

基于群索索力相异测度的斜拉桥健康状态评估

淡丹辉¹, 赵一鸣¹, 杨 通¹, 闫兴非²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海城市建设设计研究总院, 上海 200125)

摘要: 基于群索索力的相异测度, 提出一套可用于斜拉索索缆承重体系内力状态评估的指标体系. 利用桥梁的有限元分析及影响矩阵法, 定义了基于极限状态的相异测度指标阈值, 并通过蒙特卡罗方法获得这套指标阈值的合理取值. 通过该套指标与其阈值体系的比较, 建立了斜拉桥整体内力状态的评判方法. 利用国内某斜拉桥建成后十年内的斜拉索索力实测资料, 用上述方法对该桥进行了健康评估, 结果表明了该方法的有效性.

关键词: 群索索力; 状态评估; 相异测度; 蒙特卡罗方法; 影响矩阵法

中图分类号: U446

文献标志码: A

Health Status Evaluation of Cable Stayed Bridge By Dissimilarity Measures of Grouped Cable Forces

DAN Danhui¹, ZHAO Yiming¹, YANG Tong¹, YAN Xingfei²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Urban Construction Design Research Institute, Shanghai 200125, China)

Abstract: An index system for evaluating the health status of a cable stayed bridge is presented based on a set of dissimilarity measures (DM) of the cable force of grouped cables. The thresholds of DM derived from the serviceability limit state and ultimate limit state of the bridge are defined by finite element method (FEM) and influence matrixes method. The Monte-Carlo method is used to obtain the rational values of these thresholds. By comparing these indices with their thresholds, the discrimination on holistic health status of the cable stayed bridge can be done easily and explicable. A case study is conducted on a cable stayed bridge in China on the basis of its 8-year historical data. Study results prove the method to be feasible.

Key words: grouped cable forces; health status evaluation;

dissimilarity measures; Monte-Carlo methods; influence matrix methods

进行大跨度斜拉桥结构的健康状态评估时, 应尽可能考虑结构当前内力状态(效应)与结构极限状态(抗力)的关系^[1]. 而作为斜拉桥主要受力构件的斜拉索, 其内力变化对于全桥的内力状态有着显著的影响. 斜拉桥服役若干年后, 由于塔顶变位、基础沉降、收缩徐变等因素的影响, 服役期实际索力与设计索力之间必然存在一定的偏差^[1]. 这种偏差整体上对应于结构特定的工作状态, 通过对该偏差的合理把握, 能够获取其对应的结构整体内力状态的变化信息, 再结合结构极限状态, 可有效实现斜拉桥结构的健康状态评估. 因此, 监测大跨径斜拉桥结构群索索力状况并建立基于整体索力(或称群索索力)监测数据的安全评估方法, 已成为桥梁安全性评估工作中的重要组成部分之一.

目前工程中常用的索力评估方法是一种简单的比较分析法, 通过计算历年各单索索力的相对变化来反映索力状况, 当相对变化值小于一定范围(如 5%)时, 即判定索力状态正常. 这种评估方法有较大局限性: 一方面没有建立合理的阈值体系, 无法进行定量评估; 另一方面, 由于内力在全索面重新分配, 过大的单索索力变化未必会直接影响结构的整体受力状况, 而每根拉索索力都发生较小变化, 在简单进行单索比较时不存在任何问题, 有时却无法满桥梁整体的受力要求. 因此, 基于斜拉索索力的桥梁安全性评估应从整体出发, 针对群索索力进行研究.

目前针对群索索力状况的评估方法主要有变权综合法^[1]和灰色关联度法^[2]. 两者对群索的评判均依赖于一个物理意义不明确的参数的取值, 前者依赖于反映构件相关程度的均衡系数, 后者则受制于

收稿日期: 2012-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(50978196); 科技部国家重点实验室基础研究项目(SLDRCE09-D-01); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 淡丹辉(1972—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为桥梁健康监测、桥梁状态评估等. E-mail: dandanhui@tongji.edu.cn

通讯作者: 赵一鸣(1986—), 男, 硕士生, 主要研究方向为桥梁健康监测. E-mail: 519509733@qq.com

索力数据之间的关联度,均与结构整体工作状态无明确关联,可解释性差.因此,亟待发展一种科学合理可解释的评估技术,通过群索索力数据来评估结构的整体状态.

本文拟从群索索力数据综合分析的角度出发,利用蒙特卡罗方法建立群索索力的相异测度阈值体系,进而给出基于相异测度的群索索力状态评估方法.最后,针对国内某大跨径斜拉桥已有历史索力检测结果,对该评估方法进行了初步验证.

1 群索索力状态的度量

本文从群索索力整体评估的角度入手,用群索索力集组成索力数据样本,通过对数据样本进行分析处理,来获得关于斜拉桥结构健康状态的整体性评估结论.

1.1 群索索力与桥梁整体内力状态的相关性

斜拉桥是一种组合受力体系,结构(主要指主梁)的恒载和活载依靠拉索、主梁和索塔三者共同承担.结构的竖向荷载主要靠斜拉索竖向分量来平衡,由于所有的拉索均锚固在共同的主塔和主梁上,因此每根拉索的个性均受到制约,展现出较强的整体性能,共同发挥作用.除拉索体系外的结构整体内力分布、结构静力效应和动力响应,均与群索索力分布之间有很大的相关性;单根拉索的索力变化甚至有无,对结构整体受力状况的影响很小.

