

团 体 标 准

T/CES —202×

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

Technical specification for plasma jet trigger gap for fast control of UHV DC controllable
and adaptive energy absorption device

征求意见稿

××××- ××- ××发布

××××- ××- ××实施

中国电工技术学会 发布

目 次

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 标志 2

4.1 触发间隙型号 2

4.2 触发间隙铭牌 3

5 正常运行条件 3

6 额定值 3

6.1 概述 3

6.2 额定电压 4

6.3 额定绝缘水平 4

6.4 额定短路电流 4

6.5 最低可触发电压 4

6.6 触发导通时延 4

6.7 触发器和控制系统的额定电源电压和频率..... 4

6.8 绝缘气体种类、压力和额定混合比（适用时）、压力..... 4

7 关键技术要求及设计实现 5

7.1 基本结构设计 5

7.2 绝缘气体 6

7.3 绝缘 7

7.4 触发 7

7.5 通流及绝缘恢复 8

7.6 内部燃弧压力承受设计 9

7.7 测量控制 10

7.8 供能变 11

7.9 绝缘平台 12

8 型式试验 12

8.1 概述 12

8.2 间隙整机试验 13

8.3 控制系统试验 18

8.4 间隙成套装置电晕及绝缘平台绝缘试验..... 24

8.5 关键组部件型式试验注意事项 25

9 出厂试验 25

9.1 概述 25

9.2 间隙整机老练及绝缘试验 26

9.3 触发器绝缘试验 26

9.4 控制系统长时运行试验 27

9.5 关键组部件出厂试验注意事项 27

10 现场验收试验 27

11 运输和运行维护规则 28

附录 A（资料性）特高压混合直流工程可控自恢复消能装置接线和工作原理 29

附录 B（资料性）等离子体喷射触发间隙结构组成及工作原理..... 31

附录 C（资料性）混合比 30%的混合气体中场强控制值 35

附录 D（资料性）内部燃弧压力升高计算方法 37

前 言

本文件根据 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》给出的规则起草。

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这些专利的责任。

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技术及装备工作组归口。

本文件起草单位：中国电力科学研究院有限公司、西安交通大学、山东泰开高压开关有限公司、大连理工大学、国网江苏省电力有限公司电力科学研究院、西安西电高压开关有限责任公司、中电普瑞科技有限公司。

本文件主要起草人：。

本文件为首次发布。

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

1 范围

本文件中规范的等离子体喷射触发间隙（以下简称触发间隙）用于特高压直流工程可控自恢复消能装置的快速控制。特高压混合直流工程中，受端交流电网故障容易导致功率冗余，在柔直母线上出现过电压，需要快速泄放能量抑制过电压。需要在柔直母线上加装可控自恢复消能装置，本质为大容量可控避雷器。触发间隙与可控部分并联，接到命令后快速触发导通将可控部分旁路，仅投入固定部分深度抑制过电压并吸收冗余能量，保护柔直阀组。触发间隙通过产生等离子体喷射的触发方式实现主电极气体间隙在极低电压下的快速触发导通，短时通过大电流直至并联的快速断路器关合或系统故障开断，触发间隙快速熄弧并绝缘恢复，具备下一次触发导通的能力。其他等级可以参考使用。

本文件适用于触发间隙，规范了标志、正常运行条件、额定值、关键技术要求和设计实现、型式试验、出厂试验、现场验收试验、运输和运行维护规则等内容。

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 38328—2019 柔性直流系统用高压直流断路器的共用技术要求

GB/T 11022—2020 高压交流开关设备和控制设备标准的共用技术要求

GB/T 12022 工业六氟化硫

GB/T 8979 纯氮、高纯氮和超纯氮

GB/T 8320 铜钨及银钨电触头

GB/T 21429 户外和户内电气设备用空心复合绝缘子定义、试验方法、接收准则和设计推荐

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 11023 高压开关设备六氟化硫气体密封试验方法

GB/T 4208 外壳防护等级（IP等级）

GB/T 7261 继电保护和安全自动装置基本试验方法

GB/T 17626 电磁兼容 试验和测量技术 系列标准

GB/T 2434 电力电子产品环境试验 系列标准

GB/T 15972 光纤试验方法规范 系列标准

3 术语和定义

3.1

触发间隙型可控自恢复消能装置 Trigger gap Controlled adaptive energy absorption device

通过触发间隙实现快速控制的可控自恢复消能装置，简称消能装置。核心是触发间隙控制的可控

避雷器，接线及工作原理详见附录 A。当混合直流输电系统受端交流侧故障，能量无法送出时，柔直阀组上会出现过电压，消能装置控制系统检测到过电压，命令触发间隙快速导通将避雷器可控部分旁路，深度抑制过电压，提高冗余能量吸收能力，保护柔直阀组并实现故障穿越。然后与触发间隙并联的断路器关合转移间隙电流或系统故障电流开断，触发间隙熄弧恢复绝缘，断路器在故障清除后开断避雷器直流泄漏电流，将消能装置再次投入运行。

3.2

等离子体喷射触发间隙 Plasma jet trigger gap

简称触发间隙（GAP），通过产生和喷射等离子体引起间隙导通的装置。包含气体绝缘的间隙本体、触发器、控制系统，及控制箱、供能变、绝缘平台（包含支撑平台、光纤绝缘子、充气绝缘子）等辅助系统，工作原理详见附录B。间隙本体内置主电极及导电结构，主电极内嵌等离子体喷射触发腔。当控制系统接收到消能装置控制保护发出的触发指令后，能够控制触发器快速输出触发能量，烧蚀触发腔产生大量等离子体喷入主间隙，使主间隙电场畸变引起放电，实现主间隙在极低电压下的触发导通，短时通过大电流直至并联的断路器关合，快速熄弧并绝缘恢复，具备下一次触发导通的能力。间隙本体、触发器和控制系统的全部或部分模块安装于中性线高电位，需要绝缘平台提供对地绝缘支撑，供能变提供高电位隔离供能，光纤绝缘子提供高电位通讯、充气绝缘子提供高电位充补气。

3.3

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

触发间隙能够受控触发的最低端间直流电压。

3.4

触发导通时延 triggered discharge delay of a gap

触发间隙从接收到触发指令时刻至主间隙导通时刻的时间差。

4 标志

4.1 触发间隙型号

触发间隙型号中各数字和字母代表的意义如图 1 所示。

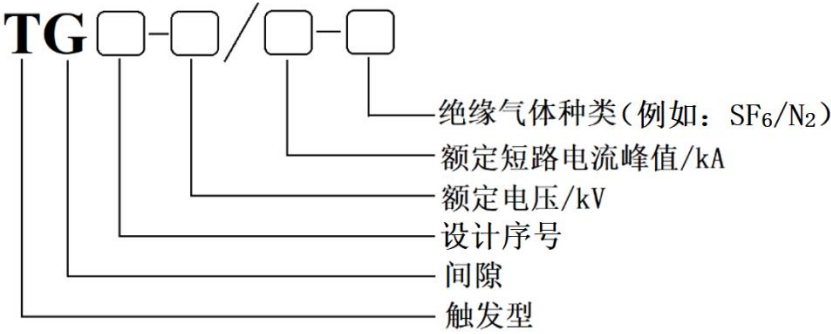


图 1 触发间隙型号定义规则

4.2 触发间隙铭牌

触发间隙的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触发间隙铭牌上。

- 研发/制造厂名或商标。
- 型号。
- 绝缘气体种类及混合比（必要时）。
- 额定气压。
- 额定电压。
- 额定雷电冲击耐受电压。
- 最低可触发电压。
- 触发导通时延。
- 额定短路电流峰值、持续时间和次数。
- 重量。
- 制造年、月。
- 出厂编号。

5 正常运行条件

触发间隙通常户内使用，运行环境条件包括以下几个方面：

- 环境温度：-5℃~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%。
- 爬电比距建议 20mm/kV。
- 地震烈度按实际工程要求。

若在户外使用时，应在以下环境条件下可靠工作：

- 环境温度：-40℃~+40℃。
- 太阳最大辐射不超过 1kW/m²。
- 海拔不超过 1000m。
- 相对湿度最大值 95%。
- 风速不大于 34m/s。
- 污秽度等级 d 级。
- 地震烈度按实际工程要求。

6 额定值

6.1 概述

触发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) 额定短路电流；
- d) 最低可触发电压；

- e) 触发导通时延;
- f) 触发器和控制系统的额定电源电压和频率;
- g) 绝缘气体种类、额定混合比;

6.2 额定电压

在规定的运行条件下，触发间隙的连续运行直流电压，等于可控消能装置可控部分额定工作电压（柔直母线额定电压*消能装置可控部分参考电压/整体参考电压），单位为kV。柔直母线额定电压从下列值中选取：

