

文章编号:0258-1825(2011)01-0091-07

发生风雨激振拉索表面水膜形态数值分析和实测初探

许林汕, 赵林, 葛耀君

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:结合 Lemaitre 斜拉索表面水膜风致形变解析算法, 对数学模型中拉索运动方程进行修正, 使其能计入拉索风致运动对表面附着水膜形态的影响, 通过差分方法对方程进行数值求解, 并进行参数分析; 研究拉索表面水膜在重力、表面风压、表面摩擦力、表面张力作用下的形态变化, 得到拉索发生风雨激振时表面水线的运动规律及形态变化。采用超声波探测仪对拉索表面水膜进行动态测量, 实时获得拉索风雨激振形态下表面水膜动态响应数据, 通过与水膜运动数值算法结果进行对比一定程度上探讨了圆截面斜拉索风雨激振发生机理。

关键词:斜拉索风雨激振、水膜计算理论、参数分析、水膜形态、水膜动态测量计

中图分类号: V211.3

文献标识码: A

0 引言

自 20 世纪 80 年代, 日本的 Hikami 和 Shiraishi^[1] 在主跨为 402m 的 Meiko 桥上首次实测到了拉索的风雨激振以来, 研究人员通过大量的现场观测和风洞试验确定了一些和拉索风雨激振密切相关的因素, 为了对这一现象进一步地深入了解, 从 1990 年 Yamaguchi^[2] 建立拉索风雨激振理论模型开始, 各国学者相继建立一系列拉索风雨激振分析模型进行机理研究。

目前的理论模型大多是拉索和水线耦合气动失稳理论^[2-7], 气动力一般是通过在一定空间姿态下带人工水线拉索模型测力或测压试验获得, 水线形态固定, 认为只有上水线存在才能发生风雨激振。上述模型揭示的拉索发生风雨激振的机理是: 在风雨条件下拉索表面存在一条做周期振荡的上水线, 水线与拉索的耦合运动是拉索出现风雨激振的必要条件。

笔者通过实验发现, 拉索在低风速大雨量、高风速小雨量情况下都会发生风雨激振^[8]。对于低风速风雨激振, 拉索表面并不会形成振荡上水线, 雨水从拉索表面呈螺旋状滑落; 对于高风速风雨激振, 拉索表面上水线高度和位置随拉索振动发生变化。对于此类风雨激振现象, 有必要对运动拉索表面水的变化进行数值分析, 并结合风洞试验测量发生风雨激振拉索表面所附着

水的动态变化, 对深入揭示拉索风雨激振机理具有重要意义。

上水线是由于雨滴在风力和重力共同作用下堆积在拉索上表面的, 雨滴处于离散状态, 将其等效为一层薄膜更便于进行理论研究。本文简要介绍一种基于滑移理论的水膜计算模型, 对模型中拉索运动方程进行修正, 可用于分析发生风雨激振时拉索表面水膜形态的变化, 并通过数值计算分析风压、摩擦力、重力、表面张力等因素的影响, 得到水膜的变化规律, 为实验和计算提供水线形态变化依据; 采用超声仪对拉索表面水进行动态测量, 获得发生风雨激振拉索表面水膜数据, 其结果与理论计算具有较好的可比性, 初步验证了数值模型的合理性。

1 水膜计算理论

1992 年 Reisfeld 和 Bankoff 等^[9] 推导出基于滑移理论模型, 用于计算拉索表面水膜在重力和表面张力作用下形态的变化, C. Lemaitre^[10] 在该模型的基础上, 将风作为外部荷载, 研究水膜形态的变化, 但计算中拉索仍然是静止的, 没有研究在拉索运动过程中水膜形态的变化, 笔者对该方程进行分析发现, 若拉索运动方程没有表示周期项的 2π , 数值算法无法计算拉索运动时水膜形态的变化。本文对拉索运动方程进行补充修正, 可以

* 收稿日期: 2010-06-29; 修订日期: 2010-08-05.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90715039)和科技部国家重点实验室基础研究资助项目(SLDRCE08-C-02)联合资助.

作者简介: 许林汕(1983-)男, 博士研究生, 主要从事桥梁抗风研究.

