

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.003

地质活动对长距离高落差 GIS/GIL 形变特性的影响规律

赵佳艺¹, 李平², 谭晓蕾¹, 李翔¹, 张乔根¹, 吴治诚¹

(1. 西安交通大学高能高功率脉冲电源全国重点实验室, 西安 710049; 2. 国家电网公司, 北京 100031)

摘要: 在高海拔、高落差等地形复杂区域, 地热、地质沉降及地震等地质活动会使气体绝缘开关设备(GIS)与气体绝缘输电线路(GIL)的形变与受力特性显著复杂化, 严重时引发开裂或塑性变形, 威胁气体绝缘输电系统安全运行。以 550 kV GIL 为例, 构建水平段、竖井段、斜井段及弯管段基本单元, 建立竖直落差 100 m、东西相距 40 m、南北相距 20 m 的长距离高落差整体管道模型, 将 3 类活动分别等效为温度荷载、管道土壤接触点强制形变荷载及各向惯性加速度荷载, 经多工况静态求解得到各节点形变。研究表明, 地热作用下直线段轴向形变随温度近似线性增长, 65 °C 时最大达 70 mm, 斜井段超 40 °C 后顶部出现过应力; 地质沉降下水平段轴向形变基本不变而竖向形变随沉降增大, 整体模型在沉降由 15 mm 增至 16 mm 时出现形变突变; 地震下垂直段最大形变达 12.77 mm, 远超水平段的 0.2 mm, 弯管结构表现出明显的减震与荷载分散作用。在此基础上, 基于熵权法探讨了膨胀节的较优安装位置, 高温下中部水平段布置改善效果较好。研究揭示了不同地质活动下 GIS/GIL 形变响应的规律差异, 可为复杂地形下 GIS/GIL 的结构设计与运行安全评估提供参考。

关键词: 气体绝缘输电线路; 气体绝缘开关设备; 长距离高落差; 地质活动; 形变特性

Influence of Geological Activity on Deformation Characteristics of GIS/GIL with Long-distance and Large Elevation Difference

ZHAO Jiayi¹, LI Ping², TAN Xiaolei¹, LI Xiang¹, ZHANG Qiaogen¹, WU Zhicheng¹

(1. National Key Laboratory for High Energy Pulsed Power, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: In topographically complex regions characterized by high altitude and large elevation difference, such geological activities as geothermal effects, geological subsidence, and earthquakes can substantially complicate the deformation and stress characteristics of gas-insulated metal-enclosed switchgear (GIS) and gas-insulated transmission line (GIL) and, in severe cases, induce cracking or plastic deformation, thereby threatening the safe operation of gas-insulated transmission systems. In this paper, a 550 kV GIL is taken as a case study, the basic units comprising horizontal sections, vertical shaft sections, inclined shaft sections, and elbow sections are constructed, and an integrated long-distance, high-elevation difference pipeline model is established with a vertical elevation difference of 100 m, an east-west span of 40 m, and a north-south span of 20 m. The three categories of geological activity are respectively equivalent to thermal loads, forced-deformation loads applied at pipeline-soil contact points and multi-directional inertial acceleration loads. The nodal deformations are then obtained through static solutions under multiple operating conditions. The results indicate that under geothermal action the axial deformation of straight sections increases approximately linearly with temperature, reaching a maximum of 70 mm at 65 °C, while the top of the inclined shaft section exhibits overstress beyond 40 °C. Under geological subsidence, the axial deformation of horizontal sections remains essentially unchanged whereas the vertical deformation increases with subsidence, and the integrated model exhibits an abrupt deformation transition as subsidence increases from 15 mm to 16 mm. Under seismic action, the maximum deformation of vertical sections reaches 12.77 mm, far exceeding the 0.2 mm observed in horizontal sections, and the elbow structures demonstrate a pronounced effect in vibration mitigation and load distribution. On this basis, the optimal installation position of the bellow is investigated using the entropy weight method.

收稿日期: 2026-03-22; 修回日期: 2026-05-21

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5500-202355794A-3-8-KJ)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5500-202355794A-3-8-KJ).

The results indicate that arranging the bellow in the middle horizontal section yields better improvement under high-temperature conditions. This study reveals the differences in the deformation response patterns of GIS/GIL under various geological activities, which can provide a reference for structural design and operational safety assessment of GIS/GIL in complex terrain conditions.

Key words: gas-insulated transmission line (GIL); gas-insulated metal-enclosed switchgear (GIS); long-distance high-drop; geological activity; deformation characteristics

0 引言

气体绝缘开关设备 (gas - insulated metal - enclosed switchgear, GIS) 与气体绝缘输电线路 (gas-insulated transmission line, GIL) 凭借敷设方式灵活、结构整体性强及电气性能稳定等优势, 已成为长距离高落差地形下电网输电的重要技术方案^[1-5]。受地形条件制约, 此类设备往往须穿越地热活跃区、地质沉降区及地震多发区, 在地热、地基不均匀沉降及地震动等地质活动的共同作用下, 其形变与受力特性显著复杂化^[6]。GIS/GIL 外壳约束强、内部元件布置紧凑, 对结构形变尤为敏感, 严重时引发壳体或绝缘件开裂乃至塑性变形, 破坏密封与绝缘性能, 威胁设备安全稳定运行^[7-9]。

围绕 GIS/GIL 等电气设备在地热作用、地质沉降及地震扰动等地质活动下的结构响应与抗形变性能开展系统研究, 已成为工程领域的重要关注方向。温度与地热方面, 现有研究主要集中于载流发热工况下 GIS/GIL 内部温度场的数值模拟与耦合分析。文[10]基于电—热—流多物理场耦合有限元法建立 252 kV GIS 模型, 分析了涡流损耗、趋肤效应下的温度场分布; 文[11]建立直流 GIL 绝缘件模型, 分析了负载电流、环境温度及气压的影响。除内部载流温升外, 外部环境温度变化对 GIS/GIL 结构形变的影响同样值得关注。文[12]指出, 在环境温度、太阳辐射及导体发热共同作用下, GIS 壳体热胀冷缩会在波纹管伸缩节两端造成位移, 超出补偿范围时即无法补偿; 文[13]建立了 GIL 热—流—力耦合有限元模型并搭建了 126 kV 实验平台, 表明 GIL 管道轴向热应变与负荷电流的平方及环境温度近似呈正相关。可见相关研究多聚焦载流温升与位移补偿, 外部地质热源对形变的影响仍待深入。

地质沉降方面, 针对不均匀沉降的有限元分析逐渐增多。文[14]建立 GIL 管道模型, 表明变形缝处沉降差最大、支架间距小处更易应力集中; 文[15-17]借鉴埋地管道研究, 分析了管土接触非线性下沉对管道变形的影响并提出简化模型。这些研究多侧重整体变形评估, 对单一管道不同节点施加差异化形变荷载的精细化分析尚不充分。

地震方面, 文[18]以 363 kV GIS 为对象, 基于响应谱法评估了套管支架的动力响应, 发现降低 GIS 重心可提升固有频率、避开地震卓越频率区, 从而增强抗震性能; 文[19-21]建立 GIL 三维模型, 采用反应谱法评价了 550 kV GIL 在多工况激励下的动力响应。然而, 上述对象多为走向单一的结构或局部部件, 对长距离高落差三维管系的地震形变响应仍缺乏针对性分析。

综上, 现有研究多针对单一地质活动, 缺乏对多类作用共同影响下结构形变响应的综合分析。站内 GIS 或短距离 GIL 多处同一水平面, 可近似按二维结构处理。而长距离高落差线路经水平段、竖井段、斜井段及多处弯头反复转折形成三维管系, 多种地质作用并存, 自重轴向分量与热、地震荷载相互耦合, 弯头处应力集中、变形显著, 危害远大于二维结构。因此有必要针对长距离高落差 GIS/GIL 的形变规律开展系统研究, 以厘清复杂地质环境下输变电设备的形变响应及薄弱环节。

文中以 550 kV GIL 为例, 通过将地热、地质沉降及地震 3 类典型地质活动等效为不同的荷载作用, 仿真计算了基础结构单元的节点形变分布, 并在此基础上获得了长距离高落差 GIS/GIL 的形变规律, 揭示了不同地质活动下 GIS/GIL 形变响应的内在规律差异。在此基础上, 针对膨胀节这一关键位移补偿元件, 文中结合熵权法对其在不同结构形式与温度工况下的较优安装位置进行了讨论, 以期复杂地形条件下 GIS/GIL 的结构设计、形变抑制与安全评估提供参考。