100kV、160kV、200kV、320kV、400kV、535kV

注1：以上额定值是参考GB/T38328-2019给出的。

注2：对于额定电压有特殊要求时，由供需双方协商确定。

6.3 额定绝缘水平

触发间隙的额定绝缘水平由消能装置设计确定，可取柔直母线额定绝缘水平*消能装置可控部分参考电压/整体参考电压。

绝缘水平应包括直流耐受电压（1min直流耐受电压、2h直流耐受电压）、额定雷电冲击耐受电压和额定操作冲击耐受电压（如有）。

6.4 额定短路电流

触发间隙的额定短路电流峰值、通流时间、通流次数及通流后绝缘恢复要求由消能装置设计确定。

额定短路电流峰值由受端交流系统故障时、消能装置可控部分被旁路后，流过固定部分的最大短路电流波形决定；通流时间由并联的断路器最长关合时间或系统故障最大清除时间决定。消能装置无明确要求时，通流时间按30ms考虑，通流次数按20次考虑，通流后100ms恢复耐受额定电压。

6.5 最低可触发电压

触发间隙的最低可触发电压由消能装置需要投入的可控部分长期工作电压确定，并留有一定裕度，建议可按可控部分受谐波影响后最低工作电压的90%。

6.6 触发导通时延

触发间隙的触发导通时延应 $<1\text{ms}$ 。

6.7 触发器和控制系统的额定电源电压和频率

GB/T 11022-2020的5.9适用，建议AC220V、50Hz。

6.8 绝缘气体种类、额定混合比（适用时）

触发间隙可采用SF₆或30±1%（体积比）SF₆/N₂混合气体绝缘。

7 关键技术要求及设计实现参考

7.1 基本结构设计

7.1.1 成套装置

触发间隙成套装置整体结构详见附图 B-2，由间隙本体、控制箱（内置触发器）、控制系统（可与触发器一体设计，也可部分模块放置于触发器内、部分模块放置于继保室内）、供能变和绝缘平台组成。间隙本体和控制箱安装于中性线高电位的绝缘平台上。供能变从地电位给控制箱中控制系统设备隔离供电。绝缘平台包括安装平台、支撑绝缘子、光纤绝缘子和充气绝缘子等，用于给间隙本体及控制箱中设备提供绝缘支撑、光纤通讯及充气通道。

为提高触发可靠性可考虑冗余设计，在复合外套内安装两对主电极，相应的触发器和控制系统均为独立的两套。两对主电极可以同时触发也可以相继触发。

7.1.2 间隙本体

触发间隙应采用气体绝缘的复合外套结构，包括复合绝缘筒、上下盖板和过渡桶，复合绝缘筒内部安主电极和导电杆。高压引线连接上盖板，经高压导电杆引入间隙连接高压电极，低压电极放置于低压导电杆上与下盖板相连，经接线端子连接可控避雷器低压引线。过渡桶安装在复合绝缘筒下方，设计有充气孔、触发接线端子用绝缘法兰和防爆膜（如有），触发接线端子用于将触发器输出的触发高压引入间隙本体连接触发电极。

主电极采用平行平板电极形成稍不均匀电场，主电极内嵌触发腔，触发腔内包含触发电极。烧蚀触发腔可产生等离子体喷入气体间隙，实现可靠导通。

主电极为螺旋槽自磁场电极结构，触发间隙导通后电极间燃弧维持通流。在自磁场电动力作用下电弧会沿间隙边缘高速旋转，避免电极局部烧蚀。

高、低压主电极平行度、同轴度和旋弧槽方向对间隙性能有重要影响。应保证加工精度，并出厂前在工装上进行预装配，确认满足平行度、同轴度、同一间隙上下电极旋弧瓣旋向一致且槽口相对、两对间隙旋弧瓣方向相反等控制因素后，再正式安装。

7.1.3 触发器

触发器包括储能电容、晶闸管组件、充电装置、放电回路和其他元件。晶闸管组件用于控制储能电容放电，输出触发高压；充电装置用于对储能电容快速充电，并实时监测储能电容电压；放电回路用于触发器断电时泄放储能电容能量，保证运维人员安全；其他元件包含脉冲变压器、电阻和小电容

等，依据不同触发需求配置。

7.1.4 控制箱

控制箱为触发器和控制系统提供外壳防护。

触发间隙在户内运行时，控制箱防护等级应满足 IP44。

触发间隙在户外运行时，控制箱防护等级应满足 IP55，还应考虑防寒、防腐、防雨、防风、防潮、的性能。

7.2 绝缘气体

7.2.1 技术要求

触发间隙建议采用绝缘和灭弧性能较好的 SF₆或 SF₆/N₂混合气体（以下简称混合气体），并规定额定压力、最高压力和最低压力，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。

最高压力建议不超过额定压力 1.05 倍，以免影响触发性能。

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按照额定压力的 0.95、0.97。

制造方应提供混合气体的气室容积和气体质量要求，并为用户提供充入气体、气体监测、及回收气体的必要说明。

7.2.2 成分及参数要求

若采用 SF₆气体绝缘，应满足如下要求：SF₆应使用符合 GB/T 12022 的新的气体，气体中水分含量允许值，交接验收时≤150μL/L，运行时≤300μL/L，年漏气率≤0.5%。

若采用混合气体绝缘，应满足如下要求：

- a) SF₆应使用符合 GB/T 12022 的新的气体，N₂气体应符合 GB/T 8979 的要求。SF₆/N₂混合气体应控制混合比、成分、水分。
- b) 混合气体混合比偏差不超过±1%。
- c) 使用混合气体压力表（带继电器）进行本体气体压力监测。
- d) 混合气体中水分含量允许值，交接验收时≤120μL/L，运行时≤250μL/L。
- e) SF₆年漏气率≤0.15%。

7.3 绝缘

7.3.1 技术要求

触发间隙应保证在气体最低工作压力下满足内绝缘要求。

在 1.1 倍额定电压下外部无电晕，1.2 倍额定电压下内部无局放。

7.3.2 内绝缘设计

触发间隙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，混合气体中的场强控制值可参考附录 C。

触发间隙本体用复合绝缘筒在 1.2 倍额定电压下应无局放。

7.3.3 外绝缘设计

触发间隙本体高、低压接线端子和绝缘平台边缘应圆角防止电晕，必要时安装均压环。

7.4 触发

7.4.1 触发方式

触发间隙通过触发电极与主电极间放电燃弧，烧蚀触发腔产生等离子体喷射的触发方式实现在间隙两端极低电压下快速触发导通。

7.4.2 可靠触发气压

触发间隙在气体压力范围内均能可靠触通，尤其是在超出额定运行压力的最高压力下也能保证触发可靠。

7.4.3 触发导通时延

间隙触发设计应保证正/负最低可触发电压下均能在 1ms 内能可靠触通。

7.4.4 配合系统重合闸的触发设计

间隙应具备“触发→300ms 后再次触发”的触发能力，以满足系统重合闸需求。触发器内可设计两套独立的触发回路，即可相继放电实现间隔 300ms 连续放电，也可作为冗余提高触发可靠性。

7.4.5 触发腔

触发电极应为耐烧蚀材料，建议选择铜钨合金。

触发腔所用绝缘材料在电弧烧蚀下应可以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，建议采用聚四氟乙烯。应避免在聚四氟乙烯等

质地较软的沿面放电材料上打螺纹孔用于限位或与其他部件固定。

触发腔属于精密零件，设计时通过加工公差的配合确保各部分紧密压接不存在寄生容积。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。

7.4.6 触发器

触发器电压、电流输出特性应与触发腔结构匹配，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，过度烧蚀触发腔降低触发寿命。

触发器内储能电容应选择干式自愈式电容，避免选择油绝缘电容。

触发器额定工作电压应低于 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。

触发器内电容电压正常是触发成功的最关键因素，触发过程中电容电压的变化可反应触发腔状态。因此，可以实时监测触发器内电容电压用于现场运行监测。

触发器内元件接地端汇聚一点与间隙本体低压端单点连接，触发器外壳通过控制箱外壳和间隙本体低压端等电位连接，由此实现触发器内元件与触发器外壳单点连接，防止触发过程中地电位浮动导致触发器壳体通流。

7.5 通流及绝缘恢复

7.5.1 基本要求

触发间隙应按技术要求具备大容量通流能力，通流后应能快速绝缘恢复，以便消能装置可控部分再次投入运行。绝缘恢复要求由消能装置提出，若无明确要求可按 100ms 后恢复耐受额定电压设计。

触发间隙通过高、低压主电极间燃弧维持电流导通，主电极应具备足够抗电弧烧蚀性能。通流后主电极表面烧蚀均匀，无龟裂、开裂、掉渣等。通流中应避免电弧扩散到主电极背面或导电杆等部位，产生大量金属蒸汽影响控弧。

