

覆冰导线在斜风下的气动力特性试验和数值模拟

王 侠, 晏致涛

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:斜风作用下, 输电线覆冰舞动往往为控制工况。基于斜风下的输电线气动特性是影响舞动的重要因素。文章主要研究新月形覆冰导线在斜风作用下的空气动力特性, 新月形覆冰导线随着风向角的变化, 及其三分力系数曲线变化。文章对斜风下覆冰导线三分力系数对传统的斜风分解法进行检验, 运用计算流体力学软件 Fluent 进行数值模拟和风洞试验两种不同方法, 对覆冰导线在斜风下的气动力特性进行研究, 把风洞试验的测得数据和数值模拟得到的结果进行比较得出, 数值模拟和试验结果吻合的很好。

关键词:覆冰导线; 风洞试验; 斜风分解法; 风向角; 气动力特性

中图分类号: TM621.5

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0088-04

Numerical Simulation and Dynamic Test of Iced Conductors under Skew Winds

WANG Xia, YAN Zhitao

(College of Civil Engineering of Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Galloping of iced conductors under skew winds is always controlling condition. The aerodynamic parameters of iced conductors under skew winds is the key factor of galloping. This paper studies aerodynamic characteristics of crescent iced conductors under skew winds. Under skew winds aerodynamic coefficients of iced conductors carries on the examination on the traditional oblique wind decomposition method, using computational fluid dynamics software FLUENT numerical simulation and wind tunnel test on two kinds of methods, the iced conductor in under skew wind aerodynamic characteristics are studied, the wind tunnel test measured data and numerical simulation results a comparison is drawn, numerical simulation and experimental results are in good agreement.

Key words: iced conductor, wind tunnel test, decomposition method of skew winds, yawed angel, fluent, aerodynamic characteristic

覆冰输电线的舞动一直是工程界所关心的热点问题, 中国经常大范围的输电线舞动造成了重大的经济损失。野外观测表明, 斜风下输电线的舞动的幅值和临界风速可能是更不利的。对于覆冰输电线的空气特性的研究有助于更加全面和精确地把握输电线的舞动分析和控制。目前, 针对输电线或拉索的气动三分力的研究主要是通过风洞试验或数值模拟实现。如 S. Chitra Ganapathi^[1] 模拟二维槽钢截面在不同湍流模型下三分力系数随风攻角的变化而不断变化。李万平^[2-3] 对三分裂覆冰导线系统的进行了气动力特性的测试, 得到了三分裂覆冰导线的气动特性。但是该试验是基于垂直风向的, 没有考虑斜风下的工况。顾明^[4] 进行了不同风向角下斜拉桥拉索模型测压试验, 试验得到了典型倾角的拉索模型在不同风向角下的气动力系数和平均和脉动风压系数。朱乐东等^[5-6] 对青马大桥斜风下主梁的三分力系数进行过风洞实测, 采用斜风分解法将斜风分解为平行于桥跨的平行分量和垂直于桥跨的法向分量, 分别计算横桥向和顺桥向的风荷载。由于上述研究是针对于拉索, 因此, 并未考虑覆冰。另外斜拉桥的拉索与输电线的型号也是不一致的。由于计算机技术的发展, 基于 CFD 技术的数值模拟并广泛应用

于结构的三分力分析, 如 Ali Vakil^[7] 对圆柱体在不同雷诺数下的三分力系数进行模拟。滕二甫^[8] 利用 Fluent 软件, 对覆冰导线的空气动力特性进行了数值模拟。同样, 以前的研究均假定垂直风为最不利工况。然而, 国内很少有人考虑覆冰导线在斜风作用下, 其空气动力特性随风向角变化而变化的规律。

文章的研究对象是新月形覆冰冰型, 通过风洞试验和数值模拟两种不同的分析方法对斜风下新月形覆冰导线的空气动力特性进行分析比较。通过风洞试验测试得到覆冰单导线在覆冰厚度为 12 mm 和风速在 12 m/s 下的静态空气动力特性。运用 Fluent 软件数值模拟了该新月形覆冰导线的气动力特性, 并将数值模拟结果和试验结果进行比较分析。

