

团体标准

T/TMAC ×××—202X

在役公路桥梁服役性能诊评与提升技术 规程

Technical regulation for service performance assessment and enhancement of
in-service highway bridges

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

已授权的专利证明材料为专利证书复印件或扉页，已公开但尚未授权的专利申请证明材料为专利公开通知书复印件或扉页，未公开的专利申请的证明材料为专利申请号和申请日期。

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中国技术市场协会 发布

中国技术市场协会（TMAC）是科技领域内国家一级社团，以宣传和促进科技创新，推动科技成果转化，规范交易行为，维护技术市场运行秩序为使命。为满足市场需要，做大做强科技服务业，依据《中华人民共和国标准化法》《团体标准管理规定》，中国技术市场协会有序开展标准化工作。本团体成员和相关领域组织及个人均可提出制修订 TMAC 标准的建议并参与有关工作。TMAC 标准按《中国技术市场协会团体标准管理办法》《中国技术市场协会团体标准工作程序》制定和管理。TMAC 标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议多数专家、成员的同意，方可予以发布。

在本文件实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料反馈至中国技术市场协会，以便修订时参考。

本文件著作权归中国技术市场协会所有。除了用于国家法律或事先得到中国技术市场协会正式授权或许可外，不许以任何形式复制本文件。第三方机构依据本文件开展认证、评价业务，须向中国技术市场协会提出申请并取得授权。

中国技术市场协会地址：北京市海淀区复兴路甲 23 号城乡华懋大厦 12 层 1217 室

邮政编码：100036 电话：010-68270447 传真：010-68270453

网址：www.ctm.org.cn 电子信箱：136162004@qq.com

目 次

前 言..... II

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 基本规定..... 2

 4.1 一般规定..... 2

 4.2 具体要求..... 2

 4.3 实施条件..... 3

 4.4 技术资料管理..... 3

5 异常诊断..... 3

 5.1 诊断参数..... 3

 5.2 诊断方法..... 6

 5.3 诊断阈值..... 6

 5.4 诊断决策..... 8

6 服役状况评估..... 8

 6.1 一般规定..... 8

 6.2 评估指标体系..... 10

 6.3 评估指标权重..... 10

 6.4 评估算法..... 16

 6.5 评估决策..... 18

7 通用性能提升技术..... 18

 7.1 一般规定..... 19

 7.2 粘贴钢板加固法..... 19

 7.3 粘贴纤维增强复合材料加固法..... 19

 7.4 体外预应力法..... 20

 7.5 纤维格栅增强高性能水泥基复合材料加固法..... 21

 7.6 结构体系调整与调整荷载分布法..... 22

8 混凝土结构性能提升技术..... 22

 8.1 一般规定..... 22

 8.2 增大截面法..... 23

 8.4 裂缝修复..... 23

 8.5 缺陷与损伤修复..... 24

 8.6 防护强化技术..... 26

9 钢结构性能提升技术..... 26

 9.1 一般规定..... 26

 9.2 疲劳性能提升技术..... 27

 9.3 腐蚀防护与修复技术..... 28

 9.4 增大截面法..... 31

 9.5 连接性能提升技术..... 31

在役公路桥梁服役性能诊评与提升技术规程

1 范围

本文件规定了在役公路桥梁服役性能诊评与提升的基本规定、异常诊断、服役状况评估、混凝土结构和钢结构性能提升技术。

本文件适用于在役公路桥梁服役性能诊评与提升。

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 50728 工程结构加固材料安全性鉴定技术规范
- GB 50661 钢结构焊接规范
- GB 50755 钢结构工程施工规范
- GB 51367 钢结构加固设计标准
- GB 50017 钢结构设计标准
- GB 50212-2014 建筑防腐蚀工程施工规范
- JT/T 1037-2022 公路桥梁结构监测技术规范
- JTG 5120-2021 公路桥涵养护规范
- JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG/T H21-2011 公路桥梁技术状况评定标准
- JTG/T J22 公路桥梁加固设计规范
- JTG/T J23 公路桥梁加固施工技术规范
- JB/T 6062 无损检测焊缝渗透检测
- JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范
- JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件
- JT/T 695 混凝土桥梁结构表面涂层防腐技术条件
- JT/T 821.1 混凝土桥梁结构表面用防腐涂料 第1部分：溶剂型涂料

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

在役公路桥梁 in service highway bridges

已经建成，可供车辆、行人、管道通过的公路桥梁。

3.2

服役性能 service performance

桥梁在环境与荷载共同作用下所表现出的，涵盖安全性、适用性、耐久性等方面的综合行为与状态。

3.3

健康监测 health monitoring

通过利用结构健康监测系统，以无损的、实时的方式连续采集结构、环境与荷载信息，分析结构各种特征，获取结构因环境因素、损伤或退化而造成的改变。

3.4

诊断阈值 warning threshold

对桥梁作用、结构响应、结构变化、关键结构构件可能出现的各种级别的异常或风险，根据各监测点数据特征指标所设定的临界状态警戒值。

3.5

桥梁定期检查 periodic inspection of bridges

通过接近目测或配合专门的仪器设备对桥梁缺损状况、关键部构件功能性、工作状况等进行全面检查，根据检查结果评定桥梁服役状况。

3.6

桥梁评估 bridge assessment

通过监测环境变化与运营条件下桥梁结构的响应，分析桥梁结构的状态，对其使用性能做出合理的评价，以确保桥梁在设计寿命内能够安全可靠地运行。

3.7

桥梁加固 bridge strengthening

通过对构件的补强和结构性能的改善来恢复或提高现有桥梁的承载能力，以延长其使用年限。

3.8

性能提升 service performance promotion

基于精准诊评结果，通过采用修复、补强、增强或调整结构体系等技术措施，使在役公路桥梁的承载能力、使用功能、耐久性及安全储备达到或优于原设计要求的活动。

4 基本规定

4.1 一般规定

- 4.1.1 在役公路桥梁服役性能诊评与提升应由公路桥梁管理部门委托或授权。
- 4.1.2 在役公路桥梁服役性能诊评与提升应贯彻诊评精准、快速提升的理念，采取检测、监测、现场试验相结合的方式，制定服役性能精准诊评与快速提升方案，建立完善的实施流程。
- 4.1.3 在役公路桥梁针对自身的运营条件、服役状况、环境特点，建立检测、长短期监测制度，周期性地开展检查、评定与维修。有条件时宜安装桥梁健康监测系统进行长期监测，系统地掌握在役公路桥梁服役状况，及时发现结构损伤和相关环境的变化。
- 4.1.4 在役公路桥梁在运营过程中，宜建立养护信息化系统并及时更新和完善，有条件时可与建设期技术档案、信息化系统统筹策划，促进建养衔接。
- 4.1.5 在役公路桥梁服役性能诊评与提升应优先采用自动化、智能化、信息化、绿色环保、交通干扰小的检测、养护维修技术和装备。
- 4.1.6 服役性能诊评与提升过程中应重视环境保护和环境综合治理。

4.2 具体要求

4.2.1 在役公路桥梁服役性能诊评与提升应做到：

- a) 应依据桥梁的运营期多源数据开展，并进行现场核对与分析。
- b) 应考虑桥梁结构实际服役状况。
- c) 应保持桥梁结构完好无损，关键部构件功能完好，无异常变形，稳定性良好，耐久性良好。
- d) 对桥梁外观影响小。

4.2.2 采用有损检测手段采集结构信息时，应合理选择测区部位，减轻对桥梁构件的结构性损伤。对现场检测造成的损伤，应事先确定修补方案，并及时进行修补。

4.2.3 应根据不同的环境、内容和要求采用合适的设备、材料与方法。已经布置检测、监测设施的桥梁应充分利用检测、监测仪器的数据。

4.2.4 应制定诊评与提升方案，包括详细的检、监测方法和服役性能提升措施，复杂桥梁的诊评与提升方案应专门制定。

4.2.5 在桥梁服役性能诊评与提升工作完成后，应按照有关规定进行验收。提升后桥梁工程部位的构件技术状况应恢复到一、二类。

4.3 实施条件

4.3.1 诊评周期应参照《公路桥涵养护规范》JTG 5120-2021 中相关规定执行，特殊情况可适当缩短诊评周期。

4.3.2 经过改扩建的公路桥梁在运行满一年后应进行一次结构诊评；经过加固维修的公路桥梁必要时每年进行一次结构诊评。

4.3.3 应参照诊评结果实施桥梁结构的服役性能提升。

4.4 技术资料管理

4.4.1 在役公路桥梁应有完备的建成交接手续及成套技术资料，并服务于诊评与提升工作。

4.4.2 在役公路桥梁服役性能诊评与提升的数据分析、交工验收等有关技术文件，均应按统一格式完整地归入桥梁养护期技术档案及数据库。对于已建立养护管理系统的桥梁，其主要诊评与提升结果宜纳入管理系统。

4.4.3 现场获取的试样、数据等信息应及时标识并妥善保存，并应满足相关标识、传递和储存等规定。

5 异常诊断

5.1 诊断参数

5.1.1 桥梁结构异常诊断参数包括以下三类：安全性参数，适用性参数，耐久性参数。所采用的具体参数应根据运营环境复杂性、桥梁重要性、桥梁力学特征、安全评估需求和运营维护需求综合确定。

5.1.2 桥梁结构异常诊断参数宜通过桥梁健康监测系统获取。

5.1.3 获取诊断参数的传感器型号选择应满足测量范围、测量精度、分辨率、灵敏度、线性度、重复性、动态频响特性、稳定性、耐久性和环境适应性要求。

5.1.4 梁桥的诊断参数应按表 1 进行选择。

表1 梁桥的诊断参数

类别	内容	要求
安全性参数	主梁应变	■
	主梁竖向变形	■
	主梁横向变形	△
	主梁加速度	■
	伸缩缝位移	■
	支座位移	■
	桥墩和桥台应变	△
	桥墩和桥台变位	△
	基础变位	△
适用性参数	车辆荷载	△
	裂缝	△
耐久性参数	钢筋锈蚀程度	△
	基础冲刷深度	△

注：“■”为应诊断参数，“△”为可诊断参数。

5.1.5 拱桥的诊断参数应按表2进行选择。

表2 拱桥的诊断参数

类别	内容	要求
安全性参数	主梁应变	■
	主梁竖向变形	■
	主梁横向变形	△
	主梁加速度	■
	主拱圈变形	■
	主拱圈应变	■
	伸缩缝位移	■
	支座位移	■
	吊杆索力	■
	桥墩和桥台应变	△
	桥墩和桥台变位	△
	基础变位	△
适用性参数	车辆荷载	△
	裂缝	△
耐久性参数	钢筋锈蚀程度	△
	基础冲刷深度	△

注：“■”为应诊断参数，“△”为可诊断参数。

5.1.6 斜拉桥的诊断参数应按表3进行选择。

表3 斜拉桥的诊断参数

类别	内容	要求
安全性参数	主梁应变	■
	主梁竖向变形	■
	主梁横向变形	△
	主梁加速度	■
	桥塔加速度	△
	桥塔应变	■

	桥塔纵向变形	■
	桥塔横向变形	■
	塔顶倾角	■
	伸缩缝位移	■
	支座位移	■
	斜拉索索力	■
	桥墩和桥台应变	△
	桥墩和桥台变位	△
	基础沉降	△
适用性参数	车辆荷载	△
	裂缝	△
耐久性参数	钢筋锈蚀程度	△
	基础冲刷深度	△
注：“■”为应诊断参数，“△”为可诊断参数。		

5.1.7 悬索桥的诊断参数应按表4进行选择。

表4 悬索桥的诊断参数

类别	内容	要求
安全性参数	主梁应变	■
	主梁竖向变形	■
	主梁横向变形	△
	主梁加速度	■
	桥塔加速度	△
	桥塔应变	■
	桥塔纵向变形	■
	桥塔横向变形	■
	塔顶倾角	■
	伸缩缝位移	■
	支座位移	■
	缆索索力	■
	锚碇应变	△

	桥墩和桥台应变	△
	桥墩和桥台变位	△
	基础沉降	△
适用性参数	车辆荷载	△
	裂缝	△
耐久性参数	钢筋锈蚀程度	△
	基础冲刷深度	△

注：“■”为应诊断参数，“△”为可诊断参数。

5.2 诊断方法

5.2.1 异常诊断应符合行业管理的要求，并可按下列流程进行：参数选取→数据分析→诊断方案→诊断结果。根据诊断指标数量和类型分为单指标确定性诊断、单指标概率诊断、多指标概率诊断。

