[浮式发电船]

浮式发电船用气体绝缘金属封闭开关设备抗振可靠性研究

文/倪国财　杨　勇
西安西电开关电气有限公司

为保证GIS能够满足发电船的振动工况，在GIS的设计阶段需要对其结构进行相应的抗振仿真校核以及振动试验验证。目前，关于浮式发电船用GIS抗振仿真方法及抗振试验程序和标准较少，结合国内首个220 kV浮式发电船项目的GIS设计经验，对浮式发电船用GIS的抗振仿真方法及振动试验程序进行研究，为相关设计人员提供参考。

随着东南亚地区发展中国家对电力需求的持续增长以及我国ECA方案的局部实施，如何给陆地或港口提供环保又便捷的电力已成为热点问题。在此背景下，浮式发电平台应运而生。浮式发电平台又称为浮式发电船，通过船内发电设备将液态天然气（LNG）转化为电能，经过变电、配电后输送至负载侧。浮式发电船具有建造效率高、投产周期短、快速部署和灵活应用的优势，并且发电燃料清洁无污染，不仅能为其所在港口船舶或岛屿供电，而且能通过配电网将电力输送至其他用电地区。

气体绝缘封闭金属开关设备（GIS）凭借全封闭结构、空间小及抗振性能优良的优势成为浮式发电船中开关设备的首选产品。GIS在随发电船运行、运输以及恶劣天气停机自存时会受到风浪、潮汐等振动载荷的长期作用和影响，为保证GIS可靠运行，必须在设计阶段对GIS进行适海性结构仿真计算及振动试验验证。目前国内关于浮式发电船用GIS抗振仿真方法及振动试验的规范标准较少，国外相关资料也寥寥无几，笔者查阅相关标准并结合国内首个220 kV浮式发电船项目的GIS设计经验，对发电船用GIS的抗振仿真方法及振动试验程序进行研究，为浮式发电船电气设备设计人员提供参考。

浮式发电船及GIS结构特点

1. 浮式发电船结构特点

浮式发电船由船体、料储存仓、燃气发电机、汽机发电机、主变压器、高压配电装置、站用变装置、中低压配电装置、二次继保屏柜、柴油发电机及黑起动设备组成。常规浮式发电船分为S型发电船和G型发电船。S型发电船通常向停泊在港口的船只供电，功率为5～15 MW，输出电压为1～15 kV，采用液态天然气作为燃料，以内燃机作为动力源发电，发的电通过港口连接电缆传输至受电船，使靠港船舶可关闭自己的停泊发电机，减少港口污染。G型发电船功率在125 MW以上，供电电压可达到35 kV以上，相当于水上发电厂，能够使用液态天然气发电，不仅可以为其所在的城市或岛屿提供电力，还可以通过电网将电力传输到本国的任何地区。G型发电船由于发电容量大、供电电压高，配电装置通常使用高压配电柜或者GIS，若输出电压在110 kV以上，则配电装置必须使用GIS设备。G型发电船的布置如图1所示。

发电船船体通常为无动力驳船，目前国内外对于舰船的设计标准及建造规范较为齐全，其中挪威船级社的《船舶入级规范》以及法国船级社的《船板规范BV2000》都对船舶安全等级、结构设计及

电器设计等方面提出了原则性的要求；IMO的《国际散装运输液化气体船舶构造与设计规则》对液化气船舶的设计和建造提出了设计标准和要求；中国船级社的《钢制海船入级规范》《海上拖航指南》《气体燃料动力船检验指南》《液化天然气燃料水上加注趸船入级与建造规范》《油船结构强度直接计算分析指南》等较为全面地对国内船舶的设计、建造、检验以及计算分析提出了原则性的方法和标准，可为发电船的安全设计和可靠运行提供保证。

