



·脉冲功率技术·

模块化 Marx 发生器机芯的力学环境适应性分析及优化设计*

肖 晶^{1,2}, 王海洋^{1,2}, 谢霖燊^{1,2}, 程 乐^{1,2}, 孙楚昱^{1,2}, 石 凌^{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: 为研究 Marx 发生器机芯在公路运输条件下的力学环境适应性, 基于随机振动理论和有限元分析方法对 Marx 机芯进行了仿真分析和随机振动试验。首先, 建立了八级模块化 Marx 机芯的有限元动力学仿真模型, 模拟确定了机芯的应力集中点; 然后, 通过振动台运输振动摸底试验修正了有限元模型, 对机芯结构进行了优化设计, 使 Marx 机芯整体一阶频率由 15.4 Hz 提高到 19.7 Hz, 降低了整机垂向的动力学响应, 提高了机芯的力学环境适应性。试验结果表明, Marx 发生器结构设计需要重点考虑其在垂直方向的可靠性; 振动过程中, 机芯整体连接稳定, 振动应力集中于机芯与 U 型支撑杆连接处、支撑杆与支撑板连接的角片处, 以及开关连接件处, 是结构设计的薄弱环节。

关键词: Marx 发生器; 随机振动; 有限元分析; 优化设计

中图分类号: TH122; TM832

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210344

Adaptability analysis and optimization design of modular Marx generator in mechanical environment

Xiao Jing^{1,2}, Wang Haiyang^{1,2}, Xie Linshen^{1,2}, Cheng Le^{1,2}, Sun Chuyu^{1,2}, Shi Ling^{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: To study the adaptability of the modularized Marx generator in mechanical environment, simulation and vibration experiment of the generator are conducted based on the random vibration theory and finite element analysis method. Firstly, the finite element simulation model of an 8-stage Marx generator is established, and the stress concentration positions are identified. Secondly, the finite element model is corrected according to the initial results of shaking table test. Then an optimization scheme is proposed to modify the Marx generator. As a result, the first-order frequency of the Marx generator is increased from 15.4 Hz to 19.7 Hz. It is helpful to reduce the dynamic response in vertical direction and enhance the mechanical environment adaptability. Results show that more attention should be paid to the reliability in vertical direction when a Marx generator is being designed. The connection of the generator is stable in the vibration experiment, and the stresses mainly concentrate on the corner pieces between the generator and the U-shape support plates, the connections between U-shape support plates and side support plates, and the switch junctions, which are the weak points in design.

Key words: Marx generator, random vibration, finite element analysis, optimization design

Marx 发生器通过电容并联充电、串联放电的方式产生高压脉冲, 广泛应用于环境治理、微波负载驱动、X 光二极管驱动^[1]、高压装置触发和电磁脉冲模拟, 以及绝缘冲击耐压等高能物理试验中^[2-3]。从国内外研究现状看, Marx 发生器的研究侧重于: (1) Marx 发生器结构设计和优化, 以提升储能级及装置的绝缘性能^[4], 满足模块化、快前沿、低抖动、紧凑型等不同的应用场合。如 M. A. Elgenedy 等人^[5]设计了一种模块化升压的多级 Marx 发生器, 保证了系统的模块化和可扩展性。宋法伦等人^[6]介绍了高储能密度的储能/脉冲成形一体化技术、紧凑型 Marx 高压串叠技术等关键技术, 为高功率重复频率 Marx 型脉冲功率源小型化研究提供了思路。(2) 理论与与

* 收稿日期: 2021-08-07; 修订日期: 2022-01-11
联系方式: 肖 晶, xiaojing@nint.ac.cn.

