

ICS 29.120.40
CCS K43

CES

团 体 标 准

T/CES —2026

特高压换流变防爆燃用 550kV SF₆ 旁路触发间隙技术规范

Technical specifications for 550kV SF₆ bypass trigger gap used to prevent explosion and
fire of ultra-high voltage converter transformer

(征求意见稿)

×××× - ×× - ××发布

×××× - ×× - ××实施

中国电工技术学会 发布

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 标识	2
4.1 型号	2
4.2 铭牌	3
5 正常运行条件	3
6 额定值	4
6.1 概述	4
6.2 额定电压	4
6.3 额定绝缘水平	4
6.4 最低可触发电压	4
6.5 触发导通时延	4
6.6 额定短路电流	4
6.7 触发测控系统的额定电源电压和频率	4
7 关键技术要求及设计实现参考	5
7.1 基本组成及结构原理	5
7.2 绝缘气体	5
7.3 绝缘	5
7.4 无线电干扰电压	6
7.5 触发	6
7.6 短时通流及内部燃弧压力耐受	7
7.7 触发测控系统	8
7.8 其余关键组部件技术要求	11
8 型式试验	13
8.1 概述	13
8.2 间隙整机试验	14
8.3 触发测控系统试验	17
9 出厂试验	18
9.1 概述	18
9.2 关键组部件	19
9.3 触发测控系统	19
9.4 间隙本体	19
9.5 间隙整机	19
10 运输、储存、安装、运行和维护规则	19
10.1 运输、储存和安装的条件	19
10.2 安装	20

10.3 调试	20
10.4 运行	21
10.5 维护	21
11 安全	22
12 产品对环境的影响	22
附 录 A（资料性）间隙旁路换流变防爆燃方法	23
附 录 B（资料性）间隙结构组成及工作原理	24

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会电网灵活快速开合控制技术 & 装备工作组归口。

本文件起草单位：中国电力科学研究院有限公司、国家电网公司、山东泰开高压开关有限公司、河南平高电气股份有限公司、西安交通大学、国网江苏省电力有限公司、国网直流技术中心、北京智宇信电力技术有限公司、国家电网公司（常州）电气设备检测中心、南京南瑞继保电气有限公司、国网甘肃省电力有限公司、国网宁夏电力有限公司、国网四川电力有限公司、国网陕西省电力有限公司、国网山东省电力有限公司。

本文件主要起草人：李志兵、黄勇、王庆、张然、付颖、刘超、李晓昂、张耀、汪建成、谭盛武、周力骏、周黄果、徐晓东、谢天喜、孙清超、史鑫、张民、许璠、汪海波、郑占锋、张玲、程浩、谭庆广、何大伟、张晓宇、陈超、林金阳。

本文件为首次发布。

特高压换流变防爆燃用 550kV SF₆旁路触发间隙技术规范

1 范围

本文件规定了标识，正常运行条件，额定值，关键技术要求及设计实现参考，型式试验，出厂试验，运输、储存、安装、运行和维护规则等内容。

本文件适用于特高压换流变防爆燃用550kV SF₆旁路触发间隙（一种SF₆等离子体喷射触发间隙，安装于特高压换流变500kV网侧，能在换流变内部故障，即使很低的残压下触发导通，超高速旁路换流变防爆燃，以下简称间隙）。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1984 高压交流断路器

GB/T 2434 电工电子产品环境试验

GB/T 2900 电工术语

GB/T 4208 外壳防护等级（IP 代码）

GB/T 7261 继电保护和安全自动装置基本试验方法

GB/T 11022 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求

GB/T 11023 高压开关设备六氟化硫气体密封试验方法

GB/T 12022 工业六氟化硫

GB/T 16927.1 高电压试验技术 第1部分：一般定义及试验要求

GB/T 17626.2 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电试验

GB/T 17626.3 电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验

GB/T 17626.4 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验

GB/T 17626.5 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌冲击抗扰度试验

GB/T 17626.6 电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度

GB/T 17626.8 电磁兼容 试验和测量技术 工频磁场抗扰度试验

GB/T 17626.9 电磁兼容 试验和测量技术 脉冲磁场抗扰度试验

GB/T 17626.10 电磁兼容 试验和测量技术 阻尼振荡磁场抗扰度试验

GB/T 17626.18 电磁兼容 试验和测量技术 阻尼振荡波抗扰度试验

GB/T 8320 铜钨及银钨电触头

DL/T 402 高压交流断路器

DL/T 593 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求

T/CES 265 特高压直流工程消能装置用等离子体喷射触发间隙技术规范

3 术语和定义

3.1

旁路触发间隙 bypass trigger gap

一种 SF₆ 气体绝缘的等离子体喷射触发间隙，具有极低电压下超高速导通、大容量通流后快速绝缘恢复的特点。可安装于换流变网侧对地，在换流变内部发生严重接地故障（套管根部对壳放电、绕组首端对壳放电及严重匝间短路等）时，接受上级保护命令，快速触发导通并形成低阻电弧通道，旁路换流变网侧（换流变阀侧会快速闭锁），大幅缩短故障清除时间、降低故障能量，有效防爆燃。旁路触发间隙旁路换流变防爆燃方法详见附录 A。

3.2

等离子体喷射触发间隙 plasma jet trigger gap

由 SF₆ 气体绝缘的间隙本体及其触发测控系统组成，间隙本体电极中内嵌触发腔，触发测控系统发出触发脉冲电流，烧蚀触发腔产生等离子体喷射至间隙中，贯穿性短接间隙，实现低电压下可靠触发导通。根据最低可触发电压的高低可采用间隙本体高压端和低压端双端对喷或单端喷射触发方式。防爆燃用旁路触发间隙采用双端对喷触发方式保证极低的可触发电压覆盖所有换流变故障类型，一端的喷射触发有故障严重缺陷时自动转为单端喷射触发方式仍可在常见的绕组匝间等高残压故障下触发导通，以充分保证防爆燃可靠性。等离子体喷射触发间隙的结构及工作原理详见附录 B。

3.3

最低可触发电压 trigger permission voltage of a gap

间隙能够可靠触发导通的最低的端间瞬时电压。

3.4

触发导通时延 triggered discharge delay of a gap

间隙从接收到触发指令时刻至间隙导通时刻的时间差。

4 标识

4.1 型号

间隙型号中各数字和字母代表的意义如图 1 所示。

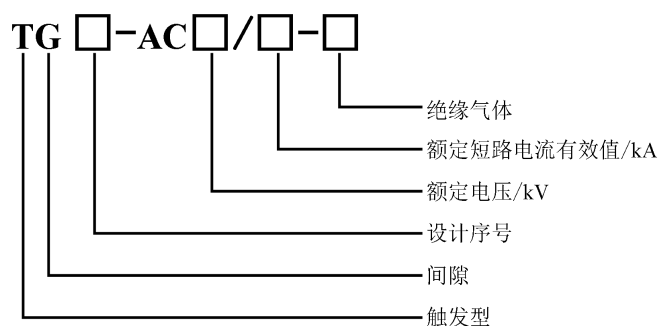


图1 间隙型号定义规则

4.2 铭牌

铭牌应固定在间隙外壳上，且应以下述最少资料永久地标示在铭牌上。

- 研发/制造厂名或商标；
- 型号；
- 绝缘气体种类；
- 额定压力、报警压力和闭锁压力；
- 额定电压；
- 额定短时工频耐受电压、操作冲击耐受电压和雷电冲击耐受电压；
- 最低可触发电压、触发导通时延；
- 额定短路电流、持续时间和绝缘恢复时间；
- 气体质量；
- 制造年、月；
- 出厂编号。

5 正常运行条件

间隙本体，触发测控系统的触发器、测量单元，供能变和光纤绝缘子户外使用，环境条件如下：

- 环境温度：最低-40℃、-25℃，最高 40℃；
- 太阳最大辐射不超过 1kW/m²；
- 海拔不超过 1000m，超出时进行外绝缘设计修正；
- 相对湿度最大值 95%；
- 风速不大于 34m/s；
- 污秽度等级 d 级，超出时进行爬距绝缘设计修正；
- 地震烈度≤8 级，超出时按实际工程要求。

