

文章编号:1000-6893(2008)05-1364-06

长边条翼身融合过渡曲面的构造方法

宋道志, 马子领, 王建中

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

Generating Blending Surface with Long Fringe

Between Wing and Fuselage of Missile

Song Qiuzhi, Ma Ziling, Wang Jianzhong

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

摘要: 针对飞航导弹长边条翼身融合过渡曲面的构造展开研究, 为满足融合过渡曲面过渡线能够由设计人员确定和长边条面必须是等截面的直纹面等要求, 综合应用基于局部重新参数化构造过渡曲面和基于物理的能量曲面造型构造过渡曲面方法, 并结合导弹弹身曲面是等截面直纹面的特点, 通过构造翼身融合面、长边条面和头锥面 3 张曲面拼接来构造 G^1 连续的长边条翼身融合过渡曲面。提出了预先构造中间辅助面和辅助基曲面的方法, 通过辅助基曲面和弹翼面上重新参数化局部基曲面间线性组合来构造翼身融合面。通过使中间辅助过渡面的边界切矢与弹身的纵向切矢一致, 来保证长边条面与翼身融合面间的 G^1 连续性。最后利用基于物理的能量曲面造型方法构造与弹身和长边条面 G^1 连续的头锥过渡面。

关键词: 过渡线; 过渡曲面; 长边条; 重新参数化局部基曲面

中图分类号: V260.5 **文献标识码:** A

Abstract: A method of generating blending surface with long fringe between wing and fuselage of a missile is presented. The blending surface consists of a blending surface between wing and fuselage, a long fringe surface and a forward 3-sided surface which are G^1 smoothly connected. An auxiliary surface and an auxiliary base surface are generated in advanced. The blending surface between wing and fuselage is generated by a linear combination of a reparameterized local base surface on the wing and an auxiliary based surface. The directions of cross boundary derivatives of the auxiliary surface at the common boundary between the auxiliary surface and the long fringe surface are the same as the lengthways directions of the missile's body. And this ensures that the blending surface between wing and fuselage and the long fringe surface are G^1 connected. Then the forward 3-sided surface is generated based on energy minimization and is G^1 continuous contact with the missile's body and the long fringe surface.

Key words: blending curve; blending surface; long fringe; reparameterized local base surface

在飞航导弹的机翼和机身间构造带有长边条面的翼身融合过渡曲面是提高飞航导弹的隐身和气动性能的有效方法之一。弹身、弹翼、边条线和过渡线如图 1 所示, 整体过渡区域为五边域曲面, 要求该曲面和弹翼、弹身有 G^1 连续, 同时又要满足一些约束条件: ①过渡线能够由设计人员确定; ②在 CD 段的长边条面必须是等截面直纹面。

因此构造该曲面比较困难, 难以用一种方法和一张曲面来构造。构造 n 边域过渡曲面一直是 CAD 领域比较难以解决的问题, 许多研究者提出了 n 边域曲面的构造方法, 如: Gregory 方法^[1]、Sabin 等提出控制点方法^[2-3]、细分方法^[4-6]、Piegl

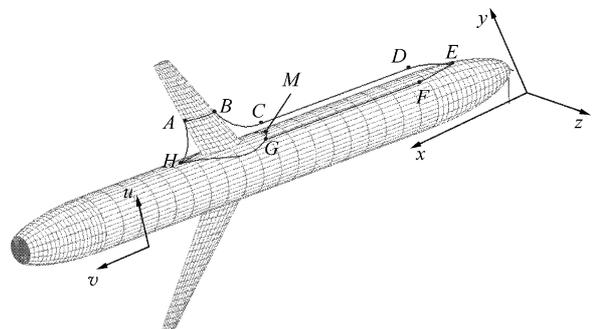


图 1 过渡线及边界线

Fig. 1 Blending curves and boundary curves

等提出的分片拼接方法^[7-8]等。现有的 CAD 软件系统的曲面造型功能基本上都是基于四边域的, 因此, Gregory 方法、控制点方法和细分方法难以

收稿日期:2007-08-10; 修订日期:2007-10-10
通讯作者:宋道志 E-mail: qzhsong@bit.edu.cn

兼容。Piegl 等分片拼接方法构造 n 边域过渡曲面时,边界跨界切矢难以确定,给过渡曲面的构造增加了困难。且这些方法构造此长边条过渡曲面时,难以满足其约束条件。

