

Doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.135

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 大型铁路站房结构健康监测研究现状评述

潘毅<sup>1a,1b</sup>, 刘扬良<sup>1a</sup>, 黄晨<sup>1a</sup>, 郭瑞<sup>1a</sup>, 鲍华<sup>2</sup>, 沈磊<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 a. 土木工程学院; b. 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031;

2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

**摘要:** 铁路站房作为大型公共建筑, 具有结构体系复杂、人流高度密集、使用年限长等特点, 一旦结构失效, 将会造成严重的社会影响。为了有效监测站房结构的健康状况, 及时发现站房结构的损伤, 最大程度地保障铁路站房的结构安全, 有必要对铁路站房结构进行健康监测。结合大型铁路站房工程案例, 总结大型铁路站房的组成和结构特点, 介绍站房健康监测系统的组成, 考虑施工和运营 2 个阶段, 从屋面层、无柱雨棚和承轨层 3 个部分, 分析大型铁路站房主要监测对象和监测内容, 并指出健康监测在铁路站房结构应用中有待解决的问题, 以期促进健康监测在大型铁路站房结构中的应用和发展。

**关键词:** 铁路站房; 健康监测; 结构安全; 施工阶段; 运营阶段

**中图分类号:** TU318.2; TU393.3      **文献标志码:** R      **文章编号:** 2096-6717(2020)01-0070-11

## A review of structural health monitoring of large railway stations

Pan Yi<sup>1a,1b</sup>, Liu Yangliang<sup>1a</sup>, Huang Chen<sup>1a</sup>, Guo Rui<sup>1a</sup>, Bao Hua<sup>2</sup>, Shen Lei<sup>2</sup>

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering,

Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China;

2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, P. R. China)

**Abstract:** Railway stations are a type of large public facility, featured with a complex structural system, high people flow and long service life. Failure of the structural system will cause a serious social impact. In order to effectively monitor the health condition of the station structures, and find out damages of the station structures timely, so as to ensure structural safety of the railway stations to the greatest extent, it is essential to perform health monitoring on the railway station structures. In this study, a case study of a large railway stations is presented, with an overview of structural components and features of stations and an introduction of the health monitoring system used in stations. The main monitoring objects included three levels (roof layer, canopy without platform columns, and rail bearing layer) of the station during

**收稿日期:** 2019-07-02

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFC0802205); 四川省科技计划(2019YJ0222)

**作者简介:** 潘毅(1977-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事工程结构抗震与防灾研究, E-mail: panyi@swjtu.edu.cn。

郭瑞(通信作者), 男, 博士, E-mail: guor4867@swjtu.edu.cn。

**Received:** 2019-07-02

**Foundation items:** National Key Research and Development Program (No. 2016YFC0802205); Sichuan Science and Technology Program (No. 2019YJ0222)

**Author brief:** Pan Yi (1977-), professor, doctoral supervisor, main research interests: seismic and disaster prevention of engineering structure and reinforcement, E-mail: panyi@swjtu.edu.cn.

Guo Rui (corresponding author), PhD, E-mail: guor4867@swjtu.edu.cn.

construction and operation stages. Problems remaining to be solved are discussed on the application of health monitoring on the railway stations structures, in order to promote the development of health monitoring in large railway station structures.

**Keywords:** railway stations; health monitoring; structural safety; construction stage; operation stage

根据 2017 年国务院印发的《“十三五”现代综合交通运输体系发展规划》,到 2020 年,铁路营运里程要达到 15 万 km,其中,高速铁路营运里程要达到 3 万 km<sup>[1]</sup>。大型铁路站房作为铁路交通网络的关键节点,具有结构体系复杂、空间跨度大、使用年限长、服役环境复杂、人群高度密集和社会影响大等特点<sup>[2]</sup>。在长期服役中,由于环境荷载作用、疲劳效应、腐蚀效应和材料老化等因素的影响,铁路站房会产生损伤,使得结构的抗力衰减,在极端情况下(如地震、台风、暴雪等)甚至会导致结构失效,造成严重的社会影响<sup>[3-4]</sup>。健康监测技术是保证结构安全的有效手段<sup>[5]</sup>,将健康监测技术应用于站房结构,能了解结构的健康状况,及时发现结构损伤,以便对结构进行维修和加固,避免结构突然失效,从而保障站房的结构安全。

健康监测是一门综合性的技术,涉及到多个学科<sup>[6]</sup>,最早开始应用于航空、航天、精密机床等领域<sup>[7]</sup>,随着科技的发展,20 世纪 80 年代,健康监测技术开始应用于土木工程领域<sup>[8]</sup>。健康监测最早应用于桥梁结构,如英国 Flintshire 大桥<sup>[9]</sup>、美国 Michigan Street 大桥<sup>[10]</sup>、日本 Akashi-Kaikyo 大桥<sup>[11]</sup>、韩国 Youngjong 大桥<sup>[12]</sup>等,中国也在汲水门大桥<sup>[13]</sup>、汀九大桥<sup>[14]</sup>和润扬长江大桥<sup>[15]</sup>等安装了健康监测系统,以监测桥梁结构的健康状况。20 世纪 90 年代,健康监测开始应用于大型公共建筑,如意大利米亚查体育馆<sup>[16]</sup>,日本某 12 层钢结构建筑等<sup>[17]</sup>,中国也对国家体育场<sup>[18]</sup>、国家游泳中心<sup>[19]</sup>和济南奥体中心<sup>[20]</sup>等结构进行了健康监测。21 世纪初,健康监测开始应用于铁路站房,如德国的 Lehrter 火车站<sup>[21]</sup>,中国的杭州东站<sup>[22]</sup>、滨海站<sup>[23]</sup>、北京西站<sup>[24]</sup>、昆明南站等。

与桥梁、大型公共建筑等结构的健康监测相比,铁路站房结构的健康监测还处于探索阶段。站房的健康监测具有监测项目多、监测测点分布广、监测数据量大等特点。结合大型铁路站房的工程案例,首先,总结大型铁路站房的组成和结构特点,然后,介绍站房健康监测的系统组成,最后,对大型铁路站房的监测对象和监测内容进行分析,针对铁路站房结构健康监测技术发展中的问题,提出相关的建议。

