



·脉冲功率技术·

## 同轴脉冲形成线的运输振动环境适应性研究\*

范红艳<sup>1</sup>, 王俊杰<sup>1</sup>, 刘胜<sup>1</sup>, 张雪飞<sup>2</sup>, 孙旭<sup>1</sup>, 王刚<sup>1</sup>, 寇磊<sup>1</sup>, 侯振园<sup>3</sup>

(1. 西北核技术研究所, 西安 710024; 2. 北京正阳恒卓科技有限公司, 北京 100032; 3. 西安交通大学, 西安 710049)

**摘要:** 为了准确评估某 MV 级 Tesla 型脉冲功率源的运输振动环境适应性水平, 针对脉冲功率源中采用悬臂绝缘支撑结构的同轴脉冲形成线, 通过仿真和试验结合的方法开展研究。针对叠层结构式内外磁芯, 提出一种通过结构元胞等效材料参数和坐标变换的等效建模方法进行有限元建模, 通过模态试验修正有限元模型, 首次对比研究了绝缘油对形成线的模态频率和阻尼的影响, 仿真分析了形成线车载运输典型工况的应力及响应, 设计实施了大尺寸形成线等效件振动试验进行验证。通过振动试验发现了形成线结构存在非线性, 通过仿真分析和等效件试验验证, 同轴脉冲形成线现有结构设计基本满足车载运输振动环境适应性要求。

**关键词:** 同轴脉冲形成线; 内外磁芯; 绝缘油; 非线性; 运输振动; 环境适应性

中图分类号: TN782

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210067

## Research on transportation vibration environmental adaptability of coaxial pulse forming line

Fan Hongyan<sup>1</sup>, Wang Junjie<sup>1</sup>, Liu Sheng<sup>1</sup>, Zhang Xuefei<sup>2</sup>, Sun Xu<sup>1</sup>, Wang Gang<sup>1</sup>, Kou Lei<sup>1</sup>, Hou Zhenyuan<sup>3</sup>

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

2. Beijing Zhengyang Hengzhuo Technology Co., Ltd., Beijing 100032, China;

3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To evaluate the vibration environmental adaptability of Tesla-type pulse generator under vehicle transportation condition, simulation and verification test were carried out for the coaxial pulse forming line (PFL) with cantilever support insulators. An equivalent modeling was proposed for the inner and outer magnetic cores with laminated structure. The finite element model was modified according to the modal test results. Thus the effect of insulating oil on the modal frequency and damping of the PFL was studied, the stress and response of PFL under typical transportation conditions were obtained by simulation, and the vibration test of PFL equivalent parts was conducted to verify the simulation result. It was found that the structure of the PFL were nonlinear in the vibration test. The simulation analysis and the vibration test of equivalent parts verify that the existing structure of the coaxial PFL meets the requirements of vehicle transportation vibration environmental adaptability.

**Key words:** coaxial PFL; inner and outer magnetic cores; insulating oil; nonlinear; transportation vibration; environmental adaptability

随着 Tesla 型脉冲功率源<sup>[1-3]</sup>小型化技术的推进, 倍宽线技术实现了形成线长度的有效缩短<sup>[4-5]</sup>, 但同时也增加了结构的复杂性。基于同轴结构二倍宽线的某 Tesla 型脉冲功率源, 其形成线结构如图 1 所示, 由形成线外筒、中筒、内筒组成, 其中中筒和内筒多采用有机玻璃板和尼龙等材料做绝缘支撑, 尾端绝缘子为悬臂支撑, 全系统结构复杂, 尺寸规模大(形成线外筒直径 1 m 左右), 整体连接刚性较差。在长时间公路运输振动环境下, 系统的结构强度存在隐患。对 Tesla 型脉冲功率源进行整体随机振动分析<sup>[6]</sup>, 结果表明尾端绝缘子和中内筒的连接部位是系统中的薄弱环节。而尾端绝缘子应力超标会对形成线组件的功能带来严重影响。