Hartmann 提出了利用两基曲面的线性组合来构造过渡融合曲面的方法^[9]。宋道志等在此基础上提出基于重新参数化局部基曲面的方法构造过渡曲面,使过渡切触线能由用户制定^[10-11]。宋道志等还提出基于物理的能量曲面造型方法构造过渡曲面^[12]。周西军提出具有公共三次曲线的 NURBS 曲面片 G^2 光滑拼接算法^[13]。

本文综合利用了基于重新参数化局部基曲面构造过渡曲面的方法和基于物理的能量曲面造型构造过渡曲面方法,并结合导弹弹身曲面是等截面直纹面的特点,采用 3 张曲面拼接来构造此长边条翼身融合过渡曲面,即 $ABCGHA$ 区域的融合面、 $CDFGC$ 区域的长边条面和 $DEFD$ 区域的头锥面。特别地,在构造融合面时,预先构造一张辅助基曲面,再采用基于重新参数化局部基曲面构造过渡曲面的方法构造弹翼和弹身间的融合面;构造长边条面时,利用了弹身曲面的直纹面特点;然后,利用基于物理的能量曲面造型方法构造头锥过渡面。

1 过渡线及边界线的确定

图 1 所示为在导弹一侧的边界线和过渡线。弹身和弹翼面分别为 $S_1(u, v)$ 和 $S_2(u, v)$ 。弹翼上的过渡线 AB 为其等参线; CDE 为边条线,其根据设计要求给定,其中 CD 段为直线段;弹身上的过渡线为 $EFGH$,其中 GH 为翼型放大线在弹身上投影的一部分, M 为翼型放大线在弹身上投影线的最前点,其与点 H 在沿轴向上的同一弹身等参线上, GF 为弹身等参线的一部分, GF 为直线,且 $GF \parallel CD$; AH 和 BC 为两自由边界,其在过渡曲面构造的时候确定。该弹翼另一侧的过渡线及边界线与此类似。

2 长边条翼身融合过渡面的构造步骤

本文定义在 $ABCEFGHA$ 区域构造的融合过渡面为长边条翼身融合过渡面。长边条翼身融合过渡面的构造较复杂,本文构造该曲面的总体思路如下:

- (1) 在 $ABCGHA$ 区域构造光滑连接弹翼和弹身的过渡面,定义该面为翼身融合面。
- (2) 在 $CDFGC$ 区域构造曲面,该面在 CG 处

与 $ABCGHA$ 面光滑连接,在 GF 处与弹身光滑连接,定义该面为边条面。

- (3) 在 $DEFD$ 区域构造三角面,该面在 DF 处与边条面光滑连接,在 GF 处与弹身光滑连接,定义该面为头锥面。

3 翼身融合面的构造

3.1 弹身面局部重新参数化

如图 2 所示, $\rho_1(s), s \in [0, 1]$ 为 MGH 在弹身参数域的参数线; M_1, G_1 和 H_1 分别为点 M, G 和 H 在参数域的对应点; $\rho_2(s)$ 为 $\rho_1(s)$ 的比例线。 $G_1G_2 \parallel M_1H_1, G_1G_2, M_1H_1$ 的方向为 $(0, 1, 0)$ 。将 $\rho_1(s)$ 和 $\rho_2(s)$ 分别在点 G_1 和点 G_2 处剖分为两段,并将 M_1G_1, M_2G_2, G_1H_1 和 G_2H_2 重新参数化为均匀曲线,其参数域为 $[0, 1]$ 。令 M_1G_1, M_2G_2 分别为 $P_1(0, t)$ 和 $P_1(1, t)$,可构造平面