5.2.2 单指标确定性诊断符合以下要求：

- 单指标确定性诊断是通过单一诊断参数诊断在役公路桥梁结构异常的方法。
- 通过单一诊断参数的监测数据与诊断阈值的直接对比，判断在役公路桥梁结构的运营状态。
- 诊断参数的选取应考虑实际情况，选择已有监测数据的诊断参数。

5.2.3 单指标概率诊断符合以下要求：

- 单指标概率诊断是通过单一诊断参数诊断在役公路桥梁结构异常的方法。
- 通过单一诊断参数的监测数据分析结果与诊断阈值的对比，并考虑概率因素的影响，判断在役公路桥梁结构的运营状态。
- 诊断参数的选取应考虑实际情况，选择已有监测数据的诊断参数。
- 在役公路桥梁结构异常概率因素宜采用贝叶斯估计确定。

5.2.4 多指标概率诊断符合以下要求：

- 多指标概率诊断是通过多个诊断参数诊断在役公路桥梁结构异常的方法。
- 通过多个诊断参数的监测数据综合分析结果与诊断阈值的对比，并考虑概率因素的影响，判断在役公路桥梁结构的运营状态。
- 诊断参数的选取应考虑实际情况，选择已有监测数据的诊断参数。
- 在役公路桥梁结构异常概率因素宜采用贝叶斯估计确定。
- 多个诊断参数的监测数据综合分析结果应考虑指标的物理意义进行判断。

5.2.5 诊断时应判别和区分传感器故障及结构异常。

5.3 诊断阈值

5.3.1 当诊断结果超过各级诊断阈值时，应及时上报。

5.3.2 诊断阈值的设置应符合以下原则：

- 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。
- 应根据、材料允许值、设计值、规范容许值、理论计算值、监测数据值、工程经验值设置。
- 应合理反映异常程度，宜包括 2 个级别。

5.3.3 诊断阈值设定应符合表 5 的规定。

表5 诊断阈值设定表

内容	阈值	级别	桥梁类型			
			梁桥	拱桥	斜拉桥	悬索桥
主梁应变	达到历史最大值	一级	■	■	■	■
	达到设计最不利工况计算值	二级				
主梁竖向变形	达到历史累积 0.95 分位值	一级	■	■	■	■
	达到 0.8 倍设计值	二级				
主梁横向变形	达到历史累积 0.95 分位值	一级	△	△	△	△
	达到 0.8 倍设计值	二级				
主梁加速度	10min 加速度均方根达到 31.5cm/s ²	一级	■	■	■	■
	10min 加速度均方根达到 50.5cm/s ²	二级				
塔顶偏位	达到 0.8 倍设计值	一级	-	-	■	■
	达到设计值	二级				
桥塔应变	达到历史最大值	一级	-	■	■	■
	达到设计最不利工况计算值	二级				
主拱圈变形	拱顶位移达到 0.8 倍设计值	一级	-	■	-	-
	拱顶位移达到设计值	二级				
主拱圈应变	达到历史最大值	一级	-	■	-	-
	达到设计最不利工况计算值	二级				
伸缩缝位移	绝对值达到 0.8 倍设计值	一级	■	■	■	■
	绝对值达到设计值	二级				
支座位移	绝对值达到 0.8 倍设计值	一级	■	■	■	■
	绝对值达到设计值	二级				
各类索力	达到 0.95 倍设计值或上下游偏差超过 10%	一级	-	■	■	■
	达到 1.15 倍设计值	二级				
桥墩和桥台应变	达到历史最大值	一级	△	△	△	△
	达到设计最不利工况计算值	二级				
桥墩和桥台变位	达到 0.8 倍设计值	一级	△	△	△	△
	达到设计值	二级				
锚碇应变	达到历史最大值	一级	-	-	-	△
	达到设计最不利工况计算值	二级				

基础变位	达到 0.8 倍设计值	一级	△	△	△	△
	达到设计值	二级				
车辆荷载	达到 1.5 倍设计车辆荷载	一级	△	△	△	△
	达到 2.0 倍设计车辆荷载	二级				
裂缝	出现结构性裂缝或发展加速	一级	△	△	△	△
	宽度超过规范限值	二级				
钢筋锈蚀程度	锈蚀深度达到保护层深度	一级	△	△	△	△
	截面损失	二级				
基础冲刷深度	达到 0.7 倍设计冲刷深度	一级	△	△	△	△
	达到设计冲刷深度	二级				

注 1: “■”为应诊断项, “△”为可诊断项, “-”为无此项。

注 2: 表中数值为通用参考值, 对于特殊桥梁, 宜基于设计文件、专项分析或长期监测数据统计进行个性化设定。

5.4 诊断决策

5.4.1 诊断结果应由专门的发布机构或被授权机构, 根据桥梁实际服役状况向相关部门及时汇报、更新信息。

5.4.2 诊断结果为结构异常时, 应提醒进行桥梁检查, 检查建议宜参考《公路桥梁结构监测技术规范》JT/T 1037-2022 和《公路桥涵养护规范》JTG 5120-2021 相关规定制定检查方案。

5.4.3 诊断结果显示结构异常影响行车安全时, 应提出车辆通行管控建议。车辆通行管控建议宜结合桥梁结构监测数据分析并协同其他运行管理系统信息给出。

5.4.4 诊断结果的反馈应充分考虑时效性, 经综合评估后根据超限程度决定是否需要进行性能提升。

5.4.5 必要时应根据诊断结果组织专家研判。

6 服役状况评估

6.1 一般规定

6.1.1 在役公路桥梁服役状况应从缺损状况、功能状况、工作状况、能力状况和风险状况五个方面进行评估。

- 缺损状况应依据构件缺失、缺陷和损伤情况进行缺损状况等级评定。
- 功能状况应依据构件和结构的设置合理性和使用功能性进行评定。
- 工作状况应依据桥梁结构异常工作状态进行评定。
- 能力状况应依据结构的通行能力、承载能力、御灾能力进行评定。
- 风险状况应依据使用潜在风险和结构潜在风险进行评定。

6.1.2 在役公路桥梁服役状况评估结果的等级为桥梁各构件状况评定结果通过分层综合得到全桥的服役状况等级。

6.1.3 在役公路桥梁缺损状况评估:

- 在役公路桥梁缺损状况等级评定包括桥梁构件、部件、部位（桥面系、上部结构、下部结构）和全桥评定。
- 在役公路桥梁缺损状况等级评定应采用分层综合评定的方法。分层综合评定应先对桥梁各构件进行评定, 然后对桥梁各部件进行评定, 再对桥面系、上部结构和下部结构分别进行评定, 最后进行桥梁缺损状况等级的评定, 见图 1。

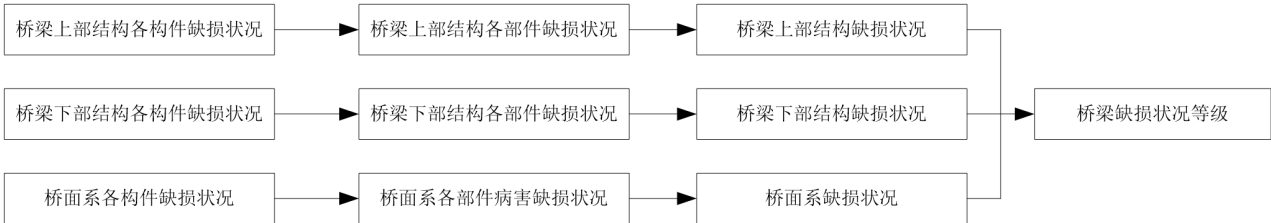


图 1 在役公路桥梁缺损状况等级评定

- c) 当单个桥梁存在不同结构形式时，可根据结构形式的分布情况划分评定单元，分别对各评定单元进行桥梁缺损状况等级评定。
- d) 桥梁构件应根据桥梁结构形式、施工工艺、受力特点等进行合理划分。
- e) 桥梁部件分为主要部件和次要部件。
- f) 在役公路桥梁缺损状况评定等级应分为 1 类、2 类、3 类、4 类、5 类。桥梁全桥缺损状况评定等级应按表 6 执行。

表6 桥梁全桥缺损状况评定等级

全桥病害状况评定等级	桥梁缺损状况描述
1 类	良好状态，功能完好
2 类	较好状态。功能良好，有局部轻度缺损或污染；对桥梁使用功能及安全无任何影响
3 类	较差状态。材料有中等缺损；或出现轻度功能性病害，但发展缓慢，尚能维持正常使用功能，进一步恶化将影响桥梁安全
4 类	差的状态。材料有大量严重缺损；或出现中等功能性病害，且发展较快；结构变形小于或等于规范值，严重影响桥梁使用功能；或影响承载能力，不能保证正常安全使用。
5 类	危险状态。材料有大量严重缺损，出现严重的功能性病害，且有继续扩展现象；关键部位的部分材料强度达到极限，异常变形大；承载能力降低，危及桥梁安全

- 6.1.4 在役公路桥梁功能状况评估应对支座，伸缩缝，防震限位装置，排水系统，翼墙（耳墙）锥坡（护坡），调治构造物等设置情况进行评估。
- 6.1.5 在役公路桥梁工作状况评估应从结构变形、变位、异响、异常振动，涂装异常衰变等方面进行评估。
- 6.1.6 在役公路桥梁能力状况评估应从承载能力和桥面行车条件进行评估。
- 6.1.7 在役公路桥梁风险状况评估应从防撞设施、周围环境、病害发展等方面进行评估。
- 6.1.8 在役公路桥梁服役状况评估工作流程应按图 2 执行。

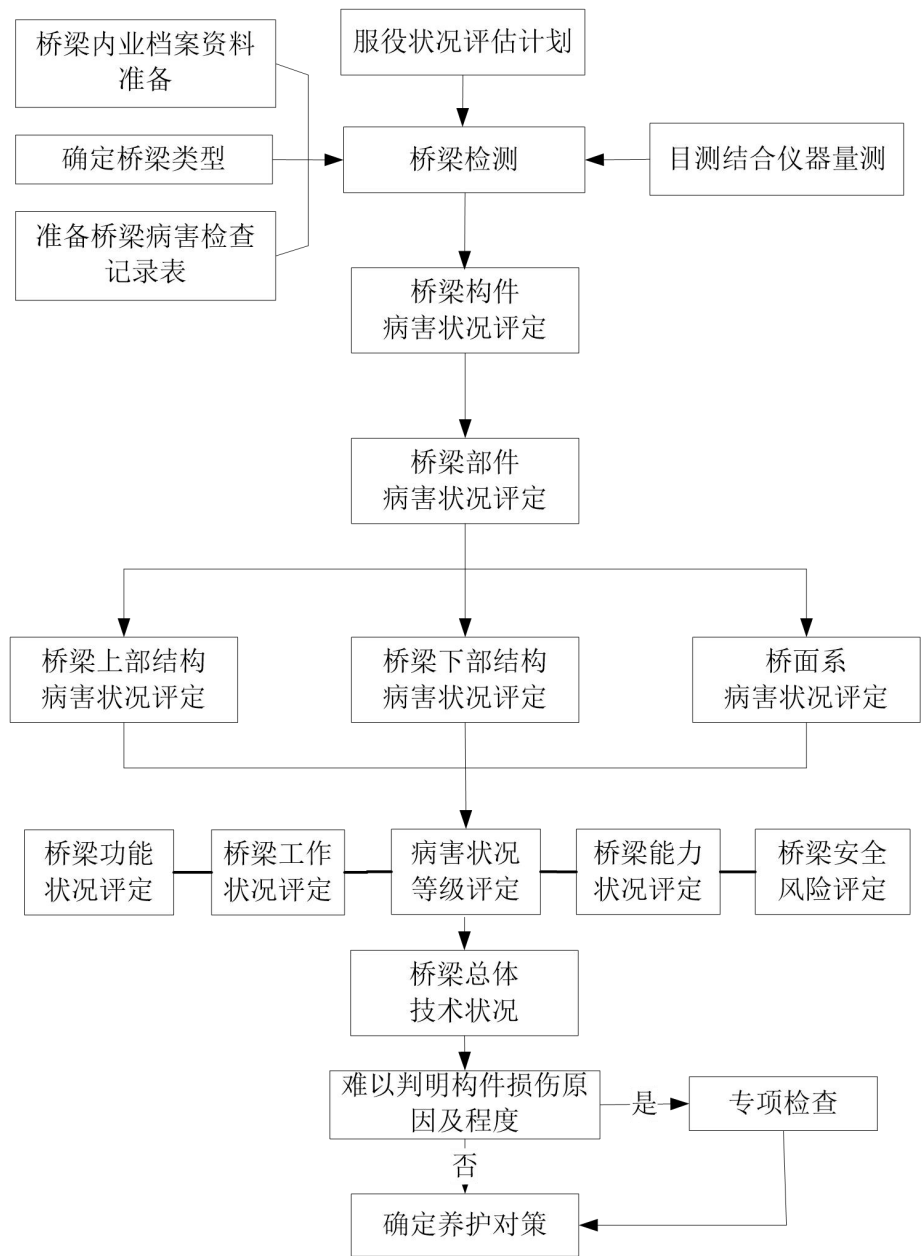


图 2 桥梁服役状况评估工作流程图

6.2 评估指标体系

6.2.1 在役公路桥梁的评估指标体系总共分为三层，分别为部位层、构件层和病害层。部件层、构件层和病害层评定结果均用 0~100 分表示，且部件层和构件层评定结果按严重程度划分为 5 类等级。

