

DOI: 10.3901/JME.2015.07.077

基于非特征分块插值技术的准双曲面齿轮 数字化真实齿面建模方法*

李 刚 汪中厚 耿 直 朱文敏
(上海理工大学机械工程学院 上海 200093)

摘要: 针对含磨损情况的准双曲面齿轮真实齿面数字化模型构造问题, 提出基于非特征分块插值技术的准双曲面齿轮数字化齿面构造方法。基于非特征的离散数据分块技术对三坐标测量仪测量获得的真实齿面离散数据进行分块, 判断出的齿面磨损区域。再结合插值改进算法对齿面磨损区域进行局部插值。对传统离散数据点光顺算法进行改进, 提高插值构造齿面的光顺性。通过实例比较, 本方法不仅减少插值算法计算量, 提高齿面插值数据点的精度, 改善数字化齿面的光顺性。为含磨损情况的准双曲面齿轮动态性能预测打下基础。

关键词: 准双曲面齿轮; 齿面磨损; 基于非特征的数据分块; 插值算法

中图分类号: TH132

Modeling Approach of Digital Real Tooth Surfaces of Hypoid Gears Based on Non-geometric-feature Segmentation and Interpolation Algorithm

LI Gang WANG Zhonghou GENG Zhi ZHU Wenmin

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

Abstract: A modeling approach of digital real tooth surfaces of hypoid gears based on non-geometric-feature segmentation and interpolation algorithm aiming at hypoid gears with wear of tooth surfaces is proposed. Above of all, the discrete data of real tooth surfaces, which are measured by 3D coordinate-measure-machine, is segmented by segmentation based non-geometric-feature. The wear areas of tooth surfaces are identified. In addition, a revised interpolation algorithm is applied to interpolation partial tooth surfaces. Finally, on the basis of traditional fairing algorithm for scattered point data, the revised fairing algorithm is proposed. By comparing the instance, this method not only reduces the amount of interpolation algorithm calculation, but also improves the accuracy of interpolation data points, and improved the smoothness of digital gear tooth surfaces. The digitization construction of real tooth surfaces of hypoid gears with wear lays the foundation for its dynamic performance prediction.

Key words: hypoid gears; wear of tooth surface; segmentation based on non-geometric-feature; interpolation algorithm

0 前言

准双曲面齿轮广泛应用于航空、汽车等领域, 齿面啮合性能作为预测其动态性能的重要指标, 直接影响到传动系统的整体性能。在准双曲面齿轮实际使用过程中, 由于齿轮加工误差、安装误差及工作润滑状态不佳等因素的影响, 轮齿接触表面会产生摩擦损耗现象。为了准确预测含磨损情况的准双

曲面齿轮的动态性能及使用寿命, 需要解决的首要问题是实现准双曲面齿轮数字化真实齿面构建。

复杂曲面重建是数字化真实齿面构建中研究最多的关键技术之一, 国内外学者进行了大量的研究, KONNO 等^[1]提出了在 NURBS 曲线网上覆盖 G^1 连续的 Gregory 曲面的方法。基于盈亏修正的思想, 蔺宏伟等^[2]提出迭代非均匀 B-spline 曲线曲面的算法; 孙殿柱等^[3]提出一种由三角网格曲面构造 G^1 连续五次三角 Bézier 曲面算法; 贾明等^[4]提出了两种基于矩形拓扑区域的曲面局部协调设计方法, 实现对跨多张曲面的局部矩形拓扑裁剪区域的重新

* 国家自然科学基金资助项目(51075279)。20140409 收到初稿, 20141210 收到修改稿

设计。

国内外对准双曲面齿轮数字化齿面构建方法的研究主要分为两类,一类是利用曲面插值算法构造插值曲面,此方法精度较高,能够反映齿面测量点信息,但为提高曲面光顺性需多次运用筛选光顺算法,使得计算过程较为繁琐。比较有代表性的是文献[5],采用的插值方式为一次线性插值;文献[6-8]对准双曲面齿轮数字化插值齿面构建方法进行了改进,将线性插值法与面积权重插值方法相结合,对测量区域之外的齿面数据点进行预估,该插补方法对于有限数据点情况下的真实齿面构建具有较好精度。第二类是利用拟合曲线对离散数据点进行逼近,此方法不要求全部数据点都落在构造曲面上,比插值曲面精度低,但拟合曲面光顺性较好。国内学者孙殿柱等^[9-10]针对渐开线齿轮齿面提出了采用参数化 Bézier 自由型曲线曲面理论及研究;方宗德等^[11]研究了基于 NURBS 曲面的弧齿锥齿轮真实齿面的仿真,将齿面通过扫描以 5×9 点离散方阵方式并用双三次 NURBS 曲面拟合。但由于齿面测量数据点有限,上述方法使用范围主要为经过磨削加工的光滑齿面,对于含齿面磨损等不规则情况的齿面上应用时,由于大多数测量数据点脱离构造齿面,使得构造齿面不能反映真实齿面情况。在上述离散数据预处理技术中数据区域分割是数字化真实齿面构建过程中的瓶颈问题。

