

钱家骊 袁大陆 杨丽华 张节容 关永刚 编著

高压开关柜—— 结构 计算 运行 发展



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

高压开关柜

—— 结构 计算 运行 发展

钱家骊 袁大陆 杨丽华 张节容 关永刚 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了高压开关柜（高压金属封闭开关设备）的发展概况、趋势、标准和各种国内外高压开关柜的结构特点，并重点叙述高压开关柜的发热技术、绝缘技术、内部电弧故障等问题，还附有若干计算公式、例题、工程上常用的曲线、图表和数据。本书还介绍了高压开关柜的运行情况、事故分析、统计以及在线监测和故障诊断技术等。本书主要取材于以日本国为主的各国技术文献和资料以及国内和作者单位的一些经验。

本书编写力求深入浅出，原理与实用并重。可供高压开关柜制造企业的设计、制造、试验及销售人员，以及发电厂、变电站、各类工业企业、高层大楼、各种大型场所等的高压开关柜运行、维修、试验技术人员使用，也可供研究院、所技术人员以及高等院校有关师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高压开关柜——结构、计算、运行、发展/钱家骊
等编著. —北京：中国电力出版社，2007

ISBN 978-7-5083-4469-0

I. 高… II. 钱… III. 高压电器-开关柜-基本知
识 IV. TM591

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 066627 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

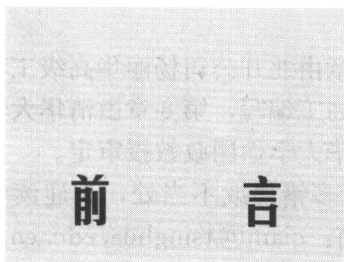
2007 年 1 月第一版 2007 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.625 印张 279 千字

印数 0001—3000 册 定价 19.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)



半个多世纪以前，不少人还不大熟悉俗称高压开关柜的金属封闭开关设备。在变电站里经常看到的是用水泥做隔墙的中压配电设备，尺寸很大，工作不安全，维修费时，建设周期也长。曾几何时，中压配电设备已是清一色的外型紧凑、运行安全省力、完全在制造工厂制成的各型各色的金属封闭开关设备了。

现在，在我国几百个高压开关制造厂中，几乎都生产金属封闭开关设备，金属封闭开关设备已成为最普遍的高压开关设备了。20世纪50年代，我国从原苏联引进的金属封闭开关设备品种少之又少，而现在则是品种繁多，琳琅满目，不断推陈出新，形成了十分兴旺的景象。

过去曾有一种认识，认为金属封闭开关设备只不过是把各种电器设备集中在一起，技术相对简单，难于发挥技术人员的聪明才智。而现在人们可以看到，正是依靠多年在研究、设计、工艺、试验、管理、运行、维修中的技术和经验的积累，依靠众多技术人员的精心、创造性的劳动，才推出了一种又一种、令人耳目一新、不拘一格、性能日趋完善、适用场所更广的金属封闭开关设备。

正是基于以上状况，本书的作者深感无论在国内还是国外，目前尚缺少一本有关金属封闭开关设备的实用型技术书籍。作者希望本书的出版能对从事金属封闭开关设备的设计、制造、试验和运行的技术人员有所帮助，特别希望能对一些年轻的技术人员有所裨益。本书的编写宗旨是：①包括原理、结构、计算、运行、动向多方面；②力争深入浅出，图文并茂，以适合不同水平及经验的人员；③重点只限于说明和解决工程实际问题，提供各种数据、曲线和图表，并不涉及较深入细致的机理，所用数学大多为中等学校水平。本书的内容只限于高压开关技术（包括绝缘技术及监测诊断技术），不包括一次接线、二次接线以及量计、继电保护、控制、通信等内容。

在本书中，作者摘编了日本电气学会近年来出版的《电气学会技术报告（Ⅱ部）》中的几本报告：《中压开关设备绝缘方式的技术动向（第622集）》、《中压开关设备的传热技术（第839集）》、《柜型气体绝缘开关设备（C-GIS）的技术动向（第442集）》、《中压开关设备的复合化·系统化的技术动向（第796集）》等和一些其他文献，丰富了本书的内容。作者认为：日本是工业发达的国家，科技研发有很深的积垫，有不少工作深入细致并有其传统特色。他们的工作成果也包括工作方法对我国将是有益的，在此表示衷心的感谢。当然，这里面有不少日本国的数据、观点，未必能很好地适应我国的情况。此外，本书也包含了我国

