UDC

中国土木工程学会标准

P T/CCES X－2024

桥梁健康状态数值分析技术规程

Technical specification on numerical analysis of bridge health condition

（征求意见稿-2023.12）

2024–XX–XX 发布 2024–XX–XX 实施

中国土木工程学会 发布

**中国土木工程学会标准**

桥梁健康状态数值分析技术规程

Technical specification on numerical analysis of bridge health condition

**T/CCES X－2024**

批准单位：中国土木工程学会

施行日期：2024年X月X日

2024 北 京

前 言

本规程是根据中国土木工程学会《关于发布<2022年中国土木工程学会标准计划（第二批）>的通知》（中土学标〔2022〕11号）的要求，由大连理工大学会同有关单位编制完成。

在本规程编制过程中，编制组广泛调查研究和总结了桥梁健康状态数值分析的经验，参考了国内外有关标准，并在广泛征求意见基础上，对具体内容进行了反复讨论、协调和修改，最后经审查定稿。

本规程的主要技术内容是：总则，术语、符号与参考标准，基本规定，桥梁结构数值建模，桥梁数值模型修正，桥梁健康状态评估，状态评估报告编制及有关的附录。

请注意本规程的某些内容可能涉及专利。本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国土木工程学会学术与标准工作委员会负责管理，由大连理工大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有修改意见或建议，请寄送大连理工大学（地址：大连市甘井子区凌工路2号，大连理工大学土木工程学院；邮政编码：116023；电子邮箱：shz@dlut.edu.cn）。

本规程主编单位：XXXX

本规程参编单位：XXXX

本规程主要起草人员：XXXX

本规程主要审查人员：XXXX

目 次

[1 总 则 5](#_Toc152139279)

[2 术语、符号及参考标准 6](#_Toc152139280)

[2.1 术 语 6](#_Toc152139281)

[2.2 符 号 7](#_Toc152139282)

[2.3 参考标准 8](#_Toc152139283)

[3 基本规定 9](#_Toc152139284)

[4 桥梁结构数值建模 10](#_Toc152139285)

[4.1 一般规定 10](#_Toc152139286)

[4.2 几何模型创建 10](#_Toc152139287)

[4.3 单元设置 10](#_Toc152139288)

[4.4 网格划分 12](#_Toc152139289)

[4.5 耦合与约束 12](#_Toc152139290)

[5 桥梁数值模型修正 14](#_Toc152139291)

[5.1 一般规定 14](#_Toc152139292)

[5.2 静力模型修正 14](#_Toc152139293)

[5.3 动力模型修正 16](#_Toc152139294)

[5.4 静动力联合模型修正 18](#_Toc152139295)

[5.5 子结构模型修正 18](#_Toc152139296)

[5.6 代理模型修正 19](#_Toc152139297)

[6 桥梁健康状态评估 21](#_Toc152139298)

[6.1 一般规定 21](#_Toc152139299)

[6.2 加载与求解 21](#_Toc152139300)

[6.3 结果提取 21](#_Toc152139301)

[6.4 服役状态评级 22](#_Toc152139302)

[6.5 评级结果展示 25](#_Toc152139303)

[7 状态评估报告编制 26](#_Toc152139304)

[附录A 单位制系统 27](#_Toc152139305)

[附录B 桥梁模型修正基本流程图 28](#_Toc152139306)

Contents

[1 General provisions 5](#_Toc152269652)

[2 Terms, symbols and reference standards 6](#_Toc152269653)

[2.1 Terms 6](#_Toc152269654)

[2.2 Symbols 7](#_Toc152269655)

[2.3 Reference standards 8](#_Toc152269656)

[3 Basic requirements 9](#_Toc152269657)

[4 Bridge numerical modeling 10](#_Toc152269658)

[4.1 General requirements 10](#_Toc152269659)

[4.2 Geometric model creation 10](#_Toc152269660)

[4.3 Element settings 10](#_Toc152269661)

[4.4 Element mesh 12](#_Toc152269662)

[4.5 Couplings and constraints 12](#_Toc152269663)

[5 Bridge numerical model updating 14](#_Toc152269664)

[5.1 General requirements 14](#_Toc152269665)

[5.2 Static model updating 14](#_Toc152269666)

[5.3 Dynamic model updating 16](#_Toc152269667)

[5.4 Joint static-dynamic model updating 18](#_Toc152269668)

[5.5 Substructure model updating 18](#_Toc152269669)

[5.6 Surrogate model updating 19](#_Toc152269670)

[6 Bridge health condition assessment 21](#_Toc152269671)

[6.1 General requirements 21](#_Toc152269672)

[6.2 Load and solve 21](#_Toc152269673)

[6.3 Export results 21](#_Toc152269674)

[6.4 Rate of operational condition 22](#_Toc152269675)

[6.5 Assessment results 25](#_Toc152269676)

[7 Condition assessment report 26](#_Toc152269677)

[Appendix A Unit system 27](#_Toc152269678)

[Appendix B Flow chart for bridge model updating 28](#_Toc152269679)

#  1 总 则

**1.0.1** 为规范桥梁健康状态数值分析工作，做到技术先进、程序合理、方法得当、结果可靠，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于基于数值模型的在役公路桥梁健康状态分析。

