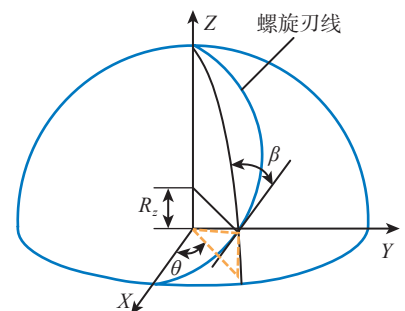


图3 球头部分螺旋刃数学模型

胡鑫等^[18-19]根据球形曲面第一基本齐式,求得球头部分等螺旋角螺旋刃线方程:

$$r = \left\{ \sqrt{R^2 - R_z^2} \cos \theta, \sqrt{R^2 - R_z^2} \sin \theta, R_z \right\}$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan\beta \cdot \ln \frac{R+R_z}{R-R_z}$$

其中, R_z 为参变量, β 为螺旋角。当刃口曲线在球头铣刀顶部时, 即 $R=R_z$ 时, 上述方程不成立, 需要另外设计一条与顶点相连接的光滑曲线。

正交螺旋刃线是指与铣刀轴线始终垂直的直母线形成的正交螺旋面与球面之间的交线。韩政峰^[20]、陈峰军^[21]以球形曲面方程和正交螺旋面方程为基础, 求得正交螺旋线方程:

$$r' = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R \cdot \sqrt{1 - (\theta/\tan\beta)^2}) \cos\theta \\ (R \cdot \sqrt{1 - (\theta/\tan\beta)^2}) \sin\theta \\ (R/\tan\beta) \cdot \theta \end{bmatrix}$$

其中, β 为周刃螺旋角, θ 为参变量, $0 \leq \theta \leq \tan\beta$ 。

(3) 容屑槽截面线数学模型建立。

立铣刀容屑槽是由砂轮与铣刀之间做相对螺旋运动产生, 真实容屑槽截面由复杂曲线构成, 主要包括前刀面、容屑槽底面、过渡部分、周刃后刀面。在铣刀参数化建模过程中, 在形状误差准许的范围内, 为了简化计算, Rababah、Tandon 等^[22-24]将整体式立铣刀容屑槽前刀面简化为一段直线, 容屑槽底面简化为分别和前刀面直线、芯圆半径、过渡部分相切的一段圆弧, 过渡部分简化为分别和容

屑槽底面、后刀面相切的圆弧, 周刃后刀面简化为两段连续的直线段, 建立了容屑槽端截面线数学模型, 如图4所示。

2 整体式立铣刀参数化设计软件实现

整体立铣刀参数化设计的软件实现是指根据立铣刀数学模型, 生成相应的三维模型, 并能实现二维图纸绘制。目前主要有2种实施途径: 基于现有三维软件的二次开发技术; 基于 OpenGL 图形接口的开发技术。

2.1 基于三维软件二次开发技术整体式立铣刀参数化设计

UG、PRO/E、Solidwoks 等三维设计软件建立的模型通常采用参数化驱动, 可根据实际工程要求生成不同的二维图纸并对图纸进行各种标注。通过二次开发技术, 利用三维软件自带的接口函数, 建立基于现有三维软件的立铣刀参数化设计系统, 可大大提高编程效率。目前, 山东大学、东北大学、哈尔滨理工大学、西北工业大学、西南交通大学、西华大学等单位在基于三维软件二次开发技术的立铣刀参数化建模方面开展了一些研究工作。

(1) 基于UG二次开发技术的刀具参数化设计。

山东大学赵邦^[25]、邵子东^[26]以砂轮磨削加工铣刀数学模型为基础, 采用UG自带的二次开发工具UG/Open Menu Script、UG/Open UIStyler 创建UG环境下的菜单以及用户界面, 采用UG/Open GRIP、UG/Open API 用户图形交互语言实现立铣刀三维模型的创建, 结合C++程序建立基于UG二次开发技术的整体硬质合金立铣刀参数化设计系统整体框架。软件实现了立铣刀螺旋槽参数计算、三维参数化建模、磨削运动参数计算以及磨削加工运动仿真分析等功能, 如图5所示。随后, 张晓东^[27-28]、裴志强^[29]从立铣刀设计角度, 对刀尖圆弧半径、退刀槽等刀具结构细节部分建模进行了研究, 并完成了二维图纸以及标注生成的开发。陈露露^[30]建立了不等齿距立铣刀的三维模型。东北大学的高长才^[31]、陆跃宁^[32]等在掌握螺旋线螺旋面理论的基础上, 对现有的数控螺旋铣刀进行分类及特征分析, 实现数控螺旋铣刀及加工螺旋槽用成形铣刀的

