

中小跨径桥梁检监测数据融合与评估技术 规程

Code of practice for fusion of inspection and monitoring data for evaluation of
medium and small span bridges

(报批稿)

20XX – XX – XX 发布

20XX – XX – XX 实施

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语与定义 1

4 程序确立 1

5 对象选取 2

6 指标确定 3

7 数据采集 3

8 分级评定 4

9 融合评估 5

10 报告编制 7

附录 A （规范性） 车辆过桥工况提取方法 9

附录 B （规范性） 中性轴指标计算方法 10

附录 C （规范性） 评估报告格式 12

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山东省交通运输厅提出并组织实施。

本文件由山东省交通运输标准化技术委员会（鲁 TC 41）归口。

本文件编制单位：山东高速集团有限公司、山东高速集团有限公司创新研究院、山东高速工程检测有限公司、山东高速基础设施建设有限公司、同济大学、长安大学、交通运输部公路科学研究院、临沂公路事业发展中心。

本文件主要起草人：张文武、辛公锋、王珊珊、徐传昶、龙关旭、王阳春、尚志强、马乃轩、张宁、马川义、胡超、张豪、孙利民、夏烨、韩万水、王涛、韦韩、邵珠峰、朱晨辉、李福如、曹明喜、郑晨、徐昕、王能威、付文博、高欣凯、武略、陈相因、刘星雨、李颖。

中小跨径桥梁检监测数据融合与评估技术规程

1 范围

本文件确立了公路中小跨径桥梁检、监测数据融合与评估的程序，规定了对象选择、指标确定、数据采集、分级评定、融合评估和报告编制阶段的指示及转换条件，描述了指标计算方法、报告编制等追溯方法。

本文件适用于单孔标准跨径小于等于 40 m 公路混凝土梁式桥的检监测数据融合与评估。

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。

- JTG D60 公路桥涵设计通用规范
- JTG/T H21 公路桥梁技术状况评定标准
- JTG/T J21 公路桥梁承载能力检测评定规程
- JTG/T J21-01 公路桥梁荷载试验规程
- JTG/T 1037 公路桥梁结构监测技术规范
- JTG/T 5214 在用公路桥梁现场检测技术规程

