



T/CECS ***-2023

中国工程建设标准化协会标准

桥梁结构运营模态测试与辨识技术规程

Technical specification on testing and identification of operational modal
parameters of bridge structures

(征求意见稿)

中国建筑工业出版社

中国工程建设标准化协会标准

桥梁结构运营模态测试与辨识技术规程

Technical specification on testing and identification of operational modal
parameters of bridge structures

T/CECS XXX - 2023

主编单位：

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2023 年 X 月 X 日

中国建筑工业出版社

2023 北 京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《2022 年第一批协会标准制订、修订计划》（建标协字〔2022〕13 号）的要求，编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国际标准和国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分为 6 章和 4 个附录，主要技术内容包括：总则、术语、基本规定、振动响应测试、模态参数辨识、报告编制和资料归档。

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

本规程由中国工程建设标准化协会建筑振动专业委员会归口管理，由大连理工大学负责具体技术内容的解释。本规程在使用过程中如有需要修改或补充之处，请将有关资料和建议寄送解释单位（地址：辽宁省大连市凌工路 2 号，大连理工大学土木工程学院，邮政编码：116023），以供修订时参考。

主编单位：

参编单位：

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1 总 则	1
2 术 语	2
3 基本规定	4
4 振动响应测试	6
4.1 一般规定.....	6
4.2 测试方案制定.....	6
4.3 测试工作准备.....	9
4.4 现场测试实施.....	11
5 模态参数辨识	13
5.1 一般规定.....	13
5.2 数据预处理.....	13
5.3 工作模态参数识别.....	15
5.4 实验模态参数识别.....	17
5.5 结果展示.....	18
6 报告编制和资料归档	20
6.1 一般规定.....	20
6.2 报告编制.....	20
6.3 资料归档.....	21
附录 A 测点优化准则	22
附录 B 硬件设备技术要求	28
附录 C 常用模态参数识别方法	30
附录 D 报告格式	40
本标准用词说明	42
引用标准名录	43
附：条文说明	错误!未定义书签。

Contents

1 General provisions

2 Terms

3 Basic requirements

4 Vibration response test

4.1 General requirements

4.2 Test plan formulation

4.3 Test preparations

4.4 Field test implementation

5 Modal parameter identification

5.1 General provisions

5.2 Data preprocessing

5.3 Operational modal parameter identification

5.4 Experimental modal parameter identification

5.5 Presentation of results

6 Report preparation and data archiving

6.1 General provisions

6.2 Report preparation

6.3 Data archiving

Appendix A Measurement point optimization criteria

Appendix B Technical requirements for hardware equipment

Appendix C Common modal parameter identification methods

Appendix D Report format

Explanation of wording in this specification

List of reference standards

Explanation of provisions

1 总 则

1.0.1 为规范桥梁结构模态参数的测试与辨识工作，做到程序得当、技术先进、方法合理、结果可靠，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于公路桥梁和市政桥梁的结构模态参数测试与辨识。

1.0.3 桥梁结构模态参数的测试与辨识工作除应符合本规程规定外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 桥梁 bridge

是连续道路中断空间，跨越道路受阻障碍，传递交通流的道路工程结构物。

2.0.2 结构模态参数 structural modal parameters

结构模态参数是描述结构固有振动特性的参数，包括固有频率、振型、阻尼比、模态质量。

2.0.3 人工激励 artificial excitation

对结构施加有计划的力，包括使用机械设备（如激振器或冲击锤）对结构施加控制力，使用爆炸装置产生冲击波，人体跳跃作用力等。

2.0.4 自然环境激励 ambient excitation

结构在自然环境中受到的外部力和环境影响，如风、雨、雪、温度变化、大地脉动、海浪等。

2.0.5 模态参数辨识 modal identification

通过采集激励与结构的振动响应信号，或仅采集振动响应信号，分析获取结构的模态参数，并减小噪声、计算误差、分析方法假定等因素对分析结果的影响，分辨出结构真实模态参数的过程。

2.0.6 工作模态参数识别 operational modal identification

在结构工作状态下，利用采集到的振动响应信号，提取结构的固有频率、振型、阻尼比等模态参数的过程。

2.0.7 实验模态参数识别 experimental modal identification

利用结构的激励和振动响应信号，提取结构的固有频率、振型、阻尼比、模态质量的模态参数的过程。

2.0.8 频率 frequency

单位时间内完成周期性振动的次数。

2.0.9 振型 mode shape

结构在某固有频率下振动时所呈现具有规律的形态，即不同位置的相对位移和相位差。

2.0.10 阻尼比 damping ratio

结构阻尼系数与临界阻尼系数之比。

2.0.11 模态质量 modal mass

结构每阶模态对应的质量大小，即结构某阶模态的广义质量。

2.0.12 频响函数 frequency response function

响应信号的傅里叶变换与激励信号的傅里叶变换之比。

2.0.13 相干函数 coherence function

激励和响应信号之间互功率谱的平方与激励信号自功率谱和响应信号自功率谱的乘积之比。

3 基本规定

3.0.1 新建、加固和改建桥梁宜通过结构模态参数测试与辨识来掌握桥梁的动力特性。

3.0.2 桥梁结构模态参数测试工作应遵循作业人员安全、交通安全、仪器设备安全、用电和消防安全的原则。

3.0.3 桥梁结构模态参数测试工作不得对桥梁造成结构性损伤。

3.0.4 桥梁结构模态参数测试与辨识的工作内容应包括振动响应测试、模态参数辨识、报告编制和资料归档。

3.0.5 桥梁结构模态参数测试与辨识工作宜进行下列资料搜集：

- 1 桥址区的地质、水文、环境和影响测试的干扰振源资料；
- 2 桥梁设计、施工、监理、施工监控、竣工、养护、检测、监测、维修、加固和改造资料。

3.0.6 桥梁结构模态参数测试的桥跨选取应符合下列规定：

- 1 采用新结构形式或新材料的桥梁应逐跨或逐联地进行测试；
- 2 多联（孔）桥梁应选择受力不利、缺陷较多或病害较严重的桥跨进行测试。

3.0.7 桥梁结构模态参数辨识工作应进行频率识别；当桥梁跨径符合下列规定时，尚应进行振型和阻尼比识别：

- 1 单跨跨径超过 80 m 的梁桥；
- 2 单跨跨径超过 60 m 的拱桥、斜拉桥和悬索桥。

3.0.8 桥梁结构模态参数辨识的阶次宜符合表 3.0.8 的规定；当辨识结果无法满足要求时，宜及时进行振动响应补充测试。

表 3.0.8 桥梁结构模态参数辨识推荐阶次

桥型	简支梁桥	非简支的梁桥、拱桥	斜拉桥、悬索桥
阶次	1 阶	3 阶	9 阶

4 振动响应测试

4.1 一般规定

4.1.1 振动响应测试工作应符合下列规定：

1 测试对象应为桥梁部件，所有桥型均应对主梁进行测试，对于拱桥还宜对主拱进行测试，对于斜拉桥和悬索桥还宜对主塔进行测试。

2 测试参数应为桥梁部件的加速度、速度、动位移或动应变，所有桥型均应进行竖向振动响应测试，对于大跨跨径桥梁还宜进行横向和扭转振动响应测试。

3 测试结果应能为桥梁结构模态参数辨识提供满足分析要求的数据。

4.1.2 振动响应测试工作应包括测试方案制定、测试工作准备和现场测试实施：

1 测试方案制定宜包括有限元建模和分析，测点位置确定，激振方式确定，激振工况制定，数据采集、传输和存储方式选择，供电方式选择，交通管制措施制定和通告；

2 测试工作准备宜包括实验室工作准备和现场工作准备；

3 现场测试实施宜包括预测试、正式测试、测试数据检查和初步分析、测试现场清理。

4.2 测试方案制定

4.2.1 有限元建模和分析应符合下列规定：

1 建模时应综合考虑桥梁结构的质量分布、刚度分布和边界条件；
当有实测结构材料参数和构件截面参数时，宜采用实测参数进行建模；

2 分析内容应包括模态分析和激振工况模拟。

4.2.2 测点位置应按以下原则进行确定：

1 测点位置宜采用测点优化准则进行确定，对于有线测试可选用本规程附录 A.1 中的准则，对于无线测试可选用本规程附录 A.2 中的准则；

2 测点位置应按照竖向、横向和扭转振型分别进行确定；当待测桥梁部件在测试频带内存在扭转振型时，测点应在部件的横断面两侧进行对称布置；确定出的测点位置应避开待测桥梁部件的振型节点；

3 当需要进行多组测试以获取全桥振型时，每个待测桥梁部件不同测量组应保证至少有一个参考点的位置保持不变，参考点宜选择位于各阶待测振型值均较大的位置。

4.2.3 激振方式可按下列方式进行选择：

1 试验模态测试可选择跑车、跳车、激振器的人工激励方式；

2 运营模态测试可选择自然环境激励方式。运营模态测试适用于斜拉桥和悬索桥。

4.2.4 制定激振工况时应满足以下原则：

1 采用有限元分析制定激振工况时，应准确反映实际激振车辆的总重、轴重和轴间距。激振车辆引起待测部件最不利截面荷载效应宜尽量大，但不能超过设计荷载效应；

2 跑车激振和跳车激振可采用同一种车辆；

3 跑车激振试验时，让单辆（或横向两辆并排）激振车以中载或偏载的情形匀速通过桥跨结构。跑车激振宜进行单车道和多车道多种工况激振，且每一种激振工况的车辆宜采用 5~80 km/h 范围内多个均匀分布的车速进行试验，每个车速工况宜进行 2~3 次重复试验；

