DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.11.005

12 kV/3 150 A干燥空气绝缘充气柜散热技术研究

李 猛，于 盟，李俊豪，翟贺鹏，牛英凯
（许继电气股份有限公司，河南 许昌 461000）

摘要：干燥空气绝缘充气柜是将所有高压带电元件密封于气箱内，全密封的结构型式导致其与外界热交换效率极低。将干燥空气作为绝缘介质，其散热性能较差，文中开展了温升控制和散热技术研究，通过对内部结构优化，降低了整柜电阻。设计了一种新型热管散热器，提升了气箱内部与外界环境的热交换速率，解决了大容量充气柜温升超标问题，提升了设备运行的可靠性。

关键词：接触电阻；热交换；层流内层；热管散热器；温升试验

Research on Heat Dissipation Technology of 12 kV/3 150 A Dry Air Insulated Switchgear Cabinet

LI Meng, YU Meng, LI Junhao, ZHAI Hepeng, NIU Yingkai
(XJ Electric Co., Ltd., Henan Xuchang 461000, China)

Abstract: The dry air insulated switchgear cabinet is to encapsulate all HV live components into the air compartment, and the full encapsulation structure form leads to extremely low heat exchange efficiency with outside. The nitrogen or dry air, as the insulating medium, have very weak heat dissipation performance. In this paper, the temperature rise control and heat dissipation technology for the environmentally friendly air filling switchgear cabinet is studied. The resistance of the whole switchgear cabinet is reduced through internal structure optimization. A new type of heat pipe sink is designed to improve effectively the heat exchange efficiency between the inside and outside environment of the air compartment. The problem of temperature rise exceeding standard of the high power environmentally friendly air filling switchgear cabinet is solved and operation reliability of the equipment is improved.

Key words: contact resistance; heat exchange; inlayer of laminar flow; heat pipe sink; temperature rise test

0 引言

对流换热是充气柜内一种重要的传热方式，并且随着电流等级的提升，对流换热对其温度场的形成机制与特性的影响愈发重要。对干燥空气绝缘充气柜[1-3]而言，温升是影响其工作性能的关键因素，当温度高到一定程度后，设备内部的某些环氧绝缘件可能会玻璃化，从而降低其绝缘性能与可靠性。由于充气柜需在不同环境下进行工作，为保证设备运行的可靠性，正确预测内部元件温升有很重要的现实意义。

文中以某3 150 A干燥空气绝缘充气柜作为研究对象，对其开展温升控制和散热技术[4-6]进行研究，为解决大电流充气柜温升问题提供理论支撑。

1 充气柜发热机理及控制措施研究

1.1 充气柜温升限值

干燥空气绝缘充气柜应按照GB/T 11022—2020《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》和GB/T 3906—2020《3.6~40.5 kV交流金属封闭开关设备和控制设备》的要求，依据标准规定的试验条件对其进行温升测试，所有监控点的温升不超过温升限值，见表1。

收稿日期：2026-05-28； 修回日期：2026-08-11

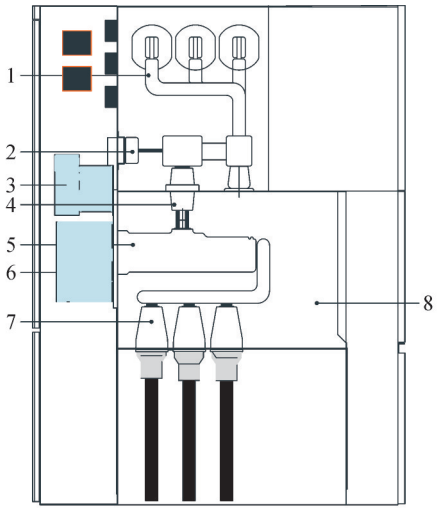
表1　充气柜内部导体的温度及温升限值

Table 1　Temperature and temperature rise limit of the conductors inside the gas-filled switchgear

连接类型	绝缘介质	温度(最大值)/℃	周围空气温度不超过40 ℃时允许的温升/K
触头(镀银)	氧化性气体	115	75
	非氧化性气体	115	75
	油	90	50
用螺栓的或与等效的连接(镀银)	氧化性气体	115	75
	非氧化性气体	115	75
	油	100	60

