

一种非圆齿轮虚拟插齿加工建模及 切屑方法研究

杨艳芳, 孙 晗

(武汉理工大学物流工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 非圆齿轮因其节曲线为非圆形, 加工过程复杂, 加工仿真困难。针对一种非圆齿轮的加工, 实现了从毛坯到成品的虚拟插齿过程仿真, 即按照事先编制的 G 代码(即数控程序), 驱动虚拟插床有序去除虚拟毛坯材料。通过对毛坯模型进行离散化, 在切割过程中不断从场景中移除切屑材料节点实现加工仿真; 通过树状场景图结构搭建虚拟加工环境; 数控插齿加工过程复合运动的协调运作, 实现了基于 G 代码的加工过程运动仿真。采用 Visual Studio 2008 作为开发平台, 结合 OSG(open scene graph)图形库, 再现了加工中工件的成型过程, 为产品加工过程提供了有益的参考。

关 键 词: 非圆齿轮; 建模; 切削仿真; OSG

中图分类号: TP 391.73

DOI: 10.11996/JGj.2095-302X.2017030425

文献标识码: A

文 章 编 号: 2095-302X(2017)03-0425-06

Research on Modeling and Cutting Method of Virtual Gear Shaping for Non-Circular Gear

YANG Yanfang, SUN Han

(School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430063, China)

Abstract: Because the pitch is the non-circular curve, the machining process of non-circular gear is complex, and the simulation is difficult. In this paper, for the manufacturing of non-circular gear, simulation of virtual gear shaping process from blank to finished product is realized, namely in accordance with the prior preparation of the G code (NC program), to drive virtual slotting machine in order to remove a virtual blank material. Through discretizing the blank model, in the cutting process, the cutting material node is removed from the scene to realize the machining simulation; through the tree scene graph structure, the virtual machining environment is built effectively; with the coordinated operation of the complex motion of NC gear shaper processing process, the simulation of machining process based on G code is realized. Using Visual Studio 2008 as a development platform, combined with open scene graph (OSG) graphics library, the forming process of the work piece is well reproduced, providing useful reference and improvement for product processing.

Keywords: non-circular gear; modeling; cutting simulation; open scene graph

非圆齿轮的加工过程复杂, 一般是通过计算机计算出加工代码, 实现刀具与工件节曲线共轭, 然后将代码输入机床的数控装置。在实际数控加工过程中,

为校验数控程序的正确性, 需要反复进行试切直至确认数控程序能够完成预定的加工任务, 操作效率低下, 而且可能引起刀具碰撞而造成经济损失。

近年来,虚拟现实技术在加工领域有着广泛应用,LEE 和 MEI^[1]等研究了基于多线程的自适应八叉树的五轴机床的切削仿真,分析了基于 GPU 的多线程优势与如何提高计算速度。袁莎等^[2]通过将工件分解为若干个圆柱体建模,运用数控指令传递坐标值,进行插补解析运算,以达到切削仿真的效果,但该方法局限于车削加工的工件为回转体的特征。李嘉等^[3]研究了基于力反馈器技术的虚拟拆卸系统,实现了在虚拟环境中进行装备拆卸时具有真实的触觉感受,提高了维修人员的训练效果,降低了训练成本。赵康和文福安^[4]通过铣刀的位置划分毛坯模型为两个区域:不加工区域与待加工区域,达到铣削的效果。MUJBER 等^[5]对整个产品制造过程进行过程仿真。通过虚拟现实技术进行沉浸式的过程仿真,用于评测和评估新产品和新思路。WASFY 等^[6]通过虚拟现实技术搭建三维数控铣床培训系统,可以三维动画显示铣削加工并进行切削力的预测,通过虚拟操作面板、专家知识库、训练操作系统,能达到良好的铣削加工教学目的。