1 模型建立与计算方法

长距离高落差 GIL 管系的形变响应由结构几何构型、约束方式及外部地质荷载共同决定。本章先建立各基础结构单元及其组合的整体模型, 再针对地热、地质沉降及地震 3 类活动构建相应荷载工况并等效引入管系模型, 为多工况求解与形变分析奠定基础。

1.1 GIL 几何模型

GIL 管道尺寸按标准管材规格系列选取, 外径为 508 mm, 壁厚为 9.525 mm, 材料为铝, 绝缘介质为

SF₆, 内压为0.5 MPa^[13]。水平直线段长50 m, 见图1。首端固定为锚固基准, 沿轴向每5 m设节点, 每10 m布置滑动支座, 使管段竖向受支撑, 轴向可自由伸缩, 横向受限位约束, 钢—钢接触面摩擦系数取0.3。垂直直线段底部单点固定, 中段设四限位块, 与壳体留3 mm间隙并加聚四氟乙烯垫降摩擦。斜井段倾斜45°、垂直落差80 m、两端固定, 弯头处设弹簧支吊架。L形弯管以长边端口为主锚固端, 短边端口施加限位与支撑, 使热膨胀主要由弯管自身柔性吸收。坐标系中X、Z向为水平方向, Y向为竖直方向。

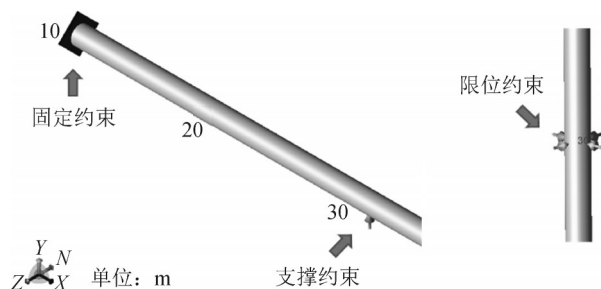
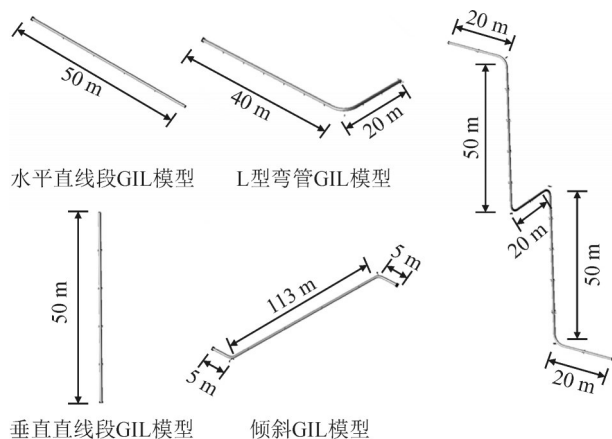


图1 各类约束示意图

Fig. 1 Schematic diagram of various constraint types

将上述单元组合, 构建含水平段、垂直段及L形弯管的长距离高落差GIL模型, 竖向落差100 m、东西相距40 m、南北相距20 m, 各转折弯头处设弹簧支吊架以补偿荷载集中与热形变, 见图2。



(a) 基本单元GIL模型 (b) 长距离高落差GIL模型

图2 各结构GIL模型

Fig. 2 GIL models of various structures

1.2 地质活动模拟方法

GIL长距离高落差敷设常穿越不同地质环境, 运行中受地热、地质沉降及地震等影响。本节对3类作用分别建立荷载工况, 通过温度变量、管土接触点强制形变荷载及各向惯性加速度荷载引入管系模型, 经多工况静态求解考察其形变响应。

1.2.1 地热工况

地热作用是随地质与季节缓变的外部热源, 变

化速率远低于设备热响应, GIS/GIL可视为准稳态热平衡。GIL外壳为薄壁铝结构, 导热系数高、壁厚小, 截面温差可忽略, 可近似为与环境同温的等温体。故通过调整环境温度模拟地热, 依地热场是否均匀分为恒温与温差两种情况^[22]。恒温下以5℃为梯度在-25~65℃内逐级取值, 标准荷载工况由重量W、温度T₁及压力P₁组合而成, 见表1。

表1 恒温环境荷载工况

Table 1 Constant-temperature environmental load condition

工况编号	工况定义	工况类型
L ₁	W+T ₁ +P ₁	操作荷载工况
L ₂	W+P ₁	持续荷载工况
L ₃	L ₁ -L ₂	膨胀荷载工况

表1中, 操作工况含重量、压力等一次荷载及形变、热膨胀等二次荷载, 可据以提取热形变; 持续工况仅含重力与压力等一次荷载, 与冷态安装一致; 膨胀工况取二者之差, 反映形变极值范围^[23], 由此剥离纯温度引起的热膨胀效应, 单独考察地热对二次应力与热形变的贡献。温差情况需进一步考虑T₁、T₂两组温度, L₆通过L₅-L₄得到, 重量与压力已相消, 为纯温差效应, 见表2。

表2 温差环境荷载工况

Table 2 Temperature-differential environmental loading condition

工况编号	工况定义	工况类型
L ₄	W+T ₁ +P ₁	操作荷载工况
L ₅	W+T ₂ +P ₁	操作荷载工况
L ₆	L ₅ -L ₄	膨胀荷载工况

1.2.2 地质沉降工况

软土地区如长江三角洲、珠江三角洲年沉降量常达10~30 mm, 基岩稳定地区则多为1~5 mm/a^[24-26], 故沉降范围取5、10、15、20 mm。沉降实际作用于管土接触支撑点而非整根管道, 据此在接触节点处施加形变荷载D_i以等效模拟, 使加载位置与沉降发生部位一致并保持模型结构完整^[27-28]。操作工况中计入形变荷载D_i, 可反映沉降与温度、压力等共同作用下的管系响应。与持续工况作差得到膨胀工况, 分离出沉降引起的附加形变与应力, 见表3。

表3 地质沉降荷载工况

Table 3 Geological settlement load condition

工况编号	工况定义	工况类型
L ₇	W+T ₁ +D _i +P ₁	操作荷载工况
L ₈	W+P ₁	持续荷载工况
L ₉	L ₇ -L ₈	膨胀荷载工况

1.2.3 地震工况

采用等效静力法分析地震荷载下 GIL 的形变响应,可反映不同方向惯性荷载的影响。为验证其适用性,对各基本单元作模态分析,前若干阶固有频率见表 4,均高于中国地震动卓越频率范围(约 1~10 Hz),结构整体偏刚,地震响应处于反应谱低放大段,故等效静力法结果偏保守、合理。

表 4 基本单元 GIL 模型主要固有频率

Table 4 Main natural frequencies of the basic-unit

基本单元	GIL models			Hz
	f_1	f_2	f_3	
水平直线段	15.568	15.568	27.284	
垂直接线段	15.088	15.088	15.088	
斜井段	10.116	11.724	35.150	
L 形弯管	12.615	12.833	25.201	
综合管道模型	13.905	14.344	14.344	

按 GB/T 50011—2010,竖向加速度取水平向的 2/3。据中国地震动参数区划图,中国峰值地面加速度大致在 0.05g~0.4g 区间^[29],以 0.05g 为梯度,将水平(X/Z)与竖向(Y)等效加速度以均布荷载施加于管系,工况见表 5。

表 5 地震荷载工况

Table 5 Seismic load condition

工况编号	工况定义	工况类型
L_{10}	$W+T_1+P_1$	操作荷载工况
L_{11}	$W+T_1+P_1+U_1$	操作荷载工况
L_{12}	$W+T_1+P_1+U_2$	操作荷载工况
L_{13}	$W+T_1+P_1+U_3$	操作荷载工况
L_{14}	$W+P_1$	持续荷载工况
L_{15}	$L_{11}-L_{10}$	偶然荷载工况
L_{16}	$L_{14}+L_{15}$	偶然荷载工况