3 术语与定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

检监测数据融合与评估 fusion of inspection and monitoring data for evaluation

对特定的评估对象，将对象的检测数据与监测数据两类数据进行综合、过滤、相关及融合，对其技术状况进行评估的工作。

3.2

构件监测指标 indicators for component monitoring

能够反映桥梁构件结构安全和功能的监测指标。

3.3

总体监测指标 indicators for global monitoring

能够反映桥梁整体结构安全和功能的监测指标。

4 程序确立

4.1 中小跨径桥梁检监测数据融合与评估工作的程序包括 6 个阶段，程序流程图如图 1 所示。

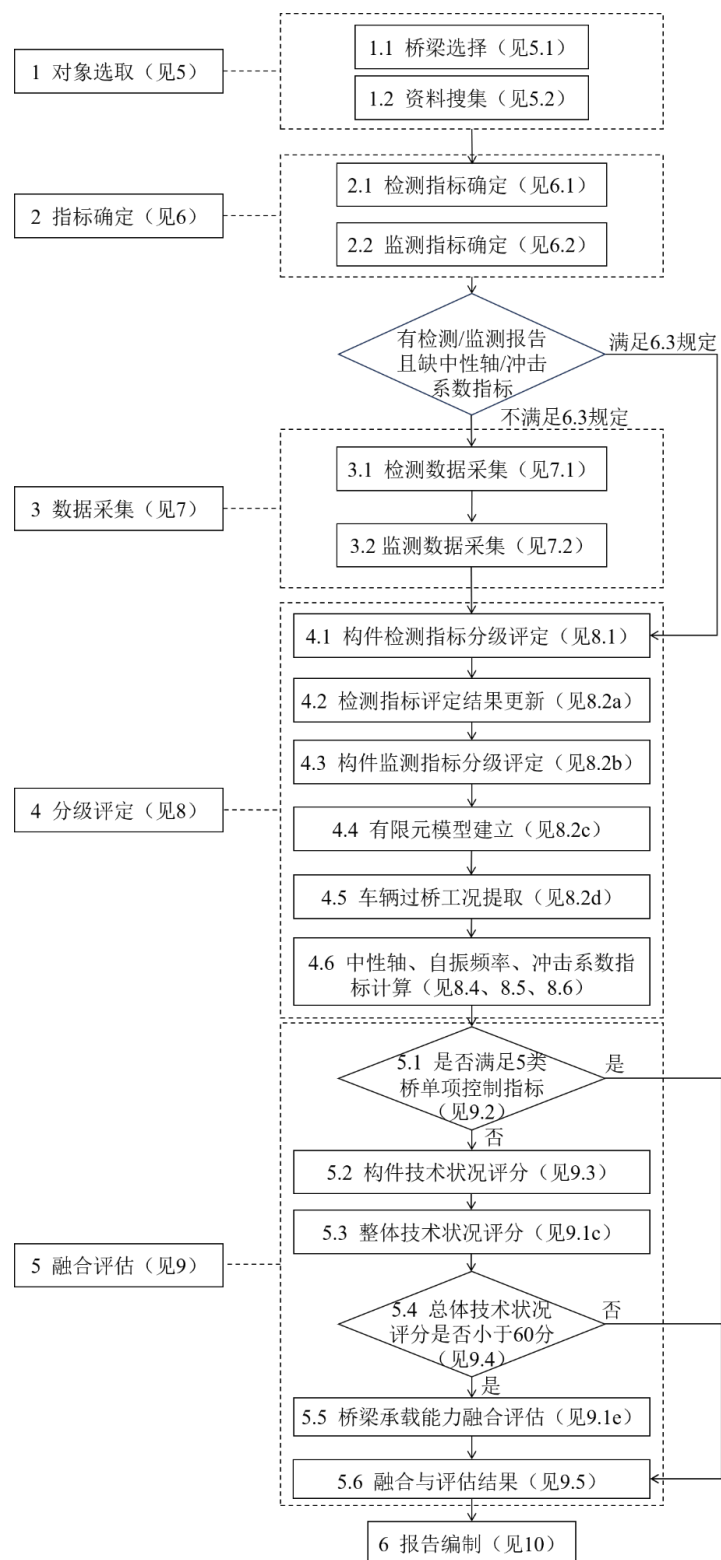


图 1 中小跨径桥梁检监测数据融合与评估工作程序图

5 对象选取

5.1 桥梁存在下列情况之一时，可进行检监测数据融合与评估，简支梁桥可逐孔评估，连续梁桥可逐联评估：

- a) 病害性质不明确；
- b) 技术状况等级为三、四类；
- c) 健康度为Ⅲ级；
- d) 存在异常振动；
- e) 拟提高荷载等级；
- f) 需要通过特殊重型车辆；
- g) 遭受重大自然灾害或意外。

5.2 进行检监测数据融合与评估的桥梁，需搜集下列资料：

- a) 结构设计资料；
- b) 健康监测系统设计资料；
- c) 可搜集距评估程序启动日期不超过一个定期检查周期的检测报告，及不超过 1 年的健康监测报告。

5.3 只准许资料完整、规范的桥梁进入指标确定。

6 指标确定

6.1 检测指标根据评估对象的情况，按 JTG/T H21 的相关规定确定。

6.2 监测指标分为总体监测指标和构件监测指标，总体监测指标包括自振频率和冲击系数 2 个指标，自振频率指标为必选指标，构件监测指标按下列要求确定：

- a) 在主梁跨中竖向位移、支座位移、桥墩沉降、基础冲刷、裂缝、横截面中性轴 6 个指标中选取；
- b) 有水毁风险的桥梁，需包括桥墩沉降、基础冲刷指标；
- c) 有超过正常使用极限状态风险的桥梁，需包括主梁跨中竖向位移指标和横截面中性轴指标；
- d) 有倾覆或装置失效风险的桥梁，需包括支座位移指标。

