

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.022

# 南昌新八一大桥健康监测预警指标计算分析

张记东, 梁力, 李鑫, 吴凤元

(东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110819)

**摘要:**为了保证桥梁健康监测系统的有效性和及时性,给桥梁管理者提供维修及加固的依据,以南昌市新八一大桥为工程背景,在有限元数值模拟结合传感器监测数据的基础上,建立了多指标并行预警的结构预警体系,阐述了预警指标、预警阈值和预警流程,并重点对索力、关键部位应力和挠度、疲劳车辆荷载、固有频率变化率等预警指标进行了计算分析。应用结果表明,在当前荷载作用下新八一大桥的各项预警指标的结果都正常,满足使用要求。

**关键词:**桥梁结构;健康监测;有限元;预警指标;预警阈值

**中图分类号:**TU446 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S1-0121-05

## Analysis of warning indices for bridge health monitoring of the eight one bridge in nanchang

Zhang Jidong, Liang Li, Li Xin, Wu Fengyuan

(School of Resources &amp; Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, P. R. China)

**Abstract:** To ensure the effectiveness and timeliness of the bridge health monitoring system and provide the basis for the maintenance and reinforcement of bridge managers, based on the finite element analysis and sensor monitoring data the structural health monitoring system of the Eight one bridge in Nanchang was taken as the research object and a structural early warning system for multi index parallel warning was proposed. The early warning indices, thresholds and workflow were elaborated and the warning indices, such as cable force, The key section of stress and vertical deformation, fatigue vehicle loads, and the change rates of natural frequencies were particularly calculated and analysed. The results of the research demonstrate that under the current load circumstances, the results of these warning indices are normal and the components can meet the operation requirements.

**Key words:** bridge structure; health monitoring; finite element analysis; early warning index; early warning threshold

中国桥梁健康监测系统经过 20 多年的发展已经在工程应用上取得了长足的进步,越来越多的桥梁安装了结构健康监测系统。

健康监测系统的 2 个重要功能分别是结构预警和安全评估。其中,系统实现功能的第一步就是结构预警,它是以自动处理和统计分析系统实时采集

的监测数据为主要手段,目的是能够迅速掌握和了解结构状态的改变,从而当表征结构状态的单个或多个指标出现异常时及时发出警报。

结构预警信号发出与否代表着结构所处得安全状态是截然不同的,一旦结构出现预警,就需要开展针对桥梁结构安全状态的评估。由此看来,桥梁健

收稿日期:2015-11-10

基金项目:国家自然科学基金(51474048)

作者简介:张记东(1991-),男,主要从事桥梁工程数值模拟研究,(E-mail)zhangjidonghhht@163.com。

梁力(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)ll-neu@163.com。

健康监测预警指标的研究具有很重要的意义。

目前,中国在桥梁的健康监测方面投入了很大的财力物力。结构预警体系在东海大桥<sup>[1]</sup>、汀九大桥<sup>[2]</sup>、苏通大桥<sup>[3]</sup>均得到了成功应用。然而,这些结构预警体系也存在着一定的缺陷,主要包括预警指标是对某一特定桥梁提出的,并不一定适合其他桥梁结构,且缺乏对结构性能改变反应敏感的参数有效研究,应用范围受到了一定的局限。

因此,文章以南昌新八一大桥为工程背景,结合该桥健康监测系统提出了有效和及时预警的多指标并行预警体系,为桥梁结构的安全评估提供技术指南,给桥梁管理者提供维修加固的依据,丰富桥梁健康监测理论,也为建立其他桥梁的健康监测系统积累经验。

### 1 工程概况

南昌新八一大桥是江西省第一座斜拉桥,大桥整体可以看作两个对称而又独立的结构体系,主孔为 2×160 m,总长 1 040 m,具体跨径布置为 2×(50+2×160+3×50)。大桥结构体系为预应力钢筋混凝土塔梁墩固结双独塔双索面扇形密索体系,桥面宽 28 m。主塔造型为 H 型,塔高 103 m。斜拉索在主梁上间距为 8 m,根据受力要求采用 6 个不同的规格,分别为 85/127/151/163/187/211,斜拉索钢丝直径 φ 7 mm,外包聚乙烯 PE 护套。图 1 为主桥总体布置图。