1 斜风下三分力系数的定义和斜风分解法

1.1 斜风下三分力系数的定义

导线覆冰后, 在空气中受到气流的作用, 产生阻力、升力和弯矩。斜风下覆冰导线所受的按风轴坐标系定义的三分力系数的定义如下:

$$\text{阻力系数 } C_D = F_D / (0.5\rho U^2 LD) \quad (1)$$

$$\text{升力系数 } C_L = F_L / (0.5\rho U^2 LD) \quad (2)$$

$$\text{弯矩系数 } C_M = F_M / (0.5\rho U^2 LD^2) \quad (3)$$

式中: F_D 、 F_L 、 F_M 分别指覆冰导线的所受到的阻力、升力、弯矩; ρ 指空气的密度, 为 2.225 kg/m^3 ; U 指来流风速; L 指导线的有效长度; D 指导线的直径。如图 1(a) 所示, 风攻角 α 是指来流的平均风方向与覆冰导线面之间的夹角; 如图 1(c) 所示风向角 β 是指来流的平均风方向与覆冰导线跨度的法向之间的水平夹角。

1.2 斜风分解法的检验

斜风分解法是把来流风速 U 分解成沿着导线向 $U \sin \beta$ 和垂直导线向 $U \cos \beta$ 。 $U \sin \beta$ 相对于 $U \cos \beta$ 较小, 所以一般将 $U \sin \beta$ 忽略。为了更好地把风洞试验得到的斜风下三分力系数与通过传统的斜风分解法得到的三分力系数进行对

比, 现定义以下 3 个系数:

$$R_D(\alpha, \beta) = C_D(\alpha, \beta) / (C_D(\alpha, 0) \cos^2 \beta) \quad (4)$$

$$R_L(\alpha, \beta) = C_L(\alpha, \beta) / (C_L(\alpha, 0) \cos^2 \beta) \quad (5)$$

$$R_M(\alpha, \beta) = C_M(\alpha, \beta) / (C_M(\alpha, 0) \cos^2 \beta) \quad (6)$$

式中: $C_D(\alpha, \beta)$ 、 $C_L(\alpha, \beta)$ 、 $C_M(\alpha, \beta)$ 和 $C_D(\alpha, 0)$ 、 $C_L(\alpha, 0)$ 、 $C_M(\alpha, 0)$ 分别是用风洞试验得到的风攻角为 α 风向角为 β 时的三分力系数和风攻角为 α 风偏角为 0° 时的三分力系数。图 2 给出的是 3 个系数比随风向角的变化曲线。风攻角 α 为 0° 。根据斜风分解法, 斜风下导线的三分力系数与风垂直导线轴线作用下导线的三分力系数存在以下关系:

$$(C_D, C_L, C_M)_{(\alpha, \beta)}^T = (C_D, C_L, C_M)_{(\alpha, 0)}^T \cos^2 \beta \quad (7)$$

