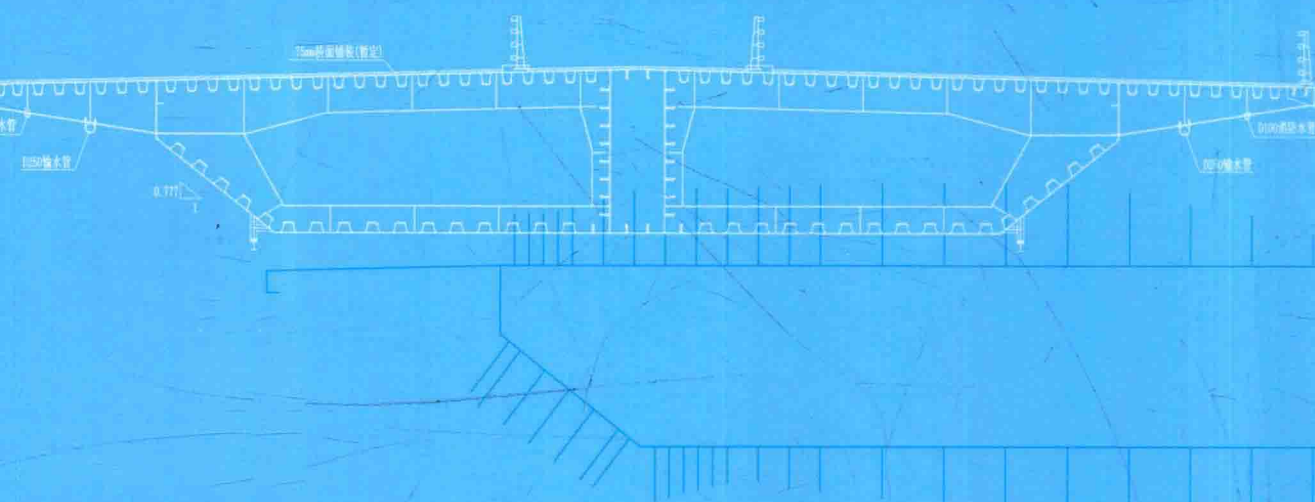


YINGXIANG ZHULIANG WOJI GONGZHEN SHIYAN JIEGUO DE
YINSU JIQI JILI YANJIU

影响主梁涡激共振试验结果的 因素及其机理研究

崔欣 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

影响主梁涡激共振试验结果的 因素及其机理研究

崔欣 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书针对桥梁涡激共振风洞试验结果与实桥观测结果存在不一致的现象开展研究。研究了类流线型桥梁断面在不同风攻角下的涡激响应；通过改变模型缩尺比来改变雷诺数大小，研究类流线型桥梁断面及带挑臂断面涡激响应的雷诺数效应；研究风洞试验中模型的尺寸大小对涡振响应结果的影响；利用格栅形成紊流场，研究均匀流场中涡振响应与紊流场中涡振响应的差异。

本书适用于研究桥梁抗风方面的研究生及研究人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

影响主梁涡激共振试验结果的因素及其机理研究 /
崔欣著. — 北京：中国水利水电出版社，2015.12
ISBN 978-7-5170-4003-3

I. ①影… II. ①崔… III. ①桥梁结构—主梁—抗风
结构 IV. ①U443.35

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第321343号

书 名	影响主梁涡激共振试验结果的因素及其机理研究
作 者	崔欣 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 7.25印张 172千字
版 次	2015年12月第1版 2015年12月第1次印刷
定 价	28.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

现代桥梁结构向着跨度大、自重轻、阻尼低的方向发展,随之对风作用更加敏感,气动弹性问题已成为大跨度及超大跨度桥梁强度、刚度和稳定性抗风设计的制约因素。涡激振动是桥梁结构风致振动的一种形式,带有强迫和自激的双重性质。涡激振动虽然不会像颤振一样导致桥梁灾难性的破坏,但是它的发生风速低、频率高,有可能导致杆件产生裂纹或疲劳破坏,较大的振幅将影响行车的舒适性和安全性。因此,涡激振动是桥梁风工程领域中一个非常重要的问题。鉴于对桥梁涡激振动的研究越来越重视,本书选取了桥梁工程中常用的两类断面:类流线形及带挑臂断面,对其涡激共振的攻角效应、雷诺数效应、跨向相关性及风场效应进行系统研究,从压力层面揭示其对涡激响应影响的内在机理,并对涡激振动的试验方法提出了建议。本书主要进行了以下研究:

(1) 研究了类流线型桥梁断面在不同风攻角下的涡激响应。在模型表面布置测压孔,通过压力扫描阀测量不同攻角下涡激共振发生时断面上各个测点的压力时程。研究了涡激响应随攻角的变化规律及结构表面压力分布在涡激共振发生时随风攻角的变化规律。结果表明,来流攻角的改变实质上是改变了浸没在流场中的气动外形,并且不同攻角下的 Strouhal 数不相同。

(2) 通过改变模型缩尺比来改变雷诺数大小,研究类流线型桥梁断面及带挑臂断面涡激响应的雷诺数效应;分析雷诺数对振动频谱、脉动压力功率谱、表面压力分布及脉动压力系数的影响,揭示了点气动力与总气动力相关性、脉动压力系数的雷诺数效应是造成涡激共振雷诺数效应的内在原因。

