变电站均压环抗风稳定性及优化设计研究

梁启军[1] 王志惠[1] 刘高飞[1] 康 钧[2] 马国祥[2] 周子旬[3] 蔡陈之[3,*]
（1.国网青海省电力公司电力科学研究院，西宁 810000；2.国网青海省电力公司，西宁 810008；
3.中南大学土木工程学院，长沙 410075）

摘 要 本文以变电站均压环结构为研究对象，基于双向流固耦合方法，通过ANSYS软件中的Fluent模块和Transient Structural模块建立耦合模型，探究支撑杆数量、支撑杆壁厚和风速对抗风稳定性的影响。研究结果表明：随着支撑杆数量增大，均压环变形量逐渐减小，但幅度较小，连接部位应力应变显著增大；随着支撑杆壁厚增大，变形量逐渐减小，且应力应变集中现象有所缓和。当风速低于15 m/s时，变形量随风速增大显著增大；风速高于15 m/s，变形趋于稳定，均压环对风荷载的响应接近饱和。

关键词 均压环，流固耦合，抗风稳定性，应力应变分析
中图分类号：TM216；TU312+.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.20251017.001

Study on Wind Stability and Optimal Design of Corona Ring in Substation

LIANG Qijun[1] WANG Zhihui[1] LIU Gaofei[1] KANG Jun[2]
MA Guoxiang[2] ZHOU Zixun[3] CAI Chenzhi[3,*]
（1.State Grid Qinghai Electric Power Company Research Institute，Xining 810000，China；2.State Grid Qinghai Electric Power Company，Xining 810008，China；3.School of Civil Engineering，Central South University，Changsha 410075，China）

Abstract This paper focuses on the corona ring in substations. Employing the fluid-structure interaction method，a coupled model is developed using the Fluent and Transient Structural modules in ANSYS to investigate the effects of the number and wall thickness of supporting rods，as well as wind speed，on the structural stability of the corona ring. The results indicate that increasing the number of supporting rods marginally reduces the overall deformation of the corona ring，while significantly elevating the stress and strain at the connection points. Increasing the wall thickness of the supporting rods effectively reduces deformation and mitigates stress concentration. Furthermore，the deformation increases substantially with wind speed below 15 m/s；however，beyond this threshold，the deformation tends to stabilize as the corona ring′s response to wind load approaches saturation.

Keywords corona ring，fluid-structure interaction，wind resistance stability，stress-strain analysis

0 引 言

随着中国经济的持续高速发展以及区域经济一体化进程的加快，国家电力需求呈现出迅猛增长趋势。2020年，青海电网进入特高压时代，全面建成并投入运行了世界上首条以输送新能源为主的特高压输电大通道——青海-河南±800 kV特高压直流输电工程，电网资源配置能力和安全保

收稿日期：2024-12-10
作者简介：梁启军，男，工程师，研究方向为电网设备材料故障分析等。E-mail：1321923461@qq.com
* **联系作者**：蔡陈之，男，副教授，研究方向为高速铁路桥梁风/声屏障等。E-mail：chenzhi.cai@csu.edu.cn

障能力显著提升,智能化水平明显提高[1-2]。均压环是特高压输电工程中重要的组成部分,其基本原理是优化超高压线路中绝缘子串的电压分布,能够有效改善电厂电压不均现象,抑制放电现象发生。但在实际生活中,均压环常因强风、恶劣气候和共振等因素而出现振动,影响电网的安全运行。

目前国内外的研究主要在均压环和绝缘子的电场特性方面。崔玉涵[3]、武坤[4]、唐香华[5]研究了均压环的电场分布及优化设计,采用了有限元法、边界元法和MATLAB等技术手段,提出了合理的参数和优化方法。Liu等[6]和Adrienn Dineva[7]分别研究了大尺寸均压环的电晕特性和聚合物绝缘子的电场分布,改进了设计。李晶[8]和陈树挺等[9-11]则分别针对500 kV和1 000 kV输电线路的均压环进行了电场计算和设计优化。