式中: C_D 、 C_L 、 C_M 分别为阻力系数、升力系数和力矩系数; α 为风攻角; β 为风向角。

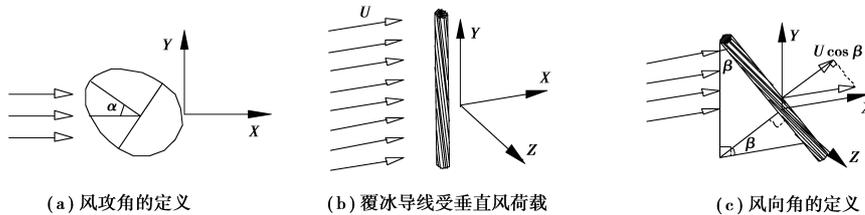


图 1 风攻角和风向角的定义

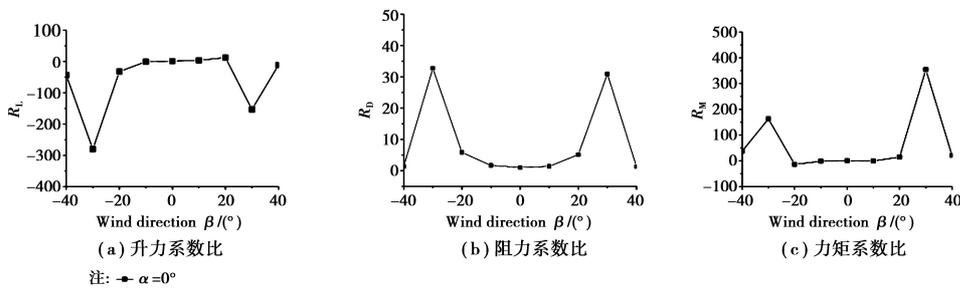


图 2 三分力系数比

在斜风作用下, 任一风攻角、风向角所对应的三分力系数比都应该为 1。但是, 从图中可以看出, 得到的不是 1, 而是随着风向角的增大而增大, 并且在 $\beta = \pm 30^\circ$ 时达到各个系数比的最大值。通过以上的对比分析说明基于用传统的斜风分解法得到的三分力系数进行斜风下覆冰导线风荷载计算是不合适的, 在这是因为通常使用传统的斜风分解法计算斜风下覆冰导线三分力时, 忽略沿导线方向的力, 上述分析得出这样的做法是不合适的。因此, 进行覆冰导线的三分力计算时, 必须考虑沿导线方向的力。本次风洞试验主要实测斜风下新月形覆冰导线沿导线方向的三分力系数。

2 覆冰导线模型风洞试验

本次试验在中国空气动力研究与发展中心低速所 $1.4 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$ 风洞进行。该风洞为直流式低速风洞, 试验段截面积为 1.8632 m^2 , 截面形状为切角矩形, 试验段长 2.8 m , 风速为 $0 \sim 65 \text{ m/s}$ 。测力试验使用 TG0151A、TG0151B 天平, 测量导线模型阻力、升力和弯矩(俯仰力矩)。测力试验数据采集系统为 PXI 系统。角度控制、速压控制由相应的工控机系统实现。设备之间由网络通讯传递指令。试验导线

型号是 4XLGJ—400/50。测试覆冰导线在不同风向角下的空气动力特性。导线直径为 27.6 mm , 长度为 700 mm 。试验模型如图 3 和图 4 所示。风攻角为 0° , 风向角为 $-40^\circ \sim 0^\circ$ 和 $0^\circ \sim 40^\circ$, 每隔 10° 取一个情况进行试验。

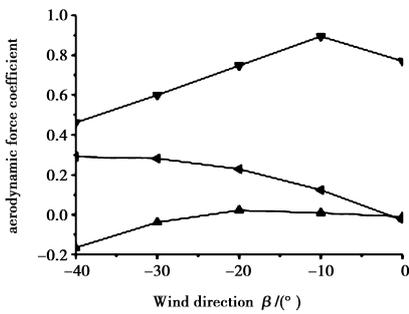
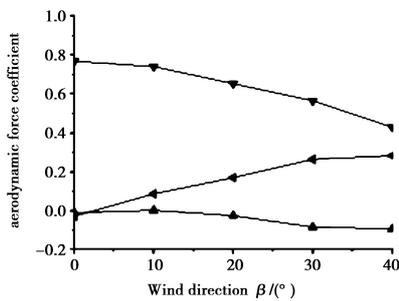


图 3 斜风下覆冰导线的试验模型



图 4 新月形覆冰导线试验模型

图 5 所示为由风洞试验测得的冰厚为 14 mm 新月形覆冰单导线在 12 m/s 风速下风向角的范围 $-40^\circ \sim 0^\circ$ 和 $0^\circ \sim 40^\circ$ 的阻力系数、升力系数和扭矩系数随风向角的变化曲线。覆冰导线风攻角为 0° ，初始风向角为 0° ，每隔 10° 测量一个点。

(a) 风向角在 $-40^\circ \sim 0^\circ$ 下三分力系数(b) 风向角在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 下三分力系数