**1.0.3** 桥梁健康状态数值分析技术除应符合本规程的要求外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

**2 术语、符号及参考标准**

**2.1 术 语**

**2.1.1** 数值模型 numerical model

由一系列节点和单元构成的用来模拟实际结构的离散化模型。

**2.1.2** 几何模型 geometry model

根据分析对象的物理结构，由关键点、线、面和体创建的用于离散化的模型。

**2.1.3** 自由度 degree of freedom

确定结构几何状态所需的独立变量数目。

**2.1.4** 单元 element

由连续求解域离散而成的具有几何和物理属性的最小求解域。

**2.1.5** 网格划分 meshing

将模型分割为单元和节点的过程。

**2.1.6** 节点 node

单元之间的连接点。

**2.1.7** 耦合 coupling

考虑两个节点自由度之间的广义位移数值强制相等的设置。

**2.1.8** 约束 constraint

考虑单个节点自由度的广义位移值强制为给定数值的设置。

**2.1.9** 模型修正 model updating

利用桥梁静力或动力试验结果调整数值模型参数，使调整后的数值模型计算结果趋于试验值的过程。

**2.1.10** 静力模型修正 static model updating

利用桥梁静力试验结果调整静力数值模型参数，使调整后的数值模型静力计算结果趋于静力试验值的过程。

**2.1.11** 动力模型修正 dynamic model updating

利用桥梁动力试验结果调整动力数值模型参数，使调整后的数值模型动力计算结果趋于动力试验值的过程。

**2.1.12** 静动力联合模型修正 joint static-dynamic model updating

联合利用桥梁静力和动力试验结果调整数值模型参数，使调整后的数值模型静力和动力计算结果趋于静力和动力试验值的过程。

**2.1.13** 目标函数 objective function

静动力试验结果和数值模型相应计算结果构成的数学函数，用于量化二者的残差。

**2.1.14** 修正参数 updated parameter

数值模型中需要调整并能决定静力和动力计算结果的参数。

**2.1.15** 灵敏度 sensitivity

参数的单位变化导致的目标函数变化程度。

**2.1.16** 子结构模型修正 substructuring model updating

将桥梁整体结构划分为若干个独立的子结构，利用子结构模态参数和桥梁整体结构模态参数的关系，通过修正子结构数值模型参数来代替整体结构数值模型修正的过程。

**2.1.17**  代理模型修正 meta-model updating

通过数理统计和回归分析等方法建立桥梁数值模型关心部分的输出和输出关系近似数学模型，并利用该模型代替桥梁数值模型进行模型修正的过程。

**2.2 符 号**

——静力模型修正的目标函数；

——静力模型修正的目标函数；

——静动力联合模型修正的目标函数；

——静力的待修正参数向量；

——动力的待修正参数向量；

——静动力的待修正参数向量；

——静力模型的计算值组成的向量；

——静力试验的实测值组成的向量；

——静力模型修正权重矩阵；

——第个待选参数对静力目标函数的灵敏度；

——模态参数阶数；

——振型测点数；

——第阶实际测试频率；

——第阶动力模型计算频率；

——第个测点上第阶实际测试振型值；

——第个测点上第阶动力模型振型值；

——第阶频率权重值；

——第阶振型的权重值；

——实际测试频率与动力模型计算频率之间的误差；

——同阶振型模态置信准则；

——静力目标函数的权重系数；

——动力目标函数的权重系数。

**2.3 参考标准**

**1** 《橡胶支座 第3部分：建筑隔震橡胶支座》GB 20688.3

**2**  《公路桥梁伸缩装置》JT/T 327

**3** 《桥梁用黏滞流体阻尼器》JT/T 926

**4** 《公路桥梁技术状况评定标准》JTG TH21

**3 基本规定**

**3.0.1** 桥梁健康状态数值分析宜按数值模型建立、数值模型修正和健康状态评估的流程依次开展。

**3.0.2** 桥梁数值模型的建立及修正应符合下列规定；

**1** 数值模型建立应采用统一单位制，并宜按本规程附录A的规定选取；

**2** 数值模型中单元类型、单元网格划分、构件约束选取与荷载简化应根据桥梁结构体系特征确定；

**3** 数值模型建立后应根据现场试验测试数据进行修正。

**3.0.3** 桥梁数值模型建立和修正的软件应计算准确、稳定可靠、功能完善及操作方便。

**3.0.4** 桥梁健康状态数值分析前搜集的资料应包括：

**1** 勘察设计资料，包括：桥位地质钻探资料及水文勘测资料、设计计算书及图纸、变更设计计算书及图纸；

**2** 施工、监理、监控与竣工技术资料，包括：材料试验资料、施工记录、监理资料、施工监控资料、地基及基础试验资料、竣工图纸及说明、交工验收资料、交工验收荷载试验报告、竣工验收资料；

**3** 养护、试验检测、维修与加固资料，包括：桥梁检查及检测、荷载试验资料历次桥梁维修、加固资料、历次特别事件记载资料；

**4** 桥梁运营荷载资料，包括：交通量、交通组成、车重、轴重。

