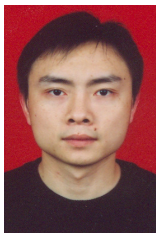
基于 CATIA V5 的圆柱齿轮虚拟加工研究

蒲太平，唐进元
（现代复杂装备设计与极端制造教育部重点实验室（中南大学），中南大学机电工程学院，湖南 长沙 410083）



摘 要: 以共轭齿面包络原理为理论基础，布尔运算为方法，商用三维实体软件为工具，研究了磨前滚刀加工圆柱齿轮的计算机虚拟加工问题，**利用 CATIA V5 的二次开发功能构建出磨前滚刀加工圆柱齿轮的虚拟仿真加工系统。对仿真系统虚拟加工的齿轮齿廓进行了曲面重构，得到了精确齿轮实体模型**，通过分析模型的公法线误差，验证了该方法的正确性。为基于包络制造原理的曲面零件的数字化制造提供了一种有效方法。

关键词: 虚拟加工；圆柱齿轮；CATIA V5；二次开发；曲线拟合
中图分类号: TP391.9 **文献标识码：** A **文章编号：** 1004-731X (2008) 16-4339-05

Virtual Machining Process Research of Spur-gear Based on CATIA V5

PU Tai-ping, TANG Jin-yuan
(Key Laboratory of Modern Complex Equipment Design and Extreme Manufacturing (Central South University),
College of Mechanical and Electrical Engineering, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on the gear generation principle, taking the Boolean calculation as the method and the commercial three dimensional software as the tool, *the gear virtual manufacture system using the CATIA V5 secondary development function was constructed. Carrying on the curve fitting to the tooth profile of the virtual machining gear model, the accurate gear model was obtained.* The validity of this method was validated through analyzing the common normal length error of the model. An effective method to establish accuracy gear three dimensional solid mold was supplied.

Key words: virtual machining process；spur-gear; CATIA V5；secondary development；curve fitting

引 言

齿轮的切削加工过程仿真及反映加工过程的齿轮模型构建是齿轮虚拟加工的关键技术。现在研究齿轮的加工仿真大多基于 VC++,VB，Autolisp 等程序语言开发相应的模拟加工程序，模拟出齿轮的加工过程，并显示出齿轮加工后的齿轮曲线[1-4]。这些程序可以使齿轮初学者认识齿轮的加工过程，但不能构建用于 CAD/CAM/CAE 分析的三维实体模型。也有用三维 CAD 系统二次开发齿轮建模模块的研究[5-10]，但多采用构建齿廓曲线函数的方法，这种方法必须先知道齿廓曲线的方程，对于齿廓曲线的过渡曲线（如:磨前滚刀加工齿轮的过渡曲线）很难构建其精确的曲线方程[11]，也不能构建出刀具和机床等误差引起的齿廓误差模型，故此方法不具有通用性。也有模拟真实齿轮加工过程，用 AutoCAD 二次开发齿轮加工仿真系统的研究[12]，但这样构建的齿轮模型的齿廓曲面是由多个微小平面组成，难以实现误差分析和有限元分析。

CATIA V5 是功能强大的通用三维实体建模软件，具有强大的曲面建模功能，高的建模精度和方便的二次开发功能。在 CATIA V5 构建的实体模型可方便的实现复杂曲面模型的构建，及模型的有限元分析、虚拟装配、运动分析和动力学分析等。文章以 CATIA V5 为建模平台，采用模拟真实加工齿轮的建模方法，利用其方便的二次开发功能开发出圆柱圆柱齿轮虚拟加工系统。

1 齿轮虚拟加工及在 CATIA V5 中的实现方法

虚拟加工[13-15]是虚拟制造(Virtual Manufacturing VM)技术的一个重要组成部分，其目标是为虚拟制造建立一个真实的加工环境,用以仿真和评估各加工过程对产品质量的影响。在虚拟机床中,需要建立机床模型和加工过程模型。机床模型包括机床的几何参数、运动关系、伺服系统、刚度和热影响等。加工过程模型包括切削力、刀具的磨损、加工表面形状以及公差等。利用虚拟机床,用户输入 NC 程序、工艺模型和刀具模型,并在得到有关工件特性、刀具状况和加工效率等信息的情况下,进行虚拟制造中产品的可制造性评价。

