

螺旋锥齿轮数控磨削3D有限元模型的构建

张小安, 明兴祖

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412008)

摘要: 在对螺旋锥齿轮数学啮合方程进行分析的基础上, 运用 Pro/E 软件强大的实体造型功能, 采用“自底向上”的建模方法, 建立了螺旋锥齿轮的3D实体模型; 并将其导入有限元软件 Ansys 中, 采用20节点六面体单元进行自由网格划分, 构建了螺旋锥齿轮数控磨削3D单齿有限元模型, 为螺旋锥齿轮数控磨削的力热耦合分析奠定了基础。

关键词: 螺旋锥齿轮; 数控磨削; 3D实体模型; 网格划分

中图分类号: TH132.41

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)04-0084-04

Construction of 3D Finite Element Model of NC Grinding of Bevel Gear

Zhang Xiaoan, Ming Xingzu

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: Based on the analysis of meshing equations of bevel gear, uses the strong 3D solid modeling functions of Pro/E software and the top-down modeling method to build 3D solid model of bevel gear. Introduces the solid model in the finite element software Ansys, applies hexahedron element of 20-nodes to the free mesh division, and establishes 3D single tooth finite element model of NC grinding of bevel gear. Lays the foundation for the analysis of thermo-mechanical coupling of NC grinding of bevel gear.

Keywords: bevel gear; NC grinding; 3D model; meshing

0 引言

螺旋锥齿轮是国防、能源、运载、装备制造及交通等领域中重要装备的关键零件, 其精密加工方法广泛采用数控磨削。由于螺旋锥齿轮呈空间形状, 其制造工况十分复杂, 磨削过程中力与热的耦合作用严重影响了磨削质量, 而研究磨削过程中力/热耦合机理, 其基础是需建立螺旋锥齿轮的3D有限元模型。

在金属切削加工3D有限元模型研究方面, Kalhori进行了专门的探讨, 以期形成比较系统的知识模式^[2], Pantale 等对具有断裂效应的金属斜铣削进行了2D和

3D数值模拟^[3], Strenkowski等采用基于Eulerian的正交有限元切削模型与基于Usui的3D切削分析模型相耦合的方法, 提出了3D切削的预测模型^[4], Hamdi等对平面磨削的残余应力进行了有限元模拟^[5], 浙江大学的黄志刚、柯映林等研究了2D金属铣削加工的热力耦合模型及正交切削有限元模拟^[6]。以上研究以简单零件2D加工的数值模拟为主, 可解决车削、2D铣削和平面磨削等简单加工过程中的热力耦合问题, 不能解决具有空间曲面结构的螺旋锥齿轮磨削的复杂问题, 因此, 近年来开展了关于螺旋锥齿轮磨削的热力耦合3D模型建立及耦合作用的研究。

收稿日期: 2010-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975291), 湖南省高等学校科研基金资助项目(07C235)

通信作者: 张小安(1979-), 男, 陕西西安人, 湖南工业大学硕士研究生, 主要研究方向为数字化装备与制造,

E-mail: hsyzhang2000@yahoo.com.cn

1 螺旋锥齿轮的几何模型

1.1 螺旋锥齿轮的数学方程

本文以准双曲面齿轮为研究对象, 其大轮是采用展成法加工的, 设描述大轮切齿过程的坐标系为:

$$\Sigma_r = \{O_r, i_r, j_r, k_r\},$$

描述加工大轮刀盘的坐标系为:

$$\Sigma_{cr} = \{O_{cr}, i_{cr}, j_{cr}, k_{cr}\},$$

则在 Σ_{cr} 坐标系中, 产形面的几何特征矢量可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{cr}^{(cr)} = (\sin i \sin j, -\sin i \sin j, -\cos i), \\ \mathbf{R}_{cr}^{(cr)} = r_{cr} (-\cos i \sin j, \cos i \cos j, -\sin i), \\ \mathbf{t}_{cr}^{(cr)} = (-\sin \phi_r \sin j, -\sin \phi_r \cos j, -\cos \phi_r), \\ \mathbf{n}_{cr}^{(cr)} = (\cos \phi_r \sin j, -\cos \phi_r \cos j, -\sin \phi_r), \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}_{cr}^{(cr)}$ 为与产形面共线的单位矢量;

$\mathbf{R}_{cr}^{(cr)}$ 为刀尖 P 点的径矢;

