

[GIS]

GIS母线筒体设计与波纹管配置研究

文/平高集团有限公司 贾耿锋 郭煜敬 蒋晓旭

国网青海省电力公司检修公司 李 军 郅 啸 刘 荣 白 伟

基于GIS设备的运行现状，根据GIS筒体固定支撑存在裂纹和开裂的问题，利用理论计算和仿真分析进行GIS母线筒体厚度以及两固定支撑间跨距的计算。通过仿真和工程经验进行了筒体中波纹管配置研究，对比了GIS筒体在不同类型波纹管下对于固定支撑的影响。研究结果为GIS筒体设计和波纹管在GIS中的配置提供了重要依据。

在变电站检修中发现，GIS运行时由于受周围环境温度变化、地基沉降等因素影响，GIS设备中固定支撑处会发生不同程度的裂纹和开裂，在高海拔、大温差等环境条件下支撑开裂情况更为严重。筒体支撑的开裂将影响GIS的安全运行，甚至出现GIS中气体的泄露，可能造成严重的电力事故。

GIS固定支撑除GIS设备本身的重力外，还受到筒体内SF₆气体压力以及温升变化造成的温度应力的影响。因此筒体内壁要进行剪切强度的校核，筒体两端支撑的跨度应满足强度和刚度的要求；同时为合理设置母线筒体固定支撑间的跨度以及支撑的强度，还要进行GIS母线筒体母线筒体波纹管配置的研究，确保设备安全稳定的运行。将从以上几个方面进行GIS筒体设计以及波纹管配置的研究。

GIS母线筒体厚度确定的计算

1. 母线筒体内应力分布分析

为了确定母线筒体的厚度，应首先研究筒体内的应力分布情况。筒体一般来说分为薄壁筒体和厚壁筒体，在只考虑内压的作用下，筒体中主要存在径向应力 σ_r 、环向应力 σ_θ 和轴向应力 σ_L 。

筒体模型如图1所示。

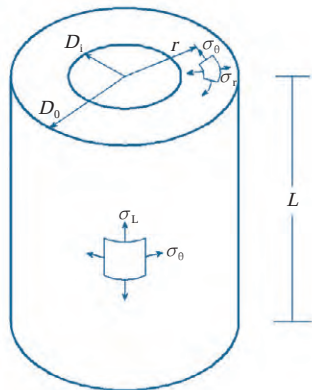


图1 内压作用下筒体中的应力

薄壁筒体和厚壁筒体一般以式（1）为界进行区分。

$$K = D_0/D_i = 1.2 \quad (1)$$

当 $K \leq 1.2$ 时为薄壁筒体，反之为厚壁筒体。显然，GIS母线筒体属薄壁筒体。因此由材料力学可知，内压作用下筒体的轴向应力 σ_L 为

$$\sigma_L = \frac{pD}{4S_0} \quad (2)$$

环向应力 σ_θ 为

$$\sigma_\theta = \frac{pD}{2S_0} \quad (3)$$

式（2）和式（3）中， p 为内压力，单位为

MPa; D 为平均直径, 等于 $(D_0 + D_i)/2$, 单位为mm; S_0 为壁厚, 单位为mm。

通过ANSYS将筒体模型施加内压, 得到筒体中应力的具体分布情况分别如图2、图3所示。

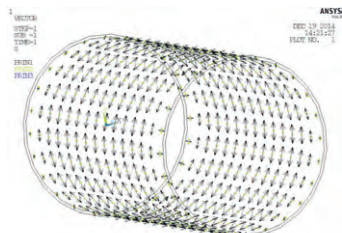


图2 内壁施加压力时筒体的应力分布

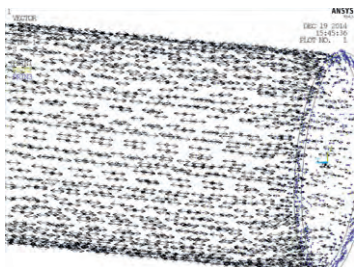


图3 端部施加压力时筒体的应力分布

通过计算和仿真分析可以看出, 薄壁筒体的环向应力和轴向应力远大于径向应力, 因此得到GIS筒体中环向应力 σ_θ 为轴向应力 σ_L 的2倍, 径向应力 σ_r 可以忽略。