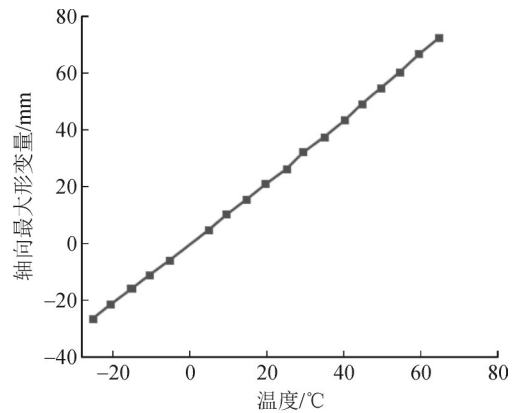
表 5 中, L_{11} 、 L_{12} 、 L_{13} 在 L_{10} 之上分别叠加 X、Z、Y 3 向的等效地震加速度 U_1 、 U_2 、 U_3 , L_{14} 为仅含重力与压力的持续工况。以 X 向为例,将 L_{11} 、 L_{10} 共有的重量、温度、压力抵消,仅留下由 U_1 单独引起的纯地震响应 L_{15} 。再将 L_{15} 叠加到 L_{14} 之上,即得 X 向偶然工况 L_{16} ,符合偶然荷载与持续荷载组合校核的要求^[23]。

2 不同地质活动对 GIL 基本单元应变特性的影响

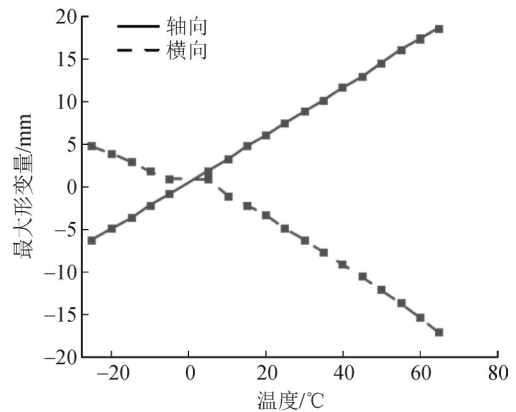
2.1 地热工况

水平直线段各节点轴向形变分布均匀,自由端形变最大,且随温度升高呈 1.05 mm/℃ 线性增长,垂直段规律与之一致,不随敷设方式改变。有温差时符合热膨胀理论,温差相同时最低温度越低则最大

形变越小、越高则增长越快。L 形弯管轴向、横向最大形变分别按 0.28、0.24 mm/℃ 线性增长,其最大形变节点位于约束较弱的长边终端,规律与水平段类似,见图 3。



(a) 水平直线段 GIL 模型



(b) L 形弯管 GIL 模型

图 3 不同构型 GIL 管道最大形变量随温度变化图

Fig. 3 Maximum deformation of GIL pipelines with different configurations as temperature changes

倾斜 GIL 模型结构更复杂,最大形变节点不再固定且随温度改变,单一节点形变随温度基本呈线性。以两端转角及中部节点为例,其 X 向与 Y 向形变随温度规律相反,Y 向普遍偏大;温度达 40 °C 后顶部端点出现过应力,见图 4。

2.2 地质沉降工况

水平直线段轴向形变不随沉降量改变,竖向形变则随沉降增大而增大。沉降小于 8 mm 时竖向受力及二次应力与沉降强正相关;超过 8 mm 后,土壤塑性变形、摩擦滑移与几何非线性协同使响应斜率下降趋稳或反向,进入荷载再分配阶段。L 形弯管轴向、横向形变不受沉降影响,其未加载节点的竖向形变随沉降增大,规律与水平段类似,见图 5。

地质沉降作用于垂直段顶部或底部时,轴向形变分布不一致。由于管道顶部为自由端,沉降荷载经底部传至自由端,因轴向刚度极大而形变均匀;作用于顶部时模型呈弹性压缩变形,各节点形变沿

轴向递减,形似弹簧压缩,见图6。

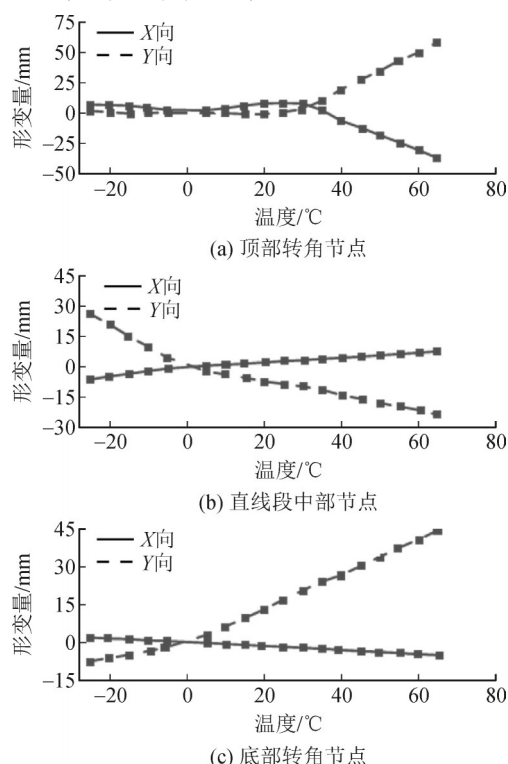


图4 不同温度下倾斜管道模型不同节点X向及Y向形变量
Fig. 4 X-and Y-direction deformations at different nodes of the inclined pipe model under various temperatures

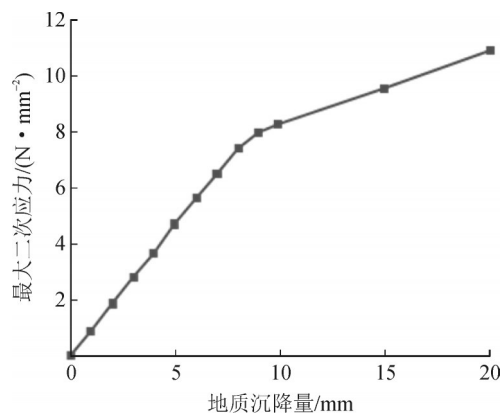


图5 水平直线段GIL管道模型沉降载荷下的最大二次应力响应曲线

Fig. 5 Maximum secondary stress response curve of horizontal straight GIL pipeline under settlement load

倾斜直线段GIL模型以各节点加载与未加载形变绝对值之差表征沉降调控效应见图7。由图7可知,沉降增强倾斜段中部及底端节点形变、削弱顶端附近节点形变,且沉降越大效果越强。

2.3 地震工况

水平直线段轴向形变对+X向加速度最敏感,约为Y向的8倍、Z向的4倍,表明轴向加速度主导轴向形变;其他两向仅激发横向弯曲或扭转模态,能量经滑动支座耗散,对轴向形变无直接贡献。垂直段

最大形变达12.77 mm,为水平段的几十倍,见图8。

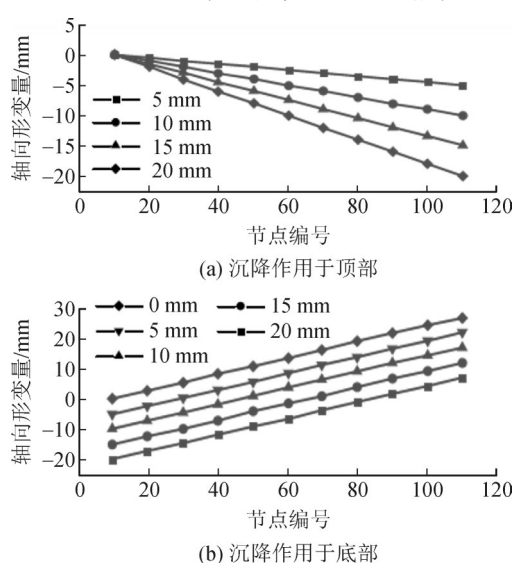


图6 不同沉降量下垂直直线段GIL管道模型轴向形变分布图

Fig. 6 Axial displacement distribution of vertical straight GIL pipeline under different settlements