$$P_1(s, t) = (1 - s)P_1(0, t) + sP_1(1, t) \quad (1)$$

式中: $s \in [0, 1], t \in [0, 1]$ 。

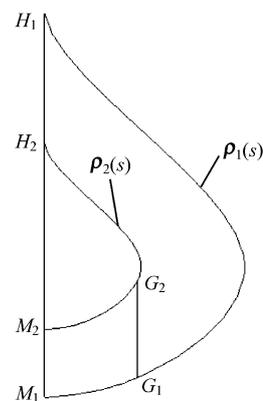


图 2 弹身过渡线 MGH 的参数域

Fig. 2 Parametric domain of blending curve MGH

由于 $P_1(s, t)$ 是在 $S_1(u, v)$ 的参数域里的平面片,存在 $P_1(s, t) = (u(s, t), v(s, t), 0)$ 。

令 $P_1(s, t)_u, P_1(s, t)_v$ 分别为 $P_1(s, t)$ 在 u, v 向的分量,则有 $P_1(s, t)_u = u(s, t), P_1(s, t)_v = v(s, t)$ 。由 $P_1(s, t)$ 所确定的弹身上的区域为 $B_1(s, t)$,称为重新参数化局部基曲面

$$B_1(s, t) = S_1(P_1(s, t)_u, P_1(s, t)_v) \quad (2)$$

同理,令 G_1H_1, G_2H_2 分别为 $P_2(0, t)$ 和 $P_2(1, t)$,可构造平面

$$P_2(s, t) = (1 - s)P_2(0, t) + sP_2(1, t) \quad (3)$$

由于 $P_2(s, t)$ 是在 $S_1(u, v)$ 的参数域里的平面片,

存在 $P_2(s, t) = (u(s, t), v(s, t), 0)$ 。

令 $P_2(s, t)_u, P_2(s, t)_v$ 分别为 $P_2(s, t)$ 在 u, v 向的分量, 则有 $P_2(s, t)_u = u(s, t), P_2(s, t)_v = v(s, t)$ 。由 $P_2(s, t)$ 所确定的弹身上的区域为重新参数化局部基曲面

$$B_2(s, t) = S_1(P_2(s, t)_u, P_2(s, t)_v) \quad (4)$$

曲面 $B_1(s, t)$ 和 $B_2(s, t)$ 如图 3 所示。

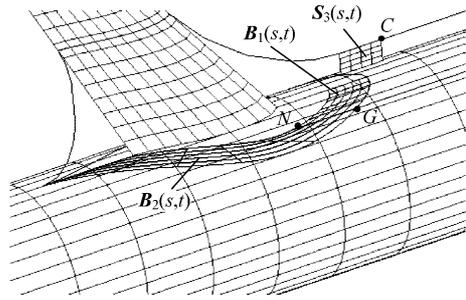


图 3 曲面 $B_1(s, t), B_2(s, t)$ 和 $S_3(s, t)$
Fig. 3 Surfaces $B_1(s, t), B_2(s, t)$ and $S_3(s, t)$

3.2 中间辅助面和辅助基曲面的构造

如图 3 所示, 在长边条线 C 点处, 沿弹身纵向构造一平面 $S_3(s, t), s \in [0, 1], t \in [0, 1]$ 。则可由 $S_3(s, t)$ 和 $B_1(s, t)$ 构造中间辅助面为

$$S_4(s, t) = f(t)S_3(s, q_1(t)) + (1 - f(t))B_1(s, q_2(t)) \quad (5)$$

式中: $f(t) = \frac{\mu(1-t)^2}{\mu(1-t)^2 + (1-\mu)t^2}$ 为过渡函数, μ 为平衡因子, $0 < \mu < 1$, 此处取 $\mu = 0.5$; $q_1(t) = \frac{t}{1-\lambda+\lambda t}, q_2(t) = \frac{t(1-\lambda)}{1-\lambda t}, \lambda$ 为调配因子, $0 \leq \lambda < 1$, 此处取 $\lambda = 0.5$ 。

$S_4(s, t)$ 如图 4 所示。再以 $S_4(s, t)$ 和 $B_2(s, t)$

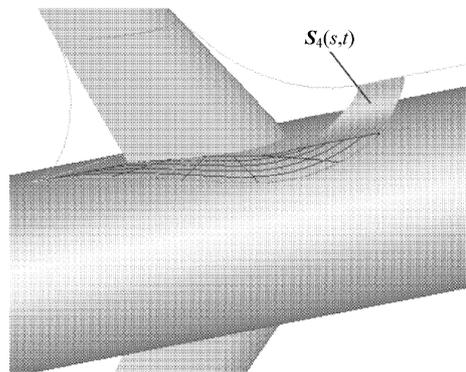


图 4 中间辅助面 $S_4(s, t)$
Fig. 4 Auxiliary surface $S_4(s, t)$

的一系列 s 向等参线为蒙皮线来构造蒙皮曲面, 即可得到 $S_4(s, t)$ 和 $B_2(s, t)$ 合并重构曲面 $S_5(s, t)$ 。 $S_5(s, t)$ 如图 5 所示, 称为辅助基曲面。则 $S_5(s, t)$ 在过渡线 HG 段与弹身面 G^1 连续。

