

基于机械激振方法的 GIL 等效通流振动响应特性研究

何文宇^{1, 2, 3}, 杨旭⁴, 杨宇萍^{1, 2, 3}, 龙启⁴, 盛康⁴, 黎卫国⁴, 杨振宇^{1, 2, 3}

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510006; 2. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广州 510006; 3. 工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广州 510006; 4. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司, 广州 510663)

摘要: 针对气体绝缘金属封闭输电线路 (GIL) 在运行中因电动力长期处于微振动环境, 导致接头触指发生磨损劣化的问题, 当前基于大电流试验平台的研究受场地、传感器布置及经济成本等因素限制, 难以灵活开展参数化研究。为此, 基于分布参数体系理论推导等效原理, 搭建了一种新型 GIL 机械激振器激励等效试验平台。在该平台上分别开展了通流无激振下的振动响应试验和连续长时间无通流激振下的振动响应试验。结果表明: GIL 管线内部导电杆简化梁单元在集中简谐荷载与均布简谐荷载下的跨中振动响应特征一致; 通流条件下, 随负载电流增大, 振动加速度值逐渐增大; 新型激振方法下的振动响应与通流实测结果吻合。该新型激振方法在等效模型与原始模型相似性高同时动态响应由基频模态主导的结构下, 可用于 GIL 管线振动响应特性及相关研究。

关键词: 机械激振方法; 激振器; GIL 管线; 振动响应特性

Investigation of Equivalent Current-carrying Vibration Response Characteristics of GIL via Mechanical Excitation

HE Wenyu^{1, 2, 3}, YANG Xu⁴, YANG Yuping^{1, 2, 3}, LONG Qi⁴, SHENG Kang⁴, LI Weiguo⁴, YANG Zhenyu^{1, 2, 3}

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center of Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology, Guangzhou 510006, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Resistance, Earthquake Mitigation and Structural Safety, Ministry of Education, Guangzhou 510006, China; 4. China Southern Power Grid Co., Ltd. EHV Transmission Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract: To address the problem that the contact fingers of gas-insulated metal-enclosed transmission lines (GIL) are subject to wear degradation caused by the long-term micro-vibration environment induced by electrodynamic forces during operation, current studies based on high-current test platforms are constrained by site limitations, sensor placement, and economic costs, which hinder flexible parametric investigations. Therefore, an equivalent test platform employing a novel mechanical exciter for GIL was developed based on the equivalence principle derived from the theory of distributed-parameter systems. On this platform, vibration response tests were carried out under two scenarios: current-carrying without excitation, and long-duration excitation without current. The results indicate that the mid-span vibration response characteristics of a simplified beam element under concentrated harmonic load and uniformly distributed harmonic load are consistent. Under current-carrying conditions, the vibration acceleration exhibits a progressive increase with the load current. The vibration responses obtained by the novel excitation method are in good agreement with the measured results under current-carrying conditions. This novel excitation method can be applied to investigate the vibration response characteristics of GIL pipelines and related topics, as long as the structures where the equivalent model is highly similar to the original model and the dynamic response is dominated by the fundamental frequency mode.

Key words: mechanical excitation method; exciter; GIL pipeline; vibration response characteristics

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52308488); 广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515010072, 2022A1515110561)。
Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52308488), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation(2023A1515010072, 2022A1515110561).

0 引言

气体绝缘金属封闭输电线路 (gas-insulated transmission line, GIL) 因其传输容量大、单位损耗低、受环境影响小、运行可靠性高等显著优势, 已成为解决特殊地理环境下电能输送问题的重要技术方案, 在水电站、核电站送出以及跨江越河等工程中得到了广泛应用^[1-6]。近年来, 随着特高压工程的快速发展, 同时苏通GIL综合管廊工程的建成投运标志着我国GIL技术水平已跻身世界前列^[7-8]。运行统计表明, 机械缺陷是导致GIL设备发生故障的重要因素之一, 易引发结构局部过热、气体泄漏、部件烧蚀甚至突发性绝缘击穿故障^[9-10]。GIL导体与壳体之间同时存在电场力与电磁力, 二者频率均为工频的2倍即100 Hz^[11]。在这种时变电磁力的持续激励下, GIL设备长期处于微振动状态, 振动能量通过连接结构传递至各个部件, 导致电连接结构发生机械磨损和接触性能劣化^[12], 从而造成GIL管线结构产生机械缺陷损伤。

针对GIL的振动响应特性及其引发的机械损伤问题, 国内外学者已开展了大量研究工作。在振动响应特性方面, 通过模态分析和有限元仿真, 获得了GIL设备的固有频率分布主要集中在800~2700 Hz及GIL设备振动传播规律^[13-14]。研究表明, GIL外壳振动信号以100 Hz及其倍频为主, 当存在母线底座松动等机械缺陷时, 振动频响函数发生显著变化, 固有频率和阻尼比均减小, 并在特定频带产生超谐波响应现象^[15]。故障诊断研究方面, 国内外学者基于振动信号提取多种特征量如时频域特征等, 结合机器学习算法实现了对GIL机械缺陷和放电性故障的识别与诊断^[16-19]。此外, 对电接触结构的磨损特性研究揭示, 弹簧触指和表带触指两种方案在往复摩擦过程中接触电阻呈现先下降后上升的趋势, 磨损碎屑的积累是接触电阻升高的重要原因^[17]。尽管现有研究已取得丰硕成果, 但绝大部分工作均

基于真实大电流试验平台开展。这类试验方法需要构建完整的GIL试验回路、配置大电流发生装置及复杂的振动传感器系统^[20-23], 受限于试验场地条件、加速度传感器难以在GIL管线内部布置以及试验时间长带来的高昂经济成本等约束, 使得其难以在多种工况下灵活开展参数化研究。因此, 开发一种更加高效、经济、传感器布置更加灵活的等效振动模拟实验方法, 对于深化GIL振动机理认识和加速相关技术研究具有重要意义。

