

# 基于监测指标变化率的大跨度屋盖钢结构 施工过程安全预警方法研究

方显\*

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

**摘要:** 大跨度屋盖钢结构采用分块分步整体提升的施工工艺, 施工过程中结构体系和边界条件存在突变, 且整体提升为动态施工过程, 整个过程结构的受力状态存在突变。针对整体提升等动态施工过程, 基于时间序列一阶差分, 提出应力和变形变化率指标; 根据施工过程模拟结果和 $3\sigma$ 准则, 提出应力和变形的三级预警机制和预警阈值。对某K6网壳静力加载试验进行全过程构件应力和结构变形监测, 并对监测结果进行分析和预警。结果表明, 网壳结构在发生整体坍塌前, 结构受力状态具有明显的非线性特征。提出的应力和变形变化率指标及预警机制能在网壳结构发生整体坍塌前, 对受力状态的非线性变化进行有效预警, 提醒使用人员提前做好应急措施。将提出的变化率监测指标和预警机制应用于上海松江站屋盖钢结构整体提升过程中, 验证提出方法的可行性和有效性。结果表明, 变化率指标及其预警机制, 可对提升过程中的荷载和边界条件突变导致的结构受力性能突变有效预警, 验证了本文提出方法的适用性。

**关键词:** 大跨度钢结构; 时间序列; 变化率; 预警阈值; 整体提升

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)05-0105-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20250111001

## Research on Early Warning Method for Lifting of Large-Span Steel Roof Structures Based on Monitoring Indicator Change Rate

FANG Xian\*

(China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

\*Corresponding author: 26412165@qq.com

**Abstract:** The large-span steel roof structure adopts a segmented and stepwise overall lifting construction technique. During the construction process, there are sudden changes in the structural system and boundary conditions, and the overall lifting is a dynamic process with abrupt variations in the structural force state. In response to the dynamic construction process, including the overall lifting, stress and deformation change rate indicators are proposed based on first-order differences of time series. A three-level early warning mechanism and thresholds for stress and deformation are introduced based on simulation results of the construction process and the  $3\sigma$  criterion. A monitoring of component stress and structural deformation was conducted during a static loading test on a K6 reticulated shell, with the monitoring results analyzed and used for early warning. The results indicate that before the overall collapse of the shell structure, there are clear nonlinear characteristics in the structural force state. The proposed stress and deformation change rate indicators, along with the early warning mechanism, can effectively warn of nonlinear changes in the force state before an overall collapse, allowing personnel to take emergency measures in advance. The proposed change rate monitoring indicators and early warning

收稿日期: 2025-01-11

基金项目: 中国铁建股份有限公司人工智能应用场景建设项目(中国铁建信合-2024-42)

作者简介:

方显(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事建筑结构设计及结构健康监测方面的研究。

E-mail: 26412165@qq.com。(通信作者)

mechanism were applied to the overall lifting process of the steel roof structure at Shanghai Songjiang South Station to verify the feasibility and effectiveness of the proposed method. The results show that the change rate indicators and their early warning mechanism can effectively warn of abrupt changes in the structural force state caused by load and boundary changes during the lifting process, validating the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** large-span steel structure; time series; change rate; early warning threshold; overall lifting

目前,为满足大空间的建筑功能需求,我国车站、体育场馆、机场等大型公共建筑结构形式趋于采用大跨度、大跨度、结构体系复杂的空间网架等钢结构。大型复杂钢结构,尤其是大跨度屋盖钢结构常用的特种施工工艺包括分块拼装、整体滑移和累积滑移、整体提升和分块提升等<sup>[1]</sup>,这些施工工艺均包含多次结构几何、姿态、荷载和边界条件的变化。尽管大跨度钢结构施工难度越来越大,施工速度却越来越快,施工工序和工艺的复杂性、施工活荷载的不确定性、风荷载和温度作用的随机性、钢结构系统体系的不断变化等诸多因素,都成为施工过程中事故发生的诱发因素。国内外已发生多起大型钢结构施工事故,如2007年某国际展览馆大跨度网架施工过程中的坍塌事故<sup>[2]</sup>。因此,有必要对大跨度屋盖结构施工阶段进行结构健康监测,并建立有效的预警机制,为安全施工提供保障。

随着硬件和数据传输技术的发展,结构健康监测技术迅速发展,并广泛应用在工程结构的施工及运营中<sup>[3,4]</sup>。目前,健康监测预警系统及阈值设置主要考虑构件应力、挠度等指标。然而,在分块和整体提升、累积滑移等大跨度结构动态施工过程中,应力、挠度等指标的变化程度及变化速率更能反映施工过程中结构受力状态下的稳定性和安全状态。而目前缺少对应力、挠度等指标变化程度的监测和预警研究,进而无法全面评估大跨度结构动态施工过程的安全性。

本文以上海松江站服务中心屋盖钢结构施工过程监测项目为研究背景,针对屋盖整体提升、滑移等动态施工过程,提出应力和挠度变化率指标,根据施工过程模拟结果和 $3\sigma$ 准则,提出构件应力和结构挠度的预警阈值。对某K6网壳静力加载试验进行全过程构件应力和结构变形监测,并对监测结果进行分析,验证本文提出方法的有效性。将本文提出的变化率监测指标和预警机制应用于上海松江站屋盖钢结构施工过程中,为施工过程的安全性提供技术保障。

## 1 监测预警指标

目前,结构健康监测系统已广泛应用于钢结构施工阶段和运营阶段的结构健康监测,评估施工过程是否安全的预警策略主要有单指标预警、多指标综合预警等<sup>[5]</sup>。单指标预警指当结构构件应力或挠度超出允许值时,认为结构不可靠;多指标综合预警指通过建立评级与多个

指标的关系式,将多个指标测量结果转化为一个评价指标。常用的安全性监测指标及预警阈值主要有:

### (1) 承载能力利用率

承载能力利用率是活载效应与构件扣除恒载效应之后富余抗力的比值,反映构件承受活载的富余程度,计算公式为:

$$S_{\text{SUF}} = \frac{\sigma_L}{\phi R_N - \sigma_D} \quad (1)$$

式中, $S_{\text{SUF}}$ 为承载能力利用率; $\sigma_D$ 和 $\sigma_L$ 分别为恒载应力、活载应力测量值; $R_N$ 为材料设计强度; $\phi$ 为强度折减因子,在结构无损伤时取1.0。预警阈值根据结构类型、构件属性等取值。

### (2) 规范限值

现行国家标准《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)<sup>[6]</sup>规定了构件强度和稳定承载力的计算方法,并规定了承载力不应超过其材料设计强度 $f_d$ 。根据现行行业标准《建筑工程施工过程结构分析与监测技术规范》(JGJ/T 302—2013)<sup>[7]</sup>,对应于三级预警,定义预警阈值调整系数 $\gamma$ 分别为0.5,0.7和0.9。

### (3) 最不利工况响应值

采用有限元分析软件对结构进行正常使用极限状态下模拟计算,充分考虑温度变化、活载等设计荷载的组合情况,取各荷载组合下的最不利工况响应值作为高级别预警阈值,相应取一级预警阈值的一定比例作为低级别预警阈值。

### (4) 实测统计类

对于在役建筑结构,可根据各个监测指标的历史监测数据进行统计分析,取具有95%保证率的分位值作为预警阈值。

上述预警指标及阈值设置方法已得到广泛应用,在实践中可单指标使用或多种指标结合使用。太原南站<sup>[8]</sup>钢结构构件应力应变安全预警系统中,取构件屈服应变的80%为三级预警阈值,取最不利工况下的应变为二级预警阈值,取二级预警阈值的80%为一级预警阈值。某铁路客站贝壳状网壳结构<sup>[9]</sup>健康监测,采用材料容许应力的90%作为阈值。海口东车站台大跨度空间钢结构<sup>[10]</sup>健康监测系统设有三级应变预警,一级预警阈值为各构件在正常使用时的最不利情况下的应变,二级预警阈值为该类型构件在最不利理论极限状态设计工况下的应变中的最大值,三级预警阈值为该类型构件的实际承

载能力极限状态。苏成等<sup>[11]</sup>取新光大桥构件承载能力利用率具有95%保证率的分位值作为黄色预警阈值,取测点位置处最不利工况响应值作为红色预警阈值。熊学炜<sup>[12]</sup>将昆明南站站房应力的三级预警阈值分别设置为 $0.5f_d, 0.7f_d, 0.9f_d$ 。

然而,屋盖提升施工过程中,结构整体变形、荷载和边界条件具有时变性的特点,其整体变形、荷载和边界条件均可能随施工过程的进行而变化,进而导致监测参数数值可能发生突变。上述方法仅对构件应力、应变和挠度等指标进行直接评估,未对实测值与模拟计算值差值、指标变化率进行评估,无法对施工过程中结构的受力性能变化进行直观反映。因此,研究监测指标的变化率具有理论和现实意义,但目前尚缺乏该方面的研究。

为此,本文提出以应力和挠度变化率为监测指标的预警方法,在大跨度钢结构整体提升的起吊和落位等边界条件变化阶段,监测指标变化率可反映边界条件或荷载突变时,施工结构体系受力性能变化的稳定性和安全性;在稳定提升阶段,监测指标变化率可反映施工扰动的大小,也可以及时发现施工异常情况,对保证施工过程结构安全有重要意义。

## 2 应力和变形变化率

施工过程监测数据链是一个复杂的自变量为时间的序列,即时间序列<sup>[13]</sup>。时间序列是由测量值和测量时间组成的有序集合,记为 $X = \{x_i = (v_i, t_i)\}_{i=1}^n$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $x_i = (v_i, t_i)$ 表示在时间序列 $t_i$ 时刻的测量值为 $x_i$ ;其中,记录时间 $t_i$ 严格增加,即有 $i < j \Leftrightarrow t_i < t_j$ 。时间序列记录了被观测对象某个特征参数在一段时间内的度量值,它真实反映了系统在各个时刻的所有重要信息。

假定监测频次不变,即监测时间序列中相邻数据间的时间间隔相同。在该假定下,本文采用时间序列一阶差分表征监测时间序列,即监测指标的变化率。

对于监测时间序列 $X = \{x_i\}_{i=1}^n$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),相邻两时刻的序列值之差为一阶差分,一阶向后差分为:

$$\nabla x_i = x_i - x_{i-1} \quad (2)$$

一阶差分序列与时间增量的比值为:

$$\nabla x'_i = \frac{x_i - x_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (3)$$

一阶向后差分后所得的序列称为一阶差分序列,记为 $\nabla X = \{\nabla x_i\}_{i=1}^n$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),一阶差分序列与时间增量的比值所得的序列称为时间序列的一阶变化率序列,记为 $\nabla X' = \{\nabla x'_i\}_{i=1}^n$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。类似于连续函数的一阶导数,一阶变化率序列表示了时间序列 $X = \{x_i\}_{i=1}^n$ 变化的快慢。

为了便于分析和评估监测时间序列的变化率,对一阶变化率序列进行标准化处理。对于一阶变化率序列 $\nabla X' = \{\nabla x'_i\}_{i=1}^n$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),其均值和标准差分别表示为:

$$\overline{\nabla x'} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \nabla x'_i \quad (4)$$

$$S_{\nabla x'} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\nabla x'_i - \overline{\nabla x'})^2} \quad (5)$$

那么,一阶变化率序列的标准变化量为:

$$\nabla \hat{x}'_i = \frac{\nabla x'_i - \overline{\nabla x'}}{S_{\nabla x'}} \quad (6)$$

其序列记为 $\nabla \hat{X}' = \{\nabla \hat{x}'_i\}_{i=1}^n$ 。 $\nabla \hat{x}'_i$ 的值越大,表示时间序列突变越明显。

基于此,将应力一阶变化率的标准变化量定义为应力变化率,表示为:

$$\nabla \hat{\sigma}'_i = \frac{\nabla \sigma'_i - \overline{\nabla \sigma'}}{S_{\nabla \sigma'}} \quad (7)$$

