

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.002

基于生死单元法的GIS设备安装过程温度效应研究

王仕俊^{1,2}, 武慧颖², 王星¹, 平常¹, 蔡建国²

(1. 国网甘肃省电力公司, 兰州 730000; 2. 东南大学土木工程学院, 南京 211189)

摘要: GIS设备在安装过程中外部温度环境复杂多变,对其安装定位偏差及构件内力有着不可忽略的影响,将造成安装完成状态与设计状态的较大差异。依托某实际变电站工程,结合工程所在地的温度环境,建立4种不同的温度变化工况,采用基于时变力学的生死单元法对GIS设备安装过程进行有限元仿真分析,研究安装过程温度效应对结构位移及应力的影响。仿真结果表明:安装过程中的环境温度变化对GIS设备间隔位移偏差产生累积效应,位移偏差将会影响安装中定位需求;设备支座采用螺栓连接,刚度较小,在温度效应明显时无法协调上部结构和下部支架的变形;安装过程中随温度变化,筒体应力相应变化但应力值较小,螺栓内力相对较大,安全余量较小。研究结果将为GIS设备结构的安装环境控制和结构优化奠定基础。

关键词: GIS设备; 生死单元法; 温度; 误差分析

Study on Temperature Effect of Installation Process of GIS Based on Birth and Death Element Method

WANG Shijun^{1,2}, WU Huiying², WANG Xing¹, PING Chang¹, CAI Jianguo²

(1. State Grid Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou 730000, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The complex and variable external environment temperature in the installation process of GIS has a non-negligible impact on the installation positioning deviation and internal forces of structure part, causing a large difference between the complete installation state and the design state. Based on an actual substation project and in combination with the local temperature environment of the project, four different temperature variation conditions are set up. The birth and death element method based on the time-varying mechanics is adopted for the finite element simulation analysis of the installation process of GIS and the influence of temperature effect on structural displacements and stress during the installation process is studied. The simulation results show that the temperature variation in the installation process has a cumulative effect on the displacement deviation of GIS bays, and the displacement deviation will affect the installation positioning requirements. The base is connected by the bolt with less rigidity which, in case of significant temperature effect, has no way to coordinate the deformation of the upper structure and the lower frame. With the temperature variation during the installation period, the stress of the enclosure varies correspondingly but with small stress value, relative large internal force of bolt and small safety margin. The study result will lay the foundation for control of installation environment structure optimization for the GIS structure.

Key words: GIS; birth and death element method; temperature; deviation analysis

0 引言

随着城镇化进程的加快和用电需求的激增,电

力系统及变电设备迎来迅猛发展的阶段。近年来,气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)因其具有占地面积小、可靠性高、安装方便等优势逐步代替传统变

收稿日期:2024-08-12; 修回日期:2024-10-20

基金项目:甘肃省青年科技基金计划项目(20JR5RA079)。

Project Supported by the Natural Science Foundation of Gansu Province(20JR5RA079).

电设备而广泛应于电力系统。GIS设备零件众多、结构复杂、内部封装GIS气体,一旦发生故障,存在检修困难大,修复时间长的问题。GIS设备虽然在经济上具有巨大优势,仍缺乏足够的使用和设计经验。现在关于GIS设备的研究主要集中在状态诊断^[1-6]、检测技术^[7-8]及结构分析^[9-15]等方面。鉴于GIS设备主构件的可靠性对整个电力系统具有关键性影响,相关学者对GIS设备结构的工作性能^[9-13]、抗震性能^[14-15]、避雷分析^[16]、智能化研究^[17]等均进行了研究。

GIS设备工作环境多变,作为影响GIS设备主构件受力的重要因素之一,环境的温度效应可能导致规模庞大、结构复杂的GIS构件产生次生内力。尤其在温差较大的西部地区,温度效应明显,可能会造成设备局部应力过大从而产生裂隙,引发严重事故。在GIS温度效应研究方面,蒋玲^[18]等分析了高温温差工况下GIS的设备产生振动关系,进而得出温况间接导致GIS内部的接触不良。吴旭涛^[19]针对GIS隔离开关借助外壳温升、环境温度和风速三者的数值关系,提出GIS间隔开关的温度计算公式。罗宏建等^[20]基于某500 kV变电站GIS设备模拟不同温度下整体GIS管道母线的应力与应变并与监测数据进行比较。在针对温度效应的补偿措施研究中,王轶慧^[21]讨论了750 kV母线筒的支撑滑块在温度下的作用。为应对西北的环境,针对长母线筒,张烁^[22]等提出滑动支撑和波纹管相结合的方式补偿温度损失。杨志轶^[23]利用有限元方法验证了柔性支座处理热胀冷缩的有效性。沈小军等^[24]应用Abaqus得出GIS波纹管参数对于补偿量和应力的影响,并对波纹管的布置提供了指导。贾耿锋等^[25]分析GIS变形的影响因素,为GIS波纹管的伸缩量计算提供思路。龚源等^[26]分析伸缩节预留缝,母线拉杆设置和端部支撑对于母线裂缝的影响。上述针对GIS设备温度效应相关的研究成果,主要集中于GIS设备安装完成后的整体形态分析,缺乏安装过程中环境温度变化对成形态的力学影响研究。

另外,根据统计,GIS设备安装施工问题引发的故障占比达到46%,当忽略安装过程本身及安装过程中环境的影响时,容易造成GIS设备实际成形态与设计态的力学差异。因此为确保GIS设备的安全性及稳定性,首要即严控安装施工质量。根据GIS安装以及GIS事故的经验总结,已有相关研究人员针对GIS设备安装过程提出了不少技术要求^[27-28]。对于安装状态、气候环境等因素导致的母线筒体位移及部分区域应力集中问题,大多数研究成果只对GIS设备安装施工过程的误差控制提出了要求,缺

