

DOI: 10.3901/JME.2014.19.120

一种骨架线驱动的产品曲面变形设计方法*

程丰备 刘振宇 谭建荣 方锡武 裘 迪
(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 针对复杂产品外形设计中一类由骨架线驱动的曲面变形设计问题, 提出基于变分原理和扩散效应控制目标曲面变形的
设计方法。通过提取决定产品外形曲面几何特征的骨架线(如脊线、谷线), 按照给定的约束条件控制曲面骨架线的几何变形,
以变形后的骨架线为几何约束条件控制曲面形状的变化趋势, 从而实现产品形状变形设计。此外, 利用该方法可以提取原曲
面拉普拉斯微分坐标表示的曲面细节, 保持曲面变形过程中几何细节特征基本不变。产品曲面变形实例验证了方法的有效性。
关键词: 骨架线; 扩散效应; 硬约束与软约束; 拉普拉斯变换

中图分类号: TP391

An Algorithm of Design for Product Surface Deformation Driven by the Skeleton Curves

CHENG Fengbei LIU Zhenyu TAN Jianrong FANG Xiwu QIU Chan
(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: To solve the surface deformation driven by skeleton curves for complex product shape design, the design methods by
controlling the target surface deformation based on variation principle and diffusion effect are presented. The skeleton curves (e.g.
ridge and valley lines) determining the surface geometric features of the product shape are extracted, the geometric shape of the
skeleton curves are manipulated to deform under the given constraint conditions, and then the deformed skeleton curves are
considered as the constraint conditions to control the variation trend of surface feature shape, therefore, the whole surface feature
shape design is to be implemented effectively. Moreover, our methods helps to extract the original surface details represented by
Laplace differential coordinate, then the surface geometric details can be essentially unchanged during the surface deformation
process. The product surface deformation examples are presented to verify the effectiveness of our approach.

Key words: skeleton curves; diffusion effect; hard constraint and soft constraint; Laplace transformation

0 前言

在激烈的市场竞争中, 不断地满足消费者日益多元化的定制需求, 已成为产品创新设计关注的焦点。尤其在汽车等机械产品开发中, 如何有效支持新颖性与个性化的产品形状设计, 成为产品创新的关键之一。产品形状设计的核心是曲线曲面的变形设计问题, 传统的产品曲面变形的的方法主要通过调整控制点、节点矢量、权重, 或者施加特定的几何约束实现曲面的变形设计, 这种变形方法具有可控性差, 难以满足设计者造型设计需求的缺点, 因此, 既能保持产品形状基本特征不变, 又能方便地对曲面局部形状进行变形控制是产品形状设计需要解决

的重要问题。

产品曲面变形方法按照是否考虑设计对象的物理属性分为两大类: 一类是将曲面对象视为物理薄板, 以薄板的应力特征等物理属性为约束条件, 将此物理条件转化为数学优化问题, 构造控制曲面变形的算法。代表性的研究包括: TERZOPOULOS 等^[1]提出弹性理论构造微分方程的方法, 描述了曲面动态变化过程, 增强了特定曲面物理属性的真实感。POURAZADY 等^[2]提出利用拉伸和弯曲刚度物理属性构造曲线的能量函数的方法, 将能量函数极小值问题转化为有限元问题求解, 从而给出 B 样条曲面受几何条件约束的变形方法。王青等^[3]提出基于力密度的统一求解法, 控制 NURBS 曲线和曲面的精确变形, 并将该法应用于解决细节特征设计和反求模型等复杂造型问题。袁天然等^[4]提出利用基于最小曲率法检测提取牙齿模型中的数据的方法,

* 国家自然科学基金(51075357, 51305393)、国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2011CB706503)和国家科技计划(2013IM030500)资助项目。20131106 收到初稿, 20140701 收到修改稿

采用最小曲面能量函数法调整曲面形状,取得满足实际要求的曲面建模结果。李娜等^[5]通过建立曲面的完备能量模型,提出曲面构型和位移模式描述曲面变形的办法。朱心雄等^[6]系统地介绍了能量法的基本原理和典型的几何约束条件以及问题的优化解法。虽然基于物理属性条件的曲面变形可增强曲面外形变化效果的真实感,但是一般计算量较大,尤其是处理较大的模型会导致交互操作的延迟效应。另外一类是不考虑研究对象的物理属性特点,分析曲面对象的控制点或者离散网格点的拓扑与几何特征,将曲面的特征设计问题转化为网格变形问题,或者进一步转化为全局变分优化问题。代表性的研究包括:SEDERBERG等^[7]提出将自由变形的算法应用到曲面变形设计领域的方法,WANG等^[8]提出满足点、法向量、曲线和面等几何约束的直接驱动B样条曲面的变形方法。陈凯云等^[9]提出通过修改节点矢量进行NURBS曲线的局部形状调整,获得满足拟合误差最小要求的叶片型测量点差值曲线的方法。利用曲面的数学表达式的固有特性、微分性质,曲线曲面的整体变分优化算法增强了曲面变形的交互可控性,但是忽略空间曲线曲面特有的物理属性,可能导致几何变形对象的几何特征失真。