群索索力分布和结构整体行为之间的关系很大程度上是受交通流荷载、不均匀沉降、温度作用等因素的影响.风荷载、非线性因素的影响对群索内力分布的影响可以忽略不计^[3-4],因此,可以引入属于线性理论的影响矩阵法来描述群索索力对结构整体行为的影响.

如图1简化斜拉桥模型所示,对于斜拉桥,忽略风荷载的影响时,群索索力与结构整体目标力学量(外加荷载或作用、内力、应力或位移)之间的关系可以表述为

$$\mathbf{S} = \mathbf{C}^T \mathbf{D} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{S} = \mathbf{S}_G + \mathbf{S}_{\text{config}} + \mathbf{S}_{\text{tr}} + \mathbf{S}_{\text{us}} + \mathbf{S}_t$,为成桥状态的群索索力列向量,下标 G, tr, us 和 t 分别代表恒载、交通荷载、不均匀沉降和温度作用产生的索力部分,下标 config 表示达到调索目标(线型或其他力学量满足指定条件)后在群索上产生的附加索力, \mathbf{S} 为受调列向量; $\mathbf{D} = (\mathbf{D}_G, \mathbf{D}_{\text{config}}, \mathbf{D}_{\text{tr}}, \mathbf{D}_{\text{us}}, \mathbf{D}_t)^T$ 为结构广义作用,其中各元素分别为行向量,组成综合施调列向

量; \mathbf{C} 为影响矩阵,在线性假设条件下是常量, $\mathbf{C} = [\mathbf{C}_G, \mathbf{C}_{\text{config}}, \mathbf{C}_{\text{tr}}, \mathbf{C}_{\text{us}}, \mathbf{C}_t]$,其中各分量分别对应于恒载、调索初张力、交通荷载、不均匀沉降、温度作用与其各自产生索力部分之间的影响矩阵子矩阵,其第一维维数等于群索数目.

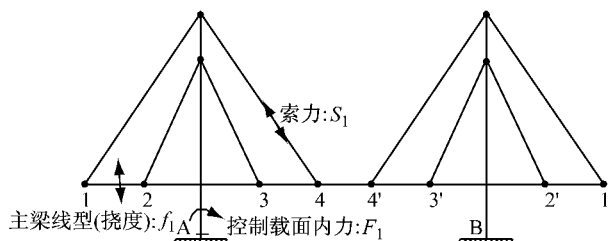


图1 简化斜拉桥模型

Fig.1 Simplified model of a cable stayed bridge

同样,也可建立斜拉桥正常使用极限状态或承载能力极限状态的目标力学量与综合施调向量之间的关系为

$$\mathbf{S}_{\text{tar}} = \mathbf{C}_{\text{tar}}^T \mathbf{D} \quad (2)$$

式中: \mathbf{C}_{tar} 为综合施调向量与目标力学量之间的影响矩阵; \mathbf{S}_{tar} 为目标力学量,是由包括斜拉桥中一些关键截面上的关键力学量所组成的列向量,包括截面内力、应力或位移等.这些元素一般在设计阶段被用来对应于结构整体的正常使用极限状态或承载能力极限状态,其功能方程 Z (裕度) 可如下表示:

$$\mathbf{Z} = [\mathbf{S}_{\text{tar}}] - \mathbf{S}_{\text{tar}} \quad (3)$$

式中: $[\mathbf{S}_{\text{tar}}]$ 表示与目标力学量相对应的阈值或抗力列向量.

按照影响矩阵法原理,式(1)可以写为

$$\begin{cases} \mathbf{S} = \mathbf{S}_D + \mathbf{S}_Q + \mathbf{S}_R \\ \mathbf{S}_D = \mathbf{C}_G \mathbf{D}_G + \mathbf{C}_{\text{config}} \mathbf{D}_{\text{config}} \\ \mathbf{S}_Q = \mathbf{C}_{\text{us}} \mathbf{D}_{\text{us}} + \mathbf{C}_{t,a} \mathbf{D}_{t,a} \\ \mathbf{S}_R = \mathbf{C}_{\text{tr}} \mathbf{D}_{\text{tr}} + \mathbf{C}_{t,i} \mathbf{D}_{t,i} \end{cases} \quad (4)$$

式中: \mathbf{S}_D 表示永久荷载组合下的群索索力, \mathbf{S}_Q 表示准永久荷载作用下的群索索力, \mathbf{S}_R 表示活载作用下的群索索力,是随机波动部分;下标 (t, a), (t, i) 分别表示以年为时间尺度的结构平均温度效应和结构温度场的瞬时波动效应,前者被归入准永久荷载,具有较强的周期性和确定性,后者则表现出较强随机性和瞬时性.

