

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.019

# 大跨度钢拱桥多指标综合预警体系研究

张远传<sup>1</sup>, 苏成<sup>1,2\*</sup>, 王勇辉<sup>1</sup>, 郑淳<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:**为及时发现结构异常、保障桥梁安全运营,该文以广州新光大桥健康监测系统为工程背景,开展大跨度钢拱桥多指标综合预警体系研究。从环境作用和结构响应2个类别选取多个预警指标,利用实测数据的分布规律设定预警指标阈值,并制定预警指标评分标准,对各项预警指标进行评分。采用层次分析法确定各项预警指标的权重,分别计算环境作用类和结构响应类综合预警得分,进而得到环境作用和结构响应综合预警等级。建立结构整体预警矩阵,确定结构整体预警等级,并制定相应的警后措施。采用该预警体系对新光大桥在某时间段内的状态进行预警分析,结果显示该桥处于二级预警状态,结构整体状态良好,可以正常运营,但需适当加大监测频率。

**关键词:**大跨度钢拱桥;结构健康监测;预警体系;环境作用;结构响应

**中图分类号:**U446

**文献标志码:**A

## 0 引言

中国大规模桥梁建设始于20世纪90年代,截至2022年底,中国拥有公路桥梁103.3万座,总长约8576万延米,其中特大桥8816座,总长约1621万延米<sup>[1]</sup>。桥梁作为重要的交通枢纽,一旦发生安全事故,将造成难以估量的损失。为保障桥梁安全运营,国内外许多大跨度桥梁相继安装了健康监测系统<sup>[2-4]</sup>。结构预警是桥梁健康监测系统的一个重要功能,其目标是通过监测系统采集的数据进行分析处理,快速了解桥梁结构的运营状态,及时发现桥梁结构可能存在的安全隐患,为判断是否有必要进行下一步的结构安全评估提供依据<sup>[5-8]</sup>。由此可知,结构预警对于发挥桥梁健康监测系统的作用、保障桥梁结构的安全运营具有重要意义。

近年来中国在桥梁健康监测预警研究方面进行了有益的探索,如芜湖长江公路二桥<sup>[9]</sup>、西堠门金塘大桥<sup>[10]</sup>、湘潭湘江特大桥<sup>[11]</sup>和石首长江公路大桥<sup>[12]</sup>的健康监测系统均建立了结构预警体系。但是,这

些结构预警体系主要是针对斜拉桥、悬索桥和梁桥提出的,不能完全适用于拱桥,且预警指标比较单一。广州新光大桥健康监测系统<sup>[13]</sup>针对钢拱桥的特点建立了多指标在线预警体系,为拱桥预警系统的建立提供了宝贵经验。然而,该预警体系只是对各项预警指标进行单独分析,缺乏对各项预警指标分析结果的综合考虑,难以判断桥梁结构的整体状态。本文以新光大桥健康监测系统为工程背景,开展大跨度钢拱桥多指标综合预警体系研究,通过综合评价多个预警指标判定桥梁结构的整体状态,弥补现有预警体系的不足,同时也为类似桥梁的结构预警提供借鉴。

## 1 多指标综合预警体系

多指标综合预警体系的基本思路:从环境作用和结构响应2个类别分别选取若干个物理量作为预警指标,利用实测数据的统计规律设定预警指标阈值,并制定预警指标评分标准,对各项预警指标进行评分;然后采用层次分析法确定各项预警指标的权重,分别计算环境作用类和结构响应类综合预警得

收稿日期:2023-09-13(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51678252);广州市科学研究计划重点项目(编号:201804020069)

作者简介:张远传,男,硕士研究生.E-mail:19966504894@163.com

\*通信作者:苏成,男,博士,教授.E-mail:cvchsu@scut.edu.cn

分,进而得到环境作用类和结构响应类综合预警等级;最后建立结构整体预警矩阵,确定结构整体预警等级,并制定相应的警后措施。

## 1.1 预警指标阈值及评分

### 1.1.1 预警指标阈值

预警指标阈值是用于结构预警的重要参数。为了更好地反映结构的实际运营状况,通常可以根据预警指标实测数据的统计规律设定预警阈值<sup>[13]</sup>。在数理统计中,95%和5%是进行假设检验时用于判断事件可靠性的常用置信水平。因此,本文将预警指标日最大值和日最小值概率分布函数的95%和5%分位值设定为黄色阈值,将年最大值和年最小值概率分布函数的95%和5%分位值设定为红色阈值。

