

培训教材

气体绝缘金属封闭开关设备 局部放电带电检测技术

国网湖南省电力公司电力科学研究院 组编
周卫华 黄福勇 主编

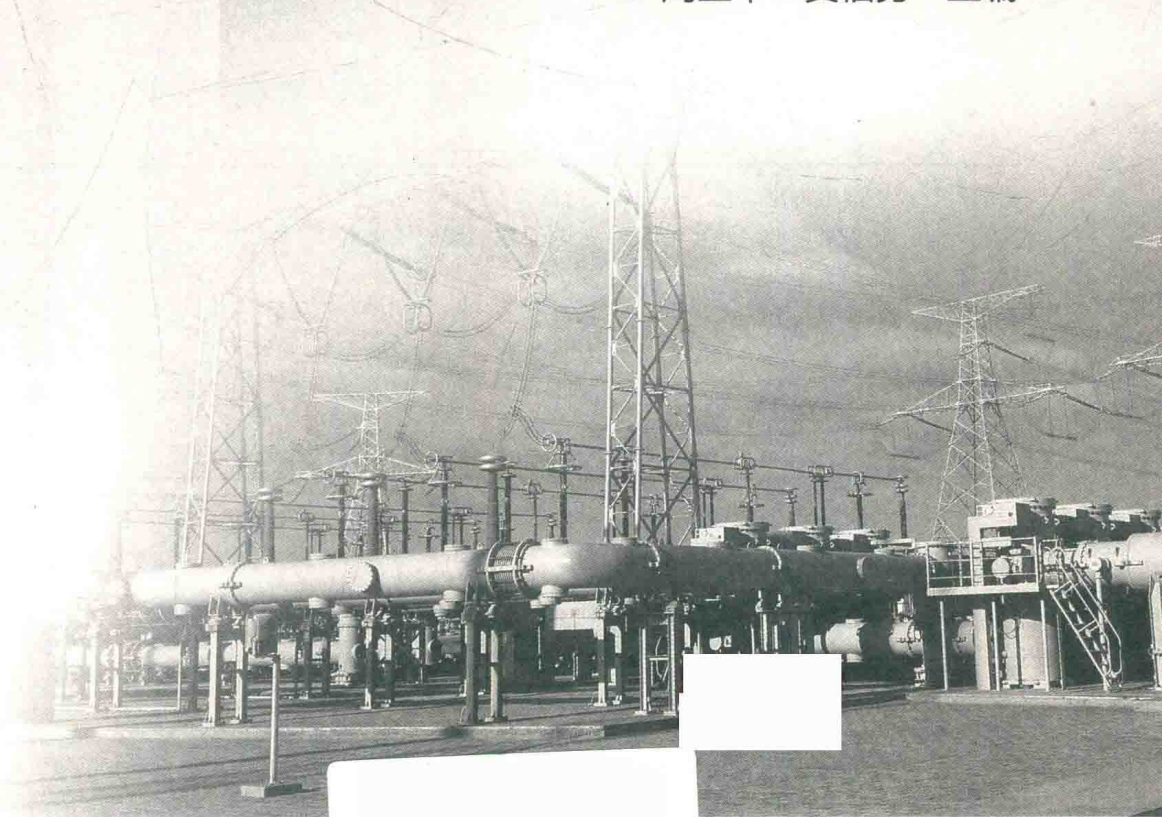


中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

培训教材

气体绝缘金属封闭开关设备 局部放电带电检测技术

国网湖南省电力公司电力科学研究院 组编
周卫华 黄福勇 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共分7章,针对气体绝缘金属封闭开关设备介绍了其基本结构知识、局部放电基本知识、特高频检测技术、超声波检测技术、SF₆气体成分分析技术以及检修决策建议,对每种检测技术介绍了基本原理、检测流程、异常信号判断方法,最后给出了多个典型案例。

本书可供气体绝缘金属封闭开关设备局部放电带电检测专业人员及电力系统状态检修管理人员使用,也可供相关专业高校师生阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

气体绝缘金属封闭开关设备局部放电带电检测技术 / 周卫华, 黄福勇主编; 国网湖南省电力公司电力科学研究院组编. —北京: 中国电力出版社, 2017.8

ISBN 978-7-5198-0831-0

I. ①气… II. ①周…②黄…③国… III. ①气体绝缘材料—金属封闭开关—带电测量 IV. ①TM564

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第136965号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 邓慧都(010-63412636) 盛兆亮

