

文章编号: 1000-0887(2002) 10-1047-08

带人工雨线的拉索在风激励下的响应^{*}

顾明¹, 刘慈军¹, 徐幼麟², 项海帆¹

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 香港理工大学 土木与结构工程系 香港)

(钱伟长推荐)

摘要: 通过在风洞中对一具有可调动力特性、雨线位置和风向角的带人工雨线的拉索模型进行了试验, 研究了拉索的风雨激振特性。试验结果和其他研究人员的结果进行了仔细对比, 得到了一些新的结论, 澄清了过去的一些模糊认识。结果表明, 带人工雨线的水平索在风向为零时的响应可以用 Den Hartog 驰振机制来解释, 而风向不为零时, 拉索表现为限速振动或限速和驰振的混合型振动。

关键词: 拉索; 人工雨线; 风洞; 驰振; 限速振动

中图分类号: U442 **文献标识码:** A

引言

近 10 多年来, 世界上已有很多关于斜拉桥拉索在风雨共同作用下发生强烈振动的报道^[1~5]。作者最近在上海杨浦大桥上也观察到拉索的风雨激振现象^[6]。杨浦大桥全长 602 m, 在中等雨量和 12~17 m/s 风速的共同作用下, 拉索发生强烈振动, 护套断裂。后来虽然安装了新的橡胶阻尼器, 但仍然可观察到索的大幅振动。

为了发现这一振动的机制, 人们进行了现场实测^[1, 4, 5]、风洞试验^[7~11]和理论分析^[12, 13]。其中, 以风洞试验方法为主。在风洞试验中, 主要有两种模拟雨线的方法。一种是在拉索上方喷水, 模拟实际降雨, 形成水线^[7]; 另一种是在拉索模型上粘贴人工水线, 模拟实际水线的作用^[9]。目前至少已经认识到, 在拉索上表面形成的水线对拉索的风雨激振起着决定性的作用。Bosdogianni 和 Olivari 最近还比较了拉索模型上有运动水线和固定水线的风洞试验结果^[10], 指出, 上水线的位置而不是其运动和形状产生了拉索的振动。

本文通过在不同风向角下对具有不同参数的人工雨线拉索模型进行试验, 研究拉索风雨激振的机制。得出的新的结论主要有: 风向角为零时拉索的振动可用 Den Hartog 驰振机制来解释; 风向角不为零时, 拉索为限速振动和限速驰振混合型振动。

1 试验装置

试验在同济大学 TJ_2 边界层风洞中进行。风洞试验段高 2.5 m, 宽 3 m, 试验风速范围 3~

* 收稿日期: 2000_06_03; 修订日期: 2002_04_11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50178049); 国家杰出青年科学基金和教育部“高等学校骨干教师资助计划”资助项目

作者简介: 顾明(1957—), 男, 江苏兴化人, 教授, 博士, 长江学者。

67 m/s。本试验的风速范围为 3~ 16 m/s, 风速步长为 1 m/s。试验在紊流度低于 1% 的均匀流风场中进行。

拉索模型为直径 120 mm, 长 2.5 m 的聚氯乙烯管。木质人工雨线沿模型轴向粘贴。模型由弹簧支撑(见图 1)。通过改变弹簧或在模型端部增加质量, 可改变模型的振动频率。模型阻尼由图 1 中所示的固定在弹簧上的钢丝圈提供。模型振动时, 钢丝圈随弹簧发生变形, 从而吸收模型系统的能量。改变钢丝圈的直径和簧丝的直径可得到不同的阻尼。试验表明, 这一阻尼器提供的阻尼在大振幅时亦具有很好的重复性。模型可在 0°~ 45° 之间转动(参见图 1), 以模拟 0°~ 45° 的风向变化。文献[8]指出, 水平索和倾斜索的振动有相同的机理。因而, 为简化试验并使参数变化更明确, 本试验模型水平放置。

