[GIS]

膨胀节在GIS中的使用方法

文/西安西电开关电气有限公司　王兆军　聂二磊　谢田桑

介绍了在GIS中使用的几种膨胀节的形式，介绍了膨胀节在GIS母线中的使用和计算方法。

膨胀节是利用其内部的一个或多个部件的有效变形来吸收管道、容器等尺寸变化的一种补偿装置，其中变形部件最常用的是金属波纹管。在不要求明确其结构形式时也可把金属波纹管膨胀节简称为膨胀节。膨胀节可以吸收轴向、径向或角向位移，用于补偿管道的热胀冷缩、机械位移、吸收振动、降低噪声等用途。

气体绝缘开关设备（GIS）由断路器、隔离开关、接地开关、互感器、避雷器、主母线、分支和出线终端等多种元件组成，这些元件全部封闭在金属接地的外壳中，在其内部充有一定压力的SF_6绝缘气体。由于GIS的主母线和分支大多比较长，所以必须使用波纹管膨胀节来调整安装误差和补偿热胀冷缩变形。如果膨胀节和母线配合不好，容易出现漏气、支架变形等故障。笔者结合自己的设计经验，谈谈如何在GIS的设计中正确使用膨胀节。

膨胀节的类型

在GB 12777《金属波纹管膨胀节通用技术条件》中将波纹管膨胀节分为单式轴向型、单式铰链型等10种形式，按照膨胀节中波纹管的形式分为无加强U形、加强U形和Ω形3种。GIS中通常使用无加强U形波纹管的单式轴向型、复式拉杆型、压力平衡型膨胀节。本文只就这3种形式的膨胀节进行介绍。

1．单式轴向型膨胀节

单式轴向型膨胀节由一个波纹管、两端的法兰和拉杆构成，如图1所示。它只能够吸收轴向的变形，且不能够承受母线内部压力引起的推力。所以单式轴向型膨胀节必须在法兰的四周安装拉杆来进行限位。在拉杆上安装有限位用的双螺母，分别位于法兰的内侧和外侧。如果只调整安装误差，在安装完毕后要将内外限位螺母锁紧，拉杆将膨胀节固定住。如果要考虑调整温度引起的变形，则需要将其中一个法兰的限位螺母松开，使膨胀节能够随着两侧母线长度变化而变化，如图1所示。

单式轴向型膨胀节的特点是结构简单，因此在GIS中广泛使用。缺点是变形范围有限，因此在超长的母线中使用时需要使用多个且支架设计非常复杂。

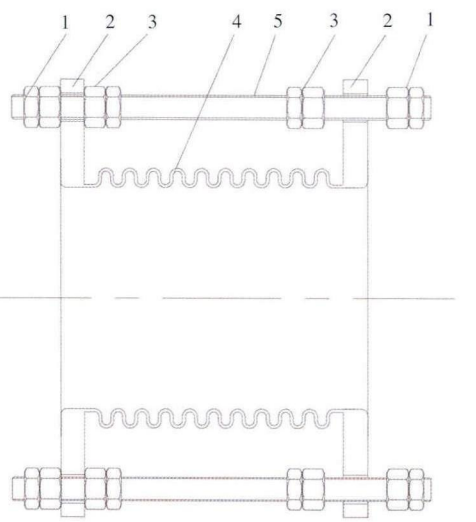

图1　单式轴向型膨胀节

1—外侧锁紧螺母；2—法兰
3—内侧锁紧螺母；4—波纹管；5—拉杆

2．压力平衡型膨胀节

压力平衡型膨胀节常用的有直管压力平衡型和碟簧平衡型。它只能够吸收轴向的变形，且能够承受母线内部压力引起的推力。

直管压力平衡型膨胀节由两个位于两端的工作波纹管和一个位于中间的平衡波纹管及拉杆、法兰构成，如图2。法兰A和法兰C使用拉杆H固定在一起，法兰B和法兰D使用拉杆K固定在一起。其原理是当膨胀节两侧的壳体遇冷收缩或内部充气后，法兰A、D受到方向向外的拉力，中间波纹管F被压缩，工作波纹管E、F被伸；反之，当膨胀节两侧的壳体遇热膨胀，法兰A、D受到方向向内的推力，中间波纹管F被拉伸，工作波纹管E、G被压缩。波纹管的变形吸收了壳体的变形，从而消除了或减小了热胀冷缩时壳体的机械应力。

