

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.03.013

基于插值细分的自由曲面重建

金初云

(浙江交通职业技术学院 机电学院, 浙江 杭州 311112)

摘要:细分曲面的差值算法对于曲面重建的精度起着重要的作用。在当前的细分曲面的研究基础上,提出了一种以三角形作为初始网格的递归插值计算方法。在边界网格节点上优化插值计算,并针对异常的网格节点选取合适的加权系数,从而改善了重建细分曲面的插值算法。在一个复杂的自由曲面上进行应用,并将计算结果与其他的曲面细分模式进行比较和误差分析。

关键词:逆向工程;细分曲面;曲面重建;网格;递归插值

中图分类号:TP391

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)03-0051-05

Reconstruction of Freeform Surface Based on Interpolate Subdivision Model

JIN Chuyun

(School of Mechanics and Electronics, Zhejiang Institute of Communications, Hangzhou 311112, China)

Abstract: The precision as reconstructing a subdivision surface depends on the subdivision calculation method conducted. Based on the available research achievements of subdivision surface, a subdivision calculation method with recursive interpolation was presented based on initial triangular mesh, which was in general applicable. The weighting coefficients for abnormal vertices were optimized, as well the boundary interpolate calculation method was used, which improved the quality of the surface construction. The subdivision model was applied on a complicate arbitrary surface, and compared its tolerance with that of other popular subdivision models.

Key words: reverse engineering; surface reconstruction; subdivision surface; mesh; recursive interpolation

从20世纪60年代以来,计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)技术已经得到了广泛地应用。在复杂曲面的CAD建模之前,常常都会有满足工业设计的样品模型,按照某种方式转化为CAD的数据模型,从而可以用先进技术对其进行处理和管理,如CAD/CAM系统、PDM产品数据管理系统、3D打印技术、快速样品制造,以及CIMS计算机集成制造系统等。这就是逆向工程,也称为反求工程。现代逆向工程普遍使用三坐标测量技术CMM在原始模型的表面上获取足够的特征点坐标,然后在计算机中通过一定的曲面构建方法还原出模型表面的数字模型,并以此计算出机床的加工轨迹,从而生成数控加工程序,就可以输入数控机床加工出符合原始模型的样品来。这其

中,曲面重构是关键技术之一。

1 研究背景

主要的曲面造型方法包括:基于Bezier曲线得样条曲线造型,基于NURBS得参数化曲面造型,以及基于多边形拆分的细分曲面。尽管参数化曲面建模方法有许多优点,但在以下几方面的缺点是难以克服的:对于拓扑结构比较复杂的自由曲面几何建模工作量非常繁重^[1-2];在模型重构中用NURBS方法反算控制点时,参数节点区间的分割和权因子的处理非常困难;以及在实际应用中需要把参数化的曲面模型离散化的过程^[3]。这些因素局限了以NURBS曲面为代表的参数化曲面建模的应用^[4]。

细分曲面克服了参数曲面难以处理任意拓扑网格

收稿日期:2014-02-26;修回日期:2014-03-13

作者简介:金初云(1977),女,浙江慈溪人,硕士,讲师,主要研究方向为机电工程、CAD/CAM/CAE/CAPP等。E-mail: jinchun1@163.com

的局限,结合了参数曲面和多边形这两种实体表现方式。在三维数据获取设备的日趋完善的今天,几何表示方法已经越来越多的采用细分离散曲面。Catmull-Clark^[5], Loop^[6]等模式都是最具有代表性的细分模式。而且细分曲面在收敛性、连续性、分辨率等方面的理论分析研究也已取得了大量成果。

表1对现有的典型细分算法进行了分类。

三角网格和四角网格结构是目前大部分细分曲面算法所采用的形式,计算方法分为插值型和逼近型。逼近算法的优点是收敛速度快、光滑性好,但在初始网格的形状上容易失真;插值算法对于保持几何模型的控制比较好,但细分曲面的光滑性不理想^[7-9]。

表1 细分算法的分类

Table 1 Catagory of subdivision calculation method

计算方法	面分裂		点分裂
	四角网格	三角网格	
插值型	Kobbelt (C^1)	Mod. Butterfly (C^1)	
逼近型	Catmull-Clark (C^2)	Loop (C^2)	Doo-Sabin

