

# 气体绝缘金属封闭输电线路 GIL 的抗震性能分析

黎玉婷<sup>✉</sup>

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的] 某项目 500 kV GIL 管道具有单跨长度跨大, 对地距离高的特点, 需要验证气体绝缘金属封闭输电线路 (GIL) 的抗震性能。[方法] 建立 GIL 管道物理结构三维有限元模型, 并进行地震响应分析。[结果] 通过模态分析获得了结构的振型特性并利用反应谱分析方法分析得出了不同地震反应谱激励下结构的动力特性及地震响应。[结论] 500 kV GIL 输电管道结构在 7 度的地震作用下具有一定的安全系数。

**关键词:** 气体绝缘金属封闭输电线路; 抗震分析; 有限元模拟; 振型; 反应谱分析

中图分类号: TM7; TM726

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)S2-0040-05

开放科学(资源服务)二维码:



## Seismic Performance Analysis of Gas Insulated Metal-enclosed Transmission Line

LI Yuting<sup>✉</sup>

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] The 500 kV GIL pipeline of a project has the characteristics of a large single span and a high distance to ground. It is necessary to verify the seismic performance of gas-insulated metal-enclosed transmission lines (GIL). [Method] A three-dimension finite element model of GIL pipeline physical structure was established to perform a seismic response analysis. [Result] The mode shape characteristics of the structure were obtained through modal analysis. The seismic performance of the GIL under different seismic excitations was then specifically evaluated by using the response spectrum analysis method. [Conclusion] The 500 kV GIL transmission pipeline structure has a certain safety factor under the earthquake with a seismic intensity of 7 degrees.

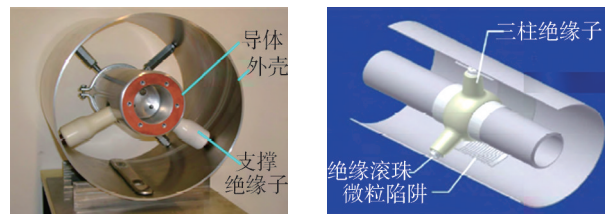
**Key words:** GIL; seismic analysis; finite element simulation; mode shapes; response spectrum analysis

## 0 引言

气体绝缘金属封闭输电线路 (Gas-insulated Metal-enclosed Transmission Lines) 简称 GIL, 是一种高电压、大电流、长距离电力传输设备。具有传输容量大、受环境影响小、运行可靠性高、单位损耗低、节约占地等优点<sup>[1-3]</sup>。由于市场 GIL 成本较高, 出于经济性考虑, 目前主要补充应用在地理或环境条件受限而采用架空输电方式的情况。

GIL 为同轴圆柱结构 (如图 1 所示), 由外至内主要由铝合金接地外壳, 柱式绝缘子、铝合金中心管状导体组成, 外壳与导体间采用绝缘气体填充 (如 SF<sub>6</sub> 等)。其中柱式绝缘子用于支撑中心导

体<sup>[4-5]</sup>。GIL 的大部分工作都是在工厂内安装完成的, 减少了现场很多不可控因素。



(a) GIL 实体图

(b) GIL 模型图

图 1 GIL 结构图

Fig. 1 The structure of the GIL

根据应用场合的不同, GIL 可采取不同的敷设方式。现有工程中 GIL 的敷设方式有水平隧道敷设、沟道敷设、地面架设、架空敷设、竖井或斜井

敷设、直埋敷设等<sup>[6]</sup>。GIL在实际工程运行中，可能受到高海拔、大风、强地震，大温差等极限恶劣环境的影响，外部载荷与结构自重、内部压力压等因素相互作用。如果GIL的下部支撑和内部的补偿结构设置不合理，整个管道将产生过大的应力及位移而造成塑性不可逆变形，引起管道漏气甚至破裂等严重损坏<sup>[7-8]</sup>。

## 1 结构建模

某站内扩建工程需要用GIL管道进行连接，且根据电气布置方案，需要横跨GIS厂房。跨越GIS厂房的断面图如图2所示。GIL跨房子段标高为15.0 m。单跨长度为 $L=17.3$  m。北侧支撑管母支架高度为3.2 m，南侧支撑管母支架高度为6.3 m，支架均采用格构式结构。