乏基于GIS设备安装过程分析的定量研究,且未考虑安装过程中环境变化产生的GIS设备安装过程累积误差。

在GIS设备的实际现场安装与施工过程中,安装对象、荷载约束条件不断变化,这种动态的安装过程属于时变力学分析的范畴,无法再采用时常力学的分析方法进行仿真计算。基于时变力学分析的生死单元法已在建筑结构领域具有较多研究成果^[29-30],但在GIS设备安装过程中应用尚无广泛应用。另外,由于在安装过程中存在环境温度的变化,导致安装过程中不仅存在竖向荷载作用,还存在水平向的结构位移变化。因此,通过分析GIS设备安装过程中的力学状态,考虑分析步中的温度效应影响,最终得到成形后定量化的误差累积,将对GIS设备的安装工艺提供理论与技术支撑,对电力系统安全稳定运行以及社会经济效益具有至关重要作用。

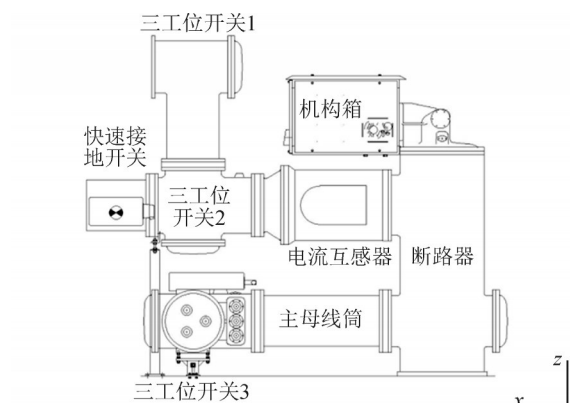
文中依托于某110 kV卓尼变电站工程结构安装与施工过程,采用有限元软件Abaqus,利用生死单元法对GIS设备的施工安装过程进行力学模拟,考虑环境温度的变化,计算不同温度工况下安装过程的位移偏差和应力状态,分析其变化趋势,为GIS设备结构的安装和工作环境控制和结构优化提供指导。

1 工程概况

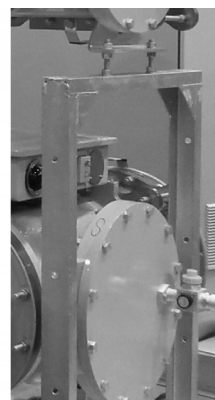
文中依托于某110 kV变电站,地处青藏高原东北边缘卓尼县。卓尼全年最高温度33.5℃,最低温度-19.2℃,温差最高可达50℃以上。按月份统计日均高低温差可达20℃,但根据月份中的历史最高最低气温,其温差高达40℃,因此按全年及月份温度综合考虑最不利情况,文中采用50℃的环境温差。项目在安装过程中存在环境温度变化影响。为简化变量,提取关键性指标,在卓尼变电站的基础上,对项目进行简化和模型调整。文中仿真的主要目的是衡量结构在安装环境温度变化下的支座位移偏差,不考虑波纹管在安装过程中的调节作用。文中的整体分析模型由4个相同的110 kV间隔和3个2.5 m长的母线筒组成。单个间隔设备由快速接地开关,三工位开关,电流互感器,盘式绝缘子,断路器,机构箱,主母线筒等组成,全长3.75 m,宽0.8 m,其结构组成见图1(a),安装见图1(b),单个GIS间隔组件的详细几何参数见图1。间隔设备支座采用螺栓连接支架,架板件厚度20 mm,连接螺栓直径16 mm;法兰厚度30 mm,内径446 mm,外径

565 mm。间隔材料以铝合金 5052-H112 为主, 支架采用 Q235A, 螺栓采用碳钢(8.8 级螺栓)。法兰和盘

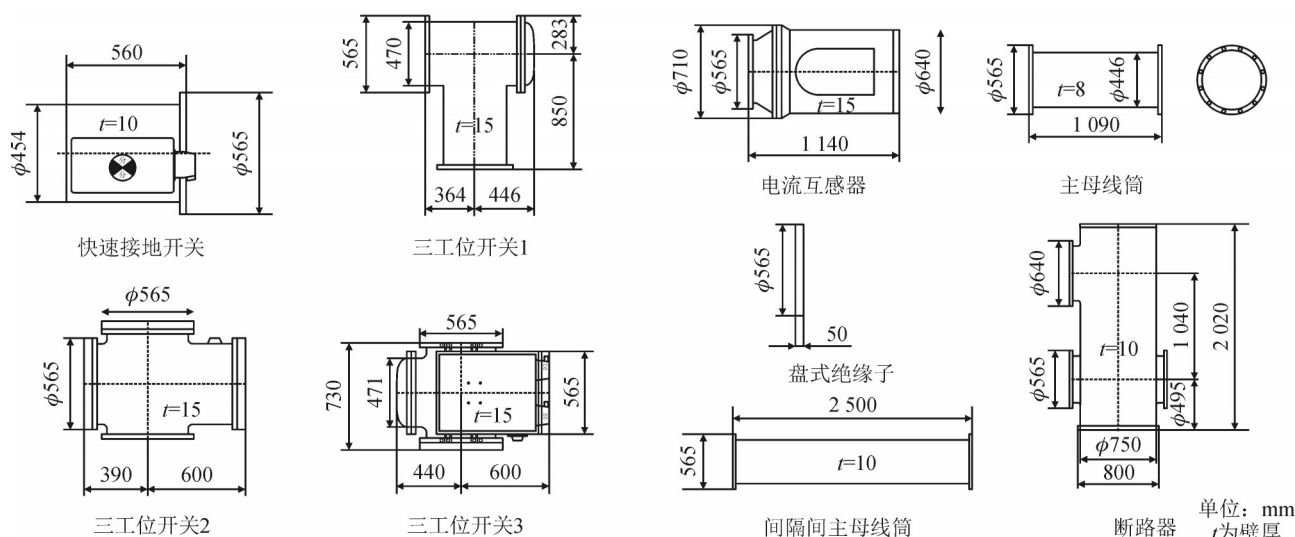
式绝缘子、法兰和法兰、法兰和连接板、连接板和支座, 支座底部和基础均由螺栓连接。



(a) 110 kV GIS 间隔



(b) 螺栓连接支架示例



(c) 间隔组件几何参数

图 1 110 kV GIS 结构组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 110 kV GIS structure composition