## 1 站房的结构特点

### 1.1 站房结构组成

根据建筑功能的需要,大型站房结构由主体结构和无柱雨棚组成,如图 1(a)所示。主体结构按标高从下往上依次是地铁层、出站层、承轨层、高架层(含夹层)、屋面层,如图 1(b)所示。其中,承轨层、屋面层和无柱雨棚是站房结构健康监测的主要部分。为适应承轨层跨越出站层和地铁层,同时又能支撑高架层和屋面层,大型铁路站房多采用“桥建合一”结构体系,桥梁结构和建筑结构的结合,是一种“列车-桥梁-站房”一体化站房结构形式,可以缩短进出站流线、节约建筑用地,具有柱网布置灵活、结构整体性较好等特点<sup>[25-26]</sup>。

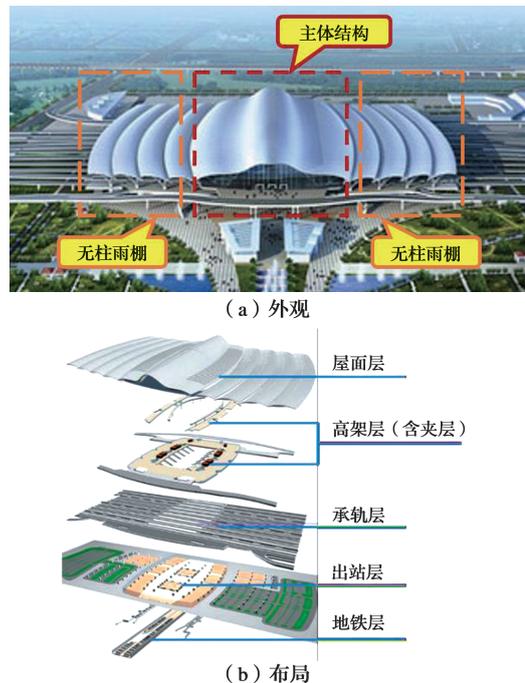
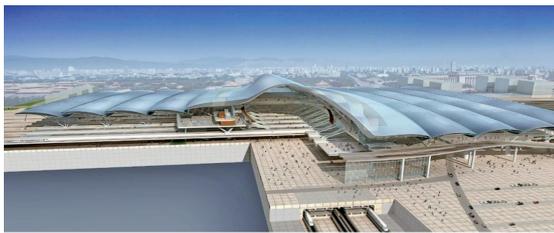


图 1 站房结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of station building structure

按两种结构主次类型不同,“桥建合一”结构体系可分为两类。第一类结构形式以桥梁结构为主,先形成桥梁结构,再在桥梁结构上布置站厅、站台、雨棚等建筑结构,如图 2(a)所示。第二类结构形式是以建筑结构为主,以建筑构件取代桥梁构件,直接承受上部结构的荷载,将承轨层的承轨梁作为建筑

的一部分,支撑于建筑结构上,以承受列车荷载<sup>[27-28]</sup>,如图 2(b)所示。



(a) 以桥梁结构为主的武汉站



(b) 以建筑结构为主的北京南站

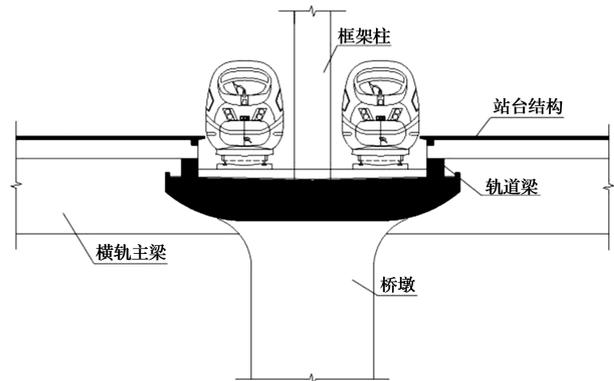
图 2 “桥建合一”类别

Fig.2 Category of “bridge construction in one”

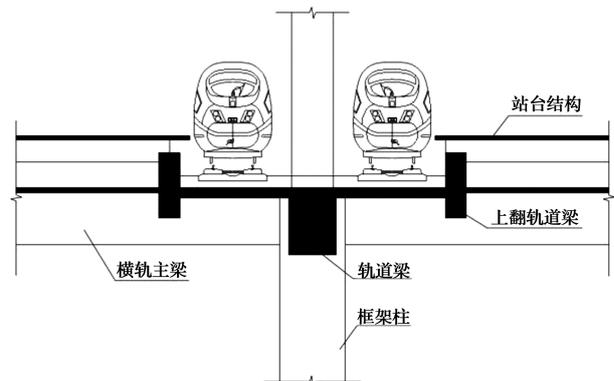
## 1.2 承轨层

承轨层也称站台层,为列车轨道层,是旅客们乘车的一个平台。承轨层是整个站房结构中受力最为复杂的部分,除了自重荷载之外,还有人群荷载和列车荷载的耦合作用。根据结构形式和荷载传递路径不同,承轨层可以分为梁桥式和框架式,其中,梁桥式是先形成桥梁结构(梁、墩柱、基础)作为支撑点,上部建筑结构直接落于桥墩或者轨道梁上,如图 3(a)所示;框架式是通过现浇混凝土形成框架结构,用框架柱和框架梁来承受列车的动荷载作用,承轨层为框架结构的一部分<sup>[29-30]</sup>,如图 3(b)所示。

梁桥式在顺轨方向的每一列桥墩为独立的桥梁体系,横轨方向通过横梁将多条桥梁连成纵横梁体系。因此,梁桥式承轨层能够实现更大的跨度,降低列车荷载对结构振动的影响,但桥梁尺寸大,横轨向和顺轨向刚度相差大。框架式承轨层由于采用整体现浇混凝土结构,避免了双向刚度相差悬殊的问题,桥梁构件的尺寸明显较少,能更好的满足建筑空间效果和视觉效果,但跨度较小,造价略高于梁桥式承轨层<sup>[31-32]</sup>。框架柱多采用钢管混凝土柱、钢管混凝土柱或型钢混凝土柱等,框架梁多采用钢管混凝土梁、预应力钢筋混凝土梁或型钢混凝土梁等。典型铁路站房的承轨层结构形式,见表 1。



(a) 梁桥式



(b) 框架式

图 3 承轨层类别

Fig.3 Category of rail bearing layer

表 1 典型站房的承轨层结构形式

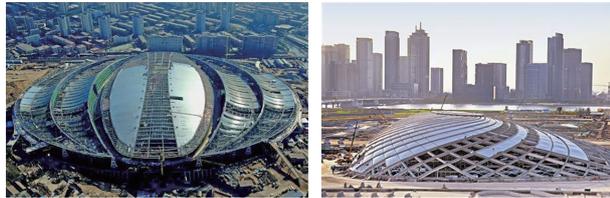
Table 1 Structural form rail bearing layer of typical station buildings

