

# Y型柱体绕流特性及风荷载<sup>1)</sup>

顾志福

(北京大学力学系,北京 100871)

**摘要** 通过风洞实验研究了二种典型尺寸的二维Y型柱体在不同风向角下的绕流特性及风荷载。实验结果表明:当风向顺Y型柱体某一肢时主要是来流脉动引起柱体较弱横向振动;当风向顺Y型柱体两肢分角线时则由涡脱落而引起柱体强烈的横向振动。来流湍流度的增加使脉动升力和阻力都大幅度增加,然而却使涡脱落引起的振动相对减弱。

**关键词** 风荷载,涡脱落,风振

## 1. 引言

在实际的工程实践中有许多Y型截面的建筑物的例子,它们可以看作由三个相同的矩形柱间隔 $120^\circ$ 联结而成。弄清这类建筑物的绕流和风荷载特性具有学术和工程实际二方面的重要意义。国内外近年来在这方面已开展了一些研究,如Takeo Nakagawa<sup>[1]</sup>对H型截面柱体的涡脱落进行了细致的研究, Hayushia H. 和 Iwasa Y.<sup>[2]</sup>对8类不同截面形状的高层建筑的涡激振动进行了风洞实验,其中有类似本文的Y型建筑,但他的结果是Y型建筑的横风向力谱中没有明显的峰值且风向的改变没有影响。Gu Zhifu等<sup>[3]</sup>在对三矩形柱作断开Y型布置的风载实验中发现随来流方向或矩形柱长宽比不同而会发生不同的风致振动。本文对二种典型长宽比的三个相同矩形柱作Y型布置时的绕流和风荷载特性进行了风洞实验研究,特别对模型所受的动态力进行了重点研究,同时在尾流中布置了热线探头以了解尾流的动态特性。最后还利用烟线技术做了流动显示。结果表明,Y型柱体绕流图案随风向角改变而改变且在一定风向角时发生强烈的涡致振动。为与实际的工程问题相联系,文中也探讨了在来流湍流度达10%时对各特性的影响。

## 2. 实验设备和模型

实验是在一座吹式直流风洞中进行的。实验段截面为边长0.6m的正方形,长4m。空风洞时最大风速约20m/s,气流湍流度为0.2%。研究湍流度影响时,在实验段前方安装了格栅,在模型实验区气流的纵向湍流度 $I_u$ 约10%,纵向湍流积分尺度 $L_u^* = 0.075m$ 。

分别采用二种长宽比( $l/b = 3.0, 1.4$ )的六个矩形体构成二个Y型柱体模型。为叙述方便,以B1代表 $l/b = 3.0$ 的模型;L1代表 $l/b = 1.4$ 的模型。如图1所示, $\beta$ 为风向角,A、B和C分别为模型的三肢。模型用有机玻璃制成,两端装有测力元件。实验中在模型1.3倍特征长度的下游分别在尾流中心和离尾流中心线横向0.5倍特征长度处布

1) 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题。

本文于1992年5月12日收到,1992年9月3日收到修改稿。

置二个热线测点称为 C 点和 S 点。实验前测得的 BI 和 LI 模型及支承系统的固有频率分别为 42Hz 和 47Hz, 阻尼因子  $\eta$  在 0.03~0.06。