4 跳车激振试验时，让激振汽车的后轮从指定位置的垫木上突然下落对桥梁产生冲击作用，激起桥梁的振动。

5 起振机宜布置在能使结构产生较大振动效应的位置，应采用正弦、正弦扫描激励、随机激励、脉冲激励使结构产生振动。

4.2.5 数据采集应满足以下原则：

1 可以采集结构振动加速度、速度和位移响应，并根据采集的结构响应类型，确定传感器类型。应根据激振工况有限元模拟结果，确定传感器量程；

2 应根据现场温度、湿度等自然条件，确定传感器的规格和适用条件。传感器类型可选择模拟信号传感器或数字信号传感器；

3 竖向、横向和扭转振型宜同时测量，当不同方向测点重合时，宜采用多向传感器采集数据；

4 多组测量时，每组测量的采样频率应相同；

5 运营模态测试时，宜选择车辆较少、风速较低的时段采集结构响应。环境激励下结构响应单次采集时间不宜小于 30 分钟。

4.2.6 数据传输和存储应满足以下原则：

1 当采用有线测试时，应根据传感器间距，确定采用一个采集仪还是多个采集仪采集数据；

2 当有线测试需要多个采集仪时，采集仪之间要进行时间同步。宜采用 GNSS 或北斗卫星导航时钟同步技术，采集时钟同步误差误差不超过 0.1 ms；

3 采集仪位置应远离电磁干扰源，或采用静电屏蔽设备阻隔干扰源对采集仪的电磁干扰；

4 用放大特性相同的多路放大器和记录特性相同的多路记录仪，同时测记各测点的振动响应信号；

5 当采集仪有存储功能时，采集的数据可以存储在采集仪本地；当采集仪没有存储功能时，数据可以存储在外接电脑上。采集的数据应按测试工况进行统一规则编号。

4.2.7 当桥址有市政供电时，宜采用市政供电。当桥址没有市政供电时，应根据测试设备选择 UPS 供电或者发电机供电。

4.2.8 应根据测试时间，提前联合桥梁管理方向当地交管部门申请交通管制措施，制定并发布交通管制通告。

4.3 测试工作准备

4.3.1 实验室工作准备应符合下列规定：

1 未在有效检定期内的传感器应进行校准，校准方法应符合现行国家标准《振动与冲击传感器的校准方法》GB/T20485 的有关规定；

2 选用激振器进行人工激振时，激振器的校准应符合现行国家标准《机械振动与冲击 机械导纳的试验确定 第 2 部分：用激振器作单点平动激励测量》GB/T11349.2 的有关规定。

4.3.2 现场测试工作准备应符合下列规定：

1 测试系统的安装、调试、保护应符合下列规定：

1) 测试系统的安装应符合下列规定：

- ① 传感器应与被测构件牢固连接，可选用栓接、胶接、焊接、磁吸的安装方式，安装位置误差应小于 0.01 m，灵敏度主轴方向应与测量方向一致；
- ② 通信线缆的连接线路宜选择传感器与采集设备之间最短路径；光缆的弯曲半径应大于缆线外径的 20 倍，光缆拼接时平均拼接损耗不应大于 0.05 dB；屏蔽电缆的弯曲半径应不小于缆线外径的 15 倍，接头应平直无应力。

2) 测试系统的调试应符合下列规定：

- ① 系统通电调试前应进行供电设备电压波动检查，对于 60 V 及以上直流电源的电压波动不得超出±10%，对于 60 V 以下直流电源的电压波动不得超出±5%，对于 220 V 交流电源的电压波动不得超出±5%；
- ② 系统各信道应通过敲击传感器附近构件结合示波进行连通性检查，并应准确记录各信道与传感器物理位置的对应关系；系统各信道宜选用三通道法对噪声水平进行评定，各频率平均噪声水平不宜超过 $10\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ；
- ③ 当存在两个及以上数据采集仪或采用无线传感器时，宜对各信道间的同步性进行检查，同步误差不宜大于 0.1 ms。

3) 测试系统应采取适宜的防振、防水、防风和防晒保护措施。

2 激振设备的准备应符合下列规定：

1) 当选用激振器进行人工激励时，激振器在安装时不得磕碰，安装位置偏差不得大于 5 cm，激振器施力方向与结构表面的垂直度应满足测试要求，激振器工作时不应有异响或异常振动；

2) 当选用车辆进行人工激励时应对车辆进行称重。

3 对于交通标志、施工警告灯、导向标和锥形交通路标的安放应符合交通组织方案的要求。

4.4 现场测试实施

4.4.1 预测试应符合下列规定：

1 对于自然环境激励方式的预测试时长不应少于 15 min，对于人工激励方式应进行不少于 1 个工况的预测试；

2 预测过程中，当桥梁响应超过测试方案的规定时，应对激振参数进行调整。

4.4.2 正式测试应符合下列规定：

1 测试前应确认传感器设置参数、数据参数、测试环境、加载条件符合测试方案的要求；

2 当采用人工激励时，应随时观察桥梁结构的状态，若出现异常应立即暂停测试，待全面检查并确认激励不会对结构造成损伤后方可恢复测试；

3 测试时应由专人进行现场记录，记录内容应包括天气状况、试验荷载参数、传感器规格、灵敏度、编号、连接通道号、适配器、采集仪采样频率、滤波频率、换算系数和各种异常情况。

4.4.3 每个工况测试完成后，应对测试数据进行检查和初步分析，若测试数据存在异常突变、零点严重偏离、电磁干扰异常、噪声过大，应在排除设备故障和干扰后再重新进行测试。

4.4.4 测试现场清理应符合下列规定：

- 1** 传感器、通信线缆和采集设备应进行分类整理和打包；
- 2** 测试过程中产生的垃圾应进行清理干净。

5 模态参数辨识

5.1 一般规定

5.1.1 桥梁结构模态参数辨识工作应包括数据预处理、模态参数识别、结果展示。

5.1.2 工作模态参数识别宜采用加速度响应数据，可采用速度响应数据、动位移响应数据、动应变响应数据；实验模态参数识别应联合采用响应和激励数据。

5.1.3 工作模态参数识别结果应包括频率和振型，宜包括阻尼比；实验模态参数识别结果应包括频率、振型和阻尼比，宜包括模态质量。

5.1.4 桥梁结构模态参数宜采用两种及以上的识别方法，并应对识别出的参数宜进行对照检查。

5.2 数据预处理

5.2.1 数据预处理应舍弃错误数据并将原始数据修复成反映桥梁响应和激励的特征数据，可分为监测数据预处理和现场测试数据预处理。

5.2.2 监测数据预处理应包括响应数据的完整性和准确性处理，以及同步性检查。

1 响应数据的完整性处理应符合下列规定：

1) 对于缺失和常量异常响应数据应采用深度学习法或差分法进行判别，并应将判别出的异常响应数据舍弃；

2) 对于常量加噪声异常响应数据应采用功率谱分析进行判别，若

功率谱中不存在显著峰值，应将异常响应数据舍弃。

2 响应数据的准确性处理应符合以下规定：

1) 对于跳点异常响应数据宜采用阈值法进行检查，并宜采用中值滤波法或均值插补法对异常响应数据进行修复；

2) 对于漂移和偏移响应数据宜采用差分滤波法或去趋势项法进行修复，修复后的响应数据均值宜为零；

3) 对于高频噪声响应数据应采用低通滤波法进行剔除，滤波截止频率不应低于待分析结构自振频率的 2.4 倍；

4) 对于多测点响应数据宜采用标准差对比法进行增益一致性检查，若某测点响应数据出现局部增益突变而其他测点响应数据增益不变，应对局部增益突变的异常响应数据进行舍弃。

3 各测点响应数据的同步性可采用互功率谱法、互相关函数法、自回归滑动平均模型法或最小误差范数法进行检查，数据时延误差应小于 0.1 ms。

5.2.3 现场试验数据若用于工作模态识别，其预处理可参考本规程 5.2.2 的规定；若用于实验模态识别，其预处理应包括激励和响应数据的相干性检查、互易性检查、线性检查和同步性检查。

1 在相干性检查中，应取两组及以上的激励和响应数据计算相干函数平均值，检查在结构频率处相干函数值，相干函数值应不低于 0.95；

2 在互易性检查中，应对激励点与响应测点位置互换前后的两组测试数据进行频响函数计算，应将两组频响函数积分面积交集与并集的比值作为相似度计算值并检查两组频响函数之间相似度，相似度应不低于 0.95；

3 在线性检查中，宜利用作用于同一激励点的两种及以上不同大小的

激励数据、及相应的响应数据进行频响函数计算，检查不同组频响函数之间相似度，相似度应不低于 0.95；

4 对于激励和响应数据的同步性可采用外因输入自回归模型法进行检查，数据时延误差应小于 0.1 ms。

5.3 工作模态参数识别

5.3.1 工作模态参数识别应包括数据分析时长选择、功率谱分析、模态参数识别、结果校核。

5.3.2 对于单次工作模态参数识别，分析数据时长应符合下列规定：

1 对于大跨径桥梁主梁的模态参数识别，分析数据时长不宜少于 30 min；

2 对于大跨径桥梁主梁以外的部件或中小跨径桥梁的模态参数识别，分析数据时长不宜小于 10 min。

5.3.3 对于工作模态参数识别所需的数据宜采用 Welch 法进行功率谱分析，其中窗函数宜采用汉宁窗或切比雪夫窗，窗长宜设为 2^N 个采样点， N 宜保证谱线分辨率低于 0.01 Hz，相邻窗的重叠程度不宜小于 50%。