在非圆齿轮的加工仿真上,刘有余等^[7]基于工具齿条原理,采用 MATLAB 软件进行三维仿真研究,阐述了滚切仿真原理及实施方法,证实了椭圆滚切模型及各种滚切方法的正确可行性。但其本质上还是基于齿刀齿廓的加工轨迹堆叠而成,三维动态加工仿真效果不是很好。李建刚等^[8]根据一种称为成形砂轮展成磨削法的非圆齿轮磨削原理,在 VERICUT 的仿真环境下,通过导入机床、刀具等三维模型和加工 G 代码,模拟非圆齿轮的磨削过程。

本文侧重基于 G 代码的加工过程的虚拟直观展示,研究了虚拟加工场景及加工工件的模型有效构建,虚拟刀具与工件的复合运动及工件材料的有序去除。针对非圆齿轮模型及加工过程的特殊性,研究了虚拟毛坯材料去除方法及数控插齿复合运动过程,真实地表现出插齿加工过程中刀具与工件运动与材料的去除,直观地验证加工代码的有效性和准确性。

1 非圆齿轮的插齿加工原理与加工过程

1.1 非圆齿轮的数控插齿加工原理

非圆齿轮插齿加工中常用的两种包络齿廓算法^[9]是等弧长法和等极角法,即在数控加工过程中,加工齿轮每步转动是转过相等的弧长还是相

等的弧度。

非圆齿轮的插齿加工过程可以看作是圆齿刀的节圆在非圆齿轮的节曲线上纯滚动的一个过程。当非圆齿轮的节曲线全部滚完,所有齿廓都被插齿完成,插齿加工过程的数学表达模型如图 1 所示^[10]。

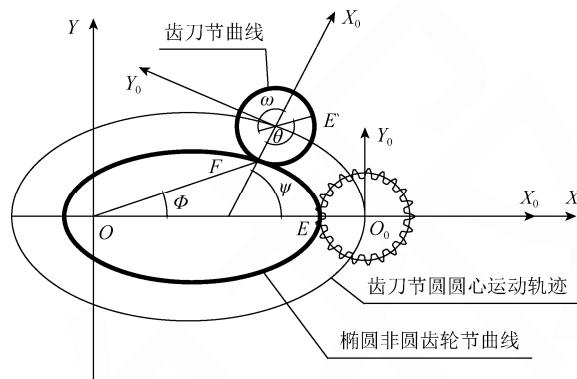


图 1 非圆齿轮展成原理图

图 1 中,小椭圆为加工齿轮的节曲线,大椭圆为圆齿刀节圆圆心运动轨迹,而圆齿刀的节圆和加工非圆齿轮的节曲线做纯滚动运动。当圆齿刀节圆滚过弧长 $E'F$ 时,椭圆上的 E 点转到了 F 点处,其转过的角度分别为 Φ 、 θ ,根据啮合原理,圆齿刀节曲线和非圆齿轮节曲线滚过的弧长应该相等,即

$$\int_0^{\Phi} \sqrt{r^2 + (dr / (d\Phi))^2} d\Phi = r_1 \theta \quad (1)$$

其中, r_1 为圆齿刀节圆半径, r 为非圆齿轮极径,是 Φ 的函数。通过该式,可以推导出圆齿刀齿廓曲线点在固定坐标系 XOY 中的位置,由此可以逐步包络出非圆齿轮的齿廓。

1.2 数控插齿加工过程

在数控插齿机上加工非圆齿轮时,应使刀具的节圆沿着非圆齿轮的节曲线无滑动的滚动。因此数控插齿机应至少有以下 3 种运动:

(1) 工件的回转运动。即工作台上的非圆齿轮毛坯绕自身旋转的运动,保证节曲线上的全部轮齿均被加工;

(2) 刀具的回转运动。圆齿刀绕自身的旋转运动;

(3) 中心距位移。刀具沿着圆齿刀与非圆齿轮的中心线进行的直线运动。

除此之外还应有主轴的往复冲程运动,即圆齿刀的上下运动完成插齿过程,和与主轴往复冲程相配合的让刀运动。本文所选择的插齿机床为三轴数控插齿机,如图 2 所示^[11]。

