

公路桥梁荷载试验与承载力评估技术

傅毕鑫 董杭龙

嘉兴市卓越交通建设检测有限公司 浙江 嘉兴 314000

摘要：公路桥梁作为交通基础设施的关键组成部分，其安全性和可靠性直接关系到交通运输的顺畅与人民生命财产安全。荷载试验与承载力评估技术是准确掌握桥梁实际工作状态、科学判断其承载能力的重要手段。本文深入探讨了公路桥梁荷载试验的原理、类型、实施流程，以及承载力评估技术的方法、指标和实际应用，分析了当前技术中存在的问题与挑战，并提出了相应的改进措施和发展方向，旨在为公路桥梁的科学养护与管理提供理论支持和技术参考。

关键词：公路桥梁；荷载试验；承载力评估技术

1 引言

随着我国交通事业的蓬勃发展，公路桥梁建设规模不断扩大，大量既有桥梁在长期运营过程中面临着车辆荷载增加、环境侵蚀、材料老化等多重因素的影响，桥梁结构性能逐渐发生变化。为确保桥梁结构的安全使用，及时准确地了解桥梁的实际承载能力，荷载试验与承载力评估技术应运而生并得到了广泛应用。通过荷载试验可以获取桥梁结构在荷载作用下的真实响应数据，承载力评估则依据这些数据以及桥梁的设计资料、检测信息等，综合判断桥梁的承载能力是否满足现行规范和实际运营要求，为桥梁的维修加固、改造决策提供科学依据。因此，深入研究公路桥梁荷载试验与承载力评估技术具有重要的现实意义。

2 公路桥梁荷载试验

2.1 荷载试验的概述

公路桥梁荷载试验是验证桥梁结构性能、保障其安全可靠服役的关键技术手段，通过模拟实际或特定荷载工况，精准测量桥梁关键部位在荷载作用下的力学响应（如应变、挠度、裂缝发展等），并与理论计算值对比分析，从而评估桥梁实际承载能力与结构状态。试验中，应变测量是核心环节之一，常用电阻应变片法，依据 $\varepsilon = \frac{\Delta R / R}{K}$ （ ε 为应变， ΔR 为电阻变化量， R 为初始电阻， K 为应变片灵敏系数）换算得到结构应变值。同时，通过在跨中、支座等关键截面布设位移传感器，可测得结构在荷载下的竖向挠度 f ，与理论计算挠度 f_{th} （如简支梁在集中荷载 P 作用下跨中挠度 $f_{th} = \frac{PL^3}{48EI}$ ， L 为跨径， E 为弹性模量， I 为截面惯性矩）对比，判断结构刚度是否满足要求。此外，结合裂缝宽度仪监测裂缝发展情况，综合判定桥梁结构在荷载作用下的安全性和耐久性，为桥梁运营维护、加固改造提供科学依据。

2.2 荷载试验的实施流程

2.2.1 试验准备阶段

收集桥梁的设计图纸、施工记录、竣工资料、养护历史等相关资料，对桥梁的外观状况、结构形式、材料性能等进行详细调查，为制定合理的试验方案提供依据。根据桥梁的结构特点、试验目的以及现场条件，确定试验荷载的大小、加载位置、加载方式以及测点布置方案^[1]。试验荷载应能够模拟桥梁在实际运营过程中可能遇到的最不利荷载组合，测点布置应能够全面反映桥梁结构在荷载作用下的响应情况。选择合适的测试仪器和设备，如位移计、应变计、加速度计、数据采集系统等，并进行安装调试和校准，确保仪器设备的精度和可靠性满足试验要求。对试验现场进行清理和布置，设置安全警示标志，确保试验过程中人员和设备的安全。同时，对加载车辆进行称重和配重，使其满足试验荷载的要求。

2.2.2 试验实施阶段

按照预定的试验方案，分级施加荷载，每级荷载施加后，待结构响应稳定后再进行数据采集。加载过程中应密切观察桥梁结构的变形、裂缝发展等情况，如发现异常现象应立即停止加载，并分析原因。在各级荷载作用下，准确采集各测点的位移、应变、振动等数据，并做好详细记录。同时，记录试验过程中的环境条件，如温度、风速等，以便对试验数据进行修正和分析。

2.2.3 试验结果分析与处理阶段

对采集到的试验数据进行整理，剔除异常数据，并根据环境条件等因素对数据进行修正，以消除外界因素对试验结果的影响。将试验实测数据与理论计算结果进行对比分析，评估桥梁结构的实际受力状态和工作性能。通过对比分析，可以发现桥梁结构存在的薄弱环节以及与设计假设的差异。

3 公路桥梁承载力评估技术

3.1 承载力评估的方法

3.1.1 基于外观调查的评估方法

外观调查法是通过目视检查、仪器检测等手段，对桥梁的外观状况进行全面检查，包括混凝土裂缝、剥落、钢筋锈蚀、钢结构锈蚀、变形，支座病害等，根据病害的类型、程度和分布情况，结合相关规范和经验，对桥梁的承载能力进行初步评估。该方法简单直观，但主观性较强，评估结果较为粗略，通常作为承载力评估的初步手段。