文中基于分布参数体系理论推导等效原理, 提出并搭建了一种新型GIL机械激振器激励等效试验平台。该平台无需通流即可模拟实际GIL在电力作用下的振动响应, 大幅降低了试验门槛和成本, 同时该等效试验平台针对传感器安装位置无所限制, 能够更加全面深入地探究GIL管线内部振动响应特性。该等效试验方法不仅从理论上揭示了集中力近似替代分布力的适用条件, 也为实验室开展GIL管线振动模拟等效试验提供了一种简便、可控的加载方案, 同时该模拟试验平台能够更好地捕捉到GIL管线振动时内部导体以及各内部零部件的振动响应特性, 并且能够在十分经济的条件下满足对GIL管线连续长时间振动响应等相关试验研究分析。文中后续将围绕该等效方法的理论推导, 以及试验验证展开系统研究, 该新型技术试验方法为GIL设备的振动响应特性分析与状态监测提供新的理论工具。

文中针对该研究首先开展了通流无激振条件下GIL管线的振动响应特性分析, 其次基于该平台, 开展了无通流机械激振器机械激振条件下GIL管线的振动响应特性研究, 旨在验证等效模拟方法的有效性, 为GIL振动响应特性研究提供一种新型技术试验方法。

1 单点机械激振原理及方法

该试验方法从欧拉-伯努利梁理论出发, 将单相GIL管线单元中的内部单根铝合金导电杆简化为一

端限制竖向位移与水平位移但允许转动的铰接，另一端限制竖向位移但允许转动与水平位移的铰接的简支梁模型。一个单相标准单元GIL管线结构示意图见图1。

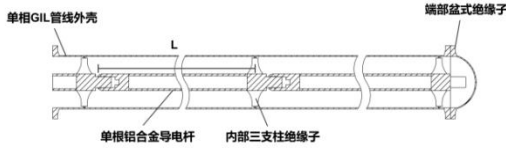


图1 18 m标准单元单相GIL管线结构示意图

Fig. 1 Schematic of the 18 m single-phase GIL standard unit configuration

基于分布参数体系，分别建立单点集中简谐荷载与均匀分布简谐荷载作用下简支梁的动力学响应解析表达式，由于两种荷载工况下跨中动态响应的模态叠加特征，无法使无穷多阶模态同时匹配，在适用条件：①结构的动态响应由基频模态主导；②不需要精确预测高阶模态响应或高频振动细节的场景下，采用基频分量 $n=1$ 相等作为等效准则。推导获得单点激励位置与荷载幅值之间的理论关系，使单点激励产生的跨中加速度响应在基频成分上与均布简谐荷载激励下的响应基本一致。

单点激励引起的振动与气体绝缘输电管线在交变磁场作用下自身受力产生的振动，均属于基本物理场中简谐荷载作用下的动力学问题。考虑到实际气体绝缘输电管线整体结构的复杂性，文中对其模型进行合理简化：忽略母线端部公母连接头以及绝缘三支柱对振动传播的影响，将一个标准单元的气体绝缘输电管线内部单根铝合金导电杆简化为一端限制竖向位移与水平位移但允许转动的铰接，另一端限制竖向位移但允许转动与水平位移的铰接的简支梁模型；同时文中忽略GIL管线在电磁力作用下产生的其他方向振动，主要研究沿着管线垂直方向振动。基于此简化模型，采用分布参数体系方法，分别针对等效振动试验下的单点简谐荷载激励作用于梁上某一位置和GIL管线通流作用下电磁力产生的

均匀分布简谐荷载激励沿梁全长均匀分布这两种情形开展系统的理论分析。

1.1 简支梁在均布简谐荷载以及单点简谐荷载下的理论分析

参考国内外学者对气体绝缘输电管线振动响应特性的相关研究成果，在正常运行工况下，GIL管线外壳以及内部导电杆所产生的振动具有正弦简谐特性并且主频率为100 Hz^[20]，振动荷载表示为 $Q(x, t) = q_0 \sin(\omega t)$ ，其中： q_0 为荷载幅值； ω 为荷载圆频率，GIL管线对应振动主频 $f=100$ Hz。因此，在正常运行状态下，GIL管线的主振动频率为100 Hz，荷载形式为正弦简谐荷载，可统一表示为 $Q(x, t) = q_0 \sin(\omega t)$ ，结构受荷载示意图见图2。针对该均布简谐荷载作用于简支梁的情况，进一步考虑系统阻尼的影响，采用分布参数体系方法即连续体分布参数法，对梁在该荷载作用下的动力响应进行理论求解。

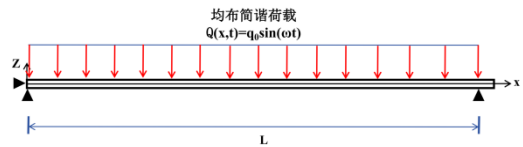


图2 GIL管线简化梁结构受均布简谐荷载示意图

Fig. 2 Schematic of the simplified beam model of the GIL under uniformly distributed harmonic load

针对均布简谐荷载下的简支梁沿着管线垂直方向上振动，同样基于欧拉-伯努利梁理论，其边界条件可表述为两端挠度为零即 $w(0) = w(L) = 0$ 且两端弯矩为零即 $M(0) = M(L) = 0$ 。由于模态叠加法将连续体离散为无限个单自由度系统，由克拉夫结构动力学教材^[24]可知，广义力 $F_n(t)$ 公式可知当 n 只有为奇数时，其广义力不为零，模态被激发。因此广义力 $F_n(t)$ 为

$$F_n(t) = \int_0^L Q(x, t) \varphi_n(x) dx = \frac{2L}{n\pi} q_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

