

基于距离-夹角形状分布的三维 CAD 模型检索算法*

张开兴¹ 黄 瑞² 刘贤喜³

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 西北工业大学机电学院, 西安 710072;

3. 山东农业大学山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要:为了更好地实现三维 CAD 模型的有效重用,提出一种三维 CAD 模型距离-夹角形状分布检索算法。首先在 CAD 模型表面随机取点,计算任意两点构成的有向线段的距离和该有向线段与端点法向的夹角;然后以距离和夹角为坐标轴构建距离-夹角平面网格,统计网格中随机点出现的频次,从而构建模型的距离-夹角分布矩阵;最后采用 Manhattan 距离度量法计算矩阵的相似值,用以评价模型间的相似程度。实验结果表明,该算法可以较好地实现三维 CAD 模型检索,检索性能优于已有的形状分布检索算法,能够满足实际应用需求。

关键词: 三维模型检索 可重用 形状分布 距离-夹角分布

中图分类号: TP391.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0316-06

引言

由于产品三维模型具有可视化、数字化和虚拟化等特点,基于三维模型的产品设计与制造已成为我国离散制造业的主流模式和产品开发各环节(CAD、CAE、CAPP、CAM)不可或缺的基础载体。研究和统计分析表明,在新产品研发中,约40%是重用过去的零部件设计,约40%是对已有设计零部件的微小修改,只有约20%是完全新的设计^[1]。三维模型检索技术的问世,为实现三维模型的有效重用提供了可能。迄今为止,在通用领域已有30多种三维模型检索算法被相继提出。由于三维模型的参数化仍是一个很复杂的问题,三维表面有任意的拓扑,导致一些广泛适用于二维图像的检索方法无法直接推广至三维领域。因此,从统计学的观点出发,寻找有区分能力的统计特征^[2-4]成为对三维模型进行检索的首选思路。典型的方法有 Osada 等^[5]提出的 D2 形状分布算法,该方法通过对模型表面随机取点,然后统计随机点间的距离(D2)作为度量尺度,并形成分布曲线,通过比较形状分布曲线来实现模型相似性比较;为了增强 D2 描述符的表征能力,Ip 等^[6]提出根据两点间连线是否仅仅经过模型内部、外部或全经过将 D2 分为 In、Out、Mixed 3 种,通过这种处理,有效地提高了形状分布算法的检索精度;王洪申等根据随机线段按其端点法矢与线段形成的

角度进行分类,将一个三维模型表达为3个形状分布曲线,提高了检索能力^[7];Ohbuchi 等提出利用惯性矩、平均距离和距离方差3个统计量共同组成的特征描述符来实现检索的算法^[3];Ankerst 等对三维模型进行分割,通过直方图的比较实现模型的相似性比较^[2];王洪申等将距离统计和曲率统计有机地相结合,设计出适合自由曲面模型的相似性检索算法^[8]。基于统计的方法原理简单明了,计算快速,因此该类算法有必要进一步深入研究和改进。

对于三维 CAD 模型来说,模型中数据点的法矢对模型形状的表达起到十分重要的作用^[7],并且法矢和模型有向线段的夹角与模型的位置、摆放姿态无关,在检索时不需要对模型进行姿态或方位的调整。基于此,本文提出将距离统计和夹角统计相结合的三维 CAD 模型检索方法。

1 基于距离-夹角形状分布的检索算法原理

形状分布算法的原理是把一个模型的形状信息用概率分布图表示,通过统计物体表面采样点间的几何属性(距离、角度、几何矩等)出现的频率来构建概率分布图,将复杂的形状相似性匹配问题简化成概率分布图的比较。

基于距离-夹角形状分布检索算法的原理图如图1所示。该算法的实现步骤如下:①随机采样取点。在模型的表面随机采样取点,并计算每个采样

收稿日期:2013-05-18 修回日期:2013-08-07

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B01)和中国博士后科学基金资助项目(2013M541943)