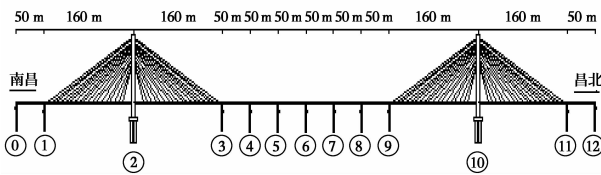


图 1 主桥总体布置图

通过有限元数值分析了解新八一大桥的结构特点,同时考虑提供必要的的数据供桥梁管理者参考,方便做出科学合理的决策,新八一大桥结构健康监测传感器采集项目包括:塔梁索温度;环境气象;整体结构挠度;索塔变位;重要部位的局部变形;结构动力特性;拉索索力;重要部位应力变化。大桥健康监测主要传感器如表 1 所示。

表 1 八一桥传感器

序号	分项	传感器类型	测点位置
1	数字温度	数字温度传感器	主梁、主塔、斜拉索

续表 1

序号	分项	传感器类型	测点位置
2	振弦温度	振弦传感器	主梁、主塔
3	振弦应力	振弦传感器	主梁、主塔
4	主梁挠度	压力变送器	主梁腹板外侧
5	塔偏角	倾角仪	塔上横梁附近
6	动态称重	压电传感器	北塔下方桥面
7	光栅应力	光纤光栅	主梁、主塔
8	斜拉索索力	压力环	斜拉索塔锚固端
9	塔顶位移	GPS	塔顶

### 2 南昌市新八一大桥有限元分析

建立以及时预警为目标的多指标并行预警体系的前提是分析研究南昌市新八一大桥的结构设计特点、环境状况、运营工况,从而建立一个能真实体现桥梁几何、物理及受力特点的三维有限元实体模型<sup>[4]</sup>。通过对有限元模型的静动力分析,确定结构应力及位移的最不利部位,进而进一步得到预警指标及其阈值。

采用桥梁结构分析软件 Midas/Civil,建立南昌市新八一大桥主桥空间杆系有限元模型并给与修正<sup>[5-6]</sup>,如图 2 所示,并按以下原则进行模型节点和单元的划分。

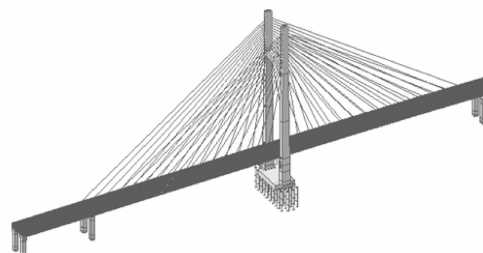


图 2 南昌市新八一大桥(南桥)有限元模型

- 1)在结构的定位点设置节点,梁段按施工长度自然分块,主梁和索塔施工阶段的端点设置节点;
- 2)较长的自然分块、塔梁交界处、辅助墩拉压支座处以及变截面处应进行适当细划;
- 3)斜拉索两端设置节点,主梁和索塔与拉索连接处设置节点;
- 4)变形控制截面和内力控制截面处应设置节点。

按以上原则全桥共离散为 939 个单元,1 190 个节点,其中斜拉索采用只受拉桁架单元模拟,主梁和索塔采用梁单元模拟。斜拉索塔端和梁端锚点按设计坐标建立,分别与主梁和主塔在锚点对应的节点处刚性连接。斜拉索的材料参数取值为表 2 所示。

表 2 材料参数取值

材料	容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	弹模/ GPa	线膨胀系 数/ $\times 10^{-5}$
主梁砼 C50	26	0.167	35	1.00
主塔砼 V40	26	0.167	33	1.00
钢绞线	78.5	0.3	195	1.20
211 号斜拉索	82.8			
187 号斜拉索	82.8			
163 号斜拉索	83.1			
151 号斜拉索	83.0	0.3	200	1.20
127 号斜拉索	84.6			
85 号斜拉索	83.9			

表注:斜拉索按照直径的不同划分为 6 种等效容重,弹性模量仅为理论值。

### 3 多指标并行预警的结构预警体系

#### 3.1 预警指标

预警指标的选择有以下几点要求:兼顾指标本身的实用性与普遍性;对结构异常变化较为敏感;可以根据有限元数值模型的计算分析和对监测数据的处理分析得到。

文中依据南昌市新八一大桥有限元数值模型结合该桥健康监测系统选定了 5 项预警指标,包括:索力;关键部位应力;关键部位挠度;疲劳车辆荷载;固有频率变化率。

#### 3.2 阈值设定原则

参考香港地区和美国公路运输协会(AASHTO)的相关规范,警戒值的大小取为正常运营极限值的 75%,此时的安全系数为  $1/0.75 = 1.33$ ,预留了部分空间以判断是否需要对接结构构件的运营状态监测结果( $\sigma_m$ )进行详细的健康评估。

