

一种拉索套管外形的设计与优化*

李仕华, 杜崇杰, 王志松, 侯建霞, 李富娟

(燕山大学河北省并联机器人与机电系统实验室 秦皇岛, 066004)

摘要 为了减小斜拉索的振动, 延长其使用寿命, 提出一种新的斜拉索套管外形。首先, 采用空气动力学方法初步设计了一种斜拉索套管外形——仿水滴形; 然后, 通过对该外形与仿鱼雷外形的计算流体力学(computational fluid dynamics, 简称CFD)模拟仿真结果进行分析比较可知, 新外形能减小拉索尾部形成漩涡生成的概率, 降低斜拉索产生的大幅振动, 有效提高斜拉索的稳定性; 最后, 运用Matlab 遗传算法对初始的仿水滴气动外形进行进一步的参数优化, 得到优化后的仿水滴外形。优化结果表明, 优化后新外形的临界最大压力值、速度值和阻力系数都有一定的减小, 可以较好地降低斜拉索的振动。

关键词 斜拉索; 仿水滴形; 计算流体力学; 遗传算法

中图分类号 V211.1

引言

斜拉索是斜拉桥的关键构件, 承受及传递着桥梁的全部载荷, 极易在外部激励下诱发涡激振动、尾流驰振、风雨振动和参数振动等^[1]各种振动。由于斜拉索造价占桥梁总造价的25%~30%^[2], 拉索长时间的大幅振动会对结构的耐久性产生影响, 如何设计斜拉索、增长斜拉桥的使用寿命是一个关注的问题。

拉索减振措施有机械减振措施和气动减振措施^[3-4]。机械减振措施主要通过添加辅助索和使用阻尼器减振。气动减振是通过改变拉索截面的形状构造来改善斜拉索的空气动力学性能, 使斜拉索在气流中具有较大的稳定性, 避免大幅振动的发生, 具体措施主要有在拉索套管表面设置齿条、凹槽和螺旋线等。气动减振措施维修保养简便, 费用较低, 是最积极主动而又经济合理的措施^[3]。

涡激振动是各种形式振动中较为常见的一种, 笔者针对涡激振动, 利用空气动力学方法设计了一种新型拉索套管截面外形, 经模拟仿真分析, 该外形能有效提高拉索的稳定性, 降低斜拉索的振动。

1 斜拉索截面模型的建立

根据空气动力学, 拉索套管受到的风阻越小意味着越稳定、振动概率越低。基于阻力小和气动性能稳定的特性, 提出仿水滴形拉索套管外形如图1所示。拉索截面外形分为3部分, 其中: AC段为椭圆

一部分; DE段为圆的一部分; 中间CD段为椭圆跟圆的切线。O₁, O₂分别为椭圆和圆的圆心。

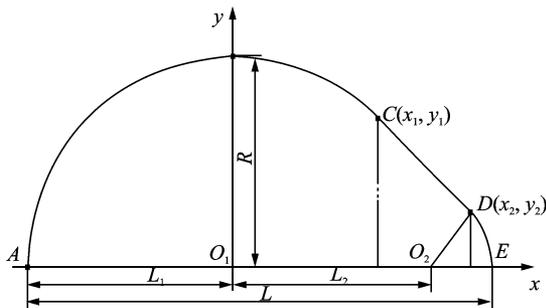


图1 仿水滴外形示意图

设仿水滴外形沿x轴的长度为L, y轴方向的最大直径为R, 椭圆的短半轴长度为L₁, 两圆心的距离为L₂, C, D两点为切点。设C, D点的坐标为(x₁, y₁), (x₂, y₂)。

计算可得仿水滴外形的表达式为

$$\begin{cases} \frac{x^2}{L_1^2} + \frac{y^2}{R^2} = 1 & \left(-L_1 \leq x \leq -\frac{kL_1^2}{\sqrt{L_1^2 k^2 + R^2}} \right) \\ y = kx + f & \left(-\frac{kL_1^2}{\sqrt{L_1^2 k^2 + R^2}} \leq x \leq -\frac{(L - L_1 - L_2)k}{\sqrt{1 + k^2}} + L_2 \right) \\ (x - L_2)^2 + y^2 = (L - L_1 - L_2)^2 \times & \left(-\frac{(L - L_1 - L_2)k}{\sqrt{1 + k^2}} + L_2 \leq x \leq L - L_1 \right) \end{cases} \quad (1)$$