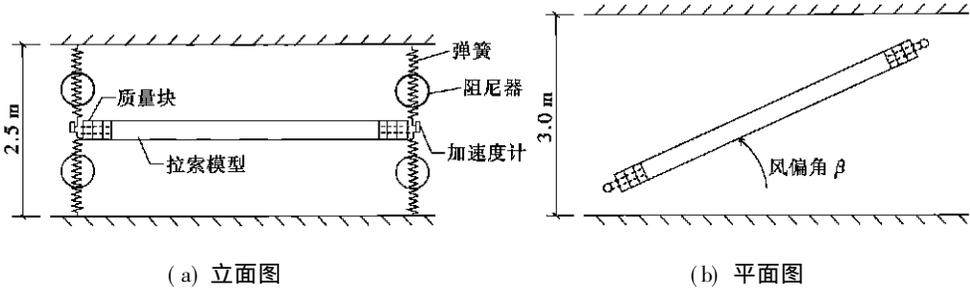


图 1 试验装置示意图

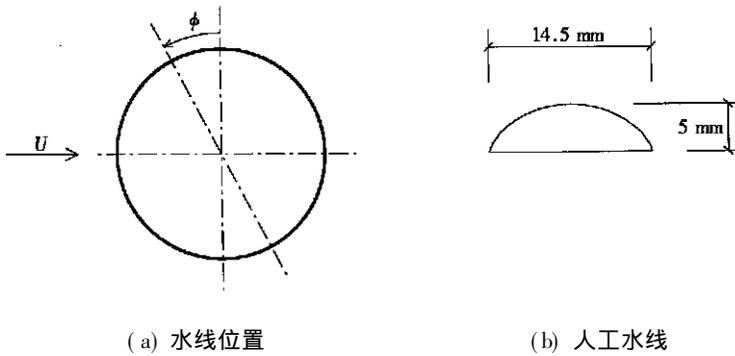


图 2 人工水线及其位置

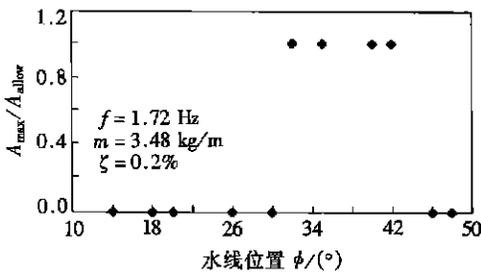


图 3 拉索振幅随上水线位置的变化

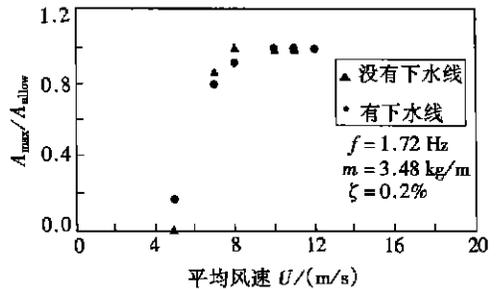


图 4 下水线对拉索振动的影响

两个自制的微型加速度传感器安装于模型两端, 测量模型的竖向运动, 即横风向运动。加速度信号被采集到计算机中, 采样频率为 60 Hz。为了防止模型的振幅过大, 特设了限幅装置。模型可在 530 mm 的峰-峰值范围中振动。

很多研究结果表明, 索表面上水线的位置在拉索的风雨激振中起着很重要的作用。本试

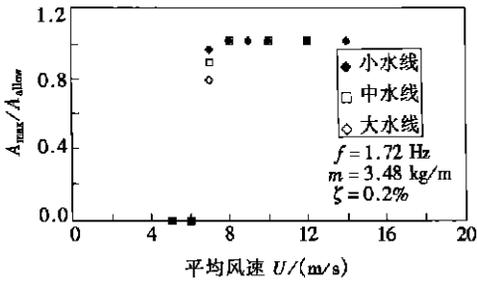


图5 上水线尺寸对拉索振动的影响

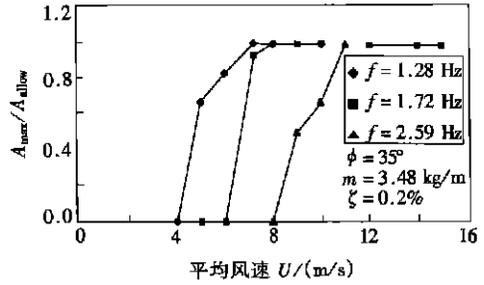


图6 频率对拉索振动的影响

验中,上水线位置 ϕ 的定义见图 2, 其变化范围为 $15^\circ, 18^\circ, 20^\circ, 27^\circ, 30^\circ, 32^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 42^\circ, 45^\circ$ 和 47° 。人工水线的形状和尺寸见图 2。其它参数的变化情况是, 频率范围: $0.968 \sim 2.59$ Hz; 阻尼比范围: $0.14\% \sim 1.8\%$; 索模型单位长度质量范围: $3.48 \sim 10.44$ kg/m。再考虑风向角和雨线位置的变化, 试验工况超过 100 个。