6.2.2 在役公路桥梁底层病害指标可参照《公路桥梁技术状况评定标准》JTG/T H21-2011 中相关规定选取。

6.3 评估指标权重

6.3.1 梁式桥各部件权重值宜按表7~表9的规定取值。

表7 梁式桥上部结构各部件权重值

部位	桥型	类别(<i>i</i>)	部件	权重值
上部结构	板梁桥	1	板梁	0.60
		2	铰缝	0.3
		3	支座	0.1
	肋梁桥 (T梁、I梁、 π 梁等)	1	肋梁	0.6
		2	横隔板	0.15
		3	湿接缝(铰缝、桥面板)	0.15
		4	支座	0.1
	装配式箱梁	1	箱梁	0.7
		2	湿接缝	0.1
		3	横隔板	0.1
		4	支座	0.1
	整体式箱梁	1	箱梁	0.8
		2	支座	0.2
	悬臂梁	1	悬臂梁及挂梁	0.8
		2	横向连系	0.1
		3	支座	0.1

表8 梁式桥下部结构各部件权重值

部位	类别(<i>i</i>)	部件	权重值
下部结构	1	翼墙、耳墙	0.02
	2	锥坡、护坡	0.01
	3	桥墩	0.30
	4	桥台	0.30
	5	墩台基础	0.28
	6	河床	0.07
	7	调治构造物	0.02

表9 梁式桥桥面系各部件权重值

部位	类别(<i>i</i>)	部件	权重值
桥面系	1	桥面铺装	0.40
	2	伸缩缝	0.25
	3	人行道	0.05
	4	栏杆、护栏	0.15
	5	排水系统	0.10
	6	照明、标志	0.05

6.3.2 拱式桥各部件权重值宜按表10~表12的规定取值。

表10 拱式桥上部结构各部件权重值

部 位	桥型	类 别 (<i>i</i>)	部 件	权重值
上 部 结 构	板 拱 桥	1	主 拱 圈	0.70
		2	拱 上 结 构	0.20
		3	桥 面 板	0.10
	箱 形 拱 桥	1	主 拱 圈	0.70
		2	拱 上 结 构	0.20
		3	桥 面 板	0.10
	肋 拱 桥	1	拱 肋	0.60
		2	横 向 连 系	0.12
		3	拱 上 结 构	0.16
		4	桥 面 板	0.08
		5	支 座	0.04
	刚 架 拱 桥	1	刚 架 拱 片	0.55
		2	横 向 连 系	0.15
		3	拱 上 结 构	0.10
		4	桥 面 板	0.15
		5	支 座	0.05
	桁 架 拱 桥	1	桁 架 拱 片	0.50
		2	横 向 连 系	0.20
		3	拱 上 结 构	0.10
		4	桥 面 板	0.15
		5	支 座	0.05
	双 曲 拱 桥	1	拱 肋	0.50
		2	拱 波	0.10
		3	横 向 连 系	0.15
		4	拱 上 结 构	0.15
		5	桥 面 板	0.10
	组 合 拱 桥	1	拱 肋	0.28
		2	横 向 连 系	0.05
		3	立 柱	0.13
		4	吊 杆	0.13
		5	系 杆	0.28
		6	桥 面 板 (梁)	0.08
		7	支 座	0.05

表11 拱式桥下部结构各部件权重值

部 位	类 别 (<i>i</i>)	部 件	权重值
下 部 结 构	1	翼 墙、耳 墙	0.02
	2	锥 坡、护 坡	0.01
	3	桥 墩	0.30
	4	桥 台	0.30
	5	墩 台 基 础	0.28
	6	河 床	0.07
	7	调 治 构 造 物	0.02

表12 拱式桥桥面系各部件权重值

部 位	类 别 (<i>i</i>)	部 件	权重值
桥 面 系	1	桥 面 铺 装	0.40
	2	伸 缩 缝	0.25
	3	人 行 道	0.10
	4	栏 杆、护 栏	0.10
	5	排 水 系 统	0.10
	6	照 明、标 志	0.05

6.3.3 悬索桥各部件权重值宜按表13~表14的规定取值。

表13 悬索桥上、下部结构各部件权重值

桥型	部 位	类 别 (<i>i</i>)	部 件	权重值
地锚式悬索桥	上 部 结 构	1	加 劲 梁	0.15
		2	索 塔	0.20
		3	支 座	0.05
		4	索 鞍 (主鞍和散索鞍)	0.04
		5	主 缆	0.25
		6	索 夹	0.04
		7	吊 索 及 钢 护 筒	0.17
		8	锚 杆	0.10
	下 部 结 构	9	锚 锭	0.42
		10	基 础	0.24
		11	桥 墩	0.10
		12	桥 台	0.10
		13	翼墙、耳墙	0.02
		14	锥坡、护坡	0.01
		15	河 床	0.08
		16	调治构造物	0.03

桥型	部位	类别(<i>i</i>)	部件	权重值
自锚式悬索桥	上部结构	1	加劲梁	0.20
		2	索塔	0.20
		3	支座	0.05
		4	索鞍 (主鞍和散索鞍)	0.04
		5	主缆	0.30
		6	索夹	0.04
		7	吊索及钢护筒	0.17
	下部结构	8	基础	0.46
		9	桥墩	0.20
		10	桥台	0.20
		11	翼墙、耳墙	0.02
		12	锥坡、护坡	0.01
		13	河床	0.08
		14	调治构造物	0.03

表14 悬索桥桥面系各部件权重值

部位	类别(<i>i</i>)	部件	权重值
桥面系	1	桥面铺装	0.40
	2	伸缩缝	0.25
	3	人行道	0.10
	4	栏杆、护栏	0.10
	5	排水系统	0.10
	6	照明、标志	0.05

6.3.4 斜拉桥各部件权重值宜按表15~表17的规定取值。

表15 斜拉桥上部结构各部件权重值

桥型	桥型	类别(<i>i</i>)	部件	权重值
上部结构	斜拉桥	1	斜拉索系统 (斜拉索、锚具、拉索护套、 减震装置等)	0.50
		2	主梁	0.20
		3	索塔	0.20
		4	支座	0.10
	部分斜拉桥	1	斜拉索系统(斜拉索、锚具、 拉索护套、减震装置等)	0.40
		2	主梁	0.30
		3	索塔	0.20
		4	支座	0.10

表16 斜拉桥下部结构各部件权重值

部 位	类 别 (<i>i</i>)	部 件	权 重 值
下 部 结 构	1	翼 墙、耳 墙	0.02
	2	锥 坡、护 坡	0.01
	3	桥 墩	0.30
	4	桥 台	0.30
	5	墩 台 基 础	0.28
	6	河 床	0.07
	7	调 治 构 造 物	0.02

表17 斜拉桥桥面系各部件权重值

部 位	类 别 (<i>i</i>)	部 件	权 重 值
桥 面 系	1	桥 面 铺 装	0.40
	2	伸 缩 缝	0.25
	3	人 行 道	0.10
	4	栏 杆、护 栏	0.10
	5	排 水 系 统	0.10
	6	照 明、标 志	0.05

6.3.5 桥梁结构组成权重值宜按表18～表21的规定取值。

表18 梁桥结构组成权重值

桥 梁 部 位	权 重 值
上 部 结 构	0.45
下 部 结 构	0.35
桥 面 系	0.20

表19 拱桥结构组成权重值

桥 梁 部 位	权 重 值
上 部 结 构	0.40
下 部 结 构	0.40
桥 面 系	0.20

表20 悬索桥结构组成权重值

桥 梁 部 位	权 重 值
上 部 结 构	0.50
下 部 结 构	0.30
桥 面 系	0.20

表21 斜拉桥结构组成权重值

桥梁部位	权重值
上部结构	0.50
下部结构	0.30
桥面系	0.20

6.4 评估算法

6.4.1 桥梁病害各检测指标扣分值应按表22执行。对已维修处理的病害，应根据维修加固效果确定其标度。

表22 构件各检测指标扣分值

检测指标所能达到的最高标度	指标标度				
	1	2	3	4	5
3	0	20	35	—	—
4	0	25	40	50	—
5	0	35	45	60	100

6.4.2 桥梁构件的评分，应参照现行行业标准《公路桥梁技术状况评定标准》JTG/T H21-2011，按式（1）计算

$$PMCI_l(BMCI_l或DMCI_l)=100-\sum_{x=1}^k U_x \dots\dots\dots (1)$$

当 $x=1$ 时，

$$U_1 = DP_{i1}$$

当 $x \geq 2$ 时，

$$U_x = \frac{DP_{ij}}{100 \times \sqrt{x}} \times (100 - \sum_{y=1}^{x-1} U_y) \quad (\text{其中 } j=x, x \text{ 取 } 2, 3, \dots k)$$

当 $k \geq 2$ 时， $U_1 \cdots U_x$ 公式中的扣分值 DP_{ij} 按照从大到小的顺序排列。

当 $DP_{ij}=100$ 时，

$$PMCI_l(BMCI_l或DMCI_l)=0$$

式中：

- $PMCI_l$ ——上部结构第 i 类部件的 l 构件的得分，值域为 0~100 分；
- $BMCI_l$ ——下部结构第 i 类部件的 l 构件的得分，值域为 0~100 分；
- $DMCI_l$ ——桥面系第 i 类部件的 l 构件的得分，值域为 0~100 分；
- k ——第 i 类部件 l 构件出现扣分的指标的种类数；
- $U、x、y$ ——引入的变量；
- i ——部件类别，例如 i 表示上部承重构件、支座、桥墩等；
- j ——第 i 类部件 l 构件的第 j 类检测指标；
- DP_{ij} ——第 i 类部件 l 构件的第 j 类检测指标的扣分值；根据构件各种检测指标扣

分值进行计算，扣分值按表 22 规定取值。

6.4.3 桥梁部件的技术状况评分，按公式（2）计算。

$$PCCI_i = \overline{PMCI} - (100 - PMCI_{\min}) / t \dots\dots\dots (2)$$

或 $BCCI_i = \overline{BMCI} - (100 - BMCI_{\min}) / t$
或 $DCCI_i = \overline{DMCI} - (100 - DMCI_{\min}) / t$

式中：

- $PCCI_i$ ——上部结构第 i 类部件的得分，值域为 0~100 分；当上部结构中的主要部件某一构件评分值 $PMCI_i$ 在 $[0, 40)$ 区间时，其相应的部件评分值 $PCCI_i=PMCI_i$ ；
- $\overline{PMCI}$ ——上部结构第 i 类部件各构件的得分平均值，值域为 0~100 分；
- $PCCI_i$ ——下部结构第 i 类部件的得分，值域为 0~100 分；当下部结构中的主要部件某一构件评分值 $BMCI_i$ 在 $[0, 40)$ 区间时，其相应的部件评分值 $BCCI_i=BMCI_i$ ；
- $\overline{BMCI}$ ——下部结构第 i 类部件各构件的得分平均值，值域为 0~100 分；
- $DCCI_i$ ——桥面系第 i 类部件的得分，值域为 0~100 分；
- $\overline{DMCI}$ ——桥面系第 i 类部件各构件的得分平均值，值域为 0~100 分；
- $PMCI_{\min}$ ——上部结构第 i 类部件中分值最低的构件得分值；
- $BMCI_{\min}$ ——下部结构第 i 类部件中分值最低的构件得分值；
- $DMCI_{\min}$ ——桥面系第 i 类部件分值最低的构件得分值；
- t ——随构件的数量而变的系数，见表 23。

表23 t 值

n （构件数）	t	n （构件数）	t
1	∞	20	6.6
2	10	21	6.48
3	9.7	22	6.36
4	9.5	23	6.24
5	9.2	24	6.12
6	8.9	25	6.00
7	8.7	26	5.88
8	8.5	27	5.76
9	8.3	28	5.64
10	8.1	29	5.52
11	7.9	30	5.4
12	7.7	40	4.9
13	7.5	50	4.4
14	7.3	60	4.0
15	7.2	70	3.6