注: \blacksquare C_d , \blacktriangle C_l , \bullet C_m

图 5 风洞试验测得三分力系数在 $-40^\circ \sim 0^\circ$ 和 $0^\circ \sim 40^\circ$ 随风向角的变化曲线

因为覆冰导线的风攻角为 0° ，此时迎风面积是所有攻角中最大的，所以通过风洞试验测得斜风下覆冰导线的三分力系数的变化就如图 3 所示。从图 3 中可以得到以下几个结论：(1) 在 $-40^\circ \sim 0^\circ$ 和 $0^\circ \sim 40^\circ$ 范围内，升力系数和力矩系数的取值都较小，在 0° 时接近于 0，随着风向角的增大而微幅增大；(2) 阻力系数在 0° 时取得最大值 0.77，随着风向角的增大，阻力系数逐渐减小，这是由于覆冰导线的迎风截面在垂直方向的投影面积在不断减小所造成的。

3 覆冰导线绕流数值模拟

利用计算流体力学软件 Fluent 进行数值模拟新月形覆冰导线绕流问题。计算采用有限体积法，为了解决动量方程中速度分量和压力耦合问题，采用 SIMPLEC 算法。这里之所以采用 SIMPLEC 算法，而不采用 SIMPLE 算法，是因为 SIMPLE 算法为求解的方便，略去了速度修正值方程中得项，这样加重了修正的负担，但是 SIMPLEC 算法并没有省略速度修正项，因此得到的压力修正值比较合适。湍流模型采

用 Realizable $k-\epsilon$ 模型，因为 Realizable $k-\epsilon$ 模型比标准的 $k-\epsilon$ 模型更能有效用于管道内流动，它引入了与旋转和曲率有关的内容，而且能更好地表示光谱的能量转换。近壁面函数的选择是通过将不同的湍流模型和壁面函数进行组合，并对不同的组合进行数值模拟，最后选定湍流模型，近壁面函数采用 Enhanced Wall Treatment^[9]。在这种组合下模拟结果与风洞试验结果吻合最好。边界条件：风洞的四面以及覆冰导线的表面设为壁面(wall)，进口处设为速度进口(velocity-inlet)，出口为压力出口(pressure-outlet)。

数值模拟时，导线直径为 27.6 mm，覆冰导线厚度为 12 mm，风速为 12 m/s。计算风向角的范围为 $-40^\circ \sim 40^\circ$ ，导线初始角为 0° ，每隔 10° 作为一个工况进行计算。采用三维模型如图 6 所示，非结构化网格，在网格划分时，在靠近导线的部分实施网格加密。当网格总数达到 100 万时，数值模拟结果和试验结果已经较吻合，这里考虑网格的独立性，对其进行优化，最后网格总数为 150 多万时，数值模拟结果和试验结果吻合最好，并且不能继续优化。由于网格数量较大，采用稳态计算。试验中覆冰导线表面粗糙，因此在进行数值模拟时，在 Fluent 中对导线表面粗糙度进行调整。网格划分如图 7 所示。

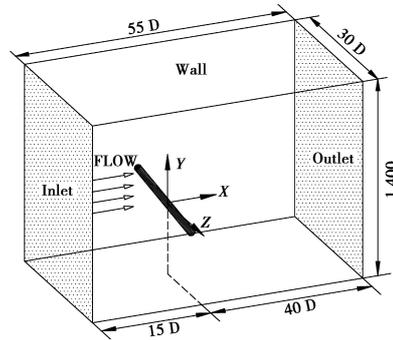


图 6 三维模拟

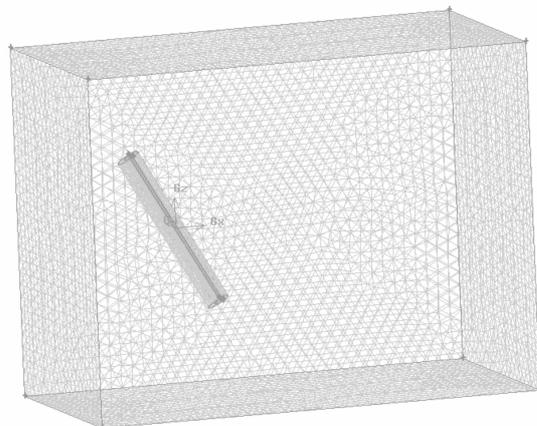


图 7 网格划分

4 试验结果和数值模拟结果比较

风洞试验所测得的斜风下三分力的方向是测量沿覆冰导线方向的，而 Fluent 数值模拟得到的是竖直方向的，所以在进行试验结果和数值模拟结果进行比较时，需对数值模拟的结果进行角度转换，如图 8 所示。