6.3 具有检测报告、监测报告且无横截面中性轴指标、冲击系数指标的桥梁，进入分级评定，否则进入数据采集。

7 数据采集

7.1 检测数据需根据确定的检测指标，按 JTG/T 5214 的相关规定采集。

7.2 监测数据的采集步骤如下：

- a) 根据确定的监测指标，按 JTG/T 1037 的相关规定检查对应传感器的安装位置、数量、安装方式、精度、采样频率，用于中性轴指标计算数据采集的应变传感器还需满足 7.3 的规定，用于冲击系数指标计算数据采集的挠度或应变传感器还需满足 JTG/T J21-01 的相关规定；
- b) 在所有进行指标计算传感器的最近 1 年内的数据中，取距评估程序启动日期最近，满足 JTG/T 1037 中完整率要求的一个月时长的原始数据；
- c) 每个传感器的原始数据存储为单独的文件，按照评估报告编号-监测指标-传感器编号的格式进行命名，并记录相关信息。

7.3 用于横截面中性轴指标计算数据采集的应变传感器，需满足下列要求：

- a) 在跨中截面安装，至少在梁腹板上安装有 2 个传感器，分别位于距顶板下缘和底板上缘 0.1 倍至

- 0.15 倍梁高范围内；
- b) 采样频率不低于 20 Hz。

7.4 只准许符合数据要求的桥梁进入分级评定。

8 分级评定

8.1 当评估对象与检测报告中的桥梁完全一致时，构件检测指标分级评定直接使用检测数据中的结果，否则需按 JTG/T H21 的相关要求，根据检测报告相关内容或重新采集的原始检测数据，对检测指标进行分级评定。

8.2 监测指标健康度分级评定按以下步骤进行：

- a) 存在裂缝监测指标时，需根据监测数据更新检测裂缝指标评定结果，并在后续的评估流程中去除监测裂缝指标；
- b) 计算除中性轴指标以外的构件监测指标，监测数据超限等级按 JTG/T 1037 的相关规定计算，可直接使用监测报告中的超限等级，监测指标按 8.3 进行健康度分级评定；
- c) 根据竣工图纸、检测报告等文件，建立评估对象的有限元模型；
- d) 提取车辆过桥工况，具体计算方法应符合附录 A 的规定；
- e) 中性轴指标按 8.4 分级评定，自振频率指标按 8.5 评分，冲击系数指标按 8.6 评分。

8.3 构件监测指标健康度分级评定标准见表 1。

表 1 构件监测指标健康度分级评定标准

健康度分级	评定标准
1	监测数据无超限
2	监测数据超限等级一级
3	监测数据超限等级二级
4	监测数据超限等级三级

8.4 横截面中性轴指标健康度分级评定按以下步骤进行：

- a) 使用有限元模型，计算每个监测截面的中性轴理论值；
- b) 使用监测数据，计算每个车辆过桥工况下每个监测截面的中性轴测量值，需保证工况内每个截面上的两个传感器数据均有效，具体计算方法应符合 B.2 的规定；
- c) 对每个监测截面的中性轴测量值进行正态分布拟合，取 97%置信区间内的计算结果求平均值，作为本截面中性轴计算值，结果精确至 0.1mm，具体计算方法应符合 B.3 的规定；
- d) 计算每个监测截面中性轴计算值与横截面中性轴理论值的比值，计算构件横截面中性轴监测指标 NA_{nc} ，具体计算方法见附录 B.4；
- e) 根据 NA_{nc} 值，普通钢筋混凝土梁横截面中性轴指标健康度按表 2 分级评定，预应力钢筋混凝土梁横截面中性轴指标健康度按表 3 分级评定。

表 2 普通钢筋混凝土梁横截面中性轴指标健康度分级评定标准

NA_{nc}	定性描述	健康度分级
> 1.05	主梁抗弯性能良好	1
$(0.97, 1.05]$	主梁所受荷载偏高，梁底出现弯曲裂缝	2
$(0.85, 0.97]$	主梁抗弯性能削弱明显	3
$(0.80, 0.85]$	主梁抗弯性能削弱明显，梁底裂缝扩展	4
≤ 0.80	主梁抗弯性能极大削减，受压区存在压溃风险	5