不少工作成果及经验。

本书第1章第1.5节由清华大学张节容教授编写，第2章由北开公司杨丽华高级工程师编写，第7章由中国电力科学研究院高压开关所所长袁大陆高工编写，第8章由清华大学关永刚博士编写，其余由本人编写并总成全书。本书最后经清华大学徐国政教授审定。

限于作者见识及水平，又加时间仓促，本书难免会有诸多错误或不当处，欢迎读者指正。联系地址：[100084]北京清华大学电机系。电子邮箱：qianj@tsinghua.edu.cn。电话：010-62784520。

钱家骧 谨识

2006年4月于清华园

目 录

前言

▶ 第 1 章 概述	1
1.1 高压金属封闭开关设备	1
1.2 我国近年生产概况	1
1.3 应用和分类	4
1.4 历史变迁	8
1.5 综合技术	12
1.6 数字技术	14
1.7 产品标准	14
附录 1.1 人力操作姿态、参数和最佳位置	27
▶ 第 2 章 结构分析	28
2.1 通用型空气绝缘和复合绝缘开关设备	28
2.2 负荷开关熔断器组合柜（环网柜）	43
2.3 SF ₆ 气体绝缘开关设备（C-GIS）	61
2.4 熔断器—高压接触器开关设备（F-C 回路柜）	68
▶ 第 3 章 发热	74
3.1 概述	74
3.2 劣化及故障	76
3.3 发热技术基础	77
3.4 自然对流气体中长导体的长期通流量计算	80
3.5 开关柜的热时间常数	83
3.6 导体短时间的电流耐受能力	83
3.7 开关柜内电气元件的选择和配置	84
3.8 开关柜长期温升计算方法	85
3.9 太阳光照对开关柜的影响	90
3.10 耐热设计	93

3.11 特殊环境中的开关柜设计考虑	95
3.12 开关柜稳定温升试验注意事项	96
附录 3.1 铜和铝导体的载流量	98
附录 3.2 SF ₆ 和空气的物性数据	103

第 4 章 绝缘

4.1 绝缘技术的重要性	104
4.2 绝缘材料及结构	104
4.3 空气绝缘技术	106
4.4 SF ₆ 气体绝缘技术	111
4.5 固体绝缘技术	116
4.6 日本电场计算技术	121
4.7 日本绝缘技术的沿革和展望	124

第 5 章 内部电弧故障

5.1 内部电弧故障	125
5.2 柜内的气体压力过程	126
5.3 柜内压力估算方法	127
5.4 抗内部电弧故障技术	128
5.5 压力释放装置实例	128

第 6 章 柜型气体绝缘开关装置 (C-GIS)

6.1 概述	130
6.2 分类	131
6.3 C-GIS 的基本技术	131
6.4 C-GIS 的出线连接	140
6.5 减少 SF ₆ 气体温室效应的对策	142

第 7 章 运行情况及事故分析

7.1 1990~1999 年国内配电断路器运行情况	145
7.2 1990~1999 年国内电力系统配电开关设备运行情况	145
7.3 2000~2001 年国内电力系统配电开关设备运行情况	150
7.4 1988~1991 年高压断路器可靠性国际问卷调查结果及对比分析	152
7.5 2002 年事故举例及分析	153
7.6 2001 年事故举例及分析	156
7.7 2000 年事故举例及分析	157

第 8 章 在线监测与故障诊断	159
8.1 概述	159
8.2 在线监测与故障诊断的方法	161
8.3 在线监测与故障诊断装置实例	171
参考文献	175

1.1 高压金属封闭开关设备

开关柜在我国是一种应用范围广泛的电力设备。开关柜的英文为 switchgear, 也是开关板、开关柜和开关设备的意思。根据我国国家标准和其他众多标准, 开关柜的正式名称为金属封闭开关设备 (Metalclad switchgear)。本书描述的只是中压级的金属封闭开关设备。中压在我国国家标准中指额定电压为 3.6、7.2、12、24、40.5kV, 属高电压 (大于 1kV) 中的中压级, 其他标准亦大同小异。