责任校对: 常燕昆

装帧设计: 郝晓燕 赵姗姗

责任印制: 邹树群

印 刷: 北京九天众诚印刷有限公司

版 次: 2017年8月第一版

印 次: 2017年8月北京第一次印刷

开 本: 787毫米×1092毫米 16开本

印 张: 8.5

字 数: 201千字

定 价: 48.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

《气体绝缘金属封闭开关设备局部放电 带电检测技术》

编 委 会

主 任 梁利清

副 主 任 谢国胜 周卫华 李喜桂 汪霄飞

编委会成员 黄福勇 叶会生 齐 飞 段肖力 徐 波

何智强 刘 赞 黎 刚 雷红才 毛文奇

黄海波 王 成 晏桂林 周恒逸

编 写 组

主 编 周卫华 黄福勇

副 主 编 叶会生 段肖力 毛文奇

编写组成员 谢耀恒 吴水锋 孙利朋 李 臻 范 敏

彭 平 李 欣 刘 赟 黄海波 秦家远

由 凯 龚尚昆 周 挺 彭 铖 韩忠晖

胡果莉 陈柯良 周 舟 丁玉柱 张 寒

姜赤龙 谢小慧 欧阳力 李丹民 毕建刚

李哲文 李 婷 万 勋 赵世华 陆新洁

姜方财 黄 欣 戴 科 刘国荣 李 杰

唐民富 李志为 孙振华 欧阳光 张 超

欧阳卓 毛长庚 张国旗

序

气体绝缘金属封闭开关设备（Gas Insulated Switchgear, GIS）目前已广泛应用于电力系统。GIS 在制造、运输、安装、运维等环节不可避免产生各种缺陷，导致运行电压下长期存在的局部放电是其绝缘损坏的重要因素之一。为准确掌握设备状态，预防 GIS 绝缘事故，检修人员通常采用局部放电检测方式对 GIS 绝缘局部放电缺陷进行诊断。

现场应用已充分证明，特高频（UHF）局部放电检测、超声波（AE）局部放电检测、SF₆ 气体成分分析等带电检测手段能及时有效地发现设备的局部放电类隐患，减少停电故障次数，化“被动”抢修为“主动”检修。Q/GDW 1168—2013《输变电设备状态检修试验规程》明确了带电检测工作的内容及检测周期，极大地提高了带电检测技术的适应性和有效性；国家电网公司《电力设备带电检测技术规范》《变电设备带电检测工作指导意见》等管理文件对 GIS 的局部放电带电检测项目、周期及技术要求做了进一步的明确规定。

国网湖南省电力公司电力科学研究院落实“菜单式管理、差异化指导、专业化服务、工厂化检测”的要求，从 2013 年开始组建带电检测技术团队，团队现有 1 名“国网公司优秀专家”、1 名“国网公司技术能手”、2 名“湖南省电力公司优秀专家”。截至目前，团队发表的核心及以上论文 20 余篇，已出版培训专著 2 本，成功申报 CSEE 标准 1 项，申请发明专利 20 余项，发现并诊断 GIS、开关柜等局部放电缺陷 30 余处。团队参加 2015 年国家电网公司 GIS 带电检测技能竞赛获得团体第二名，积累了丰富的现场经验。

为了进一步提高电力工作者 GIS 带电检测技术技能水平，加强相关从业人员对带电检测工作的认识及理解，国网湖南省电力公司电力科学研究院带电检测技术团队以国家电网公司统一发布的《输变电设备带电检测工作指导意见》为基础，依据《湖南省电力公司变电设备专业化巡检管理规定》，结合团队现场应用经验，从理论基础到实践经验，阐述了 GIS 的基本结构、局部放电的基本知识、GIS 中的 SF₆ 气体成分分析、检测技术的基本原理及方法，并结合典型案例编写完成了《气体绝缘金属封闭开关设备局部放电带电检测技术》一书，期待本书的出版发行能对从事带电检测相关工作的电力同行提供参考，也为进一步推进带电检测相关工作尽一份绵薄之力。



2017 年 3 月

前 言

近年来，我国电网容量和电压等级随着经济高速发展而不断提高，GIS 因其占地面积小、受外部因素影响小、维护工作量小等优点在电力系统中得到了广泛应用，我国 GIS 电压等级已达到 1000kV。研究表明，GIS 在制造、运输、安装、运行等环节不可避免地会出现各类潜伏性缺陷，产生局部放电，局部放电的长期存在可能导致设备的绝缘故障。

由于结构的特殊性，GIS 难以像传统敞开式设备一样开展各项停电例行试验以及及时发现潜伏性缺陷。因此，以局部放电信号为特征量的各类带电检测技术在发现 GIS 潜伏性缺陷方面意义重大。应用表明，通过局部放电带电检测技术可有效诊断 GIS 的潜伏性缺陷，并根据诊断结果做出状态评价，将缺陷消除在故障之前，提高电力系统的可靠性。