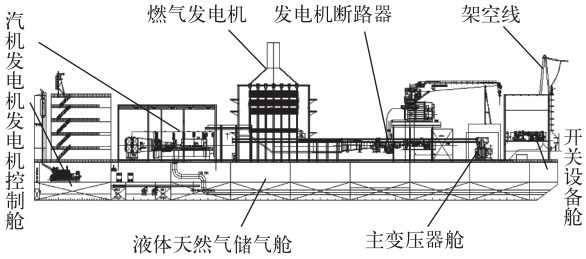

图1　G型发电船布置图

2. GIS结构特点

GIS运行安全系数高，技术性能优良，具有全封闭、占地空间小及安全可靠的优点，较其他开关设备更适合浮式发电船使用。GIS是将设备中的带电元件安装于封闭的铝合金或不锈钢材料制成的金属外壳中，外壳通过铜制接地线与大地连接，外壳内充一定压力的SF_6气体起绝缘灭弧作用。GIS结构如图2所示。GIS各元件外壳机械强度较高，各个组成元件及各个间隔都是通过高强度螺栓紧固连接，整体结构紧凑，抗振性能优良。目前国内标准GB/T 28819—2012《充气高压开关设备用铝合金外壳》规定了GIS壳体设计应力的基准，GB/T 13540—2009《高压开关设备和控制设备抗震要求》规定了GIS产品抗地震方面的相关准则。GIS在发电船领域的设计及校核标准参考海工领域电气设备的相关标准。

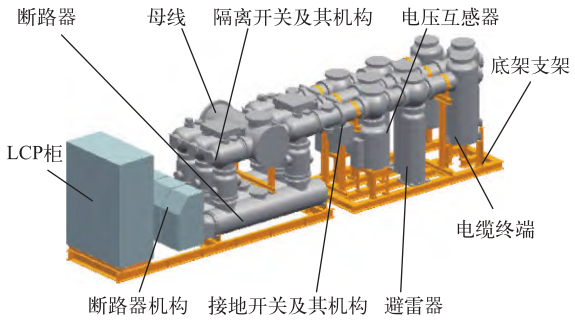

图2　GIS结构图

发电船用GIS的仿真工况

1. 振动工况

发电船用GIS在发电船GIS舱内进行安装和调试，从安装调试完毕至运行需要经历湿拖工况、运行工况以及自存工况。湿拖工况指GIS及发电船内部电力设备安装试验完毕后随发电船由舾装基地拖运至指定区域的运输振动工况；运行工况指发电船在指定区域停泊后GIS运行时的船体振动工况；自存工况指遇到海啸、台风或其他恶劣天气时GIS所经历的振动工况，此时GIS及其他电力设备处于停机状态。以上三种振动工况的实质都是GIS随船体产生的晃动，需要考虑波浪的横摇、纵摇及升沉载荷对GIS结构强度进行校核。

以上工况主要考虑发电船在风浪流作用下的摇摆运动引起的惯性力的作用，加之本身静载载荷，合计称为动态力。动态力主要是由横摇、纵摇、纵荡和垂荡（升沉）引起的。

根据GJB 1060—1991《舰船环境条件》，动态力可以通过计算载荷系数来确定。载荷系数是舰船结构或设备由于重力加速度和舰船运动加速度使其在纵向（X轴）、横向（Y轴）和垂向（Z轴）上受到的载荷与重力的比值。载荷系数由以下方法计算

$$\begin{aligned}\bar{F}_X &= \sin\theta + \frac{S_u}{g} + \frac{4\pi^2}{gT_p^2}\left(\theta^2 X + \theta Z\right)\\ \bar{F}_Y &= \sin\phi + \frac{4\pi^2}{g}\left(\frac{\theta X}{2T_p^2} + \frac{\phi^2 Y + \phi Z}{T_r^2}\right)\\ \bar{F}_Z &= 1.0 \pm \left(\frac{h_e}{g} + \frac{4\pi^2}{gT_p^2}\theta X + \frac{4\pi^2}{gT_r^2}\phi Y\right)\end{aligned} \tag{1}$$