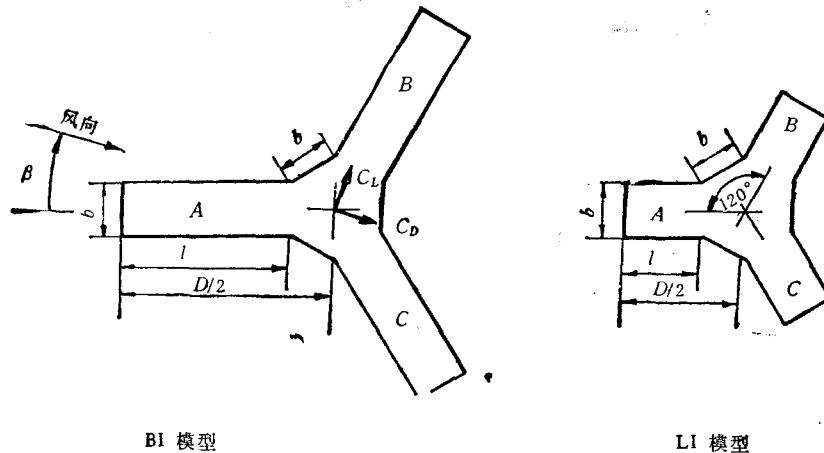


图 1 模型及各参数示意图  
Fig. 1 Schematic of drawing of models and definition of fluid force coefficients.

用烟线技术对上述二种模型在各种风向角时的流态进行了流动显示(有关烟线技术的较详细材料可参阅文献[4])。流动显示时的雷诺数  $Re$ (其中特征长度取模型中心至矩形柱外端面距离的 2 倍, 见图 1)分别为  $1.3 \times 10^4$  和  $7.8 \times 10^3$ 。

### 3. 实验结果和分析

#### (1) 平均阻力系数、升力系数和脉动升力系数

图 2 为二模型阻力系数  $C_D$  和升力系数  $C_L$  随风向角  $\beta$  的变化, 它们分别定义为  $C_D = F_D / \frac{1}{2} \rho U^2 D$  和  $C_L = F_L / \frac{1}{2} \rho U^2 D$ , 其中  $F_D$  和  $F_L$  分别为模型所受的单位长度平均阻力和升力,  $\rho, U$  分别为来流的密度和速度,  $D$  为模型的特征长度。在本底湍流度时 ( $I_w = 0.2\%$ ) 阻力系数随风向角改变变化不是很大, 但湍流度的影响十分明显, 随来流湍流度的增加阻力系数减少很多, 特别是 LI 模型。升力系数  $C_L$  在本底湍流度时二种模型都在  $\beta = 10^\circ$  时取最大值, 不同雷诺数时  $C_L$  变化很小,  $I_w = 10\%$  时  $C_L$  取最大值  $\beta$  角移到  $20^\circ$ 。来流湍流度在  $C_D$  和  $C_L$  上的较大影响可归结为来流的湍流积分尺度与模型特征长度相当的结果。

图 3 为 LI 的脉动升力(均方根值)系数  $C_{L,rms}$  随  $\beta$  角的变化 ( $C_{L,rms} = (\overline{F_L'^2})^{1/2} / \frac{1}{2} \rho U^2 D$ , 其中  $F_L'$  为单位长度脉动升力)。当  $\beta = 0^\circ \sim 30^\circ$  时  $C_{L,rms}$  数值均较小, 随  $Re$  变化也小。当  $\beta > 30^\circ$  后 随  $\beta$  增加而增大且随  $Re$  增加而增加, 特别在  $\beta = 60^\circ$  时, 如以涡共振速度  $\bar{U}_r^{[5]}$  (Vortex-resonance velocity,  $\bar{U}_r = U/f_v D$ , 其中  $f_v$  为涡脱落频率) 为无量纲参数, 在本实验中  $Re$  增加实际上是  $U$  提高, 因而  $\bar{U}_r$  增加, LI 的  $\bar{U}_r$  从 3.04 增至 5.47。对矩形柱来讲,  $\bar{U}_r = 5$  时涡激振动幅值最大<sup>[6]</sup>。从下文对脉动升力和尾流中脉