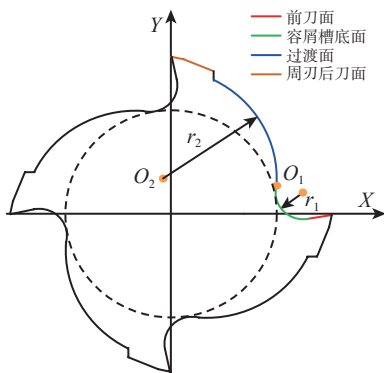
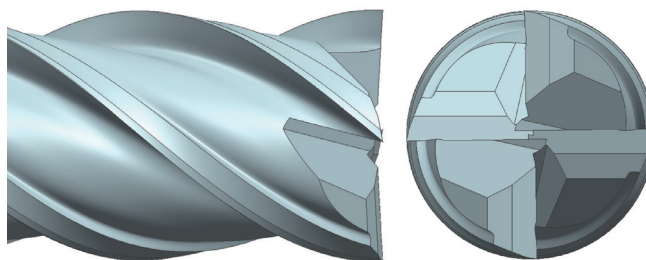


图4 立铣刀容屑槽端截面线模型



(a) UG 环境参数化设计界面



(b) 基于UG整体式立铣刀参数化模型

图5 基于UG整体式立铣刀参数化设计系统

参数化设计。西北工业大学吴占阳、侯忠滨等^[33-34]对UG环境下矩形花键滚刀三维参数化建模,并选用SQL Server 2000以及ODBC数据库访问方式对刀具CAD系统数据库技术进行了研究。随后,刘立明、韦建伟等^[35-36]实现了可转位刀具以及平头立铣刀的参数化设计。哈尔滨理工大学张辉、刘献礼等^[37],通过对球头立铣刀螺旋线及螺旋槽截面线的数学建模,探讨了整体球头铣刀参数化设计技术。

(2)基于Solidworks二次开发技术的刀具参数化设计。

西华大学吴斐等^[38-42]针对自贡硬质合金有限公司的需求,以Solidworks为开发平台,结合VC++、Oracle通过运用SolidWorks API二次开发技术、动态链接库技术、ADO数据库连接技术,以立铣刀端面廓形为基础,开发出了面向对象的三维参数化刀具CAD系统,实现了立铣刀螺旋面、四刃球头立铣刀、可转位球头立铣刀的参数化设计。

(3)基于CATIA二次开发技术的刀具参数化设计。

西南交通大学米蓉等^[8]利用VB作为开发工具,借助于OLE Automation技术、与CATIA实时通讯技术以及CATIA API技术,对CATIA进行二次开发,以球头立铣刀、普通立铣刀、数控立铣刀、高速立铣刀以及插铣刀等5大类立铣刀为研究对象,建立了毛坯体数学模型、刃线数学模型以及螺旋槽端面截形数学模型,提出了实体毛坯、柱齿、球齿、端齿、过渡齿以及其他细节的参数化建模方法,开发5大类立铣刀三维参数化设计系统。

(4)基于AutoCAD二次开发技术的刀具参数化设计。

东北大学宋灵明等^[43-44]把具有不同结构和参数的立铣刀进行分类,将立铣刀结构进行拆分,合并具有相同特征的刀具类型,简化刀具模型的

结构特征,归结为“铣刀模块”,应用Visual Basic技术对AutoCAD进行二次开发,通过调用刀具各部分的子模块,实现了加工钛合金数控立铣刀的计算机辅助设计,开发出标准化的CAD/CAPP软件,该软件会自动驱动AutoCAD系统来产生一套完整的刀具图纸。