目前对于均压环抗风性能研究的相关文献相对匮乏。葛志杰[12]等研究了在风速为35 m/s的载荷作用下均压环的应力、应变和位移情况,通过对比均压环各部件的位移量得到了均压环最易断裂失效的位置,与实际检测相符合。杨骐[13]研究了在脉动风荷载和涡激振动作用下屏蔽环的疲劳破坏,提出了一种屏蔽环结构振动频率的图像识别方法,以及一种考虑风速风向概率的屏蔽环结构振动计算分析方法,在确立屏蔽环断裂原因后,采用消能减振的思想设计了新式屏蔽环。武闯[14]通过风洞试验和气动参数计算研究了输电线路耐张塔上的屏蔽环的空气动力特性,结果表明屏蔽环的振幅响应存在明显的锁定现象,并且气动阻尼和气动刚度参数随频率变化显著。董晓虎等[15]依据风荷载计算方法,采用有限元理论进行数值模拟,对1 000 kV的硬跳线屏蔽环断裂形态进行归类,研究发现屏蔽环应力较大部位易断裂,断裂属于疲劳破坏的可能性较大。

对于均压环的结构设计和安装规范,国内外尚无统一标准。各电力设计单位通常通过半经验半模拟的方法来设定均压环的结构参数。然而,目前的均压环设计仅关注其功能作用,并未深入研究其在实际工况下的结构稳定性。当运行在强风荷载区域的电气设备频繁受到强风冲击时,设备顶部的均压环将长期承受横向风荷载和自重的联合作用,导致支撑部位被拉伸变薄甚至开裂,对电气设备的安全稳定运行造成重大隐患。基于此,本文考虑流固耦合效应,构建不同参数条件的均压环结构模型,探究支撑杆数量、支撑杆壁厚和风速对均压环抗风稳定性的影响规律,为均压环优化设计研究提供依据。

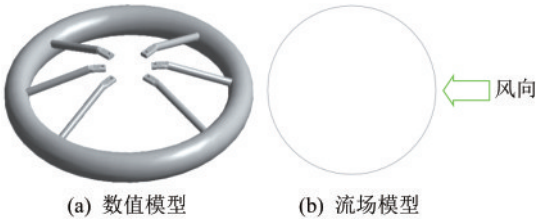
1 数值模拟

本文将对均压环进行双向瞬态流固耦合数值模拟[16-18],同时考虑风与均压环之间的双向交互作用,即风作用在均压环上的力引起均压环变形,而均压环的变形也会影响流场的分布与流动。

1.1 几何建模

均压环是一个由多个零部件组合而成的复杂系统,其中包括外环、支撑结构和连接件。外环是均压环的主体,其形状通常是圆形或椭圆形,材料常用导电性能好及耐腐蚀的金属,如铝合金或不锈钢,以确保其在高压电场中具有良好的性能。支撑结构用于将外环固定在高压设备上,并保持其位置和形状的稳定性,实际中多用金属杆、绝缘子或其他机械支撑件。连接件用于连接外环与支撑结构,确保均压环的整体稳定性和可靠性,常用的连接方式有螺栓连接、焊接等。

本文选取西安西电高压开关有限责任公司的型号为GW7B-800,电压等级为750 kV的隔离开关均压环作为研究对象。该均压环结构呈圆形环状,外环直径为2300 mm,壁厚约为16 mm,主体呈封闭的圆形结构。外环与6根径向撑杆连接,撑杆厚度为16 mm,在高度方向上呈斜向布置,形成稳固的支撑结构。为减少计算量,避免不必要的计算资源的消耗,在建模过程中忽略均压环的内部结构特点。选取比例1∶1进行建模,使用ANSYS Workbench中的三维建模软件Spaceclaim进行建模处理。均压环模型如图1所示。



