

干式空心电抗器支柱绝缘子安装节径的设计研究

张志伟, 吴玉坤, 骆福权, 张 雄

(天津经纬正能电气设备有限公司, 天津 300350)

摘要: 为提升干式空心电抗器支撑体系的稳定性, 保证支柱绝缘子尽可能多地承受抗压载荷、减少受弯载荷, 文中提出了一种基于力矩平衡原理的支柱绝缘子安装节径设计方法。首先将主体线圈沿中轴线进行对半切割, 以对半切割后的主体线圈为研究对象, 将线圈各包封铺平展开, 然后利用力矩平衡原理计算安装节径值。通过比较三维建模软件质心特性与力矩平衡原理计算节径值的差异, 分析了气道撑条结构对安装节径值的影响。以某型号特高压干式空心电抗器为例, 采用有限元仿真计算方法, 分别计算了自重作用与地震作用下支柱绝缘子的弯矩, 验证该理论预测方法的有效性。结果表明, 自重作用下, 文中提出的安装节径定位方法具有较高的精度; 地震作用下, 该定位方法的理论预测值与仿真计算值存在微小偏差, 基于模态分析方法, 识别了存在微小偏差的原因, 为后续进一步优化提供了参考方向。

关键词: 干式空心电抗器; 支柱绝缘子; 安装节径; 抗震性能; 模态分析

Design and Research of Installation Diameter of Post Insulator for Dry-type Air-core Reactor

ZHANG Zhiwei, WU Yukun, LUO Fuquan, ZHANG Xiong

(Tianjin Jingwei Zhengneng Electrical Equipment Co., Ltd., Tianjin 300350, China)

Abstract: To enhance the stability of the support system for dry-type air-core reactors and ensure that the post insulators can withstand compressive loads as much as possible while reducing bending loads, a method of positioning the installation diameter of post insulators based on the principle of moment balance is presented. Firstly, the main coil is cut in half along the central axis, taking the main coil after the half cut as the research object, the coil is spread out, and then the moment equilibriums theory is used to calculate the installation diameter. By comparing the differences in calculated values between the centroid characteristics of 3D modeling software and the moment equilibriums theory, the influence of spreader bar on the installation diameter value is analyzed. Taking a type of UHV dry-type air-core reactor as the research object, the finite element simulation method is used to check the validity of the proposed method under the action of dead weight and earthquake respectively. The results show that under the effect of dead load, the theoretical prediction values based on the moment equilibriums theory proposed in this paper have high accuracy. Under the action of earthquakes, there is a slight deviation between the theoretical prediction values and simulated values by FEM. Based on modal calculations, the reasons for the slight deviation were further analyzed, providing a reference direction for subsequent optimization.

Key words: dry-type air-core reactor; post insulator; installation diameter; seismic performance; modal analysis

0 引言

干式空心电抗器具有线性度高、结构简单、噪声低的优势, 是特高压、超高压直流输电工程的关键设备之一, 主要用途包括无功补偿、限制短路电流、滤除高次谐波和减少直流系统谐波分量等^[1-3]。

典型的干式空心电抗器由主体线圈、支柱绝缘子和结构件等组成, 主体线圈位于顶部,

距离地面有一定的高度, 支柱绝缘子安装于主体线圈底部, 沿主体线圈呈环向阵列布置; 从结构角度出发, 干式空心电抗器属于特高压电气设备中的敞开式支柱类设备, 呈现高、柔、重的结构特点, 因此, 这类设备的抗震设计要求也更为严格^[4-6]。历次震害结果调查显示^[7-8], 电抗器设备主体由于结构刚度大、自振频率高, 与地震的卓越频率相差较大, 未发现电抗

器主体在地震中破坏的先例。而支柱绝缘子由于其刚度远低于电抗器主体，且破坏应力较低，是薄弱部位，抗震设计时应予以高度重视。

关于干式空心电抗器支柱绝缘子的力学性能方面，《电力设施抗震设计规范》^[9]给出了支柱绝缘子的建模分析方法与校核标准。近年来，各位专家学者基于标准规范也开展了不同电压等级、不同形式电抗器的结构抗震性能研究^[10-11]。由于支柱绝缘子的抗压强度较高，而抗剪、抗弯性能较差，因此，诸多专家学者的研究多集中在采用仿真^[12-13]或试验^[14-15]的手段验证地震作用下支柱绝缘子的弯曲强度^[16]方面。上述研究内容为干式空心电抗器的发展奠定了坚实的基础，但未见关于电抗器支柱绝缘子安装节径对弯曲强度的影响研究，亦没有涉及电抗器支柱绝缘子的设计方法。合理的安装节径可以保证支柱绝缘子在自重状态下，尽可能多地承受抗压载荷，减小受弯载荷，从而提高整个支撑体系的稳定性与抗震能力。因此，准确预测干式空心电抗器支柱绝缘子安装节径对于电抗器的抗震设计及研发具有非常重要的意义。

针对上述现状，文中提出一种干式空心电抗器支柱绝缘子安装节径的定位分析方法。过电抗器主体线圈的中轴线，建立参考面，以该参考面为基础对主体线圈进行对半切割，将线圈各包封铺平展开，然后利用力矩平衡原理计算安装节径值。通过比较三维建模软件质心特性与力矩平衡原理计算节径值的差异，分析了气道撑条结构对安装直径值的影响。采用有限元仿真计算方法^[17-18]，分别验算了自重作用与地震作用下支柱绝缘子的弯矩，验证文中提出理论预测方法的有效性。