站名	建成时间/年	承轨层类型	结构形式
武汉站	2009	梁桥式	桥梁采用预应力混凝土连续钢梁拱
广州南站	2010	梁桥式	桥梁采用 V 构主墩和连续梁
北京南站	2008	框架式	框架采用钢管混凝土柱和加腋混凝土梁
南京南站	2011	框架式	框架采用钢管混凝土柱和梁
郑州东站	2012	框架式	框架采用钢管混凝土柱和预应力混凝土梁
昆明南站	2016	框架式	框架采用型钢混凝土柱和梁

## 1.3 屋面层

屋面层是站房结构的主要部分,为了便于采光、通风,满足建筑外观,获得较大的空间和视觉通透性,通常采用大柱网、大跨度空间结构,例如,桁架结构(图 4(a))、网壳结构(图 4(b))、网架结构、索壳和索拱结构等<sup>[33]</sup>。这些结构形式的构件受力以轴力为主,材料利用率高,边缘构件与支撑构件的适应性较强,同时具有施工速度快等特点。屋面层支撑构

件的布置受到铁路路线的限制,其在顺轨方向的跨度一般比横轨方向大。大跨度空间结构通过空间结构与建筑造型的完美结合,塑造出具有当地文化特色的铁路站房。



(a) 实腹钢梁+桁架组合结构的北京站

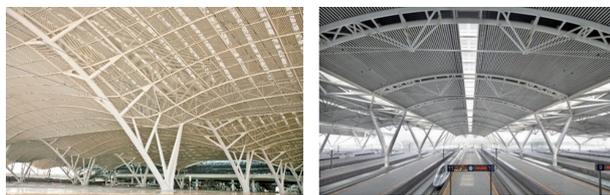
(b) 贝壳形单层网壳结构的滨海站

图 4 屋面层类别

Fig.4 Category of roof layer

#### 1.4 无柱雨棚

无柱雨棚的全称为站台无立柱雨棚,是中国大型铁路站房的标志之一。站台雨棚与站台位置相对应,是为进出站的旅客提供遮风避雨的地方<sup>[34]</sup>。传统铁路站房的雨棚柱子直接立在站台上,形式单一,以单枝 Y 型、双枝 II 型、现浇混凝土梁板和彩色压型钢板为主<sup>[35]</sup>。而现代大型铁路站房则采用整体式的无站台柱雨棚,通过将柱子直接设置在线路中间,不仅将雨棚和站房连接成了一个整体,还可以给站台留出更多空间,减少站台上影响旅客行进和观察视线的障碍物,创造更舒适的乘车环境<sup>[36]</sup>。无柱雨棚多采用大跨网壳结构(如图 5(a)所示)、索拱结构(如图 5(b)所示)等结构形式,实现了轻巧、通透的建筑效果。



(a) 网壳结构的武汉站

(b) 索拱结构的广州南站

图 5 无柱雨棚的类别

Fig.5 Category of canopy without platform cotumns

## 2 站房的健康监测

### 2.1 系统组成

站房结构的健康监测是指在工程结构施工或运营阶段,利用现场无损的检测技术,测定结构关键性能指标,获取结构内部信息并处理数据,通过分析结构系统特性,评估结构因损伤或退化而导致的主要性能指标的改变,以监测结构健康状态的变化,判断结构是否安全<sup>[37-38]</sup>。站房健康监测系统包括传感器子

系统、数据采集与传输子系统、数据管理与控制子系统和数据分析与安全预警子系统<sup>[39-40]</sup>,如图 6 所示。

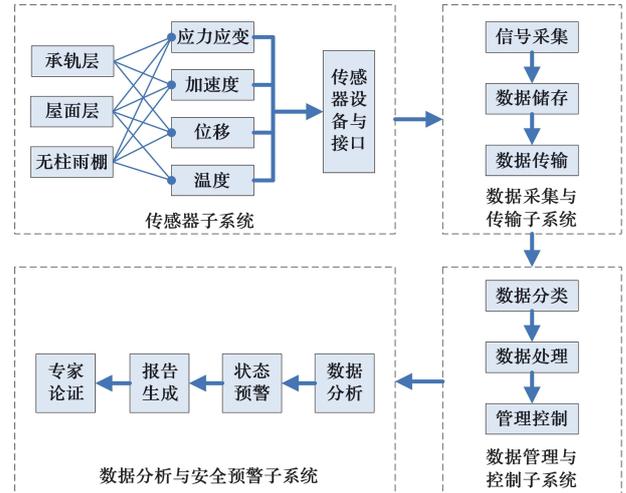


图 6 站房结构的健康监测系统

Fig.6 Health monitoring system of station building structure

其中,传感器子系统为系统硬件部分,是健康监测系统中最为基础的子系统<sup>[41]</sup>。它通过埋入结构内部或者粘贴在结构表面的多种传感器,以实时监测站房结构的作用、效应及损伤信息,并将待测的物理量以电信号形式输出<sup>[42]</sup>。数据采集与传输子系统应对接口的匹配性和软件的功能性进行设计,明确合理的监测数据传输方案,软件能实现自动采集与传输数据,并可进行人工干预采集与采集参数调整<sup>[43-44]</sup>。数据管理与控制子系统应具有统一的数据标准格式和接口,可对海量监测数据进行储存和预处理,自动生成报表和报告,并可通过操作系统中心数据库,对任意时段的数据进行查询和管理<sup>[45-46]</sup>。数据分析与安全预警子系统通过对监测数据进行全面统计分析和特殊分析,可为站房结构的安全预警和评估提供基础数据,以对结构进行实时预警,保证结构的安全<sup>[47-48]</sup>。该子系统是整个健康监测系统的核心部分,目前,数据分析已经形成了较为系统的方法,如静力参数法、动力参数法、模型修正法、神经网络法、遗传算法和小波分析方法等,但这些方法只能实现简单框架结构的损伤定位和损伤定量,而对大型铁路站房复杂结构的损伤识别还有一定困难。大型铁路站房健康监测系统总体设计,应坚持长远规划的原则,尽量实现施工监测和运营监测一体化设计,使得监测工作具有连续性和长期性,其建设宜与站房施工同步进行。从时间顺序而言,站房健康监测分为施工阶段和运营阶段;从空间关系来看,站房健康监测的重点在承轨层、屋面层和无柱雨棚;从监测内容来看,站房结构需要监测其在施工和长期运

