

高铁车站运营期钢屋盖预警阈值设定

臧万军, 张龙

(福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 利用 Midas/Gen 软件, 对车站整体进行建模, 研究其在正常使用极限状态、极限承载力状态等静力工况下及地区同等级别、比地区高一等级抗震烈度地震波作用下结构响应。结合现场实测车站钢屋盖应力与加速度数据, 分别提出钢桁架应力及加速度黄色、橙色、红色 3 个级别的预警阈值确定方法, 设定了针对依托工程的三级预警阈值。可为同类型研究提供参考。

关键词: 高铁车站; 大跨度空间钢结构; 健康监测; 预警阈值

中图分类号: TU392; U238

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)03-0225-05

Steel roof warning threshold setting during high-speed railway station operation

ZANG Wanjuan, ZHANG Long

(School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350119, China)

Abstract: The Midas/Gen software was used to model the station as a whole, and its structural response under static working conditions such as normal service limit state and ultimate bearing capacity state and that under seismic waves of the same level and one grade higher than the regional seismic intensity was studied. Combined with the on-site measured station steel roof stress and acceleration data, the determination method of three levels of early warning thresholds of steel truss stress and acceleration, i.e., yellow, orange and red, were proposed, and the three-level early warning threshold for the supporting project was set, which can provide reference for the same type of research.

Keywords: high-speed rail stations; steel structure with large-span space; health monitoring; warning threshold

结构健康监测能够实时反映结构的性能状态^[1], 运营期间对高铁站房实时监测是保证结构安全的重要手段。王琨^[2]通过对关键梁、柱、墙节点的监测, 实现了对整个房屋的监测。Zhang 等^[3]基于杭州奥林匹克中心体育场钢结构的长期监测数据, 研究了测点应力变化的相关性。吴少伟^[4]提出桁架应力及加速度三级预警取值, 其应力预警取值方法太过笼统, 加速度取值方法的一级响应过高而且对于最低等级 6° 地区无法设定一级预警。贺海建等^[5]提出 3 个级别应变预警值, 但具体采用何种工况下应变

值作为预警值未做阐述。郭晖^[6]等多种荷载工况下钢结构站房的实测加速度响应数据进行分析, 结果表明, 各工况下加速度均未达到舒适度标准限值。可见, 目前国内对于桁架应力预警阈值设定有一定研究, 而关于加速度预警阈值研究较少。

本文以某高铁车站为例, 运营阶段高铁站房健康监测为研究背景, 利用 Midas/Gen 软件, 对车站整体进行建模, 研究其在各静力工况及不同抗震烈度地震波作用下结构响应。分析钢屋盖上运营阶段部分应力应变计与加速度计数

收稿日期: 2022-11-16

基金项目: 福建工程学院横向科研项目 (GY-H-21292)

第一作者简介: 臧万军 (1975—), 男, 吉林农安人, 教授, 博士, 研究方向: 地下结构施工力学。

据,探讨并确定钢桁架应力及加速度 3 个级别的预警阈值。

1 工程概况及模型建立

1.1 工程概况

某高铁车站屋面为三维曲面造型,采用四角锥网架结构,网架覆盖面积 47 250 m²,平面投影最大尺寸为 205 m×288 m,最大跨度约 54 m。两侧悬挑长约 19.6 m。钢网架支撑在混凝土柱上,采用球型抗拉支座,网架所有杆件均为圆钢管,材质为 Q355B。

1.2 仪器布点位置

本文仅介绍钢屋盖应力应变计与加速度计布点位置。加速度监测点位如图 1 所示,桁架应力应变监测点位如图 2 所示。应力应变计型号为 JMZX-212HAT,加速度计型号为 JMCZ-2091。测量仪器均在桁架吊装安装完成后安装。因对称布置,加速度监测点位仅标注桁架南部区域。