考虑拉索运动对水膜形态变化的影响,进一步对该模型进行分析。

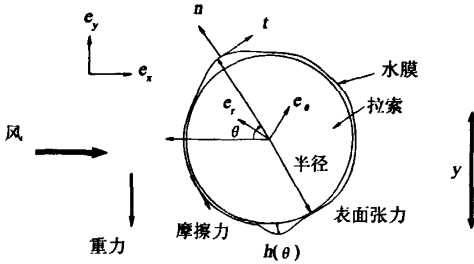


图1 水膜计算模型

Fig.1 Water film around a cable subject to gravity, surface tension and swept by wind

如图1所示水平放置的拉索,在重力、表面风压、表面摩擦力、表面张力作用下,无量纲化的水膜运动方程可以表示为:

$$\partial_\tau H + \partial_\theta \{ -[G + Af''(\Omega, T)]H^3 \cos\theta + S(\partial_\theta H + \partial_\theta^2 H)H^2 - p\partial_\theta(C_p)H^3 + F\bar{C}_f H^2 \} = 0 \quad (1)$$

式中,无量纲参数 H 、 G 、 S 、 P 、 F 分别表示为水膜厚度、重力加速度、水膜表面张力、风压、水膜表面的摩擦力, C_p 、 \bar{C}_f 分别为风压系数和摩擦力系数, A 表示拉索的运动加速度, Ω 表示折算频率,和拉索的特征频率(发生风雨激振时的频率)相对应,上述符号定义见参考文献[10]。 f 为拉索的运动方程,设:

$$g = [-(G + Af'') \cos\theta + S(\partial_\theta H + \partial_\theta^2 H) - p\partial_\theta(C_p)] H^2 + F\bar{C}_f H^2 \quad (2)$$

则式(1)可以简化为:

$$\partial_\tau H + \partial_\theta g = 0 \quad (3)$$

笔者对 Lemaitre 模型中的拉索运动方程进行修正,使该模型可以考虑拉索运动对水膜的影响。假设拉索位移随时间变化可以表示为:

$$y(t) = y_0 f(2\pi t/T) \quad (4)$$

其中 t 表示时间, T 为拉索振动周期,假定该函数二阶可微,那么拉索的加速度可定义为:

$$g_a = -\ddot{y}e_y = -4\pi^2 \frac{y_0}{T^2} f''(2\pi \frac{t}{T}) e_y \quad (5)$$

对拉索加速度方程进行无量纲化后代入水膜运动方程可得:

$$\partial_\tau H + \partial_\theta \{ -[G + 4\pi^2 Af''(\Omega, T)]H^3 \cos\theta + S(\partial_\theta H + \partial_\theta^2 H)H^2 - p\partial_\theta(C_p)H^3 + F\bar{C}_f H^2 \} = 0 \quad (6)$$

该方程即为修正后的水膜运动方程,将拉索加速度时程作为已知荷载输入,可得到水膜运动时程。本文采

用有限差分格式对水膜运动方程进行求解。

2 计算参数

计算中所用到的基本参数如下,拉索水平放置,风偏角 $\alpha = 0^\circ$,拉索倾角 $\beta = 0^\circ$ 。假定作用在水膜上的风压可以用作用在干索表面的风压代替。在风雨条件下,拉索模型的雷诺数约为 10^5 ,拉索的半径 $R = 0.1\text{m}$,风速为 10m/s ,拉索表面水膜初始厚度为 $h_0 = 5 \times 10^{-4}\text{m}$ 。风压系数取标准圆柱体绕流表面平均压力系数曲线,如图2所示,摩擦力系数取值见参考文献[11]。1968年, Achenbach^[11]测量了相同雷诺数光滑圆柱体绕流表面摩擦力系数曲线,本文将应用此结果进行计算。见图3。因为拉索表面压力与摩擦力在数量级上是相同的,在计算中摩擦力项不可以忽略。

