

ICS 03.080.01  
CCS R 00

DB51

四川 省 地 方 标 准

DB51/T 2794—2021

# 山区公路混凝土桥梁结构安全风险监测指 标体系设计与预警技术指南

Technical guide for risk index system and early warning on structural safety  
monitoring of mountain highway concrete bridges

地方标准信息服务平台

2021-08-02 发布

2021-09-01 实施

四川省市场监督管理局 发布



## 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 总则 .....	1
4 术语和定义 .....	2
5 基本规定 .....	4
6 桥梁结构安全风险辨析 .....	5
6.1 一般规定 .....	5
6.2 立项需求分析阶段 .....	6
6.3 监测指标体系设计阶段 .....	8
7 监测指标体系设计 .....	9
7.1 一般规定 .....	9
7.2 监测指标选取与测点布设 .....	10
7.3 监测设备选型与安装施工设计 .....	14
8 安全预警与应急响应 .....	14
8.1 一般规定 .....	14
8.2 风险事件管理 .....	15
8.3 预警等级管理 .....	16
8.4 应急响应 .....	18
9 安全评估与养管决策技术支持 .....	19
9.1 安全评估 .....	19
9.2 养管决策技术支持 .....	19
附录 A (规范性) 桥梁结构安全风险辨析方法 .....	22
A.1 专家调查法 .....	22
A.2 事故树分析法 .....	25
附录 B (规范性) 常见山区公路混凝土结构桥梁的监测指标和测点布设技术要求汇总表 .....	26
附录 C (规范性) 常用监测设备的选型要求、主要技术指标及安装施工要求 .....	30

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由四川省交通运输厅提出、归口并解释。

本文件主要起草单位：四川省公路规划勘察设计研究院有限公司。

本文件参加起草单位：四川省交通运输厅高速公路管理局、四川省交通运输厅公路局。

本文件主要起草人：吴涤、王万全、张敏、许磊、蒋军、翟艺阳、孙振、丁大攀、樊鸿、罗云飞、罗俊、刘昊、余翔、唐澈、王莹峰、李龙景、张二华、彭博、李宁、邝靖、曾艳、慈彬、孙璐、王钟文。

本文件首次发布。

地方标准信息服务平台

# 山区公路混凝土桥梁结构安全风险监测指标体系设计与预警技术指南

## 1 范围

本文件规定了山区公路混凝土桥梁结构安全风险监测的总则、术语和定义、基本规定、桥梁结构安全风险辨析、监测指标体系设计、安全预警与应急响应、安全评估与养管决策技术支持等。

本文件适用于四川省内山岭重丘区高速公路和各级普通公路简支梁桥、连续（刚构、T构）梁桥及上承式拱桥等结构型式的混凝土桥梁，其他桥梁可参照使用。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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。

- GB/T 21296 动态公路车辆自动衡器
- GB 50057 建筑物防雷设计规范
- GB 50139 内河通航标准
- GB 50982 建筑与桥梁结构监测技术规范
- JTG H11 公路桥涵养护规范
- JTG/T H21 公路桥梁技术状况评定标准
- JT/T 1037—2016 公路桥梁结构安全监测系统技术规程
- JTG/T 2231-01 公路桥梁抗震设计规范

## 3 总则

3.1 为规范山区公路混凝土桥梁结构安全风险监测系统的监测指标体系设计、安全预警和评估，提高监测系统建设质量，强化预警评估实效，特制定本标准。

3.2 桥梁结构安全风险监测应作为现行公路桥梁养护管理制度的有效补充，与桥梁经常检查、定期检查和特殊检查形成互补机制。

3.3 桥梁结构安全风险监测应积极稳妥地应用新方法、新技术和新设备。采用本标准或现行标准之外的新方法、新技术和新设备时，应满足下列条件之一：

- a) 与成熟的方法、技术和设备进行比对试验，结果稳定可靠；
- b) 通过科技成果评价，并经技术适用性论证。

### 条文说明

桥梁结构安全风险监测是桥梁工程、传感测试、计算机科学、光电通信、风险管理、物联网、大数据等学科的前沿交叉领域，新方法、新技术和新设备发展迅猛。在确保监测系统建设质量的前提下，鼓励推广应用新方法、新技术和新设备。

3.4 山区公路混凝土桥梁的结构安全风险监测，除应符合本标准的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

## 4 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 4.1

#### 桥梁结构安全风险监测系统 safety risk monitoring system for bridge structures

由安装在桥梁上的传感元件以及数据采集与传输、数据处理与管理等软硬件构成，对桥梁荷载与环境作用以及桥梁结构响应进行测量、采集、传输、处理和分析，并对桥梁结构正常使用功能与安全状态进行预警和评估的集成系统。

[来源：JT/T 1037—2016，3.1]

### 4.2

#### 结构安全风险辨析 structural safety risk recognition and analysis

全面考察桥梁结构受力特点及材料特性、结构既有缺损（或病害）、荷载作用和外部环境变化等因素及其相互作用和叠加效应，辨识结构安全事故、风险事件及其对应的风险源，定性或定量分析其发生概率和损失程度，评定结构安全风险等级的方法和过程。

### 4.3

#### 安全风险等级 safety risk level

表征风险对桥梁结构运行安全的综合影响程度。结合风险发生概率和风险损失进行综合评估，分为I级（低度风险）、II级（中度风险）、III级（高度风险）、IV级（极高风险）共四个等级。

### 4.4

#### 结构安全事故 structural safety accident

结构安全风险爆发导致的最终事件结果，可特指某一特定的结构安全事故，也可指各类结构安全事故的总和。在事故树分析中又称为顶上事件，是结构安全风险辨析的最终对象。

### 4.5

#### 风险源 risk source

桥梁结构本身、荷载作用或环境要素中可能引发结构安全事故的最基本原因，在事故树分析中又称基本事件或底事件。

### 4.6

#### 中间事件 intermediate event

在事故树中位于底事件与顶上事件之间，由风险源引发并可能最终导致结构安全事故的对象事件。

### 4.7

#### 风险事件 risk event

事故树分析中对顶上事件、中间事件和底事件等对象事件的总称。

## 4.8

**荷载与环境参数 load and environmental parameter**

表征桥梁结构遭受外部荷载及自然环境作用的指标参数，包括车辆荷载、风荷载、地震动、温度、降雨、地基变位、基础冲刷等。

## 4.9

**结构整体响应 structural global response**

在荷载与环境作用下桥梁结构整体的振动、位移、变形和转角等响应。

[来源：JT/T 1037—2016，3.3，有修改]

## 4.10

**结构局部响应 structural local response**

在荷载与环境作用下桥梁结构局部或构件的应变、裂缝、支座反力等响应。

[来源：JT/T 1037—2016，3.4，有修改]

## 4.11

**状态特征指标 state characteristic**

对单一监测指标进行数据处理或对多项监测指标进行相关性分析后，得到的表征结构安全状态的物理量，也是结构安全预警和评估过程中的基本数据单元。

## 4.12

**阈值 threshold**

与状态特征指标一一对应，表征桥梁结构安全状态值正常变化范围的界限值。

## 4.13

**安全预警 safety forewarning**

当桥梁结构的状态特征指标超过阈值，并根据预设的专业规则判定其影响结构安全后，向相关责任方发出安全警告的行为。

## 4.14

**预警级别 warning level**

表征桥梁结构当前状态对运行安全的影响程度，分为Ⅰ级（一般）、Ⅱ级（较重）、Ⅲ级（严重）、Ⅳ级（特别严重）共四个等级，依次用蓝色、黄色、橙色和红色表示。

## 4.15

**安全状态等级 safety level**

表征桥梁结构运行安全的水平，分为1类（完好状态）、2类（较好状态）、3类（中等损伤状态）、4类（严重损伤状态）、5类（危险状态）共五个等级。

## 4.16

**定期评估 regular assessment**

为确定桥梁结构整体或局部构件安全状态，对监测数据和人工检查成果进行的周期性分析和评估。

4.17

**专项评估 special assessment**

桥梁遭受地震、滑坡、泥石流、洪水、车船或漂流物撞击、火灾、化学剂腐蚀、超重车辆过桥等突发事件后，为确定桥梁结构整体或局部构件安全状态而进行的分析和评估。

[来源：JT/T 1037—2016，3.11，有修改]

4.18

**应急响应 emergency response**

保障桥梁结构安全运行的快速应对措施，包括但不限于：应急检查、交通管制、专项检查、专项评估、临时加固等。

4.19

**决策技术支持 technical support for decision making**

根据自动化监测数据和人工检查成果，综合评估桥梁结构安全状态，为制定科学合理的桥梁运营管理方案和养护维修计划提供技术支撑的行为。

## 5 基本规定

### 5.1 桥梁结构安全风险监测应与现行公路桥梁养护管理制度相结合，主要规定如下：

- a) 桥梁结构安全风险监测应与桥梁人工检查制度形成互补机制，定期将监测数据及其分析处理结果与经常检查、定期检查和特殊检查结果进行比对和分析，综合评估桥梁结构安全状态；
- b) 监测系统的安全预警与应急响应机制应与桥梁突发事件应急预案配套；
- c) 制定桥梁运营管理方案和养护维修计划时，除应依据桥梁定期检查或特殊检查的评定结果外，还应综合考虑基于监测数据分析得到的桥梁结构安全评估结论和建议；
- d) 宜利用桥梁结构安全风险监测系统建立健全信息化的桥梁技术档案，并及时更新技术数据，保障技术档案真实、完整和使用方便。

#### 条文说明

现行公路桥梁养护管理制度对发现桥梁结构的缺损（或病害）、及其他运行安全隐患，主要依赖于日常巡查、经常检查、定期检查和特殊检查。桥梁结构安全风险监测系统的建设和长期有效运行，可有效地克服上述人工检查方法的局限和不足，但无论从政策制度层面还是技术经济层面来看，桥梁结构安全风险监测尚不能完全替代现行人工检查手段。准确评估桥梁结构安全状态需要综合监测数据和人工检查结果进行对比分析，形成互补机制。

### 5.2 桥梁结构安全风险辨析是安全风险监测的重要前期工作，主要规定如下：

- a) 监测系统建设项目立项时宜将桥梁结构安全风险辨析结果作为重要的立项依据；
- b) 监测指标体系设计时应根据桥梁结构安全风险辨析结果进行监测指标选取和测点布设。

### 5.3 根据监测目的和适用场景不同，桥梁结构安全风险监测系统可分为综合集成监测系统、特定风险监测系统和应急监测系统，其定义和适用范围如表1所示。

表1 桥梁结构安全风险监测系统分类

序号	类别	名称	监测目的	适用场景
1	A类	综合集成监测系统	以保障桥梁结构整体安全和使用功能为目标，对结构安全风险进行全面综合的长期监测	常适用于结构复杂的重要大型桥梁，或服役时间较长、结构技术状况明显下降的桥梁，全面梳理和分析其结构安全风险隐患后，可对多个风险致因进行全面监测和综合评估
2	B类	特定风险监测系统	针对某一项或几项特定的结构安全风险进行长期监测	主要适用于针对明确的风险致因而实施的专项监测。此外，由于新建桥梁结构技术状况较好，也可采用B类系统针对其主要关键指标进行专项监测，后期再视实际需要逐步扩展升级为A类监测系统
3	C类	应急监测系统	针对特殊风险或响应应急监测任务，而进行中短期临时监测	通常为临时的应急监测任务而设，如为保障交通管制和维修加固期间结构安全和施工安全的临时监测任务。其使用期限因监测任务需求的不同而变化，一般不超过3年。应急监测任务完成后，可拆除设备另做他用，也可视实际需要改造为B类或A类监测系统

5.4 新建桥梁的结构安全风险监测系统宜与桥梁主体结构同步建设，并与桥梁主体结构同步验收；监测指标体系设计宜兼顾施工监控和成桥荷载试验的技术要求，采取措施使施工期和运营期监测数据保持连续、一致。

#### 条文说明

桥梁结构施工监控及成桥荷载试验阶段采集的数据对桥梁运营期监测数据的分析和评估有重要参考意义。若新建桥梁的运营期结构安全风险监测系统与主体结构同步建设，则有条件在部分关键测点上使运营期监测系统的数据与施工监控及成桥荷载试验测试系统的数据建立对应关系，从而达到使施工期和运营期监测数据保持连续和一致的目标。