式中，$\bar{F}_{X,Y,Z}$分别为X、Y、Z轴方向上的载荷系数；θ为最大纵摇角，rad；T_p为纵摇周期，s；ϕ为最大横摇角，rad；T_r为横摇周期，s；h_e为垂荡加速度幅值，m/s^2；S_u为纵荡加速度幅值，m/s^2；g为重力加速度，取值9.8 m/s^2；

X、Y、Z为三个轴上的坐标位置；其中X正方向沿船长方向且指向船艏，Y正方向指向右舷，Z正方向从船底指向甲板。

GIS运输阶段分析时，发电船的转动中心位于驳船纵向船中，平行于驳船龙骨并设定此转动中心为坐标原点。

根据实际发电船中GIS产品的布置情况，确定GIS的坐标位置后代入式（1），根据三种工况的

最大纵摇角度、纵摇周期、最大横摇角度、横摇周期、垂荡加速度和纵荡加速度计算出三种工况下GIS的载荷系数，三个方向的载荷系数乘以重力加速度转化成三个方向的加速度a_x、a_y、a_z，再将三个方向的加速度作为静态载荷，对GIS进行三种振动工况下的结构受力仿真分析，以此判断GIS在发电船振动工况下的可靠性。

2. 运行工况下的疲劳分析

发电船运行工况比湿拖工况以及自存工况更长，为岛屿供电的G型发电船的运行时间可能长达数年。发电船用GIS在长期的振动运行工况下还需考虑振动疲劳的影响，对因摆动带来的加速度励磁载荷下的动力响应，可以采用响应谱分析进行评估。响应谱分析可用于估计特定加速度励磁下结构的峰值响应（包括位移和应力），多用于近似估计结构在随机荷载及随时间变化荷载（如地震荷载、风荷载、海洋波浪荷载及喷气发动机推力荷载）作用下的动力响应。响应谱分析需要知道响应谱曲线及相应的设备阻尼系数。

应用该方法时，首先进行产品的模态分析，通过检查各个模态的质量参与程度（一般而言，重量参与系数在水平方向一般大于模型可动质量的90%）确定进行谱分析的振型数。然后进行谱分析，沿着结构的两个正交水平方向相等地施加平台的谱值。对于振型响应组合，使用完全二次组合（CQC）方法；对于方向响应组合，使用平方和的平方根（SRSS）方法组合。

通常GIS主体结构为铝合金材料，支撑结构为结构钢材料，图3给出了美国材料标准MMPDS中的*S-N*曲线，将上述运行工况下GIS谱响应分析计算的最大应力对照该曲线，可知GIS主体的应力水平以及疲劳寿命周期。

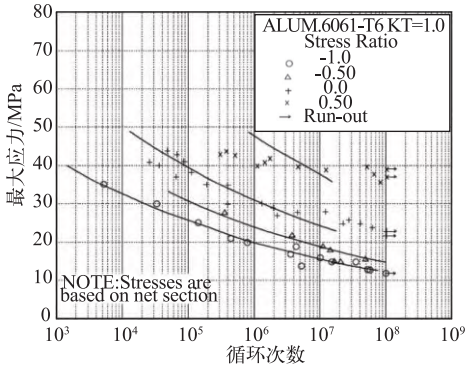

图3　美国材料标准中铝合金材料的*S–N*曲线

根据中国船级社海洋工程结构物疲劳强度评估指南，对于受力复杂的结构钢板件结构，可采用非管节点与之匹配的*S-N*曲线进行。图4为钢结构非管节点*S-N*曲线，图中B、C、D、E、F、F2、G和W分别对应不同类结构节点的*S-N*曲线。将上述运行工况下GIS谐响应分析计算的最大应力对照该曲线，可知GIS支撑结构的应力水平以及疲劳寿命周期。