虚拟加工的一个关键问题是解决刀具几何体切削毛坯几何体加工过程的仿真及构建切削后的零件几何体模型，这个零件几何体模型需反映出刀具的磨损和机床误差等对零件精度的影响。这也一直是国外 CAD/CAM 技术的一个研究热点[13],Kawabe 等人最早利用刀具轨迹,采用边界表示法来获取刀具加工零件的框架图,因为该方法简单,容易实现,所以被早期大多数的 CAD/CAM 系统所采用。但是,因为工件形状越来越复杂,刀具轨迹包含的信息量也越来越多,导致

收稿日期： 2007-04-12 **修回日期：** 2007-07-11
基金项目： 国家重点基础研究发展计划（973 计划）(2005CB724100), 湖南省科技厅资助项目 (05JT1045), 中南大学大学生创新创业启航行动项目 (ZRA16).
作者简介： **蒲太平**(1982-), 男, 四川江油人, 硕士生, 研究方向为齿轮虚拟制造；**唐进元**(1962-), 男, 湖南永州人, 教授, 研究方向为齿轮传动及数字化制造。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图形形状混乱不清,于是研究开始向三维实体仿真算法方向发展,如:Anderson 研究了三维碰撞检验算法, Chappel 给出了利用向量来分析切削过程的算法,Sungurtkin 等提出了特定造型设备上的数控仿真系统,K.K.Wang 研究了基于布尔运算的 NC 检验系统,J.H.Oliver 提出了直接尺寸检验方法等。

通用的 CAD/CAM 系统的虚拟加工模块可实现数控机床的加工仿真和NC代码的自动生成,但是只能模拟数控车、铣、线切割等通用数控机床的加工模拟,并且在模拟加工前必须先在 CAD 模块里构建零件的实体模型,系统参考这个零件模型生成 NC 代码,其主要功能是 NC 代码的生成及加工检查过程中的干涉等问题。对于齿轮等复杂曲面零件不能用通用数控机床,并且这些零件的实体模型复杂,精确构建其实体模型很困难,更不能仿真和评估各加工过程对产品质量及加工误差的影响。在 CATIA V5 中可利用其几何体位置变换及布尔运算功能实现齿轮等复杂零件的加工过程模拟及实体模型的构建,并通过其二次开发技术实现几何体位置变换及布尔运算等操作的自动化,就可构建出模拟真实加工过程的零件几何体模型,再在这个几何体模型上提取采样点,便可重构出光滑的单一齿廓曲面,进而生成能反映真实加工过程的零件几何体模型,用这个模型便可评估刀具及机床误差对产品质量的影响。用这种方法只需知道刀具及毛坯的几何实体模型及加工参数,无需推导反映各项加工误差的齿轮的齿廓方程,便可构建精确的齿轮零件模型,且方法具有通用性,适合螺旋锥齿轮等复杂曲面齿轮的加工误差及有限元分析等。

2 齿轮虚拟加工原理与齿廓曲面重构方法

2.1 齿轮虚拟加工原理

齿轮在范成加工过程中,刀具切削刃在齿坯上切出的“痕迹”,即刀具迹线。刀具迹线形成过程的仿真,旨在再现齿坯上刀具迹线逐次形成的过程,形象的描述刀具齿廓曲线和齿轮齿型的关系。为此,将坐标系固连在齿坯上,随齿坯按照齿坯的转动速度一起转动。在此坐标系中,齿坯“静止不动”,刀具则按一定的规律作平面运动,一方面绕齿坯轴线转动,构成刀具的牵连运动,同时,还要作相对于刀具坐标系的直线运动,刀具的运动是这两种运动的合成。刀具作复合运动的任一瞬时,都会留下一条“迹线”,不同瞬时的刀具迹线的集合则形成“迹线族”,即刀具包络线。

机床的切削加工是一个连续的过程,而仿真只能是给出刀具和工件有限个相对位置。所以我们必须将运动关系式离散化,得到有限个相对位置对应的数据。所谓离散化就是将运动关系式中的一个变量作为自变量,给出其在加工过程中的一些取值点,再根据运动关系算出这些取值点上对应的其它变量值。

