

江苏省地方标准

DB32/T 3496—2019

桥梁结构抗风设计规范

Wind-resistant design specification for bridge structures

2019-01-12 发布

2019-01-30 实施

江苏省市场监督管理局 发布

目 次

前言 I

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号 2

5 风特性参数计算 3

6 风荷载 6

7 桥梁结构抗风安全性验算 8

8 风致振动控制..... 14

附录 A（资料性附录） 江苏省基本风速值 15

附录 B（资料性附录） 非平稳风速模型及特征参数 17

附录 C（资料性附录） 桥梁气动力参数 19

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由江苏省交通运输厅提出并归口。

本标准起草单位：东南大学、江苏省交通运输厅公路事业发展中心、苏州科技大学、江苏省工程师学会风工程专业委员会、苏交科集团股份有限公司、江苏省气候中心。

本标准主要起草人：王浩、闵剑勇、陶天友、陈鑫、张宇峰、李爱群、陈兵、茅建校、许钧。

桥梁结构抗风设计规范

1 范围

本标准规定了面向公路桥梁结构抗风设计的风特性参数、风荷载、桥梁结构安全性验算、风致振动控制的相关要求。

本标准适用于主跨 800 m 以下的斜拉桥与主跨 1 500 m 以下的悬索桥,其他桥型的抗风设计参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

JTG D60 公路桥涵设计通用规范

JTG/T D60-01 公路桥梁抗风设计规范

JT/T 926 桥梁用黏滞流体阻尼器

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

基本风速 basic wind speed

开阔平坦地貌条件下,地面或水面以上 10 m 高度处,重现期内的 10 min 最大平均风速。

3.2

设计基准风速 design standard wind speed

考虑局部地表粗糙度影响,结构或构件基准高度处重现期内的 10min 最大平均风速。

3.3

风速风向联合分布 joint distribution of wind speed and wind direction

以风速、风向为随机变量的联合概率分布。

3.4

非平稳风速模型 nonstationary wind speed model

考虑非平稳特征的风速模型。

3.5

地表粗糙度 terrain roughness

反映大气边界层中地表起伏或地物高矮稀密的程度。

3.6

空气静力系数 aerostatic factor

表征在风的静气动力作用下,结构断面受力大小的无量纲系数。

3.7

静力扭转发散 aerostatic torsional divergence

在风的静力扭转力矩作用下,当风速达到临界值时,结构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,而出现扭转角不断增大的失稳现象。

3.8

静力横向屈曲 aerostatic lateral buckling

横向静风荷载值超过结构横向屈曲临界荷载值时出现的失稳现象。

3.9

颤振 flutter

振动的结构通过气流的反馈作用不断吸取能量,振幅逐步增大直至使结构破坏的发散性自激振动。

3.10

驰振 galloping

振动的结构从气流中不断吸取能量,使非扁平截面的细长钝体结构的振幅逐步增大的发散性弯曲自激振动。

3.11

涡激共振 vortex resonance

气流绕经钝体结构时产生旋涡脱落,当旋涡脱落频率与结构的自振频率接近或相等时,由涡激力所激发出的结构共振现象。

3.12

抖振 buffeting

风的紊流成分所激发的结构随机振动,也称为紊流风效应。

3.13

颤振临界风速 flutter critical wind speed

判断桥梁发生颤振时临界点的风速。

3.14

驰振临界风速 galloping critical wind speed

判断桥梁发生驰振时临界点的风速。

3.15

静力三分力 aerostatic force

气流绕过结构所产生的静力作用力的三个分量,即阻力、升力和扭矩。

3.16

节段模型试验 sectional model testing

将结构构件的代表性节段做成刚性模型,在风洞中测定其静力三分力或非定常气动力作用的试验。

3.17

全桥气动弹性模型试验 full aero-elastic model testing

将结构按一定几何缩尺并满足各种必要的空气动力学相似条件制成的弹性三维空间模型,在风洞中观测其在均匀流及紊流风场中各种风致效应的试验。

3.18

风致振动控制 wind-induced vibration control

为避免结构出现发散性风致振动或过大的限幅振动所采取的气动措施、结构措施或机械措施。

4 符号

下列符号适用于本文件。

B ——主梁宽度;

F_H ——单位长度上的阻力;

F_M —— 单位长度上的扭矩；
 F_V —— 单位长度上的升力；
 H —— 主梁高度；
 I_f —— 颤振稳定性指数；
 U_{cg} —— 驰振临界风速；
 U_{cr} —— 颤振临界风速；
 U_{cvh} —— 竖向涡激共振发生风速；
 $U_{cv\theta}$ —— 扭转涡激共振发生风速；
 U_d —— 桥面高度处的设计基准风速；
 U_g —— 设计基准风速；
 U_{lb} —— 静风横向屈曲临界风速；
 U_{td} —— 静风扭转发散风速；
 U_Z —— 距地面或水面高度 Z 处的风速；
 U_{co} —— 平板的颤振临界风速；
 f —— 结构振动频率；
 m —— 结构单位长度质量；
 n —— 风的频率；
 z_0 —— 地表粗糙高度；
 α —— 地表粗糙度系数；
 α_0 —— 攻角；
 ζ_s —— 结构的阻尼比；
 η_s —— 非平板主梁截面的颤振临界风速形状无量纲修正系数；
 η_α —— 非 0° 攻角下相对 0° 攻角的颤振临界风速的无量纲修正系数；
 μ_f —— 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。