将广义力归一化后的力 $Q_n(t)$ 为

$$Q_n(t) = \frac{F_n(t)}{M_n} = \frac{4q_0}{n\pi m} \sin(\omega t) \quad (2)$$

式(1)、(2)中： q_0 为均布简谐荷载幅值大小； x 为沿梁长度方向位置； L 为梁长度； m 为梁单位长度质量； t 为荷载作用时间； ω 为荷载圆频。

根据文[24]得到在均布简谐荷载下该简支梁结构运动方程为

$$U_n^{(2)}(t) + 2\zeta\omega_n U_n^{(1)}(t) + \omega_n^2 U_n(t) = Q_n(t) \quad (3)$$

解析解为

$$U_n(t) = q_{n0} \cdot H(\omega) \cdot \sin(\omega t - \theta_n) \quad (4)$$

其式(4)中：

$$\theta_n = \arctan\left(\frac{2\zeta\omega_n\omega}{\omega_n^2 - \omega^2}\right), \quad q_{n0} = \frac{4q_0}{n\pi m} \quad (5)$$

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}} \quad (6)$$

式(3)-(6)中： q_{n0} 为第 n 阶模态的广义力幅值；

$H(\omega)$ 为位移频响函数； ω 为荷载圆频率； t 为荷载作用时间； θ_n 为相位角； ω_n 为第 n 阶固有圆频率； ζ 为第 n 阶模态阻尼比。

根据模态叠加法，叠加响应为

$$\omega_1(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n(x) U_n(t) \quad (7)$$

针对文中所简化的简支梁模型即一端限制竖向位移与水平位移但允许转动的铰接，另一端限制竖向位移但允许转动与水平位移的铰接的简支梁模型，进一步考虑单点集中简谐荷载的作用情形。设该集中简谐荷载的作用位置为 $x=a$ ，则实际作用于管线上的荷载可视为作用于此点的集中简谐力，结构受荷载示意图见图3。

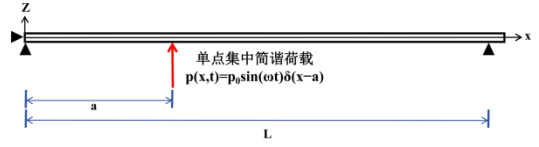


图3 GIL管线简化梁结构受单点简谐荷载示意图
Fig. 3 Schematic of the simplified beam model of the GIL under a concentrated harmonic load

为准确描述其在空间上的集中分布特性，该表达式将时间上的简谐变化与空间上的集中作用相结合，引入狄拉克函数 $\delta(x - a)$ 。由此，该单点简谐荷载的表达式为 $P(x, t) = p_0 \sin(\omega t) \delta(x - a)$ 。

单点简谐荷载下简支梁的沿着管线垂直方向上振动，同样也基于欧拉—伯努利梁理论，其边界条件、振型函数、结构固有频率以及所推导对应结构的广义质量与上述均布简谐荷载下的简支梁振动相同。

针对该简支梁所受荷载不同，根据分布参数体系可知。其广义力 $F_n(t)$ 利用狄拉克函数且归一化：

$$F_n(t) = \int_0^L P(x, t) \varphi_n(x) dx = p_0 \sin(\omega t) \varphi_n(a) \quad (8)$$

$$P_n(t) = \frac{F_n(t)}{M_n} \quad (9)$$

带入即

$$P_n(t) = \frac{2p_0}{mL} \sin(\omega t) \varphi_n(a) \quad (10)$$

式(8)-(10)中： p_0 为集中简谐荷载幅值大小； x 为沿梁长度方向位置； L 为梁长度； m 为梁单位长度质量； t 为荷载作用时间； ω 为荷载圆频率； a 为集中简谐荷载距离简支梁左端部距离。

同样根据文[24]在单点简谐荷载下该结构运动方程

$$Y_n^{(2)}(t) + 2\zeta\omega_n Y_n^{(1)}(t) + \omega_n^2 Y_n(t) = P_n(t) \quad (11)$$

得到解析解为

$$Y_n(t) = p_{n0} \cdot H(\omega) \cdot \sin(\omega t - \theta_n) \quad (12)$$

式(12)中

$$\theta_n = \arctan\left(\frac{2\zeta\omega_n\omega}{\omega_n^2 - \omega^2}\right), \quad p_{n0} = \frac{2p_0}{mL} \sin\left(\frac{n\pi a}{L}\right) \quad (13)$$

位移频响函数 $H(\omega)$ 为

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}} \quad (14)$$

式(11)-(14)中： p_{n0} 为第 n 阶模态的广义力幅值；

ω 为荷载圆频率； t 为荷载作用时间； θ_n 为相位角； ω_n

为第 n 阶固有圆频率； ζ 为第 n 阶模态阻尼比

根据模态叠加法，叠加响应为

$$\omega_2(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n(x) Y_n(t) \quad (15)$$

1.2 单点集中简谐荷载下振动等效分析

为模拟GIL管线正常运行状态下的动态响应，文中采用在GIL管线外部施加单点集中简谐荷载的方法进行等效激励。为便于理论分析与数值计算，将整根GIL管线单元复杂的动力响应简化为管线跨中点即梁长度中点处的动态响应。需要指出的是，在单点集中简谐荷载与均匀分布简谐荷载两种不同加载工况下，梁的振动响应均由无穷多阶模态叠加而成，且各阶模态的贡献比例随荷载分布形式不同而存在差异。理论上，无法同时使两种荷载工况下所有模态对应的跨中响应完全一致。因此，文中采用一种近似等效策略：仅要求两种荷载形式下跨中响应的基频分量即第一阶模态， $n=1$ 相等。在此条件下，该等效试验方法仅适用于：①结构的动态响应由基频模态主导；②不需要精确预测高阶模态响应或高频振动细节的场景。具体而言，假设两种施加的荷载频率均相同主频 100 Hz，可近似认为两种工况下的总响应，以跨中点位移或加速度响应表征基本一致为条件，从而实现对实际均布简谐振动的单点等效替代。

