



·脉冲功率技术·

32 级模块化 Marx 发生器机芯模态分析*

王海洋^{1,2}, 肖晶^{1,2}, 谢霖桑^{1,2}, 吴伟^{1,2}, 程乐^{1,2}, 何小平^{1,2}, 孙楚昱^{1,2}

(1. 西北核技术研究所, 西安 710024; 2. 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

摘 要: 模态分析可以获得结构的动特性参数。对 32 级模块化 Marx 发生器机芯进行了力学特性仿真分析和模态试验, 用以评估 Marx 发生器的力学环境适应性。首先, 建立了模块化 Marx 机芯的有限元模型, 获得了初步振型; 其次, 在自由边界条件下分别开展了 Marx 机芯整体模态试验、局部模态试验和传递特性试验, 得到了整体和局部结构的模态参数。研究表明, 模块化 Marx 机芯在 23.58 Hz 处出现整体一阶扭转; 机芯局部结构固有频率较高; 机芯在 x, y, z 三个方向的振动传递率的范围分别为 5~15, 6~10 和 10~35, 为后续工程中 Marx 发生器机芯的针对性设计提供了参考。

关键词: Marx 发生器; 随机振动; 有限元分析; 振动冲击; 模态分析

中图分类号: TM832; TH122

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210054

Modal analysis of the 32-stage modular Marx generator

Wang Haiyang^{1,2}, Xiao Jing^{1,2}, Xie Linshen^{1,2}, Wu Wei^{1,2}, Cheng Le^{1,2}, He Xiaoping^{1,2}, Sun Chuyu^{1,2}

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Xi'an 710024, China)

Abstract: The dynamic characteristic parameters of the Marx generator can be obtained by modal analysis. In this paper, the simulation analysis and modal experiment of the 32-stage modular Marx generator are conducted to evaluate its mechanical environment adaptability. Firstly, the finite element simulation model of the modular Marx generator is constructed, and the initial vibration modes are acquired. Secondly, under free boundary condition, the integral modal experiment, local modal experiment and transfer characteristic experiment are conducted respectively. In the end, the integral and local modal parameters are calculated. Results show that the 32-stage modular Marx generator has a first-order torsion at 23.58 Hz; the inherent frequency of local structure of the Marx generator is relatively high; the vibration transmissibility scopes on x, y and z axis are respectively 5–15, 6–10 and 10–35. These conclusions provide reference to design Marx generator in later engineering phase.

Key words: Marx generator; random vibration; finite element analysis; vibration and shock; modal analysis

Marx 发生器在高电压装置触发、电磁脉冲模拟和绝缘冲击耐压试验等领域有广泛应用^[1-2], 发展环境适应性好的 Marx 发生器是当前研究的一个重要方向^[3-4]。模块化设计的紧凑型 Marx 发生器更易安装维护, 便于运输, 也将大大降低大型电磁脉冲模拟装置架设的难度。Marx 发生器的基本工作原理是多个并联充电的电容器通过一系列开关导通而串联起来对负载放电, 形成高压输出^[5-6], 一般由电阻、脉冲电容器、高压气体开关、绝缘支撑结构以及高压直流充电电源、控制单元等系统组成^[7]。输出电压越高, 所需 Marx 发生器的级数越多, 结构也越复杂。在公路运输振动环境下, 可能会出现支撑结构紧固件松动、电气接触不良或电气短路、密封失效、结构裂纹或断裂等问题, 影响 Marx 发生器的可靠性。目前, Marx 结构设计主要考虑电气绝缘性能的要求^[8]及静力学特性^[9], 专门研究 Marx 发生器对振动和冲击适应性的文献相对较少。本文对 32 级模块化 Marx 发生器机芯进行模态分析, 通过模态计算和试验获取发生器机芯在自由状态下的结构动特性参数, 发现薄弱环节, 为 Marx 机芯动力学特性分析和结构设计修正提供了参考。

