

文章编号: 1005—0523(2005)02—0036—04

斜拉桥拉索风雨振动二次轴向流影响分析

王德山¹, 刘 峰², 汪至刚³

(1. 江西省上饶市公路管理局, 上饶 334000; 2. 江西省交通科学研究院, 南昌 330012; 3. 浙江大学 土木工程学系, 杭州 3100277)

摘要:对斜拉桥拉索风雨振动中二次轴向流的产生及作用机理进行分析. 认为二次轴向流的产生应从三维边界层的理论出发, 而二次轴向流对风雨振动的影响则认为与翼型的基底射流(base-bleed)作用机理相似.

关键词:风雨振动; 二次轴向流; 索; 斜拉桥
中图分类号: TM392.3 **文献标识码:** A

1 前 言

现代斜拉桥的跨度越来越大, 作为传递桥跨结构重量和荷载的拉索是斜拉桥的一个重要组成部分. 因此, 拉索的振动问题是斜拉桥急需解决的问题. 现在一般认为上雨流对拉索的振动有很大的关系, 但日本学者 M. MATSUMOTO 等人在试验中都发现在无雨的情况下, 当迎风角达到一定程度时, 斜拉索也会出现较大的不稳定现象^{[1][2]}, 于是提出了一个二次轴向流的理论, 并从实验论证了二次轴向流的存在及其对拉索的不稳定所起的积极作用, 但没有对二次轴向流的产生作理论上的分析, 也没有对轴向流的作用机理进行分析. 本文将从三维层流边界层出发, 验证二次轴向流的存在, 并与翼型的基底射流(base-bleed)现象对比, 理解其对拉索不稳定所起的作用.

2 三维层流边界层理论

对三维湍流边界层, 在大展弦比物体上, 其展开梯度和流向梯度都很小, 故与二次轴向流的产生影响不大^[3], 且从实验中观测到在层流中的不稳定

现象比在湍流中的不稳定严重得多, 而在层流中的不稳定也可能被很小的湍流度所稳定^[4]. 所以这里只考虑三维层流边界层. 在考虑任意光滑曲面的边界层流动, 选择了如图 1 所示的正交曲线坐标系, 令坐标 $q_1=x$, $q_2=y$, $q_3=z$, 并把绕流的物面 A 取为 $q_2=y=0$ 的坐标面, q_2 是与 A 正交的直线, q_1 、 q_3 是在曲面 A 上的彼此正交的曲线. 用 H_1 、 H_2 、 H_3 和 u 、 v 、 w 分别表示相应于这些坐标的拉梅系数和速度分量, 用 $u(x)$, $W(x)$ 分别表示 x 和 z 方向的外部势流速度分量, 因 q_2 是处处与曲面 A 垂直的直线, 且边界层很薄, 故有 $H_2=1$, $v \ll u$, $v \ll w$.

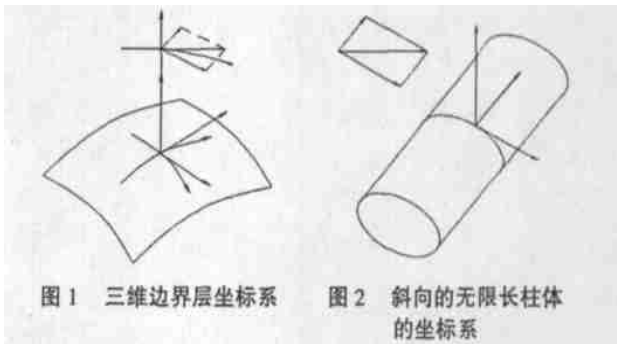


图1 三维边界层坐标系 图2 斜向的无限长柱体的坐标系

假设斜向的大展弦比柱体有相同的剖面 and 无限展长, 在这种情况下, 各速度分量与展向坐标 z 无关, 而自由来流速度分别分解成垂直于和平行于

收稿日期: 2004—12—10

作者简介: 王德山(1960—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 土木工程结构分析、检测及安全评估.

前缘的分离 $U(x)$, $W(x)$, 这样, u 、 v 、 w 仅是 x 、 y 的函数, 三维边界层方程式可写成:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= u \frac{dU}{dx} + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= v \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} y=0: u=v=w=0 \\ y \rightarrow \infty: u=U(x), w=W(x) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

经观察, 可看到方程(1)中的前二式与 w 无关, 因而可求出 u 、 v 的解, 同求二维边界层问题一样, 第三式确定二次轴向流的速度 w , 确定 u 、 v 后 w 即可确定.