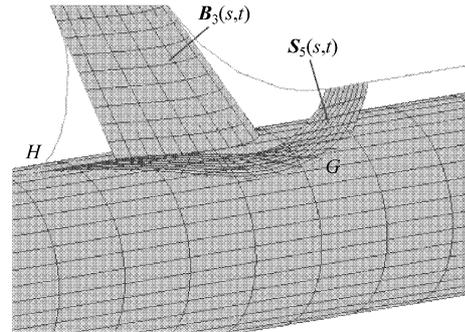


图 5 辅助基曲面 $S_5(s, t)$
Fig. 5 Auxiliary base surface $S_5(s, t)$

3.3 弹翼面局部重新参数化

如图 6 所示, 弹翼过渡线 AB 在弹翼曲面 $S_2(u, v)$ 的参数域内的曲线为 $\rho_3(s)$ 。做 $\rho_3(s)$ 的偏移线 $\rho_4(s)$, 偏移量为 $\beta = 0.2$, 则 $\rho_4(s)$ 可表示为

$$\rho_4(s) = \rho_3(s) + \beta U \quad (6)$$

式中: U 为偏移方向, 此处取 $U = (0, -1, 0)$ 。再以 ρ_3, ρ_4 为边 $P_3(s, 1), P_3(s, 0)$ 做平面 $P_3(s, t)$:

$$P_3(s, t) = (1 - t)P_3(s, 0) + tP_3(s, 1) \quad (7)$$

则由 $P_3(s, t)$ 所确定的弹翼面上的区域为重新参数化后的弹翼局部基曲面 $B_3(s, t)$ 为

$$B_3(s, t) = S_2(P_3(s, t)_u, P_3(s, t)_v) \quad (8)$$

则 $B_3(s, 1)$ 即为过渡线 AB 。 $B_3(s, t)$ 如图 5 所示。

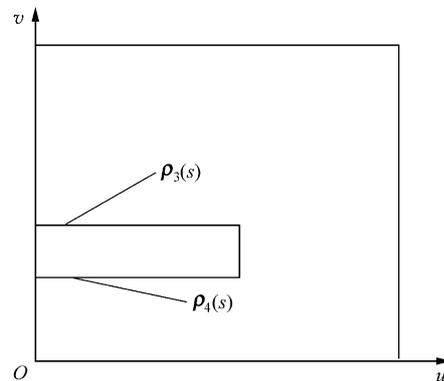


图 6 弹翼面参数域
Fig. 6 Parametric domain of wing surface

3.4 翼身融合面的构造

融合面通过 $S_5(s, t)$ 和 $B_3(s, t)$ 线性组合来构造, 则融合面 $R_1(s, t)$ 构造如下:

$$R_1(s, t) = f(t)S_5(s, q_1(t)) + (1 - f(t))B_3(s, q_2(t)) \quad (9)$$

当 $\lambda = \mu = 0.5$ 时, 所构造的融合面 $R_1(s, t)$ 如图 7 所示。

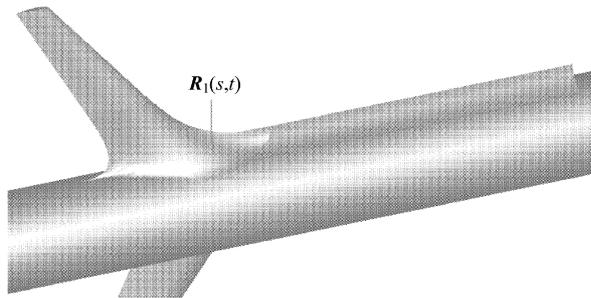


图 7 导弹翼身融合面 $R_1(s, t)$
Fig. 7 Blending surface $R_1(s, t)$ between wing and fuselage of a missile