为了得到预警指标最值分布规律,可以从桥梁健康监测系统的数据库中选取一年的实测数据,计算并统计预警指标在一年中的日最大值和日最小值。假设日最大值和日最小值均为具有各态历经性的随机过程,从而获得日最大值概率分布函数 $F_{d_{\max}}(x)$ 以及日最小值概率分布函数 $F_{d_{\min}}(x)$ 。假设每一天的预警指标日最大值和日最小值均相互独立,则年最大值概率分布函数 $F_{y_{\max}}(x)$ 和年最小值概率分布函数 $F_{y_{\min}}(x)$ 可分别表示为:

$$F_{y_{\max}}(x) = \prod_{i=1}^{365} F_{d_{\max}}^{(i)}(x) \quad (1)$$

$$F_{y_{\min}}(x) = 1 - \prod_{i=1}^{365} [1 - F_{d_{\min}}^{(i)}(x)] \quad (2)$$

式中: $F_{d_{\max}}^{(i)}(x) = F_{d_{\max}}(x)$ ,  $F_{d_{\min}}^{(i)}(x) = F_{d_{\min}}(x)$ ,  $i=1, 2, \dots, 365$ 。

值得注意的是,当预警指标日最大值和日最小值随机过程不满足以上假定时,需要进行一定的分解,再按以上公式进行计算<sup>[14]</sup>。

### 1.1.2 预警指标评分

各项预警指标的物理意义不同,它们之间没有统一的量纲,因此无法直接对各项预警指标进行综合分析。为此,本文采用评分的方式对各项预警指标进行归一化处理,并制定一套预警指标评分标准,如表1所示。

表1中的 $S_i$ 为当前时刻第 $i$ 项预警指标值; $y_{i_{\max}}$ 和 $y_{i_{\min}}$ 分别为第 $i$ 项预警指标的上限和下限黄色阈值, $r_{i_{\max}}$ 和 $r_{i_{\min}}$ 分别为第 $i$ 项预警指标的上限和下限红色阈值,可采用1.1.1节的方法确定; $G_i$ 为当前时刻第 $i$ 项预警

指标的评分。

表1 预警指标评分标准

预警指标评分条件	评分( $G_i$ )
$S_i \geq r_{i_{\max}}$	0
$(y_{i_{\max}} + r_{i_{\max}})/2 \leq S_i < r_{i_{\max}}$	1/3
$y_{i_{\max}} \leq S_i < (y_{i_{\max}} + r_{i_{\max}})/2$	2/3
$y_{i_{\min}} < S_i < y_{i_{\max}}$	1
$(y_{i_{\min}} + r_{i_{\min}})/2 < S_i \leq y_{i_{\min}}$	2/3
$r_{i_{\min}} < S_i \leq (y_{i_{\min}} + r_{i_{\min}})/2$	1/3
$S_i \leq r_{i_{\min}}$	0

## 1.2 分类综合预警分析

采用层次分析法<sup>[15-16]</sup>确定各项预警指标的权重,结合环境作用类和结构响应类各项预警指标评分,按以下公式分别计算环境作用类和结构响应类综合预警得分:

$$R = \sum \beta_i \cdot G_i \quad (3)$$

式中: $R$ 为环境作用类或结构响应类综合预警得分; $G_i$ 为环境作用类或结构响应类第 $i$ 项预警指标评分,按表1确定; $\beta_i$ 为环境作用类或结构响应类各项预警指标的权重,由层次分析法确定。

根据分类综合预警得分 $R$ 以及表2所示的分类综合预警等级评定标准,即可确定环境作用类和结构响应类综合预警等级,分为A、B和C 3个等级。

表2 分类综合预警等级评定标准

分类综合预警得分 $R$	分类综合预警等级
(2/3, 1]	A
(1/3, 2/3]	B
[0, 1/3]	C

注:分类是指环境作用类和结构响应类。

## 1.3 结构整体预警分析

全面考虑环境作用类和结构响应类综合预警等级的影响,构建如表3所示的结构整体预警矩阵,将结构整体预警等级分为4级,其中考虑了环境作用类和结构响应类综合预警等级所反映的情况严重程度的不同。根据环境作用类和结构响应类综合预警等级分析结果,即可利用结构整体预警矩阵确定结构整体预警等级。相应地,可以按表4进一步明确所需采用的警后措施。