7.5.2 导体通流要求

触发间隙导体为悬臂结构，应开展电动力校核，确认通流不会破坏间隙高、低压电极平行度及同轴度。

间隙高、低压导电杆应满足额定短路峰值电流、3s 的通流能力。

7.5.3 主电极材料及结构

主电极板应采用耐烧蚀的 CuW80 材料，整体烧结溶渗工艺，特性需满足 GB/T8320 中 4.1 和 4.3

铜钨触头相关规定。烧结溶渗后应将铜基座完全去除只留铜钨材料，避免通流过程中烧蚀铜基座产生大量铜蒸汽影响控弧。

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移动到电极边缘快速旋转，减轻电弧对主电极烧蚀。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。旋弧槽旋向设计时应保证安装后，同间隙上下电极旋弧槽旋向一致，双间隙结构中两个间隙旋弧槽旋向相反。电极座中内置触发腔，不宜过短，防止通流时电弧烧蚀电极座；也不宜过长，给触发腔加工增加困难。

7.5.4 复合绝缘筒

复合绝缘筒选型需考虑燃弧过程中高温的影响，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。但电弧不应烧蚀内壁造成复合绝缘筒机械或绝缘性能下降。

触发间隙通流及绝缘恢复型式试验后，应接触发间隙额定绝缘水平的 80%开展绝缘试验，试验中不再测量局放。若发现复合绝缘筒有烧蚀，应酌情开展例行水压试验和破坏水压试验。

7.5.5 防弧罩

必要时可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。

7.6 内部燃弧压力承受设计

7.6.1 需耐受的正常燃弧工况

触发间隙导通后电极间燃弧，直至并联断路器关合后间隙熄弧。连续两次通流后，间隙应能耐受燃弧导致压力升高。

7.6.2 允许压力释放的异常燃弧工况

触发间隙导通后电极间燃弧，并联断路器拒合，在电网最严重短路电流下燃弧超过 100ms，允许间隙压力释放。压力释放应不影响人员及其他设备安全。

7.6.3 设计校核

上述工况需要开展内部燃弧压力升高仿真结合防爆膜参数进行校核。混合气体中燃弧压力升高计算方法可参考附录 D。

7.7 测量控制

7.7.1 关键测量参量

触发器内储能电容电压可反应间隙触发性能，间隙电压和间隙电流可以用于判断间隙能否导通，均应实时监测。

若消能装置测控系统中设计了间隙电压和间隙电流测量设备，可以直接引用。

7.7.2 控制功能

（1）间隙触发

触发间隙控制系统接收触发指令后，在触发回路储能电容电压和间隙电压判断满足触发条件时，控制晶闸管导通使储能电容放电，从而使间隙导通，并自动累计间隙触发次数，间隙触发后可发出电信号用于与断路器等联动（需要时）。可以接收四种触发信号：

- ① 光纤触发：控制系统光纤口接收控保装置下发的触发命令。
- ② 电控触发：控制系统电控口接收无源/DC220V 电信号的触发命令。
- ③ 以太网口触发：控制系统以太网口接收后台调试软件发送的触发命令。
- ④ 自触发：控制系统通过模拟量采集端口监测电压/电流，判断达到设定触发阈值时自行触发。

（2）控制系统状态监测

间隙控制系统实时监测控制系统自身工作状态、与上级控保系统的通信状态，并将自检状态实时报送给控保系统。控制系统可完成三种状态监测目标：

- ①通过光纤接至上级控保装置，将控制系统的实时状态上传至上级控保装置。
- ②检测接收到上级控保下行信号的光功率，异常时上报。
- ③（调试用）通过以太网在上位机测试软件显示间隙触发控制系统的状态以及模拟量数据。

（3）电压电流模拟量采集及保护监控

控制系统实现对触发回路储能电容电压、间隙电压和间隙电流模拟量的采样和录波，间隙电压和电流信号也可共用系统测量装置信号。

（4）间隙状态监测

控制系统在未接到间隙触发命令时，实时判断间隙是否触发就绪、是否存在异常放电；在发出触发回路晶闸管导通命令后，判断晶闸管是否导通成功、间隙是否触发成功。

（5）触发回路储能电容充电控制及保护

控制充电装置对触发电容快速充电，可根据触发需求控制储能电容充电电压。实时监测储能电容状态，异常时将该触发回路退出。

（6）掉电保护

间隙控制系统应具备在系统电源短时（200ms 以内）掉电后正常工作的功能（实现正常触发和信息上送等）。

7.7.3 控制系统端子对壳绝缘要求

绝缘电阻：不低于 100MΩ；

工频耐压：2kV，1min。

7.7.4 控制系统电磁兼容水平

按特高压直流工程中控制保护系统电磁兼容水平要求，触发间隙控制系统的电磁兼容水平如表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

7.8 供能变

7.8.1 结构

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。

7.8.2 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，套管导电杆和二次绕组采用悬挂绝缘结构，避免使用环氧绝缘件。自然冷却。绝缘材料均为阻燃材料，防火阻燃等级UL 94 V-0。

一次绕组为220V/2kVA绕组，端子间和对地绝缘AC500V，1min；二次绕组为220V/2kVA绕组，端子间绝缘AC500V，1min，二次绕组对地（一次绕组和铁芯）绝缘水平与中性线绝缘水平相同。

7.8.3 稳定性

一次绕组输入端设计开关电源稳压模块，输入电压变化 $\pm 20\%$ 时，二次绕组输出电压波动控制在 $\pm 2\%$ 以内。额定功率下输出电压下降小于5%。绕组温升不大于40K。

7.9 绝缘平台

绝缘平台中支撑绝缘子、光纤绝缘子和充气绝缘子，均应采用复合外套结构，绝缘水平与中性线相同。要满足<GB/T21429 户外和户内电气设备用空心复合绝缘子定义、试验方法、接收准则和设计推荐>。

支撑绝缘子应开展机械受力校核。

光纤绝缘子中光纤数目按双倍冗余设计。

充气绝缘子承压设计应与间隙本体复合绝缘筒相同。

7.10 无线电干扰电压水平

在施加 1.1 倍额定电压时，无线电干扰电压水平不超过 2000 μ V。

8 型式试验

8.1 概述

触发间隙型式试验分间隙整机、触发器和控制系统和成套装置三部分开展。触发间隙本体和控制箱（包含触发器）、控制系统构成间隙整机，可实现间隙绝缘、触发和通流等关键性能，间隙整机型式试验中对触发器和控制系统的功能和稳定性也进行了考核。控制系统试验主要开展在间隙整机试验中没有考核到的绝缘、电磁兼容和环境等项目。成套装置重点考核间隙整机安装于中性点高电位时的电晕，以及绝缘平台的绝缘性能。具体型式试验项目及方法，如表 2 所示。其余关键组部件型式试验按相关标准开展，本标准中仅提出了需要重点关注的试验项目。

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		触发功能试验	见本文件 8.2.2	
3		触发寿命试验	见本文件 8.2.3	
4		直流通流及绝缘恢复试验	见本文件 8.2.4	
5		密封试验	见本文件 8.2.5	
6		气体混合比	见本文件 8.2.6	混合气体绝缘的触发间隙适用

序号	试验项目		试验方法及判据	备注
7		气体水分含量测定	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	控制系统	控制系统绝缘试验	见本文件 8.3.1	
10		触发器和控制系统电磁兼容试验	见本文件 8.3.2~8.3.10	
11		控制系统环境试验	见本文件 8.3.11	
12	间隙成套装置	成套装置电晕及绝缘平台绝缘试验	见本文件 8.4	

8.2 间隙整机试验

8.2.1 绝缘试验

(1) 试验目的

检验间隙本体绝缘耐压能否满足要求。

(2) 试验样机

对间隙本体开展试验，可以不带控制箱。间隙本内充最低压力气体。

(3) 试验内容

10s 直流耐压、2h 直流耐压、操作冲击耐压试验（如有）、雷电冲击耐压试验。

(4) 试验方法及判据

依据 GB/T 16927.1，低压端接地，高压端对地加压，考虑正负极性，最后一项试验应为直流耐压。

8.2.2 触发功能试验

(1) 试验目的

检验间隙在最低可触发电压下触发能力。

(2) 试验样机

对间隙本体带控制箱及内部全部设备开展试验，间隙本体内充最高压力气体。

(3) 试验方法及判据

对间隙本体带控制箱及内部全部设备开展试验。

试验电路如图 8-1 所示，选用大功率直流电源配 $M\Omega$ 级保护电阻，可在间隙触通至熄弧的短时燃弧瞬间不因短路保护跳闸。间隙本体两端分别施加正、负极性最低可触发电压，重复试验 3 次，每次试验间隔 10 分钟。试验过程中监测间隙两端电压及电流，要求间隙可靠单次或连续（必要时）触通

(触通判据为间隙电压 0.5ms 内跌落至低于 10%，或出现 5A 以上间隙杂散电容放电电流)，不得出现误触发或拒触发。

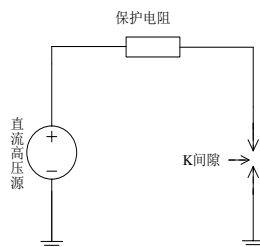


图 8-1 触发试验回路

8.2.3 触发寿命试验

(1) 试验目的

检验触发可靠性及寿命。

(2) 试验样机

间隙设计多套触发腔、触发器和控制系统时，可仅对间隙本体带控制箱及内部一套触发器和控制系统连接一套触发腔开展试验。间隙本体内充额定压力气体。

(3) 试验方法及判据

试验电路如图 8-1 所示，间隙本体分别在正、负极性最低可触发电压下开展单次触发试验（每次间歇时间 2~3min），试验过程中监测间隙两端电压及电流，要求间隙可靠触通（判据为从接到触发命令后电压跌落，并且跌落至低于 10%时间小于 0.5ms，或出现 5A 以上间隙杂散电容放电电流），不得出现误触发或拒触发。