动速度谱分析结果可知,  $\beta$  角大于  $30^\circ$  以后的  $C_{Lrms}$  增加主要是涡激振动的贡献。

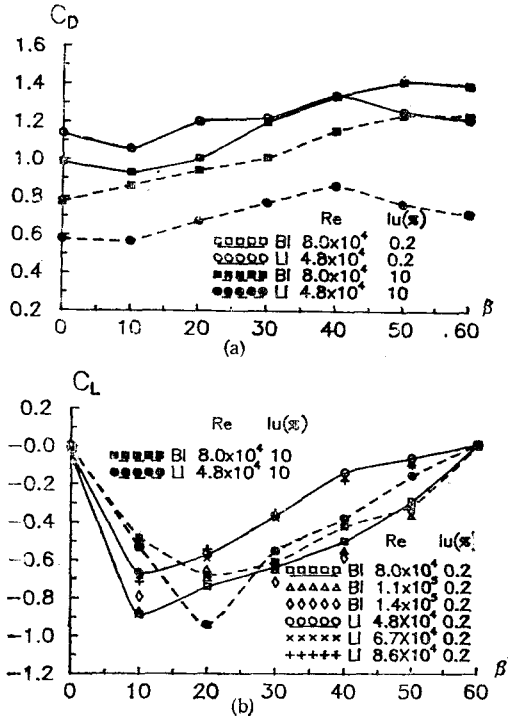


图 2 BI 和 LI 模型平均阻力系数  $C_D$  和平均升力系数  $C_L$  随风向角  $\beta$  的变化  
Fig. 2 Variation of time-mean drag and lift force coefficients  $C_D$  and  $C_L$  vs. angle of wind direction  $\beta$  for model BI and LI.

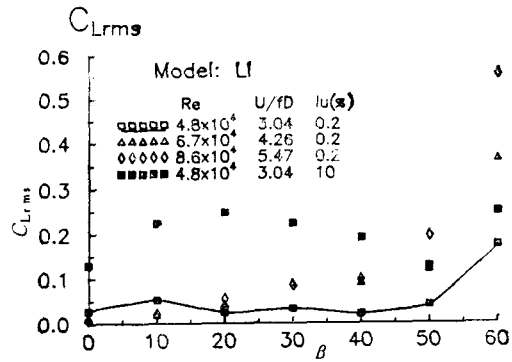


图 3 脉动升力系数  $C_{Lrms}$  随风向角  $\beta$  的变化  
Fig. 3 Variation of fluctuating lift force coefficient  $C_{Lrms}$  vs. angle of wind direction  $\beta$ .

图 3 也给出了  $lu = 10\%$  时的结果。由于湍流度的增加使  $C_{Lrms}$  增加许多, 而在  $\beta = 60^\circ$  时却增值很小, 它表明湍流度的增加对涡激振动有相对抑制的趋势。这里须指出的是阻力脉动与升力脉动相比数值较小, 特别是在本底湍流度下, 由于篇幅所限在此不作详细讨论。

(2) 脉动升力的谱分析和流动显示

作为例子图 4 给出了在  $\beta = 0^\circ, 30^\circ$  和  $60^\circ$  时脉动升力和尾流 S 点脉动速度的自功率谱, 其幅值均由各状态最大值作了归一化处理。在  $\beta = 0^\circ$  时脉动升力很小, 反映在其谱中所含能量极少并出现模型系统固有频率和高阶固有频率的多个峰值。当  $\beta = 30^\circ$  升力谱中出现了与固有频率峰值相当的涡脱落引起振动的峰值, 但所含能量仍然很少; 在尾流速度谱中亦有相同频率的峰值。这些结果说明此时已开始有规则的涡脱落发生, 但对柱体的振动影响很小。当  $\beta = 60^\circ$  时涡激发的振动已占主导地位, 在升力和尾流速度谱中都可以看到相同频率的单一峰值, 而模型在固有频率振动的能量可以忽略。图 5 给出的 BI 模型在  $\beta = 60^\circ$  时不同风速下的尾流速度谱显示了确实存在旋涡, 据此算出的 Strouhal 数(即涡共振速度的倒数)  $St = 0.14$ ; 对 LI 模型为 0.124 与文献 [6] 中提供的 H 型