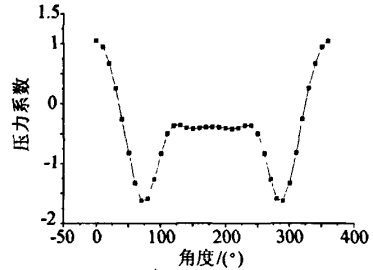


图2 拉索表面压力分布图

Fig.2 Normalized pressure coefficients

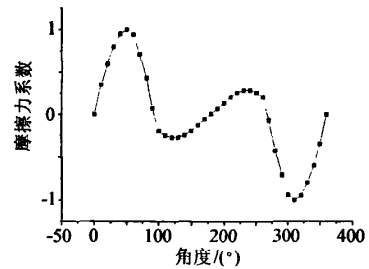


图3 拉索表面摩擦力分布

Fig.3 Normalized friction coefficients

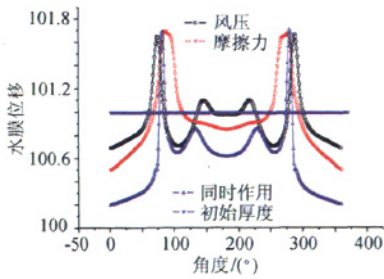
3 表面风压和摩擦力的影响

本文的水膜运动模型中,将作用在水膜上的力分为四项,分别为重力、表面张力、风压和摩擦力,其中拉索表面风压分布和摩擦力系数分布通过试验获得。在以往的试验中,拉索测力和表面测压得到的阻力系数和升力系数,测力结果比测压结果大10%左右^[12,13],这是由于通过表面测压结果积分得到的静气动力系数忽略了

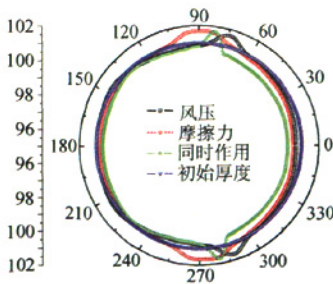
表面摩擦力所导致的。研究拉索表面水膜仅受到表面风压、摩擦力作用和两者共同作用时,水膜形态的变化,是非常必要的。下面将通过不同的参数设置,来研究风压和摩擦力对水膜形态变化的影响:

- (1) 假定作用在水膜上的力只有表面张力和风压;
- (2) 假定作用在水膜上的力只有表面张力和摩擦力;
- (3) 假定作用在水膜上的力有表面张力、风压和摩擦力;

计算结果见图 4。从图中可以看出,风压和表面摩擦力对水膜位移变化的影响是同量级的。但风压和摩擦力对水膜形态的变化影响又有所不同,在表面风压和表面张力共同作用下,水线的位置位于拉索表面漩涡脱落区,水膜形态与风压系数曲线形态一致;在表面摩擦力和表面张力共同作用下,水线位于圆柱最高点和最低点;表面风压和表面摩擦力共同作用时,水线位于两者单独作用之间的位置,两者单独作用时和共同作用时水线的高度和范围也有所区别,因此,摩擦力在拉索风雨激振计算模型中是不可以忽略的,拉索表面水膜的形态由两者共同决定。为清楚显示水膜形态的变化,图中纵坐标没有从 0 开始,只显示了水膜高度范围。



(a) 拉索表面水膜的形态变化



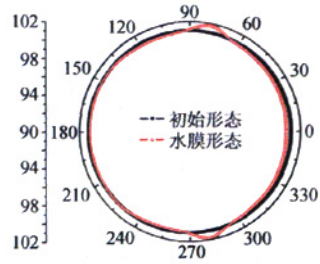
(b) 拉索表面水膜的位移变化

图 4 拉索表面水膜位移

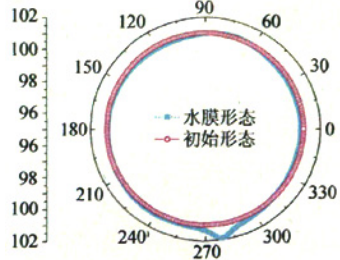
ig. 4 The shape of water film around cable

4 拉索运动状态的影响

当发生风雨激振时,拉索处于稳定正弦振动状态,其表面的水膜形态在不同的振动状态下也必然是不同的。本文对水膜方程进行修正后,可以计算不同运动状态下拉索表面水膜形态,取无量纲拉索加速度 $A = 11$,这时,拉索加速度和重力加速度大小基本一致^[13],设定不同的拉索加速度方向,将得到不同的水膜加速度,同时也会得到不同的水膜形态。图 5(a)为 A, G 反向时水膜形态,图示为拉索与水膜相对位置示意图。当 A, G 反向时,水膜加速度基本为零,水膜形态与静止状态基本相同,这时水膜形态主要受风的影响,拉索受到风压和摩擦力的作用,水膜在拉索表面应基本对称,图 5(a)所示正是如此,这也验证了本文对拉索运动方程修正的正确性;当 A, G 同向时,水膜加速度基本为重力加速度的两倍,这时风和加速度使水膜的变化趋势相反,两者的作用结果将相互抵消,计算结果如图 5(b)所示。上水线处处只有微小变化,相对于下水线,其高度很小。