递归型的的曲面分割造型算法从初始控制网格开始。初始网格描述了曲面的大致轮廓。递归细分对网格上的几个相邻节点进行线性加权递归计算,得到新的节点。对复杂曲面模型进行曲面重构,可以先采集曲面上的离散点,建立初始控制网格,然后通过适当的递归插值算法计算细分插值节点,构造出细分网格。重复插值计算,使网格节点密度达到一定程度,即误差变化足够小时,即得到最终的细分曲面^[10]。

2 新的插值细分曲面算法

初始网格通常是任意拓扑结构的,且含有一些异常节点。为了保证其插值曲面的几何连续性,可以把2个节点周围的所有相邻节点进行线性加权计算的平均值来确定它们之间的插值点^[11],如图1所示。

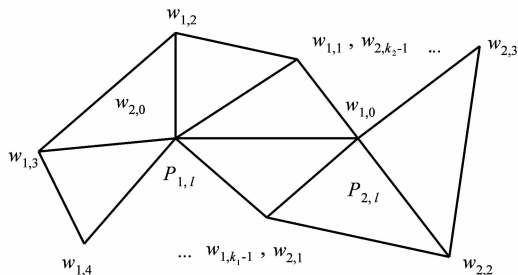


图1 任意两个节点之间插入新节点

Figure 1 Insert of new point between any pair of points

$P_{1,l}$ 和 $P_{2,l}$ 2个节点之间的插值点可以用下式统一确定

$$Q_{l+1} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=0}^{k_1-1} w_{1,i} P_{1i,j} + \sum_{j=0}^{k_2-1} w_{2,j} P_{2j,l} \right)。$$

式中, $P_{10,l} = P_{20,l}$, $P_{20,l} = P_{1,l}$, $w_{1,i}, w_{2,j}$ 为相应于 $P_{1,l}$ 和 $P_{2,l}$ 的各相邻节点的加权系数,其值按节点数量确定。

当 $k = 6$ 时,

$$\begin{cases} w_{m,0} = 1 - v \\ w_{m,1} = w_{m,5} = 1/8 + v \\ w_{m,2} = w_{m,4} = -1/8 - v \\ w_{m,3} = v \end{cases} \quad m = 1, 2,$$

其中 v 应当取接近于0的较小的数值,在后面的实际计算中取 $v = 0$ 。

当 $k = 3$ 时,

$$\begin{cases} w_{m,0} = 7/6 \\ w_{m,1} = w_{m,2} = -1/12 \end{cases} \quad m = 1, 2。$$

当 $k = 4$ 时,

$$\begin{cases} w_{m,0} = 9/8 \\ w_{m,1} = w_{m,3} = 0 \\ w_{m,2} = -1/8 \end{cases} \quad m = 1, 2。$$

当 $k = 5$ 时,

$$\begin{cases} w_{m,0} = 1.1 \\ w_{m,1} = w_{m,4} = 0.03 \\ w_{m,2} = w_{m,3} = -0.08 \end{cases} \quad m = 1, 2。$$

当 $k \geq 7$ 时,

$$\begin{cases} w_{m,i} = \frac{1}{k} \left(\frac{1}{4} + \cos \frac{2\pi i}{k} + \frac{1}{2} \cos \frac{4\pi i}{k} \right) \\ w_{m,0} = 1 - \sum_{i=1}^{k-1} w_{m,i} \end{cases}$$

$$m = 1, 2 \quad i = 1, \dots, k-1。$$

以上算法可以计算网格中内部节点之间的插值点。对于边界节点和内部节点之间的插值节点,需要特殊处理后才能按上述算法处理。处理方法是把临近边界节点的内部节点相对边界对称投影到边界以外,构成虚拟的对称点。这样,边界点就变成了“虚拟内部节点”。

按照以上算法得出的插值节点都是规则节点,因此异常节点的数量将保持不变。

在自由曲面上,边界初始节点数为 n ,采用下面的六点插值算法,可以得到曲率连续的光滑曲线(当 $0 \leq \alpha \leq 0.02$ 时):

$$\begin{cases} P_{2i,l} = P_{i,l-1} & l \geq 1, 0 \leq i \leq 2n^{l-1} \\ P_{2i+1,l} = \left[\frac{9}{16} + 2\alpha \right] (P_{i,l-1} + P_{i+1,l-1}) - \\ \quad \alpha (P_{i-2,l-1} + P_{i+3,l-1}) - \\ \quad \left[\frac{1}{16} + 3\alpha \right] (P_{i-1,l-1} + P_{i+2,l-1}) & l \geq 1, 0 \leq i \leq 2n_{i-1} - 1 \end{cases}$$