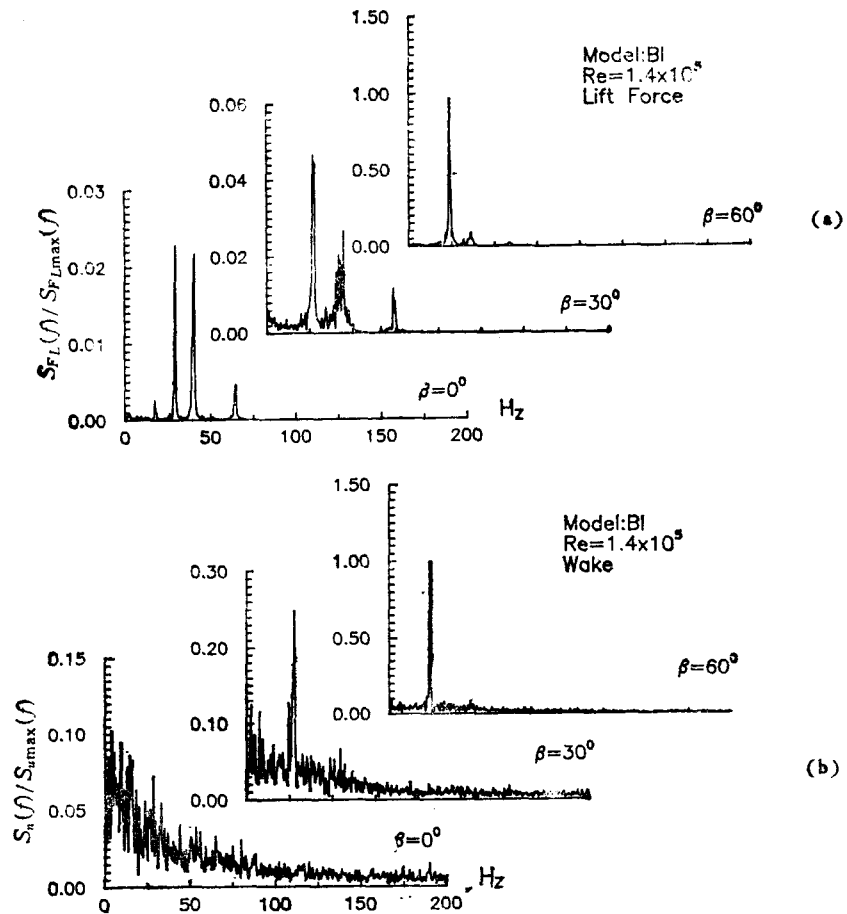


图 4 BI 模型在  $\beta = 0^\circ, 30^\circ$  和  $60^\circ$  时的脉动升力和尾流脉动速度自功率谱  
 Fig. 4 Power spectra of fluctuating lift force and velocity of wake for model BI at  $\beta = 0^\circ, 30^\circ$  and  $60^\circ$ .

结构数值相近。

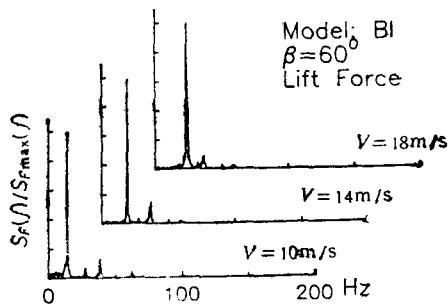


图 5 BI 模型  $\beta = 60^\circ$  时不同速度下的尾流脉动速度自功率谱 (s 点)  
 Fig. 5 Power spectra of velocity of wake (point S) with various velocity of coming flow for model BI at  $\beta = 60^\circ$ .