(a) A, G 反向 (opposite) 时水膜形态



(b) A, G 同向 (same) 时水膜形态

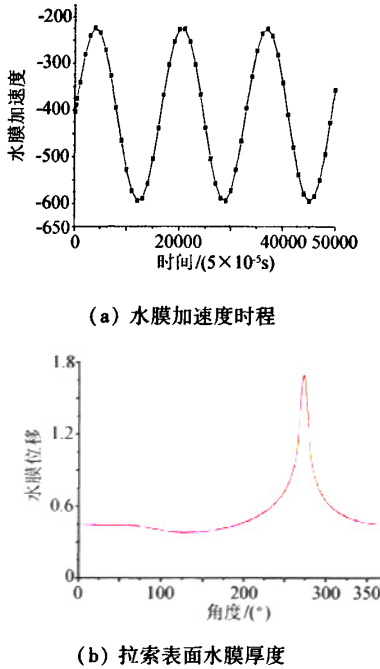
图 5 A, G 反向/同向时的水膜形态

Fig. 5 The shape of water film when A and G is in opposite/same direction

5 发生风雨激振拉索表面水膜形态

在确定修正方程计算可行,结果正确后,继续研究

发生风雨激振时拉索表面水膜形态的动态变化。拉索有两个较为明显的风雨振区域^[8],低风速大雨量区域和高风速小雨量区域,本文参考文献中的参数(4.1m/s, 80mm/h;8.7m/s,10mm/h),分别计算这两种风雨振时拉索表面水膜的动态变化。



(a) 水膜加速度时程

(b) 拉索表面水膜厚度

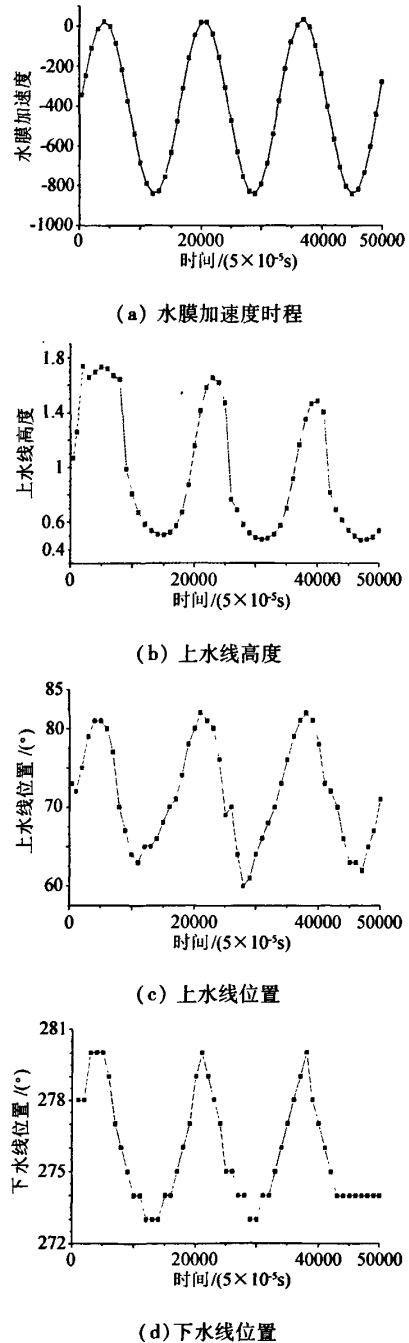
图6 风速4.1m/s、拉索振幅8.1cm,拉索表面水膜变化
Fig.6 The change of water film when wind velocity is 4.1m/s and amplitude of cable is 8.1cm