16	7.08		80	3.2
17	6.96		90	2.8
18	6.84		100	2.5
19	6.72		≥ 200	2.3
注 1: n 为第 i 类部件的构件总数。				
注 2: 表中未列出 t 值采用内插法计算。				

6.4.4 桥梁上部结构、下部结构、桥面系的技术状况评分按公式（3）计算。

$$SPCI (SBCI \text{ 或 } BDCI) = \sum^m PCCI_i (BCCI_i \text{ 或 } DCCI_i) \times w_i \dots\dots\dots (3)$$

式中：
 $SPCI$ ——桥梁上部结构技术状况评分，值域为 0~100；
 $SBCI$ ——桥梁下部结构技术状况评分，值域为 0~100；
 $BDCI$ ——桥面系技术状况评分，值域为 0~100；
 m ——上部结构（下部结构或桥面系）的部件种类数；
 w_i ——第 i 类部件的权重，按 5.2~5.3 节规定取值；对于桥梁中未设置的部件，应根据此部件的隶属关系，将其权重值分配给各既有部件，分配原则按照各既有部件权重在全部既有部件权重中所占比例进行分配。

6.4.5 桥梁总体的技术状况评分，按公式（4）计算。

$$Dr = DCI \times W_D + SPCI \times W_{SP} + SBCI \times W_{SB} \dots\dots\dots (4)$$

式中：
 Dr ——桥梁总体技术状况评分，值域为 0~100；
 w_D ——桥面系在全桥中的权重，按 5.3 规定取值；
 w_{SP} ——上部结构在全桥中的权重，按 5.3 规定取值；
 w_{SB} ——下部结构在全桥中的权重，按 5.3 规定取值。

6.4.6 桥梁技术状况分类界限应按表 24 规定执行。

表24 桥梁技术状况分类界限表

技术状况等级 (D_j) 技术状况评分	1 类	2 类	3 类	4 类	5 类
Dr ($SPCI$ 、 $SBCI$ 、 $BDCI$) ($PCCI$ 、 $BCCI$ 、 $DCCI$)	[90, 100]	[80, 90)	[60, 80)	[40, 60)	[0, 40)

6.4.7 在役公路桥梁缺损状况评定标准可参照《公路桥梁技术状况评定标准》JTG/T H21-2011中相关规定执行。

6.5 评估决策

- 6.5.1 评估结果难以判明在役公路桥梁构件损伤原因及程度时应进行专项检查。
- 6.5.2 在役公路桥梁评估完成后应从设计、施工和其他方面对其病害原因、影响程度和发展趋势进行分析。
- 6.5.3 在役公路桥梁评估完成后应提出养护策略，养护策略应包含部件维修方式和全桥养护对策。部件维修方式应包含维修范围、维修时间和维修方法。部件维修范围应严格明确，对于存在不同维修时间和维修方法的，应明确至构件。
- 6.5.4 在役公路桥梁评估完成后，对于 3-5 类桥梁宜针对具体病害提出性能提升技术。根据桥梁按主要材料的分类，性能提升技术可分为通用性能提升技术、混凝土结构性能提升技术、钢结构性能提升技术，具体的方案在第 7~9 章中进行详细规定。

7 通用性能提升技术

7.1 一般规定

7.1.1 为规范适用于多种结构材料的在役公路桥梁性能提升技术的选择、设计与施工，制定本章节。

7.1.2 通用性能提升技术的应用应遵循以下原则：

- a) 精准施策：基于本规程前述的精准诊评结果，选择针对性技术方案。
- b) 协同工作：确保新增部分与原结构形成整体，共同受力。
- c) 快速高效：优先采用对交通干扰小、施工周期短的技术与工艺。
- d) 安全耐久：采用的材料与工艺应保证提升后结构的安全性和长期耐久性。
- e) 经济合理：综合考虑初期投入与全寿命周期成本，选择最优方案。

7.1.3 本章节适用于需要进行承载力、刚度、稳定性或耐久性提升的在役公路桥梁混凝土结构与钢结构。在选择具体技术后，除符合本章规定外，尚应满足本规程后续章节中关于该技术应用于具体材料（混凝土或钢）的特殊要求。

7.2 粘贴钢板加固法

7.2.1 规定钢板设计、表面处理、锚固措施、加压固定及防腐处理要求。

7.2.2 本方法适用于钢筋混凝土及预应力混凝土受弯构件、钢筋混凝土受拉和受压构件、钢桥截面高度不足或截面承载力不足的加固。粘贴加固用钢板宜采用 Q235 钢和 Q345 钢。

7.2.3 粘贴钢板外表面应进行防锈蚀处理，表面防锈蚀材料对钢板及胶粘剂应无害。

7.2.4 钢板下料宜采用工厂自动、半自动切割方法，切割边缘表面光滑，无毛刺、咬口及翘曲等缺陷。

7.2.5 被加固构件处于极端气候、介质侵蚀等特殊环境时，粘贴钢板应采用耐环境因素作用的胶粘剂，并按专门的工艺要求施工。

7.2.6 钢板粘贴应选择干燥环境下进行。胶粘剂应满足设计要求的各项力学指标和耐久性要求。其质量应符合现行《公路桥梁加固设计规范》JTG/T J22 的相关规定。

7.2.7 粘贴钢板加固混凝土或钢构件时，宜将钢板受力方式设计成仅受轴向应力作用。

7.2.8 采用粘贴钢板加固桥梁混凝土构件时，应采取措施卸除作用在桥梁上的活载。胶粘剂未达到设计强度前应封闭交通。

7.2.9 采用粘贴钢板对受弯构件进行抗弯加固设计时，应遵守现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 中的有关要求。

7.2.10 钢板的安装与锚固应符合以下规定：

- a) 将配好的胶粘剂均匀地涂抹在清洁的混凝土和钢板条粘结面上，立面涂胶应自上而下地进行。
- b) 钢板条粘结面上的抹胶可中间厚两边薄，板的中央涂抹胶的厚度为3~5mm。将钢板平稳对准螺栓孔并迅速拧紧螺帽，使钢板与混凝土紧密粘合，清除挤出的多余胶粘剂。钢板加压的顺序应由中间向两边对称进行。
- c) 钢板厚度大于5mm时，采用压力注胶粘结，先用封边胶将钢板周围封闭，留出排气孔，在钢板低端粘贴注浆嘴并通气试漏后，以不小于0.1MPa的压力压入胶粘剂，当排气孔出现浆液后停止加压，并用封边胶封堵，再以较低压力维持10分钟以上。

7.3 粘贴纤维增强复合材料加固法

7.3.1 规定纤维增强复合材料（FRP）布（板）的设计、基面处理、粘贴工艺、锚固与防护要求。

7.3.2 本方法适用于混凝土和钢结构的受压、受拉、延性及耐久性加固，亦可用于抗弯加固。

7.3.3 受压加固时，原构件混凝土强度等级不宜低于C15。抗弯加固时，混凝土强度等级不宜低于C25。

7.3.4 预应力混凝土抗弯构件采用粘贴纤维复合材料加固后，其正常使用极限状态的计算，可将纤维复合材料折算为普通钢筋，按照现行有关规定进行计算。

7.3.5 纤维增强复合材料宜粘贴成条带状，非围束时板材不宜超过2层，布材不宜超过3层。

7.3.6 对混凝土柱进行粘贴纤维复合材料加固时，条带应粘贴成环形箍，且纤维方向应与柱的纵轴线垂直。

7.3.7 加固大偏心受压构件，可将纤维复合材料粘贴于构件受拉区边缘混凝土表面，纤维方向应与柱的纵轴线方向一致。

7.3.8 受拉粘贴时，纤维主拉应力方向应与构件受拉方向一致。

7.3.9 梁的受拉区两侧粘贴纤维复合材料进行抗弯加固时，粘贴高度不宜高于1/4梁高。

- 7.3.10 采用封闭式粘贴或U型粘贴对梁、柱构件进行斜截面加固，纤维方向宜与构件轴线垂直或与其主拉应力方向平行。
- 7.3.11 纤维复合材料沿纤维受力方向的搭接长度不应小100mm，当采用多条或多层纤维复合材加固时，其搭接位置应相互错开。
- 7.3.12 当纤维复合材料绕过构件（截面）的外倒角时，构件的截面棱角应在粘贴前打磨成圆弧面，圆化半径，梁不应小于20mm；柱不应小于25mm。对于主要受力纤维复合材料不宜绕过内倒角。
- 7.3.13 粘贴多层纤维复合材料加固时，宜将纤维复合材料逐层截断，并在每层截断处最外侧加压条，其粘贴形式采用内短外长式。
- 7.3.14 采用纤维复合材料对混凝土梁或柱的斜截面承载力进行加固时，其构造应符合下列规定：
- a) 宜选用环形箍或加锚固的U形箍；仅按构造需要设箍时，也可采用一般U形箍。
 - b) U形箍的纤维受力方向应与构件轴向垂直。
 - c) 一般情况下，在梁的中部应增设一道纵向中压带。
- 7.3.15 对梁、板进行抗弯加固时，应在纤维复合材料两端设置U型箍或横向压条。
- 7.3.16 当纤维复合材料延伸至支座边缘仍不满足粘结长度的规定时，应采取以下锚固措施：
- a) 对于梁构件，在纤维复合材料延伸长度范围内至少应设置两道纤维复合材料U型箍锚固。U型箍宜在延伸长度范围内均匀布置，且在延伸长度端部必须设置一道。U型箍的粘贴高度宜伸至顶板底面。每道 U 型箍的宽度不宜小于抗弯加固纤维复合材料宽度的1/2，U型箍的厚度不宜小于抗弯加固纤维复合材料厚度的1/2。
 - b) 对于板构件，在纤维复合材料延伸长度范围内至少设置两道垂直于受力纤维方向的压条。压条宜在延伸锚固长度范围内均匀布置，且在延伸长度端部必须设置一道。每道压条的宽度不宜小于抗弯加固纤维复合材料条带宽度的1/2，压条的厚度不宜小于抗弯加固纤维复合材料厚度的1/2。
 - c) 当纤维复合材料的粘结长度小于按公式计算所得长度的1/2时，应采取可靠的附加机械锚固措施。

7.4 体外预应力法

- 7.4.1 规定体外预应力筋的线形设计、锚固块与转向块设计、张拉控制、防腐及可更换性构造要求。
- 7.4.2 预应力张拉施工之前，应对原构件主要病害进行修复，并对需要加固的杆件进行加固，修复和加固工作经检验合格后，方可开始对构件或体系的预应力张拉工作。
- 7.4.3 预应力张拉设备和仪器，应事先进行检验和标定，其负荷范围应与设计张力吨位匹配，必要时应配备专用压力传感器，确保张拉精度。
- 7.4.4 按现行《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650的要求进行张拉，应对称、均衡张拉至设计吨位，施加张拉力次序可为：0→15%→0→50%→80%→100%。
- 7.4.5 锚固构造施工应符合以下规定：
- a) 按照设计图纸进行锚固构造的放样，若原结构预应力筋与新增锚固构造位置冲突时，应经设计同意后方可调整锚固构造位置。
 - b) 凿除混凝土保护层，露出新鲜混凝土面，将混凝土碎渣清理干净，使底板纵向和横向钢筋外露，并对钢筋除锈。
 - c) 按照设计要求植筋或种植锚栓。待固化后绑扎锚固构造的钢筋骨架或安装钢板，应调准锚具位置及角度。
 - d) 混凝土锚固构造浇筑完毕后，应待混凝土强度达到设计值的90%后方可张拉预应力束。
- 7.4.6 转向装置与梁体间连接处须凿毛处理，可选择植筋和种植锚栓，转向块与滑块施工应符合以下规定：
- a) 当转向块为混凝土构件时，应预留预应力钢筋孔道。
 - b) 水平滑块的钢垫板需粘贴在梁的底面。当在水平滑块上设置聚四氟乙烯滑板时，可将其预先粘贴在钢垫板上或滑块的顶面上。水平预应力钢筋的定位座可粘贴在跨中梁底位置。
- 7.4.7 体外预应力筋张拉结束后应按设计要求进行防腐处理。当体外预应力筋采用成品索，可不采取防腐措施。
- 7.4.8 预应力碳纤维板表面应按设计要求进行防护处理，防护材料的粘结性能应与碳纤维片材（板材）表面涂刷的胶粘剂相容，并能可靠粘结。对锚具钢结构按设计要求或现行《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》（JT/T 722）的要求进行涂装防护处理。