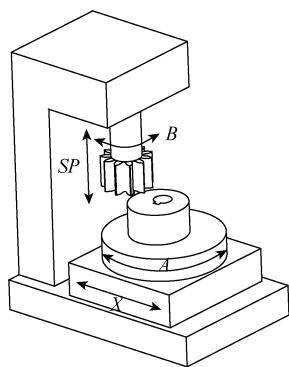


图2 三轴数控插齿机示意图

2 系统总体结构

虚拟插齿加工系统结构框图如图3所示。主要包括虚拟场景的构建和虚拟插齿加工过程仿真与交互式展示。

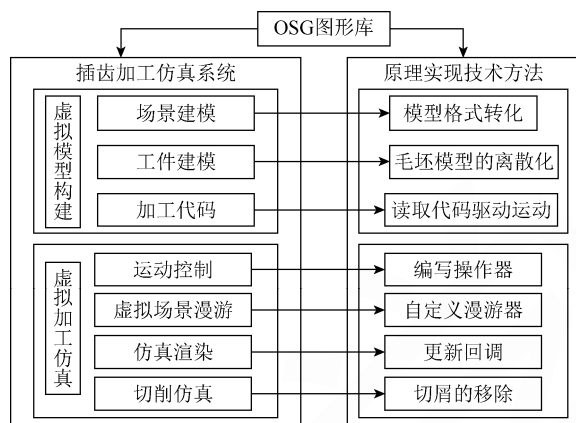


图3 系统结构框图

虚拟加工场景的构建主要包含3个部分:①场景建模:使用树状场景图来组织虚拟场景模型,通过深度遍历寻找运动节点;②工件建模:将工件模型离散化,在仿真过程中将切屑从场景移除;③加工代码:自动读取加工代码,驱动刀具与工件实现有序复合运动。

虚拟加工仿真的实现主要包含4个部分:①切削仿真:将离散的切屑模型从场景移除,达到切削仿真的目的;②仿真渲染:通过更新回调机制实现工件、刀具及机床的联合运动,实现仿真动画效果;③运动控制:仿真系统响应键盘操作,实现对加工开始、暂停、结束等运动的控制;④场景漫游:自定义漫游器,实现路径漫游以及用户漫游。

3 虚拟模型构建

在数字空间中模拟现实世界中的对象和状态,

就需要将现实世界中的对象、对象之间的关系、对象之间的相互作用及发展变化所遵循的规律映射为数字空间中的数据表示,这一过程称之为建模^[12]。

3.1 虚拟插齿仿真场景建模

齿轮加工仿真时,机床的支撑导轨部分是不动的,运动的只有齿刀、零件(包括夹具)及固定齿刀的机床床身,所以在模型处理时将具有相同运动模式的部件进行成组,以方便控制他们的运动。

在虚拟现实仿真中,需要将三维模型进行三角面片化,获得三角面片的顶点坐标、法线坐标、纹理坐标等,便于进行空间变换。场景构建流程图如图4所示。



图4 虚拟场景模型构建

场景图的树状结构如图5所示。顶部是一个根节点,使用 Group 组节点构成整个虚拟仿真场景,其下延伸子组节点,每个子组节点中均包含了几何信息和用于控制外观渲染状态的信息。为了可以控制刀具与工件的运动,两个子组节点设置了 MatrixTransform 节点,每个零部件的底层 Node 节点由其上层父节点的 MatrixTransform 节点决定其位置、旋转和动画。在场景图形的最底部,各个子节点 Node 读取 IVE 文件,包含了构成场景物体的实际几何信息。