水膜加速度由重力加速度与拉索运动加速度组成,重力加速度为恒定值,拉索运动加速度正弦变化,两者合成后为正弦曲线。

当风速为4.1m/s、雨量为80mm/h时,拉索风雨激振振幅为8.1cm时,拉索表面水膜加速度时程曲线如图6(a)所示。图6(b)为发生风雨激振时拉索表面各点水膜的厚度,这时拉索上表面并没有明显的上水线存在,拉索上表面水膜厚度基本一致,仅在下表面存在一条明显的水线。实验中观测到的现象也是如此,较低的风速不足以使雨水在拉索上表面堆集,雨水从拉索表面呈螺旋状滑落。这些为数众多螺旋状水线对气动力改变是否和高风速上水线的作用一致,有待于进一步研究。

当风速为8.7m/s、雨量为10mm/h时,拉索风雨激振振幅为19.1cm时,拉索表面水膜加速度时程曲线如图7(a)所示。图7(b)为反映上水线高度的时程曲线,规律是随加速度同频变化,但在高位停留时间短,反映

在曲线上就是高位点稀疏,时间短;在低位停留时间长,反映在曲线上就是低位点较密集,并且时间跨度长;这



(a) 水膜加速度时程

(b) 上水线高度

(c) 上水线位置

(d) 下水线位置

图7 风速10.0m/s、拉索振幅19.1cm,拉索表面水膜变化
Fig.7 The change of water film when wind velocity is 10.0m/s and amplitude of cable is 19.1cm

是因为水线的平衡位置处于低位,由于外力作用达到高位后,要迅速恢复到平衡位置。图7(c)为拉索振荡时,上水线位置的时程曲线,其规律是随拉索同频振动。图7(d)为下水线位置的时程曲线,随拉索振动同频变化,但范围非常小,其高度基本不变。

通过上述分析可知,在4.1m/s风速下,拉索虽然发生风雨激振,但没有明显的上水线存在;在8.7m/s风速下,当拉索发生大幅风雨激振时,拉索表面会出现上下两条水线,上水线高度、位置随拉索同频变化,下水线会发生小幅振动,但其高度基本不变。此结果对拉索气动力风洞实测和拉索表面气动力计算有重要的意义,在这两项工作中,必须模拟水线的变化规律,才能获得拉索表面气动力准确值。

6 拉索表面水膜动态测量

为测量发生风雨激振的拉索表面水膜厚度,采用超声微波仪,测量了直径为 $\Phi 100\text{mm}$ 的拉索发生风雨激振时表面水膜的厚度。该系统主要由四部分组成,超声脉冲发生器;马达、探头、信号反射面;固定支架;数据采集分析系统,如图8(a)所示。该系统的工作原理:首先由信号发生器产生脉冲信号,并由探头发射,经信号反

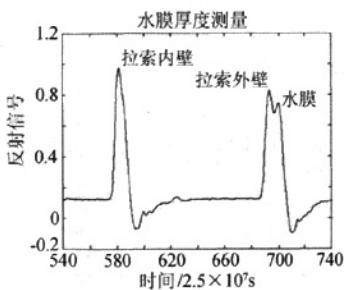
射面反射到索壁,由马达带动信号反射面转动,可将信号反射到索壁的不同位置,并由探头接收回波,经数据采集系统进行采集、存储、分析。由反射面发出的信号到达索壁后,经拉索内壁、外壁、拉索表面水膜发射后,共有三个反射信号,计算反射信号的时间差,乘以超声波在水中的传播速度,即可得到拉索表面的水膜厚度,如图8(b)所示。

作者对实测数据进行分析。该拉索在风速为8m/s、雨量为30mm/h时发生大幅风雨振动,这时拉索表面水膜实测值如图9(a)所示。拉索上下表面各有一条水线,高度在0.3mm~0.7mm之间,上水线位置在 $67^\circ\sim 90^\circ$ 之间,下水线位置在 270° ,变化不大。当风速为4m/s、雨量为30mm/h时,拉索表面没有明显的上水线存在,如图9(b)所示,这与实验中观测到的现象一致,当风速低于6m/s时,雨水从拉索表面滑落。理论计算结果也是如此,上水线区域,拉索表面水的高度变化很小,只在拉索下表面有一条明显的水线,如图6(b)所示。