2 安装过程

安装过程见表 1。GIS 设备间隔均为成品件, 间隔与母线筒的安装采用吊装方式进行施工, 从间隔 A、母线筒 A、间隔 B、母线筒 B 到间隔 D 开始顺次安装结构, 见图 2。间隔吊点选择在三工位开关 2、3 和断路器上, 对称布置在间隔对称轴两侧, 母线筒吊点布置在两端, 吊点布置见图 3。根据安装过程中可能的温度变化, 综合考虑最不利情况采用 50 ℃ 的环境温差, 拟考虑 4 种极端安装温度工况, 工况温度随安装分析步的变化见表 1。

3 模型建立

3.1 模型简化

GIS 设备零件众多, 内部组成复杂, 需对实际模

型进行合理简化, 可以有效地减少收敛困难, 计算量过大等问题, 因此拟简化在仿真过程中的次要因素, 有针对性的进行建模和有限元分析。简化处理: ①机构箱对结构变形贡献不大, 此次中不再对机构箱建模, 直接将质量作用在断路器上; ②对法兰盘处螺栓连接进行精细建模将显著增加有限元分析的难度, 并且对整体模型的分析影响不大, 该模型不对法兰连接处的螺栓建模, 采用等代连接方式进行简化; ③由于 GIS 间隔气室内部结构复杂, 同时对安装过程的受力分析影响不大, 故忽略内部结构, 对模型进行简化; ④波纹管的主要作用为调节位移误差, 该模拟主要分析温度对安装的累积误差, 因此不建立波纹管模型。整体 GIS 设备的有限元模型见图 4。

表1 不同工况的安装环境温度变化

Table 1 Temperature variation of installation environment for different working conditions

安装 步骤	安装内容	环境温度(相对于设计温度)/℃			
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
1	吊装间隔 A	0	0	0	0
2	间隔 A 落地定位, 释放吊点	0	0	0	0
3		50	-50	25	-25
4	吊装母线筒 A	50	-50	25	-25
5	间隔 B 落地定位, 释放母线筒 A 与间隔 B 吊点	50	-50	25	-25
6		0	0	-25	25
7	吊装母线筒 B	0	0	-25	25
8	间隔 C 落地定位, 释放母线筒 B 与间隔 C 吊点	0	0	-25	25
9		50	-50	25	-25
10	吊装母线筒 C	50	-50	25	-25
11	间隔 D 落地定位, 释放母线筒 C 与间隔 D 吊点	50	-50	25	-25
12		0	0	0	0

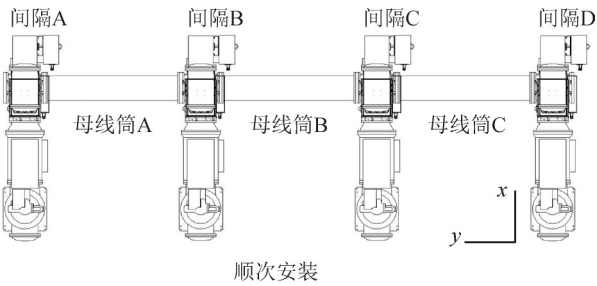


图2 110 kV GIS 安装布置图

Fig. 2 110 kV GIS installation layout

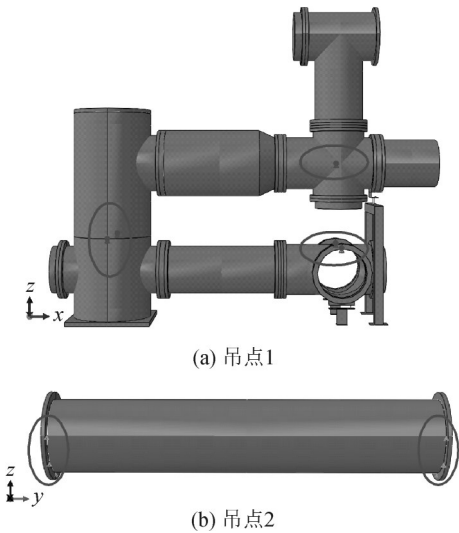


图3 吊点示意图

Fig. 3 Diagram of lifting points

3.2 材料与等效密度

材料性能参数见表2,其采用理想弹塑性本构关系。

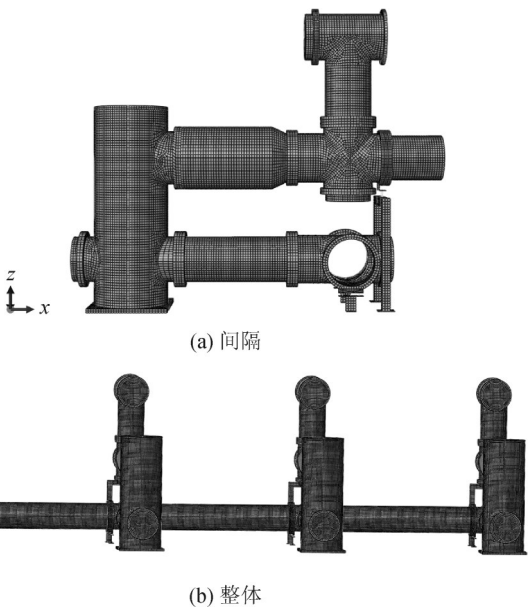


图4 有限元网格示意图

Fig. 4 Schematic diagram of finite element mesh

表2 材料性能参数

Table 2 Material performance parameters

材料	规格	弹性模量/MPa	泊松比	膨胀系数	屈服强度/MPa
铝材	5052-H112	0.69×10^5	0.28	23.2×10^{-6}	127
钢材	Q235A	2.06×10^5	0.28	12.2×10^{-6}	235

对GIS的各气室内部零件采用等效密度法进行简化。将内部结构的重力均匀等效在筒体上。将内部结构的重力均匀等效在筒体上,同时保证各部件的重量和重心一致,折算材料参数见表3。

表3 材料等效密度		
Table 3 Equivalent density of the materials		
部件名称	材料	等效密度/(t·mm ⁻³)
快死接地开关(筒体)	铝材 5052-H112	1.03×10 ⁻⁸
三工位开关(筒体)	铝材 5052-H112	7.01×10 ⁻⁹
电流互感器(筒体)	铝材 5052-H112	7.99×10 ⁻⁹
法兰	铝材 5052-H112	2.70×10 ⁻⁹
断路器(筒体)	铝材 5052-H112	6.27×10 ⁻⁹
母线线筒(筒体)	铝材 5052-H112	5.37×10 ⁻⁹
盘式绝缘子	铝材 5052-H112	8.10×10 ⁻⁹
连接板	铝材 5052-H112	2.70×10 ⁻⁹
支架	钢材 Q235A	7.80×10 ⁻⁹
螺栓	钢材 Q235A	7.80×10 ⁻⁹