1.2　热源分析

充气柜是将导体、三工位开关、固封极柱等元器件密封于气箱内，其密封结构型式是温升超标的主要原因之一，本设计采用三工位、断路器横置方案，见图1。



1—主母线；2—三工位开关；3—三工位机构；4—穿墙套管；5—固封极柱；6—断路器机构；7—3号内锥；8—气箱。

图1　干燥空气绝缘充气柜结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the structure of the dry air insulated gas-filled cabinet

其热源[7-8]主要集中于三工位开关和固封极柱：三工位开关通常采用直动式滑动连接方案，受制于安装方式和工艺的影响，此处接触电阻较大，是造成局部发热严重的关键所在。因此，在安装时去除三工位开关接触部位氧化层，保证动静触头的同轴度，是降低发热功率的直接办法。

固封极柱是将真空灭弧室、导电夹、软连接等元件固封于环氧腔体内，而真空灭弧室依靠储能簧压力接触的结构型式导致此处电阻较大，又将此薄弱部位密封于环氧腔体内，极柱动静端温升非常容易超标。且中间B相处于A、C相之间，通常要比A、C两相温升高5~7 K。

1.3　充气柜产热机制及控制措施

干燥空气绝缘充气柜长期工作时，其柜内发热量会与散热量达到某一平衡状态，一小时温升不超过1 K，此时认为设备的总散热功率等于总发热功率 P_f [9-10]

$$P_f = P_j + W_c + W_h + W_d \tag{1}$$

式(1)中：P_j 为导体产生的焦耳热量；W_c、W_h 为磁性材料产生的涡流损耗、磁滞损耗；W_d 为绝缘材料产生的介质损耗。因此式(1)可以简化为

$$P_f = K_f \times P_j \tag{2}$$

式(2)中，K_f 为主回路导体的集肤效应指数。

1.3.1　焦耳发热

当额定电流通过柜内主回路导体时就会产生焦耳热量

$$P_j = K_f \times I^2 \times R \tag{3}$$

式(3)中，总电阻 R 由导体自身电阻和连接部位接触电阻组成，导体自身电阻由导体的长度、电导率与截面积决定，而接触电阻与安装工艺、方式有关，其经验公式为

$$R_j = \frac{K}{(0.102F)^m} \tag{4}$$

式(4)中：K为不同接触材料的接触系数；m不同接触型式系数。由于影响接触电阻的因素繁杂，不同研究者在不同的试验室条件下得到数据差异较大，见表2。

表2　不同零部件接触K、m的取值

Table 2　Values of K and m in contact with different components

接触材料	K	接触形式	m
铜镀银—铜镀银	80	点接触	0.5
铜—铜(包括铜镀锡)	120~160	线接触	0.7
铜—铝	980	面接触	1.0

式(3)中，K_f 为临近效应系数与集肤效应系数的乘积，临近效应是指当交流电流过并联导体时，磁通作用使并联导体的电流分布朝向外侧，因此并联导体离得越近，临近效应系数也就越大，焦耳损耗越高。交流电的磁通作用同样会导致导体内部电流分布不均，截面积越大电流不均匀性越高，因此集肤系数也会随之增高，相应的焦耳损耗也会增高。文中研制的干燥空气绝缘充气柜结构紧凑，为保证气箱主回路有高载流能力和良好的绝缘性能，内部导体通常设计为圆形结构[11]，考虑到集肤深度，将实心导体更改空心，极大降低了导体的成本和质量，且降低了集肤效应对充气柜的热效应。集肤深

度计算为

$$D_i = k \times 66.1/\sqrt{f} \tag{5}$$

式(5)中：f为交流电流的频率；k为常数。

$$k = \left[\left(\frac{1}{u_r}\right) \times \left(\frac{\rho}{\rho_c}\right)\right]^{1/2} \tag{6}$$

式(6)中：u_r为导体材料的相对磁导率(铜和其他非磁材料为1)；ρ为导体的电阻率；ρ_c为铜材的电阻率(20 ℃时，$\rho_c = 0.017\ 5\ \mu\Omega \cdot m$)。对铜而言，$k$=1。

1.3.2 控制电阻损耗

任何用眼看起来加工非常平整的接触表面实际上是凸凹不平的。当两个导体接触时，只有少量的凸点才真正的接触，导电时也只有这几点产生导电作用，实际接触面积为理论接触面积的10%~30%，有时甚至10%都不到，见图2。