## 1.4 预警流程

综上所述,多指标综合预警流程如图1所示,该流程在整体上划分为3个层次。第一层次为预警指

表 3 结构整体预警矩阵

结构响应类综合预警等级	环境作用类综合预警等级		
	A	B	C
A	一级	一级	二级
B	二级	三级	三级
C	四级	四级	四级

表 4 结构整体预警等级及相应的警后措施

预警等级	警后措施
一级	正常运营,正常监测
二级	正常运营,加大监测频率
三级	临时交通管制,加大监测频率
四级	交通管制,全面评估桥梁状态

标分析,目的是得到各项预警指标的评分;第二层次为分类综合预警分析,目的是分别确定环境作用类和结构响应类综合预警等级;第三层次为结构整体预警分析,目的是确定结构整体预警等级。

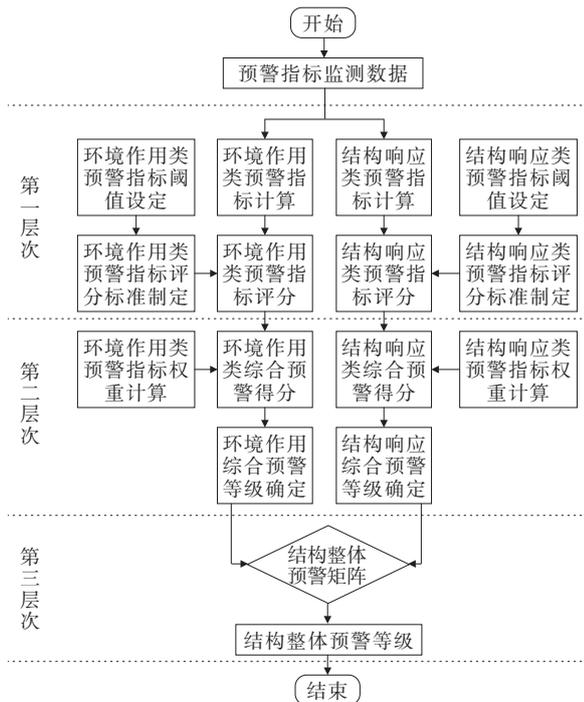
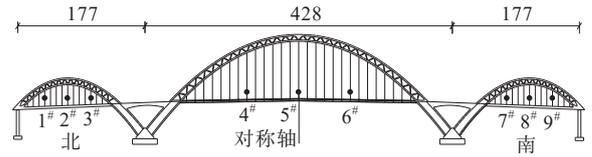


图 1 多指标综合预警流程

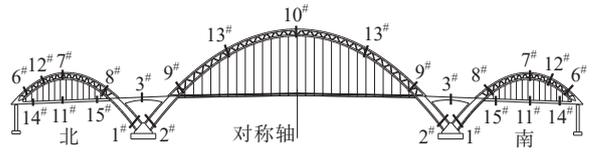
## 2 工程实例

新光大桥是广州新光快速路上的一座大跨度钢拱桥,跨径组合为(177+428+177) m,主要由钢筋混凝土三角刚架、系杆钢拱肋、吊杆和桥面系 4 大部分组成<sup>[17-18]</sup>。新光大桥健康监测系统于 2011 年建成投入使用,该系统监测项目主要包括风速风向、构件温度、车流量等环境作用以及吊杆索力、构件应力、

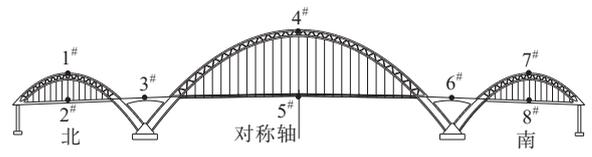
结构变形等结构响应。其中,风速风向通过 1 个综合气象站进行监测;构件温度和构件应力通过 288 个振弦式传感器进行监测;车流量通过 2 个视频识别系统进行监测;吊杆索力通过 18 个压电式加速度传感器进行监测;结构变形通过 16 台 GPS 监测站进行监测。新光大桥吊杆索力、构件应力及结构变形的测点布置如图 2 所示。



(a) 新光大桥上、下游吊杆索力监测传感器布置(单位:m)