间隙触发测控系统的控制器和 61850 合并单元在控保小室安装使用，环境条件如下：

- 环境温度：最低-5℃，最高 40℃，24h 内平均温度不超过 35℃；
- 阳光辐射的影响可以忽略；
- 海拔不超过 1000m；
- 相对湿度最大值为 60%。

6 额定值

6.1 概述

间隙的通用额定值应从下列各项中选取（适用的）：

- a) 额定电压；
- b) 额定绝缘水平；
- c) 最低可触发电压；
- d) 触发导通时延；
- e) 额定短路电流；
- f) 触发测控系统的额定电源电压和频率。

6.2 额定电压

额定电压与换流变网侧电网最高运行电压相同，设定为550kV。

6.3 额定绝缘水平

额定绝缘水平应包括额定短时工频耐受电压、额定雷电冲击耐受电压和额定操作冲击耐受电压，按照所并联的换流变网侧额定绝缘要求相同，无特殊要求时按表1执行。

表1 550kV旁路触发间隙额定绝缘水平

项目	单位	数值
短时工频耐受电压	kV _{rms}	680
雷电冲击耐受电压	kV _{peak}	1550
操作冲击耐受电压	kV _{peak}	1175

6.4 最低可触发电压

最低可触发电压由换流变内部严重短路故障时网侧最低残压决定，并留有一定裕度，无特殊要求时按照10kV。

6.5 触发导通时延

触发导通时延应 $<1\text{ms}$ 。

6.6 额定短路电流

额定短路电流由安装系统最大短路电流决定，无明确要求时，按63kA_{rms}（含直流分量）考虑。

额定通流时间由换流变保护和进线断路器总的故障开断时间决定，无明确要求时，按80ms考虑，通流后应能绝缘快速恢复。

异常通流时间考虑进线断路器拒动或换流变保护失灵，由上级断路器或后备保护清除故障时间决定，无明确要求时，按450ms考虑，此时间隙应能压力耐受并不进行压力释放。

6.7 触发测控系统的额定电源电压和频率

触发器、测量单元、供能变采用AC220V或DC220V供电，宜采用双路独立电源。

控制器和61850合并单元采用DC220V供电，宜采用双路独立电源。

7 关键技术要求及设计实现参考

7.1 结构组成及工作原理

间隙整机由间隙本体、触发测控系统、供能变、光纤绝缘子、控制箱和汇控柜等组成，配用专用的防爆燃保护。防爆燃保护能够快速识别换流变内部严重故障，分相通过光纤调制信号出口，将触发命令发给间隙触发测控系统。触发测控系统的控制器判断间隙满足触发条件，同时快速控制间隙高、低压端触发器中电容器向间隙本体上、下电极中的触发腔放电，产生等离子体喷射触发间隙导通。供能变和光纤绝缘子为高压端触发器提供电能和通讯。控制箱为高、低端触发器提供外壳防护。汇控柜为低压端触发器和供能变提供二次电源，汇集三相间隙本体及供能变气压信号，上送至监控后台，也可根据实际需要作为触发控制器与间隙本体之间光缆连接的过渡终端。防爆燃保护基于常规换流变保护开发，硬件要求与换流变保护相同，通过选用反映内部严重故障的保护类型、超高速保护原理和快速光纤出口等加速方式，实现快速准确故障检测和信号出口，详细设计及试验要求可参考换流变保护相关标准，本标准中不再重复规定。

间隙结构组成及工作原理详见附录B。

7.2 绝缘气体

7.2.1 技术要求

间隙采用绝缘和灭弧性能较好的SF₆，规定额定压力、最低压力和报警压力，并保证在气压范围内可实现可靠绝缘、触发、大电流通流及快速绝缘恢复。

考虑气体泄漏及合理充气间隔后设置最低压力，要保证绝缘性能并提前预警，最低压力和报警压力建议参考GB/T11022。

制造方应提供气室容积和气体质量要求，并为用户提供气体充入、监测及回收的必要说明。

7.2.2 气体成分及参数要求

SF₆应使用符合 GB/T 12022 的新气体。

气体中水分含量允许值，间隙本体交接验收时 $\leq 150\mu\text{L/L}$ 、运行时 $\leq 300\mu\text{L/L}$ ，供能变交接验收时 $\leq 250\mu\text{L/L}$ 、运行时 $\leq 500\mu\text{L/L}$ 。

年漏气率 $\leq 0.1\%$ 。

7.2.3 吸附剂

间隙应设置吸附剂，要求参考GB/T11022。

7.3 绝缘

7.3.1 技术要求

间隙整机绝缘设计和绝缘型式试验按1.2倍裕度开展。

间隙本体和供能变应保证在气体最低工作压力下满足绝缘及局放要求。

间隙整机需开展最低工作压力下耐压和无线电干扰试验。

7.3.2 绝缘设计

间隙本体内部应为稍不均匀电场，要严格控制雷电冲击绝缘下最高设计场强。

间隙本体用复合绝缘筒在1.2倍额定电压下应无局放。

间隙本体和供能变，内部结构设计应避免异物藏匿并便于清洁。

间隙本体要严格控制上下电极的距离、平行度和同轴度，并考虑环境温度变化后断口绝缘支撑筒热胀冷缩对间隙距离的影响。

间隙本体应注意严格控制主电极及屏蔽法兰、绝缘支撑筒（棒）和防弧罩沿面的场强，控制绝缘支撑筒（棒）、防弧罩与上、下屏蔽法兰连接处三结合点的场强，绝缘支撑筒（棒）和防弧罩相互之间要留有一定的气隙。

间隙本体上、下导电杆、电极支撑绝缘筒（棒），需增强机械强度，保证通流、运输和放电振动时的稳定性，以免影响间隙绝缘可靠性。

供能变应注意严格控制导电杆、屏蔽、支撑绝缘子沿面的场强，导电杆及触头屏蔽之间要留有一定的间隙，避免磕碰。

供能变导电杆需增强机械强度，避免或减少高压绕组受力变形，保证绝缘可靠性。

间隙本体和供能变要注意控制复合外套伞裙场强及单位长度电压分布，避免长期带电下出现电晕加速伞裙老化。复合绝缘筒外沿面伞裙电场在运行电压下不超过0.65kV/mm，建议优选值为0.4kV/mm，超过时应考虑缩小上、下电极屏蔽直径或增加复合绝缘筒内径。

间隙整机设计应注意避免间隙本体、光纤绝缘子、供能变之间绝缘的相互影响，尤其是对间隙本体内部主电极及复合外套伞裙电场的影响，注意设备接地法兰高度尽量保持一致。

间隙整机高、低压接线端子尖角应倒角防止电晕。

间隙整机高压端应设计一体化均压环，利用上盖板螺栓安装。

7.3.3 金属微粒抑制

为减小间隙内部微粒产生，采用高压水清洗、超声波清洗、电化学抛光等措施减少零部件异物。

转运时，主电极包裹硅胶套，防止磕碰划伤；装配时，采用无毛布清擦零件表面，超薄手套抚摸零件表面，检查有无毛刺，采用去静电装置对绝缘件处理，防止静电导致异物吸附；装配后，采用专用吸尘器清理装配体螺栓连接、缝隙等部位，防止残留异物。

考虑水平运输时，导体电连接处摩擦产生异物，结构设计时，将触指设计在导电管内部，触指两端设置2道导向环，导体滑动过程中异物不会漏出或掉落外部主电极或绝缘件上方；同时开展触发间隙水平运输颠簸试验，解体检查导体与触指磨损及异物情况，有异物情况下需进一步优化导体连接结构。