8.2.4 直流通流及绝缘恢复试验

(1) 试验目的

检验间隙本体直流大电流通流及通流后绝缘恢复能力。

(2) 试验样机

对间隙本体带控制箱及内部一套触发器和控制系统连接一套触发腔开展试验。间隙本体内充额定功能压力气体。间隙内部安装两对触头时，仅取一对触头开展通流试验。

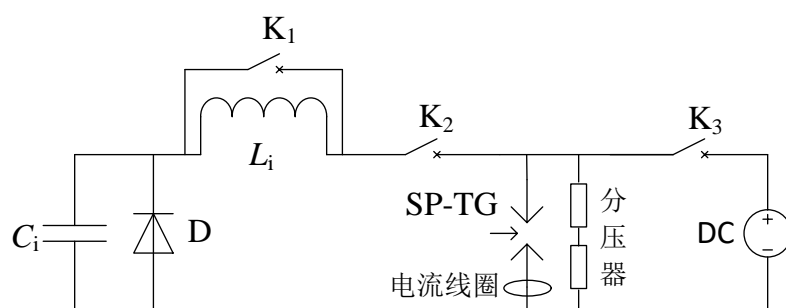
(3) 试验方法

间隙本体在气体额定工作压力下开展试验正、负极性通流试验次数各半，单次试验间隔 0.5h。通流试验结束后进行绝缘检查。

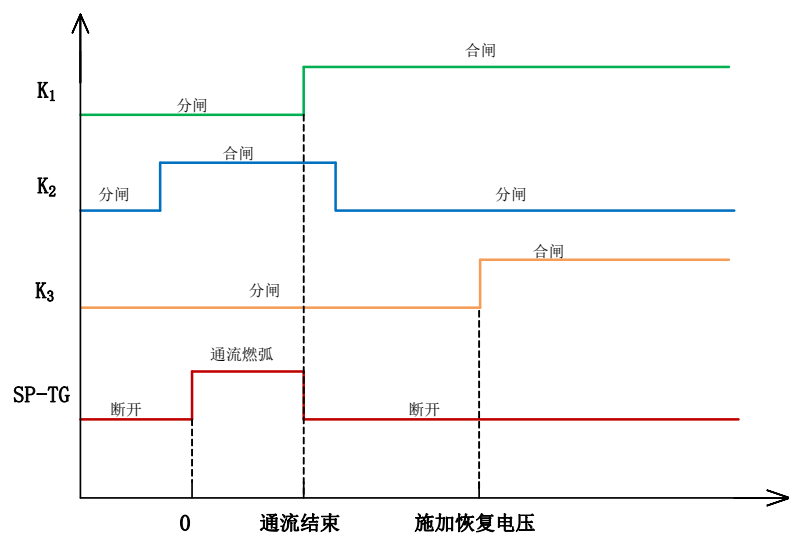
触发间隙直流通流试验可采用如图 8-2 (a) 所示电路, 通流后施加直流恢复电压。SP-TG 为试品触发间隙。电流源回路采用电容器组振荡放电+二极管续流的方式产生直流衰减电流。 C_i 为电流源储能电容, 提供间隙最低可触发电压, 与电感 L_i 振荡产生大电流。续流二极管 D 与储能电容反并联, 当电流到达峰值时电容器组电压反向, D 导通将 C_i 旁路, 与 L_i 、SP-TG 组成直流衰减电流回路。当试验电流与工程要求差距较大时, 可在电流峰值满足要求的前提下, 通过控制燃弧时间开展通电荷量等效试验。

各开关动作时序如图 8-2 (b) 所示。 K_2 关合用于电流源接通, 断开后隔离电压源保护电流源回路设备。间隙通流后, K_1 闭合转移间隙电流至“ L_i+K_1 ”支路, 协助间隙熄弧并降低续流二极管通流量。开关 K_3 接通用于接通直流电压源施加直流恢复电压。试验方法如下, 依据此回路开展的 DC80kV 触发间隙通流试验波形如图 8-2 (c):

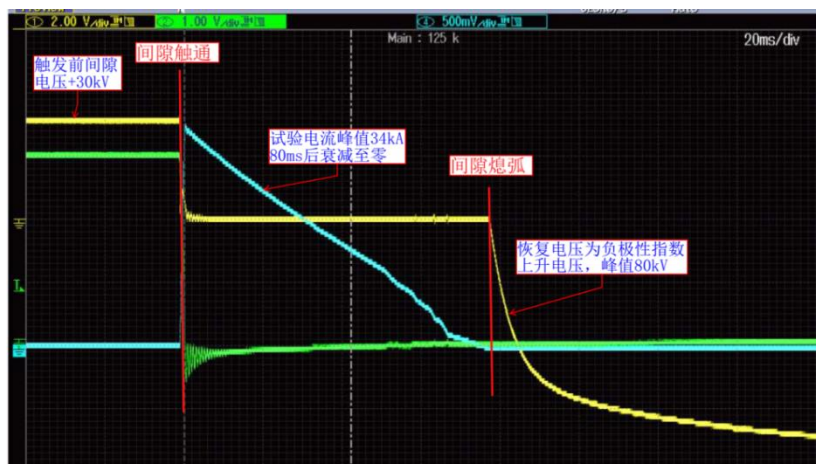
- (1) 试验前 K_1 和 K_2 均处于分闸状态, 给电流源电容 C_i 充电, 并将直流电压源输出升至恢复电压值。
- (2) 令 K_2 合闸接通, 电流源提供试品 SP-TG 最低可触发电压。
- (3) 试验开始计时, 0ms 控制 SP-TG 触通, 电流源回路放电形成直流衰减电流。
- (4) 按 SP-TG 通流时间要求, 控制 K_1 闭合转移 SP-TG 电流, SP-TG 熄弧开始绝缘恢复。
- (5) 控制 K_2 在恢复电压施加前分闸, 隔离电压源。
- (6) 根据 SP-TG 绝缘恢复时间要求, 控制 K_3 闭合施加直流恢复电压, 可考核 SP-TG 绝缘恢复速度。
- (7) 试验结束后控制 K_1 和 K_3 断开。



(a) 试验回路



(b) 开关动作时序



(c) DC80kV 触发间隙直流通流试验波形

图 8-2 直流通流及绝缘恢复试验回路及参考试验波形

(4) 试验合格判据

试验电流最大值 I 等于触发间隙短路电流峰值，单次通流电荷量不低于短路电流峰值*通流时间。
通流试验后，按 8.2.1 进行全部绝缘试验，试验电压按 80%，气压按额定压力，间隙绝缘试验应能通过。
解体检查试品触头应无明显变形、开裂。