如图 1,已知被加工齿轮模数 m、齿数 z、变位系数 x、

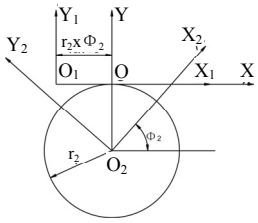


图 1 齿轮与齿条啮合的坐标系

齿坯轴线到齿条刀具分度线距离为 r_2,$r_2=m*z/2+x*m$,齿条刀具以速度 v 沿 x 正向运动,齿坯则以角速度 w 转动,由纯滚动的条件可知:$w=v/r_2$。为便于仿真处理,本文采用位置参数,某一时间 t,齿坯转角 Φ_2,刀具移动距离 s,有 $s=\Phi_2*r_2$。现将 Φ_2 为自变量离散化为 n 等分可得 $\Delta\Phi_2=\Phi_2/n$,可得 $\Delta s=\Delta\Phi_2*r_2$。故在齿轮啮合过程中,齿条刀具的运动分为两部分:绕 O_2 点的旋转和沿 X 方向的移动。

在 CATIA 软件里,可利用其几何体的平移和旋转功能方便实现以上的运动变换,再利用几何体间的布尔运算实现切削过程的仿真[16-18]。

2.2 虚拟加工齿面重构方法

2.2.1 齿廓曲线重构与拟合的必要性

通过模拟齿轮真实加工过程,用布尔运算构建的齿轮模型,其齿廓曲线是由微段直线构成的,如图 2。其实体模型有以下不足:

(1) 微段直线越短,齿廓越接近渐开线,但是微段直线越短,构建齿廓曲线的特征量越多,齿廓曲面也不是单一曲面,在加工误差时需同时对大量微小曲面进行处理,难度很大。

(2) 齿廓曲面是由多个小平面组成,在实体模型导入到有限元软件进行分析时,容易出现破面和曲面丢失现象。在对模型划分网格时需要的网格也极小,甚至出现网格的变形,得不到精确的分析结果,并且不能满足网格划分时需尽量简化特征的原则。

故需对虚拟加工的齿轮模型进行齿廓曲线拟合等后处理,以便进行加工误差和有限元等分析。

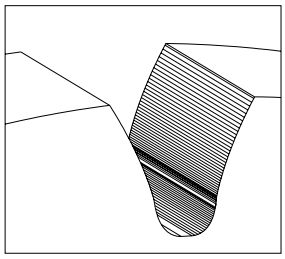


图 2 虚拟加工齿廓图

2.2.2 齿廓曲线拟合

由于圆柱齿轮只需知道齿廓曲线就可构建出齿廓曲面,故只需对齿廓曲线进行曲线重构。现在应用的主要有两种类型的曲面重建方法:一是基于矩形参数作用域,以 B 样条

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和 NURBS 曲面为代表的方法；二是基于三角参数域，以三角 Bezier 曲面为代表的曲面重建方法。本文应用的是在矩形参数作用域内用 B 样条曲线拟合的方法。

2.2.3 B 样条曲线

在计算机图形学[19]中，已知 n+1 个控制点 $P_i(i=0,1,\ldots,n)$ 也称之为特征多边形的顶点，k 次（k+1 阶）B 样条曲线的表达式是：

$$C(u)=\sum_{i=0}^{n}P_iN_{i,k}(u)$$

其中 $N_{i,k}(u)$是调和函数，也称之为基函数，按照递归公式可定义为：

$$\begin{cases}N_{i,0}(u)=\begin{cases}1,若t_i\le u<t_{i+1}\\0,其他\end{cases}\\N_{i,k}(u)=\dfrac{u-t_i}{t_{i+k}-t_i}N_{i,k-1}(u)+\dfrac{t_{i+k+1}-u}{t_{i+k+1}-t_{i+1}}N_{i+1,k-1}(u)\end{cases}$$