(5)基于PRO/E二次开发技术的刀具参数化设计。

哈尔滨理工大学程开举^[45]、兰州理工大学马世辉等^[46-47]利用Pro/TOOLKIT对Pro/E系统进行了二次开发,以球头立铣刀的刃口曲线模型、周刃螺旋槽曲面、退刀槽曲面、以及球头部分螺旋主沟槽、周刃后刀面、球头部分后刀面、球头部分螺旋副沟槽曲面数学模型为基础,通过曲面合并、阵列、实体化建立了球头立铣刀的三维参数化模型。天津理工大学倪桂功^[48]、上海交通大学邵军杰、陈明等^[49],基于立铣刀的工艺设计流程,构建了两齿球头立铣刀参数化设计系统,包括刀体设计工具、主螺旋沟槽、副螺旋沟槽、周刃后角设计工具、端齿后角设计工具、标准GASH工具以及端刃前角设计工具。

2.2 基于OpenGL图形接口程序的刀具参数化设计

OpenGL是一个开放的3D图形和模型库,被定义为“图形硬件的一种软件接口”,具有高度的可移植性和非常快的运行速度,在CAD领域得到广泛应用^[50]。采用OpenGL的立铣刀参数化设计,可与Visual C++紧密接口,便于立铣刀的建模计算和图形显示,并可方便与数据库技术、刀具磨削仿真技术(CAM技术)的系统集成。目前,专家学者主要以立铣刀刃磨过程为基础,建立基于OpenGL的立铣刀参数化设计系统。

华中科技大学陈芳^[51]、湖南大学陈峰军^[21]以及天津大学李清、王太勇^[52]综合应用微分几何、包络与

反包络理论、坐标转换、数值分析等理论知识,研究了立铣刀磨削加工数学模型,以此为基础,借助于OpenGL图形接口程序,建立了球头、锥形球头立铣刀三维模型。

3 刀具参数化设计存在问题及发展趋势

整体式立铣刀参数化设计的根本目的是为刀具设计者以及刀具生产企业服务,经过大量专家学者多年的不懈努力,对立铣刀参数化设计的研究已取得了相当的成果,但目前已建立参数化设计软件系统付诸实用的还不多,分析其原因是多方面的:现有螺旋槽模型是通过截面线沿螺旋刃线扫略获得,对于变槽深、变螺旋角不变前角、锥形等特殊结构立铣刀并不适用,参数化建模的刀具品种、规格受到限制;在三维切削仿真中起到关键作用的周刃后刀面形式(平面、凹面、偏心面)、刃口半径、刃口形式、GASH面(底刃前刀面、底刃容屑槽)等刀具关键结构细节考虑不够全面;描述铣刀结构特征的数据文件不能在CAE、CAM软件之间实现无障碍传递。此外,多数铣刀参数化设计软件是基于商用软件平台进行的二次开发,不能形成自主知识产权,软件的应用推广以及商业化比较困难。为了进一步促进刀具参数化设计软件系统的应用,刀具参数化设计正向刀具结构复杂化、结构特征细节化、系统集成化方向发展。

(1)刀具模型结构复杂化。

伴随着钛合金、镍基合金、复合材料等新材料及螺旋铣削等新工艺的不断涌现,新型铣刀相对于传统铣刀在结构上有了较大改变,出现了锥形球头、波纹形周刃、人字形螺旋刃、鱼鳞形等复杂结构(图6),三维参数化建模是研究这些复杂结构设计准则、切削机理的基础,因此,对新型、复杂结构刀具参数化建模关键技术的研究势在必行。

(2)刀具模型结构特征细节化。

整体式立铣刀在钛合金、镍基合金等难加工材料精加工阶段,为获得良好的表面质量以及较高的刀具寿命,对刀具的刚度、韧性、锋利程度以及排屑能力等提出了较高的要求,需要对刀刃结构进行细节化处理,如:为了减小铣削过程中产生的振动,需在周刃靠近刃口处增加0.02~0.05mm宽的减振刃带或清边留量,以及变螺旋角、变齿距、变槽深结构;不同加工方式获得的不同周刃后刀面形状:平面形、凹面形、偏心形;不同走刀方式获得不同GASH面;以及底刃过心量、底刃倒锥、断屑槽、不同刃口形式(锐刃、倒圆刃、倒棱刃、消振棱刃、白刃)等。这些细节特征在刀具实际加工(加工仿真)中会对刀具的切削性能产生重要影响,因此,在铣刀的参数化建模过程中,必须增加细节建模部分。