* 收稿日期: 2011-06-22; 修改稿收到日期: 2011-09-05

其中

$$k = -\sqrt{\frac{a^2(a^2 - d^2) + b^2(c^2 - a^2) - c^2(a^2 + d^2) + 2ad\sqrt{a^2(b^2 - c^2) + c^2(d^2 - b^2) + c^4}}{a^2(a^2 - 2d^2) + d^2(d^2 - 2b^2) + b^2(b^2 - 2a^2)}} \quad (2)$$

$$f = \frac{R^2}{\sqrt{L_1^2 k^2 + R^2}} - \frac{k^2 L_1^2}{\sqrt{L_1^2 k^2 + R^2}} \quad (3)$$

$$\begin{cases} a = L - L_1 - L_2 \\ b = L_1 \\ c = R \\ d = L_2 \end{cases} \quad (4)$$

2 气动外形的模拟仿真

仿鱼雷套管外形的抗振效果优于圆形^[5],为了说明新外形减振效果,这里选取横截面积相同且 y 轴方向最大半径 R 相同的仿水滴和仿鱼雷形回转体进行仿真分析。仿水滴形外形的几何尺寸分别为: $L=132$ mm, $L_1=58$ mm, $L_2=56.5$ mm, $R=50$ mm, $S \approx 9\,700$ mm²。仿鱼雷外形见图2所示,尺寸取 $L=120$ mm, $L_1=56$ mm。

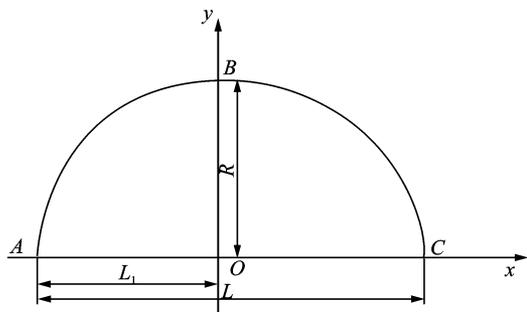


图2 仿鱼雷外形示意图

笔者基于CFD软件FLUENT及其前处理软件Gambit,对两种截面外形在相同的外界环境下进行模拟仿真。

2.1 模型的建立及参数设定

根据尺寸参数,在CAD软件中分别画出两种套管外形的二维图,以ACIS的格式导入到FLUENT的前处理软件Gambit中。设定的模型边界总长为150 cm,宽为100 cm,建立的模型几何中心位于距离左边界300 mm和上、下边界的中点处,如图3所示。

2.2 网格划分边界的设定

Gambit的网格划分有很多形状,考虑研究对象

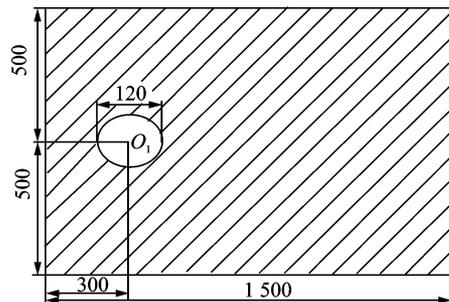


图3 计算域模型示意图(单位:mm)