为了准确评估某 MV 级 Tesla 型脉冲功率源的车载运输振动环境适应性水平, 本文针对脉冲功率源中采用悬

\* 收稿日期: 2021-03-08; 修订日期: 2021-05-15

基金项目: 国家技术创新类项目

作者简介: 范红艳(1988—), 女, 硕士, 工程师, 从事脉冲功率技术研究。

臂绝缘支撑结构的同轴脉冲形成线,进行局部精细化仿真及验证试验。仿真分析工作存在以下技术难点:(1)内外磁芯为薄硅钢片粘接而成(图1中绿色部分),这种叠层结构材料参数无法获取;(2)形成线内部充满绝缘油,如何建立绝缘油液体模型,以获得真实准确的结果;(3)中内筒与尾端绝缘子为螺纹连接,中筒和内筒尾端为螺钉固连、前端采用尼龙做绝缘支撑,这些非常规的紧固连接方式对连接刚度的建模带来了难度和挑战。因此,本文通过仿真和试验结合的方法,开展对同轴脉冲形成线运输振动环境适应性的研究,研究思路如图2所示。采用流体声单元对绝缘油进行建模<sup>[7]</sup>,通过结构元胞的等效材料参数和坐标变换建立内外磁芯的等效模型,然后通过模态试验来修正形成线组件的连接刚度及其他参数等<sup>[8-9]</sup>,获得较为精确的同轴脉冲形成线有限元模型,利用该模型进行不同运输振动环境的仿真计算,首次进行大尺寸形成线等效件(外筒直径大于1 m,长度大于2 m)振动环境试验。仿真和试验结果对同类型 Tesla 型脉冲功率源在振动工况下的强度评估和风险预判提供了有效参考。

### 1 有限元建模及模态分析

本文选取某 MV 级 Tesla 型脉冲功率源作为分析对象,其形成线组件结构示意图如图1所示。实际工作中,形成线内部充满 45# 变压器油,主开关腔充有 2 MPa 高压绝缘气体,形成线腔与其压力相通;固定方式为形成线外筒的两个法兰下端固定。

建立有限元模型是整个有限元分析过程的关键,模型合理与否将直接影响计算结果的精度<sup>[10]</sup>。针对形成线组件存在的仿真建模难题,本文采用以下方法。

内磁芯和外磁芯(图1中绿色部分)通过结构元胞的等效材料参数和坐标变换建立等效模型获得整体刚度进行仿真计算。内磁芯为渐开线形式(图3),将每一根硅钢薄带(0.08 mm)和胶层(0.02 mm)组合作为一个结构元胞,在如图4所示的材料坐标系下,根据刚度之间的并联、串联关系,参考 Voigt 模型和 Reuss 模型<sup>[11-12]</sup>,可以得到结构元胞在材料坐标系的等效材料参数,即