其中 t_i 是节点值，T=[$t0$，$t1$，…，t_{L+2k+1}]构成了 k 次 B 样条函数的节点矢量，其中的节点是非减序列，且 $L=n-k$。

对于给定的数据点集合：$N_i=[x_i, y_i, z_i]^T$, i =0,…,m,要给出其一条拟合 B 样条曲线,必须首先确定数据点的位置参数 $\{v_i\}_0^m$、次数 k、控制点数 n +1 和节点矢量 U。在 CATIA V5 中选择样条曲线功能绘制曲线时，其次数 k 和节点矢量 U 和由系统本身确定，故只要知道数据点的位置参数 $\{v_i\}_0^m$ 和控制点数 $n+1$ 便可构建出拟合的曲线。

2.2.4 采样位置及点数的确定

将渐开线的发生线 L 沿基圆作纯滚动过程离散，可得发生线 L 在不同时刻的位置，如图 3，图中 θ 为展角，r_b 为基圆半径，K 为发生线的端点，K 的轨迹即为渐开线。过 K 点作 L 的垂线 T，令展角为 θ_{i-1} 的切线 T_{i-1} 和展角为 θ_i 的切线 T_i 的交点为 a, 展角为 θ_{i+1} 的切线 T_{i+1} 和展角为 θ_i 的切线 T_i 的交点为 b。将 K_i 处放大，如图 4，a 到切点 K_i 的距离为 x，a 到切点 b 的距离为 y，其比值 $\xi=y/x$ 会随 r_b、θ 和 $\Delta\theta=\theta_{i+1}-\theta_i$ 的变化而发生变化，故 ξ 是 r_b、θ 和 $\Delta\theta$ 的函数，要精确计算出 ξ 在各个微小线段的值，数据量非常大。通过在 CATIA V5 中测量计算各个离散展角 θ_i 的 ξ 值，可发现当 r_b 为定值和 $\Delta\theta$ 极小时，ξ 会随 θ 的增加在 0.48～0.5 范围内变化。考虑到 y 值极小，通过调节建模时的 $\Delta\theta$ 值可使 y 不超过 0.2mm。设采样点为 N，N 到 K_i 的距离 δ 为采样点 N 的切向误差，τ 为法向误差，影响模型精度的主要是法向误差。当取采样点 N 的 ξ 值为 0.49 时，可使 δ 小于 0.001mm，而采样点 N 的法向误差 τ 为 δ 的高阶无穷小，当 δ 小于 0.001mm 时，τ 已经超过了软件的精度范围，可以忽略。故可以用 ξ 值为 0.49 来代替精确的 ξ 值。由于渐开线的切线 T 的位置和个数在虚拟加工建模时已定，故确定采样点的 ξ 值也就确定采样点的位置参数 $\{v_i\}_0^m$ 和个数 $n+1$，这样也就确定了拟合曲线。

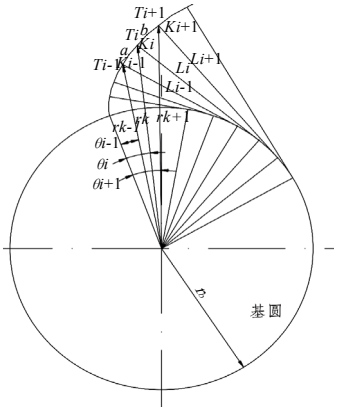


图 3　渐开线离散图

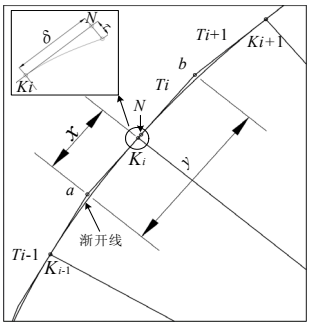


图 4　渐开线局部放大图

3　基于 CATIA V5 的虚拟加工系统的组成及程序流程

3.1 虚拟加工系统的组成

虚拟加工系统主要由刀具数据库和机床库两部分组成，刀具数据库记录了刀具的形状和尺寸，机床数据库记录了加工时机床的调整参数。如图 5，当齿坯模型进入制造系统后，通过在刀具数据库中选择相应刀具的类型和尺寸，调节齿坯在机床上的位置参数，及刀具的加工行程等机床参数，便可生成对应参数的虚拟加工出的齿轮零件模型。

