

T/ITS

中国智能交通产业联盟标准

T/ITS 0060—2016

交通基础设施结构监测数据分析技术规范

Transportation infrastructure structure monitoring data analysis-
technology specification

2016- 11 - 23 发布

2017 - 01-01 实施

中国智能交通产业联盟 发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和符号	1
3.1 术语	1
3.2 符号	3
4 数据处理	4
4.1 一般规定	4
4.2 数据预处理	4
4.3 数据二次预处理	5
4.4 数据后处理	6
4.5 数据异常处理	6
4.6 数据处理结果	12
4.7 一般规定	17
5 结构损伤识别	17
5.1 一般规定	17
5.2 基于小波分析的结构损伤识别	18
5.3 有限元模型修正	20
6 安全预警	24
6.1 一般规定	24
6.2 损伤分类及预警	26
6.3 预警体系的建立	28
7 结构性能评估	29
7.1 一般规定	29
7.2 层次分析法	29
7.3 常权综合评估法	34
7.4 变权综合评估法	36
7.5 其它评估法	37

前 言

本标准定义了交通基础设施结构监测数据分析技术标准内容。

本标准按照T/ITS0060-2016给出的规则起草。

本标准由中国智能交通产业联盟提出并归口。

本标准于2016年12月首次发布，本次为首次发布。

本标准起草单位：南京智行信息科技有限公司、交通运输部公路科学研究院、南京大学、上海交通大学、同济大学、河海大学、北京市交通信息中心、四川省交通运输厅、江苏交通控股有限公司、江苏省交通运输厅公路局、江苏省南京市公路管理处。

本标准主要起草人：张全庚、洪卫星、陈贵海、李利军、方成、杨海霞、赵颖、鲁威、李斌、焦伟赟、宋向辉、张云、刘建峰、范双成、吴赞平、徐海虹、茅荃、徐泽敏、张兵、汪峰、闵剑勇、薛海、姜培源、刘云波、杨融、姚海波、李家伟、徐灵灵、贝新林、晏新宇、陈婷、许海燕、陈俊、于海燕。

引 言

为使交通基础设施结构监测数据分析技术能够按统一的标准进行说明和描述，特制定本标准。

为了保持标准的适用性与可操作性，各使用者在采标过程中，及时将对本标准规范的意见及建议函告南京智行信息科技有限公司，以便修订时研用。

地址：江苏省南京市雨花台区安德门大街 57 号，邮编：210012，电话：+86（25）5221 3978。

交通基础设施结构监测数据分析技术标准

1 范围

本标准规定了交通基础设施结构监测系统的数据处理、损伤识别、安全预警与结构性能评估的技术要求。

本标准适用于交通基础设施结构（包括桥梁、隧道、边坡、路基）监测系统的数据分析。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 50283 公路工程结构可靠度设计统一标准

GB 50330 建筑边坡工程技术规范

JTG B01 公路工程技术标准

JTG H10 公路养护技术规范

JTG H11 公路桥涵养护规范

JTG H12 公路隧道养护技术规范

JTG/T H21 公路桥梁技术状况评定标准

JTG D62 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范

JTG D70 公路隧道设计规范

JTG D30 公路路基设计规范

3 术语和符号

3.1 术语

3.1.1

结构监测 structural monitoring

由安装在结构上的传感器以及数据采集与传输、数据处理与管理等软硬件构成，对荷载与环境作用以及结构性能参数进行测量、收集、处理、分析，并对结构正常使用水平与安全状态进行评估和预警。

3.1.2

环境参数 environmental parameter

结构所在区域的自然环境参数，包括风、温度、湿度、降雨、下雪、雾霾等。

3.1.3

结构整体响应 structural global response

在荷载作用下结构整体的振动、位移、变形和转角等。

3.1.4

结构局部响应 structural local response

在荷载作用下结构构件局部的应变、裂缝、腐蚀、拉索索力、支座反力、基础冲刷等。

3.1.5

结构损伤 structural damage

引起结构性能降低的结构状态的不利变化。

3.1.6

损伤识别 damage identification

利用结构的监测响应数据来分析结构物理参数的变化，进而识别结构损伤的过程。

3.1.7

模态参数 modal parameter

结构的固有动力特性，包括结构固有频率、阻尼比和模态振型。按照模态参数是实数还是复数，分为实模态和复模态。

3.1.8

模态参数识别 modal parameter identification

对监测的结构响应及外部激励数据，采用模态识别方法获得结构模态参数。

3.1.9

时频分析 time frequency analysis

设计时间和频率的联合函数，并用它同时描述信号在不同时间和频率的能量密度或强度。

3.1.10

小波分析 wavelet analysis

充分利用小波同时具有时频分辨率的特点,描述信号在不同时间和频率的能量密度或强度,从而反映结构的损伤特性。

3.1.11

模型修正 model updating

通过改变有限元模型中的参数,使有限元计算结果与实际测量值尽可能接近的过程。

3.1.12

安全预警 safety warning

通过对监测系统采集的结构响应数据进行处理与分析,实时掌握、评估结构的运营状态,当结构状态出现异常时及时进行报警,根据异常情况发出相应的指令。

3.1.13

预警值 warning value

对结构运营环境、结构构件可能出现的不同程度异常或危险,所设定的各监测点设备的监测参数警戒值。

3.1.14

性能评估 performance assessment

通过监测数据分析结构当前的工作状态,并与相应的临界状态进行比较分析,评价结构的安全等级。

3.2 符号

$F(t)$ 输入的原始信号荷载

Φ 振型

$MAC(i)$ 模态保证准则

E 模态应变能

F'' 柔度曲率

$COMAC(k)$ 坐标模态保证准则

u_1 单元节点位移

$[M]$ 质量矩阵

$[C]$ 阻尼矩阵

$[K]$ 刚度矩阵

4 数据处理

4.1 一般规定

a) 数据处理应实现数据预处理、数据二次预处理和数据后处理功能，数据预处理宜采用数字滤波、去噪、截取和异常点处理等，数据后处理方式宜根据数据分析要求确定；

b) 平稳信号频谱分析宜采用离散傅立叶变换，非平稳信号宜采用时频域分析方法；

c) 频谱分析宜选择合适窗函数进行信号截断，以减少对谱分析精度的影响；

d) 时域变换宜利用自相关函数检验数据的相关性和混于随机噪声中的周期信号，宜利用互相关函数确定信号源位置，并检验受通道噪声干扰的周期信号；

e) 数据处理软件开发应实现数据备份、清除和故障恢复等功能。

为保证监测系统长期、有效的运行，建立数据管理规则：

a) 数据故障管理：保证系统具有实时数据自诊断功能，能够识别传感器失效、数据异常、子系统功能异常或系统异常等问题。针对具体的故障模式，及时进行分析并排除系统存在的问题；

b) 数据采集及存储管理：由于系统在无人职守条件下24小时连续运行，采集得到的数据通过网络进行远程传输。采集设备应具有基本的缓存，在数据传输失效时，就地存储监测数据，并确保故障排除后数据的连续性，同时确立定时对监测数据库进行备份的制度，使得系统或数据库发生故障时重建系统；

c) 数据的应用管理：结合统计分析的基本原理对数据进行各类分析，并对结构运营状况生成日报表、周报表、月报表、季报表、年报表等，形成档案信息。

4.2 数据预处理

预处理过程与数据采集、通讯、传输等操作并行进行，数据采集过程不因任何操作而间断（包括磁盘处理，除非用户干预），数据预处理操作也应能够连续、在线对实时数据进行处理。预处理操作主要进行基本的统计运算，如设定时段内的最大值、最小值、均值、方差、标准差、峭度、偏度等，计算结果作为初级预警的依据。

静、动态监测数据的时域分析是对实时监测的采集数据按照数理统计的方法计算相应时间段内的极值、平均值、有效值、均方值、方差、标准差等，计算结果作为初级预警的输入及评估模块调用，并向数据显示模块传送，同时存入处理后数据库中。

a) 极值：求出各个监测参数的最大值和最小值，可以查看数据是否有异常值。通过分析每个参数值的局部方差的变化趋势，可以部分反映结构的变化；

b) 平均值：监测系统所获得的数据值受很多方面的因素的影响(比如受天气、荷载、监测系统的运行情况等的影响)，有时单个的变量的值不能反映结构当时的状况，于是以结构参数或环境参数在不同的时间单位的平均值作为研究对象，这样就可以平滑数据，减小各种因素的影响；