2. 内压作用下母线筒体壁厚的确定

根据以上结论可知, 筒体中最大应力为环向应力 σ_θ , 筒体最小应力为径向应力 σ_r , 约为零, 则根据最大剪切强度理论, 得

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \sigma_\theta - 0 \leq [\sigma]^t \quad (4)$$

将式(2)代入式(4), 同时考虑到 $D = D_0 - S_0$, 最终求解 S_0 不等式, 得

$$S_0 \geq \frac{pD_0}{2[\sigma]^t + p} \quad (5)$$

若考虑焊接接头以及温度对于筒体厚度计算的影响, 对式(5)进行修正, 得

$$S_0 \geq \frac{pD_0}{2[\sigma]^t E_j + Yp} \quad (6)$$

式中, $[\sigma]^t$ 为筒体在设计温度下的许用应力, 单位为MPa; E_j 为焊接接头系数; Y 为温度影响系数, 可以查表得到。

需要说明的是, 计算得到的筒体厚度需根据材料负偏差圆整到材料标准中所规定的厚度。该计算方法应用于公司的GIS筒体设计, 并得到了工程验证。

母线筒体允许跨距的计算

母线筒体允许跨距是指两固定支撑间所允许

的最大间距, 其计算就是在满足母线筒体自身安全的同时, 尽量减少支架的数量, 以减少工程费用和投资。

在GB 50316《工业金属管道设计规范》中对允许的跨距有明确的规定, 即水平管道支架最大间距应满足强度和刚度条件。

1. 按强度条件的筒体跨度计算

GIS母线筒体一般为连续敷设管道, 因此利用工程中较为常用的三跨连续梁模型。其模型如图4所示。

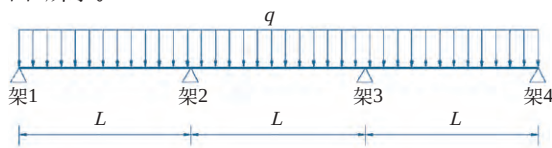


图4 三跨连续梁模型

计算得三跨连续梁模型最大弯矩 $M_{\max}$ 为

$$M_{\max} = \frac{qL^2}{10} \quad (7)$$

式中, q 为单位长度的总重量, 单位为N/m; L 为跨距, 单位为m。

母线筒体在正常运维时, 同时受到重力载荷和筒体内压力的共同作用, 因此筒体内最大轴向弯曲应力为

$$\sigma_L = \frac{qL^2}{10W} + \frac{\sigma_\theta}{2} \quad (8)$$

根据一次应力校核强度条件, 得到最大允许跨距 L 为

$$L = 0.1 \sqrt{\frac{(2[\sigma]^t - \sigma_\theta)W}{2q}} \quad (9)$$

2. 按刚度条件的筒体跨度计算

刚度条件下的筒体跨度计算时, 其固有频率计算为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\Delta}} \quad (10)$$

式中, g 为重力加速度, 即 9.8 m/s^2 ; Δ 为两支架间筒体的最大挠度, 单位为mm。

通过式(10)得三跨连续梁模型边跨的最大挠度为

$$\Delta = \frac{0.677 \times 10^7 qL^4}{E^t I} \quad (11)$$

根据GB 50316规定, 装置外两支架间管道的最大挠度不大于38 mm, 也即 $\Delta \leq 38 \text{ mm}$, 因此筒体由刚度条件计算的最大跨距为

