

中国工程建设协会标准

大跨桥梁结构健康监测系统预警阈值设置标准

Early Warning Threshold Standard for Structural Health Monitoring
System of Long-Span Bridge

(征求意见稿-2017.9.18)

*****出版社

中国工程建设协会标准

大跨桥梁结构健康监测系统预警阈值设置标准

Early Warning Threshold Standard for Structural Health

Monitoring System of Long-Span Bridge

CECS *: 2018**

主编单位: *****

批准单位: 中国工程建设标准化协会

施行日期: 2018年1月1日

*******出版社**

2018 北京

前 言

本标准是根据中国工程建设标准化协会关于印发《2016年第一批工程建设协会标准制订、修订计划》（建标协字[2016]038号）通知的要求，制定本标准。

本标准在编制过程中，编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国际标准和国内外先进标准，并广泛征求意见，最后经审查定稿。

本标准共分六章，主要技术内容包括：安全预警基本体系，桥梁荷载作用阈值，桥梁构件预警阈值，以及桥梁整体预警阈值。

本标准由建筑振动专业委员会归口管理，由*****负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送*****（地址：*****，邮编：*****），以供今后修订时参考。

主编单位：*****

参编单位：*****

主要起草人员：*****

主要审查人员：*****

目次

- 1 总则
 - 2 术语和符号
 - 2.1 术语
 - 2.2 符号
 - 3 安全预警基本体系
 - 3.1 功能构成
 - 3.2 指标选定
 - 3.3 阈值设置
 - 3.4 预警方式
 - 4 桥梁荷载作用阈值
 - 4.1 环境荷载作用
 - 4.2 人为影响因素
 - 5 桥梁构件预警阈值
 - 5.1 桥塔
 - 5.2 缆索
 - 5.3 主梁
 - 5.4 伸缩缝
 - 5.5 支座
 - 5.6 桥墩
 - 5.7 锚碇
 - 5.8 墩台基础
 - 6 桥梁整体预警阈值
- 附录 A 常用的状态评估方法
- 本标准用词说明
- 附：条文说明

Contents

- 1 General provisions
 - 2 Terms and symbols
 - 2.1 Terms
 - 2.2 Symbols
 - 3 Basic requirements
 - 3.1 Functions
 - 3.2 Criteria
 - 3.3 Threshold
 - 3.4 Early warning modes
 - 4 Thresholds of loads
 - 4.1 Natural Loads
 - 4.2 Man-made Loads
 - 5 Early warning thresholds for bridge component
 - 5.1 Towers
 - 5.2 Cables
 - 5.3 Girders
 - 5.4 Expansion Joints
 - 5.5 Supports
 - 5.6 Piers
 - 5.7 Anchorages
 - 5.8 Foundations
 - 6 Early warning thresholds for whole bridge
- Appendix A Commonly used bridge condition assessment methods
- Explanation of wording in this standard
- Addition: Explanation of provisions

1 总则

- 1.01 为规范大跨桥梁结构健康监测系统预警阈值的设置，做到安全可靠、经济合理、方便可行、技术先进，制定本标准。
- 1.02 本标准适用于主跨跨径不小于 150m 梁桥、200m 拱桥、300m 斜拉桥、500m 悬索桥等桥梁结构健康监测系统预警阈值的设置，对于其它桥梁也可参照使用。
- 1.03 大跨桥梁结构健康监测系统预警阈值具有时效性，应结合桥梁的型式特点、服役状况和管养要求，定期对其进行检验、补充、修正和优化，使其更加合理。
- 1.04 大跨桥梁结构健康监测系统预警阈值的设置，除应执行本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 结构健康监测 structural health monitoring

利用现场的、无损的、实时的方式采集结构与环境信息，分析结构反应的各种特征，获取结构因环境因素、损伤或退化而造成的改变。

2.1.2 结构安全预警 structural safety early warning

结构荷载作用、响应或评估指标超过预定阈值时，结构健康监测系统按预定方式自动发出的警告。

2.1.3 预警阈值 early warning threshold

表征结构风险指标的界限。

2.1.4 桥梁构件预警 bridge component early warning

桥梁结构主要受力构件的反应或性能超过预定阈值时，结构健康监测系统按预定方式自动发出的警告。

2.1.5 桥梁整体预警 whole bridge early warning

根据桥梁结构主要受力构件的反应，采用合理的方法计算结构整体的安全指标，当该指标超过预定阈值时，结构健康监测系统按预定方式自动发出的警告。

2.1.6 E1 地震作用 earthquake action E1

工程场地重现期较短的地震作用，对应于第一级设防水准。

2.1.7 E2 地震作用 earthquake action E2

工程场地重现期较长的地震作用，对应于第二级设防水准。
与分别为桥梁倾斜在顺桥向与横桥向的实时监测值

2.2 符号

符 号	定 义	位 置（节）
V_d	重现期为 100 年的主梁设计基准风速	4.1.1
P_F	车船撞击预警指标	4.2.2
μ_i	第 i 个加速度或应变传感器 1d 时程数据平均值	4.2.2
$\bar{\mu}_i$	第 i 个加速度或应变传感器 5min 时程数据平均值	4.2.2
n	加速度或应变传感器总数	4.2.2
R	桥墩的极限侧向抗力	4.2.2
P	船舶撞击力	4.2.2
$QX_{\text{顺}}$	桥塔顺桥向实测倾斜值	5.1.1
$QX_{\text{横}}$	桥塔横桥向实测倾斜值	5.1.1
$QX_{\text{顺}}^0$	桥塔顺桥向倾斜实测年平均值	5.1.1
$QX_{\text{横}}^0$	桥塔横桥向倾斜实测年平均值	5.1.1
ρ	差异度	5.1.1
η	曲线相似度	5.1.1
T_{max}	设计索力最大值	5.2.2
T_m	慢变索力	5.2.2
T_h	标准温度下的恒载索力	5.2.2
T_h^*	标准温度下的设计恒载索力	5.2.2

R_{Acc}	每分钟加速度均方根	5.2.3
u_R	统计周期内每分钟加速度均方根的均值	5.2.3
σ_R	统计周期内加速度均方根的标准差	5.2.3
R_{Acc}^*	扣除风致振动后的每分钟加速度均方根	5.2.3
u_R^*	统计周期内扣除风致振动的每分钟加速度均方根的均值	5.2.3
σ_R^*	统计周期内扣除风致振动的加速度均方根的标准差	5.2.3
$[D]$	伸缩装置允许伸缩量	5.4.1
\overline{D}	伸缩装置允许累积位移行程	5.4.1
D_{max}	按照桥梁结构荷载设计值计算得出的伸缩缝最大伸缩量	5.4.1
D_u	伸缩缝 IV 级预警的上限阈值	5.4.1
D_l	伸缩缝 IV 级预警的下限阈值	5.4.1
F	支座反力	5.5
F_{max}	支座反力设计最大值	5.5
d	隔震支座的水平剪切变形或竖向压缩变形	5.5
d_{max}	隔震支座的水平剪切变形或竖向压缩变形的抗震设计最大值	5.5
Pd_{RMS}	1 年周期内桥墩每小时位移有效值	5.6
u_{Pd}	1 年周期内桥墩每小时位移有效值的均值	5.6
σ_{Pd}	1 年周期内桥墩每小时位移有效值的方差	5.6
L	悬索桥主跨跨径	5.7
T	岩锚锚杆的极限承载力	5.7
δ	相邻墩台间的最大允许不均匀沉降值	5.8
W	桥梁整体预警总分值	6.0
ξ	影响线加载校验系数	6.0
η	影响线峰值检验系数	6.0

3 安全预警基本体系

3.1 功能构成

3.1.1 预警系统应具备下列功能：

- 1 发布、调整和解除预警信息。
- 2 实时、自动和明显的预警方式。
- 3 多指标和多层次的预警体系。

3.2 指标选定

3.2.1 预警指标的选订应符合下列原则：

- 1 根据桥梁荷载作用、关键构件和整体结构的特点，分类选定。
- 2 具有相对的稳定性、广泛的适用性和较强的可操作性。
- 3 当不同指标间相互冲突时，应以反映桥梁最不利状况的指标为准。

3.3 阈值设置

3.3.1 预警阈值的设置应符合以下原则：

- 1 应以定量的方式给出，并定期对其进行检验、补充、修正和优化。
- 2 可根据设计容许值、理论计算值、数值分析值、监测数据值、成熟经验设置。
- 3 应合理反映指标的不同程度，宜包括四个级别，可按表 3.1.1 确定。

表 3.1.1 阈值划分标准

预警级别	级别描述	颜色标识
I	特别严重	红色 RGB (255, 0, 0)
II	严重	橙色 RGB (255, 125, 0)
III	较重	黄色 RGB (255, 255, 0)
IV	一般	蓝色 RGB (0, 0, 255)

3.4 预警方式

3.4.1 预警信息应由专门的发布机构或被授权机构，根据桥梁安全隐患的发展态势和应急处置进展，向相关部门及时发布、调整或解除预警信息。

3.4.2 预警方式应明显，宜多样化，可包括指示灯、声音、网络、可变情报板、路侧广播等。

3.4.3 预警信息应形成日志，包括始末时间、警示事项、预警级别、预警频率等。

4 桥梁荷载作用阈值

4.1 环境荷载作用

4.1.1 风荷载

考虑车辆行驶安全的风速预警阈值，宜按表 4.1.1 确定。

表 4.1.1 风速预警阈值

预警级别	预警阈值
I	$0.84V_d$ 和 32.6 m/s 中较小值，但不小于 25.0 m/s
II	25.0 m/s
III	20.8 m/s
IV	17.2 m/s

注：1 表中风速为 10min 平均风速，并以桥面高度处风速仪设备采集数据作为判断依据；

2 当采用气象站或桥塔等其他位置处风速仪的风速值作为预警值时，应将此表数据按照《公路桥梁抗风设计规范》3.2.5 条进行高度修；

3 V_d 为重现期为 100 年的主梁设计基准风速。

4.1.2 地震作用

- 1 地震动参数指标可选用桥址区地震动水平向加速度。
- 2 大跨桥梁地震动水平向加速度预警阈值，宜按表 4.1.2 确定。

表 4.1.2 地震动水平向加速度预警阈值

预警级别	预警阈值
I	E2 设计地震动加速度峰值
II	E1 设计地震动加速度峰值的 1.35 倍
III	E1 设计地震动加速度峰值
IV	0.4m/s^2

注：桥梁 E1、E2 地震加速度设计值应根据各桥“地震安全性评价报告”相关条款或《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008) 3.1.4-3.2.2 条确定，可分别取 50 年超越概率为 10%与 2%的加速度峰值。

4.1.3 温度作用

考虑低温导致路面结冰影响行车安全，大跨桥梁路面温度预警阈值宜按表 4.1.3 确定。

表 4.1.3 桥面温度预警阈值 (°C)

预警级别	预警阈值
I	-5
II	-3
IV	0

4.1.4 湿度作用

- 1 钢箱梁、主缆、锚锭散索室内相对湿度预警阈值，宜按表 4.1.4-1 确定。

表 4.1.4-1 钢箱梁、主缆、锚锭散索室内相对湿度预警阈值 (%)

预警级别	预警阈值
I	70
II	60
III	50
IV	40

2 混凝土箱梁内部相对湿度预警阈值，宜按表 4.1.4-2 确定。

表 4.1.4-2 混凝土箱梁内部相对湿度预警阈值 (%)

预警级别	预警阈值
I	50
II	40
IV	25

4.2 人为影响因素

4.2.1 车辆荷载

车辆荷载的监测主要针对单个车辆的轴重和总重，宜选用动态称重系统进行监测，预警阈值宜按表 4.2.1 确定。

表 4.2.1 车辆荷载预警阈值

预警级别	预警阈值
I	车辆总重/轴重>2 倍设计车辆荷载
II	车辆总重/轴重与设计车辆荷载之比介于 1.5~2.0 之间
III	车辆总重/轴重与设计车辆荷载之比介于 1.0~1.5 之间
IV	车辆总重/轴重超出《道路车辆外廓尺寸、轴荷及质量限值》中规定的限值