注：除特殊说明，本标准中单位均采用国际单位制。

5 风特性参数计算

5.1 风速计算

5.1.1 基本风速

5.1.1.1 当桥址区与附近的气象台站地貌类别相同，且具有足够的连续风速观测数据时，宜采用当地气象台站年最大风速的概率分布类型，由 10 min 平均年最大风速推算重现期内（根据 JTG D60 规定可取 100 年）的数学期望值作为基本风速。

5.1.1.2 对于风敏感的桥梁结构，当桥址区附近的气象台站数据不能代表桥址区风环境时，应在桥址区进行 1 年以上的风环境现场观测，并采用观测数据推算基本风速。

5.1.1.3 对于非风敏感的桥梁结构，当桥址区缺乏风速观测资料时，基本风速可按附录 A 中的江苏省主要气象台站基本风速值表取值。

5.1.2 设计基准风速

5.1.2.1 风速沿竖直高度方向的分布宜按式(1)计算：

$$U_{Z2} = \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^a U_{Z1} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

U_{z2} ——地面或水面以上高度 Z_2 处的风速；

U_{z1} ——地面或水面以上高度 Z_1 处的风速；

α ——地表粗糙度系数。

5.1.2.2 地表粗糙度系数 α 可按表 1 和 5.1.2.3 的规定取值。

表 1 地表分类及地表粗糙度参数

地表类别	地表状况	地表粗糙度系数	地表粗糙高度 z_0/m
A	海面、海岸、开阔水面	0.12	0.01
B	田野、乡村、丛林、平坦开阔地及 低层建筑物稀少地区	0.16	0.05
C	树木及低层建筑物等密集地区、中高层建筑物 稀少地区、平缓的丘陵地	0.22	0.30
D	中高层建筑物密集地区、起伏较大的丘陵地	0.30	1.00

5.1.2.3 当所考虑范围内存在 2 种粗糙度相差较大的地表类别时，地表粗糙度系数可取两者的平均值；当所考虑范围内存在两种相近类别时，按最不利者取值；当桥梁上下游侧地表类别不同时，按最不利者取值。

5.1.2.4 当桥址区的风速观测数据不充分或当所在地区的气象台站与待建结构相距较远且与附近气象台站的地形、地貌相差较大时，宜设立现场风速观测站，并可利用现场与附近气象台站风速观测数据的相关性推算桥址处的风速，再由式(1)计算设计基准风速 U_g 。

5.1.2.5 当桥梁跨越较窄的海峡或峡谷等不易确定地表类别的特殊地形时，或待建物附近场地特征较为复杂时，宜通过模拟地形的风洞试验、实地风速观测、数值风洞方法或其他可靠方法确定桥梁设计基准风速。

5.1.3 考虑风速风向联合分布的设计基准风速

5.1.3.1 当桥址区各方向地貌特征差异显著或风速风向季节性特征明显，且具有足够连续风速观测数据时，宜考虑风速风向联合分布确定设计基准风速。

5.1.3.2 各方向最大风速概率分布宜采用广义极值分布，由各方向 10 min 最大风速分布概型推算重现期内的数学期望值作为设计基准风速。

5.1.3.3 考虑风速风向联合分布的概率分布函数宜按式(2)计算：

$$F(U, \theta) = f(\theta) \cdot P(U < U_g, \theta) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$F(U, \theta)$ ——风速风向联合概率分布函数；

$f(\theta)$ ——风向频率函数，介于 0~1；

$P(U < U_g, \theta)$ ——风向为 θ 时该方向最大风速服从的概率分布函数，可按式(3)确定；

U ——风速变量；

U_g ——设计基准风速。

5.1.3.4 各方向最大风速的概率分布函数按式(3)进行拟合：

$$P(U < U_g, \theta) = \exp \left\{ - \left(1 + \epsilon \frac{U - \mu}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\epsilon}} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：
 μ ——待拟合概率分布函数位置参数；
 σ ——待拟合概率分布函数尺度参数；
 ϵ ——待拟合概率分布函数形状参数。

5.2 紊流强度

风在水平方向的紊流强度 I_u 的平均值可按表 2 取值,与 I_u 方向垂直的水平及竖直方向的紊流强度 I_v 、 I_w 分别取 $I_v=0.88I_u$, $I_w=0.50I_u$ 。紊流强度的变化范围可为±30%。

表 2 紊流强度 I_u 基准值

高度/m	地表粗糙度类别			
	A	B	C	D
$10<Z\leq 20$	0.14	0.17	0.25	0.29
$20<Z\leq 30$	0.13	0.16	0.23	0.29
$30<Z\leq 40$	0.12	0.15	0.21	0.28
$40<Z\leq 50$	0.12	0.15	0.20	0.26
$50<Z\leq 70$	0.11	0.14	0.18	0.24
$70<Z\leq 100$	0.11	0.13	0.17	0.22
$100<Z\leq 150$	0.10	0.12	0.16	0.19
$150<Z\leq 200$	0.10	0.12	0.15	0.18

5.3 紊流积分尺度

顺风向与横风向的脉动风速紊流积分尺度可按表 3 取值,供模拟紊流积分尺度时参考。

表 3 紊流积分尺度基准值

高度/m	紊流积分尺度/m		高度/m	紊流积分尺度/m	
	L_u	L_v		L_u	L_v
$Z\leq 10$	50	20	$50<Z\leq 70$	120	60
$10<Z\leq 20$	70	30	$70<Z\leq 100$	140	70
$20<Z\leq 30$	90	40	$100<Z\leq 150$	160	80
$30<Z\leq 40$	100	50	$150<Z\leq 200$	180	90
$40<Z\leq 50$	110	50			