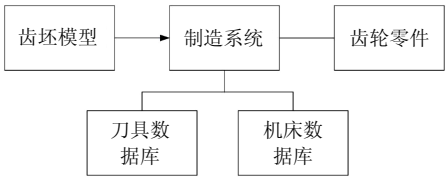


图 5　虚拟加工系统的组成

3.2 程序流程

实现以上功能可以通过如下的程序流程实现，如图 6。启动程序后，在相应的虚拟加工系统界面内输入齿轮零件的参数、刀具参数、机床参数后执行加工命令，程序开始判断 CATIA V5 是否启动，如果 CATIA V5 已经启动则直接进入零件模块，如果 CATIA V5 没有启动，则启动 CATIA V5 后再进入零件模块。进入零件模块后新建毛坯模型，再创建刀具模型同时调整刀具位置，然后让刀具几何体和齿坯几何体作布尔运算，在齿坯上切除刀具所站的位置，并判断是否切

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

完一个齿槽，如果没切完再重复上面步骤，调整刀具到下一个切齿位置。完成一个齿槽后再阵列切完的齿槽，完成整个建模过程。

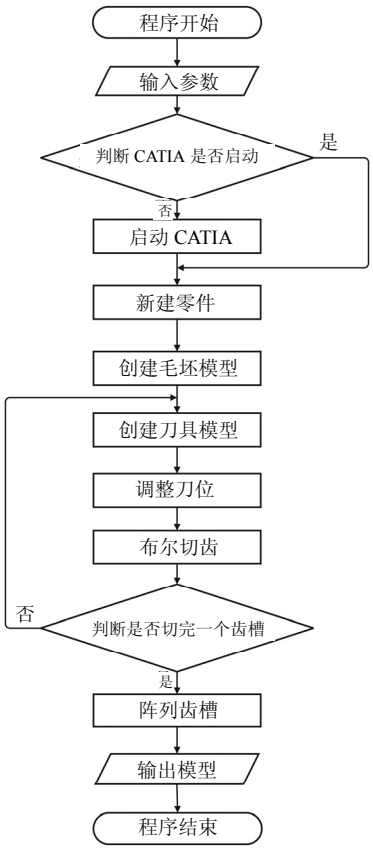


图 6 虚拟加工系统程序流程简图

3.3 CATIA V5 二次开发的步骤

目前已经有许多详细介绍 CATIA V5 二次开发原理的文章[20]，本文只介绍用 VB6.0 对 CATIA V5 二次开发的步骤：

(1) 初始化 COM 库，引入类型库文件，VB6.0 可从 IDE 中引入。类型库文件是二进制文件，但经编译后产生类型库头文件(扩展名为 TLH)和类型库实现文件(扩展名 TLI)。类型库头文件是相应环境下语言格式文件，包含对象定义，全局唯一标识符，对象中所使用的结构、方法和属性定义，智能指针(SmartPointer)定义，交叉引用类型库的说明等。若是交叉引用类型库，应按引用顺序引入，否则将出现编译错误，类型库实现文件则是对象及其接口的实现代码。

(2) 打开或新建一个全局对象 Application，这就启动了 CATIA。

(3) 向 Application 中加入 Document 对象，以实现数据管理，如零件图设计使用的 PartDocument. 产品图使用的 ProductDocument、三视图使用的 DrawingDocument。

(4) 声明欲使用对象，设置参考平面和视点，绘制几何形体。

(5) 更新 Document 对象或 Viewer 对象，以便正确显示几何形体。

(6) 关闭 Document，释放 COM 库资源。

4 齿轮虚拟加工举例

下面将以磨前滚刀滚齿以及磨齿[21]为例介绍在 CATIA V5 平台中二次开发其加工精确圆柱直齿轮的虚拟加工系统的详细过程。

4.1 初始化 COM 库

在 VB 中新建一个工程，在这个工程中初始化 COM 库，在 VB 编程环境中选择“工程/引用”打开对象库功能，选择相关的 CATIA 对象库，如图 7。CATIA 提供的对象库大约有 50 余个，在选择对象库的时候，注意应该选择我们所需要的，扩大选择范围虽然能保证对象的引用性，但运行时会造成不必要的系统开支。