直管压力平衡型膨胀节的使用方式与单式轴向型膨胀节相似，都是吸收膨胀节轴向的变形，它可以承受母线内部压力产生的推力，因此对GIS母线固定支架的刚性要求低。其缺点是结构复杂，自身重量大，中间波纹管的两个法兰靠拉杆固定，波纹管的横向刚度很低，中间波纹管的法兰的自重容易使波纹管弯曲。因此仅在离地面很高的不易布置固定支架的母线中使用。

碟簧平衡型膨胀节由由一个波纹管、两端的法兰和带碟簧的拉杆构成，如图3所示。带碟簧拉杆的内部结构见图4。在工厂装配时，碟簧已经被预压紧。其原理是当膨胀节两侧的壳体遇冷收缩或内部充气后，两端的法兰受到方向向外的拉力，波纹管被拉伸，碟簧被压缩；反之，当膨胀节两侧的壳体遇热膨胀，两端的法兰受到方向向内的推力，波纹管被压缩，碟簧被释放。碟簧平衡型膨胀节的使用方式和优点与直管压力型膨胀节（见图2）相似。由于其只有一个波纹管，所以避免了直管压力平衡型膨胀节结构复杂、自重大的缺点。

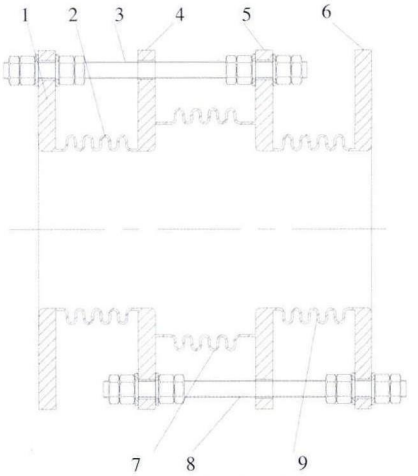

图2　直管压力平衡型膨胀节

1—法兰A；2—工作波纹管E；3—拉杆H
4—法兰B；5—法兰C；6—法兰D
7—中间波纹管F；8—拉杆K；9—工作波纹管G

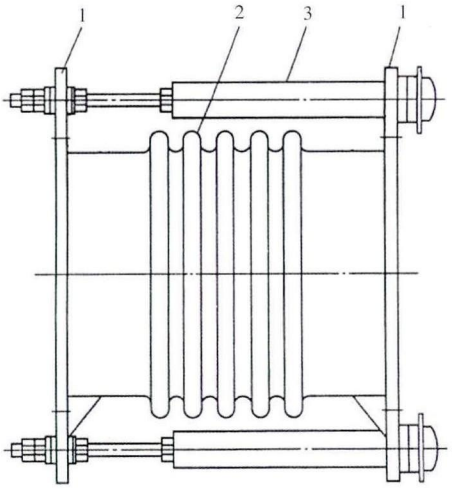

图3　碟簧平衡型膨胀节

1—端部法兰；2—波纹管；3—带碟簧的拉杆

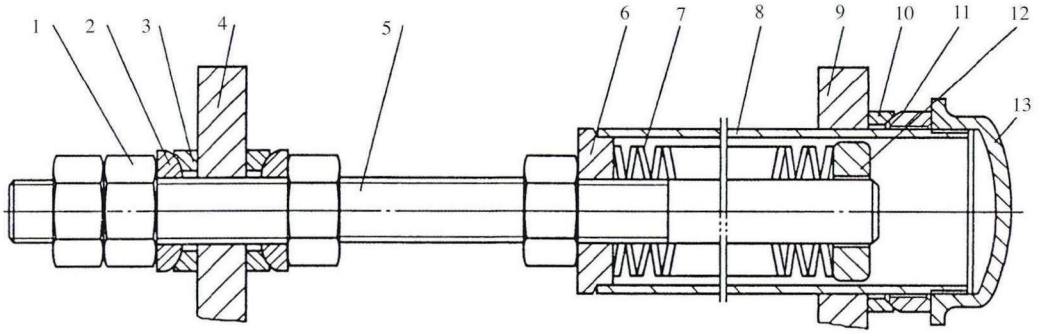

图4　碟簧平衡型膨胀节的碟簧组件结构

1—螺母；2—球面垫圈1；3—锥面垫圈1；4—法兰1；5—拉杆；6—筒座
7—碟簧；8—碟簧筒；9—法兰2；10—锥面垫圈2；11—球面垫圈2；12—挡块；13—帽

www.eage.com.cn

3．复式拉杆型膨胀节

复式拉杆型膨胀节分为使用波纹管的和不使用波纹管的复式拉杆型膨胀节。它不能够承受母线内部压力引起的推力，所以必须使用四周的拉杆进行限位。它以吸收径向变形为主，仅能够在很小的范围内吸收轴向变形，在设计过程中通常不将其吸收轴向变形计算进去。