c) 有效值：时变量的瞬时值在给定时间间隔内的均方根值，对于周期量，时间间隔为一个周期；

d) 标准方差：数据的标准方差是数据的一个重要数字特征，它反映了数据的离散程度。在数据规范化处理的过程中，要利用标准方差和平均值来计算数据的规范值。

4.3 数据二次预处理

这一过程在数据处理与控制服务器上完成，主要计算方法及流程如下图所示：

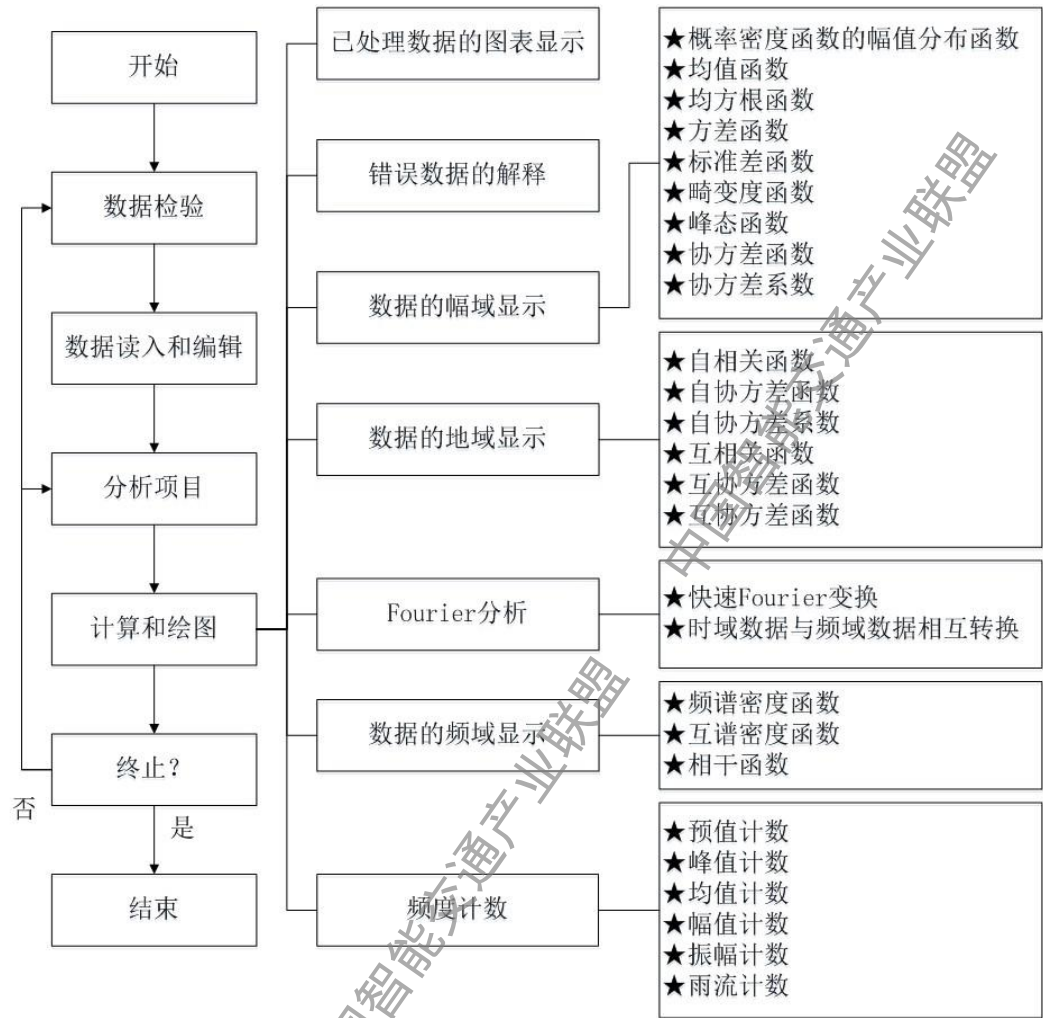


图 1 数据二次预处理计算方法及流程框图

4.4 数据后处理

主要进行监测数据的高级分析，如模态分析、结构特征量与环境因素之间的相关性分析、非线性回归分析等。软件平台应具有开放性，可以允许用户扩充处理方法，数据格式可以转换。由于这些方法常需占用一定的计算时间，这一过程往往离线进行，分析数据来自动态数据库和已备份的原始数据库。

4.5 数据异常处理

传感器与传输系统设备故障、接触故障、电磁干扰等造成采集的数据存在异常。为有效利用测试数据中所包含描述结构、监测系统状态的有用信息，需对结构监测数据进行调理以消除监测数据中所含不可避免的测试误差。结构监测中主要存在的数据异常包括：数据缺失、数据漂移、长周干扰、非一致异点、弱噪声干扰、无法消除的强噪声、其他难以快速识别和消除的数据异常。

4.5.1 数据缺失

根据数据文件的命名方式,可知该数据的开始采集时间 t_0 ,根据数据量 n 和采集频率 f ,可计算出采集结束时间 t_1 。将该数据量 n 与正常数据个数 N 进行对比,当 $n=N$ 时,判定该数据的数据量充足,将该数据另存在待处理数据文件夹中,且将 t_0 、 t_1 和 n 记录在数据预处理日志中;当 $n < N$ 时,该数据为不充足数据。当时 $kN \leq n \leq N(0 < k < 1)$ 时(k 定义为数据缺失因子,根据统计特性确定 k 值),该数据缺失(部分异常数据),将 t_0 、 t_1 和 n 记录在数据预处理日志中,将该数据另存在待处理数据文件夹中;当 $n \leq kN$ 时,该数据为全部异常数据,只在待处理文件夹的日志中保存该数据文件的部分信息。

在数据的后处理中,可以根据数据预处理日志对相关数据进行处理。对于某些因计算机时钟不精确导致数据缺失的文件,其开始时间和结束时间都是正常的,在后处理时可采用线性差值法将缺失的点补齐。

线性差值法:对于一组数据 $\{x(j)|j=1,2,3,\dots,n\}$,其中 $n < N$,通过任意连续两点 $(i, x(i))$, $(i+1, x(i+1))$ (其中 $i=1,2,3,\dots,n-1$)构造差值函数 $f_i(t) = [x(i+1) - x(i)]t - [ix(i+1) - (i+1)x(i)]$,其中 $i \leq t \leq i+1$,对于一组数据,所有两个连续点的差值函数为:

$$F(t) = \begin{cases} f_1(t) & 1 \leq t < 2 \\ f_2(t) & 2 \leq t < 3 \\ f_3(t) & 3 \leq t < 4 \\ \dots\dots\dots \\ f_{n-1}(t) & n-1 \leq t \leq n \end{cases}$$

在分段函数 $F(t)$ 上均匀取 N 个点,即 $t = 1 + \frac{n-1}{N-1}(k-1)$,产生的新数据组为 $y(k) = F(t)$,其中 $k=1,2,3,\dots,N$ 。将新数据 $\{y(k)|k=1,2,3,\dots,N\}$ 代替 $\{x(j)|j=1,2,3,\dots,n\}$,保存在待处理文件夹中。

4.5.2 数据漂移

在有漂移的数据文件中,某两个连续数据段的均值相差过大,且在这两个数据的前一段数据和后一段数据的均值差异也过大。因为在正常情况下,数据不会在短时间内突然增大很多。因此,识别与处理

数据异常的方法：计算所以连续两个数据值之间的差的绝对值 e ，并设定一个差阈值 $e_{\text{阈值}}$ ，当所有 $e < e_{\text{阈值}}$ 时，认为该数据正常，当 $e > e_{\text{阈值}}$ 时，记录差值超过阈值的数据序号 n_i ，直到数据结束。i 个数据序号 n_i 将该数据分成 $i+1$ 个数据段，分别计算每个数据段的均值，然后利用该均值减去正常数据的均值得到均值差，最后该数据段的每个数据都减去该均值差。将最终处理后的数据保存在待处理文件夹内，并在日志中记录该数据的相关信息。

4.5.3 长周干扰

数据长周干扰会导致数据文件记录的数据呈现出总体增长或下降的趋势。因为在正常情况下，数据不会在较长时间段内一直呈现出增长或下降的趋势。因此，识别与处理数据异常的方法：

根据数据文件中的所有数据，拟合一条直线 $f(i) = ai + b$ ，当该直线的斜率 a 在一定范围 $[a_1, a_2]$ 内时，认为该数据正常，没有长周干扰，当 a 超出该区域时，认为该数据异常，存在长周干扰。将该数据文件中的所有数据依次减去 $(f(i) - b)$ 。将正常数据和处理后的异常数据保存在待处理文件夹内。

4.5.4 非一致异常

数据跳点会导致数据文件记录的个别数据突然变大或变小，偏离大部分数据或均值。因此，识别与处理数据异常的方法：

计算所有数据与均值之间的差的绝对值，并设定一个差阈值，当所有绝对值小于差阈值时，认为该数据正常，当绝对值大于差阈值时，记录差值超过阈值的数据的位置，直到数据结束，记录所有情况下的数据位置，当出现绝对值大于差阈值的情况非常多，则认为该数据完全异常，当绝对值小于差阈值情况较少，则将该数据替换为正常数据的均值。将正常数据和处理后的异常数据文件保存在待处理文件夹内。

4.5.5 弱噪声干扰

(1) 小波降噪原理

小波分析的基本思想同傅里叶分析一致，都是用一族函数来表示信号，不同的是小波分析使用的小波函数通过母小波的伸缩和平移所构成。

对有限能量信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换为：

$$W_f(a, b) = \langle f, \varphi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

其通用重构公式为：

$$f(t) = \frac{1}{C_\varphi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db$$

若将子小波视作一滤波器，则小波变换是一个滤波过程。对离散序列 $s(k)$ ，设 $\varphi(\cdot)$ 是正交小波函数， $\phi(\cdot)$ 为对应的尺度函数；则式 (1) 变为离散二进正交小波变换

$$s(k) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} c_{i,j} \phi_{i,j}(k) + \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} d_{i,j} \varphi_{i,j}(k)$$

式中， i 为尺度参数； j 为平移参数； $d_{i,j}$ 为细节系数，反映各频段的高频成分； $c_{i,j}$ 为近似系数，反映原序列中的低频成分，定义如下

$$c_{i,j} = \sum_k s(k) \phi_{i,j}(k)$$

(2) 小波降噪的步骤

测试数据所含噪声的来源如下：一是由信号采集仪器和信号传输设备的热、磁、电效应引起，二是由观测误差引起；这两种噪声都属于随机白噪声。从多种信号中提取有用信号、去除无用信号称为信噪分离；有许多经典滤波和现代滤波的信噪分离方法，如维纳滤波、卡尔曼滤波、自适应滤波等。下面采用一个简单噪声模型来介绍小波分析滤波的一般思想。

一维含噪信号可表述如下：

$$x(t) = f(t) + \sigma \cdot n(t)$$

其中， $f(t)$ 为真实信号， $x(t)$ 为含噪声信号。

信号被噪声干扰的程度用信噪比 SNR 来衡量。对均值为零、方差为 σ_N^2 的正态分布白噪声，SNR 定义为：

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_s^2}{\sigma_N^2} \right)$$

其中 σ_s^2 为信号的方差， σ_N^2 为噪声的方差。信噪比越小说明噪声相对于信号所占比例越大，信号原本的特性越模糊。

有用信号通常表现为低频信号或较为平稳的信号，而噪声信号则通常表现为高频信号。所以一维信号消噪过程可分为如下三个步骤：

1) 一维信号的小波分解。选择一个小波并确定一个小波分解的层次 N ，然后对信号 $x(t)$ 进行 N 层小波分解；

2) 对小波分解所得高频系数的阈值进行量化。对第 1 到第 N 层的每一层高频系数选择一个阈值进行软阈值量化处理。

3) 一维小波的重构。根据小波分解第 N 层的低频系数、经过量化处理后的第 1 到第 N 层的高频系数进行一维信号的小波重构。

其中最关键的一步在于选取阈值和进行阈值的量化上；从某种程度上说，它直接关系到信号消噪的质量。在实际应用中，往往采用计算效果较好的“软阈值”。

(3) 小波系数阈值的确定

根据基本的噪声模型，阈值选取通常有 4 种方式：

1) Rigrsure 规则：基于 Stein 无偏估计原理的自适应阈值选取规则给定一个阈值 t ，得到它的似然估计，再将非似然 t 最小化就可得到所选阈值；这是一种软阈值估计器；

