

[输电线路]

基于Autopipe的柔性设计及仿真在GIL中的应用

文/西安西电开关电气有限公司 杨勇 孙召红

基于管道分析软件Autopipe的管道设计分析功能，通过一套柔性设计方法，对整段GIL结构进行建模仿真，并对仿真的结果进行优化，使GIL管线结构应力满足标准强度要求，GIL管线变形满足柔性补偿，GIL管线结构达到优化布置。该方法为GIL管线结构设计从经验设计方法向仿真设计方法转变提供了参考。

气体绝缘输电线路（GIL）是成熟的高压输电技术，GIL技术具有输送容量大、可靠性高、容量小、损耗低、过载能力强、免维护和环境友好等优点。由于这些优点，自该技术问世以来，已经有超过300 km的GIL在世界各地投入运行。GIL管线由外壳管、绝缘盆子、固定支架、滑动支架和波纹管伸缩节等结构组成。GIL管线外壳长度较长，通常安装于室外，环境温度的剧烈变化会导致GIL管线外壳产生较大的热变形，设计时需全面考虑GIL管线补偿以及管线的结构强度。在GIL管线结构设计时需按照有效的柔性设计原则进行设计。

Autopipe软件具备强大的管道设计分析功能，本文通过使用Autopipe软件并结合一套柔性设计方法，可有效设计出安全可靠的GIL管线结构。

GIL管线设计

GIL管线设计首先需要满足GIL安装场地的要求，确定GIL的布置走向，再根据GIL厂家的设计经验，将GIL划分成若干单元段，对每个单元段进行热补偿设计、支撑结构设计和外壳管强度设计，具体如下。

1. GIL分段设计

通常整段GIL长度较长，单相长度在几百米以

上，根据现场地形以及厂家经验，一般都是将整段GIL划分成距离相近或相同的若干单元段，每个单元由外部管、固定支架、移动支架和波纹管伸缩节组成。如图1所示。

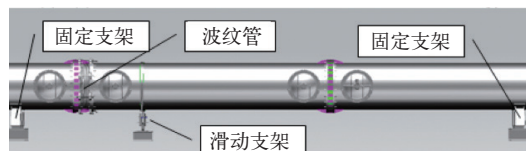


图1 GIL管线单元组成结构

2. 热补偿设计

GIL安装固定于地面或混凝土墙面上，当温度变化时，因GIL外壳热膨胀系数大于地面基础线性膨胀系数，GIL金属外壳将产生较大的变形量，需要波纹管伸缩节吸收或补偿其热变形量，从而消除和缓解壳体热变形对两端固定支架和壳体自身的作用，根据波纹管伸缩节的允许变形量，确定补偿量，选择满足每个单元内管线热变形量伸缩节波纹管。

3. 支架强度设计

GIL管线支架分为固定支架和滑动支架，固定支架除了承受GIL质量外，还承受以下载荷的作用：①承受伸缩节内压产生的推力（盲板力）；②波纹管伸缩节的轴向弹性力；③外壳管与滑动支架的摩擦力。滑动支架除了承受GIL重量外，还

应该考虑承受外壳轴向位移的摩擦推力等载荷。

在每个单元段中，支架的设计不仅要考虑以上载荷，有时还应考虑风载荷、雨雪载荷及地震载荷对支架的影响，每个单元段内支架的强度和刚度都应符合机械设计手册相关支架强度要求。

4. 壳体强度设计

GIL管线壳体承受的载荷主要有内压力、重力、支承反力、波纹管的变形载荷和温差等作用力下管线和支承的热变形力。

在工业管道行业中，尤其是化工厂和石油管线通常遵照美国设计标准ASME B31.3《ASME压力管道规范B31——工艺管道》来计算校核，该标准中按照持续应力、热胀应力（温度温差应力）和偶然应力给出了管道应力评定的依据。