* 收稿日期: 2021-02-22; 修订日期: 2021-08-02

作者简介: 王海洋(1979—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事脉冲功率技术研究。

1 模态分析理论

模态参数主要包括系统的固有频率、模态阻尼比和模态振型,反映了结构本身固有的力学特性,是谱分析、瞬态响应分析的基础^[10]。在结构设计中,固有频率应该避开主要激励频率以防共振引起结构损伤;模态阻尼是某一模态下结构的阻尼,不同模态的模态阻尼不同,主要影响结构振动的衰减。阻尼比是模态阻尼和临界阻尼之比,反映了结构受激振后的衰减形式。模态振型描述某一模态下结构的运动形式,揭示了该模态下节点的运动情况。从试验角度看,模态分析是一个参数辨识问题,此时系统被视为带参数的物理模型,通过模态试验测量系统的输入和输出得到频响函数,再利用相关信号处理技术对频响函数进行参数辨识,从而得到系统的模态参数^[11]。因此,频响函数是模态试验分析参数识别的基础,以下为频响函数的求取方法。

线性时不变系统运动微分方程^[12-13]

$$[M]\ddot{U}(t) + [C]\dot{U}(t) + [K]U(t) = F(t) \quad (1)$$

式中: $[M]$ 为系统的质量矩阵; $[C]$ 为系统阻尼矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $U(t)$, $\dot{U}(t)$, $\ddot{U}(t)$ 分别为系统在物理坐标系下的位移矩阵、速度矩阵和加速度矩阵; $F(t)$ 为系统受到的外力。

对式(1)进行拉氏变换,并整理可得

$$(K - \omega^2 M + j\omega C)X(s) = F(\omega) \quad (2)$$

对于线性时不变系统,可用各阶模态的线性组合来表示响应点的位移,即第 l 个响应点的第 r 阶模态的振型响应为

$$\{x_l(\omega)\} = \varphi_{l1}q_1(\omega) + \varphi_{l2}q_2(\omega) + \dots + \varphi_{lN}q_N(\omega) = \sum_{r=1}^N \varphi_{lr}q_r(\omega) \quad (3)$$

式中: $\{q_l(\omega)\} = [q_1(\omega)q_2(\omega)\dots q_N(\omega)]$ 为 l 点对应的模态空间的坐标。用模态空间量替换式(2)中的物理空间量,可得第 r 阶模态的空间坐标为

$$\{q_r\} = \frac{F_r}{K_r - \omega^2 M_r + j\omega C_r} \quad (4)$$

若系统只在 p 点施加激励,则模态力为

$$F_r = \varphi_{pr}f_p(\omega) \quad (5)$$

将式(4)、式(5)代入式(3)可得

$$\{x_l(\omega)\} = \sum_{r=1}^N \frac{\varphi_{lr}\varphi_{pr}f_p(\omega)}{K_r - \omega^2 M_r + j\omega C_r} \quad (6)$$

解得响应点 l 与激励点 p 间的频响函数为

$$H_{lp}(\omega) = \frac{x_l(\omega)}{f_p(\omega)} = \sum_{r=1}^N \frac{\varphi_{lr}\varphi_{pr}}{K_r - \omega^2 M_r + j\omega C_r} \quad (7)$$

2 32级 Marx 发生器机芯自由模态仿真分析

图1、图2分别给出了32级模块化 Marx 发生器机芯和单级模块的结构示意图。每个单级模块包含2个脉冲电容器、1个三电极畸变火花开关、2个单级隔离板、电阻及连接件。其中,电容和开关通过单级隔离板夹在中

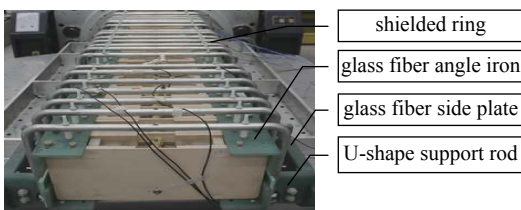


Fig. 1 32-stage Marx generator
图1 32级 Marx 发生器机芯

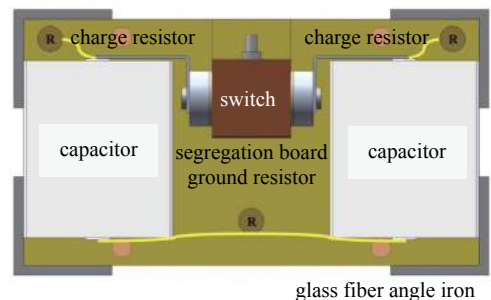


Fig. 2 Structure of one stage module
图2 单级模块结构示意图

间,依靠外侧连接件实现电容和开关的限位。每8个单级模块通过4个“L”型玻璃钢角钢固定为一组。每组模块通过2个U型玻璃钢支撑杆与玻璃钢侧板连接,并保持电路气路联通。2块平行的玻璃钢侧板通过4个均布的玻璃钢横柱连接。每组模块四周安装屏蔽环以控制电晕的产生。整个机芯件长、宽、高分别约为3, 1.1, 0.5 m。