为二维流动,所以选择非结构化四边形网格。网格划分结果如图4和图5所示。左边为速度进口,上、下边界和套管截面为壁面边界,右边为完全发展条件。

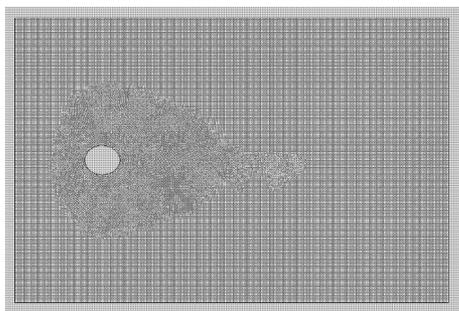


图4 仿鱼雷外形网格划分

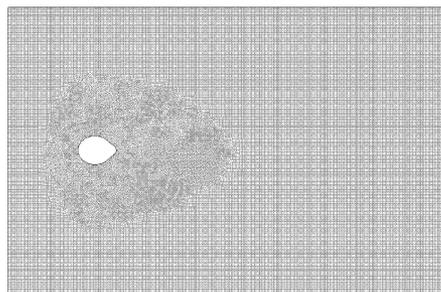


图5 仿水滴外形网格划分

2.3 仿真结果分析

在求解过程中根据电脑的硬件条件和计算时间,选择合适的迭代次数,迭代次数的多少会影响结果的收敛与否。本研究模拟选择500次迭代,进口速度为16 m/s。

两种套管外形的速度云图仿真结果如图6与图7所示。图中颜色由浅到深,表示速度由小变大。在相同入口速度 $v=16$ m/s的条件下,由图6和图7可以看出:a.仿水滴外形尾部的旋涡区域逐渐减小,旋涡区域越小,尾部转化成使拉索发生振动的能量越小,拉索越稳定;b.仿水滴外形截面边界受到

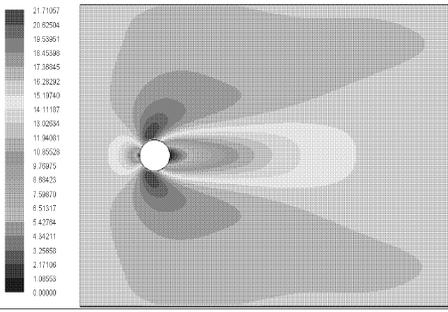


图6 仿鱼雷外形的速度云图(单位:m/s)

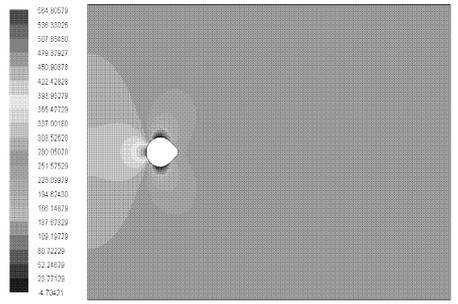


图9 仿水滴外形的压力云图(单位:Pa)

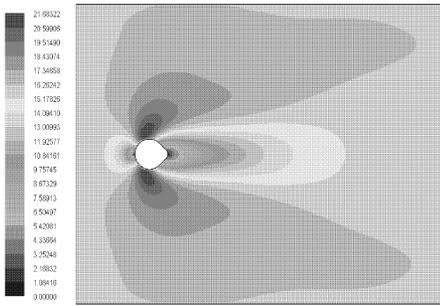


图7 仿水滴外形的速度云图(单位:m/s)

的最大速度 $v=21.683\text{ m/s}$,比仿鱼雷外形截面边界受到的最大速度 $v=21.711\text{ m/s}$ 小。由于速度越小,越不容易引起振动,说明仿水滴外形比仿鱼雷外形能延缓风速,有利于减小涡的生成。

两种套管外形的压力云图仿真结果如图8与图9所示。图中颜色由浅到深,表示压力由小变大。从图8和图9可以看出,当风速 $v=16\text{ m/s}$ 时,仿水滴形回转体气动模型的表面最大压力 $P_{\max}=564.8058\text{ Pa}$,它比仿鱼雷回转体气动模型的表面最大压力 $P_{\max}=569.0851\text{ Pa}$ 小,压力的增大会增加拉索沿流体运动方向振动概率的增加。可见,仿水滴外形做拉索外套的截面外形更为理想。

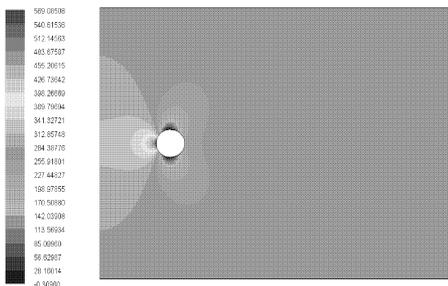


图8 仿鱼雷外形的压力云图(单位:Pa)