大桥的安全状态从坏到好依次划分为红色报警状态、黄色预警状态和绿色正常监测状态,各状态之间的临界值就是所要确定得阈值。

按照上述原则的划分的两线三状态示意图如图 3 所示,“两线”指的是预警线和报警线,“三状态”指的是正常监测状态、预警状态和报警状态。预警流程如图 4 所示。

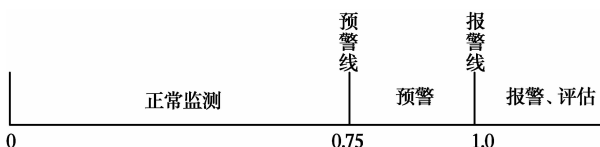


图 3 健康监测系统两线三状态示意图

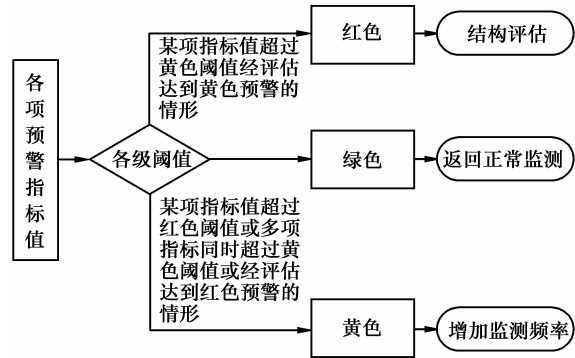


图 4 预警流程

## 4 预警指标的分析计算

### 4.1 索力预警参数

记桥梁拉索测试时的索力为  $f_{cs}$ ,最不利作用下桥梁拉索的索力计算值为  $f_j$ 。大桥的索力控制值如表 3 所示。索力预警级别的具体划分如下<sup>[9]</sup>:

绿色:  $f_{cs} \leq 0.75 f_j$ ,此时实测索力尚未大于警戒索力值;

黄色:  $0.75 f_j \leq f_{cs} \leq 1.0 f_j$ ,此时结构处于偏不利状态,实测索力值与最不利作用下索力计算值比较接近;

红色:  $f_{cs} \geq f_j$ ,此时桥梁的实测索力达到或大于允许最大索力值。

同时,考虑到拉索自身的安全性,设定拉索索力的最小值时以保障拉索不会突然断裂作为主要依据,采用拉索的最大容许拉力的 0.4 倍作为拉索最小值<sup>[10]</sup>,即  $f_{\min} = 0.4 f_s A_i / 2.5$ 。

表 3 大桥的索力控制值

编号	$f_j /$ kN	$f_{\min} /$ kN	编号	$f_j /$ kN	$f_{\min} /$ kN
A1-S-2	1 924	874	A1-S-10	1 985	874
A7-S-2	3 710	1 306	A7-S-10	3 588	1 306
A13-S-2	4 480	1 553	A13-S-10	4 574	1 553
A4-X-2	3 081	1 676	A4-X-10	3 115	1 676
A10-X-2	4 084	1 923	A10-X-10	3 861	1 923
A16-X-2	4 491	2 170	A16-X-10	4 833	2 170
B1-S-2	1 928	874	B1-S-10	1 975	874
B7-S-2	3 829	1 306	B7-S-10	3 471	1 306
B13-S-2	4 416	1 553	B13-S-10	4 474	1 553
B4-X-2	2 972	1 676	B4-X-10	3 063	1 676
B10-X-2	4 035	1 923	B10-X-10	4 001	1 923
B16-X-2	4 405	2 170	B16-X-10	4 508	2 170

表注:测点编号 A 代表岸侧,B 代表河侧。

#### 4.2 关键部位应力预警参数

应力阈值表征某点应力的允许变化范围,它是一种相对值,不是绝对值,原因是在成桥过程中,由于恒载的作用桥梁就有了一定的初始应变,但传感器都是后来安装的,所以这一应变值是无法直接通过传感器测出的,只能测出后来应变的变化量<sup>[11]</sup>。

记大桥某点测试时的应力为  $\sigma_{cs}$ , 在最不利可变荷载作用下大桥测试点的应力计算值为  $\sigma_j$ 。大桥应力控制值如表 4 所示。应力预警级别的具体划分如下:

绿色:  $\sigma_{cs} \leq 0.75\sigma_j$ , 此时结构处于安全状态, 实测应力尚未大于警戒应力值;

黄色:  $0.75\sigma_j \leq \sigma_{cs} \leq 1.0\sigma_j$ , 此时结构处于不利状态, 实测应力与最不利设计应力较接近;