式中: $\nabla \sigma'_i$ 为应力一阶变化率, $\overline{\nabla \sigma'}$ 为应力一阶变化率均值, $S_{\nabla \sigma'}$ 为应力一阶变化率标准差。

将变形一阶变化率的标准变化量定义为变形(挠度或位移)变化率,表示为:

$$\nabla \hat{\gamma}'_i = \frac{\nabla \gamma'_i - \overline{\nabla \gamma'}}{S_{\nabla \gamma'}} \quad (8)$$

式中: $\nabla \gamma'_i$ 为变形一阶变化率, $\overline{\nabla \gamma'}$ 为变形一阶变化率均值, $S_{\nabla \gamma'}$ 为变形一阶变化率标准差。

## 3 预警阈值的设定

大跨度屋盖结构的整体提升过程可分为边界条件突变和平稳提升两个阶段。针对两个阶段,监测参数预警阈值的设定主要考虑实测值与模拟值的差异和 $3\sigma$ 准则。

### 3.1 实测值与模拟值差异

大量工程监测经验表明,由于大跨度钢结构施工现场环境、荷载和边界条件复杂,施工结构系统的边界条件和荷载条件与施工过程模拟模型难以完全一致。当指标实测值与模拟值相差过大时,意味着施工结构系统的实际受力状态与理论值差异过大,施工结构系统的实际受力状态可能未达到预期或存在未预知的危险。此时应进行预警以提醒关注评估指标实测值与理论值差异较大处,对施工结构系统进行模型修正并分析原因。王小波<sup>[14]</sup>提出,当实测应力值超过施工过程模拟计算值的20%时,结构可能处于较危险状态,应停止施工,查明原因。现行行业标准《建筑工程施工过程结构分析与监测技术规范》(JGJ/T 302—2013)<sup>[7]</sup>提出,当监测结果超过施工过程分析结果的40%时,应进行预警;同时,规范还

规定了预警值按施工过程结构分析结果设定时,可取理论分析结果的130%。

考虑到结构实际所受的荷载、边界条件以及与施工模拟的差异,本文将应力和结构变形模拟计算值的 $(1\pm 40\%)$ 倍作为一级预警值。此外,根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)<sup>[6]</sup>,将材料承载力限值和结构变形限值的0.7倍和0.9倍分别作为施工过程应力和变形的二级和三级预警值。

### 3.2 3 $\sigma$ 准则

根据数理统计原理,对于常见的标准正态分布,其变量落在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 内的概率为99.74%,即3 $\sigma$ 准则。本文采用该准则,设定监测时间序列突变预警值。当施工结构系统受力状态稳定时,表现为监测时间序列稳定,此时,可认为监测指标时间序列近似服从正态分布。基于3 $\sigma$ 准则,对于标准化的一阶差分变量,若 $\nabla \hat{x}_i' < 3$ ,则可认为该时间序列变化率在正常范围内,未发生突变;若 $\nabla \hat{x}_i' \geq 3$ ,则应结合监测的实际情况,分析时间序列产生突变的原因,确保监测时间序列突变及施工过程在可控范围内,方可进行后续施工。

因此,基于3 $\sigma$ 准则,并考虑监测系统的灵敏度,考虑将应力和变形变化率的一级、二级预警阈值分别设置为 $\pm 2.0$ 、 $\pm 3.0$ 。

综上,构件应力的预警阈值如表1,结构变形的预警阈值如表2。表中, $\sigma_{NS}$ 为施工力学模拟理论应力值; $f_d$ 为钢材强度设计值; $\gamma_{NS}$ 为施工力学模拟理论变形值; $\gamma_d$ 为《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)<sup>[6]</sup>规定的结构变形限值。

当对于一级预警,需密切关注异常指标,监控其后续发展趋势;对于二级预警,当持续触发报警时,应暂停施工,排查报警原因;当间断性触发报警时,应密切关注异常指标,并通过伺服计算,对施工结构系统进行评估;对于三级预警,应暂停施工,并对施工结构系统进行全面检查和评估,确定下一步施工安全后方可继续施工。

表1 构件应力和应力变化率的预警阈值

Table 1 Warning thresholds for stress and stress change rate of a component

预警级别	应力	预警阈值	应力变化率	预警阈值
一级(黄色)	$[\sigma]^{(1)}$	$(1 \pm 40\%) \sigma_{NS}$	$[\nabla \hat{\sigma}_i]^{(1)}$	拉杆+2.0 压杆-2.0
二级(橙色)	$[\sigma]^{(2)}$	$0.7 f_d$	$[\nabla \hat{\sigma}_i]^{(2)}$	拉杆+3.0 压杆-3.0
三级(红色)	$[\sigma]^{(3)}$	$0.9 f_d$	-	-

注:表中 $[\sigma]$ 和 $[\nabla \hat{\sigma}_i]$ 的上角标(1)~(3)表示预警级别,分别对应第一列的一、二、三级。

表2 结构变形及其变化率的预警阈值

Table 2 Warning thresholds for structural deformation and deformation change rate

预警级别	变形	预警阈值	变形变化率	预警阈值
一级(黄色)	$[\gamma]^{(1)}$	$(1 \pm 40\%) \gamma_{NS}$	$[\nabla \hat{\gamma}_i]^{(1)}$	$\leq -2.0$
二级(橙色)	$[\gamma]^{(2)}$	$0.7 \gamma_d$	$[\nabla \hat{\gamma}_i]^{(2)}$	$\leq -3.0$
三级(红色)	$[\gamma]^{(3)}$	$0.9 \gamma_d$	-	-

注:表中 $[\sigma]$ 和 $[\nabla \hat{\sigma}_i]$ 的上角标(1)~(3)表示预警级别,分别对应第一列的一、二、三级。

## 4 试验验证

为验证本文提出的应力和变形变化率监测指标以及设定的预警机制的有效性,对某K6网壳施工过程结构静力加载试验进行监测,并得出试验网壳的应力和结构竖向位移监测指标;根据本文提出的预警机制和阈值,对网壳试验进行应力和变形监测结果分析和预警评估。