利用骨架线的变形控制曲面变形可以一定程度上避免上述问题出现。刘胜兰等^[10]提出快速确定初始特征线的追踪投影法,计算曲面的特征线的主动轮廓模型能量,得到光滑且逼近特征的曲面特征线。TEICHMANN等^[11]提出自动提取骨架线的方法,CAPELL等^[12]进一步改进了骨架线提取算法,提出利用骨架线的弹性物理属性计算曲面变形的办法。对目标对象添加三维网格控制可以增强骨架线驱动物体变形的效果^[13]。YOU等^[14-15]通过定义3D模型的轮廓线和脊柱线,以及考虑张力和弯曲应力等物理性质的作用,提出了构造关于轮廓线和脊柱线的微分方程的办法,实现了利用控制曲线形状驱动整个曲面变形的目的。UGAIL等^[16]在曲面变形设计中,定义了样条曲面的对称轴脊线,构造控制曲面变形的微分几何方程,通过调整脊线实现交互控制曲面变形。利用满足弹性等物理性质的骨架线变形来驱动曲面整体变形是外形设计的重要办法,这种方法既保证骨架线变形服从物理约束条件,又避免针对对象整体的物理变形计算,增加曲面变形的可控性。但是,目前骨架线驱动的曲面变形算法主要解决体积网格表示的实体变形,或二维封闭对称的曲面变形问题,在解决一般的非封闭二维曲面的曲面变形方面存在一定的问题。

在综合基于能量属性和非能量属性的变形方

法特点的基础上,本文提出一种具有能量法特点的曲面变形算法。一方面以能量变分法控制骨架线的形状变形,获取满足约束条件的光顺骨架线,保证曲面整体形状变形一致性;另一方面利用扩散法将骨架线变形结果扩散到曲面的其余区域,避免了对整张变形曲面进行能量方程求解,大幅地降低了曲面变形的计算量。同时,在变形过程中,采用曲面的微分几何细节约束来控制目标曲面的几何变形,维持曲面变形过程中细节特征的基本不变性。

1 曲面骨架线网的提取与变形

曲面骨架线变形可以分为三个层次,首先,根据曲面的曲率分布特点,提取曲面的骨架线,或者指定作为约束条件的曲线为新增骨架线;然后,针对曲面的特定骨架线,求解满足给定约束条件的变分曲线;最后,依据骨架线变形扩散原理,控制未施加约束的曲面骨架线变形。

1.1 提取曲面骨架线

曲面的骨架线定义为二维曲面上的一维特征线,这些特征线所在曲面上的曲率值是其相邻区域的曲面曲率的极大值。利用曲面骨架线具有的特殊曲率性质,沿着参数曲面 $S(u,v)$ 的 u 方向(或 v 方向),提取曲面参数等值线 v_0 对应的 u 方向曲线的曲率极值对应点,沿着 v 方向将这些对应点连接成骨架线。参数等值线 v_0 对应的空间曲线表示为参数等值线 $I(u)=(X(u),Y(u),Z(u))$,其中 $(X(u),Y(u),Z(u))$ 是曲面等值线上点的 $(x(u,v_0),y(u,v_0),z(u,v_0))$ 简写形式。参数等值线 $I(u)$ 的曲率数学公式表示为

$$VAL_K(u) = \{[(X(u)'Y(u)'' - X(u)''Y(u)')^2 + (Y(u)'Z(u)'' - Y(u)''Z(u)')^2 + (Z(u)'X(u)'' - Z(u)''X(u)')^2] / ((X(u)')^2 + (Y(u)')^2 + (Z(u)')^2)^{3/2}\}^{1/2} \quad (1)$$

求得函数 $VAL_K(u)$ 的局部极值,提取极值对应点 $p(u,v_0)$,这样得到极值点沿着 v 方向生成的骨架线。同样的原理可以求取沿着 u 方向的曲面骨架线。

1.2 基于变分原理的骨架线变形

根据产品外形设计需求,施加不同的几何约束是几何造型中不可缺少的部分。设计者提供曲线上的位置待移动点,或者给定约束点,同时要求变形过程中曲线边界满足一定的几何连续性。利用变分原理求解满足约束的变形曲线,使得曲线变形后逼近或经过插值点,从而有效地控制骨架线的变形趋势。