5.4 紊流功率谱密度

5.4.1 当桥址区具有风速观测资料时,应按基于观测资料的紊流功率谱密度进行风场模拟。当桥址区缺乏风速观测资料时,宜按式(4)、式(5)规定的紊流功率谱密度进行风场模拟：

$$\frac{nS_u(n)}{u_*^2} = \frac{495.4\tilde{f}}{(1+5.54\tilde{f}^{0.47})^{3.53}} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{nS_w(n)}{u_*^2} = \frac{6\tilde{f}}{(1+4\tilde{f})^2} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$S_u(n)$ 、 $S_w(n)$ ——分别为水平向、竖向的紊流功率谱密度;

u_* ——气流摩阻速度,可按式(6)计算;

$\tilde{f}$ ——莫宁坐标, $\tilde{f} = nz/U(z)$;

n ——脉动风的频率。

$$u_* = \frac{kU(z)}{\ln \frac{z - z_d}{z_0}} \dots\dots\dots (6)$$

$$z_d = H - z_0/k \dots\dots\dots (7)$$

式中:

k ——无量纲常数,可取 0.4;

$U(z)$ —— z 高度处的平均风速;

z ——距地面或水面的高度;

z_d ——零平面高度;

H ——周围建筑物平均高度;

z_0 ——地表粗糙高度,取值参见表 1。

5.4.2 桥梁风振响应值应根据 5.4.1 和 JTG/T D60-01 规定的紊流功率谱密度[顺风向为式(8),竖风向为式(5)]计算,并取两者结果的较大值。

$$\frac{nS_u(n)}{u_*^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \dots\dots\dots (8)$$

6 风荷载

6.1 静力风荷载

6.1.1 在主梁单位长度上的静力风荷载按式(9)、式(10)、式(11)计算:

$$F_H = \frac{1}{2} \rho U_g^2 C_D H \dots\dots\dots (9)$$

$$F_V = \frac{1}{2} \rho U_g^2 C_V B \dots\dots\dots (10)$$

$$F_M = \frac{1}{2} \rho U_g^2 C_M B^2 \dots\dots\dots (11)$$

式中:

F_H 、 F_V 、 F_M ——分别为单位长度主梁上阻力、升力与扭矩;

ρ ——空气密度;

U_g ——设计基准风速;

C_D 、 C_V 、 C_M ——分别为阻力系数、升力系数和扭矩系数,宜结合风洞试验及数值模拟综合确定,确定方法详见附录 C;

H ——主梁高度,宜计入栏杆或防撞护栏以及其他桥梁附属物的实体高度;

B ——主梁宽度。

6.1.2 对桥塔等竖向构件,静风荷载只包括阻力与扭矩,计算方法参考式(9)与式(11)。

6.1.3 对圆形截面的斜拉索、主缆等构件,静风荷载可只计算阻力,计算方法可参考式(9)。

6.2 抖振力

6.2.1 在单位长度主梁上的抖振力按式(12)、式(13)、式(14)计算:

$$F_H^b(t) = \frac{1}{2} \bar{\rho} U^2 H \left[2C_D \chi_D \frac{u(t)}{U} + (C'_D - C_V) \chi'_D \frac{w(t)}{U} \right] \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$F_V^b(t) = \frac{1}{2} \bar{\rho} U^2 B \left[2C_V \chi_L \frac{u(t)}{U} + (C'_V + C_D) \chi'_L \frac{w(t)}{U} \right] \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$F_M^b(t) = \frac{1}{2} \bar{\rho} U^2 B^2 \left[2C_M \chi_M \frac{u(t)}{U} + C'_M \chi'_M \frac{w(t)}{U} \right] \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中:

$F_H^b(t)$ 、 $F_V^b(t)$ 、 $F_M^b(t)$ ——分别为阻力、升力和扭矩抖振力;

$\bar{U}$ ——平均风速;

C_D 、 C_V 、 C_M ——分别是攻角为 0° 时的阻力、升力和扭矩系数;

C'_D 、 C'_V 、 C'_M ——分别是攻角为 0° 时阻力、升力和扭矩系数关于攻角的一阶导数;

χ_D 、 χ'_D 、 χ_L 、 χ'_L 、 χ_M 、 χ'_M ——气动导纳函数,宜通过风洞试验进行确定,确定方法详见附录 C;

$u(t)$ 、 $w(t)$ ——分别为顺风向、竖向脉动风速,通过风场模拟方法进行模拟。

6.2.2 对于桥塔等竖向构件,抖振力计算方法参考式(12)、式(13)、式(14)。

6.3 气动自激力

单位长度主梁上的气动自激力可按式(15)、式(16)、式(17)计算:

$$F_H^{se} = \frac{1}{2} \bar{\rho} U^2 (2B) \left[KP_1^* \frac{\dot{p}}{U} + KP_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 P_3^* \alpha + K^2 P_4^* \frac{p}{B} + KP_5^* \frac{\dot{h}}{U} + K^2 P_6^* \frac{h}{B} \right] \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$F_V^{se} = \frac{1}{2} \bar{\rho} U^2 (2B) \left[KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} + KH_5^* \frac{\dot{p}}{U} + K^2 H_6^* \frac{p}{B} \right] \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$F_M^{se} = \frac{1}{2} \bar{\rho} U^2 (2B^2) \left[KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} + KA_5^* \frac{\dot{p}}{U} + K^2 A_6^* \frac{p}{B} \right] \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中:

F_H^{se} 、 F_V^{se} 、 F_M^{se} ——分别为阻力、升力和扭矩方向的气动自激力;

p 、 $\dot{p}$ ——分别为结构侧向位移、侧向速度;

h 、 $\dot{h}$ ——分别为主梁竖向位移、竖向速度;

α 、 $\dot{\alpha}$ ——分别为主梁扭转角位移、扭转角速度;

P_i^* 、 H_i^* 、 A_i^* ($i=1, 2, \dots, 6$) ——为节段模型风洞试验获得的 18 个颤振导数,均为 K 的函数,确定方法详见附录 C;

K ——折算频率, $K = fB/\overline{U}$;
 f ——结构振动频率。

7 桥梁结构抗风安全性验算

7.1 静力稳定性验算

7.1.1 主跨跨径大于 400 m 的斜拉桥和主跨跨径大于 600 m 的悬索桥应计算其静力稳定性。

7.1.2 悬索桥的横向屈曲临界风速按式(18)、式(19)计算:

$$U_{lb} = K_{lb} \cdot f_t \cdot B \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$K_{lb} = \sqrt{\frac{\pi^3 \frac{B}{H^\mu} \frac{r}{b}}{1.88 C_H \epsilon \sqrt{4.54 + \frac{C'_L}{C_H} \frac{B_c}{H}}}} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\mu = \frac{m}{\pi \rho b^2}; b = \frac{B}{2};$$

$$\frac{r}{b} = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{I_m}{m}}; \epsilon = \frac{f_t}{f_b}$$

式中:

U_{lb} ——横向屈曲临界风速;

f_t ——对称扭转基频;

B ——主梁宽度;

H ——主梁高度;

B_c ——主缆中心距;

m ——桥面系及单位长度主缆质量;

I_m ——桥面系及单位长度主缆质量惯矩;

ϵ ——扭弯频率比;

C_H ——主梁阻力系数;

C'_L ——风攻角 $\alpha_0 = 0^\circ$ 时主梁升力系数的斜率,宜通过风洞试验或数值模拟获得;

f_b ——对称竖向弯曲基频。

7.1.3 悬索桥的横向屈曲临界风速应满足式(20)规定:

$$U_{lb} \geq 2U_d \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中:

U_d ——桥面高度处的设计基准风速。

7.1.4 悬索桥和斜拉桥的静力扭转发散临界风速可按式(21)、式(22)计算:

$$U_{td} = K_{td} \cdot f_t \cdot B \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$K_{td} = \sqrt{\frac{\pi^3}{2} \mu \left(\frac{r}{b}\right)^2 \cdot \frac{1}{C'_M}} \quad \dots\dots\dots (22)$$

式中:

C'_M ——当风攻角 $\alpha = 0^\circ$ 时,主梁扭转力矩系数 C_M 的斜率,宜通过风洞试验或数值模拟获得。

7.1.5 静力扭转发散的临界风速 U_{td} 应满足式(23)规定:

$$U_{td} \geq 2U_d \quad \dots\dots\dots (23)$$

7.2 驰振稳定性验算

7.2.1 斜拉桥和悬索桥的钢质桥塔、宽高比 $B/H < 4$ 的钢主梁应验算其自立状态下的驰振稳定性。

7.2.2 当驰振力系数 $C'_L + C_H < 0$ 时,应检验驰振稳定性。驰振临界风速可按式(24)估算:

$$U_{cg} = -\frac{4m\omega_1\zeta_s}{\rho H_y} \cdot \frac{1}{C'_L + C_H} \dots\dots\dots (24)$$

式中:

- U_{cg} ——驰振临界风速;
- ω_1 ——结构一阶弯曲圆频率, $\omega_1 = 2\pi f_b$;
- ζ_s ——结构阻尼比;
- H_y ——构件断面迎风宽度。

7.2.3 结构断面的驰振力系数 $C'_L + C_H$ 一般由风洞试验得到。典型断面的驰振力系数见表 4。

表 4 典型断面的驰振力系数

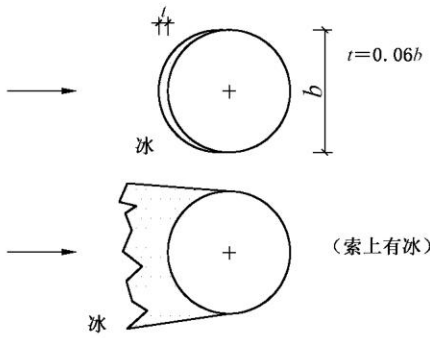
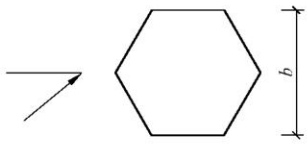
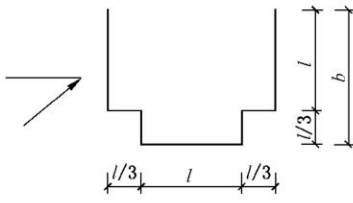
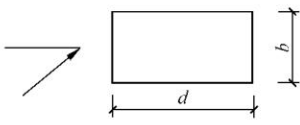
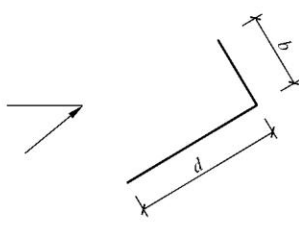
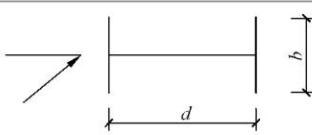
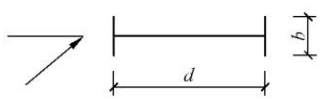
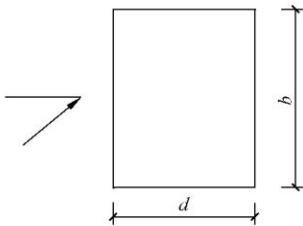
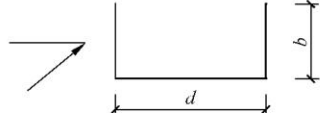
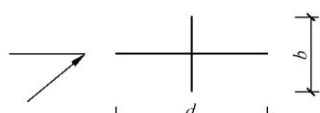
断面形状		驰振力系数	断面形状	驰振力系数
		-1		-1.0
				-4.0
	$\frac{d}{b} = 2.0$	-2.0		$\frac{d}{b} = 2.0$ -0.7
	$\frac{d}{b} = 1.5$	-1.7		$\frac{d}{b} = 2.7$ -5.0
	$\frac{d}{b} = 1.0$	-1.2		$\frac{d}{b} = 5.0$ -7.0