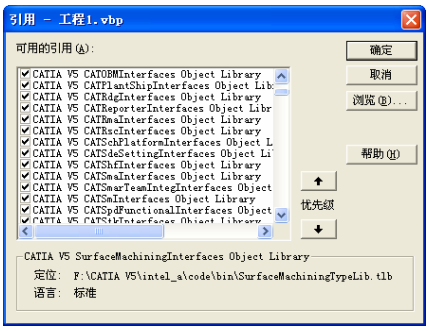


图 7 在 Visual Basic 里应用 CATIA 类型库

4.2 界面开发及程序编写

(1) 界面开发。根据磨前滚刀的截面图及相关参数编辑虚拟制造系统的界面，如图 8。

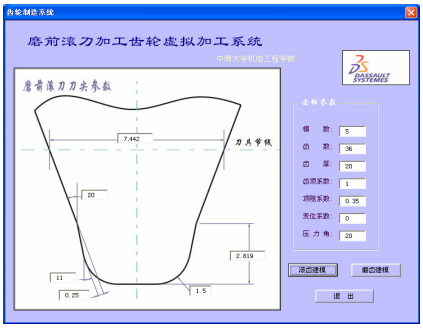


图 8 虚拟制造系统界面图

(2) 程序编写

1.通过 VB 启动 CATIA

```
Dim CATIA As Object
On Error Resume Next
Set CATIA = GetObject("CATIA.Application")
If Err.Number <> 0 Then
   Set CATIA = CreateObject("CATIA.application")
   CATIA.Visible = True
End If
On Error GoTo 0
```

2.加工速度控制

由于 CATIA 软件是庞大的基于特征的参数化三维 CAD

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

系统，其在建模过程中记录了所有特征的参数，故仿真速度受电脑 CPU 性能影响较大。当电脑 CPU 的运算速度较快时，加工过程可通过 VB6.0 中的“时钟控件”控制每次布尔运算的时间间隔，实现在建模过程看到齿坯的切削过程，以及控制加工的快慢。

3.建模部分

分别根据滚齿和磨齿加工齿轮的原理，采用前述布尔运算方法编译相关程序，也可采用宏录制建模过程，生成相应程序。具体程序限于篇幅在此不再赘述，最后通过程序生成的齿轮模型和重构的模型，如图 9，齿廓如图 10。

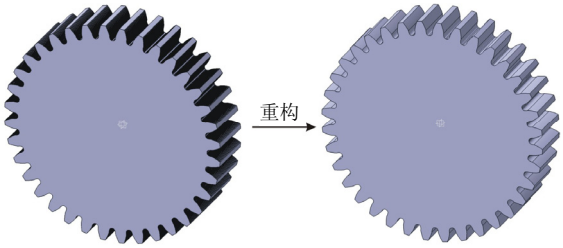


图 9　虚拟加工及拟合后的齿轮模型

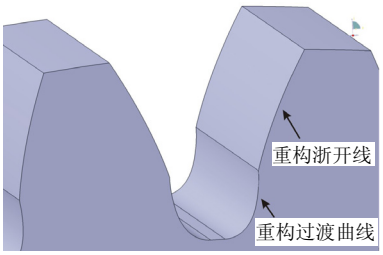


图 10　齿廓曲线图

4.3 模型精度分析

选取 m=5mm，z=36，α=20°的直齿轮，在虚拟加工系统下进行加工仿真，并对齿面进行重构。测量其公法线线长度为 54.18364mm，如图 11。由理论计算得到的公法线长度为 54.18372mm，可得虚拟加工得到的齿轮公法线误差为 0.00008mm，可见模型已达到很高的精度。