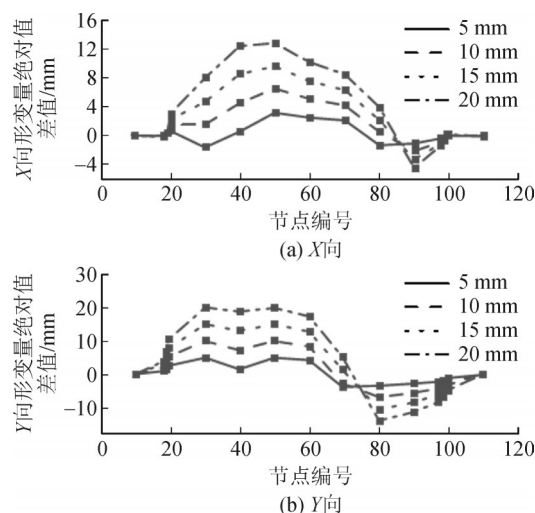


图7 不同沉降量下倾斜GIL管道模型各向形变分布图
Fig. 7 Directional displacement distribution of inclined GIL pipeline model under different settlements

倾斜GIL模型地震下各节点形变呈空间分异性。X向或Y向加速度作用下,各节点X、Y向形变趋势类似、近似上下对称,但X向较集中的节点群在Y向离散性更大,且加速度方向显著影响响应。

+X向作用下节点分两类,一类随节点线性增大但增速不一,对应倾斜段上半段、中点形变最大,另一类近似不变。-X向也分两类,一类近似为0(转角及附近节点),另一类反向增大并在0.15g处转折、增速变大。+Y向与-X向类似、转折点在0.25g,-Y向则与+X向相似,见图9。

Z向加速度正负仅改变该向形变正负,绝对值

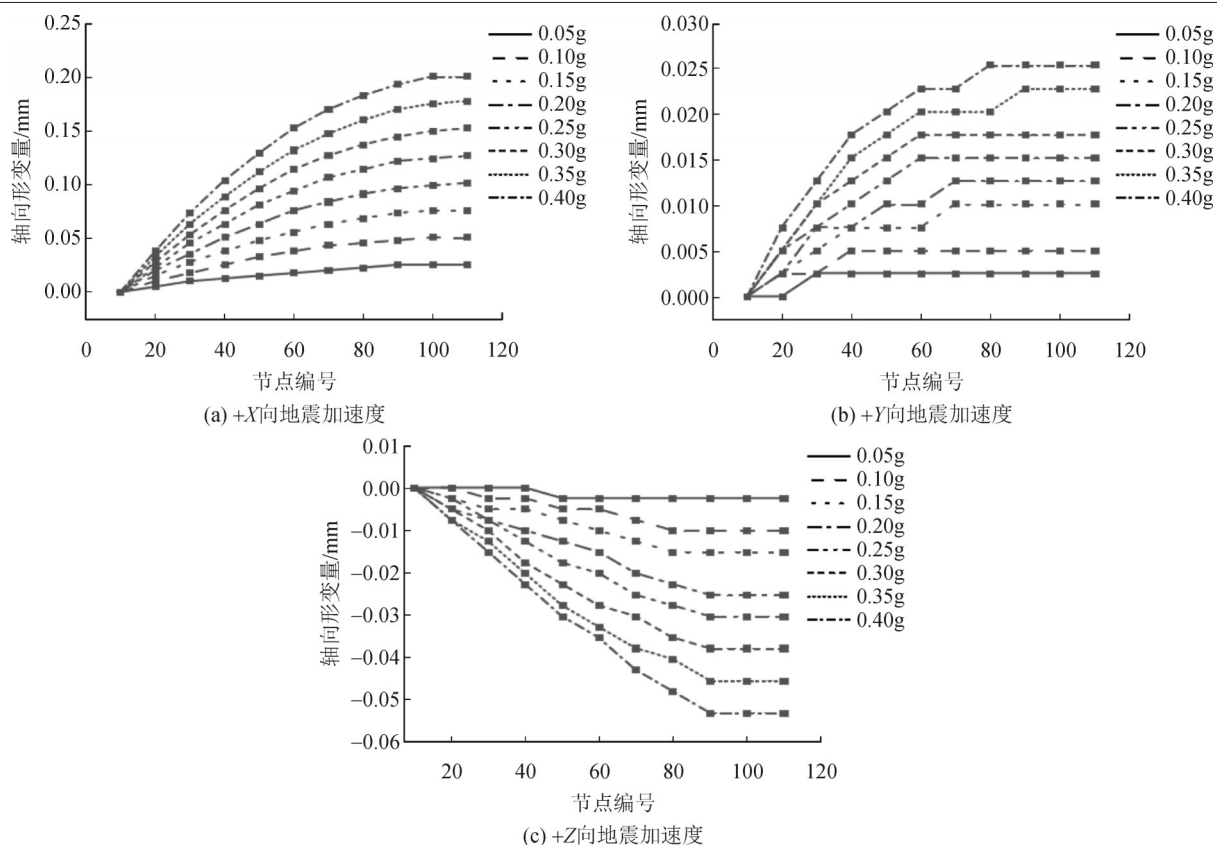


图8 多向地震载荷作用下水平直线段GIL管道模型形变分布图

Fig. 8 Deformation distribution of horizontal straight GIL pipeline under multi-directional seismic loads

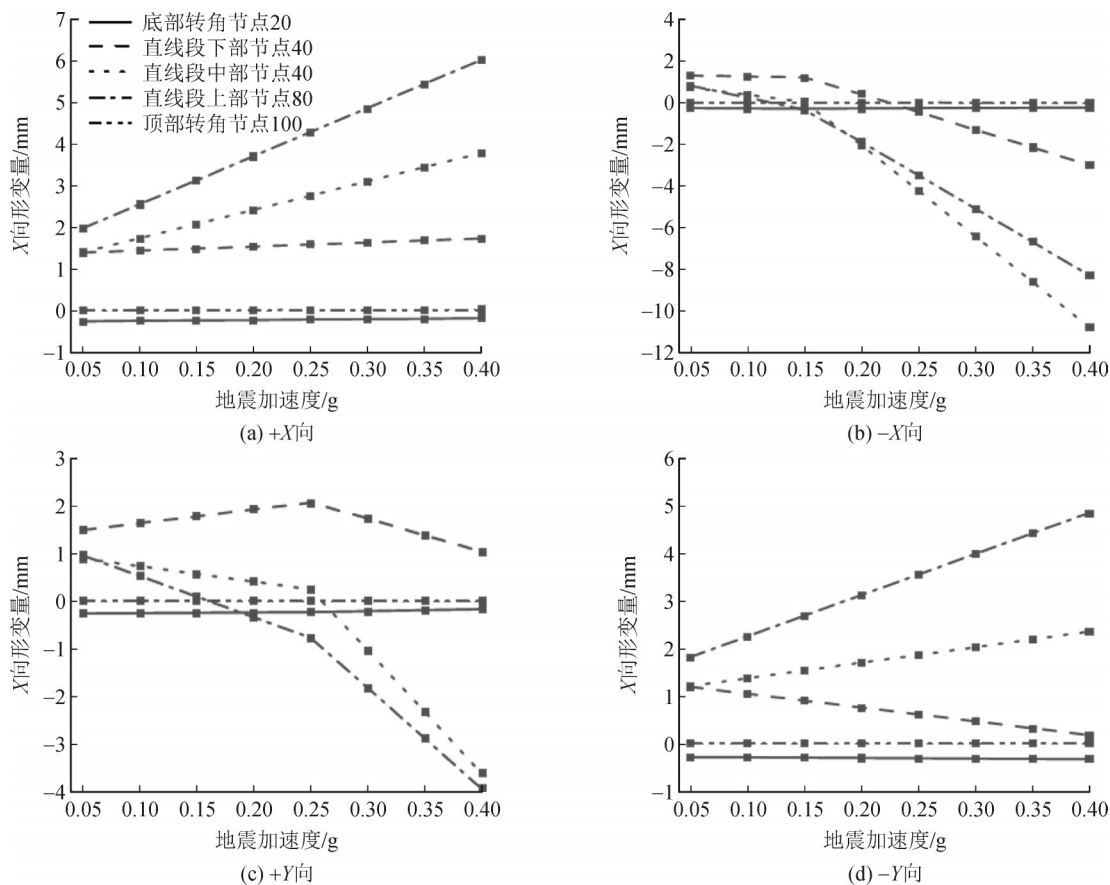


图9 多向地震载荷作用下倾斜GIL管道模型X向形变量分布图

Fig. 9 X-direction deformation distribution of inclined GIL pipeline under multi-directional seismic loads