4.2.2 车船撞击

车船撞击桥墩或塔柱等下部结构造成的影响，可依据异常峰值法或承载能力评定方法计算，宜按表 4.2.2 确定警阈值。

1 异常峰值法：

$$P_F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\mu_i|}{|\bar{\mu}|} \quad (4.2.2-1)$$

2 承载能力评定方法：

$$P_F = \frac{R}{P} \quad (4.2.2-2)$$

表 4.2.2 车船碰撞预警阈值

预警级别	预警阈值
I	$0 < P_F \leq 0.1$
II	$0.1 < P_F \leq 0.5$
III	$0.5 < P_F \leq 0.7$
IV	$0.7 < P_F \leq 1.0$

4.2.3 火灾作用

根据火灾发生位置，预警阈值宜按表 4.2.3 确定。

表 4.2.3 火灾预警阈值

预警级别	预警阈值
I	桥梁下部结构主支撑附近发生火灾
II	桥面主支撑（索）附近发生火灾
III	桥面远离主支撑（索）的其他位置发生火灾
IV	桥梁下部结构远离主支撑的其他位置发生火灾

4.2.4 爆炸荷载

爆炸荷载为极端荷载，预警阈值应按表 4.2.4 确定。

表 4.2.4 爆炸荷载预警阈值

预警级别	预警阈值
I	桥面或下部结构发生恐怖爆炸或意外爆炸

5 桥梁构件预警阈值

5.1 桥塔

5.1.1 对于混凝土桥塔或钢桥塔，宜将倾斜作为监测指标，预警阈值宜按 5.1.1 确定。

表 5.1.1 桥塔倾斜预警阈值

预警级别	预警阈值
I	$\frac{(QX_{顺} - QX_{顺}^0)^2}{a_{QX}^2} + \frac{(QX_{横} - QX_{横}^0)^2}{b_{QX}^2} \geq 1$
II	$\rho \geq 0.3$
	$\eta \leq 0.75$
III	$\rho \geq 0.2$
	$\eta \leq 0.9$
IV	倾斜值超出正常监测数据 95%的置信区间

5.2 缆索

5.2.1 缆索包括斜拉桥斜拉索、拱桥吊索、悬索桥主缆、悬索桥吊索，监测指标应采用索力或振动加速度。

5.2.2 索力预警

1 长度 200m 及以上挤压成型式斜拉索、拱桥吊索、悬索桥吊索，索力监测数据可采用磁弹索力仪或振动频率法获得索力；长度 200m 以下挤压成型式斜拉索、拱桥吊索、悬索桥吊索，悬索桥主缆，以及现场组装式平行钢绞线缆索，应采用磁弹索力仪获得的索力。

2 索力预警应分为：绝对索力预警、索力变化异常预警。

3 绝对索力预警，以避免断索等事故发生为目的：应以 1h 间采样间隔的采样数据为样本，将绝对索力 T 与索力设计最大值 T_{\max} 进行比较，宜按表 5.2.2-1 确定预警阈值。

表 5.2.2-1 绝对索力预警阈值

预警级别	预警阈值
I	$T / T_{\max} - 1 \geq 0.4$
II	$T / T_{\max} - 1 \geq 0.3$
III	$T / T_{\max} - 1 \geq 0.2$
IV	$T / T_{\max} - 1 \geq 0.1$

4 索力异常变化预警，以对拉索或主梁等构件损伤或超载等事件警示为目的：（1）应以每小时采样间隔的数据 T 为样本，滤除周期 2h 以下的动态信号，获得慢变索力 T_m 。（2）建立慢变索力 T_m 与温度的相关关系，从慢变索力中扣除温度相关索力，获得标准温度（如 25℃）下的恒载索力 T_h 。（3）对标准温度下的恒载索力 T_h 与相应的标准温度下设计恒载索力 T_h^* 进行比较，宜按表 5.2.2-2 确定预警阈值。

表 5.2.2-2 索力变化异常预警阈值

预警级别	预警阈值
I	$ T_h / T_h^* - 1 \geq 0.4$
II	$ T_h / T_h^* - 1 \geq 0.3$
III	$ T_h / T_h^* - 1 \geq 0.2$
IV	$ T_h / T_h^* - 1 \geq 0.1$

5.2.3 振动加速度预警

1 实测加速度截止频率下限应小于 0.5 倍拉索最小振动频率，上限应不大于 0.5 倍采样频率。采样频率应为 50Hz 以上，可采用触发采样以减少数据量。

2 振动加速度预警应分为：过大加速度预警、扣除风致振动后加速度变化过大预警。

3 过大振动加速度预警，以避免过大振动引起结构破坏等事故发生为目的：应以 1 年为周期，以每分钟加速度均方根 R_{Acc} 为参量，统计其均值 u_R 和标准差 σ_R ，宜按 5.2.3-1 确定预警阈值。

表 5.2.3-1 过大振动加速度预警阈值

预警级别	预警阈值
I	$ R_{Acc} - u_R / \sigma_R \geq 4.5$
II	$ R_{Acc} - u_R / \sigma_R \geq 4.0$
III	$ R_{Acc} - u_R / \sigma_R \geq 3.5$
IV	$ R_{Acc} - u_R / \sigma_R \geq 3.0$

4 扣除风致振动后加速度变化过大预警，以对车船撞桥等事件警示为目的：应以 1 年为周期，建立每分钟拉索振动加速度均方根与每分钟风速和风向均方根的相关函数，获得扣除风致振动后的每分钟加速度均方根 R_{Acc}^* ，统计其均值 u_R^* 和标准差 σ_R^* ，宜按表 5.2.3-2 确定预警阈值。

表 5.2.3-2 扣除风致振动后加速度变化过大预警阈值

预警级别	预警阈值
I	$ R_{Acc}^* - u_R^* / \sigma_R^* \geq 4.5$
II	$ R_{Acc}^* - u_R^* / \sigma_R^* \geq 4.0$
III	$ R_{Acc}^* - u_R^* / \sigma_R^* \geq 3.5$
IV	$ R_{Acc}^* - u_R^* / \sigma_R^* \geq 3.0$

5.3 主梁

5.3.1 主梁的自振频率应作为通用指标设置预警阈值。此外，混凝土主梁还应以混凝土开裂程度作为预警指标，钢主梁应以疲劳损伤程度作为预警指标，组合结构主梁应以钢和混凝土间的连接状况作为预警指标。

5.3.2 主梁自振频率宜采用 25°C 时的频率，不同温度下的自振频率宜根据主梁第一年监测数据得到的自振频率与温度的对应关系进行转化，并与第一年 25°C 频率对比，得到变化百分比，宜按表 5.3.2 确定预警阈值。

表 5.3.2 主梁自振频率变化百分比预警阈值

预警级别	预警阈值
I	25%
II	15%
III	10%
IV	5%

5.3.3 预应力混凝土主梁预警阈值确定如下：

- 1 主梁控制截面出现主拉应力导致的斜裂缝，应按表 5.3.3-1 确定预警阈值。
- 2 主梁出现横桥向及竖向受力裂缝，宜按表 5.3.3-2 确定预警阈值。
- 3 主梁出现沿预应力钢筋方向的纵向裂缝，宜按表 5.3.3-3 确定预警阈值。

表 5.3.3-1 混凝土主梁斜裂缝预警阈值

预警级别	预警阈值
I	主梁控制截面出现主拉应力斜裂缝

表 5.3.3-2 混凝土主梁横向及竖向受力裂缝预警阈值

预警级别	预警阈值	
	全预应力及 A 类构件	B 类构件
I	开裂	> 0.15mm
II	/	> 0.1mm, < 0.15mm
III		> 0.05mm, < 0.1mm
IV		< 0.05mm

表 5.3.3-3 混凝土主梁沿预应力钢筋纵向裂缝预警阈值

预警级别	预警阈值
I	纵向裂缝宽度 > 0.2mm
II	纵向裂缝宽度 > 0.2mm
III	纵向裂缝宽度 > 0.1mm, < 0.2mm
IV	出现纵向裂缝，但宽度 < 0.1mm

5.3.4 钢主梁承载能力利用率和疲劳损伤的预警阈值，宜按表 5.3.4-1 和 5.3.4-2 确定。

表 5.3.4-1 承载能力利用率的预警阈值

预警级别	预警阈值
I	主要构件承载能力利用率 > 30%
	非主要构件承载能力利用率 > 35%
II	主要构件承载能力利用率 > 25%
	非主要构件承载能力利用率 > 30%
III	主要构件承载能力利用率 > 20%
	非主要构件承载能力利用率 > 25%
IV	主要构件承载能力利用率 > 15%
	非主要构件承载能力利用率 > 20%

表 5.3.4-2 累积疲劳损伤量的预警阈值

预警级别	预警阈值
I	累积疲劳损伤量 > 95%
II	累积疲劳损伤量 > 85%
III	累积疲劳损伤量 > 75%
IV	累积疲劳损伤量 > 65%

5.3.5 对于各种使用钢-混凝土组合主梁的桥型，宜在其主跨跨中截面或恒载+交通活荷载组合下的最大弯矩截面，设置旨在考察其截面竖向、横向整体工作性能的监测项目。可以活载下竖弯中性轴高度偏移、横向弯曲中性轴偏移等为监测指标。以设定的钢梁底板正应力变化百分比或钢梁肋板正应力变化百分比为目标限制，反算得到上述监测指标的预警阈值，宜按表 5.3.5 确定。

表 5.3.5 钢-混凝土组合主梁整体性能预警阈值

预警级别	预警阈值			
	指标 1 ^{注1}	依据 1 ^{注2}	指标 2 ^{注1}	依据 2 ^{注2}
I	±3%	±3%	±3%	±3%
II	±(2,3)%	±(2,3)%	±(2,3)%	±(2,3)%
III	±(1,2)%	±(1,2)%	±(1,2)%	±(1,2)%
IV	±1%	±1%	±1%	±1%

注：1 指标 1 为竖弯中性轴高度相对偏移百分比，指标 2 为横弯中性轴相对偏移百分比；

2 指设置阈值时所依据的设置目标变量的关键取值，在该取值点时，结构性态呈现临界状态，或者结构设计参数具有明确的控制值。可按线弹性设计原则，反算相应指标的阈值。

5.3.6 对于各种使用钢-混凝土组合主梁的桥型，宜在其主梁梁端截面，主跨跨中截面，或恒载+交通活荷载组合下的最大弯矩截面，设置针对顶底板纵向滑移的监测项目。可以混凝土顶板与下层钢梁的结合面处的纵向相对位移为监测指标；以规范规定的最大滑移量为预警阈值；对于规范没有明确给出最大滑移量限值的，可通过设定底板钢梁最大正应力削弱百分比目标，来反算得到该指标的预警阈值，宜按表 5.3.6 确定。

表 5.3.6 钢-混凝土组合主梁顶底板纵向滑移预警阈值

预警级别	预警阈值
I	> 0.6mm
II	> 0.4mm, ≤ 0.6mm
III	> 0.1mm, ≤ 0.4mm
IV	≤ 0.1mm

注：底板钢梁最大正应力削弱百分比。

5.4 伸缩缝

5.4.1 对于模数式伸缩装置和梳齿板式伸缩装置的预警阈值，宜按表 5.4.1 确定。

表 5.4.1 伸缩缝预警阈值

预警级别	预警阈值
I	$\geq [D], \geq \bar{D}$
II	$\geq D_{\max}, \geq 0.65 \bar{D}$
III	$\geq 0.95 D_{\max}$
IV	$\geq D_u, \leq D_l$

5.5 支座

5.5.1 普通支座应以支座反力为监测指标，隔震支座监测指标包括支座反力、支座水平剪切变形和竖向压缩变形。

5.5.2 支座反力的预警阈值，应以支座反力 F 与支座反力设计最大值 F_{\max} 的比值计算，宜按表 5.5.2 确定。

表 5.5.2 支座反力预警阈值

预警级别	预警阈值
I	$F / F_{\max} - 1 \geq 0.4$
II	$F / F_{\max} - 1 \geq 0.3$
III	$F / F_{\max} - 1 \geq 0.2$
IV	$F / F_{\max} - 1 \geq 0.1$