2 风向角为零及驰振

本节给出风向角为零, 即风速和模型轴正交情况下的试验结果。讨论了水线位置、模型频率和阻尼的影响, 并将结果和 Den Hartog 驰振理论进行了对比。

2.1 水线位置的影响

为了研究水线位置对拉索风雨振动的影响, 对 7 组参数模型进行了试验。这 7 组模型参数为: 1) $f = 1.28$ Hz, $m = 3.48$ kg/m 和 $\zeta = 0.2\%$; 2) $f = 1.72$ Hz, $m = 3.48$ kg/m 和 $\zeta = 0.2\%$; 3) $f = 2.59$ Hz, $m = 3.48$ kg/m 和 $\zeta = 0.2\%$; 4) $f = 1.28$ Hz, $m = 3.48$ kg/m 和 $\zeta = 0.4\%$; 5) $f = 1.34$ Hz, $m = 3.48$ kg/m 和 $\zeta = 0.6\%$; 6) $f = 0.968$ Hz, $m = 6.96$ kg/m 和 $\zeta = 0.2\%$; 7) $f = 1.063$ Hz, $m = 10.44$ kg/m 和 $\zeta = 0.14\%$ 。这里, f 是模型的频率; ζ 是模型的阻尼比; m 是模型单位长度质量, 上水线位置范围为 $15^\circ \sim 47^\circ$ 。

试验结果表明, 在 $3 \sim 16$ m/s 的试验风速内, 不管其它参数如何, 上水线位置在 $32^\circ \sim 42^\circ$ 之间时, 模型都出现大的横风向振动; 而上水线在其它位置时, 模型只有很小的振动。图 3 给出了上述第 2 组参数模型的无量纲振幅和上水线位置之间的关系。图中, A_{\max} 是模型在各种试验风速下的最大振幅; A_{allow} 是允许的最大峰_峰振幅(530 mm)。 $A_{\max}/A_{\text{allow}} = 1$ 意味着振幅已达到或超出允许值。显然, 上水线位于 $32^\circ \sim 42^\circ$ 之间时, 模型出现发散振动。

由拉索风雨激振的现场观测可知, 风雨共同作用时, 拉索表面除有上水线外, 还有一下水线。本文亦研究了下水线对拉索风雨振动的作用。在模型表面同时粘贴上下水线进行试验。结果表明, 下水线对拉索风雨振动的作用很小, 可忽略。图 4 所示为模型同时有上下水线以及仅有上水线的试验结果。此时, 上水线位置为 40° , 下水线为 -160° 。显然, 在试验风速范围内, 两种模型的振动特性相近。这和文献[1]的结论相同。

本文还研究了上水线尺寸的影响。除了图 2 所示的小水线外, 另外两种水线的尺寸分别为 17.6×5.4 mm² 和 27.6×7.9 mm²。图 5 为拉索模型上分别粘贴有大、中、小水线的试验结果。可见, 水线尺寸的影响亦可忽略。