表 3 预应力钢筋混凝土梁横截面中性轴指标健康度分级评定标准

NA_{nc}	定性描述	健康度分级
>1.05 ，无裂缝	主梁抗弯性能良好	1
$(0.97, 1.05]$ ，无裂缝	主梁所受荷载偏高	2
$(0.97, 1.05]$ ，有弯曲裂缝	主梁抗弯性能削弱明显，梁底出现弯曲裂缝	3
$(0.92, 0.97]$ ，有弯曲裂缝	主梁抗弯性能削弱明显，梁底弯曲裂缝扩展	4
≤ 0.92 ，有弯曲裂缝	主梁抗弯性能极大削减，受压区存在压溃风险	5

8.5 自振频率指标健康度评定按以下步骤进行：

- a) 使用有限元模型，计算桥梁的理论自振频率 f_{di} ；
- b) 按 JTG/T J21-01 的规定，计算每辆车辆过桥工况余振下的每个自振频率指标测量值，取测量值的平均值作为自振频率指标计算值 f_{mi} ，结果精确至 0.01 Hz。
- c) 根据 f_{mi} 与 f_{di} 的比值，按表 4 确定自振频率指标健康度评分。

表 4 自振频率指标健康度评分标准

f_{mi} / f_{di}	定性描述	健康度评定分数
≥ 1.10	桥梁整体性能完好	100
$[1.00, 1.10)$	桥梁整体性能良好	$[80, 100)$
$[0.90, 1.00)$	桥梁发生损伤，力学性能发生变化	$[60, 80)$
$[0.80, 0.90)$	桥梁损伤严重，力学性能严重衰退	$[40, 60)$
$[0.75, 0.80)$	桥梁处于危险状态	$[0, 40)$
注：自振频率指标健康度评定分数可按 f_{mi} / f_{di} 的值线性内插		

8.6 冲击系数指标健康度评定按以下步骤进行：

- a) 按 JTG D60 的规定，计算设计冲击系数 μ_{di} ；
- b) 按 JTG/T J21-01 的规定，计算每个车辆过桥工况下的每个冲击系数指标测量值，宜取测量值的平均值作为冲击系数计算值 μ_{mi} ，计算结果精确至 0.01；
- c) 根据 μ_{mi} 与 μ_{di} 的比值，按表 5 确定冲击系数指标健康度评分。

表 5 冲击系数指标健康度评分标准

μ_{mi} / μ_{di}	定性描述	健康度评定分数
≤ 0.95	桥梁竖向动力效应增大程度小	100
$(0.95, 1.05]$	桥梁竖向动力效应增大程度在合理范围内	$[80, 100)$
$(1.05, 1.20]$	桥梁竖向动力效应增大程度大	$[60, 80)$
$(1.20, 1.40]$	桥梁竖向动力效应增大程度大，对运营安全产生影响	$[40, 60)$
> 1.40	桥梁竖向动力效应增大程度过大，桥梁处于危险状态	$[0, 40)$
注：冲击系数指标健康度评定分数可按 μ_{mi} / μ_{di} 的值线性内插		

8.7 只准许完成所有检监测指标的分级评定、评分的桥梁进入融合评估。

9 融合评估

9.1 融合计算与评估按以下步骤进行：

- a) 符合 9.2 规定的桥梁，判定为 5 类桥，否则继续流程；
- b) 按 9.3 的规定，计算桥梁构件技术状况评分；
- c) 按 JTG/T H21 的规定，计算桥梁各部件的技术状况评分并分级，并计算桥梁上部结构、下部结构、桥面系的技术状况评分并分级；
- d) 按 9.4 的规定，计算桥梁总体的技术状况评分 D_r ， D_r 在大于等于 60 分时，按表 6 确定桥梁技术状况分级， D_r 在小于 60 分时，进行承载能力验算；
- e) 根据验算结果，承载能力符合要求的为 4 类桥，不符合要求的为 5 类桥；
- f) 按 9.5 的规定，获取评估结果，进入报告编制。

