

桥梁荷载试验方法及数据分析

李明达

中交中南工程局有限公司 湖南 长沙 410004

摘要：本文聚焦桥梁荷载试验方法及数据分析。理论基础涵盖结构力学等多学科理论，按不同维度分类介绍试验类型。详细阐述静态、动态荷载试验方法与实施要点，以及不同桥型的试验差异化要点。还介绍了数据采集系统构建、预处理技术和多源数据融合技术。最后从技术升级和标准完善两方面提出桥梁荷载试验的优化方向，旨在为桥梁结构性能评估提供科学、全面的方法与依据。

关键词：桥梁荷载试验；静载试验；动载试验

1 桥梁荷载试验的理论基础与技术标准

1.1 荷载试验的核心理论

桥梁荷载试验的核心理论以结构力学、材料力学为基础，结合弹性力学、塑性力学等学科理论形成完整体系。结构承载能力理论是核心之一，通过分析桥梁在荷载作用下的内力分布、变形特征，判断结构是否满足设计承载要求，其本质是验证结构实际受力状态与理论计算模型的一致性。变形协调理论指导试验过程中位移、应变等参数的监测，确保结构各部分变形符合力学规律，避免局部应力集中导致结构损伤^[1]。时效理论则考虑材料蠕变、结构老化等时间因素对试验结果的影响，特别是对于运营多年的桥梁，需通过长期观测数据修正短期试验结论。概率统计理论用于试验数据的分析处理，通过对多次测量数据的统计分析，剔除偶然误差，提高试验结果的可靠性，为桥梁结构性能评估提供科学依据。这些理论相互支撑，构成荷载试验的核心理论框架，确保试验过程的科学性和试验结论的准确性。

1.2 荷载试验的分类

桥梁荷载试验可按试验目的、荷载性质、试验对象等维度进行分类。按试验目的划分，可分为鉴定性试验和研究性试验。鉴定性试验主要用于新建桥梁竣工验收、既有桥梁承载力评定、加固改造后效果验证，通过试验判断桥梁是否满足使用要求，为桥梁通车、运营维护提供依据。研究性试验则聚焦桥梁结构受力机理、新材料应用效果、新型结构体系性能等科研问题，通过系统性试验获取数据，为桥梁设计理论优化、技术创新提供支撑。按荷载性质分类，分为静态荷载试验和动态荷载试验。静态荷载试验通过施加恒定荷载，观测结构静态响应，分析结构内力、变形等参数，直接反映结构承载能力。动态荷载试验通过施加动荷载，监测结构动力特性，如自振频率、阻尼比、振型等，评估结构抗冲

击、抗疲劳性能。按试验对象不同，还可分为梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥等专项荷载试验，针对不同桥型结构特点制定专属试验方案。

2 桥梁荷载试验的方法体系与实施要点

2.1 静态荷载试验方法与实施

静态荷载试验是评估桥梁结构承载能力的重要手段，采用分级加载、分级卸载的科学方法。试验时，通过施加与设计荷载等效的静态荷载，精准监测结构关键截面（如应变、位移、裂缝等）的响应参数。试验前，需精心完成加载方案设计，依据桥梁设计图纸明确控制截面，像梁桥的跨中、支座截面，拱桥的拱顶、拱脚截面等。结合结构计算，精确确定各级加载重量和加载位置，确保加载过程安全可控。加载设备一般选用砝码、水箱或千斤顶，加载时严格遵循“对称加载、均匀递增”原则^[2]。每级加载后，保持荷载稳定，待监测数据稳定后再记录读数。加载至最大试验荷载后，需持荷一段时间，仔细观察结构是否出现塑性变形。卸载过程同样要分级进行，同时监测结构回弹性能，以此判断结构弹性恢复能力。在实施过程中，安排专人密切监测结构裂缝发展，使用裂缝宽度仪定期测量裂缝宽度和长度。一旦出现裂缝急剧扩展、位移异常增大等情况，立即停止加载并卸载。试验结束后，认真整理监测数据，与理论计算值对比，深入分析结构承载能力是否满足要求，为桥梁的安全使用提供可靠依据。

2.2 动态荷载试验方法与实施

动态荷载试验旨在通过激发桥梁结构产生动力响应，全面监测并深入分析结构动力特性和动力响应参数，以此评估结构动力性能。试验方法丰富多样，主要包括脉动试验、跑车试验、制动试验和跳车试验。脉动试验巧妙利用环境随机振动，如风力、车辆通行振动等，无需额外施加荷载。通过传感器精准采集结构振动