(b) 新光大桥上游侧构件应力监测断面布置



(c) 新光大桥上、下游结构变形 GPS 监测器布置

图 2 新光大桥吊杆索力、构件应力及结构变形测点布置

### 2.1 预警指标阈值及评分结果

#### 2.1.1 预警指标阈值

##### (1) 环境作用类预警指标阈值

选取 10 min 平均风速、构件温差和 15 min 平均疲劳车辆荷载作为环境作用类预警指标,该类指标只需要考虑日最大值。为此,统计新光大桥在 2012-08-01—2013-07-31 时段内的 10 min 平均风速日最大值,在 2012-08-01—2013-07-31 时段内的构件温差日最大值以及在 2014-01-01—2014-12-31 时段内的 15 min 平均疲劳车辆荷载日最大值。采用 1.1.1 节的方法计算 10 min 平均风速、构件温差和 15 min 平均疲劳车辆荷载等环境作用类预警指标阈值,结果见表 5。需要指出的是,由于 E~H 类多轴重型拖挂车对新光大桥造成的疲劳损伤远比其他车型造成的损伤严重<sup>[19]</sup>,因此本文仅选取 E~H 类车型的监测数据计算 15 min 平均疲劳车辆荷载的阈值。

##### (2) 结构响应类预警指标阈值

选取吊杆索力、构件应力和结构变形作为结构响应类预警指标,该类指标需要考虑日最大值

表5 环境作用类预警指标阈值

预警指标	10 min平均风速/(m·s <sup>-1</sup> )	构件温差/℃	15 min平均疲劳车辆荷载/(kN·min <sup>-1</sup> )
黄色阈值	9.1	7.7	1.42 × 10 <sup>8</sup>
红色阈值	17.7	11.5	1.52 × 10 <sup>8</sup>

和日最小值。为此,统计新光大桥在2013-07-06—2014-06-22时段内的吊杆索力日最大值和日最小值,在2012-08-01—2013-07-31时段内的构件应力日最大值和日最小值以及在2012-08-01—2013-07-31时

段内的结构变形日最大值和日最小值。采用1.1.1节的方法计算吊杆索力、构件应力和结构变形等结构响应类预警指标阈值,结果分别见表6~8。需要指出的是,由于构件应力在一年中呈现季节性变化规律,因此需要将应力日最大值和日最小值分解为随时间变化的确定性函数和受不确定性因素影响的随机过程两个部分<sup>[20]</sup>,然后利用1.1.1节的方法确定随机部分的阈值,最终获得总的构件应力阈值。限于文章篇幅,表7仅列出部分位置的构件应力阈值。

表6 吊杆索力阈值

位置	吊杆编号	黄色阈值/kN		红色阈值/kN		位置	吊杆编号	黄色阈值/kN		红色阈值/kN	
		最大	最小	最大	最小			最大	最小	最大	最小
上游北岸边跨	1 <sup>#</sup>	2 778.8	2 060.2	2 780.8	1 970.5	下游北岸边跨	1 <sup>#</sup>	2 036.3	2 020.8	2 041.1	2 019.0
	2 <sup>#</sup>	2 795.2	2 616.9	2 859.4	2 513.9		2 <sup>#</sup>	2 696.2	2 527.3	2 866.8	2 504.2
	3 <sup>#</sup>	2 665.3	2 233.0	2 839.1	2 077.8		3 <sup>#</sup>	2 225.2	2 208.3	2 230.5	2 206.2
	4 <sup>#</sup>	1 477.5	1 404.1	1 495.7	1 392.2		4 <sup>#</sup>	1 498.6	1 482.1	1 506.7	1 477.7
上游主跨	5 <sup>#</sup>	1 603.6	1 538.9	1 640.2	1 521.6	下游主跨	5 <sup>#</sup>	1 589.6	1 577.6	1 593.8	1 576.1
	6 <sup>#</sup>	1 594.1	1 509.1	1 630.2	1 493.7		6 <sup>#</sup>	1 496.7	1 413.1	1 525.6	1 396.5
上游南岸边跨	7 <sup>#</sup>	2 766.6	2 492.0	2 842.4	2 475.5	下游南岸边跨	7 <sup>#</sup>	2 534.2	2 396.4	2 558.1	2 345.7
	8 <sup>#</sup>	2 722.4	2 581.9	2 740.7	2 567.7		8 <sup>#</sup>	2 898.8	2 020.8	2 960.9	1 742.7
	9 <sup>#</sup>	2 630.1	2 545.7	2 650.7	2 519.0		9 <sup>#</sup>	2 267.4	2 017.3	2 285.2	1 988.1