营中,所受到各种作用的不确定性及其效应和积累损伤<sup>[49]</sup>,如图 7 所示。其中,效应部分的内力和变形是站房结构的监测重点,加速度和频率的监测主

要集中在承轨层和屋面层。损伤部分的裂缝监测主要集中在承轨层,疲劳监测主要集中在屋面层,锈蚀监测主要集中在无柱雨棚。

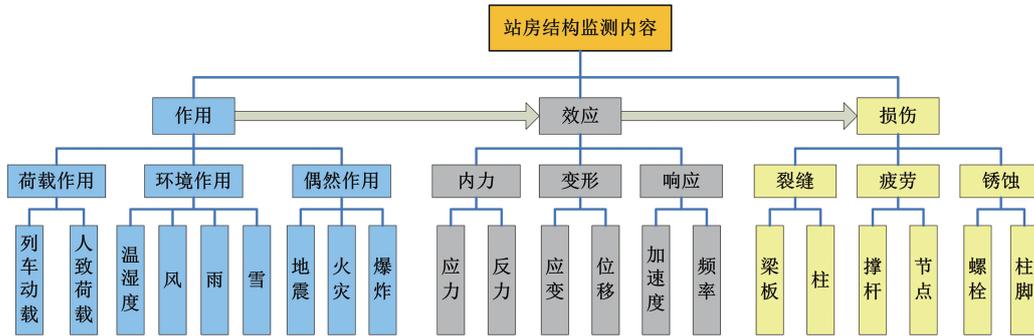


Fig.7 Health monitoring content of station building structure

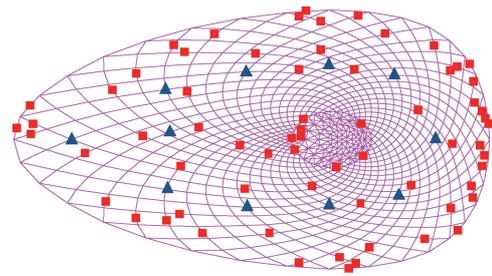
## 2.2 施工阶段

在大型铁路站房的施工过程中,其荷载大小、约束条件和力学模型可能与设计有一定差别。同时,由于外界环境等不确定因素的影响,导致施工阶段存在一定的安全风险<sup>[50-51]</sup>。因此,为了反映站房结构在施工阶段的实际受力状态,需要对车站进行健康监测,以掌握关键部位的受力指标的变化规律,准确评价结构的受力状态,控制施工可能带来的风险,以保证施工过程中结构的安全。

屋面层作为大跨度空间结构,其施工是一个动态的过程,涉及到结构的吊装、滑移、提升、拆除临时支撑和卸载等关键工序,是站房结构在施工阶段的监测重点<sup>[52]</sup>。应变是结构安全状态最直接的变量<sup>[19]</sup>,判断结构受力是否处于安全范围之内是施工监测的核心内容。通过在屋面层结构关键构件和部位设置应变传感器,及时掌握结构的实际受力状态。比如,主桁架是屋面层分块整体提升的着力点,会承受提升过程中的动力荷载,故应对主要受力杆件进行应变监测;钢柱是屋面的关键支撑构件,在吊装或提升的过程中会使得钢柱的荷载加大,而部分钢柱从屋面层贯通下部分结构,故应对柱脚进行应变监测<sup>[22]</sup>。

同时,为了防止施工过程中结构出现过大大变形,需要对结构薄弱部位的变形量进行监测,如桁架跨中和临时支撑等。此外,屋盖结构在施工过程中会受到施工机械振动、屋盖提升等动荷载作用,结构的振动响应往往要大于正常使用情况<sup>[53]</sup>,故应对结构在施工阶段的加速度进行监测。因此,屋面层在施工阶段的监测内容一般有应变、变形和振动等,监测对象为杆件、钢柱和节点等。例如,滨海站在屋面

层的主体结构设置了两种不同类型的传感器,总计 68 个。其中,光纤光栅应变传感器 12 个,用以监测主体结构关键杆件的应力;加速度传感器 56 个,用以监测杆件的振动状态<sup>[54]</sup>,如图 8 所示。监测结果表明,滨海站在施工过程中屋盖整体的动力性能稳定,但存在部分杆件应力较大,应加强监测,以确保结构安全。



注: ■ 加速度传感器 ▲ 光纤光栅应变传感器

图 8 施工阶段滨海站屋面层的测点

Fig.8 Measuring points of the roofing layer of Binhai Station during the construction stage

无柱雨棚也是大跨空间结构,但它的下部结构只有支撑柱,施工阶段监测主要关注无柱雨棚的变形。例如,沈阳北站在施工过程中对无柱雨棚钢桁架的变形进行了监测,监测结果表明桁架变形值均在理论计算范围内<sup>[55]</sup>。而承轨层结构在施工过程中多为现浇混凝土结构,在施工过程中结构相对较为安全。因此,现有关于承轨层在施工阶段的健康监测研究少,而主要集中在后期运营阶段。

表 2 列出了施工阶段铁路站房的健康监测工程应用的统计情况。由表 2 可知,目前,施工阶段站房结构健康监测对象主要是屋面层,其次是无柱雨棚,主要监测参数是结构的应力和加速度。

表 2 施工阶段铁路客站的健康监测

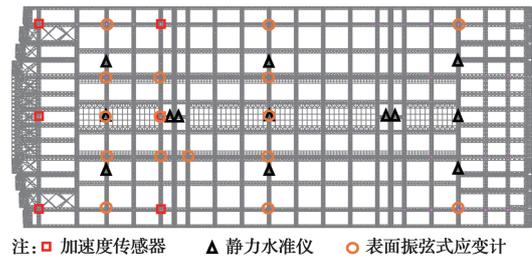
监测部位	代表车站	监测内容	监测仪器
屋面层	滨海站	网壳结构关键杆件的应力及振动	应变传感器 12 个,加速度传感器 56 个
屋面层	厦门站	屋盖关键部位的应变、倾角、结构振动	应变传感器 70 个,加速度传感器 12 个,倾角传感器 8 个
屋面层	太原南站	钢桁架应力、基础的变形和钢桁架跨中的变形	应变传感器 177 个,全站仪
屋面层	深圳北站	钢结构屋盖关键节点的应变和站房大厅 4 个四叉柱的应变	应变传感器 92 个
屋面层	杭州东站	柱脚、关键节点和桁架的应变、屋盖振动和变形缝变形	应变传感器 348 个,加速度传感器 18 个,全站仪
无柱雨棚	沈阳北站	钢立柱柱顶位移、钢桁架挠度	柱顶位移传感器 38 个,全站仪

