

凹回转曲面纤维缠绕架空分析及应用^{*}

韩振宇, 富宏亚, 付云忠, 王永章

(哈尔滨工业大学 机电学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对诸如带喷管固体火箭发动机的凹曲面过渡段等负高斯曲率面的缠绕, 应用微分几何曲面理论推导出了凹回转曲面的纤维缠绕架空条件及判据, 并对不同的过渡段曲线进行了分析, 分别给出了判别公式。通过缠绕实验验证了架空判据的正确性和实用性, 表明采用单叶双曲面比采用凹圆曲线回转曲面具有更好的缠绕工艺性, 且其直纹线的缠绕角恰好为不架空的临界缠绕角; 缠绕时, 为了保证运动的平稳性, 需要剔除奇异点, 进行平滑处理。

关键词: 固体推进剂火箭发动机; 壳体; 复合材料; 纤维缠绕

中图分类号: V435.22

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2004) 03-0286-03

Fiber bridge analysis in filament winding of concave revolution surface and its application

HAN Zhenyu, FU Hongya, FU Yunzhong, WANG Yongzhang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: For the filament winding of negative Gaussian curvature surface such as transition section between shell and nozzle of solid rocket engine, the general criterion for fiber bridge on concave revolution surface winding is derived based on differential geometry theory. The winding path on several transition section surface is discussed. An experiment demonstrated the correctness and practicability of the criteria. It showed that the winding path on uniparted hyperboloid is steadier than on concave ring surface and the winding angle on ruled surface is just the critical angle of no bridge. For smooth motion the hypervelocity point canceling and data filtering are needed.

Key words: Solid propellant rocket engine; Shell; Composite material; Filament winding

1 引 言

当纤维缠绕进行到凹曲面时, 有可能出现架空问题, 文献[1]利用微分几何理论, 从曲面上纤维受力的角度分析了普通曲面上纤维架空的条件。文献[2]研究了纤维缠绕的成型压力和曲面几何的关系, 进而得出一般曲面上纤维架空的判据, 比文献[1]更深入了一步。但对于实际缠绕中经常涉及的组合回转体凹曲面过渡段的架空判断及过渡段的选取均没有进行深入的论述。本文对凹曲面过渡段的架空判断和过渡曲线的选取等问题进行了分析, 为带喷管火箭发动

机壳体的整体缠绕成型奠定了一定的理论基础。

2 凹回转曲面纤维缠绕的架空判据

对于缠绕成型, 成型压力系由缠绕张力在成型表面上产生的正压力提供。如图 1 所示, 曲面 $S(u, v)$ 上 P 点处的微段纤维为 ds , $\mathbf{n}$ 为曲面在该点的单位法向量(方向向外), $\mathbf{e}_l$ 和 α 分别为 u 线和纤维微段在 P 点的单位切向量, φ 为纤维在 P 点的缠绕角。纤维微段在成型表面上由于纱线缠绕张力而产生的成型压力^[1]为

$$F_p = T \cdot k_n \cdot ds \cdot \mathbf{n} \quad (1)$$

* 收稿日期: 2003-07-10; 修订日期: 2003-09-24。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50175020); 黑龙江省自然科学基金资助项目 (E01-17)。

作者简介: 韩振宇 (1978—), 男, 博士生, 研究领域为纤维缠绕的 CAD/CAM 研究。E-mail: hanzy@hit.edu.cn

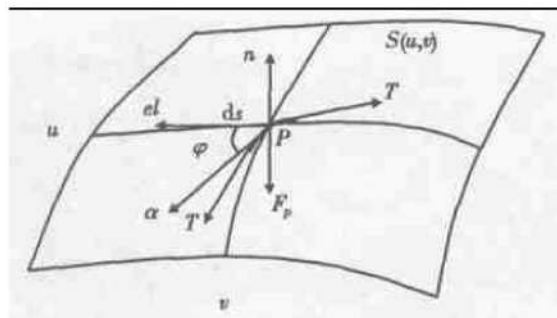


Fig. 1 Analysis to the forces acting on a tiny filament segment

式中 T 为纤维张力; k_n 为曲面上该点的法曲率。

曲面上纤维的架空从力学上讲是纤维受成型压力牵引而偏离曲面的现象, 据此原理只有当成型压力的方向与法向量相反时才不会产生架空, 故纤维不架空的条件为: $k_n \leq 0$, 根据欧拉公式, 上式可变为