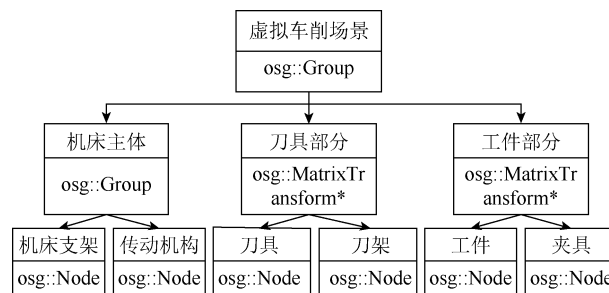


图5 场景节点树结构

3.2 工件建模与离散化

本系统加工的非圆齿轮,在建模时将工件分成待加工部分和不加工部分。图6(a)~(c)分别是非圆齿轮的毛坯模型、离散化模型和加工后成品模型。将毛坯模型在建模软件中进行分割处理,根据加工参数的不同,毛坯的离散数量也会有相应变化,图示为加工进给步数为5时的模型。即每

个切屑分成五份,在一圈加工中,当齿刀插齿加工时,将其中的一份从场景中移除,直到完成 5 次进给,此时毛坯模型转变成加工成品模型,达到加工仿真的目的。

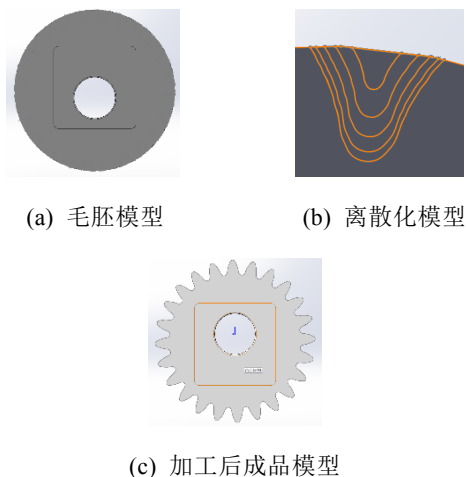


图 6 非圆齿轮模型

虚拟加工仿真对实时性的要求很高,但当模型节点数量过多时,会造成极大的内存消耗,影响运算速度,从而会影响到仿真的实时性及准确性。所以可以对工件模型进行离散化,仿真时将已经切削的工件材料部分从场景中移除,加速系统的运行速度,提高实时性。

4 虚拟加工仿真

4.1 深度遍历

虚拟加工仿真过程中,要实现刀具与工件的运动,需要在场景图中找到相应的节点。模型场景搭建时已经对各个部件进行了命名,通过深度优先遍历机制对整个场景进行遍历,找到所有需要控制的节点,并将这些节点指针赋予重新声明并命名的 Node 节点,并对具有相同运动模式的 Node 节点进行成组,构成 Group 节点,在之后的运动控制中直接对这些 Node 和 Group 节点进行操作即可。

深度优先遍历机制如图 7 所示,在访问图中某一起始节点 Node 出发,访问它的任一邻接 Node₁ 节点或 Group₁ 节点;再从该节点重新出发,访问与 Node₁ 节点或 Group₁ 节点相邻但未被访问的 Node₂ 节点,并一直进行类似的访问直到到达所有邻接节点都被访问过的 Node_n 节点为止。接着,退回一步,退到前一次刚访问过的节点,看是否还有其他未被访问的邻接节点。如果有,则访问此节点,之后再从此节点出发,进行与前述类似的访问;如果没有,

就再退回一步进行搜索。重复上述过程,直到连通图中所有节点都被访问过为止,再逐步返回到上一级尚未访问的节点,最终访问器遍历所有节点。插齿加工仿真场景如图 8 所示。