作者简介:张开兴,讲师,博士,主要从事计算机辅助设计和制造业信息化研究,E-mail:zkxoffice@gmail.com

通讯作者:刘贤喜,教授,博士生导师,主要从事农业 CAD/CAM 和虚拟现实技术研究,E-mail:wjbliu@sda.u.edu.cn

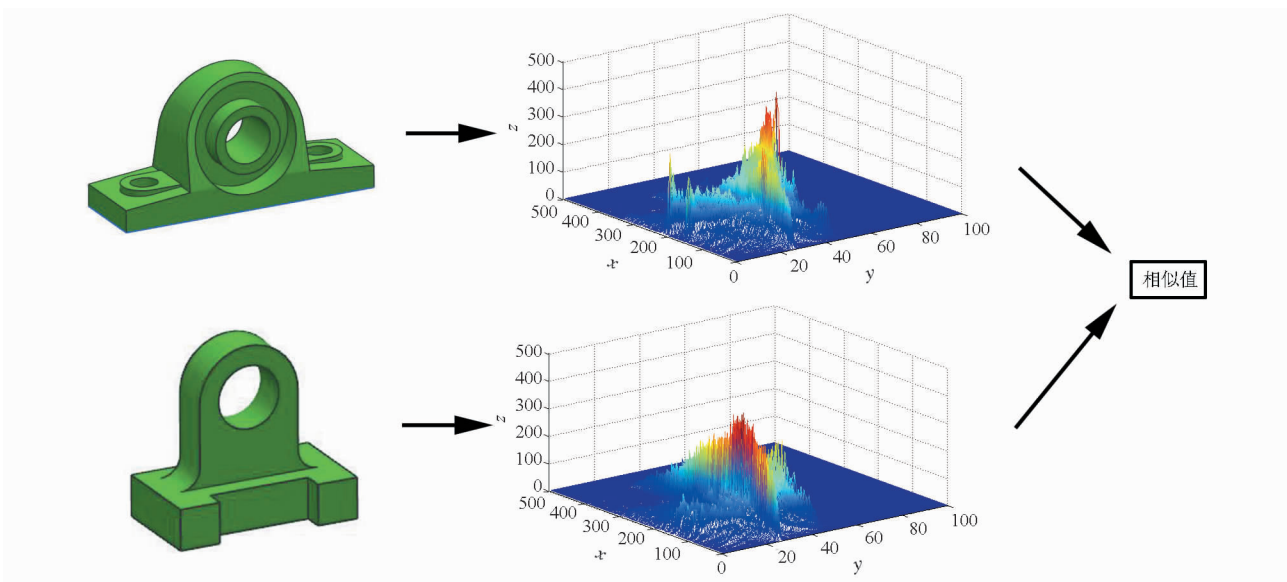


图 1 算法原理图

Fig.1 Schematic diagram

点的法矢。②距离-夹角形状分布图构建。构建每一个采样点与其他采样点的有向线段,并计算线段的欧几里德距离和线段与该采样点法矢之间的夹角;以距离和夹角为 x 和 y 坐标轴构建一平面网格,统计网格中随机点出现的频次为 z 坐标,从而将三维模型表示为一个三维的形状分布图。③模型的相似性度量。三维模型的相似性转换为形状分布图的比较,通过采用 Manhattan 距离度量法实现形状分布图对应矩阵的比较。

2 基于距离-夹角形状分布的检索算法实现

2.1 模型上随机取点

处理的对象为以三角网格形式表示的模型,为了在三角网格模型表面生成 N 个随机点,定义一个三角网格模型为 $S = \{T_1, T_2, \dots, T_k\}$, T_i 表示模型中的三角面片。随机取点过程可分为 2 个步骤:随机选取三角面片 T_j 和在随机选取的三角面片 T_j 上随机取点。应用蒙特卡罗方法,当某一区域内的点分布的概率与该区域的面积呈比例关系时,定义这种分布是平均分布^[5]。

首先,定义一个三角面片 $T = (P_1, P_2, P_3)$, 其面积可由

$$A_T = \frac{|(P_2 - P_1) \times (P_3 - P_1)|}{2} \quad (1)$$

得到。相应地,由三角面片的总面积逼近三角网格模型的表面积,三角网格模型的表面积可表示为

$$A_S = \sum_{i=1}^k A_{T_i} \quad (2)$$

随机选取三角面片 T_j 的概率可表示为

$$p(T_j) = \frac{A_{T_j}}{A_S} \quad (3)$$

如图 2 所示,把区间 $[0, 1]$ 分成 k 段,第 j 段与 $p(T_j)$ 在数值上相等。只要在 $[0, 1]$ 之间生成一个随机数,即能找到三角面片的索引号 j 。