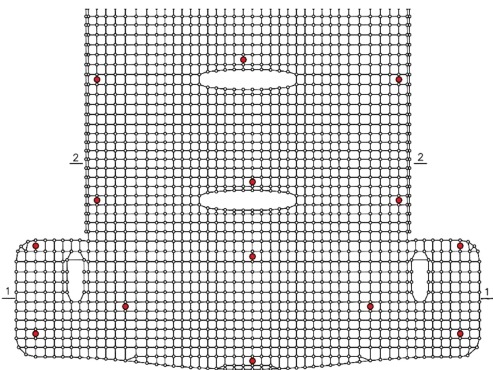


图 1 钢屋盖南侧加速度计布置图

Fig.1 Accelerometer layout on the south side of the steel roof

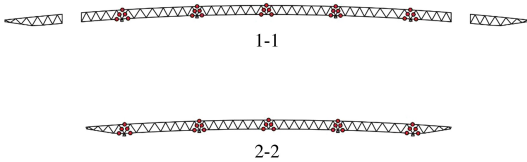


图 2 部分应力应变计布置图

Fig.2 Partial stress strain gauge layout drawing

1.3 建立车站整体模型

应用 Midas/Gen 软件对整体车站进行建模,基底边界采用一般固结约束,所有材料均假设为线弹性,弹性模量和泊松比均按设计文件取值,构件材料取用见表 1。

表 1 车站模型构件材料参数

Tab.1 Station model component material parameters

构件类型	材料类型	弹性模量/GPa	泊松比
地下层柱	C50	346	0.2
地下层梁	C40	326	0.2
承轨层梁、柱	C40	326	0.2
高架层梁、柱	C40	326	0.2
高架层钢框架	Q345B	2 060	0.3
钢屋盖桁架	Q355B	2 060	0.3

2 应力应变预警阈值

2.1 模型静力分析

根据《建筑结构荷载规范》^[7],附加恒荷载取 0.6 kN·m⁻²,活荷载取 0.5 kN·m⁻²;基本风压取 0.6 kN·m⁻²(百年一遇),地面粗糙度 B 类;对温度作用较敏感的钢结构,温度作用取升温 23 ℃,降温 27.5 ℃。

按文献[7]对恒荷载、活荷载、温度作用、风荷载进行荷载组合。组合工况如表 2 所示。其中,工况 1 计算结果如图 3 所示。

表 2 荷载工况组合表

Tab.2 Load case combination table

工况	名称	荷载组合
1	原始状态	1.00D
2	正常使用极限状态 1	1.20D+1.4L+1.40×0.6W _{x(y)}
3	正常使用极限状态 2	1.20D+1.4L+1.40×0.6T ₋
4	极限承载力状态	1.35D+1.4×(0.7L+0.6W _{x(y)} +0.6T ₋)

注:D 为恒荷载,kN·m⁻²;L 为活荷载,kN·m⁻²;W 为风荷载(小脚标为风向),kN·m⁻²;T₋为降温 27.5℃。

各工况最大位移、最大应力汇总如表 3。根据 GB50017—2017《钢结构设计标准》^[8],位移最大允许值为所在跨度的 1/125。

由数值模拟计算结果及表 3 可得出:

(1)工况 1 与工况 2 最大位移出现在悬挑桁架位置,其余工况均出现在桁架跨中位置。各工况下最大应力均出现在钢架与混凝土柱结合位置,为压应力。

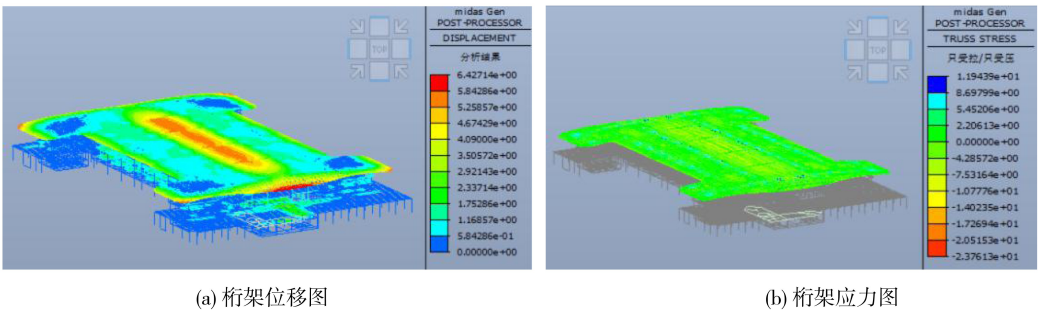


图 3 工况 1 位移与应力计算云图

Fig.3 Displacement and stress calculation result plot for working condition 1

表 3 工况最大位移与应力表

Tab.3 Maximum displacement and stress for working conditions

工况	最大位移/mm	允许值/mm	最大应力/MPa
1	6.43	152	-23.76
2	26.77	152	-94.30
3	41.08	216	-122.23
4	67.86	216	-234.56