(a) 数值模型 (b) 流场模型

图1 固体域结构模型

Fig.1 Solid domain model

1.2 计算域与网格划分

在横风作用下,由于均压环及其他构件的阻

挡效应，周围流场区域会产生相应变化。随着距离增大，阻挡效应对流场的影响逐渐变小，流场将趋于平缓，为保证流域的阻塞率不超过3%，设计流体域的大小如图2所示，其中，计算域上表面距离均压环中心轴表面的距离为16*H*；计算域的下表面距离均压环中心轴表面的距离为8*H*；计算域两侧距离均压环中心的距离分别为8*R*和16*R*；均压环中心距离计算域前表面的距离为8*R*，均压环中心距离计算域后表面的距离为16*R*。计算域的整体尺寸为长24*R*、宽16*R*、高24*H*（*R*和*H*分别为均压环的半径和高度）。

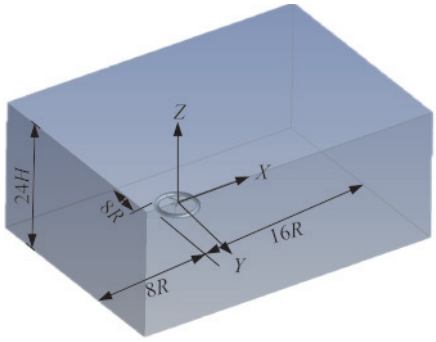


图2　计算域示意图

Fig.2　Computational domain schematic

1.2.1　边界条件

经过多次验证，将计算域四周设置为wall（壁面，如图3所示灰色部分），将计算域前表面设置为outlet（出口，如图3所示红色部分），将计算域后表面设置为inlet（入口，如图3所示蓝色部分）。

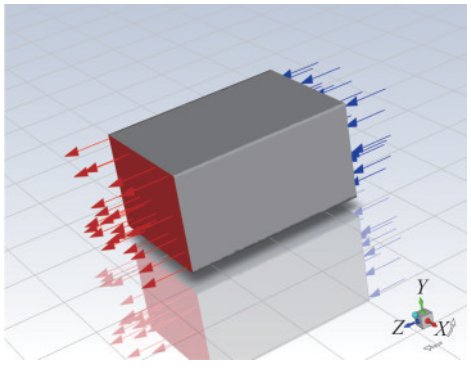


图3　边界条件示意图

Fig.3　Boundary conditions schematic

1.2.2　网格划分

在计算流体动力学中，为了获得精确计算结果和保证计算效率，需要对网格进行精确划分。本文采用结构化网格和非结构化网格相结合的方法对均压环流体域进行网格划分。在均压环附近区域采用适应性较强的四面体网格，并对其适当加密；在距离较远的流体区域采用质量更高的结构化六面体网格。加密区与非加密区交界面采用共享拓扑节点处理，加密区网格增长率设置为1.1[19]。经过一系列的网格无关性试算后，最后确定流场区域网格最大尺寸为500 mm，总网格数为140万左右，网格划分情况如图4所示。

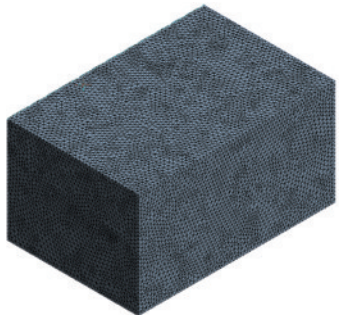


图4　流体域网格示意图

Fig.4　Grid diagram of fluid domain

对于均压环的网格划分，由于结构复杂性和受力的不均匀性，支撑杆及其与均压环的连接处应力集中现象明显，因此设置均压环最大单元尺寸为10 mm，同时在连接部位采用面尺寸调整，设置最大单元尺寸为5 mm，从而达到局部加密的效果。整体采用结构化六面体网格进行划分，最终得到总网格数为18万，如图5所示。