不变;以+Z向为例,形变场呈反对称分布,见图10。

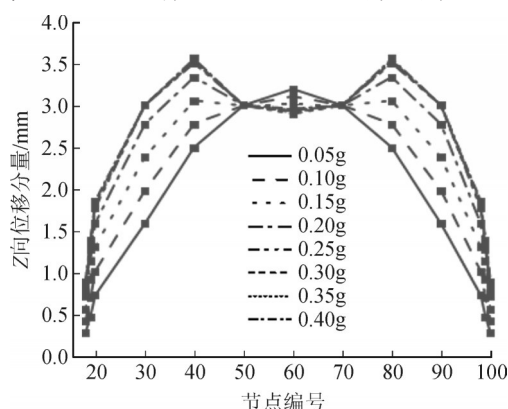


图10 +Z向地震加速度作用下倾斜GIL管道模型该向形变分布图

Fig. 10 Z-direction deformation distribution of inclined GIL pipeline under +Z-direction seismic acceleration

L形弯管的横向形变量显著小于直线段,其弯曲部分可有效分散并引导地震力,改变力的传递路径,减少直接作用的横向力,使横向形变显著降低^[30],见图11。



图11 +Z向地震加速度为0.3g时L形弯管结构形变图

Fig. 11 Deformation of L-shaped bend pipe under +Z seismic acceleration of 0.3g

为整体对比3类地质活动对不同结构GIL的影

响,将各基础结构单元的仿真结果汇总于表6,由表6可见三者影响差异显著且L形弯管在各类作用下均表现出明显的荷载分散作用。

3 长距离高落差GIL模型应变特性分析

长距离高落差GIL模型可视为水平段、垂直段及倾斜段等基础单元的组合,其多工况整体应变本质上是各单元响应的叠加与耦合。

地热工况下,基础GIL已表明直线段轴向形变随温度线性变化,符合热膨胀理论。在长距离高落差模型中,不同节点虽变化不一致,但趋势相似的节点沿对应方向的直线段聚集。故整体模型热致应变仍由各直线段线性热膨胀主导,仅在转折与连接处叠加重分配,呈分段相似、整体复杂的特征,见图12。

不同沉降量下各节点Y向形变分布类似,而沉降量从15 mm增至16 mm时,X向及Z向形变分布发生突变,与水平直线段在8 mm处应力突变的结论类似,说明地质沉降工况下GIL的形变量或者应力存在一个突变的临界值,见图13。

地震工况下,GIL模型各向形变量最大值主要受对应方向地震加速度影响。X向形变分布随加速度正负显著变化,中间段出现翻转;Y、Z向分布不受加速度方向影响,X向作用下形变集中稳定,Y、Z向作用下分散明显、负值加速度时更强,见图14。

表6 不同地质活动下各结构GIL模型的形变响应汇总

Table 6 Deformation responses of various GIL structural models under different geological activities

各结构GIL模型	地热(-25~65℃)	地质沉降(5~20 mm)	地震(0.05g~0.4g)
水平直线段GIL模型	轴向线性膨胀,最大形变量约70 mm	各向形变不显著,最大二次应力响应在8 mm处发生转折	最大形变量为0.2 mm
垂直直线段GIL模型	轴向线性膨胀,最大形变量约40 mm	作用于底部时,模型整体下移;作用于顶部,模型整体被压缩	最大形变量为12.77 mm
L形弯管GIL模型	轴向、横向近似线性膨胀,最大形变量约20 mm	各向形变不显著	各向形变不显著
倾斜GIL模型	最大形变节点不断发生变化,最大形变量约90 mm,40℃时出现过应力	模型中间段及底端节点形变量增大,顶端附近节点形变量减小	-X向加速度作用下部分节点形变量增速在0.15g处发生转折,+Y向在0.25g处

4 膨胀节较优安装位置讨论

长距离高落差GIL敷设中,因地形起伏大、跨距长,管道系统需承受多重复杂荷载^[31]。膨胀节通过

柔性变形吸收多维位移、释放约束应力,是保障GIL机械完整性的关键组件^[32~34],见图15。

L形弯管转折处应力集中、形变耦合最强,是膨胀节布置的关键薄弱环节;综合管道模型贴近工程

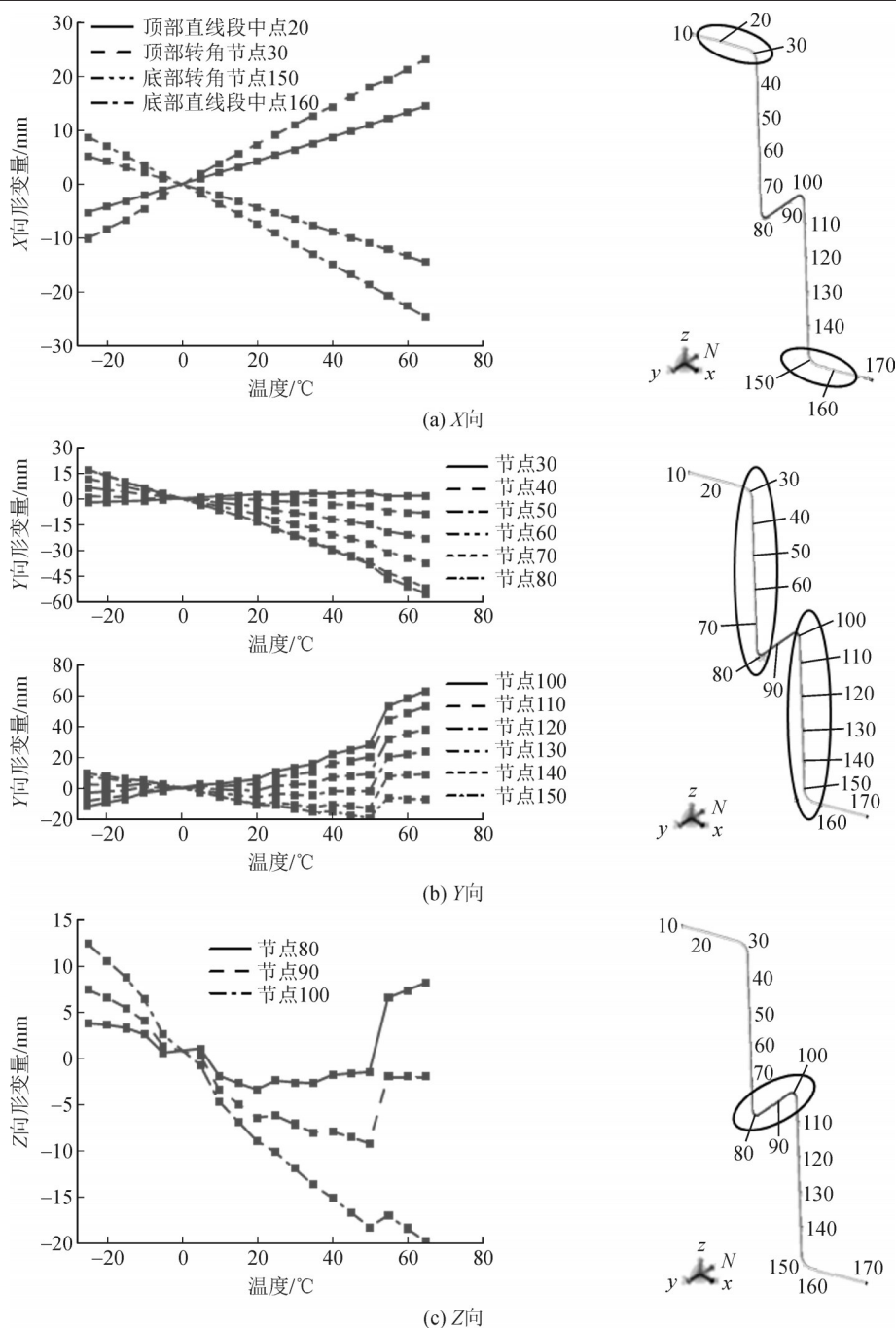


图12 不同温度下长距离高落差GIL管道模型各向直线段结构该向形变量分布图

Fig. 12 Distribution of directional displacement components for straight sections(in each direction) of a long-distance high-drop GIL pipeline model under different temperatures