(3) 研究风洞试验中模型的尺寸大小对涡振响应结果的影响。通过改变模型宽度来改变长宽比,并在两种长宽比模型的 $1/2$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 长度处布置测压孔,研究不同断面处涡激力的差异;通过压力沿模型长度方向的相关性建议涡激共振风洞试验模型的长度不应过长,建议将长宽比控制在 1.5 左右,以确保试验精度。

(4) 利用格栅形成紊流场,研究均匀流场中涡振响应与紊流场中涡振响

应的差异。结果表明，涡激响应在紊流场中将会减小甚至消失，其根本原因是紊流中的脉动成分破坏了气流的相关性，使结构的气动外形对紊流来流的改造与反馈能力降低，阻碍了旋涡的形成。

本书在研究过程中，得到了众多人士的帮助与支持。感谢笔者的博士生导师长安大学刘健新教授，在此向他致以深切的谢意和崇高的敬意！研究期间，笔者还得到了长安大学李加武教授、白桦老师、管青海博士的帮助，以及华北水利水电大学赵洋副教授、贾明晓副教授、刘祖军副教授及马军涛老师的帮助与指点，在此表示由衷的感谢！最后向所有关心和帮助过我的同志们表示诚挚的感谢！

感谢郑州市普通科技攻关计划项目（编号：131PPTGG410-6）和河南省高等学校重点科研项目（编号：16A560031）等在本书出版过程中给予的支持和帮助！

由于桥梁涡激振动的复杂性，本书的研究有一定的局限性。受专业素养、理论水平及试验条件的制约，本书研究中的试验方法、数据处理、文字表达等方面定会存在不足之处，敬请各位同行专家本着关心和爱护的态度，予以批评指正。

华北水利水电大学 崔欣

2015年11月

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 桥梁的风致振动	1
1.1.1 颤振	1
1.1.2 抖振	2
1.1.3 驰振	2
1.1.4 涡激共振	3
1.2 桥梁涡激共振的基本理论	3
1.3 桥梁涡激共振的研究现状	7
1.3.1 气动外形	7
1.3.2 来流攻角	8
1.3.3 雷诺数	8
1.3.4 紊流强度	8
1.4 本书的研究意义及主要工作	9
1.4.1 研究意义	9
1.4.2 主要工作	9
1.5 本书的技术路线及主要创新点	10
1.5.1 技术路线	10
1.5.2 主要创新点	10
第 2 章 试验研究	12
2.1 风洞试验	12
2.1.1 风洞试验内容	12
2.1.2 风洞试验中的相似准则	12
2.2 试验目的	16
2.2.1 涡激共振的攻角效应	16
2.2.2 涡激共振的雷诺数效应	16
2.2.3 涡激共振的跨向相关	16
2.2.4 涡激共振的风场效应	16
2.3 试验模型	17

2.3.1 试验模型一	17
2.3.2 试验模型二	18
2.4 试验内容	21
2.4.1 试验工况	21
2.4.2 试验内容	22
2.5 本章小结	22
第3章 涡激共振的攻角效应	23
3.1 概述	23
3.2 振幅与风速关系	23
3.3 扭矩时程	24
3.4 扭矩相关系数	26
3.5 表面压力分布	28
3.5.1 边界层与边界层分离	28
3.5.2 表面压力分布特性	30
3.6 频谱	32
3.6.1 振动频谱	32
3.6.2 压力功率谱	36
3.7 斯脱罗哈数	37
3.8 本章小结	38
第4章 涡激共振的雷诺数效应	39
4.1 概述	39
4.2 雷诺数效应的定义	39
4.3 扭转涡激共振的雷诺数效应	40
4.3.1 振幅与风速关系	40
4.3.2 振动频谱	40
4.3.3 扭矩时程	43
4.3.4 点扭矩与总扭矩的相关性	43
4.3.5 测点脉动压力功率谱	44
4.3.6 表面压力分布	46
4.4 竖弯涡激共振的雷诺数效应	47
4.4.1 振幅与风速关系	47
4.4.2 振动频谱	48
4.4.3 升力时程	52
4.4.4 点升力与总升力的相关性	53
4.4.5 测点脉动压力功率谱	55
4.4.6 表面压力分布	57
4.5 本章小结	60

第 5 章 涡激共振的跨向相关	61
5.1 概述	61
5.2 试验内容	61
5.3 升力时程	62
5.4 测点脉动压力功率谱	64
5.5 表面压力分布	68
5.6 压力沿跨径方向的相关性	72
5.7 本章小结	74
第 6 章 涡激共振的风场效应	75
6.1 概述	75
6.2 紊流	75
6.2.1 大气边界层的脉动特性	75
6.2.2 紊流度的测定	76
6.2.3 试验工况	77
6.3 试验内容	77
6.4 振幅与风速的关系	78
6.5 振动频谱	80
6.6 测点脉动压力功率谱	88
6.7 表面压力分布	95
6.8 本章小结	98
第 7 章 结论与展望	99
7.1 主要研究工作和主要结论	99
7.2 研究展望与建议	100
参考文献	102