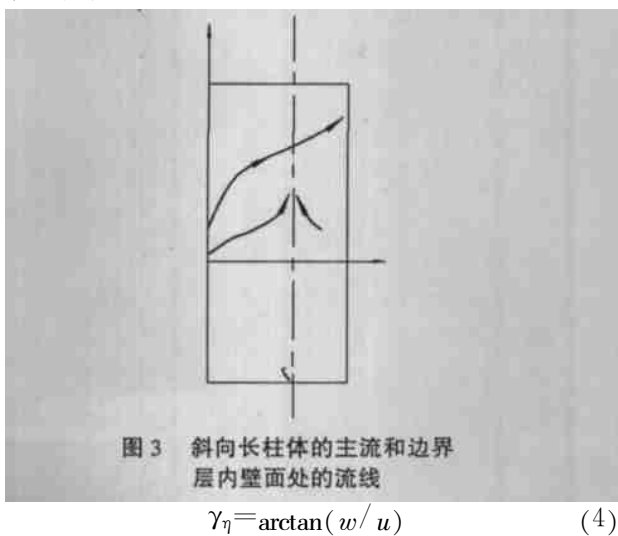
目前对三维边界层, 特别是对如柱形的对称翼型物面的斜向三维边界层, 还没有一个很好的精确解法. 但对这个方程的数值解法进行定性的分析, 可足以了解二次轴向流的产生原理.

由对称翼型物面的主流速度 $U(x)$ 不具备存在相似性解的条件, 所以采用二维对称翼型的级数解法可以求解^[5]. 把对称物面的主流速度展开为 x 的奇函数形成的幂级数, 即

$$U(x) = U_1x + U_3x^3 + U_5x^5 + \dots \quad (3)$$

进行求解.

在 xz 平面上, 如图 3, 边界层内流线方向与 x 轴的夹角 γ_η 为



通过级数计算, 在驻点附近

$$\operatorname{tg} \gamma_{\eta=0} = 0.463 W_\infty / U_{1x} \quad (5)$$

而边界层外缘的主流线与 x 的夹角 γ_e 为

$$\gamma_E = \arctan(W_\infty / U(x)) \approx \arctan(W_\infty / U_{1x}) \quad (6)$$

由式(5)与式(6)可知, $\gamma_{\eta=0} \neq \gamma_e$, 因此存在二次流, 从驻点开始(不包括驻点), 边界层内趋近于物面的流线同 x 轴的夹角 γ_η 与主流流线和 x 轴的夹角 γ_e 相比较, 前者随 x 增加而减小得比后者更快.

3 二次轴向流

从图 3 可知, 主流流线一直流向后缘, 而边界层内物面流线只流向分离线, 并与从后表面倒流向分离线的流线交会后离开表面而分离. 在三维分离时, 分离点后的逆流的存在并不意味着近壁处顺流质点一定会忽然离开物面, 因为流动还有第三个方向 z 可以选择. 如图 3, 表面流线并不离开物面, 而是转向 z 方向的分离线, 它与后面来的表面流线在分离线处会合以后, 再逐渐离开物面, 从而形成二次轴向流. 因此, 近壁面处流速并不一定为零.

玛斯克尔(Maskell, 1955)从概念上阐述了三维分离问题, 他把三维分离分成二种类型, 即自由剪切层和“气泡”结构. 从拉索上的三维分离看, 显然这里的分离层属自由剪切层类型. 如图 4a 示:



这是二次极限流线在切向相遇而结合, 然后逐渐弯曲而离开物面. 这时, 分离线是包括许多正常分离点形成自由剪切层的分离面, 如图 4b 所示. 玛斯克尔指出在物面和分离面附近将出现了一个厚的粘性区, 而正是这个粘性区驱使拉索在分离面的后半部分的流体同时向流线的方向流动. 由于拉索的形状是圆形, 其宽度与高度比为 1, 使拉索背后的流体的轴向流动足以起到下节介绍的翼型基底射流的作用. 从以上的分析, 作者以为二次轴向流的形状应有一种半弧型的层状的轴向流动, 其流速分布为越靠近分离面其流速越大(但显然比主流速度小得多), 越靠近尾流中轴流速越小, 但不会很厚, 而不象文献[1]中显示的单条的轴向流.