表 6 桥梁技术状况分类界限表

技术状况评分	技术状况等级		
	1 类	2 类	3 类
D_r	[95, 100]	[80, 95)	[60, 80)

9.2 符合 JTG/T H21 中规定的 5 类桥梁技术状况单项控制指标的桥梁，评为 5 类桥。

9.3 桥梁构件技术状况评分计算按以下步骤进行：

- a) 将构件检测指标和构件监测指标的指标项，按照表 7 进行合并，表 7 中每行保留两种指标中评定等级高的指标，未在表 7 中的指标直接保留；
- b) 按 JTG/T H21 的方法，根据各指标评定等级扣分并计算构件技术状况评分。

表 7 评定指标选取表

编号	部件	检测评定指标	监测评定指标
1	上部结构	跨中挠度	主梁跨中竖向位移
2		预应力构件损伤	预应力
3	下部结构	桥墩位移	桥墩沉降
4		冲刷、掏空	基础冲刷

9.4 按式（1）计算桥梁总体的技术状况评分。

$$D_r = BDCI \times W_D + SPCI \times W_{SP} + SBCI \times W_{SB} + DMFR \times DI_{FR} + DMIF \times DI_{IF} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- W_D —— 桥面系在全桥中的权重，按表 8 规定取值；
- W_{SP} —— 上部结构在全桥中的权重，按表 8 规定取值；
- W_{SB} —— 下部结构在全桥中的权重，按表 8 规定取值；
- D_r —— 桥梁总体技术状况评分，值域为 0 分至 100 分；
- DMFR —— 自振频率总体监测特征技术指标的评分；
- DI_{FR} —— 自振频率总体监测特征技术指标的权重，按表 8 规定取值。
- DMIF —— 冲击系数总体监测特征技术指标的评分；
- DI_{IF} —— 冲击系数总体监测特征技术指标的权重，按表 8 规定取值。

表 8 桥梁结构组成权重

类别	分类	评价部件或监测特征指标	权重
1	检测指标	上部结构（SPCI）	0.344
2		下部结构（SBCI）	0.344
3		桥面系（BDCI）	0.172
4	监测指标	自振频率（DMFR）	0.110
5		冲击系数（DMIF）	0.030

9.5 中小跨径桥梁检监测数据融合评估结果分为 1 类、2 类、3 类、4 类、5 类，见表 9。

表 9 融合评估结果

融合评估等级	技术状况描述
1 类	外观全新，功能良好
2 类	有轻微缺损，对桥梁使用功能无影响，承载能力良好
3 类	有中等缺损，尚能维持正常使用功能，承载能力满足要求
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
5 类	主要构件存在严重缺损，不能正常使用，危及桥梁安全，桥梁处于危险状态

10 报告编制

10.1 检监测数据融合与评估报告的格式需符合附录 C 的要求，报告目录需包含以下内容：

- a) 报告汇总，按 C.1 的规定制订；
- b) 工程概况；
- c) 编制目的及依据；
- d) 检监测指标；
- e) 评估数据；
- f) 分级评定；
- g) 融合评估及结果；
- h) 附件。

10.2 工程概况需包含以下内容：

- a) 评估对象的所属工程、名称、建设或服役龄期、起止点或中心桩号、结构形式、跨径组合、桥跨结构横断面形式、下部结构形式、控制荷载、运营车道数等主要技术指标；
- b) 桥梁健康监测系统的监测内容，传感器布设种类、数量、安装点位、参数等主要技术指标；
- c) 桥梁检测报告、监测报告主要结论（若有）；
- d) 给出至少一张结构整体外貌照片，以及包含评估的桥联(孔)结构的 2 立面图、平面图及横断面图。

