

NURBS曲面在气动外形变形中的应用

马晓永*, 张彦军, 雷武涛

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘 要: 针对翼吊布局飞机复杂气动外形, 建立了基于样条 (NURBS, 非均匀有理B样条) 曲面和曲面叠加技术的曲面变形方法。在对样条曲线性质分析的基础上, 以DLR-F6飞机为实例, 对其机翼翼根、短舱挂架局部进行曲面网格变形, 结果表明该方法能有效表述其复杂几何外形及型面变化特性, 并且具有较好的局域性、可控性和光滑性。该方法可有效应用于吊舱挂架等复杂气动外形的建模、表面网格变形及气动外形优化设计等。

关键词: 气动外形; 样条曲面; 短舱挂架

中图分类号: V211.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2014) 03-0075-4

飞行器的复杂几何外形参数化描述是飞行器设计的核心模块之一^[1], 其表述方法及精度直接影响到飞行器的气动性能和外形优化结果^[2]。近几十年来, 已经建立了许多飞行器几何外形参数化方法, 例如型函数法、样条法、偏微分方程法、网格点法等, 但这些方法都各有缺点, 要么难以保证局部曲面的控制, 要么数据计算量很大, 表面网格生成困难^[3]。样条曲面方法是少有的能够各方面兼顾的参数化方法, 在局部曲面控制、控制点数量、表面网格变形方面有较强的优势^[4]。而且, NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline, 非均匀有理B样条) 是一种基于自由型面B样条和初等解析曲面表述相结合的几何建模方法, 现已成为STEP标准中自由曲线、曲面唯一表述形式, 广泛应用于CAD/CAM和计算机图形学等工程研究领域^[5]。

这里从分析NURBS的曲线性质入手, 研究控制点变化、曲线阶数、权重系数以及节点对曲线的影响规律, 以DLR-F6飞机带吊舱构型为例, 详细介绍其上翼面、短舱挂架前缘外形变形操作方法及步骤。

1 样条性质与曲面变形

1.1 NURBS方程

对于一个NURBS曲面 $\vec{S}(u, v)$, u 和 v 为自变量, 若 u 方

向为 p 阶, 控制点数目为 $n+1$, v 方向为 q 阶, 控制点数目为 $m+1$, 则:

$$\vec{S}(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,j}(u, v) \vec{P}_{i,j} \quad (1)$$

其中:

$$R_{i,j}(u, v) = \frac{N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}}{\sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^m N_{k,p}(u) N_{l,q}(v) w_{k,l}} \quad (2)$$

式中: $\vec{P}_{i,j}$ 为控制点矢量, 总数目为 $(n+1) \times (m+1)$, $w_{i,j}$, $w_{k,l}$ 为权重系数; $N_{i,p}(u)$, $N_{j,q}(v)$, $N_{k,p}(u)$ 和 $N_{l,q}(v)$ 为分别定义在非递减节点矢量 $\vec{U}(u)$ 、 $\vec{V}(v)$ 上的基函数, 即:

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (4)$$

$$\vec{U}(u) = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{r-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \right\} \quad (5)$$

$r = n + p + 1$

同理可以给出 $N_{j,q}(v)$ 和 $\vec{V}(v)$ 的表达式。

收稿日期: 2013-07-15; 退修日期: 2013-12-10; 录用日期: 2014-02-28

*通讯作者. Tel.: 029-86832602 E-mail: mxycardc@mail.ustc.edu.cn

引用格式: MA Xiaoyong, ZHANG Yanjun, LEI Wutao. Application of aerodynamic shape deformation based on NURBS surface[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(03): 75-78. 马晓永, 张彦军, 雷武涛. NURBS曲面在气动外形变形中的应用[J]. 航空科学技术, 2014, 25(03): 75-78.

1.2 样条性质

从式(3)~(5)中可以看出,其基函数为分段形式,这种特性保证了NURBS曲面(线)的局域性,即控制参数的改变仅对曲面(线)较小的范围内产生影响。控制参数可以是控制点阵 $\Delta \vec{P}_{i,j}$ 、阶数 p 及 q 、节点 $\vec{U}(u)$ 、 $\vec{V}(v)$ 和权重系数 $w_{i,j}$,它们单独或一起控制整个NURBS曲面(线)。

为了便于分析,以二维NURBS曲线为例,图1中给出了这些参数的变化对NURBS曲线的影响规律。七个控制点的坐标为: $P_0(0.5, 3)$, $P_1(1.5, 5.5)$, $P_2(4.5, 5.5)$, $P_3(3, 1.5)$, $P_4(7.5, 1.5)$, $P_5(6, 4)$, $P_6(8.5, 4.5)$ 。