7.5 纤维格栅增强高性能水泥基复合材料加固法

7.5.1 采用纤维格栅增强高性能水泥基复合材料加固混凝土受弯构件时应在结构加固前对结构或构件的状况进行检测鉴定，根据鉴定结果确定加固方案。

7.5.2 对混凝土受弯构件加固之前，应将加固部位原有装饰面层铲除干净，并应剔除加固部位松散、风化严重的混凝土块体，必要时应对残损部位进行局部拆除补砌。

7.5.3 加固混凝土受弯构件时，可采用纤维格栅增强高性能水泥基复合材料加固层在截面受压区或受拉区进行加固。

7.5.4 在受压区采用纤维格栅增强高性能水泥基复合材料加固层的混凝土受弯构件，在加固施工中以原构件为支撑，在其上铺设纤维格栅，浇筑高性能水泥基复合材料并与原构件组合，不考虑纤维格栅的作用，加固构件的计算方法应按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）或《混凝土结构设计规范》（GB50010）的相关条款进行。

7.5.5 在受拉区采用纤维格栅增强高性能水泥基复合材料加固层的混凝土受弯构件，应符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）或《混凝土结构设计规范》（GB50010）对受弯构件正截面承载力计算的要求。

7.5.6 钢筋混凝土受弯构件在截面受拉区采用纤维格栅增强高性能水泥基复合材料加固层进行加固后，截面尺寸应满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）或《混凝土结构设计规范》（GB50010）的相关条款规定。

7.5.7 钢筋混凝土受弯构件抗剪加固可采用两侧黏贴纤维格栅增强高性能水泥基复合材料加固层、U形黏贴纤维格栅增强高性能水泥基复合材料加固层及全包纤维格栅增强高性能水泥基复合材料加固层的形式，宜采用U形或全包的形式进行抗剪加固。

7.5.8 宜采用将纤维格栅增强高性能水泥基复合材料加固层通过高性能水泥基复合材料黏贴到混凝土受弯构件加固区表面的方法进行加固。

7.5.9 对混凝土受弯构件进行抗弯和抗剪加固时，应采取可靠的锚固措施避免纤维增强高性能水泥基复合材料加固层发生剥离破坏。

7.5.10 若混凝土受弯构件混凝土已开裂，也可先将混凝土保护层或者已开裂的混凝土凿掉，后将纤维格栅增强高性能水泥基复合材料加固层黏贴在混凝土受弯构件加固区表面进行加固。

7.5.11 采用浇筑高性能水泥基复合材料加固的混凝土受弯构件，施工应按照以下方法进行：

- a) 清除掉钢筋混凝土受弯构件表面的浮灰和污渍，随后进行钻孔作业，钻孔深度不应小于 $5d_s$ ， d_s 为销钉直径。逐孔进行清理，直到孔内干净且没有杂物为止，保持混凝土表面干燥。
- b) 按照产品供应商提供的工艺规定配制环氧树脂胶。
- c) 将调配好的环氧树脂胶注入孔内的 $2/3$ 高度，将事先准备好的销钉插入孔中，销钉长度不应小于 80 mm 。待环氧树脂胶养护 72 h 后，将纤维格栅用扎丝绑扎固定在销钉上。
- d) 将拌合好的高性能水泥基复合材料拌合物，从加固层模板的一端开始，缓慢均匀地倒入到加固层的模板内。浇筑过程中不断用平板振动器将拌合物振实，直到高性能水泥基复合材料拌合物充满整个模板为止。用抹子对高性能水泥基复合材料表面进行抹平。
- e) 待高性能水泥基复合材料抗压强度达到设计强度的 75% 以上时，拆除模板，按照标准养护方法养护 28 d 。

7.5.12 采用喷射高性能水泥基复合材料的施工方法对混凝土受弯构件进行加固时，应按照以下方法进行：

- a) 将拌合好的高性能水泥基复合材料拌合物进行分层喷射施工，每层的喷射厚度不宜大于10 mm。
- b) 喷射第1层高性能水泥基复合材料拌合物。待加固层表面的高性能水泥基复合材料拌合物不再剥落时，将事先准备好的纤维格栅压入到高性能水泥基复合材料中，端部用扎丝将纤维格栅绑扎固定在销钉上。
- c) 采用同样的方法喷射第2层高性能水泥基复合材料拌合物，压入纤维格栅，直到满足设计要求为止。
- d) 待最后1层高性能水泥基复合材料喷射施工完成后，涂抹平整。

7.6 结构体系调整与调整荷载分布法

7.6.1 增设辅助构件：适应于钢桥原有杆件因腐蚀、疲劳或损伤导致承载能力严重不足，连接节点存在缺陷（如裂纹或螺栓不足），或需提高结构整体性、改变受力体系时。

- a) 按设计位置修建新桥墩，并对支点处梁体进行加固补强。在墩台帽上用千斤顶同步顶升主梁，安放支座，然后撤出千斤顶。顶升梁体安装支座的技术要求应符合行业推荐性标准《公路桥梁加固施工技术规范》JTG/T J23相关规定。新建桥墩与梁体固结，应按设计布置钢筋或预应力筋。固结部位与梁的接触面均应进行凿毛，清除浮渣，洒水湿润，并用干硬性混凝土浇筑。其施工技术要求应符合行业推荐性标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650相关规定。
- b) 杆件损伤严重时应予以更换，当拆卸杆件进行更换时，应先消除杆件的恒载内力。纵梁与横梁联结角钢出现裂纹，当修补条件受限时，可采用更换厚角钢、增大螺栓直径等方法。钢梁连接系杆交叉处、连接杆件与主梁或纵梁翼缘连接处铆钉不足，应增大节点板、增加螺栓进行加固。
- c) 通过增加构件变原结构为组合结构。其施工技术要求应符合行业推荐性标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650的相关规定。桥梁加固施工使用的主要材料性能，应在加固工程现场取样进行检验，并应符合设计要求。

7.6.2 调整荷载分布符合以下要求：

- a) 通过调整桥面铺装层厚度，改变桥梁恒载分布，使主梁受力更均匀，减小局部超载，提高结构整体承载效率。施工前应清除原有桥面铺装，检查梁顶混凝土状况，必要时进行修补或凿毛处理，确保新旧材料粘结良好。
- b) 通过更换为轻质材料桥面板（如正交异性钢桥面板），降低桥面系自重，减小主梁恒载，提高活载占比，间接提升桥梁承载力。换桥面板前应对原结构进行详细检测与评估，确保主梁具备承载新桥面板的条件。桥面铺装与桥面板之间应无空鼓、脱层现象，粘结性能良好。
- c) 通过减轻桥面系、栏杆、防撞设施等附属结构的自重，降低桥梁恒载，提升活载占比，间接提高桥梁的承载能力。

8 混凝土结构性能提升技术

8.1 一般规定

8.1.1 为恢复、保持或提升在役公路桥梁混凝土结构的承载能力、耐久性及使用功能，规范混凝土结构性能提升技术的选择、设计与施工，制定本章节。

8.1.2 混凝土结构性能提升应遵循“精准诊评、对症施策、技术可靠、经济合理”的原则。在实施提升前，必须依据本规程前述章节完成对桥梁的全面检测与服役性能精准评估。

8.1.3 性能提升技术分为两大类：

- a) 修复补强类：针对结构损伤和缺陷，恢复其原有性能和截面。
- b) 主动增强类：通过增加新的受力部件或施加预应力，主动提升结构承载能力和刚度。

8.1.4 性能提升方案的选择应综合考虑结构缺陷类型、损伤程度、原结构材料性能、提升目标、施工条件、环境影响及全寿命周期成本。

8.1.5 所有用于性能提升的材料，其力学性能、耐久性能及与原混凝土的相容性（如收缩、热膨胀系数、粘结性能等）必须经过验证，并符合国家及行业相关标准的规定。

8.2 增大截面法

8.2.1 一般规定

在役公路桥梁混凝土结构受压区、受拉区增大截面的设计计算、结合面处理（凿毛、植筋、界面剂）、新混凝土浇筑与养护应满足以下要求。

- a) 适用于桥梁钢筋混凝土受压构件和受弯构件的加固，以提高受压构件正截面承载力和受弯构件的截面抗弯承载力、抗剪承载力及刚度。
- b) 按现场检测结果确定的原结构构件混凝土强度应满足：钢筋混凝土受压构件不应低于C20，受弯构件不应低于C25。
- c) 增大截面加固法应采取措施减少构件在新旧材料有效结合前的扰动，新增截面混凝土强度达到设计要求前应封闭交通。

8.2.2 加固设计计算方法

采用增大受弯构件正截面的加固可分为在构件截面受压区或受拉区增设现浇混凝土加厚层两种方法。仅在截面受压区增设现浇混凝土加厚层的钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件，在加固施工中以原构件为支撑，在其上浇筑混凝土加厚层并与原构件组合，构件的计算原则应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的规定进行。

8.2.3 结合面处理

8.2.3.1 增大截面加固施工前应对原构件已有的裂缝、空洞、混凝土剥落等缺陷进行修补，对外露钢筋的锈蚀层及其周边粘结失效的混凝土应清除，并打磨钢筋至其表面露出金属光泽。

8.2.3.2 构件结合面的处理应凿除原构件混凝土缺陷部分，构件结合面凿毛凹凸差不宜小于6mm，并露出粗骨料，在浇筑混凝土前，原混凝土表面应清洗干净并保持清洁湿润。必要时可在混凝土表面设置剪力槽。

8.2.3.3 在原结构上植筋或锚栓时，新增钢筋骨架应与锚筋连成整体。当钢筋需焊接时，若焊接部位距离原混凝土表面较近，施焊前应采取措施避免烧伤原结构混凝土。

8.2.4 新混凝土浇筑与养护

浇筑混凝土前，应对以下项目按隐蔽工程要求进行检查：

- a) 界面处理施工质量；
- b) 新增钢筋的品种、规格、数量和位置；
- c) 对新增的抗剪钢筋网中的竖向钢筋和水平纵向钢筋，所需钢筋面积满足分别满足现行公路桥梁设计规范规定的最小配箍率；
- d) 新增钢筋与原构件的连接构造及焊接质量；
- e) 植筋、锚栓施工质量；
- f) 预埋件的规格、位置；
- g) 新增截面混凝土配制及浇筑施工技术要求按《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T F50）执行。在条件受限制时，新增截面的混凝土施工可选用自密实混凝土并按现行《自密实混凝土应用技术规程》（JGJ/T 283）执行。
- h) 混凝土养生应符合下列规定：
 - 1) 浇筑混凝土前应清洁表面并保持湿润，新浇混凝土应振捣密实。
 - 2) 在浇筑混凝土完毕后应及时对混凝土采取浇水、覆盖、涂刷养护剂等方法养护。
 - 3) 对采用普通混凝土，养护时间宜不得少于7d；对为尽快开放交通而采用的特殊性能混凝土的养护时间和方法应按照相应规定进行。

8.4 裂缝修复

8.4.1 表面封闭法

8.4.1.1 适用细小、非结构性裂缝，宽度一般小于等于0.1 mm~0.2 mm。

8.4.1.2 常用材料可选用环氧树脂（双组分、低粘度）、聚氨酯低粘度密封胶、改性聚合物水泥砂浆/聚合物水泥、其他低渗透性胶黏剂等。

8.4.1.3 施工工艺要点：

- a) 表面清理：使用钢丝刷、砂轮或高压气枪除尘、油污，确保裂缝两侧干燥、无松散颗粒。
- b) 裂缝处理：对极细裂缝可直接刷涂；对稍宽裂缝（ ≤ 5 cm）可先做V-型槽（宽10mm~15 mm，深30mm~50 mm），便于胶黏剂渗透。
- c) 材料涂布：沿裂缝走向均匀涂刷或刮抹密封胶，厚度约1 mm，宽度20mm~30 mm，防止气泡。
- d) 养护：按材料说明进行固化（常温24 h），必要时进行二次涂层或表面磨平。

8.4.2 低压注浆法

8.4.2.1 适用数量较多、分布密集的中等宽度裂缝，0.1 mm~1.5 mm。

8.4.2.2 常用材料可选用低粘度环氧树脂灌浆料（流动度 ≥ 250 mm）、聚氨酯发泡灌浆料（自膨胀填充）、改性水泥基灌浆料（聚合物改性）和其他低黏度聚合物胶浆等。

8.4.2.3 施工工艺要点：

- a) 裂缝清理：同表面封闭法，确保裂缝内部无松散颗粒。
- b) 钻孔布置：采用10 mm直径钻孔，孔距100mm~200 mm（视裂缝宽度而定），沿裂缝走向均匀布置。
- c) 注浆装置：使用低压注浆泵，注入压力0.1 MPa~0.4 MPa，流速缓慢，防止冲刷。
- d) 注浆过程：先进行试压，确认无泄漏后正式注浆，注入至浆液从孔口自然渗出或压力保持恒定10min~20 min。
- e) 后处理：拆除注浆嘴，清理孔口，必要时对表面进行二次封闭或磨平。