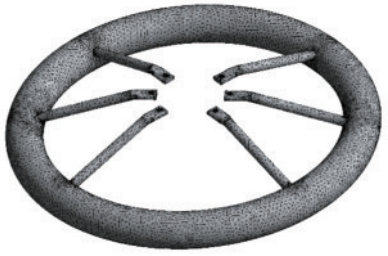


图5　均压环网格示意图

Fig.5　Grid diagram of corona ring

1.3　湍流模型及计算参数设置

湍流模型选取Realizable k-epsilon模型，方程如下：

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+\\&G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k\\&\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+\rho C_1 S-\\&\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\nu\varepsilon}}+C_1\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b+S_\varepsilon\end{aligned}\tag{1}$$

式中：ρ为流体密度；t为时间；x_i、x_j为笛卡尔坐标分量；u_i、u_j为速度分量；k为湍动能；ε为湍流耗散率；μ为动力黏度；μ_t为湍流黏度；σ_k、σ_ε分别为湍动能和耗散率对应的湍流普朗特数；G_k和G_b分别为平均速度梯度和浮力引起的湍动能生成项；Y_M为可压缩湍流脉动膨胀影响项；C_1、C_2、C_3为模型经验常数；S为平均应变率张量的模量；S_k、S_ε分别为湍动能和耗散率方程中的源项。

同时采用可扩展壁面函数(SWF)，模型常数C_2-Epsilon为1.9、TKE Prandtl为1、TDR Prandtl为1.2。时间设置为瞬态，在固体竖直方向上设置重力加速度，空气黏度为1.789 4×10^{-5} kg/(m·s)。

入口边界设置流速30 m/s，湍流强度为1%，湍流黏度比为10，出口边界设置湍流强度1%，湍流黏度比为10。为更加准确地捕捉到由于边界移动或变形引起的流场变化，采用光顺、重新划分网络的动网格方法，创建fluid_cylinder_interface动网格区域。

数值求解方法设置为压力速度耦合的SIMPLEC算法，双向流固耦合求解器类型设置为压力基(Pressure-Based)，空间离散梯度为Least Squares Cell Based，时间项离散格式为二阶隐式(Second Order Implicit)，时间步长为0.05 s，计算时间为5 s，总共100步，每时间步最大迭代次数为20次，每时间步内最多进行5次数据交换，计算收敛标准残差为1×10^{-4}。

2 结果分析与讨论

本文通过展示不同参数条件下均压环应力、应变和变形云图，探究支撑杆数量、支撑杆壁厚和风速对均压环稳定性的影响。

2.1 支撑杆数量

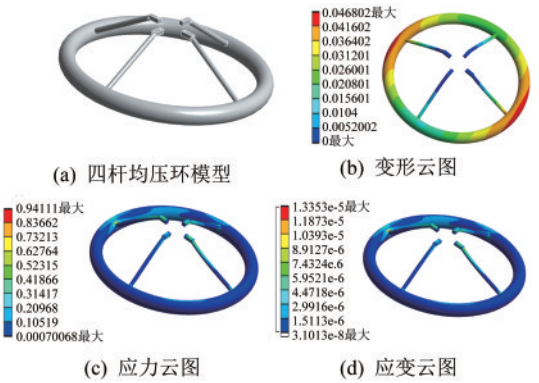
通过改变支撑杆数量进行数值模拟。具体计算工况如表1所示。

表1 支撑杆数量计算工况

Table 1 Calculation conditions of the number of support rods

支撑杆数量	应力/MPa	应变/με	变形/mm
4	0.941	1.335e-05	0.046
6	1.039	1.764e-05	0.024
8	2.918	1.571e-05	0.021