红色:  $\sigma_{cs} \geq 1.0\sigma_j$ , 此时桥梁的实测应力达到或大于允许最大应力值。

表 4 大桥的应力控制值

光纤光栅 测点编号	$\sigma_j$ /MPa	
	max	min
2A-14-1	-0.03	-2.45
2A-14-2	5.77	0.07
2A-13-1	0.017	-2.643
2A-13-2	6.202	0.052
2A-12-1	0.08	-2.67
2A-12-2	6.23	-0.03
2A-Ta-1	2.14	-1.21
2A-Ta-2	2.14	-1.22
2B-Ta-1	2.11	-1.21
2B-Ta-2	2.11	-1.22
2B-12-1	0.09	-2.63
2B-12-2	6.15	-0.08
2B-13-1	0.04	-2.62
2B-13-2	6.13	-0.02
2B-14-1	0.04	-2.36
2B-14-2	5.57	0.05

注:测点编号 A 代表岸侧, B 代表河侧; 中间代表断面, 数字为 1~18 号斜拉索, Ta 表示主塔内部。

#### 4.3 关键部位挠度预警参数

记大桥某点测试时的挠度为  $\eta_{cs}$ , 在最不利作用下该点的挠度计算值为  $\eta_j$ , 桥梁的允许最大挠度值为  $\eta$ 。大桥挠度控制值如表 5 所示。挠度预警级别的具体划分如下:

绿色:  $\eta_{cs} \leq 0.75\eta_j$ , 此时结构处于安全状态, 实测挠度尚未大于警戒挠度值;

黄色:  $0.75\eta_j \leq \eta_{cs} \leq 1.0\eta_j$ , 此时结构处于不利状态, 实测挠度值与最不利作用下的计算挠度值比

较接近;

红色:  $\eta_{cs} \geq \eta$ , 此时桥梁的实测挠度达到或大于允许最大挠度值。

表 5 大桥的挠度控制值

编号	$\eta$ /m	
	max	min
a14	0.012	-0.109
a11	0.016	-0.139
a8	0.018	-0.124
a5	0.016	-0.084
基准点	0	0
b5	0.016	-0.082
b8	0.019	-0.121
b11	0.017	-0.135
b14	0.012	-0.109

#### 4.4 疲劳车辆荷载预警参数

考虑到新八一大桥动应力测点数量较少, 为了敏感地发现桥梁动力性能的改变, 文中选取疲劳车辆荷载作为疲劳损伤预警指标。又因为 30 kN 以下的车辆所产生的疲劳损伤效应远不如 30 kN 以上的车辆所产生的疲劳损伤效应, 所以论文不考虑总重小于 30 kN 的车辆所产生的疲劳损伤效应。

参考英国规范 BS5400 知, 循环次数  $n$  及应力幅  $\sigma_r$  的  $m$  次方的积决定了监测时长疲劳损伤度  $n/N$ , 而过往车辆荷重及车辆数又分别直接影响着应力幅  $\sigma_r$  和循环次数  $n$ , 由此构建如下的疲劳车辆荷载预警指标<sup>[12-13]</sup>

$$V = \sum n_i W_i^3,$$

式中:  $W_i$  为第  $i$  车的总重;  $n_i$  为第  $i$  车的车辆数。截取 24 h 的监测数据作为车辆荷载数据。

关于预警阈值的确定, 黄色预警阈值取八一大桥具有 95% 保证率的分位值的疲劳车辆荷载作为预警指标, 即  $V_{95\%} = 4.5 \times 10^7 \text{ kN}^3/\text{d}$ 。同时, 红色预警阈值取为  $K \cdot V_{95\%}$ , 在综合考虑总损伤度  $D$  及总损伤度  $D$  与指标  $V$  对应关系的基础上<sup>[14]</sup>, 取  $K = 1.5$ , 其值为  $6.75 \times 10^7 \text{ kN}^3/\text{d}$ 。

#### 4.5 固有频率变化率预警参数

固有频率变化率为

$$v_f = \frac{f - f_0}{f_0},$$

式中:  $f$  当前实测固有频率;  $f_0$  为基准固有频率, 由基准模型得到, 八一大桥的一阶竖弯频率为 0.455 Hz, 周期为 2.196 s。

邓杨等<sup>[14]</sup>的研究表明, 在环境激励的影响下润

扬长江大桥的模态频率的变化幅度为1%~4%,结合大桥的监测数据,固有频率变化率的黄色预警阈值取为一阶竖弯的±4%(表6)。此外,中国《公路桥梁承载能力检测评定规程》<sup>[16]</sup>指出,当实测固有频率除以理论频率的值范围在0.9~1.0内时表明此时结构的安全状态较差,因此红色预警阈值取为一阶竖弯的10%,即±10%。主梁竖弯振形如图5所示。