5.5.3 水平剪切变形和竖向压缩变形的预警阈值，应以变形量 d 与桥梁抗震设计的支座水平剪切变形和竖向压缩变形最大值 d_{\max} 的比值计算，宜按表 5.5.3 确定。

表 5.5.3 支座变形预警阈值

预警级别	预警阈值
I	$d / d_{\max} \geq 1.0$
II	$d / d_{\max} \geq 0.9$
III	$d / d_{\max} \geq 0.8$
IV	$d / d_{\max} \geq 0.7$

5.6 桥墩

5.6.1 桥墩宜以墩顶位移作为预警指标，应以 1 年为周期，以每小时桥墩位移有效值 Pd_{RMS} 为参量统计其均值 u_{Pd} 和标准差 σ_{Pd} ，宜按表 5.6.1 确定预警阈值。

表 5.6.1 桥墩位移预警阈值

预警级别	预警阈值
I	$ Pd_{\text{RMS}} - u_{\text{Pd}} / \sigma_{\text{Pd}} \geq 4.5$
II	$ Pd_{\text{RMS}} - u_{\text{Pd}} / \sigma_{\text{Pd}} \geq 4.0$
III	$ Pd_{\text{RMS}} - u_{\text{Pd}} / \sigma_{\text{Pd}} \geq 3.5$
IV	$ Pd_{\text{RMS}} - u_{\text{Pd}} / \sigma_{\text{Pd}} \geq 3.0$

5.7 锚碇

5.7.1 重力式锚碇的三维位移预警阈值，宜按表 5.7.1 确定。

表 5.7.1 重力式锚碇三维位移预警阈值

预警级别	预警阈值	
	水平向位移	竖直向位移
I	0.0001 L	0.0002 L
II	0.00005 L	0.0001 L
III	正常监测数据极大值	正常监测数据极大值
IV	正常监测数据 95%的置信区间	正常监测数据 95%的置信区间

注： L 为悬索桥主跨跨径，单位 m。

5.7.2 岩锚的锚杆体预警阈值，宜按表 5.7.2 确定。

表 5.7.2 岩锚锚杆体受力预警值

预警级别	预警阈值
I	0.9 T
II	0.7 T
III	正常监测数据极大值
IV	正常监测数据 95%的置信区间

注： T 为锚杆的极限承载力。

5.7.3 隧道式锚碇和岩锚振动预警阈值，宜按表 5.7.3 确定。

表 5.7.3 散索室三向振动速度预警阈值 (m/s)

预警级别	预警阈值
I	0.015
II	0.009
III	正常监测数据极大值
IV	正常监测数据 95%的置信区间

5.8 墩台基础

5.8.1 墩台基础宜采用水平向加速度峰值和沉降值作为预警指标。

1 水平向加速度峰值预警阈值，宜按表 5.8.1-1 确定。

表 5.8.1-1 墩台基础加速度预警阈值

预警级别	预警阈值
I	E2 地震作用对应的水平地震加速度峰值
II	E1 地震作用对应的水平地震加速度峰值的 1.35 倍
III	E1 地震作用对应的水平地震加速度峰值
IV	0.4m/s ²

注：桥梁 E1、E2 地震作用对应的水平地震加速度峰值应根据各桥“地震安全性评价报告”相关条款或《公路桥梁抗震设计细则》确定，分别取 50 年超越概率为 10%与 2%的水平地震加速度峰值。

2 沉降值预警阈值，宜按表 5.8.1-2 确定。

表 5.8.1-2 墩台不均匀沉降预警阈值

预警级别	预警阈值
I	δ
II	0.85δ
III	0.70δ
IV	0.55δ

注： δ 为相邻墩台间的最大允许不均匀沉降值。桥梁墩台间的允许最大不均匀沉降值宜取《公路桥涵地基与基础设计规范》4.3.3 条规定的最大不均匀沉降值和设计要求允许的最大墩台沉降值之间的较小值。

6 桥梁整体预警阈值

6.0.1 桥梁整体预警阈值与选用的状态评估方法有关，应根据桥梁特点选择适宜的评估方法。

6.0.2 状态评估方法可选用本标准附录 A 中的方法，宜选择层次分析法。

6.0.3 选用本标准附录 A 中的方法时，预警阈值宜按表 6.0.3-1~6.0.3-5 确定。

表 6.0.3-1 层次分析法预警阈值

预警级别	桥梁工作状态评分
I	0~70
II	70~80
III	80~90
IV	90~100

表 6.0.3-2 专家打分法预警阈值

预警级别	预警阈值
I	$W \geq 90$
II	$80 < W < 90$
III	$70 < W < 80$
IV	$W < 70$

表 6.0.3-3 影响线法预警阈值

预警级别	预警阈值
I	$\max(\xi, \eta) \geq 1.0$
II	$0.95 \leq \max(\xi, \eta) < 1.0$
III	$0.9 \leq \max(\xi, \eta) < 0.95$
IV	$0.85 \leq \max(\xi, \eta) < 0.9$

注：预警值宜取结构校验系数 ξ 和影响线峰值检验系数 η 中的较大值，即 $\max(\xi, \eta)$ ，应考虑所有主要测点的变位和应变，取其中最大值作为桥梁预警的依据。

表 6.0.3-4 相关性法预警阈值

预警级别	置信区间
I	95%
II	85%
III	75%
IV	65%

表 6.0.3-5 强度储备比法预警阈值

预警级别	预警阈值
I	≤ 0.6
II	$> 0.6, \leq 0.75$
III	$> 0.75, \leq 0.9$
IV	$> 0.9, < 1$

附录 A 常用的状态评估方法

A.1 层次分析法

I 建立层次指标体系

A.1.1 桥梁结构层次指标体系应包括三个层次：最高层、中间层、最底层。具体如表 A.1.1 所示。

表 A.1.1 层次指标体系层次结构

层次	内容
最高层	桥梁结构的最终预警目标
中间层	实现最终预警目标所涉及的中间环节所需要考虑的中间指标
最低层	基本监测指标

A.1.2 桥梁层次指标体系具体宜按表 A.1.2 所示建立。

表 A.1.2 桥梁层次指标体系结构

最高层	中间层	最低层
桥梁结构的最终预警目标	桥塔	桥塔位移
		桥塔静应变
		桥塔加速度幅值
		桥塔自振频率
		桥塔塔顶倾斜
	缆索	索力
		振动加速度
	主梁	主梁变形
		主梁振动加速度
		主梁自振频率
	伸缩缝	伸缩缝位移量
		伸缩缝累计位移行程
	桥墩	桥墩倾斜
		墩顶位移
	锚固系统	锚碇位移
		锚杆应力
		振动速度
	墩台基础	墩台基础加速度
		墩台不均匀沉降
	支座	支座反力
支座位移		

A.1.3 桥梁层次指标体系的基本监测指标可根据条 A.1.2 做适当增加，但应遵循以下原则：

- 1 可测性原则：指标应具有含义明确、具备现实收集渠道、便于定量分析、具有可操作性等特点。
- 2 完备性原则：指标应整体反应桥梁的使用状态。
- 3 独立性原则：各指标之间应尽可能相互独立，避免包容性，能从不同方面反映桥梁结构的性能特征，尽量避免由于指标间的相交或重复而带来的不便和分析误差。

- 4 一致性原则：各个指标应与分析的目标相一致，所监测的指标间不应相互矛盾。
- 5 简明性原则：基本监测指标应易于理解和接受的，便于形成研究的共同语言。
- 6 敏感性原则：基本监测指标应选定为对结构异常变化较为敏感的指标。

II 监测指标标准化处理

A.1.4 对于单值型数值指标，应按照对监测对象的作用趋向分为正指标、逆指标、适度指标三种类型，并应采用线性百分制无量纲化数学模型进行标准化处理。

A.1.5 对于单值型数值指标为非线性的，应采用非线性百分制无量纲化数学模型标准化。

A.1.6 对于序列型数值指标，应考虑监测数据中存在的均匀变化和非均匀变化，采用序列型数值指标评价
值=均匀变化得分×非均匀性变化系数的形式确定其评价结果。

III 监测指标的赋权

A.1.7 宜采用五级标度法确定桥梁层次指标体系同一层次各指标在体系中的“相对重要性”以及下层指标对上层目标的“相对重要性”。

A.1.8 如果对于某些桥梁结构采用 A.1.7 条中的五级标度法不足以描述清楚的，宜用 2、4、6、8 四个数值进行内插，形成九级标度法。

A.1.9 同一层次下的所有指标应建立如表 A.1.9 所示的两两比较判断矩阵。

表 A.1.9 两两比较判断矩阵

乙指标 \ 甲指标	B_1	B_2	...	B_j	...	B_n
B_1	b_{11}	b_{12}	...	b_{1j}	...	b_{1n}
B_2	b_{21}	b_{22}	b_{2n}
...
B_i	b_{i1}	b_{i2}	...	b_{ij}	...	b_{in}
...
B_n	b_{n1}	b_{n2}	...	b_{nj}	...	b_{nn}

矩阵中：

B_1, B_2, \dots, B_n ——某一层指标 B 所支配的下一层指标；

b_{ij} ——甲指标对乙指标重要程度的赋值，即按照条 A.1.7~A.1.8 确定的赋值；

n ——判断矩阵的维数。

A.1.10 判断矩阵中的 b_{ij} 应满足式 A.1.10 所示条件。

$$b_{ij} = 1, \quad i = j = 1, 2, \dots, n \tag{A.1.10-1}$$

$$b_{ij} = \frac{1}{b_{ji}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad i \neq j \quad (\text{A.1.10-2})$$

A.1.11 判断矩阵应检验一致性，一致性的检验应根据式 A.1.11 中相对一致性指标 CR (Consistency Ratio) 判断。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (\text{A.1.11})$$

式中：

CI ——一致性检验指标， $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ ， n 为判断矩阵的维数， λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值；

RI ——平均随机一致性指标，是多次（500 次以上）重复进行随机判断矩阵特征值的计算之后取算数平均得到的。

A.1.12 判断矩阵相对一致性指标 CR 应满足 $CR \leq 0.1$ ，如果 $CR \geq 0.1$ ，应对判断矩阵作适当修正。

IV 桥梁工作状态评分

A.1.13 桥梁工作状态评分宜采用式 A.1.13 计算。

$$V(x_1, \dots, x_m) = \frac{\sum_{j=1}^m w_j^{(0)} x_j^\alpha}{\sum_{k=1}^m w_k^{(0)} x_k^{\alpha-1}}, \quad \text{其中 } 0 < \alpha \leq 1 \quad (\text{A.1.13})$$

式中：

m ——监测指标个数；

$w_j^{(0)}$ ——第 j 个指标的权重；

$w_k^{(0)}$ ——第 k 个指标权重；

x_j ——第 j 个指标的评价值；

α ——均衡系数。

A.1.14 当对各指标的均衡问题考虑较多时，宜取均衡系数 $\alpha \leq \frac{1}{2}$ ；当比较能容忍某方面缺陷时，可取

$$\alpha > \frac{1}{2}。$$

A.2 专家打分法

A.2.1 专家打分法是利用专家团队相互掌握的专业知识和预警情况，对桥梁警情实行判断并打出相应的分数做出预警。根据被打分结构中各个构件之间的互相联系影响程度，可以采用不同的计算公式确定桥梁整体预警总分值。桥梁各部件的权重分类是专家团队根据不同桥梁类型中各部件的受力特征和重要程度，具体问题具体分析，设计出类似表 A.2.1-1 的桥梁各部件的权重分类表。按照桥梁整体预警总分值 W 的大小判断出桥梁整体预警级别，桥梁整体预警的总分越高，预警级别越大。

