

文章编号:1672-9331(2018)03-0094-07

变电站全联合构架有限元建模与动力学特性分析

唐学军¹, 熊 一¹, 董弘川¹, 谢 东¹, 张赵阳¹,
李录平², 晋风华², 颜尚君², 陈鹏飞², 封 江²

(1.国网湖北省电力公司 经济技术研究院, 湖北 武汉 430001;

2.长沙理工大学 能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为了给全联合变电构架风荷载设计提供依据,以华中地区某 500 kV 变电站联合构架为工程背景,运用 Solidworks 三维建模软件,建立了 500 kV 变电站全联合构架的实体模型。采用有限元分析软件 ANSYS Workbench 对全联合构架划分网格进行模态分析,得到了全联合构架前 20 阶模态频率以及模态振型图。通过分析找到了 500 kV 全联合构架前 20 阶模态频率分布特点以及模态振型规律,发现该联合构架为风荷载的敏感结构,水平方向的脉动风速容易激起构架的低阶振型。

关键词: 500 kV 变电站; 全联合构架; 实体建模; 有限元分析; 模态频率; 模态振型

中图分类号: TK268.1

文献标识码: A

Finite element modeling and dynamics characteristics analysis for transfer substation whole joint structure

TANG Xue-jun¹, XIONG Yi¹, DONG Hong-chuan¹, XIE Dong¹,
ZHANG Zhao-yang¹, LI Lu-ping², JIN Feng-hua²,
YAN Shang-jun², CHEN Peng-fei², FENG Jiang²

(1.Economic Technological Institute of State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430001, China;

2.School of Energy and Power Engineering, Changsha University of
Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to provide the basis for the design of the wind load. A 500kV transfer substation whole joint structure in the central Chinese provinces is taken as the engineering background, the 3D solid model of a 500kV transfer substation whole joint structure is established by using the Solidworks three-dimensional modeling software, the mesh generation and modal analysis of the whole joint structure is carried out by using the ANSYS Workbench. The first 20 orders of modal frequencies and modal shapes of the whole joint structure are calculated. By analysis, the distribution law of the first 20 orders of model frequencies and modal shapes are revealed. Aanalysis result demonstrates that the 500kV transfer substation whole joint structure is sensitive to the fluctuating wind load, the lower order model shapes of which can be easily excited by fluctuating wind speed in the horizontal direction.

收稿日期:2018-05-09

基金项目:国网湖北省电力公司科技项目(52153816001B)

通讯作者:唐学军(1965-),男,国网湖北省电力公司经济技术研究院高级经济师,主要从事电力建设安全质量管理与能源经济等方面的研究。E-mail:tangxj6@hb.sgcc.com.cn

Key words: 500 kV transfer substation; whole joint structure; solid modeling; finite element analysis; modal frequency

500 kV 与 1 000 kV 全联合变电构架的荷载及自身的高度和跨度相对于其他较低电压等级的构架均有较大程度的增加,具有高度大、荷载重、自振频率低等特点。且此类全联合变电构架根据结构布置需要,在不同标高处设置构架横梁,使得结构迎风面较单孔门型构架大幅增加;同时也使得结构整体趋于柔性化,致使风荷载作用效应显著,是一种风敏感性结构。风荷载常常是设计的主要甚至是决定性的控制荷载^[1,2]。

全联合构架的模态特性参数是构架抗风设计过程需要考虑的关键性参数。对于设计定型的联合构架,设计人员希望了解联合构架的模态参数分布;对于已经建成的变电联合构架,工程技术人员也希望掌握联合构架的模态参数分布,因此,准确、便捷地获得变电联合构架的模态参数,是工程领域需要解决的难题之一。

获得变电联合构架模态参数方法主要有实验室模型实验法、现场测试法和理论计算方法。实验室模型实验法具有准确度高的优点,但研究周期长,研究成本高;现场测试法只适合已经建成的联合构架,且现场试验风险大,不适合对设计阶段的联合构架的风振特性进行研究;理论计算法是以专门的建模软件为工具,以特定的有限元计算软件为计算平台,通过计算方法获得联合构架的模态参数,该方法具有研究周期短、研究成本低、计算结果准确可靠等优点,不仅适用于已经建成的全联合构架的模态参数获取,而且适合于设计阶段对全联合构架的结构优化设计^[3]。