根据约束条件的强弱可以分为硬约束与软约束。硬约束是保持某些几何条件固定不变,例如,指定的约束点在整个变形过程中保持不变,或者曲线的边界满足一定的几何连续条件,如 C^0 , G^1 , G^2 连续,可以通过保持曲线边界附件相邻控制点的位置不变或满足特定比例关系等实现给定的几何连续性。软约束基于最小二乘法原理控制约束量的变化,考虑到曲线变形的整体光顺效果,曲线变形后不必通过指点的约束点,逼近给定的约束点也可以达到设计要求。变形过程中,将目标曲线两端边界需要满足特定的几何连续条件视为硬约束条件,而为控制曲线变形添加的点约束、曲面固有的拉伸和弯曲势能约束条件可视为软约束条件,在此基础上,利用变分法得到控制目标曲线变形的优化函数。

给定曲线 $\mathbf{x}(t)$ 插值点的新位置约束点 $\mathbf{x}(t_0)$, 控制曲线变形的大体轮廓变形趋势,该部分可作为曲线的能量函数,数学表达式为

$$E_1 = \|\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(t_0)\|^2 \quad (2)$$

另一方面,增强曲线光顺性效果,曲线变形需要满足拉伸和弯曲形变势能条件

$$E_2 = E_{bend} + E_{stretch} \quad (3)$$

式中 $E_{bend} = \int \|\mathbf{x}''(t)\|^2 dt$;

$$E_{stretch} = \int \|\mathbf{x}'(t)\|^2 dt。$$

将以上控制曲线变形的约束能量函数联系在一起,构造变分函数 $E(\mathbf{x}(t))$

$$E(\mathbf{x}(t)) = \alpha E_1 + (1 - \alpha) E_2 \quad (4)$$

式中, α , $1 - \alpha$ 为上述两类约束条件影响曲线变形程度的权重系数 ($0 \leq \alpha \leq 1.0$)。便于简化计算,常设定系数为等比例的 ($\alpha = 0.5$)。

B 样条曲线的数学表达式为 $\mathbf{x}(t) = \sum_{i=0}^{m+d-1} N_{i,d}(t) \mathbf{P}_i$,

式中 $N_{i,d}$ 为 d 阶 B 样条基, \mathbf{P}_i 为控制点矩阵矢量, m 为节点数目。将 B 样条曲线的表达式代入式(4),省略常数项,函数可以化简为

$$\bar{E}(x) = \mathbf{P}^T \mathbf{A} \mathbf{P} + \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (5)$$

式中 \mathbf{P} ——控制点矩阵矢量;

\mathbf{A} , \mathbf{B} ——关于基函数的微分形式的矩阵矢量。

相邻的曲线边界满足特定的几何连续条件,由于 G^1 几何连续比 C^1 连续便于施加约束,仅要求边界点左右两侧曲线的切向量变化幅度值成比例,方向一致,因此,有较大的设计灵活性。构造曲线的边界点处几何连续条件,满足 G^1 几何连续条件曲线的控制点分为两部分,即可变化的控制点与保持不变的点。在曲线变分变形过程中,预先调整曲

线边界的临近区域控制点和节点比例关系,保持控制点和相关节点的相关设置不变。

以上问题的求解方法是把等式(5)作为求解二次优化函数式(4)的约束条件,求解转化为无约束二次求解问题,这样可以获取受给定约束点控制的光顺变形曲线。

1.3 基于扩散效应的骨架线网变形

曲面局部骨架线的变形引起曲面全局骨架线网的变形,为描述此类曲面骨架线网的变形,引入骨架线控制点扩散算法。给定变形骨架线的控制点位移运动可扩散到其余未变形骨架线的控制点,从而控制曲面骨架线网变形。依据不同变形效果,曲面骨架线划分为三部分,将变形的骨架线称为主控制线,记为 H ,曲面不变形的边界线为固定不变的边界线,记为 F ,受曲线变形影响的曲面骨架线为待变形曲线,记为 R 。 R 集合的曲线控制点变化的幅度由该控制点到主控制线和固定边界线的距离度量决定,在此定义 R 集合的曲线控制点 \mathbf{P} 的影响因子函数 $s(\mathbf{P})$ 表示这种关系。控制点 \mathbf{P} 到主控制线的控制点测地线距离记为 $d_H(\mathbf{P})$,控制点 \mathbf{P} 到固定边界线的相关控制点的测地线距离记为 $d_F(\mathbf{P})$,影响因子函数 $s(\mathbf{P})$ 表示为

$$s(\mathbf{P}) = \frac{d_F(\mathbf{P})}{d_F(\mathbf{P}) + d_H(\mathbf{P})} \quad (6)$$

$$s(\mathbf{P}) = \begin{cases} 0 & \mathbf{P} \in F \\ s_0 & \mathbf{P} \in R \\ 1 & \mathbf{P} \in H \end{cases}$$

式中, $s_0 \in (0, 1)$ 。

R 集合的曲线任意控制点 \mathbf{p}_0 变形后变为点 \mathbf{p}'_0 ,过程可表示为

$$\mathbf{p}'_0 = (1 - s(\mathbf{p}_0)) \mathbf{p}_0 + s(\mathbf{p}_0) \mathbf{T}(\mathbf{p}_0) \quad (7)$$