4 长边条面的构造

如图 8 所示, 在 D 点构造一与弹身垂直的平面 T , 再将中间辅助面 $S_4(s, t)$ 的边界 CG 投影到平面 T 上, 得到曲线 DF 。然后, 分别以 CG 和 DF 为 $R_2(0, t)$ 和 $R_2(1, t)$ 构造长边条面 $R_2(s, t)$ 为

$$R_2(s, t) = (1 - s)R_2(0, t) + sR_2(1, t) \quad (10)$$

显然, 在边界 CG 和 DF 处的跨界切矢是沿弹身的纵向, 即 $(-1, 0, 0)$ 方向。

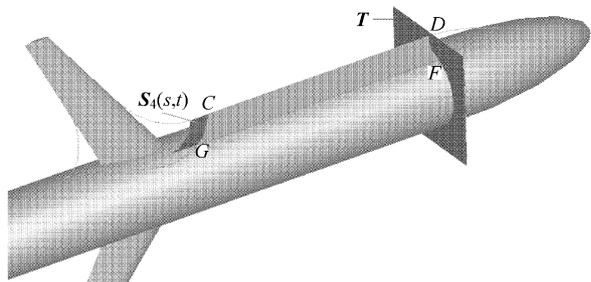


图 8 投影平面 T 及长边条面 $R_2(s, t)$
Fig. 8 Projection plane face T and long fringe surface $R_2(s, t)$

下面来证明 $R_2(s, t)$ 与融合面 $R_1(s, t)$ 和弹身面 $S_1(u, v)$ 间的连续关系。

证明 1 长边条面 $R_2(s, t)$ 和融合面 $R_1(s, t)$ 在公共边界 CG 处 G^1 连续

根据参数域平面 $P_1(s, t)$ 的构造过程, 在边界 M_1G_1 处的跨界切矢在弹身曲面的 u, v 矩形参数域中是沿 v 向的, 因此, 对应地, $B_1(s, t)$ 的边界 MG 处 ($s=0$ 的边界) 的跨界切矢是弹身的 v 向切矢, 沿弹身纵向, 即 $(1, 0, 0)$ 方向。则有

$$\frac{\partial B_1(s, q_2(t))}{\partial s} \Big|_{s=0} = F_1(t) \cdot (1, 0, 0) \quad (11)$$

式中: $F_1(t)$ 为参数 t 的函数。

对于平面 $S_3(s, t)$ 在 $s=0$ 的边界, 跨界切矢是沿弹身纵向, 即 $(1, 0, 0)$ 方向。则有

$$\frac{\partial S_3(s, q_1(t))}{\partial s} \Big|_{s=0} = F_2(t) \cdot (1, 0, 0) \quad (12)$$

式中: $F_2(t)$ 为参数 t 的函数。

根据式(4), 中间面 $S_4(s, t)$ 在边界 $s=0$ 处的 s 向切矢为

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_4(s, t)}{\partial s} \Big|_{s=0} &= f(t) \frac{\partial S_3(s, q_1(t))}{\partial s} \Big|_{s=0} + \\ &(1 - f(t)) \frac{\partial B_1(s, q_2(t))}{\partial s} \Big|_{s=0} = \\ &(F_1(t) + F_2(t)) \cdot (1, 0, 0) \quad (13) \end{aligned}$$

$S_4(s, t)$ 在边界 $s=0$ 处的 s 向切矢是沿 $(1, 0, 0)$ 方向, 与 $R_2(s, t)$ 在 $s=0$ 处 (CG 边界) 的 s 向切矢方向相反, 因此, 长边条面 $R_2(s, t)$ 与中间辅助面在边界 CG 处 G^1 连续。又中间辅助面和融合面 $R_1(s, t)$ 在 CG 处 G^1 连续, 所以, 长边条面 $R_2(s, t)$ 和融合面 $R_1(s, t)$ 在边界 CG 处 G^1 连续。

证毕。

证明 2 长边条面 $R_2(s, t)$ 和弹身面在边界 GF 处 G^1 连续

令 V_1, V_2 分别为长边条面 $R_2(s, t)$ 在边界 GC 和 FD 处的 G, F 端点切矢。如图 9 所示, 将 V_1 沿投影方向 $(-1, 0, 0)$ 平移至 F 点。 $V = (-1, 0, 0)$ 为投影方向, 由于 V_2 是 V_1 沿 V 方向在平面 T 上的投影, 所以, V_2 在 V_1 和 V 所确定的平面上。