7.4 无线电干扰电压

在施加 1.1 倍额定运行相电压时，无线电干扰电压水平不超过 500μV。

7.5 触发

7.5.1 技术要求

T/CES 265关于触发设计可参考使用。

间隙触发设计应保证在气体额定功能压力下能可靠触发导通。

间隙触发腔设计应保证在运行环境温度下可靠触发导通。

综合考虑触发腔加工装配、触发器及连接引线参数等合理偏差后，间隙触发设计应保证在最不利因素下能够可靠触发导通。

间隙触发设计应保证在上述最严苛工况下，触发时延均 $\leq 1\text{ms}$ 。

间隙采用等离子体双边对喷和单边喷射触发方式，应具备同时/相继两次触发能力，保证触发可靠性。

7.5.2 触发腔

触发腔内绝缘材料应能够在电弧烧蚀下产生足够等离子体喷出，满足间隙导通需求，同时兼顾电弧烧蚀形变量小并与SF₆及其分解产物相容的特性。

设计时通过正/负加工公差的合作确保各部分紧密压接不存在气隙，设计加工公差时需考虑低温环境下材料形变。

触发腔属于精密零件，在产品装配前应先将触发腔与产品化下电极装配为一体后，进行出厂触发测试，确认触发性能良好后再整体安装在产品上，避免现场散件装配。

7.5.3 其他

间隙本体复合绝缘筒上金属盖板和过渡金属筒下盖板，设计绝缘盘固定接线端子用于触发脉冲电流引入，接线端子对金属盖板绝缘应考虑2倍以上裕度，注意“绝缘件-金属-气隙”三结合点处电场畸变的防护，还应保证长期户外使用下沿面绝缘可靠。

7.6 短时通流及内部燃弧压力耐受

7.6.1 技术要求

间隙通过上、下主电极间燃弧维持电流导通，主电极通流燃弧工况包括以下两种：

- a) 正常工况：换流变故障情况下，间隙触发后转移熄灭换流变故障电弧，电极间通流燃弧，换流变保护动作进线断路器开断故障电流，间隙电弧熄灭快速恢复绝缘。无特殊要求时，通流燃弧按照63kA/80ms。
- b) 异常工况：间隙触发后转移熄灭换流变故障电弧，间隙电极间通流燃弧，换流变保护失灵或进线断路器拒动，间隙燃弧时间增加，无特殊要求时，通流燃弧工况按照63kA/450ms。

间隙在正常工况通流燃弧后应能够快速绝缘恢复，若无明确要求可按1s后绝缘恢复耐受设计。通流及绝缘恢复试验后，电极表面应烧蚀均匀，无龟裂、开裂、掉渣等现象，间隙绝缘和机械性能满足要求。

间隙在异常工况通流燃弧时，要求压力释放装置不动作，壳体不破裂。

间隙超出异常燃弧工况时允许压力释放，但不能对周围工作人员和其他设备造成破坏。

7.6.2 导体通流要求

间隙高、低压导电杆应满足额定短路电流、3s的通流能力。

7.6.3 主电极材料及控弧结构

T/CES 265中关于主电极设计部分可参考使用。

主电极板应采用耐烧蚀铜钨材料，整体烧结溶渗工艺，特性需满足GB/T 8320 中4.1和4.3铜钨触头相关规定。烧结溶渗后应将铜基座充分去除只留铜钨材料，避免通流过程中烧蚀铜产生大量蒸汽影响控弧。

主电极由电极板和电极座构成。电极板开螺旋槽形成自磁场旋弧结构，电弧在电极中央产生后很快受电流偏转产生的电动力作用，移动到电极边缘快速旋转，有效减轻对主电极烧蚀。电极板应保证足够的机械强度，避免旋弧过程中电动力引起旋弧瓣轻微变形，影响通流后绝缘性能。

主电极装配上、下屏蔽法兰需要尽量多的开孔，保证燃弧产生的热气流尽快扩散。

7.6.4 防弧罩

在主电极周围增加耐电弧烧蚀的防弧罩防止电弧过于扩散，防弧罩可采用断路器喷口材料。

防弧罩内径不易过小，防止电弧受挤压后烧蚀电极背部及上下屏蔽法兰。

7.6.5 复合绝缘筒、过渡套管及金属筒

复合绝缘筒和过渡套管和金属筒的压力设计应满足异常工况下通流燃弧气体压力升高安全耐受的要求，并留有足够裕度。

复合绝缘筒选型需考虑燃弧影响，绝缘筒内壁应附着耐SF₆分解产物涂层，防止SF₆分解产物的腐蚀以及电弧分解物的附着导致绝缘强度降低。

间隙通流过程中电弧高温可能烘烤复合绝缘筒内壁，导致表面变色、发黑，是允许出现的，但不应造成复合绝缘筒内壁绝缘性能明显下降。

间隙通流及绝缘恢复试验结束后，应按额定绝缘水平的80%开展绝缘状态检查试验，试验中不再测量局放。

7.6.6 地电位抑制

间隙本体设置单独短路电流接地通道，一方面防止电流经支架、控制箱外壳等入地，一方面尽量远离间隙本体减小安装处地电位升，从而减小短路电流入地对触发测控系统影响。

7.6.7 压力释放装置

间隙本体设置压力释放装置，通流超出异常燃弧工况时允许压力释放。最低释放压力不低于异常燃弧气体压力的1.1倍，最大释放压力不超过复合绝缘筒和金属筒出厂例行水压的90%。

7.6.8 内部燃弧压力耐受

应开展内部燃弧压力升高仿真结合防爆膜参数进行校核，确认壳体承压要求及防爆膜参数，并开展内部燃弧试验验证。

7.7 接地

间隙接地电阻应不高于所保护换流变接地电阻并尽量减小。

7.8 触发测控系统

7.8.1 组成

触发测控系统包含触发器（含间隙电压电流测量单元）、控制器和IEC61850合并单元等。其中控制器和IEC61850合并单元均放置于控保小室内，触发器和间隙电压电流测量单元现场就地安装。连接按图2所示设计，控制器接收防爆燃保护三取二装置分相光纤触发信号，防爆燃保护三取二装置、控制器、触发器、触发腔均为独立双冗余设计，单一元件或单一触发回路损坏应不会引起间隙误动和拒动。控制器接口均为光纤以保证高可靠性。

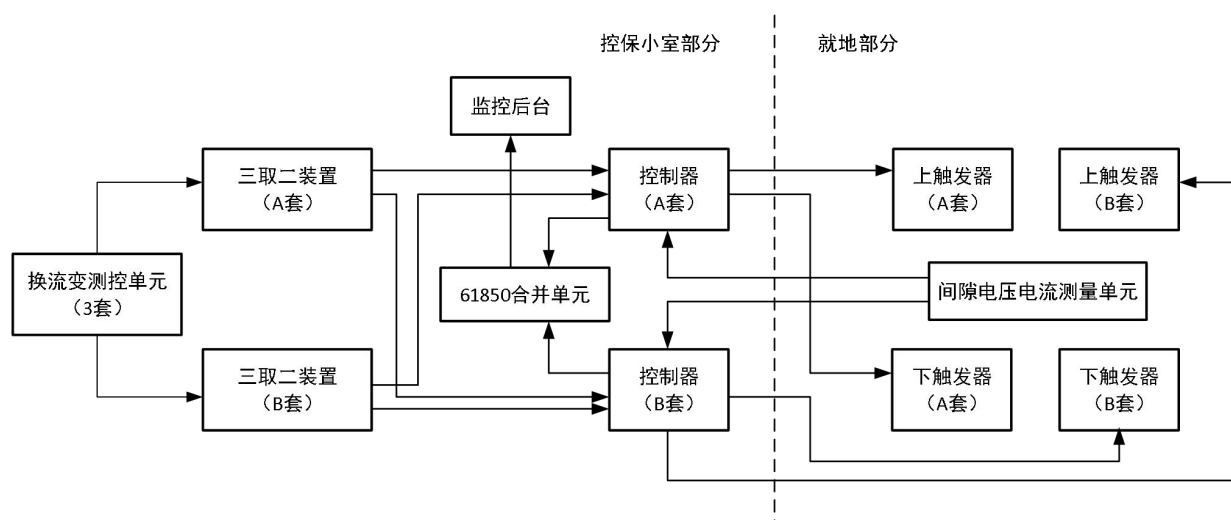


图2 触发测控系统组成

7.8.2 测量单元

7.8.2.1 间隙电压测量范围、频带和精度

在系统正常运行、间隙耐压过程中，间隙电压为系统运行电压。在换流变内部出现严重故障后，间隙电压跌落为故障残压，最严重时只有油隙电弧电压。为保证运行电压和电弧电压的准确测量，应保证测量范围应满足5kV-110kV（瞬时值）、测量频带满足0.5Hz-4kHz，超出测量范围时自动保护。