图版 I 照片 1 为通过烟线技术获得的流动显示照片。对 BI 模型, 当  $\beta = 0^\circ$  时在 B、C 柱外缘附近再分离的剪切层与来流夹角较大, 在柱体后形成“死水区”形式的很宽尾流。由于上下剪切层相距较远, 剪切层本身又比较稳定, 所以在柱体的近尾流区不形成规则的旋涡。当  $\beta = 30^\circ$  时, 由于对来流的非对称性, 上下剪切层在下游相互作用, 所以在尾流的速度谱中已有峰值但不是很强。当  $\beta = 60^\circ$  时, 来流分别从 A、C 柱尖角处分离, 形成的尾流也很宽并构成二个对称且各自独立的回流区, B 柱在尾流中起了“分裂

板”作用,使上下二部分流体干扰很小,因此虽在  $S$  点速度谱中出现单一频率峰值,但在  $C$  点却检测不到峰值。这是典型的由单独剪切层形成的涡致振动,其机理与圆柱后卡门涡街引起的振动不同。相比较而言绕  $LI$  模型的流动在  $\beta = 0^\circ$  时显得不稳定些,在  $\beta = 60^\circ$  时自  $A$ 、 $C$  柱分离的剪切层与来流夹角较小并在下游不远处被卷吸形成的倒流直达  $A$ 、 $C$  柱的背风面。由于上下剪切层的相互作用,在尾流中心  $C$  点得到了二倍涡脱落频率的谱峰值。

#### 4. 结论

通过实验和分析可知 Y 型二维柱体的绕流和风荷载有以下几个主要特点:

(1) 就平均力而言,横风向风荷载与顺风向风荷载是同量级的;对脉动力来讲,横风向脉动荷载是主要的。

(2) 当风向顺 Y 型柱体某一肢时,在近尾流中不形成旋涡;当风向顺二肢分角线时,柱体会发生强烈的涡致振动。

(3) 来流湍流度的增加使顺风向和横风向脉动力均大量增加,但使涡引起的振动有相对减弱的趋势。

(4) 雷诺数改变对作用于 Y 型柱体的平均荷载影响不大;涡共振速度改变对柱体振动影响很大。

(5) 不同长宽比矩形柱构成的 Y 型柱体在流动图案上有差别,大长宽比柱体引起的涡致振动更强些,其 Strouhal 数要大些。

致谢 作者对负责本项基金的孙天风教授和魏庆鼎副教授给予本工作的支持表示感谢,对杜向东同志在实验中的帮助也表示谢意。

#### 参 考 文 献

- [1] Takeo Nakagawa. Vortex shedding from an H-shape prism. *Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 34: 97—106
- [2] Hayshida H & Iwasa Y. Aerodynamics shape effects of tall building for vortex induced vibration. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 33: 237—242
- [3] Gu Zhifu, Xie Qi, Sun Tianfeng. The aerodynamics forces acting on three rectangular cylinders arranged in Y-shape. In: Sun T F ed. *Recent advances in wind engineering, The second Asia-Pacific symposium on wind engineering*. Beijing, 1989. Beijing: Pergamon press, 1989: 300—307
- [4] Wei Q D & Sato H. An experimental study of the mechanism of intermittent separation of a turbulent boundary layer. *J Fluid Mech*, 1984, 143: 153—172
- [5] Nakamura Y. Recent research into bluff-body flutter. *Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 33: 1—10
- [6] Blevins R D. *Flow-induced vibration*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1977