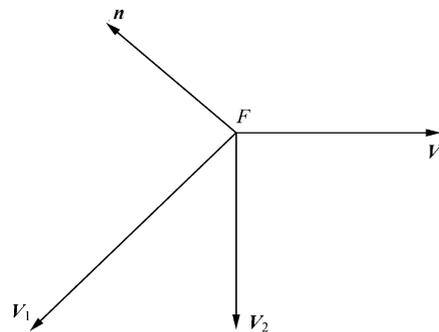


图 9 F 点处矢量示意图
Fig. 9 Sketch map of vectors at point F

存在 $\mathbf{n} = \mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}$, \mathbf{n} 为弹身面在 G 点处的法矢, \mathbf{V}_2 和 \mathbf{V} 所确定的平面为弹身面在 G 点的切平面。因为弹身面为等截面直纹面, 其在 GF 上每点的法矢都为 \mathbf{n} , 即有相同的切平面。

根据式(10), 长边条面在边界 GF (即 $t=1$ 边界) 处的跨界切矢为

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \mathbf{R}_2(s, t)}{\partial t} \right|_{t=1} &= (1-s) \frac{\partial \mathbf{R}_2(0, t)}{\partial t} + s \frac{\partial \mathbf{R}_2(1, t)}{\partial t} \\ &= (1-s)\mathbf{V}_1 + s\mathbf{V}_2 \end{aligned} \quad (14)$$

即 $\left. \frac{\partial \mathbf{R}_2(s, t)}{\partial t} \right|_{t=1}$ 为 \mathbf{V}_1 和 \mathbf{V}_2 的线性组合, 故

$\left. \frac{\partial \mathbf{R}_2(s, t)}{\partial t} \right|_{t=1}$ 在 \mathbf{V}_1 和 \mathbf{V}_2 所确定的法矢为 \mathbf{n} 的切平面内。

在边界 GF (即 $t=1$ 边界) 处

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \mathbf{R}_2(s, t)}{\partial s} \right|_{t=1} &= -\mathbf{R}_2(0, 1) + \mathbf{R}_2(1, 1) = \\ &= c(-1, 0, 0) = c\mathbf{V} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: c 为常数。

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \mathbf{R}_2(s, t)}{\partial t} \right|_{t=1} \times \left. \frac{\partial \mathbf{R}_2(s, t)}{\partial s} \right|_{t=1} &= \\ (1-s)c\mathbf{V}_1 \times \mathbf{V} + sc\mathbf{V}_2 \times \mathbf{V} & \end{aligned} \quad (16)$$

由于 \mathbf{V}, \mathbf{V}_1 和 \mathbf{V}_2 在法矢为 \mathbf{n} 的同一平面内, 存在

$$\mathbf{V}_1 \times \mathbf{V} = c_1 \mathbf{n} \quad (17)$$

$$\mathbf{V}_2 \times \mathbf{V} = c_2 \mathbf{n} \quad (18)$$

式中: c_1, c_2 为常数。

则根据式(16)~式(18)可得

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \mathbf{R}_2(s, t)}{\partial t} \right|_{t=1} \times \left. \frac{\partial \mathbf{R}_2(s, t)}{\partial s} \right|_{t=1} &= \\ [(1-s)cc_1 + sc_2] \mathbf{n} & \end{aligned} \quad (19)$$

故长边条面在边界 GF 处和弹身面有相同的切平面, 所以, 长边条面 $\mathbf{R}_2(s, t)$ 和弹身面在边界 GF 处 G^1 连续。

证毕。

5 头锥面的构造

头锥面为三角面, 如图 10 所示。本文采用基于物理的能量曲面造型方法构造头锥过渡曲面, 以长边条面的 DF 边、弹身面上的过渡线 EF 和自由边界 DE 为位置约束, 以长边条面 $\mathbf{R}_2(s, t)$ 在 DF 边上点的法矢、弹身面在 EF 线上点的法矢为约束, 以薄板弹性变形方程模型为目标函数, 通过采用有限元方法求解上述能量泛函的极小值即可确定过渡曲面 $\mathbf{W}(u, v)$ 。

