



T/CECS G XXXX: 20XX

中国工程建设标准化协会标准
Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路装配式梁桥建造成品智能化评价标准

Intelligent Evaluation Standards for Completed Construction of Highway
Prefabricated Beam Bridges
(征求意见稿)

中国工程建设标准化协会 发布
Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

中国工程建设标准化协会标准

公路装配式梁桥建造成品智能化评价标准

Intelligent Evaluation Standards for Completed Construction of Highway
Prefabricated Beam Bridges

T/CECS XXX-202X

主编单位：交通运输部公路科学研究所
中国计量科学研究院

发布机构：中国工程建设标准化协会

实施日期：20×× 年 ×× 月 ×× 日

人民交通出版社股份有限公司

前言

根据中国工程建设标准化协会公路分会《关于开展 2024 年第二批中国工程建设标准化协会标准(CECS G)制修订项目编制工作的通知》(中建标公路(2024) 279 号)的要求,由交通运输部公路科学研究所、中国计量科学研究院承担《公路装配式梁桥建造成品智能化评价标准》(以下简称“本标准”)的制订工作。

编写组在总结公路装配式梁桥多年工程实践经验与相关科研成果的基础上,以完善、提升预制梁桥成品智能检测与质量评价成套技术为核心,完成了本标准的编制工作。

本标准分为 6 章、1 篇附录,主要内容包括 1 总则、2 术语、3 基本规定、4 评价内容、5 基于神经网络的智能评价算法模型技术要求、6 智能化评价系统技术要求,附录 A 装配式梁桥成品质量智能化评价表。

请注意本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利,本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准基于通用的工程建设理论及原则编制,适用于本标准提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件,使用本标准相关条文时,应对适用性及有效性进行验证。

本标准由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理,由交通运输部公路科学研究所或中国计量科学研究院负责具体技术内容的解释,在执行过程中如有意见或建议,请函告本标准日常管理组,中国工程建设标准化协会公路分会(地址:北京市海淀区西土城路 8 号;邮编:100088;电话:010-62079839;传真:010-62079983;电子邮箱:shc@rioh.cn),或刘璐(地址:北京市海淀区西土城路 8 号;邮编:100088;电话:010-62079861 电子邮箱:lu.liu@rioh.cn),以便修订时研用。

主编单位:交通运输部公路科学研究所

中国计量科学研究院

参编单位:广西路建集团工程集团有限公司

中铁十一局集团有限公司

宁波市公路与运输管理中心

主 编:刘 璐 崔建军

主要参编人员:王义旭 刘海林 李兴勇 孙浩林 胡再乐 罗 翥

蒙东升 周毅姝 蔡嘉程 陈 恺 黄文武 陈 磊

张 冰

主 审：王 瑜

参与审查人员：

目 次

1 总则	1
2 术语	3
3 基本规定	5
4 评价内容	7
4.1 预制构件质量	7
4.2 安装	9
5 基于神经网络的智能评价算法模型技术要求	12
5.1 指标体系通用要求	12
5.2 数据输入技术要求	12
5.3 神经网络模型架构要求	13
5.4 权重融合与流形学习修正算法要求	14
5.5 分层计分推理计算规则	14
5.6 关键指标风险预警权重激励机制	17
5.7 模型性能与泛化性要求	17
6 智能化评价系统技术要求	18
6.1 一般要求	18
6.2 基础数据管理	18
6.3 预制件质量评价的要求	19
6.4 现场安装评价的要求	19
6.5 综合评价与结果输出要求	20
6.6 构件数字档案管理	20
6.7 系统运行管控	20
附录 A 装配式梁桥成品质量智能化评价表	22
本标准用词用语说明	25

1 总则

1.1 为规范公路装配式混凝土梁桥成品质量数字化管控，统一基于神经网络的智能化评价算法模型、评价流程、分级判定规则，提升预制构件工厂智能建造、现场拼装数字化管控水平，推动交通基础设施智能建造产业高质量发展，制定本标准。

条文说明

国家大力推进智能建造与建筑工业化协同发展，装配式梁桥成品质量直接决定桥梁结构安全与长期耐久性能。传统人工质量评价存在数据离散、主观干扰强、评价效率低、质量隐患无法提前预警等缺陷。本标准引入神经网络、流形学习等人工智能算法构建量化智能评价体系，统一算法模型、系统、评价指标全链条技术要求，填补装配式桥梁成品智能化评价标准空白。

1.2 本标准应适用于公路新建、改扩建、养护改造工程装配式混凝土梁桥预制构件成品、现场拼装工序的智能化质量评价；钢结构、木结构等装配式桥梁不在本标准适用范围内。

条文说明

本标准主要针对“装配式混凝土梁桥”，不包括钢结构、木结构等其他材质的装配式桥梁。适用工程类型涵盖了新建、改扩建以及养护改造工程，以确保标准在公路桥梁全生命周期内的广泛适用性。