长期以来,国内外学者对输电线塔的风振响应特性作了许多的理论和试验研究,已经取得了一系列的研究成果^[4-6]。在变电联合构架的结构分析和风动试验研究方面也开展了一些卓有成效的工作。但在运用有限元方法获取全联合构架模态特性参数方面,目前能查到的文献比较少。因此,作者运用 Solidworks 三维建模软件建立 500 kV 变电站全联合构架的实体模型,采用有限元分析软件 ANSYS Workbench 对整个全联合构架进行模态分析,以得到全联合构架前 20 阶的模态频率以及模态振型图。

1 研究对象简介

以华中地区某在建的 500 kV 变电站全联合构架为研究对象,在原设计结构的基础上作了一些结构调整。该构架具有如下结构特点。

1) 构架的边列柱、中列柱为 A 字柱,在 12, 23.5 m 高处设置横撑。

2) 构架纵向梁和横梁均采用三角形断面的格构式结构,其弦杆为钢管,腹杆为角钢构件,梁钢管接头采用无加劲法兰连接,钢管弦杆采用加劲法兰连接。

3) 联合构架在 28 m 标高处设置了格构式构架横梁,立柱和上部避雷针均为钢管构件。

4) 联合构架在 24 m 标高处设置了格构式纵梁,纵梁为整圈布置。

5) 基础采用钢筋混凝土独立基础,构架柱与基础连接方式采用杯口插入式。

2 全联合构架模型的建立

2.1 模型的简化原则

由于本研究只关注联合构架的模态特性参数,为了减少有限元计算过程中的计算时间,同时又保证计算结果的准确性,对联合构架部件的细节作一些简化,这些简化对模态特性参数的计算结果影响很小。

1) 在建模过程中,忽略零部件的所有倒角、连接孔细小尺寸变化。

2) 所有立柱的圆柱形钢管采用相同尺寸、相同材料。在立柱建模时,忽略螺栓连接处的螺栓孔,对法兰连接处的支撑肋板进行简化,用圆弧倒角代替。

3) 所有横梁、纵梁的宏观尺寸相同、材料相同。

4) 将横梁、纵梁的各部件之间的连接关系进行简化,将横梁中各部件之间的连接方式简化为固接。对于所有的腹杆,统一尺寸,方便建模。将腹杆由角钢结构等效简化为钢板结构。

2.2 立柱三维实体模型

1) A型柱三维实体建模。

本研究对象的A型柱的立柱为钢管,尺寸为 $\phi 480\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。A型柱共分为三段:下段与基础连接;中段在12 m处设有横撑连接;上段在23.5 m处设一横撑,顶部有连接平台。①12 m处横撑连接件尺寸为 $\phi 450\text{ mm} \times 8\text{ mm}$,左右各伸出一段,中间横柱用法兰连接;②23 m处横撑连接件尺寸为 $\phi 159\text{ mm} \times 8\text{ mm}$,与两侧的连接方式为焊接,其刚度强,在建模时认为其与两侧为一体;③A型柱上中下三段之间连接方式为法兰连接,两法兰盘用螺栓连接,在建模时将其简化为两法兰盘连接面重合。

A型柱与带侧向支撑边柱的建模步骤主要包括:获取尺寸数据、绘制草图、生成零件图、零件装配。本研究所建立的500 kV变电站全联合构架的A型柱的三维实体模型见图1。

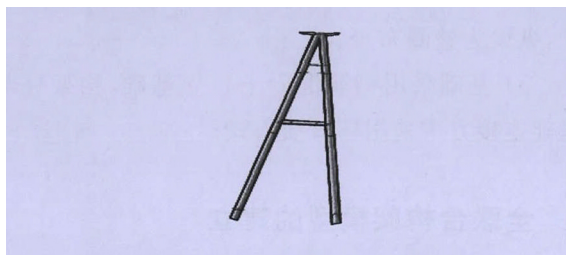


图1 A型柱三维实体模型

Fig. 1 3D solid model of A type column

2) 带侧向支撑边柱的实体建模。

为了提高全联合构架的稳定性,在全联合构架中,有一部分立柱带有侧向支撑,这些立柱位于全联合构架的外围,又称为边柱。该类立柱的建模是在A型柱的基础上(见图1),用钢板与侧向支撑相连,钢板与A型柱、侧向支撑之间假设为焊接连接。本研究所建立的带侧向支撑的边柱的三维实体模型见图2。