7.8.2.2 间隙电流测量范围、频带和精度

在系统正常运行、间隙耐压过程中，间隙不流过电流。在间隙触发导通后，流过工频短路电流，故此时的电流测量范围、频带满足系统短路电流及其直流分量测量。

7.8.3 触发器

触发器为A、B套双冗余设计，每套包括高压端的上触发器和接地端的下触发器。控制器发出触发命令后，上、下触发器的晶闸管同时控制储能电容放电产生触发脉冲至上、下电极的触发腔，烧蚀触发腔产生等离子体喷射，实现间隙导通。触发脉冲电流输出特性应与触发腔特性匹配，即能产生足量等离子体保证触发可靠性，也要避免单次能量过大，破坏触发腔机械支撑结构。

触发器在整体布置上应尽量靠近间隙本体，触发线选用大通流截面导线，以减小储能电容放电回路电感，增大触发电流，提高触发效率。与间隙本体间单独设置回流地线用于触发电流回流，避免间隙本体过渡桶及触发箱壳体通流，高压输出线应与回流地线绞合或采用同轴结构，进一步降低回路电感，上下电极触发引线电感应尽量相同，应明确触发回路参数（电感、电阻、触发波形）的检测及控制方法。

触发器内储能电容应选择干式自愈式电容，避免选择油浸渍电容。

触发器额定工作电压应不超过10kV，保证长期运行可靠性，出厂前应进行绝缘试验检查，各元件绝缘水平不低于额定工作电压的1.5倍，短时通流耐受峰值不低于最大触发脉冲电流1.5倍。

触发器中充电单元、储能电容、晶闸管和二极管组件的状态应实时上送至间隙控制器。

触发器内元件接地点汇集一点后与壳体等电位连接，禁止多点接地导致壳体通流。壳体外层应有明确的接地点。

触发器应有储能电容带电指示，保证人员接触安全。

触发器应在电源电压AC220V±10%范围内正常工作。

触发器为户外使用，在极端高、低温和湿热环境下应能可靠工作。

高压端触发器应保证长期在AC500kV等级高电位下可靠工作。

7.8.4 测控功能

7.8.4.1 触发器储能电容充电控制及保护

触发器接收控制器设定的储能电容电压值，控制充电回路对储能电容恒流/恒功率充电。实时监测储能电容电压值判断电容状态，发现储能电容异常时停止充电，防止损坏电源及其他设备。电容电压测量按三取中设计，就地转换为光信号实时上送至控制器，

在触发器断电时，自动泄放储能电容电压以保证试验人员安全。

7.8.4.2 触发功能

控制器与防爆燃保护交叉互联。控制器同时接收来自防爆燃保护A/B套三取二装置发出的光调制触发指令，收到触发指令后立刻或根据设定的延时，控制上下触发器同时发出高压脉冲电流令对应的触发腔放电，触发间隙导通，应保证双冗余并避开弧压的过零区间，实现可靠触发功能。

7.8.4.3 触发器状态监测

控制器与触发器内组件通信实时监测触发器的工作状态，包括：通过储能电容电压测量单元，判断充电状态是否正常；通过监测触发器内晶闸管、二极管电位，实时判断晶闸管、二极管和触发腔金属丝通断状态；通过监测触发器内温湿度，判断触发器内环境状态。

7.8.4.4 间隙状态监测

控制器通过测量单元监测间隙的电压电流判断间隙状态，其中，间隙电压采用内置结构式电容分压器，按三取中设计，间隙电流采用罗氏线圈，按双冗余设计，可根据现场情况采集换流变电压电流信号进行间隙电压测量校验并判断换流变故障状态。

7.8.4.5 通讯状态监测

通过监测光信号强度实时判断与防爆燃保护、间隙触发腔的通信状态。

7.8.4.6 状态上送及录波

上述状态监测信息通过61850合并单元实时报送给监控后台，根据需要进行触发过程录波。

7.8.4.7 电源防浪涌及掉电保护

触发测控系统中控制电源配备有防浪保护器及滤波器，且具备在系统电源短时（200ms以上）掉电后控制器可正常工作的功能（实现正常触发和信息上送等）。

7.8.4.8 参数设定及调试

控制主机具备独立网口，可通过网络浏览器访问控制主机的调试页面，该页面包含控制器的各个状态显示及控制，如充电状态、储能电容电压、充电电流、触发腔状态、触发输出选择等，可供运维人员使用。

7.8.5 板卡对壳绝缘要求

绝缘电阻：不低于 100M Ω ；

工频耐压：2kV，1min。

7.8.6 电磁兼容水平

按照特高压直流工程控制保护系统电磁兼容水平要求，如表 1 所示：

表1 控制系统的额定电磁兼容水平

序号	项目	等级
1	静电放电抗扰度	4 级
2	射频电磁场辐射抗扰度	4 级
3	电快速瞬变脉冲群抗扰度	4 级
4	浪涌（冲击）抗扰度	4 级
5	射频场感应传导骚扰抗扰度	3 级
6	工频磁场抗扰度	5 级
7	脉冲磁场抗扰度	5 级
8	阻尼振荡磁场抗扰度	5 级
9	阻尼振荡波抗扰度	3 级

7.9 其余关键组部件技术要求

7.9.1 电极支撑绝缘筒（棒）

应对同时浇注的试块进行冲击强度、弯曲强度、拉伸强度、介电强度、收缩率等材料性能测试。

对嵌件周围进行渗透探伤应没有缺陷。X 射线探伤不允许有内部杂质、裂纹、气孔等缺陷。

绝缘耐压 1.2 倍，1.2 倍相电压局放值 $\leq 3\text{pC}$ 。

按照-40℃（6h）、115℃（6h）程序进行 10 次冷热循环试验，试验后，绝缘棒的机械性能、电气性能均不下降，并用着色探伤等检查有无异常现象。

7.9.2 防弧罩

绝缘耐压 1.2 倍，1.2 倍相电压局放值 $\leq 3\text{pC}$ 。

X 射线探伤不允许有内部杂质、裂纹、气孔等缺陷。

应开展冷热循环试验：按照-40℃（6h）、115℃（6h）程序进行 10 次冷热循环试验，试验后机械性能、电气性能均不下降，并用 X 射线探伤等检查有无异常现象。

7.9.3 控制箱

触发器控制箱采用高可靠温控和防凝露设计。控制箱外上方设置能较好反射光线的防晒板；箱体外面涂特殊涂层和内部增加气凝胶层减少热传导；气密封堵材料阻隔湿气，内部顶部设置防凝露隔板防止水滴形成，底部设置排水孔，以排出箱体内部冷凝水。控制箱内设置高可靠温湿度控制电器件，包括半导体冷凝器/空调、热交换电风扇等。触发器设置独立的温湿度测量传感器，通过光纤传递信号。高、低压端的两个控制箱间气路贯通，防凝露设备互为备用。