$$L = 0.048 \times \sqrt[4]{\frac{EI}{q}} \quad (12)$$

式中, E 为筒体材料的弹性模量, 单位为MPa; 为筒体截面惯性矩, 单位为 mm^4 。需要说明的是以上的跨度计算为筒体最基本的要求, GIS筒体

的跨度尺寸的确定还需要与筒体中的柔性连接吸收变形的范围相匹配。

GIS母线中的波纹管配置研究

GIS母线中波纹管应用的目的是为了吸收GIS制造、安装产生的误差以及吸收热胀冷缩产生的位移变形。GIS设备中波纹管根据使用情况主要分为两大类：安装型波纹管 and 温度补偿波纹管。常见的为拉杆型波纹管、碟簧式波纹管和力平衡波纹管。

1. GIS中波纹管常用种类

(1) 拉杆型波纹管

拉杆型波纹管分单式和复式，单式拉杆型波纹管主要用于补偿GIS的加工及安装误差、GIS间隔直连的安装和拆卸以及户内站的热补偿，因为这种波纹管只能吸收筒体的轴向位移而不能承受波纹管内推的压力。复式拉杆型波纹管主要用于吸收轴向（横向）位移和波纹管内压，内压通过波纹管的拉杆承受。单式拉杆型波纹管如图5所示。

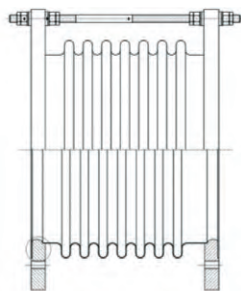


图5 单式拉杆型波纹管

(2) 碟簧结构型波纹管

碟簧式波纹管属于自由型波纹管，为动态补偿，一般用于调节母线的热胀冷缩以及地基沉降。由于碟簧组件的刚度较高，因此波纹管内产生的内压压力与碟簧产生的拉力可以达到平衡，波纹管本身对设备没有推力或者有很小的推力，保证了设备的安全运行。但由于碟簧波纹管吸收位移时波纹管长度会产生变化，因此碟簧波纹管不能完全平衡波纹管的内压推力。碟簧波纹管如图6所示。

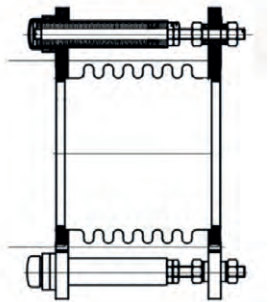
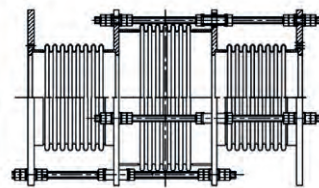


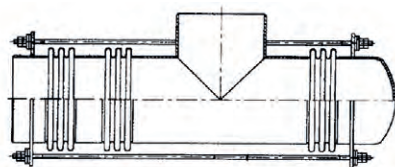
图6 碟簧结构型波纹管

(3) 力平衡型波纹管

力平衡波纹管能够吸收较大的热伸缩变形量，可以调整组装误差。压力平衡器波纹管通过自身结构使内压引起的推力保持平衡，推力不作用或少作用在相连的设备上，同时能够保证自身的轴向补偿功能。力平衡波纹管又分为直管力平衡波纹管和端头力平衡波纹管。其结构如图7所示。