**3.0.5** 桥梁健康状态数值分析工作周期应符合下列规定：

 **1** 技术状况等级为1类或2类的桥梁，宜每年进行1次，最长不宜超过3年；

 **2** 技术状况等级为3类的桥梁，宜每年进行1次；

 **3** 技术状况等级为4类或5类的桥梁，宜每半年进行1次；

**3.0.6** 当桥梁遭遇突发事件后，宜立即进行桥梁健康状态数值分析。

**4 桥梁结构数值建模**

**4.1 一般规定**

**4.1.1** 桥梁结构数值模型的全局坐标系应选用笛卡尔直角坐标系，坐标轴宜沿桥梁顺桥向、横桥向和竖直方向定义，坐标轴正方向应符合右手法则。

**4.1.2** 桥梁结构数值建模应符合如下流程：

**1** 间接方式流程包括几何模型创建、单元设置、网格划分、耦合与约束设置；

**2** 直接方式流程包括单元设置、网格划分、耦合与约束设置。

**4.2 几何模型创建**

**4.2.1** 对于拱桥、斜拉桥和悬索桥，宜通过创建几何模型的方式进行数值建模。

**4.2.2** 几何模型应按照实际桥梁主体结构的尺寸和形状进行创建。

**4.2.3** 几何模型宜依次按照关键点、线、面和体的顺序进行创建，并应利用桥梁结构的对称性简化创建过程。其中，关键点应根据数值模型的单元设置进行规划，并应在桥梁结构形状转折处、各构件端点、不同构件相交处和边界约束处设置关键点。不同桥型的关键点宜参照表4.2.3的顺序进行设置。

**表4.2.3 关键点的设置顺序**

|  |  |
| --- | --- |
| 桥型 | 顺序 |
| 拱桥 | 拱→主梁→吊杆/吊索 |
| 斜拉桥 | 主塔→主梁→斜拉索 |
| 悬索桥 | 主塔→主缆→主梁→吊索 |

**4.2.4** 对于存在辅助设计软件实体模型的桥梁，几何模型可从辅助设计软件导入，并应检查模型的正确性。

**4.3 单元设置**

**4.3.1** 桥梁构件单元属性设置应包括材料属性、截面属性和单元类型。

**4.3.2** 分析中涉及材料非线性时，材料属性应输入弹性数据和塑性数据，否则应只输入材料的弹性数据。

**4.3.3** 桥梁构件截面属性设置应符合下列规定：

**1** 截面尺寸和形状应按设计图纸或实测值设置；

**2** 等截面构件的截面中心宜设置在质心，否则宜将截面偏心至截面边缘。

**4.3.4** 桥梁上部结构的单元类型应按照表4.3.4设置。

**表4.3.4 桥梁上部结构的单元类型设置**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 桥型 | 构件 | 单元选择原则 |
| 梁式桥 | 主梁 | 当关注整体力学行为时，应设置为由纵梁和横梁组成的梁格系，横梁和纵梁应采用空间梁单元 |
| 当关注局部力学行为时，应设置为壳单元或实体单元 |
| 拱桥 | 主拱 | 应设置为由折线近似的空间直梁单元或空间曲梁单元 |
| 横撑 | 应设置为空间梁单元 |
| 主梁 | 应设置为纵梁、横梁和桥面板组成的梁板系，横梁和纵梁应采用空间梁单元，桥面板宜采用板单元 |
| 拱上立柱 | 应设置为空间梁单元 |
| 吊杆 | 柔性吊杆应设置为桁架单元，刚性吊杆应设置为空间梁单元 |
| 斜拉桥 | 桥塔 | 应设置为空间梁单元 |
| 主梁 | 混凝土板梁宜采用空间梁单元 |
| 整体式箱梁应设置为鱼骨刺模型，纵梁和横梁应采用空间梁单元 |
| 分体式箱梁应设置为由两片纵梁组成的双主梁模式，纵梁和联结横梁应采用空间梁单元 |
| 钢桁架梁的主桁架、横向横向和平联应采用空间梁单元，桥面板宜采用板单元 |
| 钢-混凝土组合梁应设置为纵梁、横梁和桥面板组成的梁板系，纵梁和横梁应采用空间梁单元，桥面板宜采用板单元 |
| 斜拉索 | 垂跨比大于1:8，宜设置为索单元 |
| 垂跨比小于1:8，宜设置为考虑Ernst公式修正的桁架单元 |
| 悬索桥 | 桥塔 | 应设置为空间梁单元 |
| 主缆 | 应设置为索单元 |
| 主梁 | 同斜拉桥 |
| 吊索 | 应设置为桁架单元 |

**4.3.5** 桥墩和桩基础应设置为空间梁单元，承台宜设置为板单元。

**4.3.6** 附属设施宜设置为点质量单元，并添加至构件节点。

**4.4 网格划分**

**4.4.1** 桥梁各构件的网格划分应包括网格划分设置、网格细化和单元有效性检查。

**4.4.2** 网格划分设置应符合下列规定：

**1** 构件的转折点、交接点、截面突变点和约束位置应设置节点；

**2** 应力集中、构件截面突变和计算精度要求高的区域应细分单元；

**3** 从稀疏网格到密集网格的过渡划分，相邻单元的尺度比不宜高于2:1；

**4** 采用实体单元分析时，对于形状不规则的构件宜采用四面体单元进行自由网格划分，否则宜采用六面体单元进行映射网格划分；

**5** 关注构件的应力和变形时，单元划分的形态比宜分别小于3:1和10:1。

**4.4.3** 对初始网格划分的模型进行分析后，宜采用加密一倍的网格重新划分模型，如加密前后的结果误差小于0.1%，可认为网格密度已足够，否则应继续细化网格直至结果误差小于0.1%。

**4.4.4** 对于划分完成的网格，宜利用有限元软件的单元有效性检查模块进行校核。

**4.5 耦合与约束**

**4.5.1** 对于构件间存在连接关系但无共用节点的情况，应设置自由度耦合。对于受到固定或部分方向支承的构件，应设置节点约束。

**4.5.2** 考虑构件连接宜在局部坐标系下参考表4.5.2设置自由度耦合。其中，阻尼器应设置粘弹性连接，刚度、阻尼参数可参照现行行业标准《桥梁用黏滞流体阻尼器》（JT/T 926）选取；伸缩缝应设置弹性连接，刚度参数可参照现行行业标准《公路桥梁伸缩装置》（JT/T 327）选取。