8.4.3 高压注浆法

8.4.3.1 适用结构性、承载力受影响的裂缝，宽度通常不小于0.15 mm~0.2 mm，尤其是深度较大、贯通或活动裂缝。

8.4.3.2 常用材料可选用高粘度环氧树脂灌浆料（强度 ≥ 45 MPa）、高强度水泥基灌浆料（28 d 抗压 ≥ 45 MPa）、聚氨酯高压灌浆料（自膨胀、抗渗）和其他高粘度聚合物改性灌浆料等。

8.4.3.3 施工工艺要点：

- a) 裂缝预处理：对裂缝两侧进行V-槽（宽15mm~20 mm，深50mm~100 mm）或开槽，以增大胶结面积。
- b) 钻孔与布置：孔径12mm~15 mm，孔距80mm~150 mm，必要时采用多点并联注浆。
- c) 注浆设备：高压泵，注入压力0.4 MPa~1.0 MPa，注入速度相对较快，确保浆液充填深层裂缝。
- d) 注浆顺序：自下而上、从底部向上逐层灌注，防止气囊形成；注浆后保持一定保压时间（5min~10 min）以保证浆液固化。
- e) 后处理：拆除注浆嘴，清理表面，必要时进行二次封闭或表面抹灰、喷涂防护层。

8.5 缺陷与损伤修复

8.5.1 剥落、空洞修复

8.5.1.1 在桥梁结构的混凝土剥落、空洞修复时，要对受损部位进行凿除，将松散、脱落的混凝土全部剔除，凿除深度一般不少于20 mm，且凿除面应垂直于构件表面，以确保露出完整的基体并形成足够的锚固深度。凿除后必须对基面进行凿毛或喷砂处理，使表面粗糙度达到1.5 mm以上，以提升后续修补层的粘结强度。

8.5.1.2 采用电动钢丝刷或喷砂等机械除锈手段对暴露的钢筋进行除锈，除去锈皮和浮锈，必要时保留微锈层以免过度削弱钢筋截面；除锈后立即使用阻锈剂进行防腐涂覆，阻锈剂的涂层厚度应控制在0.2-0.3 mm，且在混凝土龄期不少于28 d（局部修补部位不少于14 d）时方可施工，以保证阻锈剂的渗透和固化效果。

- 8.5.1.3 用清水冲洗并保持基面干燥（湿度 $\leq 5\%$ ），随后均匀喷刷或滚涂聚合物改性界面剂，厚度约1-2 mm，待表面出现细小气泡后自然干燥30 min 再进行下一步施工，以保证新旧混凝土的粘结强度不低于3.3 MPa。
- 8.5.1.4 对于混凝土剥落或表层空洞面积较小时（面积 $\leq 25\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ ），可采用聚合物改性水泥砂浆，按产品说明书中的配合比，现场加水拌合后涂抹，层厚约20 mm，养护期间保持湿润24 h。
- 8.5.1.5 对于中等深度（5 cm~15 cm）且面积较大的空洞，推荐使用聚合物改性混凝土或高强度水泥基灌浆料，分层浇筑（每 $\leq 5\text{ cm}$ ），并在浇筑过程中振捣密实，养护48 h 保湿后方可继续施工。
- 8.5.1.6 对于深层结构性缺损（深度 $> 15\text{ cm}$ ，面积 $> 25\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ ），则采用高粘度环氧或高强度聚合物砂浆，必要时在缺损底部铺设钢筋网（网格100 mm）以增强整体承载能力，浇筑后保压5min~10 min，随后进行7 d 保湿养护。
- 8.5.1.7 混凝土表面劣化处理：规定表面腐蚀、碳化层等的处理标准与方法。
- 8.5.1.8 须对受腐蚀的混凝土进行清除松动层、剥落层或污物，常用高压水射流、喷砂或机械凿毛等方法，使基面呈现均匀的凹凸纹理，粗糙度 $\geq 1.5\text{ mm}$ 。
- 8.5.1.9 混凝土碳化深度大于保护层厚度时必须凿除碳化层，凿除深度应使约50%的粗骨料露出，并用高压水冲毛清除残渣，粗糙度控制在3.8 mm~5.1 mm 的灌砂深度范围内。
- 8.5.1.10 若基面被油脂、树脂、沥青等污染，还需采用有机溶剂清洗或表面活性剂洗涤，并在必要时进行10%盐酸酸蚀以去除顽固油污，酸蚀后必须立即用清水冲洗并保持 $\text{pH}\approx 7$ 。
- 8.5.1.11 清理后完成，依据《建筑防腐蚀工程施工规范》（GB 50212-2014）要求，对已清洁的基面进行防锈剂或阻锈剂涂刷（如含锌阻锈剂），厚度控制在0.2 mm~0.3 mm，以抑制钢筋电化学腐蚀。
- 8.5.1.12 进行表面粗糙化处理（凿毛、喷砂或磨砂），确保后续修补材料的粘结强度 $\geq 3.3\text{ MPa}$ 。
- 8.5.1.13 修补层可选用高性能聚合物水泥砂浆、环氧砂浆或高强度水泥基灌浆料，配合钢筋网或纤维增强以提升结构整体性，养护期间保持湿润48 h 以上。
- 8.5.1.14 施工完成后，需进行表面平整度、粘结强度、含水率等质量检测，并对不合格部位进行返工，确保防腐层与基体的粘结满足设计要求。

8.5.2 钢筋防护修复

- 8.5.2.1 阻锈技术：规定迁移型钢筋阻锈剂的应用范围、材料性能及施工要求。
- 适用于所有现浇或预制的钢筋混凝土结构，尤其是受氯盐、海水、硫酸盐等侵蚀环境的桥梁、桥墩、桥面以及已出现轻度或中度裂缝、空洞的既有桥梁等修复工程。
 - 迁移型阻锈剂须具备较大的渗透深度，实验室试验要求渗透深度不少于50 mm，现场试验在保护层处氮含量应达到100 mg/kg 以上；
 - 其电化学防锈性能要求在28天后锈蚀电流降低率不低于50%，在150天后降低率不低于80%；抗氯离子迁移系数相对系数应不超过100%；
 - 在盐水浸渍和干湿冷热循环试验中，经过60次循环后钢筋表面仍保持无锈蚀，腐蚀面积降低率应达到95%以上；
 - 对混凝土本体的影响必须控制在合理范围，阻锈剂的加入不应显著延迟混凝土的凝结时间，7天和28天的抗压强度分别应不低于原混凝土的90%和100%；
 - 阻锈剂的黏度应在20KU~50 KU 之间，适用于0℃~50℃的施工温度，且不含亚硝酸盐，符合环保无毒的要求。
 - 施工时要对基面进行彻底清理，去除灰尘、油污、旧涂层及松动颗粒，可采用高压水射流或喷砂，使基面保持干燥并具备至少1.5 mm 的粗糙度。若基面已有裂缝或局部破损，需要先进行凿毛或开设宽10mm~15 mm、深30mm~50 mm 的V型槽，以利阻锈剂渗透。施工温度宜控制在15℃~30℃之间，避免霜冻或雨水侵入；在低于5℃的环境下应采取保温措施或推迟施工。
 - 阻锈剂的涂布方式可以采用刷涂、滚涂或喷涂，要求一次性均匀覆盖，涂层厚度约为0.2 mm（约 $1\text{ kg/m}^2\sim 2\text{ kg/m}^2$ ），不得稀释；若使用液体型产品，需在搅拌均匀后直接喷涂。为防止雨水冲刷，施工完成后应覆盖防护薄膜或塑料薄膜进行24 h 以上的短期养护。
- 8.5.2.2 电化学防护：规定阴极保护、电化学除氯等技术的适用条件与技术要求。

- a) 阴极保护技术适用于普通钢筋或预应力钢筋混凝土桥梁、桥墩、桥面、埋地或水下构件。
- b) 现场检测表明钢筋已进入主动腐蚀区（断电电位与极化后电位差 $> 100 \text{ mV}$ ）或氯盐侵蚀、硫酸盐侵蚀等导致的加速腐蚀。
- c) 预应力混凝土结构若采用电化学脱盐或再碱化，需先进行可行性论证；环氧涂层钢筋拼装构件不得直接使用阴极保护，必须先保证电连续性并避免短路。
- d) 采用阴极保护技术前，需清除松动混凝土、锈蚀层，确保钢筋表面干燥、无油污；对预应力钢筋的焊接连接需避免应力松弛。
- e) 阳极应均匀分布，距离钢筋不宜过远，且每个保护单元至少配备两根阳极电缆，以防单点失效。
- f) 先以10%-20%设计电流进行预通电，逐步提升至设计电流，直至钢筋电位稳定在保护范围内。
- g) 运行期间需定期记录电源电压/电流、钢筋电位、混凝土电阻率，并对异常电位进行报警处理。
- h) 阴极保护系统的寿命设计一般为20~30年，期间需检查阳极腐蚀情况、补充牺牲阳极或更换电源设备。

8.5.2.3 电化学除氯技术：

- a) 电化学除氯技术适用于盐污染、氯离子侵蚀明显的桥梁、桥墩等混凝土结构，尤其是沿海、盐碱地区的构件。
- b) 适用于钢筋锈蚀尚处于早期，氯离子含量已超过临界值但钢筋尚未出现大面积锈蚀的结构，能够通过短期电流降低混凝土内部氯离子浓度，实现再钝化。
- c) 在使用电化学除氯技术前，要进行评估，测定混凝土内部氯离子含量（ mg/kg ）和 pH ，确认需脱盐的区域；对钢筋进行电连续性检查，确保电流能够在整个保护区均匀分布。
- d) 在待处理区域的混凝土表面预埋阳极板，并通过导电胶或金属网与钢筋形成闭合回路。
- e) 先以设计电流的10%-20%进行预通电，观察电位变化；随后逐步提升至 $0.5 \sim 1.0 \text{ A/m}^2$ （依据结构尺寸与氯离子浓度），保持24~30 d（或直至氯离子浓度降至临界值以下）。
- f) 脱盐结束后，立即进行再碱化（提高混凝土 $\text{pH} > 11$ ）或钝化剂喷涂，确保钢筋重新进入钝化状态；随后进行混凝土表面修补以恢复结构完整性。

8.6 防护强化技术

表面涂层防护：规定防腐涂料、硅烷浸渍等保护层材料、设计与施工要求。

- a) 桥梁混凝土修复后，为了防止再度腐蚀、渗水和碱-硅酸盐反应，必须在修补层表面形成完整、耐久的防护涂层体系。
- b) 涂刷防护材料前，要进行混凝土基面处理，混凝土表面须清洁、干燥、无松散颗粒，含水率应控制在6%以下，若采用湿固化环氧封闭层可适当放宽，但仍需保持表层为表干状态；表面粗糙度应满足 $\geq 1.5 \text{ mm}$ 的凿毛或喷砂要求。
- c) 防护材料必须符合《混凝土桥梁结构表面涂层防腐技术条件》（JT/T 695）及《混凝土桥梁结构表面用防腐涂料 第1部分：溶剂型涂料》（JT/T 821.1）等行业标准的性能指标，包括耐碱性、耐盐雾、耐候性、附着力、弹性模量等要求。
- d) 采用硅烷溶液均匀浸渍或喷涂后，仍需在表面涂刷丙烯酸聚氨酯面漆，该面漆的性能须满足JT/T 695-2007对混凝土桥梁表面涂层的技术条件，确保整体体系的防水、防腐和耐候性能。
- e) 在每层涂装之间必须保证前层完全固化（底漆固化时间 $\geq 24 \text{ h}$ ，面漆固化时间 $\geq 48 \text{ h}$ ），并进行表面轻微打磨以提升粘结。
- f) 施工环境温度应保持在 $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ ，湿度 $\leq 85\%$ ，避免雨水、强风或高温直射导致涂层起泡、开裂。
- g) 每层涂料的配比、稀释剂使用必须严格按照产品说明书执行，严禁随意掺加稀释剂或其他助剂。
- h) 完成全部涂层后，需进行附着力检测和干膜厚度测量，并记录在防腐涂层档案中，以便后期维护和定期检查。