专家打分法可按加权打分型，加法打分型，连积打分型，和数相乘打分型方法计算。各方法可采用下列计算公式：

1 加权打分型。将桥梁整体结构体系中的各项构件根据受力特征及重要性程度，给予不同的权重，即对各构件的重要程度做区别对待，例如表 A.2.1-1 中桥梁各部件的权重分类。将每个构件的权重与打分

值相乘，再将各构件得分求和，求出整个桥梁整体预警的总分。总分越高，说明预警级别越大。此法用于结构类别间关系简单者。则

$$W = \sum_{i=1}^n A_i W_i \quad (\text{A.2.1-1})$$

式中：

- W ——桥梁整体预警总分值；
 W_i ——第 i 类构件得分值；
 A_i ——第 i 类构件的权值；
 n ——构件分类数。

且：1) $\sum_{i=1}^n A_i = 1$ ；2) $0 < A_i \leq 1$

表 A.2.1-1 构件分类表

构件类别	构件	权值
1 类	桥墩和墩台基础	1
2 类	主梁、支座和桥塔及其上构件和节点	0.75
3 类	缆索和锚碇及其上构件和节点	0.5
4 类	其他	0.25

2 加法打分型：对结构体系进行简化分类，不同类别所得的分值加法求和，按总分来表示预警结果，此法用于结构类别间关系简单者。

$$W = \sum_{i=1}^n W_i \quad (\text{A.2.1-2})$$

3 连积打分型。将各个构件类别的分值连乘，并按其乘积大小来表现桥梁整体预警结果。该类打分法敏感度很高，适用于被评分对象各指标间的关系特别密切，其中一项的分数连带影响到其他各项的总结果，即具有某项指标不合格，就对整体起否定作用的特点。

$$W = \prod_{i=1}^n W_i \quad (\text{A.2.1-3})$$

4 和数相乘打分型。将桥梁整体的主要打分构件分成若干组，先计算出各组评分值之和，然后再将各组评分值连乘，所得即是总的评分。此法用于构件类别间的关系密切程度不同和相互影响方式不同的桥梁体系。构件组别及具体构件分类可按表 A.2.1-3 表确定。

$$W = \prod_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{i,j} \quad (\text{A.2.1-4})$$

式中：

- $W_{i,j}$ ——桥梁结构中第 i 组构件 j 打分值；
 m ——组数；
 n —— i 组中含有的构件数。

表 A.2.1-3 组别及具体构件分类表

组别 构件	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组
构件 1	桥墩	主梁	缆索	其他

构件 2	墩台基础	支座	锚碇	
构件 3		桥塔	其上构件和节点	
构件 4		其上构件和节点		

A.3 影响线法

A.3.1 影响线法通过监测桥梁在不同使用阶段的影响线状态及其变化趋势,可作为目前广泛用于鉴定桥梁承载力的静载试验法的先验方法评估桥梁安全性。

A.3.2 影响线法以主要测点的变位/应变影响线为依据,必须合理选择测点位置。应针对桥梁结构验算存在疑问的构件或断面或根据静力荷载试验结构主要控制截面,从中选择较大变位或应变处作为主要测点布置。

A.3.3 桥梁影响线与静载试验中结构校验系数的联系紧密,可基于影响线估算结构校验系数。影响线加载校验系数可按下列公式进行计算:

$$\zeta = \frac{\sum_{i=1}^n \Phi_{mi} W_i}{\sum_{i=1}^n \Phi_{di} W_i} \quad (\text{A.3.3})$$

式中:

- ζ ——影响线加载校验系数;
- W_i ——静力试验荷载车轴的轴重;
- n ——静力试验荷载车轴的轴数;
- Φ_{mi} ——实测弹性变位或应变影响线在试验荷载车轴位置的影响线因子;
- Φ_{di} ——理论计算变位或应变影响线在试验荷载车轴位置的影响线因子。

A.3.4 影响线峰值检验系数可按下列公式进行计算:

$$\eta = \frac{\Phi_{mx}}{\Phi_{dx}} \quad (\text{A.3.4})$$

式中:

- η ——影响线峰值校验系数;
- Φ_{mx} ——实测弹性变位或应变影响线在峰值位置的影响线因子;
- Φ_{dx} ——理论计算变位或应变影响线在实测峰值位置的影响线因子。

A.3.5 准确识别桥梁影响线的软硬件系统应满足以下要求:

- 1 实测影响线的过程应简单快速,可不完全封闭交通,若需限制重车通行,宜控制在 10min 以内。
- 2 系统应能准确测量检测车辆的实时位置以及对应时刻主要测点的变位和应变时程,车辆定位精度应小于 1cm,应变测量精度应小于 1 $\mu\epsilon$,变位测量精度应小于 0.01mm。
- 3 系统采集的桥梁变位、应变、车辆位置等多类型信号,时间同步误差应小于 0.1s。
- 4 基于实测的移动车辆和同步的桥梁变位/应变信息,系统可实现准确识别桥梁影响线的功能。

A.4 相关性法

A.4.1 应以不同结构形式(斜拉桥、悬索桥、梁桥和拱桥)和不同跨度(不小于 150m 梁桥、200m 拱桥、300m 斜拉桥和 500m 悬索桥)的桥梁结构布设的结构健康监测系統实时监测的桥梁结构静动态响应数据(温度、加速度、应变、挠度等)作为预警指标,对任意两种健康监测系統实时监测数据(例如温度和频

率), 进行相关性分析以进行桥梁结构整体预警。进行桥梁结构预警所依据的预警阈值应通过置信区间确定, 本标准规定的四级预警阈值应参考表 6.4.1。

A.4.2 基于相关性法进行桥梁结构整体预警可按下列步骤进行:

(1) 确定桥梁结构健康状况标准值。选取桥梁结构运营初期阶段一段时间的监测数据作为桥梁结构健康状况下初值, 再基于相关性分析方法计算两种监测指标之间的相关性作为标准值。

(2) 确定桥梁结构四级预警阈值。基于桥梁结构健康状况标准值, 以表 6.0.3-4 为依据进行四级预警阈值确定。

(3) 桥梁结构健康状况预警。基于相关性分析方法对监测指标进行分析, 并与桥梁结构四级预警阈值进行对比, 进行桥梁结构健康状况预警。

A.4.3 应采用以下相关性分析方法进行监测数据处理分析:

(1) 线性回归方法

线性回归方法是利用数理统计方法对数据进行线性回归分析, 来确定矢量因变量 y 和一个或多个自变量 x_i 之间相互依赖的定量关系。多种监测项目数据之间的相关性是根据线性预测方程 (如式 A.4.1-1 所示) 来建立的, 通常基于监测数据并使用最小二乘法对方程中的未知参数进行估计。在相关性分析中, 线性回归分析方法是简便和形象直观的, 适合分析如温度和梁端位移或温度和频率这类具有较强线性相关性的数据。线性回归分析可以较精确的计算各类监测数据之间的相关程度与回归拟合程度高低。

$$y_i = \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_j x_{ji} + \varepsilon = \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\beta} + \varepsilon \quad (\text{A.4.1-1})$$

式中:

- x_j ——第 j 种监测项目数据;
- β_j ——第 j 种监测项目数据的权重;
- y_i ——另一种监测项目数据;
- ε ——误差变量。

(2) 支持向量机方法

支持向量机是建立在统计学习理论基础上的数据挖掘方法, 能非常成功地处理回归问题 (时间序列分析)。支持向量机有严格的理论基础, 是基于结构风险最小化原则的方法, 其算法是一个凸二次优化问题, 保证找到的解是全局最优解, 能较好的解决小样本、非线性、高维数等实际问题, 问题的复杂度不取决于特征的维数, 且具有良好的推广能力。

桥梁结构健康状况标准值的确定应根据式(A.4.1-2)进行, 以确定两种监测项目数据之间的函数关系。

$$f(x) = \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b \quad (\text{A.4.1-2})$$

式中:

- x ——样本;
- b ——阈值;
- $f(x)$ ——另一种监测项目数据;
- $K(x_i, x)$ ——核函数;
- $\alpha_i, \alpha_i^* (i=1, 2, \dots, m)$ ——拉格朗日乘子。

(3) 神经网络方法

人工神经网络方法可较准确地揭示两 (或多) 种监测数据之间的非线性映射关系, 并简化其复杂关系为函数关系。应依据下式进行两种监测数据之间的函数关系。

一个典型的神经网络由三个部分组成：输入层、隐含层和输出层。对于一个含有 n_I 个输入参数 X （一种监测数据）， n_H 个隐含层单元的神经网络，神经网络的输出值 y_p （另一种监测数据）如式(A.4.1-3)：

$$y_p = \sum_{j=1}^{n_H} W_j h \left(\sum_{i=1}^{n_I} w_{ji} x_i + b_j \right) + B \quad (\text{A.4.1-3})$$

式中：

- h —— 激活函数；
- b_i, B —— 神经网络的偏差；
- w_{ji} —— 第 j 个输入层单元到第 i 个隐含层的权重；
- w_j —— 第 j 个隐含层单元到输出层的权重。

利用一系列数据对神经网络进行训练，寻找最佳权重 W 使得目标函数 E 最小。目标函数由式(A.4.1-4)计算：

$$E = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (y - y_p)^2 \quad (\text{A.4.1-4})$$

式中：

- y —— 实际监测数据；
- y_p —— 预测值。

A.5 强度储备比汇总法

A.5.1 构件强度储备比可采用下列计算公式：

1 构件在第 j 种受力状态（单一或组合应力）下规定的设计强度储备 $\theta_j^{(d)}$ 及相应的安全系数 $K_j^{(d)}$ 可采用下式计算：

$$\theta_j^{(d)} = F_{uj}^{(d)} - F_{aj}^{(d)} \quad (\text{A.5.1-1})$$

$$K_j^{(d)} = F_{uj}^{(d)} / F_{aj}^{(d)} \quad (\text{A.5.1-2})$$

式中：

$F_{uj}^{(d)}$ —— 设计时构件在第 j 种受力状态下采用的极限强度；

$F_{aj}^{(d)}$ —— 设计时构件在第 j 种受力状态下采用的许用强度。

2 构件在第 j 种受力状态（单一或组合应力）下实际强度储备 $\theta_j^{(r)}$ 及相应的安全系数 $K_j^{(r)}$ 可采用下式计算：

$$\theta_j^{(r)} = F_{uj}^{(r)} - f_j^{(r)} \quad (\text{A.5.1-3})$$

$$K_j^{(r)} = F_{uj}^{(r)} / f_j^{(r)} \quad (\text{A.5.1-4})$$

式中：

$F_{uj}^{(r)}$ —— 构件在第 j 种受力状态下的实际极限强度；

$f_j^{(r)}$ ——根据结构服役现状进行内力重分析所得到的构件实际最大应力。

3 构件在第 j 种受力状态（单一或组合应力）下的强度储备比 φ_j 可采用下式计算：

$$\varphi_j = \theta_j^{(r)} / \theta_j^{(d)} \quad (\text{A.5.1-5})$$

4 构件的强度储备比为各受力状态下强度储备比的最小值，应按下式确定：

$$\varphi = \min_j(\varphi_j) \quad (\text{A.5.1-6})$$

A.5.2 根据受力特征及重要性程度，对桥梁结构体系的构件进行简化分类如下：

- 1 1 类构件为桥墩和墩台基础；
- 2 2 类构件为主梁、支座和桥塔及其上构件和节点；
- 3 3 类构件为缆索和锚碇及其上构件和节点；
- 4 4 类构件为上述各类构件之外的构件，是桥梁结构的次要构件。

A.5.3 不同类别构件的安全度可采用下列计算公式：

1 1 类构件的安全度指标应采用极值控制，可采用下式计算：

$$\varphi_1 = \min[\varphi_{1i}] \quad i=1, 2, \dots, n_1 \quad (\text{A.5.3-1})$$