第1章 绪 论

1.1 桥梁的风致振动

当气流绕过一般为钝体的桥梁断面时,会产生气流的分离,从而形成旋涡,产生复杂的气动力。当桥梁结构的刚度足够大时,风对它的作用表现为静力作用。1879年英国 Tay 桥的垮塌就是因为静风的作用,从此也开始了对桥梁静力抗风的研究。直至 1940 年美国的 Tacoma 桥在不到 20m/s 的风速下发生强烈的振动,最终垮塌,人们才开始重新认识风对桥梁的作用,结束了风对桥梁作用中仅考虑静风作用的历史,从此拉开了桥梁动力抗风的序幕。我国跨径最大的悬索桥——西堠门大桥,跨径达到 1650m,跨径最大的斜拉桥——苏通长江大桥,跨径也达到了 1088m。桥梁跨径的不断突破以及轻质新型材料在桥梁工程中的使用带来的最主要问题就是频率低、阻尼小,这就使桥梁的静力及动力抗风设计成为影响桥梁设计的重要因素。由风所导致的桥梁振动包括颤振、抖振、驰振及涡激共振。

1.1.1 颤振

桥梁结构受到风的作用会产生振动,振动的桥梁不断从来流中吸取能量,加强自身的振动,并对气流产生反馈作用,从而引起的失稳现象称为自激振动或者颤振。桥梁结构通过结构响应和气流的相互干涉作用不断从气流中吸取能量,当风速超过某一临界值 v_{cr} 时,结构自身的阻尼与气动阻尼之和为负值,结构的振动不再衰减,而成为发散性的振动,振幅越来越大,从而结构遭到破坏。

气流流过流线型断面时,气流的流速主要影响不同自由度之间的振幅与相位关系,引起不同自由度之间的耦合振动和气动负阻尼,导致弯扭耦合颤振。当气流流过钝体断面时,气流流速主要影响或改变扭转自由度上的振幅及相位关系,导致扭转颤振。对于介于流线形与钝体之间的桥梁断面,则有可能产生扭转颤振及弯扭耦合颤振的各种情况。

颤振属于毁灭性的破坏,因此国内外学者对颤振的研究较多,也取得了丰硕的成果。Bleich 和 Rocard 将 Theodorsen 提出的机翼古典耦合颤振的经典理论方法应用到桥梁结构上,Kloppel 在此基础之上又引入了折减系数 η ,用于修正不同断面的颤振临界风速。我国的《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60—01—2004)中所采用的颤振临界风速计算公式是 Vanderput 公式,是 1976 年 Vanderput 拟合得到的平板颤振临界风速的近似公式。在桥梁工程界得到广泛应用的是半试验、半理论的方法,最早是由 Scanlan^[1-3]教授提出的,其自激力的表达式为式 (1.1) 和式 (1.2),该方法适合于三维桥梁颤振的特性分析和基于节段模型风洞试验结果的二维颤振计算。

$$L_{se} = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B) \left[K H_1^* (K) \frac{\dot{h}}{U} + K H_2^* (K) \frac{B \dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* (K) \alpha + K^2 H_4^* (K) \frac{h}{U} \right] \quad (1.1)$$

$$M_{se} = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B^2) \left[K A_1^* (K) \frac{\dot{h}}{U} + K A_2^* (K) \frac{B \dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* (K) \alpha + K^2 A_4^* (K) \frac{h}{U} \right] \quad (1.2)$$

式中, 气动导数 H_i^* 、 A_i^* 可通过风洞试验识别或由 CFD 计算提供。

1.1.2 抖振

抖振是指由紊流中的脉动成分所引起结构物的随机强迫振动, 根据引起抖振响应的脉动风来源不同可将抖振分为 3 类: ①结构物自身尾流引起的抖振; ②其他结构物尾流引起的抖振; ③大气边界层特征紊流引起的抖振。目前对桥梁抖振响应的分析主要是针对大气边界层特征紊流引起的抖振进行的。抖振是不具有发散性质的限幅振动, 一般情况下不会引起桥梁毁灭性的破坏, 但是过大的抖振振幅将会影响施工精度或危及施工人员及机械安全, 在成桥使用阶段会影响行车舒适度, 引起结构构件疲劳从而影响寿命。

目前, 国内外对桥梁抖振分析的理论主要有 3 种: Davenport 的随机抖振分析理论、Scanlan 的颤抖振分析理论和抖振反应谱理论。Davenport^[4-6]的分析理论是基于自然风场的非定常特性, 提出气动导纳的概念用以修正按准定常气动力模型计算的误差。Davenport 引入的气动导纳虽然反映了抖振力沿跨向的相关性, 但却忽略了气动刚度和气动耦合效应。Scanlan^[7,8]在其自身建立的颤振分析理论基础上, 又提出了考虑结构物自身运动引起的自激力以及自然风产生的抖振力同时作用时的颤抖振分析理论。抖振反应谱理论的分析方法是在 Scanlan 建立的颤抖振理论的基础之上引入气动导纳函数进行抖振分析。反应谱理论是对 Davenport 和 Scanlan 抖振理论的综合, 并考虑工程应用的需要, 在计算方面做了一定程度的简化。

1.1.3 驰振

1932 年, Den Hartog^[9]在大风中观察到结冰的电缆有大幅的弯曲振动, 将这种现象定义为驰振 (galloping)。驰振是单自由度的发散性振动, 除圆形断面外, 其它具有特殊断面形状的细长结构物也都存在发生驰振的可能性。著名的登哈托判据也是将驰振问题抽象为单自由度的线性振动而得出的。基于准定常流理论, Parkinson^[10]和 Novak^[11]分析了单自由度非线性驰振的特性, Blevins^[12]在此基础上又提出了弯扭两自由度的非线性驰振理论。