2) Sqtwolog 规则：一种固定阈值形式，所产生的阈值为 $\sqrt{2 \log_{10}[\text{length}(X)]}$ ，其中 $\text{length}(X)$ 为序列 X 的长度；

3) Heursure 规则：上述两种阈值的综合，所选的是最优预测变量阈值。如果信噪比很小，而 SURE 估计有很大的噪声，在这种情况下就需要采用固定的阈值形式；

4) 最小极大值规则：一种固定阈值的选取形式，所产生的是一个最小均方差的极值。

4.5.6 强噪声

采用功率谱密度对包含此类难以快速识别和消除的数据异常的时域实测数据进行频域变换，然后对峰值点比值波动、PSD分段峭度等频域特征提取方法进行研究，提取出异常数据的频域特征，进而快速识别出数据异常。

(1) 功率谱密度

能量谱密度的定义要求信号的傅里叶变换必须存在，也就是说信号平方可积或者平方可加。可积函数 $f(t)$ 的傅里叶变换计算公式如下：

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

常用来替换式错误!未找到引用源。的表示是功率谱密度 (PSD)，它定义了信号或者时间序列的功率如何随频率分布。PSD 的定义式如下：

$$PSD(\omega) = \frac{S_{xx}(\omega)}{2\pi}$$

其中，功率谱 $S_{xx}(\omega)$ 的定义式如下：

$$S_{xx}(\omega) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} R_{xx}(m) e^{-j\omega m / f_s}$$

上式中, $R_{xx}(m)$ 是数据 x 的自相关函数, j 是虚数单位更经常便于表示抽象的信号被定义为信号数值的平方。此瞬时功率(平均功率的中间值)可表示为: 由于平均值不为零的信号不是平方可积的, 所以在这种情况下就没有傅里叶变换。维纳-辛钦定理(Wiener-Khinchin theorem)提供了一个简单的替换方位, f_s 是采样频率。

(2) 频域特征提取方法

1) 峰值点比值波动提取方法

由于时域上没有异常的数据在频域内通常有明显的峰值且相邻峰值对应的频域数据之差相近, 而存在异常的数据没有此性质; 由此, 本项目组引入了峰值点比值波动指标, 并且对结构加速度数据的功率谱密度进行了计算, 总结得到如下统计规律:

设根据功率谱密度图形的峰值得到的各个峰值点为 f_1, f_2, \dots, f_n , 则峰值点比值波动指标 RF 的定义如下:

$$RF_i = \frac{f_{i+1} - f_i}{f_i}$$

式中, f_1, f_i 分别是第 1、第 i 个峰值点。

根据上式计算得到的 $RF_1, RF_2, \dots, RF_{n-1}$ 进行 4 个区间的划分: $[Min, Min+(Max-Min)/4]$ 、 $[Min+(Max-Min)/4, Min+(Max-Min)/2]$ 、 $[Min+(Max-Min)/2, Min+3(Max-Min)/4]$ 、 $[Min+3(Max-Min)/4, Max]$, 其中 $Min = \min(RF_1, RF_2, \dots, RF_{n-1})$, $Max = \max(RF_1, RF_2, \dots, RF_{n-1})$, 考察 $RF_1, RF_2, \dots, RF_{n-1}$ 分别落入 4 个区间内的个数 N_m 。若某一 N_m ($m=1, \dots, 4$) 满足如下条件: $N_m / n \geq 60\%$, 则说明加速度数据没有异常; 若任一 N_m ($m=1, \dots, 4$) 满足如下条件: $N_m / n < 60\%$, 则说明加速度数据存在异常。

2) PSD分段峭度提取方法

由于时域上没有异常的数据在频域内通常有明显的峰值且相邻峰值对应的频域数据之差相近, 而存在异常的数据没有此性质; 由此, 本项目组引入了可识别明显峰值的 PSD 分段峭度指标, 并且对结构加速度数据的功率谱密度进行了计算, 总结得到如下统计规律:

首先将 PSD 减去其均值, 然后将上式计算得到的功率谱 $PSD(\omega)$ 按照对应的频域范围进行 N_{frq} 个区段的划分, 然后计算每个区段上 PSD 的峭度 $Kurt_i$ ($i=1, 2, \dots, N_{frq}$):

$$Kurt_i = E(PSD^4) - 3(E(PSD^2))^2$$

式中, $E(\cdot)$ 是数学期望算子, 对实测数据采用均值进行计算。

考察由上式计算得到的 N_{frq} 个区段上的 $Kurt_i$ ($i=1, 2, \dots, N_{frq}$)，设 $Kurt_i$ 的绝对值 $|Kurt_i| > 50 \times 10^{-3}$ 的区段个数为 N_{Lrq} ，若 N_{Lrq} 满足如下条件： $N_{Lrq} / N_{frq} \geq 50\%$ ，则说明加速度数据没有异常；若 $N_{Lrq} / N_{frq} < 50\%$ ，则说明加速度数据存在异常。

4.6 数据处理结果

4.6.1 加速度数据

应对加速度时程数据进行处理以提供如下信息：

- a) 各测点的加速度响应时程；
- b) 各频率的加速度幅值，功率谱；
- c) 不同位置处加速度传感器的幅值及相位差；
- d) 竖向速度、扭转速度、位移和转角时程；
- e) 位移和转角幅值，预定时段内位移和转角的最大值和平均值；
- f) 结构的动态特性，如频率、阻尼比、振型、模态参与因子和模态能量转换率；
- g) 识别外部激励下引起的以某阶结构频率为主的简谐振动。

由实测加速度数据可导出索力、位移等参数，其要求及表达形式见表 1：

表 1 加速度数据导出参数及要求

导出参数及其要求	时间	表达形式			
		幅值域	时域	频域	频率计数
整体动力特性 1) 将频率、振型、阻尼比和模态参与因子制成表格 2) 绘出对应于所有实测频率的振型 3) 将实测/提取的结果和设计/理论值进行对比 4) 校正结构的分析模型	提取每个频率，最少需要 8 小时的数据。	X		X	
索力 1) 将实测索的频率和对应的索力制成表格 2) 将实测索力与设计值进行对比 3) 评估由于索的振动引起的主梁和塔的竖向和水平力	同上	X		X	
谱的绘制 1) 对于极端事件，如拥挤车流、季风和台风等 2) 桥面、塔顶、安装了传感器的索处的加速度、速度和位移谱	在事件发生期间	X		X	

表 1 加速度数据导出参数及要求(续)

导出参数及其要求	时间	表达形式			
		幅值域	时域	频域	频率计数
位移比的绘制 1) 绘出实测的最大位移与设计值之比	每月, 每年	X			

4.6.2 倾斜数据

- a) 各测点的倾角、变形时程;
- b) 每小时、每天、每月、每年的倾角统计值;
- c) 各测点变形与环境因素的关系曲线;
- d) 结合全球定位系统(GPS)的测量结果, 导出桥墩的几何变形曲线。

4.6.3 位移数据

- a) 主梁相对于桥墩的纵向位移时程;
- b) 每小时、每天、每月、每年相对位移统计值;
- c) 各测点相对位移与环境因素的关系曲线。

4.6.4 应变数据

- a) 应变、应力和内力的幅值;
- b) 应变、应力、内力的波动范围及其柱状图;
- c) 根据统计分布预测极值;
- d) 结构构件局部截面的应变、应力、内力设计值的设计验证, 组合应力作用下的影响面设计验证;
- e) 每小时、每天、每月和每年的应变幅值, 每天的变化幅度和累计的循环次数, 按照每天中特定的时间段进行分组, 并绘柱状图;
- f) 应变、应力、内力等与温度、风和交通荷载等的相关图。

由实测应变数据可导出应力比、疲劳应力幅等参数, 其要求及表达形式见下表:

表 2 变数据导出参数及要求

导出参数及其要求	传感器	表达形式			
		幅值域	时域	频域	频率计数
应力比的绘制 1) 绘出每月和每年的实测应力与设计值之比的变化	所有应变传感器	X			
疲劳应力幅的绘制 1) 绘出正交异性桥面板、索锚、伸缩缝处测点的应力谱(从第一年开始) 2) 利用 S-N 曲线和 Miner 法则评估疲劳寿命	电阻式应变片	X			X

4.6.5 腐蚀数据

对腐蚀传感器记录的数据进行处理后,需提供4个不同的报告:

a) 测量报告:表明腐蚀测量单元的阳极棒是否已有锈蚀出现,锈蚀开始的初始电压和电流值可由用户自己定义;

b) 详细报告:提供每组腐蚀测量单元(三个测点)的详细报告,包括阳极—阴极电压、5秒非平稳腐蚀电流的时程、相对湿度值(25℃温度校正的和未校正的)、阻抗和温度;

c) 自定义报告:用户可从菜单上选择需要显示的数据,数据以其随时间或深度变化的图形方式显示;

d) 总报告:根据腐蚀单元、相对湿度(RH)传感器、测量日期和测量类型,输出所有可能的结果。

4.6.6 空气温度和相对湿度数据

表 3 空气温度和相对湿度数据导出参数及要求

导出参数及其要求	传感器	表达形式			
		幅值域	时域	频域	频率计数
外部、内部空气温度和湿度 1) 原始数据的最大、最小和均值 2) 绘出安装了空气温湿度传感器的箱梁和塔截面外部 每小时，每天，每月和每年的空气温度变化 3) 绘出上述截面内部的温度变化 4) 绘出上述截面外部的湿度变化 5) 绘出上述截面内部的湿度变化	空气温度和湿度传感器	X			X