同样,反应结构状态的目标量 \mathbf{S}_{tar} 可由下式计算:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{\text{tar}} = \mathbf{S}_{\text{tar},D} + \mathbf{S}_{\text{tar},Q} + \mathbf{S}_{\text{tar},R} \\ \mathbf{S}_{\text{tar},D} = \mathbf{C}_{\text{tar},D}^T \mathbf{D}_G + \mathbf{C}_{\text{tar},D}^T \mathbf{D}_{\text{config}} \\ \mathbf{S}_{\text{tar},Q} = \mathbf{C}_{\text{tar},Q}^T \mathbf{D}_{\text{us}} + \mathbf{C}_{\text{tar},Q}^T \mathbf{D}_{t,a} \\ \mathbf{S}_{\text{tar},R} = \mathbf{C}_{\text{tar},R}^T \mathbf{D}_{\text{tr}} + \mathbf{C}_{\text{tar},R}^T \mathbf{D}_{t,i} \end{cases} \quad (5)$$

极限状态目标力学量与群索索力通过综合施调列向量两者之间,可以写成如下线性组合:

$$\mathbf{S}_{\text{tar}} = \mathbf{C}_{\text{tar}}^T (\mathbf{C}^{-1})^T \mathbf{S} \quad (6)$$

式(1)~(6)表明,结构整体内力状态与群索索力状态紧密相关,任何一个反映结构状态的目标力学量均可以近似表示成群索索力的线性组合;进而,可以通过群索索力,来判别目标力学量的情况,进而判断距离极限状态的裕度

$$\mathbf{Z} = [\mathbf{S}_{\text{tar}}] - \mathbf{C}_{\text{tar}}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{S} \quad (7)$$

通过式(7),可以建立起基于群索索力的结构极限状态功能方程. 式(3)功能方程中的抗力和效应变量均难以测量,而式(7)群索索力是可测量的,它扮演了代理的角色^[5],将基于抗力效应的功能方程转变为基于群索索力代理的功能方程,从而为基于监测代理的可靠性评估铺平了道路.

1.2 群索索力的相异测度度量

通过式(7)可知,欲对结构状态进行准确判断,必须首先对群索索力向量进行度量. 另外,群索索力也是高维的,不便于进行处理,需要利用向量的某种度量,来简化判别分析.

在实际工程中,度量向量的常用手段就是相异测度. 相异测度是衡量多维数据样本之间相异性的度量,本质上是一组特殊的相异函数,可以将两样本向量之间的差异性转变为标量. 常用的相异测度函数主要包括:欧式距离、街区距离、切比雪夫距离、Canberra 距离、角分离度、相关系数等^[6-7]. 设两数据样本向量分别为

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_i \ x_{i+1} \ \cdots \ x_n]^T$$

$$\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_i \ y_{i+1} \ \cdots \ y_n]^T$$

则各相异测度 $DM(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 形式如表 1 所示.

表 1 相异测度函数

Tab.1 Functions of dissimilarity measures	
相异测度	计算公式
欧式距离	$DM(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$
街区距离	$DM(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n x_i - y_i $
切比雪夫距离	$DM(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \max_i x_i - y_i $
Canberra 距离	$DM(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n \frac{ x_i - y_i }{x_i + y_i}$
角分离度	$DM(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}}$
相关系数	$DM(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$

$$\text{注: } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i.$$

以上各种相异测度均可构成用于评估结构健康状况的指标体系. 用以上测度来衡量群索索力时,可以选择某种标准条件下的观测值 \mathbf{S}_0 作为基准,其余的观测值都与基准值做相异测度运算,即 $DM(\mathbf{S}_0, \mathbf{S})$. 可以用设计索力组成基准值,也可以用成桥索力作为基准值.

相异测度用作数据点的分类,即测度空间内的相异标签子空间的边界划分时,常常希望这些相异测度具有最佳的类别区分能力,这可由准则 J_2, J_3 和 J_4 取值大小来评判. 上述准则可定义如式(8)所示,这些准则取值越大,测度的类内分布就越小,类间分布也越大,分类性能也就越好.

$$\begin{cases} J_2 = \text{tr}\{\mathbf{S}_W^{-1} \mathbf{S}_B\} \\ J_3 = \frac{|\hat{\Sigma}|}{|\mathbf{S}_W|} \\ J_4 = \frac{\text{tr}\{\mathbf{S}_B\}}{\text{tr}\{\mathbf{S}_W\}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: Σ 表示总体协方差矩阵,其极大似然估计为 $\hat{\Sigma}$; \mathbf{S}_W 为类内样本散布矩阵; \mathbf{S}_B 为类间样本协方差矩阵,表示为

$$\mathbf{S}_W = \sum_{i=1}^C \frac{n_i}{n} \hat{\Sigma}_i \quad (9)$$

$$\mathbf{S}_B = \sum_{i=1}^C \frac{n_i}{n} (\mathbf{m}_i - \mathbf{m})(\mathbf{m}_i - \mathbf{m})^T \quad (10)$$

式中: Σ_i 表示第 i 类样本的协方差矩阵, n 是总体样本数, n_i 是第 i 类样本的数目, C 为总类数目, \mathbf{m} 和 \mathbf{m}_i 分别为总体和第 i 类样本均值. Σ_i 的极大似然估计 $\hat{\Sigma}_i$ 可表示为

$$\hat{\Sigma} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\mathbf{x}_j - \mathbf{m})(\mathbf{x}_j - \mathbf{m})^T \quad (11)$$

$$\hat{\Sigma}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij} (\mathbf{x}_j - \mathbf{m}_i)(\mathbf{x}_j - \mathbf{m}_i)^T \quad (12)$$

式中: \mathbf{x}_j 为 w_i 类的第 j 样本, z_{ij} 为类标识变量,由下式确定:

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \mathbf{x}_j \in w_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

$$n_i = \sum_{j=1}^n z_{ij} \quad (14)$$

\mathbf{m}_i 可由下式确定:

$$\mathbf{m}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^n z_{ij} \mathbf{x}_j \quad (15)$$

\mathbf{m} 可表示为

$$\mathbf{m} = \sum_{i=1}^C \frac{n_i}{n} \mathbf{m}_i \quad (16)$$

2 群索索力度量的阈值体系

有了群索索力的相异测度度量,还必须给出相

应的阈值体系,才能对结构受力状态做出准确的判别和合理的评估.由式(7)可知,通过与结构整体行为有关的结构控制截面的目标力学量及其在两种极限状态下的阈值,可以反推群索索力度量的阈值,下面给出其求解办法.