2.2 起振风速

起振风速定义为模型开始发生大幅振动的起始风速。起振风速的研究对抑制拉索的风雨

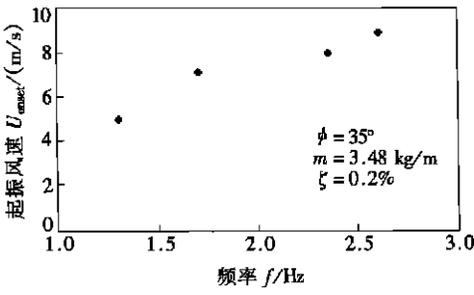


图7 频率对起振风速的影响

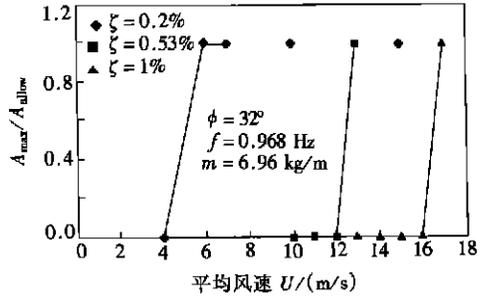


图8 阻尼比对拉索振动的影响

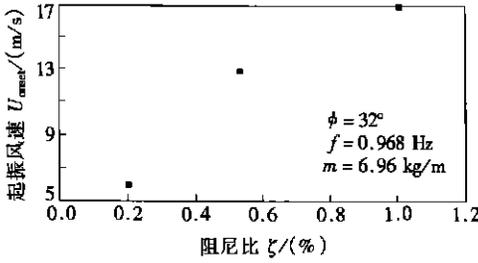


图9 阻尼比对起振风速的影响

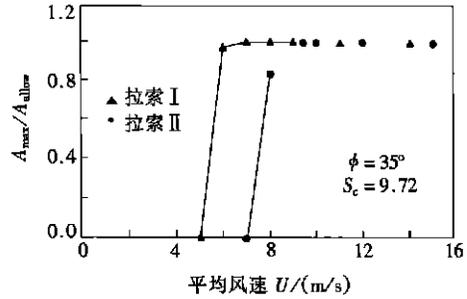


图10 Scruton数对拉索振动的影响

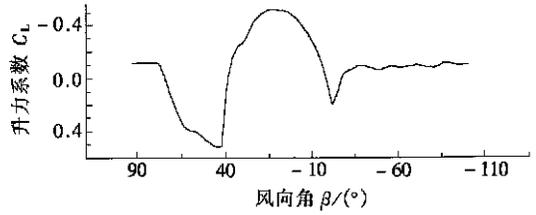
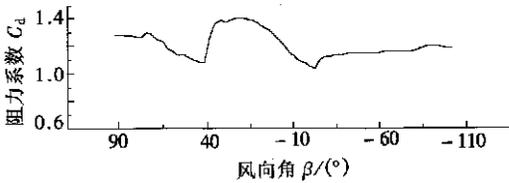


图11 人工水线拉索模型的阻力和升力系数

激振是非常重要的。这里给出了各种参数对起振风速的影响。

首先研究模型的固有频率的影响。共对9种模型进行了试验。9组模型有相同的质量和阻尼比： $m = 3.48 \text{ kg/m}$ 和 $\zeta = 0.2\%$ ，其它参数为：1) $\phi = 35^\circ, f = 1.28 \text{ Hz}$ ；2) $\phi = 35^\circ, f = 1.72 \text{ Hz}$ ；3) $\phi = 35^\circ, f = 2.59 \text{ Hz}$ ；4) $\phi = 40^\circ, f = 1.28 \text{ Hz}$ ；5) $\phi = 40^\circ, f = 1.72 \text{ Hz}$ ；6) $\phi = 40^\circ, f = 2.59 \text{ Hz}$ ；7) $\phi = 42^\circ, f = 1.28 \text{ Hz}$ ；8) $\phi = 42^\circ, f = 1.72 \text{ Hz}$ ；9) $\phi = 42^\circ, f = 2.59 \text{ Hz}$ 。可见，这9组模型有3种不同的频率和3种不同的上水线位置。试验风速仍为3~16 m/s。试验结果表明，在给定的模型质量和阻尼比的条件下，起振风速正比于模型频率。图6显示了前述的前3个模型的无量纲振幅和风速的关系。由图可见，模型频率越低，模型的起振风速越低。图7所示的试验结果表明，固有频率和起振风速大约有线形关系。

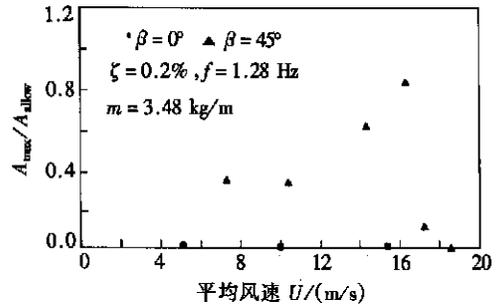
研究的第2个参数是阻尼比。共计进行了19个模型试验。这19组模型的参数为：1) $m = 10.44 \text{ kg/m}, f = 1.063 \text{ Hz}, \phi = 32^\circ$ 和 $\zeta = 0.14\%$ ；2) $m = 10.44 \text{ kg/m}, f = 1.063 \text{ Hz}, \phi = 32^\circ$ 和 $\zeta = 0.20\%$ ；3) $m = 10.44 \text{ kg/m}, f = 1.063 \text{ Hz}, \phi = 32^\circ$ 和 $\zeta = 0.50\%$ ；4) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 35^\circ$ 和 $\zeta = 0.6\%$ ；5) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 35^\circ$ 和 $\zeta = 0.8\%$ ；6) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 35^\circ$ 和 $\zeta = 1.2\%$ ；7) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 35^\circ$ 和 $\zeta = 1.8\%$ ；8) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 40^\circ$ 和 $\zeta = 0.2\%$ ；9) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 40^\circ$ 和 $\zeta = 0.2\%$ ；10) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 40^\circ$ 和 $\zeta = 0.2\%$ ；11) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 40^\circ$ 和 $\zeta = 0.2\%$ ；12) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 40^\circ$ 和 $\zeta = 0.2\%$ ；13) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 40^\circ$ 和 $\zeta = 0.2\%$ ；14) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 40^\circ$ 和 $\zeta = 0.2\%$ ；15) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 40^\circ$ 和 $\zeta = 0.2\%$ ；16) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 40^\circ$ 和 $\zeta = 0.2\%$ ；17) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 40^\circ$ 和 $\zeta = 0.2\%$ ；18) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 40^\circ$ 和 $\zeta = 0.2\%$ ；19) $m = 3.48 \text{ kg/m}, f = 1.344 \text{ Hz}, \phi = 40^\circ$ 和 $\zeta = 0.2\%$ 。