5.3.4 工作模态参数识别方法可参照本规程表 5.3.4 进行选用，方法的实施步骤可参考本规程附录 C，并宜符合下列规定：

1 当仅进行频率识别时，宜选用频域峰值法或增强频域分解法，方法中的功率谱分析应符合本规程第 5.3.3 条的规定；

2 当对频率、振型或阻尼比进行单次识别时，宜选用增强频域分解法，可选用最小二乘复频域法、随机子空间识别法或自然激励技术-特征系统实现算法；

3 当对频率、振型或阻尼比进行连续识别时，宜选用最小二乘复频域法、随机子空间法、自然激励技术-特征系统实现算法；

4 对于桥梁的瞬时频率变化，可选用时-频域方法进行识别。

表 5.3.4 激励未知的模态参数识别方法

类别	方法
频域方法	增强频域分解法、最小二乘复频域法、频域峰值法
时域方法	随机子空间识别法、自然激励技术-特征系统实现算法
时-频域方法	短时傅里叶变换法、小波分析、希尔伯特-黄变换

5.3.5 对于工作模态参数识别结果应按下列规定进行校核：

1 当对频率、振型或阻尼比进行单次识别时，宜采用两种及以上的方法并应符合下列规定：

1) 当频率偏差不超过 5% 时，应取其均值；当超过 5% 时，应将其舍弃；

2) 当模态置信度大于或等于 0.8 时，宜取归一化振型的均值；当小于 0.8 时，应将其舍弃。模态置信度应按式 5.3.5 进行计算：

$$MAC_{ij} = \frac{\Phi_{i,[k]}^T \Phi_{i,[g]}}{\sqrt{(\Phi_{i,[k]}^T \Phi_{i,[k]})(\Phi_{j,[g]}^T \Phi_{j,[g]}})} \quad (5.3.5)$$

式中： MAC_{ij} ——第 i 阶振型与第 j 阶振型之间的置信度；

Φ_i ——第 i 阶振型；

上标 T ——转置；

下标 $_{[k]}$ ——第 k 种识别方法。

3) 当阻尼比偏差不超过 20%时, 应取均值; 当超过 20%时, 应将其舍弃; 当主梁的阻尼比大于 0.05 时, 应谨慎使用。

2 当对频率、振型或阻尼比进行连续多次识别时, 应采用稳定图结合智能算法对识别出的模态进行自动辨别。

5.4 实验模态参数识别

5.4.1 当采用激振器激励时, 应综合利用激励信息和振动响应识别模态参数。识别方法可参照本规程表 5.4.1 进行选用, 必要时可采用两种方法相互校核, 并宜符合下列规定:

1 对于单点激励单点响应, 可采用傅里叶变换、波形分析法、有理分式多项式法、希尔伯特-黄变换、小波变换、最小二乘复频域法或确定随机子空间法识别频率和阻尼。

2 对于单点激励多点响应, 可采用傅里叶变换、最小二乘复频域法、有理分式多项式法或确定随机子空间法识别频率、阻尼和振型。

3 对于多点激励多点响应, 可采用傅里叶变换、复模态指示函数法、最小二乘复频域法、多参考点复指数法、确定随机子空间法或整体有理多项式法识别频率、阻尼和振型。

表 5.4.1 实验模态参数识别方法

类别	方法
频域方法	傅里叶变换、有理分式多项式法、最小二乘复频域法、复模态指示函数法、整体有理多项式法
时域方法	波形分析法、确定随机子空间法、多参考点复指数法、自然激励-特征系统实现法、随机子空间法、Ibrahim 时域法
时-频域方法	希尔伯特-黄变换、小波变换

5.4.2 当采用脉冲激励、跑车激励或跳车激励时，应利用桥梁自由衰减响应识别模态参数，宜采用自然激励法或随机减量法减少环境振动响应的干扰。可采用 Ibrahim 时域法、自然激励-特征系统实现法或随机子空间法识别频率、阻尼和振型，必要时可采用两种方法相互校核。

5.4.3 对于实验模态参数识别结果，宜采用下列方式进行校核：

1 对于频率，应取不少于三次测试的识别结果均值，单次识别结果与均值的偏差不应超过 $\pm 3\%$ ，若超过 $\pm 3\%$ 应重新测试；

2 对于阻尼比，应取不少于三次测试的识别结果均值，单次识别结果与均值的偏差不应超过 $\pm 20\%$ ，若超过 $\pm 20\%$ 应重新测试；

3 对于振型，宜根据式（5.3.5）计算振型置信度，若其值小于 0.8 应重新测试。

5.5 结果展示

5.5.1 结果展示内容应包括振动响应测试原始数据和模态参数辨识结果，且宜包括有限元模态分析结果和模态辨识精度评价指标。

5.5.2 振动响应测试原始数据展示应符合下列规定：

1 工作模态测试原始数据应为未经预处理的响应数据，实验模态测试原始数据应为未经预处理的激励数据和响应数据；

2 激励数据至少应包括激振参数、激振力时程和初始位移，原始响应数据至少应包括加速度时程、速度时程、位移时程或应变时程；

3 原始时域数据宜采用时域图进行展示，可给出频谱图和预处理后的数据。

5.5.3 模态参数辨识结果展示应符合下列规定：

1 频率宜以物理频率（Hz）为单位，并以表格的形式给出，表中可给出频率识别结果与有限元分析结果的相对误差；

2 各阶模态的振型图应分别进行绘制，各阶振型宜以三维图的形式给出结构原始状态与振动形态，并应采用不同的线型或颜色进行区分；此外，还宜以表格的形式给出识别结果与有限元分析结果的振型置信度；

3 阻尼比宜通过表格以百分数或千分数的形式给出，有效数字的位数宜大于 3；

4 模态质量和模态刚度可以表格的形式给出。

5.5.4 模态辨识精度评价指标宜采用模态置信准则、模态相位共线性指标、稳定图或变异系数。

6 报告编制和资料归档

6.1 一般规定

- 6.1.1 报告应内容完整、数据客观、结论准确、撰写规范。
- 6.1.2 归档资料应完整、详实、真实。
- 6.1.3 报告和资料中的量和单位应使用国际单位制和国家标准符号。

6.2 报告编制

- 6.2.1 报告应包括封面、目录、正文、参考文献和附录（可选），格式应符合本规程附录 D 的要求。
- 6.2.2 报告封面应包括测试项目名称、项目委托单位、项目负责单位、项目负责人、报告编号、报告总页数和日期。
- 6.2.3 报告正文应包括工程概况、目的及依据、测试方案、测试设备、振动响应测试、模态参数辨识、结论与建议。
- 6.2.4 工程概况应包括下列内容：
 - 1 桥梁的名称、竣工时间或服役龄期、起止点或中心桩号、结构形式、跨径组合、桥跨结构横断面形式、下部结构形式、设计荷载和运营车道数；
 - 2 桥梁的整体外貌照片，以及包括主要尺寸的桥跨结构立面图、平面图和横断面图。
- 6.2.5 目的及依据应包括测试与辨识的目的，所依据的技术标准、图纸资料和计算报告。
- 6.2.6 测试方案应包括有限元建模和分析，测点位置，激振方式，激振工

况，数据采集、传输和存储方式，供电方式，交通管制措施和通告。

6.2.7 测试设备应包括设备的名称、型号、编号及主要技术参数。

6.2.8 振动响应测试应包括测试方案制定、测试工作准备和现场测试实施，测试基本信息的记录内容宜符合本规程附录 D.0.2 的要求。

6.2.9 模态参数辨识应包括数据预处理过程和结果、模态参数识别选用的方法及识别过程，识别出的频率、振型和阻尼比。

6.2.10 结论与建议应包括模态参数辨识结论和应用建议。

6.2.11 报告附录可包括报告正文的补充说明、编写报告时收集的证据、报告相关的图片、政府或机构的相关文件、第三方证明。

6.3 资料归档

6.3.1 技术资料应以单座桥梁为单位建立“一桥一档”的档案管理模式。

6.3.2 归档资料应包括桥梁的有限元模型及数值分析报告、测点优化布设报告、设备选型报告、测试过程照片、原始测试数据、数据分析报告。

6.3.2 归档资料应采用纸质版，宜同时采用电子版的形式进行妥存。

附录 A 测点优化准则

A.1 有线测点优化准则

A.1.1 有线测点优化可采用基于振动响应强度的准则、基于模态重构效果的准则和基于参数识别误差的准则。

A.1.2 基于振动响应强度的准则可按下列公式进行确定：

1 模态动能准则可按下列公式进行计算：

$$\mathbf{MKE} = \mathbf{\Phi}^T \tilde{\mathbf{M}} \mathbf{\Phi} \quad (\text{A.1.2-1})$$

$$MKE_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n MKE_{ij} \quad (\text{A.1.2-2})$$

式中： \mathbf{MKE} ——桥梁的模态动能矩阵；

MKE_i ——第*i*个自由度的模态动能。

2 模态应变能准则可按下列公式进行计算：

$$\mathbf{MSE} = \mathbf{\Phi}^T \tilde{\mathbf{K}} \mathbf{\Phi} \quad (\text{A.1.2-3})$$

$$MSE_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n MSE_{ij} \quad (\text{A.1.2-4})$$

式中： \mathbf{MSE} ——桥梁的模态应变能矩阵；

MSE_i ——第*i*个自由度的模态应变能。

3 模态向量加和准则可按下列公式进行计算：

$$MSSP_i = \sum_{j=1}^n |\varphi_{i,j}| \quad (\text{A.1.2-5})$$

式中： $MSSP_i$ ——第*i*个自由度的模态向量加和值。

4 模态向量乘积准则可按下列公式进行计算：

$$MSPP_i = \prod_{j=1}^n |\varphi_{i,j}| \quad (\text{A.1.2-6})$$

式中： $MSPP_i$ ——第*i*个自由度的模态向量乘积值。

5 驱动点残差准则可按下列公式进行计算：

$$\mathbf{DPR} = \frac{\Phi^T \tilde{\mathbf{M}} \Phi}{\tilde{\mathbf{K}}} \quad (\text{A.1.2-7})$$

$$DPR_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n DPR_{ij} \quad (\text{A.1.2-8})$$