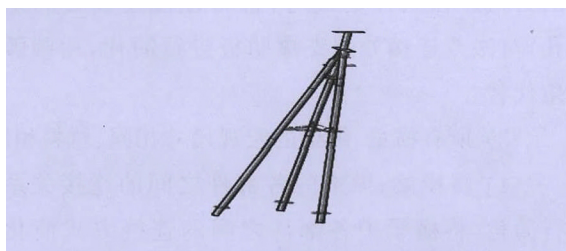


图2 带侧向支撑的边柱三维实体模型

Fig. 2 3D solid model of side column with lateral support

2.3 横梁和纵梁三维实体建模

横梁为三角形格构式梁,其弦杆为钢管,腹杆为角钢构件。构架横梁的底部弦杆总长2.6 m,顶部弦杆总长2.3 m,各弦杆之间由法兰盘连接;在弦杆上分区等距离焊有腹杆,腹杆为角钢结构;腹杆与弦杆之间用螺栓连接。在实际结构中,纵梁与横梁结构相同,均为三角形格构式梁,弦杆为钢管,腹杆为角钢构件,根据位置不同,其尺寸并不完全相同,但仅有少数腹杆尺寸变化。为建模方便,在建模时将所有的纵、横梁视为完全相同。

横梁和纵梁是整个联合构架中建模复杂程度最高的子构架,其三维实体建模的主要步骤如下。

1) 获取三弦杆的相对位置信息,定位;获取弦杆半剖面轮廓尺寸信息,绘制三弦杆半剖面轮廓线二维草图。

2) 将三弦杆的半剖面轮廓线二维草图分别绕着各自中心线旋转一周,得到三根弦杆。

3) 以顶部弦杆和一底部弦杆中心线为约束条件,建立基准面。在基准面上绘制腹杆草图,进行拉伸,得到腹杆实体。底部部分腹杆参考侧面腹杆建模过程。

4) 以腹杆表面作为约束条件,建立基准面。在基准面上绘制腹杆草图,进行拉伸,得到腹杆实体。

5) 以底部弦杆端面为约束条件,建立基准面,绘制支撑部分草图,拉伸得到支撑部分实体。

本研究所建立的500 kV变电全联合构架横梁三维实体模型如图3所示。



图3 横梁三维实体模型

Fig. 3 Three-dimensional solid model of cross beam

2.4 构架装配

1) 单跨构架装配。

完成A型柱与横梁的建模后,对其进行装配,其装配模型如图4所示。横梁与安装平台用螺栓连接固定,其相对位移为0,故可认为其为一体,在装配时简化为焊接形式固定。

装配过程:①载入 A 型柱与横梁装配体;②利用定位孔装配对装配面进行焊接处理。在装配过程中,遇到选取不到的面可先使用隐藏功能,使另一模型隐藏,再选取装配面后还原隐藏模型。

单跨构架装配图如图 4 所示。

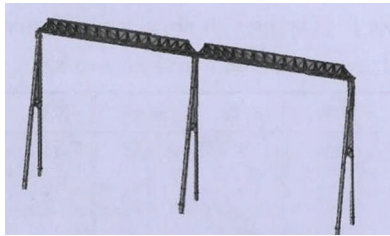


图 4 单跨构架装配模型

Fig. 4 Single span frame assembly model

2) 500 kV 全联合构架装配。

在完成单跨构架装配后,根据 500 kV 变电站通用设计 500-B-5 方案的构架布置方式进行装配(如图 5^[7]所示)。其结构形式为:边列柱、中列柱为 A 型柱,横梁为三角形格构式梁,其弦杆为钢管,腹杆为钢板构件;根据联合构架的设计要求,构架的横梁设置在标高 28 m 处,构架的纵梁设置在标高 24 m 处。