$f = 1.344 \text{ Hz}$, $\phi = 40^\circ$ 和 $\zeta = 0.6\%$; 10) $m = 3.48 \text{ kg/m}$, $f = 1.344 \text{ Hz}$, $\phi = 40^\circ$ 和 $\zeta = 1.2\%$; 11) $m = 3.48 \text{ kg/m}$, $f = 1.28 \text{ Hz}$, $\phi = 42^\circ$ 和 $\zeta = 0.2\%$; 12) $m = 3.48 \text{ kg/m}$, $f = 1.28 \text{ Hz}$, $\phi = 42^\circ$ 和 $\zeta = 0.4\%$; 13) $m = 3.48 \text{ kg/m}$, $f = 1.28 \text{ Hz}$, $\phi = 42^\circ$ 和 $\zeta = 0.8\%$; 14) $m = 10.44 \text{ kg/m}$, $f = 1.063 \text{ Hz}$, $\phi = 35^\circ$ 和 $\zeta = 0.14\%$; 15) $m = 10.44 \text{ kg/m}$, $f = 1.063 \text{ Hz}$, $\phi = 35^\circ$ 和 $\zeta = 0.2\%$; 16) $m = 10.44 \text{ kg/m}$, $f = 1.063 \text{ Hz}$, $\phi = 35^\circ$ 和 $\zeta = 0.53\%$; 17) $m = 6.96 \text{ kg/m}$, $f = 0.968 \text{ Hz}$, $\phi = 32^\circ$ 和 $\zeta = 0.2\%$; 18) $m = 6.96 \text{ kg/m}$, $f = 0.968 \text{ Hz}$, $\phi = 32^\circ$ 和 $\zeta = 0.53\%$; 19) $m = 6.96 \text{ kg/m}$, $f = 0.968 \text{ Hz}$, $\phi = 32^\circ$ 和 $\zeta = 1.0\%$ 。试验风速为 $3 \sim 16 \text{ m/s}$ 。试验结果表明, 对于给定的质量和频率, 起振风速和阻尼比大约有线性关系。图 8 给出了最后 3 组拉索模型的无量纲振幅和风速的关系。显然, 阻尼小, 起振风速低; 阻尼高, 则起振风速高。图 9 进一步说明了起振风速和阻尼的线性关系。

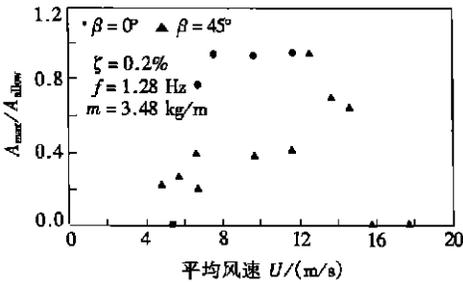
下一个参数是 Scruton 数。Scruton 数的定义为:

$$S_c = 4\pi m \zeta / (\rho D)^2, \quad (1)$$

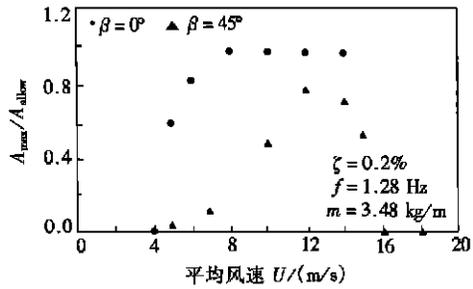
这里, D 是模型直径; ρ 是空气质量。由式(1)可



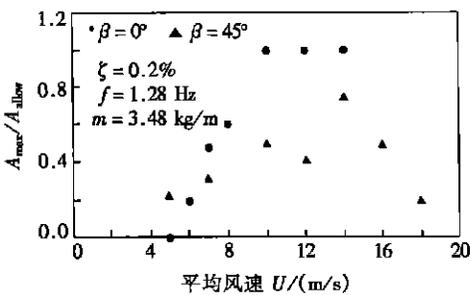
(a) $\phi = 30^\circ$



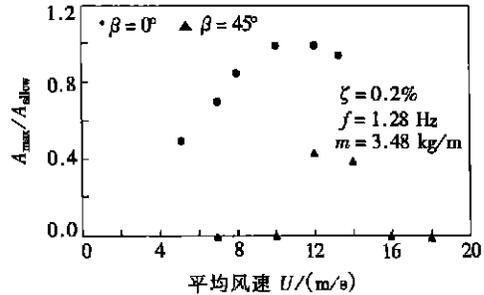
(b) $\phi = 32^\circ$



(c) $\phi = 35^\circ$



(d) $\phi = 38^\circ$



(e) $\phi = 40^\circ$

图 12 拉索的限速振动

见, 索直径给定时, Scruton 数正比于质量和阻尼的乘积。对有相同 Scruton 数但有不同频率、阻尼和质量, 水位位置 $\phi = 35^\circ$ 的两个索模型进行了试验, 试验结果示于图 10。频率为 1.28 Hz , 质量为 3.48 kg/m , 阻尼比为 0.4% 的模型 I 的起振风速在 5 m/s 和 6 m/s 之间。但 Scruton 数相同而频率为 0.968 Hz , 质量为 6.96 kg/m , 阻尼比为 0.2% 的模型 II 的起振风速在 7 m/s 和 8 m/s 之间。也就是说, Scruton 数相同的索可能有不同的起振风速。

2.3 驰振机制

上述的试验结果说明在 32° 和 42° 之间粘贴人工雨线的拉索在风向角为零的某一临界风速的作用下会突然出现发散振动。这一机制可用 Den Hartog 理论来解释。Den Hartog 驰振临界风速的计算公式为:

$$U_c = - 8\pi n f \zeta / \rho (\dot{C}_L + C_d) D, \quad (2)$$

此处, C_d 是阻力系数; \dot{C}_L 是升力系数斜率。上述公式也可写成如下形式:

$$U_c = - 2Df S_c / (\dot{C}_L + C_d) \cdot \quad (3)$$

由式(2)可见,其它参数固定时,驰振临界风速正比于阻尼比;而其它参数固定时,驰振临界风速还正比于频率。2.2节讨论的结果与此都相符。

式(3)指出,对固定的 Scruton 数,临界风速正比于频率,而和索的质量和阻尼无关。所以,对于 Scruton 数相同的两根索,频率高则起振风速高。以图 10 的结果为例,两索的 Scruton 数均为 9.72,但一索的频率为 1.28 Hz,另一索的频率为 0.968 Hz。频率比为 1.322,起振风速比为 1.33,两者接近。

上面对起振风速的分析表明,当上水线处于某些位置时,人工雨线拉索为驰振,起振风速可用 Den Hartog 理论来计算。为了进一步确认这一结论,在风洞中用气动天平对同样的人工雨线拉索模型进行了测力试验,并根据试验所得的升力和阻力系数分析了起振风速。图 11 是测得的气动力系数。由图可见,上水线在 32° 和 42° 之间时,升力系数的斜率为负值, $(\dot{C}_L + C_d)$ 值亦为负。 35° 时, $(\dot{C}_L + C_d)$ 为 -0.4 。考虑 Scruton 为 9.72,频率分别为 0.968 和 1.28 Hz 的两种模型,由式(2)或(3)可得起振风速分别为 5.64 m/s 和 7.46 m/s。这两个起振风速均和图 10 给出的试验结果吻合。由此进一步说明,人工雨线在模型上的某些特定位置时,拉索模型在风向角为零的风的作用下的振动为驰振机制。

3 非零风向角和限速振动

正如 Matsumoto 在文献[8, 9, 11]中所指出的,当风速不是沿模型轴线正交方向时,则会有轴向流的作用,由此将产生索的限幅振动。为了进一步掌握拉索风雨振动的机制,本文对人工雨线拉索模型在风向角不为零的条件下进行试验。

