

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.03.008

新型抗干扰隔离开关在风载作用下的力学特性分析

王巧红¹, 温庆国², 李付永¹, 孙龙勇¹, 付亚旭¹, 郭海涛¹,
李宇鹏¹, 姚灿江¹

(1. 河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467001; 2. 西安建筑科技大学机电工程学院, 西安 710055)

摘要: 户外高压隔离开关是电力传输系统的核心设备,但常受到外界风力等干扰而造成合闸失败的影响,因此设计了一种抗干扰的新型高压隔离开关。为了进一步研究该新型隔离开关在风载作用下的力学特性,首先在Fluent软件中对高压隔离开关风场阻转矩计算模型进行构建,计算得到风场来流方向在导电杆上产生的阻转矩大小。然后在有限元软件Ansys中建立了新型隔离开关的有限元模型,最后通过将风载所产生的阻转矩施加到仿真模型上进行力学特性分析。结果表明:隔离开关的变形量及应力集中的位置均位于支架的销轴孔位置,断定该处属于隔离开关的薄弱环节,应重点考虑该处的加固处理。通过以上仿真分析,为隔离开关抗风优化设计提供依据。

关键词: 隔离开关; 合闸; 风载荷; 力学特性; 应力分析

Mechanical Characteristics Analysis of New Type of Anti-interference Disconnecter Under Wind Load

WANG Qiaohong¹, WEN Qingguo², LI Fuyong¹, SUN Longyong¹, FU Yaxu¹, GUO Haitao¹,
LI Yupeng¹, YAO Canjiang¹

(1. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The outdoor high voltage disconnector, as the core equipment of the power transmission system, is often affected by the failure of closing operation due to interference of external wind force. Therefore, a kind of new type of anti-interference high voltage disconnector is designed. For studying the mechanical characteristics of the new disconnector under wind load further, firstly, the calculation model of wind field resistance torque of high voltage disconnector is constructed in Fluent software, and the resistance torque generated by the direction of wind field flow on the conducting rod is calculated. Then, the finite element model of the new disconnector is set up in the finite element software Ansys. Finally, the mechanical characteristics of the new disconnector are analyzed by applying the resistance torque generated by wind load to the simulation model. The results show that the deformation and stress concentration position of the disconnector are located in the pin hole of the support, which is judged to be the weak link of the disconnector, and on which the reinforcement treatment should be particularly considered. The simulation analysis mentioned above provides the basis for the wind resistance optimization design of the disconnector.

Key words: disconnector; closing; wind load; mechanics characteristic; stress analysis

0 引言

中国现阶段作为世界上经济发展最快的国家之

一,社会生产生活对电力能源的需求也越来越大^[1-2]。中国的发电资源主要集中在西部地区,而电力负荷大部分位于东部沿海地区,因此西电东送是中国能

收稿日期:2023-10-09; 修回日期:2023-12-10

基金项目:平高集团公司2021年度研究开发项目(529100210002W)。

Project Supported by 2021 Annual Research Development Projects of Pinggao Group(529100210002W).

源布局的重要方针。在这种大容量,长距离的电力输送中,高压输电线路已成为中国电网建设的重点内容。高压隔离开关作为高压输电线路建设中重要的电力设备之一,对高压装置的运维保护起着重要的安全作用^[3-4]。由于高压隔离开关通常工作在室外环境,而自然环境的多变性对隔离开关能否顺利进行分合闸操作提出了更加苛刻的要求^[5-7]。

大风天气会造成高压输电设备的主要零部件产生发生振动冲击及疲劳破坏,严重影响上游发电、中间变电及下游用电的正常运行,因此对隔离开关在风载作用下的特性进行研究是有必要的。随着现代计算机能力的不断提升,多数学者借助数值模拟的方法开展风载荷对隔离开关的影响^[8-11]。莫冰等人应用力学简化和数值模拟的方法,仿真分析了800 kV高压隔离开关进行合闸动作时风载作用对动触头应力和位移产生的影响。研究发现隔离开关中下部导电杆的根部的应变和应力最大^[12]。袁攀科等人利用Ansys有限元软件对ZGW6-408型高压直流隔离开关的动端结构系统进行风载荷作用下的仿真分析,该方法可以直观地确定动端结构变形的分布状况,避免传统理论计算的繁琐性^[13]。刘勇等人通过计算机模拟的方法仿真了隔离开关与支架的耦合体系在不同风速风向下的风振响应,研究发现隔离开关的支架在不同风攻角下的风振系数存在明显差异^[14]。由于隔离开关绝缘支柱为瓷器脆性材料所制,在受到大风外力时极易损坏,这也对长寿命高压隔离开关的研制提出更高的要求^[15-18]。孟婧等人通过在流体动力学软件建立了盘形悬式瓷绝缘子串和导线的多刚体模型,该模型可为绝缘子的设计提供参考^[19]。吴亚光等人通过增加绝缘子主体杆径和法兰高度来提高其机械弯曲强度,成功研制出了的结构高度10 m、额定弯曲破坏负荷16 kN、扭转破坏负荷10 kN的高压支柱瓷绝缘子^[20]。李付永等人通过Fluent软件对W16型隔离开关的支柱绝缘子在不同风速下所承受的载荷进行了仿真分析,该方法可为隔离开关的强度评价提供参考^[21]。刘占明等人有限元软件中对隔离开关支柱的底座法兰进行了轻量化设计,优化后的重量可减少32.6%^[22]。孙玉洲等人Adams动力学仿真软件对隔离开关中的平衡弹簧进行了重新设计,优化后的平衡弹簧结构可有效降低装备能耗^[23]。李宇鹏等人通过仿真和试验对800 kV和126 kV高压隔离开关进行了薄弱环节结构优化的研究,但未考虑风场因素对机械特性和绝缘特性的影响^[24-25]。