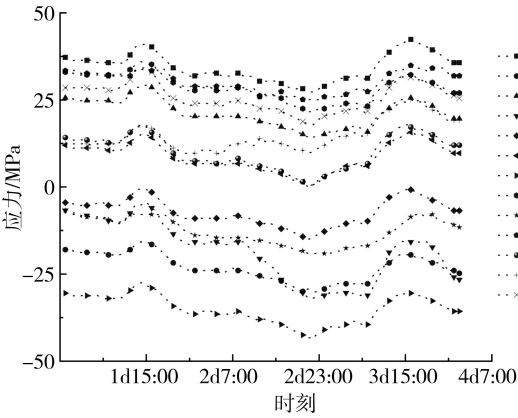


图 4 桁架应力图

Fig.4 Truss stress diagram

(2)桁架在工况 3 时产生的位移及应力比工况 4 时大,这是由于当地温度对钢桁架的影响。

(3)各工况下桁架最大位移均满足《钢结构设计标准》要求,最大应力均远小于杆件屈服应力 355 MPa。

2.2 预警阈值确定

2.2.1 现场监测数据分析

随机取 13 个桁架应力监测点位进行分析,数据 1 h 采集一次,从中抽取温差较大时连续 3 d 的测量数据,结果汇总如图 4 所示。其中 1 d15:00 表示第一天 15:00 时刻。

由图 4 可知,应力值一直处于波动状态,且在每天的 15 时左右出现较大波动,是因为夏季午后温差较大所致,桁架应力在-45 ~40 MPa 范围波动,应力值均在工况 1 与工况 2 之间,验证了模型的可靠性。

2.2.2 确定预警阈值

贺海建等^[5]提出 3 个级别应变预警值:一级预警阈值为各构件在正常使用时的最不利工况下的应变值;二级预警阈值为该类型构件在最不利理论极限状态下的最大应变值;三级预警阈值为构件的实际极限承载力。由于正常使用极限两种状态结果差异较大,且当地温度作用对桁架影响

更大,故宜采用正常使用极限状态 2 的桁架最大应力限值作为一级预警(黄色预警)值,采用极限承载力状态的桁架最大应力限值作为二级预警(橙色预警)值,采用构件屈服应力作为三级预警(红色预警)值。

综上,依托工程桁架三级预警阈值定为:黄色预警为正常使用时的最不利工况下的应变值:154.82 MPa;橙色预警为有温度荷载组合的最不利理论极限状态下的最大应变值:248 MPa;红色预警为构件的实际极限承载力:355 MPa。

3 加速度预警阈值

3.1 模型动力分析

依托工程建筑抗震设防类别为重点设防类,工程抗震设防烈度为 6 度,设计地震分组为第一组,建筑场地类别为 II 类。由于为特殊设防类建筑,应按高于本地区抗震设防烈度提高 1°的要求加强其抗震措施。故对结构地面依次施加符合文献^[9]中抗震设防烈度为 6 度和 7 度的地震波。地震波如图 5 所示。

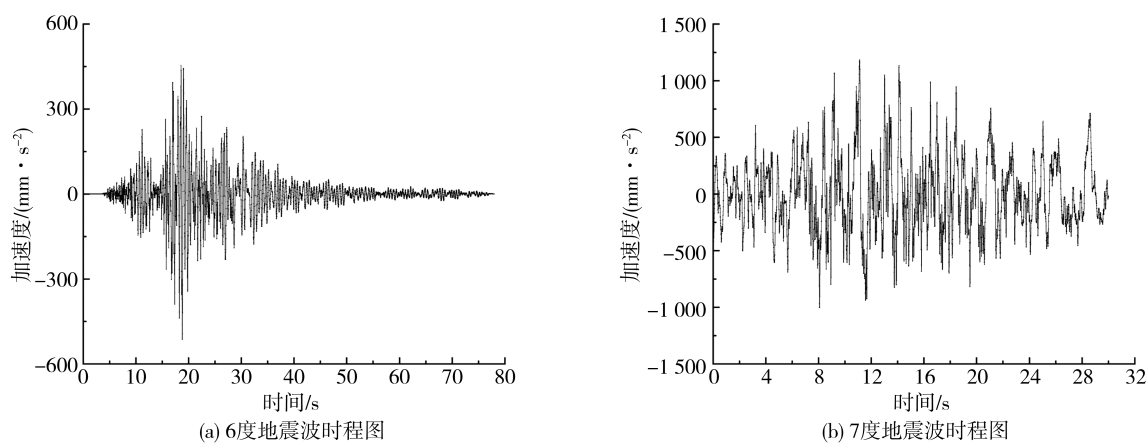


图 5 地震波时程图
Fig.5 Seismic wave time-history map

研究表明,车站结构振动响应主要受列车竖向动力荷载控制,振动以竖向振动为主^[10],故结果仅显示车站竖向振动响应。6 度地震波作用后响应结果选用 10~40 s 内,取每间隔 1 s 的钢屋盖瞬时最大加速度值。7 度地震波作用后响应结果选用 0~30 s 内,取每间隔 1 s 的钢屋盖瞬时最大加速度值。将计算结果绘制如图 6 所示。