$\mathbf{t}_{cr}^{(cr)}, \mathbf{n}_{cr}^{(cr)}$ 为产形面在过刀尖 P 点母线上的单位切矢和法矢;

i, j 为加工大轮基本刀倾角和刀倾方向角;

r_{cr} 为刀盘的刀尖半径;

ϕ_r 为过刀尖 P 点的产形母线和摇台轴线的夹角。

在 Σ_r 坐标系中, 大轮齿面上任意接触点 P 的几何特征矢量表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_r^{(r)} = \mathbf{D}_r^{(r)} + \mathbf{A}_{cr}^{(r)} - b_r \mathbf{t}_r^{(r)}, \\ \mathbf{n}_r^{(r)} = \mathbf{M}(\Gamma_m)_{j_r} \mathbf{M}(q_r)_{k_r} \mathbf{M}(\mathbf{u}_{cr}^{(cr)}, \theta_{cr}) \mathbf{M}(-j)_{k_r} \mathbf{M}(i)_{i_r} \mathbf{n}_{cr}^{(cr)}, \\ \mathbf{t}_r^{(r)} = \mathbf{M}(\Gamma_m)_{j_r} \mathbf{M}(q_r)_{k_r} \mathbf{M}(\mathbf{u}_{cr}^{(cr)}, \theta_{cr}) \mathbf{M}(-j)_{k_r} \mathbf{M}(i)_{i_r} \mathbf{t}_{cr}^{(cr)}, \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{D}_r^{(r)} = \mathbf{M}(\Gamma_m)_{j_r} (X_r \mathbf{p}_r - X_{br} \mathbf{k}_r + E_{mr} \mathbf{j}_r), \\ \mathbf{A}_{cr}^{(r)} = \mathbf{M}(\Gamma_m)_{j_r} [\mathbf{S}_r + \mathbf{M}(q_r)_{k_r} \mathbf{M}(\mathbf{u}_{cr}^{(cr)}, \theta_{cr}) \mathbf{M}(-j)_{k_r} \mathbf{M}(i)_{i_r} \mathbf{R}_{cr}^{(cr)}], \end{cases}$$

式中: $\mathbf{R}_r^{(r)}, \mathbf{n}_r^{(r)}, \mathbf{t}_r^{(r)}$ 为大轮齿面上任意接触点 P 的径矢、法矢和切矢;

$\mathbf{D}_r^{(r)}, \mathbf{A}_{cr}^{(r)}$ 为计算矢量;

b_r 为从刀尖沿 \mathbf{t}_r 的反向到瞬时接触点的距离;

$\mathbf{M}(\Gamma_m)_{j_r}$ 为绕单位向量 \mathbf{j}_r 旋转 Γ_m 角的变换矩阵;

$\mathbf{M}(q_r)_{k_r}$ 为绕单位向量 \mathbf{k}_r 旋转 q_r 角的变换矩阵;

$\mathbf{M}(\mathbf{u}_{cr}^{(cr)}, \theta_{cr})$ 为绕矢量 $\mathbf{u}_{cr}^{(cr)}$ 旋转 θ_{cr} 角的变换矩阵;

$\mathbf{M}(-j)_{k_r}$ 为绕单位向量 \mathbf{k}_r 旋转 $-j$ 角的变换矩阵;

$\mathbf{M}(i)_{i_r}$ 为绕单位向量 \mathbf{i}_r 旋转 i 角的变换矩阵;

X_r, X_{br}, E_{mr} 为加工大轮的轴向轮位、床位和垂直轮

位调整值;

\mathbf{p}_r 为大轮轴线上的单位矢量;

θ_{cr} 为 P 点所在刀盘轴截面的相位角;

\mathbf{S}_r 为 O_{cr} 点在切齿坐标系中的径矢。

1.2 螺旋锥齿轮的三维实体建模

螺旋锥齿轮是所有齿轮中结构最为复杂的一类, 本文用 Pro/E 软件对其进行实体建模, 并给出其模型的建立过程。

采用“自底向上”(即点、线、面到体)的实体建模方法, 即通过上面的啮合方程计算出准双曲面齿轮齿面网格点坐标, 创建模型的各个曲面上所有离散关键点; 再将关键点拟合成样条曲线, 然后由曲线蒙皮构成曲面, 由封闭曲面生成单齿实体, 再由单齿模型沿圆周方向旋转复制得到整个齿轮。用这种方法很容易实现齿轮实体模型参数化与自动生成, 即可得到螺旋锥齿轮的大轮实体模型。由于在 Ansys 软件中生成实体模型比较复杂, 本文用 Pro/E 软件生成实体模型后, 导入到有限元 Ansys 软件中, 再构造有限元模型。螺旋锥齿轮大轮的基本参数如表 1 所示。