7.9.4 汇控柜

汇控柜为低压端触发器和隔离供能变（高压端触发器供电）提供二次电源，汇集三相间隙本体及供能变气压信号，上送至监控后台。

可输入 2 路 AC220V 或 2 路 DC220V，DC220V 经逆变器后与 AC220V 实现双电源自动切换，每路输入功率不小于 5kW。

7.9.5 供能变

7.9.5.1 结构形式

采用单相双绕组，一次绕组和铁芯接地，二次绕组对地（一次绕组和铁芯）绝缘，一、二次绕组间设置接地屏蔽。

7.9.5.2 绝缘形式及要求

二次绕组对地绝缘可采用 SF₆ 或环氧浇筑，如果采用 SF₆ 绝缘并辅助环氧绝缘件支撑，应控制环氧绝缘件沿面及其嵌件场强，留有足够裕度。

一次绕组：1 个 220V 绕组，端子间绝缘和对地绝缘 AC 3000V，1min。

二次绕组：1 个 220V 绕组，端子间绝缘和对安装法兰绝缘 AC 3000V，1min，对地绝缘和对一次绕组绝缘与间隙本体绝缘要求相同。

7.9.5.3 稳定性

额定功率下输出电压下降小于 6%。

绕组平均温升不高于 35K，最热点温升不高于 45K，自然冷却方式。

绕组绝缘薄膜材料为阻燃材料，防火阻燃等级 UL 94 V-2。

7.9.6 光纤绝缘子

光纤绝缘子绝缘与间隙本体绝缘要求相同。

光纤绝缘子应选择嵌入式复合光纤绝缘子，由高压端法兰、低压端法兰、开槽芯棒、硅橡胶伞裙和多模光纤组成，采用预埋光纤技术，端部填胶密封处理。

光纤绝缘子上下法兰平行度公差不能超过 2mm，上下法兰安装孔的同轴度不能超过 1°，总长度公差不得超过 ±5mm。

光纤数量按照需求数量的双倍冗余设计，光路损耗小于 1dB。

应避免光纤异常弯曲和受力过大，与环氧接触良好，界面无气隙等缺陷。

7.9.7 安装支架

根据工程要求选用带有爬梯的升高底架，采用高强度型材，整体强度保证满足工程要求的抗风、抗地震烈度等级要求。

升高底架上连接固定 10kV 及以上支撑绝缘子，用于固定接地排。

底架与地基预埋件之间采用长螺柱连接固定，需根据整体重量及风载、地震载荷条件核算地基预埋件载荷。

8 型式试验

8.1 概述

间隙型式试验分为间隙整机和关键组部件（触发测控系统、复合套管、供能变、光纤绝缘子等）两部分开展。间隙整机试验，充分考核间隙整机绝缘、触发和通流等关键性能及所有部件关键性能。在此基础上，还明确了组部件中尤为关键且比较创新的触发测控系统的试验项目及方法。上述试验项目如表2所示。其余关键组部件按照相关标准开展型式试验。

表2 型式试验列表

序号	试验项目		试验方法及判据	备注	
1.	间隙整机	绝缘试验	见本文件 8.2.1		
2.		无线电干扰电压试验	见本文件 8.2.2		
3.		触发试验	见本文件 8.2.3		
4.		通流及绝缘恢复试验	见本文件 8.2.4		
5.		间隙本体长时通流压力耐受试验	见本文件 8.2.5		
6.		间隙本体密封试验	见本文件 8.2.6		
7.		端子静拉力试验	见本文件 8.2.7		
8.		控制箱防护等级试验	见本文件 8.2.8		
9.	触发测控系统	功能试验（含测量单元标定）	见本文件 8.3.1		
10.		绝缘试验	见本文件 8.3.2		
11.		环境试验	见本文件 8.3.3		
12.		电磁兼容试验	静电放电抗干扰度	见本文件 8.3.4	控制器和触发器带后台监控系统模拟触发腔，以便监视是否正常工作以及是否出现拒动和误动
13.			射频电磁场辐射抗干扰度		
14.			电快速瞬变脉冲群抗干扰度		
15.			浪涌（冲击）抗扰度		
16.			射频场感应的传导骚扰度		
17.			工频磁场抗扰度		
18.			脉冲磁场抗扰度		
19.			阻尼振荡磁场抗扰度		
20.		阻尼振荡波抗扰度			

注：（a）间隙关键组部件应按照相应标准开展完整型式试验。

（b）复合绝缘筒需补充开展局放试验，1.2 倍额定电压下应无局放。

8.2 间隙整机试验

8.2.1 绝缘试验

8.2.1.1 试验目的

检验绝缘耐压能否满足要求。

8.2.1.2 试验内容

短时工频耐压、操作冲击耐压试验（湿试）、雷电冲击耐压试验。

8.2.1.3 试验方法及判据

对间隙整机开展试验。试验方法参考标准 GB/T 16927.1，在间隙本体和供能变气体最低功能压力下，间隙低压端接地，高压端加压开展绝缘试验。

短时工频耐压之后进行雷电冲击耐压试验、最后开展操作冲击耐压试验。

8.2.2 无线电干扰电压试验

8.2.2.1 试验目的

检验整机运行中产生的无线电干扰强度能否满足标准要求。

8.2.2.2 试验内容

无线电干扰电压试验（主回路的发射试验）。

8.2.2.3 试验方法及判据

对间隙整机开展试验。试验方法参考标准 GB/T 1984，安装所有可能影响无线电干扰性能的所有附件，包括均压环、高压连接件等，在本体和供能变气体最低功能压力下，间隙低压端接地，高压端加压开展无线电干扰电压试验。施加 1.1 倍相电压，维持 5min，逐级下降至 0.3 倍相电压，再逐级升至初始值，最后逐级下降至 0.3 倍相电压，每级电压上，应进行无线电干扰的测量。

1.1 倍相电压下无线电干扰电平不超过 500 μ V。

8.2.3 触发试验

8.2.3.1 试验目的

检验触发性能及触发寿命。

8.2.3.2 试验方法及判据

对间隙整机开展试验。试验电路如图 3 所示，间隙本体在气体额定功能压力和储能电容最低工作电压下，分别在正、负极性双边对喷最低可触发电压下，各开展不低于 3 次触发试验（每次间歇时间 2min），试验过程中监测触发电流和电容 C 电压，以触发电流起始到电容 C 电压开始跌落时刻为触发导通时延，要求间隙触发导通时延 $\leq 1\text{ms}$ ，并能维持导通使电容上电压快速放电至低于 20%。

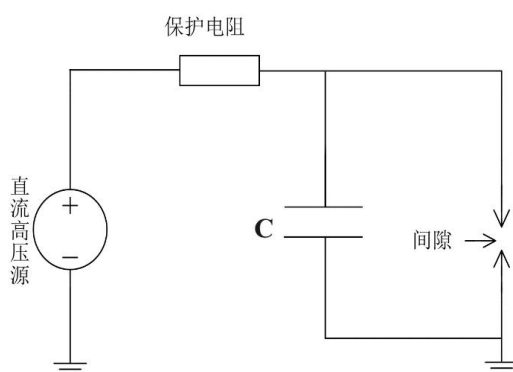


图 3 触发试验回路

8.2.4 通流及绝缘恢复试验

8.2.4.1 试验目的

检验间隙大电流通流及通流后绝缘恢复能力。

8.2.4.2 试验方法

对间隙整机开展试验。可参考采用如图 4 所示合成试验回路开展试验，图 4 中右侧为电流源回路，包括大容量电源、限流电感 L_i 和辅助合、分开关 AB 和 TB，提供间隙最低可触发电压、在间隙触发后产生工频试验电流，并控制燃弧时间。图 4 中左侧为电压源回路， C_u 和 L_u 分别为电压源的电容和电感，振荡产生高频恢复电压。 R_0 、 C_0 分别为调频电阻和调频电容，用于改变试品两端暂态恢复电压的幅值和频率，SG 控制恢复电压施加时刻。

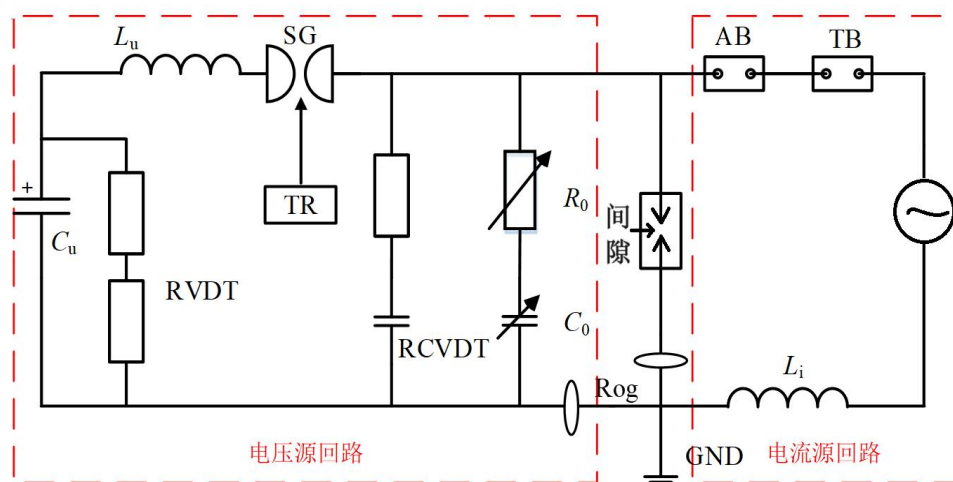


图 4 通流及绝缘恢复试验回路

间隙充额定功能压力气体，在电压大于触发间隙最低可触发电压时触发导通间隙，按参数要求控制电流峰值及通流时间，其中至少 2 次带直流分量（参考 GB/T 1984，峰值不低于 2.5 倍）。间隙熄弧后在规定绝缘恢复时间（按 7.6.1 节）内施加恢复电压（恢复电压波形与 550kV 断路器 T100s 短路开断恢复电压相同，用于检查间隙绝缘恢复耐受操作冲击电压情况）。