作用机理分析。为深入理解 Marx 发生器的建立过程,贾伟等人^[7]研究了不同过压耦合方式下发生器内部开关过电压的产生机制与分布变化规律。J. C. Pouncey 等人^[8]详细分析了紧凑型 Marx 发生器电路,得出了限制建立过程的根本原因,为 Marx 发生器的设计提供了指导。

紧凑型、模块化结构使 Marx 发生器具有易于装配检修、便于运输等特点。但是,考虑到 Marx 发生器机芯的骨架多采用尼龙和有机玻璃纤维等材料,由电阻、电容等电气元件组成,在运输振动环境下可能会造成紧固件松动、断续的电气接触、电气短路、密封失效、结构裂纹或断裂等问题。从这个意义上看,对 Marx 发生器进行动力学环境适应性分析,考察其在复杂运输振动和冲击后的结构稳定性和电气性能的可靠性也是 Marx 发生器结构设计的重要一环。

目前对 Marx 发生器随机振动特性的研究相对较少,本文对八级 Marx 发生器机芯进行了初步的模式分析,得到了各阶振型及结构设计可能的薄弱点,并通过实际振动台试验考察了 Marx 发生器机芯对随机振动的适应性,对薄弱环节进行改进,并对所建有限元模型进行了修正,为 Marx 发生器可靠性设计提供了指导。

1 八级 Marx 发生器力学环境适应性仿真分析

八级 Marx 发生器机芯模块的结构如图 1 所示,包括 8 组屏蔽环、8 个电容开关单元模块、固定电容开关模块的 4 个玻璃钢角钢、2 个 U 型支撑杆和两侧互相平行的玻璃钢支撑板。2 个玻璃钢支撑板通过 2 个跨接在二者之间的玻璃钢横柱限位,U 型支撑杆和玻璃钢支撑板及玻璃钢角钢之间通过玻璃钢角片连接。每个单元模块由 2 个脉冲电容器、1 个三电极场畸变火花开关、2 个单级隔离板、2 个充电电阻和 1 个接地电阻组成,电容和开关通过金属片直接连接;充电电阻通过软导线固定于电容器上,接地电阻与电容器通过铜网连接(见图 2),软导线与铜网的软连接在保证电连接的基础上可以降低振动过程中电容器对充电电阻和接地电阻的影响。电容器通过两侧的单级隔离板夹紧,隔离板由紧固螺栓固定于 4 个玻璃钢角钢上。这种模块化的结构有利于减小 Marx 发生器的建立时间抖动,提高电气性能的稳定性和易于安装维护,便于运输^[9]。从电气设计角度看,Marx 发生器采用 SF₆ 气体作为绝缘介质,可实现双边充电,单级模块单边充电电压最高可达到几十 kV,通过串联放电可按要求生成脉冲电压。

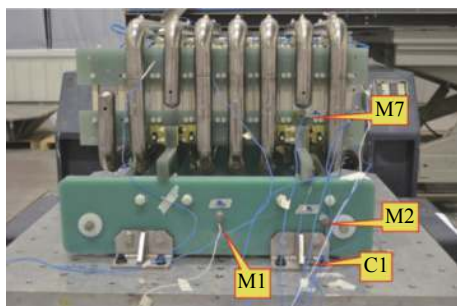


Fig. 1 Structure of the 8-stage Marx generator

图 1 八级 Marx 发生器机芯结构图

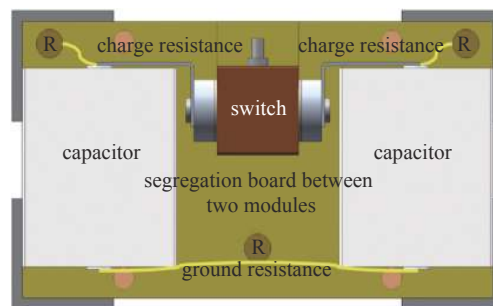


Fig. 2 Structure of one stage module

图 2 单级模块结构示意图

模态参数包括系统的固有频率、模态阻尼比和固有振型,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^[10-11]。为了预先了解八级 Marx 发生器机芯的模态参数及应力集中的位置,首先基于 Patran/Nastran 软件对其进行动力学建模和仿真分析。

Marx 发生器机芯整体结构采用梁-壳-实体单元进行建模,使用壳单元对玻璃钢角钢、单级隔离板等部件进行模拟;采用梁单元对 U 型支撑杆、玻璃钢横柱、螺栓、屏蔽环等部件进行模拟;单级开关、电阻等采用集中质量模拟;电容采用实体单元模拟。在支撑板与 U 型支撑杆之间、U 型支撑杆与角钢之间、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,以便提取内力载荷。电容与隔离板之间绑定连接,用于引入电容对整体刚度的影响。临界阻尼系数取 1%^[12-13]。材料属性设置如表 1 所示。