本文在原有研究基础上^[5-8],针对含磨损情况的准双曲面齿轮数字化真实齿面构建问题,提出基于非特征的齿面离散数据分块技术,并结合齿面插值算法,基于 NURBS 曲面实现准双曲面齿轮数字化真实齿面构建。同时,为了保证精度的前提下,提高数字化齿面的光顺性,本文对传统光顺算法进行改进。通过实例分析对比,验证了本文提出方法的可行性。

1 准双曲面齿轮真实齿面模型

1.1 准双曲面齿轮理论齿面模型

为方便之后真实齿面模型的建立,在此首先建立理论齿面模型。在齿轮坐标系 S_g 中,齿轮理论齿面模型表示为

$$\mathbf{r}_g(u, \theta), \quad \mathbf{n}_g(u, \theta) \quad (1)$$

式中, \mathbf{r}_g 和 \mathbf{n}_g 分别为齿轮理论齿面的位置矢量和单位法向矢量; u 和 θ 为刀具坐标系参数,如图 1 所示。

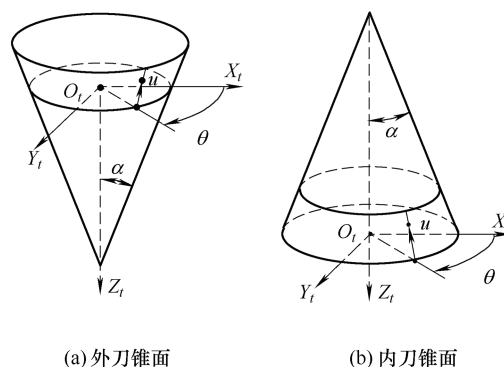


图 1 刀具示意图

齿轮理论齿面 Σ_g 是由刀具切削刃轨迹面 Σ_t 包络形成的,因此理论齿面模型可以表示为

$$\mathbf{r}_g = \mathbf{M}_{gt} \mathbf{r}_t(u_t, \theta_t) \quad f(u_t, \theta_t, \phi) = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{n}_g = \mathbf{L}_{gt} \mathbf{n}_t(u_t, \theta_t) \quad f(u_t, \theta_t, \phi) = 0 \quad (3)$$

式中, \mathbf{M}_{gt} 、 \mathbf{L}_{gt} 分别为矢量 \mathbf{r}_g 和 \mathbf{n}_g 从齿轮坐标系 S_g 到刀具坐标系 S_t 的转换矩阵; \mathbf{r}_t 和 \mathbf{n}_t 分别为刀具切削刃轨迹面位置矢量和单位法向矢量; u_t 和 θ_t 为刀具坐标系参数; ϕ 为齿轮转角

$$f(u_t, \theta_t, \phi) = \mathbf{N}_t \cdot \mathbf{V}_{tg} = 0 \quad (4)$$

式中, \mathbf{N}_t 为齿轮理论齿面 Σ_g 与刀具切削刃轨迹面 Σ_t 接触点的公法线矢量; \mathbf{V}_{tg} 为接触点在刀具切削刃轨迹面 Σ_t 与齿轮理论齿面 Σ_g 相对速度。

齿轮坐标系 S_g 与三坐标测量仪安装坐标系 S_m 的相对位置关系如图 2 所示, l 为齿轮坐标系 S_g 与测量坐标系 S_m 之间距离; δ 为齿轮坐标系 S_g 在测量坐标系 S_m 中的安装夹角。

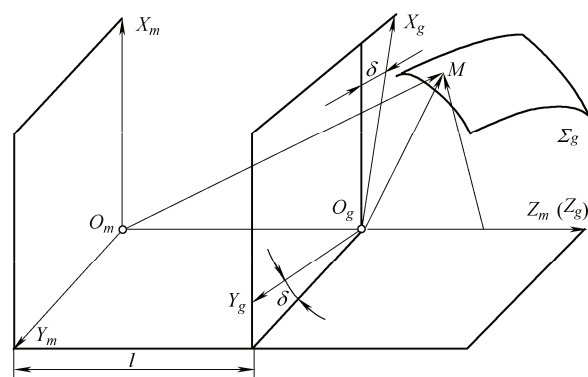


图 2 测量坐标系与齿轮坐标系位置关系

理论齿轮模型在测量坐标系 S_m 中表示为

$$\mathbf{r}_m = \mathbf{M}_{mg} \mathbf{r}_g \quad (5)$$

式中, \mathbf{M}_{mg} 为齿轮坐标系 S_g 到测量坐标系 S_m 坐标转换矩阵。

1.2 基于三坐标测量的准双曲面齿轮真实齿面模型
在齿轮实际使用过程中,产生的磨损现象可以

认为是齿形误差。为方便数字化真实齿面的构建, 本文在此建立准双曲面齿轮真实齿面数学模型。

在测量坐标系 S_m 中, 测量测头中心在理论齿面 Σ_g 上的位置矢量表示为

$$\mathbf{R}_m = \mathbf{r}_m(u, \theta) + \rho \mathbf{n}_m(u, \theta) \quad (6)$$