### 2.3 运营阶段

根据《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2018)<sup>[56]</sup>,大型铁路站房的设计使用年限为 100 a,其在长期运营过程中,由于受到人群荷载、列车荷载和风荷载等多种荷载长期作用,以及环境侵蚀、材料老化和疲劳效应等不利因素的影响,会导致结构产生损伤,可能使得站房结构存在安全隐患。因此,为了及时发现结构损伤,需要对站房结构进行健康监测,以保证铁路客站的运营安全。

为掌握运营期间的屋面层受力状况,对结构安全状态进行评定,宜在受力关键部位设置应变传感器,如支座、跨中截面以及结构分析的易损部位和受力较大部位。同时,屋面层因受不确定性环境作用的影响,存在较多偶然振动,为了掌握结构的动力响应,应采用加速度传感器进行监测,并分析其振型、频率等结果。另外,在大跨空间结构中,桁架跨中易产生变形,累积变形过大也会成为安全隐患,需监测桁架的竖向变形。此外,屋面层由于跨度大、且长期直接与外部环境接触,受温度应力、内外温差及施工因素的影响,通常会设置变形缝。为了掌握温度对结构受力及整体变形的影响,需对屋面层进行温度监测和变形缝的宽度监测。因此,屋面层在运营阶段监测的内容一般有变形,内力,振动和温度,监测对象多为杆件。例如,昆明南站在屋面层设置了 3 种不同类型的传感器,共 94 个。其中,表面振弦式应变计 63 个,用以监测杆件应力及钢柱内力;静力水准仪 13 个,用以监测屋盖挠度;加速度拾振器 18 个,用以监测桁架振动,如图 9 所示。

无柱雨棚在运营期间中,由于受列车运行振动、强气流以及室外风雨雪等自然环境的影响,其结构的支撑柱、梁等容易出现变形或下沉等问题<sup>[57]</sup>,所以需要对其支撑柱和支撑梁的受力和工作状态进行监

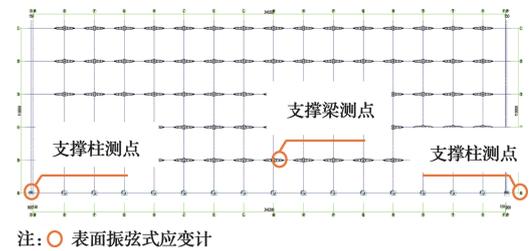


注: □ 加速度传感器 ▲ 静力水准仪 ○ 表面振弦式应变计

图 9 运营阶段昆明南站屋面层的测点

Fig.9 Measuring points of the roofing layer of Binhai Station during operation stage

测,了解其安全储备的大小。因此,无柱雨棚在运营阶段的监测内容一般有应变和变形,监测对象一般为支撑柱和梁。例如,昆明南站在无柱雨棚设置了 12 个表面振弦式应变计。其中,8 个用以监测支撑柱应力,4 个用以监测支撑梁应力,如图 10 所示。



注: ○ 表面振弦式应变计

图 10 运营阶段昆明南站无柱雨棚的测点

Fig.10 Measuring points of the canopy without platform columns of Kunming South Station during the operation stage

承轨层在运营期间,除了考虑结构自重荷载之外,还要考虑人群荷载和列车荷载的耦合作用,是整个站房结构中受力最为复杂的部分<sup>[58]</sup>。由于轨道梁截面和跨度较大,为了解轨道梁的内力及工作状态,需监测其应力状况和裂缝开展情况。其中,钢筋应力计需在混凝土浇筑前安装好,裂缝计需在拆模后安装。同时,人群荷载和列车荷载会导致结构振动,加速度过大会直接影响到结构舒适度,为掌握结

构的振级是否处于允许范围,需对结构的加速度进行监测。此外,变形缝两侧柱竖向变形不能过大,否则会影响列车的正常运行,所以,需要监测变形缝两侧柱的竖向位移。因此,承轨层在运营阶段的监测内容一般有应力应变、裂缝、变形和振动等,监测对象为承轨梁、柱等。例如,昆明南站在承轨层设置了4种不同类型的传感器,总计105个。其中,表面振弦式应变计30个,用以监测梁钢筋应力;振弦式裂缝计30个,用以监测梁裂缝,应变计与裂缝计布置位置相近,如图11所示。静力水准仪24个,用以监测变形缝两侧柱变形;加速度拾振器21个,用以监测轨道梁振动状况。监测结果表明,昆明南站尚处于运营初期,屋面层、无柱雨棚和无柱雨棚的各项指标趋于向平稳,都处于安全的范围内,结构整体安全。

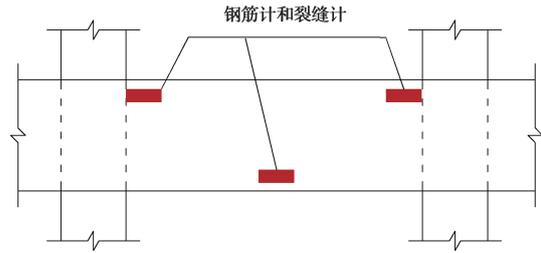


图 11 运营阶段昆明南站轨道梁的测点

Fig.11 Measuring points of the rail bearing beam of Kunming South Station during operation stage

表3列出了运营阶段铁路站房健康监测应用的统计情况。由表3可知,目前,运营阶段站房结构健康监测的对象主要是屋面层和无柱雨棚,其次是承轨层,主要监测参数是结构的应变、变形和加速度。