5.5 监测系统建设与运维的各参与单位应明确责任分工，保障监测系统的持续有效运行，形成安全预警与应急响应的联动机制、以及安全评估与养管决策的支持机制。

## 6 桥梁结构安全风险辨析

### 6.1 一般规定

6.1.1 监测系统设计时应逐桥进行结构安全风险辨析，A类和B类监测系统宜分别在立项需求分析阶段和监测指标体系设计阶段进行结构安全风险辨析，C类监测系统可在系统方案设计时进行一阶段的结构安全风险辨析。

6.1.2 桥梁结构安全风险辨析应全面考察桥梁结构受力特点和材料特性、结构既有缺损（或病害）、荷载作用与外部环境变化等因素及其相互作用和叠加效应，进行充分辨识和综合分析。

6.1.3 桥梁结构安全风险辨析可采用专家调查法、事故树分析法、概率分析法、层次分析法、模糊综合评价法等，应根据项目不同工作阶段的分析目标和深度要求，结合具体项目需求选择其中一种方法或多种方法相结合进行综合辨识分析。

6.1.4 在立项需求分析阶段和监测指标体系设计阶段，宜分别采用不同的桥梁结构安全风险辨析方法，具体规定如下：

- a) 在系统立项需求分析阶段应以评定桥梁结构安全风险等级为目的，可重点辨识主要风险事件并对风险事件发生的概率和损失进行定性分析；
- b) 在监测指标体系设计阶段应以科学选取监测指标、合理优化测点布设方案为目标，宜对结构安全风险进行全面系统的梳理辨识，并对风险事件发生的概率和损失进行定量分析。

## 6.2 立项需求分析阶段

6.2.1 监测系统立项需求分析阶段的桥梁结构安全风险辨析宜采用专家调查法，可参照附录A.1的方法和步骤进行。

### 条文说明

专家调查法又称专家评估法，是在专家个人判断和专家会议方法的基础上发展起来的，它以专家作为索取信息的对象，依靠专家的知识和经验，由专家通过调查研究对问题作出判断、评估和预测的一种定性分析方法。

在下列3种典型情况下，专家调查法特别适用，也是唯一可用的调查方法：1) 数据缺乏：数据是各种定量研究的基础，由于数据不足、或数据不能反映真实情况而无法采用定量分析方法时；2) 新技术评估：对于一些崭新的科学技术，在没有或缺乏数据的条件下，专家的判断往往是唯一的评价根据；3) 非技术因素起重要作用：当决策的问题超出了技术和经济范围而涉及到生态环境、公众舆论以至政治因素时，这些非技术因素的重要性往往超过技术本身的发展因素，因而过去的数据和技术因素就处于次要地位，在这种情况下只有依靠专家才能作出判断。

在立项需求分析阶段的桥梁结构安全风险辨析过程中，以上3种典型情况都需要面对和克服，因此专家调查法几乎是唯一可用的定性分析方法。

6.2.2 根据桥梁结构安全风险辨析结果，公路桥梁的结构安全风险等级宜分为I级（低度风险）、II级（中度风险）、III级（高度风险）、IV级（极高风险）共四个等级，各风险等级的桥梁采取的监测策略宜符合下列规定：

- a) III级或IV级桥梁应进行桥梁结构安全风险监测；
- b) II级桥梁宜进行桥梁结构安全风险监测；
- c) I级桥梁可进行桥梁结构安全风险监测。

桥梁安全风险等级及其对应的监测需求和策略汇总如表2所示。

表2 桥梁安全风险等级及其对应的监测需求和策略

风险等级		风险程度	监测需求	监测策略
I 级	低度风险	可以接受，风险完全可控。	人工检查为主，可进行桥梁结构安全风险监测。	定期检查
II 级	中度风险	有条件接受，风险基本可控。	应对风险相关的荷载与环境作用或结构响应进行针对性监测，并结合人工检查成果进行及时预警和综合评估。	B类监测系统 + 定期检查
III 级	高度风险	有条件接受，风险较难控制。	应对风险相关的荷载与环境作用和结构响应进行全面监测，并结合人工检查成果进行及时预警和综合评估。	A/B类监测系统 + 定期检查或特殊检查

表2 桥梁安全风险等级及其对应的监测需求和策略（续）

风险等级		风险程度	监测需求	监测策略
IV级	极高风险	不可接受，风险不可控。	应对风险相关的荷载与环境作用和结构响应进行全面监测，并结合人工检查成果进行及时预警和综合评估。	A类（C类）监测系统 + 定期检查或特殊检查

6.2.3 桥梁结构安全风险等级评定宜采用风险评价矩阵方法，根据风险发生概率和风险损失的估测等级，查表3确定风险等级。

表3 结构安全风险等级表

风险发生概率	风险损失				
	1	2	3	4	5
1	I	I	II	II	III
2	I	II	II	III	III
3	II	II	III	III	IV
4	II	III	III	IV	IV
5	III	III	IV	IV	IV

注：风险等级=风险发生概率×风险损失，“×”表示风险发生概率和风险损失的不同级别的组合。

6.2.4 桥梁结构安全风险的发生概率分为1、2、3、4、5级，宜根据风险发生概率估测值进行定量评价，也可在过去类似工程案例或事故记录的基础上进行定性评价，评价标准可参照表4。

表4 风险发生概率等级评价标准表

等级	定量评价标准（概率区间）	定性评价标准
1	$P_f < 0.0003$	几乎不可能发生
2	$0.0003 \leq P_f < 0.003$	极小概率发生
3	$0.003 \leq P_f < 0.03$	很少发生
4	$0.03 \leq P_f < 0.3$	偶然发生
5	$P_f \geq 0.3$	很可能发生

注1： $P_f$ 为概率估测值，当概率估测值难以取得时，可用年发生概率代替。  
注2：风险发生概率等级宜优先采用定量评价标准确定；当无法进行定量计算时，可在过去类似工程案例的基础上采用定性评价标准确定。

6.2.5 桥梁结构安全的风险损失等级分为1、2、3、4、5级，应分别从人员伤亡、经济损失及环境影响等三方面进行评价。当多种损失同时产生时，应采用就高原则确定风险损失等级。人员伤亡、经济损失及环境影响的等价评价标准可分别参照表5、表6及表7。

表5 人员伤亡等级评价标准表

等级	判断标准
1	重伤人数 5 人以下
2	3 人以下死亡（含失踪）或 5 人以上 10 人以下重伤
3	3 人以上 10 人以下死亡（含失踪）或 10 人以上 50 人以下重伤
4	10 人以上 30 人以下死亡（含失踪）或 50 人以上 100 人以下重伤
5	30 人以上死亡（含失踪）或 100 人以上重伤

注1：参考国务院《生产安全事故报告和调查处理条例》和《企业职工伤亡事故分类标准》（GB 6441—86）。

注2：“以上”包含本数，“以下”不包含本数，下同。

表6 经济损失等级评价标准表

等级	判断标准
1	经济损失 500 万元以下
2	经济损失 500 万元以上 1000 万元以下
3	经济损失 1000 万元以上 5000 万元以下
4	经济损失 5000 万元以上 10000 万元以下
5	经济损失 10000 万元以上

注1：参考国务院《生产安全事故报告和调查处理条例》。

注2：对总造价较低的工程，如石拱桥等，可采用相对经济损失进行判定。

表7 环境影响等级评价标准表

等级	判断标准
1	涉及范围很小，无群体性影响，需紧急转移安置人数 50 人以下
2	涉及范围较小，一般群体性影响，需紧急转移安置人数 50 人以上 100 人以下
3	涉及范围大，区域正常经济、社会活动受影响，需紧急转移安置人数 100 人以上 500 人以下
4	涉及范围很大，区域生态功能部分丧失，需紧急转移安置人数 500 人以上 1000 人以下
5	涉及范围非常大，区域内周边生态功能严重丧失，需紧急转移安置人数 1000 人以上，正常的经济、社会活动受到严重影响

注1：参考《建设项目环境保护管理条例》和《中华人民共和国环境影响评价法》。

### 6.3 监测指标体系设计阶段

6.3.1 监测指标体系设计阶段的桥梁结构安全风险辨析宜采用事故树分析法，可参照附录 A.2 的方法和步骤进行。

#### 条文说明

事故树分析法起源于故障树分析法，不仅能分析出事故的直接原因，而且能深入地揭示出事故的潜在原因，用它描述事故的因果关系直观明了、思路清晰、逻辑性强，既可定性分析，又可定量分析。采

用该方法进行桥梁结构安全风险辨析的基本原则和方法是“以顶上事件为干，以中间事件为枝、以底事件为叶”进行从结果到原因的逐层逆向溯源分析。既可定性评价每一风险事件的结构重要度排序，也可定量测算每一层次风险事件的发生概率和损失程度，并定量分析每一风险源的结构重要度系数、概率重要度系数等指标。事故树分析结果是科学选取监测指标、合理优化测点布设方案的基础。

**6.3.2 底险源（底事件）的发生概率测算应以类似工程案例或事故记录为基础。宜优先进行定量测算，即通过类似工程的长期运行情况统计其正常工作时间、风险源（底事件）发生次数及修复时间等原始数据，近似求得风险源的发生概率；当难以定量测算时，亦可参照表 4 将定性评价结果进行量化处理。**

**6.3.3 结构安全事故（顶上事件）的发生概率应以风险源（底事件）发生概率的测算结果为基础，根据事故树的逻辑关系分层测算得到。**

**6.3.4 风险源（底事件）的结构重要度系数、概率重要度系数及关键重要度系数等参数可根据事故树的逻辑关系测算得到，宜作为监测指标选取的参考因素。。**

#### 条文说明

结构重要度系数：假设各风险源（底事件）的发生概率相等，仅从事故树的逻辑结构上表征某底事件对结构安全事故（顶上事件）影响程度的参数。

概率重要度系数：表征某个风险源（底事件）发生概率的变化引起结构安全事故（顶上事件）发生概率变化程度的参数。

关键重要度系数：表征某个风险源（底事件）发生概率的变化率引起结构安全事故（顶上事件）发生概率的变化率的参数。

**6.3.5 结构安全事故（顶上事件）的风险损失测算应以类似工程案例或事故记录为基础，分别从人员伤亡、经济损失和环境影响三方面进行，具体评价方法和准则可参照 6.2.5 的相关规定。**

**6.3.6 安全事故（顶上事件）的经济损失测算应包括：桥梁应急抢修成本、交通管制和保通成本、维修加固或恢复改建成本、修复期通行费损失、社会车辆及其它民用设施损毁等在内的所有直接成本和间接经济损失。**

## 7 监测指标体系设计

### 7.1 一般规定

**7.1.1 监测指标体系设计应包括监测指标选取、测点布设、监测设备选型及安装施工设计。**

#### 条文说明

监测指标选取，即科学选取桥梁结构安全风险监测指标。测点布设，即在桥梁结构及其周边环境的空间坐标系内合理布设监测测点。

**7.1.2 监测指标宜分为荷载与环境、结构整体响应与结构局部响应三类，应符合 JT/T 1037—2016 中 4.3.2 的相关规定。**

**7.1.3 选取监测指标和布设测点时，应在桥梁结构安全风险辨析结果的基础上，遵循“灾害—风险分析”、“目标—功能分析”、“功能—成本分析”三个基本原则。**

#### 条文说明

桥梁结构安全风险监测系统不同于传统的桥梁健康监测系统，应立足于桥梁结构运行安全风险，监测指标选取和测点布设应具有代表性、实用性、经济性的特点，主要遵循以下基本原则：

- 1) “灾害—风险分析”原则

对具体监测指标的选取应建立在对桥梁结构安全风险辨析结果的基础上，避免出现以下情况：（1）危及结构安全的重要风险事件或致灾风险未被覆盖，安全隐患突出暴露；（2）在不必要的监测指标上花费重金，得到对安全预警和评估无用或无法处理分析的海量闲置数据。