式中：

φ_{1i} ——第 i 个 1 类构件的安全度指标，即强度储备比；

n_1 ——1 类构件总数。

2 2 类、3 类构件的安全度指标采用强度储备比自加权平均法，可采用下式计算：

$$\varphi_2 = \sum_{i=1}^{n_2} (a_{2i} \varphi_{2i}) \quad (\text{A.5.3-2})$$

$$a_{2i} = \frac{1 - v_{2i}}{\sum_{j=1}^{n_2} (1 - v_{2j})} \quad (\text{A.5.3-3})$$

$$v_{2i} = \frac{\varphi_{2i}}{\sum_{j=1}^{n_2} \varphi_{2j}} \quad (\text{A.5.3-4})$$

$$\varphi_3 = \sum_{l=1}^{n_3} (a_{3l} \varphi_{3l}) \quad (\text{A.5.3-5})$$

$$a_{3l} = \frac{1 - v_{3l}}{\sum_{k=1}^{n_3} (1 - v_{3k})} \quad (\text{A.5.3-6})$$

$$v_{3l} = \frac{\varphi_{3l}}{\sum_{k=1}^{n_3} \varphi_{3k}} \quad (\text{A.5.3-7})$$

式中：

$\varphi_{2i}, \varphi_{3l}$ ——分别为第 i 个 2 类构件和第 l 个 3 类构件的安全度指标;

v_{2i}, v_{3l} ——分别为第 i 个 2 类构件和第 l 个 3 类构件的类汇总自加权系数;

n_2, n_3 ——分别为 2 类构件和 3 类构件总数。

3 4 类构件的安全度指标采用简单平均法确定, 可采用下式计算:

$$\varphi_4 = \left(\sum_{i=1}^{n_4} \varphi_{4i} \right) / n_4 \quad (\text{A.5.3-8})$$

式中:

φ_{4i} ——第 i 个 4 类构件的安全度指标;

n_4 ——4 类构件总数。

A.5.4 结构安全度指标 Φ 可采用下列公式计算:

$$\Phi = \sum_{j=1}^4 \omega_j \varphi_j \quad (\text{A.5.4})$$

式中:

φ_j ——第 j 类构件的安全度指标;

ω_j ——第 j 类构件的安全度参与系数。

A.5.5 结构整体预警阈值的大小与结构安全状态按照以下规定:

1 当 $\Phi \geq 1$ 时, 定义结构整体处于安全状态;

2 当 $0 < \Phi < 1$ 时, 定义结构整体处于不安全状态, 应进一步查询构件安全度指标的大小, 确定 $0 < \varphi < 1$ 的构件位置, 对构件进行安全预警, 其中当 $0.9 < \Phi < 1$ 时结构预警级别为IV级预警, $0.75 < \Phi \leq 0.9$ 时结构预警级别为III级预警, $0.6 < \Phi \leq 0.75$ 时结构预警级别为II级预警。

3 当 $\Phi \leq 0.6$ 时, 定义结构整体有一定的冗余度, 但处于部分失效状态, 应进一步查询构件安全度指标的大小, 确定 $\varphi \leq 0.6$ 的构件位置, 对构件进行预警, 预警级别为 I 级预警。

本标准用词说明

- 1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对执行标准严格程度的用词说明如下：
 - 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
 - 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
 - 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时应首先应这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不应”或“不宜”；
 - 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。
- 2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……规定”或“应按……执行”。

中国工程建设协会标准

大跨桥梁结构健康监测系统预警阈值设置标准

CECS ***: 2018

条文说明

目次

- 1 总则
 - 2 术语和符号
 - 2.1 术语
 - 2.2 符号
 - 3 安全预警基本体系
 - 3.1 功能构成
 - 3.2 指标选定
 - 3.3 阈值设置
 - 3.4 预警方式
 - 4 桥梁荷载作用阈值
 - 4.1 环境荷载作用
 - 4.2 人为影响因素
 - 5 桥梁构件预警阈值
 - 5.1 桥塔
 - 5.2 缆索
 - 5.3 主梁
 - 5.4 伸缩缝
 - 5.5 支座
 - 5.6 桥墩
 - 5.7 锚碇
 - 5.8 墩台基础
 - 6 桥梁整体预警阈值
- 附录 A 常用的状态评估方法
- 本标准用词说明
- 附：条文说明

1 总则

1.01 经过近几十年的发展，结构健康监测技术已取得了长足的进步，为保障大跨桥梁的安全运营发挥了巨大的作用，然而目前一个突出的问题是结构健康监测系统主要以数据采集为主，缺乏有效的安全预警机制，造成这一问题的主要原因是缺乏预警阈值设置的相关标准，这是制定本标准的目的所在。

1.02 本条规定了标准的主要适用范围，但对于其他桥梁的结构健康监测系统，亦可结合项目实际情况参考使用。

1.03 桥梁结构的性能具有随时间变化的显著特性，即一座大桥从开始建造，到竣工服役，到逐步劣化，到维修加固，直到最后废弃的全寿命过程，其完成设计赋予的使用功能概率是一种随时间变化的过程。结构性能的变化既包括自身的逐步劣化，也包括其随时间的周期性波动，因此预警阈值具有一定的时效性，应结合对桥梁结构的认知水平和实际服役状况，定期对阈值进行检验、补充、修正和优化，尽量减少虚警现象的发生，降低结构运营维护的成本。

3 安全预警基本体系

3.1 功能构成

3.1.1 进行安全预警的目的在于提高桥梁结构对突发事件的预防和应对能力，控制、减轻和消除桥梁突发事件引起的危害程度，及时恢复正常运行，保障交通的畅通。

1 桥梁结构安全预警必须对涉及突发事件的所有方面和所有工作内容进行整体安排，主要包括预警信息的发布、调整和解除，以及为实现这一目标而进行的所有工作安排，如组织结构体系、职责划分、联动机制与应急与事故处理的具体要求等。

2 桥梁结构健康监测系统应对桥址环境和结构状态各项指标实时监测，通过对环境（强风、地震等）或响应异常变化（如过大的挠度、应变、振动）的准确把握，在灾害发生之前及时报警，使有关部门有足够的时间采取各种措施防止灾害的发生或减少灾害的直接和间接损失。实时、自动是预警的首要特性，不及时或事后的警示不能称为预警，这就要求预警应通过自动化来实现，而人工干预的方式很难满足及时性的要求。此外，预警的方式应明显。

3 桥梁结构特别是索承桥的受力状况非常复杂，很难用一个指标来衡量整体结构的服役安全，因此一般应对荷载作用、关键构件、桥梁整体设置不同的预警参数和预警级别，形成一个相对完整的参数体系。

3.2 指标体系

3.2.1 预警指标应是一个参数体系，要力求简洁、易懂，必要时可通过公式、图表等方式加以补充说明。

3.3 阈值划分

3.3.1

1 由于桥梁结构属于一种典型的时变结构，在其长期服役过程中，其性能具有明显的时变性。因此，在正常使用极限状态下应充分考虑温湿度变化、混凝土收缩和徐变、活载等设计荷载的组合情况，取各荷载组合下的最不利工况响应值。预警阈值应根据工作环境、危险种类、结构状态、认知的深入而不断补充、修正和优化，使其更加合理。

2 规范限值是设置阈值的首选依据，阈值一般不允许达到或十分接近规范的限值。采用有限元数值分析时，应明确区分三种模型：1）设计模型，指在设计寿命期内结构预定（理想）状态的模型；2）竣工模型，指根据结构竣工时的荷载试验实测结果，更新得到真实反映结构竣工时实际状态的模型；3）动态模型，指以近期结构的安全状态作为当前结构的模型。对监测数据进行处理也可以得到预警阈值，但应通过从服役起至少一年且结构未见异常的连续监测数据得到，随着桥梁运营年限的增加，监测数据也会积累的越来越多，预警阈值应做相应地更新。

3 本条文参照《公路交通突发事件应急预案》的安全预警划分方法，将大跨桥梁安全预警级别分为四级，分别为Ⅰ级预警（特别严重预警）、Ⅱ级预警（严重预警）、Ⅲ级预警（较重预警）、Ⅳ级预警（一般预警），分别用红色、橙色、黄色和蓝色来表示预警级别。异常响应可能是多种因素的耦合结果，既包括环境和运营条件的变化，又包括结构的损伤或性能退化，还包括传感器的缺陷或失效。目前的技术手段有时很难对三者加以区分，因此当出现异常响应时，应通过现场巡检等方法，查明异常的成因、发展、后果，并采取相应的处置措施。

3.4 预警方式

3.4.1 预警信息的发布机构或被授权机构，可包括国家交通运输部、地方交通运输主管部门（省、市两级）、桥梁业主单位（含收费公路经营管理单位），以及桥梁管养单位等。预警信息的发布宜与应急预案联动，使各级部门在各个阶段能够及时采取主动性处置措施。桥梁业主单位或管养单位是实施安全预警的最基层单位，发布预警信息后，应加强监测力度，加大监测频率，一旦预警涉及的安全隐患已经消除或突发事件不满足相应级别预警启动标准时，应及时降级转化或撤销安全预警，并向相关部门和单位及时报送。

4 桥梁荷载作用阈值

4.1 环境荷载作用

4.1.1 风荷载

对大跨径桥梁来说，风速预警可分为两类：行车安全和桥梁结构安全。一般来说，后者的风速值较高。根据一般桥面（路面）车辆行车安全风速的研究，在不同路面条件下，不同车辆的行车安全风速有所不同，如下表 4.1.1-1 所示（见陈艾荣，王达磊，庞加斌，跨海长桥风致行车安全研究，桥梁建设，2006 年第 3 期，1-4）。以此为依据，多座大型桥梁如杭州湾跨海大桥、苏通大桥等确定了相应的行驶安全风速。

表 4.1.1-1 大桥路面行车安全风速

车型	路面状态	行车安全风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$		
		100 km/h	80 km/h	60 km/h
小汽车	干	36.5	38.0	39.0
	湿	30.5	32.5	34.0
中轻型客车	干	25.0	27.0	28.0
	湿	19.5	22.0	23.5
微型客车	干	19.5	21.3	22.5
	湿	15.5	17.5	19.0
集装箱车	干	26.0	28.0	29.5
	湿	17.0	20.0	22.0

注：表中 100，80，60 km/h 为限速。

考虑到预警风速与气象学上的风速风力相衔接，安全风速 I 级预警设置为 8 级大风的起始值，即超过 7 级大风。当超过该风速时，在路面条件较差（如湿滑状态）时，微型客车存在侧翻风险。

风速 II 级预警设置为 9 级大风的起始值，即超过 8 级大风。当超过该风速时，中轻型客车乃至集装箱车均存在侧翻的风险；

风速 III 级预警值来源于《公路桥梁抗风设计规范》。规范 4.1.3 条规定，“当风荷载参与汽车荷载组合时，桥面高度处的风速可取 25m/s”，以此条文为依据，绝大多数桥梁管理部门将 25m/s 风速作为桥梁封闭交通的依据。

风速 IV 级预警值则以十二级大风起始值，以及 10 年重现期的风速期望值作为依据，取其较小值，但不应小于 25m/s。一般风速超过该风速值的发生概率较低，但其破坏性较强。

表中给出的风速是 10min 平均风速。因为平均风速在不同的规范和实践中采用不同的时距，如 3s、2min、10min 和 1h。我国《公路桥梁抗风设计规范》（JTGT D60-01-2004）采用 10min。图 4.1.1-2 给出了其他时距风速如何变换到 1h 平均风速应乘系数。