装配过程:参考单跨构架装配过程,为减少工作量,可先将两个单跨模型装配为双跨模型,两双跨模型装配为四跨,再装配两个边跨模型。装配总图如图 5 所示。

为了本研究后续表述的需要,将图 5 所示的联合构架的横梁从左至右编号,编号分别为 1~7。

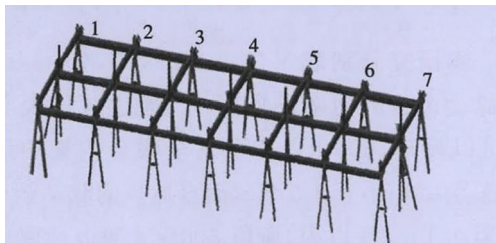


图 5 500 kV 全联合构架装配模型

Fig. 5 500 kV whole joint framework assembly model

3 全联合构架动力特性分析

3.1 模态分析基本理论

结构动力学遵循的基本方程是:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}. \quad (1)$$

式中:[M]为系统的质量矩阵;[C]为系统阻尼矩阵;[K]为系统刚度矩阵;{ $F(t)$ }为系统外力;{ u }为位移响应向量;{ \dot{u} }为速度响应向量;{ \ddot{u} }为加速度响应向量。

式(1)为用系统的物理坐标 u, \dot{u}, \ddot{u} 描述的运动方程组。在其每一个方程中均包含系统各点的物理坐标,因此是一组耦合方程。模态分析方法就是以无阻尼系统的各阶主振型所对应的模态坐标来代替物理坐标,使坐标耦合的微分方程组解耦为各个坐标独立的微分方程组,从而求出系统的各阶模态参数。结构的模态分析是进行其他动力学分析的基础,结构自由振动即{ $F(t)$ } = 0,阻尼的影响可以忽略,故式(1)可改写为:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\}. \quad (2)$$

结构自由振动为简谐振动,即位移为正弦函数:

$$u = u \cdot \sin(\omega t). \quad (3)$$

无阻尼模态分析实际上就是进行特征值和特征向量的计算,即模态提取。由式(2),(3)可得:

$$[K] - \omega^2[M]\{u\} = \{0\}. \quad (4)$$

此方程的特征值 ω_i^2 的开方 ω_i 为自振圆频率,单位是 rad/s。其对应的特征向量{ u }_{*i*} 表示相应的振型。

3.2 网格划分

由于全联合构架单元结构众多,接触部位繁多,故采用四面体网格划分中的 Patch Conforming 方法。该方法默认考虑几何面和体生成表面网格,会考虑小的边和面。而且 ANSYS Workbench 提供了独特、智能、强大的四面体主导网格划分功能,能够对任意复杂的 CAD 几何实体生成以四面体为主的网格。因此在本研究中,变电联合构架的网格划分采用块体单元,网格划分的尺寸设置为 0.008 m,利用四面体 Patch Conforming 网格划分的功能,共划分出 5 767 264 个单元,12 019 354 个节点。整体网格如图 6 所示,局部网格如图 7 和图 8 所示。

3.3 模态特性参数计算与分析

全联合构架在脉动风力荷载作用下,将使结构或构件产生一定的激振力,从而引起结构或构件产生交变的内力和位移响应,即振动。振动会造成结构疲劳而产生破坏。变电站联合构架在脉动风荷载作用下的响应大小,除了与风荷载的强

度、频率分布有关外,还与联合构架本身的动力学特性(包括模态频率、模态振型、模态阻尼)密切相关。因此,在变电联合构架抗风设计时,需要掌握构架的动力学特性参数,避免联合构架的模态频率(也称为自然频率、固有频率)与工程所在地的长年脉动风荷载的卓越频率接近。