$$E_2 = E_1 = 0.8E_s + 0.2E_m \quad (1)$$

$$G_{12} = 0.8G_s + 0.2G_m \quad (2)$$

$$V_{12} = 0.8V_s + 0.2V_m \quad (3)$$

$$1/E_3 = 0.8/E_s + 0.2/E_m \quad (4)$$

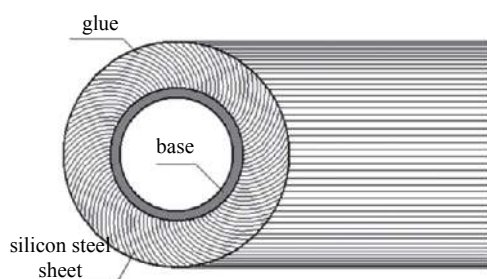


Fig. 3 Structure diagram of inner magnetic core  
图3 内磁芯结构示意图

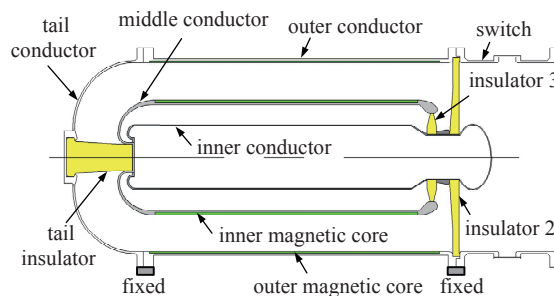


Fig. 1 Structure diagram of coaxial double-width PFL  
图1 同轴结构二倍宽脉冲形成线结构示意图

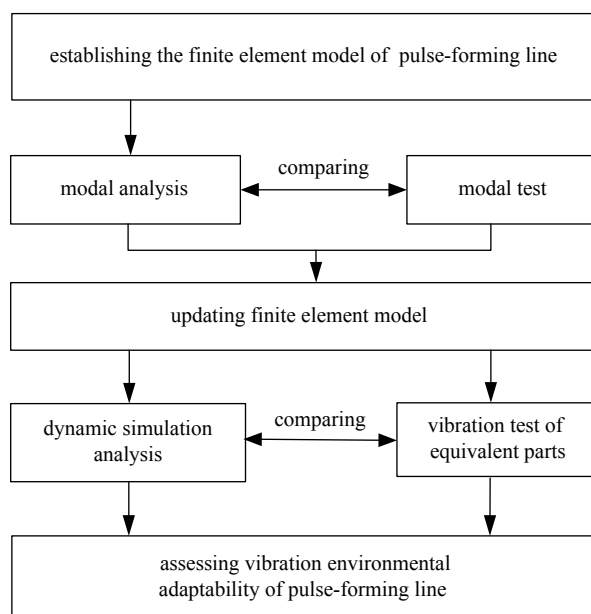


Fig. 2 Research flow chart  
图2 研究思路

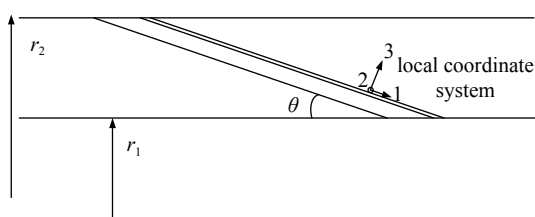


Fig. 4 Structure diagram of inner magnetic core cell  
图4 内磁芯结构元胞示意图

$$1/G_{13} = 1/G_{23} = 0.8/G_s + 0.2/G_m \quad (5)$$

$$1/V_{13} = 1/V_{23} = 0.8/V_s + 0.2/V_m \quad (6)$$

式中： $E_s$  代表硅钢片的弹性模量； $G_s$  代表其剪切模量； $V_s$  代表其泊松比； $E_m$  代表粘接胶的弹性模量； $G_m$  代表其剪切模量； $V_m$  代表其泊松比； $E_1$  代表结构元胞沿方向 1 的弹性模量； $E_2$  代表沿方向 2 的弹性模量； $E_3$  代表沿方向 3 的弹性模量； $V_{12}$  代表 1-2 方向的泊松比； $V_{13}$  代表 1-3 方向的泊松比； $V_{23}$  代表 2-3 方向的泊松比； $G_{12}$  代表 1-2 方向的剪切模量； $G_{13}$  代表 1-3 方向的剪切模量； $G_{23}$  代表 2-3 方向的剪切模量。结果如表 1 所示，可看出用正交各向异性材料参数去表征硅钢片和胶层粘接铺层特性。由于材料坐标系为局部坐标系，所以在建模时将实际结构每隔  $5^\circ$  进行等分，并在每一等份中建立局部坐标系，如图 5 所示，以获得内磁芯的整体结构刚度。外磁芯为叠片形式（图 6），建模方法同内磁芯，但是二者的材料坐标系不同（图 6），因此，二者在整体坐标系下的刚度特性也将不同。

表 1 结构元胞的等效材料参数

Table 1 Equivalent material parameters of structure cell

$E_1$ / GPa	$E_2$ / GPa	$E_3$ / GPa	$V_{12}$	$V_{13}$	$V_{23}$	$G_{12}$ / GPa	$G_{13}$ / GPa	$G_{23}$ / GPa
152	152	14.10	0.29	0.28	0.28	60.50	11.03	11.03