基于上述两种不同荷载工况下简支梁的动态响应联立可得

$$\omega_1(x, t) = \omega_2(x, t) \quad (16)$$

此时 $n=1$ ，代入式(16)得

$$\frac{2p_0}{mL} \sin \frac{\pi a}{L} = \frac{4q_0}{\pi m} \quad (17)$$

式(16)、(17)中： p_0 为集中简谐荷载幅值大小； q_0

为均布简谐荷载幅值大小； m 为梁单位长度质量； L 为梁长度； a 为集中简谐荷载距离简支梁左端部距离。式(17)解得集中简谐荷载距离简支梁左端部距离 a 为：

$$a = \frac{L}{\pi} \arcsin\left(\frac{2q_0 L}{\pi p_0}\right) \quad (18)$$

式(18)中， L 为梁长度； p_0 为集中简谐荷载幅值

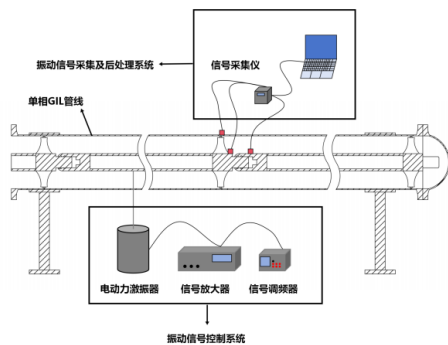
大小； q_0 为均布简谐荷载幅值大小。

根据理论公式推导，为使单点激振方法所产生的振动响应与GIL管线在正常运行状态下的动态响应保持一致，激振点应布置于距离GIL管线左端 $a = \frac{L}{\pi} \arcsin\left(\frac{2q_0 L}{\pi p_0}\right)$ 处。

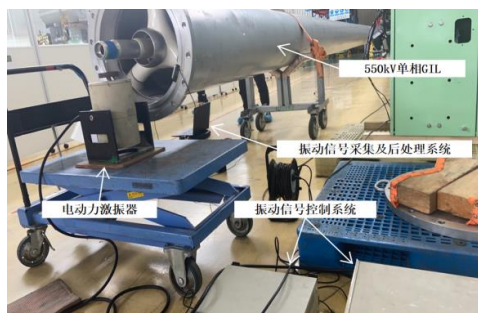
2 单点激振方法下的机械激励试验

2.1 单点机械激振试验模拟平台

文中采用GIL单点机械激振试验模拟平台。该平台主要由机械激振器、单相GIL管线、振动信号控制系统、振动信号采集及后处理系统组成，可实现GIL管线设备不同幅值情况下的激励振动模拟。该单相GIL管线集合了金属外壳、带公母头连接的内部铝合金导电杆、绝缘三支柱、法兰、触头以及覆盆子等构件，具体振动试验模拟平台以及实物图分别见图4(a)、(b)。



(a) 试验模拟平台示意图



(b) 试验模拟平台实物图

图 4 GIL单点机械激振试验模拟平台

Fig. 4 Experimental platform for single-point mechanical excitation testing of the GIL

此次试验机械激振器采用JYK-400 型机械激振器, 激振力范围为 $0 \sim 400$ N, 激振频率范围为 $DC0 \sim 2000$ Hz, GIL管线振动信号采集及后处理系统包括加速度传感器、采集仪以及计算机。采用型号为Megasig ACC 1837 压电IEPE加速度传感器采集振动信号, 最大量程范围为 $-10g \sim +10g$, 灵敏度为 500 mV/g, 频率响应采集范围为 $1 \sim 3000$ Hz, 采样频率为 1400 Hz。

试验时, 通过调节振动信号控制系统中的调频器频率输出在 100 Hz以满足GIL管线实际运行过程中的振动频率大小, 同时调节放大器在电压范围 $0 \sim 5$ V以控制振动信号幅值大小, 机械激振器通过上部顶针与GIL管线内部导电杆自然接触产生振动信号通过GIL管线外壳传递至管线上布置的压电式加速度传感器再由采集仪将振动信号转换为电信号传递到笔记本进行数据后处理, 实现电动力单点激振下的GIL管线振动响应特性分析。

文中从GIL管线结构正常运行下不同电流负载时振动响应特性、GIL管线单点机械激振方法下得到GIL管线结构振动响应特性两方面进行研究。研究流程见图 5。

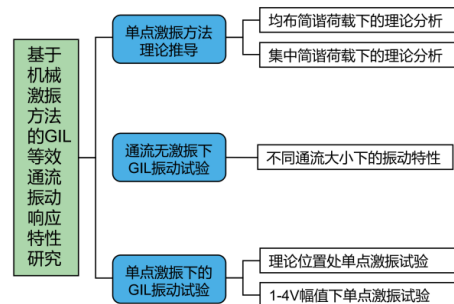


图 5 研究流程

Fig. 5 Flowchart of the research procedure

2.2 通流无激振与单点机械激振的GIL管线振动试验

1)通流无激振GIL振动试验: 为了验证正常无缺陷运行时GIL管线的振动响应特性, 在单点机械激振模拟振动试验前文中进行了在没有外部激励的条件下对单相GIL管线进行负载电流 1000 、 2000 、 3000 、 4000 A的 4 种不同通流下该单相GIL管线振动响应实测试验, 得到该单相GIL管线在正常运行时的振动响应与电流变化之间的关系, 文中将研究两种方法下单相GIL管线跨中响应特性, 因此该单相GIL管线振动加速度传感器 S_1 设置在GIL管线跨中外壳处正上方, 通过粘接方式进行布置, 布置图见图 6。

