

公路桥梁抗风设计指南

Gonglu Qiaoliang Kangfeng Sheji Zhinan

《公路桥梁抗风设计指南》 编写组



人民交通出版社

需要进一步研究。我们热诚希望读者在使用本《指南》过程中,不吝提出意见和建议。希望通过一段时间的试用,并对一些问题以及一些参数的合理取值再作深入的研究,为早日制订我国的《公路桥梁抗风设计规范》而共同努力。

《公路桥梁抗风设计指南》编写组

1996. 4

内 容 提 要

该著是在理论分析和模型试验的基础上,给出抗风设计和抗风验算的各项指标及取用参数,具有很好的实用性,可供从事桥梁设计、科研、教学等技术人员使用参考。

图书在版编目(CIP)数据

公路桥梁抗风设计指南/《公路桥梁抗风设计指南》编写组编. —北京:人民交通出版社,1996. 10

ISBN 7-114-02445-2

I. 公… II. 公… III. 公路桥-防风-设计
IV. U448.142.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第
16132 号

公路桥梁抗风设计指南

《公路桥梁抗风设计指南》编写组

人民交通出版社出版

本社发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

北京云浩印制厂印刷

开本:850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张:3.5 字数:87 千

1996 年 10 月 第 1 版

1996 年 10 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—4000 册 定价:12.50 元

ISBN 7-114-02445-2

U · 01708

《公路桥梁抗风设计指南》编写组

主 编： 项海帆 （同济大学）
成 员： 林志兴 （同济大学）
 鲍卫刚 （交通部公路规划设计院）
 陈艾荣 （同济大学）
 顾 明 （同济大学）

前 言

80年代以来,我国大跨桥梁建设发展迅猛,悬索桥、斜拉桥、连续刚构桥等桥型的跨度都已步入世界先进行列。现代大型桥梁的结构特点是大、轻、柔,对风的作用更为敏感,风荷载已成为支配性荷载。我国是受强台风和强烈季节风经常侵袭的国家,为了防止历史上象苏格兰的泰(Tay)桥和美国的塔科马(Tacoma)悬索桥那样的风毁事故重演,进行桥梁抗风设计已成为桥梁工程师们十分关心的问题。

风对桥梁的作用包括风荷载的静力作用和风引起的桥梁振动两个方面。我国目前的《公路桥涵设计通用规范》(JTJ021—89)虽有静风荷载方面的条款,但并不适用于大跨度桥梁。而桥梁的动力抗风设计尚属空白。随着桥梁向长大化发展,工程师们迫切希望能够有一个抗风设计的指导性文件。

为了满足桥梁工程师们的要求,推动我国的大跨桥梁建设,交通部公路规划设计院和同济大学的有关研究人员,于1993年联合成立了《公路桥梁抗风设计指南》编写组。编写组在总结我国十几年来桥梁抗风理论研究和风洞试验成果的基础上,参考、吸收了其他国家在桥梁抗风研究、设计及有关规范、标准中的部分成果,写成了《指南》初稿,并于1994年10月在上海召开了征求意见会。经过一年多的工作,于1995年12月在北京召开了审查会,邀请了国内从事桥梁抗风研究和桥梁设计的代表单位和专家对《指南》修改稿进行了审议修改。最后编写组又作了局部调整和补充,形成了现在同读者见面的《指南》。

风对桥梁的作用是一个十分复杂的现象,虽然许多现象的机理已基本弄清,但要简化成便于实用的公式和图表仍有许多问题

目 录

1 总则	1
2 抗风设计基本原则	7
3 抗风设计中的近地风特性	11
3.1 一般规定	11
3.2 基本风速	11
3.3 设计基准风速	12
3.4 风速的脉动特性	15
4 风荷载	19
4.1 一般规定	19
4.2 阵风荷载	19
4.3 静力风荷载	20
4.4 动力风荷载	24
4.5 静力稳定性验算	24
4.6 风荷载加载方法和荷载组合	26
5 桥梁结构的动力特性	27
5.1 一般规定	27
5.2 主梁力学模型的选择	27
5.3 基频的近似公式	30
6 桥梁的空气动力稳定性	34
6.1 颤振	34
6.2 驰振	39
7 风致限幅振动	42
7.1 抖振	42
7.2 涡激共振	45