1.3 本标准规定了公路混凝土装配式梁桥成品质量评价的基本规定、智能化系统的要求、内容、方法、结果。

条文说明

本标准构建“实体检测指标+AI神经网络评价模型+数字化评价系统”三位一体闭环评价体系，覆盖数据采集、模型推理、自动评分、分级预警、全生命周期溯源完整流程。

1.4 公路装配式梁桥成品智能化评价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。

条文说明

执行本标准时，应同步遵守《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650、《公路

工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》JTGF80/1 等现行行业标准以及国家标准。本标准在传统质量评定体系智能化升级补充标准，不得替代强制性工程质量验收条文。检验评定体系在智能化、数字化方向的补充和提升，当本标准与现行国家强制性标准冲突时，应以国家强制性标准为准。

2 术语

2.1 装配式梁桥 precast beam bridge

由预制混凝土构件通过可靠的方式连接组合成整体的混凝土梁式桥。

2.2 预制构件 prefabricated component

预先在预制厂或标准化预制场内完成全套生产工艺,经检验合格后运输至施工现场拼装,用以形成桥梁主体结构、实现通行功能及配套附属设施的各类混凝土构件与预埋制品。

2.3 智能化评价 intelligent evaluation

以层次分析法为基础,搭建神经网络非线性映射模型,结合 Isomap 流形学习算法完成指标权重冗余修正,采用正态分布、两点分布计分模型完成底层指标量化打分,自下而上分层加权推理,自动输出构件 / 桥梁整体量化得分与质量等级,并对关键不合格指标触发风险预警的评价技术体系。

2.4 权重融合 weight fusion

采集多名行业专家指标重要度打分样本,输入注意力神经网络完成归一化训练、分组聚合,经梯度下降迭代优化,输出标准化初始权重的算法流程。

2.5 流形学习修正 isomap manifold learning correction

采用等距修正降维算法消除多维评价指标间多重共线性与权重冗余,对数据空间邻近指标实施权重衰减,优化权重分配合理性。

2.6 风险激励权重 risk incentive weight

神经网络推理阶段动态权重调整机制,对判定为不合格、低分的关键评价指标自动放大指标权重,强化质量风险识别与预警效果。

2.7 构件数字档案 digital component archive

依托 BIM 模型、射频标签、二维码唯一标识,归集预制构件全流程检测数据、评价得分、缺陷记录形成的全生命周期可追溯数字化档案。

2.8 评价神经网络 evaluation neural network

以各级质量指标实测数据为输入特征，以构件综合质量得分为输出标签，经工程样本数据集监督训练得到的多层非线性神经网络模型，用于指标权重动态优化、综合得分自动推理。

3 基本规定

3.1 预制构件生产、现场拼装施工，应严格依据审批完成的设计文件、专项施工方案及现行标准规范实施。

3.2 预制构件应在具备相应生产条件、工艺装备及质量保障能力的预制构件厂或专用生产场地制作。

3.3 预制构件生产前应编制专项生产方案，应包括生产计划、生产工艺、模具设计与使用、技术质量控制、成品存放、运输及防护等要求；涉及冬季施工或预应力构件生产的，尚应编制专项施工方案。

3.4 预制构件生产单位应具备满足质量检验与控制要求的试验室或委托具备资质的检测机构开展检验工作。

3.5 预制构件出厂前应完成全项检验且全部合格，构件本体显著位置应设置永久性唯一标识。构件进场后，应对标识信息、外形尺寸、外观缺陷、预埋件、预留孔洞开展复核验收。

3.6 公路装配式梁桥建造成品质量评价应覆盖出厂检验、现场装配等工艺流程。

3.7 公路装配式梁桥建造成品质量评价应采用精细化分级评价模式，对混凝土强度、轴线偏位等关键项目，按允许偏差大小实施分级评价，偏差越小等级越优。

3.8 公路装配式梁桥建造成品质量评价应遵循客观公正原则，检测方法、仪器设备应符合现行标准规定，原始实测数据应真实、完整、不可篡改。

3.9 智能评价的得分应以实测原始数据为核心依据。专家打分仅可作为神经网络权重训练初始样本，最终各级指标权重必须完成神经网络融合、流形冗余修正，严禁仅依靠人工专家打分判定构件质量等级。

3.10 公路装配式梁桥建造成品质量评价应实现全过程可追溯，检测记录、验收资料、构件标识、生产与装配信息等应完整留存、规范归档，确保质量问题可溯源、可核查。宜采用电子标签、二维码、BIM 模型建立构件数字档案，实现质量问题一键溯源、跨平台数据共享。

3.11 公路装配式梁桥建造成品质量评价应采用智能化评价评价应全部采用智能化自动评价模式，依托层次分析法、评价神经网络、流形学习算法完成数据迭代训练，动态优化指标分级阈值、权重体系，实现自动化、数字化、动态化批量评价。

3.12 本标准设置关键评价指标，任意一项关键指标判定为不合格时，对应构件、桥梁整体质量应直接评定为不合格，智能评价系统应对低分关键指标自动触发质量风险预警。

条文说明

本章规定智能化评价通用管理原则、评价主体资质、数据采集合规要求，明确评价体系遵循“数据驱动、客观量化、全程可溯、AI 自动判定”核心准则，约束人工主观打分不可直接作为最终评价依据。