图 3、图 4 分别给出了八级 Marx 发生器机芯整体结构自由状态下的第一、第二阶模态,对应的频率分别为 9.3 和 17.0 Hz。可以看出,一阶振型表现为上端八级模块沿纵向(z 向)的振动,二阶振型表现为八级模块沿垂向(y 向)的振动。

在结构底端 4 个工装连接处向机芯施加随机振动,并统计 3 个方向 Marx 发生器机芯的加速度响应,结果如表 2、表 3 所示。

表 1 材料参数

Table 1 Parameters of the material

material	Young's modulus/GPa	Poisson ratio	density/(kg·m ⁻³)
stainless steel	190.0	0.33	8000
glass fiber reinforced plastics	37.2	0.25	2440
MC nylon	31.9	0.40	1150

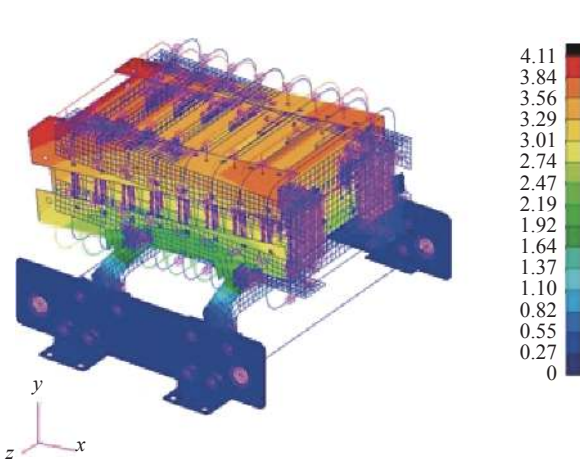


Fig. 3 First mode of the 8-stage Marx generator

图 3 八级 Marx 发生器机芯一阶模态

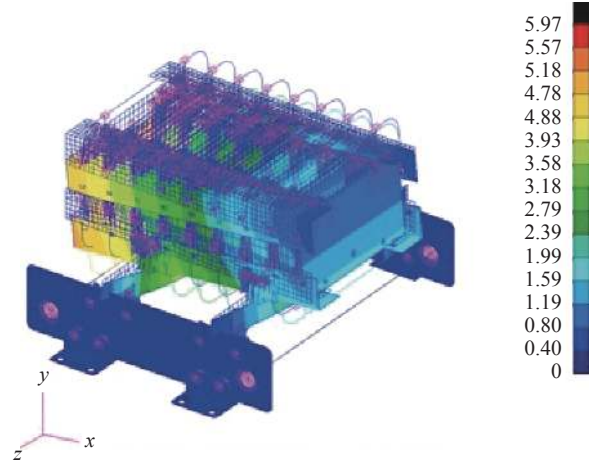


Fig. 4 Second mode of the 8-stage Marx generator

图 4 八级 Marx 发生器机芯二阶模态

表 2 Marx 发生器机芯几个位置的总均方根加速度

Table 2 Acceleration response at several points of the Marx generator

position	total root mean square acceleration/g		
	vertical extraction	lateral extraction	longitudinal extraction
U-shape support pole	2.01	1.55	0.99
support board of glass fiber	2.59	1.29	0.50
switch	1.58	0.89	0.23
random load	1.36	0.58	0.37

表 3 Marx 发生器机芯几个位置的总均方根应力

Table 3 Acceleration response of the Marx generator

position	total root mean square stress/MPa		
	vertical extraction	lateral extraction	longitudinal extraction
switch connector	32.2	12.6	7.4
segregation board between two modules	9.8	1.3	6.4
angle plate that connects the angle iron and U-shape support pole	6.8	2.3	1.4
U-shape support pole	0.4	0.1	0.2
angle plate that connects the U-shape support pole and support board of glass fiber	13.3	3.8	4.9

由表 2 可以看出：(1) 随机振动载荷条件下，3 个方向机芯上部结构动响应相比随机激励均呈放大现象，且垂向上部结构动响应的放大更为显著；(2) 纵向随机振动载荷条件下，开关动响应相比随机激励有所衰减。表 3 中，在开关连接处，尤其是在垂向随机载荷条件下应力水平相对较高。因此，实际振动试验应重点关注垂向振动条件下支撑板连接角片和开关连接件几个位置。

