

文章编号:1671-6833(2005)01-0033-05

斜拉桥拉索风雨激振的试验研究

李文勃, 林志兴

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 风雨激振现象是斜拉桥拉索在风雨共同作用下经常发生的一种激烈的大幅振动, 危害性很大, 涉及固、液、气三态, 情况复杂. 为了揭示风雨激振的一些内在规律, 进行了人工降雨雨振试验和人工水线雨振试验. 通过人工降雨雨振试验, 再现了拉索风雨激振现象, 通过人工水线雨振试验, 研究了水线的大小和位置、斜拉索动力参数及偏转角等对风雨激振的影响. 试验结果表明: 在拉索表面形成一定大小的上水线是拉索发生风雨激振的必要条件, 且上水线要在拉索表面特定的范围内形成; 增大阻尼和自振频率可有效减小拉索的风雨激振振幅; 拉索的风雨激振现象只能发生在一个特定的偏转角范围内.

关键词: 斜拉桥; 拉索; 风雨激振; 风洞试验

中图分类号: TU 448.27 **文献标识码:** A

0 引言

风雨激振是在风和雨的共同作用下, 斜拉桥拉索(或拱桥吊杆^[1])发生的一种激烈的大幅振动. 日本的 Hkani (1986) 在名港西大桥上首先发现风雨激振现象^[2], 我国新建成的南京长江二桥也发生了较严重的风雨激振现象, 斜拉索风雨激振已成为斜拉桥设计和施工中普遍关注的问题.

风雨激振发生时的风速一般为 $6\sim 18\text{ m/s}$, 雷诺数在 6×10^4 到 2×10^5 之间. 雨是拉索发生如此激烈振动的必要条件, 在大、中、小雨状况下都可能发生拉索风雨激振. 发生风雨激振时斜拉索上有上水线形成. 通常只在沿风向向下倾斜的索上发生风雨激振. 振动多发生在 PE 包裹的拉索上, 拉索直径一般为 $80\sim 200\text{ mm}$, 在表面有灰尘的拉索较容易发生. 振幅峰峰值为 $50\sim 100\text{ cm}$ 的大振幅, 约 $3\sim 4$ 倍直径. 频率 $1\sim 3\text{ Hz}$, 与拉索的自振频率相同振型. 多为单一振型, $1\sim 4$ 阶振型均有出现. 振动常以“拍”的形式出现.

通过人工降雨雨振试验和人工水线雨振试验, 再现风雨激振现象, 并研究水线、斜拉索动力参数及偏转角对风雨激振的影响.

1 模型试验

试验均在同济大学土木工程防灾国家重点实

验室 TJ-1 风洞的自由射流区进行. TJ-1 风洞为试验段 $1.8\text{ m}\times 1.8\text{ m}\times 12\text{ m}$ 直流吸式风洞, 为使 TJ-1 扩散段出口自由射流区能达到拉索风雨激振试验的流场要求, 在出口端加了一段总长 2 m 的收缩稳定段.

1.1 试验装置

试验装置包括拉索支架、阻尼装置、弹簧及模型、喷洒装置和供水系统五部分, 照片如图 1 所示. 拉索支架可悬挂斜置的拉索, 并可改变拉索的俯仰角, 弹簧与拉索垂直, 拉索可在弹簧与拉索组成的平面内沿弹簧悬挂方向振动. 在斜拉索两端各有一套阻尼装置, 整个支架通过在地面上的转轴可改变拉索偏转角.

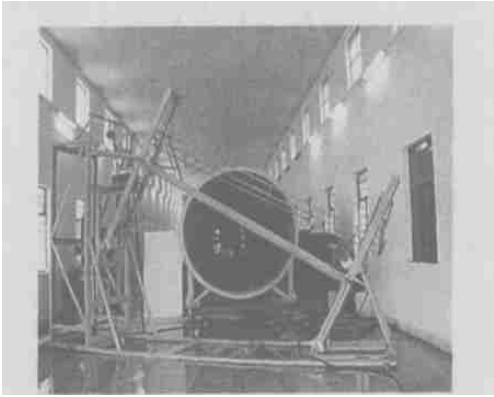


图 1 试验装置照片

Fig. 1 Photograph of testing set up

收稿日期:2004-10-08; 修订日期:2005-01-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(95895410); 上海市科委科技发展基金资助项目(036511002)

作者简介:李文勃(1975-), 男, 河南省灵宝市人, 同济大学博士研究生, 主要从事桥梁抗风研究.