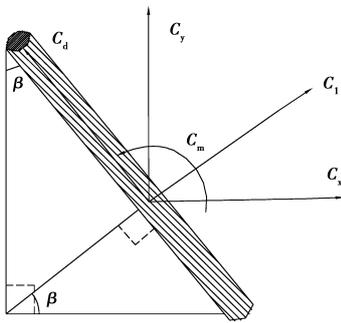


图 8 角度转换

$$C_l = -(C_x \sin\beta + C_y \cos\beta) \quad (7)$$

$$C_d = C_x \cos\beta - C_y \sin\beta \quad (8)$$

图 9 所示,三分力系数随风向角的变化曲线。阻力系数

在 -40° 至 0° 之间呈中间突起两端低,在 $\beta = -10^\circ$ 处达到最大值 0.89,在 $\beta = -40^\circ$ 处最小为 0.46,这正反映了新月形冰型在 -10° 处迎风面积在垂直方向的投影面积最大,在 -40° 处覆冰导线的迎风面积在垂直方向的投影面积最小。阻力系数在 0° 至 40° 呈逐渐减小趋势,最小是 $\beta = 40^\circ$ 时为 0.43。这反映了阻力系数在风向角为 0° 时,迎风面积在垂直方向的投影面积最大, 40° 迎风面积在垂直方向的投影面积最小。

数值模拟结果和实验结果相比较,从图中可以看出,阻力系数和力矩系数的模拟结果和实验结果吻合的非常好,升力系数的模拟结果和试验测得的结果有些微的差异,不过在误差允许范围内。由于升力系数是脉动的,较理想的方法是采用非稳态计算,取其平均值,这样比较符合试验结果。本次模拟考虑到网格数量较多,计算时间较长,所以采用了稳态计算。