表6 大桥的固有频率变化率控制值

黄色预警/Hz	红色预警/Hz
$0.455 \times (1 \pm 4\%)$	$0.455 \times (1 \pm 10\%)$

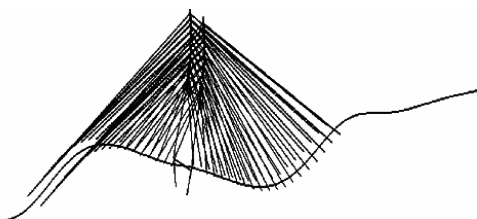


图5 主梁竖弯振形图

## 5 结论

文章以南昌新八一大桥健康监测系统为工程背景,在有限元数值模拟的基础上,建立了多指标并行预警体系,并阐述了诸如预警流程、预警指标以及其阈值等关键性问题,并重点对斜拉索索力、关键部位应力和挠度、疲劳车辆荷载、固有频率变化率等预警指标进行了计算分析。应用结果表明,在当前荷载作用下新八一大桥的各项预警指标的结果都正常,满足使用要求,并得到以下结论:

1) 桥梁结构健康监测系统的建立,应结合桥梁本身的结构特点及其所处外部环境,确定监控量测的关键点。为了判别结构的不同状态,设置黄色预警和红色预警2层阈值,并将警戒值的大小取为正常运营极限值的75%,实现了两线三状态的多指标并行预警,保证了预警的有效性和及时性。

2) 将关键部位应力和挠度测点的实测值减去温度影响(包括整体温度和温差影响)之后,再与表中阈值比,保证了判断结果的准确性,可以用于系统的实时在线监测。

3) 在借助动态称重系统的基础上,获取准确的模型,并将疲劳车辆荷载预警指标确定为具有95%保证率的疲劳车辆荷载分位值。

4) 基于有限元基准模型得到八一桥前10阶自振频率和振型特征,取一阶竖弯的±4%和10%可以作为大桥的整体振动特性方面的预警指标。

## 参考文献:

- [1] 张敏,杨志芳,朱利明. 东海大桥桥梁结构健康监测系统设计[J]. 桥梁建设,2006,02:67-70.
- [2] Ko J M, Ni Y Q. Structural health monitoring and intelligent vibration control of cable-supported bridges: research and application [J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2003,7(6):701-716.
- [3] 余波,邱洪兴,王浩,等. 苏通大桥结构健康监测系统设计[J]. 地震工程与工程振动,2009,29(4):170-177.
- [4] Michael H J, Semyon T, Patrick W P, et al. The Gerald Desmond Cable-Stayed Bridge-A case study in performance-based seismic design [J]. Structures Congress, 2013: 781-792.
- [5] Longsheng Bao, Guang Li, Ling Yu, et al. Impact analysis of concrete shrinkage and creep on a prestressed concrete box Girder Bridge[J]. ICTE,2015:1127-1136.
- [6] Teng Jun, Zhu Yanhuang, Zhou Feng, et al. Finite element model updating for large span spatial steel structure considering uncertainties [J]. Journal of Central South University,2010,17(4):857-862.
- [7] 项贻强,李毅,周畅,等. 桥梁结构在线健康监测预警系统 I:监测评估预警体系和模块设计[J]. 交通科学与工程,2009,25(1):26-31.
- [8] 郭毅霖,田蕊. 桥梁结构工程健康监测安全预警系统[J]. 建筑技术,2012,43(2):125-127.
- [9] 张开洪,张奔牛,闫果,等. 大跨度连续刚构桥梁应力、挠度和裂缝实时监测系统研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2010,29(4):521-524,619.
- [10] 温青. 斜拉桥拉索健康监测与状态评估研究[D]. 湖南湘潭:湖南科技大学,2011.
- [11] Yi Li, Hua Wei. Research of sensor fault identification and warning in the Urban Bridge cluster monitoring system. Civil Engineering and Urban Planning 2012:504-509.
- [12] 苏成,廖威,袁昆,等. 桥梁健康监测在线预警指标研究[J]. 桥梁建设,2015,3:44-50.
- [13] André D O, Dan M. F. Bridge performance monitoring based on traffic data [J]. Journal of Engineering Mechanics,2013,139(11):1508-1520.
- [14] 邓扬,丁幼亮,李爱群. 环境条件影响下悬索桥模态频率变异性的定量评价[J]. 振动与冲击,2011,30(8):230-236.
- [15] British Standard BS 5400 1980, Steel, Concrete and Composite Bridges-Part 10: Code of Practice for Fatigue [S]. 2012,43(2):125-127.
- [16] JTG/TJ21—2011,公路桥梁承载能力检测评定规程[S].