4 评价内容

4.1 预制构件质量

4.1.1 墩、台的质量应符合下列规定：

- 1 模板及支架的强度、刚度、稳定性应符合施工技术规范的规定。
- 2 施工缝设置及处理应符合施工技术规范规定。
- 3 混凝土表面应无建筑垃圾、杂物和临时预埋件，不应存在《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1-2017）中附录 P 规定的结构混凝土外观质量限制缺陷。
- 4 混凝土墩、台实测项目应符合表 1 的规定。

表 1 预制墩、台实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检测方法
1△	混凝土强度(MPa)		在合格标准内	按 JTG F80/1—2017 附录 D
2	断面尺寸 (mm)	外轮廓	±15	尺量：测 2 个断面
		壁厚	±10	
3	高度 (mm)		±10	尺量：测中心线处
4	平整度 (mm)		≤5	1m 直尺：每侧面测 1 处，每处测竖直、水平两个方向
5	支座垫石预留毛孔位置(mm)		≤10	尺量：每个检查
6	墩顶预埋件位置 (mm)		≤5	尺量：每件测

注：△为关键项目。

4.1.2 梁、板的质量应符合下列规定：

- 1 拼接粗糙面的质量和键槽的数量、质量应满足设计要求。
- 2 在吊移出预制底座时，混凝土的强度不得低于设计所要求的吊装强度，预制件不得受到损伤；在安装时，支承结构（墩台、盖梁、垫石）的强度应满足设计要求。

- 3 安装前，梁、板应检验合格，墩、台支座垫板应稳固；就位后，梁、板两端支座应对位，梁底与支座以及支座底与垫石顶应密贴，临时支撑应稳固。
- 4 梁段之间接缝填充材料的种类、规格和性能应满足设计要求，接缝填充密实。
- 5 混凝土表面应无建筑垃圾、杂物和临时预埋件，不应存在《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1-2017）中附录 P 规定的结构混凝土外观质量限制缺陷。
- 6 梁段接缝胶结材料不得存在脱落和开裂。
- 7 预制盖梁的实测项目应符合表 2。

表 2 预制盖梁实测项目

项次	检查项目		规定值或 允许偏差	检测方法	频率
1△	混凝土抗压强度(MPa)		在合格标准内	按 JTG F80/1—2017 附录D	
2	断面尺寸（mm）		±15	用钢尺量 3 个断面	
3	高度（mm）		±10	用钢尺量 2 个点	
4	平整度（mm）		≤3	2 m 直尺：每 20 m 测 1 处，且不少于 3 处，每处测竖直、水平两个方向	
5	支座垫石(mm)		位置	±10	用钢尺量每个垫石 2 点
			尺寸	±10	用钢尺量每个垫石
			预留锚孔位置	≤10	尺量：每个量
6△	预埋件 (mm)	灌浆套筒、灌浆连接金属波纹管中心	位置	±2	每个预埋件用钢尺量检查 30 %
6△	预埋件 (mm)	预留钢筋	位置	±2	用钢尺量每个垫石 2 点
			外露尺寸	±2	用钢尺量每个垫石

注：△为关键项目。

- 8 预制梁的实测项目应符合表 3。

表 3 预制梁、板或梁端实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检测方法
1△	混凝土抗压强度(MPa)		在合格标准内	按 JTG F80/1—2017 附录 D
2	梁长度 (mm)	总长度	+5, -10	尺量: 每梁顶面中线、底面两侧

			梁段长度		0, -2	
3	断面尺寸 (mm)	宽度	箱梁	顶宽	±20 (±5)	尺量：每梁测 3 个断面，板和梁段测 2 个断面。
				底宽	±10 (+5,0)	
			其他梁、板	干接缝（梁翼缘、板）	±10 (±3)	
				湿接缝（梁翼缘、板）	±20	
		高度	箱梁		0, -5	
			其他梁、板		±5	
		顶板、底板、腹板或梁肋厚			+5,0	
4	平整度 (mm)				≤5	2 m 直尺：每 20 m 测 1 处，且不少于 3 处，每处测竖直、水平两个方向
5	横系梁及预埋件位置 (mm)				≤5	尺量：每件
6	横坡 (%)				±0.15	尺量：每件
7	斜拉索锚面	锚点坐标 (mm)			±5	全站仪、钢尺：检查每锚垫板，测水平及相互垂直的锚孔中心线与锚垫板边线交点坠标推算
		锚面角度 (°)			≤0.5	角度仪：检查每锚垫板与水平面、立面的夹角，各测 3 处
注：△为关键项目。						

4.2 安装

4.2.1 墩、台的安装应符合下列规定：

- 1 预制节段胶结材料的品种和技术性能应满足设计要求，接缝填充应密实。
- 2 墩、台身埋入基坑内深度应满足设计要求。
- 3 混凝土表面应无建筑垃圾、杂物和临时预埋件，不应存在《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1-2017）中附录 P 规定的结构混凝土外观质量限制缺陷。
- 4 梁段接缝胶结材料不得存在脱落和开裂。
- 5 墩、台身安装实测项目见表 4。