**表4.5.2 考虑构件连接的自由度耦合**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 桥型 | 连接类型 | 轴向 | 平动 | 扭转 | 转动 |
| 面内 | 面外 | 面内 | 面外 |
| 梁桥 | 阻尼器 | √ | √ | √ | √ |  |  |
| 伸缩缝 | √ |  |  |  |  |  |
| 球铰节点 | √ | √ | √ | √ |  |  |
| 平面节点板 | √ | √ | √ | √ |  | √ |
| 斜拉桥 | 塔横梁-主梁（半漂浮） |  | √ |  | √ |  | √ |
| 拉索-主梁 | √ | √ | √ |  |  |  |
| 拉索-桥塔 | √ | √ | √ |  |  |  |
| 悬索桥 | 主缆-鞍座 | √ | √ | √ |  | √ | √ |
| 主缆-梁端 | √ | √ | √ |  |  |  |

**4.5.3** 漂浮体系斜拉桥的塔横梁和主梁之间不应设置自由度耦合，刚构体系斜拉桥的塔横梁和主梁应设置为刚性连接。

**4.5.4** 考虑构件的边界条件宜在全局坐标系下参考表4.5.4设置节点约束。其中，隔震支座应设置粘弹性约束，刚度、阻尼参数可参照现行国家标准《橡胶支座 第3部分：建筑隔震橡胶支座》（GB 20688.3）选取。

**表4.5.4 考虑构件边界条件的节点约束**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 桥型 | 连接类型 | 平动 | 转动 |
| 纵桥向 | 横桥向 | 竖向 | 扭转 | 面内 | 面外 |
| 梁桥 | 单向铰支座 |  |  | √ | √ |  |  |
| 双向铰支座 | √ | √ | √ | √ |  |  |
| 隔震支座 | √ | √ | √ |  | √ | √ |
| 梁端桥台 | √ |  | √ | √ |  |  |
| 悬索桥 | 主缆锚锭端 | √ | √ | √ |  |  |  |

**5 桥梁数值模型修正**

**5.1 一般规定**

**5.1.1**  桥梁数值模型修正类型应符合下列规定：

**1** 当桥梁需要进行静力性能评估时，宜采用静力模型修正；

**2** 当桥梁需要进行动力性能评估时，宜采用动力模型修正；

**3** 当桥梁需要同时进行静动力性能评估时，宜采用静动力联合模型修正。

**5.1.2** 桥梁模型修正的基本流程应包括目标函数构造、修正参数选择和优化算法选择三个基本要素，并且应符合下列规定：

**1** 目标函数中的数据应依据评估目的确定，宜采用模型计算值和试验实测值的残差构造，各类数值的权重宜依据测量精度和数据重要程度确定；

**2** 修正参数应选择对目标函数灵敏且存在建模误差的参数；

**3** 优化算法可采用梯度优化算法或智能优化算法。

**5.1.3** 桥梁数值模型超过十万个自由度时，宜采用子结构模型修正方法或代理模型修正方法。

**5.2 静力模型修正**

**5.2.1** 静力响应数据的选择宜按表5.2.1执行。

**表5.2.1 桥梁的静力响应数据**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 桥型 | 主要截面及静力响应 |
| 1 | 梁式桥 | （1）主梁*L*/4, *L*/2, 3*L*/4截面挠度和应变 |
| 2 | 拱桥 | （1）主拱*L*/4, *L*/2, 3*L*/4截面挠度和应变（2）拱脚截面应变（3）主梁*L*/4, *L*/2, 3*L*/4截面挠度和应变（4）吊杆索力 |
| 3 | 斜拉桥 | （1）主梁*L*/4, *L*/2, 3*L*/4截面的挠度和应变（2）主塔塔顶顺桥向水平变位（4）主塔塔脚截面应变（5）斜拉索最大拉力 |
| 4 | 悬索桥 | （1）主梁*L*/4, *L*/2, 3*L*/4和3*L*/8截面的挠度和应变（2）主塔塔顶顺桥向水平变位（3）主塔塔脚截面应变（4）吊索最大索力（5）主缆的最大拉力 |

注：*L*-桥梁计算跨径。

**5.2.2** 静力模型修正前，不同类型的响应宜按各自的最大值进行归一化处理。

**5.2.3** 静力模型修正的目标函数宜按式（5.2-1）和（5.2-2）确定：

 (5.2-1)

 (5.2-2)

式中：——静力的待修正参数向量；

——静力模型计算值和静力试验实测值的残差向量；

——静力模型的计算值组成的向量；

——静力试验的实测值组成的向量；

——静力模型修正权重矩阵。

**5.2.4** 静力模型修正权重矩阵中元素的值应根据以下原则确定：

**1** 权重矩阵元素所对应的参量较为重要时，宜采用较大的权重值；

**2** 权重矩阵元素所对应的参量测试精度较高时，宜采用较大的权重值，可取测量值标准差的逆为权重值。

**5.2.5** 静力模型修正参数宜根据灵敏度分析结果，选择对桥梁静力目标函数灵敏的参数，具体可参照表5.2.5。

**表5.2.5 不同结构形式桥梁的静力模型修正参数**

|  |  |
| --- | --- |
| 结构形式 | 修正参数 |
| 梁式桥 | 主梁边界条件；主梁截面尺寸和弹性模量 |
| 拱桥 | 主梁边界条件；拱肋截面尺寸和弹性模量；系梁等效截面尺寸和弹性模量；吊杆截面尺寸和弹性模量 |
| 斜拉桥 | 主梁边界条件；主梁等效截面尺寸和弹性模量；桥塔截面尺寸和弹性模量；斜拉索截面尺寸和弹性模量 |
| 悬索桥 | 鞍座边界条件；主梁边界条件；主梁等效截面尺寸和弹性模量；桥塔截面尺寸和弹性模量；主缆截面尺寸和弹性模量；吊杆截面尺寸和弹性模量 |