1.2 人工降雨雨振试验

这是一个弹簧悬挂刚性节段模型的单自由度振动试验系统, 为了避开模型试验的尺寸效应及雷诺数 Re 模拟上的困难, 试验的模型直径与南京二桥发生雨振的实际拉索相同, 风速、雨量及频率均按 1:1 进行模拟. 放宽质量及阻尼值满足模型与原型Scrutton 数 $s_c = \frac{4\pi m \zeta}{\rho D^2}$ (其中 m 为单位长度斜拉索的质量, ζ 为阻尼比, ρ 为空气密度, D 为斜拉索的直径) 相等的条件. 试验的拉索模型直径为 120 mm, 长度为 3 500 mm. 模型拉索总重为 22.9 kg, 实际拉索的重量为 181.3 kg. 试验中采用了 2 种模型, 表面光滑的拉索模型和表面粗糙处理过的拉索模型. 实桥观测表明, 发生风雨激振 1.0~3.0 Hz 之间, 选取了如表 1 所示的 5 种频率, 表 1 中还给出了对应 5 种频率试验系统的实测阻尼比. 拉索空间姿态与上水线平衡位置示意分别见图 2 和图 3. 表 2 列出了人工降雨雨振试验的主要工况.

表 1 阻尼比实测值表

Tab. 1 Damping ratio obtained from measurement				
频率/Hz	阻尼 A	阻尼 B	阻尼 C	阻尼 D
0.937 5	0.138%	—	—	0.836%
1.437 5	0.217%	0.480%	0.596%	0.830%
1.967 0	0.351%	—	—	0.580%
2.375 0	0.489%	—	—	0.697%
2.812 5	0.650%	—	—	0.568%

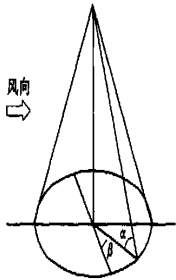


图 2 拉索空间位置示意图

Fig. 2 Definition of indination α and yaw angle β

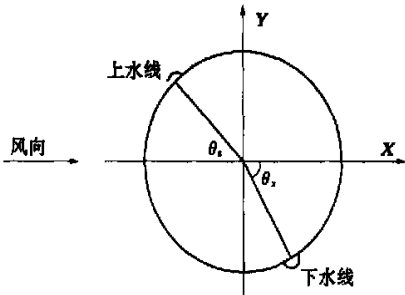


图 3 水线平衡角示意图

Fig. 3 Definition of balance angle of rivulet

表 2 人工降雨雨振试验工况表

Tab. 2 Arrangement of rain-wind induced vibration test with artificial rain						
工况序号	工况类型	模型类型	俯仰角 $\alpha/(^{\circ})$	偏转角 $\beta/(^{\circ})$	频率 /Hz	阻尼片
1	变化粗糙度	光滑拉索	30	45	1.967 0	D
2		粗糙拉索	30	45	1.967 0	D
3		光滑拉索	30	0	1.437 5	A
4		粗糙拉索	30	0	1.437 5	A
5	变化偏转角	粗糙拉索	30	22	1.437 5	A
6		粗糙拉索	30	30	1.437 5	A
7		粗糙拉索	30	45	1.437 5	A
8	变化频率	粗糙拉索	30	22	0.937 5	A
9		粗糙拉索	30	22	1.967 0	A
10		粗糙拉索	30	22	2.375 0	A
11		粗糙拉索	30	22	2.812 5	A
12	变化阻尼	粗糙拉索	30	22	1.437 5	B
13		粗糙拉索	30	22	1.437 5	C
14		粗糙拉索	30	22	1.437 5	D
15	无雨	粗糙拉索	30	22	1.437 5	A
16		粗糙拉索	30	22	1.437 5	B
17		粗糙拉索	30	22	1.437 5	C
18		粗糙拉索	30	22	1.437 5	D
19		粗糙拉索	30	30	1.437 5	A

1.3 人工水线雨振试验

用半个橡皮管粘贴在拉索表面来模拟自然水线, 用人工水线代替人工降雨, 经比较试验, 下水线在风雨激振中的作用可以忽略不计, 试验中不予模拟. 人工水线模型是在 1.2 节的拉索表面粘贴半圆形橡胶管, 试验中共用了 3 种大小的水线, 如图 4 所示. 试验工况安排见表 3.