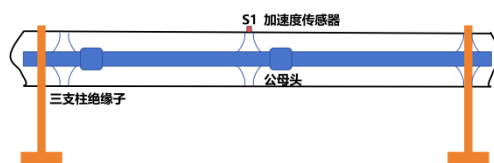


图 6 通流无激振实测试验传感器布置图

Fig. 6 Sensor layout for the experimental measurement under current-carrying condition without excitation

2)单点机械激振GIL管线振动试验: 电动力单点机械激振方法下对GIL管线振动响应研究, GIL管线正常无缺陷条件下, 在外壳布置加速度传感器 S_2 即GIL管线跨中外壳处正上方, 通过粘接方式进行布

置, 保证与通流试验位置与安装方式一致, 同时在该单相GIL跨中即滑动三支柱绝缘子 1 与滑动三支柱绝缘子 2 中间内部导电杆处施加输入电压不同幅值下机械激振器激发的振动激励, 为满足GIL管线正常通流运行时的振动响应特性, 机械激振器通过调频器与放大器输入正弦信号波。该单相GIL管线振动机械激振器以及加速度传感器S₂ 布置图见图 7。

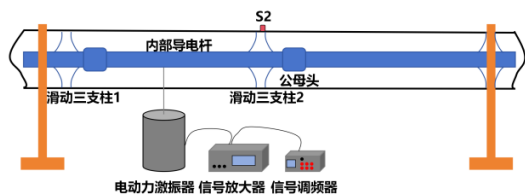


图 7 单点机械激振下GIL振动试验

Fig. 7 Vibration test of the GIL under single-point mechanical excitation

3)1~4 V不同幅值大小单点激振GIL管线振动试验: 利用单点机械激振试验模拟平台, 模拟等效试验利用信号放大器调节 1~4 V不同电压幅值大小下的GIL管线振动响应特性试验, 得到 4 种不同工况下的GIL管线跨中位置响应振动频域图以及时域图, 该单相GIL管线振动机械激振器以及加速度传感器 S₃ 即GIL管线跨中外壳处正上方, 通过粘接方式进行布置, 保证与前试验位置与安装方式一致, 布置图见图 8。

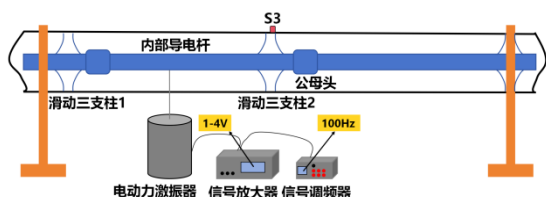


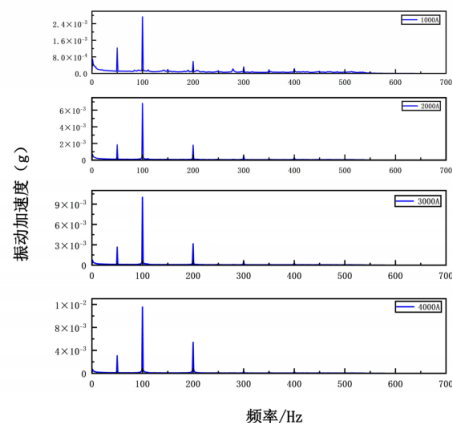
图 8 不同幅值下单点机械激振GIL振动试验

Fig. 8 Vibration tests of the GIL under single-point mechanical excitation with different amplitudes

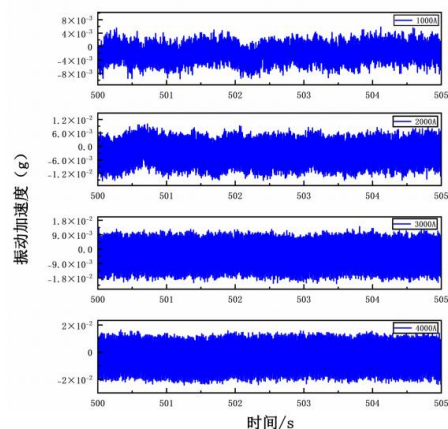
2.3 试验结果分析

1)通流 1 000~4 000 A不同负载电流下正常 18 m长单元GIL管线振动通常由频域信号以及时域信号表示其振动响应特征, 文为了研究该 18 m长单元GIL管线在通流 1 000、2 000、3 000、4 000 A不同负载电流下的振动状态变化, 得到该GIL管线跨中三

支柱绝缘子外壳处沿着管线垂直振动响应频域图以及时域图, 见图 9。



(a) 频域



(b) 时域

图 9 不同负载电流下的GIL管线振动响应特性

Fig. 9 Vibration response characteristics of the GIL under different load currents

该研究表明, 根据频域以及时域图可知正常状态下该单元GIL管线振动加速度随着负载电流的增大而增大, 见图 10。

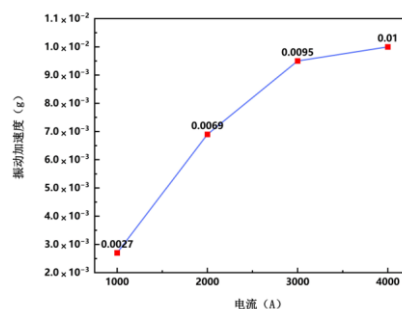


图 10 不同负载电流下的GIL振动加速度响应峰值

Fig. 10 Peak vibration acceleration response of the GIL under different load currents