4.6.7 交通流量和交通荷载数据

表 4 交通数据导出参数及要求

导出参数及其要求	传感器	表达形式			
		幅值域	时域	频域	频率计数
1) 10 分钟平均的每个方向的总流量率 2) 每 10 分钟的轴重的频率分布 3) 每 10 分钟的车重的频率分布 4) 每 10 分钟的车重/车长的频率分布 5) 每 10 分钟的轴距的频率分布 6) 每 10 分钟的每车道每方向的不同车重等级的车流量 7) 基于最重车辆信息的极限荷载模型	WIM	X			X

4.6.8 风数据

对风数据进行二次预处理，要求得到如下表所示的导出参数。对某参数的要求列于该参数名称之下，该参数的表达形式(幅值域、时域、频域或频率计数)亦列于表中，以下皆同：

表 5 风数据导出参数及要求

导出参数及其要求	时间 / 传感器	表达形式			
		幅值域	时域	频域	频率计数
风玫瑰图	3 秒	X			X
1) 最大风速 - 风向	1 分钟	X			X
2) 位于桥面和塔顶处	10 分钟	X			X
3) 每月, 每年, 多年	1 小时	X			X
风攻角图	3 秒	X			
1) 仅对于季风和台风	1 分钟	X			
2) 风速 - 竖向风攻角	10 分钟	X			
3) 仅位于桥面处	1 小时	X			
风紊流强度图	10 分钟	X			
1) 仅对于季风和台风					
2) 风紊流强度 - 平均风速	1 小时	X			
3) 位于桥面和塔顶处					
风分量图	3 秒	X			
1) 仅对于季风和台风	1 分	X			
2) 平均风和脉动风分量	10 分	X			
3) 位于桥面和塔顶处	1 小时	X			
脉动风分量图	1 分钟		X	X	
1) 仅对于季风和台风	10 分钟		X	X	
2) 湍流尺度: 时间尺度和长度尺度					
3) 脉动风自功率谱					
4) 脉动风互功率谱	1 小时		X	X	
5) 位于桥面和塔顶处					
6) 与设计脉动风参数比较(如 Von Karman 和 ESDU 谱)					
风响应图	加速度计	X	X	X	
1) 对于季风和台风	GPS	X	X	X	
2) 对于风速 > 5m/s 的风					
3) 加速度、速度和位移与风速和风向的关系					
4) 关键构件的应变/内力与风速和风向的关系	应变传感器	X		X	X
5) 比较测量值与设计/预测参数(如从设计和风洞实验中得到的抖振响应)					

4.7 一般规定

数据处理应实现数据预处理、数据二次预处理和数据后处理功能，数据预处理宜采用数字滤波、去噪、截取和异常点处理等，数据后处理方式宜根据结构与信号特点采用不同的处理方式。

5 结构损伤识别

5.1 一般规定

5.1.1 结构损伤识别的原理

损伤引起结构性能（如刚度、质量、阻尼等）退化，导致结构力学特性（如模态、动力特性等）改变，降低了结构在服役期内的承载能力；通过识别结构力学特性的变化，来判断结构是否发生损伤、损伤的位置及损伤程度。

5.1.2 结构损伤识别的主要内容

- a) 损伤判断应给出结构是否发生损伤的明确判断，并对相应的阈值进行说明。
- b) 损伤定位宜针对局部损伤单元，最好满足两个条件：一是对局部损伤敏感；二是位置坐标的单调函数。
- c) 损伤类型及程度判断应明确发生损伤的类型，以及结构的损伤程度，应明确局部单元的损伤对整体结构刚度下降的影响程度。
- d) 损伤评估应结合疲劳分析与断裂力学理论，对结构损伤后的性能退化做出综合评估，对结构损伤后的剩余寿命做出预测。
- e) 结构完整性评价应考虑结构所处的环境状况，结合局部损伤与整体刚度变化，对结构是否适合继续工作给出建议。

5.1.3 结构损伤识别的方法

结构损伤识别方法大致分为三大类，即指纹分析和模式识别法、系统识别与模型修正方法以及神经网络方法。结构损伤识别的主要方法如下图所示：



图 2 结构损伤识别方法

单一的动力指纹不能准确有效地定位损伤，通过灵敏度分析，即对比结构试验模态参数的变化与理论有限元分析的模态参数的灵敏度，以提高动力指纹分析方法的灵敏性。

5.2 基于小波分析的结构损伤识别

5.2.1 基于小波分析的结构损伤识别流程

(1) 第一阶段，损伤预警，即发出结构可能发生损伤的指示。随着结构长期监测系统的运行，动态地应用小波变换对实时采集的信号进行滤波和去噪，得到信噪比较高的测试数据。然后通过小波多分辨率分析把数据信号分解到不同尺度上对信号进行时频分析，从不同尺度分解信号的分析中得到在原始信号中无法表达出的结构系统参数变化信息。从而在结构系统有异常时，及时发出损伤预警，并给出可能发生的损伤的时间信息。这种损伤预警方法是在线进行的，无需进行复杂的结构计算，效率很高。

(2) 第二阶段, 损伤确认, 即检验损伤预警是否真实。以小波包变换的特征向量为输入, 设计一个能动态地映射损伤状态的模式分类器, 然后以第一阶段的损伤时间信息以后的测试数据信号为研究对象, 通过小波包特征提取和模式分类器来确定结构系统参数是否真正发生了变化, 进行损伤事件的确认, 从而验证损伤预警信息。

(3) 第三阶段, 损伤定位。得到损伤确认的信息以后, 通过一个基于小波包特征向量的损伤位置模式分类器来实现对损伤的定位, 损伤定位的模式分类器不同于损伤确认的模式分类器, 损伤确认只需对整个结构未损和损伤两种状态分类, 而这一阶段需要给出构件级的损伤与否的分类。

(4) 第四阶段, 损伤定量, 即确定结构损伤的程度。在得到损伤定位的信息以后可以针对损伤构件, 选择一个基于小波包特征向量的模式分类器(如神经网络、支持向量机)来对构件的损伤程度进行判断, 该损伤程度分类器的映射能力要求能够达到定量级的精度。

基于小波多尺度分析理论, 结合模式识别及信息融合的结构损伤识别的流程如下图所示:

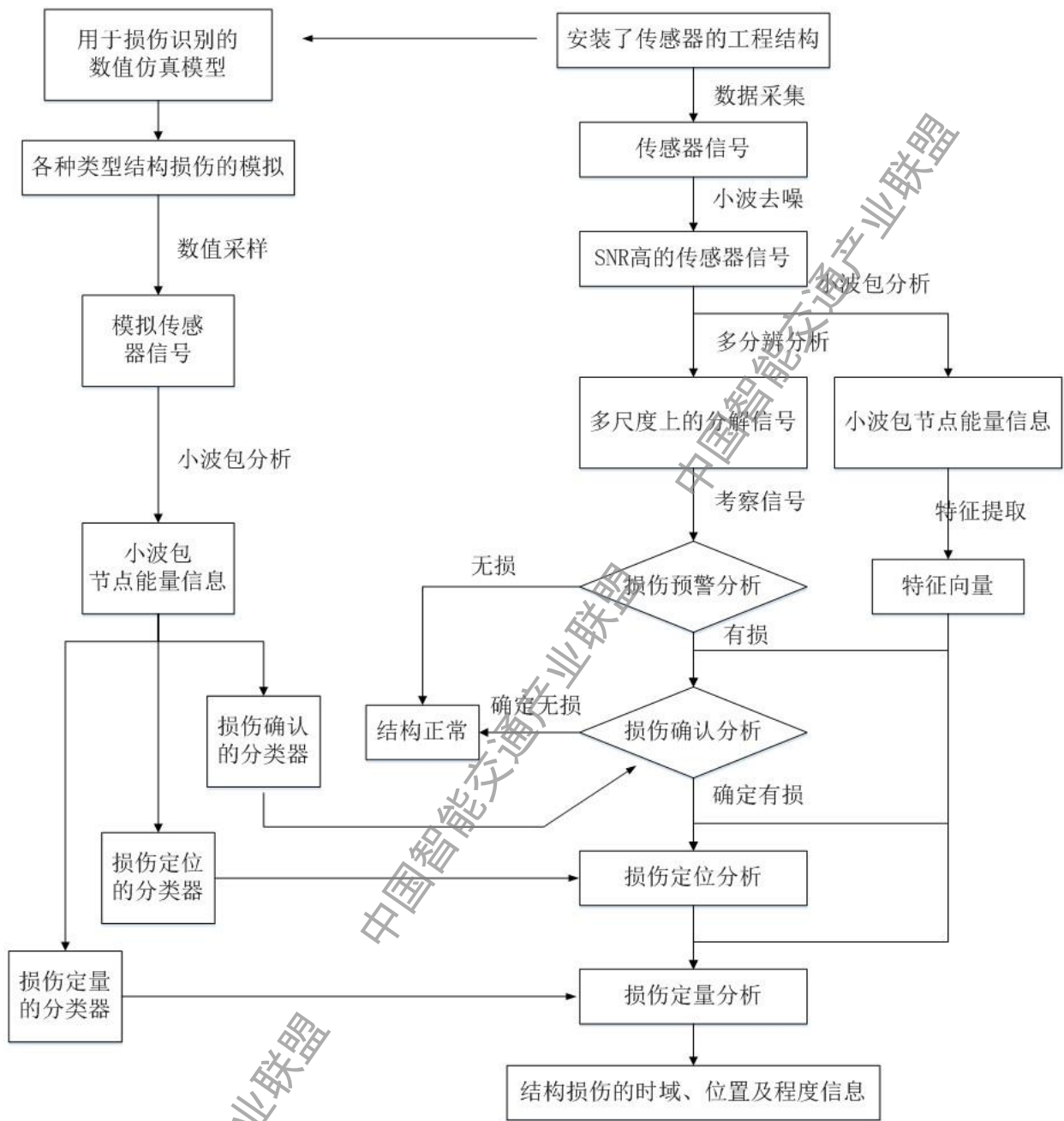


图 3 基于小波分析的结构损伤识别流程

5.3 有限元模型修正

根据结构损伤分析结果修正相应构件的刚度，当结构损伤降低材料强度时，应修正构件的允许承载力。

假定在结构监测中，有 m 个测试数据(如频率、振型或者模态曲率等)、有 n 个潜在的影响测试数据数值的因素(刚度特性、边界条件等)，在参数识别中的两组数据可分别记为：

$$R = [R1, R2, \dots, Rm]^T$$

$$P = [P_1, P_2, \dots, P_n]^T$$

其中, R 为测试的动力参数矩阵, P 为结构参数矩阵。则参数识别可分三步进行, 即敏感性分析、参数的迭代更新和收敛准则的建立。

(1) 参数敏感性分析

如果敏感参数的数目为 n 个, 需要进行 $n+1$ 次有限元分析, 第一次分析为在结构的初始参数情况下进行, 下面的 n 次分析是分别针对 n 个待识别的参数进行的。当给与第 j 个结构参数 P_j 一个小量的偏度值 ΔP 对第 i 个响应参数 R_i 的影响采用泰勒级数方法展开可得

$$R_i(P_j + \Delta P_j) = R_i(P_j) + \frac{\partial R_i}{\partial P_j}(P_j) \Delta P_j + O^2(\Delta P_j)$$