表7 构件应力阈值

测点位置	日最大值确定性部分σ <sub>d</sub> (t)回归参数			日最小值确定性部分σ <sub>d</sub> (t)回归参数			黄色阈值/MPa		红色阈值/MPa		
	a	b	c	a	b	c	最大	最小	最大	最小	
	上游北岸边跨	上弦杆上缘	-84.5	-0.2	5.8	-91.2	1.1	3.9	σ <sub>d</sub> (t)+3.8	σ <sub>d</sub> (t)-3.3	-77.5
6 <sup>#</sup> 截面	上弦杆下缘	-87.3	2.4	0.5	-92.3	0.4	6.5	σ <sub>d</sub> (t)+3.3	σ <sub>d</sub> (t)-2.0	-79.2	-96.1
	下弦杆上缘	-88.2	-0.7	4.7	-95.1	0.9	4.2	σ <sub>d</sub> (t)+5.2	σ <sub>d</sub> (t)-3.3	-80.6	-102.4
上游北岸边跨	下弦杆下缘	-60.5	1.8	12.8	-64.5	1.0	6.3	σ <sub>d</sub> (t)+1.7	σ <sub>d</sub> (t)-1.3	-55.3	-67.6
	上弦杆上缘	-74.8	-0.4	6.0	-81.1	-1.2	5.8	σ <sub>d</sub> (t)+4.8	σ <sub>d</sub> (t)-3.8	-67.8	-89.0
	上弦杆下缘	-75.2	2.5	6.3	-83.1	1.1	-6.0	σ <sub>d</sub> (t)+0.9	σ <sub>d</sub> (t)-1.9	-63.3	-87.5
	下弦杆上缘	-76.5	0.7	-5.9	-81.2	-0.4	4.9	σ <sub>d</sub> (t)+2.2	σ <sub>d</sub> (t)-3.6	-71.8	-87.5
7 <sup>#</sup> 截面	下弦杆下缘	-47.0	2.1	6.3	-50.9	1.6	6.3	σ <sub>d</sub> (t)+2.1	σ <sub>d</sub> (t)-1.3	-40.7	-54.9

注:表中σ<sub>d</sub>(t) = a + b cos(2πt/365 + c),用于反映构件应力的季节性变化规律。

表8 结构变形阈值

位置	测点编号	ΔX黄色阈值		ΔX红色阈值		ΔY黄色阈值		ΔY红色阈值		ΔZ黄色阈值		ΔZ红色阈值	
		最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小
上游北岸边跨	1 <sup>#</sup>	22.9	-23.3	57.5	-51.4	22.5	-12.7	34.2	-26.8	45.2	-27.2	73.9	-48.5
	2 <sup>#</sup>	34.4	-31.4	60.7	-67.5	55.8	-57.7	63.4	-64.7	58.9	-73.7	128.6	-141.6
	3 <sup>#</sup>	13.8	-16.0	25.5	-35.8	15.2	-10.1	29.2	-27.2	23.0	-18.7	38.8	-33.5
上游主跨	4 <sup>#</sup>	19.7	-15.2	36.2	-47.1	17.9	-18.7	52.3	-52.0	74.7	-91.9	127.3	-171.1
	5 <sup>#</sup>	36.6	-35.5	100.2	-101.0	46.7	-45.5	57.1	-52.5	88.1	-105.6	155.9	-275.2
	6 <sup>#</sup>	13.4	-10.8	25.8	-22.0	12.3	-10.1	24.7	-17.2	26.8	-20.9	49.1	-37.7
上游南岸边跨	7 <sup>#</sup>	45.5	-50.3	80.3	-91.6	52.4	-59.7	74.3	-82.1	67.0	-70.8	162.7	-167.4
	8 <sup>#</sup>	37.4	-37.9	61.1	-128.6	56.7	-55.0	67.6	-68.1	63.8	-92.3	97.6	-141.2