### 4.1 试验模型

试验模型为K6型单层球面网壳,径向5环。模型跨度 $L=6.0$  m,矢高 $f=1.0$  m,矢跨比 $f/L=1/6$ ;构件截面为 $\phi 12 \times 1.5$ ,采用Q235B钢材,如图1和图2所示。采用在铁桶内注入铁砂的方法进行静力加载,加载点位于中间19个球节点(中间3圈)。前8个加载步中,每个节点加载增量为4.0 kg;从第9个加载步开始,每个节点加载增量为2.0 kg,直到加载至网壳发生整体失稳破坏。随着试验加载的进行,节点竖向位移逐渐增大,个别节点及其所在区域局部失稳、杆件失效,当试验加载至第26步时,结构发生整体坍塌破坏。



图1 K6网壳试验模型

Fig. 1 K6 reticulated shell test model

整个试验过程中,采用应变片监测关键构件的跨中截面内力和应力,采用位移计监测跨中球节点的竖向位移。采用本文方法确定应力和节点竖向位移的预警等级和阈值,如表3所示。

### 4.2 竖向位移分析及预警

D-008节点位移最大,以该节点竖向位移表示结构

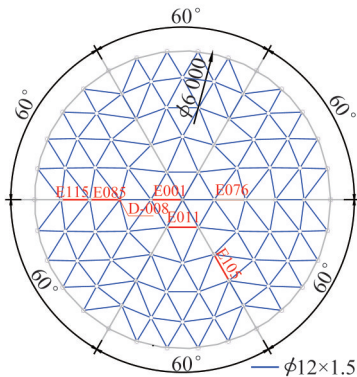


图2 K6网壳关键构件和节点

Fig. 2 Key components and nodes of the K6 reticulated shell

表3 网壳试验预警等级和阈值

Table 3 Warning grade and threshold in the reticulated shell test

预警等级	应力		最大位移	
	应力值/MPa	变化率	位移值/mm	变化率
一级(黄色)	$1.4\sigma_{NS}$	2.0	$1.4\gamma_{NS}$	2.0
二级(橙色)	151	3.0	10.5	3.0
三级(红色)	194	/	13.5	/

最大变形。D-008节点的竖向位移及其变化率评估和预警结果如图3和图4所示。

从图3和图4可以看出：

(1) 对于竖向位移,在第1~12个加载步中,D-008竖向位移随荷载的增加呈线性增大趋势。第13步加载开始,D-008竖向位移随荷载开始呈非线性增大。第16步加载后,节点竖向位移超过黄色预警值,第17步加载后,节点竖向位移超出橙色预警值,第18步加载后,节点竖向位移超出红色预警值。第20步加载中,D-008节点竖向位移迅速增加,该步荷载结束时,其竖向位移达到了26.6 mm。第21步加载后,D-008节点竖向位移迅速增加到38.3 mm。结合试验现象,认为该步加载,在D-008节点附近区域呈局部失稳状态。第26步加载中,网壳发生整体失稳坍塌。

(2) 对于位移变化率,在第1~12步加载中,D-008竖向位移变化缓慢,由于试验各步加载均为突加荷载,因此在前12个加载步中的个别时间点,竖向位移变化率大于2.0,触发黄色预警。在第13个加载步中初始时刻,D-008节点位移发生明显突变,位移标准变化率为7.0,触发橙色预警。此后,位移变化率一直在3.0以上,触发橙色预警,表示D-008测点位移随荷载增加迅速发展。第21步加载后,位移变化率为7.5,D-008呈局部失稳状态。从位

移变化率可以看出,在结构坍塌前,位移呈明显的非线性增加趋势。

从竖向位移绝对值和位移变化率预警分析结果可以看出:基于位移变化率的监测和预警从数值上直观反映出由于荷载施加导致的位移突变情况。在第13个加载步以后,位移绝对值监测和预警仅能从位移曲线的斜率上定性判断位移的非线性变化情况,而位移变化率监测和预警能定量刻画位移的非线性变化情况,在结构坍塌前可更准确判断结构受力状态。

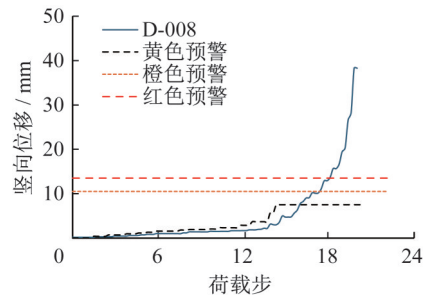


图3 D-008节点竖向位移预警结果

Fig. 3 Early warning result of vertical displacement for node D-008

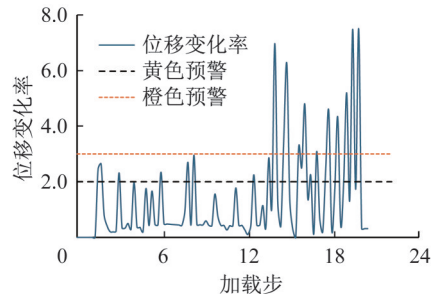


图4 D-008竖向位移变化率预警结果

Fig. 4 Early warning result of vertical displacement change rate for node D-008

### 4.3 应力分析及预警

选取典型构件E001、E011、E076、E085、E105和E115杆件进行应力监测结果分析。关键构件位置如图2所示。关键构件应力监测结果如图5所示,应力变化率结果如图6所示。结果表明:

(1) 对于构件跨中截面应力,网壳安装过程中,构件对节点存在不同程度的偏心。因此,在1~18个加载步,各构件跨中应力的发展趋势不同。E001、E011、E085和E115,随荷载的增加,其稳定应力逐渐增大。E001在第14个加载步、E011在第15个加载步、E085在第8步荷载、E115在第21步荷载超过黄色预警值。第21个加载步以后,E001、E011、E085跨中截面应力均超过橙色预警值,并在同一个加载步超过红色预警值,说明构件应力开始呈明显的非线性变化特征。E115接近支座,整体失稳