两种套管外形的阻力系数仿真结果如图10和图11所示。不同外形的阻力系数对比结果如表1所

示。从表1可以看到,仿水滴外形的阻力系数比仿鱼雷外形降低了4.5%,根据 $C_d=2F/\rho v^2 DL$ 得到在外界环境相同的前提下,阻力系数与阻力成正比。可见,仿水滴的提出能够有效减小拉索引起振动的概率,提高拉索的稳定性。

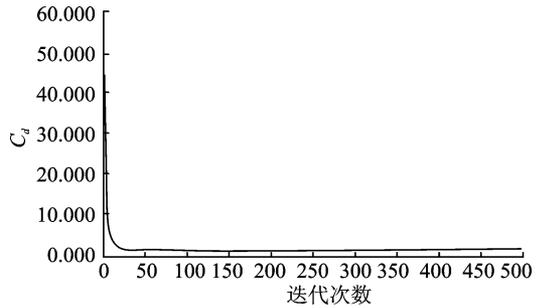


图10 仿鱼雷外形的阻力系数

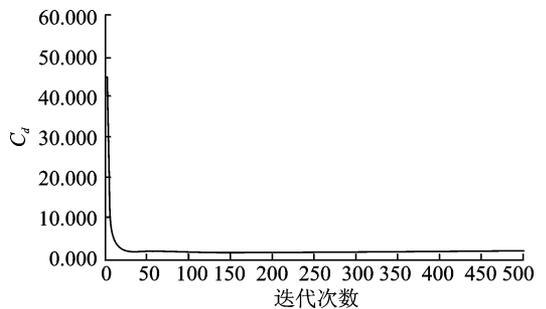


图11 仿水滴外形的阻力系数

表1 不同套管外形的阻力系数对比

名称	仿鱼雷	仿水滴	变化情况
C_d	1.692 376 4	1.619 565 9	降低4.5%

3 仿水滴外形的优化

仿水滴外形是基于阻力小的原则提出的,若气流经过拉索时在实际拉索外形尺寸改变的范围内,它受到的阻力不一定是最小的。结合引起拉索振动

的因素,采用Matlab遗传算法^[6]对外形进行参数优化,得出优化后的外形表达式。

3.1 优化目标的确定

为了使外形轮廓更精确,具有适用性,以最小压力差最小为优化目标,使物体前、后的能量损失降到最低,对仿水滴外形进行优化。由于压力差形成主要受阻力的影响,所以求最小压力差即为求最小阻力。流体绕过障碍物时受到的阻力的计算公式为

$$F_z = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (5)$$

其中: ρ 为空气密度(kg/m^3); A 为拉索截面面积(mm^2); C_d 为风阻系数; v 为来流速度(m/s)。

这里假定 y 轴方向上的直径 D 保持不变,通过积分得到拉索横截面积 A 的表达式,其中 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) 分别为3段曲线的两个连接点。

$$A = \frac{50x_1}{L_1} \sqrt{L_1^2 - x_1^2} + 50L_1 \arcsin\left(\frac{x_1}{L_1}\right) +$$

$$\frac{\pi}{2} L_1 50 + [k(x_1 + x_2) + 2b](x_2 - x_1) +$$

$$(L - L_1 - L_2)^2 \left\{ \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{(x_2 - L_1)}{(L - L_1 - L_2)} + \frac{\sin\left(2\arcsin \frac{(x_2 - L_1)}{(L - L_1 - L_2)}\right)}{2} \right\} \quad (6)$$

经计算可得 A 为关于外形参数 L, L_1, L_2 3个变量的表达式。考虑到实际中应用的拉索截面形状,给定3个变量的取值范围为: $132 \leq L \leq 134, 58 \leq L_1 \leq 59, 56 \leq L_2 \leq 57$ 。

$$F_z = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 =$$

$$\frac{1}{2} \rho A(L, L_1, L_2) \times 1.619\ 565\ 9 \times 10^2 \quad (7)$$

由式(7)可以得出 $\min F_z$ 即为 $\min A$ 。

3.2 约束条件的确定

由于拉索外套的材料为高密度聚乙烯, A 在满足最小的前提下必须满足该材料的强度要求。查表得HDPE管的许用强度为 5×10^6 Pa。拉索的强度计算公式为 F_f/A 。其中: F_f 为拉索外套所受到的风力; A 为拉索套管的迎风面积。