1 安装节径的设计方法

1.1 基于三维建模软件的设计方法

关于干式空心电抗器支柱绝缘子安装节径的定位方法，现有的技术方法通常是以线圈的内径与外径差值为基础，乘以某个系数来估算安装节径，见图 1，这样粗犷式估算的安装节径可能与主体线圈的实际质心位置偏差较大，因此有必要对支柱绝缘子安装节径的定位方法进行研究。



图 1 安装节径示意图

Fig. 1 Diagram of installation diameter

主体线圈的几何结构通常由多个包封组成，这些包封即对应图 2 中不同内、外径的环柱体；如果直接在三维建模软件中读取这些环柱体的质心特征，坐标点肯定是位于中轴线上的，并不能读取安装节径的坐标信息。为此，以线圈的中轴线为作为 z 轴，以线圈的俯视图中间面作为 xy 平面，从而建立 xyz 坐标系；以 yz 坐标轴为参考建立剖面，对线圈的各个包封进行 1/2 切割，见图 3。基于图 3 所示的模型，为各个包封赋予相应的密度信息。

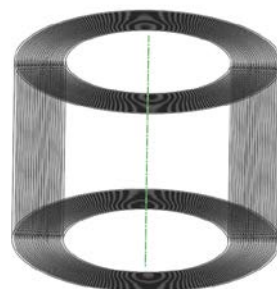


图 2 主体线圈示意图

Fig. 2 Diagram of the main coil

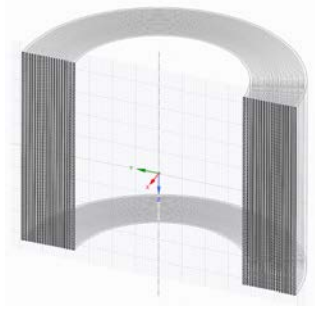


图 3 对半切割后的主体线圈示意图

Fig. 3 Diagram of the main coil after half cut

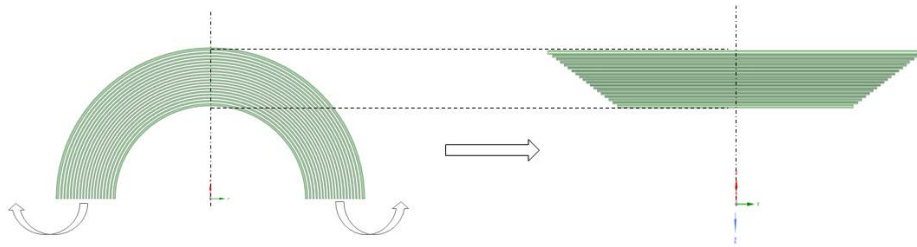


图 4 被平铺展开后的各包封示意图

Fig. 4 Diagram of each packet after being tiled out

1.2 基于力矩平衡原理的设计方法

以图 4 被平铺展开后的各包封为研究对象，基于建立的坐标系，可确定各个包封内半径、包封外半径在水平 x 坐标轴的坐标值(a_i , b_i)， i 为主体线圈中包含的包封数量值。

计算电抗器主体线圈中各包封对坐标原点的力矩信息见图 5。考虑到包封与包封之间的撑条结构质量远小于包封的质量，因此忽略撑条结构部分，得到各包封对坐标原点的力矩信息的计算公式为

$$M_i = H\rho_i \frac{\pi(b_i+a_i)}{2} \frac{(b_i+a_i)}{2} (b_i - a_i)$$

(1)

式(1)中： M_i 表示力矩信息； H 表示电抗器线圈的高度信息； ρ_i 表示主体线圈各包封的密度信息； a_i 、 b_i 分别表示主体线圈各包封内、外半径的坐标信息； i 表示包封的数量信息。

以图 3 所示对半切割后的主体线圈为研究对象，将各个包封进行平铺，这些环柱体被展开为一系列不同长度的薄板，见图 4。利用三维建模软件中的质心特征，通过读取线圈厚度方向对应的坐标值，即可确定安装节径的半径值。

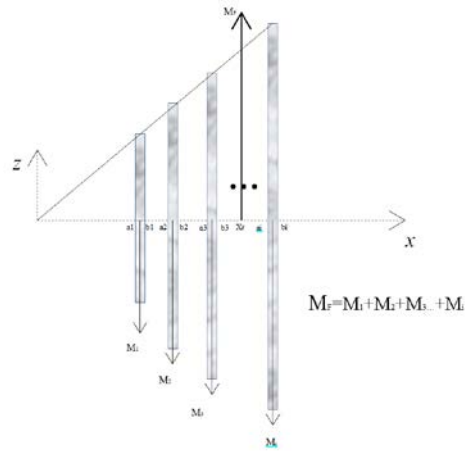


图 5 力矩平衡原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the torque balance principle

通过将全部包封对坐标原点的力矩信息进行累加运算，得到总的力矩信息。根据力学原理可知，在平衡状态下，物体对于任意一个旋转点的合外力矩为零。因此可得到

$$M_F = M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_i \quad (2)$$

式(2)中， M_F 为支柱绝缘子提供的约束反力对坐标原点的力矩。

进而，支柱绝缘子的定位信息即安装节径的半径值的计算公式为

$$X_F = \frac{M_F}{G} \quad (3)$$

式(3)中， G 为支柱绝缘子提供的约束反力；根据力学原理可知，在平衡状态下，物体除了合外力矩为零外，合力也为零。因此，支柱绝缘子提供的约束反力与各包封的重力相等，即可得到

$$G = \sum_1^i H \rho_i \frac{\pi(b_i+a_i)}{2} (b_i - a_i) \quad (4)$$

除假包封外，各包封之间密度差异值较小，进而上述安装节径的半径值的计算公式可以简化为

$$X_F = \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_1^i [(b_i - a_i)(b_i + a_i)^2]}{\sum_1^i (b_i - a_i)^2} \right) \quad (5)$$