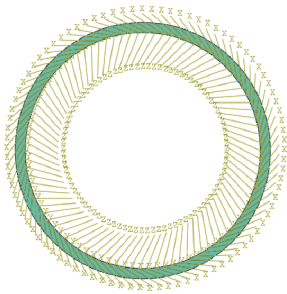


Fig. 5 Geometric model and local coordinate system of inner magnetic core

图 5 内磁芯几何模型及材料坐标系

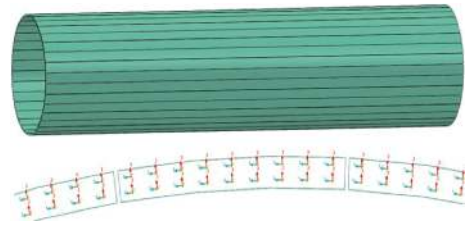


Fig. 6 Geometric model and local coordinate system of outer magnetic core

图 6 外磁芯几何模型及材料坐标系

采用流体声单元处理变压器油，其材料参数选取为：密度  $895 \text{ kg/m}^3$ （厂家提供），体积模量  $1.81 \text{ GPa}$ <sup>[13]</sup>。油液的体积模量会随着含气量、工作压力、油液温度稍有变化<sup>[14]</sup>，本文中该参数会根据模态试验的结果来修正。对于中内筒的连接结构建立了详细的连接模型，采用接触模拟其真实的连接关系。

对形成线组件进行模态分析，计算结果如表 2 所示，一阶频率为  $24.36 \text{ Hz}$ 。可看出前几阶模态振型主要集中在内筒上，主要是由于中内筒为尾端绝缘子悬臂支撑，在形成线组件中属于刚度较低的质量分部。

表 2 形成线模态分析结果

Table 2 Modal analysis results of PFL

mode	frequency/Hz	modal shape
1	24.36	lateral bending of inner conductor (x direction)
2	24.41	vertical bending of inner conductor (y direction)
3	34.05	bending of inner conductor along the z direction
4	43.53	twisting of inner conductor around the z-axis

## 2 模态试验及模型修正

建立真实准确的有限元模型对于仿真结果的有效性具有重要影响，本研究利用模态实验结果来修正有限元模型，以获得更加真实准确的响应结果。

采用激振器正弦扫描激励进行了形成线无绝缘油和形成线有绝缘油的模态试验。试验时，将形成线吊起成悬挂状态（图 7），横向和纵向模拟自由边界，垂向受到吊带一定约束。

形成线模态试验结果整理如表 3 所示，有油状态相比无油状态，弯曲频率有所降低，其中一阶弯曲频率下降了 46%，而扭转频率有所提高。分析其原因，在有油状态，弯曲频率由于附加质量影响而有所降低<sup>[15]</sup>，扭转频率由于油浮力作用引起的连接刚度变化而有所上升。有油状态的模态阻尼也显著增大，相比无油状态增大了 3~8

倍。有油状态相对无油状态,质量和阻尼的增大,显著降低了试验件振动响应,说明油对结构的振动起到了较大的抑制作用。

形成线有油状态的试验结果与初次仿真结果对比如表4所示,可看出计算得出的模态特征与试验结果基本一致,前几阶模态振型相同,频率相差在较小的范围内,说明前期有限元建模的方法是较为合理的。

通过模态实验,获得了形成线整体结构和内部关键结构的模态参数,以用于有限元模型修正。具体方法为:依据无油状态的模态试验结果对中内筒与尾端绝缘子的连接刚度进行修正,然后利用修正的连接刚度以及有油状态的模态试验结果,对油的体积模量进行修正。修正后油的体积模量为 1.6 GPa。修正后的模态振型与频率如表5所示,并与试验结果进行对比。结果显示,修正后的模型计算误差与试验误差相对较小。

表 3 形成线两种状态模态试验结果对比

Table 3 Modal test results of PFL under two different conditions

mode	modal shape	frequency (oil-free)/Hz	frequency (full of oil)/Hz	damping coefficient (oil-free)/%	damping coefficient (full of oil)/%
1	lateral bending of inner conductor ( $x$ direction)	33.38	18.03	1.71	5.89
2	vertical bending of inner conductor ( $y$ direction)	37.80	18.92	1.30	10.61
3	bending of inner conductor along the $z$ direction	57.43	42.64	1.10	7.96
4	twisting of inner conductor around the $z$ -axis	42.35	51.62	1.50	6.63

表 4 形成线仿真频率与试验频率对比 (有油)