其中 l 为递归插值次数。

3 实例分析

图2所示的是一个任意自由曲面。通过对其初始三角网格进行不同模式的曲面细分,比较细分曲面和理想曲面的误差,可以得到几种细分模式的特点。

图3给出了运用 Catmull-Clark, Loop 和本文提出的细分模式进行两次细分后的网格及相应的误差分布图。

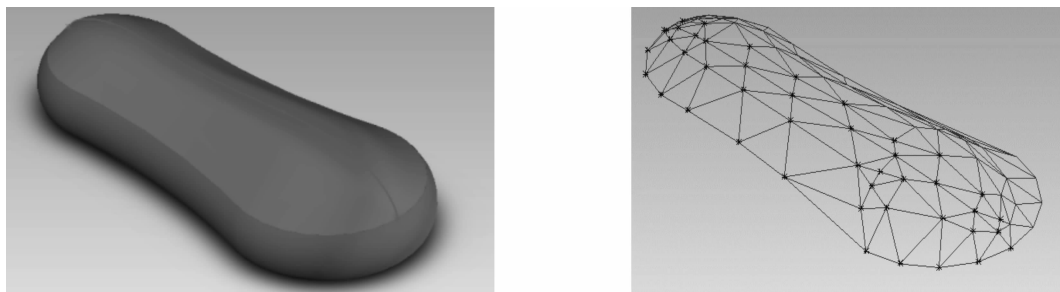


图2 任意自由曲面及初始三角网格

Figure 2 Free surface and its initial triangular mesh

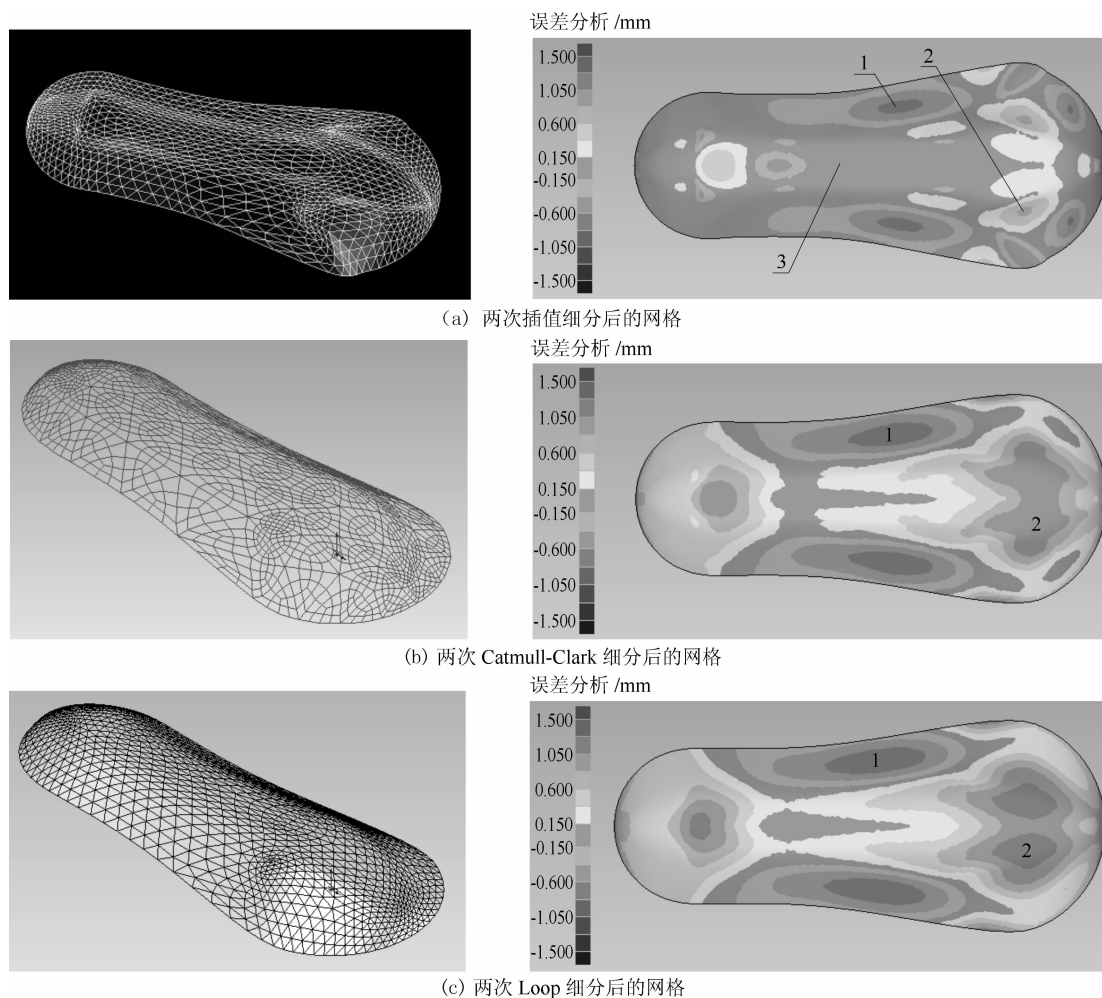


图3 某三角曲面细分结果和误差分析图

Figure 3 Different subdivision results and the deviation analysis diagram of a triangle mesh