忽略高阶微分的影响, 并记下应值的变分为, 则

$$\delta R_i \cong R_i(P_j + \Delta P_j) - R_i(P_j)$$

那么 P_j 对 R_i 的敏感参数 S_{ij} 为

$$S_{ij} = \frac{\delta R_i}{\delta P_j} = \frac{R_i(P_j + \Delta P_j) - R_i(P_j)}{\Delta P_j}$$

则敏感性矩阵可记为

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & \dots & S_{1j} & \dots & S_{1n} \\ S_{i1} & \dots & S_{ij} & \dots & S_{in} \\ S_{m1} & \dots & S_{mj} & \dots & S_{mn} \end{bmatrix}$$

(2) 参数迭代更新

通过参数更新进行识别, 可由求在限制条件为 $\Delta R = S \Delta P$ 关于结构参数和相应参数的罚函数的极小值的求解来实现。对于每一个结构参数, 其上限和下限也作为限制条件来设定, 罚函数的表达形式为

$$J(\Delta P, \Delta R, W_P, W_R) = \Delta R^T \cdot W_R \cdot \Delta R + \Delta R^T \cdot W_T \cdot \Delta P$$

式中, W_P , W_R 分别为结构参数和响应参数的权值矩阵。

那么, 参数更新的计算如下

$$P_{j+1} = P_j + G \cdot (R_0 - R_j)$$

其中, R_0 为响应目标值, 即试验实测的响应参数矩阵; G 为更新变换参数, 用下述方法计算

当 $m > n$ 时, $G = (W_P + S^T W_R S)^{-1} S^T W_R$

当 $n > m$ 时, $G = W_P^{-1} S^T (W_P^{-1} + S W_P^{-1} S^T)^{-1}$

(3) 收敛准则

如果响应为频率 f , 其迭代收敛准则采用如下方式规定:

$$CC_{abs,k} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|f_{0,i} - f_{k,i}|}{f_{0,i}}$$

式中, $CC_{abs,k}$ 为第 k 迭代步的频率值相对偏差, $f_{0,i}$ 为实测第 i 阶自振频率, $f_{k,i}$ 理论计算的第 i 阶自振频率。

(4) 参数识别流程

参数识别的实施需要通过调用有限元计算程序的调用来实现, 参数识别的流程图如下图所示:

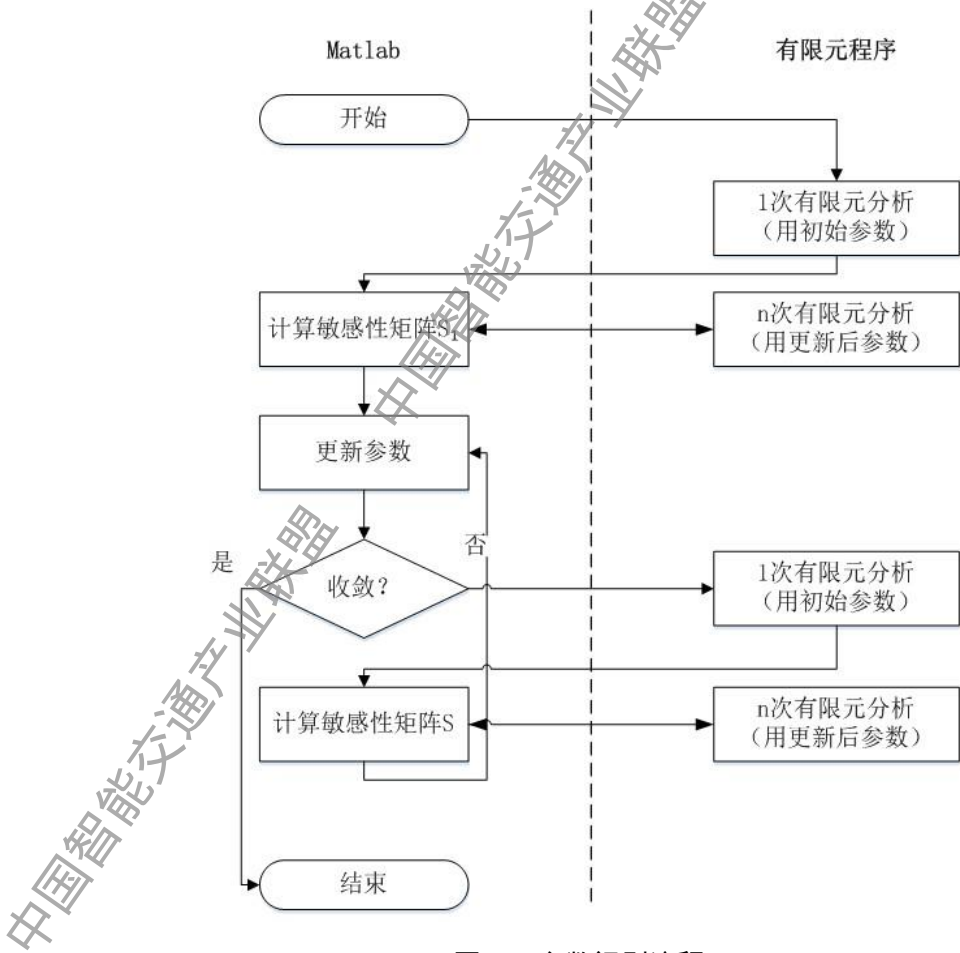


图 4 参数识别流程

5.3.1 基于识别参数的有限元模型修正流程

第一步，按照设计图纸和相关规范建立结构的初始有限元模型；

第二步，根据监测数据识别的结构参数修正有限元模型；

第三步，进行有限元分析；

第四步，进行有限元分析后处理，得到结构的自振频率和相应位移，并与实测值进行比较，代入目标函数进行计算；

第五步，判断目标函数和结构的反应是否满足要求，若满足要求则所采用的识别参数就是最优的参数值并结束修正过程，若不满足要求则改变识别参数计算程序中的权值矩阵及收敛准则，直到满足要求为止。

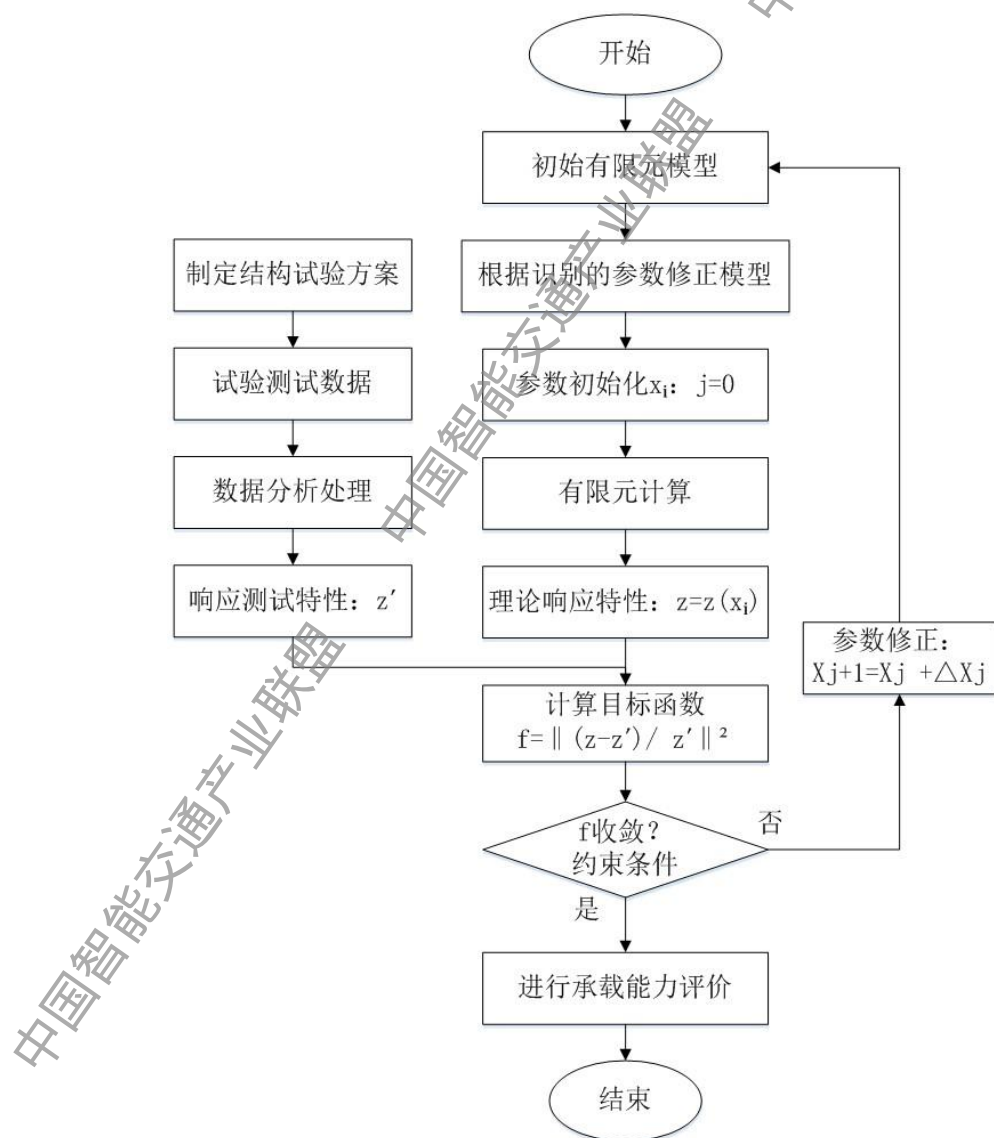


图 5 有限元模型修正流程图

材料强度、容重、弹性模量、截面几何尺寸等参数可直接量测确定,而边界条件既不能直接量测,也难以通过试验方法进行确定识别,需要采取一些技术手段进行识别估计。

5.3.2 修正参数的选取应遵循两个原则

(1)选择的参数不能太多,因为实测的静动力响应值有限而且可能本身也存在误差,过多的修正参数易造成求解困难,使参数的修正值失去物理意义;