表 4 墩、台身安装实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1△	轴线偏位 (mm)	H≤60m	≤10, 且相对前一节段≤8	全站仪:每施工节段 测顶面边线与两轴 线交点
		H>60m	≤15, 且相对前一节段≤8	
2	顶面高程 (mm)		±10	水准仪: 测 5 处
3	全高竖直度	H≤5m	≤5	全站仪、纵、横向各 测 2 处
		5m<H≤60m	≤H/1000, 且≤20	
		H>60m		
4	节段间错台 (mm)		±3	尺量:测每节每侧面
5△	湿接头混凝土强度 (MPa)		在合格标准内	按 JTG F80/1-2017 附录 H 检查

H 为墩、台高, 计算规定值或允许偏差时以 mm 计。

4.2.2 梁、板的安装应符合下列规定:

- 1 拼接粗糙面的质量和键槽的数量、质量应满足设计要求。
- 2 在吊移出预制底座时, 混凝土的强度不得低于设计所要求的吊装强度, 预制件不得受到损伤; 在安装时, 支撑结构(墩台、盖梁、垫石)的强度应满足设计要求。
- 3 安装前, 梁、板应检验合格, 墩、台支座垫板应稳固; 就位后, 梁、板两端支座应对位, 梁底与支座以及支座底与垫石顶应密贴, 临时支撑应稳固。
- 4 梁段之间接缝填充材料的种类、规格和性能应满足设计要求, 接缝填充密实。
- 5 预制安装梁、板安装实测项目应符合表 5 的规定。

表 5 梁、板安装实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	支承中心偏位 (mm)	梁	≤5	尺量: 每跨测 6 个支 承处, 不足 6 个时全 测
		板	≤10	
2	梁、板顶面高程 (mm)		±10	水准仪: 每跨测 5 处, 跨中、桥墩(台) 处应布置测点
3	相邻梁、板顶面高差	L≤40m	≤10	尺量: 测每相邻梁、

	(mm)	L>40m	≤15	板高差最大处
--	------	-------	-----	--------

5 预制安装梁、板安装实测项目应符合表 5 的规定。

表 6 逐跨拼装梁安装实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	轴线偏位 (mm)		≤3	全站仪：每跨测 3 处
2	相邻节段间接缝错台 (mm)	顶面	≤5	尺量：每条接缝测顶底面和每侧面错台最大处
		底面、侧面	≤3	
3	节段拼装立缝宽度 (mm)		≤3	尺量：每条接缝测 3 处
4	梁长 (mm)		+ 20, -40	尺量：每跨测顶面两侧边线和中线处
5	支承中心偏位 (mm)		≤5	尺量：每支承中心

5 基于神经网络的智能评价算法模型技术要求

5.1 指标体系通用要求

5.1.1 智能评价指标体系应设置三级分层架构：一级指标、二级指标、三级指标，见图 1。全部指标层级、权重分配应与附录 A 保持一致，算法模型不得擅自删减、新增评价指标。

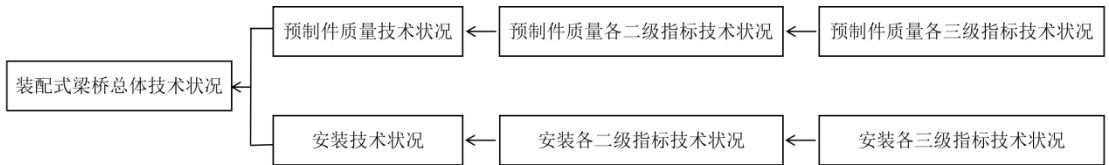


图 1 装配式梁桥技术状况评价指标

5.1.2 神经网络模型输入特征应覆盖本标准第 5 章全部预制构件、现场安装实测项目，关键指标应设置独立特征通道，模型需对关键指标增加权重激励逻辑。

5.1.3 指标分层推理顺序应遵循自底向上计算逻辑：三级指标计分→二级指标加权得分→一级指标加权得分→桥梁成品综合总分，模型推理链路不得颠倒层级计算顺序。

条文说明

本标准指标体系为神经网络模型固定输入特征集，模型训练、在线推理阶段均不可修改指标层级结构；分层计算逻辑由神经网络前向传播流程实现，保证所有构件评价计算逻辑统一。

5.2 数据输入技术要求

5.2.1 模型离线训练数据集应划分训练集、验证集、测试集，划分比例宜采用 7：2：1，三类数据集样本工况、构件类型、缺陷分布无重叠。

5.2.2 训练数据集应包含优秀、良好、合格、不合格四类全等级样本，关键指标不合格样本占比不应低于总样本 10%，避免模型训练偏置。

5.2.3 模型输入数据应分为两类处理，连续型实测偏差数据（尺寸、高程、平整

度等）采用正态分布处理；离散型二值判定数据（强度合格/不合格、外观缺陷有/无）采用两点分布处理，处理后输入神经网络。

5.2.4 在线实时推理输入数据应支持设备自动采集、人工补录双来源，输入前应完成数据清洗、异常离群值剔除、缺失值填充预处理。当缺失数据占比高于 5% 时，模型应暂停评价并输出数据异常告警。