7.3 拉索振动..... 50

8 风洞试验..... 52

8.1 一般规定..... 52

8.2 相似准则..... 53

8.3 风洞试验类型..... 55

9 桥梁风致振动控制..... 60

9.1 一般规定..... 60

9.2 气动措施..... 60

9.3 机械措施..... 61

10 施工阶段的抗风验算 66

10.1 一般原则 66

10.2 施工阶段抗风验算方法 66

附录 A 《公路桥梁抗风设计指南》条文说明 68

附录 B 抗风设计实例 88

参考文献..... 101

1 总 则

1.0.1 为使公路桥梁,特别是长、大、轻、柔桥梁结构的设计做到技术先进、经济合理,安全可靠,特编制本指南。

1.0.2 本指南适用于主孔跨径 40m 以上的各类公路桥梁的抗风设计和抗风验算,其风致振动的动力抗风设计则主要针对跨度在 150m 以上的斜拉桥和悬索桥。跨度 800m 以上的斜拉桥或 1500m 以上的悬索桥,由于在风荷载作用下可能出现强烈的非线性或其他问题,不包括在本指南的适用范围内。

1.0.3 本指南仅涉及各类公路桥梁结构的抗风设计和抗风验算,承载能力极限状态和正常使用极限状态下的各部分结构或结构构件的强度、稳定、变形等设计仍须遵守国家或交通部有关标准规范的规定。

1.0.4 基本术语和符号

1.0.4.1 基本术语

1.0.4.1.1 基本风速

桥梁所在地区(一般指县级以上气象站所管辖的范围)中的开阔平坦地面(气象台站一般均设在开阔平坦的场地上)以上 10m 高度处 100 年重现期的 10min 平均年最大风速。

1.0.4.1.2 设计基准风速

在桥梁所在地区基本风速的基础上,考虑桥位局部地表粗糙度影响的桥面高度处 100 年重现期的 10min 平均年最大风速。

1.0.4.1.3 自激振动检验风速

保证桥梁避免发生自激振动的风速界限。自激振动(颤振和驰振)是一种危险性的发散振动,必须通过抗风设计使桥梁的自激振动临界风速高于其设计基准风速,并具有一定的安全储备。

1.0.4.1.4 风的攻角

由于地形的影响,近地风的方向可能对水平面产生一定的倾斜度,称为风的攻角。具有攻角的风可能对桥梁的风致振动,如颤振,产生不利的影响。一般认为高风速时的平均攻角约在 $\pm 3^\circ$ 之间。

1.0.4.1.5 设计风荷载

进行静力抗风设计所采用的风荷载。跨度较小、刚性较大的桥梁可只考虑阵风荷载作用下的强度问题,较大跨度的柔性桥梁应考虑风致振动引起的动力风荷载作用。

1.0.4.1.6 阵风系数

瞬时风速与10min平均风速的比值。计算阵风荷载时应采用时距为1~3s的瞬时(阵风)风速,即由阵风系数乘以设计基准风速求得。

1.0.4.1.7 地表粗糙度

反映大气边界层中地表起伏或地物高矮疏密状况的一种指标。本指南将地表粗糙度分为四类,它影响平均风沿高度的分布,也影响紊流的强度和功率谱密度函数。

1.0.4.1.8 空气静力系数

表征在静力气动力作用下,各类结构断面受力大小的无量纲系数。

在平均风作用下,桥梁断面将受到不随时间变化的静力风荷载的作用。静风载可按体轴坐标系分解成横向力、竖向力和绕重心轴的扭转力矩。不同的结构断面形状可在风洞中通过节段模型的三分力试验,测定反映体型特点的三个无量纲系数,总称为空气静力系数。