3.1 限速振动

图 12a~12e 给出了风向角 β 为 0° 和 45° , 水线位置 ϕ 分别在 30° , 32° , 35° , 38° 和 40° 位时模型的无量纲振幅和风速之关系。频率、阻尼比和单位质量分别为 1.28 Hz、0.2% 和 3.48 kg/m。对 $\beta = 0^\circ$ 和 $\phi = 30^\circ$ (见图 12a),模型在所关心的风速范围内没有振动。然而, $\beta = 45^\circ$ 时,模型在 5 m/s 风速开始振动,在 18 m/s 风速振动停止。在这一风速范围内,振幅也是有限的,接近 530 mm 的允许振幅。最大振幅处的无量纲风速大约为 100。

水线位置 ϕ 在 32° (见图 12b) 的情况,风向角为零时,索模型表现为驰振;风向角为 45° 时,索又表现为限速振动。最大振幅对应的无量纲风速为 80。水线位置在 $\phi = 35^\circ$ 和 $\phi = 38^\circ$ 的情况(见图 12c 和 12d),风向角为零时,驰振出现;风向角为 45° ,限速振动出现。最大振幅比 $\phi = 30^\circ$ 和 $\phi = 32^\circ$ 时有所降低,但最大振幅亦出现在无量纲风速 80 处。风向角为 45° (见图 12e) 且水线位置为 $\phi = 40^\circ$ 时,模型仍表现为限速振动,但速度范围和振幅范围比前几个工况要小得多。最大振幅仍对应于无量纲风速 80。

3.2 混合振动

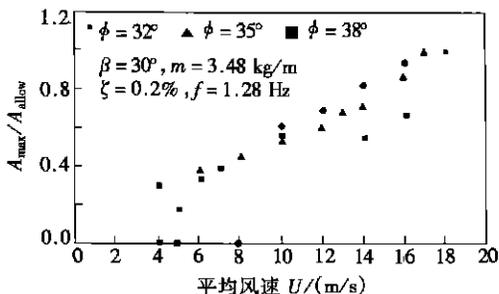


图 13 拉索的混合振动

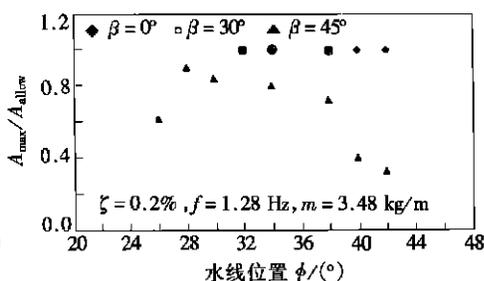


图 14 人工水线拉索振动特性的比较

当风向角既不为零,也不是 45° ,而是介于其间时,索模型表现出混合振动性质。由图 13 可见,风向角 30° ,模型在低风速时表现为限速振动;而在高风速时表现为驰振。图中模型的参数同图 12,但包括了水线位置 $\phi = 32^\circ, 35^\circ$ 和 38° 的情况。由图可见,低风速时,模型为限幅振动;风速增加,振幅变大。风速到达 16 m/s 至 18 m/s 时,模型出现强烈振动,振幅超出允许值。另还可见,起振风速似乎随水线角度的增加而降低。水线角度 $\phi = 32^\circ, 35^\circ$ 和 38° 对应的起振风速分别为 $10 \text{ m/s}, 6 \text{ m/s}$ 和 5 m/s 。

作为本节研究的小结,对应于 3 种风向角 $\beta = 0^\circ, 30^\circ$ 和 45° 的索模型的最大振幅随上水线位置的变化情况示于图 14。 $\beta = 0^\circ$,索模型在水线位置 $\phi = 32^\circ$ 至 42° 之间时为发散振动; $\beta = 30^\circ$ 时模型为混合振动,振幅发散的水线范围变小,从 $\phi = 32^\circ$ 至 38° ; $\beta = 45^\circ$,模型仍为限速振动,模型振动对应的水线位置变宽。

4 结 语

本文通过风洞试验研究了人工雨线拉索模型的响应,主要结论如下:

- 1) 索表面水线的位置对拉索的风雨激振来说是非常重要的。仅当上水线处于某些特定位置时,拉索才发生振动。上水线的形状、尺寸及下水线对拉索振动几乎没有影响;
- 2) 当上水线处于起振位置,而风向角为零时,拉索出现驰振。起振风速正比于拉索频率、阻尼,但不正比于 Scruton 数。升力和阻力系数的试验及相应的分析也证明这一条件下拉索的振动是 Den Hartog 驰振机制。
- 3) 风向角为 45° ,拉索将出现限速_限幅振动,最大振幅对应的无量纲风速为 80 和 100。
- 4) 风向角在 0° 和 45° 之间且上水线在起振范围内,拉索在低风速时是限幅振动;随着风速增加,振幅增加。到达某一风速时,驰振发生。这是一种限速_驰振混合型振动。