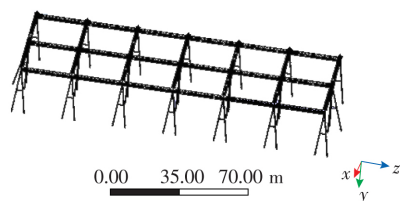


图6 全联合构架整体的网格划分

Fig. 6 Grid partition of full joint framework

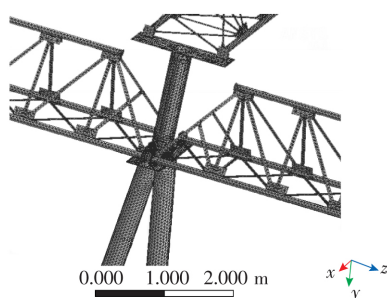


图7 全联合构架局部的网格划分

Fig. 7 Partial grid partition of full joint framework

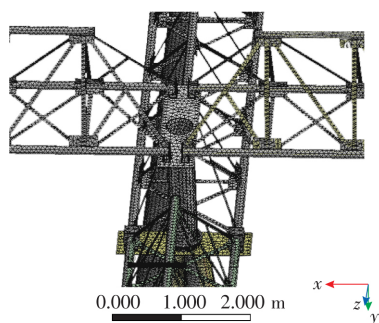


图8 全联合构架局部的网格划分

Fig. 8 Partial grid partition of full joint framework

运用有限元方法计算了500 kV全联合构架前20阶的固有频率,结果见表1。同时还获得了联合构架前20阶的模态振型图。

1) 模态频率分布特性分析。

由表1可以发现,500 kV变电站全联合构架的前20阶模态频率分布呈现如下规律:构架的低阶模态频率数值小且分布密集,相邻两阶的模态频率之间的差值非常小,如果用实测办法测量模态频率,将难以区分。这是由全联合构架的柔性

空间结构特点所决定的^[8]。从理论上讲,全联合构架是一个在空间上具有无限多个自由度、刚度又非常小的结构,这个特点决定了其模态频率的上述分布规律。

表1 全联合构架前20阶模态频率

Table 1 The first 20 order modal frequencies of the full joint framework Hz

阶数	频率	阶数	频率	阶数	频率
1	0.692	8	1.134	15	1.445
2	0.742	9	1.135	16	1.463
3	0.823	10	1.148	17	1.497
4	0.915	11	1.164	18	1.605
5	0.954	12	1.198	19	1.617
6	1.119	13	1.275	20	1.646
7	1.131	14	1.425	—	—

本研究选取随高度不变化的脉动风速谱 Davenport 谱来表征风的脉动特性。该风速谱被中国、加拿大等国荷载规范所采用。Davenport 风速自谱^[6-9]为:

$$\frac{n S_{u_i u_i}(n)}{K \bar{V}^2(z_s)} = \frac{4x^2}{(1+x^2)^{4/3}} \quad (5)$$

式中: $S_{u_i u_i}(n)$ 为脉动风速自功率谱; n 为频率, Hz; K 为地面粗糙度系数,按 B 类地区取值, $K = 0.16$; $\bar{V}(z_s)$ 为离地面参考高度($z_s = 10$ m)处的平均风速, m/s; x 为莫宁坐标(相似率坐标),为无量纲量, $x = \frac{1200f}{\bar{V}(z_s)}$ 。

本研究分别取 $\bar{V}(z_s) = 20, 30, 40$ m/s, 计算出脉动风速的功率谱见图9。通过对比表1和图9可以发现,500 kV变电站全联合构架的前5阶模态频率均小于1.0 Hz,而自然风的脉动频率分布主要在1.0 Hz以内,所以500 kV变电站联合构架为风敏感结构。特别是当平均风速大且脉动风速的卓越频率与联合构架的某阶模态频率一致时,联合构架很容易产生大幅度位移响应和应力响应,导致构架变形、损坏甚至坍塌,造成严重的后果。