10.3 编制目的及依据需包含以下内容：

- a) 说明评估的目的。
- b) 列出所依据的标准规范、规程、设计图纸及其他相关资料。

10.4 评估指标应按照检测指标、监测指标分别列出。

10.5 评估数据需包含以下内容：

- a) 按检测评估指标列出检测原始数据的位置，若有检测指标评定结果，列出结果及来源报告编号，

使用监测数据的裂缝检测指标评定数据，需单独说明；

b) 按监测评估指标列出监测原始数据的监测时间范围、安装位置、频率、文件编号，若新安装传感器，列出传感器的监测内容、编号、型号、参数指标、安装位置、现场通道，若有监测指标评定结果，列出结果及来源报告编号。

10.6 分级评定需包含以下内容：

a) 检测指标评定结果；

b) 中性轴指标评定，自振频率指标、冲击系数指标评分关键数据，监测指标评定结果。

10.7 融合评估及结果需包含以下内容：

a) 构件融合评估指标的选取过程及结果；

b) 桥梁构件技术状况评分、部件技术状况评分与总体技术状况评分的计算过程及结果；

c) 桥梁承载能力验算过程及结果（若有）；

d) 桥梁融合评估分级及评估结果；

e) 结果记录表，按 C.2 的规定编制。

10.8 附件需包含以下内容：

a) 检测、监测原始数据；

b) 典型处理中间过程数据；

c) 必要的图像记录。

附录 A
(规范性)
车辆过桥工况提取方法

A.1 中小跨径桥梁在环境激励下响应较小，难以进行相应分析，车辆荷载激励能够引起桥梁明显的结构响应，能够作为中性轴指标、自振频率指标和冲击系数指标的计算样本数据。

A.2 选取行车道对应梁体上加速度传感器的一条典型时程数据，按以下步骤提取车辆过桥工况：

- a) 对加速度时程数据使用滑动均方根方法进行处理，滑动窗口大小设置为 0.1 倍至 0.2 倍的采样频率，保留至个位；
- b) 使用拾峰法获取峰值的时间，作为车辆过桥工况的峰值时间；
- c) 取每个车辆过桥工况峰值时间前 2 秒至后 3 秒的加速度时程数据、应变数据及挠度数据(若有)；
- d) 根据 JTG/T J21-01 的方法，判断余振时间，获取用于自振频率指标计算的工况时间范围；
- e) 根据 JTG/T J21-01 的方法，判断应变或挠度响应的噪声水平，获取用于冲击系数指标计算的工况时间范围；
- f) 对每个工况，同截面上两个应变传感器的数据，噪声信号不大于信号工况内最大变化幅值的 3%，则本工况可用于中性轴指标计算。

附录 B

(规范性)

中性轴指标计算方法

B.1 对构件 n 的测量截面 i 上的两个应变传感器，首先根据 JTJ/T J21-01 的最大静应变计算方法，取得车辆过桥工况 j 下的应变变化量。

B.2 构件 n 的测量截面 i 的中性轴位置，在车辆过桥工况 j 下的测量值按式 (B.1)，图 B.1 计算。

$$NA_{nij} = \frac{(\epsilon_{bij} + \epsilon_{tij})y_{ti} - \epsilon_{tij}y_{bi}}{\epsilon_{bij}} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

- NA_{nij} —— 第 n 片梁第 i 个监测截面第 j 个计算工况的中性轴位置测量值；
- ϵ_{bij} —— 第 i 个监测截面第 j 个计算工况中下应变传感器应变变化量（单位： $\mu\epsilon$ ）；
- y_{ti} —— 第 i 个监测截面上应变传感器安装位置至梁底的距离（单位：mm）；
- ϵ_{tij} —— 第 i 个监测截面第 j 个计算工况中上应变传感器应变变化量（单位： $\mu\epsilon$ ）；
- y_{bi} —— 第 i 个监测截面下应变传感器安装位置至梁底的距离（单位：mm）；
- H —— 监测构件梁高度（单位：mm）。