首先,利用 Patran/Nastran 软件建立 32 级 Marx 发生器机芯的有限元模型。其中,Marx 机芯整体结构采用梁-壳-实体单元建模,用壳单元对玻璃钢角钢、单级隔离板和玻璃钢侧板等部件进行模拟;用梁单元对 U 型支撑杆、玻璃钢横柱、屏蔽环等进行模拟;开关、电阻等采用集中质量模拟;电容采用实体单元模拟。在玻璃钢侧板与 U 型支撑杆之间、U 型支撑杆与玻璃钢角钢之间、单级隔离板之间、隔离板与玻璃钢角钢之间、开关/电容与连接件之间建立连接模型。电容与隔离板之间绑定连接,用于引入电容对整体结构刚度的影响。阻尼比参考前期摸底试验取 1.5%。主要材料的参数如表 1 所示。

表 1 材料参数
Table 1 Parameters of the materials

material	Young modulus/GPa	Poisson's ratio	density/(kg·m ⁻³)
stainless steel	190	0.33	8000
glass fiber	37.2	0.25	2440
MC nylon	31.9	0.40	1150

对 Marx 发生器机芯进行模态仿真分析,图 3 分别给出了发生器机芯的整体振型、开关连接件局部振型,以及上部结构在纵向和垂向的整体振型,分别对应仿真结果的第 3, 7, 45, 56 阶振型。由图 3 可以看出,Marx 机芯在 19.1 Hz 处发生整体一阶扭转。当频率为 32.2 Hz 时各级开关连接件出现了局部振动;频率为 39.4 Hz 和 54.1 Hz 时,机芯整体分别出现了纵向和垂向的振动。