$$k_n = k_u \cos^2 \varphi + k_v \sin^2 \varphi \leq 0 \quad (2)$$

式中 k_u, k_v 为曲面 $S(u, v)$ 在参数曲线方向的主曲率。对于回转曲面 $r(u, \theta) = \{f(u) \cos \theta, f(u) \sin \theta, u\}$, 其中 u, θ 分别为经线和纬线, $f(u) > 0$ 是回转曲面的母线方程。根据微分几何知识有

$$k_u = L/E = f''/(1+f'^2)^{3/2}$$

$$k_\theta = N/G = 1/(f \sqrt{1+f'^2}) < 0$$

其中 L, E, N, G 为曲面第一、第二基本形式的系数。对于回转曲面 k_θ 恒小于 0, 根据纤维架空的判别条件, 可得如下结论:

(1) 当 $f'' \leq 0$ 时, 此时 $k_u \leq 0$, 无论缠绕角 φ 取何值均可满足 $k_n \leq 0$, 纤维都不会架空。

(2) 当 $f'' > 0$ 时, $k_u > 0$, 此时 $k_u \cdot k_\theta < 0$, 为负高斯曲率面, 由公式(2)可得要纤维不架空需满足如下公式

$$\tan^2 \varphi \geq -k_u/k_\theta = f f''/(1+f'^2) \quad (3)$$

3 组合回转体过渡段的选取

回转体芯模一般都是二次曲面的组合形式, 即圆柱体、圆锥体、球体、椭球体等基本形体之间的组合。基本形体之间的光滑连接即形成过渡段, 当过渡段出现负高斯曲率面时, 缠绕时就可能出现架空现象。为了造型和计算的方便, 一般选择凹圆曲线回转曲面和单叶双曲面作为过渡段曲面, 其纵剖面如图2所示。

过 $A(0, r_0), B(h, R)$ 的凹圆曲线方程为 $x^2 + (y$

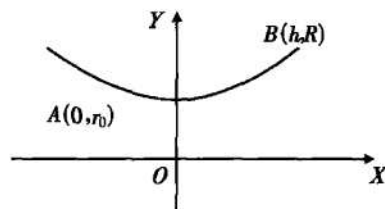


Fig. 2 Longitudinal section of transition segment

$-y_0)^2 = (R_0)^2$, 其中

$$y_0 = \frac{R^2 - r_0^2 + h^2}{2(R - r_0)}$$

$$R_0 = \frac{R^2 + r_0^2 + h^2 - 2Rr_0}{2(R - r_0)}$$

记芯模母线的 y 坐标为 r , 由公式(3)得凹圆曲线回转曲面不架空条件为

$$\tan^2 \varphi \geq \frac{-2r(R - r_0)}{2r(R - r_0) - R^2 + r_0^2 - h^2} \quad (4)$$

同样, 对于过 A, B 点的双曲线, 由公式(3)可得单叶双曲面的不架空条件为

$$\tan^2 \varphi \geq \frac{r_0^2(R^2 - r_0^2)}{(R^2 - r_0^2 + h^2)r^2 - r_0^2(R^2 - r_0^2)} \quad (5)$$

在二次曲面中, 单叶双曲面是一类特殊的曲面, 它是由一与中心轴成一定角度的直线绕中心轴回转而成, 即为直纹面。可以证明单叶双曲面上直纹线的缠绕角^[3]为

$$\tan^2 \varphi = \frac{r_0^2(R^2 - r_0^2)}{(R^2 - r_0^2 + h^2)r^2 - r_0^2(R^2 - r_0^2)}$$

恰好为不架空的临界缠绕角。而且由于直纹线为测地线, 因此若缠绕时能够沿着单叶双曲面上直纹线进行, 则纤维轨迹必然会稳定且不架空。

4 实验

为了对上述理论进行验证, 我们设计一个带凹回转曲面过渡段的组合芯模, 芯模的形状如图3所示。

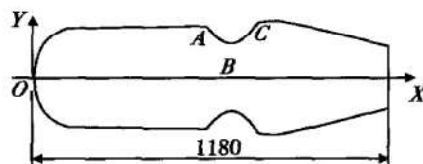


Fig. 3 Shape and dimension of the mandrel

在过渡段处,分别试用了凹圆曲线回转面和单叶双曲面作为过渡面,其纵剖面线为 ABC 段。 A, B, C 点坐标分别为 $(494.783, 100.955), (558.791, 65.525), (622.800, 100.955)$ 。