(2)选择灵敏度比较大的参数,如果选择灵敏度非常小的参数会造成灵敏度矩阵病态,导致不能求解或者得到错误的修正参数。

5.3.3 修正参数的选取主要有两种方式

(1)依赖经验进行选取;

(2)选取敏感性强的参数作为修正参数。

6 安全预警

6.1 一般规定

a) 科学合理地设定预警值,在线实时预警应实现自动化。

b) 结构的预警是通过对系统采集的结构响应数据进行处理分析,实时掌握、评价结构的运营状态,当结构状态出现异常时及时进行报警,根据异常情况发出相应的指令,避免事故的发生或扩大,为基础设施的运营管理提供科学依据。

c) 安全预警是分阶段损伤诊断策略的第一阶段,是结构损伤诊断的开关,只有发生安全预警时,才会进行损伤位置和损伤程度的诊断。

6.1.1 良好的预警系统特点

a) 及时性

及时预报结构状态信息,争取时间采取各种有效措施,防止发生进一步的破坏和引发其它事故,保障生命财产安全。

b) 准确性

外部干扰、设备不稳定等因素,都会引发系统误报,系统的设计应具有一定的稳定性和抵抗干扰的能力,能够在各种状态下准确预报。

c) 自动化

预警系统需要实时在线监测结构的运营状态, 因此, 必须自动化, 一旦启动, 将不再需要人为操作, 可自动进行状态评价和预警。

6.1.2 结构安全预警的基本原理

结构安全预警的基本原理就是通过收集梁桥基本状况数据、安全监测数据, 维修历史数据, 建立预警数据库(包括数据库、图像库和图形库), 实时采集安全监测数据, 判断安全等级、病害程度、病害范围等, 然后发布预报, 职能部门采取相应措施, 最终达到预防安全事故的目的。

6.1.3 预警原理

明确警义是前提, 是进行预警的基础; 寻找警源是对警情产生原因的分析, 是排除警患的基础; 分析警兆是关联因素的分析, 是预报警度的基础; 预报警度是排除警患的根据, 而排除警患是预警目标所在。

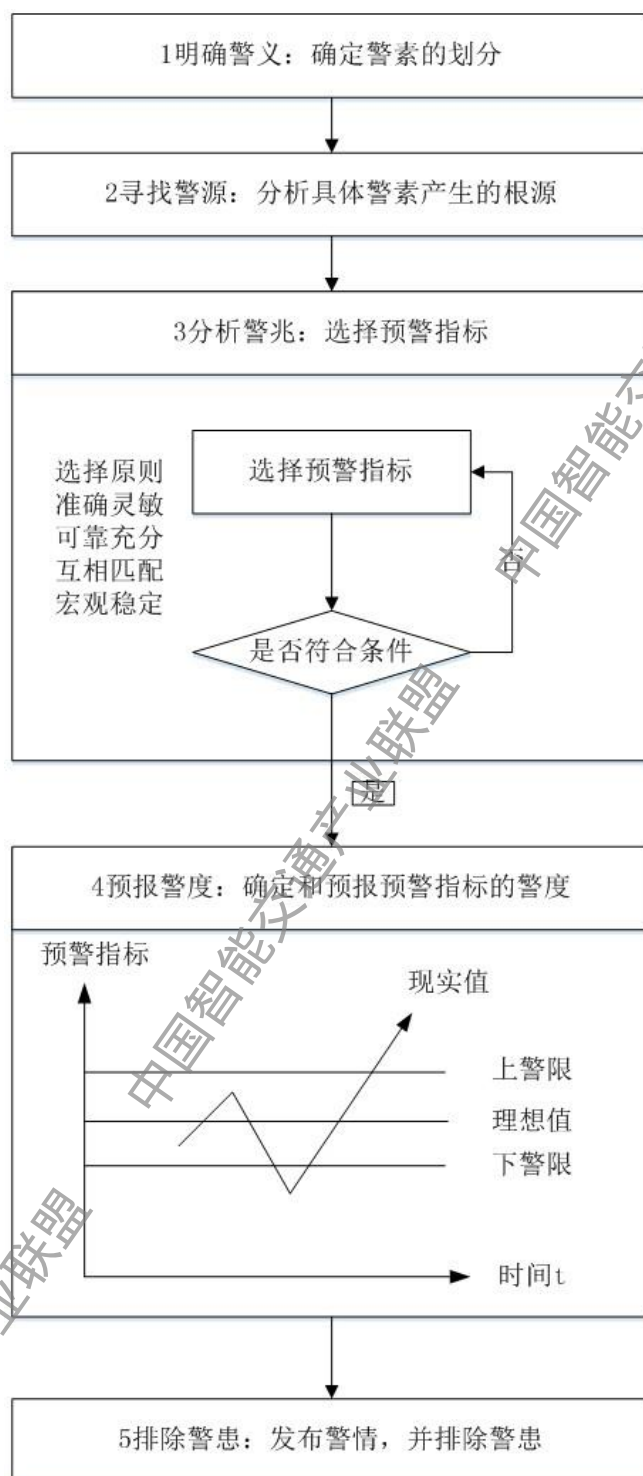


图 6 预警原理过程图

6.2 损伤分类及预警

6.2.1 结构的损伤分类

结构预警系统分类应根据结构的受损特点来进行,结构的损伤分为两类:

a) 长期累积损伤

在长期运营条件下,结构的某些部位由于疲劳积累、腐蚀等原因,造成部分构件的性能退化,影响结构的安全运营。

b) 突发性损伤

由于结构受到超载车辆、台风、地震等突发性事件,造成结构的损伤和破坏。

6.2.2 两类损伤对预警系统的要求各有侧重点

两类损伤对预警系统的要求各有侧重点,第一类损伤侧重于预警的准确性,第二类损伤侧重于预警的及时性。

6.2.3 预警系统分类体系

根据结构损伤的特点,将预警系统分为两个体系:局部状态预警体系和整体状态预警体系。局部状态预警体系主要负责突发性事件的状态预警,整体状态预警体系既对突发性损伤负责,又对长期累积损伤负责。

6.2.4 突发性损伤预警

突发性损伤具有不可预见性,破坏性强,危害严重等特点,对结构的危害一般较为严重,会使结构的受力状态发生较大改变或直接导致某些构件失效,通过局部的监测结果能够对突发性损伤进行及时预警。

6.2.5 长期累积损伤的预警

对于长期累积损伤的预警,采用整体状态预警体系,通过对当前预警状态和历史监测结果进行综合分析实现预警,提高预警的准确性。

6.2.6 局部状态预警

局部状态预警采用无模型预警体系,该体系建立在监测数据统计及简单数据分析的基础上,对结构在恒载和其它荷载情况下的实时监测数据直接进行处理,通过规范、历史记录、交通流量、环境参数等建立预警界限,根据情况设定不同的预警标准,对不同的预警标准采取不同的处理。

局部状态预警主要针对安装了传感器的构件的内力,当内力超过警戒值时进行报警。

6.2.7 整体预警

整体预警分为两部分：一是针对突发性损伤，二是针对长期累积损伤。前者以每个时刻的实测数据作为神经网络的输入向量，后者以每天的综合处理数据作为神经网络的输入向量。每个时刻的实测数据受汽车荷载、温度荷载等外部荷载的影响较大，具有较大的噪声，但是对于突发性损伤，仍然具有相当的可靠性，可以实现突发性损伤的状态预警。每天的综合处理数据减少了外部荷载的影响，减小了噪声，使得数据更为可靠，提高了预警的准确性。

6.3 预警体系的建立

6.3.1 预警体系组成

基于层次分析的结构状态综合评价、预警类别的划分，建立预警体系如下图所示：

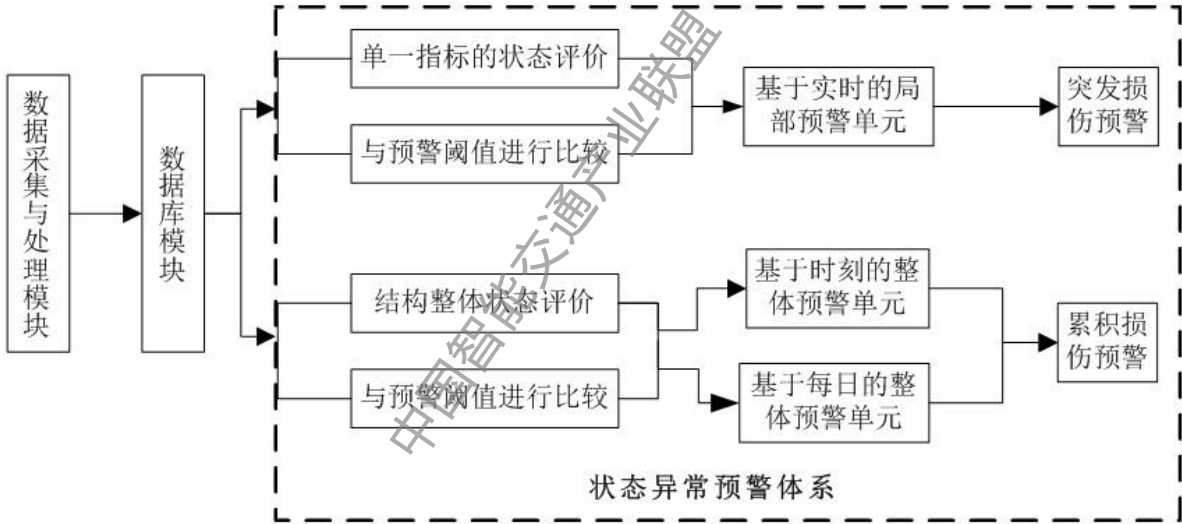


图 7 预警体系组成

6.3.2 局部状态预警

局部状态预警采用无模型方式进行，直接根据监测结果的幅值分析，并将幅值与预警阈值相比较来进行。在该预警体系中，局部状态预警采用二级预警方案即橙色预警和红色预警。

6.3.3 橙色预警

橙色预警主要指示内力是否有异常，红色预警表明内力已经超过安全允许值，构件即将或已经损坏，在进行结构监测过程，若发现一个或多个指标超过预警阈值，须及时向主管部门发出预警。