虽然上述研究得出了大量关于隔离开关在风

载干扰下的力学特性,也为后续优化隔离开关的设计和承载能力提供了设计参考依据,但这些方法未从隔离开关结构的本身出发去解决隔离开关易受环境影响而造成导电杆转动角度不足,无法接触静触点,最终误导运维人员进行错误操作而造成合闸失败的问题。

鉴于此文中以GW27A-800型三柱水平旋转式隔离开关为原型,设计了一种新型抗干扰高压隔离开关,为解决隔离开关分合闸的稳定性提供技术支持。为了分析风载作用对该隔离开关的力学特性的影响,首先在UG软件里面建立了新型抗干扰隔离开关的三维模型,然后在Fluent软件里面构建了高压隔离开关风场阻转矩计算模型,最后在大型商业软件Ansys中,采用有限元方法模拟计算隔离开关的应力和变形,从而掌握隔离开关在强风中的力学特性,为新型隔离开关的结构设计、优化及应用提供参考依据。

1 计算模型

1.1 隔离开关的建模

文中针对隔离开关以GW27A-800型三柱水平旋转式隔离开关为原型进行结构改造,其中主要部件的结构参数见表1。

表1 隔离开关主要部件的尺寸
Table 1 Dimensions of the main components on the disconnector

部件名称	几何尺寸
导电杆	杆径:100 mm;杆长:10 000 mm; 拨杆孔距开孔位置:120 mm
导电杆拨杆	杆径:12 mm;杆长:150 mm
槽轮	厚度:15 mm;槽数:1
主动拨盘	内径:40 mm;外径:130 mm;盘厚:3 mm
支架	长:560 mm;加强板厚度:5 mm
连杆	长:80 mm;厚度:16 mm
连架杆	长:180 mm;厚度:8 mm
弹簧	丝直径:8 mm;内径:64 mm; 外径:80 mm;圈数:6.5
曲柄	长度:30 mm;厚度:6 mm
法兰盘	直径:160 mm;盘厚:10 mm
绝缘支柱	杆径:130 mm;最大伞径:190 mm; 高:1 900 mm

采用UG软件对改造后的新型隔离开关的整体模型进行三维建模,隔离开关的模型见图1。从图1可以看到,翻转机构主要由导电杆拨杆、支架、主动拨盘、槽轮和抗干扰机构组成。抗干扰机构作为隔离开关核心改造部分,其结构组成为曲柄、连杆、连

架杆、弹簧和法兰盘。隔离开关合闸过程中,绝缘支柱在动力电机的作用下带动法兰盘及支架转动,此时与支架连接的导电杆做着水平圆周动作,直到导电杆两端动触头与两端的静触点相触碰而停止转动。由于动力电机继续驱动绝缘支柱转动,此时抗干扰机构的弹簧在曲柄和连架杆的双重作用下被压缩一定量,而主动拨盘带动槽轮拨动导电杆拨杆翻转,最后使得导电杆产生翻转运动实现合闸动作。反之,则实现分闸动作。

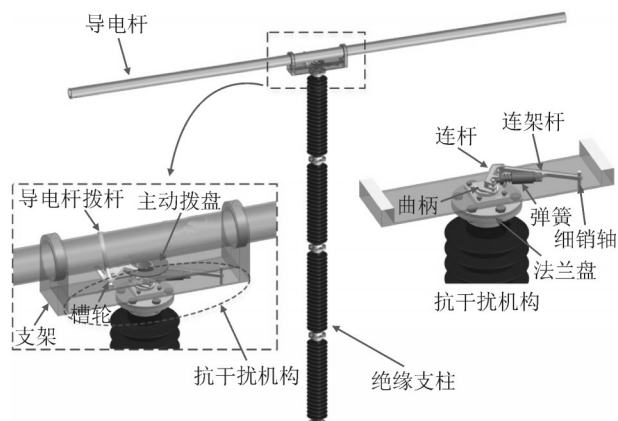


图1 新型隔离开关的三维模型

Fig. 1 3D model of the new type disconnector

1.2 风载荷的计算

为了保证高压隔离开关工作的可靠性与安全性,相关标准规定当风速在6级及以上时,高压隔离开关不得进行分合闸工作,因此文中选取6级风作为工作风载(6级风的风速通常为10.8~13.8 m/s,这里选取最大值13.8 m/s)对隔离开关的强度进行分析。当风场作用于高压隔离开关时,在导电杆上会产生载荷力,载荷力的合力最终形成阻碍导电杆转动的转矩,该阻转矩会影响到正常分合闸工作时的转动。当导电杆的方向与风场方向的夹角发生变化,该阻转矩也会发生变化。

为了获得该阻转矩的大小,利用Fluent软件建立高压隔离开关风场阻转矩的仿真,设置入口为速度边界条件(velocity-inlet),速度大小设为13.8 m/s,出口采用完全出流边界条件(outflow),计算流域顶部和两侧采用对称边界条件(symmetry),用来描述粘性流动中的自由滑移面,地面设为无滑移壁面条件(wall)。另外,为了获得比较精准的计算结果,还需要对模型表面附近的边界层网格进行加密,隔离开关风场阻转矩的仿真模型见图2。

根据仿真模型得到风场来流方向与导电杆夹角为0°~90°时的阻转矩大小,见表2。

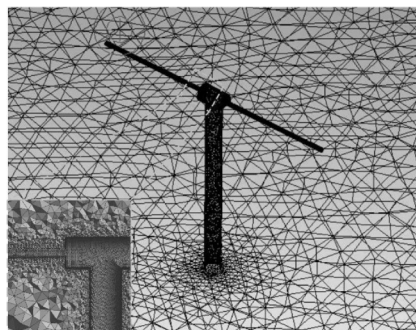


图2 风场仿真模型

Fig. 2 Wind field simulation model

表2 6级风产生的阻转矩

Table 2 Resistance torque generated by force 6 wind

风场方向与导电杆夹角/(°)	风场在导电杆上的阻转矩/(N·m)
0	0.371 6
10	12.188 0
20	25.052 0
30	43.122 0
40	40.726 0
50	34.662 0
60	27.856 0
70	14.343 0
80	7.931 5
90	2.457 4