1.0.4.1.9 静力扭转发散

在空气静力扭转力矩作用下,当风速超过某一临界值时,悬吊桥梁主梁扭转变形的附加攻角所产生的空气力矩增量超过了结构抵抗力矩的增量,使主梁出现一种不稳定的扭转发散现象。

1.0.4.1.10 静力横向屈曲

作用于悬吊桥梁主梁上的横向静风载超过主梁侧向屈曲的临界荷载时出现的一种静力失稳现象。

1.0.4.1.11 结构自振特性

结构的自振特性包括结构的各阶固有振型及其相应的频率和阻尼比。由于风致振动的多样性,参与的主要振型也不相同,一般需计算多阶振型,从中选出主梁竖弯、侧弯和扭转为前的前几阶振型作为风振分析的依据。

1.0.4.1.12 颤振

颤振是一种危险性自激发散振动,当其达到临界风速时,振动的桥梁通过气流的反馈作用不断吸取能量从而使振幅逐步增大直至最后使结构破坏。

1.0.4.1.13 驰振

对于非圆形的边长比在一定范围内的类似矩形断面的钝体结构及构件,由于升力曲线的负斜率效应,微幅振动的结构能够从风流中不断吸取能量,当达到临界风速时,结构吸收的能量将克服结构阻尼所消耗的能量,形成一种发散的横风向单自由度弯曲自激振动。

1.0.4.1.14 涡激共振

风流经各种断面形状(圆形、矩形、多边形等)的钝体结构时都有可能发生旋涡的脱落,出现两侧交替变化的涡激力。当旋涡脱落频率接近或等于结构的自振频率时,将由此激发出结构的共振。

1.0.4.1.15 抖振

大气中的紊流成分所激起的强迫振动,也称为紊流风响应。抖振是一种限幅振动,由于它发生频度高,可能会引起结构的疲劳。过大的抖振振幅会引起人感不适,甚至危及桥上高速行驶的安全。

1.0.4.1.16 静力三分力试验

采用主梁或桥塔的刚性节段模型,在风洞中测定平均风绕流的静作用力的三个分量,即阻力、升力和扭转力矩。无量纲的三分力系数和攻角的关系曲线反映出断面的基本气动性能,是分析桥梁各种风致振动和静力稳定的重要参数。

1.0.4.1.17 节段模型试验

将主梁的代表性节段做成刚性模型,用弹簧悬挂在支架上形成一个有竖向平动、转动(及侧向)自由度的振动模型,在风洞中测定风的动力作用。满足相似条件的节段模型试验可直接测定二维颤振的临界风速,也可识别出用气动导数表示的非定常气动力,是桥梁最重要的风洞试验之一。

1.0.4.1.18 全桥气动弹性模型试验

将全桥按一定几何缩尺制成并满足各种必要的空气动力学相似条件的三维弹性模型,在大型边界层风洞中观测其在均匀流及紊流风场中的各种风致振动现象,用于考察桥梁从施工各阶段到成桥的抗风性能。这是研究桥梁风致振动最精确的试验方法。

1.0.4.1.19 风振控制

当危险性风致振动(颤振和驰振)的临界风速低于自激振动的检验风速或者风致限幅振动(涡振和抖振)的振幅超过了可接受的限度时,可采用气动措施或机械措施来提高临界风速或减低振幅以确保桥梁的抗风安全。

1.0.4.1.20 调质阻尼器

用质量可变的重物 and 弹簧、阻尼装置组成一种阻尼器,通过调节重物质量使阻尼器的频率接近结构的受控频率,此时,结构的振动能量将会传递到阻尼器中耗散,使结构的振动减弱。这是一种在桥梁中常用的被动式振动控制装置。