表 4 (续)

断面形状		驰振力系数	断面形状	驰振力系数
	$\frac{d}{b} = \frac{2}{3}$	-1.0		$\frac{d}{b} = 3.0$ -7.5
	$\frac{d}{b} = \frac{1}{2}$	-0.7		$\frac{d}{b} = \frac{3}{4}$ -3.2
	$\frac{d}{b} = \frac{1}{3}$	-0.4		$\frac{d}{b} = 2.0$ -1.0

7.2.4 驰振临界风速 U_{cg} 应满足式(25)规定:

$$U_{cg} \geq 1.2U_d \quad \dots\dots\dots (25)$$

7.3 颤振稳定性验算

7.3.1 颤振稳定性指数 I_f 应按式(26)计算:

$$I_f = \frac{[U_{cr}]}{f_t \cdot B} \quad \dots\dots\dots (26)$$

式中:

- I_f —— 颤振稳定性指数;
- f_t —— 扭转基频;
- B —— 主梁宽度;
- $[U_{cr}]$ —— 颤振检验风速,可按 7.3.8 式(32)计算。

7.3.2 成桥状态下的双塔斜拉桥可按对称扭转基频计算其稳定性。成桥状态下的悬索桥可取较小的扭转基频计算其稳定性。

7.3.3 颤振稳定性检验可按以下分级进行:

- a) 当颤振稳定性指数 $I_f < 2.5$ 时,可按 7.3.4 规定计算桥梁的颤振临界风速;
- b) 当颤振稳定性指数 $2.5 \leq I_f < 4.0$ 时,宜通过节段模型风洞试验进行检验;
- c) 当颤振稳定性指数 $4.0 \leq I_f < 7.5$ 时,宜进行主梁的气动选型,并通过节段模型试验、全桥模型试验或详细的颤振稳定性分析进行检验;
- d) 当颤振稳定性指数 $I_f \geq 7.5$ 时,宜进行主梁的气动选型,通过节段模型试验、全桥模型试验和详细的颤振稳定性分析进行检验,必要时应采用振动控制技术。

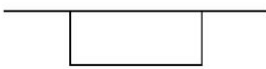
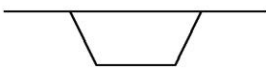
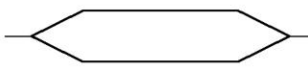
7.3.4 当颤振稳定性指数 $I_f < 2.5$ 时,颤振临界风速可按式(27)、式(28)计算:

$$U_{cr} = \eta_s \cdot \eta_a \cdot U_{co} \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$U_{co} = 2.5 \sqrt{\mu \cdot \frac{r}{b} \cdot f_t \cdot B} \quad \dots\dots\dots (28)$$

式中：
 U_{co} ——平板颤振临界风速；
 η_s ——形状系数，按表 5 取值；
 η_a ——攻角效应系数，按表 5 取值。

表 5 形状系数 η_s 和攻角效应系数 η_a

截面形式		形状系数 η_s			攻角效应系数 η_a
		阻尼比			
		0.005	0.01	0.02	
	平板	1	1	1	—
	钝头形	0.50	0.55	0.60	0.80
	带挑臂	0.65	0.70	0.75	0.70
	带斜腹板	0.60	0.70	0.90	0.70
	带风嘴	0.70	0.70	0.80	0.80
	带分流板	0.80	0.80	0.80	0.80
	开口板梁	0.35	0.40	0.50	0.85

7.3.5 主跨跨径小于 300 m 的桥梁，当主梁断面宽高比 $B/H=4\sim 8$ 时，可按式(29)估算颤振临界风速；对宽高比 $B/H<4$ 的主梁断面，其颤振临界风速取式(29)和式(30)计算结果的较小值。

$$U_{cr}=5f_t\cdot B\cdots\cdots\cdots(29)$$

$$U_{cr}=12f_t\cdot H\cdots\cdots\cdots(30)$$

7.3.6 风洞试验宜考察桥梁在风攻角 $-3^{\circ}\leq\alpha_0\leq+3^{\circ}$ 范围内的颤振稳定性。在模拟桥梁阻尼比的条件下，若无明显发散点，可以扭转位移根方差值 0.5° 时的风速作为颤振临界风速。