图2 GIL跨越房子

Fig. 2 GIL cross over the GIS building

GIL管道本身受自重、内部压力和外部载荷相互作用，需要设置外部支撑及内部补偿结构。一般架空敷设的高度通常为5~8 m，且每隔6~8 m需设置支撑结构。如果支撑设置过长，长距离管道可能会产生过大应力从而影响管道的安全性。本工程GIL单跨长度为17.3 m，GIL敷设高度为15.0 m，单跨跨度大于500 kV电压等级小于12 m的要求，高度也超过常规高度，对GIL管道本身的结构性能要求更高。需对管道进行特别的静力学计算分析，以保障GIL管道自身的结构性能。

本文采用有限元软件midas进行建模分析。模型主体部分简化为铝合金外壳，铝合金导体，导体间约束带及下部钢结构支架，简化GIL管道的三通，法兰盘及绝缘子支柱，将其等效质量施加在GIL母线筒上。GIL母线筒是细长杆件，使用6自由度的抗弯扭的两节点梁单元。梁单元连接使用刚平面假设。

边界条件：钢结构支架与地面混凝土基础采用化学锚栓连接，支架底部与基础接触的结点按固定处理。三相GIL管道之间的约束带与GIL管道连接采用铰接连接。有限元模型如图3所示，结构各主要参数如表1所示。

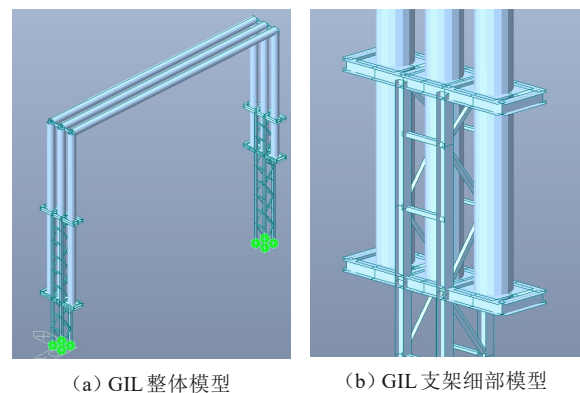


图3 三相GIL及支架模型

Fig. 3 Three-phase GIL and support structure model

表1 GIL主要材料参数

Tab. 1 Main material parameters of GIL

材料	弹性模量/ ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ )	泊松比	质量密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	破坏应 力/MPa	屈服应 力/MPa
Q235	2.06×10 <sup>11</sup>	0.5	7860	460	235
5052	0.7×10 <sup>11</sup>	0.5	4522	170	110

注：GIL质量密度等效为4522.0 kg/m<sup>3</sup>，质量79 kg。

铝合金接地外壳管径 $\phi=508$  mm，厚度为6 mm，铝合金中心管状导体直径为 $\phi=160$  mm，厚度为10 mm。

## 2 有限元分析

站址所在区域基本风压：站址风速为33 m/s， $w_0=0.68$  kN/m<sup>2</sup>。抗震设防烈度7度，场地类别为II类，设计地震分组为第1组，对应的特征周期 $T_g=0.35$  s，设计基本地震加速度值为0.15 g，设备提高一度设防。

## 2.1 模态分析及振型计算

模态分析是针对结构的固有振动特性如：固有频率、阻尼比和模态振型这些模态参数进行分析的过程。经过有限元模拟，计算出的模型的前6阶模态的频率及振型及如图4所示各阶振型表明：GIL的前6阶主振型主要为平动，尚未出现扭转变形。变形集中在角部及GIL与支架连接处。这两处均是GIL结构的薄弱环节。