2.1 群索索力相异测度的阈值定义

群索索力相异测度的阈值可以根据式(3),(6)和(7)得到.通常,斜拉桥体系会有承载能力极限状态(ULS, ultimate limit state)、正常使用极限状态(SLS, serviceability limit state)两种,每种极限状态又各自设置了上下限,因此,式(3)可以写成如下:

$$\begin{cases} [S_{tar}]_{u,f} \leq S_{tar,u} \leq [S_{tar}]_{u,c} \\ [S_{tar}]_{s,f} \leq S_{tar,s} \leq [S_{tar}]_{s,c} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $[S_{tar}]_{u,f}$, $[S_{tar}]_{u,c}$, $[S_{tar}]_{s,f}$, $[S_{tar}]_{s,c}$ 分别表示承载能力极限状态下限阈值、承载能力极限状态上限阈值、正常使用极限状态下限阈值、正常使用极限状态上限阈值,由桥梁规范和结构力学(有限元)分析得到; $S_{tar,u}$, $S_{tar,s}$ 分别表示承载能力极限状态目标力学量和正常使用极限状态目标力学量,可由下式决定:

$$\begin{cases} S_{tar,u} = C_{tar,u}^T C^{-1} S \\ S_{tar,s} = C_{tar,s}^T C^{-1} S \end{cases} \quad (18)$$

对于斜拉桥,有明确设计限值的结构状态的目标力学量有:主塔塔顶变位、主跨跨中挠度 f 、主梁梁端转角、主梁关键截面弯矩、塔梁结合部弯矩等.这些目标量及其设计限值可以被选择为评估用指标和相对应的阈值.

由式(6),(7)和(17)可知,群索索力的阈值体系可以通过反映结构状态目标力学量的阈值体系来间接获得,即

$$[S]_i = C^T (C_{tar,u}^T)^{-1} [S_{tar}]_i \quad (19)$$

式中: i 代表下标 (u,f) , (u,c) , (s,f) , (s,c) . 进而,得到群索索力相异测度的阈值

$$[DM(\cdot)]_i = DM([S]_i, S_0) \quad (20)$$

于是,对某状态下群索索力 S 的评估,就可以转换为对群索索力相异测度的评估

$$DM(S, S_0) \begin{cases} > \\ = \\ < \end{cases} [DM(\cdot)]_i \quad (21)$$

结构状态目标量 S_{tar} 的阈值 $[S_{tar}]_i$ 由规范或设计者给出,一般是一个一维标量或低维向量,其维数远小于群索的数目,式(19)的解不惟一,不能作为求解群索索力相异测度阈值的计算公式.在实际操作时,可以由蒙特卡罗方法^[7]得到群索索力的大量样本,根据式(17)判定样本标签,然后根据带类别标签

样本的界限来划定群索索力阈值.

2.2 确定相异测度阈值的蒙特卡罗方法

首先,考虑在正常使用极限状态下的作用效应组合,包括恒载、交通荷载、温度作用、不均匀沉降等,通过调索,得到符合桥梁调索目标要求的初始综合施调向量 D_0 以及综合影响矩阵 $[C, C_{tar,u}, C_{tar,s}]$. 将与恒载、索初张力、不均匀沉降、整体温度作用相对应施调元素固定,对代表交通荷载、瞬时温度作用相对应的施调元素 D_{tr} , D_t 在合理范围内随机取值,形成随机综合施调向量 D ; 然后通过影响矩阵分别计算得到随机群索索力向量和结构目标量,结合结构目标量限值,用式(17)判别此时结构状态所属类别,并同时计算群索索力相异测度值;最后,根据不同类标签索力相异测度值之间的边界,来确定群索索力相异测度的阈值.

蒙特卡罗统计方法确定相异测度阈值体系的步骤如图2所示.图中 k 和 K 分别表示当前蒙特卡罗试验数和总试验数.

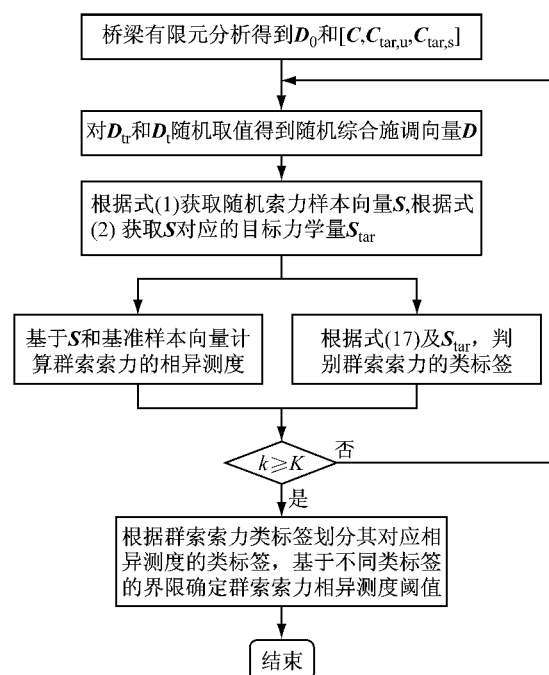


图2 蒙特卡罗法求群索索力相异测度阈值

Fig.2 Thresholds of dissimilarity measure of grouped cable forces by Monte-Carlo method