2) 模态振型分布特性分析。

采用有限元分析方法获得了500 kV变电站全联合构架的前20阶模态振型后。下面对前20阶模态振型的特点作简要分析。

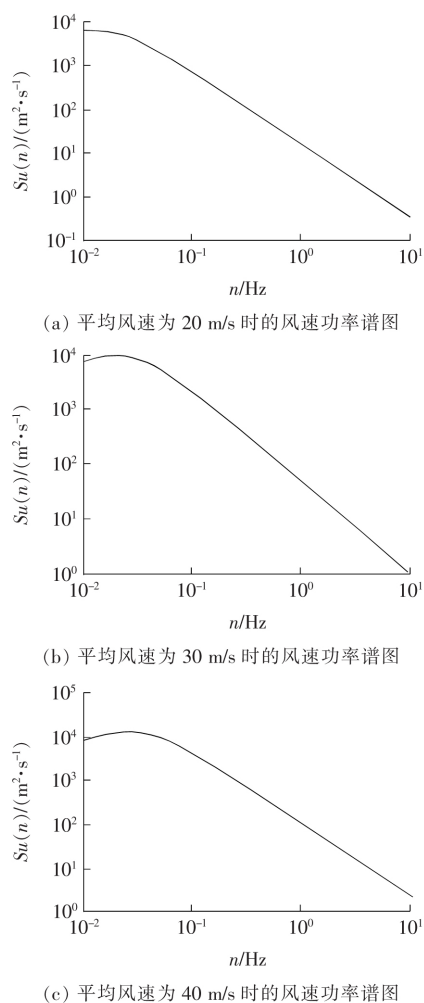


图 9 不同平均风速下的 Davenport 风速谱

Fig. 9 The Davenport wind spectrum at different average wind speed

①第一阶模态振型(模态频率:0.692 Hz)中,联合构架的 7 根横梁沿垂直方向(y 方向)同相位振动,每一根横梁呈刚体属性,其中,第 4 根横梁的振动幅度最大,第 3,5 根横梁的振动幅值次之,第 1,7 根横梁的振动幅值最小。联合构架纵向梁的振动型式为“弓形”。此振型中立柱几乎不发生变形。

②第二阶模态振型(模态频率:0.742 Hz)中,联合构架的 7 根横梁沿垂直方向(y 方向)振动,其中,居中的横梁(第 4 根横梁)保持位移为零(该振型的节线),第 1,2,3 根横梁摆动位移方向与第 5,6,7 根横梁振动位移方向相反。联合构架的纵向梁的振动型式为“~形”。此振型中立柱几乎不发生变形。

③第三阶模态振型(模态频率:0.823 Hz)中,联合构架的 7 根横梁沿垂直方向(y 方向)振动。

此振型中出现两根节线,分别位于第 2,3 根横梁之间和第 5,6 根横梁之间。振动位移最大值出现在第 1,7 根横梁,第 4 根横梁次之。此振型中立柱几乎不发生变形。

④第四阶模态振型(模态频率:0.915 Hz)中,联合构架的 7 根横梁沿构架的轴向方向(y 方向)作摆动振动(本研究称此种振动“摆振”)。对同一横梁而言,其摆振的型式为“弓形”,中间那一列立柱顶部的摆振位移为最大。这个振型是水平方向脉动风荷载最容易激起的振型,也是工程中最容易检测的振型。在工程中,计算构架的风振系数和实测构架的风振系数,都是依据这个振型。振型图如图 10 所示。

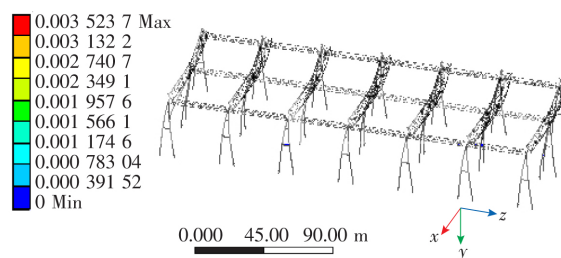


图 10 第 4 阶模态振型图

Fig. 10 The fourth order mode vibration pattern

⑤第五阶模态振型(模态频率:0.954 Hz)中,联合构架的 7 根横梁沿垂直方向(y 方向)振动。此振型中出现了 3 根平行于横梁方向的节线,分别位于第 1,2 根横梁之间有 1 根节线,第 6,7 根横梁之间有 1 根节线,第 4 根横梁为 1 根节线。振动位移最大值出现在第 1,7 根横梁,第 3 根横梁和第 5 根横梁次之。

⑥第六阶模态振型(模态频率:1.119 Hz)至第十一阶模态振型(模态频率:1.164 Hz)有一个共同的特点,即某一根横梁沿 z 方向有较大摆动位移,另有一根以上的横梁沿相反方向有较小的摆动位移。

⑦第十二阶模态振型(模态频率:1.198 Hz)中,联合构架的 7 根横梁沿垂直方向(y 方向)振动。此振型中出现 4 根平行于横梁方向的节线,分别位于第 1,2 根横梁之间有 1 根节线,第 3,4 根横梁之间有 1 根节线,第 5 根横梁为 1 根节线,第 6,7 根横梁之间有 1 根节线。振动位移最大值出现在第 4 根横梁上,第 7 根横梁次之。

⑧第十三阶模态振型(模态频率:1.275 Hz)至第十五阶模态振型(模态频率:1.445 Hz)有一个共同的特点,即振动位移以构架的纵向梁沿垂直方向(y 方向)位移为主。