在 1 000~4 000 A范围的负载电流下,该GIL管线跨中三支柱绝缘子外壳处振动加速度峰值分别为 0.002 7g、0.006 9g、0.009 5g、0.010g。根据频域图可以得到该单元GIL振动响应主要频率为 100 Hz,由于电流场强影响的原因会产生 50 Hz的工频电磁力并且还会由于整个GIL复杂机械设备结构从而产生 200~700 Hz的高次谐波。

2)针对本试验对象 18 m长单元GIL单相管线振动响应特性分析,根据分布参数体系推导得到激振点位置使单点机械激振方法所产生的振动响应与GIL管线在正常运行状态下的动态响应保持一致,则激振点应布置于距离GIL管线左端 $\alpha = \frac{L}{\pi} \arcsin(\frac{2q_0 L}{\pi p_0})$ 处。文中将控制 $\arcsin(\frac{2q_0 L}{\pi p_0})$ 值为 1,求得机械激振幅值 q_0 大小,此时激振点位置位于GIL管线左端 3/10 即该单相GIL跨中即滑动三支柱绝缘子 1 与滑动三支柱绝缘子 2 中间内部导电杆处,此试验参数下进行单点机械激振下的GIL管线振动试验。

文中在电力单点机械激振试验模拟平台下进行该单相GIL管线振动响应试验,试验最长连续振动时长为 20 h。所得该单相GIL管线跨中位置振动响应频域图以及时域图见图 11。

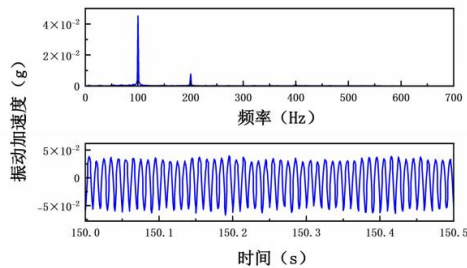


图 11 单点机械激振试验GIL管线振动响应特性

Fig. 11 Vibration response characteristics of the GIL under single-point mechanical excitation

结果表明在电力单点机械激振方法下该单元GIL管线在外壳振动处的波形为正弦波,符合在通流情况下由于电磁力作用下GIL管线受到单一频率的周期性力激励从而使GIL管线结构进行的简谐振动,

并且在通流与单点机械激振两种试验条件下GIL管线跨中振动响应时域以及频域特性一致。

由于激振试验条件可以对输入信号幅值进行放大以及缩小调节,因此将 4V电压输入激振条件下数据进行 100 倍以及 30 倍缩小得到功率谱与 4 000 A通流无激振条件下得到的GIL管线跨中振动加速度响应功率谱见图 12。

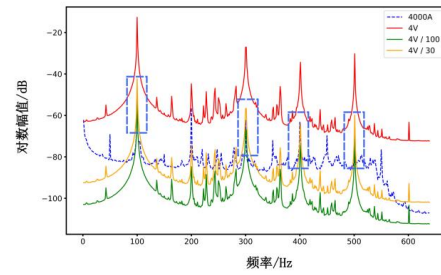


图 12 GIL通流条件与激振条件下振动加速度功率谱

Fig. 12 Power spectra of vibration acceleration of the GIL under current-carrying and excitation conditions

根据曲线得知,当激振试验下数据缩小 30 倍得到的功率谱与 4 000 A通流无激振条件下得到的GIL管线在 100、300、400、500 Hz对应的功率谱对数幅值拟合度较好。同时对 4 000 A通流下GIL管线跨中振动加速度响应与 4 V电压输入激振条件下以及缩小条件下的 4 种工况进行均方根处理分析得到均方根值RMS见图 13,图 13 中 4 000 A通流下得到GIL管线跨中振动加速度均方根值 3.185×10^{-4} 与通过缩小幅值 30 倍后 4 V电压输入激振条件下得到GIL管线跨中振动加速度均方根值 3.792×10^{-4} ,表明两种试验方法下GIL管线时域内的整体能量水平基本相似。

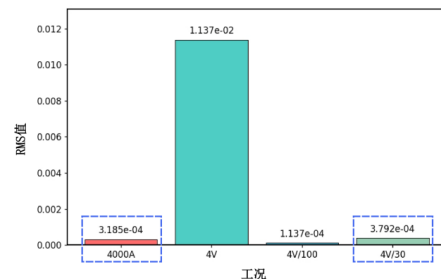
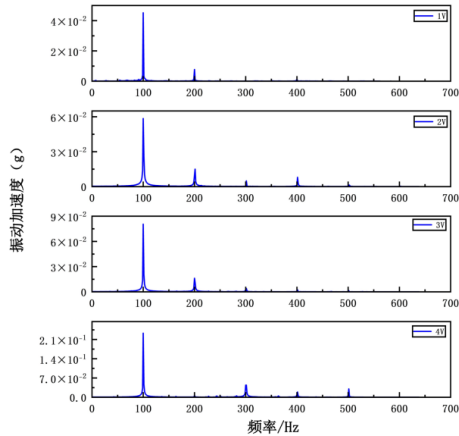


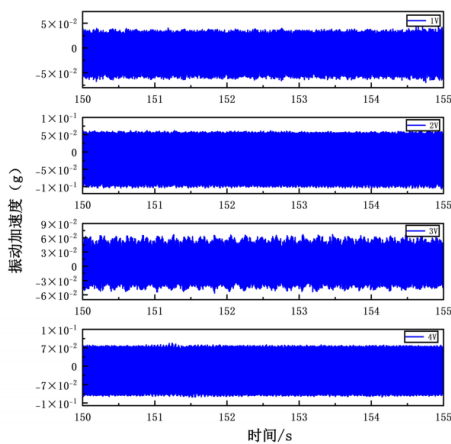
图 13 GIL通流条件与激振条件下振动加速度RMS值
Fig. 13 RMS values of vibration acceleration of the GIL under current-carrying and excitation conditions