表 3 人工水线雨振试验工况表

Tab. 3 Arrangement of rain-wind induced vibration test with artificial rivulet							
工况序号	工况类型	水线类型	水线平衡角 $\alpha/(^{\circ})$	俯仰角 $\alpha/(^{\circ})$	偏转角 $\beta/(^{\circ})$	频率 /Hz	阻尼片
1	变化阻尼	水线 1	47	30	22	1.437 5	A
2		水线 1	47	30	22	1.437 5	D
3		水线 1	47	30	22	1.437 5	B
4		水线 1	47	30	22	1.437 5	C
5	变化偏转角	水线 1	47	30	0	1.437 5	A
6		水线 1	47	30	30	1.437 5	A
7		水线 1	47	30	45	1.437 5	A
8	变化频率(1)	水线 1	47	30	60	1.437 5	A
9		水线 1	47	30	22	0.937 5	A
10		水线 1	47	30	22	2.812 5	A
11		水线 1	47	30	22	0.937 5	D
12	变化频率(2)	水线 1	47	30	22	1.967 0	D
13		水线 1	47	30	22	2.375 0	D
14		水线 1	47	30	22	2.812 5	D

续表 3

工况 序号	工况 类型	水线 类型	水线平衡 角/(°)	俯仰角 $\alpha/(^{\circ})$	偏转角 $\beta/(^{\circ})$	频率 /Hz	阻尼 片
15	变化 水线	水线 2	47	30	22	1.437 5	A
16		水线 3	47	30	22	1.437 5	A
17		水线 1	43	30	22	1.437 5	A
18		水线 1	45	30	22	1.437 5	A
19	变化水线	水线 1	53	30	22	1.437 5	A
20	平衡角	水线 1	55	30	22	1.437 5	A
21		水线 1	90	30	22	1.437 5	A

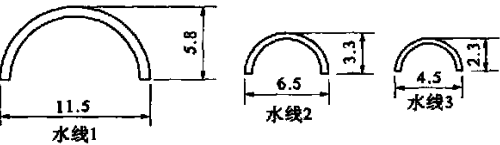


图 4 人工水线示意图
Fig. 4 Hcture of artificial rivulets

2 结果分析

2.1 风雨激振的现象

在人工降雨雨振试验中, 仅在工况 6 下发生了风雨激振现象, 但这个现象不太稳定, 持续时间约 2 min. 图 5 为俯仰角 $\alpha=30^{\circ}$, 偏转角 $\beta=22^{\circ}$, 频率 $f=1.437\text{ Hz}$, 阻尼比为 0.217% 时, 斜拉索在有、无人工降雨两种工况下(即工况 6 和工况 15)斜拉索的振幅(振幅指峰峰值) 随风速变化曲线, 斜拉索在有雨时的振幅远大于无雨时的振幅.

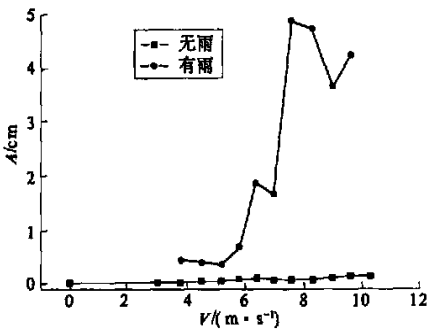


图 5 有、无人工降雨时的振幅随风速变化
Fig. 5 Vibration amplitudes of cable model as a function of wind velocity with and without raining simulation

2.2 水线对风雨激振的影响

2.2.1 有无水线对风雨激振的影响

图 6 为人工水线雨振试验工况 1 与人工降雨雨振试验工况 15 振幅随风速变化曲线的比较, 说明水线是斜拉索发生风雨激振的必要条件.