3.3 单元类型

筒体、连接板、支座等采用壳体单元 S4R 进行建模, 网格尺寸为 25 mm, 法兰、盘式绝缘子选择实体单元 C3D8R 进行建模, 网格尺寸为 25 mm, 螺栓选用梁单元 B31 建模, 网格尺寸为 5 mm。

3.4 连接方式

根据间隔设计情况, 连接方式有: 法兰和法兰之间采用 tie 的连接方式, 筒体和法兰之间采用 shell-to-solid coupling 方式进行耦合; 连接板和法兰之间采用 tie 的连接形式; 螺栓和连接板孔洞、螺栓和支座孔洞采用 MPC Pin 的连接方式进行定义。边界条件约束如下: 约束吊点 z 方向以模拟吊装, 去除吊点 z 方向实现吊点释放, 支架底板约束 z 方向位移平动自由度和底座底板中心点固定点的 x 、 y 方向位移平动自由度。

4 安装过程分析方法

生死单元法是一种通过单元的“生”或“死”模拟结构构件的增加或删减, 从而修改结构刚度矩阵来模拟安装或施工全工程的方法。生死单元法易于程序化实现, 且求解过程连续, 适用于复杂结构的安装或施工过程模拟。文中采用 Abaqus 软件, 利用生死单元法模拟安装过程, 基于软件 Model change 功能, 对 GIS 安装过程进行建模。见图 2, 在模型仿真 1, 激活间隔 A, 杀死尚未安装的结构, 根据施工过程的开展, 依次激活当前吊装的单元, 并通过约束吊点位置模拟吊装过程。随着间隔落地, 关闭吊点的约束位移, 对支座底部施加约束, 约束支座底部 z 方向位移和支座底部固定点的 xy 方向位移。

5 仿真结构分析

5.1 支座位移定位误差分析

由于断路器支座位移较为明显, 取断路器支座

底板角点与中心点的位移变化进行研究, 分析各间隔在不同温况下的位移偏移情况, 并对不同工况数据进行比较。定义见图 5 的关键点编号, A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 为底板角点, O 为底板中心点。间隔 A-D 底板中心 O 点在不同工况下的位移累计量见表 4。表 4 中 U_1 代表支座中心点在 x 方向位移, U_2 为 y 方向位移, U 为总位移。

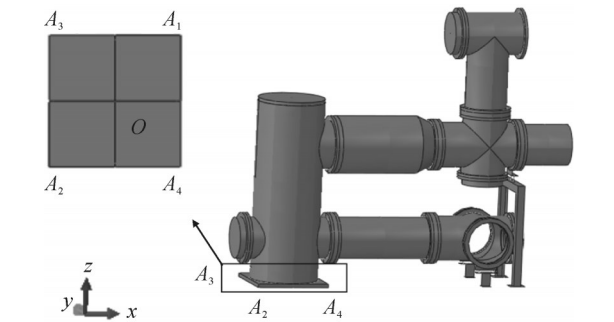


图5 断路器底板关键点编号示意图

Fig. 5 Key points on the breaker base plate

表4 不同工况下底板中心O点的位移累计量

Table 4 Accumulated displacement at the center O point of the bottom plate under different working conditions

		working conditions				mm
位移	间隔编码	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	
U_1	A	0.00	0.00	0.00	0.00	
	B	0.12	-0.16	0.05	-0.09	
	C	2.03	-2.16	1.74	-1.87	
	D	0.68	-0.92	0.02	-0.26	
U_2	A	0.00	0.00	0.00	0.00	
	B	-4.30	4.30	-2.15	2.15	
	C	-3.30	3.30	0.89	-0.88	
	D	-9.16	9.17	-2.98	2.99	
U	A	0.00	0.00	0.00	0.00	
	B	4.30	4.30	2.15	2.15	
	C	3.87	3.95	1.96	2.12	
	D	9.18	9.21	2.98	3.00	

由表 4 可知, 在不同温度工况作用下, 由于温度效应在安装过程中的累积, 导致间隔在安装完成后与设计位置存在误差。其中, 工况 1、2, 工况 3、4 之间的位移偏差存在基本走势相同, 而方向相反的情况。在 x 方向的偏移、 y 方向的偏移和总方向的偏移指标中, 各工况位移绝对值来回波动。 x 方向间隔偏移量不明显。在 y 方向的偏移中, 工况 1、2 均存在数值上的波动, 工况 1、2 位移量偏差较大; 工况 3、4 存在向同一侧改变的趋势, 且位移偏移量较为集中。在总方向的偏移中, 4 种工况的位移量整体呈现为上升趋势。在 y 方向位移偏差中, 工况 2 间隔 D 的位移最大为 9.17 mm; 在总位移偏差中, 工况 2 间

隔D的位移最大为9.21 mm,工况3间隔C的位移最小为1.96 mm。

GIS设备对于安装定位精度要求较高,要求定位安装精度不超过4 mm。通过分析可见,考虑温度作用对安装定位偏移的影响,GIS断路器底板最大累计偏移量可达近10 mm,将直接影响结构在安装过程中的定位操作。

间隔B底板中心点及角点随安装施工步的位移变化见图6。由于相同幅度的升降温产生差异不大,因此以下趋势图仅绘制工况1、3两种情况。间隔B的中心位置固定,随安装进度推进不发生改变,四边角随着温度的变化发生膨胀收缩,见图6,随着温度的变化,角点发生移动,温度变化幅度增大,偏移量增高。其中,工况1的最大偏移量为5.3 mm,工况3的最大偏移量为2.9 mm;工况1角点与中心点最大偏差量为0.99 mm,工况3角点与中心点最大偏差量0.77 mm。在安装过程位移偏差累计和底板自身膨胀收缩的共同作用下,角点偏移量在安装偏移量的基础上增大。间隔最终定位是由螺栓固定底板角点,因此,除了安装过程的累计误差,最终安装的环境温度与设计阶段的环境温度差会加剧位移偏差。