续表 8

位置	测点编号	$\Delta X$ 黄色阈值		$\Delta X$ 红色阈值		$\Delta Y$ 黄色阈值		$\Delta Y$ 红色阈值		$\Delta Z$ 黄色阈值		$\Delta Z$ 红色阈值	
		最大	最小	最大	最大	最小	最大	最大	最小	最大	最小	最大	最小
下游北岸边跨	1#	17.3	-21.6	51.6	-40.0	13.5	-17.9	40.2	-41.0	36.0	-26.3	76.1	-48.3
	2#	34.2	-31.4	82.5	-81.8	48.6	-56.3	64.5	-68.0	63.1	-56.6	118.2	-114.9
	3#	12.7	-12.8	20.0	-19.8	12.0	-13.9	31.2	-32.2	19.8	-26.5	46.3	-46.2
下游主跨	4#	21.4	-15.8	43.0	-31.2	20.5	-17.1	51.7	-46.5	72.1	-89.6	159.4	-196.1
	5#	74.3	-59.8	124.1	-133.6	84.1	-79.5	99.5	-94.1	151.3	-117.7	222.3	-378.3
	6#	14.5	-15.3	32.2	-23.6	19.2	-16.3	38.8	-42.3	30.2	-26.8	46.1	-48.1
下游南岸边跨	7#	23.1	-18.1	52.7	-34.0	17.2	-16.7	46.9	-45.8	33.4	-26.6	85.7	-52.9
	8#	49.0	-31.9	89.4	-108.0	64.6	-60.5	81.3	-75.0	118.6	-71.9	146.8	-145.8

注:表中 $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 和 $\Delta Z$ 分别表示沿桥梁横向、纵向和竖向的结构变形分量。