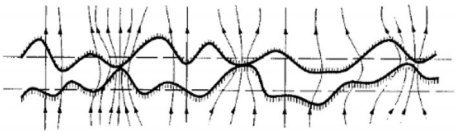


图2 接触形貌

Fig. 2 Contact morphology

降低主回路电阻可从根源上降低整柜温升，文中总结降低电阻措施如下。

降低导体本身电阻措施：如用无氧铜TU替代紫铜T2；通过结构优化设计降低导体的长度；增加温升容易超标部位(灭弧室动端、三工位开关等)的横截面积；母线或出线铜排采用双排并联。

减少接触电阻措施：对接触表面进行打麻点、直纹或者切缝处理，见图3；增大接触面积或连接紧固力矩；导体安装之前用化学试剂或细砂纸去除氧化层；导体安装完成后消除连接应力。

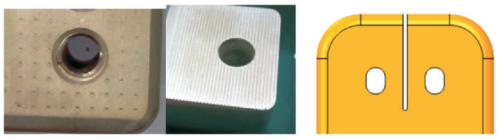


图3 导体处理工艺

Fig. 3 Conductor processing technology

经验证，本设计通过以上降电阻措施可以将主回路电阻降低10%~15%之间，从而有效的降低整柜发热功率。

1.3.3 减少铁磁发热

由法拉第定律可知，处于交变磁场的闭合回路会产生电流。文中为了减少铁磁发热、降低整柜温升，将有电流穿过的闭合结构更换为不锈钢板或薄铝板，或在不影响强度的前提下对闭合结构进行开路设计，均可有效抑制由铁磁涡流产生的发热。

1.3.4 降低介质损耗

本设计为干燥空气绝缘充气柜，仅有绝缘子和穿壁套管等固体绝缘材料，环氧材料用量较少，因此其电容C及介质损失tgδ值均比较小，对于整柜来说，其发热量可以忽略不计。

2 充气柜散热机理及散热影响因素分析

2.1 充气柜散热机理

充气柜散热过程包括柜内零部件之间的热传导、热对流和热辐射及相互耦合作用[12-13]。热传导主要发生于主回路连接导体间，对流换热主要发生于固体壁面与周围流体之间，流体与气箱壁之间；热辐射是高温物体会自发向低温物体辐射电磁波，电磁波会全部或部分地转变为热能被低温物体吸收。而充气柜所处的热环境是多个物理场相互耦合的结果，见图4。从能量传输的耦合特性来讲，充气柜运行的热场环境形成主要包含：气箱内部热环境与外部热环境之间第1层耦合；气箱内部各个零部件之间的导热、辐射和自然对流这3种传热方式之间的第2层耦合；气箱内部热源和绝缘介质之间热交换的第3层耦合关系。

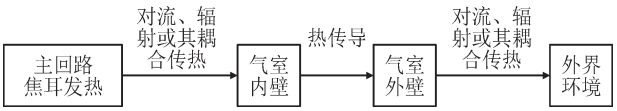


图4 充气柜传热过程

Fig. 4 Heat transfer process of the gas-filled cabinet

2.2 散热影响因素分析

2.2.1 结构因素

干燥空气绝缘充气柜的密封设计基本阻隔了气箱内部元件与外部环境之间的热交换，见图5，热量在传递过程中在气箱内壁和外壁分别形成了“层流内层”，温度在经过“层流内层”时会有明显的衰减，层层递减，导致其散热效率明显降低，相较于传统开关柜，干燥空气绝缘充气柜温升的考核更为严酷。

2.2.2 气体因素

绝缘介质[14]对充气柜导热性能有直接影响，相较于干燥空气和N_2，SF_6的摩尔质量、密度、绝缘强度高，单位分子携带的热量也大，且粘度小，见表3。

在气压、温度相同的情况下对流换热系数和击穿场强均高于干燥空气。因此在结构布局一致的充气柜中，干燥空气和N_2的散热和绝缘性能均逊于SF_6，从而导致干燥空气绝缘充气柜容量的提升难度较大。文中深入研究了大容量充气柜产热和散热