3 工程应用实例

3.1 工程背景

本文以广东某大跨径双塔斜拉桥(见图3)为工程背景,该斜拉桥共四个索面,每个索面40根拉索,共计160根拉索.鉴于桥梁自建成后至2010年间进

行斜拉索索力检测共计八次,且桥梁纵向并非完全对称,本文选取上游侧两个索面的80根拉索的索力值作为一个数据样本,共计16个数据样本。



图3 广东某跨海大桥实例

Fig.3 Case study of a cable stayed bridge in Guangdong Province, China

所有的斜拉索索力数据由国内某科研单位定期检测得到。历年单索索力变化程度的分析比较表明各组索力数据之间具有极大的相似性,除极个别拉索索力值较往年变化接近 $\pm 10\%$ 外,所有拉索索力

变化均保持在 $-5\% \sim 5\%$ 范围内。此外,从桥梁真实运营状况来看,群索索力状态良好,大体上满足桥梁正常运营要求。

如前所述,应用蒙特卡罗方法确立群索索力阈值体系的关键问题之一是求得与极限状态相匹配的类标签。本文采用桥梁通用有限元软件 Midas Civil 建立该桥的斜拉桥有限元模型(见图4)。按最不利位置布置活载,计算得到全桥的承载能力极限状态(以单侧塔底截面弯矩为目标力学量)和正常使用极限状态(以中跨跨中挠度为目标力学量),得到其各自的阈值在表2中给出。通过初始优化调索计算,得出初始施调向量和影响矩阵。两种极限状态如图5所示。



图4 Midas Civil 建立的有限元模型

Fig.4 FEM model of the target bridge by Midas Civil

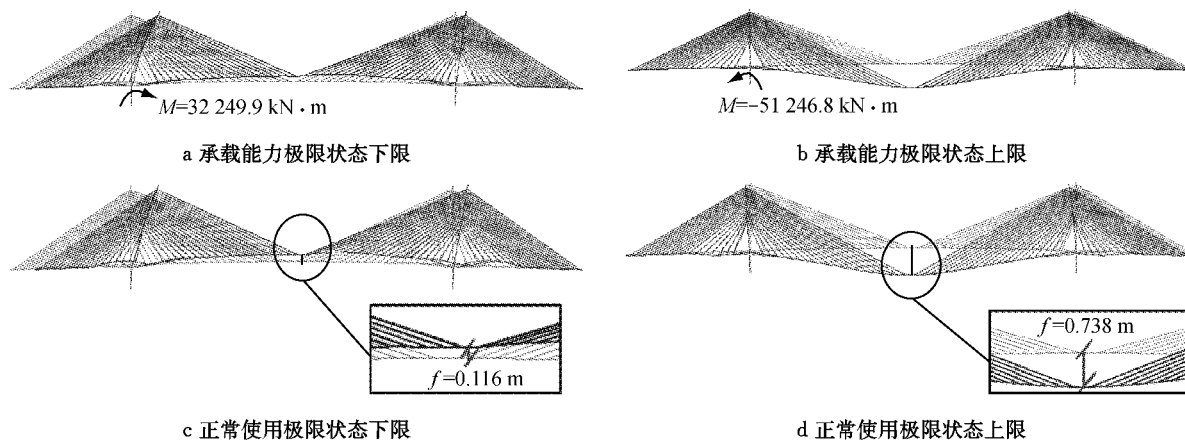


图5 极限状态变形图

Fig.5 Limit stated deformation configuration of the target bridge

表2 极限状态时目标力学量阈值

Tab.2 Threshold of target variables to limit state			
目标力学量	阈值下限	阈值上限	极限状态
塔底弯矩/ $\text{kN} \cdot \text{m}$	-51 246.8	32 249.9	承载能力
中跨跨中挠度/m	-0.738	0.116	正常使用

3.2 蒙特卡罗统计试验

为了取得尽可能接近实际运营条件下的群索索力数据样本,并使该样本尽可能反映所有工程空间中的结构行为,需要对交通流荷载进行合理建模。这种建模明显不同于规范中车道荷载建模,既要模拟实际交通流作用在桥面上的随机性,又要不拘泥于具体加载模式和随机分布类型,从而简化分析。

为此,将交通流荷载模拟成80个独立分布的随机集中力,作用位置位于拉索与主梁锚固处,每个随机集中力在 $[-68.6 \text{ kN}, 205.8 \text{ kN}]$ 之间均匀分布(考虑到短期整体温度效应,特将分布区间下限取为适宜负值)。为了避免多次重复有限元分析,利用事先得到的影响矩阵代替随机活荷载与群索索力及结构目标力学量之间的复杂函数关系进行蒙特卡罗仿真,共计180 000次,为绘图方便,二次随机抽样5 000次,形成5 000组数据样本。每次仿真同时产生群索索力样本、结构目标力学量样本(见图6和7)。