高压金属封闭开关设备是一种组合式电器, 它可以集断路器、负荷开关、接触器、隔离开关、熔断器、互感器、避雷器、电容器、母线以及相应的量测装置、控制装置、保护装置、监测诊断装置、信号装置、连锁装置以及通信系统等一个长方柜形的金属外壳内。早期的变电站中并没有金属封闭开关设备。那时, 变电站建设者根据设计方案, 向各有关制造厂商购入各种中压电气设备, 在变电站土建结构的间隔中安装各种设备, 并进行调试试验。这种建设方式显然不合理。后来人们采用工厂化的方式, 将各种电气设备在开关柜制造厂统一设计、采购、制造、安装和调试。这种方式大大加速了变电站的设计、建造工期, 结构设计更为完善合理, 减小了占地面积和体积, 明显提高了变电站的质量, 使运行更加安全, 从而有很大的经济效益。多年来, 使用高压金属封闭开关设备而拒绝分立式结构已成为绝大多数变电站中压部分的惯例。

现在高压金属封闭开关设备种类十分繁多, 大致说来, 主要品种有四大类:

- (1) 通用型空气绝缘高压金属封闭开关设备;
- (2) 气体绝缘高压金属封闭开关设备 (C-GIS, 即 Cubic Gas Insulated Switchgear);
- (3) 环网柜 (RMU, 即 Ring Main Unit);
- (4) 高压负荷开关—熔断器和熔断器—接触器柜 (F-C, 即 Fuse-Contactor 柜)。

1.2 我国近年生产概况

我国生产的金属封闭开关设备的情况以 2002 年为例大致如下。

(1) 40.5kV 金属封闭开关设备共 10493 面, 27.5~55kV 金属封闭开关设备共 15 面, 24kV 金属封闭开关设备共 22 面, 12kV 金属封闭开关设备共 113855 面。2002 年全国生产 12kV 真空断路器共 133519 台。12kV 的真空断路器绝大多数用于金属封闭开关设备。12kV 环网柜共 35065 面。估计产值达十几亿元。

(2) 40.5kV 金属封闭开关设备 2001 年较 2000 年增加 68%，2002 年较 2001 年增加 16%；12kV 金属封闭开关设备 2001 年较 2000 年增加 3%，2002 年较 2001 年增长 42%。总的看来，增速极快。

(3) 生产金属封闭开关设备（环网柜除外）的企业按产量多少排序为：

- 1) 江苏长江电气集团有限公司（5734 面）；
- 2) 天水长城开关厂（5690 面）；
- 3) 常州森源开关有限公司；
- 4) 厦门 ABB 开关有限公司；

（以上超过 4000 面）

- 5) 陕西开关厂；
- 6) 上海天灵开关厂；

（以上超过 3000 面）

- 7) 正泰集团成套设备制造有限公司；
- 8) 中山明阳电器有限公司；
- 9) 上海柘中有限公司；
- 10) 沈阳利华能源设备制造有限公司；
- 11) 广州白云电器设备有限公司；
- 12) 华仪电器集团有限公司；

（以上超过 2000 面）

- 13) 宁波耐吉科技有限公司；
- 14) 福州天宇电气股份有限公司；
- 15) 河南森源电气股份有限公司；
- 16) 绍兴电力设备成套公司；
- 17) 上海西门子开关有限公司；
- 18) 锦州新生开关有限责任公司；
- 19) 汕头正超电气有限公司；
- 20) 四川开关厂；
- 21) 吉林龙鼎电气股份有限公司。

（以上超过 1500 面）

据统计，2002 年年产超过 1000 面的厂共 37 个，生产的高压金属封闭开关设备占全国 207 个企业总产量的 71%。

(4) 生产 12kV 环网柜的企业以数量多少排序如下：

- 1) 宁波天安股份有限公司（6146 面）；
- 2) 广州白云电器设备有限公司（2945 面）；
- 3) 上海天灵开关厂（2000 面以上）；
- 4) 广东省顺德开关有限公司；
- 5) 温州市开元电气有限公司；

（以上 1500 面以上）

- 6) 宁波华通电器集团股份有限公司；

- 7) 中山市阳明电器股份有限公司;
- 8) 广州市番禺市开关有限公司;
- 9) 江苏长江电气集团有限公司;
- 10) 江苏京隆开关厂;
- 11) 金华电力开关有限公司。

(以上 600 面以上)