为避免误报频率过高,应对超过预警阈值的数据根据相关性分析来评判,即结构的某一单一指标超过预警阈值,阈值相关性较大的指标也应是状态异常;预警之前必须对数据处理模块进行数据的可靠性进行诊断,以消除由采集系统异常而引起状态预警误报。




6.3.4 红色预警

红色预警按照设计荷载通过对结构的模拟计算确定,初期可以采用上述的理论计算值作为初值;随着时间的延续,该数据应根据监测的时间序列分析结合结构的检查、趋势变化分析等来进行调整。

6.3.5 三级预警模式

根据模糊层次综合评价的结果进行结构的整体状态异常报警,三级预警模式如下表所示:

表 6 整体状态预警级别

序号	级别	图例	结构整体状态
1	红色预警		危险
2	橙色预警		坏的
3	黄色预警		较差

7 结构性能评估

7.1 一般规定

- a) 交通基础设施结构形式多样,运行环境复杂,导致结构损伤与性能退化模式不统一;
- b) 通过建立评估模型,结合定期检查、特殊检查与监测进行数据采集,对数据进行处理分析,提取用于结构性能评估的参数,完成结构性能综合评估;
- c) 各类评估方法均具有优缺点,应根据交通基础设施工程特点确定相应的基于监测数据分析结果的结构性能评估方法。

7.2 层次分析法

7.2.1 层次分析法四步骤

运用层次分析法进行结构性能评估,总体上分为四个步骤:

- a) 分析系统中各因素之间的关系,建立系统的递阶层次结构;

- b) 对同一层次的各元素关于上一层中某一准则的重要性进行两两比较，构造判断矩阵；
- c) 由判断矩阵计算被比较元素对于该准则的相对权重；
- e) 计算各层元素对系统目标的合成权重，并进行排序。

7.2.2 层次分析的结构模型

把结构性能评估问题条理化、层次化，构造出一个层次分析的结构模型。在模型中，复杂问题被分解，分解后各组成部分称为元素，这些元素又按属性分成若干组，形成不同层次。同一层次元素作为准则对下一层的某些元素起支配作用，同时它又受上面层次元素的支配。层次一般可分为三类：

- (1) 最高层：这一层次中只有一个元素，它是结构性能评估的预定目标或理想结果，即目标层；
- (2) 中间层：这一层次包括要实现目标层所涉及的中间环节中需要考虑的准则，该层可由若干层次组成，有准则和子准则之分，即准则层；
- (3) 最底层：这一层次包括为实现目标可供选择的各种措施、决策方案等，即措施层。

上层元素对下层元素的支配关系所形成的层次结构为递阶层次结构，上一层元素可以支配下层的所有元素，也可以只支配其中部分元素。

7.2.3 构造两两比较判断矩阵

在递阶层次结构中，设上一层元素C为准则，所支配的下一层元素为 u_1, u_2, \dots, u_n 对于准则C相对重要性即权重。

- (1) 如果 u_1, u_2, \dots, u_n 对C的重要性可量化（如构件开裂长度、碳化深度等），权重可直接确定；
- (2) 如果问题复杂， u_1, u_2, \dots, u_n 对于C的重要性无法直接定量，而只能定性，那么确定权重用两两比较方法。方法：对于准则C，下一层元素 u_i 和 u_j 哪一个更重要，重要的程度如何，通常按1~9比例标度对重要性程度赋值，下表中列出了1~9标度的含义。

表 7 标度的含义

标度	含义
1	表示两个元素相比，具有同样重要性
3	表示两个元素相比，前者比后者稍重要
5	表示两个元素相比，前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比，前者比后者强烈重要

表 8 标度的含义(续)

标度	含义
9	表示两个元素相比，前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若元素 i 与 j 的重要性之比为 a_{ij} ，那么元素 j 与元素 i 重要性之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

对于准则C，n个元素之间相对重要性的比较得到一个两两比较判断矩阵：

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \tag{7.2-1}$$

其中 a_{ij} 就是元素 u_i 和 u_j 相对于 C 的重要性的比例标度。判断矩阵 A 具有下列性质：

$$a_{ij} > 0, a_{ji} = 1/a_{ij}, a_{ii} = 1$$

由判断矩阵所具有的性质知，一个n个元素的判断矩阵只需要给出其上（或下）三角的 $n(n-1)/2$ 个元素就可以了，即只需做 $n(n-1)/2$ 个判断即可。

若判断矩阵A的所有元素满足 $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$ ，则称A为一致性矩阵。

7.2.4 单一准则下元素相对权重的计算以及判断矩阵的一致性检验

已知n个元素 u_1, u_2, \dots, u_n 对于准则C的判断矩阵A，求 u_1, u_2, \dots, u_n 对于准则C的相对权重 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 写成向量形式即为 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 。

权重计算方法

①和法。将判断矩阵A的n个行向量归一化后的算术平均值，近似作为权重向量，即：

$$\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{7.2-2}$$

计算步骤如下：

- 第一步：A的元素按行归一化；
- 第二步：将归一化后的各行相加；
- 第三步：将相加后的向量除以n，即得权重向量。

类似的还有列和归一化方法计算，即：

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n a_{kj}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7.2-3)$$

②根法（即几何平均法）。将A的各个行向量进行几何平均，然后归一化，得到的行向量就是权重向量。其公式为：

$$\omega_i = \frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{kj})^{\frac{1}{n}}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7.2-4)$$

计算步骤如下：

第一步：A的元素按列相乘得一新向量；

第二步：将新向量的每个分量开n次方；

第三步：将所得向量归一化后即得权重向量。

③特征根法（简记EM）。解判断矩阵A的特征根问题

$$AW = \lambda_{\max} W, \quad (7.2-5)$$

式中， λ_{\max} 是A的最大特征根，W是相应的特征向量，所得到的W经归一化后就可作为权重向量。

④对数最小二乘法。用拟合方法确定权重向量 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ ，使残差平方和 $\sum_{1 \leq i \leq j \leq n} [\lg a_{ij} - \lg(\omega_i/\omega_j)]^2$ 为最小。

⑤最小二乘法。确定权重向量 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ ，使残差平方和 $\sum_{1 \leq i \leq j \leq n} [\lg a_{ij} - \lg(\omega_i/\omega_j)]^2$ 为最小。

（2）一致性检验

在计算单准则下权重向量时，还必须进行一致性检验。在判断矩阵的构造中，并不要求判断具有传递性和一致性，即不要求 $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$ 严格成立，这是由客观事物的复杂性与人的认识的多样性所决定的；但要求判断矩阵满足大体上的一致性应该是的。

如果出现“甲比乙极端重要，乙比丙极端重要，而丙又比甲极端重要”的判断，则显然是违反常识的，一个混乱的经不起推敲的判断矩阵有可能导致决策上的失误。而且上述各种计算排序权重向量（即相对权重向量）的方法，在判断矩阵过于偏离一致性时，其可靠程度也就值得怀疑了。

因此要判断矩阵的一致性进行检验，具体步骤如下：

①计算一致性指标C.L.（consistency index）

$$C.L. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{7.2-6}$$

查找相应的平均随机一致性指标R. L. (random index)

下表给出了1~15阶正互反矩阵计算1000次得到的平均随机一致性指标。

表 9 平均随机一致性指标 R. I.

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
R. L	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41
矩阵阶数	9	10	11	12	13	14	15	
R. L.	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59	

②计算性一致性比例 C. R. (consistency ratio)

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \tag{7.2-7}$$

当C.R. < 0.1时，认为判断矩阵的一致性是可以接受的；当C.R. ≥ 0.1时，应该对判断矩阵做适当修正。

为了讨论一致性，需要计算矩阵最大特征根λ_{max}，除常用的特征根方法外，还可使用公式

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{n \omega_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} \omega_j}{\omega_i} \tag{7.2-8}$$

③计算各层元素对目标层的总排序权重

上面得到的是一组元素对其上一层中某元素的权重向量。最终要得到各元素，特别是最低层中各元素对于目标的排序权重，即所谓总排序权重，从而进行方案的选择。总排序权重需要自上而下地将单准则下的权重进行合成，并逐层进行总的判断一致性检验。

设W^(k-1) = (ω₁^(k-1), ω₂^(k-1), ..., ω_{n_{k-1}}^(k-1))^T表示第 k-1 层上n_{k-1}个元素相对于总目标的排序权重向量，

用P_j^(k) = (p_{1j}^(k), p_{2j}^(k), ..., p_{n_{kj}}^(k))^T表示第 k 层上n_k个元素对第 k-1 层上第 j 个元素为准则的排序权重向量，

其中不受 j 元素支配的元素权重取为零。矩阵P^(k) = (p₁^(k), p₂^(k), ..., p_{n_k}^(k))^T是n_k × n_{k-1}阶矩阵，它表示第

k 层上元素对 k-1 层上各元素的排序, 那么第 k 层上元素对目标的总排序 $W^{(k)}$ 为:

$$W^{(k)} = (\omega_1^{(k)}, \omega_2^{(k)}, \dots, \omega_{n_k}^{(k)})^T = P^{(k)} \cdot W^{(k-1)} \quad (7.2-9)$$

$$\text{或} \quad \omega_i^{(k)} = \sum_{j=1}^{n_{k-1}} p_{ij}^{(k)} \omega_j^{(k-1)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7.2-10)$$

并且一般公式为 $W^{(k)} = P^{(k)} P^{(k-1)} \dots W^{(2)}$.