式中, \mathbf{r}_m 、 \mathbf{n}_m 分别为理论齿面上点在测量坐标系 S_m 中的位置矢量和法向矢量; ρ 为测头半径。

在测量坐标系 S_m 中, 测量测头中心在真实齿面 Σ_r 上的位置矢量表示为

$$\mathbf{R}_m^* = \mathbf{r}_m(u, \theta) + \lambda \mathbf{n}_m(u, \theta) \quad (7)$$

式中, λ 为测量测头中心实际位置与理论齿面 Σ_g 之间的偏移量。

2 基于非特征分块的真实齿面重构技术

NURBS 曲面作为 STEP 标准中定义产品数据模型的唯一表示标准, 在真实齿面仿真方面得到了较好的应用。但在目前利用 NURBS 曲面进行真实齿面重构过程中, 由于测量数据点数量有限, 为保证重构齿面的光顺性, 使得重构齿面在非网格节点位置精度较难控制。本文针对该问题, 提出在将齿面离散数据进行非特征分块的基础上, 结合齿面插值算法对未测量区域齿面情况进行预估, 实现数字化真实齿面的构建, 最大程度上保证重构齿面的精度。

2.1 基于 NURBS 曲面的齿面模型

NUBRS 曲面是基于 NURBS 曲线的张量积形式, 则双三次 NURBS 曲面可以表达成^[11-13]

$$P(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{i,k}(u) B_{j,k}(v) \omega_{ij} V_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{i,k}(u) B_{j,k}(v) \omega_{ij}} \quad (8)$$

$$u, v \in [0, 1]$$

式中, m 、 n 分别为 u 向、 v 向为控制顶点个数; V_{ij} 为曲面的控制顶点; ω_{ij} 为 V_{ij} 的权因子; $B_{i,k}$ 、 $B_{j,k}$ 分别为沿 u 向、 v 向的 k 次 B 样条基函数。

其中, 基函数递推公式为

$$\begin{cases} B_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ B_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} B_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} B_{i+1,k-1}(u) & k \geq 1 \\ \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

2.2 离散数据的 Delaunay 三角剖分

本文采用扫描式测量方法获得齿面离散点数据, 由于齿面离散数据点之间拓扑关系复杂, 为了能够更加直观地描述真实齿面情况, 本文借助 Delaunay 三角剖分原理^[14]对离散数据点进行处理。

传统的 Delaunay 三角剖分方法往往将三维离散数据点投影到二维平面上, 再对投影点进行三角剖分, 但此方法剖分得到的三角形域无法真实反映其空间角度, 从而影响剖分质量。本文在此基础上提出了直接对三维离散数据点进行三角剖分的方法。

记扫描线 ℓ_i , $i=1, 2, \dots, n$, 扫描线上测量点数量为 t , 其中相邻两条扫描线 ℓ_k 、 ℓ_{k+1} , $1 \leq k < k+1 \leq n$ 。两条扫描线上个测量点为 $\ell_k(j)$, $j=1, 2, \dots, t$; $\ell_{k+1}(l)$, $l=1, 2, \dots, t$ 。

如图 3 所示, 连接两条扫描线的起始点 $\ell_k(1)$ 和 $\ell_{k+1}(1)$, 终止点 $\ell_k(t)$ 和 $\ell_{k+1}(t)$ 。并依次在 ℓ_k 和 ℓ_{k+1} 上各测量点查找另一条扫描线上距离最近的测量点, 并连接。此时, 扫描线 ℓ_k 和 ℓ_{k+1} 之间区域被分成 r ($r \geq t-1$) 个空间区域, 将三角形及空间四边形区域检索出来。

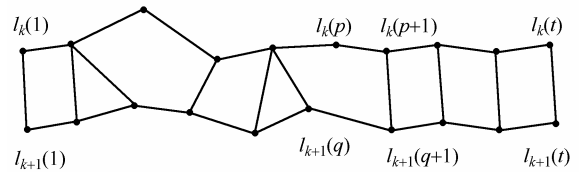


图 3 相邻齿面扫描线间初步 Delaunay 三角剖分

对于空间四边形区域, 本文采用最小内角最大准则^[14]进行剖分, 以完成齿面离散数据点的 Delaunay 三角剖分, 如图 4 所示。

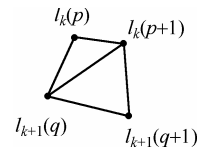


图 4 多边形区域三角剖分

2.3 基于非特征的离散数据分块技术

在数字化真实齿面的构建过程中, 为了能够快速准确地描述齿面磨损情况, 需要对齿面离散数据点进行分块, 判断齿面磨损区域, 并利用局部插值算法准确描述磨损区域, 以减少齿面插值计算量。传统数据分块方法往往基于零件的规则几何特征, 对于描述真实齿面情况的自由曲面而言并不适用。本文提出基于非特征的离散数据分块技术, 准确识别齿面磨损区域。