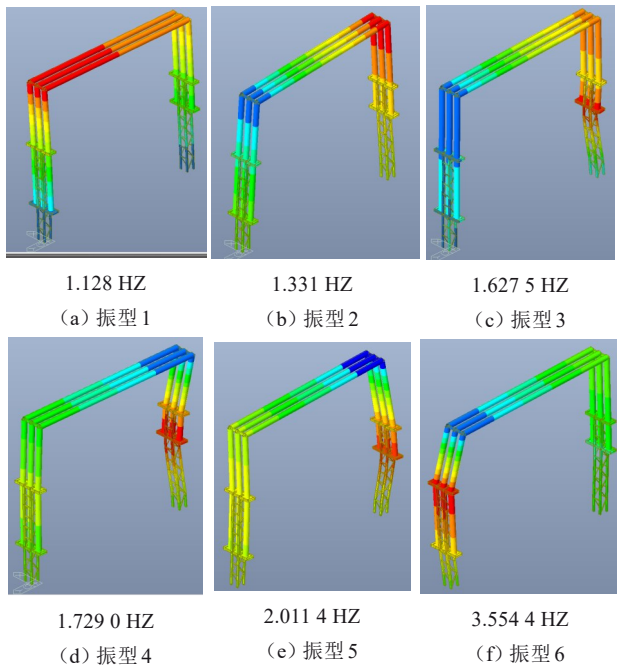


图4 模型模态振型和频率

Fig. 4 Mode shapes and frequencies of model

计算出的模型的前36阶模态的频率特征值如表2所示：最高频率为34.5 HZ，满足《高压开关设备和控制设备的抗震要求》<sup>[9]</sup>的频率范围应在0.5 HZ~35 HZ的要求。

## 2.2 地震反应谱分析

目前，电气设备抗震分析的方法主要是：时间历程分析法<sup>[10]</sup>和反应谱分析法<sup>[11]</sup>。时间历程分析是利用实际地震波时程记录作为激励，地震响应计算结果的准确性较大依赖于地震波时程曲线的选取，且计算量巨大。其优势在于可以模拟结构在整个地震持续时间内各时刻的地震响应。反应谱法体现的是结构地震响应在不同的地震动特性和结构动态特性下变化，并确定最大响应值<sup>[12]</sup>。我国电力设施抗震设计规范<sup>[13]</sup>推荐使用的设备抗震设计方法为反应谱分析法，故本文采用反应谱分析方法对

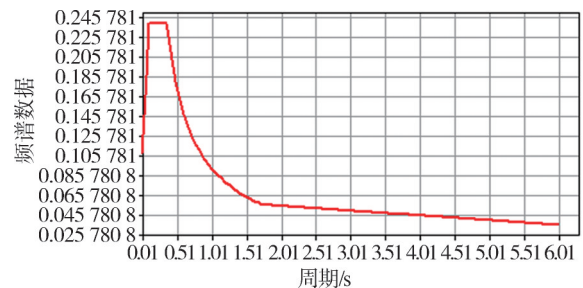
表2 模型的模态频率

Tab. 2 Modal frequency of model

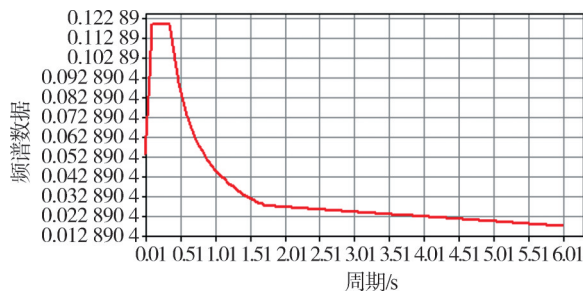
模态阶数	1	2	3	4	5	6
频率/HZ	1.13	1.31	1.63	1.73	2.01	3.55
模态阶数	7	8	9	10	11	12
频率/HZ	5.09	5.61	6.23	7.00	7.97	8.84
模态阶数	13	14	15	16	17	18
频率/HZ	9.22	9.92	10.62	14.15	15.95	16.88
模态阶数	19	20	21	22	23	24
频率/HZ	18.56	19.94	22.84	23.62	23.75	23.84
模态阶数	25	26	27	28	29	30
频率/HZ	24.48	24.82	25.51	26.38	27.33	28.12
模态阶数	31	32	33	34	35	36
频率/HZ	28.44	28.79	28.92	29.40	30.23	34.46

有限元模型进行地震反应谱分析。

地震波包含横波和纵波，实际地震中，竖向激励为水平激励的50%~75%<sup>[14]</sup>。本文根据场地条件，水平X、Y方向地面加速度采用0.3 g，竖向Z方向地面加速度采用0.15 g，结构阻尼比0.05，选用如下图5的地震反应谱函数进行地震反应激励。分别计算地震激励输入方向的组合为X+Z和Y+Z两种情况下结构的动力特性及地震响应。



(a) X、Y向地震影响系数曲线



(b) Z向地震影响系数曲线

图5 XYZ方向地震影响系数曲线

Fig. 5 Curve of seismic influence coefficient in XYZ direction

### 2.3 结构地震反应谱下强度及位移分析

本文对GIL结构在地震反应谱下的强度及位移分析与在大风荷载下强度及位移进行对比分析。计算的工况荷载分别为：

- 1) 大风工况：大风设计风载+自重。
- 2) X+Z地震工况：正常风风载（0.25大风设计风载）+自重+地震X+地震Z。
- 3) Y+Z地震工况：正常风风载（0.25大风设计风载）+自重+地震Y+地震Z。