本书共分 7 章，内容包括 GIS 基本知识、局部放电基本知识、特高频局部放电检测技术、超声波局部放电检测技术、SF₆ 气体成分分析技术、检修决策建议、GIS 局部放电带电检测典型案例。从现场应用角度全面介绍了 GIS 局部放电带电检测技术与决策，包括 GIS 局部放电带电检测的现场检测方法、干扰识别抑制、局部放电类型诊断、缺陷精确定位等内容，可供从事 GIS 研发设计、生产管理、运维检修等领域工作的技术人员参考使用。

本书在编写过程中，得到了国网湖南省电力公司、国网湖南省电力公司检修公司等单位专家的大力支持，并提供了宝贵的意见和素材，在此一并表示感谢。

限于编者水平及编写时间仓促，书中难免有疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

国网湖南省电力公司电力科学研究院

2017 年 3 月

目 录

序 前言

第1章 GIS 基本知识	1
1.1 GIS 分类与出线方式	1
1.2 GIS 组成元件	3
本章习题	8
第2章 局部放电基本知识	10
2.1 局部放电机理	10
2.2 GIS 中典型局部放电缺陷	12
2.3 局部放电特征量	14
2.4 局部放电常用检测方法	16
本章习题	18
第3章 特高频局部放电检测技术	20
3.1 检测原理	20
3.2 常用检测仪器	22
3.3 现场检测方法	27
3.4 干扰识别及抑制	31
3.5 局部放电类型识别	37
3.6 定位技术	44
3.7 严重程度分析	48
本章习题	49
第4章 超声波局部放电检测技术	51
4.1 超声波局部放电检测原理	51
4.2 超声波检测常用检测仪器	53
4.3 超声波局部放电现场检测	57
4.4 干扰识别	59
4.5 超声波局部放电类型识别	61
4.6 超声波定位技术	66
本章习题	71

第5章 SF₆气体成分分析技术..... 73

- 5.1 SF₆分解特性..... 73
- 5.2 常用检测方法及检测原理..... 77
- 5.3 异常数据判断..... 86
- 5.4 综合分析判断..... 88
- 本章习题..... 89

第6章 检修决策建议..... 91

- 6.1 GIS 内部缺陷及检修决策..... 91
- 6.2 GIS 内部悬浮放电缺陷检修决策..... 92
- 6.3 GIS 内部尖端放电缺陷检修决策..... 93
- 6.4 GIS 内部自由颗粒放电缺陷检修决策..... 94
- 6.5 GIS 内部气隙放电缺陷检修决策..... 95
- 6.6 GIS 内部沿面放电缺陷检修决策..... 95
- 6.7 GIS 内部振动缺陷检修决策..... 96
- 6.8 GIS 内部发热缺陷..... 97
- 本章习题..... 98

第7章 GIS 局部放电带电检测典型案例..... 102

- 7.1 某 330kV GIS 内部尖端放电带电检测案例..... 102
- 7.2 某 110kV GIS 内部悬浮放电带电检测案例..... 106
- 7.3 某 500kV GIS 内部悬浮放电带电检测案例..... 109
- 7.4 某 110kV GIS 支撑绝缘子气隙放电带电检测案例..... 114
- 7.5 某 220kV GIS 母线盆式绝缘子沿面放电带电检测案例..... 119

参考文献..... 125

GIS 基本知识

GIS 是将除变压器外的一次设备按照一定的电气主接线方式安装在充有一定压力的 SF_6 气体的金属壳体内构成的一套紧凑变电站设备。

我国 GIS 研制工作起步于 20 世纪 60 年代,1971 年首套 110kV GIS 成功制造并投入运行。近年来,我国 GIS 在电场优化、绝缘件性能提升等领域研究成果显著,关键技术和主要零部件质量都得到了大幅提高,使得 GIS 电压等级迅速提高,应用范围越来越广泛。目前,GIS 已广泛应用于水电站、火电厂、变电站等,最高电压等级达到 1000kV。

1.1 GIS 分类与出线方式

1.1.1 GIS 分类

1. 按安装地点分

GIS 按照安装地点可分为户内型和户外型。户内型 GIS 需布置在带有吊车的楼房内,土建成本较高,具有不受日照、雨水等因素影响,运行环境较好的优点;户外型 GIS 土建成本相对较低,但运行环境较差,其外壳法兰螺栓需加强防水密封措施、密度继电器需加装防雨罩。

2. 按结构形式分

GIS 按结构形式可分为三相共箱和分箱两种,二者各有优缺点。三相共箱结构的优点在于结构更加紧凑、占地面积更小、漏气可能性小(盆式绝缘子少)、正常运行时三相电流平衡、外壳感应电流小,但技术要求高、制造难度相对较大。三相分箱结构的优点在于不会发生相间短路,有利于防止事故范围扩大,技术要求相对较低,但外壳感应电流较大、易因电磁感应引起涡流发热等,需采取隔磁措施或选用非磁性材料。