5.2.5 所有输入实测数据应绑定构件唯一编码、采集时间、采集设备编号，作为神经网络模型附属溯源特征留存，全程参与日志记录。

条文说明

详细解释各项算法的应用场景。例如：正态分布模型用于处理具有统计规律的连续型尺寸偏差数据；两点分布用于处理“合格/不合格”的离散型属性数据。流形学习算法用于对高维多源异构数据进行降维和特征提取；神经网络用于建立输入特征与最终质量等级之间的非线性映射关系。

5.3 神经网络模型架构要求

5.3.1 智能评价核心网络应采用多层全连接注意力神经网络，网络输入层维度匹配全部三级评价指标数量。隐藏层不少于 2 层，激活函数宜采用高斯误差线性单元。输出层输出各级指标权重修正系数、综合质量得分修正值。

5.3.2 网络训练优化器应选用 AdamW 配置动态衰减学习率，解决权重衰减与参数更新计算混在一起的问题。损失函数应采用均方误差损失，设置 L2 正则岭回归、辍学层抑制模型过拟合。

5.3.3 模型训练应配置早停机制，验证集损失连续 10 轮无下降时自动终止训练，保存最优权重文件。

5.3.4 模型应支持轻量化量化部署，适配本地评价系统离线推理。单构件完整评价推理时延不应大于 100ms，批量并发推理每秒处理构件数量不少于 50 个。

5.3.5 网络权重文件应加密存储，禁止明文导出。模型推理全流程计算日志自动留存，支持复现完整打分过程。

5.4 权重融合与流形学习修正算法要求

5.4.1 初始权重数据集应采集不少于 10 位行业专家指标打分样本，作为神经网络监督训练输入样本。

5.4.2 注意力神经网络应对专家打分样本归一化、分组聚合，采用小批量梯度下降迭代训练输出初始融合权重。

5.4.3 初始权重完成神经网络训练后，必须采用流形学习算法完成权重冗余修正：对高相关性邻近指标实施权重衰减，消除指标多重共线性干扰。

5.4.4 经流形修正后的同层级指标权重之和应严格等于 1.0，神经网络应内置权重自检逻辑，权重和偏差超出 ± 0.001 时自动报错。

5.4.5 模型应内置风险激励权重模块，推理过程识别三级指标不合格样本时，自动放大该指标权重，强化不合格项对综合得分的影响，实现质量风险预警。

条文说明

说明权重计算的动态调整机制。初始权重由层次分析法（AHP）结合专家打分（权重融合）确定，在系统运行过程中，利用神经网络根据历史评价数据和实际工程质量反馈，对权重进行动态修正和优化。流形学习算法用于对高维多源异构数据进行降维和特征提取。神经网络用于建立输入特征与最终质量等级之间的非线性映射关系。

5.5 分层计分推理计算规则

5.5.1 三级指标计分应区分两类算子，模型必须完整实现两套计分逻辑，不可简化删减。连续型指标：正态分布计分模型，按 5.5.2.1 计算；离散型指标：两点分布计分模型，按 5.5.2.2 计算。

5.5.2.1 正态分布计分模型

1 有效取值范围为 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 的评价指标，按正态分布进行计算。

2 通过行业大数据或其小样本数据，利用人工智能方法，获得同类在役装配式梁桥各评价指标的均值 μ 、总体标准差 σ 及其正态分布模型。

3 测量值处于有效取值范围的进行进一步分级，测量值超出有效取值范围的判定为不合格。

4 区间分界值确定以均值 μ 为中心，按双侧累积概率：

(1) 均值双侧合计概率为 30%分界值： $x_{-1.5}$ ， $x_{1.5}$ ，满足 $P(x_{-1.5} < X < x_{1.5}) = 0.3$;

(2) 均值双侧合计概率为 60%分界值： x_{-3} ， x_3 ，满足 $P(x_{-3} < X < x_3) = 0.6$ 。

5 三级指标按正态分布双侧概率区间划分的评价等级如表 8 所示：

表 8 指标评价等级及分值表

评价等级	指标数值区间	评价分值
优秀	$x_{-1.5} \leq x \leq x_{1.5}$	[90,100]
良好	$x_{-3} \leq x < x_{-1.5}$ 或 $x_{1.5} < x \leq x_3$	[75,90)
合格	$x_{\min} \leq x < x_{-3}$ 或 $x_3 < x \leq x_{\max}$	[60,75)
不合格	$x < x_{\min}$ 或 $x > x_{\max}$	[0,60)

6 评价分值计算

对任意一个划分区间 $[x_a, x_b]$ ，区间内概率密度取值范围 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 。

$$I_{ijk} = S_{low} + (S_{high} - S_{low}) \cdot \frac{f(x) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (1)$$