(1) 支撑杆数量为4的均压环模型及云图如图6所示。



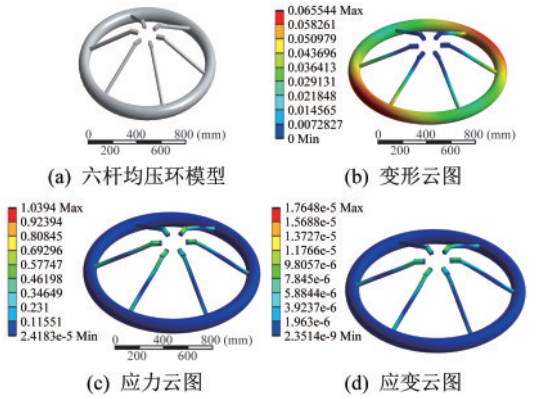
(a) 四杆均压环模型 (b) 变形云图

(c) 应力云图 (d) 应变云图

图6 四杆均压环模型及云图

Fig.6 Four-rod corona ring model and contour plots

(2) 支撑杆数量为6的均压环模型及云图如图7所示。



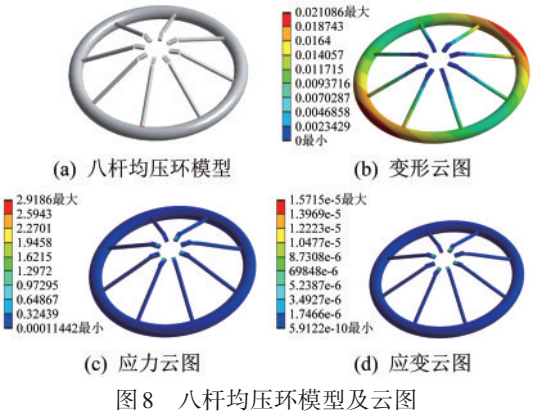
(a) 六杆均压环模型 (b) 变形云图

(c) 应力云图 (d) 应变云图

图7 六杆均压环模型及云图

Fig.7 Six-rod corona ring model and contour plots

(3) 支撑杆数量为8的均压环模型及云图如图8所示。



(a) 八杆均压环模型 (b) 变形云图

(c) 应力云图 (d) 应变云图

图8 八杆均压环模型及云图

Fig.8 Eight-rod corona ring model and contour plots

由图6—图8可知，在风速相同、壁厚相等的条件下，随着支撑杆数量的增加，均压环的变形逐

渐降低，应力和应变呈现出逐渐增大的趋势，且集中在支撑杆固定端位置，表明增加支撑杆后该处仍然是易失效部位，且增加支撑杆数量虽然可以提高结构的整体稳定性，但也会导致支撑杆固定端承受更多的应力和应变，可能会对支撑杆的耐久性产生影响。

从经济效益的角度出发，由图6(b)和图7(b)可知，增加支撑杆数量可以显著减少结构变形，降低维修和维护的成本。然而，8根支撑杆相对于6根支撑杆变形降低相对较少，成本却可能会显著增加。因此，同时考虑到稳定性和成本，选择6根支撑杆可能更加经济合理，既可以满足结构稳定性的要求，又能在成本方面取得较好的平衡。

2.2　支撑杆壁厚

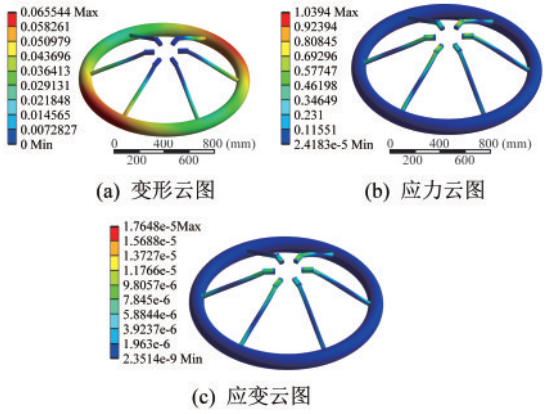
同支撑杆数量一样，支撑杆壁厚是影响均压环结构刚度、承载能力及整体抗风性能的关键因素之一。具体计算工况如表2所示。

表2　　支撑杆壁厚计算工况

Table 2　Calculation conditions of the wall thickness of support rods

支撑杆壁厚/mm	应力/MPa	应变/με	变形/mm
5	0.971	0.9713e−05	0.651
8	12.249	2.204e−04	0.261
9	54.328	7.905e−04	0.201