1.0.4.2 基本符号

B	桥梁的全宽(m)
b	桥梁的半宽(m)
C_H, C_V, C_M	结构体轴坐标系下的阻力、升力及扭转力矩系数
D_D, C_L, C_M	风轴坐标系下的阻力、升力及扭转力矩系数
D	主梁投影高度(m)
E	材料弹性模量(MPa)
f_b, f_t	结构的竖向弯曲及扭转振动频率(Hz)
G	材料剪切模量(MPa)

I_m	结构单位长度的质量惯矩($\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{m}$)
J_x, J_y	截面对主形心轴惯性矩(m^4)
J_d	截面的自由扭转惯性矩(m^4)
J_w	截面的约束扭转主扇性惯性矩(m^4)
L	桥梁的跨度(m)
L_x^u, L_y^u	脉动风速 u 在 x, y 方向的紊流尺度(m)
M	空气静力扭转力矩($\text{N} \cdot \text{m}$); 结构质量(kg)
m	结构单位长度质量(kg/m)
n	风的频率(Hz)
P	风荷载(N)
P_g	阵风荷载(N)
P_H, P_V	桥梁体轴坐标系下的侧向及竖向风荷载(N)
q	风速的动压(Pa)
$[q_{cr}]$	悬索桥主梁横向屈曲临界荷载(N)
r	截面的惯性半径(m)
S_t	斯特罗哈(Strouhal)数
$S_u(n), S_v(n), S_w(n)$	脉动风的顺风向、横风向及竖直方向的功率谱密度函数
T	振动周期(s)
T_h	西奥多森(Theodorsen)数
U, V, W	主流方向、垂直主流方向的水平方向及铅直方向的风速(m/s)
$\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$	主流方向、垂直主流方向的水平方向及铅直方向的平均风速(m/s)
u, v, w	风速 U, V, W 的脉动风速(m/s)
U_{10}	距地面或水面 10m 高处的基本风速(m/s)
U_d	设计基准风速(m/s)
U_g	阵风风速(m/s)
U_z	距地面(或水面) z 高度处的风速(m/s)

U_{cr}	颤振临界风速(m/s)
U_{cg}	驰振临界风速(m/s)
U_{cv}	涡激共振发生风速(m/s)
U_{co}	平板的颤振临界风速(m/s)
x, y, z	直角几何坐标系的三个坐标轴方向
Z	桥梁(结构或构件)的基准高度(m)
Z_0	地面粗糙高度(m)
Z_g	地面到大气边界层边界的高度(m)
α	大气剪切流风速剖面的幂指数;风的攻角(°)
ε	桥梁主梁扭转与竖向弯曲振动的频率比
δ	对数衰减率
ζ	阻尼比
ζ_s	结构的阻尼比
η_s	非平板主梁截面的形状修正系数
η_a	攻角效应系数
μ	结构物与空气的密度比
μ_t	考虑风速的脉动影响及水平相关特性的修正系数
ρ	空气密度(kg/m ³)
ρ_s	结构物密度(kg/m ³)
$\sigma(x)$	在坐标 x 处的抖振位移响应根方差(m)
$\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$	风速的标准偏差(根方差)(m/s)
$\phi(x)$	结构物振型函数
ω	结构固有圆频率
ω_b, ω_t	桥梁的竖向弯曲及扭转圆频率

2 抗风设计基本原则

2.0.1 风对桥梁的作用

2.0.1.1 一般规定

风对桥梁的作用受到风的自然特性、结构的动力特性以及风与结构的相互作用三方面的制约。从工程的抗风设计角度,可以把自然风分解成不随时间变化的平均风和随时间变化的脉动风两部分的叠加,分别考虑它们对桥梁的作用。

2.0.1.2 风的静力作用

在平均风作用下,假定结构保持静止不动,或者虽有轻微振动,但不影响空气的作用力,即忽略气流绕过桥梁时所产生的特征紊流以及旋涡脱落等非定常(随时间变化的)效应,只考虑定常的空气作用力,称为风的静力作用。

2.0.1.3 风的动力作用

桥梁作为一个振动体系在近地紊流风作用下的空气弹性动力响应可以分为两大类:

(1)在风作用下,由于结构振动对空气力的反馈作用,产生一种自激振动机制,如颤振和驰振达到临界状态时,将出现危险性的发散振动。

(2)在脉动风作用下的一种有限振幅的随机强迫振动,称为抖振。涡激共振虽带有自激的性质,但也是限幅的,因而具有双重性。

2.0.1.4 风对桥梁的作用分类(表 2.0.1.4)

2.0.2 抗风设计的目的和手段

2.0.2.1 桥梁抗风设计的目的首先在于保证结构在施工阶段和建成后的营运阶段能够安全承受可能发生的最大风荷载的静力作用和由于风致振动引起的动力作用。

表 2.0.1.4

分 类	现 象			作 用 机 制		
静力作用	静风载引起的内力和变形			平均风的静风压产生的阻力、升力和力矩作用		
	静力不稳定		扭转发散	静(扭转)力矩作用		
			横向屈曲	静阻力作用		
动力作用	抖振(紊流风响应)		限 幅	紊流风作用		
	自激振动	涡 振	振 动	旋涡脱落引起的涡激力作用		
		驰 振		单自由度	发 散 振 动	自激力的气动负阻尼效应—— 阻尼驱动
		扭转颤振				
		古典耦合颤振				
		二自由度			自激力的气动刚度驱动	

2.0.2.2 由于自然风会引发各种风致振动,在桥梁抗风设计中首先要求发生危险性颤振或弛振的临界风速与桥梁的设计风速相比具有足够的安全度,以确保结构在各个阶段的抗风稳定性;

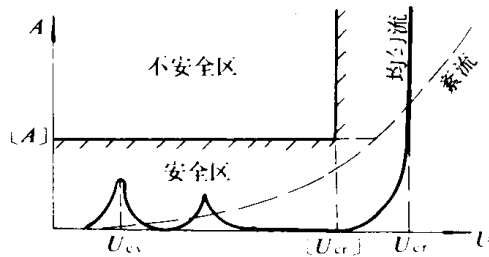


图 2.0.2.2 桥梁风致振动的安全区域

同时要求把涡激振动和抖振的最大振幅限制在可接受的范围内,以免造成结构疲劳、人感不适以及行车不安全等问题,参见图 2.0.2.2。

2.0.2.3 若桥梁的最初设计方案不能满足抗风的要求,应通过修改设计或采取气动措施、结构措施或者机械措施等控制方法提高结构的抗风稳定性或减小风致振动的振幅。

2.0.2.4 由于大气边界层的紊流风特性以及桥梁断面作为一种不规则钝体的气动特性具有相当的复杂性,目前还无法建立起能够完善地描述风和结构相互作用的数学模型,而只能通过半理论半实验或纯实验的途径寻求近似的解答。因此,风洞试验是桥梁抗风设计中必不可少的重要手段。

2.0.2.5 在桥梁设计的不同阶段,可以根据情况采用不同精度的抗风设计方法和风洞试验手段。

对于一般的大桥,初步设计阶段的抗风分析可采用近似的公式对各方案的静风载内力和气动稳定性进行估算,待方案确定后再通过节段模型的风洞试验测定各种参数,进行抗风验算和各类风振分析。

对于重要桥梁,宜在初步设计阶段通过风洞试验进行气动选型,为确定主梁断面提供依据。在技术设计阶段再对选定的断面方案进行详细的抗风验算和风振分析,还应通过全桥模型的风洞试验对分析结果予以确认。

2.0.2.6 抗风设计的工作流程

参见图 2.0.2.6。

2.0.3 抗风设计中的重要因素

2.0.3.1 风特性参数

应通过调查和收集气象资料掌握桥址处的风特性,并采用正确的方法确定合理的参数供抗风设计使用。特别要注意桥址处特殊的地形、地貌和风向条件,以便对常规的取值进行必要的修正。