**5.2.6** 参数对静力目标函数的灵敏度宜按式（5.2-3）计算：

 (5.2-3)

式中：——第个待选参数对静力目标函数的灵敏度。

**5.2.7** 修正参数设置的修正范围宜参照表5.2.7进行选取。

**表5.2.7 参数的修正范围**

|  |  |
| --- | --- |
| 参数 | 修正范围（初始值倍数） |
| 边界条件 | 0.1 ~ 10 |
| 截面尺寸 | 0.9 ~ 1.1 |
| 钢结构弹性模量 | 0.8 ~ 1.2 |
| 混凝土弹性模量 | 0.7 ~ 1.3 |

**5.2.8** 目标函数与待修正参数之间关系非线性程度较弱时，模型修正迭代算法宜采用梯度优化算法，否则宜采用智能优化算法。

**5.2.9** 静力模型修正迭代计算终止条件宜符合下列规定：

**1** 修正收敛容差可取绝对值为10-6，相对值10-3；

**2** 规定迭代次数可取100次。

**5.2.10** 静力模型修正后，构件位移与实测值的误差宜小于3%；构件应变与实测值的宜小于5%；索力与实测值的误差宜小于5%。

**5.3 动力模型修正**

**5.3.1** 动力数据宜包括频率和振型。

**5.3.2** 动力模型修正的目标函数应按式（5.3-1）确定：

 (5.3-1)

式中：——动力的待修正参数向量；

——模态参数阶数；

——振型测点数；

，——第阶实际测试频率和动力模型计算频率；

，——第个测点上第阶实际测试振型值和动力模型振型值；

，——第阶频率和振型的权重值。

**5.3.3** 采用频率和振型修正模型前，宜通过以下方式对频率和振型的有效性进行判定：

**1** 同阶频率误差应小于±10%。实际测试频率与动力模型计算频率之间的误差应按式5.3-2计算：

 (5.3-2)

**2**  同阶振型模态置信准则（MAC）应大于0.9。实测振型向量与动力模型计算振型向量之间的MAC应按式5.3-3计算：

 (5.3-3)

**5.3.4** 动力模型修正参数宜根据灵敏度分析结果参照表5.3.4进行选取。

**表5.3.4 不同结构形式桥梁的动力模型修正参数**

|  |  |
| --- | --- |
| 结构形式 | 修正参数 |
| 梁式桥 | 静力模型修正参数；主梁密度 |
| 拱桥 | 静力模型修正参数；拱肋密度；系梁密度；吊杆密度 |
| 斜拉桥 | 静力模型修正参数；主梁密度；桥塔密度；斜拉索密度 |
| 悬索桥 | 静力模型修正参数；主梁密度；桥塔密度；主缆密度；吊索密度 |

**5.3.5** 参数对动力目标函数的灵敏度计算宜参考本规程5.2.6的规定。

**5.3.6** 修正参数的修正范围，密度可取初始值的0.8 ~ 1.2倍之间，其他参数的取值宜符合本规程5.2.7的规定。

**5.3.7** 动力模型修正权重值应根据以下原则确定：

**1** 低阶模态参数权重宜大于高阶模态参数权重，可取频率的逆为权重值；

**2** 频率权重宜大于同阶振型权重，可取频率权重为振型权重的5 ~ 10倍。

**5.3.8** 动力模型修正迭代算法应符合本规程5.2.8的规定。

**5.3.9** 动力模型修正迭代计算终止条件应符合本规程5.2.9的规定。

**5.3.10** 动力模型修正后，桥梁前三阶自振频率误差宜小于3%，其他阶频率误差宜小于5%；动力位移与实测值的误差宜小于5%；动力应变与实测值的误差宜小于10%。

**5.4 静动力联合模型修正**

**5.4.1** 动静力联合模型修正应将动静力响应数据归一化处理，宜在相同数量级。

**5.4.2** 静动力联合模型修正的目标函数应综合静力和动力测量数据，按式（5.4-1）确定：

 (5.4-1)