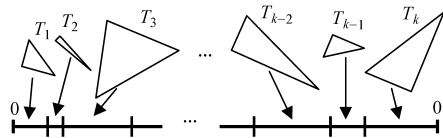


图 2 随机选取三角面片示意图

Fig.2 Sampling random triangular faces

三角面片选取完成后,需要在三角面片随机取点,如图 3 所示,随机生成 2 个介于 $[0, 1]$ 区间的数字 r_1 和 r_2 ,随机点 P 的位置可以表示为

$$P = (1 - \sqrt{r_1})P_1 + \sqrt{r_1}(1 - r_2)P_2 + \sqrt{r_1}r_2P_3 \quad (4)$$

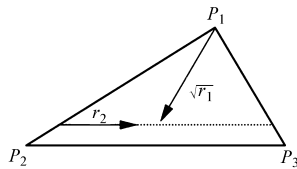


图 3 三角面片上随机生成点示意图

Fig.3 Sampling random point in triangle

在采样的同时需记录每个点的法矢,各点法矢与该点所在的三角面片的法矢相同。需要说明的是,当 $r_1 = 0, r_1 = 1$ 且 $r_2 = 0, r_1 = 1$ 且 $r_2 = 1$ 3 种情况时,采样点刚好是三角面片的顶点,当 $r_1 = 1$ 且 $r_2 \in (0, 1), r_2 = 0$ 且 $r_1 \in (0, 1), r_2 = 1$ 且 $r_1 \in (0, 1)$ 3 种情况时,采样点刚好在三角面片的边上。此时,采样点的法矢可根据与该点相连接的三角形法矢的面积加权平均来计算。设过点 P 有 n 个三角形,三角形的法矢记作 n_j ,面积记作 $A_j (j = 1, 2, \dots, n)$,则采样点 P 的法矢为

$$n = \sum_{j=1}^n A_j n_j / \sum_{j=1}^n A_j \tag{5}$$

2.2 模型距离-夹角形状分布图构建

设两采样点分别为 $P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2)$, 其法矢量分别为 n_1, n_2 , 如图 4 所示。



图 4 线段与端点法矢的夹角

Fig. 4 Angle between directed line and normal

模型表面采样点间的距离采用欧几里德距离^[9]表示, 则采样点 P_2 到 P_1 的距离为

$$l = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \tag{6}$$

对于采样点 P_1 , 有向线段 P_1P_2 与 n_1 的夹角余弦为

$$\cos\theta = \frac{P_1P_2 \cdot n_1}{|P_1P_2| \times |n_1|} \tag{7}$$

其中, 式(7)中 θ 的取值范围为 $[0, \pi]$ 。

在计算距离的同时记录采样点在各坐标方向的最小值与最大值, 可得到模型包围盒的两个顶点 $P_{\min}(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min})$ 和 $P_{\max}(x_{\max}, y_{\max}, z_{\max})$, 则模型包围盒对角线长度 d (图 5) 为

$$d = \sqrt{(x_{\max} - x_{\min})^2 + (y_{\max} - y_{\min})^2 + (z_{\max} - z_{\min})^2} \tag{8}$$

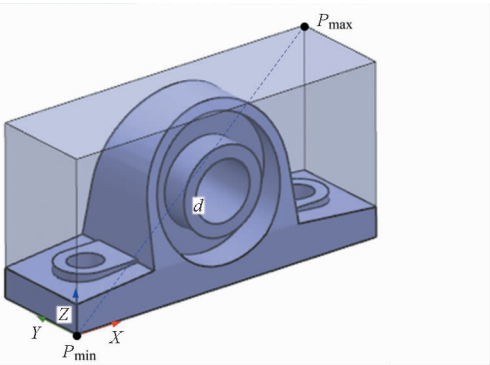


图 5 包围盒对角线长度计算

Fig. 5 Length calculation of bounding box

采样点的距离和夹角计算完成后, 用分布矩阵来表示距离-夹角的概率分布。模型的距离-夹角分布矩阵构建的具体步骤如下:

- (1) 根据包围盒对角线距离 d , 将 d 等分为 n_1 份 ($n_1 = 500$), 则每一等份 $d_{\text{bin}} = d/n_1$ 。
- (2) 对于有向线段与法矢的夹角 θ , 其取值范围为 $[0, \pi]$, 将 π 等分为 n_2 份 ($n_2 = 100$), 则每一等份 $\theta_{\text{bin}} = \pi/n_2$ 。

(3) 以 d 作为纵坐标, 间隔为 d_{bin} , 以 θ 作为横坐标, 间隔为 θ_{bin} , 构成一个二维网格平面, 如图 6 所示, 网格平面中各小方格的初始值为零。

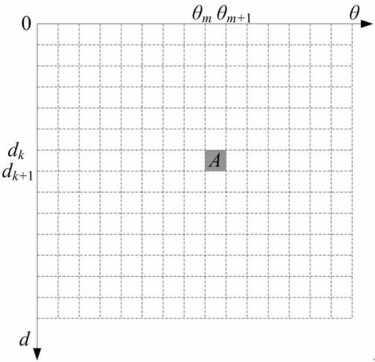


图 6 模型的距离-夹角分布矩阵表示

Fig. 6 Distance - angle distribution matrix representation

(4) 统计距离和夹角的概率分布。当距离和夹角满足 $d_k \leq d_i < d_{k+1}$, 且 $\theta_m \leq \theta_i < \theta_{m+1}$ 时, 网格平面所对应的小方格加 1, 通过这种方式可以在二维网格平面中统计距离和夹角的概率分布。

(5) 利用一个 $n_1 \times n_2$ 的矩阵 M 来表示该网格平面, 从而将三维模型用距离-夹角分布矩阵 M 来表示。

表 1 所示为 5 个模型分布矩阵所对应的形状分布图, 可以看出, 5 个模型在几何形状和拓扑结构上的差异性明显地体现在其形状分布图上, 可以有效地对模型进行区分。

2.3 模型的相似性度量

2 个三维 CAD 模型之间相似性的度量可以转

表 1 模型的形状分布图

Tab. 1 Model shape distribution

	1	2	3	4	5
模型					
形状分布图					

换为 2 个距离-夹角分布矩阵之间的相似性比较来实现。为了更好地体现出矩阵所代表的模型之间的差异性,采用 Manhattan 距离^[10]来评价两个模型之间的差异。设模型 A 与模型 B 的距离-夹角分布矩阵分别为 M_A 和 M_B ,则模型 A 与模型 B 的相似性度量函数为

$$D(M_A,M_B)=\sum_{i=1}^{n_1}\sum_{j=1}^{n_2}|^Am_{ij}-^Bm_{ij}| \quad (9)$$

3 结果与分析

为了验证算法的有效性,以 Microsoft Visual Studio 2008 为集成开发环境,实验中的模型取自美国普渡大学开发的 ESB 模型库^[11-12],该模型包含回转体类、棱柱类及薄壁类共计 800 多个模型。

表 2 和表 3 所示为文献[5]、文献[7]和本文算

法对 ESB 模型库中 T-Shaped parts 类、Motor Bodies 类模型的检索实验结果。在 ESB 模型库 T-Shaped parts 类中与索引模型最相似的有 6 个模型,采用文献[5]算法检索结果排列在前 9 位的模型有 3 个,文献[7]算法检索出 6 个,但有一个模型排列顺序错误,而本文算法检索出全部 6 个最相似的模型,分别排列在前 6 位,如表 2 所示;在 ESB 模型库 Motor Bodies 类中与索引模型最相似有 7 个模型,文献[5]算法检索结果排列在前 9 位的模型仅 1 个,文献[7]算法检索出 2 个,分别位于第 1 位和第 9 位,而本文算法检索出全部 7 个最相似的模型,分别排列在前 7 位,如表 3 所示。图 7 所示为对 ESB 模型库进行统计测试,获得了 3 种算法的查全率-查准率^[13](Precision recall,PR)曲线。PR 曲线用于表征正确率和返回结果数量的曲线,理想检索结果的 PR 曲