目前,国内外 110kV 及以下 GIS 母线与断路器一般为三相共箱结构,如图 1-1 所示;220kV GIS 断路器为三相分箱结构,母线多采用共箱结构,如图 1-2 所示;220kV 以上 GIS 母线与断路器、500kV 及以上 HGIS 断路器多为三相分箱结构,如图 1-3 所示。

1.1.2 GIS 出线方式

GIS 出线方式有以下三种:

- (1) 架空线路引出方式。GIS 通过充有 SF_6 的套管与架空线路相连。
- (2) 电缆引出方式。GIS 通过电缆仓与高压电缆相连。
- (3) 与主变压器对接。GIS 通过油气套管与主变压器对接,此时连接套管的一侧为 SF_6 气体,另一侧充有变压器油;除此之外,还有利用高压电缆直接连接 GIS 与主变压器的连接方式。

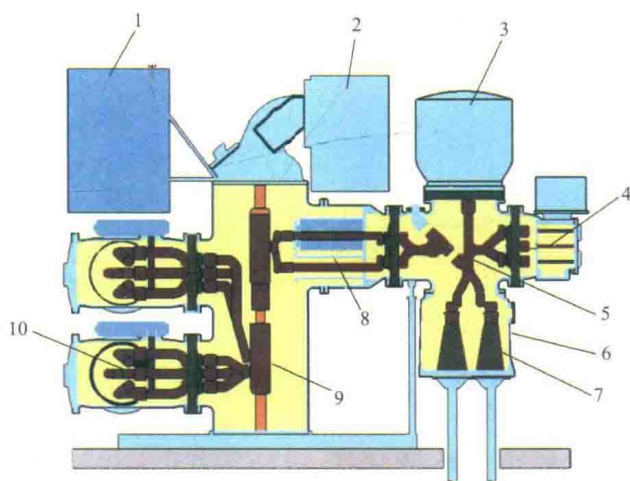


图 1-1 110kV 双母线接线 GIS 三相共箱式间隔结构

1—汇控柜；2—断路器操动机构；3—电压互感器；4—快速接地开关；5—线路侧三工位隔离接地开关；
6—电缆终端筒；7—电缆终端头；8—电流互感器；9—断路器；10—母线侧三工位隔离接地开关

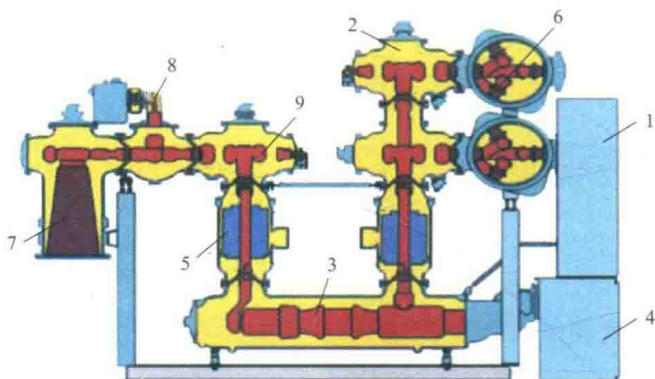


图 1-2 220kV 双母线接线 GIS 母线三相共箱式间隔结构

1—汇控柜；2—母线侧三工位隔离接地开关；3—断路器；4—断路器操动机构；5—电流互感器；
6—主母线；7—电缆终端；8—快速接地开关；9—线路三工位隔离接地开关

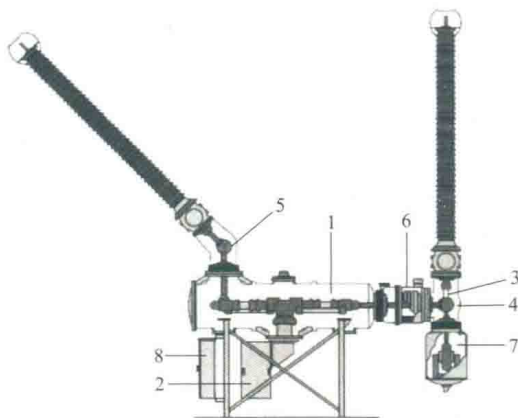


图 1-3 HGIS 分相式间隔结构

1—断路器灭弧室；2—储能弹簧操动机构；3—隔离开关；4、5—接地开关；
6—电流互感器；7—电压互感器；8—就地控制单元

1.2 GIS 组成元件

GIS 组成元件包括断路器、隔离开关、接地开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、盆式绝缘子、母线、套管等，这些一次设备全部密封在 SF_6 气体绝缘的金属壳体内。HGIS 为简化 GIS，其母线、线路避雷器、线路电压互感器等设备为常规敞开式，其他设备与 GIS 类似置于金属壳体内。与传统敞开式设备相比，GIS、HGIS 具有占地面积小、不受外部环境干扰、运行可靠性高、维护工作量小的优点。