Table 4 Contrast between simulation frequency and measured frequency of PFL (full of oil)

mode	modal shape	simulation frequency/Hz	measured frequency/Hz	error/%
1	lateral bending of inner conductor ( $x$ direction)	24.36	18.03	25.99
2	vertical bending of inner conductor ( $y$ direction)	24.41	18.92	22.49
3	bending of inner conductor along the $z$ direction	34.05	42.64	-25.23
4	twisting of inner conductor around the $z$ -axis	43.53	51.62	-18.58

表 5 试验频率与修正模型计算频率对比 (有油)

Table 5 Contrast between measured frequency and simulation frequency of modified model (full of oil)

mode	modal shape	measured frequency/Hz	modified simulation frequency/Hz	error/%
1	lateral bending of inner conductor ( $x$ direction)	18.03	18.95	5.10
2	vertical bending of inner conductor ( $y$ direction)	18.92	19.02	0.53
3	bending of inner conductor along the $z$ direction	42.64	30.61	-14.61
4	twisting of inner conductor around the $z$ -axis	51.62	46.16	-10.58

### 3 运输振动环境适应性仿真分析

建立了较为精确的同轴脉冲形成线有限元模型后,根据真实工作场景,开展车载运输环境典型工况的计算分析工作,以获得形成线组件及尾端绝缘子的真实应力。形成线组件有限元模型及固支边界如图8所示。

驱动源在静态作用下,形成线外筒组件由于 2 MPa 内外压差存在较大预应力(尾盖处达到 173 MPa),因此,在振动工况下,将静力结果与动态仿真结果矢量叠加获得综合应力,用以表征形成线组件的真实应力。



Fig. 7 Photo of PFL modal test

图 7 形成线组件模态实验照片



Fig. 8 Finite element model of PFL under clamped boundary condition

图 8 形成线有限元模型及固支边界

运输中的典型路况有高速公路、外场公路以及路面坑洼引起的运输冲击,因此,根据相关标准选取高速公路卡车振动环境 PSD 谱、组合轮式车辆振动环境 PSD 谱和运输冲击后峰锯齿脉冲分别对应这三种路况的激励载荷曲线,如图 9 所示。

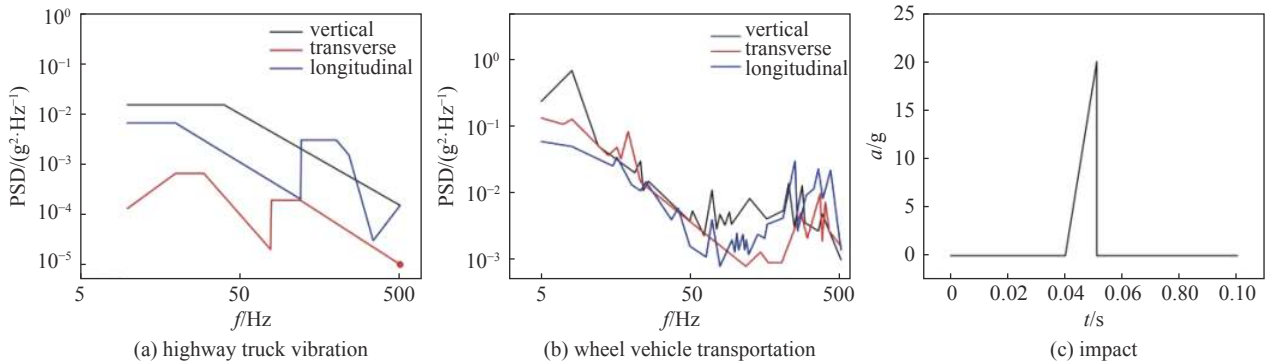


Fig. 9 Excitation spectrum of typical working conditions of vehicle transportation environment

图 9 车载运输环境典型工况激励谱

根据图 9 中的作用曲线对形成线组件分别施加激励载荷,获得其在三种路况下的响应结果,如表 6 所示。提取中筒尾端的加速度响应值,高速公路卡车运输加速度均方根值放大 2 倍,组合轮式车辆加速度均方根值放大 1.1 倍,运输冲击加速度放大 2 倍,说明中内筒在运输振动中出现了共振放大。从表 6 中可看出形成线组件中最大综合应力为 246.46 MPa,出现在尾盖处,其值小于材料的屈服强度 345 MPa,因此尾盖的应力值处在安全范围,但安全系数仅为 1.4,在长时间运输振动环境仍需关注疲劳问题。尾端绝缘子最大应力位于螺纹连接段的前几圈螺纹处,其值为 40.99 MPa(应力分布如图 10 所示),小于其屈服强度 85 MPa,因此不会发生变形及断裂,说明尾端绝缘子在车载运输工况下的强度是满足要求的。综上所述,通过仿真分析可看出,同轴脉冲形成线现有结构强度基本满足车载运输振动环境适应性要求。