式中： \mathbf{DPR} ——桥梁的驱动点残差矩阵；

DPR_i ——第*i*个自由度的平均驱动点残差。

6 平均加速度准则可按下列公式进行计算：

$$AAA_i = \sum_{j=1}^n \varphi_{i,j} \varphi_{i,j} \quad (\text{A.1.2-9})$$

式中： AAA_i ——第*i*个自由度的平均加速度幅值。

A.1.3 基于模态重构效果的准则可按下列公式进行确定：

1 有效独立准则可按下列公式进行计算：

$$\mathbf{EI} = \text{diag}[\Phi(\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T] \quad (\text{A.1.3-1})$$

式中： \mathbf{EI} ——有效独立系数向量；

$\text{diag}(\cdot)$ ——提取括号内矩阵的对角元。

2 模态置信准则可按公式（5.3.5）进行计算。

3 QR 分解准则可按下列公式进行计算：

$$\Phi^T \mathbf{E} = \mathbf{QR} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1s} & \cdots & R_{1s} \\ & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & & R_{ss} & \cdots & R_{sm} \end{bmatrix} \quad (\text{A.1.3-3})$$

$$|R_{11}| > |R_{22}| > \cdots > |R_{ss}| \quad (\text{A.1.3-4})$$

式中： \mathbf{E} ——置换矩阵。

4 均方差准则可按下列公式进行计算：

$$\sigma = \sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{\sigma_j} \sum_{i=1}^m (\varphi_{ij}^F - \varphi_{ij}^D) \right] / M \quad (\text{A.1.3-5})$$

式中： φ_{ij}^F ——有限元数值计算所得的第 j 阶振型在第 i 个自由度上的值；
 φ_{ij}^D ——三次样条插值拟合所得的第 j 阶振型在第 i 个自由度上的值；
 σ_j ——第 j 阶振型的标准差。

A.1.4 基于参数识别误差的准则可按下列公式进行确定：

1 费希尔（Fisher）信息阵准则可按下列公式进行计算：

$$D_F = \det(\Phi^T \Phi) \quad (\text{A.1.4-1})$$

式中： D_F ——费希尔信息阵准则指数；

$\det(\cdot)$ ——矩阵行列式运算符。

2 条件数准则可按下列公式进行计算：

$$\text{cond}_2(\Phi) = \sqrt{\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}} \quad (\text{A.1.4-2})$$

式中： $\text{cond}_2(\Phi)$ ——振型矩阵的 2-条件数；

λ_{\max} ——矩阵 $\Phi^T \Phi$ 的最大奇异值；

λ_{\min} ——矩阵 $\Phi^T \Phi$ 的最小奇异值。

3 表征最小二乘法准则可按下列公式进行计算：

$$E[D(\hat{q}_s, \hat{q}_A)] = \text{tr}(J_s^{-1} J_A) - n \quad (\text{A.1.4-3})$$

式中： \hat{q}_A ——在全测点集下估计的振型；

\hat{q}_s ——在部分测点集下估计的振型；

J_A ——在全测点集下估计振型的费希尔信息阵；

J_s ——在部分测点集下估计振型的费希尔信息阵；

$D(\cdot)$ ——两种估计振型之间的马氏距离。

A.2 无线测点优化准则

A.2.1 无线测点优化可采用连通性准则、均衡负载准则、均衡能耗准则、最高能耗准则和服务性准则。

A.2.2 连通性准则可按下列公式进行计算：

$$\mathbf{D} = \sum_{s=1}^{k-1} \mathbf{A}^s \quad (\text{A.2.2-1})$$

式中： \mathbf{D} ——连通性矩阵：当连通性矩阵中的最小元素大于 0 时，无线测点组成的无线传感网络为连通网络；当连通性矩阵中的最小元素等于 0 时，无线测点组成的无线传感网络为非连通网络；

\mathbf{A} ——邻接矩阵：当第 s 个无线测点与第 t 个无线测点之间的距离不超过无线测点的最大传输距离时，邻接矩阵 \mathbf{A} 的第 s 行第 t 列元素取 1；当第 s 个无线测点与第 t 个无线测点之间的距离超过无线测点的最大传输距离时，邻接矩阵 \mathbf{A} 的第 s 行第 t 列元素取 0；邻接矩阵 \mathbf{A} 的对角线元素均取 0。

A.2.3 均衡负载准则可按下列公式进行计算：

$$E_b = \frac{\bar{E}}{\sum_{s=1}^k E_s} E_{\min} \quad (\text{A.2.3-1})$$

式中： E_b ——均衡负载指数；

\bar{E} ——无线传感网络中所有无线测点的平均能量消耗速度；

E_s ——无线传感网络中第 s 个无线测点的能量消耗速度；

E_{\min} ——无线传感网络中的最低能量消耗速度。

A.2.4 均衡能耗准则可按下列公式进行计算：

$$E_m = \text{var}(\bar{E}_1, \bar{E}_2, \dots, \bar{E}_k) \quad (\text{A.2.4-1})$$

$$\bar{E}_s = \frac{E_s}{E_{\max}} \quad (s=1, 2, \dots, k) \quad (\text{A.2.4-2})$$

式中： E_m ——均衡能耗指数；

$\text{var}(\cdot)$ ——标准差运算符；

\bar{E}_s ——无线传感网络中第 s 个无线测点的归一化能量消耗速度；

E_s ——无线传感网络中第 s 个无线测点的实际能量消耗速度；

E_{\max} ——无线传感网络中的最高能量消耗速度。

A.2.5 最高能耗准则可按下列公式进行计算：

$$E_a = \max(E_1, E_2, \dots, E_k) \quad (\text{A.2.5-1})$$

式中： E_a ——最高能耗指数；

$\max(\cdot)$ ——最大值运算符。

A.2.6 服务性准则可按下列公式进行计算：

$$RPI = \left[\frac{\bar{E}_L}{E_C} E_{L,Min} \right]^{Q_1} \left[\frac{1}{L} \right]^{Q_2} \left[\frac{1}{N} \right]^{Q_3} \left[\bar{I}_n I_{n,Min} \right]^{Q_4} \quad (\text{A.2.6-1})$$

式中： RPI ——服务性准则指数；

\bar{E}_L ——数据传输路径上所有测点的平均剩余能量；

$E_{L,Min}$ ——数据传输路径上所有测点的最低剩余能量；

E_C ——数据传输路径上所有测点的总能量消耗；

L ——数据传输路径的总长度；

N ——数据传输路径的跳数；

\bar{I}_n ——数据传输路径上所有测点的平均空闲度；

$I_{n,Min}$ ——数据传输路径上所有测点的最小空闲度；

Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 ——权重指数。

附录 B 硬件设备技术要求

B.0.1 加速度类振动响应测量系统应满足表 B.0.1 的技术要求。

表 B.0.1 加速度类振动响应测量系统技术要求

类型	测量范围	频率响应	横向灵敏度	振幅一致性偏差	相位一致性偏差
电磁式加速度计及放大器	±0.5 g	0.3 ~ 20 Hz	< 0.05	<0.5 dB@1kHz	<0.2°@1kHz
应变式加速度计及动态应变仪	±5 g	0 ~ 100 Hz	< 0.05	<0.5 dB@1kHz	<0.2°@1kHz
压电式加速度计及电荷放大器	±100 g	0.5 ~ 1000 Hz	< 0.05	<0.5 dB@1kHz	<0.2°@1kHz
伺服式加速度计及放大器	±5 g	0 ~ 100 Hz	< 0.05	<0.5 dB@1kHz	<0.2°@1kHz
电容式加速度计及放大器	±5 g	0 ~ 100 Hz	< 0.05	<0.5 dB@1kHz	<0.2°@1kHz

B.0.2 其他类型振动响应数据采集系统应满足表 B.0.2 的技术要求。

表 B.0.2 其他类型振动响应测量系统技术要求

类型		测量范围	频率响应	线性误差	重复精度
位移传感器	差动变压式	±200 mm	0 ~ 250 Hz	±1.0%	±0.4%
	磁致伸缩式	±500 mm	0 ~ 1000 Hz	±0.05%	0.02%
	激光式	±300 mm	0 ~ 500 Hz	±0.2%	0.05%
速度传感器	磁电式	±0.3 m/s	0.5 ~ 100 Hz	±0.2%	±0.1%
	压电式	±0.6 m/s	5 ~ 500 Hz	±0.2%	±0.1%
	霍尔式	±1.0 m/s	1 ~ 1000 Hz	±0.2%	±0.1%

B.0.3 振动响应数据采集系统应满足表 B.0.3 的技术要求。

表 B.0.3 振动响应测量系统技术要求

输入电压	±10 V
频率响应范围	0.1 Hz ~ 100 Hz
抗混叠滤波器	截止频率 > 最高分析频率 f_{max}
	频带外的衰减率 > 12 dB/oct
采样频率	正弦信号: 5 ~ 100 f_{max}

	随机信号: $2.5 \sim 4 f_{max}$
	瞬态信号: $5 \sim 10 f_{max}$
A/D 转换器	工作模态测试 ≥ 24 bit
	实验模态测试 ≥ 16 bit
扩展方式	有线模式模块之间扩展距离 ≥ 100 m
	无线传输可靠传输距离 ≥ 200 m
幅度畸变	< 1.0 dB
系统准确度	$> 5\%$
相位一致性偏差	小于 0.1 ms
信噪比	> 80 dB

附录 C 常用模态参数识别方法

C.1 频域方法

C.1.1 频域峰值法 (Peak Picking Method, PP) 可用于工作模态识别, 应按下列步骤进行计算:

- 1 响应信号 $x(t)$ 的傅里叶变换应利用式 (C.1.1-1) 进行计算:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (\text{C.1.1-1})$$

- 2 响应信号 $x(t)$ 的功率谱密度函数 $G_{xx}(\omega)$ 可利用式 (C.1.1-2) 进行计算:

$$G_{xx}(\omega) = X^*(\omega) \cdot X(\omega) \quad (\text{C.1.1-2})$$

式中: 上标* ——共轭。

- 3 频率应通过拾取功率谱密度函数曲线上的峰值进行获取。

C.1.2 增强频域分解法 (Enhanced Frequency Domain Decomposition, EFDD) 可用于工作模态识别, 应按下列步骤进行计算:

- 1 各测点响应信号 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 、 \dots 、 $x_n(t)$ 的自、互功率谱密度函数应按式 (C.1.1-1) 和 (C.1.1-2) 进行计算;

- 2 功率谱密度函数矩阵 $\mathbf{G}(\omega)$ 应按式 (C.1.2-1) 进行构造:

$$\mathbf{G}(\omega) = \begin{bmatrix} G_{x_1x_1}(\omega) & G_{x_1x_2}(\omega) & \cdots & G_{x_1x_n}(\omega) \\ G_{x_2x_1}(\omega) & G_{x_2x_2}(\omega) & \cdots & G_{x_2x_n}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{x_nx_1}(\omega) & G_{x_nx_2}(\omega) & \cdots & G_{x_nx_n}(\omega) \end{bmatrix} \quad (\text{C.1.2-1})$$

- 3 功率谱矩阵 $\mathbf{G}(\omega_1)$ 、 $\mathbf{G}(\omega_2)$ 、 \dots 、 $\mathbf{G}(\omega_N)$ 应进行奇异值分解以获得

第一阶奇异值 $s_1(\omega_1)$ 、 $s_1(\omega_2)$ 、 \dots 、 $s_1(\omega_N)$ 构成的第一阶奇异值曲线；

4 频率应计算为第一阶奇异值曲线峰值处的谱线频率 ω_r ，振型应计算为功率谱矩阵 $\mathbf{G}(\omega_r)$ 的第一阶左奇异向量；

5 对谱线频率 ω_r 附近频带的第一阶奇异值曲线应进行逆傅里叶变换，以获得近似的单自由度相关函数曲线（图 C.1.2 所示），阻尼比宜使用对数衰减法按式（C.1.2-2）进行识别：

$$\zeta = \frac{1}{2\pi m} \ln \left(\frac{A_0}{A_n} \right) \quad (\text{C.1.2-2})$$

式中： ζ —— 阻尼比；

m —— 衰减周波数；

A_0 —— 起始波振幅值；

A_n —— 第 n 个波振幅值。

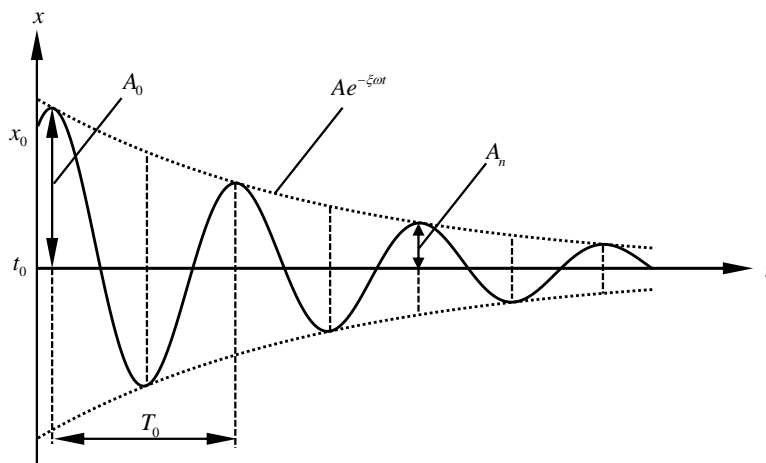


图 C.1.2 单自由度自由衰减曲线

C.1.3 最小二乘复频域法（Least Squares Complex Frequency Domain Method, LSCF）可用于实验模态识别和工作模态识别，应按下列步骤进行计算：

1 对于实验模态识别，激励和响应间的频响函数 $\tilde{H}_o(\omega)$ 宜按下式进行计算：

$$\tilde{\mathbf{H}}_o(\omega) = \frac{G_{XF}(\omega)}{G_{FF}(\omega)} \quad (\text{C.1.3-1})$$

式中： $G_{XF}(\omega)$ ——响应信号与激励信号的互谱均值；

$G_{FF}(\omega)$ ——激励信号的自谱均值。

2 实测与理论频响应函数矩阵的误差函数 $\mathbf{L}^{LS}(\omega, \boldsymbol{\theta})$ 应按下式进行构造：

$$\mathbf{L}^{LS}(\omega, \boldsymbol{\theta}) = \sum_{o=1}^{Nr} |\mathbf{N}_o(\omega, \boldsymbol{\theta}) - \mathbf{H}_o(\omega) * \mathbf{D}(\omega, \boldsymbol{\theta})|^2 \quad (\text{C.1.3-2})$$

式中： \mathbf{H}_o ——第 o 个输出响应的实测频响应函数矩阵；

\mathbf{N}_o ——第 o 个输出响应的理论频响函数的分子多项式；

\mathbf{D} ——理论频响应函数矩阵的分母多项式；

Nr ——响应输出数量；

ω ——频率；

$\boldsymbol{\theta}$ ——理论频响函数的分母和分子多项式系数矩阵。

3 分母多项式 \mathbf{D} 和分子多项式 \mathbf{N}_o 的系数可通过误差函数最小化求解，频率和阻尼比应利用分母多项式的零点进行计算；

4 对于工作模态识别，式 (C.1.3-2) 中的频响应函数 $\mathbf{H}_o(\omega)$ 应以响应的功率谱矩阵进行代替。

C.2 时域方法

C.2.1 随机子空间法 (Stochastic Subspace Identification, SSI) 可用于工作模态识别和实验模态识别，应按下列步骤进行计算：

1 对工作模态识别，多点响应数据 $\mathbf{x}(k) = [x_1(k) \ x_2(k) \ \cdots \ x_n(k)]^T$

(其中，离散时间 $k = 0, 1, \dots, 2i + j - 2$) 的 Hankel 矩阵应按下式进行构造：

$$\mathbf{X}_{0|2i-1} = \frac{\begin{bmatrix} \mathbf{x}(0) & \mathbf{x}(1) & \cdots & \mathbf{x}(j-1) \\ \mathbf{x}(1) & \mathbf{x}(2) & \cdots & \mathbf{x}(j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{x}(i-1) & \mathbf{x}(i) & \cdots & \mathbf{x}(i+j-2) \\ \mathbf{x}(i) & \mathbf{x}(i+1) & \cdots & \mathbf{x}(i+j-1) \\ \mathbf{x}(i+1) & \mathbf{x}(i+2) & \cdots & \mathbf{x}(i+j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{x}(2i-1) & \mathbf{x}(2i) & \cdots & \mathbf{x}(2i+j-2) \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \mathbf{X}_{0|i-1} \\ \mathbf{X}_{i|2i-1} \end{bmatrix}} \quad (\text{C.2.1-1})$$

2 投影矩阵 \mathbf{O}_i 应按下式进行计算:

$$\mathbf{O}_i = \frac{\mathbf{X}_{i|2i-1}}{\mathbf{X}_{0|i-1}} = \mathbf{X}_{i|2i-1} \mathbf{X}_{0|i-1}^T \left(\mathbf{X}_{0|i-1} \mathbf{X}_{0|i-1}^T \right)^\dagger \mathbf{X}_{0|i-1} \quad (\text{C.2.1-2})$$

式中: 上标[†]—广义逆。

3 左奇异矩阵 \mathbf{U}_1 、奇异值对角矩阵 \mathbf{S}_1 和右奇异矩阵 \mathbf{V}_1 应通过对投影矩阵 \mathbf{O}_i 做奇异值分解进行计算;

4 可观矩阵 $\mathbf{\Gamma}_i$ 、系统矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{C} 应分别按下式进行计算:

$$\mathbf{\Gamma}_i = \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1^{1/2} \mathbf{T} \quad (\text{C.2.1-3})$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{\Gamma}_i(1:n,:) \quad (\text{C.2.1-4})$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{\Gamma}_i(1:(i-1)n,:)^\dagger \mathbf{\Gamma}_i(n+1:in,:) \quad (\text{C.2.1-5})$$

式中: n ——响应测点个数。

5 频率、阻尼比、振型应分别按下式进行计算:

$$\omega_i = \frac{|\ln \lambda_i|}{\Delta t} \quad (\text{C.2.1-6})$$

$$\xi_i = \frac{\text{Re}(\ln \lambda_i)}{|\ln \lambda_i|} \quad (\text{C.2.1-7})$$

$$\mathbf{\Phi} = \mathbf{C}\mathbf{\Psi} \quad (\text{C.2.1-8})$$

式中: Δt ——离散时间系统时间间隔;

$|\ln \lambda_i|$ —— $\ln \lambda_i$ 的模;

$\text{Re}(\ln \lambda_i)$ —— $\ln \lambda_i$ 的实部;

λ_i ——系统矩阵 \mathbf{A} 的第 i 个特征值;

Ψ ——系统矩阵 \mathbf{A} 的特征向量。

6 对实验模态识别, Hankel 矩阵 $\mathbf{U}_{i|2i-1}$ 和 $\mathbf{U}_{0|i-1}$ 应利用激励数据 $\mathbf{u}(k)$ 按式 (C.2.1-1) 相同的方式构造。投影矩阵 \mathbf{O}_i 应按式 (C.2.1-9) 进行计算:

$$\mathbf{O}_i = \mathbf{X}_{i|2i-1} / \mathbf{U}_{i|2i-1} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{0|i-1} \\ \mathbf{X}_{0|i-1} \end{bmatrix} \quad (\text{C.2.1-9})$$