1.2.1 断路器

1. 断路器分类

GIS 断路器按照现场布置方式分为立式和卧式两种。220kV 及以下的 GIS 通常采用立式断路器，如图 1-4 所示；220kV 以上的 GIS 通常采用卧式断路器，如图 1-5 所示。GIS 断路器按断口数量可分为单断口断路器、双断口断路器和多断口断路器。

2. 断路器操动机构

GIS 断路器操动机构按机构数量可分为分相操动机构和三相机械联动操动机构，220kV 及以上 GIS 断路器通常采用分相操动机构（主变压器和母联断路器采用三相机械联动操动机构），220kV 以下 GIS 断路器通常采用三相机械联动操动机构。

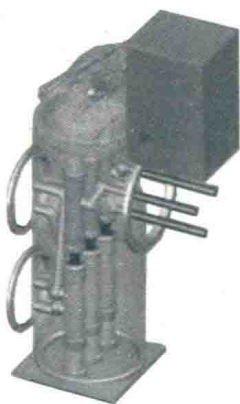


图 1-4 立式断路器



图 1-5 卧式断路器

GIS 断路器操动机构按类型可分为液压机构、气动机构、弹簧机构和液压弹簧机构等。液压、气动和液压弹簧机构通常用于高电压大容量断路器。

1.2.2 隔离开关

GIS 隔离开关由绝缘子、壳体和不同形状的导体构成最优布置，隔离开关动、静触头均做成同轴圆柱体、能互相插入，动触头通常采用电动机构或弹簧机构，具有很高的电气和机械可靠性。

GIS 隔离开关根据用途可分为三种类型：①只在主回路中提供明显断开点，称为隔离开关；②将主回路通过外壳直接接地，称为接地隔离开关，简称接地开关；③快速接地隔离开关，简称快速接地开关。①②不能切断主回路电流，只能切断电容电流和电感电流，而快速接地开关能直接关合接地短路电流。当 GIS 发生内部接地短路故障时，会产生强烈电弧，为及时切断故障电流，可通过快速接地开关使主回路直接接地，这时继电保护装置使得断路器跳闸、切断故障电流。快速接地开关通常安装在线路侧。

传统 GIS 的隔离开关和接地开关相互独立，而新一代 126~252kV GIS 已普遍将二者合并为一个组合元件，称为三工位隔离开关/接地开关。其包括隔离开关合闸-接地开关分闸（导通）、隔离开关分闸-接地开关分闸（隔离）、隔离开关分闸-接地开关合闸（接地）三种工作位置，结构如图 1-6 所示。

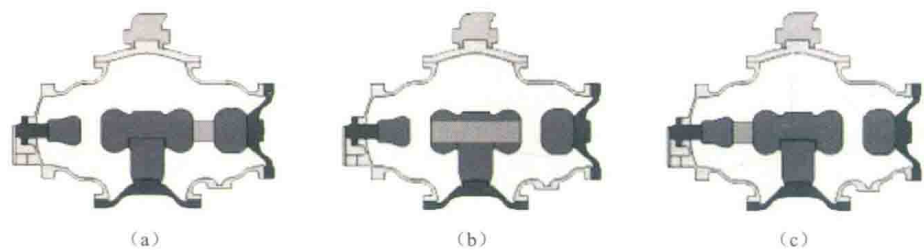


图 1-6 三工位隔离开关/接地开关结构
(a) 导通；(b) 隔离；(c) 接地

1.2.3 电流互感器

GIS 电流互感器套在 GIS 母线管上，母线导电杆作为电流互感器一次绕组，母线管外面包裹环形铁芯，环形铁芯与母线导电杆同心，电流互感器二次绕组缠绕在铁芯外部，电流互感器结构示意图如图 1-7 所示，仿真模型如图 1-8 所示。

