

基于 DSTFT 的无缝线路稳定性分析

郭磊, 雷鸣, 祁欣

(北京化工大学 理学院, 北京 100029)

摘要:基于离散短时傅里叶变换(DSTFT)思想提出了一种新的 CWR 稳定性分析方法,该方法利用 DSTFT 算法对线路纵向各采样点处测得的应力进行计算,并绘制各采样点处应力的幅度和频率在线路纵向上的三维分布图谱。通过对图谱的研究,建立了 CWR 稳定性评估条件,实现了对 CWR 稳定性的定量分析。经过对北京丰台区某 CWR 的多次试验,结果证明该方法的分析结论准确可靠。

关键词:无缝线路;离散短时傅里叶变换;稳定性评估;无损检测

中图分类号:U213.2+13 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)01-0046-06

0 引言

铁路运输作为主要的运输方式之一,已经在世界各国得到了广泛应用。近年来,随着社会经济的发展,对铁路运力的高速化和重载化也提出了更高的要求,因此无缝线路(CWR)成为现代铁路铺设的首选方案之一。

CWR 具有行车速度快,平稳性好、维护成本低、使用寿命长等优点。然而,由于 CWR 仅能在钢轨两端的伸缩区内伸缩,在固定区则很难伸缩。当外界温度过高或过低时,将在钢轨内部产生较大的温度应力。此外,钢轨本身也具有一定的残余应力^[1],两种应力叠加很可能降低 CWR 的稳定性,甚至使 CWR 发生胀轨跑道,危及行车安全。

对 CWR 稳定性的检测评估,过去主要依靠铁路工人的观察和经验判断;铁路维护部门为保证 CWR 安全运营,会进行定期应力放散,这样虽然能降低 CWR 的失稳风险,但人力物力消耗过大。1977年,铁道科学研究院根据能量法构建了“统一无缝线路稳定性计算公式”^[2],为 CWR 的稳定性评估提供了一种理论分析方法;2003年,韩国学者 Lim 等^[3]通过建立三维有限元模型讨论了道床阻力在横向、纵向和竖向上对 CWR 稳定性的影响;2010年,Choi 等^[4]通过参数研究讨论了 CWR 的设计参数对其稳定性的影响;2013年,Carvalho 等学者利用 ANSYS 平台建立了 CWR 热载荷理论模型并提出了一种通过计算 CWR 安全温升评估稳定性的新方法^[5]。上述方法分别从不同角度对 CWR 的稳定性进行了研究,为 CWR 的设计和维护提供了技术借鉴,但大都集中在 CWR 稳定性的理论分析上,对实际 CWR 稳定性的考察不够全面。

本文在前人工作的基础上,将离散短时傅里叶变换(DSTFT)思想引入 CWR 的稳定性研究中,提出了一种新的 CWR 稳定性检测评估方法,并利用该方法对北京丰台区某 CWR 进行了多次试验,其结果证明该方法的分析结论准确可靠。

1 DSTFT 理论

导致 CWR 失稳的主要因素是钢轨中的温度压力^[6],同时,扣件松动、道钉缺失和轨枕失效等因素会

收稿日期:2016-01-15 责任编辑:刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2017.01.09

基金项目:国家自然科学基金(51275029)

作者简介:郭磊(1991-),男,硕士研究生,研究方向为无缝线路的稳定性、无缝线路应力检测、无损检测。E-mail:nxzwgl@163.com

通信作者:祁欣(1952-),男,博士,教授,研究方向为无损检测、无缝线路。E-mail:qixin@mail.buct.edu.cn

郭磊,雷鸣,祁欣.基于 DSTFT 的无缝线路稳定性分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(1):46-51.