图1(a)给出了控制点 P_2 移动引起的NURBS曲线变化,其中: $P_2'(3.5, 4.5)$ 、 $P_2''(3, 4)$ 。NURBS曲线阶数取3,权重系数全部取1.0,节点取0,0,0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0,1.0,1.0,1.0。可以看出曲线在随着控制点的移动而改变,并且曲线的后半部分几乎没有变化,不同控制点下的NURBS曲线仍保持着较好的光滑性。

从图1(b)可看出阶数改变引起的NURBS曲线变化规律:阶数等于3时,NURBS曲线和控制点的连接直线相切,随着阶数增加,拟合线逐渐远离相切的直线,在阶数为4时,由于节点总数必须为控制点数和阶数之和,节点的边界取值稍有不同,可以看出起始边界多取一个“0”和末边界多取一个“1.0”带来的拟合曲线差异,和阶数为3时相比较,在拟合线的前、后部分变化较大,中间部分几乎重合。

图1(c)给出了在阶数为3时不同节点取值时的拟合曲线,可以看出,第四个节点值分别取0.1,0.2和0.3时拟合曲线与控制点连接直线相切的位置不同,以 P_1 和 P_2 之间为例,取0.1时靠前,取0.3时靠后,后半部分拟合线没有变化。控制点权重系数的变化规律和节点变化规律相似,图1(d)给出了 P_2 点的权重系数从0.5~1.5变化时不同的拟合曲线。

1.3 曲面变形

对于NURBS曲面,其实质是一个由 $(n+1) \times (m+1)$ 个控制点 $\vec{P}_{i,j}$ 形成的以 u, v 为自变量的网格面(结构化网格),当外形发生变化时,采用曲面叠加技术实现曲面变形:

$$\vec{S}_{\text{new}} = \vec{S}_{\text{initial}} + \Delta \vec{S}(u', v') \quad (6)$$

即在原始型面 $\vec{S}_{\text{initial}}$ 的基础上叠加一个型面变化量 $\Delta \vec{S}(u', v')$,其是由(1)式得到的一个NURBS曲面:

$$\Delta \vec{S}(u', v') = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,j}(u', v') \Delta \vec{P}_{i,j} \quad (7)$$

由(6)、(7)式可知,只需给定 $\Delta \vec{S}(u', v')$ 的NURBS曲面控制点、节点、权重系数等控制参数,即可控制型面的自由变化,且当 $\Delta \vec{S}(u', v')$ 时保证了 $\vec{S}_{\text{new}}$ 为原始型面,从而免去直接描述初始外形所带来不必要的麻烦。

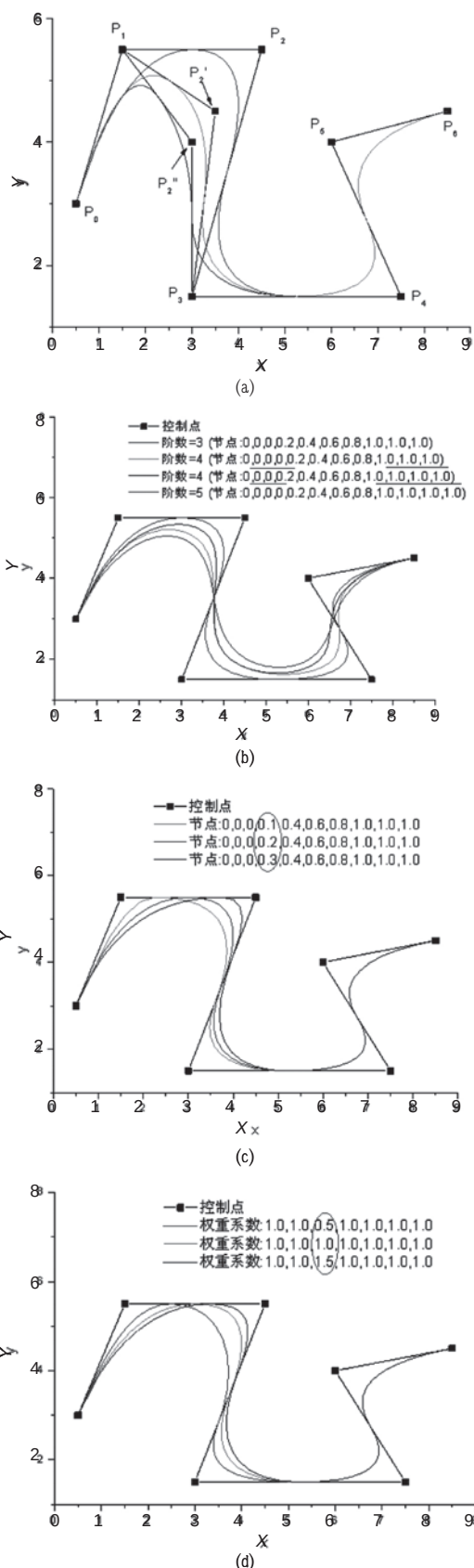


图1 NURBS控制参数的影响

Fig.1 The influence of NURBS control parameters

2 实例分析

考虑到翼吊布局飞机特殊的气动布局形式,以DLR-F6飞机(见图2)进行实例分析。对其机翼翼根附近上表面和短舱挂架前缘进行了NURBS曲面变形,由于可变的参数较多,这里只考虑控制点作为设计变量的情况。