C.2.2 自然激励-特征系统实现法 (Natural Excitation Technique- Eigen-system Realization Algorithm, NExT-ERA) 可用于工作模态识别和实验模态识别, 应按下列步骤进行计算:

1 响应信号 $x(t)$ 的自相关函数 $R(k)$ 应利用式 (C.2.2-1) 进行计算:

$$R(k) = E[x(t)x(t+k)] \quad (\text{C.2.2-1})$$

2 对工作模态识别, 相关函数矩阵 $\mathbf{R}(k)$ 应按式 (C.2.2-1) 进行计算, 广义 Hankel 矩阵应利用互相关函数按下式进行构造:

$$\mathbf{H}(k-1) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(k) & \mathbf{R}(k+1) & \cdots & \mathbf{R}(k+j-1) \\ \mathbf{R}(k+1) & \mathbf{R}(k+2) & \cdots & \mathbf{R}(k+j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{R}(k+i-1) & \mathbf{R}(k+i) & \cdots & \mathbf{R}(k+i+j-2) \end{bmatrix} \quad (\text{C.2.2-2})$$

3 左奇异矩阵 \mathbf{U}_1 、奇异值对角矩阵 \mathbf{S}_1 和右奇异矩阵 \mathbf{V}_1 应通过对 $\mathbf{H}(0)$ 的奇异值分解计算, 系统矩阵 \mathbf{A} 和输出矩阵 \mathbf{C} 应按式 (C.2.2-3) 进行计算:

$$\mathbf{A} = \mathbf{S}_1^{-\frac{1}{2}} \mathbf{U}_1^T \mathbf{H}(1) \mathbf{V}_1 \mathbf{S}_1^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{C.2.2-3})$$

$$\mathbf{C} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{0}] \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{C.2.2-4})$$

4 频率、阻尼比和振型应分别按式 (C.2.1-5~ C.2.1-8) 进行计算;

5 对实验模态识别, 广义 Hankel 矩阵宜使用脉冲响应函数代替互相关函数矩阵 $\mathbf{R}(k)$ 进行构造。

C.2.3 Ibrahim 时域法 (Ibrahim Time Domain, ITD) 可用于实验模态识别, 应按以下步骤进行计算:

1 对 M 个测点的自由振动响应, 应按下式构造三次不同延时采样的自由振动响应矩阵:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(t_1) & \tilde{x}_1(t_2) & \cdots & \tilde{x}_1(t_{2n}) \\ \tilde{x}_2(t_1) & \tilde{x}_2(t_2) & \cdots & \tilde{x}_2(t_{2n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{x}_M(t_1) & \tilde{x}_M(t_2) & \cdots & \tilde{x}_M(t_{2n}) \end{bmatrix} \quad (\text{C.2.3-1})$$

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \tilde{y}_1(t_1) & \tilde{y}_1(t_2) & \cdots & \tilde{y}_1(t_{2n}) \\ \tilde{y}_2(t_1) & \tilde{y}_2(t_2) & \cdots & \tilde{y}_2(t_{2n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{y}_M(t_1) & \tilde{y}_M(t_2) & \cdots & \tilde{y}_M(t_{2n}) \end{bmatrix} \quad (\text{C.2.3-2})$$

$$\tilde{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} \tilde{z}_1(t_1) & \tilde{z}_1(t_2) & \cdots & \tilde{z}_1(t_{2n}) \\ \tilde{z}_2(t_1) & \tilde{z}_2(t_2) & \cdots & \tilde{z}_2(t_{2n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{z}_M(t_1) & \tilde{z}_M(t_2) & \cdots & \tilde{z}_M(t_{2n}) \end{bmatrix} \quad (\text{C.2.3-3})$$

式中: $\tilde{\mathbf{X}}$ ——正常采样的自由响应数据矩阵;
 $\tilde{\mathbf{Y}}$ ——延时 $\Delta\tau$ 采样的自由响应数据矩阵;
 $\tilde{\mathbf{Z}}$ ——延时 $2\Delta\tau$ 采样的自由响应数据矩阵。

2 自由振动响应的增广数据矩阵应按下式进行构造：

$$\tilde{\mathbf{D}}_{xy} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{X}} \\ \tilde{\mathbf{Y}} \end{bmatrix} \quad (\text{C.2.3-4})$$

$$\tilde{\mathbf{D}}_{yz} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Y}} \\ \tilde{\mathbf{Z}} \end{bmatrix} \quad (\text{C.2.3-5})$$

3 系统特征方程应通过组合自由响应数据矩阵进行构造：

$$(\mathbf{A} - \Delta_i \mathbf{I}) \boldsymbol{\Psi}_{xyi} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, 2n) \quad (\text{C.2.3-6})$$

式中： $\boldsymbol{\Psi}_{xyi} (i=1, 2, \dots, 2n)$ ——特征向量；

Δ_i ——特征值。

4 特征值 Δ_i 和特征向量 $\boldsymbol{\Psi}_{xyi}$ 可通过系统特征方程求解计算，振型、频率和阻尼比可利用特征值和特征向量进行估算。

C.2.4 最小二乘复指数法 (Least Squares Complex Exponent Method, LSCE)

可用于实验模态识别，应按以下步骤进行计算：

1 脉冲响应模型应利用 M 个测点的脉冲响应时间序列和 Z 变换按下式进行构造：

$$h_k = \sum_{i=1}^{2n} X_i R_{efi} z_i^k \quad (\text{C.2.4-1})$$

式中： k ——采样点号；

R_i 、 z_i ——待识别参数。

2 $2n$ 次实系数 Prony 多项式应采用脉冲响应模型按下式(C.2.4-2)进行构造：

$$p(z) = \sum_{p=0}^{2n} \alpha_p z^p = \prod_{i=1}^n (z - z_i)(z - z_i^*) \quad (\text{C.2.4-2})$$

式中： $a_{2n} = 1$ 。

3 采用 Prony 多项式，将脉冲响应模型转化为以 为自回归系数的自回归模型：

$$\mathbf{h}_l^T \mathbf{a} = -h_{l+2n} \quad (\text{C.2.4-3})$$

式中：

$$\mathbf{h}_l = [h_l \quad h_{l+1} \quad \cdots \quad h_{l+2n-1}]^T \quad (\text{C.2.4-4})$$

$$\mathbf{a} = [a_0 \quad a_1 \quad \cdots \quad a_{2n-1}]^T \quad (\text{C.2.4-5})$$

4 振型、频率和阻尼比应通过求解得到的自回归模型系数进行估算。

C.3 时频域方法

C.3.1 短时傅里叶变换法（Short-time Fourier transform, STFT）可用于工作模态识别，应按以下步骤进行计算：

1 信号 $x(t)$ 的短时傅里叶变换 $S_x(\omega, \tau)$ 应按下式进行计算：

$$S_x(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) m(t - \tau) e^{-j\omega t} dt \quad (\text{C.3.1-1})$$

式中： $m(t - \tau)$ ——窗函数，通常 $m(t - \tau)$ 是实偶的；

$S_x(\omega, \tau)$ ——不同时刻傅里叶变换的集合。

2 频率应计算为短时傅里叶变换时频图中的脊线频率。

C.3.2 小波分析（Wavelet Transform, WT）可用于工作模态识别和实验模态识别，应按以下步骤进行计算：

1 对工作模态识别，响应的功率谱密度函数矩阵 $\mathbf{G}(\omega)$ 应按式（C.1.2-1）计算，并应按下式计算其连续小波时-频变换：

$$W_R(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{G}(\omega) \varphi\left(\frac{\omega - b}{a}\right) d\omega \quad (\text{C.3.2-1})$$

式中： a ——尺度伸缩参数，表示小波的伸缩；
 b ——时间平移参数，表示小波的平移；
 $\varphi[(\omega-b)/a]$ ——小波母函数。

2 第 k 个小波函数极值所对应尺度坐标可确定为 (a_k, b_k) ，第 k 阶频率和阻尼比应按下式进行计算：

$$\omega_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (\text{C.3.2-2})$$

$$\xi_k = \frac{a_k}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}} \quad (\text{C.3.2-3})$$

3 对 $W_R(a_k, b_k)$ 进行奇异值分解，第 k 阶模态振型 φ_k 应确定为最大奇异值 $\sigma_1(a_k, b_k)$ 对应的左奇异向量 $\mathbf{u}_1(a_k, b_k)$ ；

4 对实验模态识别，式 (C.3.2-1) 中的功率谱密度函数矩阵 $\mathbf{G}(\omega)$ 应用频响应函数进行代替。

C.3.3 希尔伯特黄变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT) 可用于工作模态识别，应按以下步骤进行计算：

1 本征模函数 $IMF_1, IMF_2, \dots, IMF_n$ 应通过对响应信号进行经验模态分解计算；

2 各本征模函数的希尔伯特变换应按下式进行计算：

$$v_i(t) = \pi^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{IMF_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (\text{C.3.3-1})$$

3 各本征模函数 IMF_i 的瞬时频率按式 (C.3.3-2~ C.3.3-3) 进行计算：

$$\theta_i(t) = \arctan \frac{v_i(t)}{IMF_i(t)} \quad (\text{C.3.3-2})$$

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (\text{C.3.3-3})$$

附录 D 报告格式

D.0.1 封面宜采用如下格式

报告编号：XXXX 共 XX 页

XXX 桥梁结构模态参数测试与辨识报告

项目委托单位：

项目负责单位（盖章）：

项目负责人：（签字）

报告日期： 年 月 日

D.0.2 动力测试宜根据表 D.0.2 记录测试基本信息，并将该原始记录表以附件形式置于报告正文中。

表 D.0.2 动力测试原始记录表

工程名称		工程地址	
测试时间		天气情况	
仪器名称		主要技术参数	
仪器型号		设备编号	
采样频率		采集时间	
传感器灵敏度		测点数目	
桥梁既有病害信息			
测点布设说明			
激励信息（如有）			
测试人员		测试单位	