式中, $\mathbf{T}(\mathbf{p}_0)$ 为以测地线距离度量,距离点 \mathbf{p}_0 最近的 H 主控制曲线控制点 \mathbf{p}'_1 的位置位移变化量。

点 \mathbf{p}'_1 在曲线未变形之前为点 \mathbf{p}_1 , $\mathbf{T}(\mathbf{p}_0)$ 可以表示为

$$\mathbf{T}(\mathbf{p}_0) = \mathbf{p}'_1 - \mathbf{p}_1 \quad (8)$$

式(6)、(7)表明, R 集合的曲线控制点变化幅度从靠近 H 集合的曲线到边界 F 的曲线,变形骨架线对未变形骨架线的影响逐渐减弱。

2 骨架线驱动的曲面变形

在曲面几何变形设计的整个过程中,维持曲面的整体光顺性和保持曲面的细节特征是外形设计的重要参考因素。曲面光顺性的研究已有各类不同的

解决方法，可以利用主曲率平方积分生成的薄板能量函数，通过求解非线性优化函数产生光滑曲面；也可以根据曲面的平均曲率几何性质定义偏微分方程控制曲面的光滑过程。以上方法偏重于解决曲面整体光滑问题，控制微分坐标的优化问题可以兼顾曲面的光滑和几何特征不变性。移植原曲面拉普拉斯微分坐标^[17]可以有效保存曲面的几何细节特征，但由于原曲面和对应目标曲面的微分坐标提取点所对应的面积变化幅度不一致，直接将微分坐标添加到目标曲面可能导致几何特征失真，几何特征的幅度变化过大或者过小，对移植的曲面微分坐标进行相应的调整可以解决这个问题。目标曲面的骨架线变形导致相应的曲面局部面积增大或者减小，使得对应点的法向发生变化。对提取的拉普拉斯微分算子施加旋转的法向要做一定的旋转 T ，其中旋转的角度等于原曲面变形前后对应点法向的夹角。考虑到骨架线变形引起目标面对应点的法向量以及局部面积的变化，按照曲面变形前后的面积比，对提取的原曲面的拉普拉斯微分坐标施加放缩变换。按照曲面变形前后对应点的法矢量的变化，对微分坐标作旋转变换，经过放缩和旋转处理的拉普拉斯微分坐标 δ_i 表示为

$$\delta_i = (A'_i / A_i) \cdot T(L(p_i)) \quad (9)$$

式中 p_i ——原曲面的控制点；
 L ——均匀拉普拉斯变换；
 A_i ——原曲面点 p_i 对应的局部网格面积；
 A'_i ——原曲面变形后的控点 p'_i 对应的局部网格面积；
 T ——将原曲面控制点 p_i 的法矢量旋转到变形后的控制点 p'_i 法矢量方向的变换。

骨架线驱动目标曲面的优化变形过程需要考虑三个影响因素。

(1) 统一样条曲面的 u 和 v 方向节点矢量，以样条骨架线的节点矢量为标准重新构造曲面的节点矢量和控制点网格。

(2) 目标曲面的拉普拉斯微分坐标以式(9)得到的拉普拉斯微分坐标为目标微分坐标。

(3) 曲面骨架线的控制点作为目标曲面控制点的位置软约束条件，控制曲面的控制点的变化。

满足上述曲面变形要求，构造保持曲面的光滑性和几何细节特征不变性的目标优化函数

$$\min \left\{ \sum_{i \in P_C} \beta \|L(p'_i) - \delta_i\|^2 + \sum_{i \in H_C} (1 - \beta) \|p'_i - p_i\|^2 \right\} \quad (10)$$

式中 P_C —— R 集合与 H 集合的骨架线上的控制点标记集合；

H_C —— H 集合的骨架线上的控制点标记集合；
 p'_i ——曲面优化后的控制点；
 β ——权重值 ($0 \leq \beta \leq 1$)。

式(10)第一项使得曲面变形后的拉普拉斯坐标与目标曲面变形前保持一致，从而维持曲面变形过程中的几何细节特征的相对不变性；第二项对于变形区域的控制点施加位置约束，避免控制点产生较大的位移，导致曲面畸形变形。调节权重的大小，可以控制原曲面的拉普拉斯微分坐标和骨架线的控制点之间的权重。以曲面边界线作为已知固定不变的硬约束条件，将目标优化函数式(10)转化为线性方程组求解，得到保持几何细节特征的光顺的目标曲面。

3 曲面形状变形的算法流程

在曲面变形设计过程中，首先根据设计者给定的目标约束点，驱动骨架线变形，接着利用变分方法求解满足光滑性的变形曲线，然后，根据骨架线变形的扩散效应引起其余未变形骨架线的变形，以原曲面控制点的拉普拉斯微分坐标为约束条件控制目标曲面的生成，整个算法流程(图 1)可以分为七个步骤。