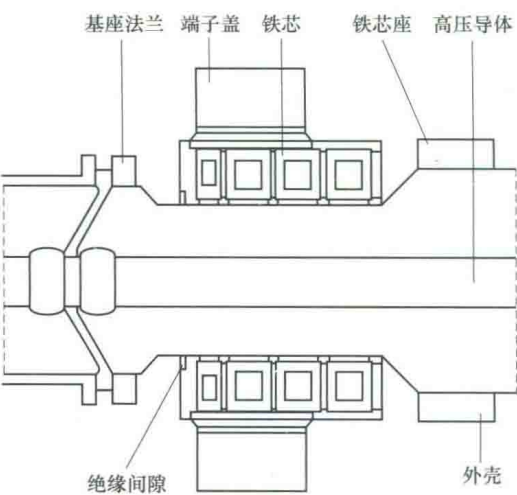


图 1-7 电流互感器结构示意图

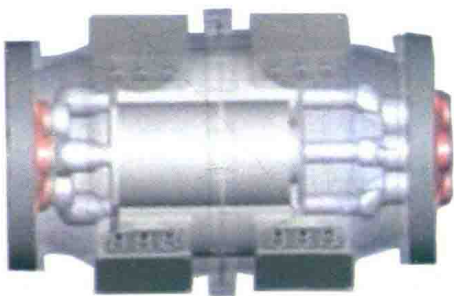


图 1-8 电流互感器仿真模型

1.2.4 电压互感器

GIS 电压互感器一般为电磁式电压互感器，其直接接在母线上，电压互感器结构示意图如图 1-9 所示，仿真模型如图 1-10 所示。

1.2.5 避雷器

GIS 避雷器一般为金属氧化物避雷器，与敞开式避雷器原理类似，但结构更紧凑，整个避雷器为金属外壳封闭，SF₆ 气体绝缘，具有较强的吸收能力和较高的通流容量。避雷器结构示意图如图 1-11 所示，仿真模型如图 1-12 所示。

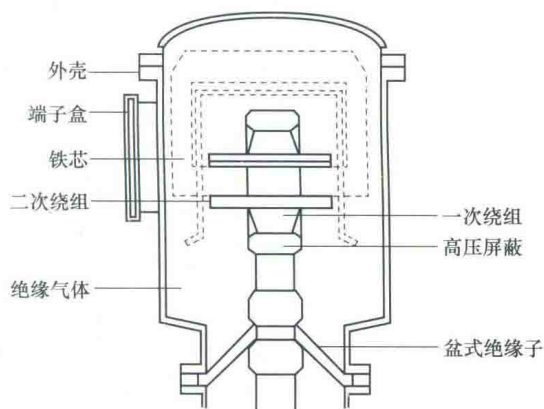


图 1-9 电压互感器结构示意图

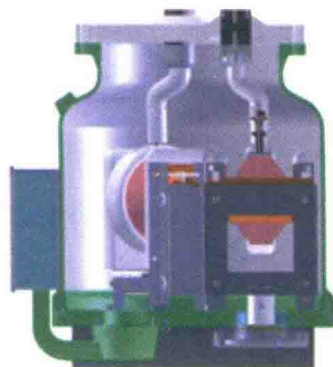


图 1-10 电压互感器仿真模型

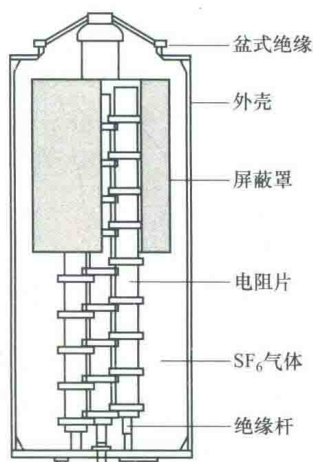


图 1-11 避雷器结构示意图

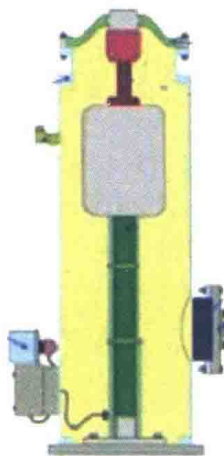


图 1-12 避雷器仿真模型

1.2.6 绝缘子

GIS 绝缘子包括隔离盆式绝缘子和支撑绝缘子两种，如图 1-13 所示。其主要作用包括：①支撑 GIS 中的导体；②使得 GIS 中的导体与壳体和其他元件保持足够距离；③将 GIS 划分为若干个气室，方便检修维护。

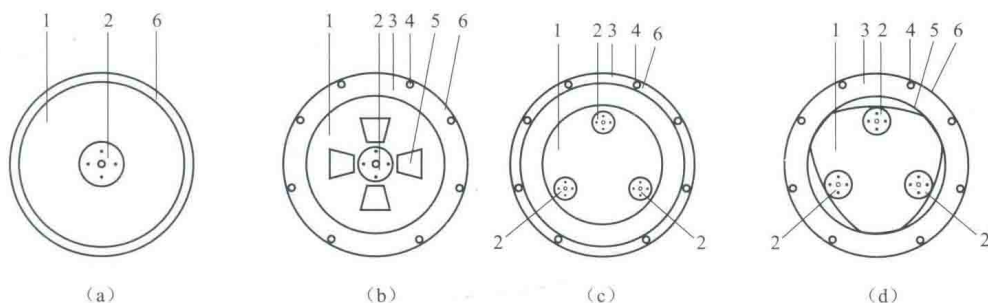


图 1-13 隔离盆式绝缘子和支撑绝缘子

(a) 单相隔离盆式绝缘子；(b) 单相支撑绝缘子；(c) 三相隔离盆式绝缘子；(d) 三相支撑绝缘子

1—绝缘子；2—触头；3—支撑环；4—螺杆；5—通孔；6—密封槽

GIS 绝缘子一般采用环氧树脂浇注而成，隔离盆式绝缘子能承受相邻两个气室间可能出现的最大压力差，若一侧为持续电弧达到最大气体压力、另一侧是正常状态时的压力差，若一侧是正常状态压力、另一侧是在检修状态下气室压力最低时的压力差。