导致钢轨各点处温度压力出现波动,因此,CWR 稳定性检测的主要任务是考察 CWR 上各点处应力的的大小、整体 CWR 中应力的波动情况以及应力波动的具体位置。针对以上问题,本文引入 DSTFT 思想,以钢轨的纵向作为时间轴,通过在钢轨纵向上添加适当的窗函数把整体钢轨中的应力信号 σ 划分为若干小段,并通过平移窗函数覆盖全局应力信号。最终得到应力信号随钢轨长度变化的幅值和频率值的分布图,它能够反映应力信号的频率成分随长度变化的规律。因此在钢轨上 n 点处的应力 $\sigma(n)$ 的 DSTFT 定义为^[7]

$$DSTFT(n, f) = \sum_{\tau=0}^{L-1} \sigma(nR + \tau) H(\tau) e^{2\pi j f \tau / L} \quad (1)$$

式中, n 表示分帧序列号,相当于应力检测过程中钢轨上采样点的标号; f 表示采样频率; R 为帧移长度,相当于采样点间距; $H(\tau)$ 是窗函数,窗函数的宽度由 L 表示,这里我们选用 Hamming 窗^[8]。通过改变 DSTFT 中窗函数的宽度可以动态调整时频谱的分辨率,但受 Heisenberg 不确定准则的限制^[9], DSTFT 的窗函数面积不能小于 2。

通过对实测应力信号进行 DSTFT,能够绘制出钢轨中应力信号随钢轨长度变化的频谱分布图,对该频谱图进行分析能够初步定性地评估 CWR 的稳定状态。为定量地评估 CWR 的稳定性,本文定义了 CWR 的稳定性评估条件

$$SEC = \sum_{m=1}^N F_m^2 \cdot V_m \quad (2)$$

式中, N 表示选取的幅度峰的个数; F_m 为 DSTFT 频谱的第 m 个应力幅度峰的幅值,它是 CWR 稳定性评估的第一参数; V_m 是 DSTFT 频谱中与幅值相对应的频率值,是 CWR 稳定性评估的第二参数。根据以上定义, SEC 的值越小, CWR 的稳定性越好。

2 钢轨应力的检测

2.1 钢轨应力检测装置

检测应力的设备是自制的 CWR 应力检测系统,该系统基于巴克豪森(BN)原理^[10]开发,通过外加激励磁场对 CWR 钢轨进行局部交流磁化,致使钢轨内部磁畴壁发生位错,磁畴磁矩发生转动,从而释放 BN 信号。由于 BN 信号特征值会随应力的变化而变化,因此,通过接收 BN 信号并利用电子技术对 BN 信号进行处理,最终实现了对 CWR 应力的无损定量检测。整个 BN 应力检测系统的结构如图 1 所示。

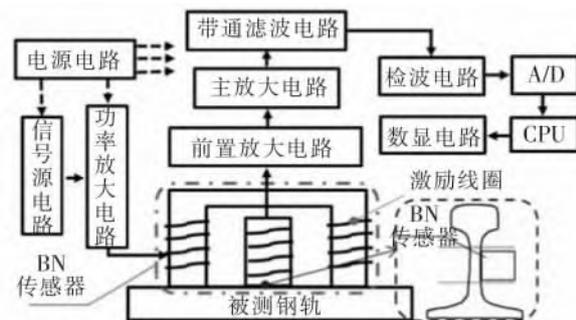


图 1 CWR 应力检测系统结构图

检测系统主要包括电源、BN 传感器、功率放大电路、带通滤波电路、A/D、CPU 以及数显模块等部分。信号源电路和功率放大电路产生交流信号,作用于励磁线圈产生外加交流磁场,对钢轨进行局部交流磁化。BN 传感器将接收到的 BN 信号转换为电信号,经前置放大器和主放大器放大后送入带通滤波电路,以抑制噪声信号对真实信号的影响。检波电路用于对信号的相位和幅值等特征进行矫正,A/D 用于将模拟信号转换为离散的数字信号,并送入 CPU 进行处理。本系统采用 MSP430 单片机作为系统的计算控制中心,它负责信号的处理、运算、存储和显示。此外系统还配备 RS232 串口,能够将检测的实验数据输入计算机以便进一步处理。

2.2 测量精度的标定

自制应力检测系统采用支持向量机(SVM)非线性回归算法^[11]进行标定。建立 BN 信号特征值随应力 σ 变化的非线性函数关系

$$\sigma(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K(x, x_i) + b \quad (3)$$

式中, $\sigma(x)$ 是测试对象的应力值训练样本; x 是 BN 信号特征值训练样本; n 是训练样本的数量; α 表示拉格朗日算子; b 是决策函数的参数; K 为核函数。训练样本由材料试验机对测试对象进行拉、压实验获得, 实验装置如图 2 所示。