表 3 运营阶段铁路客站的健康监测

Table 3 Health monitoring of railway passenger station during operation stage

监测部位	代表车站	监测内容	监测仪器
屋面层	滨海站	环境监测、网壳结构温度场、支座位移、网壳杆件应力、网壳节点焊缝工作状态及结构振动	风速仪,温度传感器26个,位移传感器12个,应变传感器36个,加速度传感器12个
屋面层	石家庄站	屋盖变形、应力、振动、温度、风速	应变传感器191个,位移传感器33个,加速传感器,温度传感器10个,风速仪
屋面层	昆明南站	桁架的竖向变形、振动和下部型钢柱变形	应变传感器63个,静力水准仪13个,加速度传感器18个
无柱雨棚	北京站	拱架应力、檩条应力和拱架位移	90个应变传感器,全站仪
无柱雨棚	北京西站	运营阶段拱架应力和拱架位移	56个应变传感器,全站仪
无柱雨棚	阳泉北站	钢结构雨棚的集中应力、应变以及环境	22个应变传感器,风速仪
无柱雨棚	海口东站	钢结构雨棚的柱倾角监测、桁架应力应变、结构振动和环境监测	应变传感器90个,倾角仪18个,风压传感器,温度传感器
无柱雨棚	昆明南站	支撑柱和支撑梁的受力状态	应变传感器12个
承轨层	南京南站	承轨层梁的变形	全站仪
承轨层	昆明南站	承轨层的应力、应变、梁裂缝、振动和变形缝两侧柱竖向位移	应变传感器30个,裂缝计30个,静力水准仪13个,加速度传感器18个

### 3 有待解决的问题及建议

目前,健康监测在铁路站房结构上的应用还不够成熟,针对铁路站房的结构特点,结合铁路站房结构健康监测已有应用情况,提出有待解决和研究的问题及相关建议。

1)如何利用尽可能少的传感器获得尽可能多的结构健康信息,是铁路站房结构健康监测应用中的关键问题。铁路站房的结构体系庞大,需要在屋面层、承轨层和无柱雨棚的关键部分布置传感器。传感器数量过多,不仅会提高系统的成本,也会导致数据量激增,而过少或布置不合理将会导致数据不全

或关键数据缺失。建议可参考航空、航天等领域成熟的传感器优化布置研究成果<sup>[59]</sup>,结合站房结构的特点,开发出适用于站房结构的传感器优化布置技术。

2)大型铁路站房结构属于复杂的非线性系统,如何对结构进行准确地非线性损伤识别还待解决。现有损伤识别方法多基于结构为线性系统的假设,而有关非线性系统的损伤识别方法,还存在许多问题没有解决<sup>[60]</sup>。在对站房结构进行损伤识别的过程中,由于受非线性因素的影响,损伤识别的准确度会降低。其中,遗传算法和神经网络对模型的精度要求不高,而小波分析则在细节刻画方面更好。因

此,建议综合这几种方法加强对非线性损伤识别方法的研究,以提高铁路站房结构损伤识别的准确度。

3)铁路站房结构的健康监测在数据处理研究还存在不足。数据处理是监测工作的基础,现阶段站房健康监测关注硬件系统的建设,而对后期数据的重视程度不够。健康监测系统在运行的过程中,会积累海量的监测数据,而在实际中采集到的初始数据可能存在缺陷,不能准确反映出真实的结构状态。因此,建议对原始的数据进行剔除、消冗及清洗等处理工作,得到有效的监测数据,并进一步利用这些海量数据,发展数据的分析与挖掘技术,以揭示在站房结构在列车荷载、人群荷载和环境因素等耦合作用下的力学行为和演化规律。

4)铁路站房结构的健康监测工作缺乏长期有效的管理机制。结构健康监测是一项需要长期坚持的工作。而在实际应用中,健康监测系统存在重建设、轻管理的情况,在监测信息共享和运营维护上往往存在困难。因此,建议加强建设单位、设计单位、施工单位和管理使用单位的长期联系,实现技术资料 and 监测信息的共享,制定完善的管理使用手册,使得对站房结构健康监测系统的管理定期化和制度化。

5)铁路站房结构健康监测还处于探索阶段,缺乏统一的标准。为有效地推进铁路站房结构的健康监测工作,明确铁路站房健康监测的实施主体、具体内容、技术细则和评估标准等,避免监测的盲目性,建议在相关标准的基础上,吸纳已有大型铁路站房结构健康监测系统的设计、施工及运营经验,编制统一的技术标准。目前,《铁路客站结构健康监测技术标准》正在编制中。

## 4 结 语

阐述了大型铁路站房的组成和结构特点,介绍了站房健康监测系统的组成,分施工和运营2个阶段,从屋面层、无柱雨棚和承轨层等3个结构层次,结合具体工程案例,总结了各结构层次的监测内容和监测对象,并针对铁路站房健康监测应用中存在的问题,给出了相应的建议。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院.“十三五”现代综合交通运输体系发展规划[Z]. 2017: 8-9.  
State Council of the People's Republic of China. "13th Five-year" modern integrated transportation system development plan[Z]. 2017: 8-9.(in Chinese).
- [2] 韩志伟. 铁路客站大型复杂结构健康监测研究与思考[J]. 铁道经济研究, 2011, 19(6): 28-32.
- HAN Z W. Research and thinking on health monitoring for large and complex structure of railway stations[J]. Railway Economics Research, 2011, 19(6): 28-32.(in Chinese)
- [3] DOEBLING S W, FARRAR C R, PRIME M B, et al. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review[R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1996. doi: 10. 2172/249299.
- [4] 李惠, 周文松, 欧进萍, 等. 大型桥梁结构智能健康监测系统集成技术研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(2): 46-52.  
LI H, ZHOU W S, OU J P, et al. A study on system integration technique of intelligent monitoring systems for soundness of long-span bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2): 46-52.(in Chinese)
- [5] ACHENBACH J D. Structural health monitoring-What is the prescription? [J]. Mechanics Research Communications, 2009, 36(2): 137-142.
- [6] 杨智春, 于哲峰. 结构健康监测中的损伤检测技术研究进展[J]. 力学进展, 2004, 34(2): 215-223.  
YANG Z C, YU Z F. Progress of damage detection for structural health monitoring [J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(2): 215-223.(in Chinese)
- [7] PINES D, AKTAN A E. Status of structural health monitoring of long-span bridges in the United States [J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2002, 4(4): 372-380.
- [8] CHAN T H T, YU L, TAM H Y, et al. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation[J]. Engineering Structures, 2006, 28(5): 648-659.
- [9] CURRAN P, TILLY G. Design and monitoring of the flintshire bridge, UK [J]. Structural Engineering International, 1999, 9(3): 225-228.
- [10] UDD E, KUNZLER M, LAYLOR M, et al. Fiber grating systems for traffic monitoring [C]// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2001: 510-516.
- [11] FUJINO Y. Monitoring system of the Akashi Kaikyo Bridge and displacement measurement using GPS[C]// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2000: 229-236.
- [12] YUN C B, LEE J J, KIM S K, et al. Recent R & D activities on structural health monitoring for civil infrastructures in Korea [J]. KSCE Journal of Civil