1.3 模型的简化

由于上述三维模型中包含大量的倒角、圆角、螺栓连接件以及瓷裙等影响分析效率的零部件,所以拟对其进行简化之后再行模态分析。在Ansys有限元软件中将简化后的三维模型进行导入,然后对三维模型进行网格划分,划分后的网格单元数和节点数分别为70 995和188 389,网格大小为5 mm,简化后的有限元仿真模型见图3。

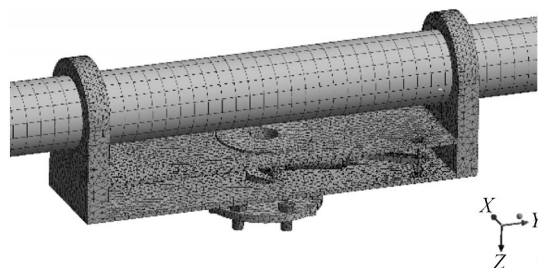


图3 新型隔离开关的三维简化模型

Fig. 3 3D simplified model of the new type disconnector

2 隔离开关力学特性

2.1 隔离开关的应变变化

将风荷载所产生的阻转矩施加在隔离开关上,隔离开关的变形云图见图4。图4(a)、(b)、(c)、(d)分别为新型隔离开关在合闸过程中,导电杆逆时针经过

0°、30°、60°、90°的模型应变云图,其中抗干扰隔离开关的最大变形总处在连架杆和支架的右端点连接处。由图1可以看出,抗干扰机构中的连架杆与支架是通过细销轴进行连接转动。当合闸瞬间,此时导电杆与施加的风载方向平行,导电杆处于静止未产生旋转角度(0°)。随着导电杆逆时针经过0°、30°、60°、90°进行合闸时,支架上细销轴的应变云图见图4(e)、(f)、(g)、(h)。由图4可知,由于导电杆的自

身惯性通过支架上的连架杆对抗干扰机构中的弹簧进行压缩,进而使细销轴发生应变。当导电杆依次转过0°(开始合闸)、30°、60°、90°(完成合闸)时,细销轴的变形量先增大后减小,呈现出抛物线的变化趋势。当导电杆转动与风载方向构成30°夹角时,细销轴的变形最大。因此为了保证隔离开关的安全运行,后期应对细销轴的结构尺寸进行适当加粗,同时尽量选择结构强度较大的材料。