式中：——静动力的待修正参数向量；

——静力目标函数的权重系数；

——动力目标函数的权重系数。

**5.4.3** 静动力目标函数的权重系数应根据以下原则确定：

**1** 静动力目标函数的权重系数应保证静力响应目标函数值和动力响应目标函数值在同一个数量级；

**2** 静动力目标函数的权重系数应依据测试精度调整，可取测试数据标准差的逆为权重值；动力参量测试精度较高时，宜增大权重值；静力参量测试精度较高时，宜减小权重值。

**5.4.4** 修正参数宜根据静动力目标函数的灵敏度分析，选择对静动力联合目标函数灵敏的修正参数，具体宜参照本规程5.3.3的规定。

**5.4.5** 修正参数的修正范围宜符合本规程5.2.8和5.3.8的规定。

**5.4.6** 静动力联合模型修正迭代计算终止条件应符合本规程5.2.9的规定。

**5.4.7** 静动力联合模型修正后，计算值与实测值的的误差宜参考本规程5.2.10和5.3.10的规定。

**5.5 子结构模型修正**

**5.5.1** 子结构模型修正方法应将整体结构均匀划分为独立子结构，子结构大小宜小于十万个自由度。

**5.5.2** 子结构模型修正应采用动力数据，宜包括频率和振型。

**5.5.3** 子结构模型修正的目标函数应按式（5.3-1）确定，目标函数计算应符合以下原则：

**1** 应依据子结构频率和振型计算数值模型的频率和振型；

**2** 数值模型的频率和振型宜依据子结构模态综合法计算；

**3** 子结构划分界面处由两个子结构连接时，宜采用固定约束子结构模态综合法计算频率和振型；由三个及以上子结构连接时，宜采用自由约束子结构模态综合法计算频率和振型；

**4** 采用子结构模态综合法计算数值模型频率和振型时，子结构模态数量宜取整体数值模型计算模态阶数的2 ~ 3倍。

**5.5.4** 子结构修正模型前，宜参照本规程5.3.3对频率和振型的有效性进行判定，实测频率和振型宜参照本规程5.3.7进行归一化处理。

**5.5.5**  参数对目标函数的灵敏度计算宜参考本规程5.2.6的规定，且应符合以下规定：

**1** 应依据参数确定待修正子结构位置；

**2** 灵敏度应依据待修正子结构灵敏度矩阵计算；

**3** 灵敏度宜依据子结构模态综合法计算，方法及模态数量选取宜参考本规程5.3.2的规定。

**5.5.6** 子结构模型修正过程应符合下列规定：

**1** 应只对局部少数子结构实施模型修正；

**2** 应只对待修正的子结构计算频率和振型，非修正子结构频率和振型保持不变；

**3** 应只对待修正的子结计算频率和振型的灵敏度，非修正子结构频率和振型灵敏度为零。

**5.5.7** 修正参数的修正范围参照本规程5.3.6的规定。

**5.5.8** 动力模型修正迭代算法应符合本规程5.2.8的规定。

**5.5.9**  动力模型修正迭代计算终止条件应符合本规程5.2.9的规定。

**5.6 代理模型修正**

**5.6.1** 代理模型修正根据不同模型修正类型，响应数据应符合本规程5.2.1、5.3.1和5.4.1的规定，目标函数应符合本规程5.2.2、5.3.2和5.4.2的规定，修正参数应符合本规程5.2.5、5.3.4和5.4.4的规定。

**5.6.2** 代理模型应综合应用数理统计和数据拟合方法建立桥梁修正参数与结构响应的近似关系模型。

**5.6.3** 代理模型应包含试验设计、模型选择和模型建立三个部分，并应符合以下规定：

**1** 试验设计宜采用全因子设计法、中心复合设计法或拉丁超立方设计法建立代理模型需要的模型修正参数集合，并应利用数值模型计算该集合对应的结构响应；

**2** 代理模型宜选择响应面模型、高斯过程模型或人工神经网络模型；

**3** 代理模型的模型参数应利用样本数据进行估计，并应建立桥梁修正参数与结构响应的近似关系模型。

**5.6.4** 代理模型的精度应采用验证样本集合进行评价，代理模型预测值和样本真实值的相对误差不宜大于5%。

**5.6.5** 代理模型修正应利用所建立的输入和输出近似关系模型代替桥梁数值模型进行模型修正迭代计算。

**5.5.7** 代理模型修正参数的修正范围参照本规程5.3.6的规定。

**5.5.8** 代理模型修正迭代算法应符合本规程5.2.8的规定。

**5.5.9**  代理模型修正迭代计算终止条件应符合本规程5.2.9的规定。

**6 桥梁健康状态评估**

**6.1 一般规定**

**6.1.1** 桥梁健康状态评估应按构件评估和整体评估的顺序进行。

**6.1.2** 桥梁健康状态评估内容应包括加载与求解、结果提取、服役状态评级和评级结果展示。

**6.2 加载与求解**

**6.2.1** 对于没有加固过的桥梁，应采用原设计标准的作用（或荷载）及其组合；否则应选用加固时所采用设计标准的作用（或荷载）及其组合。

**6.2.2** 作用（或荷载）及其组合可施加在几何模型上，也可施加在网格上。

**6.2.2** 静力模型求解宜选择直接解法或迭代解法，动力模型求解宜选择直接积分法或阵型叠加法。

**6.3 结果提取**

**6.3.1** 分析结果可根据数值分析类型提取动力特性参数和构件响应。

**6.3.2** 动力特性参数宜选择频率，频率的阶次宜符合表6.3.2的规定。

**表6.3.2 桥梁结构频率阶次表**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 桥型 | 梁式桥 | 拱桥 | 斜拉桥 | 悬索桥 |
| 简支梁桥 | 非简支的梁桥 |
| 计算阶次 | 1阶 | 3阶 | 3阶 | 9阶 | 9阶 |