由此可知，在单点机械激振等效试验方法下，可以通过调节输入幅值大小从而使得GIL管线振动响应特性与实测振动信号特征吻合进而达到等效振动效果。

3)如图 14 所示中机械激振器通过放大器以及调频器的作用，针对不通流的 18 m单元GIL管线进行主频为 100 Hz，振动幅值为 1~4 V不同电压下的机械激振作用，得到GIL管线跨中三支柱绝缘子外壳处 S₃ 沿着管线垂直方向振动信号。



(a)频域



(b)时域

图 14 1~4 V 电压下机械激振 GIL 管线振动响应
Fig. 14 Vibration response of the GIL under mechanical excitation with 1~4 V input voltage

由频域图以及时域图可知，单点机械激振方法下该GIL管线振动响应频谱特征振动主要频率为 100 Hz，同时由于GIL复杂机械设备结构从而产生 200~500 Hz的高次谐波与通流下GIL管线振动响应频谱特性吻合，同时单点机械激振方法下随着输入电压幅值增大，该GIL管线振动响应振动加速度幅值也会逐渐增大，1~4 V下振动加速度峰值分别为 0.045 2g、0.058 5g、0.080 5g、0.232 1g分别为见图 15。

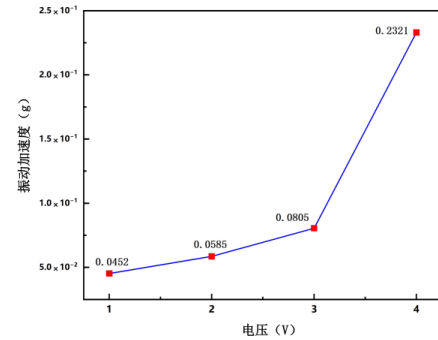


图 15 1~4 V机械激振GIL管线振动加速度响应峰值
Fig. 15 Peak vibration acceleration response of the GIL under mechanical excitation with 1~4 V input voltage

该研究结果表明，基于GIL单点机械激振试验模拟平台，通过调节信号放大器从而放大或缩小激振输入幅值等效再现不同通流等级下GIL管线产生的振动加速度响应趋势，且两种条件下的响应特性吻合良好，该平台为管线振动响应模拟提供了有效手段。

3 结论

文中针对单点机械激振下GIL管线的振动响应特性等效方法，开展了理论分析与通流试验研究。通过改变负载电流和激振幅值，系统考察了管线振动响应的频谱及时域特征，并验证了单点机械激振下等效模拟方法的有效性。主要结论如下：

1)单点机械激振等效试验激振点应布置于以左端支座为原点，沿 GIL 管线轴向的坐标 $a = \frac{L}{\pi} \arcsin(\frac{2q_0 L}{\pi p_0})$ 处，其中 L 为GIL管线长度； p_0 为施

加机械激振力大小； q_0 为GIL管线运行受电磁力大小，具体位置可以根据不同的等效荷载条件确定。

2)正常运行GIL管线在1 000~4 000 A不同负载电流下GIL管线振动加速度随着负载电流的增大而增大。

3)激振20 h的单点机械激振等效试验得到该GIL管线的振动响应主频为100 Hz,同时产生200~500 Hz的高次谐波；时域波形呈正弦特征，特征与通流试验下频域、时域特征吻合。

4)单点机械激振等效试验4 V电压输入缩小幅值30倍与通流4 000 A实测试验，两者在频域分布、时域波形、加速度功率谱及均方根值RMS上相吻合。

5)满足结构的动态响应由基频模态主导；不需要精确预测高阶模态响应或高频振动细节的场景条件下：验证得到单点机械激振等效试验方法的有效性，为后续更加全面深入地探究GIL管线内部振动响应特性以及长时间持续振动下GIL管线内部振动磨损劣化等研究提供新的研究方法。

参考文献：

- [1] 李 鹏, 颜湘莲, 王 浩, 等. 特高压交流GIL输电技术研究及应用[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3161-3167.
Li Peng, Yan Xianglian, Wang Hao, et al. Research and application of UHVAC gas-insulated transmission line[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3161-3167.
- [2] 肖登明, 阎究敦. 气体绝缘输电线路(GIL)的应用及发展[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 699-707.
Xiao Dengming, Yan Jiudun. Application and development of gas insulated transmission line (GIL)[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 699-707.
- [3] 范建斌. 气体绝缘金属封闭输电线路及其应用[J]. 中国电力, 2008, 41(8): 38-43.
Fan Jianbin. Gas insulated metal enclosed transmission line (GIL) and its application[J]. Electric Power, 2008, 41(8): 38-43.
- [4] 高 凯, 李莉华. 气体绝缘输电线路技术及其应用[J]. 中国电力, 2007, 40(1): 84-88.
Gao Kai, Li Lihua. Technology and application of gas-insulated transmission lines[J]. Electric Power, 2007, 40(1): 84-88.
- [5] 齐 波, 张贵新, 李成榕, 等. 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1466-1473.
Qi Bo, Zhang Guixin, Li Chengrong, et al. Research status and prospect of gas-insulated metal enclosed transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1466-1473.
- [6] Zebouchi N, Haddad M A. A review on real-size epoxy cast resin insulators for compact high voltage direct current gas insulated switchgears and gas insulated transmission lines[J]. Energies, 2020, 13(23): 6406.
- [7] 刘泽洪, 王承玉, 路书军, 等. 苏通综合管廊工程特高压GIL关键技术要求[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2377-2385.
Liu Zehong, Wang Chengyu, Lu Shujun, et al. Key technical parameters of UHV GIL in sutong utility tunnel project[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2377-2385.
- [8] 腾 云, 陈 双, 邓洁清, 等. 智能巡检机器人系统在苏通GIL综合管廊工程中的应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 393-401.
Teng Yun, Chen Shuang, Deng Jieqing, et al. Application of intelligent inspection robot system in sutong GIL utility tunnel project[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 393-401.
- [9] 丁屹林, 郝 建, 钟 尧, 等. 超高压GIL设备振动模态及振动响应特性分析研究[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2810-2819.
Ding Yilin, Hao Jian, Zhong Yao, et al. Vibration modes and characteristics of EHV GIL equipment[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2810-2819.
- [10] 杨景刚, 刘 媛, 宋思齐, 等. GIS设备机械缺陷的振动检测技术研究[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 86-90.
Yang Jinggang, Liu Yuan, Song Siqi, et al. Research on vibration detection technology of GIS mechanical defects[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 86-90.
- [11] 张书琴, 张克选, 岳宝强, 等. GIS的异响振动及其时变力分析[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 155-160.