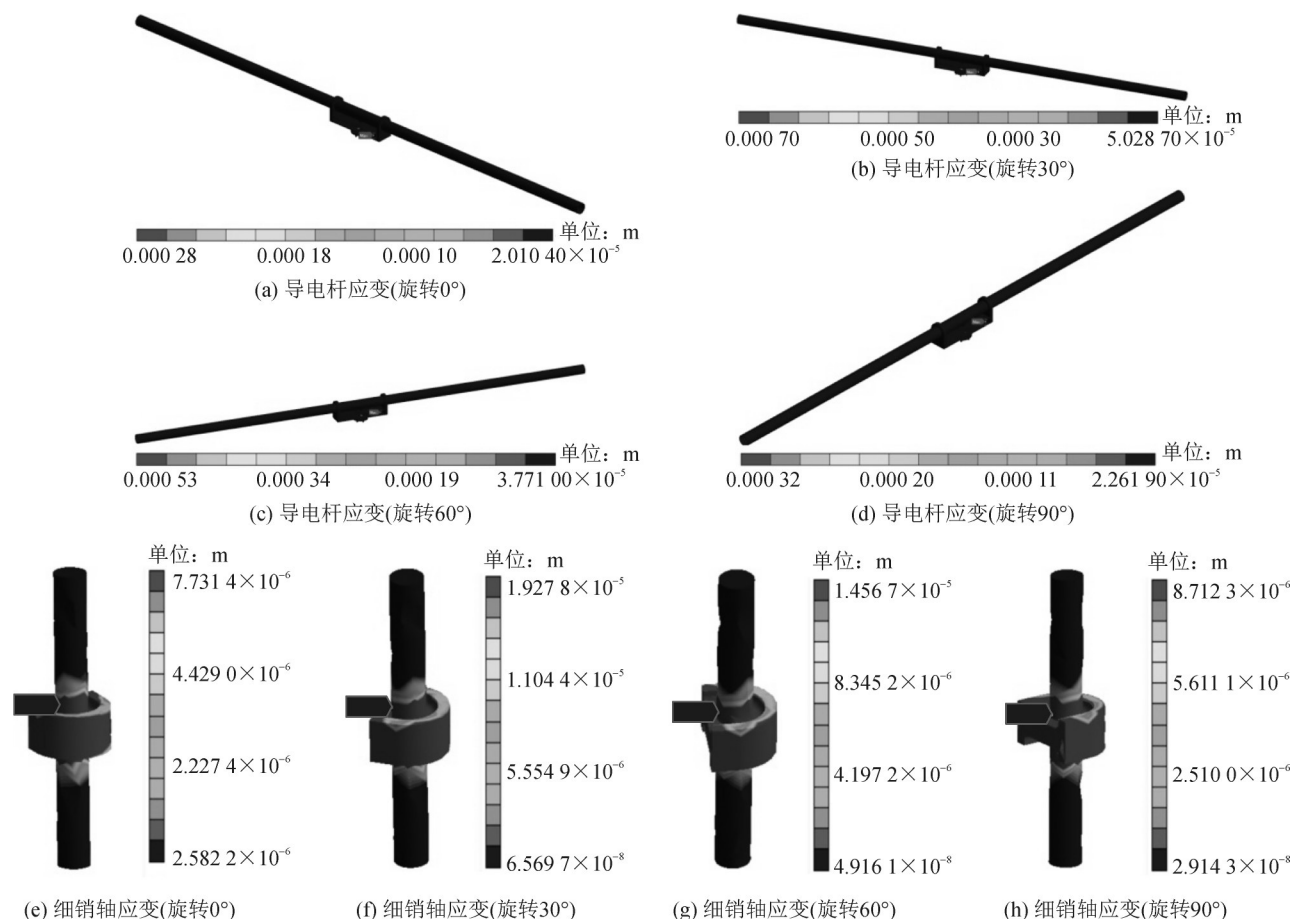


图4 隔离开关的应变云图

Fig. 4 Strain cloud diagram of the disconnector

2.2 隔离开关的应力变化

2.2.1 导电杆的应力变化

为了保证隔离开关具有良好的导电性,水平旋转导电杆的材料通常选用铝合金材质,因此有必要对风载作用下导电杆的强度进行分析。新型隔离开关在合闸过程中,导电杆逆时针经过0°、30°、60°、90°的应力云图见图5。图5(a)、(b)分别为在启动合闸瞬间,导电杆与风载方向夹角为0°时的等效应力分布和最大主应力分布。由图5可以看出,最大主应力位置处在导电杆与支架左端接触位置,其中最大主应力为0.3 MPa小于等效应力0.5 MPa,可以保证稳定启动旋转。图5(c)、(d)分别为导电杆与风载

方向夹角为30°时的等效应力分布和最大主应力分布,等效应力1.2 MPa大于最大主应力0.8 MPa。当导电杆方向与风载方向分别构成60°和90°夹角时,其中导电杆最大主应力位置同样在导电杆与支架左端接触位置,并且最大主应力小于等效应力。

2.2.2 支架的应力变化

隔离开关的支架作为一种金属支承件,除了在绝缘支柱旋转过程中带动导电杆进行开合闸动作,同时也可以对导电杆及其他零部件起到定位作用以保证隔离开关的稳定运行。新型隔离开关在经过合闸动作,支架旋转0°、30°、60°、90°的应力云图见图6。由6(a)、(b)可以看出,当旋转动作启动瞬间

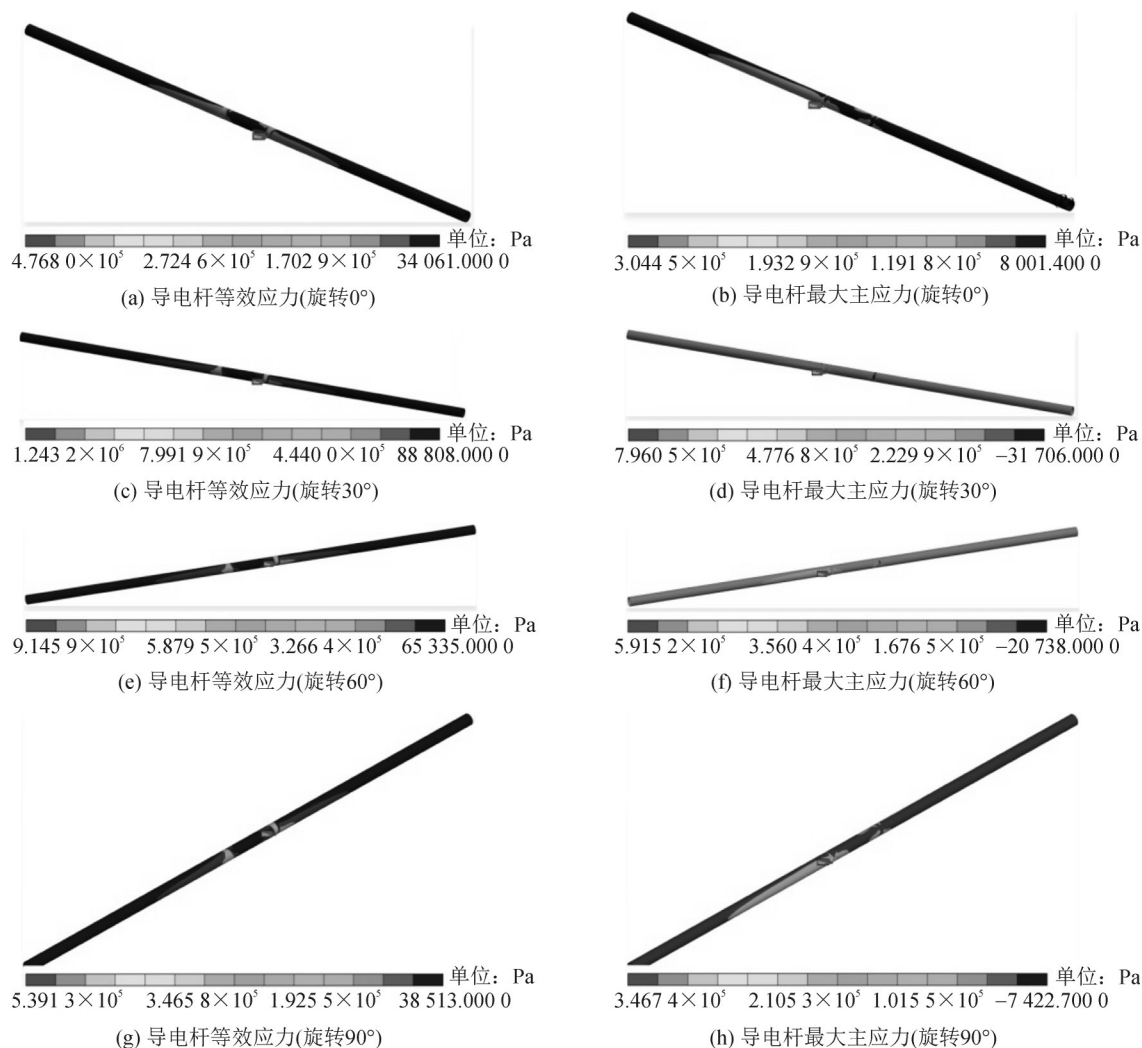


图5 导电杆的应力云图

Fig. 5 Stress cloud diagram of conductive rod

(支架0°位置),由于隔离开关上部旋转部分由静变动。在惯性的作用下,支架与连架杆连接处的销轴孔的位置出现应力集中的现象,并且等效应力和最大主应力属于同一位置,其中等效应力和最大应力分别为14.3 MPa和16.2 MPa。当支架依次在30°、60°、90°的位置时,等效应力和最大主应力仍处在支架与连架杆连接处的销轴孔位置,并且此处的最大主应力均接近等效应力,说明此处极易受到破坏。