2 计算实例

为了验证主体线圈各包封之间气道撑条结构的影响，以本节分析的高压干式空心电抗器结构为例，见图 6，分别采用第 1.1 节与第 1.2 节的设计方法，计算支柱绝缘子的安装节径值。该电抗器主体线圈重约 32.5 T，采用 8 支撑，每个支撑包含 2 节复合支柱绝缘子，支柱绝缘子的杆径为 260 mm。主体线圈各包封的结构信息见表 1。

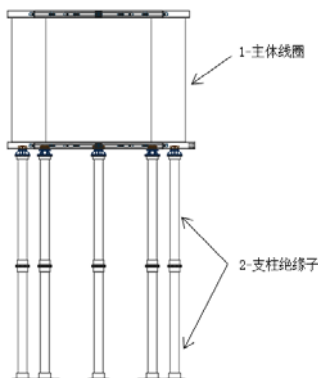


图 6 某型号特高压空心电抗器外形示意图

Fig. 6 Outline diagram of a UHV air-coil reactor

表 1 电抗器主体线圈的结构信息

Table 1 Structure information of the coil of the reactor

包封序号	包封内径 /mm	包封外径 /mm	密度/(kg·m ⁻³)
1	3 050.00	3 129.65	1 453.468 745
2	3 183.65	3 234.96	1 575.024 271
3	3 288.96	3 338.70	1 582.515 489
4	3 392.70	3 440.06	1 584.790 744
5	3 494.06	3 541.08	1 488.232 058
6	3 595.08	3 635.42	1 573.664 255
7	3 689.42	3 731.26	1 590.152 208
8	3 785.26	3 822.24	1 572.421 746
9	3 876.24	3 916.96	1 469.851 857
10	3 970.96	4 009.81	1 587.780 422
11	4 063.81	4 107.01	1 524.122 117
12	4 161.01	4 205.15	1 533.562 041
13	4 259.15	4 306.85	1 447.554 419
14	4 360.85	4 406.48	1 551.070 303
15	4 460.48	4 506.49	1 550.368 920
16	4 560.49	4 609.68	1 468.245 838
17	4 663.68	4 710.25	1 562.571 141
18	4 764.25	4 815.24	1 568.354 514
19	4 869.14	4 959.28	1 474.750 725

采用文中 1.1、1.2 节列出的方法，分别计算该型号电抗器安装节径的坐标值。

将研究对象主体线圈的结构模型导入三维建模软件中，按照文中提供的思路，对主体线圈进行切割，展开铺平后，对各包封赋予相应的密度值。基于三维建模软件中的质量属性功能，读取的质心坐标值；见图 7，线圈厚度方向对应的质心坐标值为 2 048.03 mm。

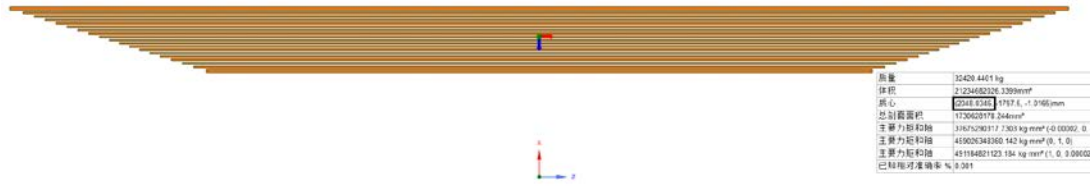


图 7 三维建模软件读取质心特征

Fig. 7 Centroid features read in 3D modeling software

采用基于力矩平衡原理的定位方法计算该型号特高压电抗器主体线圈的安装节径值，见表 2，得到安装节径的半径值为 2 049.83 mm。

表 2 基于力矩平衡原理计算安装节径的数据表

Table 2 Data table for calculating mounting pitch diameter based on torque balance principle

封装序号	a_i/mm	b_i/mm	$0.5(b_i-a_i)(b_i+a_i)^2$	$(b_i-a_i)(b_i+a_i)$
1	1 525.000	1 564.825	190 105 006.5	123 052.280 600
2	1 591.825	1 617.480	132 118 613.9	82 334.719 770
3	1 644.480	1 669.350	136 554 570.4	82 414.952 100
4	1 696.350	1 720.030	138 192 363.3	80 899.878 400
5	1 747.030	1 770.540	145 448 126.3	82 698.070 700
6	1 797.540	1 817.710	131 811 278.4	72 919.592 500
7	1 844.710	1 865.630	143 998 875.7	77 620.312 800
8	1 892.630	1 911.120	133 761 412.5	70 331.337 500
9	1 938.120	1 958.480	154 567 944.1	79 334.776 000
10	1 985.480	2 004.905	154 653 812.4	77 513.228 620
11	2 031.905	2 053.505	180 258 208.6	88 244.856 000
12	2 080.505	2 102.575	193 092 176.7	92 320.575 600
13	2 129.575	2 153.425	218 753 261.3	102 149.550 000
14	2 180.425	2 203.240	219 212 438.6	100 013.317 000
15	2 230.240	2 253.245	231 219 088.2	103 142.572 400
16	2 280.245	2 304.840	258 530 397.3	112 770.165 600
17	2 331.840	2 355.125	255 758 259.3	109 135.980 000
18	2 382.125	2 407.620	292 448 774.7	122 114.548 800
19	2 434.570	2 479.640	544 208 079.4	221 483.444 700
		求和	3 854 692 687.6	1 880 494.159 00
			安装节径 (X_F):	2 049.829 652