不少于 6 次通流试验后开展电寿命后的绝缘检查试验。间隙在通流试验原地或转运至绝缘试验间，在气体额定功能压力下按 0.8 倍额定值开展工频耐压、雷电冲击耐受和操作冲击耐受试验，获得试验

后绝缘耐受性能。最后开展 2h 的 1.2 倍运行电压下长期耐压试验。

8.2.4.3 试验合格判据

单次通流试验应能耐受恢复电压，不少于 6 次通流后绝缘检查试验应能通过。

8.2.5 间隙本体长时通流压力耐受试验

8.2.5.1 试验目的

检验间隙本体在长时通流燃弧压力升高后，复合绝缘筒及金属壳体是否能承受安全压力而不压力释放。

8.2.5.2 试验方法

试验次数 1 次，考虑试验目的及危险性，仅需对间隙本体开展（可不安装触发腔、不使用触发测控系统，通过电极间加装熔丝来导通）。使用带远传功能的压力表，试验过程中监测压力升高情况。试验电路如图 5 所示。熔丝引弧，通过要求的短路电流及时间后，开断试验电流。

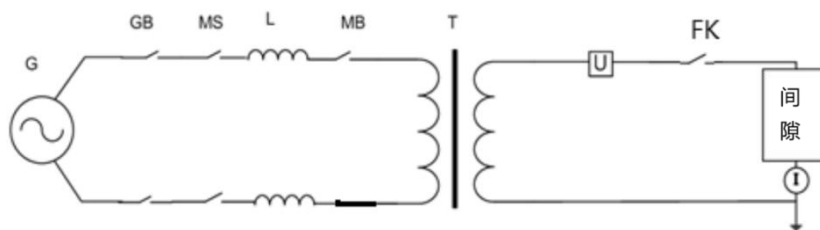


图 5 长时通流压力耐受试验回路

8.2.5.3 试验判据

间隙本体压力不释放，外观检查无可见破损。

8.2.6 间隙本体密封试验

8.2.6.1 试验目的

检验间隙本体密封性能。

8.2.6.2 试验参数

SF₆ 年泄漏率小于 0.1%。

8.2.6.3 试验方法及判据

对间隙本体开展试验，不需带控制箱、触发测控系统。

按 GB/T 11023 中 4.2.1 SF₆ 气体检漏方法开展试验。

8.2.7 端子静拉力试验

8.2.7.1 试验目的

检验验证在冰、风及连接导体作用下间隙能正常运行。

8.2.7.2 试验方法及判据

对间隙整机开展试验，参考 GB/T 1984 开展。

8.2.8 控制箱防护等级试验

8.2.8.1 试验目的

检验控制箱防尘、防水和防撞性能。

8.2.8.2 试验参数

防护等级 IP55W、IK10。

8.2.8.3 试验方法及判据

仅对控制箱开展试验，不需要安装触发测控系统。按照 GB/T 4208 开展。

8.3 触发测控系统试验

8.3.1 功能试验

8.3.1.1 试验目的

全面检验触发测控系统充放电、测量、绝缘、通流、监测、触发、录波、逻辑控制等功能。

8.3.1.2 试验样机

采用高低压侧两台触发器（含测量单元）和一台控制器开展试验。触发器输出短接，可通过测量触发输出电流辅助判断触发是否正常。

8.3.1.3 试验内容

- a) 充放电功能测试：触发器正常充放电且在 1.1 倍最高充电电压下稳定保压。
- b) 储能电容电压测量准确度测试：应保证三个测量通道的测量误差均 $<1\%$ 。
- c) 触发器通流能力验证：能够连续 3 次输出 30kA 电流（峰值）而不损坏。
- d) 系统状态监测功能测试：包括晶闸管短路指示、触发腔断线指示等。
- e) 触发及录波功能测试：应保证上、下触发器的三路输出均能够同步触发且触发后的录波功能正常，触发电压阈值逻辑判断正确。
- f) 测量单元标定试验。

8.3.1.4 试验参数及方法

依据具体功能设计开展。

8.3.1.5 试验判据

设备及功能完好。

8.3.2 绝缘试验

按照 GB/T 7261 完成端子对壳的绝缘电阻测量及 DC2kV/1min 的耐压试验。

8.3.3 环境试验

8.3.3.1 试验目的

检验触发测控系统在极端运行温度和湿度下是否能够正常工作。

8.3.3.2 试验样机

触发器（含测量单元）户外安装，控制器户内使用，对单台触发器（含测量单元，安装于控制箱内）和控制器分别开展试验。触发器输出短接，通过测量触发输出电流辅助判断触发是否正常。

8.3.3.3 试验内容

高温运行试验、低温运行试验、恒定湿热试验。

8.3.3.4 试验参数

触发器（含测量单元，安装于控制箱内）：极端运行高温 70℃、极端运行低温 - 30℃、极端运行湿度 95%。

控制器：极端运行高温 55℃、极端运行低温 - 10℃、极端运行湿度 60%。

8.3.3.5 试验方法

按照 GB/T 2434 中相关规定执行，外接电源为试品供电。将试品放入恒温箱中，温度调节至目标温度，恒温储存 2 小时后，令试品处于正常带载工作状态，连续运行 16 小时，且每 1 小时完成一次触发操作。运行过程中，实时通过上位机监测试品运行状态。

8.3.4 电磁兼容试验

8.3.4.1 试验目的

检验抗电磁干扰性能。

8.3.4.2 试验样机

仅对单台触发器（含测量单元）和控制器开展试验。触发器输出短接，可通过测量触发输出电流辅助判断触发是否正常。

8.3.4.3 试验内容

电磁兼容试验。

8.3.4.4 试验参数及方法

依据 GB/T 17626 等系列标准。

8.3.4.5 试验判据

设备及功能完好。

9 出厂试验

9.1 概述

间隙出厂试验分为间隙关键组部件、触发测控系统、间隙本体和间隙整机四部分开展。关键组部件按照相应标准和本规范要求开展出厂试验。触发测控系统需要试验考核全部功能完好和长时运行稳定性。间隙本体重点考核绝缘耐压及局放、触发回路参数、间隙本体密封性和密度表等。间隙整机出厂进行试装配和低压触发试验，保证一、二次安装连接正常。试验项目如表 3 所示。

表3 出厂试验列表

序号	试验项目	试验方法及判据
1	关键组部件	见本文件 9.2
2	触发测控系统	见本文件 9.3

序号	试验项目		试验方法及判据
3	间隙本体	触发回路参数测试	见本文件 9.4.1
4		绝缘及电容分压器变比标定试验	见本文件 9.4.2
5	间隙整机	装配检查	见本文件 9.5.1
6		低压模拟触发试验	见本文件 9.5.2

9.2 关键组部件

间隙关键组部件，包括绝缘件、供能变、光纤绝缘子等，应按照相应标准及技术规范开展全部出厂试验。

其中，注意复合绝缘筒、电极绝缘支撑筒和防弧罩的出厂试验应包括 X 射线探伤、局放试验（1.2 倍运行相电压局放应 $\leq 3\text{pC}$ ）和工频耐压（与间隙本体相同）等。