上游结构物的尾流波动引发的下游结构物的振动, 称为尾流驰振 (wake galloping), 目前对尾流驰振的研究相对较少。1970 年 Simpson^[13]建立了尾流驰振的微分方程。1973 年 Wardlaw^[14]提出尾流驰振的敏感区不在尾流中心, 大约位于尾流宽度的 1/4 处, 他还认为结构物具有一个椭圆形的极限运动圈, 处于该范围下游的结构物都将受到尾流驰振的影响。

在准定常假定下, 单自由度线性驰振方程为

$$\dot{h} + \left[2\xi_h \omega_h + \frac{1}{2m} \rho U B \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \right] \dot{h} + \omega^2 h = 0 \quad (1.3)$$

式中: C_L 和 C_D 分别为升力系数和阻力系数, 由风洞试验提供; $2\xi_h \omega_h + \frac{1}{2m} \rho U B$

$\left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D\right)$ 为系统阻尼; $2\xi_h\omega_h$ 为机械阻尼, 一般为正数; $\frac{1}{2m}\rho UB\left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D\right)$ 为气动阻尼。当系统阻尼为负时, 断面就发生驰振失稳。因此判断断面是否发生驰振的重要参数是 $\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D$, 一般认为, $\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D < 0$ 是驰振失稳的必要条件, 这就是著名的登哈托判据。

1.1.4 涡激共振

暴露于气流中的结构物, 由于气流流经结构断面时所产生的旋涡脱落而诱发的强迫振动称为涡激共振。Strouhal、Von. Karman^[15] 等都对涡激共振进行过研究, 并引进斯特罗哈数 (Strouhal) St :

$$St = \frac{fD}{U} \quad (1.4)$$

式中: U 为来流风速, m/s; f 为旋涡脱落频率, Hz; D 为结构物的特征尺寸, m, 对于圆柱体为直径。

当结构物发生涡激共振时, 作用于结构上的涡激力近似为一个简谐力:

$$F(t) = F_0 \sin \omega t \quad (1.5)$$

式中: $\omega(Re, St)$ 为旋涡脱落的频率; F_0 为涡激力幅值, $F_0 = (\rho U^2/2)CD$; ρ 为空气密度 (1.225kg/m^3); C 为截面的空气动力系数。

涡激力引起的振幅为

$$A(t) = \frac{\pi}{\delta} \frac{1}{K} \rho \frac{U^2}{2} CD \sin \omega t \quad (1.6)$$

式中: δ 为对数衰减率 (约为 0.05); K 为体系的刚度。

则振动的幅值为

$$A = \frac{\pi}{\delta} \frac{1}{K} \rho \frac{U^2}{2} CD = \frac{\pi F_0}{\delta K} = \frac{\pi}{\delta} A_0 \quad (1.7)$$

式中: A_0 为由 F_0 引起的静位移。

当风速达到一定数值时, 结构开始发生涡激共振, 结合式 (1.4) 和式 (1.6) 得

$$A = \frac{\pi F_0}{K\delta} = \frac{\pi}{\delta} \frac{\rho C f^2}{2K(St)} D^3 \quad (1.8)$$

由式 (1.8) 可以看出, 当结构的截面尺寸已定, 可提高阻尼来降低涡激共振振幅, 如在桥梁的跨中安装 TMD。

1.2 桥梁涡激共振的基本理论^[15-17]

涡激共振是大跨度桥梁在低风速下极易出现的风致振动现象, 它具有自激与限幅的双重性质, 如丹麦的大海带东桥在架设过程中出现了涡激共振, 我国的西堠门大桥和日本的东京湾联络桥在成桥阶段出现了涡激共振。虽然涡激共振不会给桥梁带来毁桥的危险, 但过大的振幅将影响施工精度及行车安全, 因此, 应尽量避免桥梁发生涡激共振或将其振幅控制在规范允许范围之内。

1898 年, Strouhal 研究了竖琴的风振现象, 并利用试验研究了气流流经圆柱体后的

旋涡脱落情况,从而定义了斯脱罗哈数,即式(1.4),描述了旋涡脱落频率、风速及圆柱直径之间的关系,对于圆柱体, St 约为 $0.2^{[17]}$ 。1911年 Von Karman^[15]的研究表明,长圆柱体沿中轴的垂直方向以速度 v 在静止的无黏性理想流体中匀速前进时,物体后面的尾流中将产生一系列相隔固定间距 a 的单涡,并且以 $u < v$ 的速度沿几乎平行的两根直线(内距为 b) 随物体前进,这些交替脱落的旋涡被称为“卡门涡街”,Von Karman 还指出,只有涡脱满足

$$\cosh\left(\frac{2\pi b}{a}\right)=2 \quad (1.9)$$

即两涡列的行距 b 为相邻涡距 a 的 0.28 倍时,涡街才是稳定的,此时旋涡脱落频率为

$$f_v = \frac{v-u}{a} \quad (1.10)$$

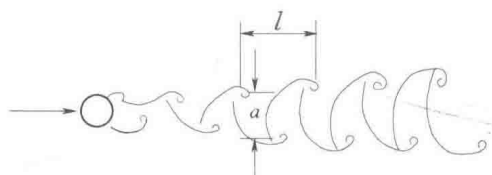


图 1.1 黏性流体中的 Karman 涡街

l —前后两个涡旋的中心距;
 a —左右两个涡旋的中心距

然而在现实中并没有理想的无黏性流体,一般都有黏性。因此在物体后面的尾流中所产生的单涡之间的距离是不相同的,也不是沿着平行的两根直线移动的,而是随着单涡向下游的移动,前后两个单涡的中心距增大,左右两个旋涡的中心距也增大,如图 1.1 所示。