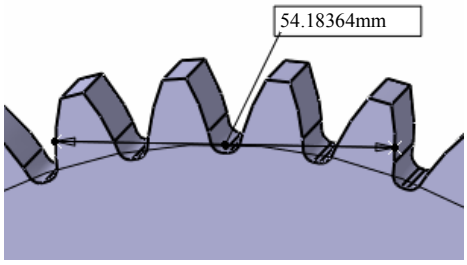


图 11　模型公法线长度

5　结论

以共轭齿面包络原理为理论基础，采用模拟真实齿轮的加工过程来构建齿轮模型的方法，利用 CATIA V5 的二次开发技术完成加工过程的自动化，再对齿廓曲线进行 B 样条曲线的拟合，可实现齿轮等复杂零件的虚拟加工过程，构建出能反映刀具磨损和机床误差的齿轮实体模型，为齿轮等复杂曲面零件的数字化制造研究提供了一条有效的途径。

参考文献：

[1] Argyris J, Donno M De, Litvin F L. Computer program in Visual Basic language for simulation of meshing and contact of gear drives and its application for design of worm gear drive [J]. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 2000, 189(2): 595-612.

[2] Bair B W. Computer Aided Design of Elliptical Gears [J]. ASME of Journal Mechanical Design, 2002, 124(4): 787-793

[3] 吴学文. 用 AutoCAD 生成渐开线齿轮齿廓的方法[J]. 机床与液压, 2004, 7(3): 142-143.

[4] 杨玉芳, 林大均, 付掌印. 齿轮加工仿真技术[J]. 东华大学学报, 2005.

[5] 毛培军, 麦云飞, 樊大飞, 等. 基于 Pro / Engineer 二次开发的齿轮优化设计及参数化造型系统研究[J]. 上海理工大学学报, 2005, 27(6): 560-564.

[6] 吴卓, 赵同霞, 丁志磊. 基于 Pro / ENGINEER 二次开发齿轮参数化模型库[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2006, 15(4): 61-63.

[7] 景仁坤, 王三武, 余旭阳. 基于 Pro/E 的渐开线圆柱齿轮建模[J]. 现代制造工程, 2004, 15(11): 43-45.

[8] 肖石林, 鲍务均. 渐开线齿轮在 CATIA 中的三维参数化建模与应用[J]. 起重运输机械, 2004, 21(10): 19-21.

[9] Ramamuti V, Vijayendra N H, Sujatha C. Static and Dynamic analysis of spur and bevel gears using FEM [J]. Mechanism and Machine Theory (S0094-114X), 1998, 33(8): 1177-1193.

[10] Faydor L. Litvin, Alfonso Fuentes, Qi Fan. Computerized design, simulation of meshing, and contact and stress analysis of face-milled formate generated spiral bevel gears [J]. Mechanism and Machine Theory (S0094-114X), 2002, 37(5): 441-459.

[11] 唐进元, 肖利民, 文伟军. 基于剃前滚刀加工的过渡曲线合成[J]. 长沙铁道学院学报, 1996, 14(2): 27-31.

[12] 李建刚, 吴序堂. CNC 铣齿机床加工曲线齿锥齿轮仿真系统的研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(4): 499-501.

[13] 肖田元, 韩向利, 王新龙, 等. 虚拟加工技术的研究[J]. 计算机集成制造系统, 1999, 6(3): 16 -20.

[14] 肖田元. 虚拟制造研究进展与展望[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1879-1913.

[15] 肖田元. 虚拟制造内涵及其应用研究[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(1): 118-123.

[16] 何兆太, 李国顺, 刘鹄然. 复杂回转面刀具的计算机辅助造型与加工过程仿真[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(3): 409-410.

[17] 谢黎明, 邱震宇, 张永贵, 等. 用简化 SCS 算法进行可视化加工过程仿真[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(4): 492-518.

[18] 陈修龙, 赵永生. 虚拟轴机床数控加工过程的计算机模拟[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(3): 541-545.

[19] 孙家广, 杨长贵. 计算机图形学[M]. 北京:清华大学出版社, 1998: 301-318.

[20] 武刚. 基于 CATIA ActiveX Automation 机械零件参数化系统的开发技术[J]. 天津理工学院学报, 2003, 19 (4): 53-56.

[21] 唐进元, 周长江, 吴运新. 齿轮精确建模有限元分析的探讨[J]. 机械科学与技术, 2004, 14(2): 1146-1149.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net