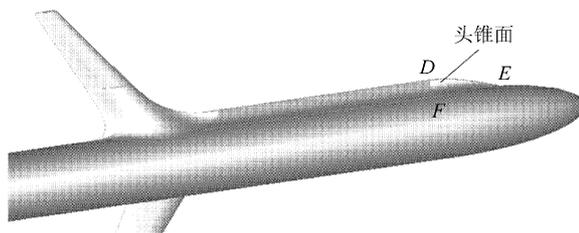


图 10 头锥面及翼身融合面和长边条面

Fig. 10 Forward 3-sided surface, long fringe surface and blending surface between wing and fuselage

令曲线 FD, FE 和 DE 分别为 $\varphi_1(t), \varphi_2(t)$ 和 $\varphi_3(t)$ 。头锥面 $\mathbf{W}(u, v)$ 的参数域如图 11 所示, 为三角形。 F_1D_1, F_1E_1 和 D_1E_1 分别为 FD, FE 和 DE 的参数域, 令 $\varphi_1(t), \varphi_2(t)$ 和 $\varphi_3(t)$ 分别为 $\mathbf{W}(0, v), \mathbf{W}(u, 0)$ 和 $\mathbf{W}(u, 1-u)$ 。将此参数域三角化。单元为三角形单元, 如图 12 所示, 每个单元有 6 个节点。约束优化模型为

$$\begin{aligned} \text{Min } E_{\text{surface}} &= \iint [(\alpha_{11}\mathbf{W}_u^2 + 2\alpha_{12}\mathbf{W}_u\mathbf{W}_v + \alpha_{22}\mathbf{W}_v^2 + \\ &\beta_{11}\mathbf{W}_{uu}^2 + 2\beta_{12}\mathbf{W}_{uv}^2 + \beta_{22}\mathbf{W}_{vv}^2) - 2\mathbf{W}f(u, v)] dudv \end{aligned} \quad (20)$$

s. t. ① 边界 DE 上各节点的位置约束;

② 边界 DF 上各节点的位置约束;

③ 边界 FE 上各节点的位置约束;

④ DF 边上各节点处长边条面的法矢约束;

⑤ FE 边上各节点处弹身面的法矢约束。

设计变量: 各节点处的空间位置 (x_i, y_i, z_i) 。

式中: $\mathbf{W} = \mathbf{W}(u, v)$ 为头锥面; $\mathbf{W}_u = \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial u}$; $\mathbf{W}_v = \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial v}$;

$\mathbf{W}_{uu} = \frac{\partial^2 \mathbf{W}}{\partial u^2}$; $\mathbf{W}_{vv} = \frac{\partial^2 \mathbf{W}}{\partial v^2}$; $\mathbf{W}_{uv} = \frac{\partial^2 \mathbf{W}}{\partial u \partial v}$; $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{22}$ 为抗拉系数; $\beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{22}$ 为抗弯系数, 此处均取值为 5; $f(u, v)$ 为作用力, 此处为 0。

通过有限元方法求解可以确定各节点处的空间位置。一般地, 节点位置确定以后, 每个三角形曲面片可由该单元的 6 个节点处的位置插值确定, 一系列的三角片就构成了整张过渡面。但这样确定的曲面在现有的基于四边域表达的软件系统中难以表示, 故而本文没有采用这种方法, 而是由这些单元节点插值确定一系列的 u 向等参线, 再由这些 u 向等参线蒙皮构造四边域表达的头锥面, 在 $u=1$ 时, 等参线是一点 E 。所构造的头锥面如图 10 所示。