Karman-Dunn 研究了雷诺数对光滑圆柱体绕流的影响^[16],如图 1.2 所示。

$Re < 5$ 时,流动将附着在圆柱体的整个表面上,即流动不分离。

$5 < Re < 40$ 时,流动仍然是对称的,但出现了流动分离,在背风面形成两个对称排列的稳定旋涡,随着 Re 的增大,涡向外拉长,发生畸形。

$40 < Re < 150$ 时,从 $Re = 40$ 起,旋涡将从圆柱体表面交替脱落,流入到圆柱体背后附近流体中形成剪切层,不稳定的剪切层很快卷成旋涡,向下游流动,形成卡门涡街。此时,旋涡的脱落是规则的,且具有周期性,如图 1.2 所示。

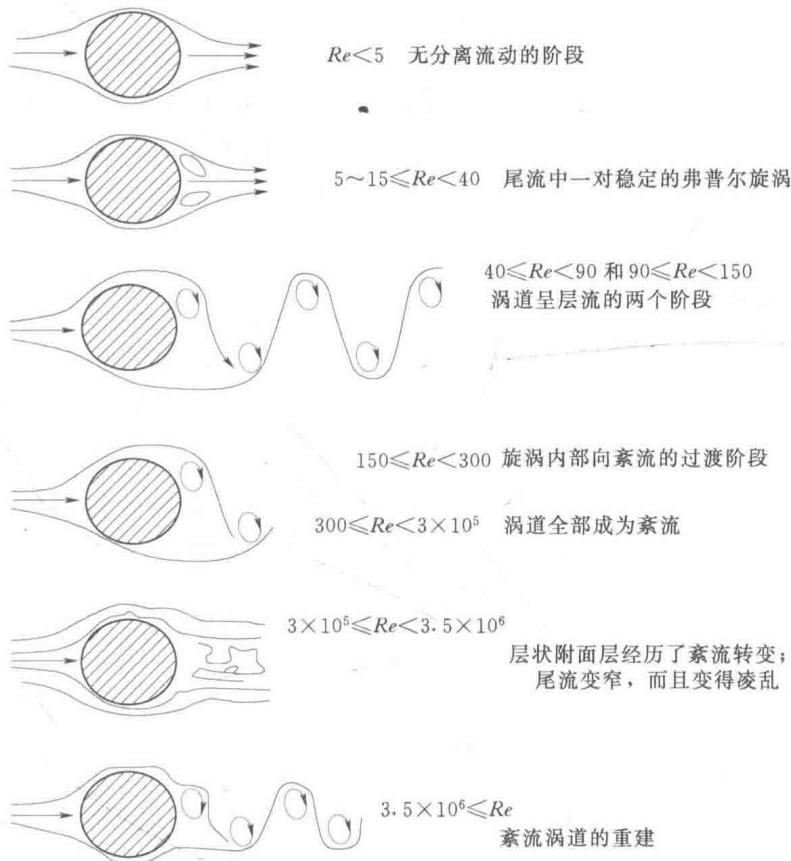
$150 \leq Re < 300$ 是从层流向紊流过渡的转变期,此时周期性的旋涡脱落被不规则的紊流所覆盖。

$300 \leq Re < 3 \times 10^5$ (亚临界区) 圆柱体尾流在分离后主要表现为紊流尾流,旋涡脱落开始不规则,涡脱频率的周期尚可大致定出,但涡旋振幅和涡脱时的扰力将不再对称,而是随机的。

$3 \times 10^5 \leq Re < 3.5 \times 10^6$ (超临界区) 流动的分离点,旋涡脱落点向后移动,已无法辨认涡街,成了完全无周期的涡流。

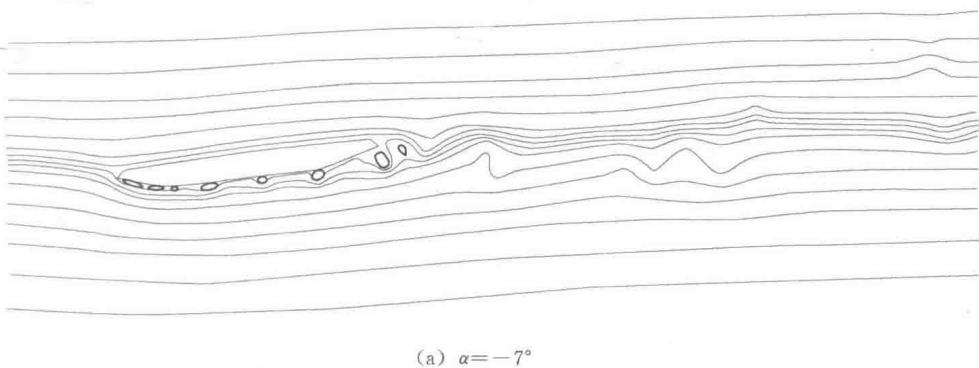
$3.5 \times 10^6 \leq Re$ (跨临界区) 虽然尾流十分紊乱,但又呈现出有规律的旋涡脱落。