图2 DLR-F6飞机气动布局

Fig.2 Aerodynamic configuration of DLR-F6 aircraft

DLR-F6飞机上翼面NURBS曲面变形过程如图3所示,具体算法如下:

第1步:取DLR-F6飞机机翼上翼面作为原始外形(图3(a)),进行上翼面特征线提取操作,考虑到机翼特殊的平面形状,沿展向提取特征线时,取翼根、翼梢和机翼内、外段连接处上翼面型线作为特征线,分别在机翼内、外段均匀分布取2条和3条特征线;对于弦向特征线,除了上翼面前、后缘线外,分别在5%,20%,50%和80%当地弦长位置提取特征线。

这样,整个上翼面共计14条特征线,其中沿翼展方向8条,弦向6条,特征线交叉点共计48个(图3(b))。

第2步:将14条特征线进行平面投影,若保持翼根、翼梢以及机翼前后缘线不动,可以在整个平面内获得24个控制点用以控制整个上翼面的变化量(NURBS曲面)。

第3步:对其中的一个控制点(翼根前缘附近,图3(c))进行操作,让其在翼面垂直方向运动,从而形成一个新的NURBS曲面(图3(d)~(e)),从图中可以看出,只是在变化的控制点附近曲面形状发生了改变,而且整个曲面有很高的光顺性。

第4步:将新曲面叠加到原始的上翼面上,在翼根前缘附近便有一小鼓包外形(图3(f)),而其它区域型面保持不变,整个上翼面网格变形完成。

同理,当两个或多个控制点变化时,便实现整个翼面的自由变形操作,如图4所示。

考虑到短舱挂架外形过于复杂,仅选取挂架前缘附近(图5(a)~(b))进行曲面变形示例。先选取控制线位置,平面投影后从中取得9个控制点,对其中4个控制点操作,让其沿投影平面法向移动,获得NURBS曲面,最后再进行曲面叠加得到新的挂架外形(图5(c)),图5(d)给出了变形后的吊舱、挂架整体图示。