表 3 不同方法计算的安装节径(半径)值

Table 3 The value of the installation pitch diameter (radius) calculated by different methods

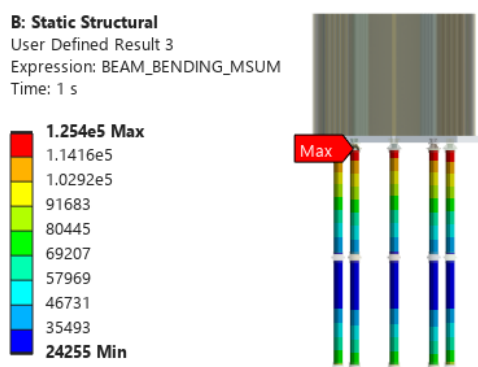
基于三维建模软件质心特征读取的安装节径值与基于力矩平衡原理计算的安装节径值数据对比见表 3，其偏差值仅有 0.09%，说明主体线圈中撑条结构对于安装节径的影响不大；因此，在理论预测安装节径时，忽略撑条结构部分是合理的。

参数	数值
方法 1 的安装节径值/mm	2 048.03
方法 2 的安装节径值/mm	2 049.83
偏差/%	+0.09

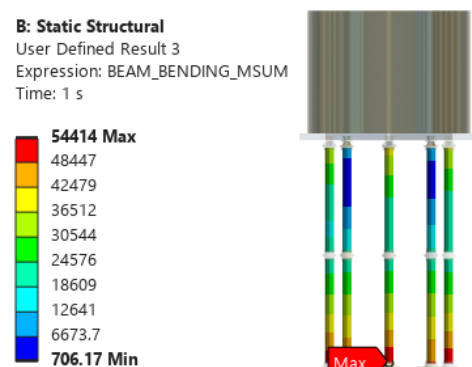
3 安装节径对自重状态的影响

如前文所述，当安装节径不同时，干式空心电抗器支柱绝缘子的受力也不相同。考虑到支柱绝缘子的抗压性能强于抗弯性能，因此很有必要设计合适的安装节径，保证支柱绝缘子所受的弯矩尽可能最低。本部分以第 2 章中的某型号特高压电抗器为研究对象，采用有限元计算分析方法，分析自重状态下不同安装节径对应的支柱绝缘子弯矩。

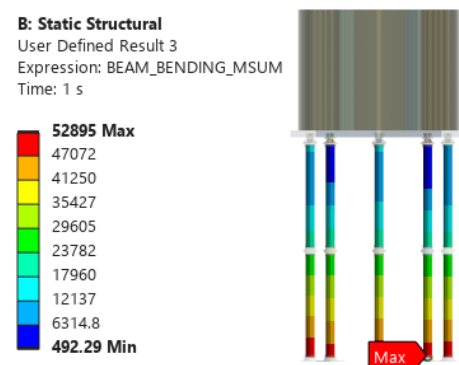
对支柱绝缘子进行梁单元建模，固定约束底部法兰面，施加重力加速度作为激励条件。经计算，不同安装节径对应的支柱绝缘子弯矩云图见图 8。分析云图可知，安装节径值不同，支柱绝缘子最大弯矩值对应的位置也随之变化；主要原因是当安装节径发生变化时，电抗器底部支撑结构除了弯曲变形，还包含扭转变形。



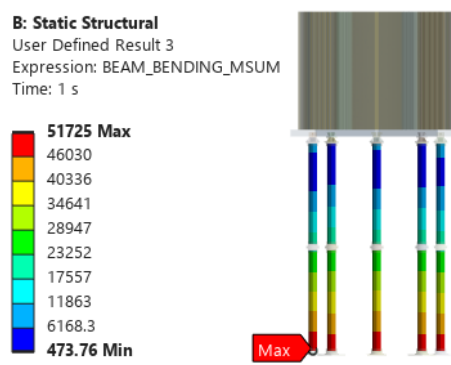
(a) $R=1\ 650\ \text{mm}$



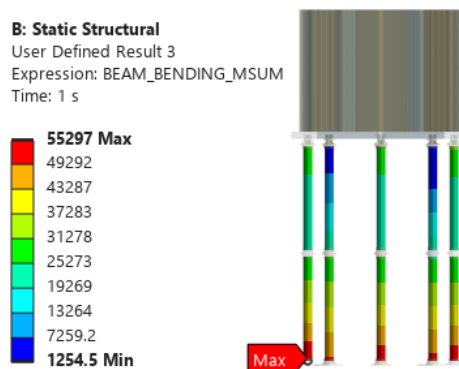
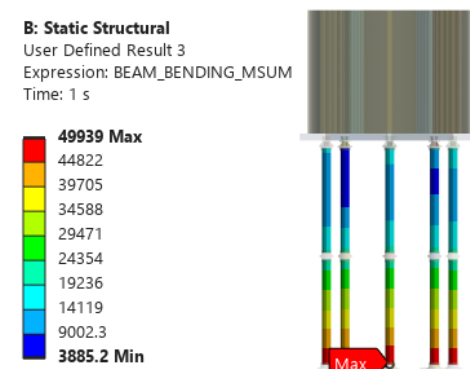
(b) $R=1\ 750\ \text{mm}$



