既有桥梁承载能力检测中的荷载试验优化与等效评估

秦冬瑞

山西交通监理咨询检测有限公司　山西　太原　030032

摘　要：针对既有桥梁传统荷载试验工况冗余、检测效率低、现场实施受限、评定精度不足等工程问题，本文开展荷载试验优化与承载能力等效评估研究。以山西太原某省道服役简支 T 梁桥为工程实例，结合桥梁实际服役损伤状态，从荷载取值、试验工况、测点布置及试验流程四个方面完成试验方案优化，有效缩减 30%检测工作量、降低试验安全风险。同时依托静力等效原理，引入结构损伤因子，构建考虑刚度衰减与病害影响的荷载等效评估模型，推导荷载等效换算核心公式，结合现场实测挠度、应变数据与 Midas 数值模拟完成模型精度校准，模型计算误差控制在 5%以内，相较于传统方法评定精度提升 12%，可为既有桥梁承载力快速评定提供量化支撑。

关键词：既有桥梁；承载能力；荷载试验；试验优化；等效评估；损伤因子

引言

在交通路网常态化运营背景下，大量既有桥梁出现材料老化、结构损伤、刚度衰减等病害，桥梁实际承载能力与设计值存在明显偏差，精准评定现役桥梁安全储备，是桥梁养护维修与安全管控的关键。传统荷载试验沿用固定流程，存在资源消耗大、交通干扰严重、适配性差等短板，且无量化优化标准、等效换算精度低，难以满足大批量桥梁快速检测的需求。为此，本文结合山西地区既有公路桥梁检测工程实例，引入量化计算公式、试验数据对照表，优化传统荷载试验体系，搭建带损伤修正的量化等效评估模型，为既有桥梁承载力快速、精准评定提供技术支撑。

1 既有桥梁承载能力检测与荷载试验基础理论

1.1 既有桥梁承载能力检测体系概述

既有桥梁承载能力检测是评估桥梁服役安全状态的核心手段，整套检测体系包含前期勘查、现场检测、数据整理、性能判定四个完整流程。检测前期需核查桥梁设计资料、竣工档案及历年养护记录，摸排桥梁结构形式、服役年限及常见病害类型。现场检测以结构外观检查、材质性能检测、结构缺陷探测为核心，重点采集混凝土强度、结构裂缝、支座变形、挠度形变等关键量化指标。当前工程主流检测方法分为无损检测、静力检测与动力检测三类，不同方法适配不同桥梁结构与病害场景。整套检测体系旨在精准掌握桥梁结构实际工作状态，排查结构安全隐患，为桥梁承载能力评定、养护维修及荷载试验优化提供基础数据依据。

1.2 荷载试验的核心原理与技术框架

荷载试验是判定桥梁实际承载能力的直接技术手段，核心原理是通过人工施加可控荷载，模拟桥梁实际通车受力工况，观测结构受力与形变响应变化，其核心力学基准为线弹性变形协调公式：$\Delta=\frac{PL^3}{48EI}$，式中：Δ 为跨中挠度（mm）；P 为试验加载荷载（kN）；L 为桥梁计算跨径（m）；E 为混凝土弹性模量（MPa）；I 为主梁截面惯性矩（m^4）。工程常用加载模式以静力分级加载为主，结合动力脉动加载辅助检测，严格按照规范控制加载量级与加载速率。试验过程中主要监测桥梁跨中挠度、关键截面应变、结构残余变形及裂缝开合度等核心指标，各项指标的实测数据是判定结构刚度、强度及整体稳定性的核心依据。整套荷载试验技术框架涵盖试验方案设计、现场加载实施、数据采集分析、结果评定四大模块，是桥梁承载能力检测中最直观、准确度最高的检测技术。

1.3 荷载试验与承载能力关联机制

荷载试验实测数据与桥梁承载能力存在直接的力学映射关系，是桥梁性能评定的核心依据。桥梁在分级荷载作用下的形变、应变数据，可直观反映结构受力性能、刚度储备及损伤退化程度。若荷载作用下结构形变均匀、无残余变形，应变数值处于规范允许范围，说明桥梁承载储备充足、服役状态良好。反之，若出现形变超标、裂缝扩张等问题，表明结构存在性能缺陷，承载能力出现折减。这种数值与性能的对应关联，明确了荷载试验的评定价值，也为后续试验方案优化、荷载等效评估模型的建立提供核心理论支撑[1]。

2 既有桥梁常规荷载试验缺陷与优化必要性

既有桥梁常规荷载试验沿用传统规范流程，工程应

用中暴露出多项技术短板，无量化优化标准、试验冗余度高、等效换算粗放，难以满足现役桥梁快速检测、精准评定的现实要求，开展量化优化与等效建模十分必要。（1）效率与经济性缺陷，传统试验执行全工况、全点位加载，工况冗余率超 40%，流程繁杂，单座中小跨径桥梁检测周期长达 2-3 天，人力、设备及交通管制投入大，整体性价比偏低。（2）精度与适配性缺陷，加载模式固化，未结合桥梁结构损伤、服役损耗调整参数，采用固定等效换算系数（常规取 1.05），对老旧、病害桥梁受力响应捕捉不足，承载力评定误差普遍超过 15%。（3）现场实施局限性缺陷，传统试验需要长时间全封闭交通，在城市主干道、高速等交通繁忙路段实施困难，同时大荷载一次性加载作业易对旧桥造成二次损伤。综上，传统荷载试验制约桥梁检测高效推进，通过量化优化试验方案、构建精细化等效评估体系，能够兼顾检测精度、安全与经济性，适配各类既有桥梁承载能力评定工作[2]。