自重的分项系数取1.3，风载分项系数取1.5，地震的分项系数取1.3，组合时考虑不同方向的风载及地震响应。计算结果详见表3~表5。

表3 位移云线图

Tab. 3 Displacement cloud diagram

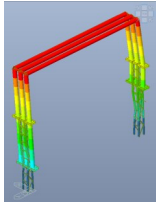
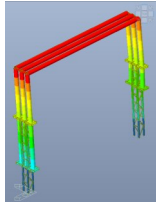
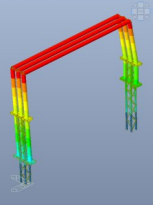
工况	大风工况	X+Z地震工况	Y+Z地震工况
位移云线			
最大位移	X=91.8 mm Y=43.0 mm Z=6.1 mm	X=59.8 mm Y=12.3 mm Z=3.66 mm	X=23.96 mm Y=28.40 mm Z=2.42 mm

表4 GIL应力云线图

Tab. 4 Stress cloud diagram of the GIL

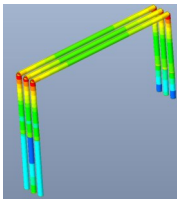
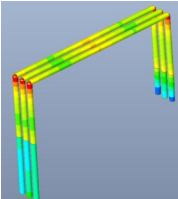
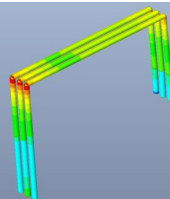
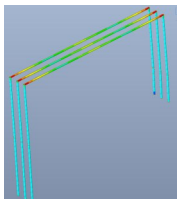
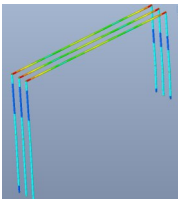
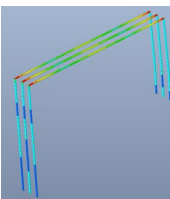
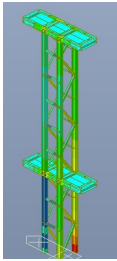
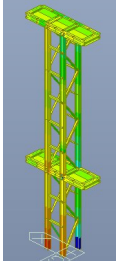
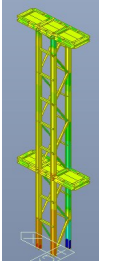
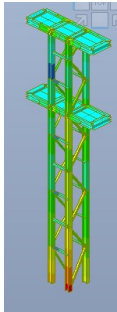
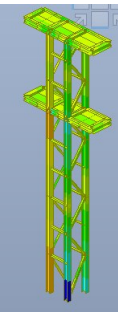
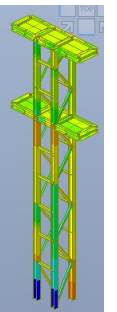
工况	大风工况	X+Z地震工况	Y+Z地震工况
外壳应力云线			
导体应力云线			
最大应力/(N·mm <sup>-2</sup> )	48.72	44.62	47.34
利用率	44.29%	40.56%	43.04%

表5 支架应力云线图

Tab. 5 Stress cloud diagram of the support

工况	大风工况	X+Z地震工况	Y+Z地震工况
左支架应力云线			
左支架应力云线			
最大应力/(N·mm <sup>-2</sup> )	135.2	81.6	76.9
利用率	57.5%	34.7%	32.7%

### 3 结论

1) 本工程中大风工况下结构位移，应力的利用率均比在地震激励组合工况下大，故本工程中大风工况为主要控制工况；

2) 在X+Z, Y+Z不同方向地震激励组合下，结构位移相差较大，应力值相差较小较接近。所以可以得出结论：地震激励输入方向主要影响GIL的位移响应，对应力响应影响较小。

3) 气体绝缘金属封闭输电线路GIL已经通过了抗震计算分析，GIL管道底部支架钢材的计算应力小于钢材的强度，GIL管道本身外壳及导体的计算应力小于铝合金的强度，结构本身有一定的安全系数。

4) 气体绝缘金属封闭输电线路GIL在大风工况下的横向位移偏大，接近于规范规定的H/100，但对于GIL本体来说，位移过大可能会产生塑性不可逆变形，导致漏气甚至管道破裂等严重损坏，建议另行增加支撑，以增加结构的整体刚度，减少侧向位移。