2.2.3 连杆机构的应力变化

连杆机构作为新型抗干扰隔离开关的关键机构,可以有效防范隔离开关遭遇外界影响而造成翻转机构的提前动作,因此有必要对连杆机构的强度进行分析。当隔离开关分别从0°、30°、60°、90°逆时针转动时的抗干扰连杆机构应力云图见图7。从图7可以看出,当隔离开关完成0°到90°的旋转动作过程中,在60°位置处,连杆机构的等效应力和最大主应力最大,分别为87.3 MPa和95.1 MPa。其次在

0°和90°位置处,等效应力和最大主应力大小相近,而在30°处,其等效应力和最大主应力最小,分别为11.6 MPa和12.6 MPa。同时也可以看出,抗干扰连杆机构的等效应力出现在连架杆与弹簧套筒连接处附近,最大主应力均集中在连架杆与细销轴连接处的位置。结合图4和图6可知,该位置恰好也与隔离开关的最大应变和支架的最大主应力位置相临近,因此在对抗干扰高压隔离的结构优化时,应重点考虑该位置的结构强度予以保证整个高压隔离开关的工作安全性与运行稳定性。

2.2.4 法兰盘的应力变化

绝缘支柱通过与隔离开关支架的上法兰盘进行连接,带动支架旋转部分进行水平旋转促使导电杆完成开合闸动作,因此有必要对法兰盘的强度进行分析,见图8。图8(a)~(h)分别为新型隔离开关在合闸过程中,上法兰盘逆时针旋转0°、30°、60°、90°的模型应力变化云图。由图8可以看出,上法兰盘



图6 支架的应力云图

Fig. 6 Stress cloud diagram of the support

与抗干扰机构中的曲柄部件连接处存在有应力集中现象。当在导电杆旋转至30°位置处,该连接处的

等效应力和最大主应力值最大,分别为3.57 MPa和2.12 MPa。

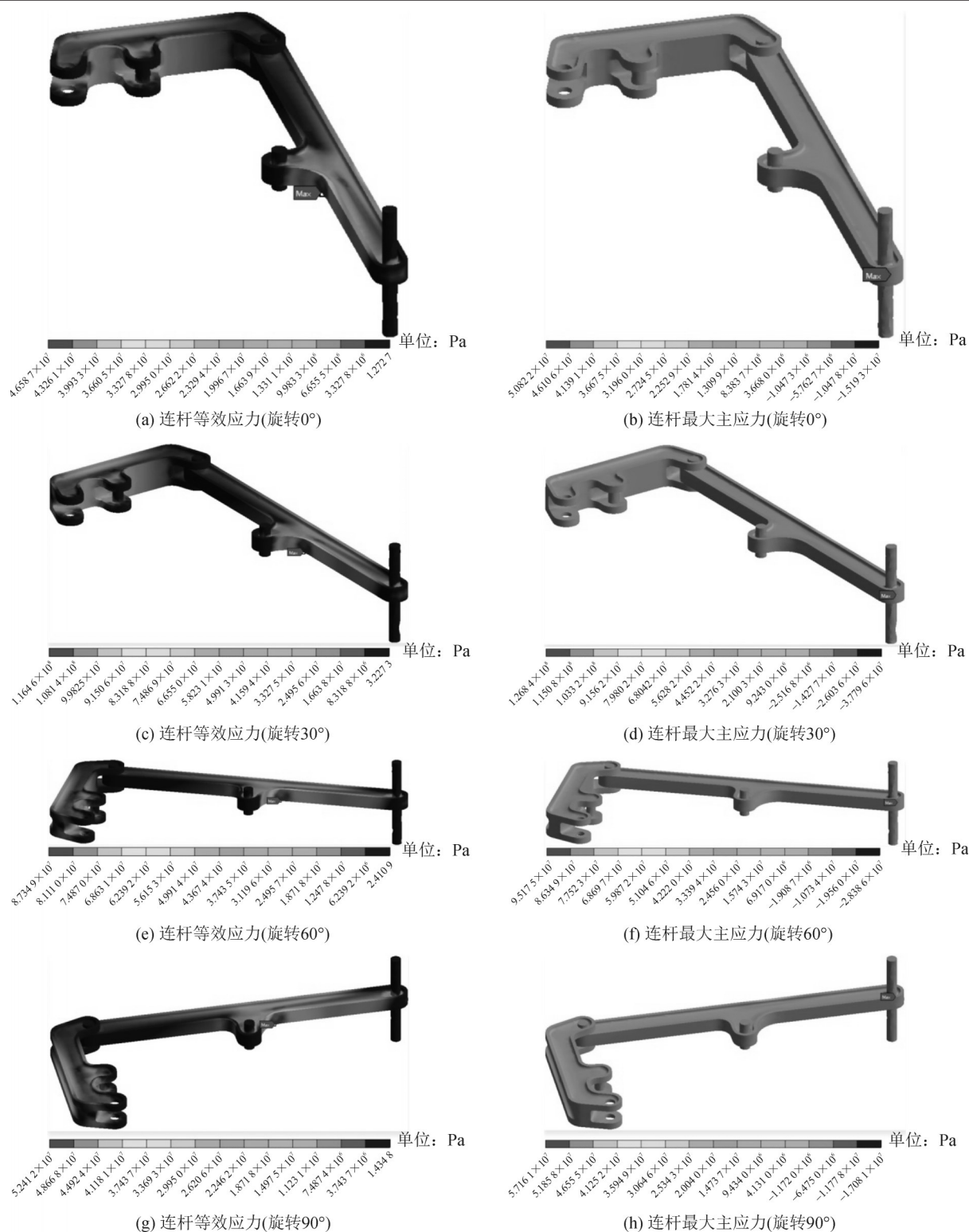


图7 连杆结构的应力云图

Fig. 7 Stress cloud diagram of connecting rod structure

3 试验研究

为了验证设计研发的抗干扰隔离开关在工作过程中分合闸的稳定性和可靠性,需要制作隔离开关的试验样机进行相关型式试验,对高压隔离开关

样机进行的寿命试验见图9。

从上述仿真分析可知,隔离开关工作过程中,由于支架同时与导电杆和绝缘支柱固定连接着,起着“承上启下”的角色,往往受到很大的冲击,因此对支架有必要对支架应力变化情况进行寿命试