从这里也可以理解上下雨流的产生, 当一定的水量浮在拉索表面时, 近物面的流线就把雨层聚到分离线附近形成上下雨流.

4 翼型基底射流 (base-bleed) 对尾流的影响^[6]

翼型基底射流是基于对高速喷气式飞机的机翼研究而进行的. 但了解在低的基底射流率下各参数的变化是有助于理解二次轴向流对拉索的不稳定

定所起的作用.

基底射流率的定义为 $C_\mu = U_j d / U_\infty h$, 其中 U_j 为射流的速度, d 为射流孔的孔径, U_∞ 为未受干扰的来流速度, h 为基底厚度. 如果把射流孔孔径近似认为与基底厚度一致的话, 基底射流率就等于射流的速度与未受干扰的来流速度之比.

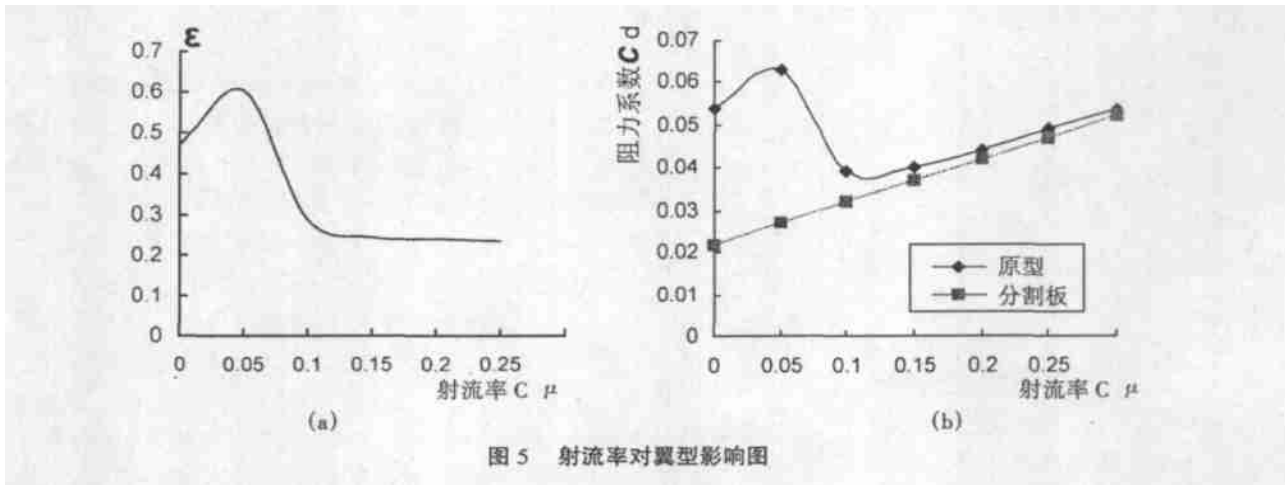


图 5 射流率对翼型影响图

从实验中可以发现, 当射流率为 0.05 左右时, 也即是射流速度仅是来流速度的 5%, 翼型的阻力系数会比无射流时大 10% 左右, 如图 5 所示. 而翼型的阻力的变化总是与翼型的进入涡街的涡旋的旋度相应. 在文献[1]中指出尾迹中的涡旋旋度对不可压缩流中的流体的阻力起到主要作用 (90% 左右). 所以可认为翼型的阻力系数的增大表明进入涡街的涡旋的旋度增大. 而这一点也可以从另一方面得到证实. 在图 6 也可以看到在射流率为 0.05 左右时, ϵ 值比无射流时大了 20%, 而当射流值超过 0.1 后, ϵ 值就只相当于无射流时的一半. 而 ϵ 值的定义为: 涡街中的涡旋强度与基底脱落时的涡旋强度之比. 由此可见当低射流率时, 涡街中涡旋的强度要比无射流时强, 而当射流率超过 0.1 时, 基底脱落的涡旋强度有很大一部分被较强的射流所扩散.