表 6 计算结果汇总(车载运输环境)

Table 6 Calculation results (vehicle transportation condition)

condition	maximum acceleration (middle conductor)/g	maximum dynamic stress/MPa	total stress/ MPa	maximum stress (tail insulator)/MPa
highway transportation(vertical)	1.95	50.08	223.08	27.78
wheel vehicle transportation(vertical)	2.40	73.46	246.46	40.99
impact(20g, vertical)	39.95	60.22	233.22	33.67

#### 4 形成线等效件振动环境力学试验

首次开展了同轴脉冲形成线等效件(m 级直径)的力学环境试验,其中,尾端绝缘子为真实产品,外筒、中筒、内筒、绝缘支架等部件均采用等效件。等效件的质量特性和刚度分布与真实产品保持一致,通过仿真计算验证和迭代,保证等效件和实际结构的前三阶频率相近,尾端绝缘子连接处的载荷和响应相近,从而实现等效,最终确定的等效件设计模型如图 11 所示。

振动试验照片如图 12 所示,具体试验工况如表 7 中所示。在尾端绝缘子上粘贴了应变片,用以监测尾端绝缘子的应力状态,调整试验量级,以防尾端绝缘子发生破坏。最终试验均达到了满量级,但考核时间稍有不足。试验中提取了中筒尾端的加速度响应值,结果如表 7 所示,可看出在动载工况下中筒尾端存在动态放大效应,运输振动总能量放大 1~2 倍,运输冲击放大 2 倍,这与表 6 中的计算仿真结果相一致。因此可得出,形成线等效件可初步承受满量级振动试验,且结构的振动响应总体控制在较好的范围内。

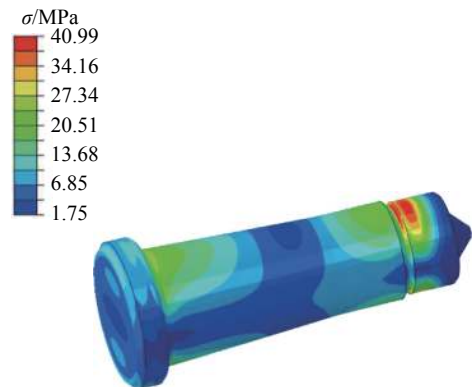


Fig. 10 Contour curve of tail insulator (wheel vehicle transportation along the vertical direction)

图 10 尾端绝缘子应力云图(轮式车辆运输垂向)

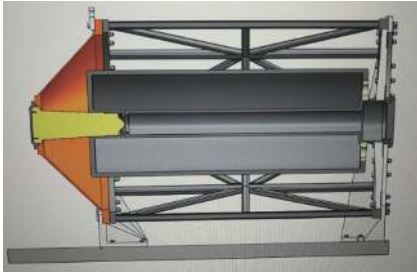


Fig. 11 Equivalent structure of PFL  
图 11 形成线等效件结构



Fig. 12 Vibration test of PFL equivalent parts  
图 12 形成线等效件振动试验

表 7 中筒尾端响应加速度汇总表

Table 7 Response acceleration summary of middle conductor

test condition	longitudinal acceleration/g	vertical acceleration/g	lateral acceleration/g
highway transportation	1.34	2.01	0.53
wheel vehicle transportation	1.76	2.05	2.66
impact(5g)	9.41	13.11	8.44

Note: The results of highway and wheel vehicle transportation tests were root mean square values.