因实际风速变化较大，为安全起见和便于操作，这里不区别风向和攻角。

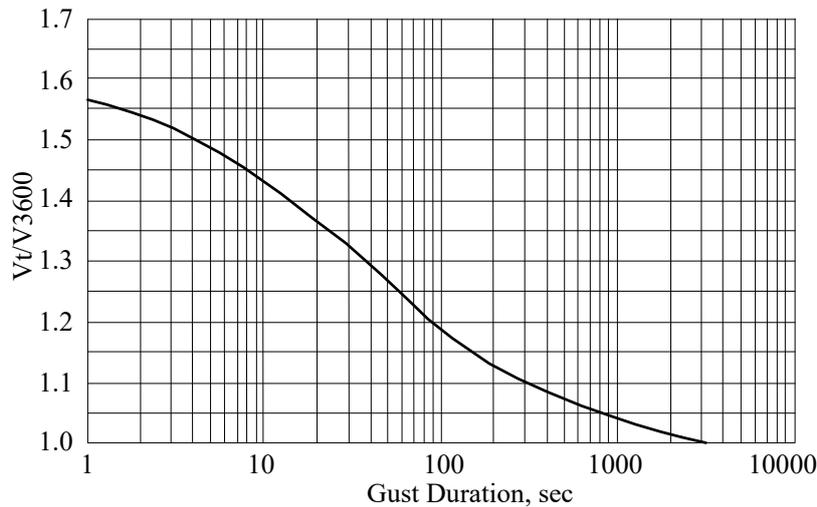


图 4.1.1-2 其他时距平均风速变换到 1 小时平均风速系数图

4.1.2 地震作用

1 桥梁所在场址区域应至少设置一套地震台站系统，该系统应可实时监测记录场址区域水平向地震动，且应对地震动记录作带通滤波处理，有效频带可采用 0.05-5Hz。

2 表 4.1.2 中 IV 级预警阈值 $0.4m/s^2$ 主要参考了日本新干线高铁桥梁地震监测与预警系统相应阈值，超过该值可能对结构安全与行车安全造成影响，且设置该值可保证地震峰值到达前留有应急处理时间。III、I 级预警阈值主要参考《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008) 3.1.1-3.1.4 条条文说明与《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》中 8.2.2 条规定。中间的 II 级预警阈值按 III、I 级两值的线性差值确定得到设计 E1 地震作用下的加速度峰值的 1.35 倍。

4.1.3 温度作用

当出现降雨、降雪天气，或湿度达到一定条件，低温将导致路面结冰，影响行车安全。结冰条件包括温度和湿度，湿度为先决条件，温度为主要因素。当路面达到 $0^{\circ}C$ 及以下时才能够结冰，将 $0^{\circ}C$ 定为 IV 级预警；参考文献《高速公路交通气象监测预报服务研究进展》可知 $-5\sim 20^{\circ}C$ 之间，摩擦系数随温度的下降而明显减小， $-5\sim 0^{\circ}C$ 有显著突变，当温度 $< -5^{\circ}C$ ，摩擦系数随温度下降反而有所增大。因此，将 $-5^{\circ}C$ 定为 I 级预警阈值；参考文献《典型路面结构冰水混合物附着条件下湿滑性能研究》，将 $-3^{\circ}C$ 定为 II 级预警阈值。

4.1.4 湿度

1 相对湿度对桥梁结构的钢构件（主缆、锚锭散索、刚箱梁内部）影响

(1) I 级对应相对湿度大于 70%。有试验结果表明钢在相对湿度大于 70% 时腐蚀严重^[1]。

(2) II 级对应相对湿度为 60%。一般钢材在常温下的临界湿度在 60%~70% 之间，相对湿度超过临界湿度时，钢的腐蚀速率显著增加^[2]。

(3) III 级对应相对湿度为 50%。环境湿度在 50%~60% 范围时，钢材发生电化学腐蚀，但反映微弱。

(4) IV 级对应相对湿度为 40%。研究表明在海洋大气中，由于金属沉积海盐粒子，临界相对湿度易降低到 40% 以下^[3]。

2 相对湿度对混凝土碳化作用

(1) I 级对应相对湿度为 50%，混凝土碳化速度达最大值。据已有文献表明：碳化速度与相对湿度的关系呈抛物线状，在相对湿度 40%-60% 时，混凝土碳化速度较快；混凝土的碳化速度最大值位于 50%~70% 相对湿度范围区间内^[4]。由于相对湿度在 75%-84% 范围内碳化深度随着湿度的增加而减小^[5]。

(2) II 级对应相对湿度为 40%，混凝土碳化速度较快。

(3) IV 级对应相对湿度小于 25%，混凝土中含有水分不足以进行混凝土碳化反应。

参考文献:

- [1] 夏兰廷, 黄桂桥, 张三平. 金属材料的海洋腐蚀与防护[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [2] Suzumura K, Nakamura S. Environmental factors affecting corrosion of galvanized steel wires[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(1): 1-7.
- [3] 刘云. 大气对常用触点金属材料的腐蚀影响[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.
- [4] 张超. 现场混凝土早期碳化与实验室加速碳化关系研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [5] Roy S K, Poh K B, Northwood D O. Durability of concrete accelerated carbonation and weathering studies[J]. Journal of Building and Environment, 1999, 34(5): 597-606.

4.2 人为影响因素

4.2.1 车辆荷载

- 1 确定表 4.2.1-1 中 I、II、III 级预警阈值的参照标准为《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》。
- 2 确定表 4.2.1-1 中 IV 级预警阈值的参照标准为《道路车辆外廓尺寸、轴荷及质量限值》。
- 3 本条只给出了针对单个车辆荷载的预警阈值, 没有给出车队荷载的预警阈值。原因在于车队荷载较复杂, 目前国际上在其预警阈值的研究上还存在分歧, 也尚未有针对车队荷载安全限值的相关规定。

4.2.2 车船撞击

1 异常峰值法: 基于桥梁健康监测系统, 对车船撞击桥梁结构时加速度或应变传感器时程数据进行分析, 即对所观测的 1d 内时程数据进行统计分析。首先剔除由温度效应引起的数据, 进而计算各加速度或应变传感器 1d 内时程数据的平均值 μ_i 和 5min 时程数据的平均值 $\bar{\mu}_i$ 。综合考虑 n 个传感器的时程数据, 若 5min 时程数据平均值的绝对值 $|\bar{\mu}_i|$ 明显大于一天内时程数据平均值的绝对值 $|\mu_i|$, 则判定此时桥梁结构出现异常, 需现场查看和发出预警。

2 承载能力评定方法主要参考《铁路桥涵设计基本规范》(TB10002.1-99)、《公路桥涵设计通用规范》(JTJD60-2004)、《全国内河通航标准》(GB 50139-2004) 以及美国道路工程师协会 (AASHTO)《公路桥梁船撞设计指南》。

4.2.3 火灾作用

桥梁火灾通常是由载油 (或易燃液体) 罐车引发的火灾, 也称为碳氢化合物火灾或液体池火灾, 其特点是加热速率快, 可在火灾开始数分钟内达到非常高的温度。因此, 本规范规定荷载阈值主要考虑载油 (或易燃液体) 罐车等引发的火灾。考虑到采取指标的可监测性, 荷载阈值主要由火灾位置确定。主要考虑:

(1) 依据桥梁火灾风险评估的最新研究成果, 大跨度桥梁火灾最危险的位置包括: 1) 下部空间主支撑附近, 主支撑主要包括桥墩、桥塔等桥梁下部构件, 2) 桥面主支撑 (或索) 附近; 桥下易燃物燃烧等其他类型火灾对桥梁的影响较小。(2) 下部空间主支撑附近火灾可能为载油 (或易燃液体) 罐车撞击主支撑后引发火灾, 桥面主支撑 (或索) 附近火灾多为载油 (或易燃液体) 罐车与其他车辆相撞引发的火灾, 前者更为危险。

主要参考文献如下:

- [1] 林辉, 周云岗, 简方良. 考虑风险的桥梁防火措施选择. 重庆交通大学学报 (自然科学版) [J]. 2011, 30(4): 213-216.
- [2] Maria G, Ignacio P. Fire hazard in bridges: Review, assessment and repair strategies[J]. Engineering Structures, 2012, 35: 89-98.
- [3] Naser M Z, Kodur V K R. A probabilistic assessment for classification of bridges against fire hazard[J]. Fire Safety Journal, 2015, 76: 65-73.
- [4] Peris-Sayol G, Paya-Zaforteza I. Detailed analysis of the causes of bridge fires and their associated damage levels [J]. ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 31(3): 04016108.

4.2.4 爆炸荷载

爆炸荷载最直接的表示是爆炸超压和冲量，然而爆炸超压和冲量的现场测量极其困难，且设备昂贵，考虑到爆炸荷载为非常规荷载，在桥梁健康监测系统中安装压力传感器及相关数据采集设备不具实际意义；同时考虑到爆炸荷载为极端荷载，大跨桥梁结构多未进行抗爆设计，一旦监测到桥面或下部空间发生恐怖爆炸或意外爆炸事故，对桥梁安全可能产生大的威胁，因此预警级别应为 I 级。。

5 桥梁构件预警阈值

5.1 桥塔

5.1.1 倾斜预警

由于性能退化或地基沉降的原因,可能导致桥塔变形过大,一般都需要监测桥塔倾斜。桥塔位移预警设定 I、II、III、IV 全部 4 级预警, I 级预警表示已超出设计允许或规范规定,或可能影响桥梁结构的安全, II 级预警表示超出设计最不利工况组合,或可能造成桥梁非主要受力件的破坏,或影响结构主要受力件的耐久性, III 级预警表示可能对结构使用性(如行车安全)产生不良影响, IV 级预警表示异于日常数据的正常水平。桥塔倾斜 III 级预警阈值包含差异度 ρ 和相似度 η , 差异度 ρ 表示两塔同一时间段内的差异, 相似度 η 表示同一塔两个不同时间段内的差异。

差异度 ρ 的设定方式实例为: 分别计算顺桥向和横桥向倾斜的月统计分布, 与前一年对应月份的统计分布结果进行比较, 采用差异度 ρ 作为两组测值之间差异的度量。差异度 ρ 的计算方式为: 将各年倾斜监测数据各自看作一个集合, 这些元素的数值分布在区间 $[a, b]$ 中, $k = \text{int}(b - a)$, 区间 $V_j = [a + j, a + j + 1]$, $j = 0, 1, 2, 3, \dots, k + 1$, 假设 A 集合中共有 n 个元素, 其元素值在区间 V_j 中的个数为 α_j , B 集合中共有 m 个元素, 其元素值在区间 V_j 中的个数为 β_j , 定义差异度:

$$\rho = \frac{\sum |\alpha_j / n - \beta_j / m|}{2} \quad (5.1.4-1)$$

相似度 η 的设定方式为: 计算主塔顺桥向倾斜的月统计平均值, 以一年的数据画曲线, 设 S_1 和 S_2 分别表示上一年和当年的倾斜曲线与曲线上最低点横坐标围成的面积, S 阴影表示两条曲线之间的面积, 则相似度表示为:

$$\eta = 1 - \frac{2 \cdot S_{\text{阴影}}}{S_1 + S_2} \quad (5.1.4-2)$$

桥塔倾斜的 I 级预警值是按规范规定或设计单位给出的主塔横桥向和顺桥向的最大倾斜来设定, 分别以最大顺桥向倾斜 a_{QX} 为椭圆的长半轴, 最大横桥向倾斜 b_{QX} 为椭圆的短半轴, 以主塔倾斜的年平均值 $QX_{\text{顺}}^0$ 和 $QX_{\text{横}}^0$ 为椭圆的原点, 该椭圆即为 I 级预警阈值, 当主塔的倾斜监测值在椭圆外时, 发出 I 级预警。 $QX_{\text{顺}}$ 与 $QX_{\text{横}}$ 分别为桥梁倾斜在顺桥向与横桥向的实时监测值。

5.2 缆索

5.2.1 说明“缆索”指代的范围, 以及两种监测指标: 索力和振动加速度

5.2.2 对索力预警方法进行说明。

1 说明索力数据来源, 根据缆索工艺种类和应用类型分振动频率法或磁弹索力仪法; 指出索力预警作用或目的。

2 指出绝对索力预警方法和预警阈值。

3 指出索力异常变化预警方法和预警阈值。

5.2.3 对振动加速预警方法进行说明。

1 指出振动加速度数据来源及其数据要求; 指出加速度预警作用或目的。

2 指出过大振动加速度预警方法和预警阈值

3 指出扣除风致振动后的过大加速度变化预警方法和预警阈值。

参考文献:

[1] JT/T 1037-2016 公路桥梁结构安全监测系统技术规程[S]. 中华人民共和国交通运输部, 北京: 人民交通出版社, 2016.