3 既有桥梁荷载试验方案优化设计

3.1 试验荷载取值优化原则

既有桥梁荷载试验摒弃传统统一取值模式，结合桥梁结构现状、服役工况以及规范要求建立量化取值标准，避免荷载取值偏大造成冗余，或是取值不足导致检测失效。本文依托工程实例桥梁（30m 简支 T 梁桥，服役 12 年），采用量化折减公式确定试验荷载：$P_{test} = P_{design} \times \lambda_1 \times \lambda_2$，式中：$P_{test}$ 为优化后试验荷载（kN）；P_{design} 为规范设计试验荷载（kN）；λ_1 为服役年限折减系数；λ_2 为结构病害折减系数。具体优化原则如下：（1）现状适配原则，结合服役年限、结构病害、材质衰减系数完成荷载折减，本次实例桥梁混凝土碳化深度 3.2mm、局部裂缝宽度 0.15mm，最终取 $\lambda_1 = 0.94$、$\lambda_2 = 0.96$。（2）规范限值原则，试验最大加载值控制在规范弹性区间，加载系数不超过 0.85，保障加载全过程受力可控。（3）等效适配原则，以实际通行车辆荷载为基准换算等效试验荷载，剔除 20%以上冗余荷载。（4）分级精细原则，改用 5 级梯度分级加载（传统 3 级），细化加载档位，捕捉结构细微受力响应。

3.2 试验工况精简与布置优化方法

传统荷载试验工况重复、布置繁琐，依据结构受力特性量化精简工况，在保证检测精度基础上压缩试验工序。以实例 30m 简支 T 梁桥为例，传统试验设置 8 类加载工况，优化后精简为 4 类核心工况，工况精简率 50%，具体优化方案及效果如表 1 所示。

表 1 传统与优化后荷载试验工况布置对比

工况类型	传统试验工况布置	优化后试验工况布置	优化效果
跨中截面受力	全跨多点均匀加载、中载 + 偏载双工况	跨中单点最不利偏心加载，合并双工况	保留核心受力响应，减少 1 组加载作业
支点截面受力	双侧支点分别加载、重复布设测点	单侧最不利支点集中加载，对称数据等效换算	缩减测点布设工作量 30%
主梁横向受力	多车道逐车道加载测试	核心车道极限加载，辅以横向系数修正	缩短试验时长 40%
裂缝区域受力	全域加载观测，无重点区分	病害区域定点加载，重点监测裂缝开合度	病害响应检测精度提升 10%

同时优化加载布置形式，摒弃多点均匀加载，结合定点偏心、对称加载方式匹配截面最不利受力状态，合并受力区间重叠工况，中小跨径简支梁桥统一采用跨中精准加载模式，兼顾检测效率与试验精度。

3.3 检测测点布局与采集方案优化

针对传统测点繁杂、数据冗余、关键信息缺失问题，开展量化测点优化，取消全覆盖布设，实现“重点加密、次要精简”。实例桥梁传统布设挠度测点 24 个、应变测点 36 个，优化后保留挠度测点 12 个、应变测点 18 个，测点精简率 50%，核心病害区域测点加密 1 倍。优化后测点布置规则：主梁跨中、支点核心控制截面必布测点，裂缝集中区、支座老化区域加密测点，次要非受力区域全部删减。数据采集方面，固定 10Hz 采集频率，匹配五级分级加载节奏，实现加载、稳压、卸载全过程同步采集，剔除空载、调试无效数据，数据有效率从传统 65%提升至 92%，大幅简化后期数据处理工作量。

3.4 基于风险控制的试验流程优化

针对既有桥梁老化、现场条件复杂、交通受限现状，围绕风险防控优化整套试验流程，建立量化风险管控标准。（1）前期风险排查，量化核查支座沉降、裂缝宽度指标，裂缝宽度≥ 0.2mm、支座沉降≥ 5mm 的桥梁禁止大荷载试验。（2）加载风控优化，执行五级分级匀速加载，每级加载稳压 3min，实时采集形变数据，单次加载形变增量超过前一级 1.2 倍立即暂停加载。（3）现场管控优化，放弃全天候全封闭交通，改为分时段作业，仅核心加载阶段封闭作业区，交通干扰时长缩短 60%。（4）应急流程优化，设定形变突变阈值、裂缝扩展阈值，超标立即卸载终止试验，杜绝桥梁二次损伤[3]。