3.1.2 基于结构检算的评估方法

结构检算法是根据桥梁的设计图纸、材料性能检测结果等资料，建立桥梁结构的计算模型，运用结构力学和有限元分析方法，对桥梁在不同荷载作用下的内力、变形等进行计算分析，将计算结果与现行规范规定的容许值进行比较，从而评估桥梁的承载能力^[2]。该方法能够较为准确地反映桥梁结构的受力状态，但计算结果的准确性依赖于计算模型的合理性和材料性能参数的准确性。

3.1.3 基于荷载试验的评估方法

荷载试验法是通过实际荷载试验获取桥梁结构在荷载作用下的真实响应数据，结合理论分析和经验判断，对桥梁的承载能力进行评估。该方法能够直接反映桥梁结构的实际工作性能，评估结果较为可靠，但荷载试验成本较高、实施难度较大，通常用于对重要桥梁或承载能力存在严重疑问的桥梁进行精确评估。

3.1.4 基于可靠度理论的评估方法

可靠度理论评估方法考虑了桥梁结构在各种不确定性因素（如荷载效应的不确定性、材料性能的不确定性、计算模型的不确定性等）影响下的可靠性，通过建立结构的极限状态方程，计算结构的可靠指标或失效概率，从而评估桥梁的承载能力。该方法能够定量地描述桥梁结构的安全程度，但需要大量的统计数据 and 复杂的计算分析。

3.2 承载力评估的指标

表1 公路桥梁承载力评估的主要指标

评估指标	核心内容与作用	评估方式要点
强度指标	衡量结构承载能力（混凝土抗压/抗拉强度、钢材屈服/抗拉强度）	材料性能检测对比设计强度值
刚度指标	反映荷载下结构变形能力（挠度/转角参数）	荷载试验获取变形数据，对比设计允许值
稳定性指标	评估结构保持平衡状态能力（重点大跨径/细长构件）	结构分析计算，验证整体/局部稳定性
耐久性指标	衡量长期抗环境侵蚀与材料老化能力	综合碳化深度、氯离子、锈蚀率、涂层状况，预测剩余寿命

4 改进措施与发展方向

4.1 荷载试验技术的改进措施

4.1.1 优化试验荷载确定方法

加强对桥梁实际运营车辆荷载的监测和统计分析，建立更加完善的车辆荷载模型。可以利用先进的交通监测设备，如地磅、车辆识别系统等，对桥梁上的车辆类型、重量、行驶速度、车间距等信息进行实时监测和记录。通过对大量监测数据的统计分析，建立符合实际情况的车辆荷载概率分布模型，为试验荷载的确定提供科学依据。同时，针对不同结构形式的桥梁，制定相应的试验荷载标准和规范。对于特殊结构形式的桥梁，可以开展专题研究，通过理论分析、数值模拟和现场试验等方法，确定合理的试验荷载大小和布置方式。在制定标准和规范时，要充分考虑桥梁的设计特点、使用功能和安全要求，确保试验荷载能够准确地模拟最不利荷载组合。

4.1.2 提高试验数据质量

采用先进的测试仪器设备和技术手段，提高测试数据的精度和可靠性。例如，采用高精度的光纤光栅传感器、激光位移传感器等，这些传感器具有灵敏度高、抗

干扰能力强、测量精度高等优点，能够更准确地测量桥梁结构的变形和应变^[3]。同时，利用温度补偿技术、滤波技术等消除环境因素和噪声干扰对试验数据的影响。温度补偿技术可以通过在结构上布置温度传感器，实时监测温度变化，并根据温度与结构响应之间的关系对测量数据进行修正；滤波技术可以去除测量信号中的高频噪声，提高信号的质量。

4.1.3 加强试验安全管理

制定严格的试验安全管理制度和操作规程，加强试验现场的安全管理。在试验前对桥梁结构进行全面的评估，采用无损检测、结构计算等方法，对桥梁的结构性能和承载能力进行详细分析，确保桥梁在试验荷载作用下不会发生安全事故。同时，配备必要的安全防护设备和应急救援措施，如安全帽、安全带、灭火器、急救箱等，保障试验人员和设备的安全。在试验过程中，要设置明显的安全警示标志，安排专人负责现场安全监督，及时制止违规行为。对于可能存在安全风险的试验环节，要制定详细的应急预案，明确应急处置流程和责任分工，确保在发生安全事故时能够迅速、有效地进行