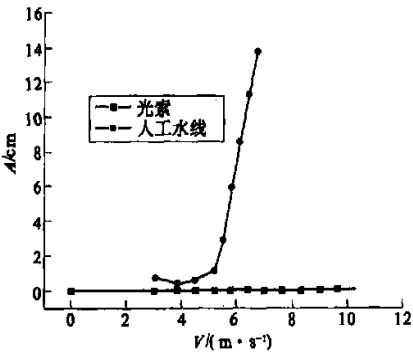


图 6 有无人工水线比较
Fig. 6 Vibration amplitudes of cable model as a function of wind velocity with and without artificial rivet

2.2.2 水线大小对风雨激振的影响

通过人工水线雨振试验的工况 1, 15, 16, 进行了水线大小对风雨激振影响的试验研究. 图 7 为 3 种工况的振幅随风速变化曲线比较, 前两种工况下发生了风雨激振现象, 起振风速均为 5.2 m/s, 第三种工况下未发生风雨激振现象, 说明仅当水线高度大于某个界限发生风雨激振, 并且界限以上的水线大小对风雨激振的影响不大.

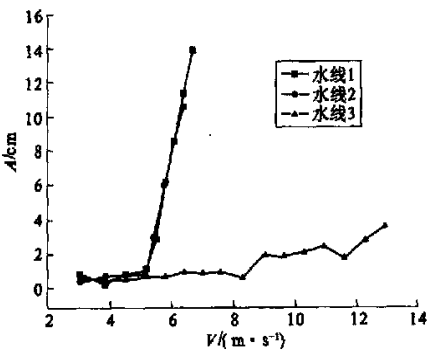


图 7 3 种不同水线的比较
Fig. 7 Vibration amplitudes of cable model as a function of wind velocity with three different artificial rivulets

2.2.3 水线平衡角对风雨激振的影响

通过人工水线雨振试验的工况 17, 18, 1, 19, 20, 21 来研究水线平衡角对风雨激振的影响. 图 8 为 6 种工况的振幅随风速变化曲线比较, 水线平衡角为 45° , 47° , 53° , 55° 时发生了风雨激振现象, 起振风速分别为 6.4, 5.2, 10.3, 10.3 m/s, 水线平衡角为 43° , 90° 时未发生风雨激振现象, 说明水线平衡角在某个范围内时拉索发生风雨激振, 出此范围时拉索不会发生风雨激振. 本文中的范围为 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}$.

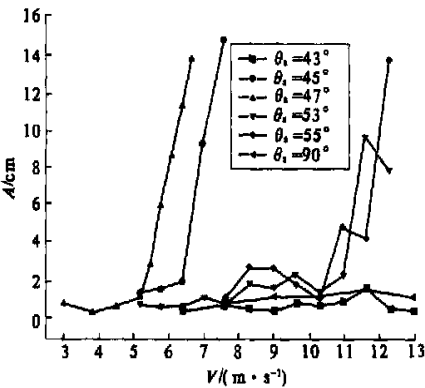


图 8 不同水线平衡角比较

Fig. 8 Vibration amplitudes of cable model as a function of wind velocity with different balance angles of artificial rivulet

2.3 斜拉索动力参数对风雨激振的影响

2.3.1 频率对风雨激振的影响

通过人工水线雨振试验的工况 9, 1, 10 和工况 11, 2, 12, 13, 14 两组工况来研究频率对斜拉索风雨激振的影响, 振幅随风速变化比较分别如图 9 和 10. 根据试验中观察结合图 9、图 10 知, 工况 9, 10, 11, 2, 12, 13, 14 下发生了风雨激振现象, 起振风速分别为 5.2 m/s、10.3 m/s、8.3 m/s、8.3 m/s、10.3 m/s、6.9 m/s、12.3 m/s, 斜拉索风雨激振的起振风速、发散风速随频率增加而增大, 对应的振幅随频率增加而减小.