9 钢结构性能提升技术

9.1 一般规定

9.1.1 为恢复、保持或提升在役公路桥梁钢结构的承载能力、疲劳性能、耐久性及使用功能，规范钢结构性能提升技术的选择、设计与施工，制定本章节。

9.1.2 钢结构性能提升应遵循“精准检测、分类处治、强化薄弱、防控疲劳”的原则。在实施提升前，必须依据本规程前述章节完成对钢结构的材料、缺陷、变形、连接状态及腐蚀情况的全面检测与评估。

9.1.3 性能提升技术分为三大类：

- a) 修复矫形类：针对钢结构损伤和变形，进行恢复性处理。
- b) 补强加固类：通过增加截面或改变体系，提升结构承载能力和刚度。
- c) 耐久性提升类：改善防腐体系，延长结构寿命。

9.2 疲劳性能提升技术

9.2.1 裂纹修复与处理

9.2.1.1 裂纹止钻与修复：

- a) 钢桥构件上发现裂纹时，作为临时应急措施，可于板件裂纹端外（0.5~1.0）倍板厚处钻孔，防止其进一步扩展，并及时根据裂纹性质及扩展走向采取适当措施修复加固。
- b) 用碳弧气刨、风铲或砂轮将裂纹边缘加工出坡口，直达裂纹端部，坡口形式应按设计要求及根据板厚和施工条件按现行国家标准《气焊、手工电弧焊及气体保护焊缝坡口的基本形式与尺寸》GB/T 985 的要求选用。
- c) 堵焊后表面应磨光，使之与原构件表面齐平，磨削痕迹线应大体与裂纹切线方向垂直。焊缝质量应按照行业标准《无损检测焊缝渗透检测》JB/T 6062 进行 100%磁粉检测（MT），确认无新生裂纹产生。

9.2.1.2 焊接修复：

- a) 应采用机械打磨、碳弧气刨等方法彻底清除裂纹，清除范围应延伸至裂纹两端各50mm以上完好金属区域。清理后的坡口应呈U形或V形，坡口角度不宜小于15°，底部圆滑过渡，无尖角、夹碳、粘渣等缺陷。
- b) 预热：温度宜为100~150℃，并采用低氢焊接方法按全焊透对接焊缝要求进行，应符合现行国家标准《钢结构焊接规范》GB50661。
- c) 采用与钢材相匹配的低氢型焊接材料（如E××15、E××16系列焊条或相应低氢焊丝）施焊。应采用合理的焊接顺序，尽可能采用小直径、小电流及多层多道焊接工艺。
- d) 焊后应立即进行后热消氢处理或采用保温棉缓冷。
- e) 无损检测应在外观检查合格后进行。I、II类钢材及焊接难度等级为A、B级的结构的焊缝应以焊接完成 24h后检测结果作为验收依据，III、IV类钢及焊接难度等级为C、D级的结构应以焊接完成 48h 后的检查结果作为验收依据；
- f) 对接焊缝除应用超声波探伤外，尚须用射线抽检其数量的10%（并不得少于一个接头）。用射线和超声波两种方法检验的焊缝，必须达到各自的质量要求，符合现行国家标准《钢结构焊接规范》GB50661规定的无损检测标准。

9.2.1.3 胶接修复：

- a) 经可靠性鉴定确认可以修复钢结构局部缺陷和损伤（包括疲劳裂纹），可进行专项修复设计；
- b) 应采用碳纤维、玻璃纤维或芳纶纤维等高性能连续纤维制品，其安全性须符合现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728的规定；
- c) 应采用专门配制的环氧树脂类结构胶粘剂，其安全性须符合现行国家标准《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》GB 50728和《钢结构加固设计标准》GB 51367的规定。使用的底胶和修补胶必须与胶粘剂相适配，其安全性能指标须符合现行国家标准《钢结构加固设计标准》GB 51367的规定。
- d) 胶接修复应严格遵循以下工艺流程：首先彻底清洁裂纹区域基材表面，清除所有油污、锈迹及松散物，并进行喷砂或打磨粗糙化处理，确保粘结面干燥洁净。施工环境温度宜控制在5℃~35℃，相对湿度不宜大于85%。在处理后的基材表面均匀涂刷底胶形成完整覆盖层，再将预先裁剪的纤维布（或板）粘贴于预定位置，充分滚压排除气泡，确保紧密贴合无空鼓。多层粘贴时，各层纤维布的搭接长度应符合现行国家标准《钢结构加固设计标准》GB 51367的规定。

9.2.2 抗疲劳加固

9.2.2.1 对应力集中严重的构造细节（如焊趾、加劲肋端部）进行打磨处理（TIG 熔修、锤击等）：适用于对既有结构当检测到缺陷、微裂纹或评估显示疲劳寿命不足时。

- a) 采用钨极惰性气体保护焊（TIG 焊）设备，对疲劳裂纹萌生区进行重熔。通过改变焊趾的几何形状，消除微小的咬边、未熔合等缺陷，形成平滑过渡，从而降低应力集中系数；
- b) 用锤击法消除中间焊层应力时，应使用圆头手锤或小型振动工具进行，不对根部焊缝盖面焊缝或焊缝坡口边缘的母材进行锤击，应符合行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 规定。

9.2.2.2 增设过渡板、改变连接形式以降低应力集中系数：适用于改变结构体系的加固设计。

- a) 不同厚度板材或管材对接时，均应加工成斜坡过渡；接口的错边量小于较薄板件厚度时，宜将焊缝焊成斜坡状，或将较厚板的一面（或两面）及管材的外壁（或内壁）在焊前加工成斜坡，应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 中的构造要求，其坡度最大允许值为 1: 4；
- b) 改变结构体系所采用的支柱、支撑、撑杆等，其端部应与被加固结构构件可靠连接，且连接的构造不应过多削弱原构件的承载能力；
- c) 在同一受力部位连接的加固中，可采用焊缝和摩擦型高强螺栓在一定条件下共同受力的并用连接；当采用端焊缝或螺栓加固而需要拆除原有连接，或需要扩大原钉孔，或增加钉孔时，应采取合理的施工工艺和安全措施，并核算结构、构件及其连接在负荷下加固过程中是否具有施工所要求的承载力，应符合现行国家标准《钢结构加固设计标准》GB 51367 规定。

9.2.2.3 粘贴加固板法：在疲劳敏感区域粘贴钢板或碳纤维复合板（CFRP），改变应力传递路径，降低应力幅。适用于钢结构受弯、受拉、受剪实腹式构件的加固以及受压构件的加固。

- a) 当工字形钢梁的腹板局部稳定需要加固时，可采用在腹板两侧粘贴 T 形钢件的方法进行加固，其中 T 形钢件的粘贴宽度不应小于板厚的 25 倍；
- b) 在受弯构件的受拉边或受压边钢构件表面上进行粘钢加固时，粘贴钢板的宽度不应超过加固构件的宽度，采用手工涂胶粘贴的单层钢板厚度不应大于 5mm，采用压力注胶粘贴的钢板厚度不应大于 10mm，为避免胶层出现应力集中而提前破坏，宜将粘贴钢板端部削成 30° 斜坡角，且不应大于 45°；
- c) 加固件的布置不宜采用引起截面形心轴偏移的形式，不可避免时，应在加固计算中考虑形心轴偏移的影响；
- d) 粘贴钢板加固钢结构构件时，加固钢结构构件表面宜采取喷砂方法处理，保证钢板与原加固构件表面的粘合更牢固，最外层表面及每层钢板的周边均应进行防腐蚀处理，在加固前采取措施卸除或大部分卸除作用在结构上的活荷载，应符合现行国家标准《钢结构加固设计标准》GB 51367。

9.2.2.4 施加预应力法：采用体外预应力索、高强螺栓等方式引入预压应力，降低荷载作用下的应力幅。

- a) 对正截面受弯承载力不足的梁、板构件，可采用预应力水平拉杆进行加固，亦可采用下撑式预应力拉杆进行加固；若工程需要且构造条件允许，尚可同时采用水平拉杆和下撑式拉杆进行加固；
- b) 对受压承载力不足的轴心受压柱、小偏心受压柱以及弯矩变号的大偏心受压柱，可采用双侧预应力撑杆进行加固；若偏心受压柱的弯矩不变号，亦可采用单侧预应力撑杆进行加固；
- c) 对桁架中承载力不足的轴心受拉构件和偏心受拉构件，可采用预应力杆件进行加固；
- d) 采用体外预应力索等方法引入预压应力，降低荷载作用下的应力幅，预应力拉索的转折点或撑杆的支点，宜位于构件变形较大处，用于加固钢构件的预应力构件及节点，宜根据被加固构件的截面对称布置，预应力拉索的锚固节点及撑杆的支点，应位于原结构的节点或支座，均应符合现行国家标准《钢结构加固设计标准》GB 51367 规定。

9.3 腐蚀防护与修复技术

9.3.1 表面处理

9.3.1.1 除锈等级要求：

- a) 采用热喷金属涂层、无机富锌底漆或应用于JCX腐蚀环境下的底漆，钢材表面处理应达到现行国家标准《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定》GB/T8923规定的Sa3 级。
 - b) 采用应用于JC5 及以下腐蚀环境下的环氧类底漆包括环氧富锌底漆，钢材表面处理应达到现行国家标准《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定》GB/T 8923 规定的Sa 2½ 级。
 - c) 采用热喷金属涂层或膜厚大于400μm的涂层，钢材表面粗糙度为Rz60μm~100 μm。
 - d) 采用无机富锌底漆或膜厚在300μm~400μm的涂层，钢材表面粗糙度为Rz50μm~80μm。采用其他防护涂层，钢材表面粗糙度为Rz30μm~60μm。
 - e) 应根据表面粗糙度要求选用合适粒度的磨料。喷射清理用金属磨料应符合现行国家标准《涂覆涂料前钢材表面处理 喷射清理用非金属磨料的技术要求》GB/T18838.1的要求，非金属磨料应符合现行国家标准《涂覆涂料前钢材表面处理 喷射清理用非金属磨料的技术要求》GB/T17850.1的规定。
- 9.3.1.2 处理方法：规定喷砂除锈、高压水射流除锈、机械打磨等方法的适用场合与标准。
- a) 喷砂除锈适用于大面积、高效率的表面处理以及要求达到最高清洁度和粗糙度的新建或大修工程。相关方应协商确定表面状态要求，并应通过试验确定喷射参数，包括磨料硬度、喷射角度、喷嘴距离、空气压力及磨料粒度等。扫砂清理宜采用较低空气压力及较细磨料。不便于喷砂除锈的部位可采用手工或动力工具除锈，除锈等级应达到 GB/T 8923 规定的 St3 级，并应使用环氧类底漆（包括环氧富锌底漆）。
 - b) 高压水射流除锈适用于对环保有严格要求的区域、敏感设备周边以及需要去除可溶性盐分的潮湿表面处理。应在待清理表面喷射高压洁净淡水，水压应根据污染物性质确定。若使用洗涤剂，清理后应采用洁净淡水冲洗。
 - c) 机械打磨适用于局部维修、空间受限的复杂部位以及不便进行喷射清理的场合。可采用旋转钢丝刷、打磨机、冲击锤、针束除锈器等动力工具，不易处理的部位可辅以手工处理。清理作业不得造成构件损伤或变形，应避免凿削导致的表面刻痕。使用钢丝刷时，应确保彻底清除锈蚀及污染物，避免仅形成光亮表面影响涂层附着力。动力工具清理效率高于手工工具，但低于喷射清理。在不宜产生粉尘或磨料残留的场合，宜优先选用动力工具除锈。

9.3.2 防护体系修复与提升

9.3.2.1 涂层防护体系：规定重防腐涂料体系的选择（环氧富锌底漆、环氧云铁中间漆、氟碳/聚硅氧烷面漆等）。

- a) 涂料体系的选择宜依据现行国家标准《色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护》GB/T 30790.附录 A 所列示例，并应适应所处腐蚀环境中的最高腐蚀应力。设计时应核查涂料厂商提供的技术文件，必要时应通过实际应用验证或按《色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护》GB/T 30790.6 进行试验确认；
 - b) 当需根据面漆性能或综合耐久性要求选择体系时，宜按现行国家标准《色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护》GB/T 30790.5 附录 A 中表 A.1、表 A.7 和表 A.8 所列体系进行选用；
 - c) 当腐蚀性等级明确时，宜按现行国家标准《色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护》GB/T 30790.5 附录 A 中表 A.2 至表 A.6 所列体系进行选用，其中 C5-I 与 C5-M 可视为同一等级。
- 9.3.2.2 规定涂装施工环境（温度、湿度）、涂装间隔、干膜厚度检测及附着力测试标准。
- a) 溶剂型涂料施工环境温度应为 5℃~38℃，空气相对湿度不应大于 85%，钢材表面温度应高于露点 3℃ 以上。雨、雾、雪、大风及扬尘天气不得进行户外施工。环境温度为-5℃~5℃时，应采用低温固化产品或采取其他措施。无机富锌底漆应按涂料厂商要求固化后再涂中间漆。
 - b) 水性涂料施工环境温度应为 5℃~35℃，空气相对湿度不应大于 80%；宜控制温度为 15℃~30℃，相对湿度不大于 60%。雨、雾、雪、大风及扬尘天气不得户外施工。在密闭或通风不良环境中施工时，应采取强制通风措施。环境温度较低时，可适当提高涂料或基材表面温度。