### 2) “目标 - 功能分析” 原则

桥梁结构安全风险监测系统总体目标主要是降低桥梁结构的安全风险，提高运营期养护维修管理水平。服务于此目标，监测指标的选取应主要瞄准与桥梁结构垮塌等顶上风险事件或其直接致因，宜尽量选取靠近事故树主干并与结构安全密切相关的环境、荷载和结构响应参数或指标。

### 3) “功能 - 成本分析” 原则

监测系统的功能需求直接决定监测系统建设和运行的成本预算。对于特定的桥梁，监测系统覆盖的风险事件和风险源越多，系统就越庞大，建设和维护成本也越高。另一方面，桥梁结构的安全评估应结合实时监测数据和人工检查成果进行综合分析，安全监测系统应与人工检查制度形成互补机制，监测系统不能准确识别的安全风险可通过人工定期巡检或应急检查来弥补。综上，应把握安全监测系统与人工检查互补机制的平衡点，力求达到桥梁结构全生命周期内的性价比最优，为此监测系统设计需进行“功能 - 成本分析”。

7.1.4 A类和B类监测系统的监测设备除应符合 JT/T 1037—2016 中 4.1.9 的相关规定外，对于埋入式监测设备还宜按 7.2.1.3 d) 项的要求布设相应的外置式监测点。

### 条文说明

对于埋入式传感器，可同时布设与其监测数据强相关的外置式传感器，便于通过相关性分析建立埋入式传感器与外置式传感器监测数据之间的对应关系，以备埋入式传感器失效后，外置传感器能继续“接力”监测，从而保障监测数据的连续性和一致性。

## 7.2 监测指标选取与测点布设

### 7.2.1 总体要求

7.2.1.1 选取监测指标时，应根据桥梁结构安全风险辨析结果优先选取风险损失大、发生概率高、或对顶上事件重要性系数高的风险事件进行监测。此外，还应结合桥梁结构受力特点和材料特性、既有缺损（或病害）状况、桥位周边环境及桥梁实际运行条件等统筹考虑，相互验证，便于综合分析。

7.2.1.2 当结构安全风险辨析结果表明桥位处的水文、地质、气候等各类自然灾害及人为活动对桥梁结构安全有直接影响时，应将灾害和活动本身纳入到监测指标体系中。

7.2.1.3 测点布设应基于数据处理分析与安全预警评估的需求，根据结构计算分析、结构危险性和易损性分析结果确定待监测的关键构件和部位，遵循“代表性、实用性、经济性、少而精”的原则进行测点布设方案优化，总体技术要求如下：

- a) 应根据桥梁结构的受力分析结果对测点布设方案进行优化，实际监测数据宜与理论计算分析结果建立一一对应关系；
- b) 宜对结构构件进行重要性、危险性和易损性分析，并将分析结果作为测点布设方案优化的依据；
- c) 对施工过程中发生过质量安全事故，经检测、处理与评估后恢复施工或使用的桥梁部位应布设对比测点；
- d) 针对采用埋入式传感器的监测点，宜同时布设与其相关性较强的外置式监测点；
- e) 测点数量和数据采集设备接入能力应具有适度冗余，以确保系统的可靠性，并满足系统未来改进、扩充和升级的需要。

7.2.1.4 对桥梁结构响应监测指标的选取及测点布设宜以结构整体响应监测为主，结构局部响应监测为辅。

### 条文说明

相较于应变、裂缝等结构局部响应指标，桥梁结构整体响应指标，如主梁挠度、结构振动等，与桥梁结构安全状态的相关性更加直接。选择与结构安全强相关的整体响应指标作为输入，可显著增加桥梁结构安全预警的有效性和安全评估的可靠性。

#### 7.2.2 荷载与环境类监测指标

7.2.2.1 各级普通公路路网中超载超限车辆管控困难的桥梁、大件运输公路关键路段代表性桥梁宜采用不停车称重方法对车辆荷载参数进行实时监测，可辅以车牌识别摄像机组成“非现场执法”抓拍系统。监测指标宜包括断面车流量、车型、车轴重、轴数、车辆总重、车速等，测点布设应符合下列规定：

- 宣布设在桥头路基或桥跨范围内有稳定支撑、振动较小部位的混凝土结构铺装层内，应覆盖所有行车道；
- 称重传感器安装的车流断面处宜配套高清摄像机进行辅助监测；
- 现场安装施工时还应符合附录C.1的相关规定。

### 条文说明

目前，省内高速公路运管部门对超载超限车辆管控的成效显著，各级普通公路路网中个别地区超载超限车辆屡禁不止，宜对各级普通公路路网中超载超限车辆管控困难的关键路段代表性桥梁采用不停车称重方法对车辆荷载参数进行实时监测，还可辅以车牌识别摄像机组成“非现场”执法系统。其一，可为准确评估车辆荷载对桥梁结构安全的影响提供基础数据；其二，也可进一步加强“治超”效果。

大件运输公路关键路段代表性桥梁实施车辆荷载监测的目的同上。通常，大件运输公路一幅按通行大件荷载设计，而另一幅则为普通公路，宜优先对普通公路桥幅进行监测，以辅助其日常管理。

#### 7.2.2.2 温度监测包括环境温度监测和结构温度监测，应符合下列规定：

- 超静定结构桥梁应对环境温度进行监测，布设梁端位移监测点的静定结构桥梁宜对环境温度进行监测，测点布设宜结合桥位处环境温度的空间分布特点进行；
- 结构温度测点布设宜与应变监测的温度补偿测点统一设计。

### 条文说明

环境温度和结构温度的实测数据一般不直接用于安全预警，但却是结构受力和变形分析的重要输入参数。

#### 7.2.2.3 条件允许时宜对混凝土桥梁构件内部封闭空间的相对湿度进行监测。

7.2.2.4 对抗震设防类别为A类且抗震设防烈度8度及以上的桥梁应进行地震动监测，其余桥梁可根据抗震设计要求和安全风险评估结果进行监测。地震动监测应测量地表振动，主要监测指标为两岸（桥台等处）地表场地加速度、主墩或拱座底部加速度等，测点布设应符合下列规定：

- 长度小于600m的桥梁，宜布设一个测点；
- 长度不小于600m的桥梁，考虑地震地面运动非一致性，宜增设一个测点；
- 测点应布设于地表附近相对固定不动的位置：桥岸区域可将测点布设于护岸、桥台、近桥址监控中心等自由场地上，水体区域可布置于桥墩底部或承台顶部，并易于防护和维修的位置。

### 条文说明

地震动监测数据除直接用于安全预警外，也可为震后桥梁结构安全专项评估提供基础数据。关于桥梁抗震设防分类和设防标准的相关规定，请参照《公路桥梁抗震设计规范》（JTGT 2231-01）。

#### 7.2.2.5 根据墩台基础类型和人工检查报告，应对浅埋扩大基础和冲刷深度已接近或超过设计限值的桩基础进行冲刷深度和水位监测；测点布设宜选择冲刷最大区域或墩台基础薄弱区域。

7.2.2.6 根据桥位处地质灾害体的类型、规模、发育程度和地形地貌特点，并对其影响桥梁结构安全的概率、形式和程度进行综合分析评估后，宜结合桥梁结构安全风险等级评定结果，针对具体风险选择性监测桥梁周边的地表位移和倾斜度、地表裂缝、深部位移、降雨量、地下水位等指标，宜符合下列规定

- 风险等级为Ⅰ级的可不监测；
- 风险等级为Ⅱ级的可仅对桥梁结构响应进行监测；
- 风险等级为Ⅲ级、Ⅳ级的宜同时对灾害体和桥梁结构响应进行监测，并做相关性分析；
- 测点布设宜根据灾害体的规模和具体监测项目综合考虑。

#### 条文说明

鉴于我省山区公路桥梁桥位处地质灾害相对高发的特点，在《建筑与桥梁结构监测技术规范》（GB 50982—2014）、《公路桥结构安全监测系统技术规程》（JT/T 1037—2016）的基础上新增了本条。

7.2.2.7 对船舶（漂流物）撞击的监测应符合下列规定：

- 航道等级为Ⅰ级至Ⅴ级且未设防撞设施的桥梁，宜对通航孔跨进行船舶撞击监测，可对非通航孔跨及其它存在大型漂流物撞击风险的跨河桥梁在撞击风险区进行撞击监测；
- 宜选择具有区域入侵自动识别功能的视频（或红外线）摄像系统，在船只偏离航道进入危险水域时自动识别，并通过声光发生装置提醒驾驶人员，避免事故发生或降低事故损失；
- 可采用拾振器监测撞击过程中的结构振动响应，测点宜布设在易遭受撞击的桥墩处，且同时监测水平面内纵桥向和横桥向结构振动响应。

#### 条文说明

关于航道等级的相关规定，请参照《内河通航标准》（GB 50139）。

7.2.2.8 宜对桥面交通、易发生车船撞击事件的桥下空间进行视频监测。

#### 条文说明

按公路交通运行状态“可视、可测、可控”的要求，宜对桥面交通、易发生车船撞击事件的桥下空间进行视频监测。

### 7.2.3 结构整体响应类监测指标

7.2.3.1 结构整体响应监测指标选取和测点布设应根据结构振动、变形和位移特点，并结合系统参数识别及安全预警和评估需求综合确定。

7.2.3.2 结构振动测点布设应符合以下规定：

- 应根据桥梁结构类型及特点，确定结构振动监测和模态分析所需振型阶数：
  - 简支梁桥宜至少监测竖向1阶振型；
  - 连续（刚构）梁桥、上承式拱桥宜监测竖向2至3阶振型；
  - 对墩高超过40m的梁桥或矢高超过20m拱桥，可增设水平向拾振器，监测结构纵向及横向低阶振动。
- 应根据桥梁结构动力计算分析结果及所需振型阶数布设测点，拾振器宜布设在结构各阶振型振幅最大或较大部分，并避开节点位置。

7.2.3.3 结构整体变形和位移测点的布设应根据结构受力分析结果，宜优先选择主梁、主拱等关键受力构件的变形、位移包络曲线中最大或较大部分。

7.2.3.4 受地灾或洪水威胁的桥跨结构，宜同时对上、下部结构位移进行监测；除符合7.2.2.5、7.2.2.6的相关规定外，还宜对墩（台）倾斜度、墩（台）顶偏位、及墩（台）梁间相对位移等结构整体响应类监测指标进行监测。

### 条文说明

受地灾或洪水威胁的桥跨结构，安全监测应关注的主要风险是由于基础承载能力不足或下部结构失稳导致的桥梁整体坍塌，以及上、下部结构间相对位移过大导致落梁的风险。

#### 7.2.4 结构局部响应类监测指标

7.2.4.1 结构局部响应监测指标选取和测点布设应根据结构计算分析和易损性分析结果确定。

7.2.4.2 宜对主要承重构件关键截面的应变进行监测，测点布设应符合以下规定：

a) 宜根据结构受力计算分析结果，选择恒载作用下应力水平较高或安全余度较低的关键构件、截面和部位进行静态监测，选择可变荷载作用下应力幅较大或安全余度较低的关键构件、截面和部位进行动态监测；

b) 宜根据结构易损性分析结果，选择易破坏或破坏后易导致结构整体失稳的关键构件、截面和部位进行监测；

c) 用于监测恒载作用下结构应变的传感器，应在桥梁新建或加固改造过程中，承重构件尚未承受恒载前预先埋设在关键截面测点处；

d) 对应变场分布复杂的构件、截面和部位，宜布设双向或三向应变测点。

7.2.4.3 可对混凝土桥梁主要承重构件关键截面的钢筋应力进行监测，测点布设应符合以下规定：

a) 宜根据结构受力计算分析结果，选择恒载作用下应力水平较高或安全余度较低的关键构件、截面和部位进行静态监测，选择可变荷载作用下应力幅较大或安全余度较低的关键构件、截面和部位进行动态监测；

b) 宜根据结构易损性分析结果，选择易破坏或破坏后易导致结构整体失稳的关键构件、截面和部位进行监测；

c) 应在桥梁新建或加固改造过程中，布设绑扎钢筋笼架时预先安装在关键截面的被测钢筋上。

7.2.4.4 宜对连续（刚构）梁桥体外或体内预应力钢束的有效预应力进行监测，应符合以下规定：

a) 可采用振动频率法、磁通量测试法、锚垫板承压法及其他不影响结构安全的方法监测钢束有效预应力；

b) 宜优先选择恒载作用下应力水平高或活载作用下应力幅较大的代表性钢束布设测点。

7.2.4.5 宜对关键支座的支座反力和位移进行监测，监测项目应包括支座位移或支座反力，测点布设应符合下列规定：

a) 对于易发生倾覆的独柱墩桥梁、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应布置支座反力或支座位移监测设备；

b) 支座反力的监测宜选用测力支座；测力支座在使用前，应重新设置零点，并在支座上加载标准重物，修正支座参数；

c) 支座位移的监测应能判定支座脱空情况；采用位移监测设备监测支座位移时，传感器量测方向应平行于支座反力方向。

7.2.4.6 宜根据桥梁结构受力分析、易损性分析结果或设计要求，对混凝土主要承重构件上宽度超限的代表性受力裂缝进行裂缝宽度监测，传感器布设时测量轴应与裂缝走向垂直。