救援和处理。

4.2 承载力评估技术的发展方向

4.2.1 综合评估方法的研发

将多种承载力评估方法有机结合,发挥各自的优势,建立更加科学合理的综合评估模型。例如,将基于外观调查的评估结果作为初步判断依据,通过外观调查可以快速了解桥梁的病害情况,为后续的评估工作提供线索;结合结构检算,对桥梁的承载能力进行初步评估,结构检算可以提供桥梁结构的理论受力信息;再利用荷载试验获取桥梁结构的实际响应数据,对前面的评估结果进行验证和修正;最后运用可靠度理论分析,综合考虑各种不确定性因素的影响,对桥梁的承载能力进行最终评估。通过综合评估,可以充分考虑各种因素的影响,提高评估结果的可靠性。在综合评估过程中,需要建立合理的评估指标体系和权重分配方法,对不同评估方法的结果进行加权综合。同时,要加强对各种评估方法之间相关性的研究,避免重复计算和评估结果的偏差。

4.2.2 完善评估指标体系

进一步完善桥梁承载力评估指标体系,综合考虑桥梁的强度、刚度、稳定性、耐久性、适用性等多个方面的指标。对于耐久性指标,可以增加混凝土碳化深度、氯离子含量、钢筋锈蚀速率等量化指标;对于适用性指标,可以增加行车舒适性指标(如桥梁的振动加速度、挠度变化等)、排水畅通性指标等。同时,研究不同评估指标之间的关联性和权重确定方法,建立科学合理的综合评估指标体系。可以采用层次分析法、模糊综合评价法等方法来确定各评估指标的权重。层次分析法通过将评估指标分解为多个层次,构建判断矩阵,计算各指标的权重;模糊综合评价法通过引入模糊数学理论,对评估指标进行模糊量化处理,综合考虑各指标的模糊信息,确定桥梁的承载能力等级。

4.2.3 加强评估结果不确定性分析

运用概率统计、模糊数学等方法,对承载力评估结果的不确定性进行分析和量化。通过建立评估结果的不确定性模型,考虑各种不确定性因素对评估结果的影响。例如,对于荷载效应的不确定性,可以采用概率分布模型来描述;对于材料性能的不确定性,可以根据材料性能的检测数据建立概率分布或模糊集合。在评估过程中,采用蒙特卡洛模拟、区间分析等方法对评估结果进行不确定性分析。蒙特卡洛模拟通过大量随机抽样,模拟各种不确定性因素的组合情况,计算评估结果的概率分布;区间分析通过确定各不确定性因素的取值区间,计算评估结果的取值范围。通过不确定性分析,可

以为桥梁管理决策提供更加科学准确的风险评估和决策依据,使决策者能够更好地了解桥梁承载能力的可靠程度和潜在风险。

4.2.4 推动智能化评估技术的发展

随着人工智能、大数据、物联网等技术的快速发展,将这些先进技术应用于公路桥梁承载力评估领域,推动评估技术的智能化发展。例如,利用传感器技术实时监测桥梁结构的运行状态,在桥梁的关键部位布置各种类型的传感器,如应变传感器、位移传感器、加速度传感器、温度传感器等,实时采集桥梁结构的变形、应变、振动、温度等信息。通过大数据分析技术对监测数据进行挖掘和分析,利用数据挖掘算法对海量的监测数据进行处理,提取有价值的信息和特征,发现桥梁结构性能的变化趋势和潜在问题^[4]。利用人工智能算法建立桥梁承载力评估模型,如神经网络模型、支持向量机模型等,这些模型可以通过学习大量的历史数据和案例,自动调整模型参数,提高评估的准确性和效率。实现桥梁承载能力的实时评估和预警,通过建立桥梁结构健康监测系统,将传感器采集的数据实时传输到数据中心,利用智能化评估模型对数据进行实时分析和处理,及时评估桥梁的承载能力。当评估结果显示桥梁的承载能力存在异常或潜在风险时,系统能够自动发出预警信息,通知相关部门及时采取措施进行处理,提高桥梁管理的效率和科学性。

结语

公路桥梁荷载试验与承载力评估是保障其安全运营的关键技术。荷载试验能获取桥梁实际响应数据,承载力评估则据此科学判定其承载能力。当前,该技术在荷载试验精准度、评估方法完备性等方面仍有不足。但随着技术革新,通过优化试验荷载确定、提升数据质量、强化安全管理,以及研发综合评估法、完善指标体系、推进智能化评估等举措,技术将不断完善。这将为桥梁科学养护管理提供有力支撑,保障其安全运行,助力交通事业发展。未来需加强多学科融合,探索新理论方法,推动技术再上新台阶。

参考文献

- [1]陈威.公路桥梁检测中荷载试验的应用[J].运输经理世界,2024,(12):109-111.
- [2]蹇钢.公路桥梁荷载试验过程控制要点分析[J].运输经理世界,2023,(16):121-123.
- [3]王琪.高速公路桥梁工程荷载试验检测技术及实施要点[J].汽车画刊,2024,(09):152-154.
- [4]李从财,刘焱.荷载试验在公路桥梁检测中的应用[J].交通世界,2021,(32):138-139.