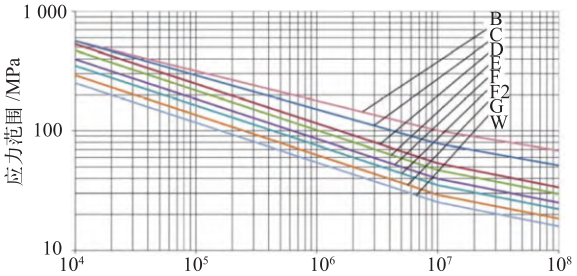

图4　非管节点结构钢材料的*S–N*曲线

3. 运行工况耦合GIS温升以及舱体下挠分析

GIS随发电船正常运行时，本体结构不仅要承受由于发电船晃动加速度引起的影响，还要承受由于壳体温度升高引起的热应力和热变形。

发电船中GIS安装在GIS舱内，环境温度对GIS温升影响较小，主要考虑设备运行时GIS内部导体发热对GIS壳体的热传递温升。正常运行时GIS导体温升为30 ℃，保守认为GIS壳体温升与环境温升总和为45 ℃，图5为GIS在运行工况下以及温升工况下的分析模型。

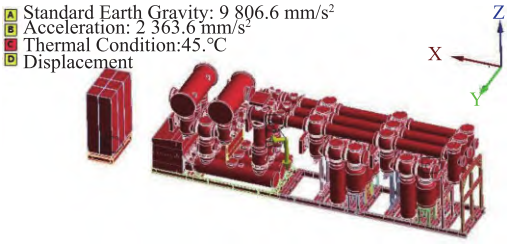

图5　GIS在运行工况下以及温升工况下的分析模型

通常发电船GIS舱体为钢结构，舱体由于自重以及船体自重产生一定挠度的变形，此情况下进行GIS结构强度分析时，需要同时考虑GIS运行工况下的等效振动加速度，并耦合GIS的温升载荷以及舱体下挠位移。

发电船用GIS的振动试验设计

1. 振动试验目的

通过仿真计算可以精确计算发电船用GIS外部

壳体、支架的应力、变形及疲劳强度，但难以精确计算GIS内部导体、触头等连接部件的接触强度，也难以模拟在振动工况下断路器与隔离开关能否可靠关合，需要采取试验方法验证。

振动试验的主要目的是通过试验方式验证GIS在振动工况下的结构强度、机构可靠性和电气可靠性，其中结构强度验证是模拟发电船的振动响应对GIS结构的影响，验证GIS经受规定严酷度正弦振动的能力，论证GIS的机械结构完好性以及相关动态特性；机构可靠性验证通过测量振动试验过程中GIS机构的分合闸机械特性曲线，验证断路器和隔离开关机构特性在满足振动工况下是否可靠使用；电气可靠性验证通过振动试验后的密封试验、回路电阻试验和工频耐压试验验证GIS的电气绝缘性能在振动工况下的电气可靠性。

2. 振动试验程序

GIS在厂家安装完毕后，需要按照GB/T-11022—2020《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》完成出厂试验。试验通过后运输至振动试验机构，可参照GB/T 7094—2016 《船用电气设备振动（正弦）试验方法》以及 GD22—2015《中国船级社电气电子产品型式认可试验指南》按以下程序进行振动试验以及相关试验，如图6所示。