(a) 直管力平衡波纹管



(b) 端头力平衡波纹管

图7 力平衡波纹管示意图

2. GIS中波纹管配置原则

目前我公司GIS设备波纹管主要应用有拉杆型波纹管、碟簧波纹管以及压力平衡波纹管3种，以下将通过ANSYS应力分析说明GIS中不同波纹管的配置和使用。

GIS母线筒体主要受热变形和筒体内压力的作用，如果筒体中没有波纹管吸收变形，其模型如图8所示。

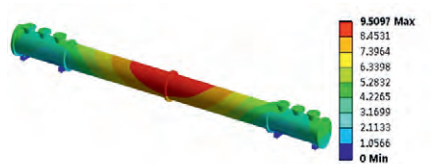


图8 无波纹管时母线筒体模型

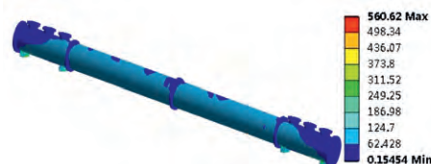
GIS额定压力为0.5 MPa，假设环境温度为一20~30℃，由母线发热导致的温升为20 K，也即母线筒体温升设为70 K，为有明显对比，以下分析参数相同。将模型导入Workbench中，设置对应参数，求得结果如图9所示。



(a) 一端固定而另一端自由滑动时母线筒体的变形量



(b) 两端固定时母线筒体的变形量



(c) 两端固定时母线筒体的所受应力

图9 无波纹管时母线筒体变形和应力分布

由以上分析可以看出,当母线筒体不设置波纹管而直接两端固定时,筒体由温升和内压产生的变形不能得到释放,筒体的变形量仅为9.5 mm,固定支撑处承受的应力为560.62 MPa,已超出材料的强度极限280 MPa。因此当不设置波纹管时,固定支撑须承受的应力很大,容易产生支撑处的开裂。

在110 kV、220 kV以及330 kV的变电站的GIS设备中用于吸收热伸缩的波纹管主要有拉杆型波纹管和碟簧波纹管。

拉杆型波纹管能承受筒体轴向位移,但不能承受筒体内的压力推力,分析模型时,波纹管用弹簧连接代替进行变形和应力分析,结果如图10所示。



(a) 安装波纹管时母线筒体的变形量



(b) 安装波纹管时母线筒体的应力分布

图10 无拉杆波纹管下母线筒体变形和应力分布

从以上分析可以明显看出,同样的筒体在安装波纹管后,变形量由原来的9.5 mm变为15.2 mm,筒体产生的变形通过波纹管得到有效的释放,筒体支撑处的最大应力由原来的560.6 MPa降低到269.8 MPa,说明波纹管在母线中作用明显。但是拉杆波纹管作

为温度补偿时,一般不用于户内站,特别是大温差、高海拔地区,以下为青海省某330 kV户外变电站中检修发现的GIS(仅有拉杆波纹管)中筒体支撑开裂情况,如图11所示。



图11 拉杆波纹管应用于户外站时出现的支撑开裂

在550 kV、800 kV以及1 100 kV变电站设备中用于吸收热伸缩的波纹管主要为力平衡波纹管。力平衡波纹管由两个工作波纹管和一个平衡波纹管组成,力平衡波纹管能够吸收较大的热伸缩变形量,可以调整组装误差,最重要的是可以通过自身结构使内压引起的推力保持平衡,波纹管固定支撑仅受到波纹管变形产生的作用力。将拉杆型波纹管模型内去掉内压影响进行分析,即得到安装压力平衡波纹管下的母线筒体的变形和应力分析情况,如图12所示。



(a) 安装力平衡波纹管时母线筒体的变形量



(b) 安装力平衡波纹管时母线筒体的应力分布

图12 力平衡波纹管下母线筒体变形和应力分布

通过以上分析,说明力平衡波纹管的使用,筒体支撑处的最大应力由原来的560.6 MPa降低到140.7 MPa,效果明显。

碟簧波纹管的碟簧组件可以承受部分的筒体内压而不能完全平衡,碟簧波纹管使用效果介于拉杆型波纹管和力平衡波纹管之间。

从检修经验来看,与仿真分析结果相符。在高海拔和大温差地区,GIS中仅设置拉杆型波纹管的设备容易出现支撑开裂,而经过科学计算同时布置力平衡波纹管的GIS设备支撑发生开裂概率较小。因此GIS母线波纹管的类型设置还应充