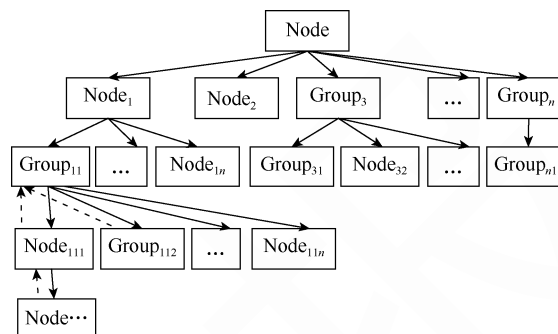


图 7 深度优先遍历机制

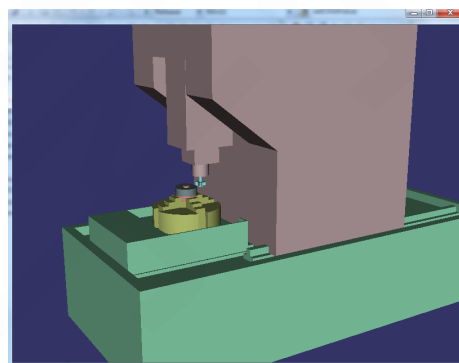


图 8 插齿仿真场景

4.2 加工代码转化与读取

非圆齿轮的特点在于其节曲线不是圆而是非圆曲线,因此,在非圆齿轮的加工中,工作台的自转、刀具的自转、机床的轴线运动都是非线性的,且 3 个运动之间有着精确的数学关系。

通过 Matlab 模拟齿刀与毛坯间的滑动啮合,进行数字仿真从而获得加工 G 代码,得到的非圆齿轮的加工 G 代码主要有 3 个数据,即上述的 3 个运动。数控机床有着自己的坐标系,G 代码中的数据不适用于仿真环境,因此可以将数据前后两两相减,得到加工运动中的实际数据,如工作台和齿刀的每步旋转弧度,机床的位移距离。这样只需建模时确定好加工初始位置,在每步回调时增加各个部件的运动差值,即可得到准确的运动动画。将处理后的代码读入程序中的数组中储存,在之后的加工仿真中,每一次的回调渲染从数组中读取数据,通过该数据驱动各部件进行运动。

4.3 复合运动合成

在虚拟仿真场景中,模型包含着顶点的信息,

动画本质上是各个顶点坐标的空间变换,模型中的所有顶点都被视为三维齐次顶点,包含4个坐标,向量 $(x, y, z, w)^T$ 表示一个齐次顶点。这样顶点变换(旋转、平移、缩放)和投影变换(透视投影和正交投影)都可以用一个 4×4 的矩阵表示。变换矩阵依照变换类型分为3种:平移变换矩阵、旋转变换矩阵、缩放变换矩阵。

将点 (x, y, z) 沿向量 (T_x, T_y, T_z) 平移至新位置,表示为

$$[X'Y'Z'1] = [X \ Y \ Z \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & T_z & 1 \end{bmatrix} = [X + T_x \ Y + T_y \ Z + T_z \ 1]$$

旋转变换是指绕某一个轴旋转 θ 角时所产生的变换。变换矩阵可表示为

(1) 绕 x 轴旋转:

$$[X'Y'Z'1] = [X \ Y \ Z \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 绕 y 轴旋转:

$$[X'Y'Z'1] = [X \ Y \ Z \ 1] \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3) 绕 z 轴旋转:

$$[X'Y'Z'1] = [X \ Y \ Z \ 1] \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

缩放变换将模型沿3个方向进行比例缩放。变换矩阵表示为

$$[X'Y'Z'1] = [X \ Y \ Z \ 1] \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

坐标矩阵的基本变换一般是以世界坐标系的原点为变换中心,所以在进行变换的过程中会出现一些意想不到的错误。例如在插齿加工仿真时,齿刀应做一个绕自身轴的旋转,但当齿刀的轴与OSG世界坐标轴的 y 轴不重合时,齿刀即绕着另一个轴做旋转运动。

该问题的出现在于变换结果应以自身为中心旋转,而实际却是以世界坐标系的中心旋转。为了解决这个问题,可以采用2种办法:①在3D Max中将旋转物的中心点与世界坐标系的中心点重合;②在每次变换时将物体中心与世界坐标系中心重合,即每次变换前将模型移动到世界坐标中心,进行旋转变换,然后在反向移回原位置。