式中： I_{ijk} ——三级指标最终评价分值；

S_{low} 、 S_{high} ——本等级对应评价分值上下限；

$f(x)$ ——当前实测值对应的正态分布概率密度；

$F_{\max}$ ——本区间内概率密度最大值；

$F_{\min}$ ——本区间内概率密度最小值。

5.5.2.2 正态分布计分模型

有效取值范围为 $\{\geq, >, <, \leq\}x$ 的评级指标，按两点分布进行计分：测量值在有效取值范围内的计为 100 分，超出范围则计为 0 分。

5.5.2 二级指标得分应按式（2）完成加权求和计算，神经网络前向传播过程自动

完成加权聚合。

$$I_{ij} = \sum_{k=1}^m I_{ijk} \times w_k \quad (2)$$

式中： I_{ij} ——装配式梁桥二级指标技术状况评分，值域为 0~100 分；

I_{ijk} ——装配式梁桥三级指标技术状况评分，值域为 0~100 分；

m ——某二级指标下的三级指标数；

w_k ——第 k 个三级指标的权重。

5.5.3 一级指标得分应按式（3）完成加权求和计算，神经网络完成层级特征聚合输出分项质量得分。

$$I_i = \sum_{j=1}^n I_{ij} \times w_j \quad (3)$$

式中： I_i ——装配式梁桥一级指标技术状况评分，值域为 0~100 分；

I_{ij} ——装配式梁桥二级指标技术状况评分，值域为 0~100 分；

n ——某一级指标下的二级指标数；

w_j ——第 j 个二级指标的权重。

5.5.4 桥梁成品综合总得分应按式（4）完成加权计算，输出 0~100 区间标准分值。

$$D_r = \sum_{i=1}^o I_i \times w_i \quad (4)$$

式中： D_r ——装配式梁桥总体技术状况评分，值域为 0~100 分；

I_i ——装配式梁桥一级指标技术状况评分，值域为 0~100 分；

o ——装配式梁桥一级评价指标数；

w_i ——第 i 个一级指标的权重。

5.5.5 各级指标质量等级划分严格执行表 9 分值区间，神经网络输出得分后自动匹配对应等级标签。

表 9 装配式梁桥质量水平分级界限表

质量水平评分	质量水平分级			
	优秀	良好	合格	不合格
D_r (I_i, I_{ij}, I_{ijk})	[90,100]	[75,90)	[60,75)	[0,60)

5.3.2.6 可设定某些评价指标为关键评价指标，当关键评价指标质量水平为不合格时，装配式梁桥整体质量水平可评定为不合格。

5.6 关键指标风险预警权重激励机制

5.6.1 混凝土强度、轴线偏位、湿接头强度等带△关键指标，模型应设置独立风险判定通道。

5.6.2 任意关键三级指标得分低于 60 分（不合格）时，神经网络应触发全局风险判定，直接将构件整体质量判定为不合格，同步输出预警信息。

5.6.3 风险激励权重放大系数宜设置 1.5~2.0，模型可根据工程历史样本自动迭代优化放大系数。

5.7 模型性能与泛化性要求

5.7.1 离线测试集综合得分误差绝对值应 ≤ 2 分，质量等级判定准确率 $\geq 98\%$ 。

5.7.2 全新工况、新型构件跨样本测试时，模型综合得分精度衰减不应大于 4%。

5.7.3 模型应支持增量迭代训练，新增工程样本累计达到 500 组时，系统应自动触发模型重训练，动态更新权重参数。

5.7.4 模型应具备对抗噪声鲁棒性，少量实测数据微小扰动不会造成质量等级误判、虚假预警。

6 智能化评价系统技术要求

6.1 一般要求

6.1.1 智能化评价系统应集成预制构件质量评价、现场安装质量评价两大核心业务模块，完整覆盖检测数据自动采集、神经网络模型推理计算、质量等级自动判定、构件数字档案全生命周期管理全业务流程。

6.1.2 系统内置神经网络评价算法、指标限值、各级指标权重、计分规则应与本标准第 4 章、第 5 章、附录 A 完全一致，系统后台不得提供人工修改允许偏差、权重系数、计分公式的操作权限。

6.1.3 系统应支持电脑端、移动端多终端适配，预制工厂、施工现场应同时支持在线联网、离线本地缓存两种数据录入模式；原始检测数据锁定后不可篡改，全操作行为留存日志，满足工程归档、质量监督核查要求。