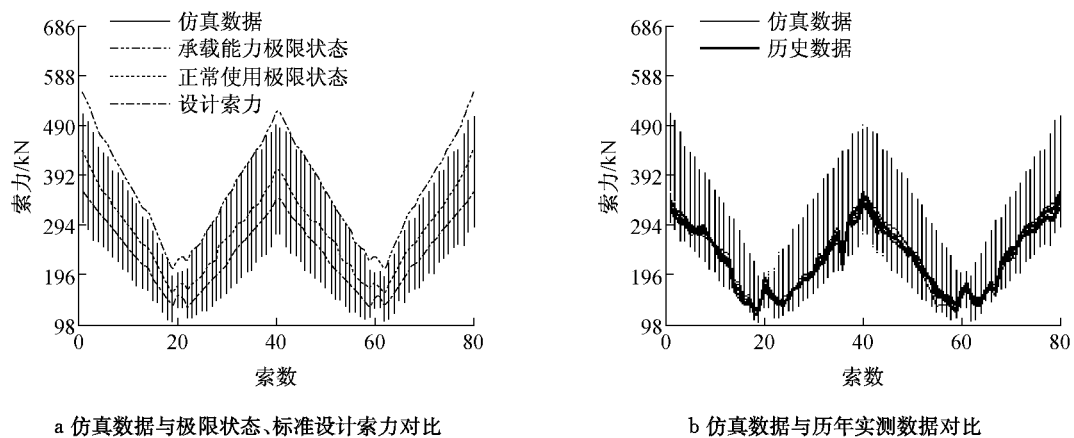


图6 蒙特卡罗仿真得到的群索索力样本

Fig.6 Samples of grouped cable forces by Monte-Carlo simulation

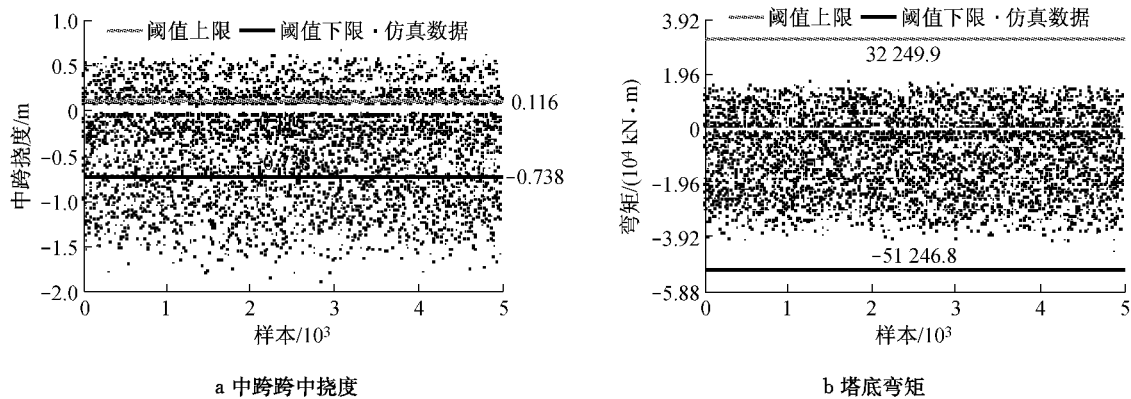


图7 蒙特卡罗仿真得到的目标力学量

Fig.7 Samples of target variables by Monte-Carlo simulation

从图6和7可见,仿真得到群索索力全部覆盖设计索力、正常使用极限状态索力,与承载力极限状态索力非常贴近,这说明仿真得到的群索索力样本的代表性很好,能够反映工程可行域内的群索受力大小关系。同样,目标力学量的仿真样本也满布其工程可行域,样本集包含了全部结构行为信息。

3.3 相异测度比选及其阈值体系的确定

假设桥梁成桥阶段为健康状态,选择成桥群索索力为基准,计算相应的相异测度,并利用正常使用极限状态功能方程计算得到类标签。于是,以相异测度描述的群索索力空间中,每个数据点都与一个类标签相关联。

利用仿真得到的各相异测度数据,按照式(8),可以对各相异测度的分类能力进行评价,见表3。可以看出,按分类能力大小排序,最好的测度是Canberra距离,其次是街区距离和欧式距离,而切比雪夫距离、角分离度和相关系数的 J_4 准则值很小,不适于用作数据的分类。

表3 各种相异测度的分类能力比较(J_4 准则)Tab.3 Comparison of capacities of dissimilarity measures(J_4)

相异测度	类间散度	类内散度	总散度	J_4 准则
欧式距离	3.09×10^{-4}	2.19×10^{-4}	5.28×10^{-4}	0.709 6
街区距离	2.22×10^{-6}	1.68×10^{-6}	3.90×10^{-6}	0.757 6
切比雪夫距离	1.45×10^{-3}	3.32×10^{-3}	1.78×10^{-3}	0.229 8
Canberra 距离	6.10	5.09	11.2	0.834 5
角分离度	6.90×10^{-7}	1.31×10^{-7}	8.21×10^{-7}	0.190 5
相关系数	1.15×10^{-4}	2.00×10^{-5}	1.35×10^{-4}	0.174 4