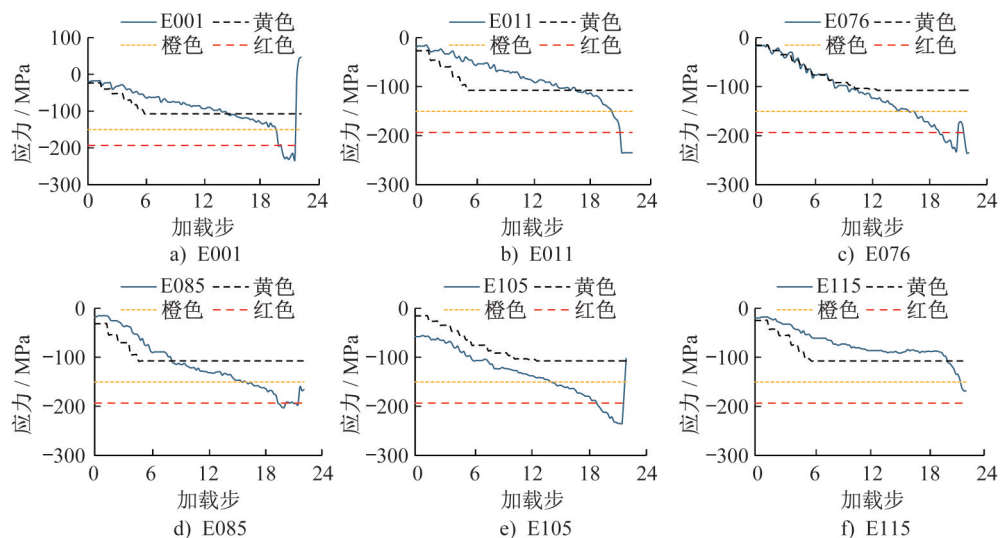


图5 应力监测预警结果

Fig. 5 Early warning result of the stress

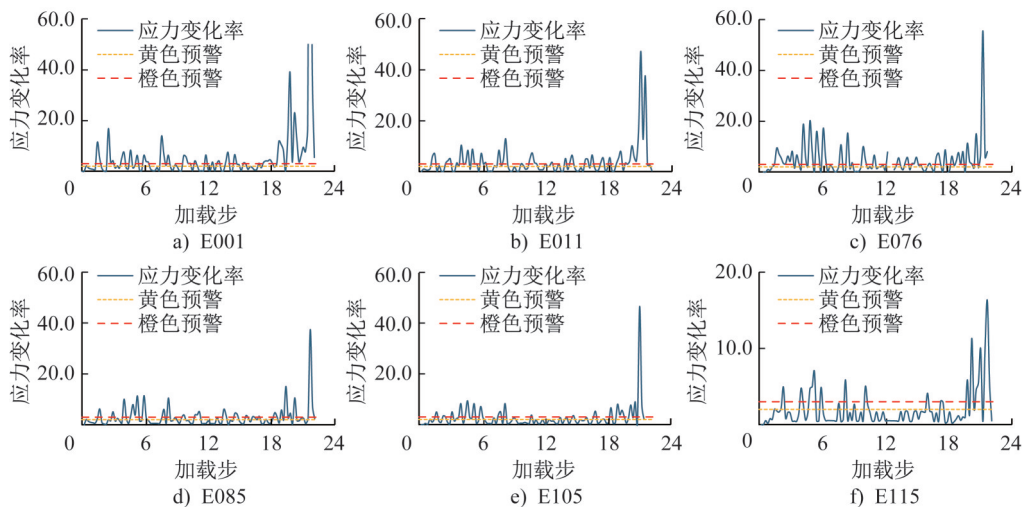


图6 应力变化率监测预警结果

Fig. 6 Early warning result of the stress change rate

传播滞后,在第23个加载步应力超出橙色预警值,并在同一步荷载超过红色预警值。

(2) 对于网壳中存在加工偏差和初始缺陷的构件,如初始弯曲分别1.1 mm、1.4 mm的构件E076和E105,其跨中截面应力,在第1个加载步开始,应力值就超过了黄色预警值,但在第12步荷载之前,应力变化趋势与理论趋势一致。在第16个加载步中,两构件跨中截面应力超过橙色预警值,第21个加载步后超过红色预警值。E076和E105两根构件在非线性受力特征出现之前的4个加载步即发生橙色预警,达到了提前预知险情的目的。

(3) 对于应力变化率,由于各步加载的荷载施加均为突加荷载,且荷载施加于各节点位置,相邻构件对突加荷载较敏感,因此大部分荷载在加载初期应力变化率均大于3.0,超过橙色预警值。第21步加载之后,各测点应力变化率急剧增大,变化率最大值达到了45.8(E001),直

至破坏。

(4) 结合应力监测结果,在第19个加载步之后,应力变化呈明显的非线性趋势,直至破坏。说明,在结构发生破坏之前,应力变化率能有效反映结构的非线性变化特征,达到预警的目的,让结构使用人员提前做好应急措施。

从应力绝对值和应力变化率预警分析结果可以看出:基于应力变化率的监测和预警可以从数值上直观反映由于荷载或边界条件变化导致的应力突变情况。在第19个加载步之后,应力绝对值仅能从应力曲线斜率上定性反映应力的非线性变化情况,而应力变化率的监测和预警能定量反映应力的非线性变化和突变情况,在结构坍塌前可更准确判断结构的受力状态。

从节点竖向位移和构件应力监测分析和预警结果可以看出,在网壳结构发生整体坍塌前,构件应力和结构变

形具有明显的非线性特征。采用本文方法对构件应力和结构位移及其对应的变化率进行监测,设定预警等级和阈值,可以对结构险情进行预警,尽最大可能避免过大的生命和财产损失。

### 5 工程实例监测结果分析

将本文提出的监测指标和预警机制应用于上海松江站服务中心结构分块整体提升施工过程中。选取提升1区(图7)进行关键构件应力和结构挠度监测,并根据本文提出方法对屋盖施工过程进行安全评估和预警,验证本文提出方法的适用性。