9.3 触发测控系统

使用 1 套触发测控系统，包括控制器和触发器（安装测量单元）。按 8.3.1 开展功能试验，之后进行 24 小时带电试验。

9.4 间隙本体

9.4.1 触发回路参数测试

在触发引线接线端子处测量内部触发回路电阻和电感。

9.4.2 绝缘及电容分压器变比标定试验

在间隙本体最低功能压力下，按 1.2 倍裕度开展绝缘试验，包括工频耐压、正负极性雷电耐受各 3 次，在此过程中标定电容分压器变比。

9.5 间隙整机

9.5.1 装配检查

注意间隙本体、光纤绝缘子、供能变安装后上部平整度调整，做好调整标记以供复装。

9.5.2 低压模拟触发试验

低压模拟触发，逐个回路检查触发回路电容、电感、电阻、波形等参数，检查充放电、连续触发、相继触发、触发腔切换、上下触发同步性、录波等功能是否正常。

10 运输、储存、安装、运行和维护规则

参考 GB/T 11022，并作如下补充：

10.1 运输、储存和安装的条件

出厂包装运输应尽可能以完整的功能单元为基本运输单位。

间隙本体和供能变，应在密封和充微正压（0.02~0.05MPa）SF₆气体的情况下包装、运输和储存。控制箱单元，安装触发器的情况下应采取相应的加固和缓冲措施。

应在间隙本体、供能变、控制箱单元上加装三维冲击记录仪（厂内运输时可仅加装震动指示器）。运输中如出现冲击加速度大于 3g 或不满足产品技术文件要求的情况，产品运至现场后应打开相应功能单元检查各部件是否完好，必要时可增加现场检查试验项目或返厂处理。

10.2 安装

GB/T 11022-2020 的 11.3.2 到 11.3.6 适用，并做如下补充：

间隙本体和供能变现场不再开盖装配；

制造厂提供间隙现场安装用图纸、安装作业指导书及指导性文件；

现场安装由施工单位负责，制造厂对现场安装工作进行指导，安装时气候条件应满足设备要求，包括温湿度、风速、无风沙、无雨雪等要求；

设备到达现场后，到货验收应在业主、监理、物资公司、施工单位、设备厂家五方见证下开展，设备验收结束后完成交接验收手续，施工单位负责设备保管；

安装前，由施工单位负责进行地基复测，表面清洁程度、平整度、预埋件及预留孔洞等应符合设计要求，并提供安装和就位需要的基础中心线，制造厂对主要基础参数和指标进行复核；

按照图纸要求将间隙精准就位，复核就位精度符合设计要求；

施工单位负责间隙支撑等与地基之间的固定工作，包括埋件焊接、地脚螺栓等固定；

制造厂负责指导现场对接、密度继电器安装、气路连接等工作，施工单位配合；

施工单位负责间隙本体及供能变充气、对接面气密性试验、设备接地、触发控制箱、汇控柜吊装就位、电缆及槽盒的现场敷设。

10.3 调试

GB/T 11022-2020 的 11.3.2 到 11.3.6 适用，并做如下补充：

间隙到现场后需开展设备检查、组装接线、充补气体和试验调试等工作，建议按照如下方法开展：

- a) 设备检查：检查所有材料和部件完好无损；测量光纤绝缘子内光纤光损；测量供能变输出是否正常。现场汇控柜及触发器控制箱二次配线前应检查各处接线是否松动、控制柜内电器件是否松动和位置窜动、放电回路导流排及固定螺栓是否松动。触发测控系统功能模块检查，应工作正常。
- b) 组装接线：完成间隙就地部分组装；完成站内供电系统-汇控柜-控制箱及供能变间的供电电源接线；完成本体与触发器之间的触发接线；完成控制箱-光纤绝缘子-间隙控制器-上级测控系统之间的光纤连接、熔接。
- c) 充补气体：混合气体应采用符合要求的商用混合气体或专用的充补气装置。先对间隙本体抽真空，之后给间隙本体充气至额定压力，静止 24h 后，开展密封、混合比和水分测试。
- d) 交接试验：开展如表 7 中试验项目，间隙安装后首先开展常规的外观、接线和气体检测，之后进行间隙整机耐压、触发测控系统功能检查、防爆燃保护功能检查，最后进行间隙整机触发试验。试验后再与主回路连接。

表7 间隙交接试验项目

序号	试验项目	试验目的	试验方法
1	安装的外观检查	检查产品标识、铭牌、配管和接地、外观、螺栓、防水、油漆等是否正确	符合技术要求，无破损、锈蚀等异常。

2	配线检查	检查二次控制回路电缆及光纤连接的正确性	配线正确，无损坏、无松动、无虚接等异常情况。
3	SF ₆ 气体的验收	检查充入间隙整机内新气的质量证明书，抽样质量复核。	
4	供能变检查	检查供能变极性、线圈电阻、电压比和空载电流	(1) 测量极性，绕组直流电阻； (2) 检查电压比； (3) 低压空载电流测量。
5	绝缘电阻测量	检查间隙、供能变一次绕组和套管的绝缘电阻	2500V 兆欧表，绝缘电阻>2000MΩ。
6	辅助回路的绝缘试验	考核间隙、供能变辅助和控制回路的绝缘性能。	2500V 兆欧表，绝缘电阻>10MΩ。
7	气体密度继电器的检查	检查密度继电器气压指示、报警和闭锁动作值	
8	密封试验	考核现场间隙整机装配后各密封部位的漏气率	年漏气率≤0.1%
9	SF ₆ 气体湿度测量	考核产品气室内 SF ₆ 气体水分含量	间隙气室按照灭弧室标准，应小于 150 μL/L； 隔离变气室<250 μL/L。
10	整机耐压试验	考核间隙整机耐压水平	按照额定值的 100%开展 1min 工频耐压试验。 试验期间可开展触发测控系统断电、上电不误动功能测试。
11	触发测控系统功能检查	检查电容器充放电及间隙触发等基本功能	(1) 进行触发器电容器充电和停电电容器放电，检查电容器电压监测信号，判断电容器充放电功能是否正常。 (2) 触发器电容器充电 200~300V，通过触发控制器调试口，发出触发命令，检查各触发腔回路接线及晶闸管触发功能是否正常。
12	防爆燃保护功能检查	检查换流变严重故障下的防爆燃保护基本功能	(1) 外观及接线检查 (2) 通电检查 (3) 交流模拟量测量精度检查 (4) 交流模拟量零漂及线性度检查 (5) 保护功能校验 (6) 通讯和回路校验 (7) 通讯传动校验 (8) “试验”、“通道”软压板屏蔽出口试验
13	间隙整机触发试验	检查防爆燃保护检测故障、发出间隙触发命令和间隙触发功能。	间隙不接入系统，使用直高发给间隙施加最低可触发电压，使用继电保护测试仪模拟故障电流输出至防爆燃保护，检查间隙是否能够可靠触通。

10.4 运行

GB/T 11022 适用。

10.5 维护

间隙具有状态监测和动作录波功能，据此开展运维。

间隙动作检查：①当所保护的换流变发生内部严重故障时，检查间隙动作情况，查看间隙状态监测参量，必要时调取录波，分析正常运行及触发动作是否正常；②间隙每次动作后检测 SF₆气压和分

解物，判断是否有异常燃弧；③考虑现场使用的可靠性，可在设备未达到电寿命时提前检修，如累计动作次数超3次，或短路通流超过50kA、2次，现场检修更换触头（含触发腔），开展交接试验（防爆燃保护调试免做）。

年度开展例行检修：①触发测控系统调试，间隙从防爆燃保护处退出运行，单独检测触发测控系统功能，方法与交接试验相同；②SF₆气体状态检测，包括气压、水分和分解物；③其余常规检查项目。

11 安全

GB/T 11022 适用。

12 产品对环境的影响

GB/T 11022 适用。

附录 A

(资料性)

间隙旁路换流变防爆燃方法

间隙旁路换流变防爆燃原理如图 A.1 所示，间隙分相安装于换流变网侧对地，换流变内部严重接地故障情况下（套管根部、绕组首端及高压侧接地，和 10%以上绕组对地短路等），采用换流变超高速防爆燃保护，能够 6-11ms 内快速识别故障并发出间隙触发指令；间隙能够 1ms 内快速触发导通形成低阻弧道，转移熄灭换流变内部油中电弧，故障清除时间大幅缩短约 80%至约 7-12ms，从而大幅降低故障电弧能量防爆燃。