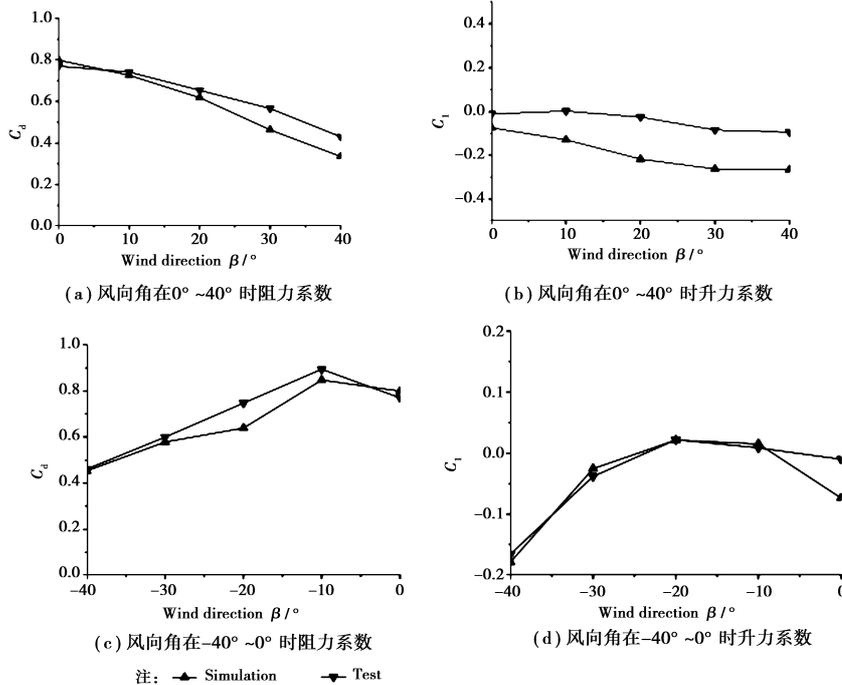


图 9 数值模拟结果和试验结果的比较

5 比较斜风下新月形覆冰导线和斜拉索的空气动力特性

目前有很多人做过斜风下斜拉索桥的空气动力特性的风洞试验和数值模拟,得到斜风下斜拉索的三分力系数。风攻角为 0° ,风向角为 $0^\circ \sim 45^\circ$,阻力系数为 $0.9 \sim 0.6$,在 0° 时,阻力系数取得最大值 0.9,随着风向角的增大而逐渐减小;升力系数为 $0 \sim 0.15$,在 0° 时,升力系数取得最大值 0.15,随着风向角的增大而逐渐减小;升力矩系数为 $0.08 \sim 0.05$,在 0° 时,升力矩系数取得最大值 0.08,随着风向角的增大而逐渐减小^[10]。

从上述风洞试验结果和数值模拟结果,可以得到斜风下新月形覆冰导线的空气动力特性。斜风下,风攻角为 0° ,风向角为 $0^\circ \sim 40^\circ$,阻力系数为 $0.77 \sim 0.43$,在 0° 时,阻力系数

取得最大值 0.77,随着风向角的增大而逐渐减小;升力系数为 $0.03 \sim -0.17$,在 40° 时,升力系数取得最大值 -0.17 ,随着风向角的增大而逐渐增大;力矩系数为 $-0.02 \sim 0.28$,在 40° 时,力矩系数取得最大值 0.28,随着风向角的增大而逐渐增大。

通过上面比较,可以得到:1)阻力系数都是随着风向角的增大而减小,但是斜拉索的取值要比覆冰导线的值大得多;2)升力系数和力矩系数的变化曲线完全相反,并且覆冰导线的力矩系数在 40° 时,取值比斜拉索的大非常多。覆冰导线和斜拉索在斜风下空气动力特性区别这么大,是因为:1)斜拉索未覆冰;2)斜拉索的尺寸也和覆冰导线差别很大,两者的刚度也有所不同。

表 1 主管杆端轴向位移

时间/点	6.00	10.00	14.00	20.00	26.00	30.00	38.00	40.00	46.00	50.00	60.00
YHK	0.248	0.331	0.417	-0.501	0.687	0.803	1.199	-1.188	1.719	1.9526	-2.766
YNK	0.230	0.307	0.385	-0.463	0.634	0.720	0.902	-0.928	1.147	1.2089	-1.466

4 结论

本文在试验的基础上采用 ANSYS 有限元软件,对直接焊接平面 K 型圆钢管搭接节点隐藏焊缝焊与不焊在往复荷载下的滞回性能进行分析,发现隐藏焊缝焊与不焊对节点承载力有比较明显的影响:

1)在同等加载受力条件下,YHK 节点破坏时节点的极限承载力高于 YNK 节点的极限承载力,试验数据得出 YHK 的极限承载力比 YNK 极限承载力高出 3% 左右,有限元模拟分析得出该数据 2.52%。

2)同等条件下 YHK 的延性相对好一些。随着承载力的增大,变形速度的增大程度也不一样,到最后 YHK 的位移大约是 YNK 位移的两倍左右,从滞回曲线的饱满度可以看到 YHK 节点在耗能方面也比 YNK 节点的好。

3)ANSYS 模拟计算结果和试验实测结果吻合较好,说明相贯节点的滞回性能的试验通过有限元模拟试验分析是可行的,同时验证了本次试验的有效性。进一步说明 ANAYS 软件的精确性和广泛的可应用性。

参考文献:

- [1] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [2] European Committee for Standardization. BSEN1993-1-8 design of Steel Structure[S]. Englang: Civil Engineering Corp,2005.
- [3] 刘建平. 钢管相贯节点的研究现状和动向[J]. 钢结构,2003,18(4): 13-15,28.
LIU Jianping. The status and trend of research on steel tubular intersecting joints[J]. Steel Construction, 2003, 18(4): 13-15,28.
- [4] 詹琛. 空间直接焊接圆钢管节点足尺试验研究[D]. 上海:同济大学,2000.