7.2.5 常见山区公路混凝土结构桥梁的监测指标和测点布设技术要求汇总见附录B。

### 条文说明

为方便使用，本标准将7.2.1至7.2.4的相关技术要求汇总列于附录B。附录B除对常见监测指标进行了梳理汇总外，针对结构响应监测指标，结合常见桥型给出了初步的测点布设方案，具体使用时还应符合7.2.1至7.2.4条的相关技术要求。

### 7.3 监测设备选型与安装施工设计

7.3.1 监测设备选型前应充分了解桥梁周边环境和运营条件，以及现场供电、通信接入条件。对于供电及通信条件差、线缆敷设困难的桥梁，在监测设备选型时宜优先选择抗干扰性能好和功耗低的无线监测设备。

7.3.2 传感器选型应全面考虑量程、精度、分辨力、灵敏度、动态频响特性、抗干扰性、长期稳定性、耐久性、环境适应性、可更换性和经济性等要求，宜便于现场安装、集成调试和维修更换。

7.3.3 传感器布设及安装施工设计应考虑防雷、防静电、防尘、防水等防护措施。

7.3.4 传感器安装前应进行必要的校准或标定，系统运维过程中也宜定期标定或自校。

#### 条文说明

校准：由具有计量检验资质的第三方机构，依据校准规范或方法，确定传感器的示值误差，必要时加以修正的操作过程。

标定：由传感器生产厂商或用户，分别在出厂前或使用过程中对其测量精度进行检测，必要时加以修正的操作过程。

自校：传感器用户在使用过程中对其测量精度进行检测，必要时加以修正的操作过程。

7.3.5 应综合考虑信号调理方案、传感器接口匹配性及数据采样方案的要求进行数据采集设备的选型，其主要功能和性能技术指标宜符合下列规定：

- a) 传感器输出为电荷信号的，应选用电荷放大器进行信号调理和采集；
- b) 传感器输出为数字信号的，可选用基于 RS485、CAN、Modbus TCP 或 UDP 等技术标准的数据采集设备，并指定传输距离、传输带宽及速率等主要技术指标；
- c) 传感器输出为电流或电压模拟信号的，宜采用标准工业信号；可选用基于 PCI、PXI 等技术的集中式数据采集设备，并确定输入范围、分辨力、精度、传输带宽和速率；
- d) 传感器输出为光信号的，应采用专用的光纤解调设备；
- e) 电阻应变传感器输出应选用惠斯通电桥调理仪进行信号调理及放大；
- f) 电信号应进行光电隔离，以增强抗干扰能力；
- g) 数据采集设备的模数转换分辨力不宜低于 24 位；
- h) 静态模拟信号可选用多路模拟开关和采样保持器进行多路信号依次采集；
- i) 动态信号宜采用抗混滤波器进行滤波和降噪。

7.3.6 常用监测设备的具体选型要求、主要技术指标及安装施工要求应符合附录 C 的相关规定。

## 8 安全预警与应急响应

### 8.1 一般规定

8.1.1 桥梁结构安全预警宜分为风险事件管理和预警升级管理两个层级。实测风险监测指标超越预设阈值时，触发风险事件；对风险事件经专业规则链分析或专家评估后，认定影响桥梁结构安全状态时应调整桥梁预警级别。

#### 条文说明

许多桥梁结构健康/安全监测系统均基于现场传感器采集的实时监测数据是否超过预设的阈值标准判断结构安全状态，监测值超过阈值则预警。上述安全预警规则过于简单，易导致虚警误报频发或遗漏重要安全风险事件。本标准针对上述弊端，将安全预警管理分为两个层级，即：风险事件管理和预警状态管理。

8.1.2 监测系统应在试运行前预设风险事件的触发阈值和结构安全状态分析评估的专业规则链。在监测系统试运行期间及后期运维过程中还应根据桥梁周边环境、运行条件、结构性能的变化、以及对结构状态认知的深入，持续进行风险触发阈值和预警专业规则的补充、修正和优化，并定期检验其有效性。

#### 条文说明

桥梁结构是一个典型和复杂的事变系统，其性能和状态具有随时间变化的显著特性。一座桥梁从开始建造，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，因此安全风险事件的触发阈值和结构安全状态管理的专业规则链（预警专业规则）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，持续对阈值和预警触发专业规则进行补充、修正和优化，并定期检验。目标是在把控住结构主要安全风险的前提下，尽量减少虚警，降低系统运维的人力成本。

对阈值和预警触发专业规则有效性的定期检验可结合对桥梁结构安全评估报告的确认或评审环节展开。有效性检验主要考察两方面：1) 阈值和预警触发专业规则的设置是否覆盖桥梁结构主要安全风险？2) 结构安全评估周期内的系统误报率是否可接受？有无措施进一步降低误报率？

8.1.3 监测系统宜支持对风险事件触发、预警状态调整（包括自动升级和人工干预）、预警快讯/快报发布、应急响应措施等全过程事件的自动记录和归档。

## 8.2 风险事件管理

8.2.1 传感器采集到的实时监测数据不宜直接用于阈值比对，实时监测数据应经数据预处理及分析后得到表征结构安全风险的特征指标，再将其与预设阈值自动比对，状态特征指标超过阈值则触发风险事件。实时监测数据的处理分析应符合 JT/T 1037—2016 中 8.2 的相关规定。

8.2.2 对应于每项状态特征指标应设置阈值体系以实现风险事件的自动触发功能，阈值及其超限判据设置宜采用以下两种形式：

a) 容许阈值：判断状态特征指标是否处于正常范围的单向阈值。状态特征指标超出容许阈值的级别可表征该项状态的风险程度；状态特征指标未超出容许阈值时，其间距也可大致表征该项状态的安全富余度；

b) 区间阈值：判断状态特征指标是否处于正常范围的双向阈值。基于监测数据是否在合理值附近或者在合理范围之内进行异常分析和判断。

以上两种阈值判据的表达式及说明见表8。

表8 阈值判据的两种形式

序号	类别	表达式	阈值判据
1	容许阈值	$D < [D]$ 或 $D > [D]$	单向判据，根据特征指标与容许阈值之间的差距，可判断其该项状态的风险程度或安全富余度
2	区间阈值	$ D - P  < P_d$ $P_l < D < P_u$	双向判据，根据特征指标超出合理区间的距离，可判断其该项状态的风险程度

注： $D$ ——状态特征指标； $[D]$ ——容许阈值； $P$ ——状态理想值； $P_d$ ——区间阈值； $P_l$ ——区间下限值； $P_u$ ——区间上限值。

8.2.3 每项状态特征指标对应的阈值判据可分为1至3级设置，不同的阈值级别量化表征状态特征指标超出正常范围的程度。

8.2.4 常见状态特征指标对应的初始阈值设置宜符合下列规定：

- a) 车辆总重或轴重：容许阈值，1 级阈值=1.5 倍设计标准车辆荷载；2 级阈值=2.0 倍设计标准车辆荷载；
- b) 最高温度、最低温度、最大温差及最大温度梯度：容许阈值，1 级阈值=设计值；2 级阈值=1.2 倍设计值；
- c) 构件封闭空间内相对湿度：容许阈值，1 级阈值=50%；
- d) 水平地震动加速度峰值：容许阈值，1 级阈值=设计 E1 地震作用加速度峰值时；2 级阈值=设计 E2 地震作用加速度峰值；
- e) 位移或变形：容许阈值，1 级阈值=0.8 倍设计值；2 级阈值=设计值或一个月内超越 1 级阈值 10 次以上；
- f) 墩台冲刷深度：容许阈值，1 级阈值=0.7 倍设计冲刷深度；2 级阈值=设计冲刷深度；
- g) 主梁振动加速度：容许阈值，1 级阈值=舒适度限值，且持续时间超 30 分钟；1 级阈值=幅值持续增大，呈发散特征；
- h) 裂缝：容许阈值，1 级阈值=出现结构性裂缝；2 级阈值=裂缝宽度达 0.2mm；
- i) 体外预应力：容许阈值，1 级阈值=体外预应力相对损失 5%；2 级阈值=体外预应力相对损失 10%；
- j) 上述状态特征指标的更高级别阈值、其它特征指标的初始阈值、以及所有特征指标的阈值动态调整，宜结合被监测桥梁的技术规范限值、结构理论计算分析结果及历史监测数据统计分析结果等综合考虑确定。

### 8.3 预警等级管理

8.3.1 桥梁预警级别直接对应桥梁结构安全状态，宜分别设为绿色、蓝色、黄色、橙色和红色五个预警级别，总共代表桥梁结构安全的五种状态：

- a) 绿色安全状态：桥梁荷载与环境、结构响应等各项监测参数均在正常范围之内，满足设计和规范要求，桥梁使用功能正常，结构安全；
- b) 蓝色预警状态：个别结构状态特征指标超出 1 级阈值，对桥梁正常使用功能有轻度影响；
- c) 黄色预警状态：多项结构状态特征指标超出 1 级阈值，或个别结构状态特征指标超出 2 级阈值，影响桥梁的正常使用功能；
- d) 橙色预警状态：多项结构状态特征指标超出 2 级阈值，或个别与结构安全密切相关的状态特征指标超过 3 级阈值，严重影响桥梁的正常使用功能，若不及时处治会显著增加结构安全风险；
- e) 红色预警状态：对监测数据和专项检查结果进行技术评估或专家会审后确认，桥梁已出现危及结构安全的严重缺陷，或荷载与环境风险显著加剧，桥梁结构无法正常使用，随时可能造成桥梁结构安全事故，需进行临时交通管制或应急处治。

8.3.2 桥梁结构安全预警级别的升降级模式应包括系统自动触发和人工手动触发两种，宜符合下列规定：

- a) 预警升级：蓝色、黄色及橙色预警升级可由系统自动触发，也可由人工手动触发；升级红色预警应由人工手动触发。
- b) 预警降级：应由人工手动触发。

8.3.3 监测系统应支持自动判识各项状态特征指标超阈值触发的风险事件，并根据预设的预警专业规则链自动调整预警级别。预警专业规则链宜根据桥梁结构安全风险辨析结果、结构理论计算分析结果、前期预警记录及应急响应情况，并结合系统管理人员的专业技术经验进行设定和调整。

8.3.4 对安全预警级别进行人工调整，应根据技术分析评估（会审）的结论或应急响应过程中的现场检查、交通管制或应急处治的反馈结果实施。

8.3.5 桥梁结构安全预警的各级预警级别、触发模式、判别依据及其对应的结构安全状态汇总见表 9。

表9 预警级别及其对应的技术状态、触发模式和判别依据

预警状态	颜色标识	技术状态	触发模式	判别依据
绿色安全	绿色 RGB (0, 255, 0)	桥梁使用功能正常，结构安全	/	桥梁荷载与环境、结构响应等各项监测参数均在正常范围之内，满足设计和规范要求
蓝色预警	蓝色 RGB (0, 0, 255)	对桥梁正常使用功能有轻度影响	系统自动触发	个别结构状态特征指标超出 1 级阈值
黄色预警	黄色 RGB (255, 255, 0)	影响桥梁的正常使用功能	系统自动触发	多项结构状态特征指标超出 1 级阈值，或个别结构结构状态特征指标超出 2 级阈值
橙色预警	橙色 RGB (255, 125, 0)	严重影响桥梁的正常使用功能，若不及时处治会显著增加结构安全风险	系统自动触发 / 人工手动触发	多项结构状态特征指标超出 2 级阈值，或个别与结构安全密切相关的状态特征指标超过 3 级阈值
红色预警	红色 RGB (255, 0, 0)	桥梁结构无法正常使用，随时可能造成桥梁结构安全事故，需进行临时交通管制或应急处治	人工手动触发	对监测数据和专项检查结果进行技术评估或专家会审后确认，桥梁已出现危及结构安全的严重缺陷，或荷载与环境风险显著加剧