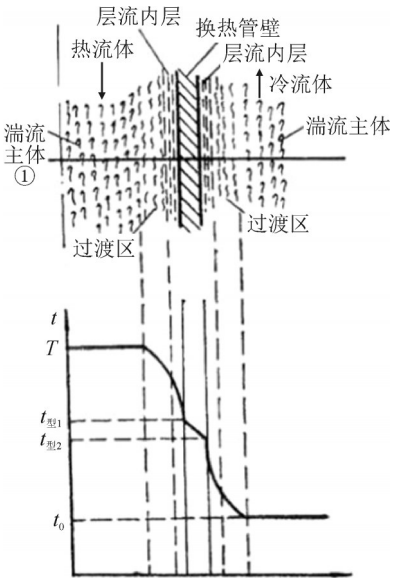


图5　换热壁两侧流体流动状况及温度分布

Fig. 5　The fluid flow conditions and temperature distribution on both sides of the heat exchange wall

表3　SF_6、干燥空气及N_2的主要特性对比

Table 3　Comparison of the main characteristics of SF_6, dry air and N_2

参数	SF_6	干燥空气	N_2
分子直径/Å	6.00	3.64~3.75	3.75
相对摩尔质量/(g·mol^{-1})	146	29	28
密度(气态，20 ℃，0.1 MPa)/(kg·m^{-3})	6.070	1.190	1.165
定压比热容/[kJ·(kg·K)$^{-1}$]	0.657	1.013	1.038
粘度系数/(Pa·s)	15.6×10^{-6}	18.3×10^{-6}	17.8×10^{-6}
热导率/[W·(m·K)$^{-1}$]	0.015 5	0.025 5	0.023 8
相对介电常数(气态，20 ℃，0.1 MPa)	1.002 0	1.000 5	1.000 5
临界场强/[kV·(mm·MPa)$^{-1}$]	88.4	33.0	30.0
相对于SF_6的绝缘强度	1.00	0.36~0.41	0.33~0.45

机理，提出了散热设计方法，并结合试验研究解决温升难题，确保设备长期运行的安全性。

2.2.3　散热面积小

为满足当前电力系统对充气柜经济小型化的要求，其外形尺寸必须严格控制，本设计与原有SF_6充气柜外形尺寸一致，整体散热面积并未增大，且散热面积是同规格开关柜的82%，见表4。由于散热器对电场的影响，会降低其使用频率，这些因素都会导致温升难以控制在国标要求范围内。

表4　外形尺寸

Table 4　Dimensions

开关设备类型	宽×高×深/mm^3	表面积/mm^2
开关柜	1 000×2 400×1 800	17.04
充气柜	800×2 400×1 600	14.00
干燥空气绝缘充气柜	800×2 400×1 600	14.00

3　充气柜温升测试与散热设计

为了缩短项目周期，减少试验次数，文中快速对首版样机进行了温升摸底测试，获取试验数据，找出薄弱环节，对其进行散热设计。

3.1　首轮样机温升测试

按照国标要求进行首轮温升测试[15]，试验要求在相对封闭的空间或房间内进行，空气流动速度不高于0.5 m/s，室温在20 ℃左右，在预埋完温升测试点后对充气柜进行密封，在零表压下通流为1.1倍额定电流3 465 A，测试结果见图6。

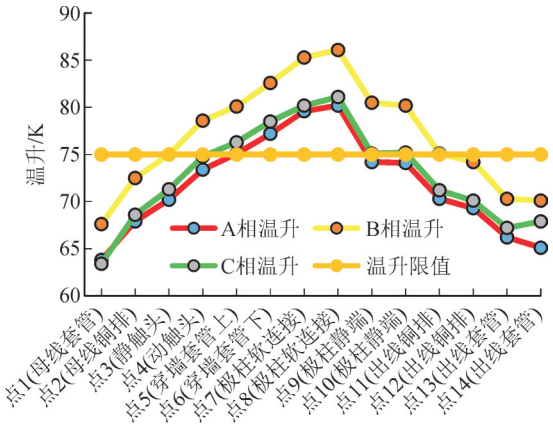


图6　主回路温升分布

Fig. 6　Temperature rise distribution of the main circuit

由测试结果可知，柜内B相主回路温升最高，平均温升比C相高4.5 K，比A相高5.5 K。按照现有新国标规定，B相三工位隔离开关动触头超标3.6 K，穿墙套管超标6.5 K，极柱软连接部位超标11.1 K，灭弧室静端超标5.5 K。