设数字化拟合齿面 Σ 上任意三角形作为中心三角形 CenTri, 其法向矢量为 \mathbf{n} , 与其相邻三角形 NeiTri(i) 法向矢量为 \mathbf{n}_i , $i=1,2,3$ 。中心三角形 CenTri 与相邻三角形 NeiTri(i) 夹角为 δ_i 。遍历全部中心三角形, 按式(10)计算各中心三角形 T 值, 选取 T 值最小的中心三角形记为起始三角形 StaTri, 如图 5 所示。

$$T = \max(|\delta_1 - \delta_2|, |\delta_2 - \delta_3|, |\delta_1 - \delta_3|) - \min(|\delta_1 - \delta_2|, |\delta_2 - \delta_3|, |\delta_1 - \delta_3|) \quad (10)$$

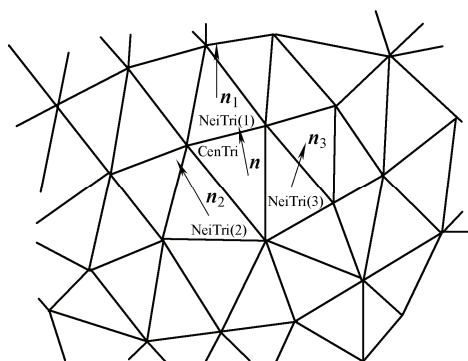


图 5 中心三角形 CenTri 在齿面网格中的位置

将与起始三角形 StaTri 法向矢量夹角最小的相邻三角形 NeiTri(i) 作为中心三角形 CenTri, 若能满足式(10), 则将除起始三角形 StaTri 之外, 与中心三角形 CenTri 法向矢量夹角最小的相邻三角形 NeiTri(i) 作为中心三角形 CenTri; 否则, 重新选取起始三角形 StaTri, 基于非特征离散数据分块过程见图 6。

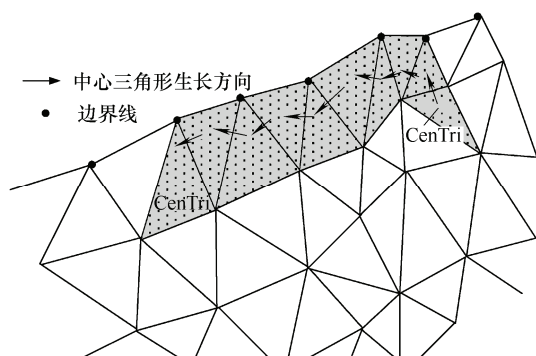


图 6 基于非特征离散数据分块过程

2.4 数字化齿面局部插值改进算法

传统 NURBS 曲面插值算法是通过先曲线插值, 再对曲线进行光顺, 此方法的缺陷是为保证曲面的光顺性而改变 NURBS 曲面控制顶点, “忽略”部分测量点, 这种仅改变控制顶点的差值方法在构建含齿面磨损情况的真实齿面时精度难以保证, 局限性较大。

本文在文献[6]提出的基于面积权重法的齿面插补算法的基础上进行改进, 考虑对构造误差的补

偿, 并结合基于非特征的离散数据分块技术, 提出了 NURBS 曲面局部插值改进算法。在测量数据点有限的情况下, 如何确定插补位置处的齿面数据以及确定对应控制顶点处权因子调整量, 是该插值算法的两大难点。

根据基于非特征的离散数据分块技术, 将未能满足式(10)的齿面网格区域提取出来, 作为插值对象。

通过三角区域数值插补算法, 获得齿面非测量区域内的齿面数据, 并以此作为插值曲线 $P'(u)$ 的控制顶点 V_i , 相应的权因子 ω_i , 是构造曲线 $P'(u)$ 插值于所有经过插补算法得到的离散数据点, 控制顶点 V_i 与通过调整插值曲线 $P'(u)$ 型值点之间偏差为 ΔE_i , 如图 7 所示。

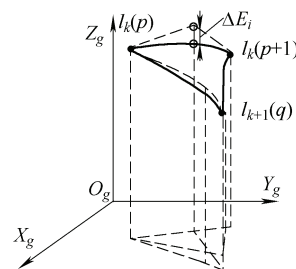


图 7 齿面插值改进算法

$$\sum B_{i,k}(u_j)(\omega_i + \Delta\omega_i)\Delta V_i + \sum B_{i,k}(u_j)\Delta\omega_i(B_i - V_i) = \sum B_{i,k}(u_j)\omega_i(V_i - V(u_j)) \quad (11)$$

式中, V_i 为曲线的控制顶点; ΔV_i 为曲线的控制顶点改变量; ω_i 为 V_i 的权因子; $\Delta\omega_i$ 为 V_i 的权因子改变量; $B_{i,k}$ 为沿 u 向的 k 次 B 样条基函数。

为实现对 NURBS 曲面构造误差 ΔE_i 的补偿, 使插值曲线通过插补数据点, 需要对控制顶点位置进行调整, 将式(12)应用于三次 NURBS 曲面插值算法, 针对控制顶点调整量($\Delta\omega_i = 0$)求解公式为

$$\begin{pmatrix} b_{1,2} & b_{1,3} & 0 & & & 0 \\ b_{2,2} & b_{2,3} & b_{2,4} & & & 0 \\ & & & \ddots & & \\ & & & b_{j,j-1} & b_{j,j} & b_{j,j+1} \\ \vdots & & & & \ddots & \\ & & & & & b_{n-1,n-1} & b_{n-1,n} & b_{n-1,n+1} \\ 0 & & & & & & b_{n,n} & b_{n,n+1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \vdots \\ \Delta V_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \Delta E_1 \\ a_2 \Delta E_2 \\ \vdots \\ a_n \Delta E_n \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中, $a_j = \sum B_{i,3}(u_j)\omega_i$; $b_{j,i} = \sum B_{i,3}(u_j)\omega_i$ 。