8.3.6 桥梁结构安全预警的发布形式应包括预警快讯和预警快报，并符合下列规定：

- a) 预警快讯：应包含桥梁名称、预警时间、预警级别、触发方式、对应状态特征指标及超出阈值级别等信息，由系统自动通过电话、短信、微信、系统内信息等快捷通讯方式中的一种或多种第一时间通知相关责任人；
- b) 预警快报：除预警快讯内容外，尚应包含桥梁概况、预警前桥梁运行监测或检查的概况、预警触发过程及原因分析、对桥梁安全状态影响的预判、及应急响应建议等内容，并经技术会审后提交相关责任单位。

8.3.7 桥梁结构安全预警体系框架宜符合图 1。

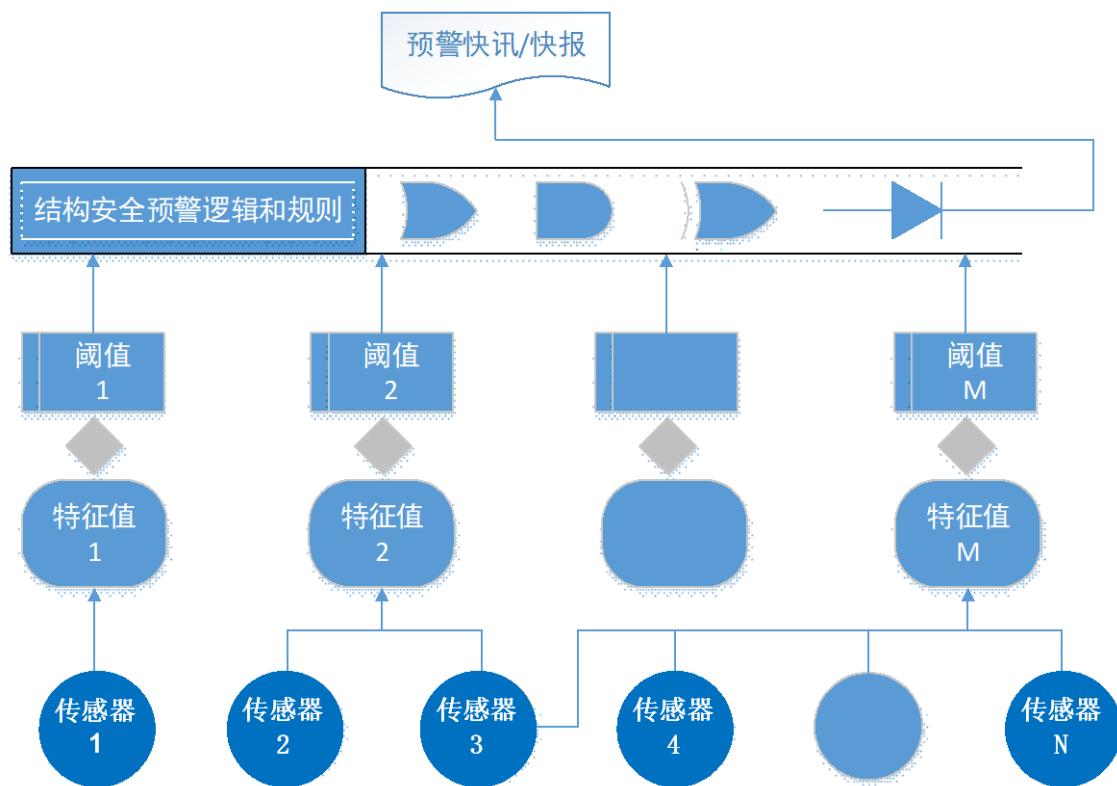


图1 桥梁结构安全预警体系框架示意图

#### 8.4 应急响应

**8.4.1** 桥梁突发事件应急预案应与结构安全预警机制配套，并形成联动机制，宜定期对其进行有效性进行检查评估；桥梁结构安全预警后应快速启动相应的应急预案，统筹协调监测系统的预警管理机制，及时采取相应的应急响应措施，预防桥梁坍塌等恶性事故发生。

##### 条文说明

针对建有结构安全风险监测系统的桥梁，为使桥梁突发事件应急预案与监测系统的预警管理机制挂钩和联动，应重新制定或修订原应急预案。

##### 8.4.2 各级预警后采取的应急响应措施应包括但不限于：

- 蓝色及黄色预警：应及时对预警信息进行分析评估，如有必要应尽快安排现场复查，并根据分析评估、现场复查结果决定是否调整预警级别；若调整预警级别，则按调整后的预警级别采取相应的应急响应措施。
- 橙色预警：发出预警快讯及快报，及时对预警信息进行分析评估，尽快安排现场复查或专项检查，并根据分析评估、现场复查或专项检查结果决定是否调整预警级别，酌情采取临时交通管制或应急维修加固处治；若调整预警级别，则按调整后的预警级别采取相应的应急响应措施。
- 红色预警：发出预警快讯及快报，采取临时交通管制或应急维修加固处治。

## 9 安全评估与养管决策技术支持

### 9.1 安全评估

9.1.1 桥梁结构安全评估从评估方法和技术深度层面宜分为安全一级评估和安全二级评估，安全一级评估、安全二级评估应符合 JT/T 1037—2016 中第 8 章的相关规定。

9.1.2 进行安全一级评估时，除应符合 JT/T 1037—2016 中 8.4 的相关规定外，还应将监测所得的状态特征指标与以下人工检查（或检测）结果进行对比分析：

- a) 恒载作用下结构变形（位移）特征指标宜与人工控制检测（定期检查或特殊检查）的桥面高程、主拱圈线形、墩台倾斜度、墩台变位、拱座变位及其它永久性观测点的观测数据进行对比分析；
- b) 活载作用下结构变形（位移）特征指标宜与近期桥梁荷载试验数据进行对比分析；
- c) 结构监测自振特征指标宜与近期桥梁自振特性试验及模态分析数据进行对比分析；
- d) 裂缝宽度特征指标宜与近期人工检测所得的裂缝宽度实测值进行对比分析。

对比分析时，应注意人工检查（或检测）时的环境和荷载条件与运行监测的差异；当环境和荷载条件不同时，应换算到相同或相近条件下进行对比分析。

9.1.3 桥梁结构有限元模型修正方法可根据实际情况采用基于结构静力响应、动力响应或响应面的一种方法或多种方法组合，并应符合 JT/T 1037—2016 中 8.5 的相关规定。

9.1.4 桥梁结构安全评估从组织实施层面宜分为定期评估和专项评估，定期评估应符合 9.1.5 中的相关规定，专项评估应符合 JT/T 1037—2016 中第 8 章的相关规定。

9.1.5 定期评估频率应结合桥梁结构所处的安全预警状态，宜按表 10 规定的频率开展安全评估工作，评估方法和技术深度可为安全一级评估或安全二级评估。

表10 桥梁结构定期安全评估频率

预警状态	颜色标识		评估频率
绿色安全	绿色 RGB (0, 255, 0)		每年 1 次
蓝色预警	蓝色 RGB (0, 0, 255)		每季度 1 次
黄色预警	黄色 RGB (255, 255, 0)		每月 1 次
橙色预警	橙色 RGB (255, 125, 0)		每周 1 次
红色预警	红色 RGB (255, 0, 0)		每日 1 次

9.1.6 桥梁结构安全评估报告内容除应符合 JT/T 1037—2016 中 8.4.10、8.5.7、8.6.7 的相关规定外，还应包括评估期内监测系统的总体运行情况、评估期内预警事件及其处理过程汇总。

### 9.2 养管决策技术支持

9.2.1 应对桥梁结构安全风险监测成果与桥梁人工检查成果进行综合分析、互为补充，共同为制定桥梁运营管理方案和养护维修计划提供决策技术支持，其流程框图见图 2。

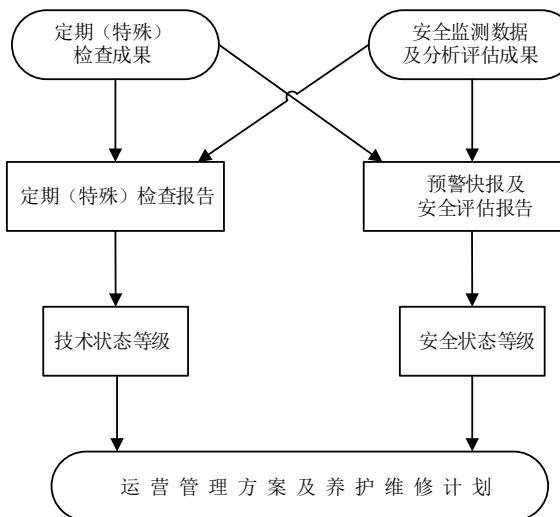


图2 制定桥梁运营管理方案和养护维修计划的流程框图

### 条文说明

为满足交通运输部和四川省交通运输厅关于监测系统应与现行定期(特殊)检查制度形成互补机制、综合评估桥梁运行状况的政策要求,本标准要求桥梁经营管理单位制定桥梁运营管理方案和养护维修计划时,除依据定期(特殊)检查的结论和建议外,还应综合考察桥梁结构安全评估的结论和建议。

**9.2.2** 综合考察基于定期检查或特殊检查的桥梁技术状况等级(JTG/T H21)和基于安全风险监测评估的桥梁安全状态等级(JT/T 1037)制定桥梁运营管理方案和养护维修计划时,宜按表11的分类确定养管措施。

表11 桥梁技术状况等级、安全状态等级与养管措施

定期(特殊)检查成果		安全风险监测成果		运营管理方案	养护对策
技术状况等级	桥梁技术状况描述	安全状态等级	桥梁安全状态		
1类	全新状态,功能完好	1类	完好状态	正常通车	正常保养或预防养护
2类	有轻微缺陷,对桥梁使用工程无影响	2类	较好状态	正常通车	修复养护:小修,及时修复轻微病害;或预防养护
3类	有轻微缺陷,尚能维持正常使用功能	3类	中等损伤状态	酌情进行交通管制	修复养护:中修,加固或更换较大缺陷构件
4类	主要构件有大的缺损,严重影响桥梁使用功能;或影响承载能力,不能保证正常使用。	4类	严重损伤状态	及时进行交通管制,必要时封闭交通	修复养护:大修或加固
5类	主要构件有严重缺损,不能正常使用,危及桥梁安全,桥梁处于危险状态。	5类	危险状态	及时封闭交通	改建或重建

### 条文说明

本条文的运营管理方案和养护对策与《公路桥涵养护规范》(JTG H11)、《公路养护工程管理办法》《公路养护工程管理办法》(交公路发〔2018〕33号)一致。

9.2.3 桥梁技术状态评定等级与安全状态评定等级不一致时，应依据最不利的评定结果确定运管方案和养护计划。

地方标准信息服务平台

**附录 A**  
**(规范性)**  
**桥梁结构安全风险辨析方法**

#### A.1 专家调查法

采用专家调查法进行桥梁结构安全风险辨析的方法和步骤如下：

##### 1. 组建安全风险评价小组

安全风险评价小组可由项目所涉桥梁养管单位或受托承担项目的专业技术机构组建，也可双方人员共同组建。小组成员应由具备丰富经验的桥梁、地质等专业技术或管理人员组成，一般以3~5人为宜。

##### 2. 基础资料准备

基础资料由风险评价小组收集准备，宜包括桥梁工程设计（竣工）图纸文件、运营期内桥梁检测及维修资料、以及桥址处水文、地质、地形和气候环境等资料。必要时可组织评价小组成员和专家进行现场踏勘。