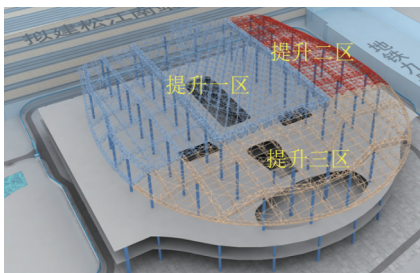


图7 提升分区

Fig. 7 Zone of the overall lifting

#### 5.1 工程概况

上海松江站位于上海市松江区,建筑规模约190 051 m<sup>2</sup>,是沪苏湖高铁全线最大新建站,其服务中心是集交通配套、公共服务、文化及商业等功能为一体的综合建筑体,如图8所示。

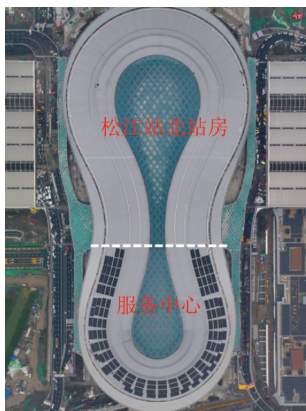


图8 上海松江站平面

Fig. 8 Plan of Shanghai Songjiang Railway Station

上海松江站服务中心屋盖主结构采用空间桁架结构体系,采用钢管混凝土柱支承;内圈屋盖(含天窗)为斜交平面管桁架结构,通过矩形管桁架与外圈屋盖连接;外圈屋盖为正交结构,由倒三角管桁架和平面管桁架组成,如图9所示。屋盖投影尺寸为187.0 m×199.4 m,桁架最大跨度为72.0 m,最大悬挑长度为30.6 m,总用钢量约

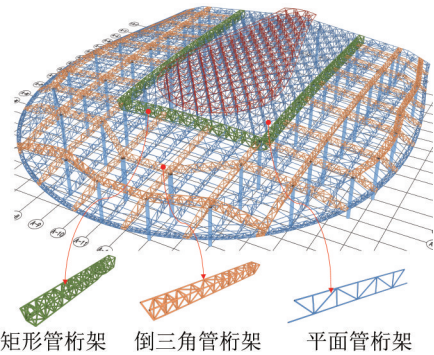


图9 上海松江站服务中心屋盖钢结构组成

Fig. 9 Structural composition of the Shanghai Songjiang Railway Station service center

4 000 t。屋盖结构杆件类型均为圆管型,下弦杆件最大截面尺寸为φ700×70,上弦杆件最大截面尺寸为φ500×50,腹杆最大截面尺寸为φ500×36,主要材质为Q420GJD及Q355B。屋盖采用分区分块和累积提升相结合的施工方法,最大提升高度30 m。

#### 5.2 施工力学模拟

采用分步建模法,对上海松江站服务中心提升一区进行数值模拟,提升一区分为3个累积提升区域,如图10所示。1-1区、1-2区和1-3区依次提升(图11),提升一区第一次累计提升时,1-1区跨中布置临时吊点;第二次累积提升时,临时吊点拆除,模拟计算显示由于边界条件改变,跨中构件应力和挠度均有显著变化。本文选取1-1区桁架HJ01为分析对象,对跨中受压上弦杆TS-SX001、受拉下弦杆TS-XX001的应力监测结果和跨中下弦的挠度监测结果进行分析,计算结果如图12所示。根据计算结果,考虑结构特点和施工可行性,构件应力测点布置在应力比较大的部位,结构挠度测点布置在跨度大的桁架下弦。