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

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：

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，在条件许可时应首先应这样做的：

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，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《机械振动 桥梁动态测试与检测测量结果的评估》 GB/T 33511
- 2 《公路桥梁荷载试验规程》 JTG/T J21-01
- 3 《建筑结构动力性能检测技术规程》 DB37/T 5025
- 4 《大跨度桥梁结构健康监测系统预警阈值标准》 T/CECS 529

中国工程建设标准化协会标准

桥梁结构运营模态测试与辨识技术规程

T/CECS XXX-2023

条文说明

目 次

3	基本规定	46
3.1	一般规定.....	46
3.2	振动响应测试.....	46
4	振动响应测试	47
4.2	测试方案制定.....	47
4.3	测试工作准备.....	49
4.4	现场测试实施.....	50
5	模态参数辨识	51
5.2	数据预处理.....	51
5.3	工作模态参数识别.....	52
5.4	实验模态参数识别.....	52
5.5	结果展示.....	55
6	报告编制和资料归档	57

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.5 检测资料包括本次振动响应测试前对桥梁进行的外观检测、承载力评定等各项检测资料和长期监测资料。

3.2 振动响应测试

3.2.2 桥梁模态参数主要与桥梁的总体质量、刚度及其分布有关，故在振动响应测试前桥梁主要质量应安装到位，混凝土构件应达到设计强度才能提供相应的刚度。

4 振动响应测试

4.1 一般规定

4.1.5 环境激励测试是利用风或运营车辆作为激励源，测量获得桥梁结构的振动响应。人工激振测试是利用专用车辆、激振装置或人工跳跃作为激励源，测量获得桥梁结构的振动响应。

4.1.6 为减小气象和运营条件对桥梁模态参数的影响，提出本条文。常规气象条件是指大跨径桥梁风速小于 5 m/s，中小跨径桥梁小于 8 m/s；常规运营条件是指车辆稀疏状态；否则应考虑气候和运营的影响。

4.2 测试方案制定

4.2.1 结构动力特性检测之前，宜先建立结构有限元模型，进行模态特征分析，初步掌握结构的动力特性，布置测点时可有效避开信号弱的振型节点。

4.2.2 模态测试的传感器数量有限，只能布置在少数几个位置。为了最大程度获得有效结构响应，可以根据测点优化准则和优化方法对测点数量和位置进行优化。如果待测桥梁模态中含有扭转振型，在桥梁横断面上只布置一个传感器时，不能测得扭转振型，需要在同一横断面上下游对称位置同时布置传感器。

当桥梁跨径较大且传感器数量有限时，为了获得更多位置的振型而需要进行多组测量。选择至少一个测点在整个测量过程中保持不动，这些测点称为参考点。每组测试中保持参考点不动，移动其它测点，直至测量工

况覆盖所有需要测试的位置。参考点的选择应避免所有待测振型的零点位置。

4.2.4 可以根据桥梁类型采用不同的激励方式：

跑车激振法，是利用车辆驶离桥面后引起的桥梁结构余振信号来识别结构自振特性参数。为提高信噪比，获取尽可能大的余振信号，可采用不同的车速进行多次试验，或在桥跨特征截面设置弓形障碍物进行激振（有障碍行车激振）。弓形障碍物可按下图 4.2.4-1 设置：

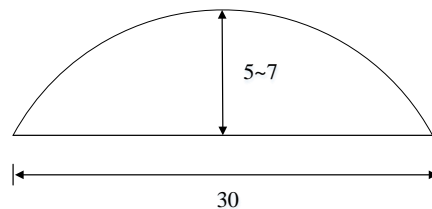


图 4.2.4-1 跑车激励弓形障碍物尺寸（尺寸单位：cm）

跳车激振法，是通过让单辆载重汽车的后轮在指定位置从三角形垫块上突然下落对桥梁产生冲击作用，激起桥梁的振动。该方法更适用于其他方法不易激振的、刚度较大的桥梁，如石拱桥、小跨径梁式桥等。跳车用三角垫块如图 4.2.4-2。

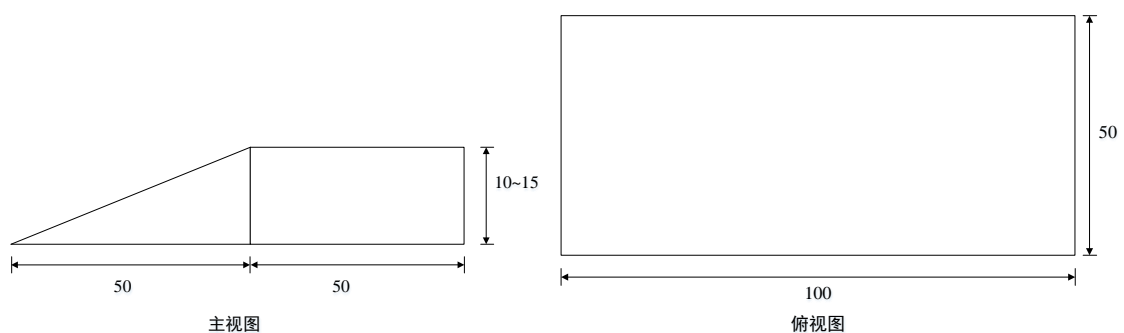


图 4.2.4-2 跳车三角垫块尺寸（尺寸单位：cm）

起振机激振法，是指利用起振机采用可控的定点激励使结构产生稳态振动。该方法测试精度高，但需要较为庞大的起振机设备，运输不方便，

同时安装起振机对桥面将产生一定的损伤。在需要高精度识别桥梁结构动力特性时，可以采用此方法。激振力的类型包括：（1）正弦激励：外加力随时间的变化严格依照简谐规律。这些试验的优点是激励能量在同一时刻集中在同一模态,从而产生相对高幅值的响应。（2）随机激励：外加力依平稳随机规律随时间变化，激起结构的不同模态。（3）脉冲激励：脉冲激励包括动态作用的应用（牵拉并快速释放、冲击荷载、使用液压振动发生器等），它用于使结构产生自由振动。

跑车和跳车试验分为车桥耦合振动部分和桥梁自由振动部分，试验要记录从车辆开始运动到车辆驶离桥梁后桥梁自由振动完全停止全过程数据。要记录车辆开始启动和离开桥面的时间为后续模态识别提取对应数据提供基准。

4.2.5 运营模态测试采用环境激励，运营模态识别是指在桥面交通荷载较少或无交通荷载以及桥址附近无规则振源的情况下，通过测定桥梁由风荷载、地脉动、水流等随机激励引起的微幅振动来识别结构自振特性参数的方法。该方法需对采集的长样本信号进行能量平均，以便消除随机因素的影响。对悬索桥、斜拉桥等自振频率较低的桥型，为保证频率分辨率和提高信噪比，采集时间一般不小于 30 min。环境激振法更适合大跨柔性桥梁。

4.3 测试工作准备

4.3.2 为获得高精度模态参数，中小跨径桥梁可选用激振器进行单点激振。电液式或机械式激振器体积小、质量轻、低频性能好，适用于桥梁激振。

4.3.5 选用屏蔽电缆并与其他电缆保持必要距离的原因在于避免额外噪声。

4.3.7 为保障测试系统供电的稳定性，可在供电设备输出端加设不间断电源系统（Uninterruptible Power Supply, UPS）。

4.4 现场测试实施

4.4.1 两次激励之间应不相互影响，即两次激励的时间间隔应大于桥梁响应信号衰减至初始最大值 5%所需时间，按桥梁阻尼比为 0.5%，桥梁频率为 0.5 Hz 计算，则桥梁响应信号衰减至初始最大值 5%所需时间约 190 s，故规定时间间隔应大于 200 s。

5 模态参数辨识

5.1 一般规定

5.1.3 结构的模态质量 M_r 又称为结构的第 r 阶广义质量,反映了结构质量在第 r 阶模态振型中的参与程度,定义为第 r 阶振型向量的转置 $\boldsymbol{\varphi}_r^T$ 、结构质量矩阵 \mathbf{M} 和第 r 阶振型向量 $\boldsymbol{\varphi}_r$ 的乘积,如下式:

$$M_r = \boldsymbol{\varphi}_r^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_r \quad (\text{附 5.1.3-1})$$

5.2 数据预处理

5.2.3

1 输入输出数据相干函数 $\gamma^2(\omega)$ 定义为激励和响应信号的互功率谱 $G_{ux}(\omega)$ 的平方除以激励信号自功率谱 $G_{uu}(\omega)$ 和响应信号自功率谱 $G_{xx}(\omega)$ 的乘积,如下式:

$$\gamma^2(\omega) = \frac{|G_{ux}(\omega)|^2}{G_{uu}(\omega)G_{xx}(\omega)} \quad (\text{附 5.2.3-1})$$

2 外因输入自回归模型法用于识别具有成对输入输出测量之间的时间延迟,也就是适用于有人工激励的结构模型,其可表示为:

$$x_j(t_m - \tau_j) + \sum_{i=1}^{n_a} a_i x_j(t_m - \tau_j - i\Delta) = \sum_{i=0}^{n_b} b_i u_g(t_m - t_0 - n_k \Delta - i\Delta) + \varepsilon'_j(t_m - \tau_j | t_0) \quad (\text{附 5.2.3-1})$$