虽然经验设计方法考虑了GIL管线结构的热补偿设计，支架结构强度设计和管线壳体强度设计，但只能对GIL管线一段单元内管线结构热补偿和强度进行考虑，经验设计方法很难对整段GIL管线进行设计和数值计算。GIL整段管线为各个单元段连接成的系统结构，由于各个单元段支架都有刚度，各个单元段之间都有相互作用力，如图2所示，单元段1和单元段2的长度 L_1 和 L_2 不同，则在热变形作用下单元段1与单元段2公用固定支架的总作用力 F_1 不等于 F_2 ，若设计时不考虑各个单元段间的相互作用，则设计时GIL管线结构的受力状态往往与实际受力状态存在差异，严重时这种差异可能会导致GIL管线在运行时产生严重的变形和破坏。

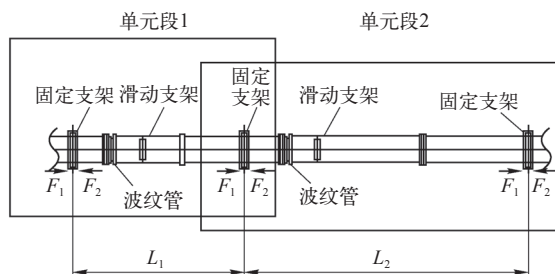


图2 GIL固定支架受力

基于Autopipe的柔性设计和仿真

1. Autopipe介绍

Autopipe软件是一个独立的用于管道应力计算、管道支撑设计、管道补偿分析及静态和动态载荷条件下设备整体受力分析的计算机辅助工程分析软件。包含25种管道规范，满足美国机械工

程师协会（ASME），美国石油协会（API），国际电气制造协会（NEMA），美国国家标准学会（ANSI），美国土木工程师学会（ASCE）等设计规范的限制。由于软件本身是按照各类标准规范设计的，故软件计算的应力可直接按照不同标准进行应力分类评判。

2. 基于Autopipe的柔性设计和仿真

根据工程要求，按照经验设计方法设计GIL管线各段单元结构形成初步方案；完成GIL结构初步设计后，通过Autopipe软件对整段GIL管线进行建模并按照工作温度、压力、风载和地震载荷等对GIL管线整体结构进行建模计算，通过Autopipe对整段GIL管线的计算结果，使用有限元分析软件Workbench对管线支架、法兰和波纹管伸缩节等关键部件进行强度校核，验证方案的可行性并对方案进行优化。如图3所示。