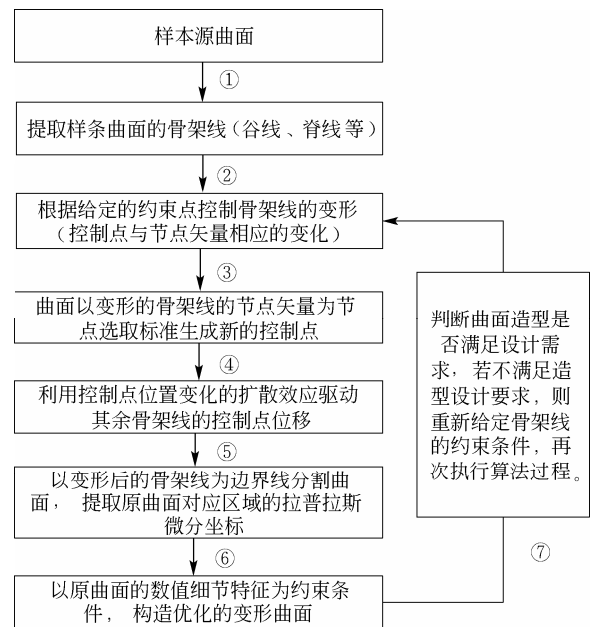


图 1 骨架线驱动曲面变形的算法流程

(1) 分析目标产品造型曲面，计算曲面的参数 u 方向(或 v 方向)曲率函数 $VAL_K(u)$ 的局部极值，提取局部极值对应的曲线极值点，沿着曲面的 v 方向(或 u 方向)连接极值点集合，生成曲面的骨架线，这些骨架线一般是曲面的脊线、谷线。根据曲面几何特征设计要求，如果目标曲面需要添加原曲面不

存在的几何特征,这就需要指定曲面的某些约束曲线为骨架线,这些非原曲面特征曲线的骨架线作为约束条件控制曲面变形。新添加的骨架线在曲面变形后变为代表对象曲面新增几何特征的骨架线。

(2) 选取待变形骨架线,根据预先设想的曲线形状为目标,给定骨架线变形趋势的目标约束点。将这个问题转化为数学问题,以等式(5)为控制曲线变形的方程,求解方程的二次优化问题,得到光滑的曲面变形骨架线。

(3) 步骤(2)生成的骨架线之间具有不同的节点矢量,以其中一个曲线节点矢量为标准矢量,通过插入其他同的节点矢量加密生成新的标准节点矢量,然后以标准节点矢量为骨架线和曲面的节点矢量,重新计算骨架线和曲面控制点集合。

(4) 以指定骨架线变形前后的控制点位移变化矢量值为已知条件,以曲面边界线的控制点零位移矢量为边界条件,利用曲面骨架线变形扩散效应公式(7)计算其余的骨架线的控制点位移矢量,计算曲面骨架线网的变形结果。

(5) 提取原曲面控制点的拉普拉斯微分坐标,根据等式(9),按照原曲面和目标曲面对应点之间的法向和对应曲面特征关系,调整拉普拉斯微分坐标值的方向和大小,使得曲面变形前后的几何细节特征保持相对不变。

(6) 以曲面骨架线控制点与经过步骤(5)处理的原曲面的拉普拉斯微分坐标为约束曲面的优化变形的条件,设定两个约束条件之间的权重系数 β ,求解曲面变形的目标优化函数式(10),计算目标曲面变形后的控制点,生成满足骨架线约束条件并且保持原曲面几何细节特征的光顺曲面。

(7) 设计者根据实际设计的需求,判断生成的光顺曲面是否达到预期的实际要求。如果对于曲面的造型不满意,可以返回步骤(2)重新设定约束点控制曲面骨架线的变形,进一步给出不同的曲面造型设计结果。

4 应用实例与分析

以汽车外形曲面设计为应用对象,通过改变曲面骨架线几何特征形状,以及添加或减少曲面骨架线等方法,实现了多种曲面关键几何特征的变形设计。

4.1 基于骨架线形状变化的曲面变形设计

以图 2 所示的汽车前盖外形曲面为目标曲面,曲面中轴对称区域隆起的几何特征是目标关键特征。根据曲面特征线的曲率与相邻区域的曲率之间

的关系,计算曲面横向截线的局部曲率极值对应的极值点,沿着曲面的纵向方向连接极值点,执行步骤(1)生成曲面的骨架线(图 3)。图 3 中的中轴骨架线反映了目标关键特征的变形趋势。根据目标关键特征的变形需求,给定约束相应中轴骨架线变形的点约束条件。基于曲线变形的变分原理,执行算法步骤(2),中轴曲线形状由较为平直的曲线变形为拱形曲线(图 4)。由于变形骨架线对于其余未指定约束条件的骨架线变形的扩散效应,可以生成新的曲面骨架线网,以这些骨架线为软约束条件,曲面边界线为硬约束条件,利用预先提取的源曲面控制点几何细节特征作为目标曲面几何变形的几何细节约束条件,反复执行算法步骤(3)~(7),可以生成满足各种设计要求的变形曲面(图 5)。