为了保证标定结果的可靠性, 本文截取了一段钢轨作为测试对象, 分别对其施加拉、压应力, 应力范围控制在 ± 200 MPa, 其中“—”表示拉应力, “+”表示压应力。BN 传感器用于记录 BN 信号的特征值, 温控装置可以根据需要调节测试环境的温度, 并保证实验装置在测试过程中始终处于恒温状态。取 500 组拉、压应力实验数据, 经过 SVM 算法训练后得到 BN 特征值与应力值之间的标定关系。用自制应力检测系统测得的应力值与训练结果进行比较, 结果表明, 自制的应力检测系统在使用中的实际误差小于 $\pm 3\%$ 。

2.3 无缝线路应力的测量方法

选择北京丰台区某 CWR 作为试验对象, 该线路的钢轨规格为 U75 V 型 60 kg/m 钢轨, 钢轨横截面积 $A=77.45 \text{ cm}^2$ 。测量区段总长度设定为 1 100 m, 其中两端的伸缩区长度都是 100 m, 固定区长度为 900 m。开始测量前, 需要对测量位置进行定点标注。由于一般情况下钢轨在邻近区域的应力变化不会很大, 因此为提高实验效率, 本文将测量点间距设置为 20 m。选择当天温度最高的时间段测量, 首先利用高精度电子温度计记录钢轨的实际温度。然后将自制应力检测系统的传感器放置在各测量点的轨腰部位, 钢轨将会被传感器磁化并释放 BN 信号, 被 BN 传感器接收, 这样就实现了钢轨应力的定点定量检测。需要注意的是, 该方法测得的应力值包括了钢轨的残余应力和温度应力。

3 CWR 稳定性的检测评估

为了研究钢轨中应力大小和应力波动对 CWR 稳定性的影响, 应选取两段在相同运营环境中并行的 CWR, 并在同一轨温下对这两段 CWR 的固定区进行应力检测, 检测过程中始终保持两段 CWR 的采样点一一对应。实际检测时的轨温为 $45 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, 以应力测量点的位置为横坐标, 所对应的应力值为纵坐标建立直角坐标系, 得到两段钢轨在各测量点处的应力分布图如图 3 和图 4 所示。

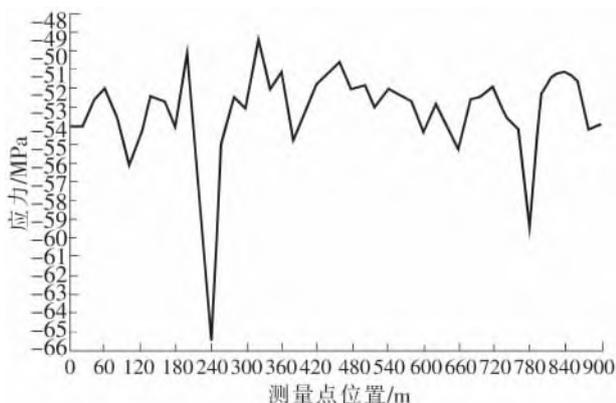


图 3 轨温 $45 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 时第一段钢轨固定区应力数据

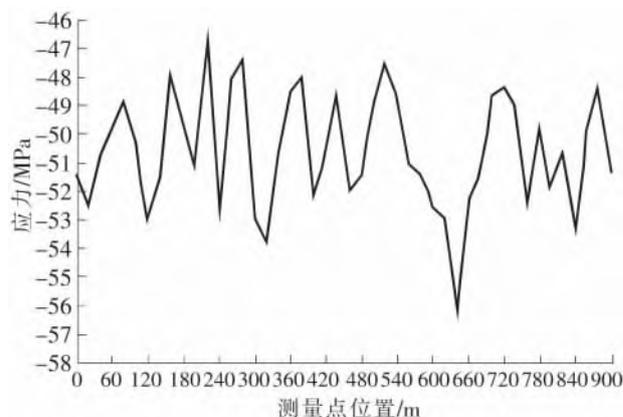


图 4 轨温 $45 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 时第二段钢轨固定区应力数据

从图 3 和图 4 可以看出, 两段 CWR 的应力主要在 $-49 \sim -56$ MPa (这里“—”表示压应力) 范围内波动。然而, 仅从表中列出的应力数据很难对两段 CWR 的稳定性进行分析, 为此, 利用 DSTFT 算法分别对图 3 和图 4 中的实验数据进行分析。首先, 需要对应力值进行归一化处理, 即以平均应力值为基准, 计