7.3.7 在风攻角 $-3^{\circ}\leq\alpha_0\leq+3^{\circ}$ 范围内，颤振临界风速应满足式(31)规定：

$$U_{cr}\geq [U_{cr}]\cdots\cdots\cdots(31)$$

式中：
 U_{cr} ——颤振临界风速；
 $[U_{cr}]$ ——颤振检验风速，可按 7.3.8 规定计算。

7.3.8 颤振检验风速可按式(32)计算：

$$[U_{cr}]=1.2\cdot \mu_f\cdot U_d\cdots\cdots\cdots(32)$$

式中：
 μ_f ——风速脉动修正系数。

7.3.9 风速脉动修正系数 μ_f 按表 6 规定选用。

表 6 风速脉动修正系数 μ_r

地表类别	主跨跨径/m									
	100	200	300	400	500	650	800	1 000	1 200	>1 500
A	1.30	1.27	1.25	1.24	1.23	1.22	1.21	1.20	1.20	1.19
B	1.36	1.33	1.30	1.29	1.28	1.27	1.26	1.25	1.24	1.22
C	1.43	1.39	1.37	1.35	1.33	1.31	1.30	1.28	1.27	1.25
D	1.49	1.44	1.42	1.40	1.38	1.36	1.35	1.33	1.31	1.29

7.4 抖振验算

7.4.1 由于风的脉动作用,引起桥梁结构发生抖振。当判断结构对风的作用较为敏感时,宜通过适当的风洞试验及数值模拟技术确定其气动力参数,并进行结构抖振响应分析,必要时可通过全桥气动弹性模型试验测定其抖振响应。

7.4.2 抖振响应分析应考虑脉动风的空间相关性和动力特征以及结构的振动特性等因素,宜包括所有可能被紊流激发的振型。

7.4.3 当考虑风场非平稳特性时,可根据附录 B 规定的非平稳风速模型及特征参数进行抖振响应分析。

7.5 涡振验算

7.5.1 混凝土桥梁可不考虑涡激共振的影响,钢桥或钢质桥塔宜通过风洞试验作涡激振动测试。

7.5.2 当结构基频大于 5 Hz 时,可不考虑涡激共振的影响。

7.5.3 实腹式桥梁的竖向涡激共振发生风速可按式(33)计算:

$$U_{cvh} = 2.0 f_b B \quad \dots\dots\dots (33)$$

式中:

U_{cvh} ——竖向涡激共振发生风速;

f_b ——竖向弯曲振动频率。

7.5.4 实腹式桥梁的扭转涡激共振的发生风速可按式(34)计算:

$$U_{cv\theta} = 1.33 f_t B \quad \dots\dots\dots (34)$$

式中:

$U_{cv\theta}$ ——扭转涡激共振发生风速;

f_t ——扭转振动频率。

7.5.5 实腹式桥梁竖向涡激共振振幅可按式(35)、式(36)、式(37)、式(38)、式(39)估算:

$$h_c = \frac{E_h \cdot E_{th}}{2\pi m_r \zeta_s} B \quad \dots\dots\dots (35)$$

$$m_r = \frac{m}{\rho B^2} \quad \dots\dots\dots (36)$$

$$E_h = 0.065 \beta_{ds} (B/H)^{-1} \quad \dots\dots\dots (37)$$

$$E_{th} = 1 - 15 \cdot \beta_t \cdot (B/H)^{1/2} I_u^2 \geq 0 \quad \dots\dots\dots (38)$$

$$I_u = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z}{z_0}\right)} \quad \dots\dots\dots (39)$$

式中：

h_c ——竖向涡激共振振幅；

m ——桥梁单位长度质量。对变截面桥梁，可取 1/4 跨径处的平均值；对斜拉桥，应计入斜拉索质量的一半；对悬索桥，应计主缆全部质量；

ζ_s ——桥梁结构阻尼比；

β_{ds} ——形状修正系数，对宽度小于 1/4 有效高度，或具有垂直腹板的钝体断面，取为 2；对六边形断面或宽度大于 1/4 有效高度或具有斜腹板的钝体断面，取为 1；