信号，进而分析得到结构自振频率、阻尼比和振型等固有动力特性。该方法操作简便、对结构无损伤，非常适用于常规动力性能评估。跑车试验让试验车辆以不同速度在桥梁上行驶，监测结构在移动荷载作用下的动应变、动位移和振动加速度，深入分析动力放大系数等参数，从而反映结构抗冲击性能。制动试验模拟突发制动产生的水平荷载，让行驶中的试验车辆在指定位置紧急制动，监测结构在冲击荷载下的动力响应。跳车试验通过让车辆在预设高度的垫块上跳离，对桥梁产生瞬时冲击荷载，检验结构抗突发冲击能力。实施时，要合理布置传感器，确保覆盖关键截面和振动敏感部位，同步记录车辆行驶状态和结构响应数据。试验后，借助动力分析软件处理数据，准确评估结构动力稳定性和疲劳性能。

2.3 不同桥型的荷载试验差异化要点

不同桥型因结构形式、受力特点存在显著差异，荷载试验需突出差异化要点。梁桥以受弯为主，试验重点聚焦于跨中、支座等控制截面的弯曲应变和竖向位移。对于简支梁桥，要格外关注跨中最大正弯矩截面；连续梁桥则还需监测支座处负弯矩截面。加载时，采用对称布置荷载的方式，避免产生附加扭矩，确保试验结果准确反映结构真实受力情况。拱桥以受压为主，同时兼顾受弯，试验核心在于拱顶、拱脚等截面的压力、竖向位移和水平位移。加载时，需严格控制拱脚水平推力，必要时设置抗推装置。密切监测拱肋稳定性，防止失稳破坏，保障试验安全进行。斜拉桥属于高次超静定结构，受力复杂。试验需同步监测主梁、塔柱、斜拉索的受力状态。主梁重点监测跨中、梁端截面应变和位移；塔柱监测顺桥向和横桥向应变；斜拉索通过张力传感器监测索力变化。加载时，充分考虑斜拉索张力重分布对结构的影响，确保试验数据可靠。悬索桥以主缆承重为主，试验重点监测主缆拉力、加劲梁应变、塔柱位移和吊索张力。加载过程中，需实时调整主缆垂度，确保结构受力均衡。同时，高度关注加劲梁的颤振和涡振性能，评估抗风稳定性，为悬索桥的安全运营提供有力保障。

3 桥梁荷载试验数据的采集与预处理技术

3.1 数据采集系统的构建

数据采集系统的构建需遵循全面性、准确性、可靠性原则，由传感器、数据采集仪、传输设备和分析软件组成。传感器选型需匹配监测参数，应变监测选用电阻应变片或光纤光栅应变传感器，电阻应变片成本低、适用性强，光纤光栅传感器抗干扰能力强、适用于长期监测；位移监测选用百分表、位移计或GPS定位系统，百分表精度高，适用于静态位移监测，GPS适用于大跨度

桥梁动态位移监测；振动监测选用加速度传感器，根据桥梁自振频率范围选择合适量程和灵敏度的传感器。数据采集仪需具备多通道同步采集功能，确保不同位置、不同参数的监测数据时间同步，采样频率需满足Nyquist定理，避免数据失真^[3]。传输设备采用有线或无线传输方式，有线传输稳定性高，适用于短距离试验，无线传输灵活性强，适用于大跨度或复杂地形桥梁。分析软件需具备数据实时显示、存储和初步分析功能，支持应变、位移、振动等数据的同步处理，系统构建完成后需进行校准调试，通过标准荷载试验验证传感器精度和系统稳定性，确保采集数据准确可靠。

3.2 试验数据的预处理方法

试验数据预处理是剔除干扰信号、提高数据质量的关键环节，主要包括数据清理、平滑处理、滤波处理和异常值剔除。数据清理首先对采集数据进行完整性检查，补全缺失数据，对于因设备故障导致的连续缺失数据，采用插值法或替换法补全，确保数据连续性。平滑处理用于消除数据中的随机噪声，常用移动平均法和加权平均法，移动平均法通过计算一定窗口内数据的平均值平滑曲线，加权平均法对近期数据赋予较高权重，提高平滑后数据的时效性。滤波处理用于剔除特定频率的干扰信号，静态试验数据采用低通滤波剔除高频噪声，动态试验数据根据结构自振频率范围，采用带通滤波保留有效信号，过滤环境干扰产生的无关频率信号。异常值剔除通过统计分析识别异常数据，采用 3σ 准则，将超出均值 ± 3 倍标准差的数据判定为异常值，结合试验记录判断异常原因，若为设备误差或偶然干扰导致，采用相邻数据插值替换，若为结构响应异常，需保留数据并结合试验现象分析。预处理后的数据需进行一致性检验，确保与结构受力规律相符。

3.3 多源数据的融合技术

多源数据融合技术通过整合不同传感器、不同试验阶段获取的多类型数据，实现对桥梁结构性能的全面评估，核心是挖掘数据间的关联关系，提升评估精度。数据融合分为数据层、特征层和决策层三个层次。数据层融合在原始数据层面进行整合，对同一监测参数的不同传感器数据进行加权融合，根据传感器精度确定权重，提高参数测量精度，如将电阻应变片和光纤光栅传感器的应变数据融合，降低单一传感器误差影响。特征层融合提取各类型数据的特征参数，如静态数据的最大应变、最大位移，动态数据的自振频率、动力放大系数，通过主成分分析、因子分析等方法降维，提取反映结构性能的关键特征。决策层融合基于特征层提取的关键特