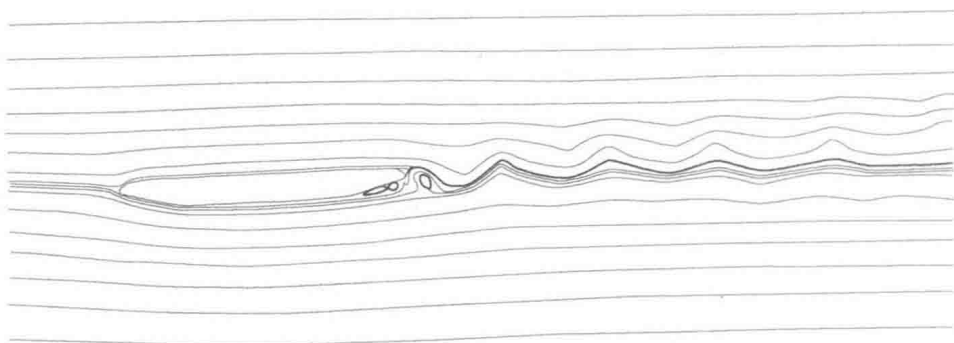
其他的钝体如方形、矩形或各种桥梁断面都有类似的旋涡脱落现象,图 1.3 所示为苏通大桥主梁瞬时流场^[18]。当均匀流流经钝体断面时,在断面背后产生的周期性的旋涡脱落还会对结构物产生一个周期性变化的作用力——涡激力,且其频率为

图 1.2 圆柱涡脱与雷诺数关系^[16]

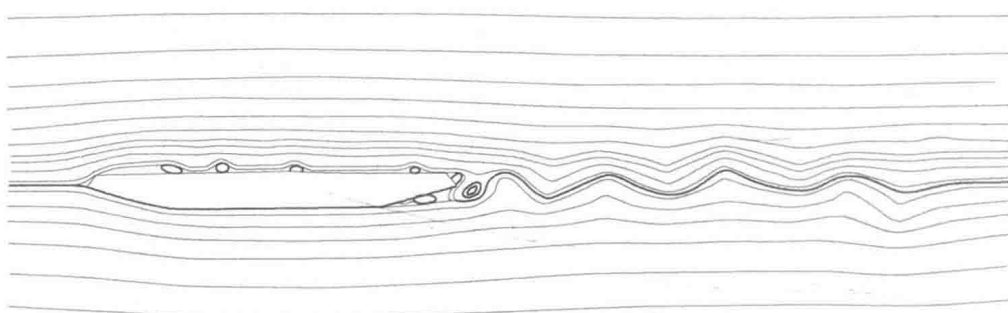
$$f_v = St \frac{v}{d} \quad (1.11)$$

式中： d 为断面的特征尺寸，对于一般钝体断面，可取迎风面的高度； v 为来流风速； St 为斯脱罗哈数。当被绕流的物体为一振动体系，并且旋涡脱落频率与结构物的某阶自振频率相一致时，周期性的涡激力将引起结构的涡激共振（vortex-induced vibration）。苏通大桥主梁瞬时流场如图 1.3 所示。

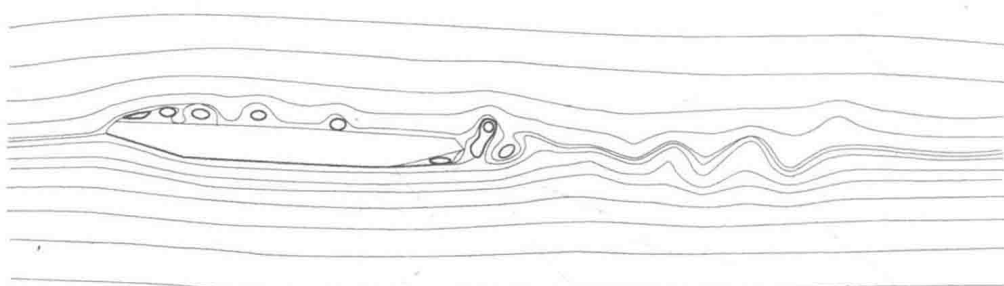
图 1.3 苏通大桥主梁瞬时流场^[18]



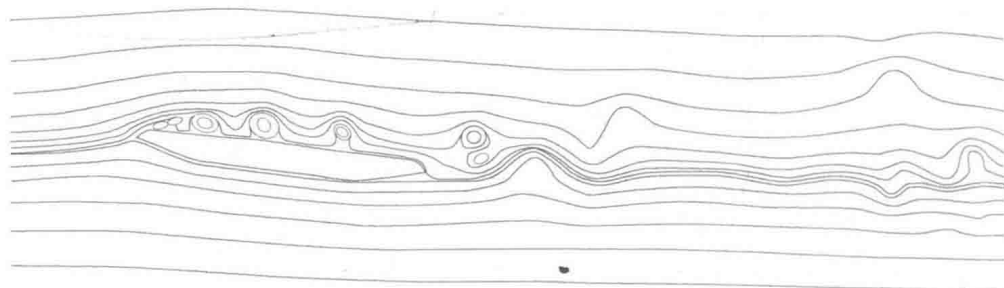
(b) $\alpha = -3^\circ$



(c) $\alpha = 0^\circ$



(d) $\alpha = +3^\circ$



(e) $\alpha = +7^\circ$

图 1.3 苏通大桥主梁瞬时流场^[18]