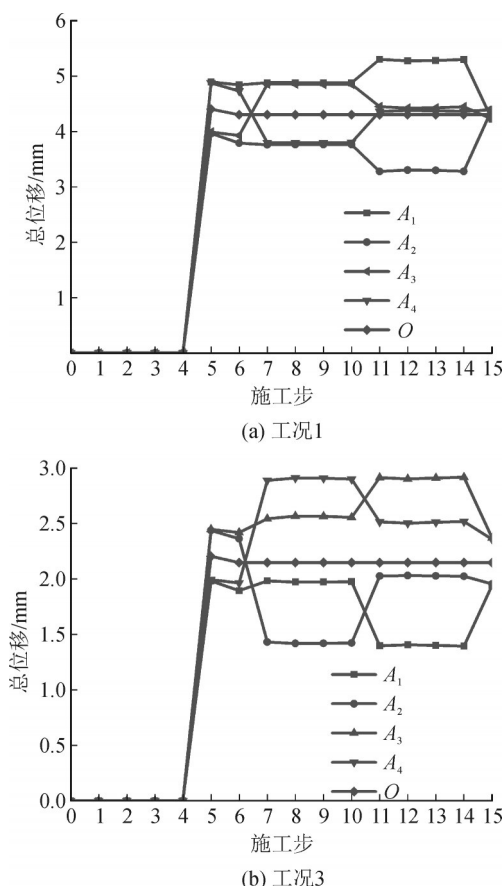


图6 间隔B底板关键点位移

Fig. 6 Displacement of key points in the base plate of interval B

支座螺栓位移关键点,见图7,每个间隔分别有1个长支座及2个短支座,长支座安装2个连接螺栓,取每个间隔同侧的螺栓进行比较分析,选取的长支座螺栓上端编码为 B_1 ,下端编码为 B_2 。每个间隔短支座的连接螺栓有4个,4个螺栓的位移变化趋势基本一致,数值略有差异,以上部位位移最大的螺栓作为分析对象,选取的短支座螺栓上端螺栓为 B_3 ,下端编码为 B_4 。

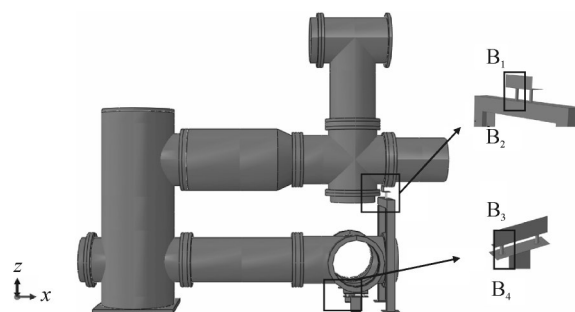


图7 支座螺栓位移关键点示意图

Fig. 7 Key points of bearing bolt displacement

安装全过程中间隔支座螺栓位移变化见图8。环境温度变化使后续安装步中的螺栓端部位移不断产生位移累积效应。同时,已安装间隔中的螺栓的偏移程度也同时发生变化。温度变化过程中,工况1、3的螺栓位移峰值呈现近似2倍关系。

长螺栓端部 B_1 位移峰值相对短螺栓端部 B_3 峰值相差不大,但随着最终温度回落到环境初始温度,各间隔长支座螺栓处的位移偏差各异,短螺栓位移偏差基本一致。短支座底部螺栓仅在本间隔吊装状态下产生较大的位移,吊装至地面位移偏差大幅减少。长支座螺栓端部 B_2 位移在工况1下随温度变化浮动相对剧烈,而在工况3的情况下随着安装进度在0.3~0.4 mm范围轻微波动。位移最终随着环境温度回落。

在安装过程中,螺栓端部 B_2 、 B_4 位移量变化并不显著,均小于1 mm。对比螺栓上下端部接头位移,螺栓上部偏移量比下部偏移量大2~10 mm之间,螺栓连接类似于半刚性连接,其刚度不足以对下部支座与上部设备构件进行变形约束,使下部支座与上部设备构件同步变形,但也无法完全释放相对变形产生的力。螺栓本身需要承受上部结构的竖向荷载,而在反复的较高温度变化情况下,螺栓的受力将会更为不利。建议可采用滑动式支座形式或柔度更高的连接方式,释放上下部的相对变形。