表 2 ESB 中 T-Shaped parts 类的检索结果
Tab.2 Retrieval result in T-Shaped parts of ESB

索引 模型	算法	T-Shaped parts 类检索结果排序(排列在前 9 位的模型)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	文献[5]算法									
	文献[7]算法									
	本文算法									

表 3 ESB 中 Motor Bodies 类的检索结果
Tab.3 Retrieval result in Motor Bodies of ESB

索引 模型	算法	Motor Bodies 类检索结果排序(排列在前 9 位的模型)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	文献[5]算法									
	文献[7]算法									
	本文算法									

线应该是一条查准率恒等于 1.0 的平行直线。显然,位置靠上的曲线具有较高精度,代表着较好的检索结果。

综上所述可以看出,本文算法的检索性能要优于其他 2 种算法,这是因为文献[5]算法只采用随机点间的距离来构建形状分布图,文献[7]算法根据端点法矢与线段形成的角度对距离进行了分类,将一个三维模型表达为 3 个形状分布图,但形状分布图的构建仍然是采用随机点间的距离,而本文算法构建的形状分布图不仅考虑随机点间的距离,同时考虑到模型法矢和线段之间的夹角与模型的位置、摆放姿态无关,将距离和夹角结合起来构建形状分布图,能够更好地反映模型的形状特征。

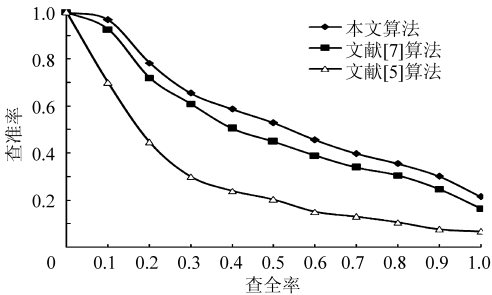


图 7 3 种算法对 ESB 模型库中模型检索效率对比

Fig.7 Retrieval efficiency comparison of three algorithms in ESB library

本文算法的时间复杂度为 $O(n^2)$,其中 n 是采样点的个数。本文算法在模型表面随机采样 500 个

点,500 个采样点完全可以达到较好的区分效果^[14-15]。由这些点产生的随机点对数量(夹角计算次数)为 $N=500\times499=24\,950$,计算次数低于文献[5]算法和文献[7]算法(523 776 次)。实验所用测试机 CPU 为 Inter(R) Pentium(R) Dual 1.80 GHz,内存为 2.00 GB。表 4 为 3 种算法对单个模型的平均处理时间,包括特征提取时间和特征比较时间,本文算法的整体效率高于其他 2 种算法。

表 4 3 种算法对单个模型的处理时间

Tab.4 Processing speed comparison of three algorithms

算法	特征提取时间/s	特征对比时间/s
文献[5]算法	1.126	0.000 002 1
文献[7]算法	1.378	0.000 003 7
本文算法	0.783	0.000 003 3

4 结束语

提出了一种将距离统计和夹角统计有机结合的三维 CAD 模型形状分布检索算法。通过对三维 CAD 模型表面进行随机采样,三维模型可以表示为由距离和夹角分布统计所形成的矩阵,将三维 CAD 模型的相似性比较问题转化为 2 个距离-夹角分布矩阵的比较问题,最后通过 Manhattan 距离度量法实现三维 CAD 模型的相似性评价。实验结果表明,本文算法较之于以往的形状分布检索算法的检索性能有明显提高。

参 考 文 献

1 Iyer N, Jayanti S, Lou K, et al. Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends [J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(5): 509 – 530.

2 Ankerst, Kastenmüller G, Kriegel H P, et al. 3D shape histograms for similarity search and classification in spatial databases [C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Advances in Spatial Databases, 1999: 207 – 226.

3 Ohbuchi R, Otagiri T, Ibato M, et al. Shape-similarity search of three-dimensional models using parameterized statistics [C]// Proceedings 10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, 2002: 265 – 274.