从式 (1.11) 来看, 涡脱频率 f_v 与风速 v 呈线性关系, f_v 等于结构某一频率 f_s 的条件是在一定风速下才能满足的, 但是频率为 f_s 的振动体系将对旋涡的脱落产生某种反馈作用, 使得涡脱的频率 f_v 在一定的风速范围被结构的振动频率所“俘获”, 使其在这一风速范围内不随着风速的改变而改变, 这种现象被称为锁定 (lock-in), 如图 1.4 所示, 锁定将扩大涡激共振的风速范围。

从振动形式上看, 涡激共振是带有自激与强迫双重性质的限幅振动。涡激共振主要具有以下 5 个方面的主要特征。

- (1) 在低风速下极易发生。
- (2) 只发生在某一特定风速范围内。
- (3) 最大振幅对阻尼有很大的依赖性。
- (4) 涡激响应特性对断面形状具有高敏

感性。

- (5) 涡激振动可激起弯曲振动, 也可激起扭转振动。

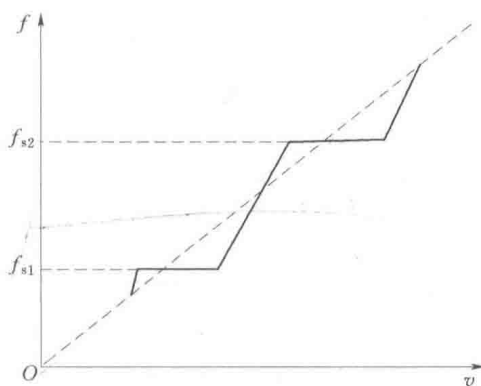


图 1.4 涡激振动锁定现象

1.3 桥梁涡激共振的研究现状

桥梁的涡激共振特性一直受到学术界的关注。Tacoma 桥在颤振发生之前, 在低风速下曾观测到竖弯涡激共振的发生。丹麦的 Great Belt 东引桥^[19]、英国的 Second Severn 桥、东京湾联络桥以及加拿大的 Lion Gate 桥都曾出现过大幅的涡激共振^[20]。在我国, 舟山桃夭门大桥在风洞试验阶段发现扭转和竖弯方向上都存在超过规范允许值的大幅涡激共振^[21]; 柳州红光桥在试验过程中发现某些攻角下会发生竖弯和扭转的涡激共振^[22]; 济南市某跨铁路的斜拉桥在试验中观察到显著的竖弯涡激共振^[23]。西埃门大桥在建成后也观测到明显的竖弯涡激共振。桥梁的涡激共振问题已成为桥梁风工程领域的一个重要问题, 无论是在针对具体实桥的应用研究还是针对机理的基础研究, 都越来越受到重视, 但是对涡激振动的影响因素众多^[24], 因此仍需深入研究。

1.3.1 气动外形

桥梁的断面外形是影响主梁涡激共振特性的重要因素。对气动外形的高敏感性是涡激共振的一个重要特征^[25-28], 对于具体的桥梁断面, 形状的微小改变都会带来对涡激共振特性的影响^[29]。结构的气动外形直接决定了气流遇到断面以后分离点的位置、再附情况、尾流的形状及旋涡的形成, 这对涡振的发生及振幅大小至关重要^[30]。Yoshinobu Kubo^[31,32] 等对 π 形断面绕流特性的研究表明, 断面越钝, 气流分离越彻底。刘志文^[33] 等人的研究发现 H 形杆件的涡激共振锁定区间比矩形断面的锁定区间要大, 是因为 H 形断面的气流分离更严重。对比 π 形梁、扁平箱梁及倒梯形梁的涡激共振特性, 扁平箱梁是最易发生涡激共振的断面形式。

在其他外界条件不发生变化的情况下, 气动外形的微小变化都有可能带来涡振特性的

明显量变,甚至质变,这表明了涡激共振对断面外形的高敏感性。F. Nagao^[34,35]、曹丰产^[36]等人的研究都表明,栏杆的形状及位置对桥梁的涡激共振特性有显著影响,对竖弯涡激共振一般具有放大作用,对扭转涡激共振的影响较为复杂,因此栏杆对扭转涡激共振的影响还需进一步研究;长安大学对港珠澳大桥主梁断面的涡激振动特性研究时也发现栏杆对竖弯涡激响应有放大作用,并发现栏杆的透风率不同,竖弯涡激共振特性存在显著差异。周立等^[37]通过风洞试验发现,桥面是否存在车辆对桥梁的涡激共振特性也有显著影响。

1.3.2 来流攻角

Shinichi Kuroda^[38]通过数值方法研究了扁平箱梁不同风攻角下的压力分布特性,发现同一断面在不同风攻角下其绕流特点具有显著差异,绕流的差异必然导致气动力存在差异,这将决定不同攻角下的涡激共振特性也不尽相同。大量的风洞试验结果表明,来流的风攻角不同,桥梁的涡激共振响应也不同。因为来流攻角的变化实质上是改变了结构浸没在流场中的气动外形,但风攻角对桥梁涡激共振特性的影响并没有表现出明显的趋势,不具有统一的规律性。因此,目前没有较为成熟的理论来解释攻角对涡激共振特性的影响^[38-40]。