H ——主梁高度，见图 1；

β_t ——系数，对六边形截面取 0，其他截面取 1；

I_u ——紊流强度；

Z ——桥面的基准高度；

z_0 ——桥址处的地表粗糙高度，可按表 1 选取。

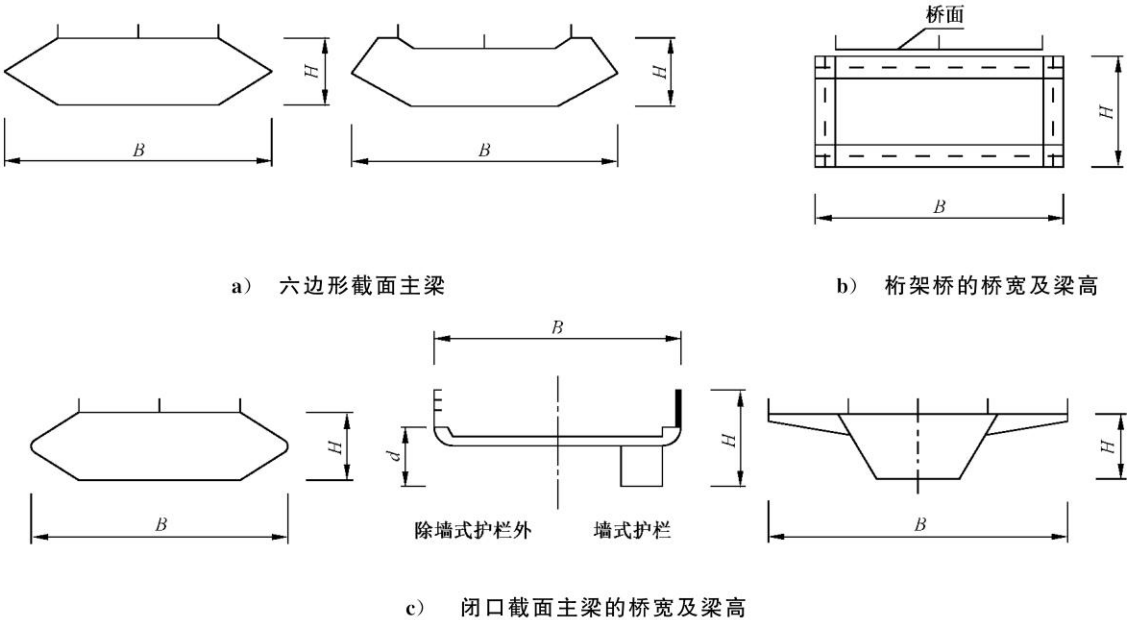


图 1 桥面的宽度和高度

7.5.6 实腹式桥梁扭转涡激共振振幅可按式(40)、式(41)、式(42)、式(43)估算：

$$\theta_c = \frac{E_\theta \cdot E_{t\theta}}{2\pi I_{pr} \zeta_s} B \dots\dots\dots (40)$$

$$I_{pr} = \frac{I_p}{\rho B^4} \dots\dots\dots (41)$$

$$E_\theta = 17.16 \beta_{ds} (B/H)^{-3} \dots\dots\dots (42)$$

$$E_{t\theta} = 1 - 20 \cdot \beta_t \cdot (B/H)^{1/2} I_u^2 \geq 0 \dots\dots\dots (43)$$

式中：

I_p ——桥梁单位长度质量惯矩。对变截面桥梁，取 1/4 跨径处的平均值；对斜拉桥，应计入斜拉索质量的一半；对悬索桥，应计主缆全部质量；

θ_c ——扭转涡激共振振幅；

ζ_s ——桥梁结构阻尼比。

7.5.7 涡激共振振幅的允许值可按式(44)、式(45)计算：

- a) 竖向涡激共振的振幅应满足式(44)规定:

$$h_c < [h_a] = \frac{0.04}{f_b} \dots\dots\dots (44)$$

式中:

$[h_a]$ ——竖向涡激共振的允许振幅。

- b) 扭转涡激共振的振幅应满足式(45)规定:

$$\theta_c < [\theta_a] = \frac{4.56}{Bf_t} \dots\dots\dots (45)$$

式中:

$[\theta_a]$ ——扭转涡激共振的允许振幅。

7.5.8 拉索有可能会出现参数振动、线性内部共振、涡激共振以及风雨激振等振动,应采取相应的措施控制其振动。

8 风致振动控制

8.1 一般规定

8.1.1 桥梁结构的抗风能力可通过结构措施、气动措施和机械措施予以提高或改善。

8.1.2 结构措施是通过增加结构的总体刚度来提高桥梁结构气动稳定性的措施。

8.1.3 气动措施是通过选择空气动力稳定性好的断面或较小改变主梁、桥塔、吊杆、拉索的外形或附加气动装置,提高桥梁结构气动稳定性或降低风振响应的措施。

8.1.4 机械措施是通过附加阻尼来提高桥梁结构气动稳定性或降低风振响应的措施。

8.2 控制措施

8.2.1 主梁风致振动控制措施:

- a) 主梁基本断面的选择应考虑气动稳定性的要求;
- b) 当主梁的基本断面不能满足气动稳定性要求或者出现不能接受的涡激共振时,可适当修改断面或附加导流板、抑流板、风嘴、分流板和中央稳定板等装置改善空气动力学性能;
- c) 在满足气动稳定性要求的前提下,可采用机械措施降低涡激共振或抖振响应。

8.2.2 桥塔和高墩风致振动控制措施:

- a) 桥塔驰振稳定性和涡振性能可通过桥塔塔柱断面切角或附加气动装置改善;
- b) 当气动措施不能满足抗风要求时,可采用阻尼装置或主动控制措施控制桥塔施工过程和成桥后的风致振动。

8.2.3 拉索和吊杆风致振动控制措施:

- a) 拉索的振动可通过设置阻尼装置、辅助缆索或联结器等措施进行控制;
- b) 防止或降低风雨激振发生可采用附加凸起、卷缠螺旋线、表面加工或改变断面形状等措施;
- c) 吊杆的振动可采用辅助缆索或联结器联结若干根进行控制。

8.3 控制装置技术性能

8.3.1 控制装置的设计使用年限不宜小于桥梁结构的使用年限,当控制装置设计使用年限小于桥梁结构使用年限时,控制装置达到使用年限时应及时检测,检测应符合相关规程或标准的技术要求(如黏滞流体阻尼器需满足 JT/T 926 的技术要求),检测后重新确定控制装置后续使用年限或更换。