4 张开兴,张树生,刘贤喜. 三维 CAD 模型检索技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报,2013,44(7):256 – 263.
Zhang Kaixing, Zhang Shusheng, Liu Xianxi. Current research and future development of 3-D CAD model retrieval [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(7):256 – 263. (in Chinese)

5 Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, et al. Shape distributions[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 807 – 832.

6 Ip C Y, Regli W C. A 3D object classifier for discriminating manufacturing processes [J]. Computers & Graphics, 2006, 30(6): 903 – 916.

7 王洪申,张树生,张开兴,等. 基于法向分类的三维模型形状分布检索算法[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(6): 1187 – 1193.
Wang Hongshen, Zhang Shusheng, Zhang Kaixing, et al. Shape distributions retrieval algorithm of 3D CAD models based on normal direction[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2009, 15(6):1187 – 1193. (in Chinese)

8 王洪申,张树生,白晓亮,等. 三维 CAD 曲面模型距离-曲率形状分布检索算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(5):762 – 770.
Wang Hongshen, Zhang Shusheng, Bai Xiaoliang, et al. 3D CAD surface model retrieval algorithm based on distance and curvature distributions [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(5): 762 – 770. (in Chinese)

9 Funkhouser T, Min P,Kazhdan M, et al. A search engine for 3D models [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(1): 83 – 105.

10 Dejian V, Vranic, Dietmar Saupe. An improvement of rotation invariant 3D shape descriptor based on functions on concentric

spheres[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, 2003:757 – 760.

11 Engineering Shape Benchmark. <http://shapelab.een.purdue.edu>.

12 Jayanti S, Kalyanaraman Y, Iyer N, et al. Developing an engineering shape benchmark for CAD models [J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(9): 939 – 953.

13 Patel N V, Sethi I K. Video shot detection and characterization for video databases [J]. Pattern Recognition, 1997, 30(4):583 – 592.

14 Hong T, Lee K, Kim S, et al. Similarity comparison of mechanical parts [J]. Computer-Aided Design & Applications, 2005, 2(6): 759 – 768.

15 Hong T, Lee K, Kim S. Similarity comparison of mechanical parts to reuse existing designs [J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(9): 973 – 984.

3-D CAD Model Retrieval Algorithm Based on Distance and Angle Distributions

Zhang Kaixing¹ Huang Rui² Liu Xianxi³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

3. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: To reuse 3-D CAD models more efficiently, a 3-D CAD model retrieval algorithm based on distance and angle distributions was proposed. Firstly, a large number of random points on the model surface were taken to calculate the length of the directed line constructed between two random points and the angle between the normal of the point and the directed line. Then, a distance – angle planar grid was constructed to express the distance – angle distribution by obtaining a statistic data of the sampled points. At last, the Manhattan distance metric method was used to compute the similarity between the two distance – angle matrices, which can give the similarity coefficient for two compared 3-D CAD models. Experiments results show that the algorithm can effectively support 3-D CAD model retrieval, and the efficiency meets the requirements of engineering application.

Key words: 3-D model retrieval Reusable Shape distributions Distance – angle distributions

(上接第 326 页)

Analysis of Interference Area in Machining Hyperboloidal Surface

Huang Zhidong^{1,2} Zhang Lei¹ Zhao Ji¹

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

2. Department of Mechanical Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi 117004, China)

Abstract: The hyperboloidal surface was studied, which was common in complex surfaces. The mathematical model for machining hyperboloidal surface was set up. Based on the analysis of parameter characteristics of hyperboloidal surface, the variation law of the slope limit value of tangent at arbitrary point on hyperboloidal surface and the slope limit value of the axis of tool was discovered. Based on the variation law, the functional relationship between parabola parameter, tool parameter and the square of eccentricity was obtained. The parameter criterion, by which the interference on machining hyperboloidal surface could be avoided, was deduced. The interference areas corresponding to different functional relationships between cutting angle and the square of eccentricity were clarified. The simulation experiment results showed the validity of theoretical analysis, which facilitated the parameter selection for machining hyperboloidal surface.

Key words: Hyperboloidal surface Machining Interference Analysis