表 1 螺旋锥齿轮大轮基本参数

Table 1 Basic parameters of spiral bevel gear

项目	齿数	模数	齿顶圆直径/mm	分度圆直径/mm	齿形角/°
参数	30	3.62	108	105	20
项目	节锥角/°	轴交角/°	顶锥角/°	螺旋角/°	根锥角/°
参数	64.98	90	68.49	39.52	60.32

构造螺旋锥齿轮实体模型的步骤如下。

1.2.1 创建基本曲线

单击“新建”, 在对话框中键入文件名, 然后单击“确定”, 创建基准平面“DTM1”; 在基准平面上草绘“曲线1”, 选取“FRONT”面作为草绘平面, “RIGHT”面作为参考平面, 绘制二维草图, 如图 1。

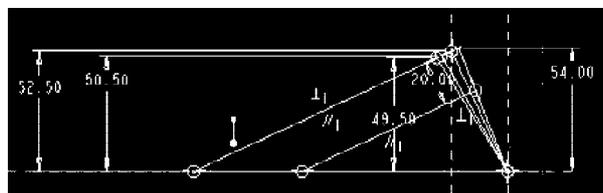


图 1 基本曲线

Fig. 1 Fundamental curve

1.2.2 创建齿轮基本圆

创建基准平面“DTM2”, 然后创建基准点, 在工具栏内单击 , 系统弹出“基准点”对话框, 创建从“PNT0”到“PNT9”共 10 个基准点, 再过这 10 个基准点做圆, 如图 2。

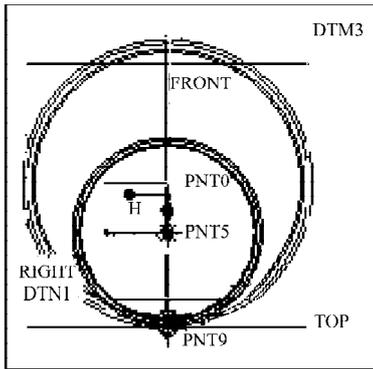


图2 基准圆
Fig. 2 Basic circle

1.2.3 创建齿廓曲线

在工具栏中按 键，创建基准坐标系“CS0”和“CS1”，然后创建坐标轴。在齿轮大端创建渐开线，依次单击“插入”——“模型基准”——“曲线”，系统弹出“曲线选项”管理菜单，从中选择“从方程”——“完成”，单击“笛卡尔”，创建齿廓曲线，如图3~5。

```

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
/* 为笛卡尔坐标系输入参数方程
/* 根据t (将从0变到1) 对x, y和z
/* 例如:对在 x-y平面的一个圆, 中心在原点
/* 半径 = 4, 参数方程将是:
/*      x = 4 * cos ( t * 360 )
/*      y = 4 * sin ( t * 360 )
/*      z = 0
/*
-----
r=76.64
theta=t*60
x=r*cos(theta)+r*sin(theta)*theta*pi/180
y=r*sin(theta)-r*cos(theta)*theta*pi/180
z=0
  
```

图3 小端齿廓曲线方程
Fig. 3 Curvilinear equation of litter tooth outline

```

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
/* 为笛卡尔坐标系输入参数方程
/* 根据t (将从0变到1) 对x, y和z
/* 例如:对在 x-y平面的一个圆, 中心在原点
/* 半径 = 4, 参数方程将是:
/*      x = 4 * cos ( t * 360 )
/*      y = 4 * sin ( t * 360 )
/*      z = 0
/*
-----
r=117.05
theta=t*60
x=r*cos(theta)+r*sin(theta)*theta*pi/180
y=r*sin(theta)-r*cos(theta)*theta*pi/180
z=0
  