比较3种细分模式的误差分布图,新的插值细分方法所得到的曲面误差最小(区域3的面积分布最大)。由此可知,按新插值细分算法所得到的细分曲面最接近理想曲面。不过,在插值细分曲面的误差分布图上的一些分散的、小块的1或2区域,说明其光滑性还不理想。

细分曲面总会有误差。不同的细分方法会导致大小不同的误差结果。图4中颜色较深的位置是初始网格和理想曲面相差比较大的地方,用数字标识可以选择这几个区域(1~5)来比较不同细分法重建的曲面的误差水平。图5中的5张曲线图,对应的是曲面上这5个位置。每一条曲线显示的是一种细分方法在该位置上随着细分次数的误差走势。每张图上的3条曲线分别对应的是3种细分方法的误差变化。

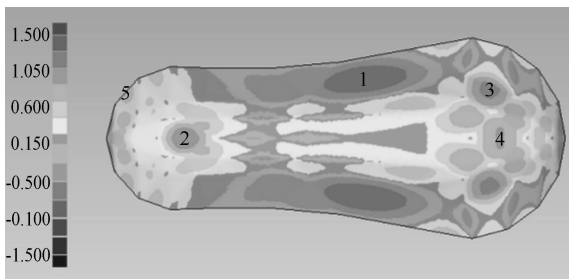


图4 初始网格相对理想曲面的误差分布
Figure 4 Deviation distribution of initial mesh against the ideal surface