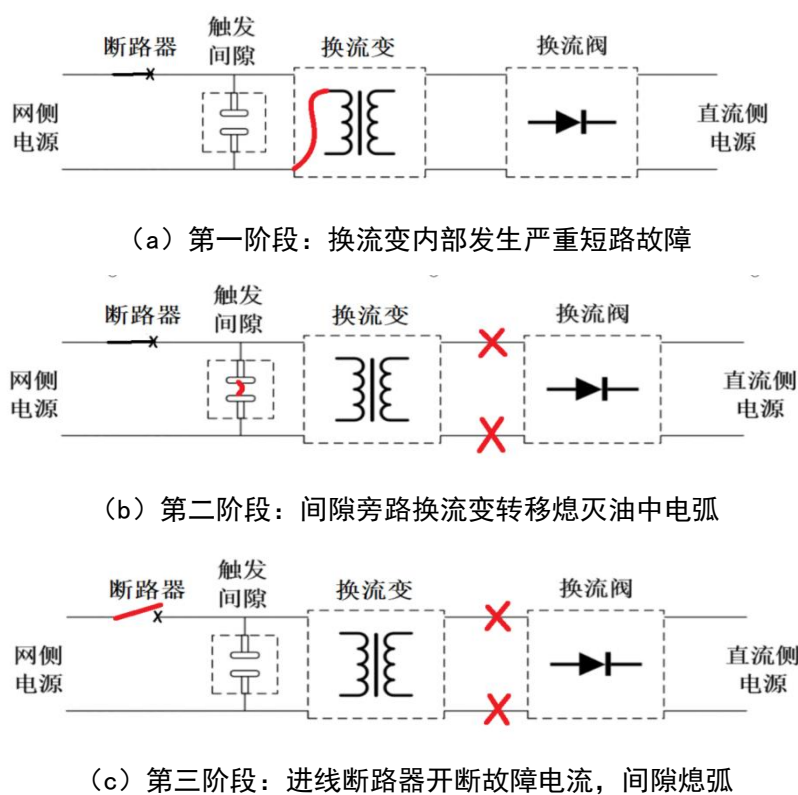


图 A.1 间隙旁路换流变防爆燃原理

附录 B

(资料性)

间隙结构组成及工作原理

间隙整机结构如图 B.1 所示，由间隙本体、触发测控系统、供能变和光纤绝缘子等构成，可配用专用的防爆燃保护。

间隙本体采用 SF₆ 气体绝缘，复合外套+单间隙结构，等离子体双边对喷触发导通，内部结构如图 B-1 所示，由复合套管，上、下盖板及导电杆、上下屏蔽法兰及电极，断口绝缘支撑筒（棒）及防弧罩，过渡套管和金属筒构成。高压进线从上盖板引入，经上导电杆连接上电极，下电极经下导电杆和下盖板连接低压出线。上、下电极为平行平板电极，构成稍不均匀场的气体间隙，断口绝缘支撑筒（棒）和上下安装法兰形成稳定的支撑结构，保证间隙距离和上下电极同轴度，不受长导电杆的影响。电极内置触发腔，在触发器中电容放电烧蚀下会产生等离子体从电极表面小孔喷出，畸变间隙电场引起放电。电极板刻螺旋槽形成自磁场旋弧电极，在间隙通流过程中控制电弧沿电极表面旋转，防止局部过度烧蚀，断口绝缘筒内设耐烧蚀防弧罩，进一步控制电弧扩散。过渡套管防止大电流沿支架入地，金属筒用于安装充气口、防爆膜，触发引线法兰等。

触发测控系统由高、低压侧触发器、测量单元、控制器和 61850 合并单元构成，连接关系如图 B-2 所示。触发器为电容器组受控充放电回路，提供触发能量烧蚀触发腔产生等离子体喷射。测量单元包括间隙电压和间隙电流测量采集设备。间隙电压测量以断口间电容为一次电容构建电容分压器，模拟量采集采用“三取中+一路备用”冗余设计；间隙电流测量采用外置罗氏线圈，按双冗余配置；模拟量就地转换为光信号送至触发控制器。控制器负责间隙触发的状态监测及触发命令输出，与防爆燃保护交叉互联，和触发器均为独立双冗余设计，实现独立/连续两次触发，安装于继保室，通过光纤连接就近的防爆燃保护、现场的触发器和测量单元，以保证高可靠性。间隙控制器接到防爆燃保护触发命令后，判断间隙电压满足触发范围，快速控制触发器中电容器向间隙本体上下电极中的触发腔放电，产生等离子体喷射触发间隙导通。

供能变和光纤绝缘子为高压侧触发器提供电能和通讯。

防爆燃保护能够快速识别换流变内部严重故障，分相通过光纤调制信号出口，将触发命令发给间隙触发控制器。

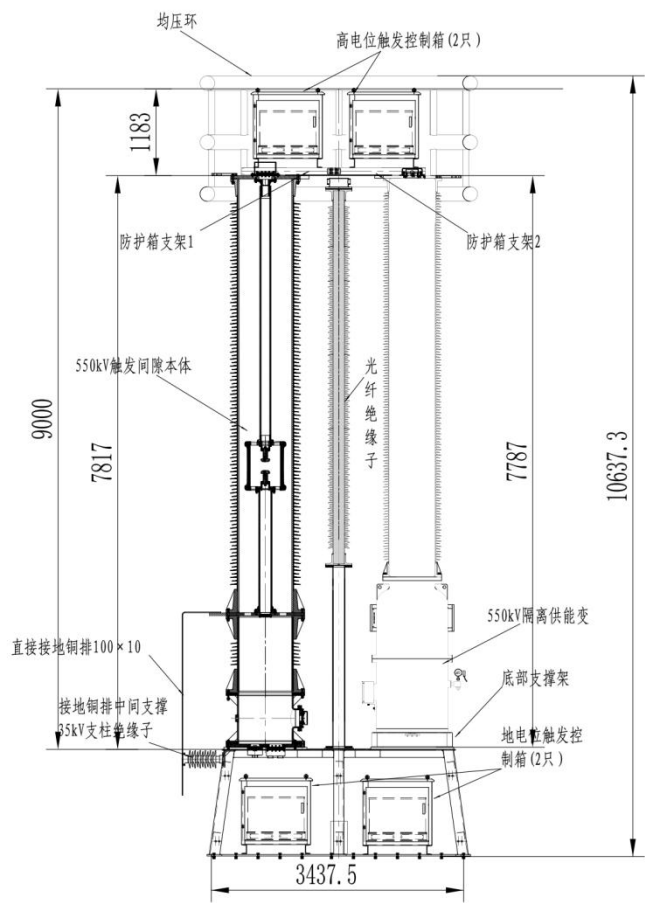


图 B.1 间隙整机结构（去掉尺寸）

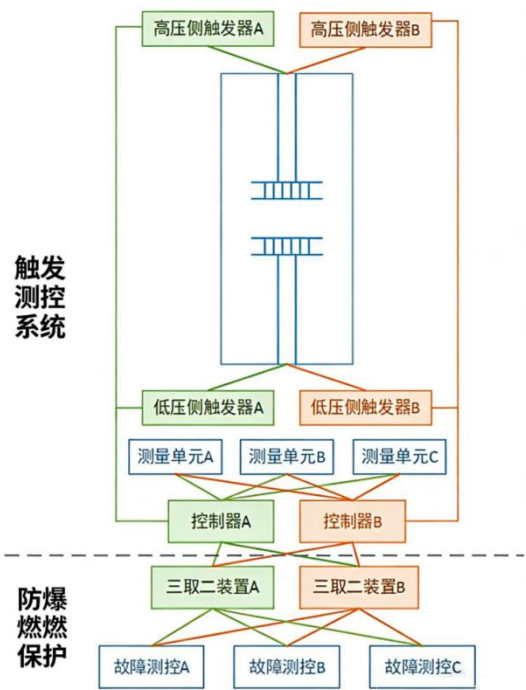


图 B.2 间隙触发腔、触发测控系统与防爆燃保护之间连接关系