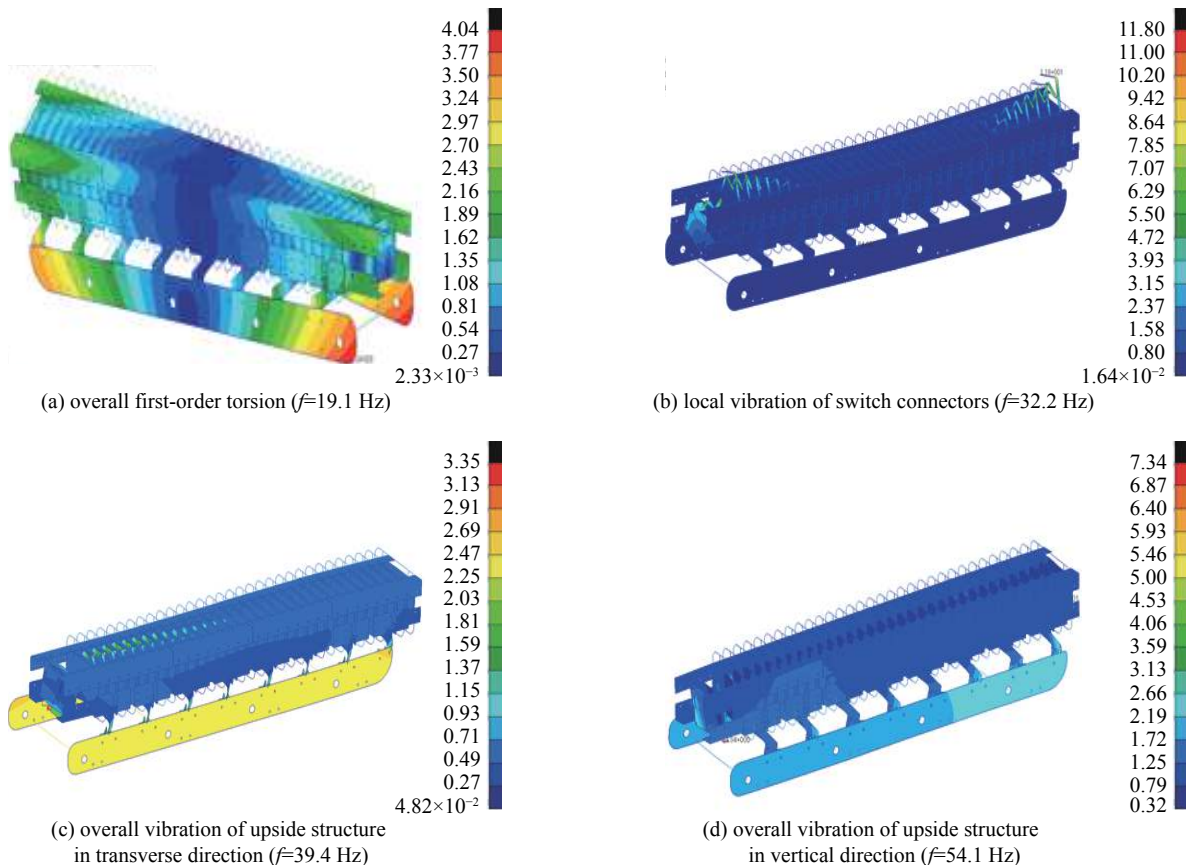


Fig. 3 Modal analysis results of the 32-stage Marx generator

图 3 32 级 Marx 发生器机芯的模态分析结果

由于公路运输振动属于随机宽带低频振动,环境较为复杂^[14]。依据 GJB3XX 规定的运输环境,垂向、横向、纵向 3 个方向在 19.1 Hz 附近的加速度谱密度极值分别为 4.00, 0.15, 0.08 $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-4}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。垂向方向上,固有频率对应的加

速度谱密度极值分别是横向和纵向的 27 倍和 50 倍左右,长距离运输振动可能会对机芯造成疲劳损伤,影响发生器的性能。

3 32 级 Marx 发生器机芯模态试验

考虑到有限元分析存在模型误差、材料属性误差、网格密度误差等^[15],这都将导致模态分析结果出现偏差。因此,本节对 Marx 发生器进行实际模态试验,以得到较为准确的模态参数,为进一步模型修正提供指导。

3.1 模态试验系统

实际模态试验系统主要包括 LMS Test.Lab 试验系统^[16]、激振器和 ICP 型加速度传感器,其中由 LMS Test.Lab 模态试验系统进行加速度数据的采集和模态参数识别。试验时,通过吊带、橡皮绳和吊装置将 Marx 机芯整体吊起至距地面 100~200 mm 的高度以模拟自由边界。采用脉冲激励的模态试验法,通过力锤敲击 Marx 机芯产生脉冲激励,同时用加速度传感器测量机芯的响应,再经过谱分析和参数识别得到最终的模态参数。

3.2 自由边界整体模态试验

以 8 个单级模块为 1 组,从机芯触发器端到输出端共分为 4 组,分别记作第一、第二、第三、第四组,在 Marx 机芯上均匀布置 40 个测点,每个测点测量 3 个方向。整体模态激振点位于玻璃钢侧板端部,分别在横向(x 向)、垂向(y 向)和纵向(z 向)进行敲击测试,每个敲击状态进行 8 次平均,分析带宽为 256 Hz,频率分辨率为 0.125 Hz。表 2 和图 4 给出了自由边界条件下 32 级 Marx 机芯整体模态的试验结果和振型。

表 2 自由边界整体模态试验结果

Table 2 Integral modal analysis results under free boundary condition

frequency/Hz	damping ratio/%	mode of vibration
23.58	1.50	overall first-order torsion
30.76	1.31	overall first-order bend in y direction
34.33	0.99	overall first-order bend in z direction
48.76	0.98	approximate second-order bend in z direction
63.31	0.92	overall second-order torsion
70.93	1.40	the phase of glass fiber side plate in x direction is opposite
75.14	1.91	overall second-order bend in z direction