式中: x_j ——输出响应

u_g ——输入激励

- Δ ——采样间隔；
- n_k ——考虑采样间隔倍数的时间延迟；
- ε_j' ——考虑 t_0 的误差项；
- t_0 ——输入激励与输出响应间的时间延迟；

5.3 工作模态参数识别

5.3.5 稳定图是在模态识别中假定不定的模型阶次，采用模态识别方法分别识别各阶次模型下的模态参数，将识别结果绘制在以频率为横坐标，模型阶次为纵坐标的二维坐标图中。若随着模型阶次的增加，稳定图中的频率点持续存在，则这些点既有可能表示结构模态。智能算法用于从稳定图中自动筛选可能的结构模态，并自动给出模态参数辨识值。

5.4 实验模态参数识别

5.4.1 实验模态参数识别法包括行车激振动法和起振机激振法等。行车激振法是利用车辆驶离桥面后引起的桥梁结构余振信号识别结构模态参数的方法，对小阻尼桥梁效果较好；起振机激振法是利用起振机采集可控的定点正弦激励或正弦扫描激励使结构产生稳态振动，并同时利用结构振动和激励信号进行模态参数识别的方法，在需要高精度识别桥梁结构模态参数时，可采用此方法。

5.4.2

1 采用频谱分析法时，用于分析的响应数据不应包含强迫振动成分。如采用行车余振激励时，应根据采集的加速度信号确定车辆驶离桥梁的准

确时刻(如图 5.4.2-1 所示), 以免将强迫振动当作自由振动进行处理, 截断的数据长度应满足频率分辨率的要求。

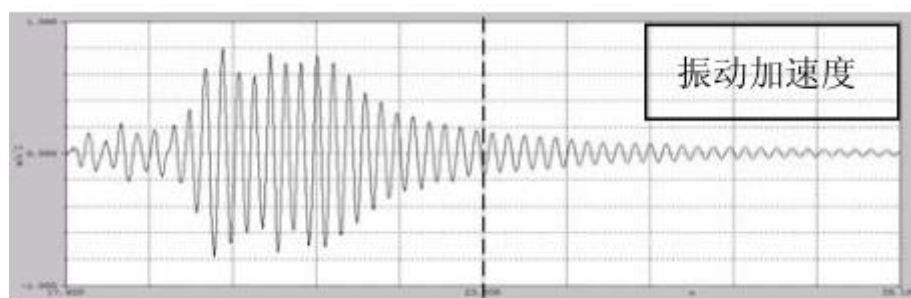


图 5.4.2-1 行车激励余振起始点确定 (注: 图等后续全规程格式确定后再重新绘制)

2 采用波形分析法时, 取若干周期自振波形, 通过时间坐标计算自振频率均值。当测试信号包括多阶自振信号叠加时, 应利用带通滤波进行信号分离, 得到单一频率的自振信号, 再进行频率计算, 如图 5.4.2-2 所示。

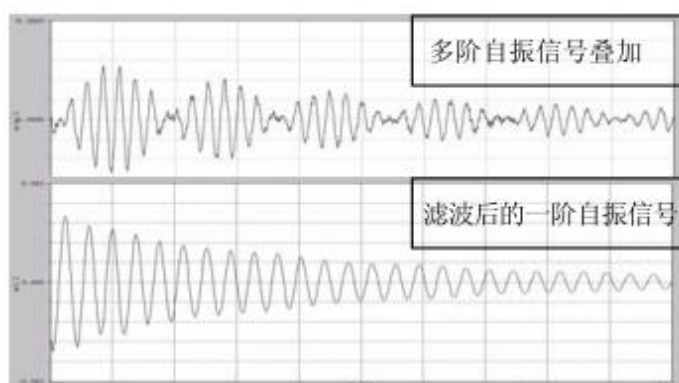


图 5.4.2-2 某桥多阶叠加自振信号的分离 (注: 图等后续全规程格式确定后再重新绘制)

3 采用跳车激振法时, 对于跨径小于 20m 的桥梁, 应按式 (附 5.4.2-1) 对实测桥梁自振频率进行修正:

$$f_0 = f \sqrt{\frac{M_0 + M}{M_0}} \quad (\text{附 5.4.2-1})$$

式中: f_0 和 f 分别为桥梁的自振频率和有附加质量影响的实测自振频率;

M_0 和 M 分别为桥梁在激振处的换算质量和附加质量。

桥梁的换算质量：通常用两个不同质量的突加荷载依次激振，分别测定自振频率 f_1 和 f_2 ，其附加质量为 M_1 和 M_2 ，可用式（附 5.4.2-1）求得换算质量 M 。

4 采用模态分析法时可采用专用软件，计算各阶自振频率。

5.4.3

1 采用波形分析法时，应先将包含多阶自振信号叠加的测试信号分离为单一频率的自振信号（如图 5.4.2-2），再按式（附 5.4.3-1）计算阻尼：

$$D = \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{A_i - A_i'}{A_{i+n} - A_{i+n}'} \quad (\text{附 5.4.3-1})$$

2 采用模态分析法时可采用专用软件，计算各阶模态阻尼。

5.4.4

1 ITD 法使用各测点的自由响应，通过三次不同延时的采样，构造自由响应采样数据的增广矩阵，根据自由响应的数学模型建立特征方程，求解出特征对后再估算模态参数。采用 ITD 法识别桥梁模态参数主要包括构造自由响应的数据矩阵、构造自由响应的增广数据矩阵、构造系统特征方程和估算模态参数四个步骤；

2 最小二乘复指数法通过多项式把非线性函数拟合为线性函数，结合最小二乘法计算出自由衰减响应的数学曲线，通过识别曲线特性获取振动系统的频率、阻尼和振型。采用最小二乘复指数法识别桥梁模态参数主要包括构造脉冲响应模型、构造 Prony 多项式、建立自回归模型和模态参数估算四个步骤；

3 特征系统实现法以脉冲响应函数为基本模型，通过构造广义 Hankel 矩阵，利用奇异值分解技术，得到系统的最小实现，从而得到最小阶数的

系统矩阵，进而识别系统的模态参数。采用特征系统实现法识别桥梁模态参数主要包括构造特征系统实现模型、构造广义 Hankel 矩阵、奇异值分解和估算模态参数四个步骤。

5.4.5 模态准则矩阵按照式（附 5.4.5-1）计算。

$$MAC(i, j) = \frac{(\Psi_i^T \Psi_j)^2}{(\Psi_i^T \Psi_i)(\Psi_j^T \Psi_j)} \quad (\text{附 5.4.5-1})$$

式中： Ψ_i 和 Ψ_j 分别为识别的第 i 阶和第 j 阶振型向量。

5.5 结果展示

5.5.4 模态辨识精度评价指标是表征模态识别结果可靠性的指标，主要使用的指标包括：

1 模态置信准则（Modal Assurance Criteria, MAC）

$$MAC_i = \frac{|\phi_i^T \tilde{\phi}_i|^2}{(\phi_i^T \tilde{\phi}_i)(\tilde{\phi}_i^T \phi_i)} \quad (\text{附 5.5.4-1})$$

式中： ϕ_i^T 和 $\tilde{\phi}_i$ 分别表示第 i 阶模态的试验振型与理论振型或者两种不同模态辨识方法所得的试验振型。

2 模态相位共线性指标（Modal Phase Collinearity, MPC）；

$$MPC_i = \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \right)^2$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{S_{xx} + S_{yy}}{2} \pm S_{xy} \sqrt{e^2 + 1}$$

$$e = \frac{S_{xx} - S_{yy}}{2S_{xy}}$$

$$S_{xx} = (\phi_i^{\text{real}})^T \phi_i^{\text{real}}, S_{yy} = (\phi_i^{\text{imag}})^T \phi_i^{\text{imag}}, S_{xy} = (\phi_i^{\text{real}})^T \phi_i^{\text{imag}}$$

式中： ϕ_i^{real} 和 ϕ_i^{imag} 分别表示第 i 阶的振型向量的实部与虚部。

3 稳定图 (Stabilization Diagram, SD)。在模态参数辨识中, 稳定图是分离结构物理模态和虚假模态的有力工具。稳定图的建立方式为: 坐标轴横坐标为频率, 坐标轴纵坐标为阶次值。利用稳定图进行模态辨识时需要对模型阶次进行假设, 且假设阶次要高于系统固有阶次, 通过计算得到物理模态及虚假模态。一般情况是随模型假设阶次递增, 物理模态作为真实模态, 始终保持稳定在一条轴上; 而通过计算出现虚假模态则随机离散出现, 散布于稳定图上, 不会出现类似于真实模态稳定轴。根据结构系统这个性质, 便比较直观在稳定图上区别开物理模态和虚假模态。根据工程经验, 系统假设的阶次取值越大, 在稳态图上反映的极点信息越全面, 防止出现漏掉的稳定极点, 也便于出现稳定轴; 但是阶次估值提高也带入了许多虚假的极点信息, 这样会给极点分离带来困难。这就要需要权衡估计阶次高低的利弊, 选取合适估计阶次。

4 变异系数 (Coefficient of Variation, COV)。变异系数是模态参数辨识结果不确定性的量化指标。变异系数的计算公式为: 变异系数 $CV = (\text{标准偏差 } SD / \text{平均值 } Mean) \times 100\%$ 。变异系数越大, 表明辨识结果的不确定性越大。

6 报告编制和资料归档

6.3 资料归档

6.3.3 如果建立了桥梁有限元模型，进行了桥梁模态分析和振动分析，则应该将有限元模型存档，将对应的结构有限元模态分析、振动分析、传感器优化分析等报告存档。激振设备信息包括激振源基本参数比如激振车辆总重、轴重、轴间距，车速等；采集设备信息包括设备类型、型号、基本参数、校准证明等；应保存采集的结构振动原始数据，并按一定规则命名。