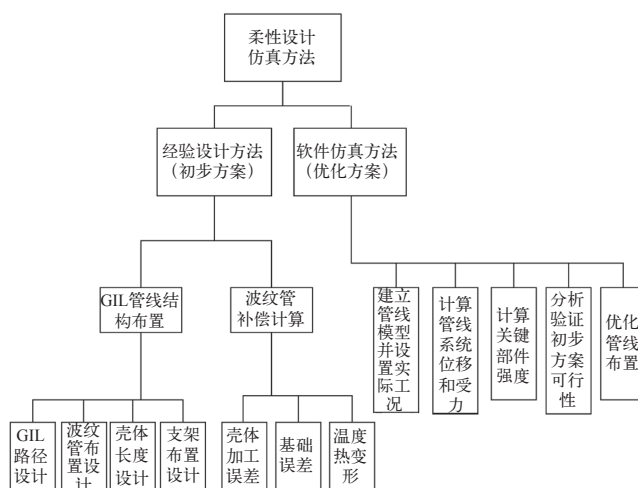


图3 柔性设计仿真方法

3. 优化方法

通过Autopipe软件对GIL管线初步方案进行整段管线结构的计算，判定计算结果。

(1) 管线补偿分析

计算得到的GIL全段管线受力和位移值判定管线结构的补偿是否满足波纹管伸缩节补偿要求。

(2) 管线强度分析

通过在Autopipe中设置不同管道应力标准计算出管线的标准应力，通常都是按照ASME B31.3标准设置。

(3) 支架强度分析

通过Workbench软件对GIL重要零件进行强度校核。

(4) 综合判定

若以上各个分析满足使用标准,则可认为整段GIL结构设计合理,若不满足可以按照图4所示流程进行改进。

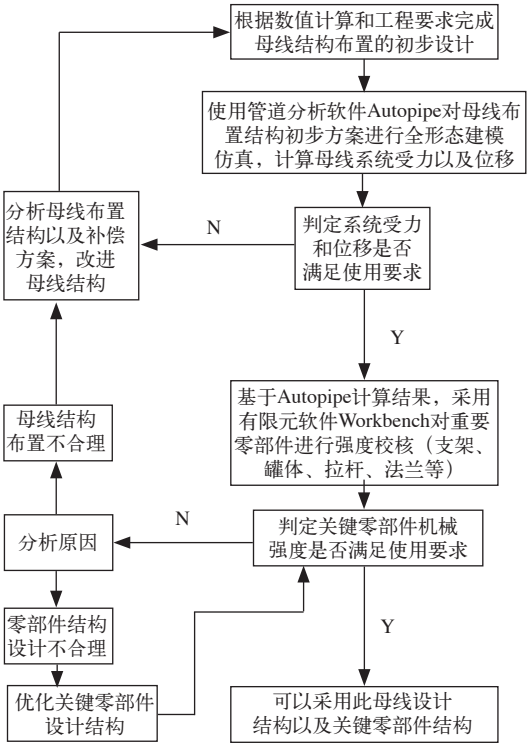


图4 基于Autopipe的优化方法

工程应用

1. Autopipe建模

某GIL工程额定电压为550 kV,额定电流为4 000 A,单相长度约2 400 m,安装场地为户外对本工程GIL结构完成初步结构设计后,通过Autopipe软件对其整段结构进行建模,如图5所示。

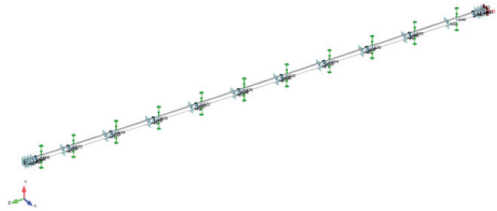


图5 Autopipe模型

2. 计算工况

GIL的计算工况如表1所示。

3. 计算结果

(1) 管线壳体应力计算结果

Autopipe基于ASME B31.3—2004标准对管线

表1 GIL工况

序号	名称	参数	单位
1	安装温度	20	℃
2	导体发热温升	10	℃
3	环境最高温度	40	℃
4	波纹管重量	400	kg
5	管道内压	0.5	MPa
6	风速/风压	30/700	kN/mm
7	铝合金筒体线膨胀系数	23.6	℃ ⁻¹
8	混凝土材料线膨胀系数	11.7	℃ ⁻¹
9	波纹管刚度	700	N/mm
10	固定支架刚度	55	m/s, Pa
11	滑动支架摩擦系数	0.15	
12	波纹管补偿量	130	mm

应力计算结果如图6所示,管线最大应力效果评定如表2~表5所示。

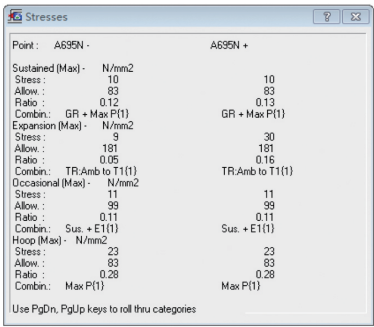


图6 Autopipe基于ASME B31.3的应力

表2 GIL管线最大持续应力(Sustained stress)

序号	名称	数值	单位
1	标准	ASME B31.3	
2	铝管许用值	83	MPa
3	计算最大值	10	MPa

表3 GIL管线最大膨胀应力(Expansion stress)

序号	名称	数值	单位
1	标准	ASME B31.3	
2	铝管许用值	181	MPa
3	计算最大值	30	MPa

表4 GIL管线最大偶然应力(Occasional stress)

序号	名称	数值	单位
1	标准	ASME B31.3	
2	铝管许用值	99	MPa
3	计算最大值	11	MPa

表5 GIL管线最大环向应力(Hoop stress)