使用波纹管的复式拉杆型膨胀节由两个波纹管、中间壳体和拉杆构成，如图5所示。端部波纹管A一侧拉伸另外一侧压缩，端部波纹管B则与其相反，一侧压缩另外一侧拉伸，膨胀节两端的法兰产生错位，所以可以吸收任意方向的膨胀节径向变形。

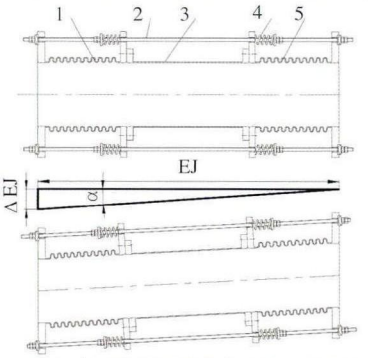

图5　复式拉杆型膨胀节及其变形过程

1—端部波纹管A；2—拉杆
3—中间壳体；4—支撑弹簧；5—端部波纹管B

图6所示是另一种复式拉杆型膨胀节。它不使用波纹管，依靠端部法兰和中间壳体的相对滑动来产生变形，是使用波纹管的复式拉杆型膨胀节的一个变种。它与使用波纹管的复式拉杆型膨胀节相比，由于没有波纹管，所以成本稍低。但是由于在每一次变形时端部法兰和中间壳体都要和密封圈摩擦，对零件表面粗糙度要求极高，并且必须采取措施保证密封圈能够耐受多次摩擦，否则非常容易造成SF_6气体泄漏。

复式拉杆型膨胀节的优点是允许径向变形量与其长度成比例，可以通过加长长度来增加变形量，因此变形范围非常大。它的缺点是由于只能用于调整膨胀节径向方向的变形，膨胀节的轴线必须与变形方向也就是母线的轴线方向垂直，所以复式拉杆型膨胀节要与母线垂直布置才能调节母线的变形，在空间受到限制的时候设计困难。

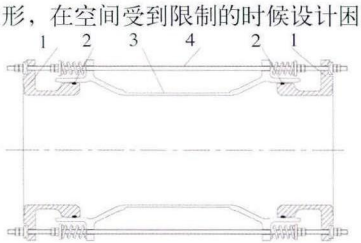

图6　不使用波纹管的复式拉杆膨胀节

1—端部法兰；2—密封圈；3—中间壳体；4—拉杆

GIS母线的变形

GIS母线变形产生的原因有安装尺寸误差产生的变形；基础不均匀沉降产生的径向变形；母线自身热胀冷缩产生的轴向变形。

1．安装误差补偿的变形

安装误差的大小主要取决于制造和安装水平。如果母线一端是安装位置容易调整的，例如出线套管，则安装误差可以不考虑。如果母线两端都不易调整，如两个间隔之间的主母线，其安装误差按照5～10 mm考虑，方向为GIS母线的长度方向。安装的误差和母线长度制造的公差积累通常可以控制到5 mm以下，考虑到基础施工和安装单位的水平不一，下文中安装误差选用10 mm。