8.3.2 控制装置应具有良好的抗疲劳、抗老化性能。

8.3.3 控制装置需要考虑防腐、除锈和防火时,应外涂防腐、防锈漆、防火涂料或进行其他相应处理,但不能影响控制装置的正常工作。

8.3.4 当采用机械措施时,控制装置应经过减振结构或子结构力学性能试验,验证减振装置的性能和减振效果。控制装置中非减振构件的材料应达到设计强度要求。

附 录 A
(资料性附录)
江苏省基本风速值

A.1 江苏省主要气象台站 10 年、50 年和 100 年重现期下的基本风速值见表 A.1。

表 A.1 江苏省主要气象台站基本风速值

气象台站所在地	风速/(m/s)		
	10 年一遇	50 年一遇	100 年一遇
南京市	20.2	25.6	27.1
苏州市	22.1	27.1	28.6
吴中区	22.2	27.1	28.6
淮安市	20.2	25.6	27.1
盱眙县	20.2	23.9	25.6
盐城市	20.2	27.1	30.0
射阳县	22.1	25.6	27.1
东台县	22.1	25.6	27.1
徐州市	20.2	24.0	25.6
南通市	22.1	27.1	28.6
启东市	23.9	28.6	30.0
常州市	20.2	25.6	27.1
溧阳市	20.2	25.6	27.1
泰州市	20.2	25.6	27.1
高邮市	20.2	25.6	27.1
镇江市	22.2	25.6	27.1
无锡市	22.1	27.1	28.6
连云港市	23.9	30.0	32.6
赣榆区	22.1	27.1	28.6

附录 B

(资料性附录)

非平稳风速模型及特征参数

B.1 时变平均风速

对于台风、下击暴流等风场可根据实际情况采用非平稳风速模型进行描述。在非平稳风速模型中,基本时距 T 内的风速 $U(t)$ 被视作时变平均风速与脉动风速的叠加,即:

$$U(t) = \tilde{U}^*(t) + u^*(t) \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

$\tilde{U}^*(t)$ ——时变平均风速;

$u^*(t)$ ——非平稳脉动风速。

基于非平稳风速模型,脉动风的特征参数主要包括紊流强度、紊流积分尺度和紊流演变谱密度。

B.2 紊流强度

$$I_i^* = E \left[\frac{\sigma_i^*}{\tilde{U}^*(t)} \right] \quad i = u, v, w \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

I_i^* ——顺风向($i=u$)、横风向($i=v$)或竖向($i=w$)非平稳紊流强度;

σ_i^* ——非平稳脉动风速的均方根;

$E[\cdot]$ ——在基本时距内取均值。

B.3 紊流积分尺度

$$L_i^* = E \left[\frac{\tilde{U}(t)}{(\sigma_i^*)^2} \int_0^\infty R_i^*(\tau) d\tau \right] \quad i = u, v, w \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

L_i^* ——顺风向($i=u$)、横风向($i=v$)或竖向($i=w$)非平稳紊流积分尺度;

$R_i^*(\tau)$ ——非平稳脉动风速的自相关函数;

τ ——滞后时间。

B.4 紊流演变谱密度

$$S(n, t) = |A(n, t)|^2 S(n) \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

式中:

$A(n, t)$ ——时间与频率调制函数且为关于时间的慢变函数,具体表达见式(B.5);

$S(n)$ ——基于平稳风速模型的脉动风速功率谱密度,具体表达见式(B.6)。

$$A(n,t)=\sqrt{\left[\frac{\overline{U}}{U(t)}\right]^{\gamma-2}\left\{\frac{1+B\left[\frac{nz}{\overline{U}}\right]^{\alpha}}{1+B\left[\frac{nz}{U(t)}\right]^{\alpha}}\right\}^{\beta}}\dots\dots\dots(\text{B.5})$$

$$\frac{nS(n)}{u_*^2}=\frac{Af^{\gamma}}{(1+Bf^{\alpha})^{\beta}}\dots\dots\dots(\text{B.6})$$

当缺乏实测风速数据时,可采用 Kaimal 谱作为平稳脉动风速功率谱密度计算紊流演变谱密度,即 $\alpha=\gamma=1,\beta=5/3,A=200,B=50$ 。

附 录 C
(资料性附录)
桥梁气动力参数

C.1 三分力系数

三分力系数是建立静力风荷载与平均风速之间转换关系的关键参数。在主梁节段模型风洞试验中,当测得主梁阻力、升力和扭矩后,三分力系数通过式(C.1)~式(C.3)进行计算。

$$C_H = \frac{F_H}{0.5\rho U^2 H} \dots\dots\dots (C.1)$$

$$C_V = \frac{F_V}{0.5\rho U^2 B} \dots\dots\dots (C.2)$$

$$C_M = \frac{F_M}{0.5\rho U^2 B^2} \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:
 C_H 、 C_V 、 C_M ——分别为阻力系数、升力系数和扭矩系数;
 F_H 、 F_V 、 F_M ——分别为主梁上测得的阻力、升力与扭矩;
 ρ ——空气密度;
 U ——试验风速;
 H ——主梁高度;
 B ——主梁宽度。

C.2 气动导纳函数

气动导纳函数是描述脉动风速作用在结构上气动力非定常特性的修正系数,包含了所有体现气动力非定常特性的因素。主梁断面的气动导纳函数一般通过风洞试验测得。基于风洞试验,同时测得3个方向的抖振力分量及两个脉动风速分量,通过互功率谱密度法即可有效获得6个气动导纳函数。

C.3 颤振导数

颤振导数是气动自激力关于不同方向运动位移、速度的变化率,即不同方向发生单位位移和速度引起的气动自激力的变化,表征结构在均匀流场中运动时引起周围流场变化而导致气流反作用到结构上的自激力特性。颤振导数需通过风洞试验或计算流体力学方法获得。

江苏省地方标准

桥梁结构抗风设计规范

DB32/T 3496—2019

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: www.spc.org.cn

服务热线: 400-168-0010

2019年6月第一版

*

书号: 155066 · 5-0932

版权专有 侵权必究



DB32/T 3496-2019