针对控制顶点对应的权因子调整量($\Delta V_i = 0$)

求解公式为

$$\begin{pmatrix} J_{1,2} & J_{1,3} & 0 & & & 0 \\ J_{2,2} & J_{2,3} & J_{2,4} & & & 0 \\ & & & \ddots & & \\ & & & & J_{j,j-1} & J_{j,j} & J_{j,j+1} \\ \vdots & & & & & & \ddots & \vdots \\ & & & & & & & J_{n-1,n-1} & J_{n-1,n} & J_{n-1,n+1} \\ 0 & & & & & & & J_{n,n} & J_{n,n+1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta\omega_2 \\ \Delta\omega_3 \\ \vdots \\ \Delta\omega_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum N_{i,3}(u_1)\omega_1\Delta E_1 \\ \sum N_{i,3}(u_2)\omega_2\Delta E_2 \\ \vdots \\ \sum N_{i,3}(u_n)\omega_n\Delta E_n \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中, $J_{j,i} = \Gamma_i \cdot B_{i,3}(u_j)\Delta E_i$; Γ_i 为 $V_i - V(u_i)$ 的切向矢量; $N_{i,3}$ 为法向矢量。

3 数字化齿面离散数据点光顺算法

传统离散数据光顺算法是基于插值曲线的曲率计算, 删除“噪音点”以达到曲面光顺的目的。这种方法无法保证齿面磨损区域离散数据点的保留性。针对这一问题, 本文在传统光顺算法的基础上加以改进, 在保留离散数据点的前提下, 提高曲面的光顺性。

控制顶点 V_i 对应型值点 $P(u_i)$ 的曲率^[13]

$$\kappa(u_i) = \frac{\|\dot{P}(u_i) \times \ddot{P}(u_i)\|}{\|\dot{P}(u_i)\|^3} \quad (14)$$

式中, $\dot{P}(u_i)$ 为 $P(u_i)$ 对 u_i 的一阶导数; $\ddot{P}(u_i)$ 为 $P(u_i)$ 对 u_i 的二阶导数。

利用式(14)求解个控制顶点所对应型值点的曲率, 通过型值点的曲率差变化对“噪音点”进行判断。若控制点 V_i 对应型值点 $P(u_i)$ 曲率满足式(15), 则判断其为“噪音点”。

$$\begin{cases} \Delta\kappa(u_{i-1}) \cdot \Delta\kappa(u_i) < 0 \\ \Delta\kappa(u_i) \cdot \Delta\kappa(u_{i+1}) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\Delta\kappa(u_i) = \kappa(u_i) - \kappa(u_{i-1})$ 。

判断得到“噪音点”后, 为达到在保留“噪音点”的前提下, 并实现离散数据平滑的目的, 本文进行了“噪音点”移动算法的研究。记控制点 V_j 为判断出的“噪音点”, V_j 对应的节点矢量为 t_j , 满

足平滑条件的新控制顶点 V'_j 为

$$V'_j = \frac{(t_{j+2} - t_j)l_j + (t_j - t_{j-2})h_j}{t_{j+2} - t_{j-2}} \quad (16)$$

$$l_j = \frac{(t_{j+1} - t_{j-3})V_{j-1} + (t_{j+1} - t_j)V_{j-2}}{t_j - t_{j-3}}$$

$$h_j = \frac{(t_{j+3} - t_{j-1})V_{j+1} - (t_j - t_{j-1})V_{j+2}}{t_{j+3} - t_j}$$

利用式(16)可以对齿面离散数据点进行平滑, 并与前文局部插值方法相结合, 可大大提高齿面构建效果。

4 实例比较

以某对准双曲面齿轮为例, 齿轮几何参数和加工机床设定参数分别如表 1、2 所示, 根据相关加工机床设定参数完成齿轮加工, 将按照表 1、表 2 加工出的齿轮, 安装在后桥试验机上进行加载试验, 小轮输入速度为 4 000 r/min, 输入扭矩为 160 N·m,

表 1 齿轮的几何参数

参数	小轮	大轮
齿数	6	37
模数/mm	8.243	—
旋向	左旋	右旋
轴交角/(°)	90	
小轮偏置距/mm	31.75	
齿宽/mm	45.12	40
节锥角	11°43'	77°58'
面锥角	16°3'	78°26'
根锥角	11°15'	73°31'
节锥顶至相错点距离/mm	0.71	1.40
顶锥顶至相错点距离/mm	-3.14	1.40
根锥顶至相错点距离/mm	-7.59	1.39
外锥距/mm	155.35	155.92
大端直径/mm	84.07	305.52
节径/mm	304.99	