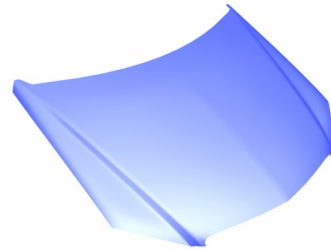


图 2 目标曲面 1

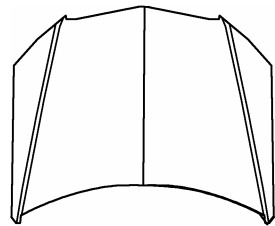


图 3 目标曲面 1 的骨架线



图 4 中轴线拉伸变形

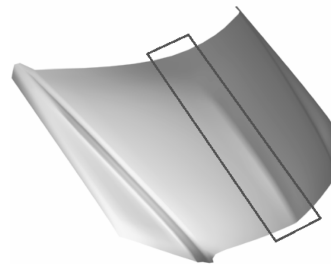


图 5 中轴线区域隆起变形后的新曲面

4.2 基于增加骨架线的曲面变形设计

在曲面的变形设计过程中,针对第 4.1 节中的

曲面骨架线施加不同的约束，进而可以增强或减弱原曲面已存在的几何特征，但是，并没有增加新的曲面几何特征。通过添加骨架线可以克服这种局限性，如图 6 所示，在图 3 所示骨架线的基础上增加两条关于中轴线对称的骨架线①与②。类似于第 4.1 节的分析过程，将中轴线沿着曲面法向向上拉伸，两侧新增加的骨架线沿着曲面法向向下拉伸变形。利用骨架线变形扩散法以及曲面微分细节的约束条件，得到新曲面造型，该曲面的左侧线框内的曲面向上凸起的几何特征(图 7)。

如图 8 所示的目标曲面可以通过类似的方法处理添加几何特征，在曲面边界线基础上增加 5 条特征骨架线(图 9)，以此为软约束条件生成如图 10 所示的凸起的几何形状特征。以上例子证实了所提出的方法仅仅通过添加约束曲面变形的骨架线，可以得到新的曲面几何特征。因此，提供了一种更加易于实现的添加曲面几何特征的方式。

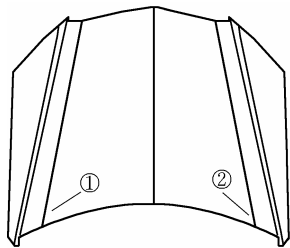


图 6 增加目标曲面 1 的骨架线

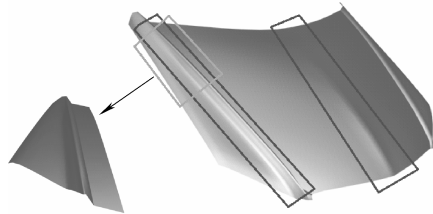


图 7 特征骨架线驱动的曲面变形

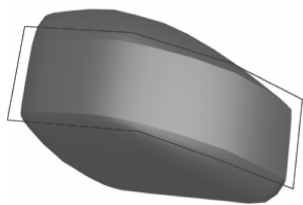


图 8 目标曲面 2

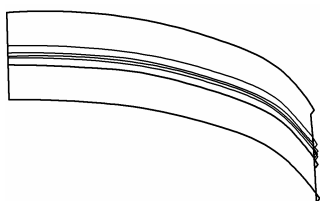


图 9 增加目标曲面 2 的骨架线

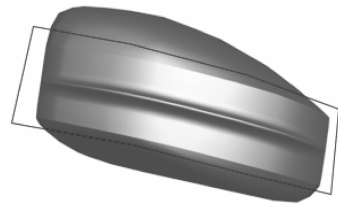


图 10 目标曲面 2 变形后的新特征

4.3 基于骨架线增删的曲面变形设计

位于汽车前车盖的目标曲面(图 11)具有向下凹陷的凹槽型几何特征，几何骨架线如图 12 所示。通过删除图 12 中的靠近边界的两条骨架线，改变其中一条曲面边界线的形状，同时增加控制曲面生成新几何特征的四条对称的骨架线(图 13)，从而形成控制曲面变形的约束条件。以靠近曲面中部一侧的微分坐标代替删除特征线对应的曲面区域的微分坐标，执行算法流程的过程同于第 4.1 节的过程，生成的新曲面，去除原曲面整体凹槽特征，同时具有中部对称区域向上凸起的新几何特征(图 14)。