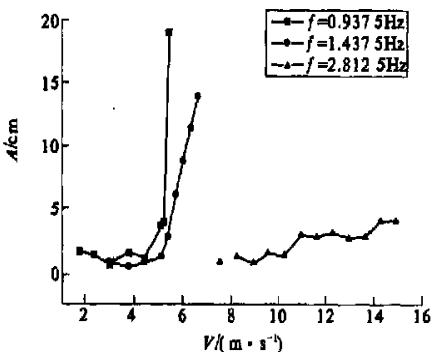


图 9 不同频率的 V-A 曲线比较 (阻尼 A)

Fig. 9 Vibration amplitudes of cable model as a function of wind velocity with different nature frequencies (damper A)

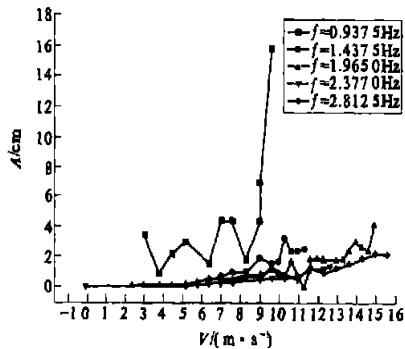


图 10 不同频率的 V-A 曲线比较 (阻尼 D)

Fig. 10 Vibration amplitudes of cable model as a function of wind velocity with different nature frequencies (damper D)

2.3.2 阻尼对风雨激振的影响

通过两类试验来研究阻尼对斜拉索风雨激振的影响, 人工降雨雨振试验工况为第 5, 12, 14 和人工水线雨振试验工况第 1, 3, 4, 2, 振幅随风速变化比较分别如图 11 和 12. 由图可知人工水线雨振试验工况 3, 4 对应的起振风速分别为 7.6 m/s 和 7.9 m/s, 在小阻尼时斜拉索发生了明显的风雨激振现象, 而增大阻尼后风雨激振现象迅速减弱下来, 提高阻尼可以提高起振风速并减小起振振幅.

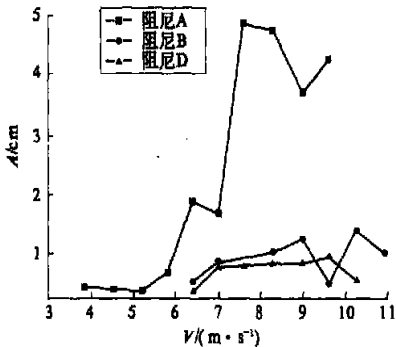


图 11 人工降雨试验工况比较图

Fig. 11 Vibration amplitudes of cable model as a function of wind velocity with different damping ratios with raining simulation

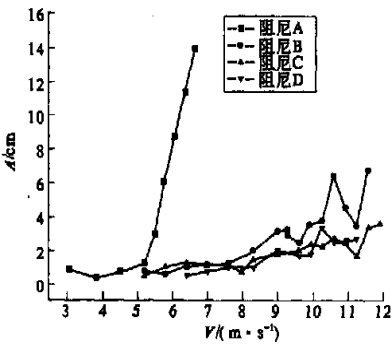


图 12 人工水线试验工况比较

Fig. 12 Vibration amplitudes of cable model as a function of wind velocity with different damping ratios with artificial rivulet

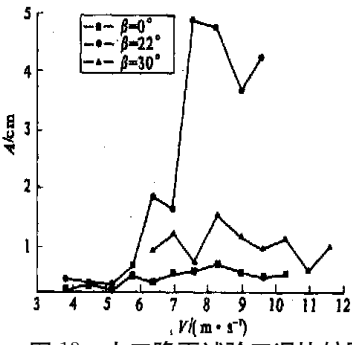


图 13 人工降雨试验工况比较图

Fig. 13 Vibration amplitudes of cable model as a function of wind velocity with different yaw angles with raining simulation