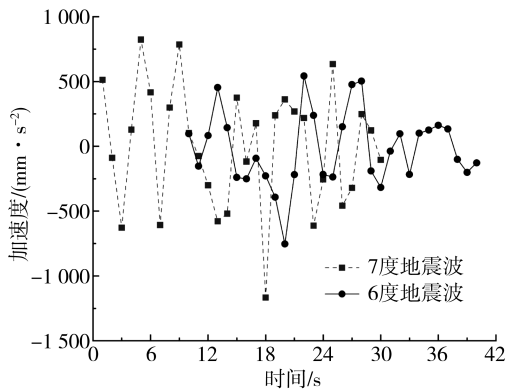


图 6 地震波最大加速度时程图

Fig.6 Time-history diagram of the maximum acceleration of seismic waves

文献[11]给出了不同人员活动环境下加速度限值。如表 4 所示。

高铁车站取加速度限值为 0.015g,即 147 mm/s²。由图 6 及表 4 可看出:

(1)地震作用时,钢屋盖整体最大瞬时加速度位置以及大小处于波动状态。6 度地震波加速度波动范围在-800~600 mm/s²,7 度地震波加速度波动范围在-1 100~1 000 mm/s²。

(2)6 度地震波加速度绝对最大值为-676 mm/s²,出现在地震波作用至 20 s 处。7 度

地震波加速度绝对最大值为-1 046 mm/s²,出现在地震波作用至 18 s 处。

(3)在地震波作用下,两者均超过美国规范 AISC 中舒适度评价加速度限值 147 mm/s²。

表 4 文献[11]中加速度限值
Tab.4 AISC acceleration limits

人员活动情况	结构阻尼比	加速度限值
住宅、办公、教堂	0.02~0.05	0.005g
商场	0.02	0.015g
室内行人连廊	0.01	0.015g
室外行人连廊	0.01	0.050g

3.2 确定预警阈值

工程现场实测钢屋盖加速度均在 5 mm/s² 以下小范围波动,远小于美国规范人体舒适度评价加速度限值。美国规范中仅以加速度响应时程极值作为评价指标,会高估结构振动响应对人体舒适度的影响^[8]。因是对钢屋盖加速度确定 3 级预警值,应合理放大舒适度评价,故将美国规范舒适度加速度限值作为一级预警值(黄色预警),将抗震设防烈度等级同等地震波作用下钢屋盖加速度竖向响应最大值作为二级预警值(橙色预警),将高于抗震设防烈度等级一级同等地震波作用下钢屋盖加速度竖向响应最大值作为三级预警值(红色预警)。

综上,依托工程桁架加速度预警阈值定为:黄色预警为美国规范舒适度评价加速度限值:147 mm/s²;橙色预警为同等级抗震设防烈度

地震波作用下桁架竖向加速度响应最大值:
676 mm/s²;红色预警为高一等级抗震设防烈度
地震波作用下桁架竖向加速度响应最大值:
1 046 mm/s²。

4 结论

1)桁架应力阈值设定方法:黄色预警为正常
使用时的最不利工况下的应变值;橙色预警为有
温度荷载组合的最不利理论极限状态下的最大应
变值;红色预警为构件的实际极限承载力。

2)桁架加速度阈值设定方法:黄色预警为美
国规范舒适度加速度限值;橙色预警为同等级抗
震设防烈度地震波作用下桁架竖向加速度响应最
大值;红色预警为高一等级抗震设防烈度地震波
作用下桁架竖向加速度响应最大值。

3)大跨度空间钢结构最大位移易出现在钢
架悬挑或跨中位置,最大应力易出现在桁架与混
凝土柱结合部位。

4)抗震设防烈度地震波作用时,加速度远大
于人体舒适度限值。

参考文献:

[1] 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.

[2] 王琨. 基于射频和 NB-IoT 的危房监测系统设计[J]. 福建工程学院学报,2021,19(3):247-254.

[3] ZHANG Z Y,LUO Y Z. Restoring method for missing data of spatial structural stress monitoring based on correlation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2017,91:266-277.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 郭晖,安毅,程欣,等. 多工况激励下大跨度钢结构高铁站房振动响应的现场实测研究[J]. 太原理工大学学报,2021,52(2):247-255.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.

[9] 广东省住房和城乡建设厅. 建筑工程混凝土结构抗震性能设计规程:DBJ/T 15-151-2019[S].广州:中国城市出版社,2019.

[10] ZHUZ H,DAVIDSON M T,HARIK I E,et al. Train-induced vibration characteristics of an integrated high-speed railway station[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2017,31(4):218-224.

[11] American Institute of Steel Construction. Steel design guide series II: floor vibration due to human activity: AISC II[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2003.

(责任编辑:陈雯)