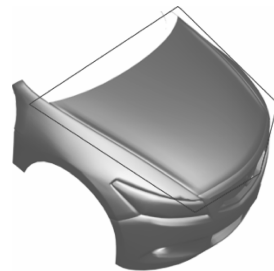


图 11 目标曲面 3

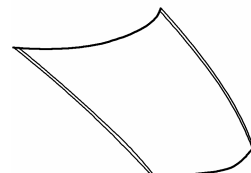


图 12 从目标曲面 3 提取的骨架线

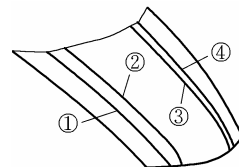


图 13 增加目标曲面 3 的骨架线

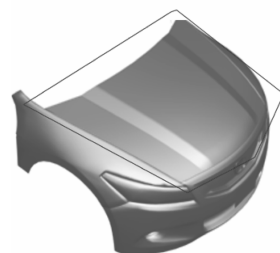


图 14 以新骨架线为约束生成的曲面

通过实例分析可知,与目前已有方法相比,提出的变形设计方法具有以下优点。

(1) 传统的基于能量法的曲面变形,每次调整约束条件生成新的曲面过程中,计算量巨大且可能出现曲面畸形变形结果,本文提出的方法仅对骨架线进行基于能量法的计算,利用骨架线的变形扩散效应有效地将变形扩散到曲面的其余部分,保证了整体曲面变形趋势的一致性,降低了计算量。

(2) 传统的曲面变形方法,难以将设计意图转化为精确的几何约束条件控制曲面生成理想的形状。本文提出的方法通过调整骨架线网改变曲面关键形状特征的变化,增强了曲面形状特征设计的控制能力,同时,将曲面的微分几何细节特征作为约束曲面变形的条件,避免传统方法变形过程中的几何细节丢失现象。

5 结 论

(1) 针对机械产品曲面形状设计问题,提出利用曲面骨架线变形控制曲面形状的设计方法,兼顾了曲面的物理和几何属性,一方面,通过机械产品曲面具有的能量属性获取骨架线的光顺优化形状,另一方面,利用扩散法将骨架线的变形扩散到曲面的其余部分,避免了基于能量法对整体曲面进行曲面变形计算,降低了计算量。

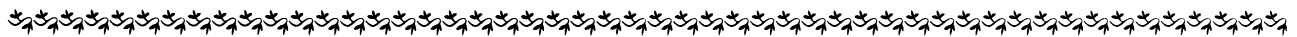
(2) 采用基于拉普拉斯微分算子的变形曲面细节约束,考虑了曲面变形过程中的曲面的微分几何特性,避免了单纯依赖样条曲面的几何特性实现曲面变形容容易导致局部几何特征失真的情况,保持了曲面变形前后的几何细节的协调一致性。

(3) 提出的方法综合运用了曲线能量变分法、曲面变形扩散法、微分坐标约束法等方法,可以得到高质量的产品外形特征变形设计结果。提出的方法在汽车等产品外形设计中进行了应用验证。

参 考 文 献

- [1] TERZOPOULOS D, PLATT J, BARR A, et al. Elastically deformable models[J]. *Computer Graphics*, 1987, 21(4): 205-214.
- [2] POURAZADY M, XU X. Direct manipulations of B-spline and NURBS curves[J]. *Advanced in Engineering Software*, 2000, 31: 107-118.
- [3] 王青, 柯映林, 李江雄. 基于力密度方法的 NURBS 曲线和曲面变形框架[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(3): 136-142.
WANG Qing, KE Yinglin, LI Jiangxiong. Shape modification of NURBS curves and surfaces based on force density method[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(3): 136-142.
- [4] 袁天然, 廖文和, 程筱胜, 等. 三维牙颌模型的牙齿形状建模方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22(4): 703-710.
YUAN Tianran, LIAO Wenhe, CHENG Xiaosheng, et al. Tooth shape modeling scheme for 3D dental model[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*. 2010, 22(4): 703-710.
- [5] 李娜, 罗尧治. 基于完备能量模型的 B 样条曲面造型技术[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2009, 21(6): 713-720.
LI Na, LUO Yaozhi. The modeling technique of B-Spline surface based on a complete energy model[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2009, 21(6): 713-720.
- [6] 朱心雄, 等. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
ZHU Xinxiong, et al. The modeling technique of free-form curve and surface[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [7] SEDERBERG T W, PARTY S R. Free-form deformation of solid geometric models[J]. *Computer Graphics*, 1986, 20(4): 151-160.
- [8] WANG Z, ZHOU L, WANG X. Direct manipulation of B-spline surfaces[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 18(1): 103-108.
- [9] 陈凯云, 谢晓芹. 节点矢量影响 NURBS 曲线的规律研究与应用[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(10): 294-299.
CHEN Kaiyun, XIE Xiaoqin. Research on how the knot vector influences non-uniform rational B-spline curve[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(10): 294-299.
- [10] 刘胜兰, 周儒荣, 张丽艳. 用主动轮廓模型优化网格曲面上的特征线[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(4): 439-448.
LIU Shenglan, ZHOU Rurong, ZHANG Liyan. Feature line optimization on triangular surfaces using active contour model[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*. 2004, 16(4): 439-448.
- [11] TEICHMANN M, TELLER S. Assisted articulation of closed polygonal models[C]// In *Computer Animation and Simulation '98*, Proceedings of the Eurographics Workshop in Lisbon, Portugal, 1998: 87-102.
- [12] CAPELL S, GREEN S, CURLESS B, et al. Interactive