优化的约束条件为

$$F_f/A - 5 \times 10^6 \leq 0 \quad (8)$$

3.3 优化结果及仿真分析

运用Matlab编写遗传算法优化代码,3个自变量优化前、后的取值分别如表2所示。从表2可以看到3个自变量都有所变化。拉索外形的中间部分 L_2 有所增加,尾部圆的直径 $(L - L_1 - L_2)$ 减小,与准水滴形更相似,这说明优化后的外形在减阻方面具有优势。

表2 优化后自变量的取值 mm

自变量	优化前	优化后
L_1	58	58.021 4
L_2	56.5	56.969 6
L	132	132.123 7

表3 套管外形优化前的仿真结果

名称	最大值	最小值
P/Pa	162.916 8	-1.349 638
$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	10.078 01	0.443 997 9
C_d	1.619 565 9	

表4 套管外形优化后的仿真结果

名称	最大值	最小值
P/Pa	160.204 7	-2.053 342
$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	10.075 74	0.335 500 3
C_d	1.608 770 9	

通过表3和表4可以看到,优化后的各项系数都有所减低,说明当优化后的拉索外形与流体有相对运动时,稳定性越好,抗振动效果理想。

4 结束语

基于水滴形属于流线型及其仿生减阻的原理,提出能减小拉索套管阻力、改善边界所处压力和速度环境的一种新型回转体截面形状——仿水滴外形,运用Gambit,Fluent等软件进行仿真模拟,证明该外形可以有效降低振动。以阻力最小为优化目标,以拉索强度为约束条件,运用Matlab遗传算法对新外形进行参数优化设计。通过对优化前、后的物理模型进行数值模拟,并对模拟结果对比,发现优化后外形的临界最大压力值、速度值和阻力系数都有一定的减小,可以较好地降低斜拉索的振动。

参 考 文 献

- [1] 张蓉,马洪斌.斜拉索的振动分类及振动机理探讨[J].黑龙江科技信息,2008,23:206.
Zhang Rong, Ma Hongbin. The vibration classification of cable-stayed and the discussion of the vibration mechanism [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2008, 23: 206. (in Chinese)
- [2] 郭蹦.斜拉桥设计中拉索抗风问题研究综述[J].城市道桥与防洪,2008,8:161-166.
Guo Beng. Summarization on study of stay cable wind resistant problem in design of cable-stayed bridge [J]. Urban Rodas Bridges & Flood Control, 2008, 8: 161-166. (in Chinese)
- [3] 王金峰,刘斌.斜拉索的振动与抑振措施探讨[J].中国港湾建设,2006,1:34-37.
Wang Jinfeng, Liu Bin. Discussion on vibration of diagonal ties and measures against vibration [J]. China Harbour Engineering, 2006, 1: 34-37. (in Chinese)
- [4] 符旭晨,周岱,吴筑海.斜拉索的风振与减振[J].振动与冲击,2004,23(3):29-32.
Fu Xuchen, Zhou Dai, Wu Zhuhai. Study on wind induced vibration and vibration reduction of stayed cables [J]. Journal of Vibration and Shock, 2004, 23 (3): 29-32. (in Chinese)

- [5] 杜崇杰,王麟,李仕华,等.基于减振目的的斜拉索套管外形设计[J].机床与液压,2009,37(11):100-103.
Du Chongjie, Wang Lin, Li Shihua, et al. The design of cable-stayed casing shape based on the purpose of damping [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37 (11): 100-103. (in Chinese)
- [6] 张宝吉,马坤,纪卓尚.基于遗传算法的最小阻力船型优化设计[J].船舶力学,2011,15(4):325-333.
Zhang Baoji, Ma Kun, Ji Zhuoshang. Optimization design for hull form of minimum total resistance based on genetic algorithms [J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(4): 325-333. (in Chinese)



第一作者简介:李仕华,男,1966年10月生,教授、博士生导师。主要研究方向为机器人理论及设计、传感器及智能设计。曾发表《基于减振目的的斜拉索套管外形设计》(《机床与液压》2009年第37卷第11期)等论文。

E-mail: lifujuan1986@163.com