- Engineering, 2003, 7(6): 637-651.
- [13] WONG K Y, LAU C K, FLINT A R. Planning and implementation of the structural health monitoring system for cable-supported bridges in Hong Kong [C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2000: 266-275.
- [14] KO J M, NI Y Q. Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges[J]. Engineering Structures, 2005, 27(12): 1715-1725.
- [15] 李爱群, 缪长青, 李兆霞, 等. 润扬长江大桥结构健康监测监测系统研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(5): 544-548.  
LI A Q, MIAO C Q, LI Z X, et al. Health monitoring system for the runyang yangtse river bridge[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(5): 544-548.(in Chinese)
- [16] CIGADA A, MOSCHIONI G, VANALI M, et al. The measurement network of the San Siro Meazza Stadium in Milan: Origin and implementation of a new data acquisition strategy for structural health monitoring[J]. Experimental Techniques, 2010, 34(1): 70-81.
- [17] IWAKI H, SHIBA K, TAKEDA N, et al. Structural health monitoring system using FBG-based sensors for a damage-tolerant building[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2003: 392-399.
- [18] 曾志斌, 张玉玲. 国家体育场大跨度钢结构卸载时应力监测系统[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(1): 139-144.  
ZENG Z B, ZHANG Y L. Stress monitoring system of large-span steel structure of the national stadium while unloading [J]. China Railway Science, 2008, 29(1): 139-144.(in Chinese)
- [19] 李惠, 周峰, 朱焰煌, 等. 国家游泳中心钢结构施工卸载过程及运营期间应变健康监测及计算模拟分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 1-9.  
LI H, ZHOU F, ZHU Y H, et al. An analysis of monitored and computed strain of the National Aquatics Center in the states of unloading and daily use [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 1-9.(in Chinese)
- [20] 周学军. 济南奥体中心场馆钢结构设计特色与健康监测[J]. 工程力学, 2010, 27(Sup2): 105-113.  
ZHOU X J. Structural design and health monitoring of Jinan Olympic Sports Center [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(Sup2): 105-113.(in Chinese)
- [21] HABEL W R, KOHLHOFF H, BRANDES K, et al. Complex measurement system for long-term monitoring of prestressed railway bridges of the new Lehrter Bahnhof in Berlin[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2002: 236-241.
- [22] 罗尧治, 刘钝, 沈雁彬, 等. 杭州铁路东站站房钢结构施工监测[J]. 空间结构, 2013, 19(3): 3-8, 26.  
LUO Y Z, LIU D, SHEN Y B, et al. Construction monitoring of the steel structure for Hangzhou East Railway Station building[J]. Spatial Structures, 2013, 19(3): 3-8, 26.(in Chinese)
- [23] 赵中伟, 陈志华, 王小盾, 等. 于家堡交通枢纽站房网壳施工仿真分析与监测[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 136-142.  
ZHAO Z W, CHEN Z H, WANG X D, et al. Simulation and monitoring of whole erection process for the Yujiapu Railway Station building [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 136-142. (in Chinese)
- [24] 孟宪全. 北京西站无站台柱雨棚安全监测方法[J]. 铁道建筑, 2006, 46(7): 96-98.  
MENG X Q. Safety monitoring method for no-column canopy in Beijing West Railway Station [J]. Railway Engineering, 2006, 46(7): 96-98.(in Chinese).
- [25] 郑健. 总结提升 持续改进 进一步推动中国铁路客站的创新与发展[J]. 铁道经济研究, 2009(6): 1-5.  
ZHENG J. Sum up experiences to improve persistently, providing further impetus to the innovation and development of railway stations [J]. Railway Economics Research, 2009(6): 1-5.(in Chinese)
- [26] 赵建华. 北京南站“房桥合一”结构体系整体分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(Sup1): 743-746.  
ZHAO J H. Global analysis of frame-bridge combined system in Beijing South Railway Station [J]. Building Structure, 2011, 41(Sup1): 743-746.(in Chinese)
- [27] 王伟佳. 桥建合一框架结构站房概述及设计分析方法探讨[J]. 铁道勘测与设计, 2011, 55(5): 92-98.  
WANG W J. Discussion on bridge building and frame structure station building and discussion on design analysis method [J]. Railway Survey and Design, 2011, 55(5): 92-98.(in Chinese).
- [28] 宋佳刚. 桥建合一与桥建分离高架站房的对比分析[J]. 铁道勘测与设计, 2015, 59(3): 40-44.  
SONG J G. Comparative analysis of bridge construction and one bridge and separation of elevated station buildings [J]. Railway Survey and Design, 2015, 59(3): 40-44.(in Chinese).
- [29] 赵鹏飞, 钱基宏. 我国新时期大型铁路站房结构的特点与展望[J]. 建筑结构, 2011, 41(11): 64-68.  
ZHAO P F, QIAN J H. Characteristic and expectation of China railway station structure in new period [J]. Building Structure, 2011, 41(11): 64-68.(in Chinese)