##### 3. 编制风险调查表

风险调查表由风险评价小组编制，由风险源普查表、风险源检查表、风险等级专家调查表、风险调查说明材料。说明材料为本次专家调查的解释性内容，应包括调查目的、指导提示性语言、对调查结果的要求和相关基础资料简介等。

风险发生概率等级与判断标准、风险损失等级与判断标准可参照6.2。风险源普查表、风险源检查表、风险等级专家调查表可参照表A.1~表A.3的格式。

##### 4. 选择专家

专家组人数应有合理的规模。专家的人数取决于项目的特点、规模、复杂程度和风险的性质而定，一般以5~9人为宜。

专家组宜包括：

- 1) 了解该项目桥梁工程建设或养管情况的桥梁工程资深技术专家；
- 2) 具有丰富工程风险评估经验的风险管理专家；
- 3) 本项目桥梁工程新建或维修加固设计单位的技术专家。

专家组不宜包括：工程的项目法人（业主）单位、施工单位、监理单位、桥梁养管单位的技术人员或专家。

##### 5. 填写风险调查表

风险源普查表应由风险评价小组成员在对基础资料进行分析后填写。评价小组通过小组讨论、专家咨询等方式对小组成员填写的风险源普查表逐一检查后，统一完成风险源检查表。风险等级专家调查表的填写可通过现场会议、邮寄等方式完成。采用专家邮寄方式填写调查表时，可从风险源检查表、风险等级专家调查表中的“典型风险”栏、“当前状态”栏、“基于正常运行的风险管理措施”栏、以及风险调查说明材料中获取相关信息；采用现场会议方式时，可由评价小组直接介绍相关信息或专家查阅相关基础资料。当专家意见比较分散时，应再次征询意见，待专家重新考虑后再次提出自己判定风险发生概率和风险损失等级的理由，调整等级判定结果。

##### 6. 整理统计调查结果

在风险等级调查表集中回收完成后，应对调查表进行逐份检查，剔除不合格的调查表，然后将合格调查表统一编号，以便于调查数据的统计。对某一风险的发生概率和相应风险损失，应统计所有合格表格对该项的判定值，按照加权平均的方式进行计算。当权值不易判定时，可按权值为1处理。

表A. 1 风险源普查表

序号	典型风险		描述		
1	风险事件1	风险源1-1			
		风险源1-2			
		.....			
		风险源1-n			
2	风险事件2	风险源2-1			
		风险源2-2			
		.....			
		风险源2-n			
.....		.....			
.....		风险源m-1			
.....		风险源m-2			
.....		.....			
填表人:		填表日期:			

注：“典型风险”栏为同类桥梁工程所存在风险源的归纳总结，“描述”栏为每项风险源可能存在的方式、产生的影响及已有典型案例的教训和经验的简要说明。

表A. 2 风险源检查表

序号	检查项目		是否存在该风险源	存在方式	产生的影响	是否为主要风险源	
1	风险事件1	风险源1-1					
		风险源1-2					
		.....					
		风险源1-n					
2	风险事件2	风险源2-1					
		风险源2-2					
		.....					
		风险源2-n					
.....	.....	.....					
m	风险事件m	风险源m-1					
		风险源m-2					
		.....					
		风险源m-n					
填表日期:							
评价小组成员:							

表A.3 风险等级专家调查表

典型风险		当前状态	基于正常运行的风险管理措施	风险发生概率级别	风险损失级别			评定概率和损失级别的判定标准或理由	进一步的措施建议
					人员伤亡	经济损失	环境影响		
风险事件 1	风险源 1-1								
	风险源 1-2								
	.....								
	风险源 1-n								
风险事件 2	风险源 2-1								
	风险源 2-2								
	.....								
	风险源 2-n								
.....	.....								
风险事件 m	风险源 m-1								
	风险源 m-2								
	.....								
	风险源 m-n								
专家:					填写日期:				
注1: 专家可根据项目的实际情况, 增减主要风险源, 评估小组应视情研究是否将其补入风险源列表; 注2: 风险等级调查表的编制应保证结构完整、风险源完备、信息简练准确; 注3: “典型风险”栏、“当前状态”栏和“基于正常运行的风险管理措施”栏的内容应由风险评价小组在专家填写前完成; 注4: “当前状态”栏应填写与对应风险源相关的桥梁工程技术标准、荷载等级、技术状况、主要病害及缺陷情况、以及周边环境和或运行状态等, 宜尽量具体详尽; 注5: “基于正常运行的风险管理措施”栏应填写与对应风险源相关的运行管理措施, 如超载治理、巡检加密、交通限流等; 注6: 专家判定并填写了“风险发生概率级别”和“风险损失级别”时, 须一并填写“判定标准或理由”栏及“进一步的措施建议”栏。									

## A.2 事故树分析法

采用事故树分析法进行桥梁结构安全风险辨析的方法和步骤如下：

### 1. 组建安全风险分析小组

安全风险分析小组宜由受托承担桥梁结构安全风险监测项目的专业技术机构组建。小组成员应由具备丰富经验的桥梁、地质、风险管理等专业技术人员及咨询专家组成，一般以3~7人为宜。

### 2. 基础资料准备

基础资料由风险分析小组收集准备，宜包括桥梁工程设计（竣工）图纸文件、运营期内桥梁检测及维修资料、以及桥址处水文、地质、地形和气候环境勘察资料、类似工程案例及事故记录资料等。必要时可组织分析小组成员和咨询专家进行现场踏勘。

### 3. 枚举调查风险事件

在广泛调研过去类似工程案例及事故记录的基础上，枚举调查所有可能发生的结构安全风险事件。

### 4. 确定顶上事件

在枚举调查的结构安全风险事件范围内，选取典型的最终风险事件作为研究分析对象，即顶上事件。针对具体桥梁，顶上事件可以是某一特定的最终风险事件，也可以是本桥梁结构安全最终风险事件的总和，即结构安全总体风险。

### 5. 逆向调查所有原因事件及其风险源

从顶上事件出发，逆向溯源枚举调查所有的原因事件及其风险源。调查过程中可利用表 A.1和表A.2采用成员普查和小组检查的方式全面梳理所有原因事件和风险源，避免疏漏和错误。

### 6. 画出事故树

根据上述调查资料，从顶上事件起进行逆向演绎分析，一级一级的找出所有原因事件，直到无法再细分的基本原因事件，即风险源本身。然后按照其逻辑关系，画出事故树。

### 7. 风险发生概率分析

根据逻辑定律对事故树结构进行简化，求出最小割集和最小径集，可进行定性分析以确定各基本原因事件的结构重要度排序。

根据所调查的基础资料定量确定所有底层原因事件（基本事件、风险源）的发生概率后，可依据逻辑定律分层计算所有风险事件的发生概率，直至得到顶上事件的发生概率。必要时，也可计算各基本事件（风险源）的结构重要度系数、概率重要度系数及关键重要度系数等参数指标。

### 8. 风险损失分析

顶上事件的风险损失则可根据类似工程案例及事故记录，从人员伤亡、经济损失和环境影响等三方面进行定性或定量分析评价。

## 附录 B

(规范性)

## 常见山区公路混凝土结构桥梁的监测指标和测点布设技术要求汇总表

B.1 常见荷载与环境监测类指标选取的相关技术要求汇总见表 B.1, 对桥位处水文、地质灾害监测指标选取的相关技术要求汇总见表 B.2。

B.2 简支梁桥结构响应监测指标选取和测点布设汇总见表 B.3, 连续(刚构、T构)梁桥结构响应监测指标选取和测点布设汇总见表 B.4, 上承式拱桥结构响应监测指标选取和测点布设汇总见表 B.5。

表B.1 常见荷载与环境类监测指标选取汇总表

监测项目		主要监测指标	梁式桥		拱式桥	备注
			简支梁	连续(刚构、T构)梁桥		
交通荷载	车辆荷载	断面车流量、车型、车轴重、轴数、车辆总重、车速	○	○	○	见 7.2.2.1
		车辆空间分布	○	○	○	
环境影响因素	温度	温度	○	●	●	见 7.2.2.2
	湿度	相对湿度	—	○	—	见 7.2.2.3
	地震动	两岸(桥台等处)地表场地加速度、主墩或拱座底部加速度等	○	○	○	见 7.2.2.4
其他影响因素	船舶(漂流物)撞击	船舶(漂流物)位置、航向及速度、结构振动	○	○	○	见 7.2.2.7
	桥面交通或桥下安全状况	视频记录	⊕	⊕	⊕	见 7.2.2.8

注1: “●”表示应选监测项,“⊕”表示宜选监测项,“○”表示可选监测项,“—”表示不包含项。

注2: 监测指标选取和测点布设时还应满足“备注”栏中相关条文的具体要求。

注3: 荷载与环境类监测指标应与结构响应监测相适应,所监测的桥跨也应相对应。

表B.2 桥位处水文地质灾害监测指标选取汇总表

监测项目		主要监测指标	桩基础		浅埋扩大基础	备注
			无明显冲刷	冲刷明显		
洪 水	基础冲刷	冲刷深度	○	⊕	⊕	见 7.2.2.5、7.2.3.4
		水流流速、水位	○	⊕	⊕	
地 质 灾 害	地表位移	地表绝对位移或相对位移	—	○	⊕	见 7.2.2.6、7.2.3.4
	地表倾斜	地表倾斜度	—	○	⊕	
	地表裂缝	地表裂缝宽度	—	○	⊕	
	深部位移	地层间相对位移或倾斜	—	○	⊕	
	土压力	土体压力	—	○	○	
	地下水位	地下水位	—	○	○	
	雨量	降雨量、降雨强度	—	○	⊕	

注1：“●”表示应选监测项，“⊕”表示宜选监测项，“○”表示可选监测项，“—”表示不包含项。

注2：监测指标选取和测点布设时还应满足“备注”栏中相关条文的具体要求。

注3：桥位处水文地质灾害监测指标应与结构响应监测相适应，所监测的桥跨也应相对应。

表B.3 简支梁桥结构响应监测指标选取和测点布设汇总表

类别	监测项目	主要监测指标	监测优先级	测点布设截面/部位		备注
				主要测点	附加测点	
结构整体响应	振动	频率、振型、阻尼比	竖向	○	跨中截面	见 7.2.3.2
			横向	—	—	
			纵向	—	—	
	变形	挠度、转角	主梁静挠度	○	跨中截面	1/4、3/4 截面
			主梁动挠度	○	跨中截面	1/4、3/4 截面
	位移	位移、倾角	梁端位移	⊕	伸缩缝处梁端截面	—
			墩台倾斜	⊕	墩台顶部	—
结构局部响应	应变	恒载应变	○	跨中截面	1/4、3/4 截面	见 7.2.4.2
		动应变	○	跨中截面	1/4、3/4 截面	
	钢筋应力	恒载应力	○	跨中截面	1/4、3/4 截面	见 7.2.4.3
		动应力	○	跨中截面	1/4、3/4 截面	
	裂缝	裂缝宽度	⊕	主要承重构件上宽度超限的代表性受力裂缝、主要承重构件上成因不明的代表性裂缝		
	支座反力及位移	支座反力、支座位移	○	弯桥、斜桥、易倾覆的独柱墩、基础沉降的墩台		

注1：“●”表示应选监测项，“⊕”表示宜选监测项，“○”表示可选监测项，“—”表示不包含项。

注2：监测指标选取和测点布设时还应满足“备注”栏中相关条文的具体要求。

注3：“主要测点”为优先布设的测点，“附加测点”为条件允许时可布设的测点。

注4：当被监测桥梁采用不停车称重方法对车辆荷载参数进行实时监测时，主梁动挠度、动应变宜为宜选监测项（⊕）；当被监测桥跨主梁开裂较严重时，结构振动宜为宜选监测项（⊕）。

注5：当被监测桥梁由相同结构类型的多孔跨组成时，可选择不同跨径技术状况较差或运行环境恶劣的代表性桥跨实施监测；梁端位移、墩台倾斜宜优先选择结构变位风险较高的桥跨实施监测，如长大纵坡桥梁梁端位移及高墩、河沟中以及陡坡上墩台等。