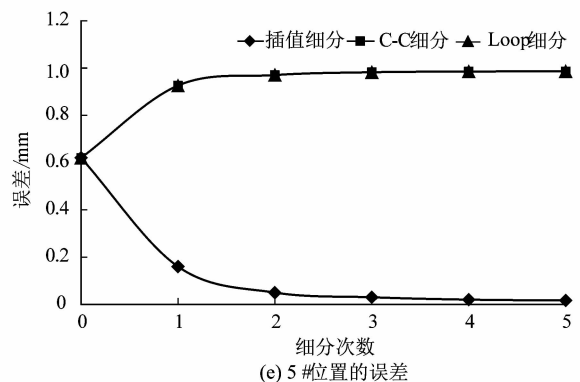
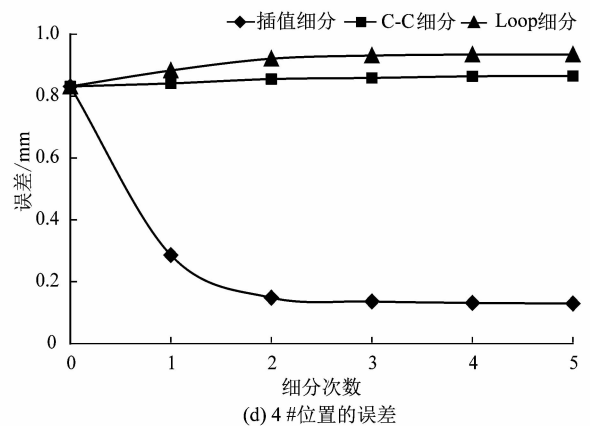
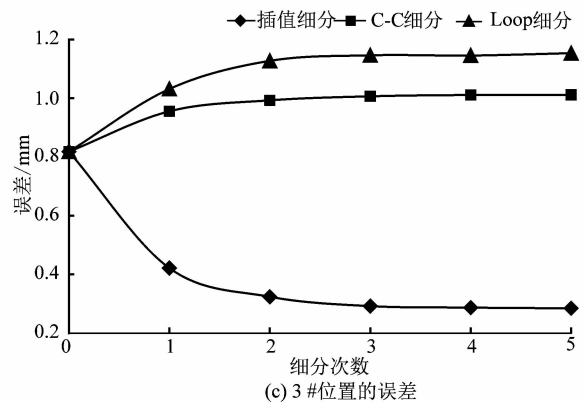
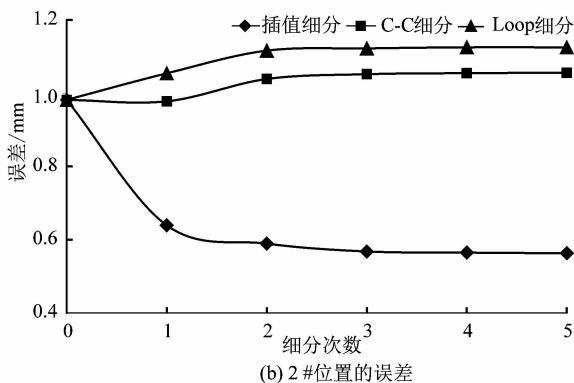
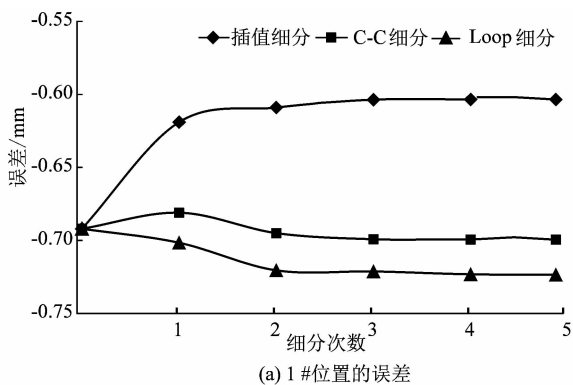


图5 曲面上不同位置的误差变化曲线
Figure 5 Deviation trends of different positions on the surface

随着细分次数的增多,图5中所有的曲线都趋近于某一个定值。比如,在图5(a)中,插值细分曲面的最终误差趋近于 -0.6 mm,而Catmull-Clark曲面的最终误差趋近于 -0.7 mm。其他的所有误差曲线都是如此。这说明这3种细分方法都是收敛的。而且细分曲面在2到3次细分之后就已经趋近于极限曲面,后面的细分对误差的影响就很小了。

从图5中还可以发现,Loop和Catmull-Clark细分曲面的误差值随着细分次数增加而增大,而插值曲面的误差则会不断减小。图5中所有的误差曲线都是这

种规律,比如图 5(d) 显示的 4#位置的误差,初始网格的误差为 0.83 mm, Catmull-Clark 细分使误差扩大到 0.87 mm, Loop 细分更使误差达到 0.93 mm, 而插值细分则把误差减小到 0.14 mm。

在内部网格上(图 4 中的位置 1~4, 图 5 中的图(a)~(d)), Catmull-Clark 细分曲面的误差要小于 Loop 细分曲面。在边界上(图 4 中的位置 5, 图 5(e)), 由于这两种细分曲面在边界节点的计算上采用的是相同的计算公式, 因此它们的误差变化曲线是重合的。

比较图 5 中所有误差的最终数值, 除了插值细分算法在边界上(位置 5)的误差趋近于 0, 所有 3 种细分算法在任意位置上, 都没有趋近于理想曲面的零误差, 总是存在着一定的误差值, 称为残余误差。因为初始网格是从理想曲面简化而来, 这种通过简化而建立的初始网格本身就存在一定的误差。曲面细分方法只能在一定程度和范围里减小或是增大残余误差, 却无法消除残余误差。根据曲面的特点来建立合理的初始网格是减小残余误差的有效途径。比如, 在曲面变化较大的区域要布置较多的网格节点^[12-13]。