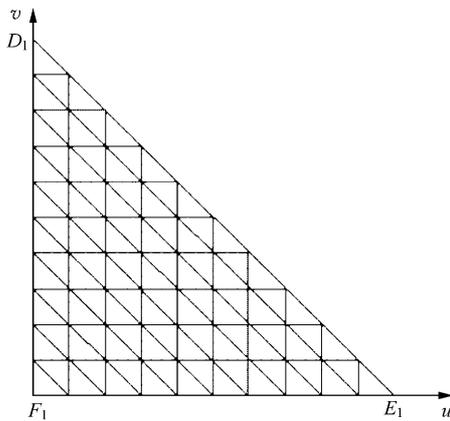


图 11 头锥面参数域

Fig. 11 Parametric domain of the forward 3-sided surface

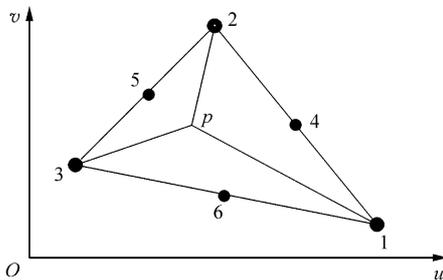


图 12 三角形单元

Fig. 12 Triangular element

6 结 论

(1) 给出了构造长边条翼身融合过渡面的过渡线和边界线的确定方法。

(2) 提出了在构造中间辅助面和辅助基曲面基础上,采用基于局部重新参数化构造过渡曲面的方法来构造翼身融合面,并使中间辅助面的边界切矢与弹身的纵向切矢一致。

(3) 构造了沿弹身纵向切矢方向插值的直纹长边条面。这样,长边条面和中间辅助面在公共边界处的跨界切矢都是沿弹身纵向切矢方向,也就保证了长边条面与翼身融合面间的 G^1 连续性。

(4) 以边条面的边界及该边界处的边条面法矢、弹身上过渡线及该线处的弹身法矢和另一条自由边界为约束,利用基于物理的能量曲面造型方法构造头锥过渡面。

这样翼身融合面、长边条面和头锥过渡面就拼接构成了长边条翼身融合过渡曲面。

参 考 文 献

[1] Gregory J A, Hahn J M. A C^2 polygonal surface patch[J].

Computer Aided Geometric Design, 1989, 6(1): 69-75.
 [2] Sabin M A. Some negative results in n -sided patches[J]. Computer-Aided Design, 1986, 18(1): 38-44.
 [3] Hosaka M, Kimura F. Non-four-sided patch expressions with control points[J]. Computer Aided Geometric Design, 1984, 1(1): 75-86.
 [4] Levin A. Combined subdivision schemes for the design of surfaces satisfying boundary conditions[J]. Computer Aided Geometric Design, 1999, 16(5): 345-354.
 [5] Ohbuchi R, Kokojima Y, Takahashi S. Blending shapes by using subdivision surfaces[J]. Computers and Graphics, 2001, 25(1): 41-58.
 [6] 李桂清. 细分曲面造型及应用[D]. 北京: 中国科学院计算技术研究所, 2001.
 Li Guiqing. Modeling and application of subdivision surfaces[D]. Beijing: Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, 2001. (in Chinese)
 [7] Piegl L A, Tiller W. Filling n -sided regions with NURBS patches[J]. The Visual Computer, 1999, 15(2): 77-89.
 [8] Yang Y J, Rong J H, Zhang H, et al. A rational extension of Piegl's method for filling n -sided holes[J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(11): 1166-1178.
 [9] Hartmann E. Parametric G^n blending of curves and surfaces[J]. The Visual Computer, 2001, 17(1): 1-13.
 [10] Song Q, Dai Q H, Chen L P, et al. Generating parametric G^n blending surfaces with some constraints[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2003, 16(2): 108-116.
 [11] Song Q Z, Wang J Z. Generating parametric G^n blending surfaces based on partial reparameterization of base surfaces. Computer-Aided Design, 2007, 39(11): 953-963.
 [12] 宋道志, 陈立平, 钟毅芳, 等. 基于物理的能量最小法构造融合过渡曲面[J]. 工程图学学报, 2002, 23(3): 122-132.
 Song Qiuzhi, Chen Liping, Zhong Yifang, et al. Generating blending surface based on energy minimization[J]. Journal of Engineering Graphics, 2002, 23(3): 122-132. (in Chinese)
 [13] Zhou X J. G^2 continuity algorithms between adjacent NURBS patches along common cubic boundary curve[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2003, 16(4): 241-246.

作者简介:

宋道志(1966—) 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 机械设计及理论/CAD, 曲面造型, 火炮, 自动武器, 表面工程。

Tel: 010-68912044

E-mail: qzhsong@bit.edu.cn

马子领(1983—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 机械电子工程, CAD。

E-mail: hailing10505@gmail.com

王建中(1963—) 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 机械电子工程, 机器人技术, 火炮, 自动武器。

Tel: 010-68915821

E-mail: cwjzwang@bit.edu.cn

(责任编辑: 蔡斐, 杨冬)