实际,可在多节点、多工况下给出整体较优选位。先在L形弯管不同位置安装膨胀节,以加装后轴向、横向最大形变与对照组之差为衡量标准,综合可知长边中点效果较好。再以不同长短边比的L形弯管验证,长边中点均为较优安装位置,见图16。

对长距离高落差模型,以地热工况为对象,用熵权法基于未加膨胀节时-25~65℃共18组应变数据确定3个方向及各节点权重,再据此对加装后的

形变改善量评分,结果见图17。

膨胀节安装位置评分见表7。由表7可知,环境温度未达高温时,温差较大推荐在节点70加膨胀节,温差较小则在对应温度区间推荐节点处加装;高温下节点90即中间水平直线段中点添加膨胀节是较好的选择。

5 结论

文中将地热、地质沉降及地震3类地质活动等效

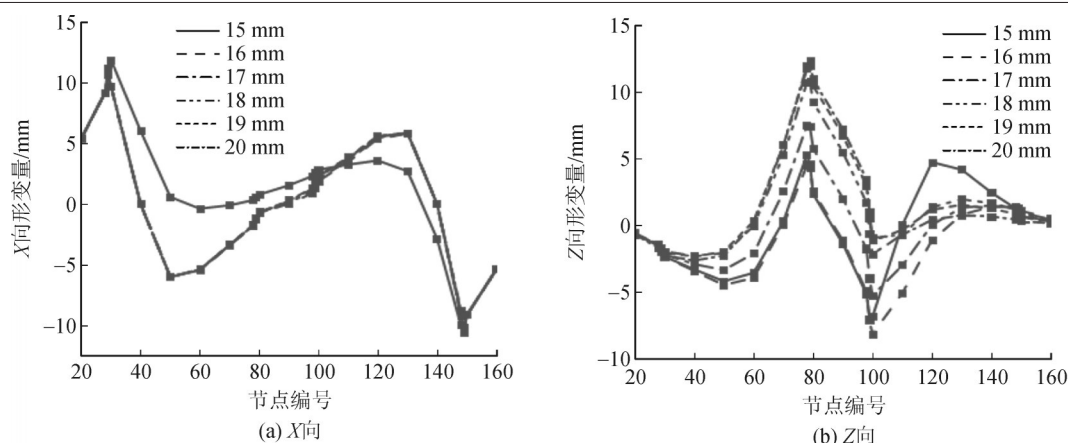


图13 不同沉降量下长距离高落差GIL管道模型各向形变量分布图

Fig. 13 Directional displacement distribution of long-distance high-drop GIL pipeline under different settlements

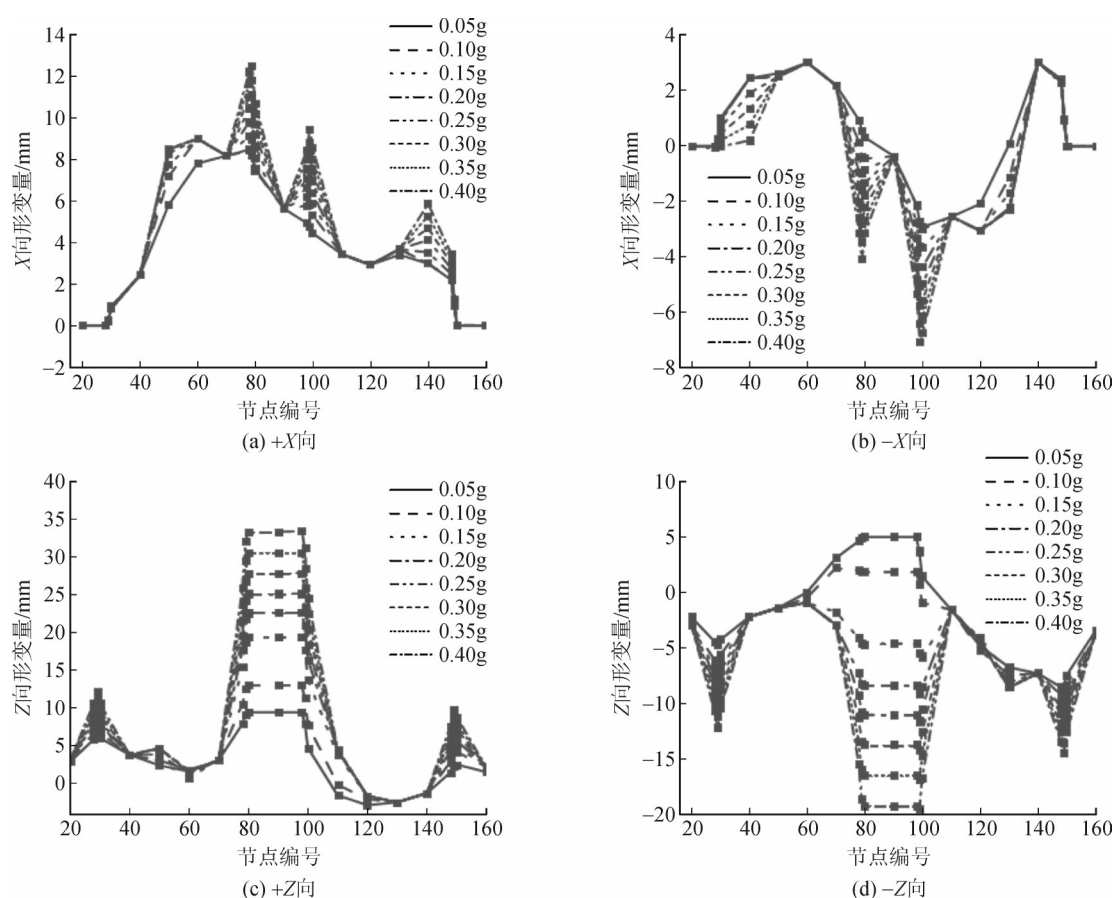


图14 多向地震载荷作用下长距离高落差GIL管道模型各向形变量分布图

Fig. 14 Directional displacement distribution of long-distance high-drop GIL pipeline under multi-directional seismic loads

为不同荷载, 仿真计算各基础单元节点位移分布, 进而获得长距离高落差GIL的整体形变规律, 结论如下。

1) 地热作用下, 各直线段沿轴向近似线性热膨胀, 是3类活动中形变量级最大者, 最大轴向形变达70 mm。倾斜段因自重轴向分量与热膨胀耦合, 受力较直线段更不利, 40℃时顶部端点即出现过应力, 是热致变形的薄弱处, 设计中应重点补偿与防护。

2) 地质沉降下, 各节点Y向形变分布接近、受沉降影响小, 而沉降由15 mm增至16 mm时X向与Z向形变分布突变, 与水平段8 mm处应力突变一致。表明沉降下GIL形变与应力存在突变临界值, 超过后管系进入荷载再分配阶段、响应明显恶化。

3) 地震作用下, 各向形变主要受对应方向加速度控制, 横向尤为敏感, 垂直段横向最大形变达12.77 mm, 远超水平段轴向的0.2 mm。X向位移随

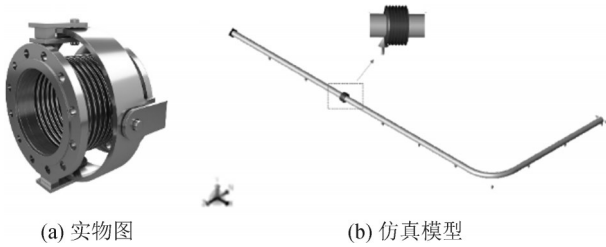


图15 膨胀节实物图及仿真模型

Fig. 15 Physical photo and simulation model of the expansion joint

加速度方向显著变化、中间段翻转;弯管结构在各类地震荷载下形变均小,减震与荷载分散作用明显,抗震性能较优。

4)长距离高落差 GIL 整体形变可视为各基础单元响应的叠加与耦合,趋势相似的节点沿对应方向直线段聚集,仅在转折与连接处叠加重分配,呈分段相似、整体复杂的特征,验证了以基础单元分解复杂三维管系的有效性。