其中 ($W^{(2)}$) 是第二层上元素的总排序向量, 也是单准则下的排序向量。

要上到下逐层进行一致性检校为困难, 若已求得 k-1 层上元素 j 为准则的一致性指标 $C.I_j^{(k)}$, 一致

性比例 $R.I_j^{(k)}$, 一致性比例 $C.I_j^{(k)}$ (其中 $j=1, 2, \dots, n_{k-1}$), 则 k 层的综合指标

$$C.I_j^{(k)} = (C.I_{.1}^{(k)}, \dots, C.I_{.n_{k-1}}^{(k)}) \cdot W^{(k-1)} \quad (7.2-11)$$

$$R.I_j^{(k)} = (R.I_{.1}^{(k)}, \dots, R.I_{.n_{k-1}}^{(k)}) \cdot W^{(k-1)} \quad (7.2-12)$$

当 $C.R_j^{(k)} < 0.1$ 时, 认为递阶层次结构在 k 层水平的所有判断具有整体满意的一致性。

7.3 常权综合评估法

交通部颁发的《公路桥涵养护规范》(JTG H11-2004) 中和《公路桥梁技术状况等级评定标准》(JTG H21-2011) 中的综合评定方法就采用了该常规方法。

《公路桥涵养护技术规范》(JTG H11-2004) 中对桥梁技术状况的综合评价, 基于各桥梁部件的评分, 采用的算式为:

$$D_r = 100 - \sum_{i=1}^n R_i W_i / 5 \quad (7.3-1)$$

式中:

R_i ——对桥梁各部件确定的评定标度 (0~5);

W_i ——各部件权重, $\sum W_i = 1$;

D_r ——全桥结构技术状况评分（0~100）。

《公路桥梁技术状况等级评定标准》（JTG H21-2011）中对桥梁技术状况的综合评价，基于各桥梁构件的评分，采用的算式为：

$$PMCI_1(BMCI_1 \text{ 或 } DMCI_1) = 100 - \sum_{x=1}^k U_x \quad (7.3-2)$$

当 $x = 1$ 时

$$U_1 = DP_{i1} \quad (7.3-3)$$

当 $x \geq 2$ 时

$$U_x = \frac{DP_{ij}}{100 \times \sqrt{x}} \times (100 - \sum_{y=1}^{x-1} U_y) \quad (7.3-4)$$

当 $DP_{ij} = 100$ 时

$$PMCI_1(BMCI_1 \text{ 或 } DMCI_1) = 0 \quad (7.3-5)$$

式中：

$PMCI_1$ ——上部结构第 i 类部件 1 构件的得分，值域为 0~100 分；

$BMCI_1$ ——下部结构第 i 类部件 1 构件的得分，值域为 0~100 分；

$DMCI_1$ ——桥面系第 i 类部件 1 构件的得分，值域为 0~100 分；

K ——第 i 类部件 1 构件出现扣分的指标的种类参数；

U 、 x 、 y ——引入的变量；

i ——引入的变量；

j ——第 i 类部件 1 构件的第 j 类检测指标；

DP_{ij} ——第 i 类部件 1 构件的第 j 类检测指标的扣分值；根据构件各种检测指标扣分值进行计算，

扣分值按照表 3.1-1 规定取值。

表 10 构件各检测指标扣分值

检测指标所能达到的最高等级指标	指标类别				
	1 类	2 类	3 类	4 类	5 类
3 类	0	20	35	50	—
4 类	0	25	40	50	—
5 类	0	35	45	60	100

7.4 变权综合评估法

7.4.1 结构性能评估流程

整个评估流程包含五个步骤：（1）建立层次分析模型；（2）专家调查与权重计算；（3）确定底层指标评语；（4）评估指标的采集与分析；（5）变权综合评估。

结构性能评估采用基于层次分析原理的变权综合评估方法，如下图所示：

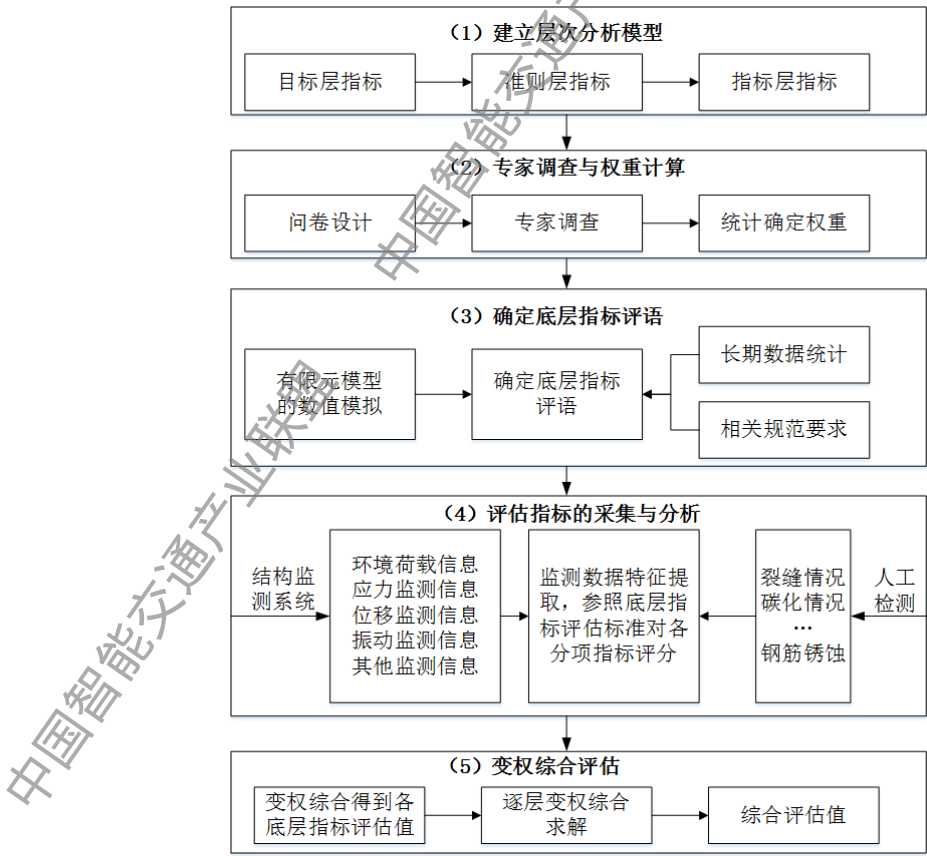


图 8 结构性能评估流程图

7.4.2 底层评估指标按数据类型分类

- a) 第一类指标，对结构构件的状态描述或简单的等级划分，没有数值结果，如混凝土裂缝、构件缺损等；
- b) 第二类指标，监测结果为一个数值，如混凝土强度、保护层厚度、砼碳化深度等；
- c) 第三类指标，监测结果为一组数据序列，如应力、挠度、位移、加速度等。

7.4.3 底层评估指标的无量纲化处理方法

- a) 第一类指标，根据现行有关结构养护规范及专家系统对程度描述进行评价，给予在某一等级内的一个分值(百分制)，量化结果即可作为底层评价指标的评价值；
- b) 第二类指标，采用正指标、负指标和适度指标3种模型进行归一转换；
- c) 第三类指标，经过线性或非线性量纲归一化处理，将实测数据分解为均匀变化和非均匀变化两部分，通过灰色关联度分析，底层指标评价值等于均匀变化得分乘以非均匀性变化系数。

7.4.4 底层指标的评定准则

a) 按既有养护规范评分

第一类指标，根据缺损程度、对结构功能的影响程度及缺损的发展变化情况等，以累加评分的方法对各构件状态等级评定。

b) 按指标模型评分

第二类指标，混凝土强度、混凝土保护层厚度等按照正指标量化模型评分，混凝土碳化深度按照负指标量化模型评分。

c) 实用监测数据评分

结合数据统计和模型计算结果，在监测结果评定中设定两个判别值：运营荷载值和设计荷载值，确定测点的应力、位移等评定标准。

7.5 其它评估法

(1) 德尔菲专家评估法将结构评价指标体系分为四层：目标层、准则层、大指标层、小指标层，把交通、道路类别和绕行距离这三项作为边界条件。将模型最底层的各项影响指标的技术状况，按无量纲等级0~5评定，乘以评定层次指标相应的权值与边界条件影响系数，综合处理得出评定值；

(2) 模糊综合评估法以模糊数学为基础，应用模糊关系合成的原理，将一些边界不清、不易量化的因素定量化进行评估。模糊综合评估法较好地解决了事物的模糊性与算法的确定性矛盾，能很好地反映客观事物的本质；

(3) 神经网络评估法采用神经网络的结构和模糊逻辑的推理机制，将神经网络和模糊系统有机结合在一起，可有效发挥各自的优势并弥补不足。神经网络法可降低评估过程中的人为因素，能较好地保证评估过程的客观性，但神经网络的学习需要大量样本，如果累积的资料较少，其结果的准确性将存在一定的局限性；

(4) 灰色关联度评估法适合于多目标、多属性的评价，即对于某个问题有多个属性，同时有一组最优数据可描述这些属性。灰色关联度法能很好地反映客观事物的真实情况，在许多领域得到了应用；灰色关联度理论本身还不够成熟，其几何形状相似性的表达方式还不完善。

中国智能交通产业联盟
标准

交通基础设施结构监测数据分析技术规范

T/ITS 0060-2016

北京市海淀区西土城路 8 号（100088）

中国智能交通产业联盟印刷

网址：<http://www.c-its.org>

2016 年 11 月第一版 2016 年 11 月第一次印刷