(上接第 91 页)

6 结论

通过风洞试验获得斜风下不同风向角覆冰导线的三分力系数变化曲线,通过斜风分解法得到的三分力系数比,再利用 Fluent 进行数值模拟。得到以下结论:

1)用传统的斜风分解法得到的三分力系数进行斜风下覆冰导线风荷载计算是不适用的,必须通过风洞试验实测斜风下覆冰导线的三分力系数。

2)使用 Fluent 进行数值模拟,数值模拟的结果和风洞试验测得的结果吻合的较好,可以在一定范围内使用 Fluent 数值模拟来取代风洞试验。

3)斜拉索的空气动力特性和覆冰导线的差别很大。

参考文献:

- [1] S CHITRA GANAPATHI, P HARIKRISHNA, S ARUNACHALAM, et al. Numerical investigations on aerodynamic characteristics of 2-D channel section using two-equation turbulence models[EB/OL]. [2012-01-01]. http://www.ntnu.no.
- [2] 李万平,杨新详,张立志. 覆冰导线群的静气动力特性[J]. 空气动力学学报,1995, 13(4):427-434.
- [3] 李万平,黄河,何程. 特大覆冰导线气动力特性测试[J]. 华中科

[5] 陈以一,沈祖炎,翟红,等. 圆钢管相贯节点滞回特性的试验研究[J]. 建筑结构学报,2003, 24(6): 58-63.

CHEN Yiyi, SHEN Zuyan, ZHAI Hong, et al. Experimental research on hysteretic property of unstiffened space tubular joints[J]. Journal of Building Structures,2003, 24(6): 58-63.

[6] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S](GB 50017—2003 Code for the design of steel structures[S](in Chinese))

[7] 丁芸孙. 圆管结构相贯节点几个设计问题的探讨[J]. 空间结构,2002, 8(2): 56-64.

DING Yunsun. Discussion on some design problems in circular tubular joints[J]. Spatial Structures, 2002, 8(2): 56-64.

[8] 王秀丽,李强,殷占忠. 圆管相贯节点的承载力性能研究[J]. 甘肃科学学报,2006,18(2): 97-90.

WANG Xiuli, LI Qiang, YIN Zhanzhong. A research for strength performance of ring-stiffened circular tubular Y-joints[J]. Journal of Gansu Sciences, 2006,18(2): 97-90.

[9] American welding society (AWS). AWS D1. 1-90 Structural Welding Code-Steel[S]. 12th ed. Miami, FL: American Welding Society,1990.

[10] 武振宇,陈鹏,王渊阳. T 型方管节点滞回性能的试验研究[J]. 土木工程学报. 2008,41(12).

[11] 吴捷. 圆钢管结构 K 形搭接节点受力性能及设计方法研究[D]. 南京:东南大学土木工程学院,2006.

[12] Gazzola F, Lee M M K, Dexter E M. Design equation for overlap tubular K-joints under axial loading[J]. Journal of Structural Engineering,2000,126(7):798-803.

[13] Dexter E M, Lee M M K. Static strength of axially loaded tubular K-joints (II): Ultimate capacity[J]. Journal of Strural Engineering,1999,125(2):194-201.

(编辑 彭建国)

技大学学报,2001,29(8):84-86.

[4] 顾明,杜晓庆. 不同风向角下斜拉桥拉索模型测压试验研究[J]. 振动与冲击,2005,24(6):5-9.

[5] ZHU L D, XU Y L, ZHANG F, et al. Tsing Ma Bridge deck under skew winds-Part I: aerodynamic coefficients[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(7): 781-805.

[6] ZHU L D, XU Y L, ZHANG F, et al. Tsing Ma Bridge deck under skew winds-Part II: flutter derivatives[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(7): 807-837.

[7] ALI VAKIL, SHELDON I GREEN. Drag and lift coefficients of inclined finite circular cylinders at moderate Reynolds Numbers[J]. Computers & Fluids 2009,38(9) 1771-1781.

[8] 腾二甫,段忠东,张秀华. 新月形覆冰导线气动特性的数值模拟[J]. 低温建筑技术,2008(1):86-88.

[9] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 清华大学出版社,2004.

[10] 刘小兵. 斜风下大跨度桥梁主梁三分力系数试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2008,35(9):10-14.

(编辑 詹燕平)