（1）支撑杆壁厚为5 mm均压环云图如图9所示。



(a) 变形云图　　(b) 应力云图

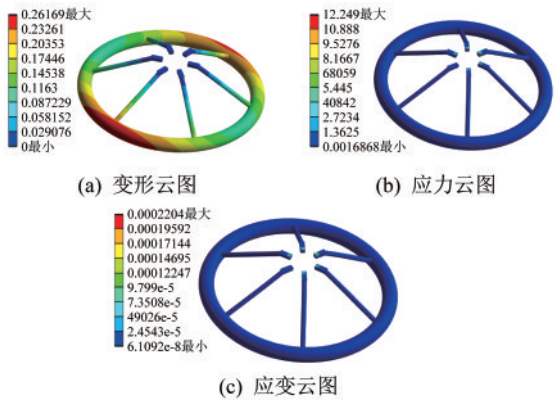
(c) 应变云图

图9　壁厚5 mm均压环云图

Fig.9　Contour plots of the 5-mm-thick corona ring

（2）支撑杆壁厚为8 mm均压环云图如图10所示。

（3）支撑杆壁厚为9 mm均压环云图如图11所示。

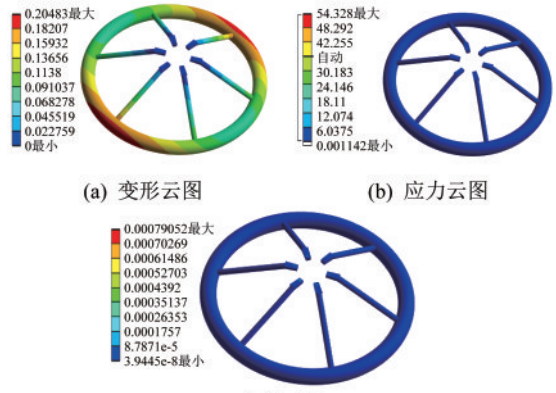


(a) 变形云图　　(b) 应力云图

(c) 应变云图

图10　壁厚8 mm均压环云图

Fig.10　Contour plots of the 8-mm-thick corona ring



(a) 变形云图　　(b) 应力云图

(c) 应变云图

图11　壁厚9 mm均压环云图

Fig.11　Contour plots of the 9-mm-thick corona ring

如图9—图11所示，随着支撑杆壁厚的增加，均压环的整体变形显著减少。具体而言，当壁厚从5 mm增加到8 mm时，变形量从0.65 mm变为0.26 mm，均压环的最大变形显著降低；壁厚进一步增加到9 mm，虽然变形继续减少，但减少幅度相对较小，即从0.26 mm变为0.20 mm。这表明在达到一定壁厚后，增加壁厚对减少变形的效益逐渐减小，因此在实际工艺中可考虑选择壁厚为8 mm的均压环；随着壁厚的增加，支撑杆的应力水平也有所提高，说明支撑杆需要承受更高的内部应力，因此材料的选择和处理工艺需确保能够承受这些高应力。

2.3　风速

为研究风速对实验结果的影响，现研究六杆，壁厚5 mm的均压环模型在风速为5、10、15、20、25、30 m/s条件下的变形量、应力和应变，同时改变相关参数（在fluent中改用标准壁面函数进行运算、改变流体域宽度、改变网格尺寸），计算结果

如表3所示。

表3 风速仿真计算部分工况

Table 3 Selected operating conditions for wind speed simulation

模型	风速/(m·s^{-1})	应力/MPa	应变/με	变形/mm
六杆、壁厚5 mm均压环	5	0.041	2.647e-07	0.000 7
	10	0.412	2.566e-06	0.003 9
	15	0.454	5.174e-06	0.020 4
	20	0.641	9.494e-06	0.037 8
	25	0.685	1.189e-05	0.038 9
	30	0.694	2.413e-05	0.039 6