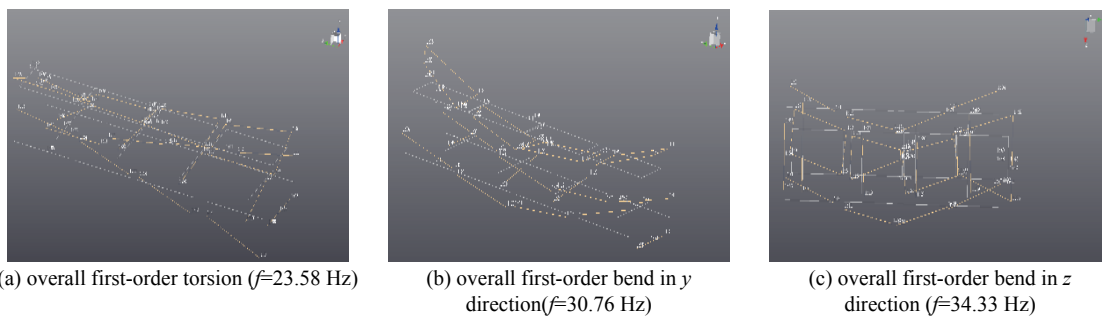


Fig. 4 Vibration mode of integral modal analysis under free boundary condition

图 4 自由边界整体模态试验振型

可以看出,模态试验中整体结构在 23.58 Hz 处出现一阶扭转,对应的阻尼比为 1.5%,与模态仿真分析得到的整体一阶扭转频率对应较好。但是,其他试验模态与仿真模态差异较大,主要原因是仿真模型与模态试验的机芯有差异,包括模态试验 Marx 机芯屏蔽环直径小于仿真模型的屏蔽环;电容、开关及其连接形式建模与真实器件有区别。因此,后续工作需要依据模态试验结果对仿真模型进行修正。

3.3 自由边界局部模态试验

分别在屏蔽环、电容与开关连接件、电容、U 型玻璃钢支撑杆,以及一侧玻璃钢侧板靠近机芯支撑角的安装处进行敲击,以获取自由边界条件下屏蔽环、单级模块和 U 型玻璃钢支撑杆处的频响,得到各部件频响峰值对应的频率值,其他试验条件保持不变。局部模态试验结果如表 3 所示。

局部模态试验结果表明局部结构频率均较高。第三组、第四组模块屏蔽环上的振动频率差异较大,现场检查

表 3 自由边界局部模态试验结果

Table 3 Local modal test results under free boundary condition

frequency/Hz	corresponding part
100.6, 151.3	upper shielded ring at the outermost of the 4th module
129.4, 188.7	upper shielded ring at the outermost of the 3rd module
59.28, 206.3	capacitor and switch of the 4th module
58.59, 219.8	capacitor and switch of the 3rd module
124.9, 225.8	U-shape support rod of the 1st module

发现,屏蔽环安装时螺栓的预紧力差异较大。对此,可以通过规定螺栓预紧力、增加紧固连接件的加工一致性等保证 Marx 机芯各位置连接刚度的一致性。

3.4 自由边界传递特性试验

从机芯底部到上部选择一条振动传递路径设置一组测点,分别对 U 型玻璃钢支撑杆、玻璃钢支撑杆与机芯角钢的固定角片和机芯角钢的传递率进行分析。力锤敲击位置位于玻璃钢侧支撑板上。振动传递率为系统在振动过程中的响应幅值与激励幅值之比,传递率越小,结构对振动的抑制效果就越好。参考该定义,图 5~图 7 给出了 3 个方向传递路径上各位置相对玻璃钢侧支撑板响应的振动传递率。