2 Marx 脉冲源随机振动分析

Marx 发生器机芯采用多级串联结构，安装时不存在直接耦合，但不可控的安装误差可能会产生不可预测的影响。在边界条件无法确定且多个结构的耦合关系无法预测的情况下，有限元等数值模拟方法不能直接反映装置的

动力学响应。加之有限元分析还存在模型误差、材料属性误差、网格密度误差等^[14],分析结果往往存在偏差。因此,有必要通过实际振动试验分析 Marx 机芯的力学环境适应性。

2.1 振动试验系统

采用电动振动台和东菱振动试验仪器有限公司生产的 ES-100-550 型振动控制仪进行试验条件加载控制, ICP 加速度传感器进行振动加速度数据采集。振动试验原理如图 5 所示,图 1 给出了 Marx 发生器机芯进行纵向随机振动时在振动台上的固定、摆放情况。通过 4 个带加强筋的金属角件将 Marx 机芯两侧的玻璃钢支撑板和振动台连接在一起,金属角件的固有频率远高于公路运输的最高频率,以保证振动特征量不失真地传至试件。控制仪生成的驱动信号经功率放大器放大后驱动振动台工作,同时由加速度传感器采集控制点的响应信号反馈给控制仪,将反馈信号与设定的参考谱进行比较,得出新的驱动谱,如此反复进行,最终使控制谱满足试验控制精度^[15]。

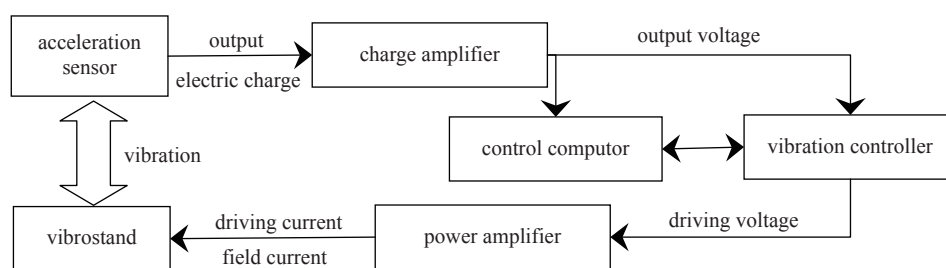


Fig. 5 Schematic diagram of the vibration experiment system

图 5 振动试验系统原理框图

试验采取 2 点平均控制的方式施加激励,振动控制点位于支撑底座上 2 个对角线位置,分别记作 C1 和 C2。为了获得振动传递关系和关键位置的振动量级,在支撑底座、玻璃钢支撑板、U 型支撑杆和机芯单元上布置了 14 个加速度测量点,记作 M1~M14。图 1 给出了八级 Marx 发生器机芯上部分测点。 x, z 轴的振动试验在水平滑台上进行, y 轴试验在垂直台上进行。

2.2 八级 Marx 发生器机芯故障情况

依据 I 类汽车运输规定的垂向、横向和纵向的加速度激励条件和频率范围,分别在 3 个方向进行随机振动。为了监测试验模块振动前后的特性变化,每个方向试验前后都进行正弦扫频试验。结合振动台实际控制精度并避免过量级试验,依据以往振动试验的经验将扫频量级设为 0.2g。一个方向振动结束后测量电阻阻值,检查电阻的连接情况;整个试验结束后进行开关击穿特性试验,考察开关特性的变化。

纵向运输振动后检查试件,未发现故障,振动前后扫频结果一致,电阻连接正常,表明 Marx 机芯结构在该方向上比较可靠。横向试验结束后扫频,加速度曲线的一阶频率由 17.92 Hz 降低至 15.39 Hz(见图 6)。检查发现 U 型支撑杆与玻璃钢角钢连接处的角片断裂(见图 7),几处连接螺栓松动。恢复机芯状态后进行垂向运输振动,试验进行 2 min 后,连接角片断裂,螺栓松动。可见,玻璃钢支撑板与 U 型支撑杆,以及支撑杆与玻璃钢角钢的连接片是设计的薄弱位置,与初步摸底试验及仿真分析指示的薄弱位置相符。