图8中,深色点为满足正常使用极限状态的样本,浅色为不满足的样本。可以看出,两类不同类标签的数据在Canberra距离、街区距离、欧式距离散点图中,存在着两个清晰的界限,将测度空间区隔为完全安全区、完全危险区和混合区。在切比雪夫距离中,完全危险区界限明显,完全安全区界限已经很难给出了,混合区几乎完全覆盖带安全类标签的数据。而对于角分离度和相关系数,安全类标签数据和危险类标签数据充分混合,几乎整个测度空间都成为混合区,失去了分类的能力。

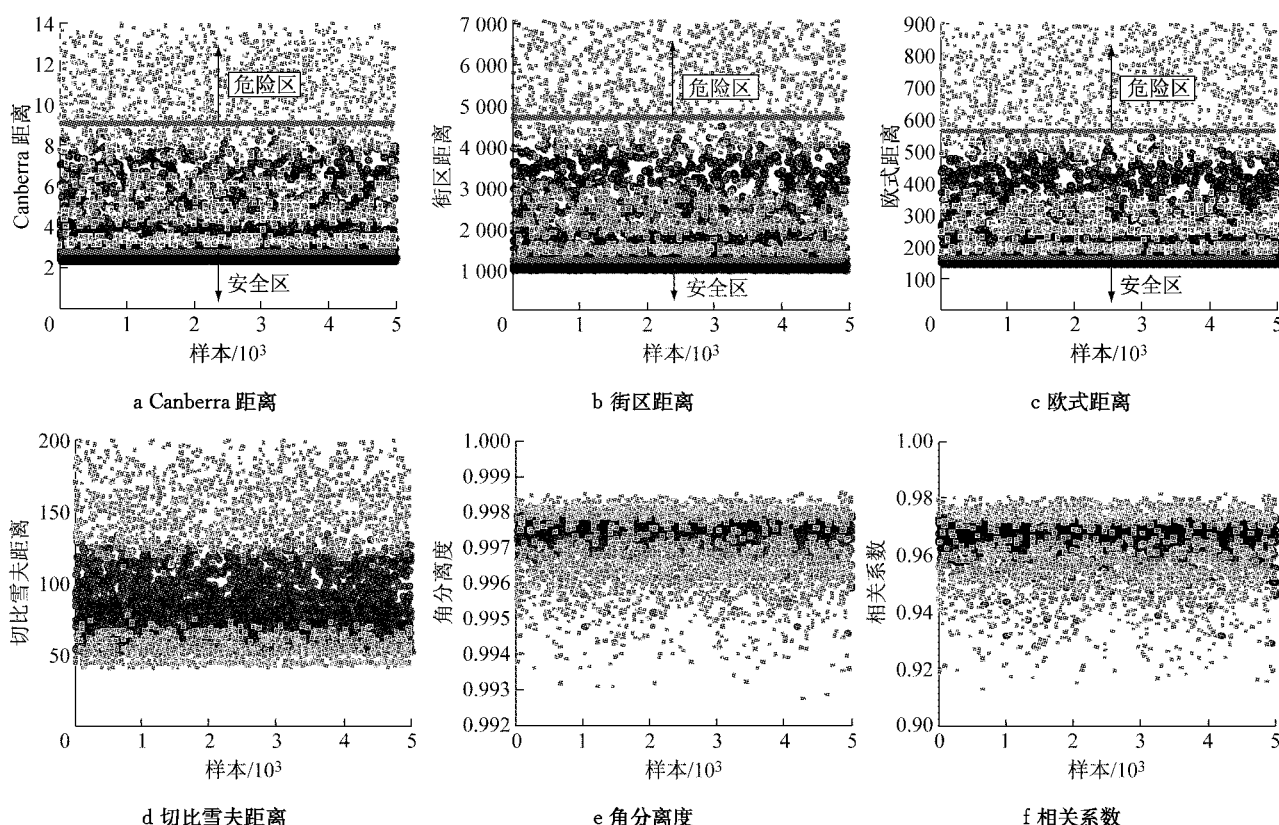


图 8 群索索力相异测度蒙特卡罗仿真散点图

Fig. 8 DM scatter plot of grouped cable forces from Monte-Carlo simulation

对于图 8a~d, 测度空间中不同类数据区的界限可由下式确定:

$$\begin{cases} [DM(\cdot)]_{\text{safety}} = \min(DM(S_{\text{unsafety}}, S_0)) \\ [DM(\cdot)]_{\text{unsafety}} = \max(DM(S_{\text{safety}}, S_0)) \end{cases} \quad (22)$$

由各相异测度指标的公式可知, 当数据样本的相似性越小时, 欧式距离、街区距离、切比雪夫距离及 Canberra 距离等四项指标值越大, 而角分离度及相关系数等指标值相应越小. 结合 J_4 准则, 选取前三项相异测度指标的最大值、最小值作为其各自的阈值, 如表 4 所示.

表 4 相异测度阈值

Tab. 4 Threshold of dissimilarity measures

相异测度	$[DM(\cdot)]_{\text{unsafety}}$	$[DM(\cdot)]_{\text{safety}}$
欧式距离	566.772 6	168.043 5
街区距离	4 679.680 0	1 227.920 0
Canberra 距离	9.086 3	2.836 8

3.4 基于实测群索数据的状态评估

为验证群索索力阈值体系的合理性和有效性, 将八年来索力普查测得的群索索力数据样本(跨度从 1998 年到 2010 年, 其中, 1999, 2000, 2003, 2006, 2009 年没有进行检测, 因此共得到 8 年的数据, 按上下游, 共 16 组数据)应用测度计算公式, 基准选为

竣工试验时上游侧两个索面的 80 根索组成的模式样本, 得到 16 个测度数据, 以散点的形式绘制在图 9 中. 其中, 三角形数据点为竣工试验时的测度, 由于是自己与自己相比, 因此测度均取值为零, 圆形数据点为历年来测度最大点, 即距离安全界限最近的点. 结果表明, 这些数据均处于相应测度空间的安全区域内, 说明该桥的结构整体安全性和使用性均满足, 这与该桥实际状态相吻合.