随着风速的增加,均压环的整体变形也随之增大。在较低风速(如5 m/s)下,均压环的变形较小,结构稳定性较好。风速从5 m/s增加到10 m/s以及从10 m/s增加到15 m/s时,变形的增加幅度非常显著:变形量从风速为5 m/s的0.000 7 mm增加到10 m/s的0.003 9 mm,再增加到15 m/s的0.02 mm,表明在这些风速范围内,均压环对风载荷的敏感性较高,结构变形大幅增加。然而,当风速进一步增加到20 m/s及以上时,变形增加的幅度显著减小且基本处于一个量级,这说明在更高风速下,均压环的变形趋于稳定,结构对风载荷的响应逐渐达到饱和状态。

3 结 论

本研究基于双向流固耦合方法,系统地分析了均压环在不同支撑杆数量、支撑杆壁厚和风速条件下的抗风性能。通过对这些变量的详细分析,得出以下主要结论:

(1)支撑杆数量的影响:增加支撑杆数量可以显著提高均压环的抗风性能,减少结构变形,提升均压环结构稳定性。但随着支撑杆数量的增加,应力和应变也会相应增加,应力集中现象依然存在。在设计时可以考虑增加支撑杆数量与使用高强度材料,在兼顾经济效益的同时确保结构的长期稳定性和耐久性。

(2)支撑杆壁厚的影响:增加支撑杆壁厚有助于提高均压环的刚度,减少其在风载荷作用下的变形,同时改善应力应变集中现象,使其分布更加均匀。然而增加壁厚会提高结构的整体重量和材料成本。在实际设计中,需要考虑壁厚成本和性能之间的最佳平衡点,以兼顾经济性和功能性的双重要求。

(3)风速的影响:随着风速的增加,均压环的应力、应变和变形均显著增大。在风速从5 m/s增加到10 m/s和15 m/s时,变形增加的幅度非常显著,但在更高风速(如20 m/s及以上)时,变形增加的幅度趋于减小,表明在这些风速下结构响应趋于饱和。在实际工程应用中,应综合考虑支撑杆数量、壁厚以及风速对均压环抗风性能的影响,通过合理的参数选择和优化设计,确保均压环在各种风速条件下的稳定性和安全性。

参 考 文 献

[1] 周鹤良.电力强国崛起——中国特高压输电技术开发应用国际领先[J].电气时代,2019(2):10-12,17.
Zhou Heliang. Rise of a power nation: China's UHV transmission technology development and application at the international leading level [J]. Electrical Era, 2019(2):10-12,17.(in Chinese)

[2] 蒋伟,黄震,吴广宁.特高压输电系统绝缘问题的综述[J].现代电力,2007(4):10-16.
Jiang Wei, Huang Zhen, Wu Guangning. A review on insulation issues of UHV transmission systems [J]. Modern Electric Power, 2007(4):10-16.(in Chinese)

[3] 崔玉涵.±1 100 kV PLC电抗器均压环电场特性分析和结构改进研究[D].北京:北京交通大学,2019.
Cui Yuhan. Analysis of electric field characteristics and structural improvement of ±1 100 kV PLC reactor voltage equalizing ring [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.(in Chinese)

[4] 武坤.特高压直流线路复合绝缘子均压环优化研究[D].重庆:重庆大学,2008.
Wu Kun. Optimization of voltage equalizing rings for UHV DC line composite insulators [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.(in Chinese)

[5] 唐香华.超高压合成绝缘子p均压环结构优化研究[D].重庆:重庆大学,2004.
Tang Xianghua. Structural optimization of voltage equalizing rings for UHV composite insulators [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.(in Chinese)

[6] Liu J, Zhang Z, Jia B, et al. Corona characteristics of a large-sized AC grading ring and prediction of corona onset field intensity[J]. Energies, 2022, 15(6):2041.

[7] Aziz E, Aouabed F, Abdellah H, et al. Case Study: optimizing grading ring design for high voltage polymeric insulators in power transmission systems for enhanced electric field and voltage distribution by using a finite element method [J]. Energies, 2023, 16

(13):5235.

[8] Li J, Peng Z, Feng Y, et al. Electric field calculation and grading ring optimization of composite insulator for 500 kV AC transmission lines [C]//2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics. IEEE,2010:1-4.