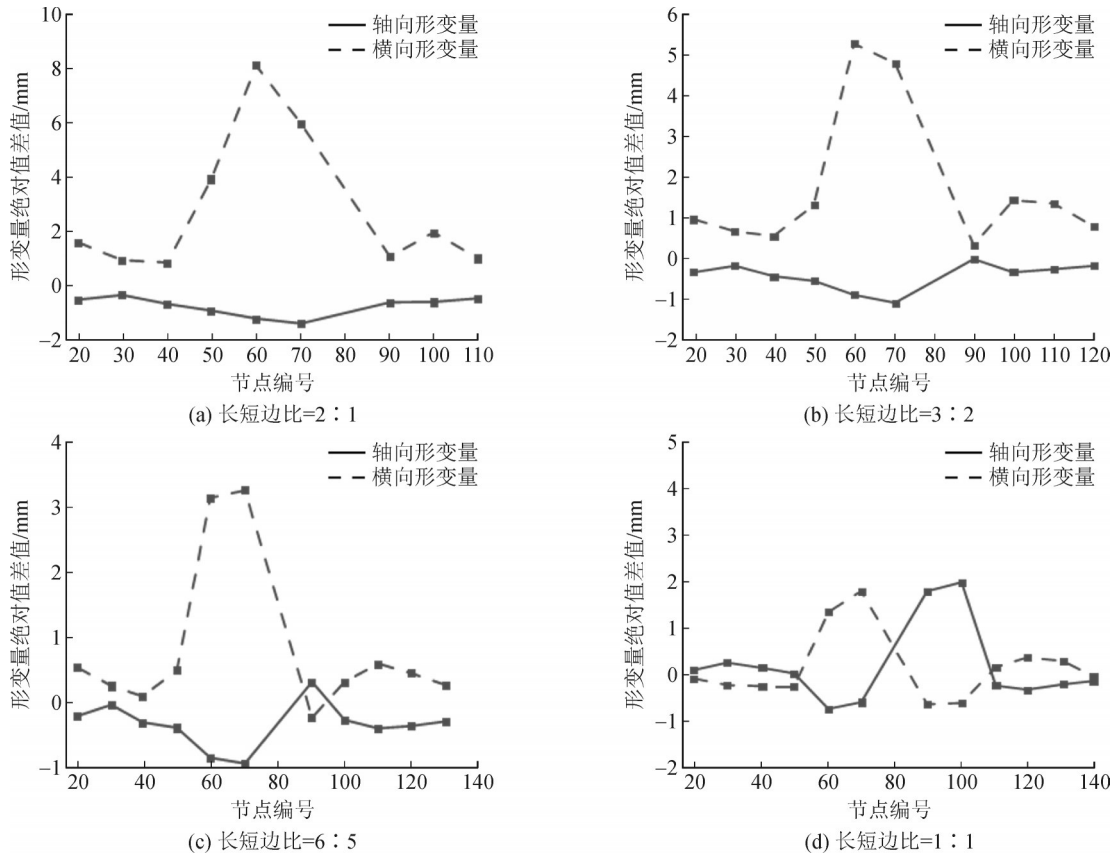


图16 不同长短边比下膨胀节改善L形弯管 GIL 模型形变量随安装位置变化图

Fig. 16 Deformation improvement of L-shaped GIL bend by expansion joint position for different arm ratios

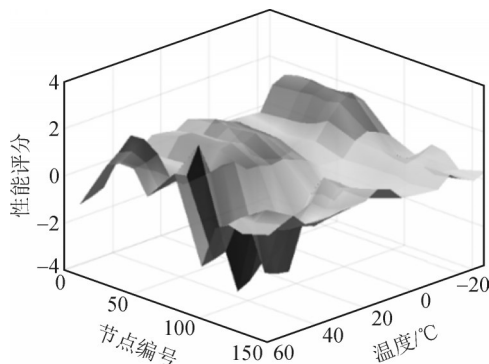


图17 长距离高落差 GIL 模型膨胀节位置评分三维决策平面

Fig. 17 3D decision plane for expansion joint position scoring in long-distance high-drop GIL model

表7 膨胀节安装位置评分

Table 7 Expansion joint installation position score

温度区间	推荐节点	平均评分	推荐节点	峰值评分
极低温(-25~-15 °C)	70	1.800 0	70	2.052 8
低温(-10~5 °C)	70	0.740 0	20	1.223 4
常温(10~35 °C)	70	1.540 0	40	1.781 9
高温(40~65 °C)	90	2.000 0	90	2.963 0

5)膨胀节的改善效果与安装位置密切相关,L形弯管中长边中点为优选位置;长距离高落差综合模型的推荐安装节点随温度区间而变,高温下中部水平段设置效果较好。

参考文献:

- [1] Mehta K, Ehrenwirth M, Zörner W, et al. Need of energy transition at roof of the world: correlative approach to interpret energy identity of high-altitude central Asian communities[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2023(76): 101271.
- [2] Koch H, Schuette A. Gas insulated transmission lines for high power transmission over long distances[J]. *Electric Power Systems Research*, 1998, 44(1): 69-74.
- [3] 杨剑锋, 杨建国, 马玉慧. 基于GIS和VR技术的输电线路巡线可视化研究及应用[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(1): 151-156.
Yang Jianfeng, Yang Jianguo, Ma Yuhui, et al. Visualization research and application of transmission line inspection based on GIS and VR technology [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(1): 151-156.
- [4] 吴泽华, 程建伟, 吴宝英, 等. 基于数据驱动的三相共箱GIL温度场分布快速计算方法[J]. *高电压技术*, 2025, 51(1): 110-122.
Wu Zehua, Cheng Jianwei, Wu Baoying, et al. Data-driven fast calculation method for temperature field distribution of three-phase compact GIL[J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(1): 110-122.
- [5] 高一波, 郑志曜, 冯亮, 等. 基于指标精简的GIS设备运行安全绝缘状态评价指标提取方法[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(9): 107-115.
Gao Yibo, Zheng Zhiyao, Feng Liang, et al. The extraction method of evaluation index of safety insulation status of GIS equipment operation based on simplified indicators[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(9): 107-115.
- [6] Li Xiaoxuan, Xie Qiang, Wen Jiayi. Seismic performance evaluation and retrofit strategy of overhead gas-insulated transmission lines[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020(165): 105840.
- [7] Du Baoshuai, Zhang Zhongwen, Su Shuai, et al. Failure analysis of cracking in aluminum alloy shell of a 220 kV gas insulated switchgear[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 714(4): 042003.
- [8] 李旭, 郝建, 李滢, 等. 变频电流激励下GIS隔离开关机械缺陷的振动非线性行为及其辨识方法[J]. *高电压技术*, 2024, 50(2): 579-589.
Li Xu, Hao Jian, Li Ying, et al. Nonlinear vibration behavior and identification method for GIS disconnecter looseness mechanical defect under variable frequency currents excitation[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(2): 579-589.
- [9] 李滢, 郝建, 丁屹林, 等. 基于多模态组合振动图像与堆叠稀疏自编码器的GIS设备机械缺陷诊断方法[J]. *高电压技术*, 2025, 51(2): 753-765.
Li Ying, Hao Jian, Ding Yilin, et al. Mechanical defect diagnosis method of GIS equipment based on multi-modal combined vibration image and stacked sparse autoencoder[J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(2): 753-765.
- [10] Gao Baoming, Li Zhengyu, Gao Jinwen, et al. The simulation study on temperature field distribution of 220 kV gas insulated switchgear [J]. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2021, 16(5): 797-805.
- [11] Li Xiaoxuan, Wan Mingde, Wang Wei, et al. Temperature and electric field distribution of tri-post insulator in DC-GIL based on numerical multiphysics modelling[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2023, 17(5): 1232-1242.
- [12] 杨勇, 张路. 单式轴向型波纹管在126 kV气体绝缘封闭开关设备母线中的应用研究[J]. *电气技术*, 2019, 20(11): 82-87.
Yang Yong, Zhang Lu. Application of single axial bellows in 126 kV gas insulated switchgear[J]. *Electrical Engineering*, 2019, 20(11): 82-87.
- [13] 王健, 陈超, 李庆民, 等. 基于热力耦合分析的GIL热致伸缩特性及其影响因素[J]. *高电压技术*, 2017, 43(2): 429-437.
Wang Jian, Chen Chao, Li Qingmin, et al. Thermal-induced flexible property of gas insulated lines and influencing factors based on thermal mechanical coupling analysis[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(2): 429-437.
- [14] 杨帅, 杨毅, 罗向源, 等. 不均匀沉降对气体绝缘封闭线路的影响研究[J]. *高压电器*, 2025, 61(1): 96-103.
Yang Shuai, Yang Yi, Luo Xiangyuan, et al. Study on influence of nonuniform settlement on gas insulated transmission line[J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(1): 96-103.
- [15] 马小明, 康逊. 埋地管道不均匀沉降的应力及影响因素分析[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(8): 45-52.
Ma Xiaoming, Kang Xun. Analysis on stress and influence factors of buried pipelines under uneven settlement[J]. *Journal of Chongqing University(Natural Science Edition)*, 2017, 40(8): 45-52.
- [16] 巴振宁, 王智恺, 梁建文. 温度和不均匀沉降耦合作用下埋地管道力学性能[J]. *油气储运*, 2018, 37(10): 1097-1103.
Ba Zhenning, Wang Zhikai, Liang Jianwen. Mechanical properties of buried pipeline under the coupling effect of temperature and uneven settlement[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2018, 37(10): 1097-1103.
- [17] 许利惟, 刘旭, 陈福全. 塌陷作用下埋地悬空管道的力学响应分析[J]. *工程力学*, 2018, 35(12): 212-219.
Xu Liwei, Liu Xu, Chen Fuquan. Mechanical analysis of buried suspended pipeline under the action of collapse[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(12): 212-219.
- [18] 高洋, 沈丰慧. GIS抗震性能仿真分析研究[J]. *浙江电力*, 2021, 40(12): 103-110.
Gao Yang, Shen Fenghui. Simulation and analysis on seismic performance of GIS[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2021, 40(12): 103-110.
- [19] Li Haoran, Zhou Jin, Wang Zemin, et al. Gas insulated metal enclosed transmission line(GIL) seismic response analysis[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2024, 2731(1): 012021.
- [20] 孙靖云, 陈利琼, 夏燕, 等. 地震载荷工况下隧道内油气管道应力分析研究[J]. *应用力学学报*, 2017, 34(4): 795-801.
Sun Jingyun, Chen Liqiong, Xia Yan, et al. Stress analysis of oil and gas pipelines in tunnels under seismic loading conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2017, 34(4): 795-801.
- [21] 樊苏楠, 闫相祯. 地震载荷作用下长输管线穿越断层应变设计[J]. *石油机械*, 2015, 43(12): 114-118.
Fan Sunan, Yan Xiangzhen. Strain design of long-distance pipelines crossing faults under seismic loading[J]. *China Petroleum Machinery*, 2015, 43(12): 114-118.
- [22] 乔宇娇, 唐泽华, 高鹏, 等. 不同环境因素下GIL温度场分布特性研究[J]. *电力工程技术*, 2020, 39(3): 136-143.
Qiao Yujiao, Tang Zehua, Gao Peng, et al. Distribution characteris-