5.2 内力及应力分析

文中应力分析主要关注GIS设备主构件及支座连接螺栓在各温度工况下分析步中的内力变化,衡量GIS设备的安装安全性与可靠性。

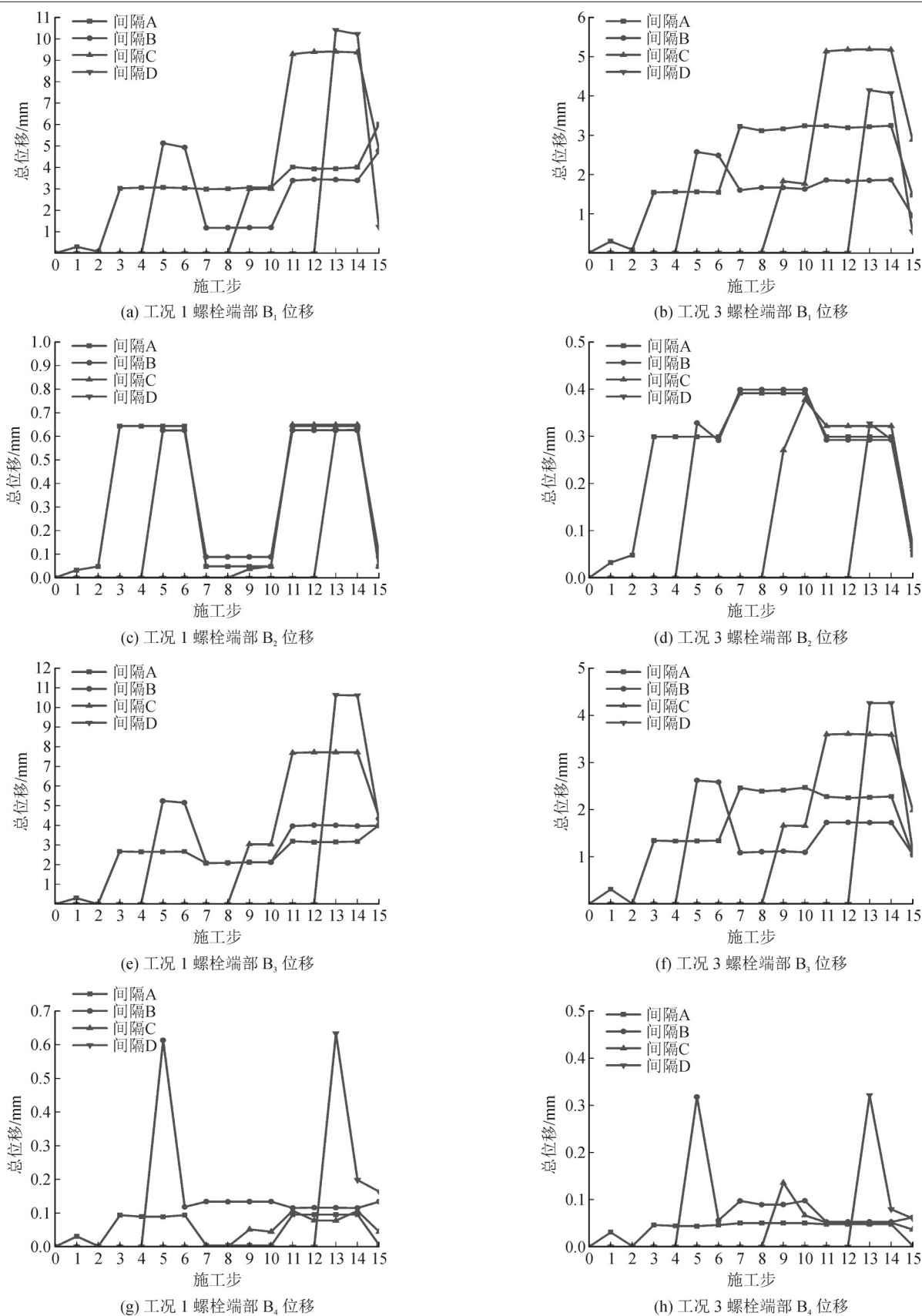


图 8 安装全过程间隔支座螺栓位移图

Fig. 8 Installation of the whole process of interval support bolt displacement diagram

安装过程中筒体应力随温度变化不断改变, 最终安装完成后环境温度变化至设计温度, 除间隔 D

三工位开关以外, 其他主要构件的应力值均低于其应力峰值。安装完成后的间隔 D 三工位开关应力云

图见图9,最大应力均出现在竖向筒体与水平筒体的连接区域内,工况1应力峰值为39.6 MPa,约为工况3应力峰值的2倍,满足许用应力的要求。相比于初始设计结构,考虑安装过程的GIS结构中存在残余应力,虽还未达到明显影响结构承载能力的程度,仍应关注设备服役过程中此处的应力状态。

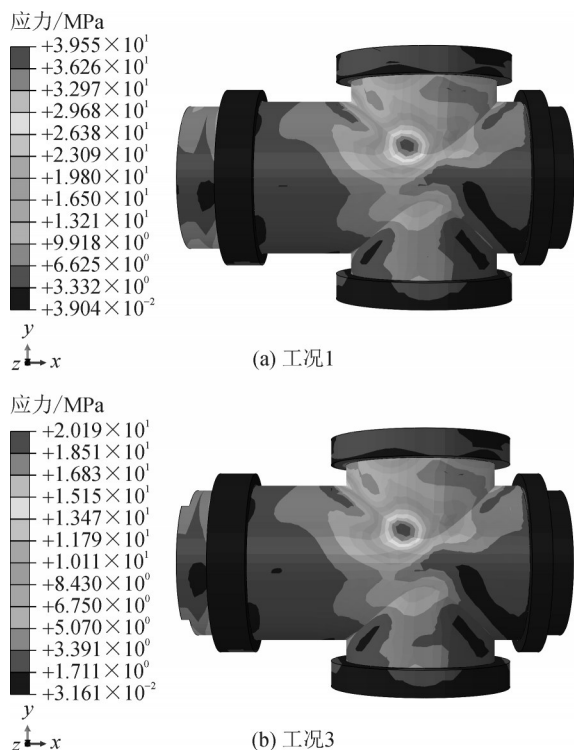


图9 间隔D三工位开关应力云图

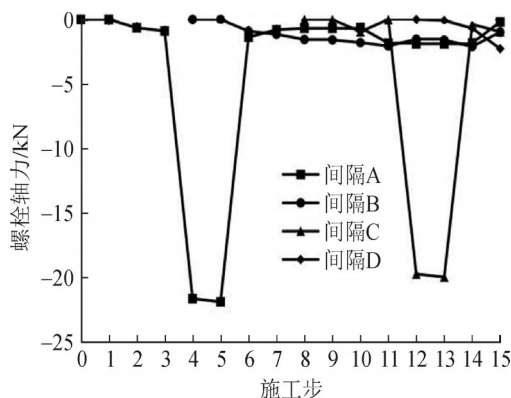
Fig. 9 Stress distribution of interval D three-position switch

提取安装施工步下工况1、3的螺栓轴力,其变化趋势见图10,随温度升降,螺栓在第4、8、12分析步产生内力突变。分析螺栓 B_3B_4 内力值,工况1、3下,随着新的间隔的吊装,上一个间隔内力激增,随着间隔落地安装回落。工况1过程中始终受压力,而工况3过程同时受到拉力和压力。根据工况1、3下的安装过程分析,工况1螺栓的最大轴力达到22 kN,工况3螺栓的最大轴力达到11 kN。螺栓轴向承载力设计值为64 kN,满足规范要求。但考虑螺栓连接采用模拟方式问题较实际更柔,实际上螺栓受到的内力将大于分析值,因此考虑安装过程温度效应的螺栓,其安全余量会受到较大的影响,有可能在设备服役过程中受到破坏。