(3) CAD/CAM/CAE系统集成化。

根据设计参数生成立铣刀三维模型,进而进行切削仿真,可大大提高刀具研发效率。但砂轮形状尺寸、砂轮安装等加工误差会不可避免的造成铣刀设计模型和加工模型不符,根据设计参数获得的参数化模型并不能真实地反应铣刀实际结构尺寸特征。为了在切削仿真过程中尽可能的使刀具三维模型接近于铣刀实际模型,需进一步建立基于磨削制造工艺过程的立铣刀参数化设计,并完成铣刀结构数据在CAD/CAM/CAE之间的交互传递,如图7所示。在不对铣刀实体进行试验性加工的前提下,完成刀具从图纸设计、三维模型建立、磨削工艺及数控代码生成、到刀具切削性能评价的集成化系统。



图6 整体式立铣刀新型结构

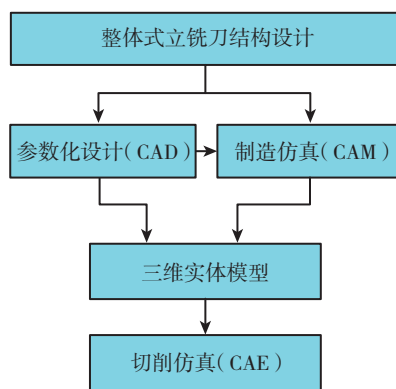


图7 整体式立铣刀CAD/CAM/CAE集成系统
刀具数据传递

结束语

立铣刀参数化设计是降低刀具研发周期,提高刀具研发水平,增加刀具生产企业竞争力的重要保障。本文结合国内外整体式立铣刀参数化设计的研究现状,以参数化设计相关理论为基础,分析了立铣刀参数化设计主要研究内容以及参数化设计软件系统建立过程中存在的主要问题,指出了刀具参数化设计未来的研究方向:应向刀具模型结构复杂化、刀具模型结构特征细节化、系统集成化方向发展。

参考文献

- [1] 戴春来. 参数化设计理论的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
- [2] 易荣庆. 参数化设计中的关键问题研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
- [3] 孟祥旭. 参数化设计模型的研究与实现[D]. 北京: 中科院计算机技术研究所, 1998.
- [4] 张峰, 李兆前, 黄传真. 参数化设计的研究现状与发展趋势. 机械工程师, 2002(1): 13-15.
- [5] 金建国, 周明华, 邬学军. 参数化设计综. 计算机工程与应用, 2003, 39(7): 16-18.
- [6] 曹红. 参数建模方法及其在产品中的应用. 四川兵工学报, 1999, 20(1): 25-27.
- [7] 杜平安, 王豪才. 产品CAD中的参数化建模方法. 计算机辅助设计与制造, 1996(6): 17-18.
- [8] 米蓉. 立铣刀三维参数化设计系统研发[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [9] 邱迎宾. 复杂形状刀具三维实体建模[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [10] 吴喜让, 宗荣珍. 通用螺旋立铣刀的力学和动力学模型(一). 失效分析与预防, 2003(2): 36-42.
- [11] Engin S, Altintas Y. Mechanics and dynamics of general milling cutters Part I: Helical end mills. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(15): 2195-2212.
- [12] 彭祥增, 译. 刀具设计的螺旋面理论. 北京: 机械工业出版社, 1984: 22-40.
- [13] 龚智辉, 宾鸿赞. 螺旋角的广义定义及其应用. 中国机械工程, 1994, 5(1): 14-15.
- [14] 何耀雄, 周云飞, 周济. 广义螺旋运动与复杂回转刀具几何建模. 航空学报, 2002, 23(2): 135-139.
- [15] Chen W F, Lai H Y, Chen C K. A precision tool model for concave cone-end milling cutters. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18 (8): 567-578.
- [16] Lin S W, Lai H Y. A mathematical model for manufacturing ball-end cutters using a two-axis NC machine. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(12): 881-888.
- [17] 何彪. 新型球头立铣刀刃磨加工研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2005.

本文共有参考文献52篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 小城)