8.2.5 密封试验

(1) 试验目的

检验间隙本体密封性能。

(2) 试验样机

对间隙本体开展试验，不带控制箱、触发器及控制系统。间隙本体内充额定功能压力气体。

(3) 试验参数

SF₆ 绝缘间隙，SF₆ 年泄漏率≤0.5%，混合气体绝缘间隙，SF₆ 年泄漏率≤0.15%。

(4) 试验方法及判据

按 GB/T11023 中 4.2.1 SF₆ 气体检漏方法开展试验。

8.2.6 气体混合比测定

(1) 试验目的

检验混合气体绝缘的间隙本体气体混合比。

(2) 试验样机

对间隙本体开展试验，不带控制箱、触发器及控制系统。间隙本体内充额定功能压力气体。

(3) 试验参数

气体混合比 30%±1%。

(4) 试验方法及判据

试验按照 GB/T12022 中相关要求进行。

8.2.7 水分含量测定

(1) 试验目的

检验间隙本体气体水分。

(2) 试验样机

对间隙本体开展试验，不带控制箱、触发器及控制系统。间隙本体内充额定功能压力气体。

(3) 试验参数

SF₆ 气体绝缘间隙水分≤150μL/L，混合气体绝缘间隙水分≤120μL/L。

(4) 试验方法及判据

试验按照 GB/T12022 中相关要求进行。

8.2.8 控制箱防护等级试验

(1) 试验目的

检验控制箱防尘防水性能。

(2) 试验样机

仅对控制箱开展试验，不带触发器及控制系统。

(3) 试验方法及判据

试验按照 GB 4208 中相关要求进行的。

8.3 控制系统试验

8.3.1 绝缘试验

(1) 试验目的

检验控制系统板卡对壳绝缘水平。

(2) 试验样机

仅对单台控制系统开展试验。

(3) 试验参数

1min 工频耐压 2kV。

(4) 试验方法

试验按照 GB/T 7261 中 13.2 相关要求进行，外壳接地，对端子和外壳加压（适用时）。

(5) 试验判据

控制系统内部无闪络无击穿。

8.3.2 静电放电抗扰度试验

(1) 试验目的

检验控制系统抗静电干扰能力。

(2) 试验样机

仅对单台控制系统开展试验，可带触发器和间隙下电极，通过下电极是否产生等离子喷射辅助判断触发是否正常。

(3) 试验参数

满足 GB/T17626.2 中规定的试验等级为 4 级的抗扰度要求。

(4) 试验方法

试验方法按照 GB/T 17626.2 相关规定的执行。实时通过上位机监测试品运行状态。

(5) 试验判据

干扰过程中和干扰结束后，产品无损坏、无异常事件记录，性能正常。

8.3.3 射频电磁场辐射抗扰度试验

(1) 试验目的

检验控制系统对由无线电发射机或任何其他发射连续波形式辐射电磁能的装置所产生电磁场的抗扰度。

(2) 试验样机

仅对单台控制系统开展试验，可带触发器和间隙下电极，通过下电极是否产生等离子喷射辅助判断触发是否正常。

(3) 试验参数

满足 GB/T17626.3 中规定的试验等级为 4 级的抗扰度要求。

(4) 试验方法

按照 GB/T 17626.3 中相关规定执行，试验前确定电波暗室中实验场区满足频率和场强的均匀性（注意避免驻波和扰动反射）。整机部件置于暗室内并连接所有电气和光纤接线。设置试验设备参数如表 7 所示。

表 3 射频电磁场辐射抗扰度试验设备参数

试验项目	场强	频率
射频电磁场	30V/m	80~3000（扫频）
		80（点频）
		160（点频）
		380（点频）
		450（点频）
		900（点频）

试验开始前要求直流高压电源放在暗室外面，通过高压电源对暗室内控制系统供电，使其处于正常工作状态（可去掉静态均压电阻），然后开始进行辐射试验，整个试验进行三个方向的试验。实时通过上位机监测试品运行状态。

(5) 试验判据

干扰过程中和干扰结束后，产品无损坏、无异常事件记录，性能正常。

8.3.4 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验

(1) 试验目的

检验控制系统对极短瞬态脉冲群的抗扰度。

(2) 试验样机

仅对单台控制系统开展试验，可带触发器和间隙下电极，通过下电极是否产生等离子喷射辅助判断触发是否正常。

(3) 试验参数

满足 GB/T17626.4 中规定的试验等级为 4 级的抗扰度要求。

(4) 试验方法

按照 GB/T 17626.4 中相关规定执行。将控制系统放在 $\geq 0.1\text{m}$ 的绝缘木块上，并连接电气接线和光纤。试验分两步进行：第一步，对于电源端口试验及对试品整体性能的一个测试考虑，试验测试时通过耦合夹在试品高压输入端耦合瞬变脉冲，让试品处于正常工作状态中，然后进行瞬变脉冲群试验。通过上位机界面观察瞬变脉冲群对整个试品运行的影响情况。第二步，对控制板卡性能进行考核，测试方法为通过电源输出将干扰信号耦合串入，试品处于正常工作状态后，进行瞬变脉冲群试验。实时通过上位机监测试品运行状态。

(5) 试验判据

干扰过程中和干扰结束后，产品无损坏、无异常事件记录，性能正常。

8.3.5 浪涌（冲击）抗扰度试验

(1) 试验目的

检验控制系统电源能否具备承受浪涌（冲击）抗扰度的能力。

(2) 试验样机

仅对单台控制系统开展试验，可带触发器和间隙下电极，通过下电极是否产生等离子喷射辅助判断触发是否正常。

(3) 试验参数

满足 GB/T17626.5 中规定的试验等级为 4 级的抗扰度要求。

(4) 试验方法

试验方法按照 GBT 17626.5 中相关规定的执行，将干扰信号串入板卡电源的输入端口。实时通过上位机监测试品运行状态。

(5) 试验判据

干扰过程中和干扰结束后，产品无损坏、无异常事件记录，性能正常。

8.3.6 射频场感应的传导骚扰抗扰度

(1) 试验目的

检验电源对骚扰源作用下形成的电场和磁场的一种抗扰度。

(2) 试验样机

仅对单台控制系统开展试验，可带触发器和间隙下电极，通过下电极是否产生等离子喷射辅助判断触发是否正常。

(3) 试验参数

满足 GB/T17626.6 中规定的试验等级为 X 级的抗扰度要求。

(4) 试验方法

按照 GB/T 17626.6 中规定的执行，试验中电源口和信号口分别采用间接耦合和直接耦合的方式为试品提供传导骚扰，射频传导感应传导器参数如表 8 所示。试验前，试品应距离参考接地平面上 0.1m 高的绝缘支架，全部被测电缆上应插入耦合和去耦装置，该装置距离受试设备 0.1m~0.3m 处与参考平面间接触。

试验分两步进行：第一步，高压端试验，通过耦合夹在试品高压输入端耦合传导脉冲，试品处于正常工作状态后，进行辐射传导试验。通过上位机观察试品是否工作正常。第二步，低压端试验，传导脉冲串联加在试品电源输出上，在试品处于正常工作状态后，进行射频传导试验。通过上位机界面观察脉冲群在整个电源上对试品运行状态的影响情况。实时通过上位机监测试品运行状态。

表 4 射频传导感应传导器参数

频率范围	开路试验电平	频率增步率
150kHz~80MHz（扫频）	20V	1%
27MHz（点频）		
68MHz（点频）		

(5) 试验判据

干扰过程中和干扰结束后，产品无损坏、无异常事件记录，性能正常。

8.3.7 工频磁场抗扰度检验试验

(1) 试验目的

检验电源对附近导体中的工频电流或较为少见的由其他器件产生的磁场的抗扰度。

(2) 试验样机

仅对单台控制系统开展试验，可带触发器和间隙下电极，通过下电极是否产生等离子喷射辅助判断触发是否正常。

(3) **试验参数**

满足 GB/T17626.8 中规定的试验等级为 5 级的抗扰度要求。

(4) **试验方法**

按照 GB/T 17626.8 中规定的执行。将试品控制系统放置于测试台上，设置工频电磁装置的参数如表 9 所示，连接供电电源，给试品输入端供电，使试品进入正常工作状态。试验需要在三个方向分别进行。实时通过上位机监测试品运行状态。

表 5 工频电磁装置参数

试验内容	磁场强度	试验时间
工频电磁场抗扰度试验（短时）	1000A/m	3s
稳定持续磁场试验	100A/m	30s

(5) **试验判据**

干扰过程中和干扰结束后，产品无损坏、无异常事件记录，性能正常。

8.3.8 **脉冲磁场抗扰度试验**

(1) **试验目的**

检验电源受到规定的脉冲磁场抗扰度时功能是否正常。

(2) **试验样机**

仅对单台控制系统开展试验，可带触发器和间隙下电极，通过下电极是否产生等离子喷射辅助判断触发是否正常。

(3) **试验参数**

满足 GB/T17626.9 中规定的试验等级为 5 级的抗扰度要求。

(4) **试验方法**

按照 GB/T 17626.9 中规定的执行。将试品控制系统放置于测试台上，设置工频电磁装置参数如下：上升时间为 6.4μs±30%，持续时间为 16μs±30%，输出电流范围为 100~1000A，极性为正极性和负极性，试验需要在三个方向分别进行。实时通过上位机监测试品运行状态。

(5) **试验判据**

干扰过程中和干扰结束后，产品无损坏、无异常事件记录，性能正常。

8.3.9 阻尼振荡磁场抗扰度试验

(1) 试验目的

检验试品受到规定的阻尼振荡抗扰度试验时功能是否正常。

(2) 试验样机

仅对单台控制系统开展试验，可带触发器和间隙下电极，通过下电极是否产生等离子喷射辅助判断触发是否正常。

(3) 试验参数

满足 GB/T17626.10 中规定的试验等级为 5 级的抗扰度要求。

(4) 试验方法

按照 GB/T 17626.10 中规定的执行。将试品放置于测试台上，阻尼振荡磁场强度（峰值）100A/m（100kHz、1MHz）。试验需要在三个方向分别进行。实时通过上位机监测试品运行状态。

(5) 试验判据

干扰过程中和干扰结束后，产品无损坏、无异常事件记录，性能正常。

8.3.10 阻尼振荡波抗扰度试验

(1) 试验目的

检验电源能否具备承受振荡波抗扰度的能力。

(2) 试验样机

仅对单台控制系统开展试验，可带触发器和间隙下电极，通过下电极是否产生等离子喷射辅助判断触发是否正常。

(3) 试验参数

满足 GB/T17626.18 中规定的试验等级为 3 级的抗扰度要求。

(4) 试验方法

试验方法按照 GB/T 17626.18 中规定的执行，试验频率分别为 100kHz 和 1MHz，电压等级分别为共模 2kV、差模 1kV。将干扰信号串入板卡电源的输入端口。实时通过上位机监测试品运行状态。