[参 考 文 献]

- [1] Hikami Y, Shiraishi N. Rain_wind induced vibrations of cables in cable stayed bridges[J]. J Wind Eng Indust Aerodyn, 1988, 29: 409—418.
- [2] Ohshima K, Nanjo M. Aerodynamics stability of the cables of a cable_stayed bridge subject to rain (a case study of the Aji River Bridge)[A]. In: Proc US_Japan Joint Seminar on Natural Resources [C]. 1987, 324—336.
- [3] Pacheco BM, Fujino Y. Keeping cables calm[J]. Civil Engineering, ASCE, 1993, 63(10): 56—58.
- [4] Main JA, Jones NP. Full scale measurements of stay cable vibration[A]. In: A Larsen, GL Larose, FM Livesey Eds. Proc 10th Inter Conf Wind Eng [C]. Copenhagen, Denmark: A A Balkema, 2,

- 1999, 963—970.
- [5] Persoon A J, Noorlander K. Full scale measurements on the Erasmus Bridge after rain/wind induced cable vibration[A]. In: A Larsen, G L Larose, F M Livesey Eds. Proc 10th Inter Conf Wind Eng [C]. Copenhagen, Denmark: A A Balkema, 2, 1999, 1019—1026.
- [6] 顾明, 刘慈军, 罗国强, 等. 斜拉桥拉索风(雨)激振及控制[J]. 上海力学, 1998, 19(1): 281—288.
- [7] Flamand O. Rain_wind induced vibration of cables[J]. J Wind Eng & Indust Aerodyn, 1995, 57: 353—362.
- [8] Matsumoto M, Saitoh T, Kitazawa M, et al. Response characteristics of rain_wind induced vibration of stay_cables of cable_stayed bridges[J]. J Wind Eng & Indust Aerodyn, 1995, 57: 323—333.
- [9] Matsumoto M, Shirashi N, Shirato H. Rain_wind induced vibration of cables of cable_stayed bridges [J]. J Wind Eng & Indust Aerodyn, 1992, 41_42: 2011—2022.
- [10] Bosdogianni, Olivari D. Wind_ and rain_induced oscillations of cables of stayed bridges[J]. J Wind Eng & Indust Aerodyn, 1996, 64: 171—185.
- [11] Matsumoto M, Yagi T, Tsushima D. Vortex_induced vibration of inclined cables at high wind speed [A]. In: A Larsen, G L Larose, F M Livesey Eds. Proc 10th Inter Conf Wind Eng [C]. Copenhagen, Denmark: A A Balkema, 2, 1999, 979—986.
- [12] Yamaguichi H. Analytical study on growth mechanism of rain vibration of cables[J]. J Wind Eng & Indust Aerodyn, 1990, 33: 73—80.
- [13] Geurts C P W, Staalduinen P C V. Estimation of the effects of rain_wind induced vibration in the design stage of inclined stay cables[A]. In: A Larsen, G L Larose, F M Livesey Eds. Proc 10th Inter Conf Wind Eng [C]. Copenhagen, Denmark: A A Balkema, 2, 1999, 885—892.

Response Characteristics of Wind Excited Cables With Artificial Rivulet

GU Ming¹, LIU Ci_jun¹, XU You_lin², XIANG Hai_fan¹

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering,
Tongji University, Shanghai 200092, P R China;

2 Department of Civil & Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic
University, Hong Kong, P R China)

Abstract: A wind tunnel investigation of response characteristics of cables with artificial rivulet is presented. A series of cable section models of different mass and stiffness and damping ratio were designed with artificial rivulet. They were tested in smooth flow under different wind speed and yaw angle and for different position of artificial rivulet. The measured response of cable models was then analyzed and compared with the experimental results obtained by other researchers and the existing theories for wind induced cable vibration. The results show that the measured response of horizontal cable models with artificial rivulet could be well predicted by Den Hartog's galloping theory when wind is normal to the cable axis. For the wind with certain yaw angles, the cable models with artificial rivulet exhibit velocity_restricted response characteristics.

Key words: cable; artificial rivulet; wind tunnel; galloping; velocity_restricted vibration