(c) $R=1\ 850\ \text{mm}$



(d) $R=1\ 950\ \text{mm}$



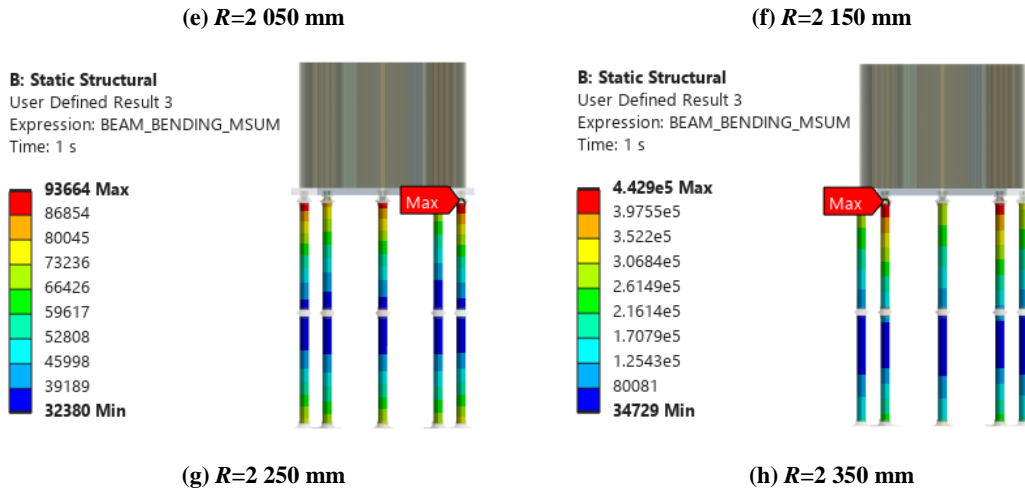


图 8 自重作用下，不同安装节径对应的支柱绝缘子弯矩云图
(R 为对应的安装节径半径值)

Fig. 8 Under the action of self-weight, the bending moment contour of the pillar insulator corresponding to different installation diameters

(R is the radius value corresponding to the corresponding installation pitch)

基于图 8 计算的结果数据，支柱绝缘子在自重作用下的弯矩随安装节径的变化规律见图 9。当安装半径从 1 650 mm 变化至 2 350 mm 时，其支柱绝缘子的弯矩呈现先降低后升高的规律，其拐点位于 2 000~2 100 mm 之间，与上一章节基于力矩平衡原理计算的安装半径(2 049.83 mm)基本吻合。

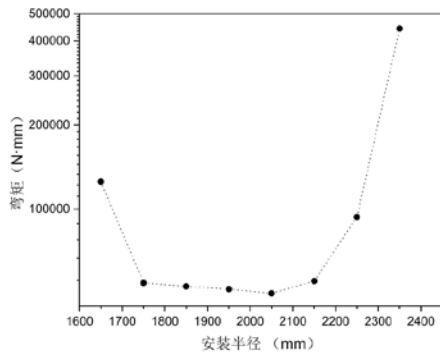


图 9 自重作用下，不同安装节径对应的支柱绝缘子弯矩数据

Fig. 9 The bending moment data of the pillar insulator corresponding to different installation diameters under the action of self-weight

4 安装节径对抗震性能的影响

由于特高压电抗器设备的自振基频通常低于 33 Hz，按照 GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》要求，需采用振型分解反应谱法进行抗震验算。本节参考该规范要求，采用振型分解反应谱法进行支柱绝缘子的抗震性能分析。

地震作用的地震影响系数，根据场地指数、场地特征周期和结构自振周期确定，场地特征周期取 0.40 s，阻尼比取 5%。

地震影响系数按照下列计算：

$$\alpha(t) = \left(0.40 + \frac{\eta_2 - 0.40}{0.1} T\right) \alpha_{max} \quad 0 \leq T \leq 0.1$$

$$\alpha(t) = \eta_2 \alpha_{max} \quad 0.1 < T \leq T_g$$

$$\alpha(t) = \left(\frac{T_g}{T}\right)^{\gamma} \eta_2 \alpha_{max} \quad T_g \leq T < 5T_g$$

$$\alpha(t) = [\eta_2 0.2^{\gamma} - \eta_1 (T - T_g)] \alpha_{max} \quad 5T_g \leq T \leq 6$$