(5) 试验判据

干扰过程中产品无损坏、无异常事件记录，产品内部器件均能按照要求正常工作；干扰结束后产品工作正常。

8.3.11 控制系统环境试验

(1) 试验目的

检验控制系统在极端运行温度和湿度下是否能够正常工作。

(2) 试验样机

仅对单台控制系统开展试验，可带触发器和间隙下电极，通过下电极是否产生等离子喷射辅助判断触发是否正常。

(3) 试验内容

高温运行试验、低温运行试验、恒定湿热试验。

(4) 试验参数

极端运行高温 70℃、极端运行低温 - 10℃、极端运行湿度 60%。

(5) 试验方法

① 高温试验

按照 GB/T 2434.1 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 70℃，恒温储存 2 小时后，令试品处于正常带载工作状态，高温连续运行 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。

② 低温试验

按照 GB/T 2434.2 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，将温度调节至 - 10℃，恒温储存 2 小时；之后，令试品处于正常带载工作状态，低温连续运行 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。

③ 恒定湿热试验

按照 GB/T 2434.3 中相关规定执行，将试品放入恒温箱中，将温度调节至 50℃，湿度调节至 60%，恒温恒湿储存 2 小时后，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。

(6) 试验判据

功能完好。

8.4 间隙成套装置电晕及绝缘平台绝缘试验

(1) 试验目的

检验间隙成套装置运行中是否出现电晕以及绝缘平台的绝缘性能。

(2) 试验样机

对间隙成套装置开展试验，可不带供能变。

(3) 试验内容

间隙成套装置 1.1 倍额定电压下电晕试验，绝缘平台 1h 直流耐受试验、操作耐受试验和雷电耐受试验。

(4) 试验方法及判据

按 GB/T 16927.1 对间隙成套装置开展试验，可不带触发器和控制系统。

① 间隙高压端施加 1.1 倍额定电压，使用紫外成像观测无放电。

② 将间隙端间短接，在低压端施加 1.1 倍额定电压，使用紫外成像观测无放电。

③ 将间隙端间短接，间隙低压端加压，按相关标准开展绝缘平台操作耐压、雷电耐压和 1h 直流耐受试验。

8.5 关键组部件型式试验注意事项

触发间隙关键组部件应按照相应标准开展完整型式试验。

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。

9 出厂试验

9.1 概述

触发间隙出厂试验分间隙整机、触发器和控制系统三部分开展。间隙整机出厂试验重点考核绝缘及触发性能。绝缘试验前对触头开展放电老练，提高绝缘水平；触发功能试验中同时考核触发器和控制系统的触发功能。触发器单独开展出厂绝缘及空载触发试验，考核关键组部件和整体绝缘性能。控制系统出厂前需进行长时运行试验，确认稳定性。出厂试验项目见表 6 所示，并对关键组部件出厂试验注意事项进行了规定。

表 6 出厂试验列表

序号	试验项目		试验方法及判据	备注
1	间隙整机	设计及外观检查		
2		老练及绝缘试验	见本文件 9.2	
3		触发功能试验	见本文件 8.2.2	
4		间隙本体密封试验	见本文件 8.2.4	

序号	试验项目		试验方法及判据	备注
5		气体密度表检查		
6	触发器	绝缘及空载触发试验	见本文件 9.3	
7	触发器和控制系统	长时运行试验	见本文件 9.4	

9.2 间隙整机老练及绝缘试验

(1) 试验目的

通过直流及雷电放电试验开展老练，之后检验间隙本体绝缘耐压能否满足要求。

(2) 试验样机

对间隙本体开展试验，可以不带触发器和控制系统，内充最低功能压力气体。

(3) 试验内容

直流及雷电冲击放电试验、10s 直流耐压、2h 直流耐压、操作冲击耐压试验（如有）、雷电冲击耐压试验。

(4) 试验方法及判据

依据 GB/T 16927.1 对间隙本体低压端接地，高压端对地加压，考虑正负极性。

首先进行间隙本体直流及雷电冲击放电试验，获得直流放电值及雷电放电 $U_{50\%}$ ，开展间隙本体老练及绝缘摸底，确保间隙直流放电值不低于间隙 1min 直流耐压要求值的 1.1 倍，间隙的雷电冲击放电 $U_{50\%}$ 不低于间隙雷电耐压值的 1.1 倍。之后开展耐压试验，最后一项试验为直流耐压。

9.3 触发器绝缘及空载触发试验

(1) 试验目的

检验触发器绝缘性能。

(2) 试验样机

仅对触发器开展。

(3) 试验内容及方法

- ① 直流长时带电试验：外壳接地状态下，去掉晶闸管保护用避雷器，储能电容器组充电至额定电压 1.5 倍，带电 0.5h。验证电容器组及充电回路等设备绝缘及长期带电可靠性。
- ② 空载触发试验：外壳接地，触发回路不连接触发腔，通过空气间隙放电，放电电压不低于最高工作电压 1.5 倍，重复试验 3 次，验证脉变绝缘、放电可靠性，及对相关设备的绝缘可

靠性。

(4) 试验判据

无闪络放电。

9.4 触发器和控制系统长时运行试验

(1) 试验目的

检验控制系统长时运行可靠性。

(2) 试验样机

仅对单台控制系统开展，可带触发器和间隙下电极，通过下电极是否产生等离子喷射辅助判断触发是否正常，。

(3) 试验内容及方法

令控制系统连续运行 72~168 小时，实时通过上位机监测试品运行状态，不定期通过上位机发送触发命令。

(4) 试验判据

无误动、无拒动，通讯正常。

9.5 关键组部件出厂试验

触发间隙关键组部件应按照相应标准及技术规范开展全部出厂试验。

复合绝缘筒出厂试验应包括局放试验，1.2 倍额定电压下应无局放。

光纤绝缘子出厂试验应包括光纤光损测量，按 GB/T15972 中规定的插入损耗法进行，光路损耗应小于 1dB。

10 现场验收试验

触发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，拟按照如下方法开展现场验收。

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；测量供能变压器输出是否正常、直阻是否满足要求。

组装接线：搭建绝缘平台、将控制箱与间隙本体安装在绝缘平台上；完成站内供电系统-供能变-控制箱间的供电电源接线；完成本体与触发器之间的高压脉冲线、地线和间隙电流测量线圈信号线连接；完成控制系统-光纤绝缘子-站内控制用光纤之间的光纤连接、熔接。

充补气体：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 后确认装置气密性完好。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。

验收调试试验：开展如表 7 中试验项目

表 7 间隙调试试验项目

试验项目	试验目的	试验说明
整体耐压试验	考核间隙整体耐压水平	开展 1min 直流耐压试验
触发测试	确认间隙触发性能	使用直高发给间隙加最低可触发电压，通过控制系统电控接口/以太网口发触发命令，使用高压探头测量间隙电压判断是否触通，测量触发电压电流，与出厂数据对照确认触发性能是否良好。
控制联调	确认间隙控制系统与消能装置控制系统之间的控制及信号传送功能是否正常	配合与消能装置调试方法开展

11 运输和运行维护规则

触发间隙出厂时本体与控制箱装配成一体发货、本体内充微正压 N_2 ，其余部件单独打包发货。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。

触发间隙检修方法分为例行检修和动作后检查两种情况。

根据站内安排进行年度例行检修，检修内容为：①触发测试，方法与工程调试时相同；②气体状态检测，包括气压、混合比、水分和分解物，判断是否需要充补气；③根据年度间隙动作次数判断是否需要更换触头。

间隙动作后，首先，调取控制系统上传的间隙触发状态监测参量，分析间隙触发性能是否正常；其次，检验气压、混合比和分解物，判断是否有异常燃弧。

附录 A

(资料性)

特高压混合直流工程可控自恢复消能装置接线和工作原理

以国家电网公司待投运的白鹤滩—江苏±800kV 混合直流输电工程（简称白-江工程）为例介绍可控自恢复消能装置的接线及工作原理。混合直流输电作为一种新型直流输电方式，综合利用了常规直流输电（LCC）和柔性直流输电（VSC）技术，具有电压高、容量大、换相失败风险低、控制灵活、能够组网消纳功率、对受端电网影响小等优点，是我国远距离大容量直流输电技术重点发展方向。白-江工程汇总受端采用 400kV LCC 串联 3 个并联的 400kV VSC，单极接线如图 A-1 所示。当受端交流系统故障时，在故障穿越过程中会在±400kV 母线上产生很大的功率盈余导致过电压，严重威胁 VSC 阀组安全，需加装消能装置限制过电压和吸收能量。消能装置并联在 VSC 阀组两端，构成如图 A-2 所示，当±400kV 母线上出现过电压时，控制开关 K 需要 1ms 内关合将可控避雷器可控部分阀柱旁路，使可控避雷器投入工作；在可控避雷器能量超标或损坏等紧急情况下，保护开关 BPS 需要 1ms 内将 ±400kV 母线快速关合接地，保护柔直阀组安全。