此外,模态仿真结果指出电容器与开关之间的连接是设计的薄弱点,图 8 给出了横向振动中电容器与开关连

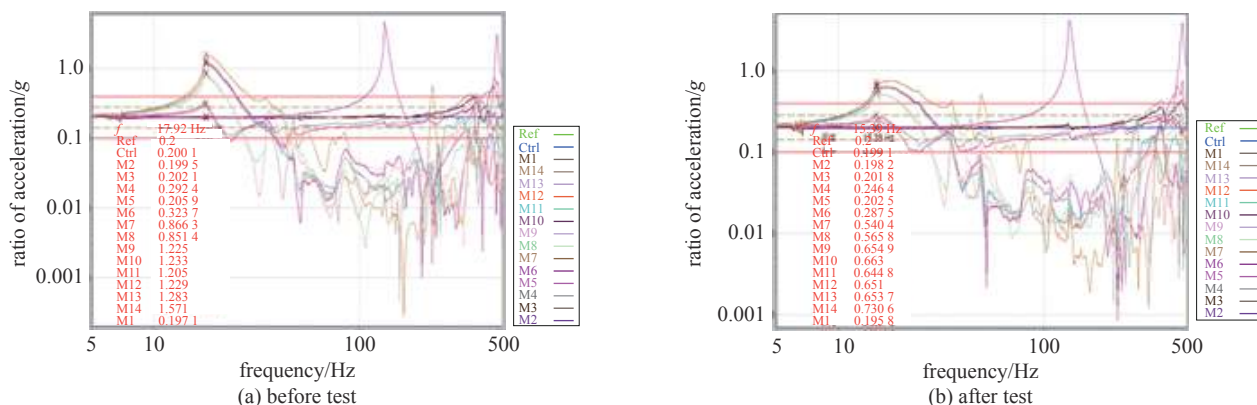


Fig. 6 Acceleration curve of frequency sweep before and after the vibration experiment on x axis

图 6 x 向振动试验前后扫频的加速度曲线



Fig. 7 Broken angle iron after random vibration experiment

图 7 振动断裂的角片

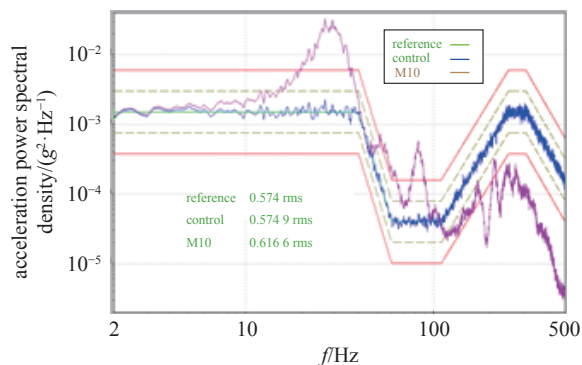


Fig. 8 Acceleration power spectral density curve at observation point M10 in horizontal direction

图 8 横向 M10 测点的加速度功率谱密度曲线

接片(对应测点 M10)连接角片的加速度功率谱密度曲线。从振动结果看, M10 处功率谱密度均方根值相对激励的放大倍数为 1.07, 说明振动能量不大, 且电容器与开关通过金属连接件固定, 连接相对可靠, 因此未出现连接断裂和螺栓松动。

2.3 Marx 发生器机芯优化设计

由摸底试验结果可知, Marx 机芯角片连接件是设计的薄弱环节。针对已有机芯连接角片(见图 9(a))主要从 3 个方面进行改进: (1) 选用强度更高的玻璃钢材料重新制作角片连接件; (2) 增大角片与角钢的连接面积, 增加角片开孔位置的孔边距; (3) 考虑到垂向振动量级较高, 在角钢正下方与 U 型支撑杆的连接处增加了一组固定角片, 以加强连接。优化方案如图 9(b) 所示。改进前机芯整体质量约 151 kg, 改进后的约 163 kg; 改进后玻璃钢角片材料的弹性模量为 42.5 GPa, 泊松比为 0.33, 密度为 2040 kg/m³。