式(1)中： $\alpha(t)$ 是水平地震影响系数；

α_{max} 水平地震影响系数的最大值； T 是结构的自振周期。

采用的反应谱的曲线见图 10,激励方向为水平 x 轴向。

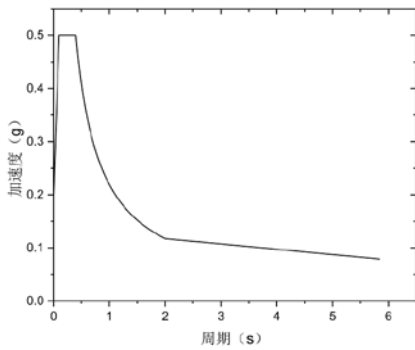
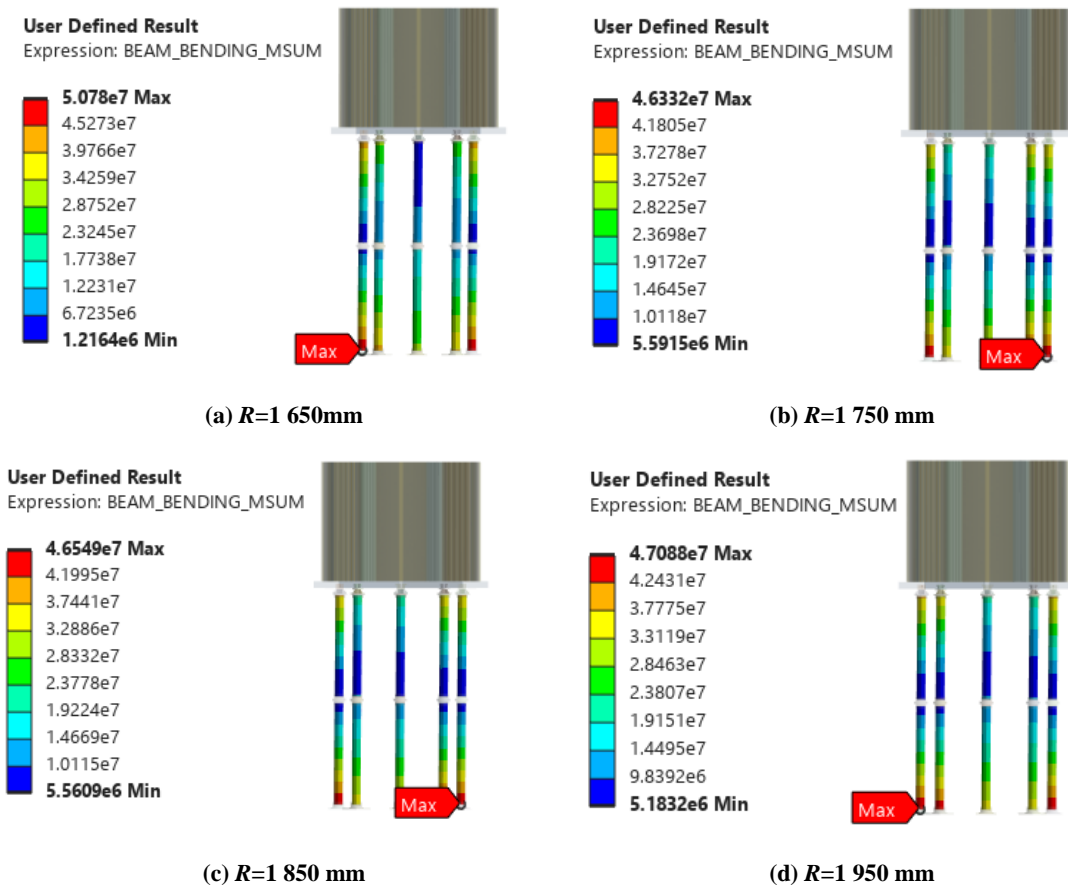


图 10 中软场地反应谱曲线图(0.2 g)

Fig. 10 The seismic response spectrum curve diagram of the soft site (0.2 g)

联合荷载作用下,不同安装节径对应的支柱绝缘子弯矩云图见图 11;其中,联合荷载包括自重与地震荷载,两者的分项系数各取 1.0。分析云图可知,安装节径值不同时,其支柱绝缘子最大弯矩出现的位置也随之变化。



(a) $R=1\ 650\text{mm}$

(b) $R=1\ 750\ \text{mm}$

(c) $R=1\ 850\ \text{mm}$

(d) $R=1\ 950\ \text{mm}$

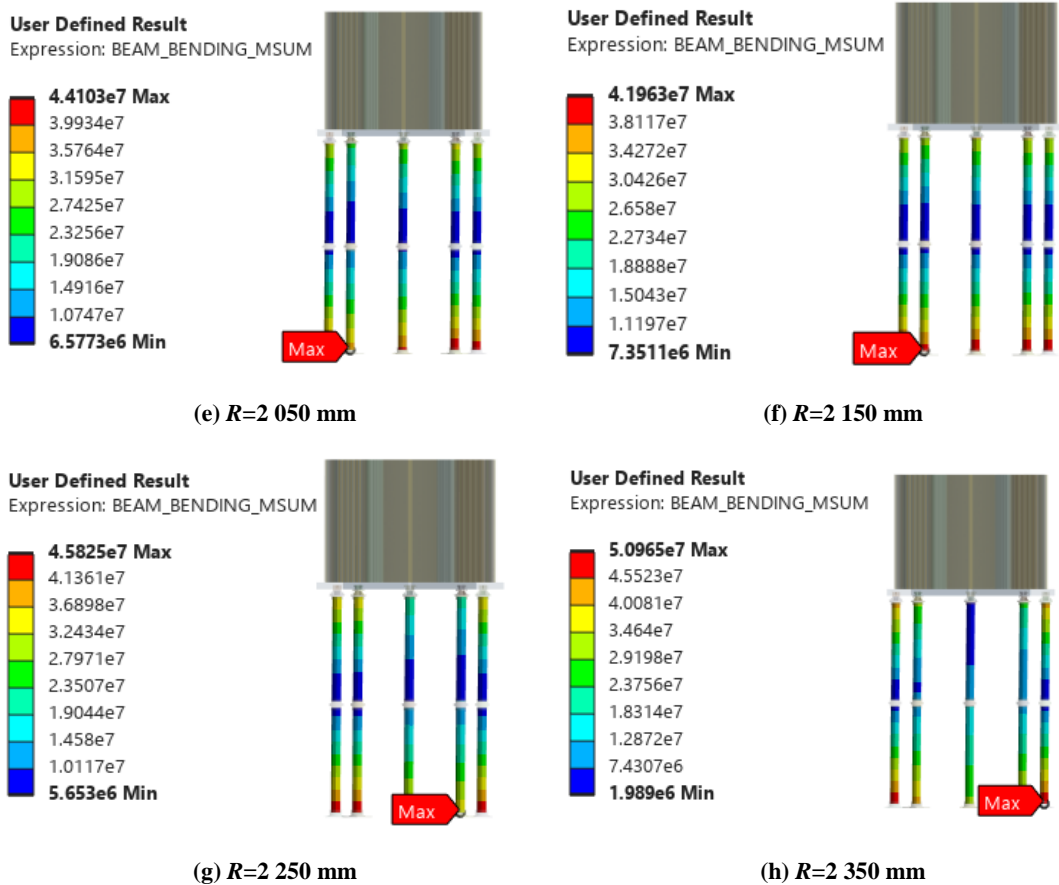


图 11 联合载荷下，不同安装节径对应的支柱绝缘子弯矩云图
 (R 为安装节径对应的半径值)