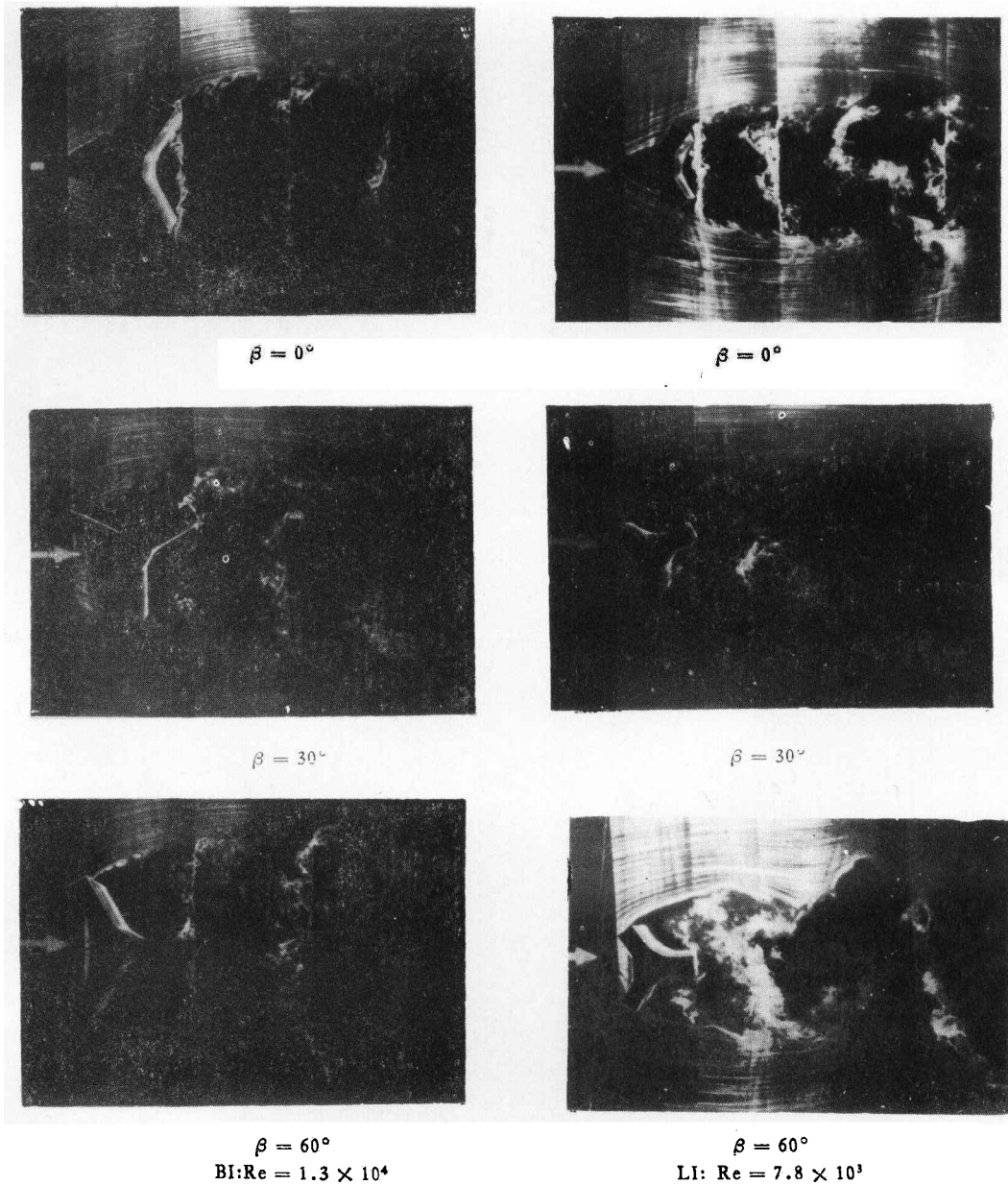
## CHARACTERISTICS OF FLOW AROUND A Y-SHAPE PRISM AND ITS WIND LOADING

Gu Zhifu

(Dept. of Mechanics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** The characteristics of flow around Y-shape prisms under various wind directions and its wind loading were studied by means of wind tunnel test. The results show that as the wind is along one leg of the model, the vibrations which are mainly caused by turbulence of oncoming flow are weak, and as the wind is along the angular bisector of two legs, the vibrations induced by vortex are strong. Increasing turbulence intensity in oncoming flow will cause both fluctuating lift and drag forces to increase significantly, whereas the vortex induced vibration will be somewhat restricted relatively.

**Key words** wind loading, vortex shedding, flow induced vibration



照片 1 用烟线法获得的 BI LI 模型  
在  $\beta = 0^\circ$   $30^\circ$  和  $60^\circ$  时的流动显示照片  
Photo 1 Flow visualization for model BI and LI at  $\beta = 0^\circ, 30^\circ$   
and  $60^\circ$  by the means of smoke-wire technique.