[9] 陈树挺,李日隆.复合绝缘子均压环应用研究[J].电瓷避雷器,2004(3):8-10.
Chen Shuting, Li Rilong. Application research of voltage equalizing rings for composite insulators [J]. Electrical Porcelain & Surge Arresters,2004(3):8-10.(in Chinese)

[10] 王景朝,樊宝珍,侯继勇.1 000 kV输电线路绝缘子串的均压屏蔽技术[J].高电压技术,2007,(12):9-13.
Wang Jingchao, Fan Baozhen, Hou Jiyong. Voltage equalizing shielding technology for insulator strings in 1 000 kV transmission lines [J]. High Voltage Engineering,2007,(12):9-13.(in Chinese)

[11] 李亚莎,张专专.1 000 kV交流复合绝缘子串电场分布计算及均压环设计 [J].现代电力,2012,29(1):20-23.
Li Yasha,Zhang Zhuanzhuan.Electric field distribution calculation and voltage equalizing ring design for 1 000 kV AC composite insulator strings[J].Modern Electric Power,2012,29(1):20-23.(in Chinese)

[12] 葛志杰,周冠斌,秦海勇,等.强风环境中均压环结构应力应变场分布模拟[J].机电工程技术,2023,52(9):202-205.
Ge Zhijie, Zhou Guanbin, Qin Haiyong, et al. Simulation of stress and strain field distribution of voltage equalizing ring structure in strong wind environment [J]. Electromechanical Engineering Technology,2023,52(9):202-205.(in Chinese)

[13] 杨骐.特高压屏蔽环断裂机理及风振特性研究[D].宜昌:三峡大学,2018.
Yang Qi. Study on the fracture mechanism and wind vibration characteristics of UHV shielding rings[D]. Yichang:Three Gorges University,2018.(in Chinese)

[14] 武闯.屏蔽环空气动力特性理论及风洞实验研究[D].成都:西南交通大学,2022.
Wu Chuang.Theory of aerodynamic characteristics and wind tunnel experimental study of shielding rings[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.(in Chinese)

[15] 董晓虎,徐天勇,雷成华,等.1 000 kV南荆一回管型硬跳线屏蔽环静力风载分析[J].水电与新能源,2016,(10):1-3,12.
Dong Xiaohu, Xu Tianyong, Lei Chenghua, et al.Static wind load analysis of 1 000 kV Nanjing-I return pipe-type hard jump line shielding rings[J].Hydroelectric Power & New Energy, 2016, (10): 1-3, 12.(in Chinese)

[16] 许振飞.基于流固耦合的隧道内机车车体涡激振动数值研究[D].成都:西南交通大学,2022.
Xu Zhenfei. Numerical study of vortex-induced vibration of locomotive bodies in tunnels based on fluid-structure interaction [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2022.(in Chinese)

[17] 梅钊.开孔薄壁圆柱壳结构风致屈曲性能及抗风设计研究[D].武汉:武汉科技大学,2023.
Mei Zhao. Study on wind-induced buckling performance and wind resistance design of perforated thin-walled cylindrical shell structures [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2023.(in Chinese)

[18] 杨冬玉,严伟,周瑞等.基于ANSYS Workbench的风机叶轮流固耦合分析[J].今日制造与升级,2023,(12):81-83.
Yang Dongyu, Yan Wei, Zhou Rui, et al. Fluid-structure interaction analysis of wind turbine impeller based on ANSYS workbench [J]. Today's Manufacturing & Upgrading, 2023, (12): 81-83.(in Chinese)

[19] 王贵春,曹宗恒.基于重叠网格法的斜拉索涡激振动分析[J].郑州:郑州大学学报(理学版),2021,53(3):119-126.
Wang Guichun, Cao Zongheng. Vortex-induced vibration analysis of cable-stayed cables based on the overlapping grid method [J]. Zhengzhou: Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2021,53(3):119-126.(in Chinese)