4 结语

基于初始网格插值细分的曲面重建的优点在于它可以在任意拓扑结构的复杂曲面上直接处理。插值细分几次之后形成的多面体的误差就可以满足几何精度要求。本文提出了一种新的细分算法, 把三角网格中更多的相邻节点包含到插值计算中去, 得到了更好的

连续性, 以及相对于 Loop 和 Catmull-Clark 细分方式更小的偏差。

参考文献:

- [1] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 5-6.
- [2] 樊志华, 张靖磊. 基于解析伪谱法的四边 PDE 曲面生成方法[J]. 机电工程, 2012, 29(8): 907-910.
- [3] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994: 14-17.
- [4] FARIN G E. Curves and surfaces for computer-aided geometric design: a practical code[M]. 4th ed. Orlando, FL: Academic Press, 1996.
- [5] CATMULL E, CLARK J. Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes[J]. Computer Aided Design, 1978, 10(6): 350-355.
- [6] LOOP C. Smooth subdivision surfaces based on triangles[D]. Salt Lake City, Utah: University of Utah, 1987: 33-54.
- [7] 任秉银, 孟庆鑫, 于华. 基于递归分割的曲面造型算法[J]. 高技术通讯, 2002(1): 71-74.
- [8] 潘超. 基于节点多数据场的四面体网格的简化算法[J]. 轻工机械, 2013, 31(4): 43-48.
- [9] 李慧莹, 陈良骥. 基于四边形网格参数细分的平面与自由曲面求交算法[J]. 机电工程, 2013, 30(8): 956-958.
- [10] 王金生, 韩臻. 几种经典网格细分算法的比较[J]. 计算机应用研究, 2004, 21(6): 139-141.
- [11] 任秉银, 陈皓晖. 任意拓扑结构复杂曲面模型重构新方法[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 162-166.
- [12] 王玉槐, 贾虹, 孙亚萍. 注塑模表面自适应三角网格剖分策略[J]. 轻工机械, 2011, 29(4): 1-4.
- [13] 金初云. 基于插值细分的自由曲面重建及刀具轨迹仿真[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2007.

(上接第 50 页)

蓄电池生产线总体布局^[9-11]。在极板上料装置设计过程中, 通过比较分析已有技术方案, 仍有难以解释和解决的问题。今后可提高真空系统的破坏时间来满足高速的吸附, 达到每分钟 250 片。并且与 TBS 公司研制的极板包片机上料装置异同: 将椭圆形环状的吸附转变成圆环状的吸附, 在真空吸附的密封腔体从椭圆体分割变成圆环上的分割。极板上料装置解决了蓄电池生产线的瓶颈之一, 取代了人工包片上料, 因此在理论和实用上有着重要意义及经济价值; 但仍需进一步研究该装置与蓄电池自动化生产线的匹配, 满足柔性控制、模块化设计要求。

参考文献:

- [1] 陈红雨, 熊正林, 李中奇. 先进铅酸蓄电池制造工艺[M]. 北京: 化学出版社, 2009.
- [2] 古河电池株式会社, 株式会社伊研制作所. 极板层叠体的极板分

离供给装置及其极板分离供给方法: 中国, CN02124951. 2[P]. 2003-02-05.

- [3] 朱松然. 蓄电池手册[M]. 天津: 天津大学出版社, 1998: 112.
- [4] TBS 工程有限公司. 用于将蓄电池极板放成一行的装置: 中国, CN200810091655. 9[P]. 2008-10-15.
- [5] 刘广林. 铅酸蓄电池工艺学概论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [6] 秦彦斌, 陆品. 机械设计: 导教·导学·导考[M]. 7 版. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [7] 高德. 包装机械设计[M]. 北京: 化学出版社, 2008: 156.
- [8] 沈则亮. 真空吸附铣削夹具的设计及其应用[J]. 机床与液压, 2011, 39(16): 43-44.
- [9] 唐毅, 金圭. 不规则物料等间距上料控制[J]. 轻工机械, 2008, 26(4): 65-69.
- [10] 吴旭东, 张慧. Breaker 温度开关自动上料设备的设计[J]. 轻工机械, 2013, 31(3): 84-87.
- [11] 寿军波. 钢卷上料自动控制系统的设计[J]. 机电工程, 2013, 30(1): 81-84.