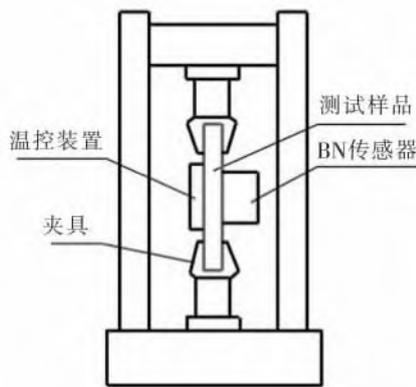


图 2 拉、压实验装置示意图

算各测量点的应力值相对于基准的偏离程度,偏离程度越大即表明此处的应力波动越剧烈。将经过归一化处理的应力值输入 DSTFT 工具箱,绘制出两段 CWR 的三维频谱分布图,如图 5 所示。

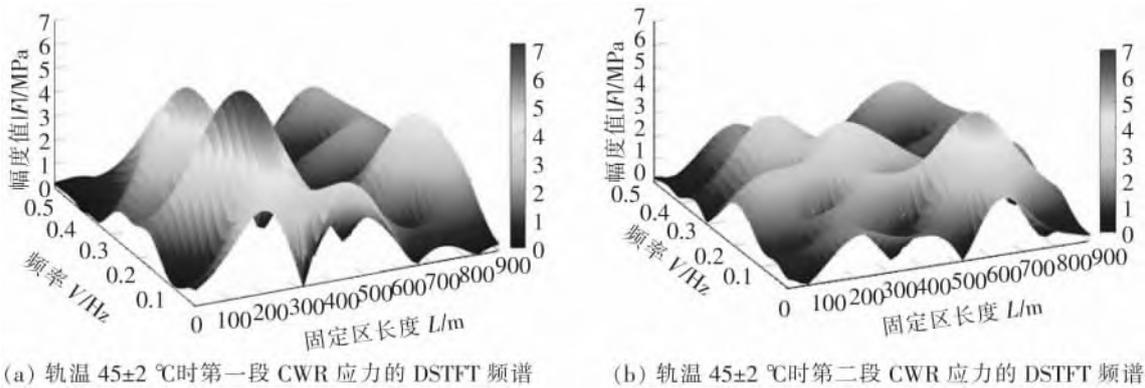


图 5 三维频谱分布

频谱分布图中幅度值的大小直接反映了钢轨中累积的能量(内能)的高低,而能量越高的物体其结构稳定性越差^[12]。从图 5(a)可以看出,第一段 CWR 在固定区 240 m 附近区域出现了最大应力峰,其峰值为 6.95 MPa,所对应的频率值为 0.14 Hz,并且在频率为 0.29 Hz 附近出现了次高峰,峰值为 5.60 MPa;在固定区 800 m 附近区域还分布着一个小高峰,其幅值和频率分别是 4.33 MPa 和 0.15 Hz;并且,在固定区其他区域还分布着一些更小的峰。同样,从图 5(b)可以看到第二段 CWR 在固定区 640 m 附近区域出现了最高应力幅度峰,其峰值和频率分别为 5.25 MPa 和 0.10 Hz;并且,在固定区 360 和 240 m 附近区域分布着两个次高峰。

两段 CWR 的幅度峰的数量、位置、幅度值和频率值各不相同,这表明在相同运营环境中并行的两段 CWR,即使铺设在同一道床上,其应力波动也不存在严格的对应关系,它们具有相对独立的稳定性。

为了对这两段 CWR 的稳定性进行定量评估,分别取图 5(a)和图 5(b)中最高前 3 个幅度峰的幅值以及对应的频率值,如表 1 所示。

表 1 DSTFT 频谱前 3 个幅度峰数据

幅度峰编号	第一段 CWR($45\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$)		第二段 CWR($45\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$)	
	$ F $	V	$ F $	V
1	6.95	0.14	5.25	0.10
2	5.60	0.29	4.01	0.25
3	4.33	0.15	3.57	0.35