Fig.11 Under the load combination, the bending moment contour of the pillar insulator corresponding to different installation diameters
 (R is the radius value corresponding to the corresponding installation pitch)

基于图 11 计算的结果数据，支柱绝缘子在联合载荷作用下的弯矩随安装节径的变化规律见图 12。当安装半径从 1 650 mm 变化至 2 350 mm 时，其支柱绝缘子的弯矩呈现先降低后升高的规律，其拐点位于 2 100~2 200 mm 之间，与上一章节基于力矩平衡原理计算的安装半径(2 049.83 mm)有所偏大。

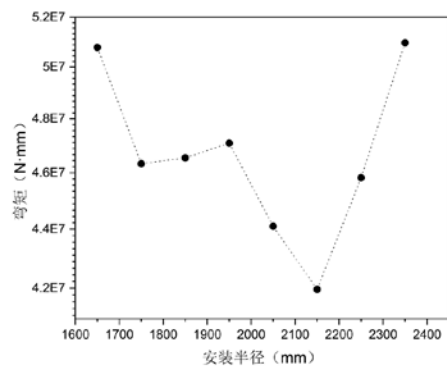


图 12 联合载荷下，不同安装节径对应的支柱绝缘子弯矩数据

Fig.12 The bending moment data of the pillar insulator corresponding to different installation diameters under load combination

为分析该偏差的原因，安装半径为 2 150 mm 对应电抗器结构的模态振型见图 13-15，由于该结构前三阶模态的振型参与系数基本达到 90%，因此，这里只列出了前三阶模态振型。从图中不难发现，其第一、二阶模态振型分别沿水平 x 、 y 轴平动，而第三阶模态振型为绕垂向 z 轴转动。文中第二节给出的理论预测方法未分析主体线圈扭转来的影响，因此，支柱绝缘子的弯矩数据与理论预测值有所偏差。

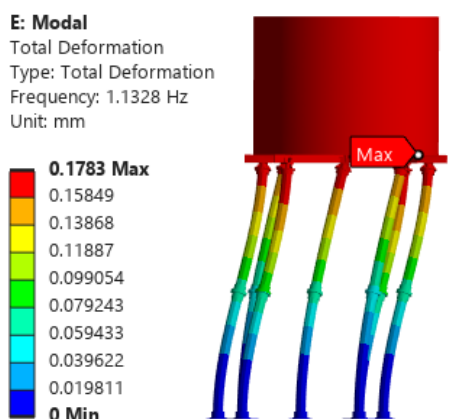


图 13 一阶模态振型($R=2\ 150\ \text{mm}$)

Fig.13 The first-order vibration mode($R=2\ 150\ \text{mm}$)

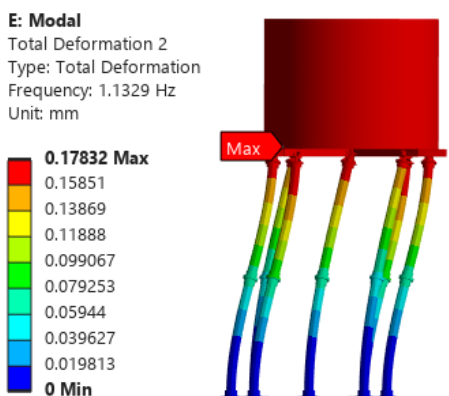


图 14 二阶模态振型($R=2\ 150\ \text{mm}$)

Fig.14 The second-order vibration mode($R=2\ 150\ \text{mm}$)

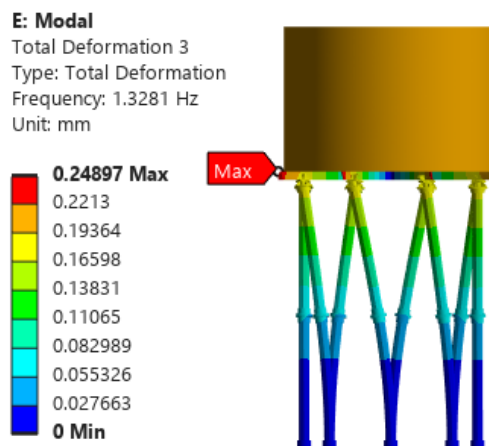


图 15 三阶模态振型($R=2\ 150\ \text{mm}$)

Fig.15 The third-order vibration mode($R=2\ 150\ \text{mm}$)

5 结语

为了保证干式空心电抗器支柱绝缘子尽可能多地承受抗压载荷、减小受弯载荷，文中提出了一种干式空心电抗器支柱绝缘子安装节径的定位方法，并通过有限元仿真计算方法验证了该理论预测的有效性。具体结论如下：

1)对比分析三维建模软件质心特征与力矩平衡原理计算的安装节径值，不难发现其主体线圈中撑条结构对于安装节径值的影响不大，因此，在理论预测支柱绝缘子的安装节径时，忽略撑条结构部分是合理的；