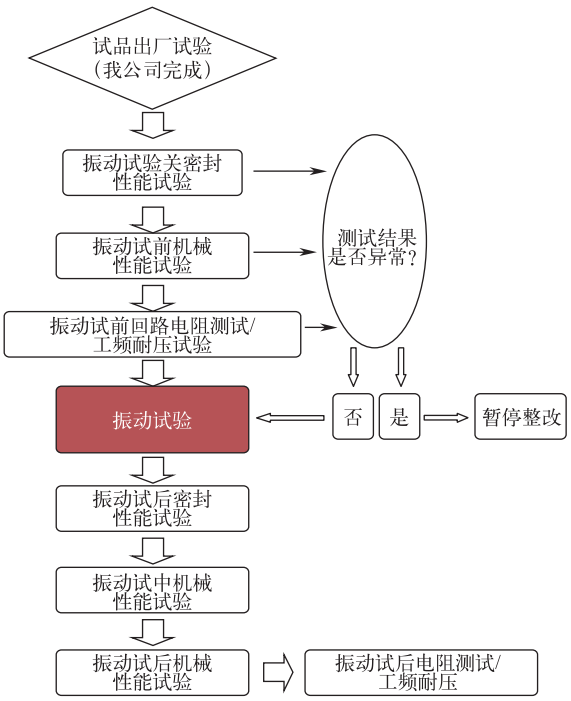

图6　GIS振动试验程序

振动试验包含扫频试验和振动耐受试验，其中扫频试验是在三个正交轴上分别进行试验，扫频范围5～100 Hz，振幅0.2 g，扫频速率1 oct/min，并监测GIS的动态参数，寻找共振频率；振动耐受试验时，若存在危险频率，在三个正交轴上分别进行危险频率范围内、90 min振幅0.7 g的振动试验。若没有危险频率，在三个正交轴上分别进行30 Hz、90 min 耐振试验，振幅0.7 g振动试验。

3. 振动试验样机方案

试验形态采用GIS单相结构，总重量约为1 650 kg，外形尺寸为4 012 mm×750 mm×3 143 mm。该试验形态优点是元件较少、成套周期短，样机形态如图7所示。

图7　GIS振动试验样机形态

4. 振动试验重点检查内容

振动试验确定GIS样品的机械薄弱环节和特性降低情况，结合GB/T 7094—2016《船用电气设备振动（正弦）试验方法》和GD22—2015《中国船级社电气电子产品型式认可试验指南》判定样品是否可以接受，用于论证GIS的机械结构完好性和振动特性。具体检查内容包含：

1）振动试验后法兰、绝缘盘子、支架及底架没有机械结构破坏或损伤。

2）振动试验后连接件无松动或脱落。

3）GIS在试验过程中机构操作正常，机械特性曲线无异常。

4）振动试验后GIS中机构操作正常，机械特性曲线无异常。

5）振动试验后GIS密封性能正常。

6）振动试验后GIS电阻值符合出厂标准。

7）振动试验后进行GIS工频耐压试压，试验符合标准。

结束语

浮式发电船用GIS在随发电船运行、运输以及恶劣天气停机自存时受到风浪、潮汐等振动载荷的长期作用和影响。为保证GIS满足发电船的振动工况，在GIS的设计阶段需要对其结构进行相应的抗振仿真校核以及振动试验验证。

依据国内首个220 kV发电船GIS的设计方法，结合相关海工标准提出了发电船用GIS结构仿真计算时的几种工况受力要求，以及一套振动试验程序和试验要求，只有当仿真结果及试验结果同时满足安全系数的要求，才可以认为发电船用GIS结构设计合理，满足发电船使用的结构要求。EA

（收稿日期：2023-04-14）

参考文献

[1] 黎斌．SF_6高压电器设计[M]．北京：机械工业出版社，2009．

[2] 张文昊．浮式LNG发电船设计[D]．武汉：武汉理工大学，2018．

[3] 文艳．大型浮式平台结构强度[J]．中国海洋平台，2019，34(5)：37-40．

[4] American Petroleum Institute，designing，constructing fixed offshore platforms-working stress design：API recommended practice 2A-WSD[S]．USA：Publishing Service API，2014．

[5] 杨勇，史方颖，潘巧梅．海上风电用气体绝缘金属封闭开关设备抗振可靠性研究[J]．电气技术，2022，21(8)：31-40．

[6] 方舟，刘辉，张伟，等．气体绝缘封闭金属开关设备运输振动风险评估算法设计与系统实现[J]．电气技术，2021，22(4)：57-62．

[7] 董艳秋．深海采油平台波浪载荷及相应 [M]．天津：天津大学出版社，2005．

[8] 周丹．波浪载荷作用下施工平台随机动力响应分析[J]．重庆交通大学学报，2008 (3)：370-373．

[9] 杨志勇，元和平．随时间变化的海洋平台结构系统可靠性分析[J]．海洋工程，1998，16(4)：1-6．

[10] 姚卫星．结构疲劳寿命分析[M]．北京：国防工业出版社，2003．