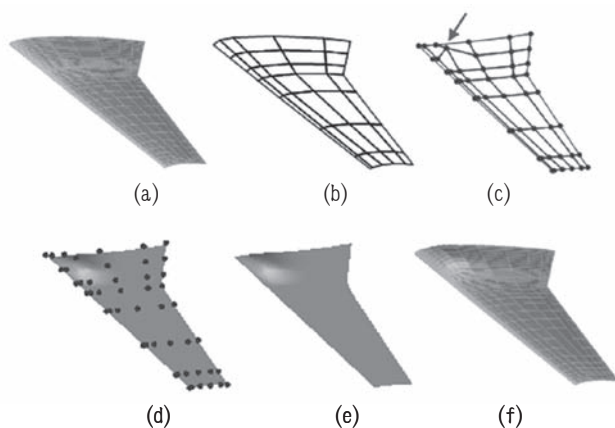


图3 DLR-F6飞机上翼面NURBS曲面变形过程

Fig.3 NURBS surface deformation process of DLR-F6 wing upper surface

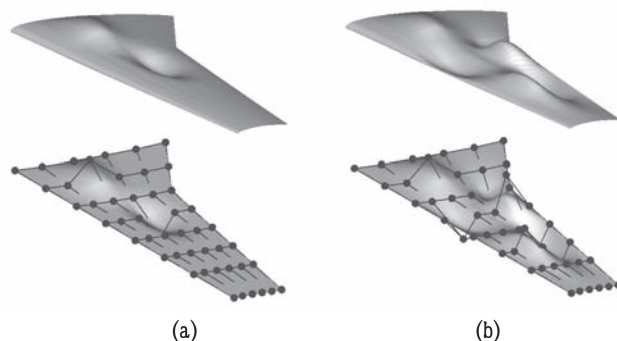


图4 多个控制点操作引起的翼面变形

Fig.4 Wing surface deformation caused by multiple control points operation

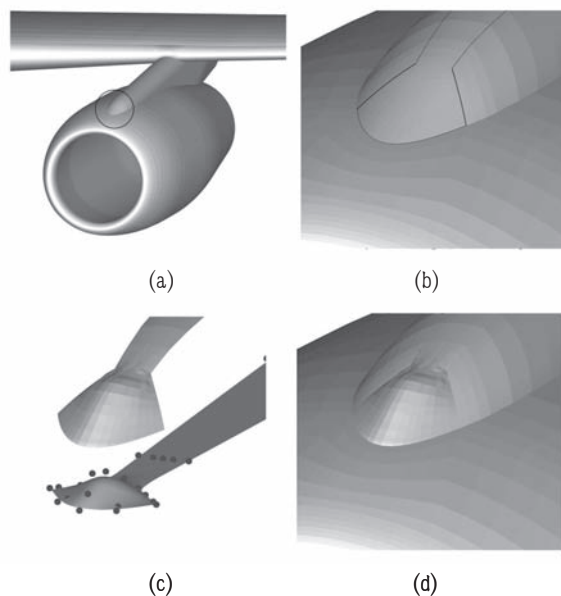


图5 DLR-F6飞机挂架前缘NURBS曲面变形过程

Fig.5 NURBS surface deformation process of DLR-F6 pylon front edge

从上述两个实例可以看出,选取的NURBS曲面变形方法简单,操作起来也比较方便,很容易对复杂型面进行局部修改,曲面叠加技术保证了参数化精度,NURBS的曲面性质保证了新型面的光顺性,较适合飞行器复杂气动外形的曲面变形。

3 结论

通过对样条曲线性质分析,建立了面向翼吊布局复杂气动外形的NURBS曲面变形方法。该方法不仅具有较好的局域性质,而且控制点、阶数、节点和权重系数都可作为设计变量,单独或一起控制整个NURBS曲面(线),操作性较强。在对DLR-F6飞机上翼面、短舱挂架前缘曲面变形过程中,创造性地通过提取表面特征线的方法获取控制点,结合曲面叠加技术实现了复杂曲面的自由变形。该方法可应用于复杂气动外形建模及优化设计。

AST

参考文献

- [1] Giampietro Carpentieri, Barry Koren, Michel J L van Tooren. Development of the Discrete Adjoint for a Three-Dimensional Unstructured Euler Solver. *Journal of Aircraft*, 2008, 45(1): 237-245.
- [2] Arash M, Patrice C, Siva K N. Survey of shape parameterization techniques and its effect on three-dimensional aerodynamic shape optimization. *AIAA-2007-3837*, 2007.
- [3] Wataru Y, Sylvain M, Gérald C. Geometry parameterization and computational mesh deformation by physics-based direct manipulation approaches. *AIAA Journal*, 2010, 48(8): 1817-1832.
- [4] 卫伟, 周来水, 王志国. NURBS表面上的曲线精确表达[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(1): 85-88.
WEI Hui, ZHOU Laishui, WANG Zhiguo. Exact representation of curves on NURBS surface[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2008, 40(1): 85-88. (in Chinese)
- [5] 马晓永, 范召林, 吴文华, 杨党国. 基于非均匀有理B样条方法的机翼气动外形优化[J]. 航空学报, 2011, 32(9): 1616-1621.
MA Xiaoyong, FAN Zhaolin, WU Wenhua, YANG Dangguo. The wing aerodynamic shape optimization based on NURBS[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(9): 1616-1621. (in Chinese)

作者简介

马晓永(1979—) 男, 博士后, 副研究员。主要研究方向: 飞行器气动布局与优化设计。

Tel: 029-86832602

E-mail: mxycardc@mail.ustc.edu.cn

张彦军(1980—) 男, 工程师。主要研究方向: 部件气动力设计。

雷武涛(1975—) 男, 工学硕士, 高级工程师。主要研究方向: 空气动力学研究。

Application of Aerodynamic Shape Deformation based on NURBS Surface

MA Xiaoyong*, ZHANG Yanjun, LEI Wutao

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: A free deformation method based on the B-Spline (NURBS, Non-Uniform Rational B-Spline) and surface superposition technique was presented for complex aerodynamic shape such as wing mounted nacelle-pylon configuration. The characteristic of parameters were analyzed with B-Spline curves case, and the application instances of surface grids deformation on wing and pylon of DLR-F6 plane shows that the method could describe complex surfaces and its deformation characteristic effectively, the control parameter only change its local surface, and it is easy to carry out. The method is feasible and applicable to model representation, surface grids deformation and aerodynamic shape optimization etc.

Key Words: aerodynamic shape; NURBS surface; nacelle & pylon

Received: 2013-07-15; Revised: 2013-12-10; Accepted: 2014-02-28

* Corresponding author. Tel: 029-86832602 E-mail: mxycardc@mail.ustc.edu.cn