1.2.7 母线及波纹管

GIS 母线用于连接各个电气元件，母线管道内部导体的连接方式为刚性，其安装方式包括水平和垂直布置。母线管道壳体通过自身法兰与其他模块上的隔离绝缘子或支撑绝缘子对接。母线仿真模型如图 1-14 所示。



图 1-14 母线仿真模型

目前，GIS 母线上通常装设有数量不一、结构不同的波纹管，其原因是 GIS 在安装过程中不可避免存在误差；GIS 各个元件材料不同，膨胀系数存在差异，当温度变化时，元件受到的温度应力和伸缩长度不一。故为调节安装误差、吸收温度应力，需在 GIS 母线上装设一定数量的波纹管。波纹管包括热补偿波纹管、安装波纹管、力平衡波纹管等，结构示意图如图 1-15 所示。波纹管的具体作用如下：

- (1) 吸收 GIS 各元件、外壳和基础由于温度变化引起的相对热伸缩。
- (2) 吸收地基及元件的制作误差和安装误差。
- (3) 补偿地基下陷等长期地质因素变化引起的设备应力。
- (4) 检修过程中，有波纹管便于将元件进行拆卸和重新组装。

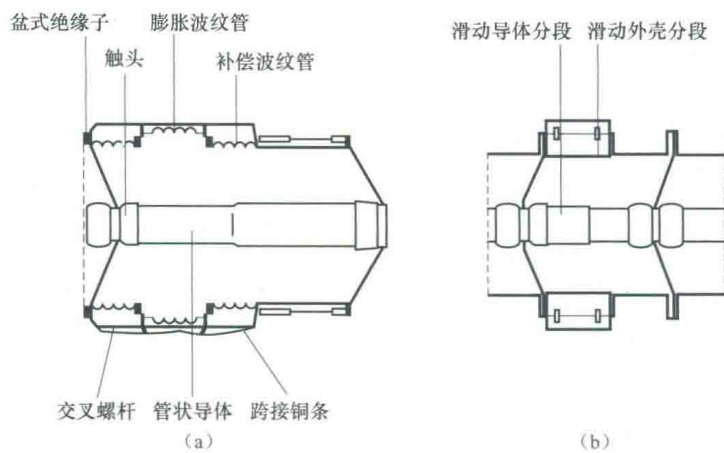


图 1-15 波纹管结构示意图

(a) 热补偿波纹管 and 力平衡波纹管；(b) 安装波纹管

1.2.8 终端元件

1. SF₆-空气套管

GIS 与架空线路通常采用 SF₆-空气套管相连，该套管包括纯瓷套管和复合绝缘套管，内部采用电容均压和屏蔽罩使套管的内外部电场均匀，其内绝缘为 SF₆ 气体，SF₆-空气套管结

构示意如图 1-16 所示。

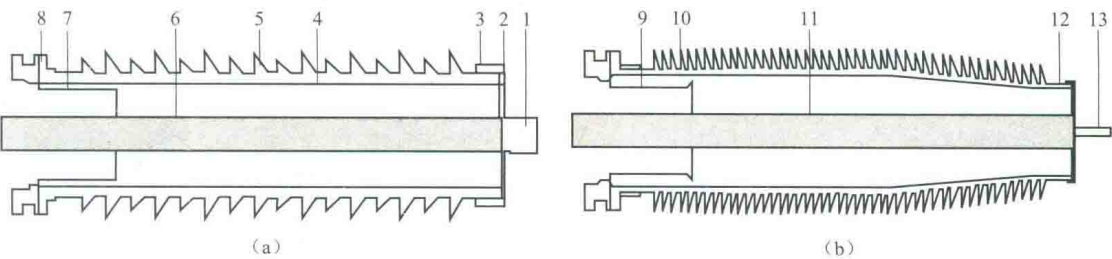


图 1-16 SF₆-空气套管结构示意图

(a) 复合套管结构；(b) 瓷套管结构

- 1—导线接头；2—端盖；3—上法兰；4—纤维加固环氧树脂管；5—硅橡胶；6—导体；
7—屏蔽罩；8—下法兰；9—屏蔽罩；10—瓷套管；11—导电杆；12—顶板；13—出线端子