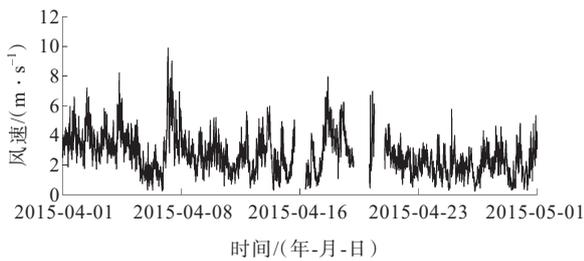
### 2.1.2 预警指标评分

#### (1) 环境作用类预警指标评分

选取新光大桥 2015 年 4 月的实测数据,结合表 5

给出的环境作用类预警指标阈值,按表 1 的评分标准

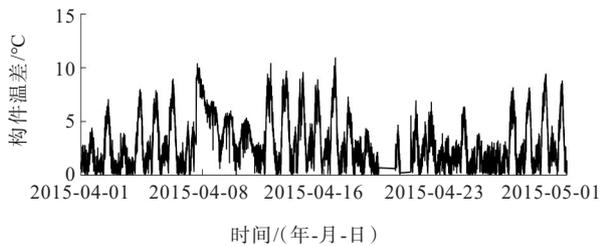
对各项预警指标进行评分。各项预警指标实测值及其评分结果如图 3 所示。



(a) 10 min 平均风速实测值



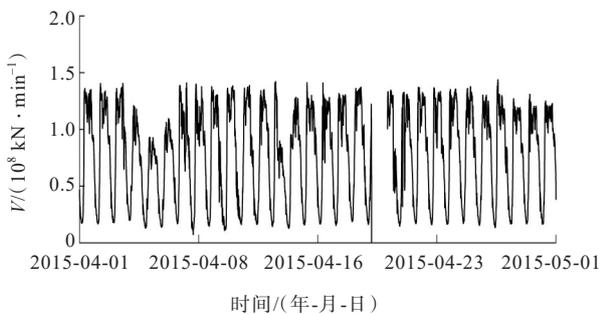
(b) 10 min 平均风速评分



(c) 构件温差实测值



(d) 构件温差评分



(e) 15 min 平均疲劳车辆荷载实测值



(f) 15 min 平均疲劳车辆荷载评分

图 3 环境作用类预警指标实测值及其评分结果

#### (2) 结构响应类预警指标评分

选取新光大桥 2015 年 4 月的实测数据,结合表

6~8 给出的结构响应类预警指标阈值,按表 1 的评分

标准对各项预警指标进行评分。部分预警指标实测

值及其评分结果见图4。

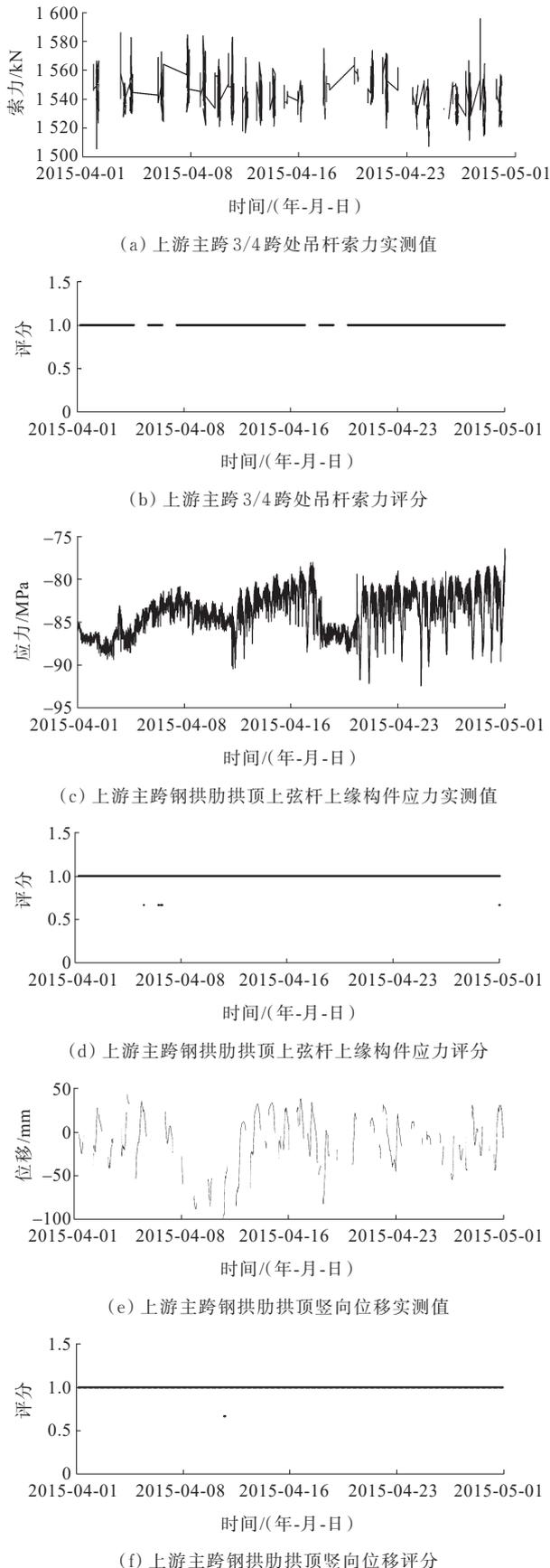


图4 结构响应类部分预警指标实测值及其评分

## 2.2 分类综合预警分析结果

### 2.2.1 环境作用综合预警分析

采用层次分析法确定各项环境作用类预警指标的权重,如表9所示。结合图3所示的评分结果,利用式(3)可以得到2015年4月环境作用综合预警得分,如图5所示。由图5可知:环境作用综合预警得分大部分时间等于1,因此环境作用综合预警等级大部分时间为A级。

表9 环境作用类预警指标权重

预警指标	权重
10 min 平均风速	0.202
构件温差	0.387
15 min 平均疲劳车辆荷载	0.411

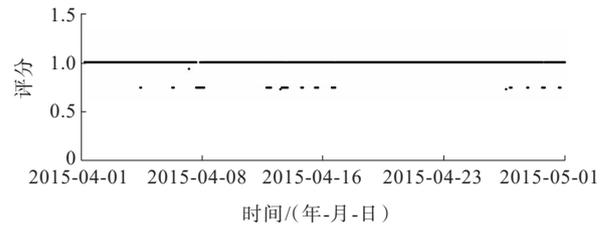


图5 环境作用综合预警得分

### 2.2.2 结构响应综合预警分析

采用层次分析法确定各项结构响应类预警指标的权重,如表10所示。结合图4所示的评分结果,利用式(3)可以得到2015年4月结构响应综合预警得分,如图6所示。由图6可知:结构响应综合预警得分大部分时间落在区间(1/3, 2/3]内,因此结构响应综合预警等级大部分时间为B级。