6.1.4 系统综合评价输出结果仅针对预制墩台、盖梁、梁板成品及现场拼装工序。原材料进场检测数据仅作为基础录入附件，不参与神经网络综合得分计算。

6.2 基础数据管理

6.2.1 系统应搭建统一标准化基础数据库，数据库应包含指标限值库、指标权重库、神经网络模型文件库、构件数字档案库四大模块，为智能评价推理提供基础输入支撑。

6.2.2 指标限值库完整收录本标准全部实测项目规定值、允许偏差、关键项目标识，作为实体质量符合性判定唯一基准，后台锁定不可修改。

6.2.3 指标权重库完整存储附录 A 全部一至四级指标权重，系统启动自动执行权重合规自检，同层级权重和非 1.0 时系统禁止启动评价计算。

6.2.4 神经网络模型库存储加密训练权重文件，内置正态分布、两点分布计分算子、流形修正、风险激励权重全套算法逻辑，系统推理计算不得脱离内置模型执行人工打分。

6.2.5 构件数字档案库存储构件唯一标识码、BIM 关联数据、二维码标识、全流程检测记录、历次智能评价报告，数据完整可追溯，满足竣工验收、运维信息调取需求。

6.3 预制件质量评价的要求

6.3.1 系统应支持物联网智能感知设备自动接入，全站仪、水准仪、三维激光扫描仪、混凝土回弹仪等检测设备可实时上传几何尺寸、力学性能原始数据，减少人工录入干预。

6.3.2 系统应集成机器视觉识别子模块，通过图像自动识别构件平整度、表面裂缝、外观缺陷参数，并自动关联构件二维码唯一身份编码。

6.3.3 系统应保留传统检测工具人工补录接口，录入数据完成逻辑性、完整性校验，异常数据弹窗提示整改。

6.3.4 采集指标完整覆盖本标准 4.1 全部预制墩台、盖梁、梁板实测项目，无指标缺漏采集。

6.3.5 系统依据构件唯一编码、图像特征自动识别构件类型，自适应匹配对应标准化采集表单，分类完成数据归集。

条文说明

本条明确智能化采集硬件配套技术要求，区别于传统纸质记录标准，强制要求物联网自动采集、机器视觉缺陷识别，减少人工读数带来主观误差，保障神经网络输入数据源真实客观。

6.4 现场安装评价的要求

6.4.1 系统按施工工序分类管理安装数据，区分墩台安装、梁板安装、逐跨拼装梁三类专属采集表单，实现检测数据结构化分类存储。

6.4.2 系统内置指标自动校核预警模块，对轴线偏位、顶面高程、节段错台、接缝宽度等安装核心指标，实测值超出标准允许偏差时实时弹出质量警示。

6.4.3 系统支持质量问题反向溯源，识别安装不合格缺陷后，自动调取对应预制构件出厂检测记录、智能评价得分，打通预制生产、现场安装完整质量数据链路。

6.5 综合评价与结果输出要求

6.5.1 系统调用内置神经网络模型自动完成分层加权计算，综合预制构件质量、现场安装两大一级指标得分输出桥梁成品综合评价总分。

6.5.2 系统支持三类标准化评价报告导出：预制构件质量专项报告、现场安装专项报告、全桥成品综合评价报告；报告完整包含原始实测数据、各级指标得分明细、权重分配、质量等级判定、不合格项汇总，格式满足工程电子归档、电子签章要求。

6.5.3 系统内置数据可视化看板，以直方图、趋势折线图展示构件得分分布，自动汇总统计所有不合格关键指标，支持对比预制、安装分项质量差异，辅助定位质量波动工序。

6.6 构件数字档案管理

6.6.1 系统集成 BIM 模型、射频标签、二维码标识技术，建立预制构件全生命周期数字档案，档案归集几何尺寸、外观缺陷、材料强度、预埋件检测、运输记录、安装检测、历次智能评价全部信息。

6.6.2 系统支持构件唯一编码一键检索溯源，快速调取全流程质量数据，形成缺陷发现、整改复核闭环管理。

6.6.3 档案数据采用加密存储防护，支持按标段、生产厂家、构件类型、生产批次多维度筛选导出，满足竣工验收、行业监督抽查、后期运维溯源需求。

6.7 系统运行管控

6.7.1 系统设置分级权限隔离机制：数据采集录入、评价结果审核、系统后台管理权限相互独立，严禁跨权限越权操作。原始实测数据锁定后禁止修改、删除。

6.7.2 神经网络评价模型全部计算步骤全程留痕，完整演算底稿可导出，评价结果可复现，满足第三方检测机构复核、合规审查要求。

6.7.3 系统具备模型、指标库动态更新能力；当国家、行业桥梁标准修订时，可同步更新指标限值、权重参数、神经网络模型，保证评价算法持续符合现行标准要求。

条文说明

本条强调了数据采集的“智能化”转型。传统标准多强调“应记录”，本标准要求“应支持自动采集与实时传输”，明确了物联网（IoT）技术的应用；新增“机器视觉识别技术”和“射频识别（RFID）”条款，旨在推动行业从人工量测向自动化检测升级，确保数据的原始性和真实性。