- tics of GIL temperature field under different environmental factors [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2020, 39(3): 136-143.
- [23] ASME B31.3—2022 Process piping[S].
- [24] 薛禹群, 张云. 长江三角洲南部地面沉降与地裂缝[J]. 华东地质, 2016, 37(1): 1-9.
- Xue Yuqun, Zhang Yun. Ground subsidence and ground fissures in the southern yangtze river delta[J]. East China Geology, 2016, 37(1): 1-9.
- [25] 王双, 严学新, 揭江, 等. 珠江三角洲平原区地面沉降影响因素分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(5): 98-104.
- Wang Shuang, Yan Xuexin, Jie Jiang, et al. Analysis on factors affecting ground settlement in plain area of pearl river delta[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(5): 98-104.
- [26] 梁景才. 珠江三角洲平原区地面沉降成因机理分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(5): 162-165.
- Liang Jingcai. Analysis on the causes of land subsidence in the pearl river delta plain[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2022, 45(5): 162-165.
- [27] Kouretzis G P, Karamitos D K, Sloan S W. Analysis of buried pipelines subjected to ground surface settlement and heave[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(8): 1058-1071.
- [28] Imura S. Simplified mechanical model for evaluating stress in pipeline subject to settlement[J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(6): 469-479.
- [29] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范(2016年版)[S].
- GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings(2016 edition)[S].
- [30] Vazouras P, Karamanos S A. Structural behavior of buried pipe bends and their effect on pipeline response in fault crossing areas [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, 15(11): 4999-5024.
- [31] Li Xiaoxuan, Xie Qiang, Fan Shenggang, et al. Seismic evaluation of gas insulated lines(GIL) based on a newly defined key control metric and a simplified theoretical model[J]. Engineering Structures, 2025(345): 121466.
- [32] 陈允, 崔博源, 韩先才, 等. 特高压 GIL 用伸缩节的研制及型式试验[J]. 高压电器, 2022, 58(2): 164-170.
- Chen Yun, Cui Boyuan, Han Xiancai, et al. Development and type test of expansion joint for UHV GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 164-170.
- [33] 徐长福, 赵新冬, 梁伟, 等. 基于数字孪生技术的 GIL 综合管廊气体泄漏与排除全过程风险性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 160-171.
- Xu Changfu, Zhao Xindong, Liang Wei, et al. Risk assessment of gas leakage and elimination in GIL utility tunnels based on digital twin technology[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 160-171.
- [34] Dong Xuzhu, Cai Li. The proceedings of 2023 4th international symposium on insulation and discharge computation for power equipment (IDCOMPU2023): volume I[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024.
- 赵佳艺(2004—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为 GIL 外壳的形变响应特性(E-mail: 2215122505@stu.xjtu.edu.cn)。
- 吴治诚(1993—), 男, 博士, 副教授, 博导, 主要从事 GIS/GIL 设备绝缘可靠性评估提升及先进电工环材料制备与研发的研究工作(通信作者)(E-mail: hvzcwu@xjtu.edu.cn)。

(上接第 14 页)

- Li Jin, Chen Siyuan, Du Boxue. Curing residual stress and forming reliability of oversized GIL tri-post insulators: a review[J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(4): 376-388.
- [76] Ono K. Ultrasonic attenuation of engineering materials[J]. Applied Sciences, 2020, 10(12): 2230.
- [77] Zheng Yao, Hao Yanpeng, Liu Lin, et al. An ultrasonic nondestructive testing method for density uniformity of basin-type insulators in GIS[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021(70): 1-8.
- [78] Guo Chenjun, Xu Wenlong, Cai Mingming, et al. A review: application of terahertz nondestructive testing technology in electrical insulation materials[J]. IEEE Access, 2022(10): 121547-121560.
- [79] Li Yu, Xie Congzhen, Gou Bin, et al. Terahertz detection of interface defects within composite insulators using a gated recurrent neural network[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(2): 704-712.
- [80] Gao Tianfang, Wang Yishou, Qing Xinlin. A new laser ultrasonic inspection method for the detection of multiple delamination defects[J]. Materials, 2021, 14(9): 2424.
- [81] 贾文达, 曹志伟, 王继豪, 等. GIS 操作电磁骚扰的三维全波仿真及电弧模型影响分析[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 134-142.
- Jia Wenda, Cao Zhiwei, Wang Jihao, et al. Effect of the arc model on electromagnetic interference caused by GIS switch operations in 3D full wave simulation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 134-142.
- [82] Cao Tienan, Cui Yufei, Tan Haotian, et al. Research on a degradation identification method for GIS UHF partial discharge sensors based on S-parameters[J]. Sensors, 2025, 25(22): 6860.
- [83] Jing Qianzhen, Yan Jing, Lu Lei, et al. A novel method for pattern recognition of GIS partial discharge via multi-information ensemble learning[J]. Entropy (Basel, Switzerland), 2022, 24(7): 954.
- [84] Mahdi A S, Abdul-malek Z, Arshad R N. SF₆ decomposed component analysis for partial discharge diagnosis in GIS: a review[J]. IEEE Access, 2022(10): 27270-27288.
- [85] Zhou H, Ma G, Wang Y, et al. Optical sensing in condition monitoring of gas insulated apparatus: a review[J]. High Voltage, 2019, 4(4): 259-270.
- 贺春(1976—), 男, 硕士研究生, 正高级工程师, 主要研究方向为输变电设备状态检测、评价与故障诊断研究(E-mail: chun.he@tj.sgcc.com.cn)。
- 赵思源(1998—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为断路器开断技术、输变电设备状态检测研究(通信作者)(E-mail: zhaosiyuan2357@qq.com)。