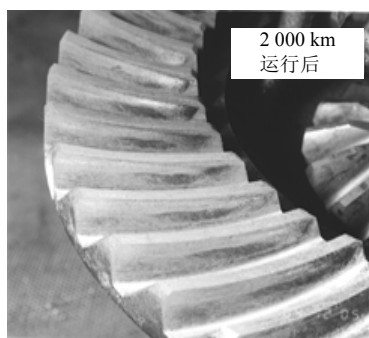
表 2 小轮加工机床调整参数

参数	凹面	凸面
刀盘直径/cm	22.7	22.2
刀齿齿廓角/(°)	14	35
齿坯安装角	-3°	-4°5'
机床中心至工件安装基准面距离/mm	5.26	10.57
床位/mm	22.60	37.56
齿坯偏置距/mm	25.51	44.64
刀盘安装偏心角	55°53'	68°4'
刀转角	269°33'	292°21'
刀盘主轴转角	49°24'	54°56'
滚比	0.680 2	0.830 1

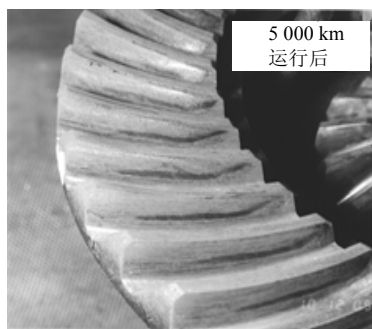
分别运行 2 000 km 和 5 000 km。在试验过程中,为了更好地反映齿面磨损情况,在润滑油中加入一些研磨粉,人为使齿面产生磨损,得到齿面磨损情况结果,如图 8 所示(在试验中,在试验齿轮的 1.3 L 润滑油中加入了 150 mg 的研磨粉)。



(a) 试验前的轮齿



(b) 运行 2 000 km 后齿面磨损情况



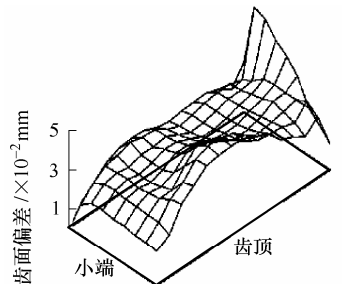
(c) 运行 5 000 km 后齿面磨损情况

图 8 试验大轮齿面磨损情况

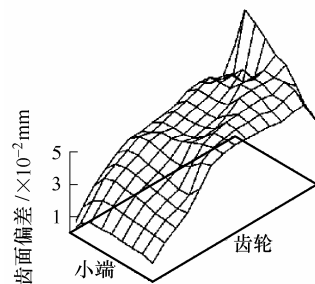
本文使用 Hyb-35 型准双曲面齿轮齿面测量仪进行扫描式测量^[15],其测量过程如图 9 所示。基于文献[6]所提出的插值算法构造齿面结果如图 10 所示;本研究方法构造齿面结果如图 11 所示。通过试验测试结果与数字化构造齿面的比较,在齿面磨损区域最大齿面误差值方面,本文所提出的方法具有更高的精度,具体比较数据见表 3、4。由此可见,本文所提出的基于非特征分块插值技术准双曲面齿轮数字化齿面构建方法具有较高的准确度。



图 9 试验后齿轮测量过程

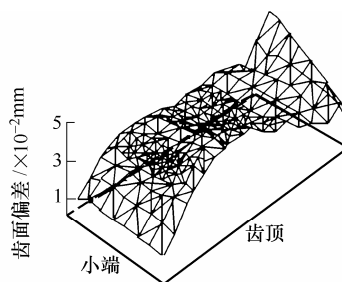


(a) 运行 2 000 km 后磨损齿面构造情况
(最大值 0.057 mm)

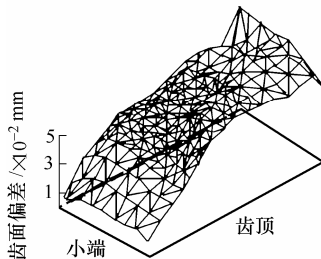


(b) 运行 5 000 km 后磨损齿面构造情况
(最大值 0.082 mm)

图 10 基于面积权重插值法的构造齿面(大轮)



(a) 运行 2 000 km 后磨损齿面构造情况
(最大值 0.064 mm)



(b) 运行 5 000 km 后磨损齿面构造情况
(最大值 0.101 mm)

图 11 基于非特征分块插值技术的构造齿面(大轮)

以准双曲面齿轮真实齿面 Σ_r 上的数据点为依据，分别将通过基于面积权重插值法及通过本文方法构造的数字化齿面模型与真实齿面 Σ_r 上的数据点进行对比。在对数字化齿面模型进行误差分析时，针对本文研究内容，重点对齿面磨损区域数据测量点进行数据校验。根据齿面磨损试验结果，确定数据校验区域如图 12 所示。