附录 A 装配式梁桥成品质量智能化评价表

表 A1 装配式梁桥成品质量智能化评价指标及评价要素评价权重值

一级评价指标	一级权重	二级评价指标	二级权重	三级评价指标	三级权重
预制件质量	0.54	预制墩柱	0.25	混凝土抗压强度（MPa）	0.18
				断面尺寸（mm）	0.15
				高度（mm）	0.11
				平整度（mm）	0.11
				支座垫石(mm)	0.12
				预埋件(mm)	0.32
		预制盖梁	0.48	混凝土抗压强度（MPa）	0.17
				断面尺寸（mm）	0.15
				高度（mm）	0.11
				平整度（mm）	0.12
				支座垫石(mm)	0.12
				预埋件(mm)	0.12
		预制梁	0.27	混凝土抗压强度（MPa）	0.13
				梁长度（mm）	0.12
				断面尺寸（mm）	0.08
				平整度（mm）	0.09
				横系梁及预埋件位置（mm）	0.08
				横坡（%）	0.10
				斜拉索锚面	0.40
安装	0.46	墩、台身安装	0.32	轴线偏位（mm）	0.30
				顶面高程（mm）	0.20
				全高竖直度	0.20
				节段间错台（mm）	0.20
				湿接头混凝土强度（MPa）	0.10
		预制安装梁、板	0.35	混凝土抗压强度（MPa）	0.30
				梁长度（mm）	0.20
				断面尺寸（mm）	0.20
				平整度（mm）	0.10
				横系梁及预埋件位置（mm）	0.10
				横坡（%）	0.10
		梁、板安装	0.23	支承中心偏位（mm）	0.50
				梁、板顶面高程（mm）	0.33
				相邻梁、板顶面高差（mm）	0.17
		逐跨拼装梁安装	0.10	轴线偏位（mm）	0.32
				相邻节段间接缝错台（mm）	0.20
				节段拼装立缝宽度（mm）	0.22
				梁长（mm）	0.16
				支承中心偏位（mm）	0.10

表 A2 预制墩柱中支座垫石(mm)指标及评价要素评价权重值

三级评价指标	三级权重	四级评价指标	四级权重
支座垫石(mm)	0.25	位置	0.25
		尺寸	0.21
		预制锚孔位置	0.54

表 A3 预制墩柱中预埋件(mm)指标及评价要素评价权重值

三级评价指标	三级权重	四级评价指标	四级权重
预埋件(mm)	0.32	灌浆套筒、灌浆连接金属波纹管中心位置	0.57
		预留钢筋位置	0.26
		预留钢筋外露尺寸	0.16

表 A4 预制盖梁中支座垫石(mm)指标及评价要素评价权重值

三级评价指标	三级权重	四级评价指标	四级权重
支座垫石(mm)	0.12	位置	0.24
		尺寸	0.24
		预制锚孔位置	0.53

表 A5 预制盖梁中预埋件(mm)指标及评价要素评价权重值

三级评价指标	三级权重	四级评价指标	四级权重
预埋件(mm)	0.32	灌浆套筒、灌浆连接金属波纹管中心位置	0.57
		预留钢筋位置	0.27
		预留钢筋外露尺寸	0.17

表 A6 预制梁中梁长度(mm)指标及评价要素评价权重值

三级评价指标	三级权重	四级评价指标	四级权重
梁长度(mm)	0.12	总长度	0.66
		梁端长度	0.34

表 A7 预制梁中断面尺寸(mm)指标及评价要素评价权重值

三级评价指标	三级权重	四级评价指标	四级权重
断面尺寸(mm)	0.08	箱梁顶宽	0.07
		箱梁底宽	0.07
		其他梁、板干接缝（梁翼缘、板）	0.07
		其他梁、板湿接缝（梁翼缘、板）	0.07
		箱梁高度	0.14
		其他梁、板高度	0.15
		顶板、底板、腹板或梁肋厚	0.43

表 A8 预制梁中斜拉索锚面指标及评价要素评价权重值

三级评价指标	三级权重	四级评价指标	四级权重
斜拉索锚面	0.40	锚点坐标（mm）	0.63

		锚面角度 (°)	0.37
--	--	----------	------

表 A9 预制安装梁、板中梁长度(mm)指标及评价要素评价权重值

三级评价指标	三级权重	四级评价指标	四级权重
梁长度(mm)	0.20	总长度	0.66
		梁段长度	0.34

表 A10 预制安装梁、板中断面尺寸(mm)指标及评价要素评价权重值

三级评价指标	三级权重	四级评价指标	四级权重
断面尺寸(mm)	0.20	箱梁顶宽	0.07
		箱梁底宽	0.07
		其他梁、板干接缝（梁翼缘、板）	0.07
		其他梁、板湿接缝（梁翼缘、板）	0.07
		箱梁高度	0.14
		其他梁、板高度	0.15
		顶板、底板、腹板或梁肋厚	0.43

表 A11 梁、板安装中支承中心偏位（mm）指标及评价要素评价权重值

三级评价指标	三级权重	四级评价指标	四级权重
支承中心偏位（mm）	0.50	梁	0.60
		板	0.40

表 A12 逐跨拼装梁安装中相邻节段间接缝错台（mm）指标及评价要素评价权重值

三级评价指标	三级权重	四级评价指标	四级权重
相邻节段间接缝错台（mm）	0.20	顶面	0.40
		底面、侧面	0.60

本标准用词用语说明

1 本标准执行严格程度的用词，采用下列写法：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的用词，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用词，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，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

- 1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“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”。
- 2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《××××××》（×××）的有关规定”。
- 3) 当引用本标准中的其他规定时，表述为“应符合本标准第×章的有关规定”、“应符合本标准第×.×节的有关规定”、“应符合本标准第×.×.×条的有关规定”或“应按本标准第×.×.×条的有关规定执行”。