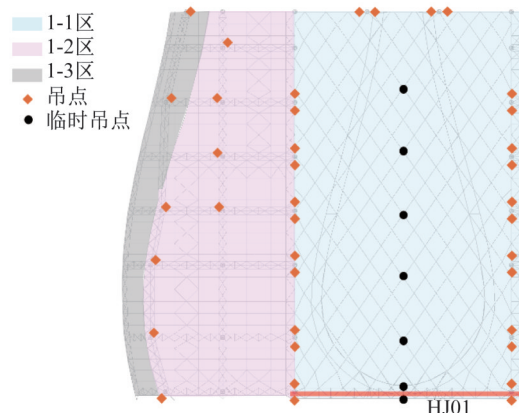


图10 提升一区吊点平面布置

Fig. 10 Lifting zone 1 hoisting point layout plan

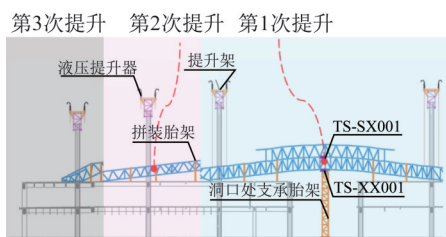


图 11 提升一区提升次序立面示意

Fig. 11 Elevation schematic diagram of lifting sequence for zone 1

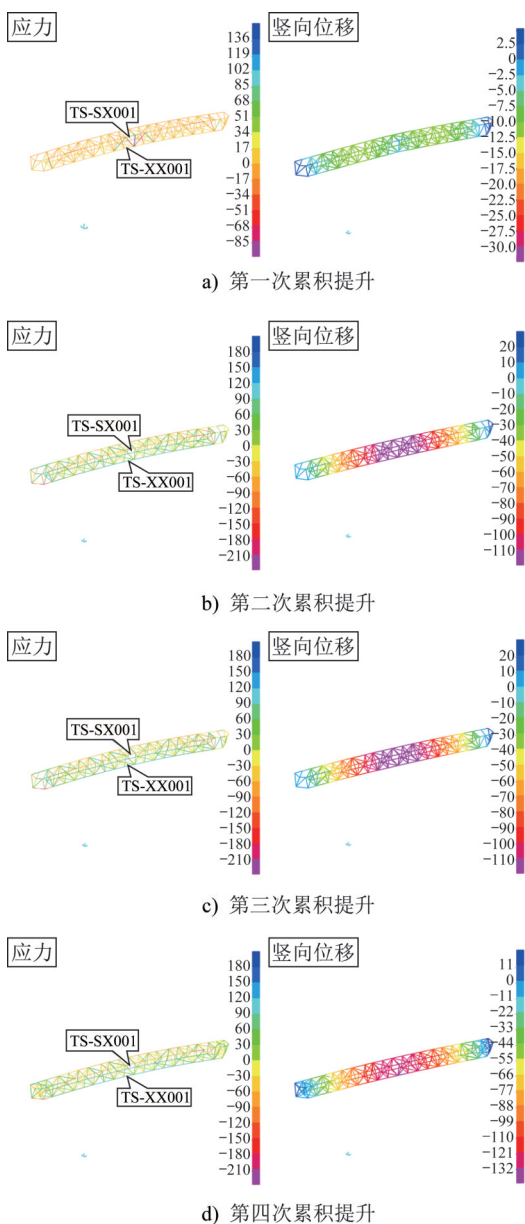


图 12 HJ01 施工过程模拟计算结果

Fig. 12 Simulation results of construction process for HJ01

### 5.3 监测数据分析

受压弦杆 TS-SX001 及受拉弦杆 TS-XX001 应力和

应力变化率实测结果与模拟值如图 13~图 14, 施工过程中实测值与模拟值的变化规律一致; 边界条件变化时, 应力显著增大; 进入平稳提升阶段后, 应力维持在一定水平波动。第一次提升开始阶段, 应力发生突变, 应力结果未超过黄色预警值, 但应力变化率达到橙色预警值。在第二次累积提升时, 1-1 区临时吊点拆除, 杆件内力显著增大, 应力在个别时间点超过黄色预警值, 属于正常波动; 应力变化率出现极大的异常值, 超过橙色预警值。在第三次累计提升和落位阶段, 1-1 区受力状态稳定, 应力和应力变化率均无异常突变, 变化率也未超过黄色预警值。

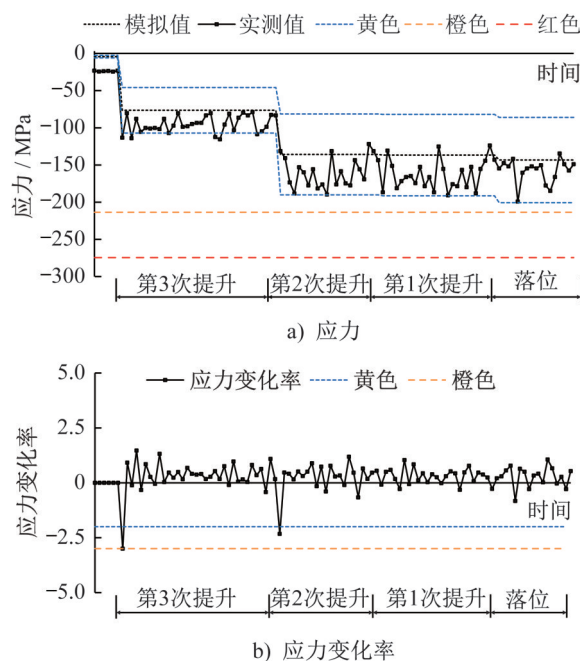


图 13 受压测点 TS-SX001 预警结果

Fig. 13 Early warning results of compression monitoring point TS-SX001

HJ01 跨中挠度及挠度变化率监测结果如图 15 所示, 施工过程中实测值与模拟值的变化规律一致。在第二次提升开始阶段, HJ01 跨中临时吊点拆除, 跨中挠度显著增大, 挠度变化率达到 -12.6, 远大于橙色预警值。进入平稳提升阶段, 挠度维持在一定水平波动, 第二次提升过程挠度略高于理论值, 第三次提升过程挠度低于理论值。

从预警结果可以看出, 在上海松江站服务中心大跨度屋盖钢结构分块整体提升施工过程中, 各提升阶段的初始时刻, 即边界或荷载条件发生突变时, 本文提出的应力和变形变化率指标可以实现有效预警, 提醒工程师关注应力和挠度突变位置, 并对施工结构体系进行整体评估, 确保整个提升过程的安全性。

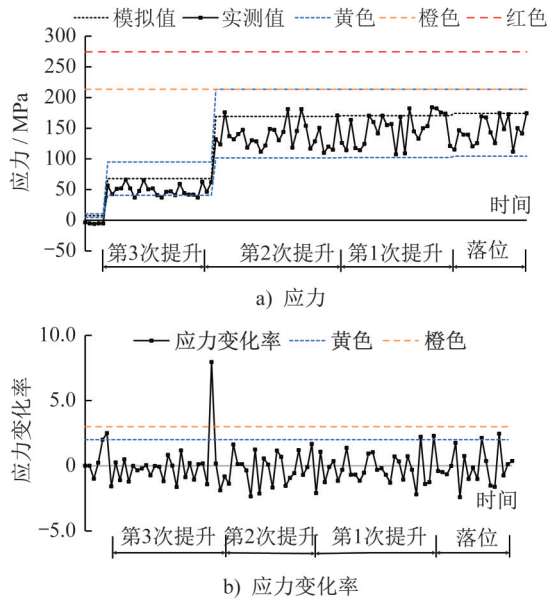


图 14 受拉测点 TS-XX001 预警结果

Fig. 14 Early warning results of tension monitoring point TS-SX001

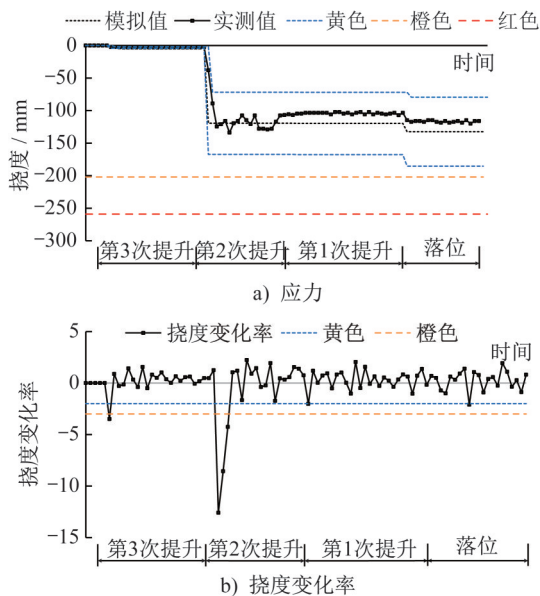


图 15 HJ01 跨中挠度和变化率监测结果

Fig. 15 Monitoring results of mid-span deflection and corresponding change rate for HJ01