[2] GB 50982-2014 建筑与桥梁结构监测技术规范[S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部, 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

5.3 主梁

5.3.2 表 5.3.2 中实测到不同温度下的主梁自振频率宜转化为 25°C 时的频率, 并与第一年 25°C 时对应的自振频率作对比, 得到频率变化百分比。具体方法如下: 根据第一年监测数据所识别到的自振频率与温度的对应关系, 拟合两者间的关系模型, 并利用此模型将不同温度下实测到的主梁频率转化为 25°C 时的频率, 从而得到统一温度 (25°C) 下的频率, 与第一年 25°C 频率对比, 得到的变化量除以第一年 25°C 时对应的自振频率, 得到自振频率变化百分比。主梁自振频率变化百分比预警阈值的规定, 主要是依据《公路桥梁承载力监测评定规程》(JTG/T J21-2011) 中第 5.9 条的相关规定结合工程实际经验得出的。

5.3.3 考虑大跨混凝土桥梁主梁基本采用预应力混凝土主梁, 因此本条款主要针对预应力混凝土主梁进行预警阈值设置。本标准以混凝土开裂作为混凝土主梁的主要预警指标, 主要考虑开裂一方面影响桥梁的正常使用性能, 另一方面大大降低了混凝土主梁的耐久性能, 影响桥梁使用寿命。

表 5.3.3-1 中有关混凝土主梁主拉应力斜裂缝预警阈值的规定, 主要是依据《桥梁结构检测技术规程》中第 4.1.3 条的相关规定结合工程实际经验得出的。

表 5.3.3-2 中有关混凝土主梁横向及竖向受力裂缝预警阈值的规定, 主要依据是《公路钢筋混凝土及预应力混凝土设计规范》中第 6.3 条的相关规定结合工程实际经验得出的。

表 5.3.3-3 中有关预应力筋纵向裂缝预警阈值的规定, 主要是依据《桥梁结构检测技术规程》中第 4.1.5 条的相关规定结合工程实际经验得出的。

5.3.4

1 构件承载能力是反映结构安全性的重要指标, 参考英国规范 BS5400 可以采用承载能力利用率 r_s 作为承载能力的预警阈值, 其计算公式如下:

$$r_s = \frac{\sigma_l}{\phi S - \sigma_d}$$

式中: σ_d 和 σ_l 分别为恒载应力和活载应力, 可以从实际监测中由传感器测量得到的总应力中分离获得; S 为材料设计强度; ϕ 为强度折减因子, 未进行强度修正时可取为 1.0。

2 疲劳损伤是钢结构和构件失效的主要原因之一。进行预警时, 可根据需要设定预警计算的频率, 如每天统计计算和报警一次。

累积疲劳损伤量用来反映构件在循环应力作用下的损伤累计程度, 其计算公式如下:

$$D = D_0 + \sum_1^m D_i$$

$$D_i = \sum_1^n \frac{n_j}{N_j}$$

式中: D_0 为开始监测时的初始损伤评估值, 当采用疲劳加固手段后, 可对 D_0 取值进行评估和修正; D_i 为第 i 个监测时段的损失值 ($i=1, \dots, m$); n_j 和 N_j 分别为应力幅 σ_j 对应的循环次数及其理论破坏循环次数 ($j=1, \dots, n$)。其中, 应力幅 σ_j 可由雨流计数统计监测应力时程获得, N_j 由疲劳公式及构件细节等级计算。

5.3.5 钢-混凝土组合主梁经常被用在连续梁桥、连续钢构桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥中，作为主要的梁体结构。由于桥梁整体结构形式的不同，钢-混凝土组合主梁的受力特点和力学行为表现出较大的差异，针对其设计监测措施时，应首先考虑桥梁整体结构受力特点和服役期力学行为。

钢-混凝土组合主梁主要由钢梁、连接件和钢筋混凝土板构成，尽管钢-混凝土组合主梁从属的桥梁结构类型各异，但钢-混凝土组合主梁的三种主要构件的受力特点和行为规律大致相同，连接件是这类结构的关键。主要考察服役期关键截面的整体协同工作性能。交通活荷载作用下的中性轴偏位，以及横向侧弯时中性轴的偏位，都与钢-混凝土组合主梁的三个主要构件的协同工作性能有关，尤其是与剪力连接件的工作性能。

5.3.6 主要考察钢-混凝土组合主梁在纵向的顶板与钢梁协同工作能力。纵向滑移越大，剪力件的能力发挥越少，顶板混凝土的抗压性能和钢梁的抗拉性能发挥的越不充分。因此，可通过设定底板钢梁最大正应力削弱百分比目标，来反算得到该指标的对应阈值。

5.4 伸缩缝

5.4.1 伸缩缝是使桥梁梁端能适应由于温度变化、混凝土徐变与收缩、不均匀沉降、车辆冲击和梁端转动等引起变形的重要构件。伸缩缝主要病害包括污物塞入、变形、破损、运动滞涩、断裂等。伸缩缝破坏会降低行车舒适性、加快铺装层破坏速度。常用的伸缩装置有对接式、模数式、梳齿板式、剪切式、钢制支承式、弹性装置等。本标准主要适用于大跨桥梁经常采用的模数式伸缩装置和梳齿板式伸缩装置。其余种类伸缩缝预警阈值的设定可参考本标准执行。本条规定了伸缩缝的四个级别预警阈值，伸缩缝累积位移行程是指伸缩缝从安装完成开始使用到当前时刻这一段时间范围内的累积位移行程。考虑到由于伸缩装置的加工误差、安装施工误差以及伸缩缝位移测量误差等因素的影响，累积伸缩量 II 级预警阈值设置时建议预留一定的富余量；根据以往经验，建议考虑 30%左右的富余量。

上限阈值是指监测位移大于此值即显示 IV 级预警的阈值。下限阈值监测位移小于此值即显示 IV 级预警的阈值。研究表明，大跨桥梁结构伸缩缝平均位移 D_m 和跨中截面有效温度 T_e 符合 $D_m = \alpha T_e + D_0$ 规律。大跨桥梁结构健康监测系统试运行期一般为 1 年，利用一年的伸缩缝平均位移样本和跨中截面有效温度样本，通过线性回归可得到主梁整体温度膨胀系数 α 和假定跨中截面有效温度为 0 时伸缩缝的平均位移 D_0 。为了消除风和车辆冲击等短周期因素的影响，伸缩缝平均位移样本点和跨中截面有效温度样本点均采用周期为 10min 以上的平均值，且计算伸缩缝平均位移样本点采用的周期与计算跨中截面有效温度样本点采用的周期应相同。实测位移和线性回归位移之间的残差 $(D_{m,j} - \alpha T_{e,j} - D_0)$ 样本服从 t 分布， t 分布表中 95% 置信区间对应的临界值为 1.96。

上限阈值和下限阈值应按下列公式计算：

$$D_u = \alpha T_e + D_0 + 1.96 \hat{\sigma} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(T_e - \bar{T})^2}{S_T}} \quad (5.4.3-1)$$

$$D_l = \alpha T_e + D_0 - 1.96 \hat{\sigma} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(T_e - \bar{T})^2}{S_T}} \quad (5.4.3-2)$$

$$\alpha = \frac{S_{DT}}{S_T} \quad (5.4.3-3)$$

$$D_0 = \bar{D} - \alpha \bar{T} \quad (5.4.3-4)$$

$$T_e = \sum_{i=1}^m \frac{A_i}{A} T_i \quad (5.4.3-5)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{j=1}^n (D_{m,j} - \alpha T_{e,j} - D_0)^2} \quad (5.4.3-6)$$

$$D_{m,j} = \sum_{r=1}^k D_{j,r} \quad (5.4.3-7)$$

$$T_{e,j} = \sum_{i=1}^m \frac{A_i}{A} T_{j,i} \quad (5.4.3-8)$$

- 式中： D_u —— 上限阈值；
 D_l —— 下限阈值；
 α —— 主梁整体温度膨胀系数；
 D_0 —— 大跨桥梁结构健康监测系統试运行期内，假定跨中截面有效温度为 0 时伸缩缝的平均位移；
 T_e —— 跨中截面当前时刻的有效温度；
 $\hat{\sigma}$ —— 预测残差的方差；
 $D_{m,j}$ —— 大跨桥梁结构健康监测系統试运行期内，伸缩缝的第 j 个平均位移样本；
 $T_{e,j}$ —— 大跨桥梁结构健康监测系統试运行期内，跨中截面的第 j 个有效温度样本；
 n —— 大跨桥梁结构健康监测系統试运行期内，伸缩缝平均位移的样本数；
 \bar{T} —— 大跨桥梁结构健康监测系統试运行期内，跨中截面有效温度样本序列的平均值；
 S_T —— 大跨桥梁结构健康监测系統试运行期内，跨中截面有效温度样本序列的方差；
 S_{DT} —— 大跨桥梁结构健康监测系統试运行期内，跨中截面有效温度样本序列和平均位移样本序列的协方差；
 \bar{D} —— 大跨桥梁结构健康监测系統试运行期内，伸缩缝平均位移样本序列的平均值；
 A_i —— 跨中截面第 i 个温度传感器监测的区域面积；
 A —— 跨中截面总面积；
 T_i —— 跨中截面第 i 个温度传感器测量的当前时刻的有效温度；
 m —— 跨中截面温度传感器的数量；
 k —— 监测伸缩缝位移的位移传感器数量；
 $D_{j,r}$ —— 大跨桥梁结构健康监测系統试运行期内，监测伸缩缝位移的第 r 个位移传感器测量的第 j 个位移样本；
 $T_{j,i}$ —— 大跨桥梁结构健康监测系統试运行期内，跨中截面第 r 个温度传感器测量的第 j 个温度样本。

5.5 支座

5.5.1 对于易发生倾覆破坏的独柱桥梁、弯桥、斜桥、基础易发生沉降的桥梁及存在负反力的大跨径桥梁可布置支座反力和位移监测。

5.5.3 如果水平剪切变形过大，支座处在长期偏压状态下，将会对支座产生影响。隔震支座的竖向压缩变形量是反映隔震支座质量的重要指标。参照日本《隔震建筑维护管理标准》（2010），允许支座剪切变形最大值不超过 50mm，支座竖向压缩变形最大值不超过 5mm。

5.6 桥墩

5.6.1 桥墩

桥墩监测预警阈值应结合全桥有限元仿真进行计算，取桥梁在承载能力极限状态、正常使用极限状态下结构响应值作为红色及黄色预警阈值，橙色及蓝色预警考虑在两种极限状态阈值的基础上进行组合或折减后获得。

桥墩如果出现了影响正常使用的外观变形、正常使用的局部破坏、正常使用的振动或其他状态之一，则认为已经达到了正常使用极限状态。按照正常使用极限状态计算的预警数值进行预警时，荷载效应主要采取短期荷载效应组合及长期荷载效应组合的最不利值作为预警阈值。

承载能力极限状态一般指的是结构或构件作为刚体即将失去平衡，结构、构件或连接超过材料强度，发生过度变形而不适合继续承载，结构或构件丧失稳定性等。实际结构中一般都采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，并满足正常使用极限状态的要求。按承载能力极限状态下结构的响应进行预警时，主要采用基本组合荷载组合方式。

5.7 锚碇

5.7.1 锚碇水平向和竖向位移会导致主缆、加劲梁、桥塔和边跨第一根吊索产生较大的内力变化。根据《公路悬索桥设计规范》(JTGT D65-05)的有关规定，运营阶段锚碇允许水平变位不宜大于 0.0001 倍的主跨跨径，竖向变位不宜大于 0.0002 倍的主跨跨径，所以采用《公路悬索桥设计规范》(JTGT D65-05)的有关规定进行 I 级、II 级预警值的规定。第 III 级、IV 级预警采用正常监测数据的统计值。