```

图4 大端齿廓曲线方程
Fig. 4 Curvilinear equation of big tooth outline

1.2.4 创建齿根及扫描轨迹线

在主菜单栏内单击“插入”——“旋转”命令，弹出旋转操作面板，选取“FRONT”面作为草绘面，“TOP”面作为参考平面，进入草绘环境。草绘好二维草图后，进行旋转形成图6，在已经生成的旋转面上产生扫描轨迹线，做基准平面“DTM6”，在此基准平面上作二

维图形，然后进行投影，得图7。

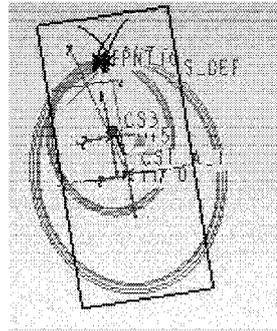


图5 齿廓曲线
Fig. 5 Tooth outline of curve

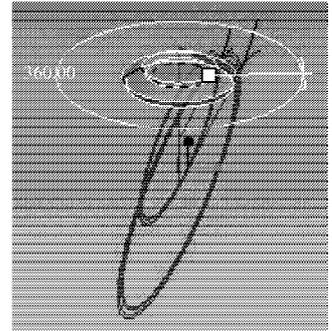


图6 创建齿根
Fig. 6 Creating root of tooth

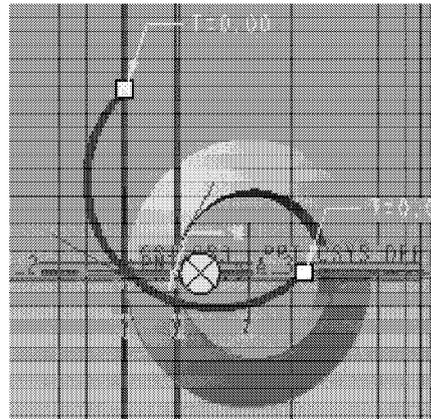


图7 创建扫描轨迹线
Fig. 7 Creating sweep trace

1.2.5 创建扫描混合截面和齿轮

在已经生成的扫描轨迹线两端，分别做螺旋锥齿轮的大端面和小端面，进入到草绘，参照前面所做的齿顶圆和齿根圆分别进行创建端面，如图8。用同样的方法可以产生螺旋锥齿轮小端面，完成大小端面的造型后，就可以沿着扫描轨迹线进行扫描，创建第一个单齿，如图9所示。完成第一个单齿的创建后，进行阵列就可以得到全齿，如图10。