文献[14]采用具有更高识别精度的设备对水膜厚度进行了测量,得到上水线较为详细的数据。上水线振动频率与拉索振动频率相同^[14],上水线振动范围在 $20^\circ\sim 25^\circ$ 之间^[2],这和本文10m/s风雨激振计算结果相同,



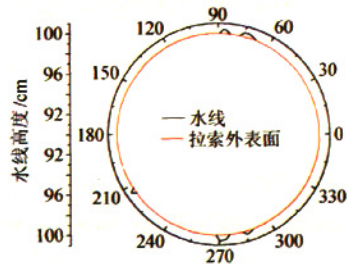
(a)



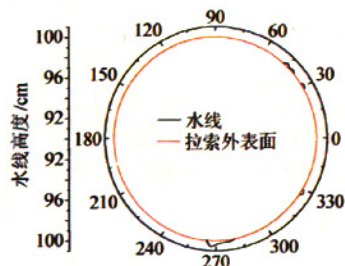
(b)

图8 模型装配及测量原理

Fig.8 Assemblage of UTMS and the principle of measurement



(a)



(b)

图9 实测拉索表面水膜厚度

Fig.9 The measured result of water film

见图7。上水线平均厚度为 $0.509\text{mm}^{[14]}$,本文由于选取水膜厚度为无量纲参数1,计算结果与实测结果没有可比性,只有选取适当的初始水膜厚度,才能得到与实测结果具有可比性的结论,这需要在实测中对非水线区域水的平均厚度进行高精度的识别。水线应当是有光滑边界的,这是自然状态水的存在形式,在本文的计算中也得到证明,文献[14]实测结果为梯形,笔者认为是由于对水线边界的采样点少,分辨率较低造成的,提高超声发射频率,获得尽可能多地采样点,可以得到具有光滑边界的水线。

7 结论

本文对水膜运动方程进行修正,在计算中可以考虑拉索振动对水膜运动的影响,初步开展了发生风雨激振拉索表面水膜的动态实测,从拉索水膜运动理论分析和实测结果,可得到以下结论:

(1) 表面风压和摩擦力对上水线的影响是相同量级的,在计算中摩擦力不能忽略,水线的位置、高度由二者共同决定。

(2) 在对拉索运动方程进行修正后,得到了高风速拉索发生风雨激振时表面水线的变化规律:低风速风雨激振时,拉索表面没有明显上水线存在,其发生机理需要进一步研究,亦从另一个侧面说明拉索表面上水线并非产生风雨激振的必要条件;高风速风雨激振时,拉索表面出现上下两条水线,上水线高度、位置与振动拉索同频变化;下水线位置与拉索同频变化,但幅值很小,高度基本不变。

(3) 初步开展了发生风雨激振拉索表面水膜动态测量,实测和理论计算结果在上水线振动频率和振幅上具有较好一致性;需要对非水线区域的水膜厚度进行识别,得到合理的水膜厚度初值,为计算水线高度提供参考。

本文理论计算和水膜实测在多个方面取得与风洞试验结果较为一致的结论,初步验证了数值模拟的合理性;但由于文中拉索压力系数和摩擦力系数曲线都是由干索测得,并没有反映由于水的存在和其变化导致拉索表面气动力的变化。有必要测量发生风雨激振时拉索表面气动力的变化;尝试建立气固液耦合的立体计算理论,获得拉索表面气动力变化,得到拉索及表面水的运动形态,而不是通过输入拉索运动方式,获得表面水的形态变化。