本节规定的正常监测数据是指在桥梁结构健康监测系统运行前 1 年时间，来源于监测系统在锚碇处测点采集的数据。因通常情况下桥梁结构需 1 年时间才能经历 1 个完整的温度变化周期。对于锚碇水平和竖向位移，若在桥梁结构健康监测系统建立前有关于桥梁运营期间锚碇水平向和竖向偏位的准确测量数据，在 I 级、II 级预警值中需计入监测系统建立前的偏位值。

根据重庆市鹅公岩长江大桥、云南龙江特大桥等多座悬索桥锚碇多年观察数据和监测数据表明，运营期间锚碇的位移变动基本在毫米级（测量精度范围内），所以 III 级预警阈值不会超过第 II 级预警阈值（以水平向位移为例 $0.00005 \times 500\text{m} = 25\text{mm}$ ，其中 500m 为悬索桥宜建设健康监测系统的最小跨径）。

5.7.2 当无法监测恒载引起的锚杆受力时，采用理论计算值代替。工程实践中，岩锚锚杆体的安全系数往往在 2 以上，因此，正常监测数据极大值（第 III 级预警阈值）不会超过第 II 级预警阈值。

5.7.3 爆破、地震等引起的过大振动将破坏隧道和山体围岩的完好程度。本条根据《爆破安全规程》(GB6722)中爆破振动安全允许标准对散索室三向振动速度进行了规定。

5.8 墩台基础

5.8.1 表中 IV 级预警阈值主要参考了日本新干线高铁桥梁地震监测与预警系统相应阈值，超过该值可能影响行车安全。III、I 级预警阈值主要参考《公路桥梁抗震设计细则》3.1.1-3.1.4 条条文说明。由于大跨度桥梁属 A 类桥梁，其抗震设防目标为 E1 地震作用下不受损或不需修复即可继续使用，E2 地震作用下可产生有限损伤，但地震后应能立即恢复正常交通通行。同时参考《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》中的 8.2.2 条规定：“当水平地震加速度峰值大于设计 E1 地震作用对应的加速度峰值时，进行黄色预警；大于设计 E2 地震作用对应的加速度峰值时，进行红色预警。”，本条规定 E1 地震作用对应的加速度峰值作为 III 级预警阈值，E2 地震作用对应的加速度峰值作为 I 级预警阈值。中间的 II 级预警阈值按 III 级和 I 级预警阈值的线性差值确定得到，即为 E1 地震作用对应的加速度峰值的 1.35 倍。

本条规定根据《公路桥涵地基与基础设计规范》4.3.3 条规定：相邻墩台间不均匀沉降差值（不包括施工中的沉降）不应使桥面形成大于 0.2% 的附加纵坡（折角）。考虑到对于实际的重要桥梁结构，设计要求允许的最大墩台沉降值小于《公路桥涵地基与基础设计规范》4.3.3 条规定要求，因此桥梁墩台间的允许最大不均匀沉降值宜取《公路桥涵地基与基础设计规范》4.3.3 条规定的最大不均匀沉降值和设计要求允许的最大墩台沉降值之间的较小值。桥梁墩台间的允许最大不均匀沉降值作为 I 级预警阈值，最大不均匀沉降差值的 0.85 倍作为 II 级预警阈值，最大不均匀沉降差值的 0.70 倍作为 III 级预警阈值，最大不均匀沉降差值的 0.55 倍作为 I 级预警阈值。

A 常用的状态评估方法

A.1 层次分析法

A.1.3 基本监测指标满足可测性原则是指指标能够通过数学公式，测试仪器或试验统计等方法获得，指标本身应便于实际使用和度量。

对结构异常变化较为敏感的指标应可以直接根据自动监测数据快速计算获取。

A.1.4 标准化处理是指通过一定的数学变换来消除各评估指标量纲的影响，使所有指标在单位、强度和离散度等方面一致，即把性质、量纲各异的指标转化为具备可比性的相对“量化值”以进行综合评估。

单值型数值指标即监测数据为数值型的定量描述，条文中线性百分制无量纲化数学模型可采用式 A.1.4-1~A.1.4-3。

正指标无量纲化模型：

$$f(x) = \begin{cases} 100(x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) & x > x_{\min} \\ 0 & x \leq x_{\min} \end{cases} \quad (\text{A.1.4-1})$$

负指标无量纲化模型：

$$f(x) = \begin{cases} 100(x_{\max} - x) / (x_{\max} - x_{\min}) & x > x_{\max} \\ 0 & x \leq x_{\max} \end{cases} \quad (\text{A.1.4-2})$$

适度指标无量纲化模型：

$$f(x) = \begin{cases} 100(x - x_{\min}) / (x_0 - x_{\min}) & x_{\min} < x < x_0 \\ 100(x_{\max} - x) / (x_{\max} - x_0) & x_0 < x < x_{\max} \\ 0 & x \leq x_{\min} \text{ 或 } x \geq x_{\max} \end{cases} \quad (\text{A.1.4-3})$$

式中：

- x —— 监测指标数值；
- x_{\min} —— 监测指标在区域范围内的最小值；
- x_{\max} —— 监测指标在区域范围内的最大值；
- x_0 —— 监测指标在区域范围内的最优值。

A.1.6 序列型数值指标即监测数据为一组数值序列的评估指标，条文中序列型数值指标均匀变化得分可按表 A.1.6 计算，非均匀变化性系数可采用灰色关联分析方法，即式 A.1.6 计算。

表 A.1.6 均匀变化得分计算方法

	测点重要性程度相同	测点重要性程度不同
计算公式	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	$\sum_{i=1}^n \omega_i x_i$
	式中： x_i —— 单个测点评价价值； n —— 测点数。	式中： x_i —— 单个测点评价价值； n —— 测点数。 ω_i —— 第 i 测点权重。

$$r(X_0, X_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{1 + \left| \frac{a^{(1)}(x_0(k+1))}{x_0(k+1)} - \frac{a^{(1)}(x_i(k+1))}{x_i(k+1)} \right|} \quad (\text{A.1.6})$$

式中:

$$a^{(1)}(x_0(k+1)) = x_0(k+1) - x_0(k), k=1, 2, \dots, n-1;$$

$$a^{(1)}(x_i(k+1)) = x_i(k+1) - x_i(k), k=1, 2, \dots, n-1;$$

x_0 ——桥梁竣工状态某监测项目理论设计值;

x_i ——桥梁运营状态下同一监测项目的第 i 次实测值;

n ——桥梁运营状态下同一监测项目的实测总数。

A.1.7 五级标度法相应的赋值是 1、3、5、7、9，表示一个指标对另一个指标的重要程度，数字越大表明越重要，条文中五级标度法具体含义及说明见表 A.1.7。

表 A.1.7 五级标度法含义及其说明

标度	含义	说明
1	两个指标，具有同样的重要性	两个指标对某性质相同的贡献
3	两个指标，前者比后者稍重要	两个指标中稍重于某个指标
5	两个指标，前者比后者明显重要	两个指标中偏重于某个指标
7	两个指标，前者比后者强烈重要	实际显示某个指标占主导地位
9	两个指标，前者比后者极端重要	两个指标中某个指标占绝对重要地位

注：如果要表示一个指标比另一个指标次要，则赋值取为上述 1、3、5、7、9 的倒数。

A.1.8 条文中九级标度法具体含义及说明见表 A.1.8。

表 A.1.8 九级标度法及其含义

标度	含义	说明
1	两个指标，具有同样的重要性	两个指标对某性质相同的贡献
3	两个指标，前者比后者稍重要	两个指标中稍重于某个指标
5	两个指标，前者比后者明显重要	两个指标中偏重于某个指标
7	两个指标，前者比后者强烈重要	实际显示某个指标占主导地位
9	两个指标，前者比后者极端重要	两个指标中某个指标占绝对重要地位
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值	其它

注：如果要表示一个指标比另一个指标次要，则赋值取为上述 1、3、5、7、9 的倒数。

A.1.11 判断矩阵相对一致性指标 CR 愈小时,判断矩阵的一致性愈好。当 $CR \leq 0.1$ 时判断矩阵基本符合完全一致性,属于可接受的程度。如果 $CR > 0.1$ 那么认为初步建立的判断矩阵不能令人满意,需要重新分析赋值,仔细修正,直到检验通过为止。

A.1.14 α 取值反应对均衡性的要求,对桥梁中的局部缺陷容忍程度越小,取值越小。 α 取值在 0.2~0.5 之间都能满足大多数工程要求。

A.3 影响线法

A.3.1 静载试验法是目前相对最可靠的桥梁安全性评估方法，但需要较长时间中断交通且费用较高。影响线法可作为该方法的先验方法，可通过一辆/少量检测快速通过桥梁，识别桥梁影响线并构造安全评价指标。可实现桥梁影响线的长期监测，宜将桥梁挠度和应变传感器永久布置于桥梁关键截面或构件，指定测试时间间隔，获取桥梁在不同使用阶段的影响线状态及其变化趋势。

A.3.2 制定适用于影响线评估的测点布置方案，应参考《公路桥梁承载能力检测评定规程》表 8.1.3，宜根据不同桥梁类型选择主要控制截面，并分析截面内荷载横向分布，可确定控制截面主要测点的位置。

A.3.3 结构校验系数是静载试验法最主要的评价指标，代表试验荷载下实测弹性变位或应变值与相应的理论计算值的比值。该值小于 1，可表明桥梁的实际状况优于理论状况。桥梁运营初期，通常实测影响线比理论影响线更趋于安全，此时结构校验系数小于 1；若桥梁性能退化，实测影响线随之改变，此时结构校验系数接近甚至超过 1。理论影响线宜通过桥梁设计的计算模型确定，实测影响线可通过检测车在桥上行驶的实测信息确定。静力试验荷载应根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》第 8.1.2 条确定关键截面或构件的布载方案，静力荷载试验效率宜控制在 0.95~1.05 之间。

A.3.4 影响线峰值一般出现在传感器测点附近，在该位置施加竖向荷载，可测到桥梁变位/应变较强的响应信号，信噪比较高。相对于影响线的整体变化，影响线的峰值对桥梁损伤更为敏感。监测不同使用阶段的桥梁影响线状态改变，宜采用反映影响线整体变化的结构校验系数与反映影响线局部变化的峰值检验系数相结合的预警方法。

A.5 强度储备比汇总法

A.5.1 构件强度储备比有以下明确的物理意义：当 $\varphi \geq 1$ 时，表明构件的实际强度储备大于或等于设计规定的强度储备；当 $0 < \varphi < 1$ 时，表明构件的实际强度储备低于设计规定的强度储备；当 $\varphi \leq 0$ 时，表明构件的实际应力已等于或高于极限强度，构件已无强度储备，可定义构件完全失效。

A.5.2 强度储备比汇总法是以强度储备比为构件的安全度指标，从安全度分析角度将结构体系予以简化，由基本构件的安全度指标获得结构体系的安全度指标。

A.5.3 结构中各类构件由于重要性程度不同，因而对结构安全度的贡献亦不同。采用各类构件安全度指标的线性加权组合来近似表征结构安全度指标。安全度参与系数可按照层次分析法中的权重向量计算方法计算各类构件权重向量。

A.5.4 结构整体安全评定的汇总方法考虑确定的荷载工况，在构件安全度的基础上，根据构件的重要性和联结关系，归纳得到结构整体安全度指标，可以在一定程度上反映结构整体的安全状况，在实际应用中也比较简单，仅做确定性的线性分析。

A.5.5 整体预警阈值的确定依据为桥梁损坏极限状态的强度储备率 R_d ，美国 The National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) 报告 406 指出一个桥梁系统被认为有冗余度时的强度储备率取值为 $R_d \geq 0.5$ ，同时考虑到强度储备比法涉及到权重系数和四类构件数量的影响，为了减少不同类型桥梁计算之间的差异，偏保守取值并确定最高一级预警值为 0.6。详见参考文献“姜勇，苑春艳. 双箱结合梁桥结构冗余度评估. 世界桥梁. 2013, 41(3): 66-72”和“姜天华，王强，杨壮，黄雯. 在役预应力混凝土桥梁损伤状态承载力评估. 铁道建筑. 2016, (8): 31-34”