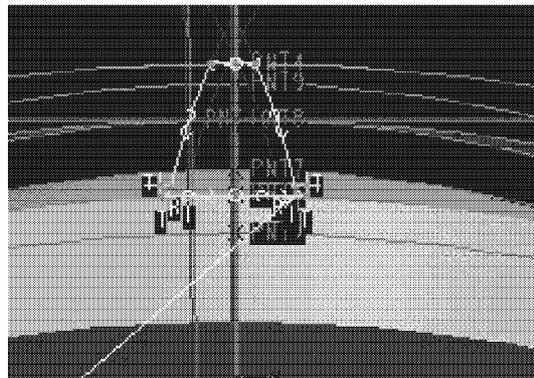


图8 创建齿轮大端面
Fig. 8 Creating gear large cross-section

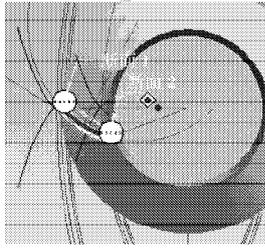


图9 创建第一个单齿
Fig. 9 Creating single-tooth gear

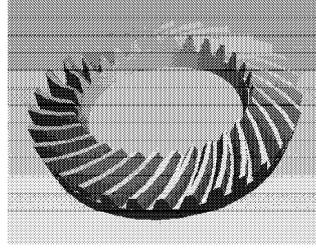


图10 螺旋锥齿轮实体模型
Fig. 10 Model of spiral bevel gear

2 螺旋锥齿轮磨削有限元模型的建立

螺旋锥齿轮磨削磨齿采用间歇分度加工法, 可以认为每个轮齿的磨削温度分布基本相同, 因此, 在进行磨削有限元分析模型的建立时, 可以考虑采用单齿3D模型。

采用通用有限元软件 Ansys 来建立螺旋锥齿轮的有限元3D模型。有限元软件 Ansys 自身带有建模的功能, 对简单的模型可以方便地进行建模, 但是对于螺旋锥齿轮这种比较复杂的模型, 在有限元软件中进行建模是非常麻烦, 甚至是不可以完成的。所以本文先运用建模能力比较强大的 CAD 软件进行建模, 然后将建好的模型通过与有限元软件的接口导入到 Ansys 软件中, 如图 11 所示。导入到软件中后, 截取 1 个单齿进行分析。建立有限元模型的关键技术是网格划分。由于六面体单元划分得到的网格要比四面体单元的整齐、规则, 更方便随后进行的加载、分析计算及后续处理, 且计算精度要高, 因此本文采用 8 节点六面体等参元的有限元单元。针对不同要求, 可采取不同的网格划分方法, 如自由网格划分和映射网格划分等。本文采用适应曲线边界建模的 20 节点六面体单元 Brick 20 nodes, 该单元能够用于不规则形状, 而且在计算精度上不会有任何损失, 故本文采用自由网格划分方法。考虑材料的弹性模量为 220 MPa, 泊松比为 0.3, 密度为 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 在自由网格划分前, 先对网格密度大小进行设置, 自由网格划分后得到的网格密度较大, 因此计算精度会高一些, 得到的单齿 3D 有限元模型如图 12 所示。

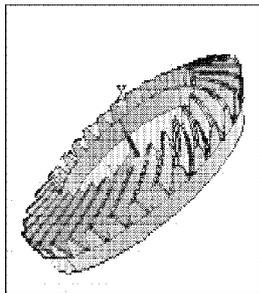


图11 Ansys 中模型
Fig. 11 Model in ansys

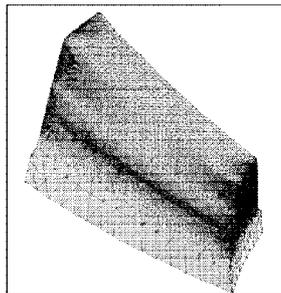


图12 划分网格
Fig. 12 Meshing Grid

3 结语

本文根据螺旋锥齿轮的啮合数学方程, 介绍了 Pro/E 环境下“自底向上”实体建模的方法及步骤, 同时将建好的实体模型导入到有限元软件 Ansys 中, 并采用 20 节点六面体单元进行自由网格划分, 得到螺旋锥齿轮单齿 3D 有限元模型。该模型为螺旋锥齿轮数控磨削过程中进行力热耦合分析, 即温度场、应力应变场的分析提供了基础。

参考文献:

- [1] 明兴祖, 严宏志, 陈书涵. 螺旋锥齿轮啮合热特性分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 161-166.
Ming Xingzu, Yan Hongzhi, Chen Shuhan. Analysis of Thermal Aspects for Bevel Gear Meshing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38 (11) : 161-166.
- [2] 胡韦华, 王秋成, 胡晓冬, 等. 切削加工过程数值模拟的研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(增1): 194-198.
Hu Weihua, Wang Qiucheng, Hu Xiaodong, et al. Numerical Simulation of Cutting Process: An Overview[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37 (S1): 194-198.
- [3] Pantali O, Bacaria J L, Dalverny O, et al. 2D and 3D Numerical Models of Metal Cutting with Damageeffects[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2004, 193(4): 4383-4399.
- [4] Strenkowski J S, Shih A J, Lin J C. An Analyticalfinite Element Model for Predicting Three-Dimensional Tool Forces and Chip Flow[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42: 723-731.
- [5] Hamdi H, Zahouani H, Bergheau J M. Residual Stresses Computation in A Grinding Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 147: 277-285.
- [6] 黄志刚, 柯映林, 王立涛. 金属切削加工的热力耦合模型及有限元模拟研究[J]. 航空学报, 2004, 25(3): 317-320.
Huang Zhigang, Ke Yinglin, Wang Litao. Coupled Thermo-Mechanical Model for Metal Orthogonal Cuting Process and Finite Element Simulation[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2004, 25(3): 317-320.
- [7] 邓凡平. ANSYS 10.0 有限元分析自学手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
Deng Fanping. Self-Stduy Manual of ANSYS 10.0 Finite Element Analysis[M]. Beijing: Peoples Posts and Telecom Press, 2007.
- [8] 王 宵. Pro/E 典型机械零件设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
Wang Xiao. Handbook of Pro/E Typical Mechanical Parts Design [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.

(责任编辑: 李玉珍)