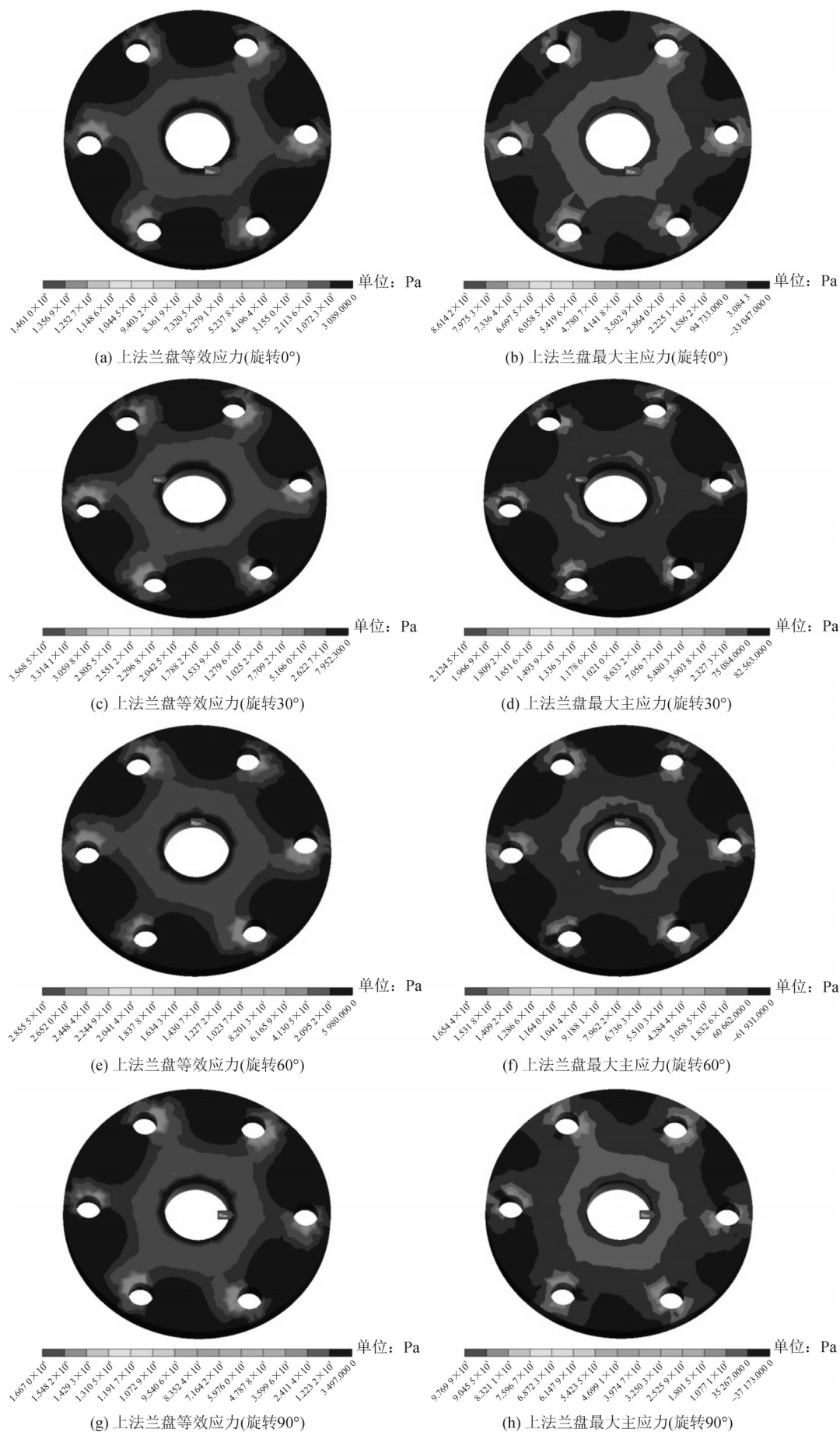


图8 上法兰盘的应力云图

Fig. 8 Stress cloud diagram of connecting rod structure



图9 隔离开关寿命试验

Fig. 9 Life test of disconnector

验。寿命试验以额定动力源进行10 000次的操作循环组成,在主回路没有电压和电流的情况下试验。在每次操作循环中,都应达到合闸和分闸位置,在试验前过程中不允许对机械结构进行润滑以及其他调整维护。根据支架的仿真结果确定支架的最大应力集中测试位置,隔离开关在经过合闸动作,支架旋转0°、30°、60°和90°的试验和仿真的应力值对比见表3。