表B.4 连续(刚构、T构)梁桥结构响应监测指标选取和测点布设汇总表

类别	监测项目	主要监测指标	监测优先级	测点布设截面/部位		备注	
					主要测点		
结构整体响应	振动	频率、振型、阻尼比	竖向	⊕	边跨: 跨中截面 主跨: 跨中、1/4、3/4 截面	边跨: 1/4、3/4 截面 主跨: 1/8、3/8、5/8、7/8 截面	见 7.2.3.2
			横向	⊕	主跨跨中截面、连续刚构/T构桥 主墩墩顶截面	边跨: 跨中截面 主跨: 1/4、3/4 截面	
			纵向	⊕	大跨高墩连续刚构桥主跨跨中 截面、主墩墩顶截面	大跨高墩连续刚构桥边跨跨中 截面、支座截面	
	变形	挠度、转角	主梁静挠度	⊕	边跨: 跨中截面 主跨: 跨中、1/4、3/4 截面	边跨: 1/4、3/4 截面 主跨: 1/8、3/8、5/8、7/8 截面	见 7.2.3.3
			主梁动挠度	○	边跨: 跨中截面 主跨: 跨中、1/4、3/4 截面	边跨: 1/4、3/4 截面 主跨: 1/8、3/8、5/8、7/8 截面	
	位移	梁端位移	⊕	伸缩缝处梁端截面		—	
		墩台倾角	⊕	墩台顶部		—	
结构局部响应	应变	恒载应变	○	边跨最大正弯矩截面、支点处最 大负弯矩截面、主跨跨中截面		主跨 1/4、3/4 截面	见 7.2.4.2
		动应变	○	边跨最大正弯矩截面、支点处最 大负弯矩截面、主跨跨中截面		主跨 1/4、3/4 截面	
	钢筋应力	恒载应力	○	边跨最大正弯矩截面、支点处最 大负弯矩截面、主跨跨中截面		主跨 1/4、3/4 截面	见 7.2.4.3
		动应力	○	边跨最大正弯矩截面、支点处最 大负弯矩截面、主跨跨中截面		主跨 1/4、3/4 截面	
	裂缝	裂缝宽度	⊕	主要承重构件上宽度超限的代表性的受力裂缝、主要承重构件上成因 不明的代表性的裂缝			见 7.2.4.6
	预应力度	钢束有效预应力	○	大跨桥梁主跨顶板或底板纵向 钢束	特大跨桥梁主跨 1/4 跨附近竖向 钢束	—	见 7.2.4.4
支座反力及位移	支座反力、支座位移		○	弯桥、斜桥、易倾覆的独柱墩、基础沉降的墩台			见 7.2.4.5

注1：“●”表示应选监测项，“⊕”表示宜选监测项，“○”表示可选监测项，“—”表示不包含项。

注2：指标选取和测点布设时还应满足“备注”栏中相关条文的具体要求。

注3：“主要测点”为优先布设的测点，“附加测点”为条件允许时可布设的测点。

注4：本表中主梁振动、主梁静挠度监测指标主要适用于主跨跨径不小于 60m 的连续(刚构、T 构)梁桥，对于主跨跨径小于 60m 的连续(刚构、T 构)梁桥宜结合其主跨跨径适当减少监测指标和测点。

注5：主跨跨径不小于 60m 的新建连续(刚构、T 构)梁桥，恒载应力、钢束预应力宜为宜选监测项(⊕)。

注6：当被监测桥梁采用不停车称重方法对车辆荷载参数进行实时监测时，主梁动挠度、动应变宜为宜选监测项(⊕)。当被监测桥梁主梁开裂较严重、主跨跨中明显下挠时，主梁静挠度宜为应选监测项(●)。

注7：当被监测桥梁由相同结构类型的多孔跨组成时，可选择技术状况较差或运行环境恶劣的代表性联跨布设测点；引桥为简支梁的，引桥部分参照表 B.3 选取监测指标和布设测点。

表B.5 上承式拱桥结构响应监测指标选取和测点布设汇总表

类别	监测项目	主要监测指标	监测优先级	测点布设截面/部位		备注	
				主要测点	附加测点		
结构整体响应	振动	频率、振型、阻尼比	竖向	⊕	主拱圈拱顶截面	主拱圈1/4、3/4截面，桥面系跨中截面、1/4截面、3/4截面	见7.2.3.2
			横向	⊕	主拱圈拱顶截面	主拱圈1/4、3/4截面，桥面系跨中截面	
			纵向	○	主拱圈拱顶截面	—	
	变形	挠度、转角	主梁静挠度	○	跨中截面	1/4、3/4截面	见7.2.3.3
			主梁动挠度	○	跨中截面	—	
			主拱变形	⊕	主拱圈拱顶截面	主拱圈1/4、3/4截面	
结构局部响应	位移	位移、倾角	梁端位移	⊕	伸缩缝处梁端截面	—	见7.2.4.2
			墩台倾角	⊕	墩台顶部	—	
			拱座偏位	⊕	拱座或拱脚、拱座上立柱或拱脚附近的拱上立柱		
	应变	恒载应变	○	主拱圈拱脚截面、拱顶截面，主梁跨中截面	主拱圈1/4、3/4截面，主梁1/4、3/4截面	见7.2.4.3	
		动应变	○	主拱圈拱顶截面，主梁跨中截面	主拱圈1/4、3/4截面，主梁1/4、3/4截面		
	钢筋应力	恒载应力	○	主拱圈拱顶、拱脚截面	主拱圈1/4、3/4截面	见7.2.4.4	
		动应力	○	主梁体系关键截面	—		
	裂缝	裂缝宽度	⊕	主要承重构件上宽度超限的代表性受力裂缝、主要承重构件上成因不明的代表性裂缝			见7.2.4.5
	预应力	钢束有效预应力	—	—	—	见7.2.4.6	见7.2.4.4
	支座反力及位移	支座反力、支座位移	—	—	—	见7.2.4.5	见7.2.4.4

注1：“●”表示应选监测项，“⊕”表示宜选监测项，“○”表示可选监测项，“—”表示不包含项。

注2：指标选取和测点布设时还应满足“备注”栏中相关条文的具体要求。

注3：“主要测点”为优先布设的测点，“附加测点”为条件允许时可布设的测点。

注4：本表中结构振动、主梁静挠度监测指标主要适用于主跨跨径不小于60m的上承式拱桥，对于主跨跨径小于60m的上承式拱桥宜结合其主跨跨径适当减少监测指标和测点。

注5：当被监测桥梁采用不停车称重方法对车辆荷载参数进行实时监测时，主梁动挠度、动应变宜为宜选监测项（⊕）。

注6：当被监测桥梁由相同结构类型的多孔跨组成时，可选择技术状况较差或运行环境恶劣的代表性联跨布设测点；引桥为简支梁的，引桥部分参照表B.3选取监测指标和布设测点。

## 附录 C

(规范性)

## 常用监测设备的选型要求、主要技术指标及安装施工要求

C.1 车辆荷载监测宜选用动态称重系统，并应符合下列规定：

- a) 动态称重传感器的主要技术指标和安装要求应符合《动态公路车辆自动衡器》(GB/T 21296)的规定；
- b) 动态称重系统传感器的布设尺寸宜与车道同宽，量程宜根据桥梁限载以及预估车辆载重综合确定，单轴监测量程不宜小于限载车辆轴重的200%；
- c) 安装位置要求路面平整度良好（路面高低差不宜大于5mm），应远离加速段和减速段，尽量避免弯道、道路岔口；
- d) 安装位置前后50m路面水平弯曲半径不宜小于1500m，纵向和横向坡度不宜超过2%；
- e) 采用石英晶体传感器的动态称重系统应安装于桥头路基段的硬化路面上，混凝土路面厚度不宜小于30cm，路面刻纹深度不宜大于3mm；
- f) 在符合GB 50057的环境下可耐受雷击且不影响正常工作；
- g) 安装防护等级应达到IP66标准；
- h) 动态称重系统主要技术指标宜符合表C.1的相关要求。

表C.1 动态称重系统主要技术指标要求

传感器类型	技术指标		技术要求
动态称重系统	行车速度范围(km/h)		10~200
	测速误差		≤±1.5%
	称重范围(kN/轴)		≥300
	交通量计数误差		≤±1%
	称重误差	压电薄膜传感器	≤±10%
		石英晶体传感器	≤±5%
	可分类车型		交通运输部颁布标准车型

C.2 温度传感器可选用热电偶、热电阻和光纤光栅温度传感器等，选型时应综合考虑量程、精度、分辨力和环境适应性等参数要求，并应符合下列规定：

- a) 监测大气环境温度的传感器，量程宜超出年极值最高温度+20℃和年极值最低温度-20℃；
- b) 监测结构表面温度的传感器，量程宜超出年极值最高温度+50℃和年极值最低温度-20℃；
- c) 光纤光栅类温度传感器安装时，禁止用手直接接触接线和光纤接头，禁止直角弯折光纤光缆；
- d) 对于安装在混凝土构件内部的温度传感器，必须采取措施保护数据线缆；
- e) 其他主要技术指标宜满足表C.2的相关要求。

表 C. 2 温度传感器主要技术指标要求

传感器类型	技术指标	技术要求
温度传感器	量程 (°C)	见 C. 2 a) 项和 b) 项
	精度 (°C)	环境温度: $\leq \pm 0.5$ 结构温度: $\leq \pm 0.2$
	分辨力 (°C)	$\leq 0.1$

C. 3 桥址处地震动监测可选用强震记录仪或三向加速度传感器（力平衡式），应符合地震动监测相关标准的要求，主要技术指标宜满足表C. 3 的相关要求。

表 C. 3 强震记录仪/力平衡式加速度计主要技术指标要求

传感器类型	技术指标	技术要求
强震记录仪/力平衡式三向加速度计	量程	力平衡式三向加速度计: $\pm 2g$
	灵敏度 (V/ (m/s <sup>2</sup> ))	$\geq \pm 0.125$
	满量程输出 (V)	$\pm 2.5$ 、 $\pm 5$ 、 $\pm 10$ 可选
	频率响应 (Hz)	0.1~80
	动态范围 (dB)	$\geq 120$
	线性度误差 (%)	$\leq 1$
	信号调理	线性放大、积分

C. 4 监测船舶（或漂流物）撞击致桥梁结构振动所用传感器的主要技术指标，宜符合C. 3 及C. 9 的相关要求。

C. 5 雨量计可选用电容雨量计、红外散射式雨量计、单翻斗雨量计等，选型时应根据具体监测需求及现场气象条件，综合选定设备类型、量程、精度及分辨力等指标，主要技术指标宜满足表C. 4 的相关要求。

表 C. 4 雨量计主要技术指标要求

传感器类型	技术指标	技术要求
雨量计	量程 (降水强度)	0~4mm/min
	分辨力 (mm)	0.2
	测量误差	$\leq \pm 4\%$

C. 6 对桥墩处基础冲刷主要监测水位和水深两个指标，水位监测可选用超声波水位计或雷达水位计，水深监测宜选用雷达测深仪。应根据桥址处水流速度、含沙量等水文参数、具体监测需求及传感器安装位置，综合选定传感器类型、量程、精度等指标，布设安装方式及主要技术指标应符合下列规定：

- a) 传感器数量和安装位置应根据被测墩身基础类型、尺寸、水流特点和基础冲刷的人工检查结果综合确定，安装高度应不低于最高水位以上 1m，圆形桥墩宜布设在桥墩上下游，圆端形桥墩宜布设在桥墩上下游以及桥墩侧面最大冲刷位置；
- b) 传感器的预埋安装件应与桥墩（台）结构长期牢固连接；传感器探头宜选用非永久方法固定，安装连接材料应防水、防锈、耐老化；
- c) 传感器主要技术指标宜满足表 C.5 的相关要求。

表 C.5 基础冲刷监测传感器主要技术指标要求

传感器类型	技术指标	技术要求
测深仪	水深测量范围 (m)	1~150 (可选)
	静水中测量误差 (m)	≤0.1
	分辨力 (m)	0.05
	允许最大含沙量 (kg/m³)	≤50
	适应最大流速 (m/s)	≤5
	防护等级	IP66
水位计	测量范围	1~100m (可选)
	测距精度	±0.5% F.S.
	测距分辨力 (mm)	1
	防护等级	IP66