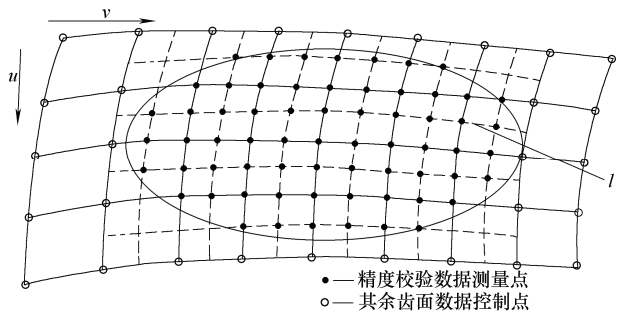


图 12 数字化齿面精度校验测量点

表 3 基于面积权重插值法的构造齿面(大轮)精度比较结果

	真实齿面 $x'_i, y'_i, z'_i/\text{mm}$	基于面积权重插值法的构造齿面 $x_i, y_i, z_i/\text{mm}$	绝对误差 $\Delta e/\mu\text{m}$
1	63.380 7, -26.262 2, 171.245 5	63.380 7, -26.262 2, 171.245 5	0.245
2	61.442 8, -21.359 7, 166.588 2	61.442 8, -21.359 7, 166.588 2	4.051
3	59.473 7, -16.686 6, 161.713 1	59.473 7, -16.686 6, 161.713 0	15.553
4	57.474 3, -12.252 9, 156.629 7	57.474 3, -12.252 9, 156.629 7	21.798
5	55.445 5, -8.069 0, 151.349 6	55.445 5, -8.069 0, 151.349 6	17.128
6	53.388 1, -4.144 3, 145.884 0	53.388 1, -4.144 3, 145.884 0	11.975
7	51.303 1, -0.488 0, 140.244 8	51.303 1, -0.488 0, 140.244 8	10.240
8	49.191 5, 2.891 3, 134.444 5	49.191 5, 2.891 3, 134.444 5	9.986
9	47.054 2, 5.985 3, 128.496 1	47.054 2, 5.985 3, 128.496 1	5.383
10	44.892 2, 8.786 6, 122.412 8	44.892 2, 8.786 6, 122.412 8	3.437
11	41.050 0, 6.085 3, 124.185 5	41.049 9, 6.085 3, 124.185 5	1.375

表 4 基于非特征分块插值法的构造齿面(大轮)精度比较结果

	真实齿面 $x'_i, y'_i, z'_i/\text{mm}$	基于非特征分块插值法的构造齿面 $x_i, y_i, z_i/\text{mm}$	绝对误差 $\Delta e/\mu\text{m}$
1	63.380 7, -26.262 2, 171.245 5	63.380 7, -26.262 2, 171.245 5	0.224
2	61.442 8, -21.359 7, 166.588 2	61.442 8, -21.359 7, 166.588 2	0.539
3	59.473 7, -16.686 6, 161.713 1	59.473 7, -16.686 6, 161.713 1	3.146
4	57.474 3, -12.252 9, 156.629 7	57.474 3, -12.252 9, 156.629 7	3.265
5	55.445 5, -8.069 0, 151.349 6	55.445 5, -8.069 0, 151.349 6	3.176
6	53.388 1, -4.144 3, 145.884 0	53.388 1, -4.144 3, 145.884 0	2.550
7	51.303 1, -0.488 0, 140.244 8	51.303 1, -0.488 0, 140.244 8	3.544
8	49.191 5, 2.891 3, 134.444 5	49.191 5, 2.891 3, 134.444 5	3.164
9	47.054 2, 5.985 3, 128.496 1	47.054 2, 5.985 3, 128.496 1	2.538
10	44.892 2, 8.786 6, 122.412 8	44.892 2, 8.786 6, 122.412 8	2.335
11	41.050 0, 6.085 3, 124.185 5	41.045 0, 6.085 3, 124.185 5	0.860

5 结论

(1) 提出基于非特征的离散齿面数据分块技术，实现齿面磨损区域判断，减少齿面插值算法计算量，提高数字化齿面构建效率。

数字构造化齿面上校验区域内一点 p_i 的位置矢量模为 $r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$ 。根据式(7)，真实齿面 Σ_r 上对应点 p'_i 的位置矢量模为 $r_{mi}^* = \sqrt{x_i'^2 + y_i'^2 + z_i'^2}$ ，则构造齿面上一点 p_i 与真实齿面上对应点 p'_i 处的位置矢量模绝对误差为 $\Delta e = |r_{mi}^* - r_i|$ 。

由于篇幅有限，本文仅列举在运行 5 000 km 后磨损齿面图 12 中绝对误差 Δe 最大的扫描测量线 ℓ 位置处的数据，如表 3、表 4 所示。

通过表 3、表 4 数据可以看出，在齿面磨损测量区域内，基于面积权重插值法的数字化构造齿面上校验点的精度低于 20 μm ，而利用本文提出的基于非特征分块插值方法构建的数字化齿面校验点位置处的精度低于 3.6 μm 。由此可见，本文所提出方法提高了磨损区域真实齿面构造精度。

(2) 对齿面插值算法进行改进，在计算构造齿面控制顶点改变量及权因子调整量的同时，考虑对构造误差 ΔE_i 补偿，尽可能地保留被测齿面数据，同时在测量数据点有限的情况下，该算法能对未测区域齿面数据进行预估，提高数字化齿面构造精度。