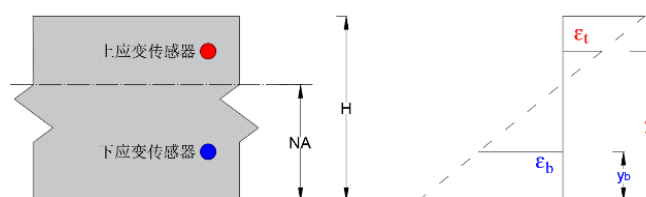


图 B.1 中性轴指标计算参数示意图

B.3 构件 n 的测量截面 i 的中性轴计算值按式 (B.2) 至式 (B.4) 计算。

$$\overline{NA_{ni}} = \frac{\sum_{j=1}^j NA_{nij}}{j}, \overline{NA_{nis}} = \sqrt{\frac{1}{j-1} \sum (NA_{nij} - \overline{NA_{ni}})^2} \dots\dots\dots (B.2)$$

$$L = \overline{NA_{ni}} - 2.17 \frac{\overline{NA_{nis}}}{\sqrt{j}}, \quad U = \overline{NA_{ni}} + 2.17 \frac{\overline{NA_{nis}}}{\sqrt{j}} \dots\dots\dots (B.3)$$

$$NA_{ni} = \frac{1}{m} \sum_{NA_{ni} \in [L, U]} NA_{nij} \text{ (精确到 } 0.1\text{mm)} \dots\dots\dots (B.4)$$

式中：

- $\overline{NA_{ni}}$ —— 第 n 片梁的中性轴位置测量值的平均值；
- $\overline{NA_{nis}}$ —— 第 n 片梁的中性轴位置测量值的方差；
- L, U —— 第 n 片梁的中性轴位置测量值 97%置信区间的边界值；
- m —— 第 n 片梁的中性轴位置测量值处于 97%置信区间内的数量；
- NA_{ni} —— 第 n 片梁的中性轴位置计算值。

B.4 构件中性轴监测指标 NA_{nc} 按式 (B.5) 计算。

$$NA_{nc} = \frac{\sum_{i=1}^i \frac{NA_{ndi}}{NA_{ni}}}{i} \dots\dots\dots (B.5)$$

- 式中：
- NA_{nc} —— 第 n 片梁的中性轴监测指标；
 - NA_{ni} —— 第 n 片梁第 i 个监测截面的中性轴位置计算值；
 - NA_{ndi} —— 第 n 片梁第 i 个监测截面的中性轴位置设计值；
 - $n、i$ —— 监测部位梁编号、监测截面数量；

附录 C
(规范性)
评估报告格式

C.1 报告汇总可采用表 C.1 的格式。

表 C.1 评估报告汇总表

工程名称			
桥梁名称		桥梁建成时间	
桥梁桩号		桥梁结构形式、跨径组成	
评估桥梁（孔）结构形式		评估桥梁（孔）跨径组成	
桥梁风险排查			
检测指标		监测指标	
编制依据			
主要结论			

C.2 融合评估结果可采用表 C.2 的格式，可根据重新评定的构件指标增加行。

表 C.2 融合评估记录表

桥梁编码							
桥梁名称				桥梁建成时间			
桥梁桩号				桥梁结构形式、跨径组成			
评估桥梁（孔）结构形式				评估桥梁（孔）跨径组成			
检监测报告编号							
序号	桥梁组成及评估等级		桥梁部件及评估等级		重新评定的构件指标及等级		
	桥梁组成	评估分数 （0至100）	桥梁部件	评估分数 （0至100）	构件指标	原等级 （1至5）	评估等级 （1至5）
1	上部结构		上部承重构件				
2			上部一般构件				
3			支座				
4	下部结构		翼墙、耳墙				
5			锥坡、护坡				
6			桥墩				
7			桥台				
8			墩台基础				
9			河床				
10			调治构造物				
11	桥面系		桥面铺装				
12			伸缩缝装置				
13			人行道				
14			栏杆				
15			排水系统				
16			照明、标志				
17	自振频率		/				
18	冲击系数		/				
总体技术状况评分					总体技术状况等级		
编制人					负责人		