- skeleton-driven dynamic deformations[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 586-593.
- [13] CHEN C, TSAI M, LIN I, et al. Skeleton-driven surface deformation through lattices for real-time character animation[J]. The Visual Computer, 2013, 29(4): 241-251.
- [14] YOU L H, YANG X, YOU X Y, et al. Shape manipulation using physically based wire deformations[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2010, 21(3-4): 297-309.
- [15] YOU L H, TANG B P, YOU X Y, et al. Creating and manipulating surfaces through physics-based curve deformations[J]. ICGST-GVIP Journal, 2010, 10(4): 35-46.
- [16] UGAIL H. Partial differential equations for geometric design[M]. London: Dordrecht Heidelberg, 2011.
- [17] SORKINE O, COHEN-OR D, LIPMAN Y, et al. Laplacian surface editing[C]// Proceeding SGP '04 Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM Siggraph Symposium on Geometry Processing, New York, NY, USA, 2004: 175-184.
- 作者简介:程丰备,男,1982年出生,博士。主要研究方向为计算机图形学、产品数字化设计等。
E-mail: fbchen@zju.edu.cn
- 刘振宇,男,1974年出生,教授,博士研究生导师。主要研究方向为产品数字样机仿真、虚拟现实等。
E-mail: liuzy@zju.edu.cn
- 谭建荣,男,1954年出生,教授,博士研究生导师,中国工程院院士。主要研究方向为机械设计及理论、工程图形学、计算机集成制造等。
E-mail: egi@zju.edu.cn
- 方锡武,男,1971年出生,博士。主要研究方向为计算机图形学、计算机辅助设计等。
E-mail: fangxiwu@tzc.edu.cn
- 裘迪,男,1983年出生,博士后。主要研究方向为计算几何、数字化设计与制造等。
E-mail: qc@zju.edu.cn



国家自然科学基金委员会机械工程学科 2012/2013 年度结题项目简介

基于滑转沉陷和轮刺效应的月球车轮地相互作用地面力学及其应用研究

项目负责人:高海波(E-mail: gaohaibo@buaa.edu.cn)

依托单位:哈尔滨工业大学

项目批准号:50975059

1. 项目简介

月球车轮地相互作用力学是进行月球车设计、动力学仿真、运动控制和月壤力学参数估计的基础,具有重要的理论研究和应用前景。目前月球车研究中主要采用传统车辆地面力学理论,不能有效反映车轮的高滑转沉陷和轮刺效应等问题,而且传统地面力学理论对月球车设计、控制、实时仿真和力学参数辨识等方面无法提供可直接借鉴的研究成果。本项目研究了:①月球车轮地相互作用滑转沉陷问题;②轮刺效应、车轮构型及尺寸对轮地相互作用力学的影响;③基于驱动效率的车轮构型及尺寸参数设计方法;④松软崎岖地形中被动关节式月球车的多轮协调控制方法。

2. 主要创新点及主要研究进展

(1) 根据实际月球车的设计参数,设计加工系列刚性车轮,采用上海航天技术研究院提供的模拟月壤,在实验室开发的车轮-土壤相互作用测试系统上进行试验测试,通过系列试验,揭示了滑转沉陷效应、轮刺效应、载荷效应和尺寸效应机理。

(2) 分析了车轮的轮刺效应和滑转沉陷两个关键问题,建立了星球车轮地作用应力分布模型,在此基础上推导了高保真度星球车车轮滑转前进模型,并针对载荷效应进行了修正。考虑参数辨识和星球车控制及动力学仿真对模型的要求,建立了两种轮地相互作用解析解偶模型,并实现了土壤力学参数的在线辨识。

(3) 系统地进行了车轮驱动力学性能评价,总结了车轮相对和绝对驱动性能指标,提出了车轮尺寸和轮刺参数的设计原则和方法。

(4) 实现了松软崎岖地形中基于地面力学的星球车高保真度动力学建模和仿真,推导了基于地面力学的关节式移动机器人通用动力学模型,进行了星球车高保真度动力学仿真,基于目标追踪法设计路径跟踪策略,推导了松软崎岖地形中探测车的非完整运动学模型,提出了基于滑移补偿的转向控制策略。