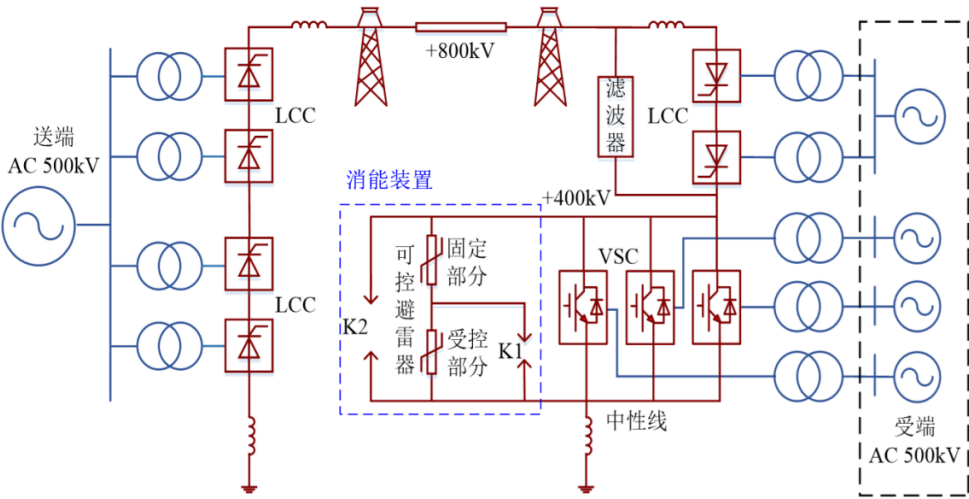


图 A-1 白鹤滩—江苏±800kV 特高压混合直流输电工程单极接线图

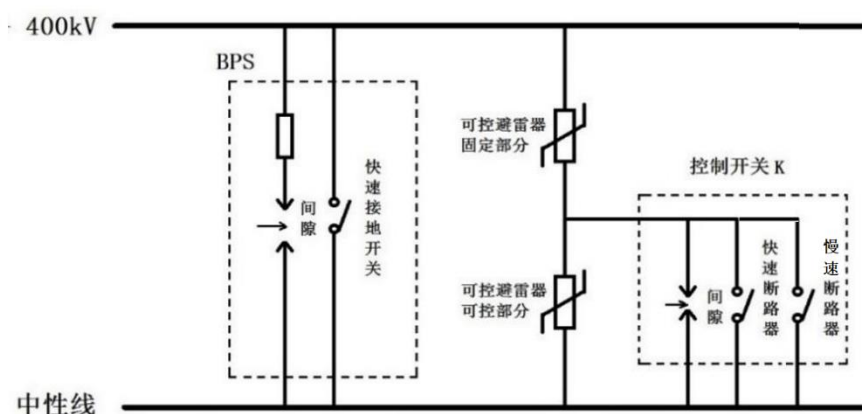


图 A-2 可控自恢复消能装置接线原理图

当故障发生时消能装置动作特性如下：

- （1）触发间隙、快速断路器及慢速断路器同时开始合闸动作，触发开关首先完成导通，故障电流流经固定元件+触发开关支路；
- （2）控保系统指令发出约 5ms 后，快速真空断路器完成合闸，流经触发开关的电流开始向旁路开关转移，故障电流流经固定元件+快速断路器；
- （3）控保系统指令发出约 25ms 后，慢速断路器完成合闸，流经触发开关的电流开始向旁路开关转移，故障电流流经固定元件+快速断路器+慢速断路器；
- （4）慢速断路器合闸完成后，向可控消能装置控保系统发送合闸成功信号；系统收到该信号后，向快速断路器发送分闸信号，快速真空断路器分闸，故障电流流经固定元件+慢速断路器；
- （5）在系统故障清除后，控保系统向可控消能装置发送分闸指令；可控消能装置控保系统控制慢速断路器支路断开，装置投入运行。

附录 B

(资料性)

等离子体喷射触发间隙结构组成及工作原理

等离子体喷射触发间隙是一种高电压大容量超高速闭合开关，通常和快速机械开关并联使用，间隙在 1ms 内快速触发导通后燃弧，机械开关快速闭合将间隙旁路，间隙旁路后快速熄弧恢复绝缘，然后机械开关打开恢复分闸状态，如图 B-1 所示。触发间隙能替代晶闸管阀组，为电力系统快速控制和保护提供简单、可靠和低成本的超高速闭合开关解决方案。

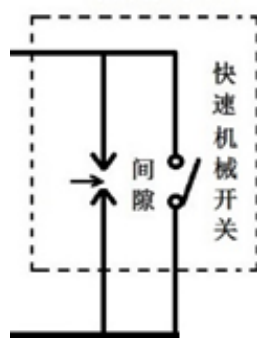


图 B-1 触发间隙工作示意图

特高压直流工程消能装置用触发间隙整体结构如图 B-2 所示，由间隙本体、控制箱（内置触发器）、控制系统、供能变和绝缘平台组成。间隙本体和控制箱安装于中性线高电位的绝缘平台上。供能变从地电位给控制箱中的触发器和控制系统部分/全部模块隔离供电。绝缘平台包括安装平台、支撑绝缘子、光纤绝缘子和充气绝缘子等，用于给间隙本体及控制箱中设备提供绝缘支撑、光纤通讯及充气通道。

间隙本体采用 SF_6 或 SF_6/N_2 混合气体绝缘，包括复合绝缘筒、上下盖板和过渡桶，本体外形及内部结构见图 B-3，复合绝缘筒内部安装高压电极、低压电极和触发腔。可控避雷器高压引线连接上盖板高压导电杆引入间隙连接高压电极，间隙低压电极放置于低压导电杆上与下盖板相连，经接线端子连接可控避雷器低压引线。过渡桶安装于复合绝缘筒下方，设计有充气孔和触发接线端子用绝缘法兰，间隙本体对地绝缘。间隙主电极中高压电极、低压电极均为平行平板电极，低压电极内嵌等离子体喷射触发腔，触发腔内包含触发电极。

触发器通过控制储能电容器放电输出触发高压，一套触发器内安装两组触发回路，可实现 300ms 内连续触发，满足系统重合闸需求。控制系统连接消能装置控保系统，用于实时监测间隙本体、触发器和控制系统状态；接到间隙触发命令后，具备触通条件时控制触发器放电，同时进行触发过程高频录波；控制系统还可连接后台调试和录波。触控制系统发器和屏蔽箱均放置在间隙本体下方的控制箱

中。

为了增加间隙触发可靠性，可进行冗余设计，间隙高压电极、低压电极、触发腔、触发器、测量系统和控制系统均设计为独立的 2 套，图 B-4 为间隙触发腔、触发回路、控制系统及可控避雷器控保系统之间连接关系。