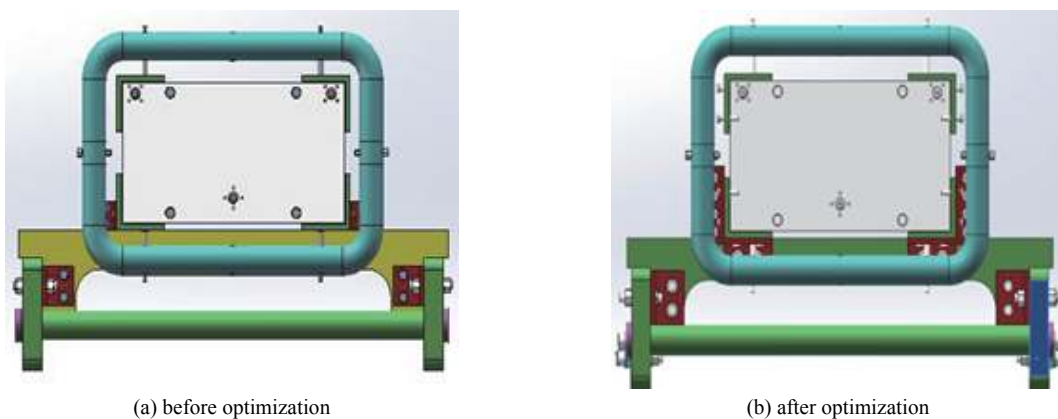


Fig. 9 Structure of the Marx generator before and after optimization

图 9 Marx 发生器机芯结构优化前后比较

2.4 八级 Marx 发生器机芯的随机振动分析

本节重点研究改进的 Marx 机芯在垂向的力学环境适应性, 试验设置及测点布置与 2.1 节一致。图 10、表 4 分别给出了振动试验监测图谱和垂向随机振动前后的扫频结果, 试验中未出现螺钉脱落及角片断裂的情况。

分析振动结果可知: (1) 垂向振动前后扫频曲线及各测点的峰值均未改变, 说明 Marx 机芯状态未发生变化。(2) 从测点频率特性来看, U 型支撑杆和 Marx 机芯形成一个弹性系统, 一阶频率为 90~100 Hz, 并且在该频率范围内有放大, 最大放大倍数约为 10 倍。必要时可加装阻尼垫片减少放大倍数。(3) U 型支撑杆以下部分在低频段不放大, 而在高频段放大, 一阶频率正好落在外激励量级比较低的区域, 对结

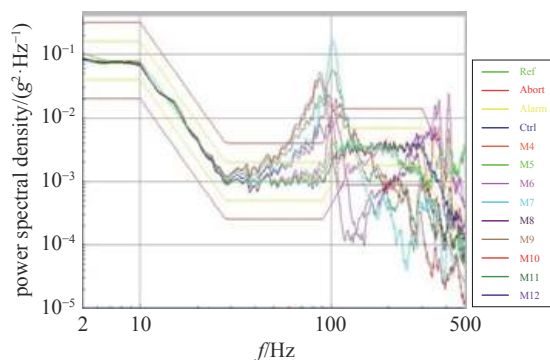


Fig. 10 Monitoring results of the Marx generator in transportation vibration on y axis

图 10 Marx 机芯垂向运输振动监测结果

表4 改进结构八级 Marx 机芯垂向随机振动扫频结果

Table 4 Random vibration results of the improved 8-stage Marx pulser in vertical direction

testing positions	root mean square of random vibration/g	magnification factor	1 st sweep frequency/Hz	
			before vibration	after vibration
support board of glass fiber	0.57	2.8	87.8	87.8
angle iron of glass fiber	1.29	6.5	97.9	96.1
U-shape support pole	0.73	3.7	87.8	87.8
switch connector of the 1 st module	2.06	10.3	88.6	87.8
switch and capacitor connectors of the 1 st module	2.00	10.0	88.6	88.6
switch and capacitor connectors of the 4 th module	1.09	5.5	88.6	87.8

构影响不大,说明改进方案效果较好。

2.5 改进 Marx 发生器机芯的模态分析

根据摸底振动试验结果将模态分析的临界阻尼系数修正为 1.5%,对改进的 Marx 机芯再进行模态分析^[16-17]。表 5 比较了 Marx 发生器机芯改进前后整体结构在自由状态下的模态特性。