2. SF₆-油套管

GIS 与变压器通常采用 SF₆-油套管相连，以确保 SF₆ 气体与绝缘油的有效隔离。油气套管外壳上部设置有安装调节用的波纹管，接口处设置有可靠的隔离断口，以便于 GIS 和变压器独立开展试验工作，SF₆-油套管结构示意图如图 1-17 所示。

3. 电缆终端

在城市中，当不便于采用架空线路出线方式时，GIS 通常采用高压电缆出线。电缆终端包括带法兰的电缆终端套管、壳体和带有插接头的间隔绝缘子。电缆终端与电缆的连接采用滑动插入触头，并利用连接导体在 GIS 与电缆之间形成隔离断口，便于 GIS 和电缆独立开展试验工作，电缆终端结构示意图如图 1-18 所示。

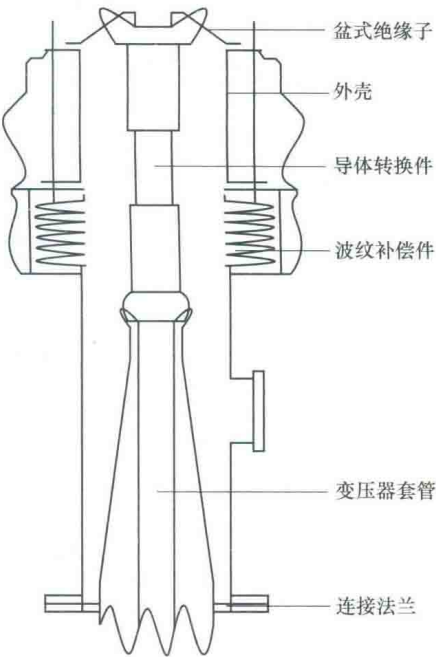


图 1-17 SF₆-油套管结构示意图



图 1-18 电缆终端与 GIS 连接结构示意图

1.2.9 气体密度继电器

GIS 的绝缘性能和 SF₆ 断路器的开断能力与气体密度有关, 为监视 GIS 密封是否良好, 气室中的 SF₆ 气体是否存在泄漏, 在 GIS 每个气室装设有气体密度继电器以监视气室压力变化情况。

气体密度继电器应装设在与 GIS 本体同一运行环境下, 户外安装的气体密度继电器应装设防雨罩, 保证指示表、控制电缆接线盒和充放气接口能够得到有效遮挡, 三相分箱断路器每相应安装独立的密度继电器。

本章习题

1-1 GIS 是将除 D 外的一次设备按照一定的电气主接线方式安装在充有一定压力 SF₆ 气体的金属壳体内构成的一套紧凑变电站设备。

- A. 断路器
- B. 电流互感器
- C. 电压互感器
- D. 变压器

1-2 GIS 三工位隔离开关/接地开关工作位置不包括 C。

- A. 导通
- B. 隔离
- C. 分断
- D. 接地

1-3 GIS 断路器操动机构按类型包括 ABCD。

- A. 液压机构
- B. 气动机构
- C. 弹簧机构
- D. 液压弹簧机构

1-4 GIS 与架空线路通常采用 A 相连。

- A. SF₆-空气套管
- B. SF₆-油套管
- C. 电缆终端
- D. 空气-油套管

1-5 GIS 按照安装地点可分为 户内型和户外型。

1-6 GIS 断路器按断口数量可分为 单断口断路器、双断口断路器和多断口断路器。

1-7 GIS 电流互感器套在 GIS 母线管上, 母线导电杆 作为电流互感器一次绕组。

1-8 GIS 的绝缘子包括 隔离盆式绝缘子 和 支撑绝缘子 两种。

1-9 GIS 按结构形式可分为哪几种? 它们各有什么优缺点?

答: GIS 按结构形式可分为三相共箱和分箱两种, 二者各有优缺点。三相共箱结构的优点在于结构更加紧凑、占地面积更小、漏气可能性小 (盆式绝缘子少)、正常运行时三相电流平衡、外壳感应电流小, 但技术要求高、制造难度相对较大。三相分箱结构的优点在于不会发生相间短路, 有利于防止事故范围扩大, 技术要求相对较低, 但外壳感应电流较大、易因电磁感应引起涡流发热等, 需采取隔磁措施或选用非磁性材料。

1-10 GIS 母线上设置的波纹管的具體作用有哪些?

答: GIS 母线上通常装设有数量不一、结构不同的波纹管, 其原因是 GIS 在安装过程中不可避免存在误差; GIS 各个元件材料不同, 膨胀系数存在差异, 当温度变化时, 元件受到的温度应力和伸缩长度不一。故为调节安装误差、吸收温度应力, 需在 GIS 母线上装设一定数量的波纹管。波纹管包括热补偿波纹管、安装波纹管、力平衡波纹管等。波纹管的具体作