序号	名称	数值	单位
1	标准	ASME B31.3	
2	铝管许用值	83	MPa
3	计算最大值	23	MPa

从表2~表5可知,在表1的工况下,GIL管线各点最大持续应力(Sustained stress)、膨胀应力(Expansion stress)、最大偶然应力(Occasional stress)和最大环向应力(Hoop stress)均符合ASME B31.3—2004标准。

(2) 作用力和位移计算结果

通过对Autopipe计算结果统计,得到沿管线波纹管位移以及固定支架受力曲线。如图7、图8所示。

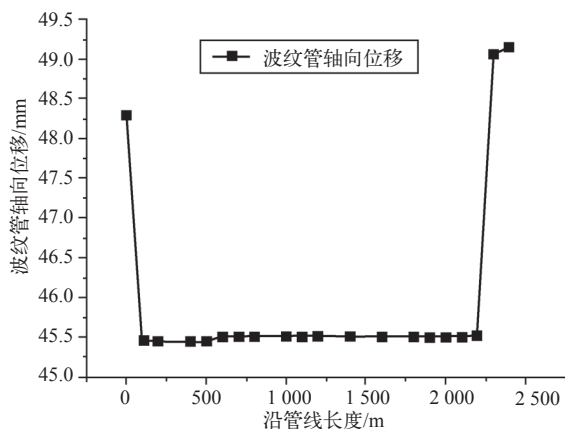


图7 沿管线分布波纹管轴向位移

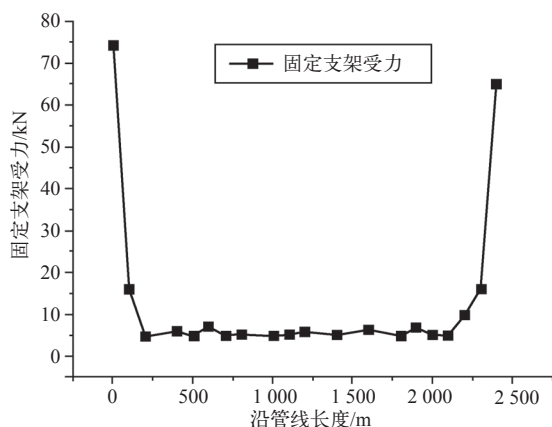


图8 沿管线分布固定支架受力

从图7沿管线分布波纹管轴向位移图可知,波纹管最大位移为48.3 mm,波纹管膨胀节的有效补偿范围为130 mm,故管线最大变形满足波纹管的柔性补偿要求;从图8沿管线分布固定支架受力图可知,固定支架最大支反力为74 kN,将此结果带

入Workbench中,对固定支架进行机械强度计算。如图9所示。

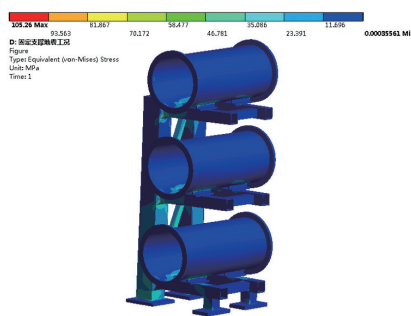


图9 固定支架应力云图

从图9固定支架机械强度分析可知,按照第四强度理论,固定支架在74 kN的最大轴向力作用下,产生的最大等效应力为105.26 MPa,

出现在支撑最上侧横向H钢与竖直H钢连接处,支撑H钢材质为Q235,固定支撑最大应力小于材料许用应力,满足使用要求。

通过Autopipe计算,GIL管线壳体满足强度要求。最大位移在波纹管伸缩节补偿范围内,最大作用力下的固定支架的应力也满足材料许用值,故整段GIL管线结构设计合理,满足使用条件。

结束语

针对GIL管线的经验设计方法无法系统地对整段GIL管线进行数值计算,无法有效分析GIL管线各个单元段之间的相互作用,本文介绍了一套基于Autopipe软件的柔性设计方法和结果判定标准,该方法可系统地分析整个GIL管线并进行判定。该方法为GIL管线结构设计从经验设计方法向仿真设计方法转变提供了参考。EA

(收稿日期:2019.03.26)

(编辑:朱金凤)

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告