- [30] 史娣. 武汉站桥建合建结构桥梁设计的关键技术研究[J]. 桥梁建设, 2008, 38(6): 34-36.  
SHI D. Research of key techniques for bridge design in integrated bridge and building structure of Wuhan railway station[J]. Bridge Construction, 2008, 38(6): 34-36.(in Chinese)
- [31] 蔡德强. 广州南站桥建合建结构设计综述[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(6): 164-168.  
CAI D Q. Design of combination structure of bridge and building in Guangzhou South railway station [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(6): 164-168.(in Chinese)
- [32] 李茂生. 建桥一体化车站结构研究及其应用[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
LI M S. Research on the application of the structure of the station integrating bridge with building [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.(in Chinese)
- [33] 郑健. 空间结构在大型铁路客站中的应用[J]. 空间结构, 2009, 15(3): 52-65.  
ZHENG J. The applications of spatial structures in large railway stations[J]. Spatial Structures, 2009, 15(3): 52-65.(in Chinese)
- [34] 盛晖. 溯本求源, 尽善尽美: 关于无柱雨棚的思考[J]. 铁道经济研究, 2012, 20(5): 40-45.  
SHENG H. Seeking source and to be best: Thinking on no-column canopy[J]. Railway Economics Research, 2012, 20(5): 40-45.(in Chinese)
- [35] 陈耀先. 新型铁路旅客站台彩色压型钢板雨棚的研究与应用[J]. 铁道标准设计, 2000, 44(12): 1-3.  
CHEN Y X. Research and application of color profiled steel plate canopy for new railway passenger station platform[J]. Railway Standard Design, 2000, 44(12): 1-3.(in Chinese)
- [36] 高剑. 无站台柱雨棚特性与设计[J]. 铁道工程学报, 2008, 25(12): 75-78.  
GAO J. Characteristics and design of no -platform-column canopy [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 25(12): 75-78.(in Chinese)
- [37] HOUSNER G W, BERGMAN L A, CAUGHEY T K, et al. Structural control: past, present, and future[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(9): 897-971.
- [38] CHANG P C, FLATAU A, LIU S C. Review paper: health monitoring of civil infrastructure[J]. Structural Health Monitoring: an International Journal, 2003, 2(3): 257-267.
- [39] CHONG K P, CARINO N J, WASHER G. Health monitoring of civil infrastructures[J]. Smart Materials and Structures, 2003, 12(3): 483-493.
- [40] HUMAR J L, AMIN M S. Structural health monitoring[M]//HUMAR J L, AMIN M S. Structural Engineering, Mechanics and Computation. Elsevier, 2001: 1185-1193.
- [41] FRASER M, ELGAMAL A, HE X F, et al. Sensor network for structural health monitoring of a highway bridge[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2010, 24(1): 11-24.
- [42] MEASURES R M. Structural monitoring with fibre optic technology [J]. Applied Mechanics Reviews, 2001, 55(1): 1609-1610.
- [43] PARK G, ROSING T, TODD M D, et al. Energy harvesting for structural health monitoring sensor networks[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2008, 14(1): 64-79.
- [44] CROXFORD A J, WILCOX P D, DRINKWATER B W, et al. Strategies for guided-wave structural health monitoring[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007, 463(2087): 2961-2981.
- [45] FARRAR C R, LIEVEN N A J. Damage prognosis: the future of structural health monitoring [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007, 365(1851): 623-632.
- [46] WANG Y, LYNCH J P, LAW K H. A wireless structural health monitoring system with multithreaded sensing devices: design and validation[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2007, 3(2): 103-120.
- [47] LYNCH J P. An overview of wireless structural health monitoring for civil structures [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007, 365: 345-372.
- [48] BROWNJOHN J M W. Structural health monitoring of civil infrastructure[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007, 365: 589-622.
- [49] 李宏男, 李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 82-90.  
LI H N, LI D S. Safety assessment, health monitoring and damage diagnosis for structures in civil engineering [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(3): 82-90.(in Chinese)
- [50] 罗永峰, 叶智武, 王磊. 大型复杂钢结构施工过程监测系统研究现状[J]. 施工技术, 2015, 44(2): 68-74.  
LUO Y F, YE Z W, WANG L. The research status of construction monitoring system in large and complex

- steel structures [J]. Construction Technology, 2015, 44(2): 68-74.(in Chinese)
- [51] 曹志远. 土木工程分析的施工力学与时变力学基础[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 41-46.  
CAO Z Y. Construction mechanics and time-varying mechanics in civil engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 41-46.(in Chinese)
- [52] 董石麟, 罗尧治, 赵阳. 大跨度空间结构的工程实践与学科发展[J]. 空间结构, 2005, 11(4): 3-10, 15.  
DONG S L, LUO Y Z, ZHAO Y. Practical application and research advances of long-span space structures[J]. Spatial Structures, 2005, 11(4): 3-10, 15.(in Chinese)
- [53] 罗永峰, 叶智武, 陈晓明, 等. 空间钢结构施工过程监测关键参数及测点布置研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(11): 108-115.  
LUO Y F, YE Z W, CHEN X M, et al. Research on key parameter selection and monitoring point arrangement in construction monitoring of spatial steel structures[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(11): 108-115.(in Chinese)
- [54] 张凤龙, 蒋丰军, 陈庆鹏, 等. 贝壳形穹顶网壳结构在线监测系统及其应用[J]. 现代城市轨道交通, 2015, 12(4): 34-37.  
ZHANG F L, JIANG F J, CHEN Q P, et al. On-line monitoring system and its application for reticulated steel structure of shell dome [J]. Modern Urban Transit, 2015, 12(4): 34-37.(in Chinese)
- [55] 杨光. 沈阳北站雨棚钢结构整体变形监控与分析[J]. 铁道建筑, 2006, 46(11): 12-14.  
YANG G. Monitoring and analysis of overall deformation of canopy steel structure in Shenyang North station[J]. Railway Engineering, 2006, 46(11): 12-14.(in Chinese).
- [56] 建筑结构可靠度设计统一标准: GB 50068—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 9-10.  
Unified standard for reliability design of building structures: GB 50068-2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019: 9-10. (in Chinese).
- [57] 刘辉, 宫涛. 高铁站台钢结构雨棚健康监测技术的研究与应用[J]. 铁路计算机应用, 2018, 27(6): 43-47.  
LIU H, GONG T. Health monitoring technology for steel structure rainshed of high-speed railway station platform[J]. Railway Computer Application, 2018, 27(6): 43-47.(in Chinese)
- [58] 朱志辉, 官斌, 余志武, 等. 列车-“站桥合一”大型客运站耦合振动响应分析[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(5): 38-46.  
ZHU Z H, GUAN B, YU Z W, et al. Coupling vibration response of train-“station-bridge integration” for large-scale passenger station [J]. China Railway Science, 2014, 35(5): 38-46.(in Chinese)
- [59] 谢强, 薛松涛. 土木工程结构健康监测的研究状况与进展[J]. 中国科学基金, 2001, 15(5): 285-288.  
XIE Q, XUE S T. Research state and advances on structural health monitoring in civil engineering [J]. Bulletin of National Science Foundation of China, 2001, 15(5): 285-288.(in Chinese)
- [60] 周奎, 王琦, 刘卫东, 等. 土木工程结构健康监测的研究进展综述[J]. 工业建筑, 2009, 39(3): 96-102.  
ZHU K, WANG Q, LIU W D, et al. A summary review of recent advances in research on structural health monitoring for civil engineering infrastructures [J]. Industrial Construction, 2009, 39(3): 96-102.(in Chinese)

(编辑 邓云)