将表 1 中的数据代入 CWR 稳定性评估条件(式(2))得

$$\text{第一段 CWR } SEC_1^{45\text{ }^{\circ}\text{C}} = 18.67;$$

$$\text{第二段 CWR } SEC_2^{45\text{ }^{\circ}\text{C}} = 11.24。$$

从以上结果可以看出,第二段 CWR 的值要比第一段小很多,这表明第一段 CWR 的应力波动要比第二段 CWR 更加剧烈,且钢轨中累积的能量也更高。可见 CWR 的稳定性可以通过钢轨中应力的 DSTFT 频谱图反映,图中包含的应力的幅值和频率信息对 CWR 稳定性的评估起到了决定性作用。

为了研究温度对 CWR 稳定性的影响,选取上述实验中稳定性相对较差的第一段 CWR 作为研究对象,并保证试验方法和实验环境不变。当轨温降至 $35\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开始检测钢轨中的应力。并对检测数据绘制 DSTFT 频谱图,如图 6 所示。

从图 6 可以看到,当轨温降至 $35\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在固定区 240 m 附近同样出现了一个最高应力幅度峰和一个次高峰,它们的幅值分别是 5.56 和 4.83 MPa,相应的频率值分别是 0.14 和 0.29 Hz;在固定区 800 m 附近也同样出现了一个小高峰,其幅值和频率分别为 3.96 MPa 和 0.16 Hz;同时,在其他区域同样还分布着一些更小的峰。与图 5(a)相比,轨温为 $35\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时同一 CWR 的 DSTFT 频谱图中幅度峰的位置

和相应的频率基本未发生变化,而幅值则发生了较大变化,45±2℃时幅度峰的幅值明显大于35±2℃。这表明温度对钢轨中的应力大小的影响非常大,但对应力的分布和波动影响甚微。取图6中前3个幅度峰的幅值和对应的频率,代入式(2)得出不同温度下同一段CWR的值为

$$SEC_1^{35^\circ\text{C}} = 13.60;$$

$$SEC_1^{45^\circ\text{C}} = 18.67.$$

可以看出,对同一段CWR,轨温为35±2℃时的SEC值明显小于45±2℃,说明35±2℃时CWR的稳定性优于45±2℃。这表明温度对CWR的稳定性影响很大,轨温过高或过低都会降低CWR的稳定性。

4 结论

(1)基于DSTFT思想提出了一种新的CWR稳定性分析方法,并建立了CWR稳定性评估条件,实现了对CWR稳定性的定量检测和评估。

(2)利用该方法对北京丰台区某CWR进行试验,结果表明:当轨温相同时,相同运营环境中并行的两条CWR的应力大小和波动不存在严格的对应关系,其稳定性是相对独立的。

(3)利用该方法对不同温度下,同一CWR的稳定性进行研究,结果表明温度的变化能够极大地影响钢轨中应力的积累程度,但对应力的波动状态和应力集中区的分布影响很小。

参 考 文 献

- [1]詹刚,许玉德,周宇.重载铁路曲线钢轨型面的发展规律分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2012,25(4):72-76.
- [2]陈秀芳.关于《统一无缝线路稳定性计算公式》中原始弯曲的探讨[J].长沙铁道学院学报,1980(1):49-57.
- [3]Lim N-H, Park N-H, Kang Y-J. Stability of continuous welded rail track[J]. Computers & Structures, 2003, 81(22/23): 2219-2236.
- [4]Choi D-H, Na H-S. Parametric Study of Thermal Stability on Continuous Welded Rail[J]. IJR International Journal of Railway, 2010, 3: 126-133.
- [5]Carvalho J, Delgado J, Cal ada R, et al. A new methodology for evaluating the safe temperature in continuous welded rail tracks[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2013, 13(2): 1350016.
- [6]杨瑞娟.无缝线路温度应力危害及其放散方法[J].黑龙江科技信息,2016(1):230.
- [7]Chikkerur S, Cartwright A N, Govindaraju V. Fingerprint enhancement using STFT analysis[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(1): 198-211.
- [8]Kumar S, Singh K, Saxena R. Analysis of Dirichlet and Generalized "Hamming" window functions in the fractional Fourier transform domains[J]. Signal Processing, 2011, 91(3): 600-606.
- [9]Guanlei X, Xiaotong W, Xiaogang X. The logarithmic, Heisenberg's and short-time uncertainty principles associated with fractional Fourier transform[J]. Signal Processing, 2009, 89(3): 339-343.
- [10]Wang P, Ji X, Yan X, et al. Investigation of temperature effect of stress detection based on Barkhausen noise[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 194(0): 232-239.
- [11]赵世英,李延强.基于粒子群优化支持向量机的斜拉桥主梁损伤识别研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(1):17-21.
- [12]苏万春,刘廷平.温度、内能、熵与热力学定律[J].电子科技大学学报,1997(S1):257-260.