表5 机芯改进前后整体结构的模态特性

Table 5 Mode characteristic comparison before and after improvement of the Marx generator

modes	frequency/Hz		modal descriptions	
	before modification	after modification	before modification	after modification
1 st order	15.4	19.7	longitudinal vibration on upper Marx	longitudinal vibration on upper Marx
2 nd order	26.7	30.7	local vibration in switch	local vibration in switch and over all vibration

改进后 Marx 机芯一阶、二阶频率分别提高了 27.9% 和 15.0%,对于振动条件最恶劣的垂向振动,一、二阶频率更靠近外加激励量级较低的区域,从而降低了激励对 Marx 机芯的影响,提高了结构对振动环境的适应性,这与 2.4 节振动试验的结果一致。

振动试验结束后开展开关电气性能实验,试验前后各开关击穿电压基本不变,电阻等连接可靠,证明了优化方案的有效性。

3 结论

利用有限元分析,结合实际振动试验研究了八级模块化 Marx 发生器机芯的力学环境适应性。结果表明,3 个方向随机振动载荷条件下,机芯上部结构动响应相对随机激励呈放大现象,且垂向载荷条件下上部结构动响应的放大效果更为显著;连接件处应力水平相对较高,且垂向随机载荷条件下的连接处,尤其是支撑板连接角片和开关连接件位置应力水平较高。选用强度更高的材料或增加垂向的连接可有效提高机芯在垂向的稳定性。对于振动中出现的螺钉松动情况,可以预涂防松胶或采用特殊螺牙形式增加螺栓紧固的可靠性,必要时可以加装减震装置,进一步减小产品的振动量级。

参考文献:

- [1] Wei Hao, Yin Jiahui, Zhang Pengfei, et al. Development of a 4-MV, 80-kA-induction voltage adder for flash X-ray radiography[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(11): 5030-5036.
- [2] 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)
- [3] 樊旭亮,孙旭,潘亚峰,等. 基于磁开关的固态近方波Marx发生器初步模拟设计[J]. *现代应用物理*, 2018, 9: 041201. (Fan Xuliang, Sun Xu, Pan Yafeng, et al. Design of a solid state rectangular pulse Marx generator based on magnetic switch[J]. *Modern Applied Physics*, 2018, 9: 041201)
- [4] 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)
- [5] Elgenedy 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.
- [6] 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)
- [7] 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 and Technology (Nature Science Edition), 2018, 46(10): 110-115)
- [8] Pouncey J C, Lehr J M, Giri D V. Erection of compact Marx generators[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(6): 2902-2909.
- [9] 西北核技术研究所. 一种紧凑型结构的Marx发生器: 103475255A[P]. 2013-12-25. (Northwest Inst Nuclear Tech. Marx generator with compact structure: 103475255A[P]. 2013-12-25)
- [10] Sharma J K. Theoretical and experimental modal analysis of beam[M]//Ray K, Sharan S, Rawat S, et al. Engineering Vibration, Communication and Information Processing. Singapore: Springer, 2019: 177-186.
- [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] 韩帅, 曹亚文, 邓长华, 等. 液体火箭发动机三轴向虚拟振动试验技术研究[J]. 火箭推进, 2018, 44(6): 68-74. (Han Shuai, Cao Yawen, Deng Changhua, et al. Research on test technology for three-axial virtual vibration of liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2018, 44(6): 68-74)
- [13] 顾乾磊, 张万福, 张尧, 等. 基于微元轨迹的密封动力特性系数理论识别方法[J]. 振动与冲击, 2019, 38(16): 22-28. (Gu Qianlei, Zhang Wanfu, Zhang Yao, et al. A theoretical identification method for dynamic coefficients of seals based on infinitesimal trajectory of rotors[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(16): 22-28)
- [14] 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)
- [15] 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 Bubber shock absorber on the rockets[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019)
- [16] Randall R B, Antoni J, Smith W A. A survey of the application of the cepstrum to structural modal analysis[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 118: 716-741.
- [17] 李星占, 董兴建, 岳晓斌, 等. 振动响应传递率的动力学特性研究及其在工作模态分析中的应用[J]. 振动与冲击, 2019, 38(9): 62-70. (Li Xingzhan, Dong Xingjian, Yue Xiaobin, et al. Dynamic characteristics of vibration response transmissibility and its application in operational modal analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(9): 62-70)