征，采用模糊综合评价、神经网络等方法，结合静态和动态试验结果，对桥梁承载能力、动力性能等进行综合评估。融合过程中需建立数据关联模型，处理不同数据的时间、空间同步问题，通过卡尔曼滤波等算法实现动态数据的实时融合，确保融合结果能够全面、准确反映桥梁结构实际性能。

4 桥梁荷载试验的优化方向

4.1 技术升级

桥梁荷载试验技术升级正坚定不移地朝着智能化、高效化、精细化方向大步迈进，通过积极引入并应用各类新技术，全方位提升试验水平。在智能化监测领域，应用场景愈发广泛。无人机凭借其灵活的飞行能力，搭载高清摄像头与高精度传感器，能够轻松抵达桥梁上部结构、桥墩等人工难以触及的部位，实现可视化监测与数据采集。这不仅大幅减少了人工攀爬、检查带来的安全风险，还能获取更为全面、细致的桥梁信息。机器人则在桥梁底部、支座等隐蔽部位的巡检中发挥着关键作用，结合先进的AI图像识别技术，可自动精准识别裂缝、锈蚀等病害，极大地提高了缺陷检测的精度与效率。无线传感网络技术为多节点同步监测提供了有力支持，传感器节点无需繁琐布线，能够灵活布置于桥梁关键部位，借助物联网技术实现数据的实时传输与远程监控。这一技术尤其适用于大跨度桥梁和需要长期监测的场景，可及时捕捉桥梁结构的细微变化。数值模拟与试验结合技术不断升级，利用有限元软件建立精细化的桥梁模型，提前对荷载试验过程进行模拟，优化加载方案和传感器布置位置。试验结束后，将实测数据与模拟结果进行对比分析，修正模型参数，从而更精准地评估结构性能。另外，便携式试验设备的研发也取得了显著进展，小型化、高精度的应变仪、位移计等设备，有效降低试验设备的运输和安装成本，提高试验效率，能够更好地适应复杂场地条件下的荷载试验需求。

4.2 标准完善

桥梁荷载试验标准的完善工作必须紧密结合工程实践和技术发展的实际需求，着力填补现有标准的空白之处，切实提高标准的科学性与适用性。针对新型桥型，诸如组合结构桥梁、波形钢腹板桥梁等，当前现有标准

缺乏具有针对性的试验要求。为此，需要制定专项试验标准，明确这类桥型在控制截面选取、加载方案设计、监测参数设置等关键环节的具体内容，确保试验方法能够与结构的受力特点精准匹配，从而为新型桥型的质量评估提供可靠依据^[4]。对于既有桥梁，其荷载试验标准需进一步强化对老化结构的考量，补充材料性能衰减评估方法。结合桥梁的服役年限、环境腐蚀程度等多方面因素，制定差异化的试验荷载等级和评估指标，避免因标准滞后而导致评估结果不准确，保障既有桥梁的安全运营。标准体系还应完善数据处理规范，统一数据预处理方法、异常值判定标准和试验结果评价指标，有效解决不同实验室、不同试验人员处理数据时存在的差异问题，提高试验结果的可比性。建立标准动态更新机制至关重要。要密切跟踪新技术、新材料的应用情况，及时将无人机监测、无线传感网络等新技术纳入标准范畴。同时，积极借鉴国际先进标准经验，结合国内工程实际对标准内容进行优化，形成覆盖桥梁设计、施工、运营全生命周期的荷载试验标准体系，为桥梁工程的高质量发展提供坚实的标准支撑。

结束语

桥梁荷载试验是保障桥梁安全运营的关键环节。通过科学的试验方法、精准的数据采集与处理，以及对不同桥型的针对性试验，能全面评估桥梁结构性能。未来，随着技术不断升级和标准持续完善，桥梁荷载试验将更加智能化、高效化和精细化。这将为桥梁的设计、施工、运营提供更有力的支持，确保桥梁在复杂环境下长期安全稳定运行，推动桥梁工程事业迈向新高度。

参考文献

- [1] 张浩,毛永刚.双塔双索面斜拉桥荷载试验方法研究[J].运输经理世界, 2025(15): 83-85.
- [2] 李海波.桥梁动力测试中的模态参数识别方法研究[J].公路交通科技, 2020, 37(5):56-62.
- [3] 于哲.基于动力荷载试验的多跨连续T梁桥的受力性能研究[J].建筑机械,2024(6):244-249.
- [4] 林一涵.空腹式拱桥荷载试验及分析[J].江西建材,2023(4):80-82,85.