本文进行的非圆齿轮加工是采用三轴联动的数控插齿机进行的,在加工过程中主要实现的是3个运动:①齿轮工件的绕自身运动;②齿刀的绕自身轴的运动;③齿刀的沿中心线方向的轴向运动。因此,在虚拟加工仿真中也应该有3种运动方式:①非圆齿轮工件及其夹具有着相同的运动,即绕自身轴的自转;②齿刀的复合运动,包括其绕自身轴的自转,沿中心线方向的轴向运动,及沿加工齿轮轴线方向的上下切削运动;③齿刀夹具,即整个机床的床身有着与刀具在中心线方向相同的轴向运动。

据此分析,将模型的世界坐标中心设在了工件夹具的中心处,这样,非圆齿轮工件的绕自身轴的自转可以看作是绕世界坐标系的 y 轴的旋转运动,齿刀夹具的轴线运动即沿着世界坐标系的轴线运动,这两个运动可以通过上述的坐标变换一步实现。而齿刀的运动则较为复杂,由多个运动复合而成,复合运动由变换矩阵的级联来实现。

为了获得较好的效率,复合运动往往采用级联的形式来完成,变换级联是将多个矩阵按顺序相乘得到的单个矩阵。例如,要对物体依次进行缩放、旋转和平移运动,可以先将这3个变换矩阵级联成单个矩阵 $M=TRS$,然后将需要变换的物体的位置矩阵与 M 左乘,而不是对物体进行3次变换,可以提高效率。其中需要特别注意的是矩阵乘法不适用于交换率,所以变换时要特别注意变换顺序,顺序不同造成的结果也不相同,变换顺序从最右边的变换矩阵开始,依次向左实现每一个变换。

由上述可知,齿刀的矩阵变换为

$$M = M' \times (T_1 \times T_2 \times T_3 \times R_1 \times T_3^{-1}) \quad (2)$$

其中, M 表示变换后的齿刀矩阵, M' 表示变换前齿刀的位置矩阵, T_1 为齿刀的上下运动变换矩阵, T_2 为齿刀随齿刀夹具进行轴线运动的变换矩阵, T_3 为齿刀的包围盒矩阵, R_1 为齿刀的自转矩阵, T_3^{-1} 为 T_3 的逆矩阵。 T_1 与 T_2 实现齿刀的两个平移移动, T_3 、 R_1 及 T_3^{-1} 的级联实现齿刀的绕自身轴的旋转,矩阵的具体数值通过读取加工代码来获取。

5 切削仿真实现

虚拟插齿加工仿真主要是实现齿刀、工件及机床床身的运动,通过系统响应操作器的响应事件,在响应事件中调用节点的更新回调函数,如设置旋转的回调以实现工件及齿刀的自转,平移的回调以实现机床的移动等。具体的实现方法流程如图9所示:①通过继承 `GUIEventHandler` 类编写自定义的操作器 `UseEventHandle`, 定义一个 `osg::MatrixTransform* mt` 对象进行坐标变换,在 `mt` 对象下添加零件为子节点,控制下面节点的移动、旋转、缩放等操作;②当响应 `handle` 函数中的键盘操作后, `Viewer` 执行更新回调命令;③在每一帧的渲染中启动更新回调,使用 `mt->setMatrix()` 方法设置旋转、移动、缩放的参数,因为人眼的视觉停留效果会展现出旋转、移动等动画效果。