3.2　散热设计

3.2.1　降低发热功率

通过对充气柜“温升”和“散热”机理的研究，降低主回路电阻是控制该充气柜温升最直接办法，首版样机测量的回路电阻值见表5。

文中采用上述回路电阻控制措施对整柜结构和安装工艺进行了优化，优化后电阻见表6。

由表6可知，整柜优化后平均每相电阻由30 μΩ下降至26 μΩ，相当于每相发热功率降低了13.3%。

表5 优化前主回路电阻

Table 5 Main circuit resistance before optimization

电阻	A相/μΩ	B相/μΩ	C相/μΩ
主回路电阻	21.2	22.6	24.3
接触电阻	7.2	7.4	7.3
总电阻	28.4	30.0	31.6

表6 优化后主回路电阻

Table 6 Main circuit resistance after optimization

电阻	A相/μΩ	B相/μΩ	C相/μΩ
主回路电阻	19.0	20.4	22.4
接触电阻	5.2	5.6	5.4
总电阻	24.2	26.0	27.8

3.2.2 提升辐射系数

受制于充气柜密封结构流动性差的影响，辐射散热[16]占比较高，因此本设计将所有导体表面、气箱和密封铝板进行喷涂处理，将整柜平均辐射系数由0.35提升至0.9~0.96，辐射散热效率提升60%以上。

3.2.3 母线室散热设计

由测试结果可知，母线气室热源主要集中于三工位开关，为解决此处温升问题，采用以下方法对其散热优化[17]设计：缩短导体以降低电阻；合理布局元器件使气箱内部气体流动顺畅；在不影响载流的前提下，对触头设计散热齿和散热孔以增加散热面积和对流换热效率；气箱顶部增加散热器提高内外热交换效率，减少“层流内层”对换热效率的影响，见图7。

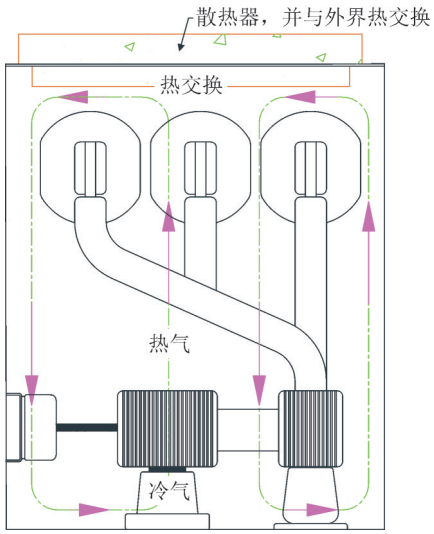


图7 母线气室优化

Fig. 7 Busbar air chamber optimization

3.2.4 断路器室散热设计

断路器室最大的发热源为灭弧室，其动端超标尤为严重，文中采用以下方式降低断路器室整体温升：ϕ60铜管改为ϕ70铜管以降低电阻；极柱和导体适当开孔以增加对流换热效率，见图8，不影响电场前提下在固封极柱上设置对流孔，以加强极柱腔体内外之间的热交换。增加风道[18]后对流效果明显加强，提升了固封极柱的对流散热效率，有助于降低整柜温升。

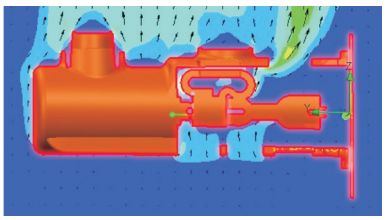


图8 风道流线方向

Fig. 8 Direction of air duct flow lines

在极柱静端与导体连接处设计了散热器，通过传导和对流方式降低此处温升，充分将静端热量散于气箱内，然后在气箱后上部设计了热管[19]散热器模块，此模块由吸热翅片、热管、固定块、和散热翅片等组成，密封安装于下气箱后上部，见图9。