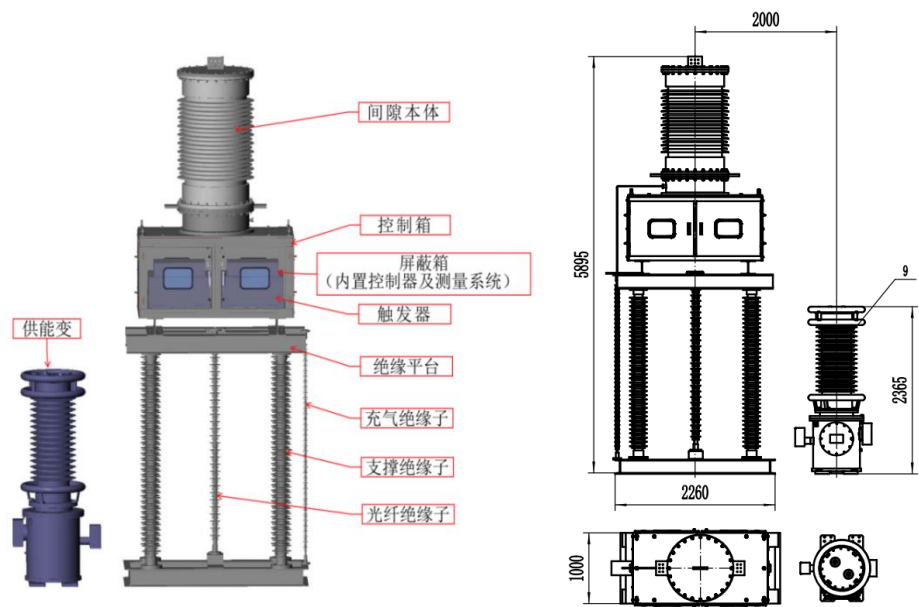


图 B-2 间隙整体结构

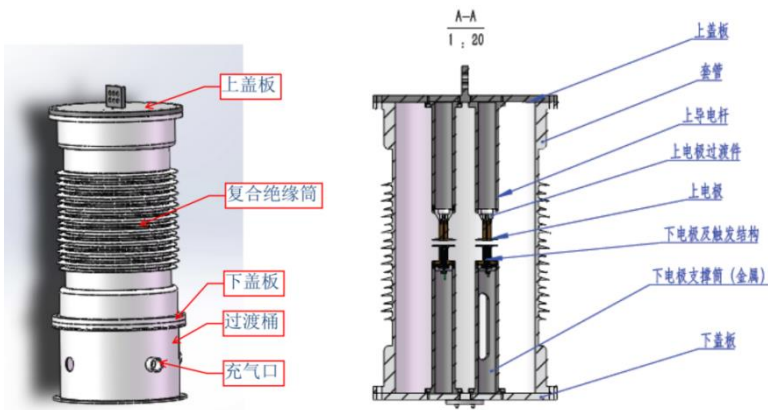


图 B-3 间隙本体外形及内部结构

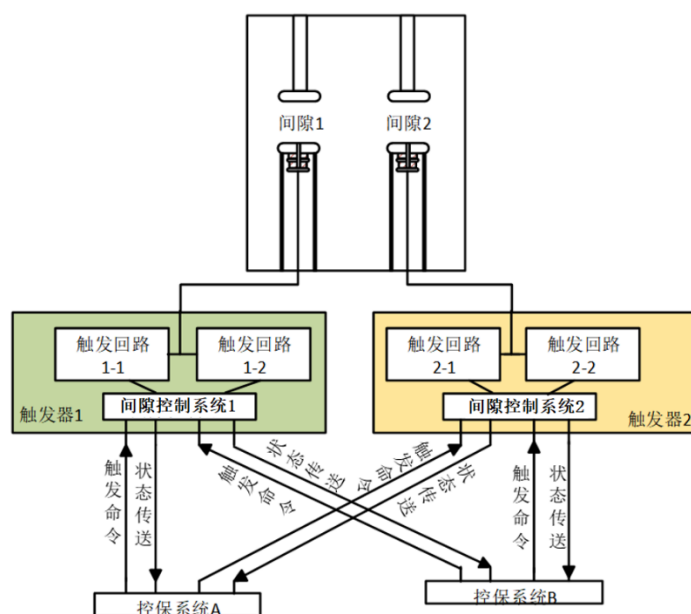
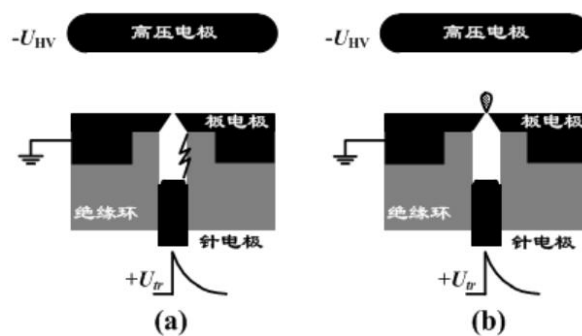


图 B-4 间隙触发腔、触发回路、控制系统及可控避雷器控保系统之间连接关系

触发间隙利用脉冲放电激励高速等离子体喷射，引起主间隙放电，可以实现 10%左右的极低工作系数（最低可触发电压/雷电耐受电压）下，在百微秒左右有效触发导通，工作原理如图 B-5 所示：当触发电压加到触发用针电极上时，在放电腔内针电极的尖端与板电极之间发生放电，产生大量的等离子体，同时，放电产生的能量对放电腔内的气体进行加热，使得腔内气压急剧增加。由于气压的作用，腔内的高压气体就会通过金属板电极上的小孔喷出，从而产生等离子体喷射。等离子体导致开关间隙电场严重畸变，引起间隙放电进而使开关导通。



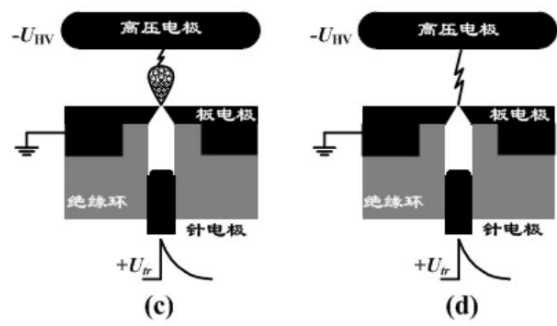


图 B-5 触发间隙工作原理

附录 C

(资料性)

混合比 30% 的混合气体中场强控制值

相同压力下的 SF₆/N₂ 混合气体与 SF₆ 绝缘强度的比值为 0.75 (如供应商选择其它混合比, 则需对应调整该比值), 参考 SF₆ 电器中电场设计, 混合气体 GIS 中高压侧导体在雷电冲击负极性电压下的 50% 击穿场强 $E_{50\%}$ 按下式计算:

$$E_{50\%} = 0.75 \times (63p + 2.4) \quad (1)$$

式中 p ——绝对气压 (MPa), $E_{50\%}$ ——50% 击穿场强 (kV/mm)。

耐受场强 E_B 按下式计算:

$$E_B = E_{50\%} (1 - 3\sigma) \quad (2)$$

该式是以试验为基础归纳出的计算式, 式中 $\sigma=0.05$ 。

考虑产品制造的分散性和运行中的种种不利因素, 允许场强 E_1 的取值在 E_B 基础上再留有裕度 K_1 , 这里取为 0.85, 则:

$$E_1 = 0.85E_B \quad (3)$$

由式 (1) ~ (3), 可得不同气压下的场强控制值。

(2) 绝缘件表面控制场强 E_τ

雷电冲击电压下, 绝缘件表面切向控制场强 E_τ :

$$E_\tau = \frac{E_1}{2} \quad (4)$$

(3) 接地导体表面控制场强 E_2

相同压力下的混合比 30% 的 SF₆/N₂ 混合气体与 SF₆ 绝缘强度的比值为 0.75, SF₆/N₂ 表压为 0.4MPa 时, 雷电冲击电压下, 接地导体表面的控制场强 $E_2=0.75 \times 16 \text{ kV/mm}$ 。

当 SF₆ 气压改变时, E_2 也会相应变化为 E_{2a} , 可按下式换算:

$$E_{2a} = E_2 \left(\frac{p_a}{p_0} \right)^{0.7} \quad (5)$$

式中 E_2 为 p_0 下的控制场强, p_a 为改变后的 SF₆ 绝对气压 (MPa)。

(4) 金属嵌件表面控制场强 E_3

为了满足长期带电运行时, 控制局部放电的需要, E_3 的值取 3kV/mm (设备额定相电压有效值下), 其取值与充气压力无关。综合式 (1) ~ (5), 雷电冲击电压下部分气压下的场强设计控制值如表 C-6 所示。

表 C-6 不同 SF₆/N₂ 气压时场强设计控制值 (kV/mm)

SF ₆ /N ₂ 表压 (MPa, 混合比 30%)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
E_1	4.71	8.13	11.54	14.96	18.37	21.78	25.20	28.61	32.02
E_τ	2.36	4.06	5.77	7.48	9.18	10.89	12.60	14.31	16.01
E_2	3.89	6.32	8.39	10.26	12.00	13.63	15.19	16.67	18.11

T/CES xxxx—xxxx

附录 D

(资料性)

内部燃弧压力升高计算方法

SF₆/N₂ 混合气体中内部燃弧压力升高计算尚没有经验公式，本部分参考 SF₆ GIS 中内部燃弧压力升高计算，再根据已有研究中获得的混合气体与 SF₆ 中弧压和比热容的变化规律进行推算。

根据工程经验，SF₆ 中燃弧后压力升高可由公式 1 和公式 2 计算获得：

$$\Delta P = 0.6 \int U_a I dt / V \quad (1)$$

$$U_a = L \times U_{avd} \quad (2)$$

式中：U_a 为电弧电压 (V)、I 为电弧电流 (A)、V 为气室体积 (cm³)、t 为 L 为电弧长度 (cm)，U_{avd} 为电弧平均梯度 (V/cm)。上述参数中，考虑了旋弧过程电弧被拉长 L 取 5cm，根据工程经验 U_{avd} 取 34V/cm。

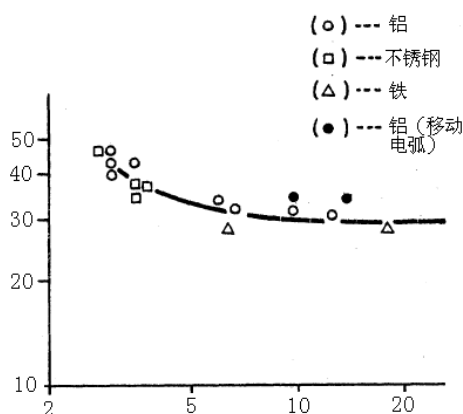


图 D-1 气体压力 4 个大气压下，电弧平均电压梯度与电弧长度的关系

通过查阅文献，30%SF₆/N₂ 混合气体中电弧电压约为 SF₆ 中 1.3 倍，说明相同电流下电弧能量提高 1.3 倍。30%SF₆/N₂ 混合气体比热容约为 SF₆ 气体的 2.2 倍，说明吸收相同能量，混合气体压力升高为 SF₆ 气体的 2.2 倍。综合考虑，混合气体中燃弧后气压的增加约为 SF₆ 中的 2.9 倍。