参 考 文 献

- [1] HIKAMI Y, SHIRAISHI N. Rain - wind induced vibration of cables in cable stayed bridges[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998 (29): 409 - 418.
- [2] YAMAGUCHI H. Analytical study on growth mechanism of rain vibration of cable[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990,33: 73 - 80.
- [3] BOSDOGIANNI A, OLIVARI D. Wind - and rain - induced oscillations of cable of stayed bridge[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996,64: 171 - 185.
- [4] 顾明,刘慈军,徐幼麟.带人工雨线的拉索在风雨激励下的响应[J].*应用数学和力学*,2002,23(10):1047 - 1054.
- [5] Y. L. XU, L. Y. WANG. Analytical study of wind - rain - induced cable vibration: SDOF model[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003,91: 27 - 40.
- [6] VAN DRE BURGH A H P, HARTONO. Rain - wind - induced vibrations of a simple oscillator[J]. *International Journal of Non - linear Mechanics*, 2003,39: 93 - 1001.
- [7] 李寿英,顾明,陈政清.准运动水线三维连续弹性拉索风雨激振理论模型[J].*工程力学*,2007,24(6):7 - 14.
- [8] L. S. XU, Y. J. GE, L. ZHAO. Experimental investigation of rain - wind - induced vibration of stay cables based on high precision raining machine[R]. APCWE - VII, 701 - 704.
- [9] REISFELD B, BANKOFF S G. Non - isothermal flow of a liquid film on a horizontal cylinder[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1992 (236): 167 - 196.
- [10] LEMAITRE C. Thin water film around a cable subject to wind[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007,95:1259 - 1271.
- [11] ACHENBACH E. Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in a cross - flow up to Re 5 - 106[J]. *Fluid Mech*, 1968, 34 (4): 625 - 639.
- [12] 林志兴,杨立波,李文勃.斜拉桥拉索顺桥向风阻系数的实验研究[J].*郑州大学学报*,2006,26(3):38 - 41.
- [13] 李文勃,林志兴,杨立波.超长斜拉索风阻系数及风雨激振的试验研究[J].*振动、测试与诊断*,2005,25(6):85 - 90.
- [14] 陈文礼,李惠,李凤臣.斜拉索风雨激振水线的超声波测试研究[J].*地震工程与工程振动*,2009,29(2):139 - 145.

Numerical analysis and real - time measurement of water - film on rain - wind induced vibration dable

XU Lin - shan¹, ZHAO Lin¹, GE Yao - jun¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction of Civil Engineering, Tongji Univ., Shanghai 200092, China)

Abstract: Combined the algorithm of wind - induced deformation of water film on stayed - cable which developed by Lemaitre, equation of motion in the mathematical model was modified, morphologic changing of water film which induced by the motion of cable could be concerned. Through solving the function by difference methods and parametric analysis, the evolution of water film which subject to gravity, wind pressure, friction and surface tension was investigated. We had got the movement and morphologic changing of the water rivulet when rain - wind induced vibration (RWIV) happened. Use ultrasonic transmission thickness measurement system (UTTMS), the real - time dynamic response data of the water film in condition of RWIV are measured. Compare the result with that of numerical analysis; the mechanism of RWIV of cable with circle cross section has been investigated in some extent.

Key words: rain - wind induced vibration of cable; theoretical analysis of water - film; parameters analysis; shape of water - film; real - time measurement of water - film

(上接第101页)

- [13] CHEN X Y, ZHA G C. 3D Simulation of a transonic wing flutter using an efficient high resolution upwind scheme[R]. AIAA 2006 - 3216. 19(9): 1240 - 1242.
- [14] ISOGAI K. On the transonic - dip mechanism of flutter of a sweptback Wing [J]. *AIAA Journal*, 1979, 17(7): 793 - 795. [16] YATES E C. AGARD standard aeroelastic configurations for dynamic response, I - Wing 445.6[R]. NASA - TM - 100492, 1987.
- [15] ISOGAI K. Transonic dip mechanism of flutter of a sweptback wing: Part II[J]. *AIAA Journal*, 1981, [17] LEE - RAUSCH E. BATINA J. Wing flutter boundary prediction using unsteady euler aerodynamics Method[R]. NASA - TM - 107732, 1993.

Numerical simulation of wing flutter based on multigrid method

ZHU Biao, QIAO Zhi - de, SONG Wen - ping, HAN Zhong - hua

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aerodynamic Design and Research, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Numerical simulation of aircraft's flutter is rather expensive and time - consuming. In order to save expense and calculating time, an efficient fluid - structure interaction solver based on multigrid is developed. The flow governing equations coupled with aeroelastic equations are solved using finite volume algorithm based on multigrid method. For the structural displacements a modal approach is applied. Radial basis function (RBF) method is used for data interaction between CFD and CSD. The system is marched implicitly in time domain using a dual time stepping method. The flutter speed boundary and flutter frequency boundary of Isogai wing model and Agard 445.6 wing are obtained by using above method. The results are in good agreement with related references, it is shown that the method based on multigrid method is effective for aeroelastic simulation.

Key words: multigrid method; Navier - Stokes equations; flutter; radial basis function