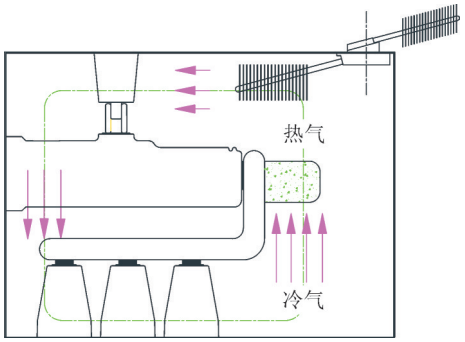


图9 断路器气室优化

Fig. 9 Optimization of the circuit breaker air chamber

其原理为：通过安装于气箱内的吸热翅片，吸热面积约为2 m^2，充分吸收气箱内部气体热量，然后将热量传递至热管，而热管是由铜管、吸液芯和蒸汽通道组成，吸液芯环绕在密封管的管壁上，管内充有易挥发的饱和液体(如纯水、甲醇、丙酮等)，通过工质的相变作用实现热量传递，其导热系数约为铜的25倍，高效的将热量传递至气箱外部，由外部散热翅片将热量散于大气内。经试验与计算，安装此散热系统后，下气箱散热功率增加67 W，断路器室气体温升降低20~30 K，气箱内外传热效率提升了25%，打破“层流内层”对充气柜温升的影响。

4 试验验证及结果分析

文中按图7-9所示散热方案[20~25]对整柜进行了优化设计，完成整改后，与首轮样机保持同样测试环境，重新按照GB/T 11022—2020《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》的规定在零表压

下进行1.1倍额定电流温升测试，见图10、11，此次温升测试所有点位均不超标，整柜平均温升降低了12 K左右，试验结果证明该文的散热措施是有效的。



图10　温升试验

Fig. 10　Temperature rise test

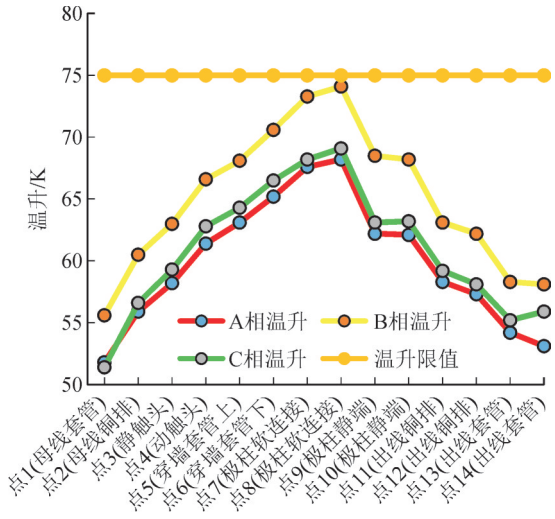


图11　温升试验数据

Fig. 11　Temperature rise test data

5　结论

文中通过对12 kV 3 150 A干燥空气绝缘充气柜温升控制和散热技术的研究，在零表压下进行了1.1倍额定电流温升试验，试验结果符合有关标准要求，并得到如下结论：

1)焦耳发热是充气柜内部最直接热源，温升超标点主要集中于B相三工位开关和固封极柱动端，平均温升比A、C相高5~7 K。

2)测试结果表明，通过对导体、接触方式及连接方式的优化，可以有效降低主回路的总电阻，从而降低焦耳损耗。

3)对柜内元器件进行合理布局，且在不影响载流的前提下对触头增加“散热孔”和“散热齿”设计，可有效增强局部的对流散热和辐射散热，从而降低柜内元器件温升。

4)由于充气柜是完全密封的，与外界热交换极弱。文中设计的热管散热器以其高效的热传递方式，极大提升了气箱内外热交换效率，通过大幅降低气箱内绝缘气体温升达到降低主回路温升的目的。

参考文献：

[1] 宋光华. 干燥空气绝缘环网柜的技术特点与发展趋势[J]. 科技与创新，2021(11)：100-101.
Song Guanghua. Technical features and development trends of dry air insulated ring main units[J]. Science and Technology & Innovation，2021(11)：100-101.

[2] 李燕燕，郑晓果. 一二次融合环网柜内置EVT的内锥套管局部放电分析[J]. 电器与能效管理技术，2024(10)：31-35.
Li Yanyan，Zheng Xiaoguo. Partial discharge analysis on inner cone casing of built-in EVT in primary and secondary fusion ring cabinet[J]. Electrical & Energy Management Technology，2024(10)：31-35.

[3] 魏　敏. 一种中压开关柜的智能化研究与设计[J]. 电气应用，2023，42(1)：86-91.
Wei Min. Intelligent research and design of medium voltage switchgear[J]. Electrotechnical Application，2023，42(1)：86-91.