2.0.3.2 桥梁的动力特性

桥梁动力特性分析是风振分析的基础,需采用合理的力学模型,并注意边界支承条件的正确处理。对计算结果要通过与相似桥梁的比较(最好有实测资料)检验其合理性和可靠性,其中特别是对于主梁前二阶对称和反对称的竖向弯曲、侧向弯曲和扭转振型要作出正确的判断。

2.0.3.3 桥梁风荷载

桥梁风荷载由静力风荷载和动力风荷载两部分组成。静力风荷载包括阻力、升力和力矩;动力风荷载为风致振动所产生的结构惯性力。由于引起振动响应需要一定的持续时间,可采用时距较大的平均风作为计算振动响应的设计风速。

2.0.3.4 颤振临界风速

颤振临界风速是桥梁发生发散性颤振的起始风速。当外界风

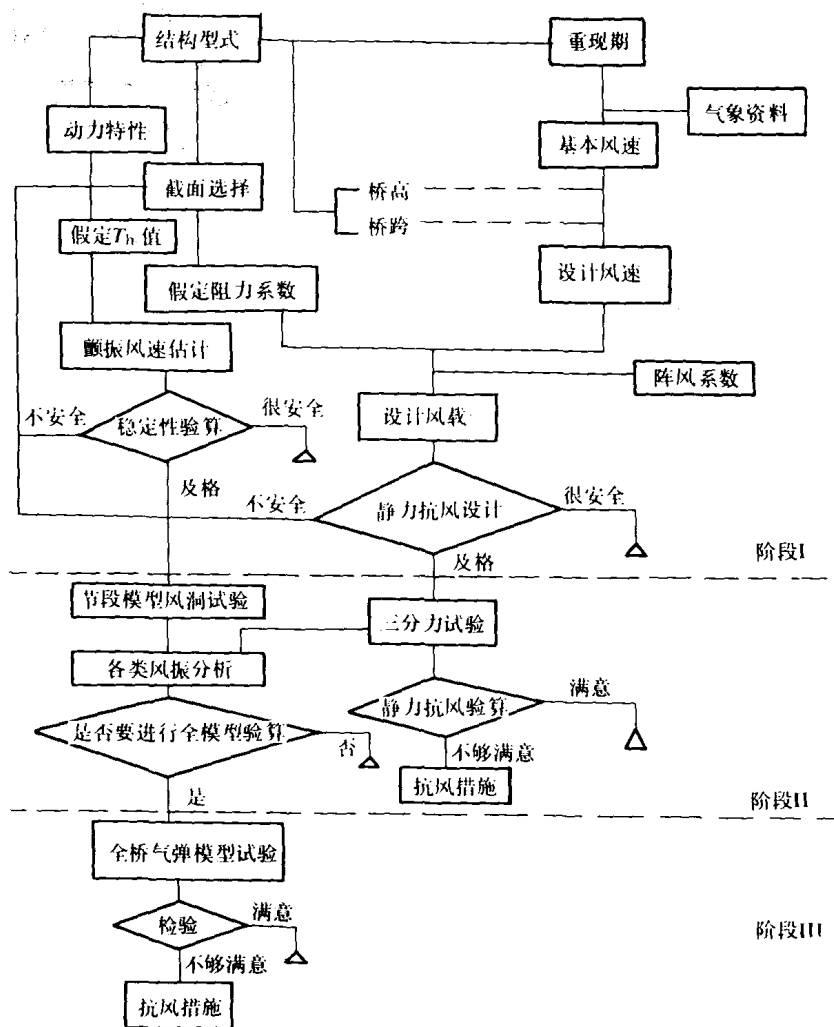


图 2.0.2.6 桥梁抗风设计的工作流程

速低于临界风速时,振动是衰减的。为了防止出现这种造成桥梁风毁的危险振动,必须保证桥梁的颤振临界风速高于桥址处可能出现的设计基准风速并具有一定的安全系数。

2.0.3.5 抖振响应

抖振是紊流风作用下的随机强迫振动。抖振响应的正确预测主要取决于桥梁的动力特性、主梁断面的气动特性和紊流风特性。