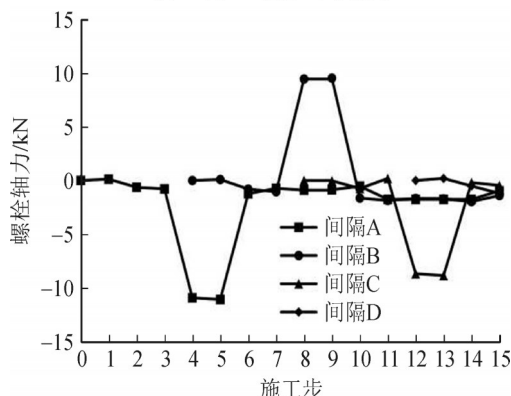
6 结论

文中基于110 kV卓尼变电站工程,采用生死单元法模拟GIS设备的安装过程,并在安装过程中考虑温度变化,分析GIS设备安装过程中的温度效应,

得出以下结论:



(a) 工况1, 螺栓 B_3B_4 轴力



(b) 工况3, 螺栓 B_3B_4 轴力

图10 螺栓轴力变化趋势图

Fig. 10 Variation trend of axial force of the bolts

1)安装过程中的环境温度变化导致GIS设备间隔位移偏差存在累积。垂直于安装方向上的位移偏差均满足要求,安装方向位移偏差较大,当温度变化较大时,安装方向位移偏差无法满足安装精度要求,将直接影响安装中的定位需求。

2)温度效应使间隔底板不仅产生位移偏差,同时还发生膨胀收缩,GIS底板角部位移偏差在安装偏移的基础上进一步加剧,温度较为恒定的安装环境可有效降低安装误差。

3)设备支座采用螺栓连接,其水平刚度较小,在温度效应明显时不足以对下部支座与上部设备构件进行变形约束,使下部支座与上部设备构件同步变形,但也无法完全释放相对变形产生的力。实际使用中可能会造成连接螺栓的损坏,应改进支座连接方式,建议采用滑动式支座形式或柔度更高的连接方式。

4)安装过程中随温度变化,筒体应力相应变化但应力值较小,螺栓内力相对较大,虽然满足承载力要求,但由于考虑安装过程温度效应的安全余量较小,有可能在设备服役过程中受到破坏。

参考文献:

- [1] 李 鹏, 雷雨秋, 刘宗杰, 等. 基于决策树算法的断路器弹簧操动机构振动诊断技术[J]. 高压电器, 2021, 57(9): 1-8.
LI Peng, LEI Yuqiu, LIU Zongjie, et al. Vibration diagnosis technology of technology of spring operating mechanical for circuit breaker-based on decision tree algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 1-8.
- [2] 吴旭涛, 赵晋飞, 马云龙, 等. 基于多频激励下振动响应的GIS机械缺陷诊断方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(4): 108-115.
WU Xutao, ZHAO Jinfei, MA Yunlong, et al. Mechanical defect diagnosis technology of GIS based on vibration response under multiple frequency excitation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(4): 108-115.
- [3] WANG Yanxin, YAN Jing, ZHEN Qian, et al. A novel adversarial transfer learning in deep convolutional neural network for intelligent diagnosis of gas-insulated switchgear insulation defect: A DATCNN for GIS insulation defect diagnosis[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021(23): 3229-3241.
- [4] XIONG Qing, ZHAO Jinfei, GUO Ziqing, et al. Mechanical defects diagnosis for gas insulated switchgear using acoustic imaging approach[J]. Applied Acoustics, 2021 (174): 107784.
- [5] 吴旭涛, 赵晋飞, 马云龙, 等. 基于多频激励下振动响应的GIS机械缺陷诊断方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(4): 108-115.
WU Xutao, ZHAO Jinfei, MA Yunlong, et al. Mechanical defect diagnosis technology of GIS based on vibration response under multiple frequency excitation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(4): 108-115.
- [6] 梅 飞, 张晓光, 李剑文, 等. 基于多维振动特征图谱的特高压换流阀主循环泵轻量化故障诊断模型[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 83-96.
MEI Fei, ZHANG Xiaoguang, LI Jianwen, et al. A light-weight fault diagnosis model for the main circulating pump of an ultra high voltage converter valve based on a multidimensional vibration feature graph[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 83-96.
- [7] 韩德斌, 肖少阳, 张超群, 等. 变电站GIS结构健康状况在线监测[J]. 东北电力技术, 2021, 42(10): 1-4.
HAN Debin, XIAO Shaoyang, ZHANG Chaoqun, et al. On-line monitoring of GIS structure health status in substation[J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(10): 1-4.
- [8] 王彦彪, 陈振勇, 郭文萍, 等. 基于双注意力机制优化CNN架构的GIS局部放电模式识别[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 22-29.
WANG Yanbiao, CHEN Zhenyong, GUO Wenping, et al. PD pattern recognition for GIS based on CNN architecture optimized by the double attention mechanism[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 22-29.
- [9] 成 林, 陶佳鑫, 吴 涛, 等. 330 kV GIS隔离开关操作产生的VFTO电磁骚扰特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(5): 11-19.
CHENG Lin, TAO Jiaxin, WU Tao, et al. Research on VFTO electromagnetic disturbance characteristics of 330 kV GIS disconnector operation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(5): 11-19.
- [10] 刘立宝, 张惠哲, 张恩跃, 等. GIS出线穿墙套管法兰安装部分的力学分析[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 97-104.
LIU Libao, ZHANG Huizhe, ZHANG Enyue, et al. Force analysis of flange installation part of GIS outgoing line wall bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 97-104.
- [11] 陈于晴, 黄青丹, 宋浩永, 等. 油浸式电流互感器主绝缘快速暂态过电压分布的研究[J]. 变压器, 2023, 60(12): 27-33.
CHEN Yuqing, HUANG Qingdan, SONG Haoyong, et al. Study of VFTO distribution in insulation system of IOCT[J]. Transformer, 2023, 60(12): 27-33.
- [12] DAMIRI D J, PRASETIO T W. Redesign gas insulated switchgear to semi air insulated switchgear 500 kV side and 150 kV side in EHVS Kembangan[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1098(4): 042033.
- [13] 赵洪山, 高玉峰. 基于振动特征估计的GIS设备故障检测与分析[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 114-120.
ZHAO Hongshan, GAO Yufeng. Fault detection and analysis of GIS based on vibration characteristic estimation [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 114-120.
- [14] 刘 伟, 刘传会, 刘秀君. 应用于高海拔环境下的550 kV GIS套管抗震性能分析[J]. 电工电气, 2021 (11): 39-42.
LIU Wei, LIU Chuanhui, LIU Xiujun. Seismic performance analysis of 550 kV GIS casing at high altitude[J]. Electrotechnics Electric, 2021(11): 39-42.
- [15] 樊庆玲, 陈 晨, 宋景博, 等. 户内变电站楼面GIS电气设备地震响应分析[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 240-245.
FAN Qingling, CHEN Chen, SONG Jingbo, et al. Seismic response analysis of floor GIS electrical equipment of indoor substation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 240-245.
- [16] 郭 伟, 陈秀珍, 陈 嵩, 等. 一起GIS内部母线支柱绝缘子击穿故障的定位分析与防止对策[J]. 电瓷避雷器, 2020(5): 248-253.