[4] 郅娇娇，师进强，庞　博. 40. 5 kV SF_6灭弧室电场优化设计[J]. 电器与能效管理技术，2025(7)：39-43.
Zhi Jiaojiao，Shi Jinqiang，Pang Bo. Electric field optimization design of 40.5 kV SF_6 interrupter[J]. Electrical & Energy Management Technology，2025(7)：39-43.

[5] 王庆泽，艾茂民，安军伟，等. 基于供电可靠性的10 kV配电网综合不停电作业技术探讨与实践[J]. 电器与能效管理技术，2024(4)：82-89.
Wang Qingze，Ai Maomin，An Junwei，et al. Exploration and practice of comprehensive uninterrupted operation technology for 10 kV distribution network based on power supply reliability[J]. Electrical & Energy Management Technology，2024(4)：82-89.

[6] 吴如祥，许国航. 高压开关柜新型冷却方式研究应用[J]. 电工技术，2021(20)：100-101.
Wu Ruxiang，Xu Guohang. Research and application of novel cooling method for high voltage switchgear[J]. Electric Engineering，2021(20)：100-101.

[7] 彭　涛，唐炳南，赵莉华，等. 中压开关柜典型接触故障下的温升特性研究[J]. 高电压技术，2021，47(12)：4331-4340.
Peng Tao，Tang Bingnan，Zhao Lihua，et al. Study on the temperature rise characteristics of medium - voltage switchgear under typical contact failure[J]. High Voltage Engineering，2021，47(12)：4331-4340.

[8] 王　昭，陈德敏，汤　凯，等. 电力开关柜温度场分布及其散热影响因素[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版)，2021，38(4)：401-406.
Wang Zhao，Chen Demin，Tang Kai，et al. Temperature field distribution of power switchgear and its influence factors of heat dissipation[J]. Journal of Anhui University of Technology(Natural Science)，2021，38(4)：401-406.

[9] 柯红海，于志国，袁 杰，等. 中压开关柜温升特性的多物理场耦合仿真研究[J]. 广东电力，2022，35(10)：125-132.
Ke Honghai，Yu Zhiguo，Yuan Jie，et al. Multi-physical field coupling simulation research on temperature rise characteristics of medium voltage switchgear[J]. Guangdong Electricity，2022，35(10)：125-132.

[10] 刘 分，刘 刚，秦晓宇，等. 等效热路在共箱隔离开关温升计算中的运用[J]. 高压电器，2020，56(8)：211-216.
Liu Fen，Liu Gang，Qin Xiaoyu，et al. Application of equivalent thermal circuit in calculation of temperature rise of three-phase enclosed disconnector[J]. High Voltage Apparatus，2020，56(8)：211-216.

[11] 朱 擘，王 聪，胡利成，等. 一起500 kV变压器压钉松动放电产气故障分析[J]. 变压器，2024，61(9)：55-59.
Zhu Bo，Wang Cong，Hu Licheng，et al. Analysis of gas generation fault caused by loose discharge of pressure nails in 500 kV transformer[J]. Transformer，2024，61(9)：55-59.

[12] 王辰旭，李永华，彭志敏. 高压开关柜温度流场仿真研究[J]. 电工电能新技术，2021，40(11)：64-71.
Wang Chenxu，Li Yonghua，Peng Zhimin. Simulation of temperature flow field in high voltage switchgear[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy，2021，40(11)：64-71.

[13] 冀立鹏，甄 利，刘宏亮，等. 基于磁场—温度场耦合的高压开关柜梅花触头有限元数值计算[J]. 中国测试，2022，48(6)：8-12.
Ji Lipeng，Zhen Li，Liu Hongliang，et al. Finite element numerical calculation of butt contact in high voltage switchgear based on magnetic-temperature field coupling[J]. China Measurement & Testing Technology，2022，48(6)：8-12.

[14] 孙利雄，赵莉华，赵 虎. 不同绝缘气体下中压开关柜温升特性研究[J]. 机械与电子，2022，40(2)：39-44.
Sun Lixiong，Zhao Lihua，Zhao Hu. Study on the temperature rise characteristics of medium-voltage switchgear with different insulating gas[J]. Machinery & Electronics，2022，40(2)：39-44.