同时文献[6]指出从基底脱落的涡旋的脱落频率与基底射流率基本无关. 也就是说, 在低射流率的情况下, 对于相同的脱落频率, 将产生比无射流时更大的旋度, 而显然更大的旋度将带来更大的负压. 故按一定的频率, 在索后垂直于气流及沿气流方向涡旋非对称脱落形成周期性负压, 导致翼型的不稳定.

5 二次轴向流的类基底射流作

由于二次轴向流是一种由粘性区的粘性作用驱使的流动. 对一般的低速空气气流, 二次轴向流不会很强, 它的纵向流动也起到了低基底射流率时, 射流分隔上下二个自由剪切层的作用. 二次轴向流所能分隔的范围应属于低基底射流时所能分隔的范围. 它对拉索的作用接近于低速射流对翼型的振荡作用. 在此时不太强的二次轴向流相对于拉索的作用也类似于文献[7]中指出的分割板 (splitter plate) 宽度小于钝体弦长时, 分割板所起的作用. 这一切都充分体现了二次轴向流在拉索风雨振动中的关键作用.

而从这里也可以分析上下雨流所起的作用, 上下雨流由分析可知应基本处于分离线的附近, 它一方面是接近物面的流线驱使而成, 而另一方面使近物面的流线脱离物面时更加剧烈, 从而形成一旋度更强的涡街, 使拉索的不稳定现象更加明显. 文献[1]指出, 在同样的情况下, 当人工雨流正好放在分离流分离点位置附近时会使拉索气动态更不稳定, 故可以认定雨流起到了扩大拉索气动态不稳定的作用.

6 结 论

斜拉桥拉索的风雨振动机理中,二次轴向流是起到关键作用的.这一点可以从众多实验中发现拉索的迎风角(或有效迎风角)只有在一定的角度下才能使拉索起振得到反映.二次轴向流的产生是由于物面和分离面上存在粘性区的缘故.而二次轴向流对拉索的振动机理类似在低基底射流率时的翼型不稳定,使拉索的上下二个剪切层非对称产生了旋度较强的涡旋而带来的负压,使拉索产生不稳定,而上下雨流的作用起到了放大器的作用.

本文从理论分析上定性的提出了这一结果,还有待于在将来的实验中更进一步的研究分析.

参考文献:

[1] M. Matsumoto, N. Shiraishi, Aerodynamic Behavior of In-

duced Circular Cylinders-Cable Aerodynamics, Journal Wind Eng. & Aerodyn. 1990, Vol. 33, 63—72,
[2] M. Matsumoto, N. Shiraishi, Rain—wind Induced Vibration of Cable of Cable—Stayed Bridges, Journal Wind Eng. & Aerodyn. 1992, Vol. 41—44, 2011—2022.
[3] F.M. 怀特著,魏中磊,甄思淼译.粘性流体动力学[M].北京:机械工业出版社,1982.
[4] M. Matsumoto, M. Yamagashi, Various Mechanism of Included Cable Aerodynamic, 9ICWE, 1995, New Delhi, India
[5] 南京工学院,华中工学院,重庆大学,天津大学.粘性流体力学[M].北京:高等教育出版社,1987.
[6] C. J. Wood, The Effect of Base Bleed on a Periodic Wake, Journal of Royal Aeronautical Society, 1964 447-482.
[7] P. W. Bearman, Investigation of the flow behind a two-dimensional Model With a Blunt Trailing Edge and Fitted with Splitter Plates, Journal of Fluid Mechanics, 1965 Vol. 21, pp241-255.
[8] Goldstei· S· , Developments in Fluid Dynamics, Art· 242, Oxford, 1938.

Investigation of Second Axial Flow in Rain-wind Induced Vibration of Stay Cables in Cable-Stayed Bridges

WANG De-shan¹, LIU Feng², WANG Zhi-gang³

(1. Shangrao Highway Management Bureau of Jiangxi Province, Shangrao 343000; 2. Institute of Jiaotong Science Research of Jiangxi Province, 330012 Nanchang; 3. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This study attempts to clarify mechanism of a secondary axial flow in rain-wind induced vibration of the stay cables in cable stayed bridge. This secondary axial flow is considered to result from the three dimensional shear layers, and it plays a similar role to that of the base-bleed from the blunt trailing edge.

Key words: rain-wind induced vibration; second axial flow; stay cable; cable-stayed bridge