2．基础不均匀沉降产生的径向变形

由于GIS的占地面积比较大，GIS的安装基础通常分为几块，每块基础之间由于沉降速度不同，基础之间会产生高度差。基础不均匀沉降产生的变形量可以由土建图样查出，方向为上下方向。这种变形只在基础的沉降缝处产生，如果没有沉降缝则不需要考虑。

3．母线热胀冷缩产生的轴向变形

母线热胀冷缩的原因有环境温度的变化、电流流过引起的外壳温度升高、日照引起的外壳温升。根据试验和调查，日照最强时为中午12点钟。日照引起外壳的温升，大约在13～14点会达到最大值。母线通电引起外壳的温升要在4 h以上才会达到最大值。一天中负荷最大时为10～16点，所以母线通电引起外壳的温升在14点之后达到最大值。母线通电引起外壳的温升和日照引起的温升最大值不同时发生，所以没有必要考虑最大值叠加。但是在工程实践中为增加裕度，通常将日照引起的温升和电流引起的温升都计算进去。因此母线伸缩量为：

母线的最大热胀冷缩量为

$$\Delta L_E = L \times \alpha 1 \times \Delta T_1 \qquad (1)$$

L为母线的两个固定支撑之间的距离。$\alpha 1$为母线线膨胀系数，铝材为24×10^{-6}/K。ΔT_1为母线最大温度升高值。

户外母线：$\Delta T_1 = \Delta T_Y + \Delta T_E + \Delta T_S$　　(2)

户内母线：$\Delta T_1 = \Delta T_Y + \Delta T_E$　　(3)

ΔT_Y为GIS所处环境的年最大温差，可以由电站气象资料查得。ΔT_E为电流通过引起GIS母线外壳升高的温度，取30 K。ΔT_S为日照引起的GIS母线外壳升高的温度，根据经验取10 K。

综上所述，母线热胀冷缩时的最大伸缩量为：

户外母线：$\Delta L_E = L \times \alpha 1 \times (\Delta T_Y + \Delta T_E + \Delta T_S)$ (4)

户内母线：$\Delta L_E = L \times \alpha 1 \times (\Delta T_Y + \Delta T_E)$ (5)

4．母线的最大变形量

综上所述，母线的轴向方向上的最大变形量为：

$$\Delta L = \Delta L_E + \Delta L_S \quad (6)$$

ΔL_S为安装误差最大值，取10 mm。

径向最大变形量为沉降缝变形量。

在GIS母线中如何使用膨胀节

膨胀节按照吸收变形的方向可以分为吸收轴向变形的膨胀节和吸收径向变形的膨胀节。吸收轴向变形的膨胀节指的是能够吸收膨胀节轴线方向的变形的膨胀节，包括单式轴向型、直管压力平衡型、碟簧平衡型等类型的膨胀节，见图1、图2、图3。吸收径向变形的膨胀节指的是能够吸收膨胀节径向方向的膨胀节，包括使用波纹管和不使用波纹管的复式拉杆型膨胀节，见图5、图6。以下按照这两种不同类型的膨胀节分别介绍使用方法。

1．吸收轴向变形的膨胀节的使用方案

吸收轴向变形的膨胀节通常的用法是将GIS母线两端使用支撑固定，在母线中安装一个膨胀节，如图7。在母线上安装若干滑动支撑来保证母线仅在轴线方向变形。膨胀节的位置要靠近一端而不要在中间。无论使用单式轴向型、直管压力平衡型或碟簧平衡型膨胀节都可以适用。