[15] 董立峰，王西龙，李 真，等. 一起110 kV油—油套管均压罩固定板断裂缺陷分析[J]. 变压器，2024，61(6)：62-66.
Dong Lifeng，Wang Xilong，Li Zhen，et al. Analysis of fastening plate of a 110 kV immersed-immersed oil-oil bushing's shield cracking defect[J]. Transformer，2024，61(6)：62-66.

[16] 姚 硕，刘洪正，徐绍禹，等. 辐射制冷涂料在环网柜上的降温效果测试[J]. 山东电力技术，2021(5)：37-41.
Yao Shuo，Liu Hongzheng，Xu Shaoyu，et al. Cooling effect test of radiant cooling coating on ring cabinet[J]. Shandong Electric Engineering，2021(5)：37-41.

[17] 陈利民，张罗锐，李红雷，等. 40.5 kV环保型充气柜三工位开关绝缘结构优化设计[J]. 科学技术创新，2022(29)：31-34.
Chen Limin，Zhang Luorui，Li Honglei，et al. Optimization design of insulation structure of three-station switch of 40.5 kV environment-friendly inflatable cabinet[J]. Science and Technology Innovation，2022(29)：31-34.

[18] 王增彬，王 睿，姚聪伟，等. 强制对流散热对开关柜温升影响规律的仿真研究[J]. 高电压技术，2021，47(3)：1064-1074.
Wang Zengbin，Wang Rui，Yao Congwei，et al. Simulation study on the influence of forced convection heat dissipation on temperature rise of switchgear[J]. High Voltage Engineering，2021，47(3)：1064-1074.

[19] 童小琴，张 敬，刘德红. 热管自冷型整流柜风道设计分析[J]. 低温与超导，2021，49(9)：38-41.
Tong Xiaoqin，Zhang Jing，Liu Dehong. Analysis on the air duet design of the heat pipe rectifier cabinet[J]. Cryogenics and Superconductivity，2021，49(9)：38-41.

[20] 周文文. 外覆绝缘材料的高压开关柜接头温度监测技术[J]. 电器与能效管理技术，2021(4)：46-51.
Zhou Wenwen. Joint temperature monitoring technology of high voltage switchgear covered with insulation materials[J]. Electrical & Energy Management Technology，2021(4)：46-51.

[21] 杨 桢，任玲玲，王 凯，等. 基于混合绝缘气体的GIS母线温升多物理场耦合分析[J]. 高压电器，2021，57(1)：48-54.
Yang Zhen，Ren Lingling，Wang Kai，et al. Multiphysics-field coupling analysis of GIS bus bar temperature rise based on mixed insulating gas[J]. High Voltage Apparatus，2021，57(1)：48-54.

[22] 黄志亮，王怀兴，阳同光，等. 储能锂离子电池包单体内部温度压力模拟[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(15)：138-146.
Huang Zhiliang，Wang Huaixing，Yang Tongguang，et al. Simulation of internal temperature and pressure for cells in an energy storage lithium-ion battery[J]. Power System Protection and Control，2022，50(15)：138-146.

[23] 吕 超，张 爽，朱世怀，等. 储能锂离子电池包强制风冷系统热仿真分析与优化[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(12)：48-55.
Lyu Chao，Zhang Shuang，Zhu Shihuai，et al. Thermal simulation analysis and optimization of forced air cooling system for energy storage lithiumion battery pack[J]. Power System Protection and Control，2021，49(12)：48-55.

[24] 王 维，鲁海亮，王 羽，等. 垂直型直流接地极温升特性及计算方法研究[J]. 智慧电力，2022，50(12)：7-12.
Wang Wei，Lu Hailiang，Wang Yu，et al. Research on temperature rise characteristics and calculation method of vertical DC grounded pole[J]. Smart Power，2022，50(12)：7-12.

[25] 贺建明，刘坚钢，易非凡，等. 开关柜绝缘故障仿真与检测系统研究[J]. 高压电器，2022，58(3)：23-28.
He Jianming，Liu Jiangang，Yi Feifan，et al. Research on simulation and detection system of insulation fault of switchgear cabinet[J]. High Voltage Apparatus，2022，58(3)：23-28.

李 猛(1987—)，男，硕士研究生，高级工程师，主要从事中压开关设备关键技术研究及产品开发工作(通信作者)(E-mail：15290986338@163.com)。