⑨第十六阶模态振型(模态频率:1.463 Hz)中,联合构架的7根横梁沿垂直方向(y 方向)振动。此振型中出现5根平行于横梁方向的节线。

⑩第十七阶模态振型(模态频率:1.497 Hz)中,中间一列A形立柱发生明显的弯曲变形;7根横梁的变形形状为平行“ $x-z$ ”平面的“ \sim 形”。

⑪第十八阶模态振型(模态频率:1.605 Hz)和第十九阶模态振型(模态频率:1.617 Hz)有一个共同的特点,即振动位移以构架的纵向梁沿垂直方向(y 方向)位移为主。

⑫第二十阶模态振型(模态频率:1.646 Hz)中,联合构架的7根横梁与三根纵向梁组成的长方形结构做平行四边形扭转振动,这个平行四边形的中间轴为中间纵向梁。

4 结论

1) 观察全联合构架前20阶模态频率和振型图,频率范围从第1阶的0.692 Hz到第20阶的1.646 Hz,可以看出全联合构架的频率低且分布密集;虽然500 kV变电站全联合构架的低阶模态频率之间的差值非常小,但是各阶模态振型的形状有较大的差别。

2) 500 kV变电站全联合构架的前5阶模态频率均小于1.0 Hz,而自然风的脉动频率分布主要在1.0 Hz以内。由此可以看出,500 kV变电站联合构架为风敏感结构,在风荷载的作用下很容易产生很大的位移相应和应力响应,导致构架变形、损坏甚至坍塌,造成严重的后果。

〔参考文献〕

- [1] 牛华伟,孔凯歌,陈寅,等.500 kV全联合变电构架体型系数风洞试验及风振系数取值分析[J].湖南大学学报,2015,42(11):80—87.
NIU Hua-wei, KONG Kai-ge, CHEN Yin, et al. 500 kV whole combined substation framework shape factor of wind tunnel test and dynamic response fac-

- tor analysis[J]. Journal of Hunan University, 2015, 42(11): 80—87.
- [2] 冯仁祥,金华吴宁500 kV变电站全联合构架结构设计[J].浙江建筑,2014(7):35—40.
FENG Ren-xiang. Design of full joint frame structure of Jinhua Wuning 500 kV substation[J]. Zhejiang Architecture, 2014(7): 35—40.
- [3] 何勇.500 kV超长变电构架纵向支撑的设计优化[J].钢结构,2017,32(9):81—84.
HE Yong. Optimization of longitudinal support design for ultra-long 500 kV substation structures[J]. Steel Construction, 2017, 32(9): 81—84.
- [4] 刘小云.变电站联合构架结构分析设计中的若干问题[J].钢结构,2017,32(9):77—80.
LIU Xiao-yun. Some problems in analysis and design of united gantry structure of substation[J]. Steel Construction, 2017, 32(9): 77—80.
- [5] 朱海维,马勇杰,吴伟康.1 000 kV构架风振系数的计算研究[J].电力建设,2013,34(2):28—34.
ZHU Hai-wei, MA Yong-jie, WU Wei-kang. Calculation and study for wind-induced vibration coefficient of 1 000 kV structural gantry[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(2): 28—34.
- [6] 岳培根.高压输电塔线体系的风致动力响应分析[D].郑州:郑州大学,2014.
YUE Pei-gen. Wind-induced dynamic response analysis of high voltage transmission tower-line system[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.
- [7] Q/GDW 2.3—2008, 110~500 kV变电站通用设计规范[S].
Q/GDW 2.3—2008, General design specification for 110~500 kV substation[S].
- [8] 杨建江,李晨曦,刘亮亮.全联合构架单钢管柱空间作用影响系数[J].工业建筑,2016,46(12):146—151.
YANG Jian-jiang, LI Chen-xi, LIU Liang-liang. Spatial work effect coefficient of single steel pipe column in entirely united framework[J]. Industrial Construction, 2016, 46(12): 146—151.
- [9] 张传才,郭强.输电塔线体系风振响应频域分析的一种简化方法[J].应用力学学报,2013,30(5):782—786.
ZHANG Chuan-cai, GUO Qiang. A simplified frequency domain analysis method for wind-induced vibration response of transmission tower-line system[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(5): 782—786.