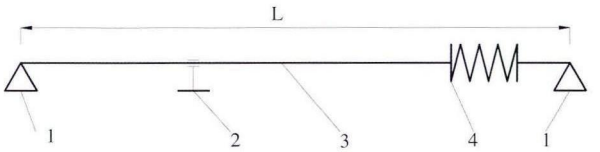

图7　使用单个吸收轴向变形的膨胀节的设计方案

1—固定支撑；2—滑动支撑；3—母线
4—吸收轴向变形的膨胀节

当满足下式时可以认为母线的设计是安全的：

$$\Delta EJ \geqslant K1 \times \Delta L \quad (7)$$

ΔEJ为膨胀节允许变形量，由膨胀节自身确定。$K1$为安全系数，取1.2。

值得注意的是，如果在此使用单式轴向型膨胀节，对GIS母线的固定支撑、滑动支撑的强度要求很高，往往很难保证。因此在支撑强度不够时，可以使用非常长的拉杆，将拉杆固定在母线法兰上，如图8。母线的伸缩被限制在拉杆内，不会传递到相邻的母线、支撑上。式（5）仍然适用。这种方法的缺点是拉杆的长度长达几米到十几米，制造、安装都非常困难。

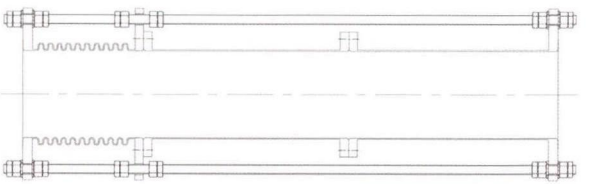

图8　使用单式轴向型膨胀节和长拉杆的设计方案

若GIS母线过长，一个膨胀节无法满足要求，可以在母线中多设置几个固定支撑，将母线分为几段，使每一段均满足式（7），如图9。

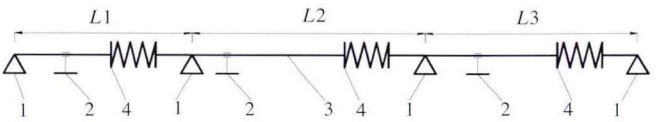

图9　使用多个吸收轴向变形的膨胀节的设计方案

1—固定支撑；2—滑动支撑；3—母线
4—吸收轴向变形的膨胀节

举例如图10。一段户外GIS母线约20 m长，极限环境温度为－20～40℃。由式（4）、式（6）可计算得知，母线最大变形量$\Delta L = 20\ \text{m} \times (24 \times 10^{-6}/\text{K}) \times (60\text{K} + 30 + 10\text{K}) + 10\ \text{mm} = 58\ \text{mm}$。吸收轴向变形的膨胀节允许变形量$\Delta EJ$为45 mm。只安装一个膨胀节不满足式（7）。因此需要在母线的中部设置一个固定支撑，将母线分为两段。每段母线的最大变形量$\Delta L = 34$ mm，可以满足式（5）。