**6.3.3** 桥梁构件响应的提取指标宜符合表6.3.3的规定。

**表6.3.3 构件响应提取指标表**

|  |  |
| --- | --- |
| 桥型 | 提取指标 |
| 梁式桥 | 主梁 | 各跨跨中应力、位移、转角、加速度和疲劳应力，支座顶端应力和转角，梁端转角。 |
| 桥墩 | 顶部位移、转角和加速度，底部应力。 |
| 支座 | 反力和水平剪切变形。 |
| 拱桥 | 主梁 | 各跨跨中应力、位移、转角、加速度和疲劳应力，支座顶端应力和转角，梁端转角，吊索锚固点应力。 |
| 主拱 | 拱顶位移、加速度、转角和应力，拱脚位移和应力。 |
| 吊索 | 索力、疲劳应力和振动幅值。 |
| 桥墩 | 顶部位移、转角和加速度，底部应力。 |
| 支座 | 反力和水平剪切变形。 |
| 斜拉桥 | 主梁 | 各跨跨中应力、位移、转角、加速度和疲劳应力，支座顶端应力和转角，梁端转角，斜拉索锚固点应力。 |
| 桥塔 | 塔顶位移和转角、塔和横梁连接处应力、塔和主梁连接处应力、钢与混凝土连接处应力和塔底应力。 |
| 斜拉索 | 索力、疲劳应力和振动幅值。 |
| 桥墩 | 顶部位移、转角和加速度，底部应力。 |
| 支座 | 反力和水平剪切变形。 |
| 悬索桥 | 主梁 | 各跨跨中应力、位移、转角、加速度和疲劳应力，支座顶端应力和转角，梁端转角，吊索锚固点应力。 |
| 桥塔 | 塔顶位移和转角、塔和横梁连接处应力、塔和主梁连接处应力、钢与混凝土连接处应力和塔底应力。 |
| 主缆 | 各跨跨中和塔顶处应力，各跨跨中和塔顶处位移。 |
| 吊索 | 索力、疲劳应力和振动幅值。 |
| 桥墩 | 顶部位移、转角和加速度，底部应力。 |
| 支座 | 反力和水平剪切变形。 |

**6.4 服役状态评级**

**6.4.1** 构件响应提取指标评级宜按表6.4.1-1 ~ 6.4.1-10进行。

**表6.4.1-1 应力评级标准**

|  |  |
| --- | --- |
| 级别 | 应力评级标准 |
| 差 | 应力比 > 1 |
| 良 | 0.8 < 应力比 ≤ 1 |
| 优 | 应力比 ≤ 0.8 |

注：应力比=有限元计算应力值/材料强度设计容许值。

**表6.4.1-2 位移评级标准**

|  |  |
| --- | --- |
| 级别 | 位移评级标准 |
| 差 | 位移比 > 1 |
| 良 | 0.8 < 位移比 ≤ 1 |
| 优 | 位移比 ≤ 0.8 |

注：位移比=有限元计算位移值/位移设计容许值。

**表6.4.1-3 主梁加速度评级标准**

|  |  |
| --- | --- |
| 级别 | 主梁加速度（$m/s^{2}$） |
| 差 | > 0.5 |
| 良 | (0.315,0.5] |
| 优 | ≤ 0.315 |

**表6.4.1-4 拉索加速度评级标准**

|  |  |
| --- | --- |
| 级别 | 拉索加速度（$m/s^{2}$） |
| 差 | > 3 |
| 良 | (1,3] |
| 优 | ≤ 1 |

**表6.4.1-5 反力评级标准**

|  |  |
| --- | --- |
| 级别 | 反力评级标准 |
| 差 | 反力比 ≤ 0.7或 > 1.4 |
| 良 | 1.1 < 反力比 ≤ 1.4 |
| 优 | 0.7 < 反力比 ≤ 1.1 |

注：反力比=有限元计算反力值/反力设计容许值。

**表6.4.1-6 索力评级标准**

|  |  |
| --- | --- |
| 级别 | 索力评级标准 |
| 差 | 索力比 > 15% |
| 良 | 10% < 索力比 ≤ 15% |
| 优 | 索力比 ≤ 10% |

注：索力比=|有限元计算索力值-成桥索力值|/成桥索力值×100%。

**表6.4.1-7 疲劳应力评级标准**

|  |  |
| --- | --- |
| 级别 | 疲劳应力评级标准 |
| 差 | 疲劳应力比 > 1 |
| 良 | 0.8 < 疲劳应力比 ≤ 1 |
| 优 | 疲劳应力比 ≤ 0.8 |

注：疲劳应力比=有限元计算疲劳应力值/疲劳应力设计容许值。

**表6.4.1-8 水平剪切变形评级标准**

|  |  |
| --- | --- |
| 级别 | 水平剪切变形评级标准 |
| 差 | 水平剪切变形比 > 1 |
| 良 | 0.8 < 水平剪切变形比 ≤ 1 |
| 优 | 水平剪切变形比 ≤ 0.8 |

注：水平剪切变形比=有限元计算水平剪切变形值/水平剪切变形设计容许值。

**表6.4.1-9 振动幅值评级标准**

|  |  |
| --- | --- |
| 级别 | 振动幅值评级标准 |
| 差 | 振动幅值比 > 1 |
| 良 | 0.8 < 振动幅值比 ≤ 1 |
| 优 | 振动幅值比 ≤ 0.8 |

注：振动幅值比=有限元计算振动幅值值/振动幅值设计容许值。

**表6.4.1-10 频率变化评级标准**

|  |  |
| --- | --- |
| 级别 | 频率变化评级标准 |
| 差 | 频率变化率 > 10% |
| 良 | 5% < 频率变化率 ≤ 10% |
| 优 | 频率变化率 ≤ 5% |