C.7 针对桥梁周边地质灾害体主要监测地表位移及变形、深部位移、以及降雨量等指标，其中地表位移可选用全球导航卫星系统 (GNSS) 或大量程位移计，局部变形可选用地裂缝计，深部位移可选用深孔测斜仪，降雨量可选用雨量计。应根据灾害体的类型、规模、发育程度、地形地貌特点和具体监测需求，综合考虑选定传感器类型和技术指标。地裂缝计和深孔测斜仪的主要技术指标宜满足表C.6 的要求，GNSS和位移计的主要技术指标宜满足表C.10 的相关要求。

表 C.6 地裂缝计和深孔测斜仪的主要技术指标要求

传感器类型	技术指标	技术要求
地裂缝计	测量范围	50~1000mm (可选)
	测量精度	±0.1% F.S.
深孔测斜仪	测角范围	±15°
	测量精度	±0.1% F.S.
	灵敏度	<10"
	防护等级	IP68

C.8 船舶（漂流物）撞击的视频监测宜采用具有区域入侵自动识别功能的高清视频（红外）摄像系统，布设安装方式及主要技术指标应符合下列规定：

- 安装方式应考虑后期运维的可维护和可更换性；
- 安装位置应视野开阔，尽量靠近数据采集站或数据传输网络节点；
- 在符合 GB 50057 的环境下可耐受雷击且不影响正常工作；
- 安装防护等级应达到 IP66 标准；
- 主要技术指标宜满足表 C.7 和表 C.8 的相关要求。

表 C.7 用于船舶（漂流物）撞击监测高清摄像机主要技术指标要求

传感器类型	技术指标	技术要求
高清摄像机	图像传感器	≥1/3 英寸 逐行扫描 CMOS
	图像像素	≥200 万像素
	最低照度	彩色：0.005lux@F1.6 黑白：0.0005lux@F1.6 0Lux 星光级（红外开启）
	信噪比（dB）	≥50
	宽动态范围（dB）	≥80
	帧率（fps）	≥25
	防护等级	IP66

表 C.8 用于船舶（漂流物）撞击监测的区域入侵识别系统主要技术指标要求

设备类型	技术指标	技术要求
区域入侵识别系统	识别距离	1000 吨级以上船舶 ≥300m 300 吨级以上船舶 ≥125m
	反应时间	船舶进入识别区域 ≤1s
	事件识别率	白天准确率 ≥95% 晚上准确率 ≥90% 大雾/逆光/强光等恶劣情况 ≥90%
	目标过滤	支持

C.9 结构整体振动监测宜根据桥梁结构动力计算分析结果、具体监测需求和布设方案选用加速度传感器或速度传感器，传感器选型和主要技术指标宜符合以下规定：

- 基频较低的大跨桥梁，宜选用低频性能优良、灵敏度高的力平衡式或电容式传感器；
- 基频较高的常规桥梁，可选用力平衡式、电容式和压电式加速度传感器；
- 可根据测点布设方案选择三向、双向和单向传感器；
- 在符合 GB 50057 的环境下可耐受雷击且不影响正常工作；
- 防护等级应达到 IP66 标准；
- 传感器主要技术指标宜满足表 C.9 的相关要求。

表 C.9 结构振动监测主要技术指标要求

传感器类型	技术指标	技术要求
加速度传感器	量程	$\geq \pm 2g$
	灵敏度	$\geq 0.25 V/(m/s^2)$
	分辨力(与数采配接放大后)	$5 \times 10^{-6} (m/s^2)$
	频响范围(Hz)	0.25~80
速度传感器	量程	$\geq 0.125 (m/s)$
	灵敏度	$1~25 V/(m/s)$ (分档可选)
	分辨力(与数采配接放大后)	$1.5 \times 10^{-6}~5 \times 10^{-8} (m/s)$ (分档可选)
	频率响应(Hz)	0.2~100
通用指标	线性度误差	$\leq 1\%$
	横向灵敏度	$\leq 5\%$
	信号调理	线性放大、积分、滤波

C.10 桥梁结构的位移和变形监测可选用位移计、液压连通管系统(静力水准系统)、全球导航卫星定位系统(GNSS)及倾角计等多种传感器，应根据被测桥梁结构或构件的变形位移特征及现场安装条件综合考虑选定传感器类型及技术指标，并宜符合下列规定：

- a) GNSS 基准站应选址在地基稳定、上方天空开阔、远离电磁干扰、易受保护及维修的区域；监测站应安装在被测结构或构件顶部，上方无遮挡，并远离电磁干扰；GNSS 的监测数据宜转换到大桥独立坐标系下(施工坐标系)；
- b) 梁桥、拱桥的静挠度监测，宜选用液压连通管系统(静力水准系统)，监测数据宜进行温度修正；
- c) 在符合 GB 50057 的环境下可耐受雷击且不影响正常工作；
- d) 防护等级应达到 IP66 标准；
- e) 常用位移和变形监测传感器主要技术指标宜满足表 C.10 的相关要求。

表 C.10 常用位移和变形监测传感器主要技术指标要求

传感器类型	技术指标	技术要求
位移传感器	量程(mm)	$10~1000$ (可选)
	精度(mm)	0.1% F.S.
	分辨力(mm)	0.05% F.S.
全球导航卫星系统 (GNSS)	静态基线精度： 水平	$3mm+1ppm$
	竖向	$5mm+1ppm$
	RTK 精度： 水平	$10mm+1.5ppm$
	竖向	$15mm+1.5ppm$
	防护等级	IP67

表 C.10 常用位移和变形监测传感器主要技术指标要求（续）

传感器类型	技术指标		技术要求
倾角计	量程: $\pm 15^\circ$	分辨力	$\leq 10''$
		精度	$\pm 0.1\% F.S.$
	量程: $\pm 5^\circ$	分辨力	$\leq 2''$
		精度	$\pm 0.1\% F.S.$
液压连通管系统 (静力水准系统)	量程 (mm)		$\geq \pm 200$
	精度 (mm)		$\pm 0.1\% F.S.$

C.11 结构应变监测可选用电阻应变式、振弦式或光纤光栅式传感器，应根据监测需求和被测对象的具体情况，综合考虑选定传感器类型和技术指标，并应符合下列规定：

- a) 静态(准静态)应变监测可选用振弦式、电阻应变式或光纤光栅式传感器，量程宜不小于预测最大值的2倍，分辨力宜小于预测最大值的10%；
- b) 动态应变监测可选用电阻应变式或光纤光栅式传感器，量程宜不小于预测最大值的3倍，分辨力宜小于预测最大值的10%；
- c) 应变传感器均应进行温度补偿或修正；
- d) 混凝土结构宜选择大标距的应变计；应变梯度较大的区域，宜选用标距较小的应变计；
- e) 电阻应变传感器的测量单元和补偿单元宜选用同一规格产品，并进行屏蔽绝缘保护；
- f) 振弦式应变传感器宜与匹配的频率仪配套校准，频率仪的分辨力不宜大于0.5Hz；
- g) 如需采用位移传感器与工装配套进行应变监测，计算其安装标距时宜使其测量分辨力小于预测最大值的10%；
- h) 应变传感器主要技术指标宜符合表C.11的相关要求。

表 C.11 应变传感器主要技术指标要求

传感器类型	技术指标	技术要求
应变传感器	测量范围 ( $\mu\epsilon$ )	混凝土结构: $\pm 1500$ 钢结构: $\pm 3000$
	分辨力 ( $\mu\epsilon$ )	1
	精度 ( $\mu\epsilon$ ) (与应变仪配接后)	$\pm 3$

C.12 钢筋应力监测可选用振弦式或光纤光栅式钢筋计，应根据监测需求和被测对象的具体情况，综合考虑选定传感器类型和技术指标，并应符合下列规定：

- a) 静态(准静态)监测可选用振弦式或光纤光栅式钢筋计，量程宜不小于预测最大值的2倍，分辨力宜小于预测最大值的1%；
- b) 动态监测可选用光纤光栅式钢筋计，量程宜不小于预测最大值的2倍，分辨力宜小于预测最大值的1%；
- c) 钢筋计均应进行温度补偿或修正；
- d) 振弦式钢筋计宜与匹配的频率仪配套校准，频率仪的分辨力不宜大于0.5Hz；
- e) 钢筋计的主要技术指标宜满足表C.12的相关要求。

表 C. 12 钢筋计主要技术指标要求

传感器类型	技术指标	技术要求
钢筋计	量程 (MPa)	200~450 可选
	分辨力 (MPa)	0.1% F.S.
	精度 (与数采配接后)	±1% F.S.

C. 13 裂缝宽度监测可选用电阻应变式、振弦式或光纤光栅式裂缝计, 计算安装标距时宜使其技术指标满足表C. 13 的要求。

表 C. 13 裂缝计主要技术指标要求

传感器类型	技术指标	技术要求
裂缝计	量程 (mm)	1~50 (可选)
	分辨率	0.1% F.S.
	精度	±0.5% F.S.

C. 14 预应力钢束有效预应力的监测可选用加速度传感器(频率法)、锚索计(压力环)或磁通量传感器等, 应根据监测需求和被测对象的安装条件, 综合考虑选定传感器类型及技术指标, 各类传感器的主要技术指标宜满足表C. 14 的相关要求。

表 C. 14 钢束有效预应力监测传感器主要技术指标要求

传感器类型	技术指标	技术要求
磁通量传感器	量程	500~10000 kN (可选)
	精度 (配接磁弹仪后)	≤3% F.S.
	防护等级	IP66
锚索计 (压力环)	测量范围	500~10000kN 可选
	基本误差	≤±1% F.S.
	重复性误差	≤±1% F.S.
加速度传感器 (频率法)	量程	≥±2g
	灵敏度	≥0.1 V/(m/s <sup>2</sup> )
	分辨力 (与数采配接放大后)	1×10 <sup>-6</sup> (m/s <sup>2</sup> )
	横向灵敏度	≤5%
	频响范围 (Hz)	0~100
	线性度误差	≤1%
	防护等级	IP66

#### 条文说明

表C. 15中与锚索计(压力环)相关的技术指标说明如下:

基本误差: 在较为理想的加载条件下, 考虑温度影响后锚索计输出结果和真值的差异。

重复性误差: 在相同试验条件下, 以相同方式在锚索计上连续多次进程施加相同荷载时, 测量结果之间的最大差异。

C.15 支座反力监测可选用测力支座，并应符合下列规定：

- 测力支座安装后不应改变桥面高程，不应改变桥梁结构与支座接触方式和接触面积；
- 测力支座应具备可更换性；
- 测力支座的主要技术指标宜满足表 C.15 的相关要求。

表 C.15 测力支座主要技术指标要求

传感器类型	技术指标	技术要求
测力支座	测量范围 (kN)	500~64000
	分辨率	≤0.1% F.S.
	非线性度	≤1.5% F.S.
	精度	≤3% F.S.

C.16 常用数据采集设备的主要技术指标宜满足表C.16的相关要求。

表 C.16 常用数据采集设备的主要技术指标要求

采集设备	技术指标	技术要求
动态数据采集系统	模数转换分辨力	24 位
	共模干扰	120dB
	模拟量输入	电压：±10V 电流：4mA~20mA
	采样频率	5~200Hz (可调)
	采样模式	连续采样/定时采样/触发采样 (可远程控制模式转换)
	防护等级	P65
	通讯接口	支持 RJ45/以太网 速率：≥100M 隔离电压：≥2500V
光纤光栅解调仪	波长范围 (nm)	≥40
	精度 (pm)	±5
	分辨力 (pm)	1
	重复性 (pm)	2
	动态范围 (dB)	25
	光纤接头	FC/APC
	外部数据接口	支持 RJ45/USB
强震记录仪	满量程输入 (V)	≥±5
	动态范围 (dB)	≥120
	转换精度 (bit)	≥20
	采集模式	支持带通触发采集、STA/LAT 比值触发采集、外触发采集等
	采样频率	程控，至少 2 档，最高采样率不低于 200HZ
	通讯接口	支持 RS-232/以太网
	数据存储	≥4Gb
磁弹仪	测量精度	≤±3% F.S.
	分辨力	≤1% F.S.
	激励电压 (V)	30~280