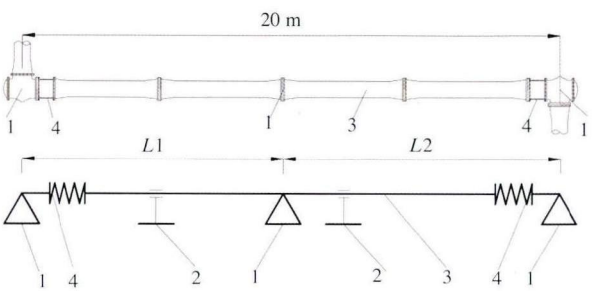

图10　设计实例及其简化模型

1—固定支撑；2—滑动支撑；3—母线
4—吸收轴向变形的膨胀节

www.eage.com.cn

2．吸收径向变形的膨胀节的使用方案

吸收径向变形的膨胀节必须设置在与母线垂直的方向，用来吸收母线轴向方向的变形，如图11。无论使用带波纹管或不带波纹管的复式拉杆型膨胀节都可以适用。

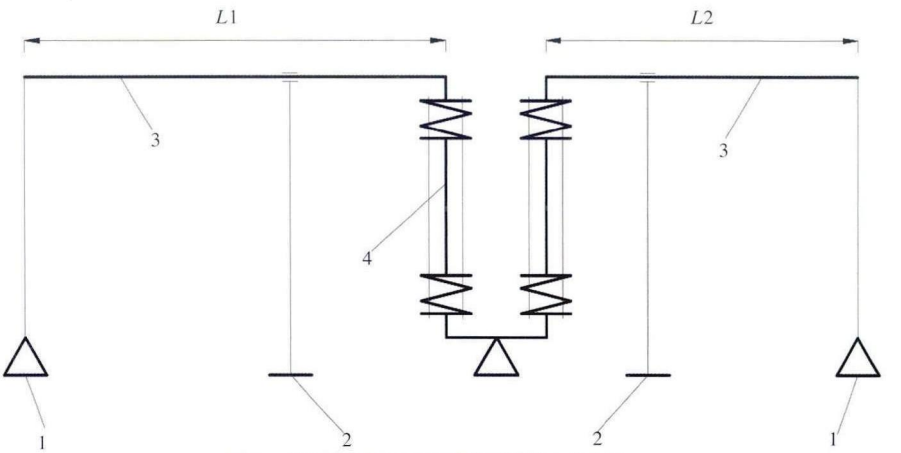

图11　使用吸收径向变形的膨胀节的设计方案

1—固定支撑；2—滑动支撑；3—母线；4—吸收径向变形的膨胀节

吸收径向变形的膨胀节的简化模型为图12。吸收径向变形的膨胀节的长度为EJ，可偏转角度为a，通常取3度，则允许变形量为：

$$\Delta EJ = EJ \times \tan(\alpha) \tag{8}$$

代入式（5），得$EJ \times \tan(\alpha) \geq K1^* \Delta L$ (9)

$$EJ \geq \frac{K1 \times \Delta L}{\tan(\alpha)} = \frac{1.2 \times \Delta L}{\tan(3^\circ)} = 22.9 \times \Delta L \tag{10}$$

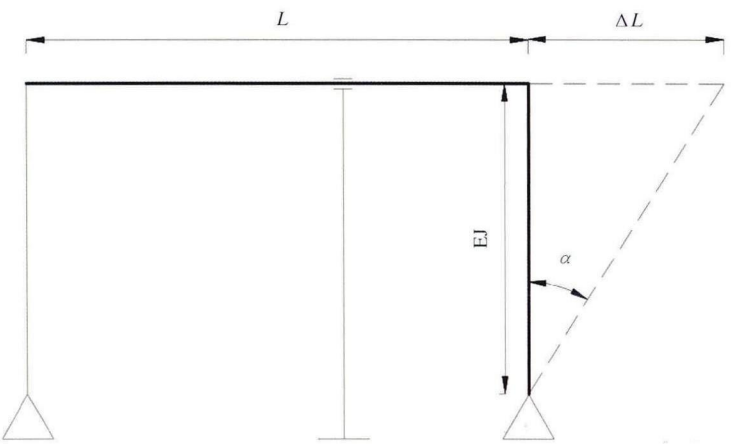

图12　吸收径向变形的膨胀节的简化模型

由此可见，当GIS母线变形较大时可以通过增加径向伸缩节的长度EJ的方法来增加膨胀节允许变形量。

举例如下。一条户外母线长度为68 m，极限环境温度为－30～40℃。由式（4）、（6）可计算得知，母线的最大变形量$\Delta L = 68\text{m} \times (24 \times 10^{-6}/\text{K}) \times (70\text{K} + 30 + 10\text{K}) + 10\ \text{mm} = 190\ \text{mm}$。吸收轴向变形的膨胀节允许变形量$\Delta EJ$为45 mm。只有将母线用固定支撑划分为5段，使用5个吸收轴向变形的膨胀节才能保证母线的安全。若使用吸收径向变形的膨胀节，可将母线如图11划分为2段，$L1 = L2 = 34$ m，每段母线的最大变形量$\Delta L1 = \Delta L2 = 100$ mm。由式（10）计算可知，当吸收径向变形的膨胀节长度$EJ \geq 22.9 \times \Delta L = 2290$ mm时，可以保证膨胀节允许变形量大于母线变形量。

由以上实例可知，当母线较短的时候，使用吸收轴向变形的膨胀节比较简单；在母线比较长的情况下使用吸收径向变形的膨胀节更合适，因为使用的膨胀节数量要少得多，结构更简单。**EA**

（收稿日期：2015.06.01）

（编辑：白文亭）