2)以具体电抗器结构为例，结合有限元仿真计算方法，分别计算自重作用下不同安装节径对应的支柱绝缘子受弯数据，结果表明，基于力矩平衡原理计算的安装节径值位于支柱绝缘子最小弯矩对应的节径范围区间，说明文中提出的理论预测方法有效；

3)采用振型分解反应谱法，计算地震作用下不同安装节径对应的支柱绝缘子受弯数据，结果表明，基于力矩平衡原理计算的安装节径值与支柱绝缘子最小弯矩对应的节径范围区间存在微小偏差，分析原因，主要是本文提出的基于力矩

平衡原理未考虑主体线圈在地震作用下的扭转影响,有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 1-8.
LIU Zhenya. Innovation of UHVAC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 1-8.
- [2] 路宝民, 朱东柏. 户外干式空心电抗器设计的若干问题[J]. 变压器, 1997, 34(12): 1-5.
LU Baomin, ZHU Dongbai. Problems in outdoor dry-type air-core reactor design[J]. Transformer, 1997, 34(12): 1-5.
- [3] 孙 勇, 刘青松, 谷 裕, 等. ± 800 kV 特高压柔性直流桥臂电抗器设计方法[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 217-223.
SUN Yong, LIU Qingsong, GU Yu, et al. Design method of bridge arm reactor for ± 800 kV UHV flexible DC[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 217-223.
- [4] 李 强, 田松丰, 张世洪. 特高压交流滤波器回路地震响应及易损性分析[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 107-116.
LI Qiang, TIAN Songfeng, ZHANG Shihong. Analysis on seismic response and vulnerability of alternating current filter circuit[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 107-116.
- [5] 刘如山, 舒荣星, 熊明攀. 变电站高压电气设备易损性研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(1): 9-16.
LIU Rushan, SHU Rongxing, XIONG Mingpan. Vulnerability study for high voltage electrical equipment in substations[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(1): 9-16.
- [6] 特高压瓷绝缘电气设备抗震设计及减震安装与维护技术规程: Q/GDW 11132—2013[S].2013.
Technical specification for seismic design of ultra-high voltage porcelain insulating equipments and installation/maintenance to energy dissipation devices: Q/GDW 11132—2013[S].2013.
- [7] 于永清, 李光范, 李 鹏, 等. 四川电网汶川地震电力设施受灾调研分析[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 1-6.
YU Yongqing, LI Guangfan, LI Peng, et al. Investigation and analysis of electric equipment damage in Sichuan power grid caused by wenchuan earthquake[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 1-6.
- [8] 杨少勇, 赵建国. 电力系统地震灾害预防技术综述[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 57-63.
YANG Shaoyong, ZHAO Jianguo. An overview on prevention technology of earthquake disaster for power grids[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 57-63.
- [9] 电力设施抗震设计规范: GB 50260—2013[S]. 北京: 中国 标准出版社, 2013.
Code for design of seismic electric installations: GB 50260—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [10] 赖炜煌, 谢 强, 李晓璇, 等. 不同结构型式直流滤波器回路抗震性能对比分析[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 135-143.
LAI Weihuang, XIE Qiang, LI Xiaoxuan, et al. Comparative analysis on seismic performance of DC filter coupling loops with different structural forms[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 135-143.
- [11] 孙帮新, 曹枚根. 特高压新松换流站直流场设备抗震设计及能力考核[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 24-35.
SUN Bangxin, CAO Meigen. Aseismic design and capability assessment of DC yard equipment for UHV xinsong converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 24-35.
- [12] 张 军, 齐立忠, 李科文, 等. 电瓷型高压电气设备的抗震试验及有限元分析[J]. 电力建设, 2011, 32(7): 6-10.
ZHANG Jun, QI Lizhong, LI Kewen. et al. Shock test and finite element analysis of porcelain high voltage electrical equipment[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(7): 6-10.
- [13] 王 锋, 宓传龙, 张 磊. 基于 Ansys 的干式空心电抗器抗震分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(4): 67-71.
WANG Feng, MI Chuanlong, ZHANG Lei. Seismic analysis on Ansys-based dry air core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(4): 67-71.
- [14] 俞越中, 苏扩军, 吴桂军, 等. 110 kV 复合材料干

- 式电抗器抗震性能振动台试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(s2): 262-266.
- YU Yuezhong, SU Kuojun, WU Guijun, et al. Shake table test research on seismic performance of 110 kV composite material dry type of reactor[J]. Building Structure, 2016, 46(s2): 262-266.
- [15] 孙宇晗, 程永锋, 卢智成, 等. 170 kV 中性点电抗器地震模拟振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(13): 229-234.
- SUN Yuhan, CHENG Yongfeng, LU Zhicheng, et al. Earthquake simulation shaking table tests for a 170 kV neutral reactor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37 (13): 229-234.
- [16] 张雪松, 代泽兵, 曹枚根, 等. 特高压电气设备瓷套与法兰连接弯曲刚度的计算系数[J]. 武汉大学学报, 2014, 47(6): 794-799.
- ZHANG Xuesong, DAI Zebing, CAO Meigen, et al. Coefficient of bending stiffness of interconnected parts between ultra - high voltage porcelain bushings and flanges[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(6): 794-799.
- [17] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- ZENG Pan. Finite element analysis and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [18] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 第2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- ZHU Baifang. The finite element method theory and applications[M]. 2nd ed. Beijing: China Waterpower Press, 1998.

张志伟(1994—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电抗器设备抗震研究 (E-mail: : zhangzhiwei@tee.com.cn)。