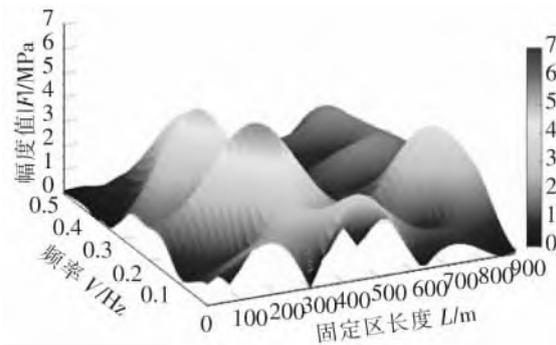


图6 轨温35±2℃时第一段CWR应力的DSTFT频谱

Research on Stability of Continuous Welded Rail Based on DSTFT

Guo Lei, Lei Ming, Qi Xin

(School of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: On the basis of the Discrete Short Time Fourier Transform (DSTFT) thoughts, a new method has been proposed to analyze the stability of continuous welded rail (CWR). In this approach, the DSTFT algorithm is utilized to calculate the stress that is measured at each sampling point in longitudinal direction of rail. Then the three-dimensional distribution maps of amplitude and frequency of stress for each sampling point of rail are plotted. And through the study of distribution maps, the stability evaluation condition of CWR is derived to quantitatively analyze the stability of CWR. The results prove that the method is accurate and reliable after much experimentation conducted to CWRs located at Fengtai District in Beijing.

Key words: continuous welded rail; the discrete short time fourier transform; stability assessment; non-destructive testing

(上接第 35 页)

[14]姚谦峰,陈平. 土木工程结构试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[15]Mao C S, Ricles J, Lu L W, et al. Effect of local details on ductility of welded moment connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 127(9): 1036-1044.

[16]王薇. 钢框架板式加强型焊接节点的断裂性能分析[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.

[17]王纪斌. 空间钢框架在循环荷载作用下的受力性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.

[18]王秀丽, 沈世钊, 殷占忠, 等. 钢框架梁腹板开孔型连接节点力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(6): 65-76.

[19]喻岩, 段树金, 张裕. 榫卯式连接钢框架节点承载力性能研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2015, 28(1): 1-5.

Study on Seismic Performance of Space Steel Frames with Opening on Beam Webs Section Connections Under Low-Cyclic Loading

Shi Dan, Meng Chunhui

(School of Civil and Architecture Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to compare the seismic performance of the conventional connection steel frames and the opening on beam webs section connection steel frames, three-dimensional finite element models of steel frames with two types of connections under low-cyclic loading are established utilizing ABAQUS software. Main properties including failure mode, ultimate bearing capacity, hysteretic behavior, energy dissipation capacity, strength and stiffness degradation are evaluated on steel frames with these two types of connections. Analysis results show that the opening on beam webs joint can let the plastic hinge away from the welded connection of beam-column and avoid welded connection brittle fracture induced by the tie-beam stress connection. The equivalent viscous damping ratio of the opening on beam webs joint steel frame is obviously greater than the common joint steel frame, and when the steel frames enters the yield stage, the stiffness and bearing degradation of the reduced joint steel frame is more slower for the stress redistribution. The opening on beam webs joints steel frame has a clear and ductile beam-hinge failure mechanism. The research contents can provide reference for the application and theoretical analysis of space steel frame with the reduced beam connections.

Key words: opening on beam webs; space steel frame; ABAQUS; relocation of the plastic hinge; hysteretic behavior; seismic performance