表3 支架旋转0°、30°、60°、90°的应力值

Table 3 Stress values of the support rotating 0°, 30°, 60° and 90°

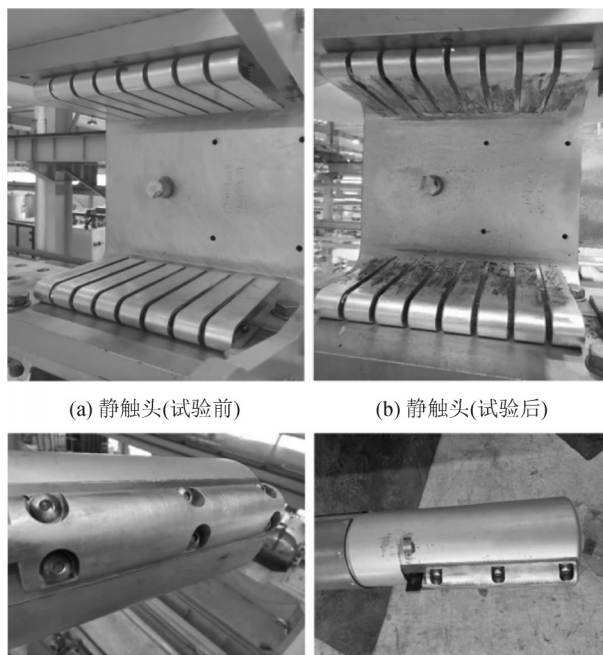
角度/(°)	仿真值/MPa	试验值/MPa	相对误差/%
0	16.19	17.32	0.07
30	40.63	42.34	0.04
60	30.45	32.89	0.08
90	18.23	19.32	0.06

由表3可知,隔离开关支架最大应力的仿真值和试验值基本接近。随着支架从0°旋转到90°时应力变化趋势一致。仿真数据和实验数据之间的相对误差小于10%,说明仿真结果基本正确。

高压隔离开关进行10 000次循环试验后,隔离开关的所有零部件均未发生变形和严重磨损,其中动静触头试验前后的对比照片见图10。由图10可知,经过寿命试验后,静触头和动触头的表面磨损轻微,说明所设计的抗干扰隔离开关顺利通过了机械寿命试验。

4 结论

文中首先在Fluent软件中对新型抗干扰隔离开关在6级风下的流场模型,然后计算得到了风场来流方向与导电杆夹角为0°~90°时的阻转矩大小,最



(a) 静触头(试验前)

(b) 静触头(试验后)

(c) 动触头(试验前)

(d) 动触头(试验后)

图10 寿命试验前后静动触头磨损情况

Fig. 10 Wear of static and moving contacts before and after life test

后通过在Ansys软件中对隔离开关合闸的旋转动作进行了仿真计算,得到隔离开关的应力应变分布。结果表明:

1)隔离开关的细销轴的变形量先增大后减小,呈现出抛物线的变化趋势。当导电杆转动与风载方向构成30°夹角时,细销轴的变形最大。因此为了保证隔离开关的安全运行,后期应对细销轴的结构尺寸进行适当加粗,同时尽量选择结构强度较大的材料。

2)在30°位置时,导电杆和支架应力最大,其中支架的销轴孔的位置处最大主应力与等效应力相近。连杆机构在60°位置处,等效应力和最大主应力最大。并且最大主应力集中在支架的销轴孔位置,因此该位置属于隔离开关的薄弱环节,应重点对该位置的结构强度进行校核以及选取强度较大的材料以保证隔离开关的安全工作。

3)在隔离开关在水平旋转合闸过程中,除了连杆机构外,大部分结构件在风场来流方向与导电杆夹角为30°时的应力变化最大。在后期对抗干扰隔离开关的可靠性进行优化设计时,应考虑此方面的加固处理。

参考文献:

- [1] 张天,龚雁峰. 特高压交直流电网输电技术及运行特性综述[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 87-92.

- ZHANG Tian, GONG Yanfeng. Research on transmission technologies and operational performance of UHV AC/DC power grid in China[J]. Smart Power, 2018, 46(2): 87-92.
- [2] 孙龙勇, 姚灿江, 李付永, 等. 水平回转式隔离开关风致振动研究分析[J]. 高压电器, 2022, 58(2): 73-81.
- SUN Longyong, YAO Canjiang, LI Fuyong, et al. Research and analysis on wind induced vibration of horizontal rotary disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 73-81.
- [3] 毛文奇, 王舶仲, 蒋毅舟, 等. 高压隔离开关分合闸位置监测技术的研究综述及展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 112-119.
- MAO Wenqi, WANG Bozhong, JIANG Yizhou, et al. Summary and prospect of breaking - closing position monitoring method for high voltage disconnecter[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 112-119.
- [4] 杨茹茵, 宋宗涛, 庞东旭, 等. 某高压开关曲杆销轴应力试验及影响分析[J]. 机械设计, 2021, 38(8): 110-113.
- YANG Ruyin, SONG Zongtao, PANG Dongxu, et al. Stress test on the high-voltage switch's crank pin shaft and the analysis on its influence[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(8): 110-113.
- [5] 盛明学, 王志清. 户外高压隔离开关常见故障的原因分析与处理[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 93-96.
- SHENG Mingxue, WANG Zhiqing. Cause analysis and treatment of common faults of outdoor high - voltage disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 93-96.
- [6] 庞小峰, 马金伟, 王流火, 等. 强风下高压隔离开关风荷载及其力学特性研究[J]. 高压电器, 2022, 58(6): 205-211.
- PANG Xiaofeng, MA Jinwei, WANG Lihuo, et al. Study on wind load and mechanical properties of high voltage disconnecter under strong wind[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 205-211.
- [7] 李娜, 马飞越, 牛勃, 等. 750 kV 敞开式接地开关异常合闸故障分析[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2020, 57(6): 1131-1136.
- LI Na, MA Feiyue, NIU Bo, et al. Analysis of abnormal closing fault of 750 kV AIS earthing switch[J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 2020, 57(6): 1131-1136.
- [8] 孙涛, 肖汉宁. 棒形支柱瓷绝缘子弯曲应力的有限元仿真分析[J]. 电瓷避雷器, 2007(2): 19-21.
- SUN Tao, XIAO Hanning. Simulation analysis of bending stress of solid core post insulator by finite element method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2007(2): 19-21.
- [9] 陈维杰, 陈国明, 朱本瑞, 等. 强台风下导管架平台风载荷数值仿真分析[J]. 中国海上油气, 2013, 25(3): 73-77.
- CHEN Weijie, CHEN Guoming, ZHU Benrui, et al. Numerical simulation of wind load on jacket platform under strong typhoon[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(3): 73-77.
- [10] 刘学军, 冯涛. 隔离开关中支柱绝缘子的风载荷计算[J]. 高压电器, 2015, 51(5): 83-88.
- LIU Xuejun, FENG Tao. Wind load calculation of post insulator in disconnecting switch[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 83-88.
- [11] CAO Gui, CAO Baojiang. Research on the wind-resistant structure of composite insulators for overhead contact system cantilever used based on fluid-structure interaction method[C]//2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Chengdu, China: IEEE, 2016: 1-4.
- [12] 莫冰, 王宇驰, 司小伟. 风力作用下 800 kV 高压交流隔离开关导电闸刀在合闸过程中动触头偏移的研究[J]. 现代制造技术与装备, 2016, 239(10): 96-98.
- MO Bing, WANG Yuchi, SI Xiaowei. Research on the offset of the 800 kV double column horizontal telescopic AC disconnecter conductive system under wind[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2016, 239(10): 96-98.
- [13] 袁攀科, 禹龙飞, 龚晓雅, 等. 基于直流隔离开关动端系统风载荷仿真分析[J]. 电工电气(江苏电器), 2020(7): 29-33.
- YUAN Panke, YU Longfei, GONG Xiaoya, et al. Wind load simulation analysis of actuating end system based on DC disconnecter[J]. Electrotechnics Electric (Jiangsu Electrical Apparatus), 2020(7): 29-33.
- [14] 刘勇, 魏珍中, 蒋昱楠, 等. 隔离开关与支架体系风振实测与响应分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2023, 53(1): 83-91.
- LIU Yong, WEI Zhenzhong, JIANG Yunan, et al. Wind vibration measurement and response analysis of isolation switch and support system[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2023, 53(1): 83-91.
- [15] 王世山, 晏坚军, 牛赞, 等. 160 kN 棒形悬式瓷绝缘子应力分析[J]. 电瓷避雷器, 2002(3): 3-7.
- WANG Shishan, YAN Jianjun, NIU Yun, et al. Stress analysis on 160 kN porcelain rod insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2002(3): 3-7.
- [16] 蔡洙郁, 荆洪阳, 樊利国. 110 kV 棒形悬式瓷绝缘子结构应力分析[J]. 绝缘材料, 2005, 38(4): 32-35.
- CAI Zhuyu, JING Hongyang, FAN Ligu. The analysis of structural stress about rod porcelain insulator of 110 kV[J]. Insulating Materials, 2005, 38(4): 32-35.
- [17] 邹学东, 张丽萍, 李琦, 等. 基于有限元法的支柱绝缘子应力分析[J]. 陕西电力, 2017, 45(9): 68-73.
- ZOU Xuedong, ZHANG Liping, LI Qi, et al. Stress analysis of post insulators based on finite element method[J].