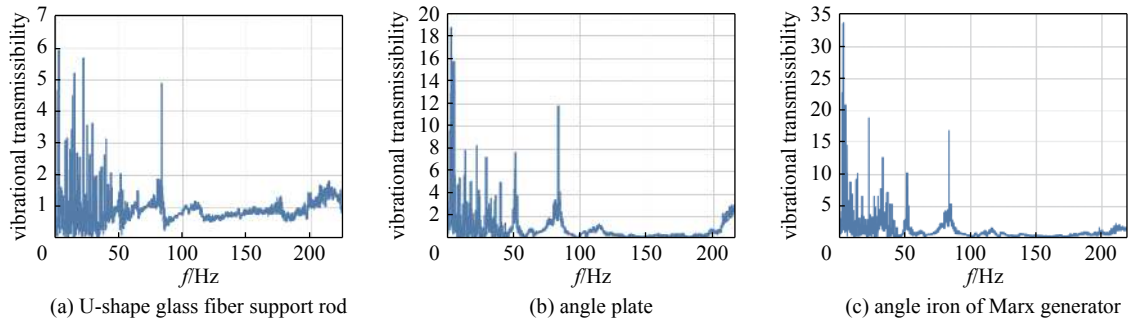


Fig. 5 Vibrational transmissibility on x axis

图 5 x 方向上的振动传递率

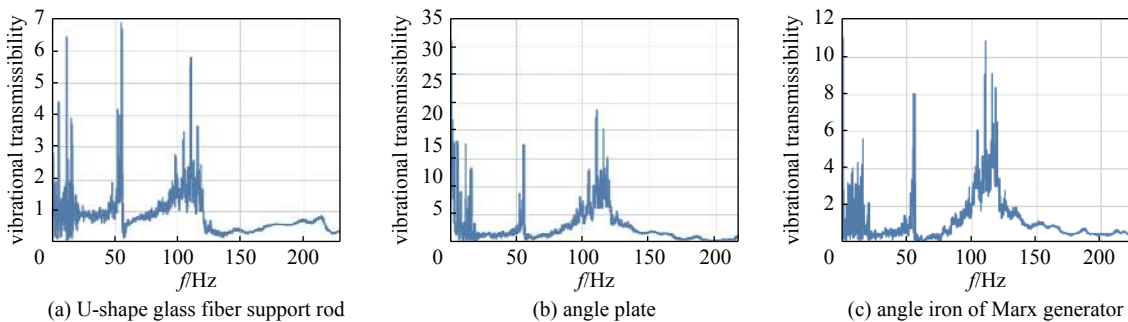


Fig. 6 Vibrational transmissibility on y axis

图 6 y 方向上的振动传递率

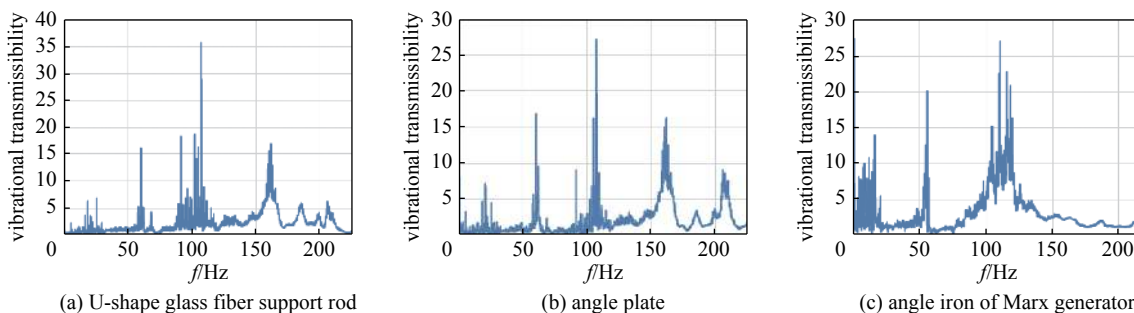


Fig. 7 Vibrational transmissibility on z axis

图 7 z 方向上的振动传递率

从传递特性试验结果看, x 向(横向)在 60~80 Hz 范围内传递有所放大, 传递率在 5~15 之间; y 向(垂向)在 50~60, 110~120 Hz 范围内有传递放大, 传递率在 6~10 之间; z 向(纵向)在 50~60, 110~120 Hz 及更高频率范围内有传递放大, 传递率在 10~35 之间。考虑到模态激励量级很小, 结构的非线性特征没有被激发, 依据以往实际振动台的试验结果, 振动试验中的传递率还会有较大幅度下降。

4 结 论

本文对 32 级 Marx 发生器机芯进行了模态分析和试验, 获得了机芯固有频率、模态阻尼比、固有振型等模态参数。试验结果为: (1) 机芯整体在 23.58 Hz 处出现一阶扭转, 对应的阻尼比为 1.5%, 为长时间运输的加固减震设计提供了依据; (2) 屏蔽环、U 型玻璃钢支撑杆局部结构频率较高, 为避免振动中出现螺栓松动或脱落, 可通过规定螺栓预紧力、增加紧固连接件加工的一致性来保证 Marx 机芯各位置连接刚度的一致性; (3) 纵向方向上 Marx 发生器机芯传递率较大, 是结构设计的薄弱环节, 运输振动时需重点关注纵向的稳定性和可靠性。此外, 利用模态试验结果可以对有限元仿真模型进行进一步修正, 为后续谱分析、瞬态响应分析提供必要条件。

参考文献:

- [1] 邓明海, 曹宁翔, 马成刚, 等. 200 kV 重复频率 Marx 发生器研制[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 055003. (Deng Minghai, Cao Ningxiang, Ma Chenggang, et al. Development of 200 kV repetitive Marx generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 055003)
- [2] Redjimi A, Nikolić Z, Knežević D, et al. Post-processing synchronization and characterization of generated signals by a repetitive Marx generator[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2018, 50: 352.
- [3] Elgedy M A, Massoud A M, Ahmed S, et al. A modular multilevel voltage-boosting Marx pulse-waveform generator for electroporation applications[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(11): 10575-10589.
- [4] 宋法伦, 李飞, 龚海涛, 等. 高功率重复频率 Marx 型脉冲功率源小型化技术研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 020201. (Song Falun, Li Fei, Gong Haitao, et al. Research progress on miniaturization of high power repetition frequency Marx type pulse power source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 020201)
- [5] 贾伟, 陈志强, 郭帆, 等. 典型布局 Marx 发生器内部过压形成与分布[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(10): 110-115. (Jia Wei, Chen Zhiqiang, Guo Fan, et al. Formation mechanism and distribution of internal overvoltage of Marx generator with typical layouts[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 46(10): 110-115)
- [6] 张永民, 陈维青, 杨莉, 等. 储能型 Marx 发生器的串联电感计算[J]. *高电压技术*, 2009, 35(3): 651-656. (Zhang Yongmin, Chen Weiqing, Yang Li, et al. Inductance calculation of storage Marx generator[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(3): 651-656)
- [7] Nasab J N, Hadizade A, Mohsenzade S, et al. A Marx-based generator with adjustable FWHM using a controllable magnetic switch[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, 26(2): 324-331.
- [8] 王翔宇, 樊亚军, 乔汉青, 等. 全同轴型 Marx 发生器的研制与场路协同仿真[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 115001. (Wang Xiangyu, Fan Yajun, Qiao Hanqing, et al. Design of a coaxial Marx generator and field-circuit co-simulation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 115001)
- [9] 刘锐, 曾乃工, 王新新. 1.2 MV 全封闭 Marx 发生器的绝缘结构设计[J]. *高电压技术*, 2005, 31(4): 69-70. (Liu Rui, Zeng Naigong, Wang Xinxin. Insulation design for a 1.2 MV enclosed Marx generator[J]. *High Voltage Engineering*, 2005, 31(4): 69-70)
- [10] 高炳军, 王滨, 翟兰惠, 等. 吊带支撑低温储罐运输中随机振动分析[J]. *河北工业大学学报*, 2018, 47(1): 48-52, 58. (Gao Bingjun, Wang Bin, Zhai Lanhui, et al. Random vibration analysis of the strip-supported-cryogenic storage tank in transporting[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2018, 47(1): 48-52, 58)
- [11] 瞿金秀, 石长全, 王磊超, 等. 不同老化状态黏弹夹层结构的模态分析[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(11): 69-75. (Qu Jinxiu, Shi Changquan, Wang Leichao, et al. Modal analysis of viscoelastic sandwich structure with different aging states[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(11): 69-75)
- [12] 张建斌. 带橡胶减振器的箭载电子设备动力学响应分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. (Zhang Jianbin. Research on dynamic response of the electronic equipment with rubber shock absorber on the rockets[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019)
- [13] 陈双, 包黎明, 於胜军. 不同路面工况下的整车振动模态能量分析[J]. *机械设计与制造*, 2019(3): 82-85, 90. (Chen Shuang, Bao Liming, Yu Shengjun. Modal energy analysis of vehicle vibration under different road[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2019(3): 82-85, 90)
- [14] 唐利涛, 杨舟, 李刚, 等. 基于疲劳损伤谱的随机振动试验方法在智能电表模拟公路运输中的研究[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(5): 38-42. (Tang Litao, Yang Zhou, Li Gang, et al. Random vibration test method based on fatigue damage spectrum in simulation of road transport with smart meter[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(5): 38-42)
- [15] 李勤建, 高翠琢, 边国辉. 组件的模态分析和随机振动分析[J]. *半导体技术*, 2012, 37(10): 810-814. (Li Qinjian, Gao Cuizhuo, Bian Guohui. Modal analysis and random vibration analysis on a module[J]. *Semiconductor Technology*, 2012, 37(10): 810-814)
- [16] 王桂伦, 姜东, 周李真辉, 等. 铰接式空间桁架结构模态试验研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(12): 252-257. (Wang Guilun, Jiang Dong, Zhou Lizhenhui, et al. Modal experiment for a spherical hinged space truss structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(12): 252-257)