1.3.3 雷诺数

丹麦的 Great Belt 东引桥在 16~20m/s 风速范围内发生了大幅的涡激共振现象,但风洞试验结果表明其涡振风速应为 23m/s,后在压力风洞中证实为雷诺数效应。G. Schewe 等^[41]根据 Great Belt 东引桥的油膜试验发现,在低雷诺数下箱梁下缘的流体分离点提前,尾迹较之高雷诺数要宽,认为桥梁断面的绕流状态在高低雷诺数下不同。林志兴等^[42]对比苏通大桥不同缩尺比模型的涡激共振试验结果发现,无论是起振风速还是涡振发生与否都因雷诺数的不同而不同。张伟^[43]等对西堠门大桥涡激共振雷诺数效应的研究表明,低雷诺数试验中的涡激共振振幅较之高雷诺数试验中要大。气动措施的有效性也具有明显的雷诺数效应,中国香港昂船洲桥的风洞试验发现,导流板在 1:80 模型试验中无效,而在 1:20 模型的试验中有效^[44-47]。即在低雷诺数风洞试验中无效的气动措施在高雷诺数风洞试验中可能有效^[48]。Schewe 等^[41]人的研究证实,导致 Great Belt 东引桥在较低风速下出现涡激共振与风洞试验结果不一致的原因是斯脱罗哈数的雷诺数效应。Y. Kubo^[49]等对 Ikara 桥的实桥进行研究,并对比缩尺模型试验结果,认为风洞试验的雷诺数大于 2×10^4 时,雷诺数对斯脱罗哈数的影响才会减小。李加武^[50]利用热线风速仪在流线形断面模型尾流区域捕捉涡脱,发现尾流中的涡脱强区随着雷诺数的变化而不断移动。金挺^[51,52]研究苏通大桥斯脱罗哈数的雷诺数效应表明,雷诺数 $2 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5$ 是斯脱罗哈数变化的过渡区。以上研究表明,桥梁涡激共振的雷诺数效应主要表现为雷诺数对涡振起振风速、锁定区间大小及涡激共振振幅的影响。

1.3.4 紊流强度

涡激共振响应在紊流场和均匀流场中可能会表现出明显的差异。大量的风洞试验结果表明,一般情况下紊流对涡激共振起到抑制作用,即结构在紊流中的涡振响应较小甚至消失。M. Kawatani 等^[53]研究了紊流度对长宽比为 4:1 和 7:1 的矩形断面和六边形断面

涡激共振特性的影响,试验结果表明,紊流度的增大使涡激共振振幅减小,对矩形断面的影响更为明显。但有时也存在均匀流场中不存在涡激共振,而在紊流场出现了的情况^[54-59]。虽然在风洞试验中能模拟一定程度的紊流强度,但是表征自然风场特性的参数还有很多,尤其在风洞试验中很难实现对自然风场紊流积分尺度的模拟,因此,紊流积分尺度对涡激共振特性的影响目前还不明确。

对涡激共振的认识始于古罗马的竖琴振动,这种奇特有趣的振动很早就引起了人们的注意,但是在桥梁抗风领域中对于涡激共振的研究一直处于滞后状态。一方面,是因为涡激共振不具有发散性,不会给桥梁带来灾难性的破坏,因此,没有像颤振及驰振一样作为结构的安全问题而备受关注;另一方面,是因为问题本身的复杂性与随机性,使得多年对涡激振动的研究不曾有突破性的进展,显得步履维艰。目前对涡振的研究仍处于试验尝试阶段,并没有从理论上提出涡激共振的发生机理及有效的抑制措施,这就使得对涡振的研究具有很大的盲目性,很难有效地指导工程实际。

1.4 本书的研究意义及主要工作

1.4.1 研究意义

涡激共振虽然是一种风致限幅振动,不会给桥梁结构带来毁桥的危险,但是由于其起振风速较低,所以发生的频率较高,国内外多座桥梁在建成后都观测到较大程度的涡激共振。涡激共振不仅会出现在桥梁主梁上,桥塔、缆索及吊杆也都有可能发生涡激共振,如我国九江大桥的吊杆就发生过涡激振动。虽然涡激共振不具有发散性,但过大的振幅及加速度将会影响行车的安全性及舒适性,也有可能局部构件疲劳破坏从而引发结构的其他气动不稳定现象。因此,对于涡激共振的研究是桥梁风工程领域的一个研究重点。

目前国内外的大型桥梁在设计的过程中都会进行涡激共振的风洞试验,但是影响桥梁涡激共振特性的因素众多,如风攻角、雷诺数、紊流强度等。常规的低速风洞试验的雷诺数与实桥相差近两个数量级,同时也不能完全模拟实桥的风环境,因此使得风洞试验中的涡激共振结果与实桥存在显著差异。偏于保守的试验结果虽然能保证结构的安全性,但过于保守可能造成经济上的浪费,最令人不愿看到的是,试验结果偏于危险,即在试验中未观测到涡激共振的发现却在实桥中出现了。因此,研究影响涡激振动试验结果的因素,并且揭示这些因素对涡激振动试验的影响机理,提高试验精度,寻求出更为有效、准确的涡激振动试验方法已经迫在眉睫!

1.4.2 主要工作

近几十年来,建成的桥梁越来越多,并且向着大跨径、超大跨径的方向发展,必然导致桥梁结构自重轻、频率低、阻尼小,这些特点加大了桥梁结构对风作用的敏感性,使得对桥梁风致振动问题的研究显得越加重要。在桥梁设计之初,其涡激共振特性通过风洞试验进行检验,过于保守的试验结果将造成经济浪费,而偏于危险的结果又将给桥梁带来涡激共振发生的可能性,因此,必须对桥梁的涡激振动进行深入、细致的研究,有效提高桥梁涡激共振试验的精度、准确评估桥梁的涡激共振特性对风洞试验技术的发展及经济指导