- c) 应按设计要求及工艺进行底涂、中涂和面涂施工。底涂宜在表面处理后 4h 内施工；环境相对湿度不大于 60% 时，可延至 12h 内施工。基材表面返锈时应重新除锈。层间涂装间隔应符合材料厂商要求，超过最大间隔时应对表面进行粗糙化处理。
 - d) 施工中应实时检测湿膜厚度以确保干膜厚度符合设计。干膜厚度按“85-15”规则评定（允许 15% 测值低于规定值，但单点值不低于规定值的 85%）；结构主体外表面应按“90-10”规则评定。厚度不达标时应增涂至合格。当设计厚度不大于 300 μm 时，测点最大值不应超过设计厚度 3 倍；设计厚度大于 300 μm 时，最大值不应超过设计厚度 2.5 倍；无机富锌底漆测点最大值不应超过 120 μm 。
 - e) 涂层附着力应采用拉开法检测，附着力不应低于 5MPa（无机富锌底漆体系不低于 4MPa）。对多层体系，应按现行国家标准《防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护的标准》GB/T 31586.2 进行划格法附着力测试，划格间距 2mm，附着力等级不应低于 1 级。
- 9.3.2.3 金属热喷涂防护：规定电弧喷涂或火焰喷涂锌、铝及其合金层的材料、厚度及封闭要求。
- a) 涂层材料：热喷涂用的锌、铝及其合金材料应符合国际标准《热喷涂火焰和电弧喷涂用电线、杆和帘线分类和供货技术条件》ISO 14919 的要求，尤其是：
 - Zn99.99，应符合 ISO 14919 中 2.1 的要求；
 - ZnAl15，应符合 ISO 14919 中 2.3 的要求；
 - Al99.5，应符合 ISO 14919 中 3.2 的要求；
 - AlMg5，应符合 ISO 14919 中 3.3 的要求。
 - b) 厚度：金属热喷涂层厚度应按最小局部厚度评定。最小局部厚度指工件主要表面各测点局部厚度中的最小值，具体按现行国家标准《热喷涂.金属和其他无机覆盖层.锌、铝及其合金》GB/T 9793 执行。
 - c) 热喷涂层的孔隙应进行封闭处理。自然封闭需确保氧化物在环境中稳定；人工封闭可采用磷化、活性涂料或专用封闭剂，并应在吸潮前完成。
- 9.3.2.4 阴极保护技术：规定适用于水下或地下钢结构（如钢管桩）的牺牲阳极法或外加电流阴极保护法的设计与实施要求。牺牲阳极法应符合下列规定：
- a) 系统设计应符合下列要求：高电阻率环境宜选用棒状或带状阳极；低电阻率环境应预留设计余量，可采用粗棒、块状或球形阳极；阳极内应设置钢芯等电负性较小的嵌入件，其力学性能应满足本体材料的要求。
 - b) 阳极材料及施工应符合下列要求：铝合金牺牲阳极的性能应符合现行国家标准《铝合金牺牲阳极》GB/T 4948 中表 10、表 11 及《阴极保护技术条件》GB/T 33378 附录 B 的规定；锌合金牺牲阳极的性能应符合现行国家标准《埋地钢质管道阴极保护技术规范》GB/T 21448 中表 4～表 7 及《阴极保护技术条件》GB/T 33378 附录 C 的规定；镁合金牺牲阳极的性能应符合现行国家标准《埋地钢质管道阴极保护技术规范》GB/T 21448 中表 8～表 10 及《阴极保护技术条件》GB/T 33378 附录 D 的规定；牺牲阳极填包料宜采用石膏粉、膨润土与工业硫酸钠的混合物，其配比应符合现行国家标准《阴极保护技术条件》GB/T 33378 表 3 的规定。
 - c) 外加电流阴极保护法应符合下列要求：系统设计应综合考虑现场危险条件的识别、相关标准规范的适用性、材料与施工工艺的选择，并应采取有效措施减少杂散电流影响；供电系统应保证连续稳定，优先采用市电或稳定交流电源；无市电时可选用太阳能、风力发电、热电发生器（TEG）、电容分压取能装置（CCVT）等直流电源，并应配置备用电源或不间断供电设备。

9.3.3 耐候钢稳定化锈层维护技术

9.3.3.1 常规清洗应符合下列要求：

- a) 每年冬季结束后，应采用压力为 0.2 MPa~0.4 MPa 的低压水对耐候钢表面进行清洗；
- b) 当发现表面有杂物堆积时，应及时采用同等压力的低压水进行清洗，并应避免破坏保护性锈层；
- c) 桥梁遭遇洪水、台风、流冰、滑坡或漂流物撞击后，应对耐候钢表面进行清洗。

9.3.3.2 密封维护应符合下列要求：若发现耐候钢与混凝土交界处、高强度螺栓连接处密封胶老化，应清除老化密封胶并采用新密封胶替换。

9.3.3.3 局部腐蚀处理应符合下列要求：

- a) 若发现螺栓连接处有腐蚀产物，应将耐候高强度螺栓及周围 10 cm 范围内的钢板打磨至清洁度 St3 级，并进行涂装；

- b) 当耐候钢锈蚀程度技术状况评定标度（按《公路耐候钢混凝土组合桥梁技术规程》T/CECS G:D60-31表7.2.3）达到4或5时，应将腐蚀区域处理至清洁度Sa2.5级或St3级、粗糙度Rz 40 μm ~60 μm ，并进行涂装。

9.3.3.4 板厚损失补偿应符合下列要求：若监测点处板厚损失超过设计锈蚀裕量，应将相邻未超限监测点范围内的钢板处理至清洁度Sa2.5级或St3级、粗糙度Rz 40 μm ~60 μm ，并进行涂装。

9.4 增大截面法

9.4.1 适应于钢桥的截面刚度不足。

9.4.2 钢板、型钢、扁钢和钢管应采用 Q235 钢、Q345 钢、Q390 钢、Q420 钢；对重要结构的焊接构件，应采用 Q235-B 级、Q345-C 级等可焊性好的钢材。

9.4.3 焊条材料的品种、规格应满足设计要求；其型号应与被焊接钢材的强度相适应；焊缝连接的设计指标应符合公路桥梁钢结构设计规范的相关规定。钢桥结构加固时，应优先采用高强度螺栓连接；亦可采用焊接和高强度螺栓的混合连接。对于桥梁的非主要构件，可谨慎采用焊接。

9.4.4 当采用焊接连接加固时，焊缝的形式、构造及计算应按照公路桥涵钢结构设计相关规范进行。当采用高强度螺栓连接加固时，必须验算连接处高强度螺栓的承载力和构件连接截面的承载力。单个高强度螺栓的容许抗剪承载力以及受力验算要求应符合行业推荐性标准《公路桥梁加固设计规范》JTGT J22 相关规定。

9.5 连接性能提升技术

9.5.1 高强度螺栓连接

9.5.1.1 更换失效螺栓：

- 首先考虑采用相同直径的摩擦型高强度螺栓，若摩擦型高强度螺栓承载力不能满足强度要求时，可考虑改用承压型高强度螺栓。
- 当采用相同直径的摩擦型高强度螺栓时，应合理确定板件间的抗滑移系数；在计算高强度摩擦型螺栓的承载力设计值时，应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定计算确定。
- 采用承压型高强度螺栓时，应先将错位不平整的钉孔或螺孔设法扩钻平整，然后用 B 级或 A 级螺栓进行安装，同时还应校核被连接板件的净截面强度。
- 准备合适的拆卸与安装工具，并确保工具完好且精度符合要求。扭矩扳手在使用前需按照相关计量标准进行校准，误差不得超过 $\pm 2\%$ ，以保证扭矩施加的准确性。
- 高强度大六角头螺栓连接副扭矩系数的平均值应在 0.110~0.150 范围内，螺栓的扭矩值可参照行业标准《工程机械 螺栓拧紧力矩的检验方法标准》JB T 6040。

9.5.1.2 摩擦面处理：

- 摩擦面可根据设计抗滑移系数的要求选择处理工艺，抗滑移系数必须满足设计要求。
- 高强度螺栓摩擦面对因板厚公差、制造偏差或安装偏差等产生的接触面间隙，应按国家标准《钢结构工程施工规范》GB 50755表7.2.3规定进行处理，接触面间隙处理涂层摩擦面在进行钢材表面处理时，表面除锈处理应达到设计要求。
- 采用手工砂轮打磨时，打磨方向应与受力方向垂直，且打磨范围不小于螺栓孔径的4倍。
- 连接摩擦面保持干燥、清洁，不应有飞边、毛刺、焊接飞溅物、焊疤、氧化铁皮、污垢等。
- 经处理后的摩擦面采取保护措施，不得在摩擦面上作标记。
- 若摩擦面采用生锈处理方法时，安装前应以细钢丝刷垂直于构件受力方向刷除去摩擦面上的浮锈。

9.5.1.3 增设螺栓：

- 在连接板允许的情况下，增设螺栓数量以提高连接强度，螺栓数量计算公式可参照现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017。

- b) 一个构件借助填板或其他中间板与另一构件连接的螺栓(摩擦型连接的高强度螺栓除外), 应按计算增加 10%。
- c) 当采用搭接或拼接板的单面连接传递轴心力, 因偏心引起连接部位发生弯曲时, 螺栓(摩擦型连接的高强度螺栓除外)数目应按计算增加10%。
- d) 搭接或用拼接板的单面连接的承压高强度螺栓数, 应按计算增加 10%。
- e) 在构件的端部连接中, 当利用短角钢连接型钢(角钢或槽钢)的外伸肢以缩短连接长度时, 在短角钢两肢中的一肢上, 所用的高强度螺栓数, 应按计算增加 50%。

9.5.2 焊接连接

9.5.2.1 缺陷修复: 焊缝金属或母材的缺欠超过相应的质量验收标准时, 需要进行焊接修复。

- a) 采用焊接修复前, 应清洁修复区域的表面。
- b) 焊缝或母材上裂纹应采用磁粉、渗透或其他无损检测方法确定裂纹的范围及深度, 应用砂轮打磨或碳弧气刨清除裂纹及其两端各50mm长的完好焊缝或母材, 并应用渗透或磁粉探伤方法确定裂纹完全清除后, 再重新进行补焊。
- c) 对于拘束度较大的焊接接头上裂纹的返修, 碳弧气刨清除裂纹前, 宜在裂纹两端钻止裂孔后再清除裂纹缺陷。
- d) 焊接裂纹的返修, 应通知焊接工程师对裂纹产生的原因进行调查和分析, 应制定专门的返修工艺方案后按工艺要求进行。
- e) 焊缝缺陷返修的预热温度应高于相同条件下正常焊接的预热温度30℃~50℃, 并应采用低氢焊接方法和焊接材料进行焊接。
- f) 焊缝返修部位应连续焊成, 中断焊接时应采取后热、保温措施。
- g) 验收标准可参照现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205和《钢结构焊接规范》GB 50661的相关规定。
- h) 焊缝同一部位的缺陷返修次数不宜超过两次。当超过两次时, 返修前应先对焊接工艺进行工艺评定, 并应评定合格后再进行后续的返修焊接。

9.5.2.2 焊缝补强: 适用于原结构或构件的损坏、变形、锈蚀等情况。

- a) 对于受气相腐蚀介质作用的钢结构构件, 应根据所处腐蚀环境按现行国家标准《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046 进行分类, 对于特殊腐蚀环境中钢结构焊接补强和加固问题应作专门研究确定。
- b) 对立即能起到补强作用, 且对原结构影响较小的部位应先施焊。
- c) 当需加大焊缝厚度时, 应从原焊缝受力较小的部位开始施焊, 道间温度不应超过 200℃, 每道焊缝厚度不宜大于 3mm。
- d) 根据原构件钢材的品种, 选用相应的低氢型焊条, 且焊条直径不宜大于 4mm。
- e) 施工环境温度不宜低于 10℃, 当需多道施焊时, 层间温度差应低于 100℃, 加固后的焊缝应力应符合现行国家标准《钢结构焊接规范》GB 50661。