注：频率变化率=$max\left(\frac{\left|f\_{1}^{计算}−f\_{1}^{原始}\right|}{f\_{1}^{原始}},\frac{\left|f\_{2}^{计算}−f\_{2}^{原始}\right|}{f\_{2}^{原始}},\cdots ,\frac{\left|f\_{n}^{计算}−f\_{n}^{原始}\right|}{f\_{n}^{原始}}\right)×100\%$，$f\_{i}^{计算}$表示有限元计算的第*i*阶频率值，$f\_{i}^{原始}$表示设计计算或成桥测试的第*i*阶频率值，$i=1,2,\cdots ,n$，*n*的取值按表6.3.2。

**6.4.2** 构件服役状态评级应根据表征构件的所有响应提取指标的区间确定，宜按表6.4.2进行。

**表6.4.2 构件服役状态评级标准**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 级别 | 评级标准 | 颜色标识 |
| 差 | 响应提取指标评级结果为差的数量大于等于1。 | 红色RGB（255，0，0） |
| 良 | 响应提取指标评级结果为良的数量大于等于1且响应提取指标评级结果为差的数量等于0。 | 黄色RGB（255，255，0） |
| 优 | 响应提取指标评级结果均为优。 | 绿色RGB（0，255，0） |

**6.4.3** 整体结构健康状态评级宜采用层次分析法进行综合评分计算，评级标准宜按表6.4.3确定。

**表6.4.3 整体结构健康状态评估标准**

|  |  |
| --- | --- |
| 级别 | 评级标准 |
| 差 | $综合评分\leq $75 |
| 良 | 75 < 综合评分 ≤ 90 |
| 优 | 综合评分$ > $90 |

**6.5 评级结果展示**

**6.5.1** 评级结果展示内容应包括构件响应指标和服役状态评级结果。

**6.5.2** 构件响应指标展示的内容应包括6.3.3条列出的构件响应指标，并以列表形式在文档中给出。

**6.5.3** 构件服役状态评级结果宜按6.4.2节规定的颜色在桥梁整体结构图中进行展示，并以列表形式在文档中给出。

**6.5.4** 整体结构服役状态评级结果宜以文字形式在文档中给出。

**7 状态评估报告编制**

**7.0.1** 桥梁经过健康状态数值分析后应撰写桥梁状态评估报告，报告应包括封面、目录、正文和附录。

**7.0.2** 封面应包括测试项目名称、项目委托单位、项目承担单位、项目负责人、报告编号、报告总页数和报告日期。

**7.0.3** 正文应包括工程概况、状态评估目的及依据、桥梁结构数值建模、桥梁数值模型修正和桥梁健康状态评估。

**7.0.4** 工程概况应包括评估对象的桥梁名称、建成时间、设计标准和规范名称、结构形式、设计要点、主要材料、技术状况、病害成因、使用荷载和养护维修记录信息，应给出清晰的桥梁结构整体外貌照片，以及附有结构尺寸的桥梁立面图、平面图和横断面图。

**7.0.5** 状态评估目的及依据应包括工作目的，所依据的技术标准、桥梁设计资料、运维资料、加固和改造资料。

**7.0.6** 桥梁结构数值建模应绘制单元设置列表，应给出数值模型三视图和网格划分变化处示意图，宜绘制耦合与约束设置列表。

**7.0.7** 桥梁数值模型修正应包括数值模型修正方法选择和修正结果误差。

**7.0.8** 桥梁健康状态评估应包括采用的荷载及其组合、求解方法选择、状态指标结果提取和服役状态评级结果，状态指标结果提取和服役状态评级结果应分别按本规程6.5.2条和6.5.3条的规定给出。

**7.0.9** 附录可包括正文说明、收集的相关资料和第三方证明。

# 附录A 单位制系统

**A. 0. 1**  表A.0.1给出了建立桥梁数值模型时推荐采用的单位制系统。

**表A.0.1 单位制系统**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 物理量名称 | 单位名称 | 单位符号 |
| 长度 | 毫米 | mm |
| 质量 | 千克 | kg |
| 时间 | 秒 | s |
| 温度 | 摄氏度 | oC |
| 力 | 牛顿 | N |
| 应力 | 兆帕 | MPa (N/mm2) |
| 力矩 | 牛顿毫米 | N∙mm |
| 密度 | 千克每立方毫米 | kg/mm3 |
| 位移 | 毫米 | mm |
| 速度 | 毫米每秒 | mm/s |
| 加速度 | 毫米每二次方秒 | mm/s2 |
| 频率 | 赫兹 | Hz |

# 附录B 桥梁模型修正基本流程图

**B. 0. 1**  模型修正基本流程宜按图 B. 0. 1进行。



**图 B.0.1 桥梁模型修正基本流程**

# 本规程用词说明

  **1** 为便于在执行本规程条文时区别对待，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** 条文中指明应按其它有关标准执行时的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

#

**中国土木工程学会标准**

**桥梁健康状态数值分析技术规程**

T/CCES X－2024

条 文 说 明

**制订说明**

《桥梁健康状态数值分析技术规程》T/CCES XXX-2024，经中国土木工程学会2024年XX月XX日以XX号函文批准发布。

本规程制订过程中，编制组进行了桥梁数值建模与健康状态分析的调查研究，总结了我国桥梁健康监测领域的实践经验，同时参考了相关先进技术法规、技术标准。

为便于广大检测、设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，本规程编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。需要注意的是，本条文说明不具备与规程正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。

**目 次**

[3 一般规定 7](#_Toc152269593)

# 3 一般规定

**3.0.5** 根据《公路桥梁技术状况评定标准》（JTG TH21）的规定，确定桥梁技术状况等级。