- Zhang Shuqin, Zhang Kexuan, Yue Baoqiang, et al. Analysis on abnormal vibration and its time-varying force of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 155-160.
- [12] 靳守锋, 田汇冬, 王浩然, 等. 特高压GIL电接触结构选型及磨损特性研究[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4482-4490.
- Jin Shoufeng, Tian Huidong, Wang Haoran, et al. Comparison between UHV GIL electrical contact structure schemes and analysis of their wearing characteristics[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4482-4490.
- [13] 蒋 龙, 臧春艳, 秦怡宁, 等. 基于振动检测的GIL放电性故障先兆的判别方法[J]. 水电能源科学, 2018, 36(10): 194-197.
- Jiang Long, Zang Chunyan, Qin Yining, et al. Diagnosis method of GIL discharge fault sign by vibration detection[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(10): 194-197.
- [14] 王扬程, 关向雨, 陈志鹏, 等. 基于结构声强法的GIS机械振动传递特性[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5162-5171.
- Wang Yangcheng, Guan Xiangyu, Chen Zhipeng, et al. Energy transfer characteristics of GIS mechanical vibration based on structural intensity method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5162-5171.
- [15] 张 旭, 鲁 杰, 张潮海, 等. 220 kV三相共箱GIL振动响应与结构优化[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(11): 4503-4513.
- Zhang Xu, Lu Jie, Zhang Chaohai, et al. Vibration response and structural optimization of 220 kV three phase integrated enclosure GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(11): 4503-4513.
- [16] Duan D W, Ma H Z, Yang Q F, et al. Fault diagnosis of free-conducting particles within GIL based on vibration signals[J]. Frontiers in Energy Research, 2023(11): 1088549.
- [17] 屈 斌, 张 利, 王永宁, 等. 基于振动信号的GIS机械松动与局部放电诊断方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 98-106.
- Qu Bin, Zhang Li, Wang Yongning, et al. Study of mechanical looseness and partial discharge diagnoses of GIS based on vibration signals[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 98-106.
- [18] Hu Tianyu, Ma Hongzhong, Duan Dawei, et al. Novel GIL mechanical fault diagnosis method based on multi-sensor data feature fusion and TDEAVOA-ELM[J]. Computers and Electrical Engineering, 2024(119): 109573.
- [19] 杜志叶, 郝兆扬, 郝 乾, 等. 220 kV GIL复杂壳体结构振动传播特性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(2): 125-134.
- Du Zhiye, Hao Zhaoyang, Hao Qian, et al. Analysis on vibration propagation characteristics of 220 kV GIL complicated shell structure[J]. Journal of Hunan University Natural Sciences, 2022, 49(2): 125-134.
- [20] 徐爱华, 胡红波, 臧春艳, 等. GIL放电性故障的振动检测法研究[J]. 计量科学与技术, 2024, 68(4): 31-36.
- Xu Aihua, Hu Hongbo, Zang Chunyan, et al. Research on the vibration detection method for discharge faults in gas-insulated transmission lines(GIL)[J]. Metrology Science and Technology, 2024, 68(4): 31-36.
- [21] 张兆闯, 肖江滔, 屈文锋, 等. GIL故障定位声传播特性分析[J]. 水电与新能源, 2024, 38(11): 41-44.
- Zhang Zhaochuang, Xiao Jiangtao, Qu Wenfeng, et al. On the acoustic propagation characteristics of GIL for fault location[J]. Hydropower and New Energy, 2024, 38(11): 41-44.
- [22] Okutsu N, Takahashi Y, Matsuda S, et al. Pattern recognition of vibrations in metal enclosures of gas insulated equipment and its application[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(6): 2733-2739.
- [23] 冯俊宗, 孙利雄, 陈维维, 等. 不同运行状态下GIS隔离开关的振动响应特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4314-4322.
- Feng Junzong, Sun Lixiong, Chen Weiwei, et al. Vibration characteristics of GIS isolating switch under different operating conditions[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4314-4322.
- [24] R.克拉夫, J.彭津. 结构动力学[M]. 王光远等, 译. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Clough R, Penzien J. Dynamics of Structures[M]. Wang

Guangyuan, et al. Translate. Beijing: Higher Education Press, 2006.

何文宇(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事特高压GIL
管 线 振 动 特 性 与 损 伤 控 制 研 究 (E-mail :
hewenyu0509@163.com)。

杨振宇(1993—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事
电 力 设 备 抗 震 及 减 隔 震 技 术 研 究 (E-mail :
yang_zy@gzhu.edu.cn)。