从图 9a~c 中也可看出, 无论是 Canberra 距离、街区距离还是欧式距离, 距离安全域上限最近的点发生在最近一次监测年限(2010 年)上, 而且随着桥梁结构服役年限的增长, 各测度均有逐渐上升并逼近安全域上限的趋势. 这反映了桥梁的整体性能在持续地下降, 这一现象应该引起注意.

4 结论

(1) 群索索力状态对应于特定的斜拉桥整体内力状态, 故可通过将群索索力作为评估代理, 实现桥梁整体健康状态的评估.

(2) 基于蒙特卡罗方法, 结合桥梁极限状态下

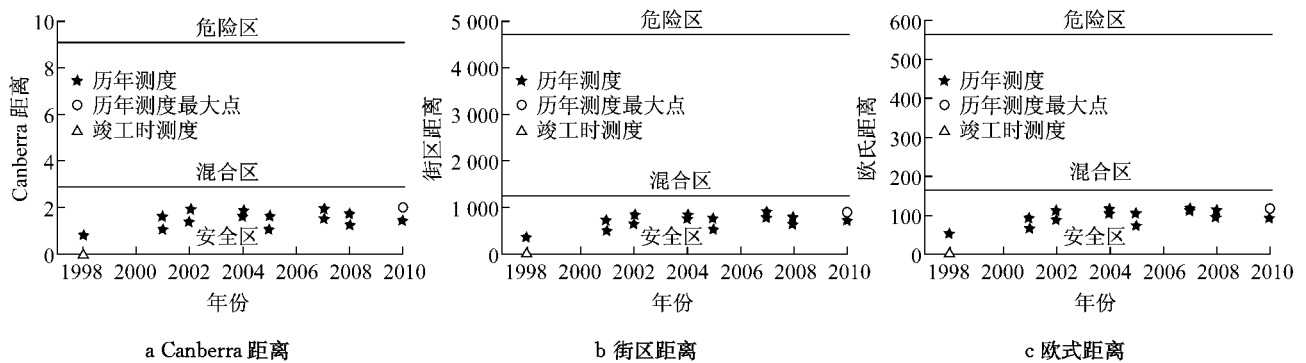


图9 实测群索索力相异测度状态评估

Fig.9 Health status evaluation driven by DM of the measured data of grouped cable force

的目标力学量阈值,可以建立群索索力样本相异测度的阈值体系。

(3) 在群索索力相异测度计算中,Canberra 距离、街区距离、欧式距离分类性能较好,可被用于类似结构的状态评估。

(4) 随运营时间增长,斜拉桥结构的群索索力相异测度值逐年增大,反映结构的整体性能在逐年下降。

本文所研究的方法既可以利用历史检测数据,建立一套索力普查后的斜拉桥结构安全性评估方案,也可以利用桥梁健康监测系统中群索体系的实时监测数据,经由简单的分析处理,实现斜拉桥结构在线安全预警和评估功能。由于篇幅所限,本文在进行影响矩阵计算时未考虑非线性因素的影响,在后续工作中将开展相关研究。

参考文献:

- [1] 伍华成,项贻强,李毅.大跨度斜拉桥的安全性评估研究[J].中国市政工程,2006(1):43.
WU Huachen, XIANG Yiqiang, LI Yi. Research on safety evaluation of large span cable stayed bridge[J]. China Municipal

Engineering,2006(1):43.

- [2] 尚鑫,徐岳.基于灰色理论的斜拉桥拉索安全性评价[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):52.
SHANG Xin, XU Yue. Safety-based cables' condition evaluation of cable stayed bridge with grey theory[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science, 2004, 24(1): 52.
- [3] 徐光辉,华孝良.桥梁结构非线性分析[M].北京:人民交通出版社,1997.
XU Guanghui, HUA Xiaoliang. Nonlinear analysis of bridge structure[M]. Beijing: China Communications Press, 1997.
- [4] 肖汝诚,项海帆.斜拉桥索力优化的影响矩阵法[J].同济大学学报:自然科学版,1998,26(3):235.
XIAO Rucheng, XIANG Haifan. Influence matrix optimization method on cable force of cable stayed bridge [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1998, 26(3): 235.
- [5] Sohn H, Farrar R C, Hunter F N, et al. Structural health monitoring using statistical pattern recognition techniques[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, ASME, 2001, 123: 706.
- [6] Webb A R. 统计模式识别[M]. 2版.王萍,杨培龙,罗颖昕,译.北京:电子工业出版社,2004.
Webb A R. Statistical pattern recognition [M]. 2nd ed. Translated by WANG Ping, YANG Peilong, LUO Yingxin. Beijing: Electronics Industry Press, 2004.
- [7] Kalos M H, Whitlock P A. Monte-Carlo Methods [M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.