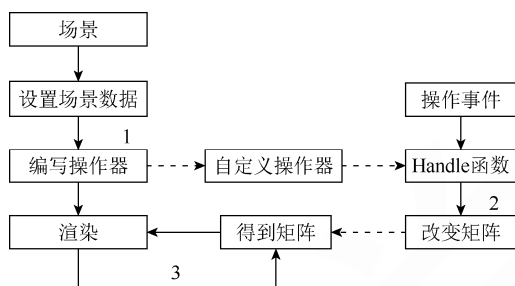


图9 渲染动画实现流程图

虚拟加工仿真本质可以看做是切屑的去除,通过上述的毛坯模型离散化,随着加工时间的推移,切屑节点随着毛坯自转角度的增加逐渐从场景中被移除,达到切削仿真的效果。同时,在不同的加工阶段,可以在渲染画面正对屏幕的角度写上相关的汉字说明,如加工阶段、加工注意事项等内容,获得更好的展示效果。图10所示为加工过程中的齿轮毛坯。

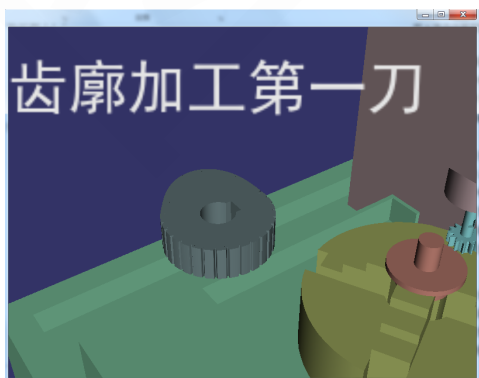


图10 加工中的齿轮毛坯

6 结束语

本文针对非圆齿轮虚拟插齿加工仿真,对非圆齿轮加工原理、仿真过程中的虚拟场景建模、漫游系统的设计、仿真渲染的实现、碰撞检测等技术原理进行了介绍。同时通过系统的实现,提供了解决方案,对实现虚拟加工提供了一些实用的建议。

此外,通过非圆齿轮实际加工前进行虚拟仿真加工,可以初步验证非圆齿轮的节曲线设计是否合理,刀具参数选择是否得当,插齿加工程序代码是否正确等。即在设计阶段就对其参数设计及加工过程有一定的了解,达到试切的效果,避免在实际加工中发生突发意外,造成重大损失。

参考文献

- [1] LEE R S, MEI K J. Motion and virtual cutting simulation system for a five-axis virtual machine tool [J]. *International Journal of Automation and Smart Technology*, 2011, 1(1): 35-39.
- [2] 袁莎, 余震, 郑慧, 等. 基于 OSG 的虚拟数控车削过程研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2010(6): 47-49.
- [3] 李嘉, 侯文, 夏文文, 等. 基于力反馈的虚拟拆卸系统关键技术研究[J]. *图学学报*, 2014, 35(3): 451-454.
- [4] 赵康, 文福安. 虚拟切削加工系统的设计与实现[J]. *软件*, 2012, 33(3): 50-53.
- [5] MUJBER T S, ZECSI T, HASHMI M S J. Virtual reality applications in manufacturing process simulation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155(1): 1834-1838.
- [6] WASFY T M, WASFY A M, EL-MOUNAYRI H, et al. Virtual training environment for a 3-axis CNC milling machine [C]//ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers & Information in Engineering Conference. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2005: 1111-1120.
- [7] 刘有余, 韩江, 夏链. 椭圆齿轮滚齿加工三维仿真研究[J]. *机械设计*, 2012, 29(5): 50-53.
- [8] 李建刚, 俞春华, 王琳, 等. 基于 VERICUT 非圆齿轮磨齿虚拟加工研究[J]. *机械传动*, 2010, 34(2): 1-3.
- [9] 徐晓俊, 李华忠, 唐德威, 等. 非圆齿轮数控插齿加工程序的计算机辅助设计与仿真技术[J]. *机械传动*, 1996(4): 1-9.
- [10] 吴序堂, 王贵海. 非圆齿轮及非匀速比传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 53-56.
- [11] 李建刚, 周磊, 赵巍, 等. 在三轴插齿机上实现非圆齿轮磨齿运动的方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(11): 1749-1752.
- [12] 赵沁平. 虚拟现实综述[J]. *中国科学*, 2009, 39(1): 42-46.