5) GIL管道为充气管道,存在内部预压力,在下一步研究中将在建模中考虑内部预压力对GIL管道结构振动模态与频率的影响。

#### 参考文献:

- [1] KOCH H. Gas insulated transmission lines (GIL) [M]. Chichester, United Kingdom: Wiley-IEEE Press, 2012:33-38.
- [2] 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 J B. Application of gas-insulated metal-enclosed transmission line [J]. China Electric Power, 2008, 41(8):38-43.
- [3] 陈轩恕, 胡毅, 辛耀中, 等. 高压长距离压缩空气绝缘输电线路的发展前景 [J]. 高电压技术, 2009, 35(12):3137-3142.  
CHEN X S, HU Y, XIN Y Z, et al. Prospect of high voltage long distance compressed-air insulated transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12):3137-3142.
- [4] 李鹏, 李志兵, 孙倩, 等. 特高压气体绝缘金属封闭输电线路绝缘设计 [J]. 电网技术, 2015, 39(11):3305-3312.  
LI P, LI Z B, SUN Q, et al. Research on insulation design of UHV gas-insulated metal-enclosed transmission line [J]. Power System Technology, 2015, 39(11):3305-3312.
- [5] 李鹏, 颜湘莲, 王浩, 等. 特高压交流GIL输电技术研究及应用电网技术 [J]. 2017, 41(10):3161-3167.  
LI P, YAN X L, WANG H, et al. Research and application of UHVAC gas-insulated transmission line [J]. Power System Technology, 2017, 41(10):3161-3167.
- [6] 冯士刚. 气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)敷设方式的研究 [J]. 电工技术, 2016(8):84-86.  
FENG S G. Research on laying method of gas insulated metal-enclosed transmission line (GIL) [J]. Electrical Technology, 2016, (8):84-86.
- [7] 国家能源局. 气体绝缘金属封闭输电线路技术条件:DL/T 978—2018 [S]. 北京:中国电力出版社, 2018.  
National Energy Administration. Specification for gas-insulated metal-enclosed transmission line: DL/T 978—2018 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [8] 庞庆平, 郭煜敬, 金光耀, 等. 1 100 kV SF6 气体绝缘金属封闭输电线路关键技术 [J]. 高压电器, 2017, 53(8):34-37+42.  
PANG Q P, GUO Y J, JIN G Y, et al. Technology of 1 100 kV SF6 gas-insulated metal-enclosed transmission line [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8):34-37+42.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 高压开关设备和控制设备的抗震要求:GB/T 13540—2009 [S]. 北京:中国标准出版社, 2009.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Seismic qualification for high-voltage switchgear and controlgear: GB/T 13540—2009 [S]. Beijing: China Standard Press, 2010.
- [10] 吴小峰, 孙启国, 狄杰建, 等. 抗震分析反应谱法和时程分析法数值仿真比较 [J]. 西北地震学报, 2011, 33(3):275-278+304.  
WU X F, SUN Q G, DI J J, et al. Comparison of numerical simulation between response spectrum analysis and time history analysis [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(3):275-278.
- [11] 梁君, 赵登峰. 模态分析方法综述 [J]. 现代制造工程, 2006(8):139-141.  
LIANG J, ZHAO D F, et al. Summary of the model analysis method [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2006(8):139-141.
- [12] 李庆民, 李伯涛, 王健, 等. 气体绝缘金属封闭输电线路地震响应的薄弱部位及其响应规律 [J]. 高电压技术, 2015, 41(5):1437-1445.  
LI Q M, LI B T, WANG J, et al. Weak parts of gas insulated transmission line under seismic response and its response regularity [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5):1437-1445.
- [13] 国家质检总局. 电力设施抗震设计规范:GB 50260—2013 [S]. 北京:中国计划出版社, 2013.  
State Administration of Quality Supervision. Code for seismic design of electrical installations: GB 50260—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [14] CHAKIR A, KOCH H. Seismic calculations of directly buried-gas-insulated transmission lines (GIL) [C]//Anon. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002, [S. l.], 2002. [S. l.]: IEEE/PES, 2002:1026-1029.

#### 作者简介:



黎玉婷

黎玉婷 (通信作者)

1988-, 女, 江西吉安人, 高级工程师, 哈尔滨工业大学硕士, 主要从事换流站、变电站结构设计工作 (e-mail) liyuting@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)