分考虑温度变化、地基沉降、允许安装误差量以及经济因素等。由以上分析可以得到，拉杆型波纹管只能补偿轴向变形，不能平衡筒体的内压；碟簧波纹管可以吸收一定轴向和横向的变形，性能优于普通拉杆型波纹管，但碟簧波纹管的价格要高于拉杆型波纹管。力平衡波纹管能够完全平衡筒体的内压推力，可以降低对于固定支撑的要求，但是价格昂贵。

结束语

根据理论计算并结合仿真分析进行了GIS母

线筒体设计与柔性连接的研究，得到如下结论。

1) 依据理论计算和仿真分析验证了内压作用下筒体的应力分布，从而为确定筒体的厚度尺寸提供可靠的理论依据。

2) 利用仿真技术研究了不同类型波纹管的使用效果，为不同种类波纹管的使用提供了可靠的理论依据，并通过工程经验得到，在高海拔大温差地区，拉杆型波纹管不能在户外站用于作温度补偿。EA

(收稿日期：2015.06.05)

(编辑：刘群点)

施耐德电气推出Masterpact NW“即插即用”解决方案老客户感恩回馈计划

2015年11月4日，全球能效及自动化领域管理专家施耐德电气宣布，将为15年来购买、使用施耐德电气梅兰日兰Masterpact M断路器的老客户，提供新型Masterpact NW“即插即用”解决方案的升级安装服务，并做出30 min完成更换、母排不需断电、配电柜无需改动等多项承诺。此举不仅能为即将进入断路器改造换代阶段的施耐德电气老客户带来一次“无间断”的升级体验，也体现了能效专家在技术领域的精益求精与突破创新，更彰显出施耐德电气始终秉承的“心系客户，于细微之处为客户着想”的服务理念。

1个计划，积极关爱15年老客户

作为施耐德电气为中国市场客户量身定制的一款经典之作，梅兰日兰Masterpact M断路器（以下简称M断路器）15年来始终以稳定卓越的性能，服务上万家客户，并得到他们的青睐与信任。如今，大多数梅兰日兰Masterpact M都已运转数年，而随着技术的发展，将产品进行更新换代，是提升配电设备的性能、延长其使用寿命的必备之举。作为梅兰日兰Masterpact M的升级版本，施耐德电气于2011年推出的Masterpact NW“即插即用”解决方案在产品性能、设计等各方面都进行了创新性升级，产品在上市后的近5年时间里获得了广大用户的一致赞誉。

因此，为回馈客户信任，施耐德电气诚意提出“Masterpact NW‘即插即用’升级解决方案的计划”，为客户提升设备性能、延长使用寿命。对“M断路器”的客户而言，这不但是一条最安全快速的升级通道，还可避免由于无法及时获取老设备的备品备件服务而对供电连续性产生的负面影响。

2步行动，轻松完成升级过程

如何将升级过程对用户日常业务运作产生的影响降至最低状态，始终是施耐德电气考虑的重点。为此，Masterpact NW“即插即用”解决方案创造性地提出了“30分钟2步走”的更换概念。首先，现场的M断路器的抽架在进行更换时将被保留，随后，只需在相关电路被隔离的情况下更换断路器本体，无需调整开关柜内的母排和电缆，即可完成整个升级过程。

该方案不仅将更换过程对现有配电柜的影响降至最低，最大限度减少了更换过程的断电对业务生产的影响，还可让用户全程享受施耐德电气所提供的定制断路器和覆盖全国的现场安装服务。此外，升级完成之后，用户仍将享受施耐德电气提供的质保期及备品备件服务。

多项奖励，诚心邀赴感恩之约

为了让更多M断路器的用户了解并加入此次的升级计划，施耐德电气还特别推出了“寻找老M”的重金悬赏活动。老客户只需要提交申请表单参与升级，即可在享受Masterpact NW“即插即用”解决方案卓越性能的同时，参与到施耐德电气回馈老M用户的抽奖活动中。