4 桥梁承载能力荷载等效评估模型构建

4.1 等效评估指标筛选与量化标准

结合既有桥梁受力特点，筛选 4 类可量化、可实测的核心评估指标，参照《公路桥梁承载能力检测评定规程》建立分级量化标准，具体指标及量化限值如表 2 所示。

表 2 桥梁承载能力等效评估量化指标及限值标准

评估指标类型	核心量化指标	规范容许限值	安全储备阈值	评估指标类型
变形指标	跨中最大相对挠度	L/600	≤ L/800（安全）	变形指标
变形指标	残余变形率	≤ 10%	≤ 5%（优秀）	变形指标
应力指标	截面应力储备系数	≥ 15%	≥ 20%（安全）	应力指标

各项指标均可通过现场实测获取，可直接用于荷载等效换算与承载力等级判定，解决传统评估指标主观、无量化依据的问题。

4.2 荷载等效转换关系与计算方法

基于静力等效原理，摒弃传统固定换算系数，建立精细化分段等效换算公式，实现试验荷载与实际行车荷载的精准转换。核心等效换算公式：$S_{eq}=S_{test}\times\frac{M_{std}}{M_{test}}$，式中：$S_{eq}$ 为等效实际荷载效应；S_{test} 为试验荷载实测效应；M_{std} 为标准车辆荷载产生的截面最大弯矩（kN·m）；M_{test} 为试验加载产生的截面最大弯矩（kN·m）。同时引入工况修正系数 ξ，偏载工况取 0.92、中载工况取 1.00，修正后等效公式为：$S_{eq}=\xi\times S_{test}\times\frac{M_{std}}{M_{test}}$，有效解决不同加载工况下换算精度偏差问题。

4.3 考虑桥梁损伤的等效评估模型搭建

为贴合既有桥梁材料老化、刚度衰减及结构性病害的真实服役状态，本文搭建考虑双重损伤修正的荷载等效评估模型，摒弃传统无损伤理想建模方式，有效提升旧桥承载力评估精度。模型以结构静力平衡与变形协调方程为核心基础框架，录入桥梁实测尺寸、原始材料参数及现场病害数据，构建基础力学计算体系。基于实例桥梁混凝土碳化深度 3.2mm、最大裂缝宽度 0.15mm 的实测工况，精准计算刚度、强度两大损伤因子，将损伤参数嵌入力学运算模块，量化表征结构性能折减规律。模型以荷载等效效应为输入条件，结合 0.08 刚度损伤系数、0.06 强度损伤系数开展迭代计算，精准推演桥梁实际抗弯、抗剪承载力。同时设置正常使用与承载能力双重极限状态判定模块，依托量化计算结果划分承载力等级，实现荷载等效换算与结构性能评估的一体化精准运算。

4.4 模型参数校准与精度验证方法

通过工程实测数据与 Midas 有限元数值模拟双向校准模型参数，设定模型计算误差阈值≤ 5%。以实例 30m 简支 T 梁桥为校准载体，分别提取 5 级加载工况下挠度、应变实测值、模型计算值、数值模拟值，数据对比结果如表 3 所示，所有工况计算误差均控制在 5% 以内，模型精度满足工程规范要求。

表 3 不同加载工况下模型计算精度对比结果

加载等级	实测挠度（mm）	模型计算挠度（mm）	有限元模拟挠度（mm）	模型计算误差（%）
20% 加载	2.12	2.08	2.10	1.89
40% 加载	4.35	4.26	4.31	2.07
60% 加载	6.58	6.42	6.51	2.43
80% 加载	8.72	8.51	8.65	2.41
100% 加载	10.95	10.62	10.81	3.01

同时通过多座不同病害等级桥梁校验模型稳定性，优化模型换算系数，形成标准化参数取值体系，保障模型在各类工程场景下的精准应用[4]。

结束语：本文结合山西地区实体桥梁工程实例，完成了既有桥梁传统荷载试验的缺陷梳理与全套量化优化，形成了适配现役病害桥梁的精细化、可量化试验方法。通过引入刚度、强度双损伤因子，推导荷载等效换算、承载力修正核心公式，搭建了兼顾精度与实用性的荷载等效评估模型，配套完善的试验数据量化表格，解决了传统试验工况冗余、评定偏差大、无量化支撑、现场实施困难等实际问题。工程实测表明，相较于传统方法评定精度显著提升，优化方案安全、高效、适用性强，可为公路既有桥梁承载能力检测评定、运维决策提供可靠的量化技术参考。

参考文献

[1] 褚福鹏. 既有钢箱梁桥荷载试验及承载能力检测评定研究 [J]. 福建建材,2026,(6):26-28+75.

[2] 段润泽. 移动荷载下桥梁承载能力评定与传感器布设优化 [J]. 交通世界,2026,(18):148-151.

[3] 史林国. 既有桥梁荷载承载能力评估及加固方案优化设计 [J]. 中文科技期刊数据库（引文版）工程技术,2026,(2):181-184.

[4] 李亮. 基于荷载试验对某既有城市桥梁的承载能力评定 [J]. 工程与建设,2022,36(5):1404-1407.