- Shaanxi Electric Power, 2017, 45(9):68-73.
- [18] 邱志斌, 姚文军, 李慧慧, 等. 高压隔离开关支柱瓷绝缘子机械特性研究[J]. 绝缘材料, 2013, 46(5):37-42.
- QIU Zhibin, YAO Wenjun, LI Huihui, et al. Research on mechanical characteristics of high voltage isolating switch post porcelain insulator[J]. Insulating Materials, 2013, 46(5):37-42.
- [19] 孟 婧, 陈 炯, 毕祥宜. 盘形悬式瓷绝缘子在多刚体模型下的风偏应力分析[J]. 电瓷避雷器, 2021, 299(1): 210-216.
- MENG Jing, CHEN Jiong, BI Xiangyi. Analysis on windage yaw stress of porcelain cap and pin insulator on multi-rigid model[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021, 299(1): 210-216.
- [20] 吴光亚, 王昭武, 张 锐, 等. 1 000 kV 交流特高压支柱瓷绝缘子制造技术[J]. 电瓷避雷器, 2010(1):1-5.
- WU Guangya, WANG Zhaowu, ZHANG Rui, et al. The manufacturing technology of post porcelain insulator for 1 000 kV AC UHV[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(1):1-5.
- [21] 李付永, 姚灿江, 孙龙勇, 等. 基于 Fluent 的 GW16 型隔离开关支柱绝缘子气流仿真分析[J]. 电工技术, 2018(17): 12-15.
- LI Fuyong, YAO Canjiang, SUN Longyong, et al. Simulation analysis of GW16 isolator insulator based on Fluent[J]. Electric Engineering, 2018(17):12-15.
- [22] 刘占民, 毕伟伟, 陈希三, 等. 支柱瓷绝缘子金属附件的结构优化设计[J]. 电瓷避雷器, 2020(4):228-232.
- LIU Zhanmin, BI Weiwei, CHEN Xisan, et al. Structural optimum design for the metal fittings of porcelain post insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(4): 228-232.
- [23] 孙玉洲, 李付永, 郭海涛, 等. 800 kV 交流隔离开关的机构运动分析及平衡弹簧优化设计[J]. 机械强度, 2021, 43(1):191-197.
- SUN Yuzhou, LI Fuyong, GUO Haitao, et al. Mechanism kinematic analysis and balance spring optimization design of 800 kV AC disconnecter[J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(1):191-197.
- [24] 李宏楼, 付亚旭, 郭海涛, 等. 800 kV 高压交流隔离开关研究开发[J]. 高压电器, 2021, 57(9):138-145.
- LI Honglou, FU Yaxu, GUO Haitao, et al. Research and development on 800 kV high-voltage AC disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9):138-145.
- [25] 李宇鹏, 郭海涛, 李付永, 等. 新型 126 kV 隔离开关设计及抗震性能研究[J]. 高压电器, 2022, 58(10):57-66.
- LI Yupeng, GUO Haitao, LI Fuyong, et al. Research on design and seismic performance of new 126 kV disconnecter [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10):57-66.
- 王巧红(1983—), 女, 高级工程师, 硕士, 研究方向为高压电器设计(E-mail:286364100@qq.com)。
- 温庆国(1981—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为机电设备设计与检测(通信作者)(E-mail:627127006@qq.com)。