## 6 结论

本文针对上海松江站服务中心大跨度屋盖钢结构整体提升施工过程,提出了应力和变形变化率指标和三级预警机制和阈值,并得出以下结论:

(1) 根据施工过程模拟结果和  $3\sigma$  准则,将应力和变形理论模拟值的  $(1\pm 40\%)$  倍作为一级预警阈值,将材料承载力限值和结构变形限值的 0.7 倍和 0.9 倍分别作为施工过程应力和变形的二级和三级预警值。将  $\pm 2.0$ 、 $\pm 3.0$

分别作为应力和变形变化率的一级、二级预警值。

(2) 对 K6 网壳静力加载试验进行应力和节点位移监测,结果表明,网壳在静力加载后期整体坍塌前,应力和变形呈明显的非线性特征,本文提出的应力和变形变化率指标及预警机制可在险情发生前进行预警,验证本文提出方法的有效性。

(3) 将本文提出方法应用到上海松江站服务中心屋盖结构整体提升施工监测中,结果表明,在各提升阶段初始时刻,被提升结构边界条件发生突变,应力和挠度监测结果未超过黄色预警值,但应力变化率超过黄色预警值,挠度变化率在第三阶段提升初始时刻达到橙色预警值。应力和挠度变化率可对边界和荷载条件突变导致的结构受力状态突变进行预警,提醒工程师关注应力和挠度突变位置,并对施工结构体系进行整体评估,确保整个提升施工过程的安全性。

## 参考文献:

- [ 1 ] 许立新, 遇瑞. 大跨度钢结构安装工艺的选择[J]. 施工技术, 2013, 42(20): 25-27, 64. DOI: 10.7672/sgjs2013200025.  
XU Lixin, YU Rui. The installation technology selection for large-span steel structure[J]. Construction Technology, 2013, 42(20): 25-27, 64. DOI: 10.7672/sgjs2013200025. (in Chinese)
- [ 2 ] 郭正兴, 朱张峰, 牛萌. 钢结构安装坍塌事故案例分析及警示[J]. 施工技术, 2010, 39(7): 35-39.  
GUO Zhengxing, ZHU Zhangfeng, NIU Meng. Case analysis and warning of installation collapse accidents of steel structure[J]. Construction Technology, 2010, 39(7): 35-39. (in Chinese)
- [ 3 ] 罗尧治, 赵靖宇. 空间结构健康监测研究现状与展望[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(10): 16-28. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0070.  
LUO Yaozhi, ZHAO Jingyu. Research status and future prospects of space structure health monitoring[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(10): 16-28. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0070. (in Chinese)
- [ 4 ] 罗尧治, 沈雁彬, 童若飞, 等. 空间结构健康监测与预警技术[J]. 施工技术, 2009, 38(3): 4-8.  
LUO Yaozhi, SHEN Yanbin, TONG Ruofei, et al. Health monitoring and early warning technology in spatial structure[J]. Construction Technology, 2009, 38(3): 4-8. (in Chinese)
- [ 5 ] 罗永峰, 叶智武, 张蓉, 等. 大型复杂钢结构施工过程监测方法研究[C]// 第十二届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 北京:《工业建筑》杂志社, 2012: 72-78.  
LUO Yongfeng, YE Zhiwu, ZHANG Rong, et al. Research on monitoring methods for construction process of large-scale complex steel structures[C]// Proceedings of the 12th National Symposium on Modern Structural Engineering. Beijing: Industrial Construction Magazine Agency, 2012: 72-78. (in Chinese)
- [ 6 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S].

- 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程施工过程结构分析与监测技术规范: JGJ/T 302—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Construction Process Analyzing and Monitoring of Building Engineering: JGJ/T 302—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [8] 吴少伟. 太原南站钢结构健康监测方案及安全预警研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- WU Shaowei. Research on steel structure health monitoring scheme and safety early warning of Taiyuan South Station[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [9] 张涛. 贝壳状钢网壳结构铁路客运站健康监测方案探讨[J]. 铁道经济研究, 2014(5): 26-31. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9746.2014.05.006.
- ZHANG Tao. Discussion on the conchoidal railway station steel reticulated shell structure health monitoring scheme[J]. Railway Economics Research, 2014(5): 26-31. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9746.2014.05.006. (in Chinese)
- [10] 贺海建, 左志亮, 杨春, 等. 某高铁站台大跨度空间钢结构健康监测及其预警系统研究[J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(2): 121-128. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.02.015.
- HE Haijian, ZUO Zhiliang, YANG Chun, et al. Study on health monitoring and early-warning system of long-span spatial steel structure in a high speed railway station[J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(2): 121-128. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.02.015. (in Chinese)
- [11] 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.
- SU Cheng, LIAO Wei, YUAN Kun, et al. Research of online early warning indices for bridge health monitoring[J]. Bridge Construction, 2015, 45(3): 44-50. (in Chinese)
- [12] 熊学炜. 基于温度效应分析的昆明南站结构监测预警评估方法研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊1): 2091-2097. DOI: 10.19701/j.jzjg.23S1638.
- XIONG Xuewei. Research on the monitoring alarming method of Kunming South Railway Station based on the structural temperature effect[J]. Building Structure, 2023, 53(Suppl.1): 2091-2097. DOI: 10.19701/j.jzjg.23S1638. (in Chinese)
- [13] 房建方. 时间序列分段线性表示及定性趋势分析方法的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- FANG Jianfang. Time series piecewise linear representation and qualitative trend analysis[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [14] 王小波. 钢结构施工过程健康监测技术研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- WANG Xiaobo. Health monitoring application and research in construction process of the steel structure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)