试验中进行了不同能量等级的扫频试验,发现在不同的激振能量下,结构的同一阶固有频率会有所漂移。表 8 为不同量级扫频振动试验内筒上测点的响应频率。可看出在低量级下响应频率高,在高量级下响应频率有所下降,频率漂移最大达到 16%,说明结构存在较大的非线性。分析其原因有二:(1)系统中连接关系较多,在不同的振动量级下连接关系会有微变化,导致连接刚度发生变化,进而引起频率的改变<sup>[6]</sup>; (2)系统中有尼龙、有机玻璃、聚醚醚酮等高分子材料结构件时,材料本身的非线性特性表现为结构件的共振频率会随着振动量级的改变有所漂移,随着振动量级的提高,频率会有所下降。

表 8 横向(z向)不同量级扫频振动试验内筒上测点的一阶响应频率

Table 8 First mode frequency of inner conductor under different magnitudes of sine sweep tests (z direction)

magnitude/(g <sup>2</sup> ·Hz <sup>-1</sup> )	response frequency/Hz
0.001	26
0.000 1	26
0.000 01	30
0.000 001	30
0.000 000 1	31

对 Tesla 型脉冲功率源在车载运输前后的脉冲形成输出波形进行了测试,运输路况为高速公路,距离为 3000 km。图 13 为运输前的记录波形,图 14 为运输至目的地后的记录波形,可看出,运输前后输出波形在脉冲宽度和幅值上无明显变化,波形基本保持一致,说明同轴脉冲形成线现有结构在车载运输中可保持功能完好,具有较好的运输振动环境适应性。

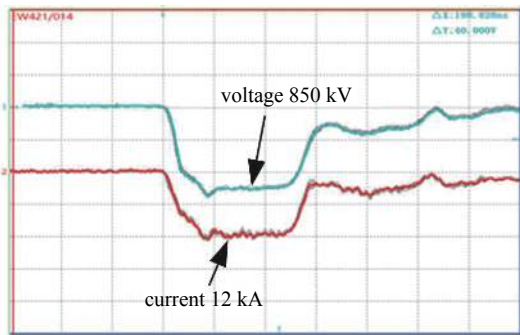


Fig. 13 Output pulse waveform before transportation  
图 13 运输前输出脉冲波形

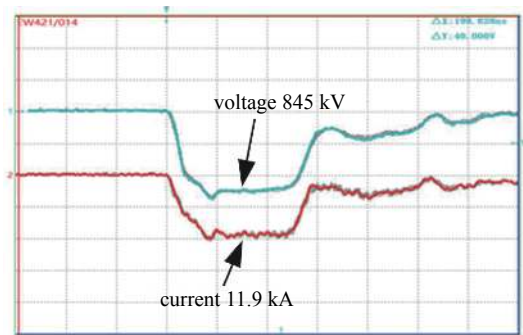


Fig. 14 Output pulse waveform after transportation (3000 km, highway)  
图 14 运输后输出脉冲波形(3000 km, 高速公路)

## 5 结 论

本文通过仿真和试验结合的方法,研究了 Tesla 型脉冲功率源中同轴脉冲形成线的车载运输振动环境适应性,结论如下:

(1) 提出一种等效建模方法, 具体为通过结构元胞的等效材料参数和坐标变换建立等效模型获得整体刚度, 解决了叠层结构式内外磁芯有限元建模的难题。

(2) 首次通过试验对比了同轴脉冲形成线内部无油和有油的模态结果, 相比无油状态, 有油状态的一阶弯曲频率下降 46%, 扭转频率有所上升, 阻尼增大 3-8 倍, 显著降低了试验件振动响应。

(3) 通过仿真分析和等效件试验验证, 尾端绝缘子强度满足要求, 悬臂绝缘支撑结构同轴脉冲形成线现有结构设计基本满足车载运输振动环境适应性要求, 但仍应关注疲劳问题。