(3) 在构造齿面光顺性处理方面，在传统“噪

音点”算法的基础上,提出“噪音点”移动光顺算法。该方法的优点是,与齿面插值改进算法相结合在最大程度的保留了磨损区域实际齿面数据前提下,提高了构造齿面光顺性。

参 考 文 献

- [1] KONNO K, TOKUYAMA Y, CHIYOKURA H. G1 connection around complicated curve meshes using C1 NURBS boundary gregory patches[J]. Computer-Aided Design, 2001, 33(4): 293-306.
- [2] 蔺宏伟, 王国瑾, 董辰世. 用迭代非均匀曲线(曲面)拟合给定数据集[J]. 中国科学(E 辑), 2003, 33(10): 912-923.
LIN Hongwei, WANG Guojin, DONG Chenshi. Iterative NURBS curve (surface) fitting assigned points set[J]. Science in China (Series E), 2003, 33(10): 912-923.
- [3] 孙殿柱, 李心成, 李延瑞, 等. G^1 连续三角 Bézier 曲面模型快速生成算法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 125-129.
SUN Dianzhu, LI Xincheng, LI Yanrui, et al. G^1 -continuous algorithms of triangular mesh surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 125-129.
- [4] 贾明, 吕震, 李永青, 等. 基于 B 样条曲面裁剪计算的局部协调设计[J]. 机械工程学报, 2003, 39(2): 74-78.
JIA Ming, LÜ Zhen, LI Yongqing, et al. Local coincided design based on trimmed B-spline surfaces[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(2): 74-78.
- [5] 汪中厚, 久保愛三, 浅野総一郎, 等. ハイボイドギヤの性能経時劣化の追跡: 第 1 報, 実測歯面形状データの導入法[J]. 日本機械学会論文集, 2000, 66(647): 2354-2362.
WANG Zhonghou, KUBO A, ASANO S, et al. Simulation of deterioration of hypoid gears performance due to tooth flank wear (1st report, data processing of measured tooth flank form deviation for performance simulation) [J]. JSME, 2000, 66(647): 2354-2362.
- [6] 汪中厚. 准双曲面齿轮动态性能仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
WANG Zhonghou. Simulation of hypoid gears dynamic performance[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [7] 汪中厚, 久保愛三, 浅野総一郎, 等. ハイボイドギヤの性能経時劣化の追跡: 第 2 報, 歯面形状劣化に伴う性能変化[J]. 日本機械学会論文集, 2000, 66(647): 2363-2370.
WANG Zhonghou, KUBO A, ASANO S, et al. Simulation of deterioration of hypoid gears performance due to tooth flank wear (2nd report, model for tooth flank wear and the change of gear performance resulted) [J]. JSME, 2000, 66(647): 2363-2370.
- [8] 汪中厚, 久保愛三, 浅野総一郎, 等. ハイボイドギヤの性能経時劣化の追跡: 第 3 報, 初期歯面形状による経時劣化後の歯車性能の相異[J]. 日本機械学会論文集, 2000, 66(647): 2371-2376.
WANG Zhonghou, KUBO A, ASANO S, et al. Simulation of deterioration of hypoid gears performance due to tooth flank wear (3rd report, influence of initial tooth flank form on the deterioration of gear performance) [J]. JSME, 2000, 66(647): 2371-2376.
- [9] 孙殿柱, 董学朱. 描述真实齿面数字模型的研究[J]. 农业机械学报, 2000, 31(1): 79-90.
SUN Dianzhu, DONG Xuezh. Research on the mathematical model describing real tooth surface[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(1): 79-90.
- [10] 孙殿柱, 董学朱. 真实齿面对应点的求解算法[J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(4): 64-68.
SUN Dianzhu, DONG Xuezh. Solving algorithms of corresponding point of two real tooth surface[J]. Journal of China Agricultural University, 1999, 4(4): 64-68.
- [11] 张军辉, 方宗德, 王成, 等. 基于 NURBS 的弧齿锥齿轮真实齿面的数字化仿真[J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1672-1676.
ZHANG Junhui, FANG Zongde, WANG Cheng, et al. Digital simulation of spiral bevel gears real tooth surfaces based on non-uniform rational B-spline[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1672-1676.
- [12] WU Qingbiao, XIA Feihai. Shape modification of Bézier curves by constrained optimization[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2005, 6A(Suppl. 1): 124-127.
- [13] TANG Kai, PANG A. Optimal connection of loops in laminated object manufacturing[J]. Computer-Aided Design, 2005, 35(11): 1011-1022.
- [14] WOO H, KANG E, WANG S Y, et al. A new segmentation method for point cloud data[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42: 167-178.
- [15] 汪中厚, 周晓玲, 小熊辰照, 等. 螺旋锥齿轮齿面扫描式测量法及其应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2007(2): 11-13.
WANG Zhonghou, ZHOU Xiaoling, OGUMA T, et al. Surface error measurement of spiral bevel gears using scanning measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007(2): 11-13.

作者简介: 李刚, 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要研究方向为齿轮动力学仿真、三维复杂曲面测量技术等。

E-mail: ligangteller@163.com

汪中厚(通信作者), 男, 1963 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为齿轮动力学仿真、三维复杂曲面测量技术等。

E-mail: wang_zhonghou18@163.com