- GUO Wei, CHEN Xiuzhen, CHEN Song, et al. Location analysis and prevention countermeasures of the fault of insulator of the internal busbar of GIS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(5):248-253.
- [17] 赵 谦,殷建荣,程 成,等. 基于就地控制器的变电站GIS智能化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 149-155.
- ZHAO Qian, YIN Jianrong, CHENG Cheng, et al. Study on intelligent GIS based on on-site control unit[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 149-155.
- [18] 蒋 玲,曲全磊,王志惠,等. 高温差工况下长母线GIS设备振动特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 144-151.
- JIANG Ling, QU Quanlei, WANG Zhihui, et al. Study on vibration characteristics of long-busbar GIS equipment in large temperature difference conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 144-151.
- [19] 吴旭涛,马 波,李秀广,等. 基于有限元分析的不同电压等级GIS隔离开关温度场仿真研究[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 160-164.
- WU Xutao, MA Bo, LI Xiuguang, et al. Simulation on temperature field of GIS disconnecter at different voltage level based on finite element analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 160-164.
- [20] 罗宏建,陈兴涛,张 杰,等. GIS设备有限元结构分析研究[J]. 浙江电力, 2019, 38(12): 99-106.
- LUO Hongjian, CHEN Xingtiao, ZHANG Jie, et al. Finite element structural analysis of GIS equipment[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(12): 99-106.
- [21] 王轶慧,何芙蓉,祁文治. 750 kV GIS长距离母线筒热胀冷缩问题探讨[J]. 电网与水力发电进展, 2007, 23(11): 18-20.
- WANG Yihui, HE Furong, QI Wenzhi. Approach on thermal expansion/contraction for 750 kV GIS long-distance busbar enclosures[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2007, 23(11): 18-20.
- [22] 张 烁,陈莲君,付宣蓉,等. 750 kV GIS设备长母线结构滑动支撑失效原因分析[J]. 青海电力, 2017, 36(3): 55-58.
- ZHANG Shuo, CHEN Lianjun, FU Xuanrong, et al. Failure analysis of sliding support of long busbar structure in 750 kV GIS equipment[J]. Qinghai Electric Power, 2017, 36(3): 55-58.
- [23] 杨志轶,龙金星. 采用柔性支架处理GIS热胀冷缩的研究[J]. 高压电器, 2017, 53(11): 105-108.
- YANG Zhiyi, LONG Jinxing. Research on thermal expansion and contraction of GIS treated by flexible support[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11): 105-108.
- [24] 沈小军,许海伟,杜 勇,等. GIS波纹管温度补偿能力影响因素研究[J]. 高压电器, 2021, 57(5): 58-66.
- SHEN Xiaojun, XU Haiwei, DU Yong, et al. Study on the factors influencing the temperature compensation ability of GIS bellows[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 58-66.
- [25] 贾耿锋,李 军,蒋晓旭,等. GIS母线用热补偿型波纹管伸缩量设计分析[J]. 电气工程学报, 2017, 12(6): 36-40.
- JIA Gengfeng, LI Jun, JIANG Xiaoxu, et al. Design and analysis of expansion capacity of bellows with thermal compensation for GIS bus[J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 12(6): 36-40.
- [26] 龚 源,彭 鹏,周家戎,等. 110 kV GIS母线裂纹故障实例分析[J]. 电工技术, 2018(3): 77-78.
- GONG Yuan, PENG Peng, ZHOU Jiaqu, et al. Example analysis of bus-bar crack failure for 110 kV GIS[J]. Electric Engineering, 2018(3): 77-78.
- [27] 李禹生,杨巧妮,安 影. 高压开关设备技术要求的标准相关性分析[J]. 中国标准化, 2020(5): 200-204.
- LI Yusheng, YANG Qiaoni, AN Ying. Analysis of the technical requirements for high voltage switchgear about standard relevance[J]. China Standardization, 2020(5): 200-204.
- [28] 钟建英,陈 刚,谭盛武,等. 高压开关设备关键技术及发展趋势[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2769-2782.
- ZHONG Jianying, CHEN Gang, TAN Shengwu, et al. Key technology and development trend of high-voltage switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2769-2782.
- [29] 杨律磊,龚敏锋,朱寻焱. ABAQUS在结构连续倒塌数值模拟中的应用[J]. 建筑结构, 2019, 49(1): 83-87.
- YANG Lulei, GONG Minfeng, ZHU Xunyan. Application of ABAQUS in numerical simulation of structural progressive-collapse[J]. Building Structure, 2019, 49(1): 83-87.
- [30] 刘文聪,朱博莉,王宏业,等. 某高层建筑混凝土核心筒—外框架竖向变形差值研究[J]. 施工技术, 2022, 51(4): 108-113.
- LIU Wencong, ZHU Boli, WANG Hongye, et al. Research on vertical deformation difference between concrete core-tube and external frame of a high-rise building[J]. Construction Technology, 2022, 51(4): 108-113.
- 王仕俊(1988—),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向为智能化输变电工程技术(E-mail: angelofkill@126.com)。
- 蔡建国(1984—),男,博士,教授,博导,研究方向为空间结构。