(4) 通过振动试验发现, 形成线结构存在非线性, 在不同的振动量级下一阶频率有所漂移, 随着量级的增大, 频率会逐渐下降。

#### 参考文献:

- [1] 彭建昌, 苏建仓, 张喜波, 等. 20 GW/100 Hz 脉冲功率源研制[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(11): 2919-2924. (Peng Jianchang, Su Jianchang, Zhang Xibo, et al. Development of 20 GW/100 Hz repetitive pulsed accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(11): 2919-2924)
- [2] 石磊, 朱郁丰, 卢彦雷, 等. 紧凑 Tesla 变压器型纳秒脉冲源[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 125001. (Shi Lei, Zhu Yufeng, Lu Yanlei, et al. Compact GW nanosecond pulse generator based on Tesla transformer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 125001)
- [3] Li Rui, Su Jianchang, Zeng Bo, et al. 5-GW Tesla-type pulse generator based on a mixed pulse-forming line[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91: 074710.
- [4] 张喜波, 苏建仓, 潘亚峰, 等. 倍宽脉冲形成线[C]//第四届全国脉冲功率会议. 2015: A38. (Zhang Xibo, Su Jianchang, Pan Yafeng, et al. Multiple-width pulse forming lines[C]//4<sup>th</sup> Chinese Pulse Power Conference. 2015: A38.)
- [5] Liu Sheng, Su Jianchang, Zhang Xibo, et al. A Tesla-type long-pulse generator with wide flat-top width based on a double-width pulse-forming line[J]. *Laser and Particle Beams*, 2018, 36(1): 115-120.
- [6] 范红艳, 张喜波, 刘胜, 等. Tesla 型脉冲功率源随机振动响应分析[J]. *现代应用物理*, 2018, 9: 031003. (Fan Hongyan, Zhang Xibo, Liu Sheng, et al. Random vibration analysis of Tesla-type pulse generator[J]. *Modern Applied Physics*, 2018, 9: 031003)
- [7] 杨万理, 李乔. 深水桥梁墩-水耦合作用计算模式对比研究[J]. *世界桥梁*, 2012, 40(2): 46-50. (Yang Wanli, Li Qiao. Comparative study of pier-water interaction calculation model of deep water bridge[J]. *World Bridges*, 2012, 40(2): 46-50)
- [8] Xu Kunpeng, Sun Wei, Gao Junnan. Mistuning identification and model updating of coating blisk based on modal test[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 121: 299-321.
- [9] 龙吟, 任晓辉, 张珂, 等. 基于模态实验的轨道牵引电机整机有限元模型的建立[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(6): 1553-1559. (Long Yin, Ren Xiaohui, Zhang Ke, et al. Finite element modeling of rail traction motor based on modal experiments[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(6): 1553-1559)
- [10] 杜平安, 于亚婷, 刘建涛. 有限元法——原理、建模及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. (Du Pingan, Yu Yating, Liu Jiantao. Finite element method—principle, modeling and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.)
- [11] 任超, 陈建均, 潘红良. 随机短纤维增强复合材料弹性模量预测模型[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(4): 191-194. (Ren Chao, Chen Jianjun, Pan Hongliang. Prediction model for elastic modulus of random short fiber reinforced composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(4): 191-194)
- [12] 常熠存, 耿悦, 王玉银, 等. 基于两相复合材料的再生混凝土弹性模量预测模型[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(12): 165-173. (Chang Yicun, Geng Yue, Wang Yuyin, et al. Models of elastic modulus for concrete made with recycled coarse aggregate based on two-phase composite material[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(12): 165-173)
- [13] 闫小乐, 谷立臣. 液压系统油液有效体积模量的在线软测量[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(10): 126-132. (Yan Xiaole, Gu Lichen. Online measurement of effective bulk modulus in hydraulic system by the soft-sensing model[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(10): 126-132)
- [14] Gholizadeh H, Burton R, Schoenau G. Fluid bulk modulus: A literature survey[J]. *International Journal of Fluid Power*, 2011, 12(3): 5-15.
- [15] 王在铎, 马斌捷, 贾亮, 等. 水下附加质量及阻尼的试验研究[J]. *强度与环境*, 2018, 45(3): 15-19. (Wang Zaiduo, Ma Binjie, Jia Liang, et al. Experimental study of added mass and damping in water[J]. *Structure and Environment Engineering*, 2018, 45(3): 15-19)
- [16] 钱志英, 韩世泽, 马为佳, 等. 航天器振动试验中的频率漂移现象研究[J]. *航天器环境工程*, 2018, 35(4): 342-347. (Qian Zhiying, Han Shize, Ma Weijia, et al. Natural frequency drift in the vibration test of spacecraft[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2018, 35(4): 342-347)