2.4 偏转角对风雨激振的影响

通过人工降雨雨振试验第4,5,6,7四个工况和人工水线雨振试验中第5,1,6,7,8五个工况来研究偏转角对斜拉索风雨激振的影响,人工水线雨振工况5,6下起振风速为6.1 m/s 和8.3 m/s ,7,8两种工况下拉索未发生风雨激振现象.从图13可以看出,仅在偏转角为22°时发生了风雨激振现象,说明风雨激振需要在一个特定的偏转角下才能发生.由人工水线雨振试验结果看到,当来流的偏转角在一个特定范围时斜拉索发生风雨激振,并且在此范围内,存在最易发生风雨激振的一个角度,此时起振风速和发散风速最小,能发生风雨激振的偏转角范围是0~30°,最易发生风雨激振的上水线平衡角度在22°附近.

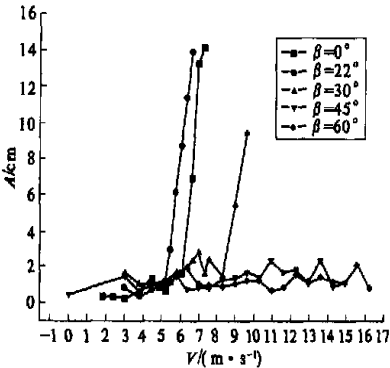


图 14 人工水线试验工况比较

Fig.14 Vibration amplitudes of cable model as a function of wind velocity with different yaw angles with artificial rivulet

3 结论

(1) 水线是斜拉索发生风雨激振的必要条

件;对一直径确定的斜拉索,存在一水线的高度界限,超过该水线高度时,会发生风雨激振现象,低于该高度时,不会发生风雨激振.

(2) 存在一个上水线的平衡角区间,水线在此区间内时,将发生拉索风雨激振,水线离开该区间时风雨激振现象消失.

(3) 拉索的风雨激振起振风速和发散风速与拉索的固有频率成正比.

(4) 存在一个来流风向与斜拉索平面间的偏转角范围,在此范围内可能发生拉索的风雨激振,并在其中某偏转角下使风雨激振的振幅最大.

(5) 拉索发生风雨激振的风速和拉索的阻尼成正比,振幅和拉索的阻尼成反比,增大阻尼是抑制拉索风雨激振的有效途径.

参考文献:

[1] BOSDOGIANNI A, OLIVRAI D. Wind and rain induced oscillations of cables of stayed bridges[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics , 1996,(64) :171 ~185.

[2] HKAM Y,SHRAISH N.Rain wind induced vibration of cables in cable stayed bridges[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics , 1988,(29) :409 ~418.

[3] 李文勃.斜拉桥拉索风雨激振及气动减振措施研究[D].上海:同济大学桥梁工程系,2002.

[4] 李加武,林志兴,项海帆.极端桥梁断面雷诺数效应研究[J].郑州大学学报(工学版),2003,24(2) :22~25.

Experimental Study on Rain -wind Induced Vibration of Cables in Cable -stayed Bridge

LI Wen -bo , LI N Zhi -xing

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering ,Tongji University ,Shanghai 200092,China)

Abstract : Rain wind induced vibration is a destructive large amplitude vibration ,which often occurs under the combined influence of wind and rain .Rain wind induced vibration is a very complex phenomenon concerned with rain , wind and cable ,and its mechanism is not well explained yet .In this paper the rain wind induced vibration tests with artificial rain or artificial upper rivulet are carried out to clarify the mechanism of rain wind induced vibration . The phenomenon of rain wind induced vibration of a cable model is reproduced under condition of simulation of rain and wind .A cable model with artificial upper rivulet has also been tested ,and the effects of some parameters such as the size and position of rivulet ,the dynamic parameters of cable model and wind yaw angle etc . on the rain wind induced vibration are experimentally investigated .The results show that the upper rivulet which must be larger than a threshold and on some scope of the cable surface seem the prerequisite for the appearance of rain wind induced vibration of the cable ,and that vibration amplitude of rain wind induced vibration will decrease obviously with the increase of frequency and damping of a cable ,and that cables are susceptible to rain wind induced vibration at wind angles between 0° and 30° .

Key words : Cable stayed bridge ; cable ; rain -wind induced vibration ; wind tunnel test