当 ABC 段取为凹圆曲线时,由公式(4)可得 A, B, C 各点的最小缠绕角分别为 $57.777^\circ, 42.960^\circ, 57.777^\circ$ 。当 ABC 段取为双曲线时,其曲线方程为

$$\frac{y^2}{65.526^2} - \frac{(B-558.791)^2}{54.720^2} = 1$$

由公式(5)可得 A, B, C 各点的最小缠绕角分别为 $29.907^\circ, 50.191^\circ, 29.907^\circ$ 。

对于回转体芯模,按照缠绕的基本理论,沿芯模半径减小方向,缠绕角应该增大。当选用凹圆曲线作为过渡段时,其缠绕角的可变化范围要比采用双曲线作为过渡段小得多。从缠绕的可行性角度来衡量,其缠绕工艺性不好。

当纤维轨迹满足不架空要求后,就可以按照利用摩擦机理的非测地线理论^[4]进行线型计算了,只要滑线系数小于芯模表面的摩擦系数就可以保证纤维在芯模表面稳定不打滑。纤维缠绕成型是由丝嘴与芯模的合成运动实现的,因此丝嘴运动轨迹求取是纤维缠绕的一个关键问题^[5]。在本例中,丝嘴运动轨迹是由线型轨迹的切线与丝嘴约束轨迹的交点确定的,丝嘴的约束轨迹取芯模的包络线。

实际缠绕过程如图4所示,在缠绕的过程中,没有出现架空和滑线问题。只是在缠绕凹曲面时,小车运动不太平稳,这可以通过剔出奇异点等平滑处理方法来解决。缠绕实验说明,通过限定凹曲面过渡段的缠绕角大于由公式(3)确定的缠绕角,在带凹曲面回转体的缠绕过程中就完全可以避免架空的产生。

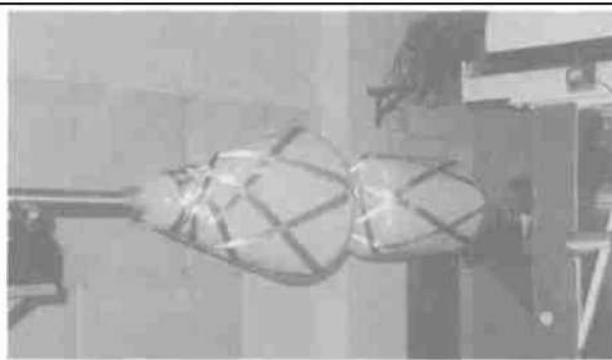


Fig. 4 Winding experiment

5 结 论

(1) 对负高斯曲率回转曲面进行缠绕时,当缠绕角满足一定的条件时可以避免架空的产生。

(2) 组合回转体的过渡段采用单叶双曲面比采用凹圆曲线回转曲面具有更好的缠绕工艺性,而且其直纹线的缠绕角恰好为不架空的临界缠绕角。

(3) 在对带有凹曲面的组合回转体进行缠绕时,为了保证运动的平稳性,需要剔除奇异点,进行平滑处理。

参考文献:

- [1] Su Hongtao. Modeling stable filament winding on general curved surface[C]. 33st International SAMPE Technical Conference, 1999.
- [2] 李 勇, 肖 军. 纤维缠绕的曲面架空分析及应用[J]. 宇航材料工艺, 2002, (3).
- [3] 万 卉, 吴耀楚, 田会方. 组合回转体过渡段缠绕的数学模型研究[J]. 武汉工业大学学报, 1999, 21(1).
- [4] 富宏亚. 非测地线稳定缠绕的边界条件及稳定方程[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1996, (4).
- [5] 贾延林, 富宏亚, 路 华. 基于非测地线理论的回转体缠绕成型的数学模型[J]. 宇航材料工艺, 1997, (5).

(编辑: 王居信)