表10 结构响应类预警指标权重

预警指标	一级权重	二级权重
吊杆索力	0.202	18个吊杆索力权重
构件应力	0.387	128个构件应力权重
结构变形	0.411	48个结构变形权重

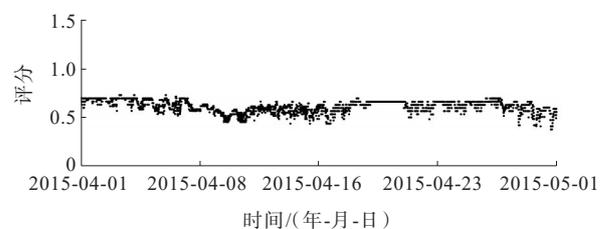


图6 结构响应综合预警得分

### 2.3 结构整体预警分析结果

由 2.2 节的分类综合预警分析可见,新光大桥在 2015 年 4 月大部分时间的环境作用和结构响应综合预警等级分别为 A 级和 B 级。利用表 3 所示的结构预警矩阵,可以判断该桥在 2015 年 4 月大部分时间处于二级预警状态,结构整体状态良好。按表 4 所制定的警后措施,该桥在这个时间段内可以正常运营,但需适当加大监测频率。

## 3 结论

(1) 本文针对大跨度钢拱桥开展多指标综合预警体系研究,提出由预警指标分析、分类综合预警分析和结构整体预警分析 3 个层次组成的结构多指标综合预警体系。

(2) 采用该体系对新光大桥进行综合预警分析,结果显示,2015 年 4 月大部分时间该桥处于二级预警状态,结构整体状态良好,在适当加大监测频率的条件下,可以正常运营。

(3) 所提出的多指标综合预警体系能及时发现问题,对保障桥梁结构安全运营具有较大的实用价值,可为类似桥梁健康监测预警系统的建立提供借鉴。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部.2022 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].(2023-03-16)[2023-04-13].[https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615\\_3847023.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615_3847023.html).
- [2] 王智文,毛永嘉,丁幼亮.基于 Matlab-JAVA 融合的桥梁健康监测数据分析与预警平台[J].中外公路,2023,43(4):137-140.
- [3] 尹恒,王立娟,裴尼松,等.三维激光扫描技术在危旧桥梁健康监测中的应用研究[J].中外公路,2021,41(5):187-192.
- [4] 屈英豪,周建庭,张洪,等.基于自动补水的连通管式桥梁挠度监测系统[J].中外公路,2021,41(3):71-74.
- [5] 王代君,周天图,傅俊敏,等.大型桥梁健康监测系统多源异构数据集成研究[J].中外公路,2023,43(2):100-106.
- [6] 孙利民,尚志强,夏焯.大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J].中国公路学报,2019,32(11):1-20.
- [7] 曹素功,黄立浦,张勇,等.桥梁健康监测数据的数据化存储与分析[J].中外公路,2019,39(2):102-108.
- [8] 蓝日彦.桥梁拉索状态检测和评估的关键技术与应用研究[D].长沙:中南大学,2023.
- [9] 高翔宇.芜湖长江公路二桥健康监测系统设计及预警阈值研究[D].合肥:合肥工业大学,2016.
- [10] 郑春,吴重男,张新越,等.舟山连岛工程西堠门金塘大桥运营监测系统预警评估体系研究[J].中国工程科学,2010,12(7):84-89.
- [11] 李明.铁路钢桁梁桥损伤预警与健康状态评估方法研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [12] 张门哲,金耀,李小龙,等.湖北石首长江公路大桥结构健康监测系统设计研究[J].中外公路,2019,39(1):158-163.
- [13] 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,2015,45(3):44-50.
- [14] 王勇辉.桥梁结构健康监测多指标综合预警研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [15] 邓雪,李家铭,曾浩健,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.
- [16] 申晓剑.基于模糊层次分析法的高速公路桥梁养护管理评价方法研究[D].西安:长安大学,2019.
- [17] SU C, LIAO W, TAN L, et al. Reliability-based damage identification using dynamic signatures[J].Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(3): 1-16.
- [18] 苏成,廖威,秦帆,等.大跨度钢拱桥构件评级体系研究[J].桥梁建设,2017,47(4):84-89.
- [19] 袁昆.桥梁健康监测结构预警关键问题研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [20] LUCAS J M, VIRLOGEUX M, LOUIS C. Temperature in the box girder of the Normandy bridge[J].Structural Engineering International, 2005, 15(3): 156-165.