产量最高的 15 个企业的产量占全国 207 个企业总产量的 63%。

(5) 据统计, 2002 年我国高压开关企业中主要经济指标 (企业经济指标项目很多, 不同企业各有所长) 完成较好的 20 个企业为 (未排序):

- 西安西电高压开关有限责任公司;
- 平顶山天鹰集团有限公司;
- 沈阳高压开关有限责任公司;
- 北京北开电气股份有限公司;
- 厦门开关有限公司;
- 宁波天安股份有限公司;
- 江苏东源电器集团股份有限公司;
- 江苏长江电气集团股份有限公司;
- 华仪电器集团有限公司;
- 山东泰开电气有限公司;
- 广州白云电器设备有限公司;
- 天水长城开关厂;
- 正泰集团成套设备制造有限公司;
- 上海柘中有限公司;
- 吉林龙鼎电气股份有限公司;
- 沈阳华利能源设备制造有限公司;
- 上海天灵开关厂;
- 宁波耐吉科技股份有限公司;
- 常州森源开关有限公司;
- 中山市明阳电器有限公司。

在以上 20 个企业中, 除西开、平高、沈高、北开等四大传统高压开关制造大厂外, 其余 16 个企业中的 15 个都是高压开关柜的生产大户。

根据以上情况可以看出:

(1) 由于我国电力急剧增长 (包括持续多年的城网、农网改造), 对金属封闭开关设备的需求量很大并不断增长。

(2) 我国是世界真空断路器产量最大的国家, 而真空断路器主要用于装设金属封闭开关设备。

(3) 我国金属封闭开关设备主要厂家集中于东南和广东一带, 特别是浙江、江苏和珠江三角洲一带。

(4) 我国生产金属封闭开关设备的厂商很多, 达 217 家, 2002 年厂平均产量不足 800 面, 从生产效率和资金积累看是相当不合理的。

(5) 金属封闭开关设备由于其技术和生产的特点,常可以获得较好的经济效益。与此相关,近年来,民营企业在这方面的实力增长迅速。

(6) 近年来,金属封闭开关设备的品种不断增加,技术进步快,新结构层出不穷。

1.3 应用和分类

1.3.1 高压金属封闭开关设备的应用

在当今社会,电能已成为社会各方面的基本需要。工业,包括电力、煤炭、石油、冶金、采矿、化工、轻工以及各种信息产业,科技、军事、政府机关、各种民用单位均大量使用高压金属封闭开关设备。当前,在信息化社会中,社会形态急剧变化,各部门对电力设备的要求更日益提高,有关要求及背景见表 1.1。

表 1.1 当前对高压金属封闭开关设备的要求及背景

当前要求	社会背景
容量增大	用电增加
小型化	用地难、地价高
高可靠性	防止停电、防止火灾、防止设备和人身事故
耐环境性	各种环境的适应(潮湿、高热、高海拔、污染、粉尘等)
低造价、低运行维护费	市场竞争、人力资源昂贵
无公害化	噪声降低
外观好	环境协调

电力部门和其他一些领域、部门对高压金属封闭开关设备的特殊要求及对应技术见表 1.2~表 1.3。

表 1.2 电力部门各领域的特殊要求及对应技术

领域	特殊要求	对应技术
发电设备	高可靠性 高抗震性	高可靠性设计 抗震性设计
配电设备	尺寸缩小 外形美观 低噪声	SF ₆ 气体、超小型固体绝缘 外形艺术设计、加工 低噪声换气扇
移动式设备	易于搬运 高度、重量受限制 全天候型	小型化设计 防护设计
调相设备	频繁动作 维修容易	选用真空断路器及耐电腐蚀触头

表 1.3 其他领域、部门的特殊要求及对应技术

部门或领域	特殊要求	对应技术
高层建筑	防火灾 低噪声、低振动 小型、轻重量,搬运容易 操作维修容易	采用无油化设备 低噪声换气扇等 小型化、分割化 柜前操作、柜前维修
水处理设备	耐腐蚀、耐环境	耐腐蚀材料、表面处理

续表

部门或领域	特 殊 要 求	对 应 技 术
轧钢设备	耐环境性(粉尘) 动作频繁	防尘式 真空开关
石油、化工、煤炭	耐环境性 防爆	完全防爆密封式
电气铁道	防火灾 极频繁动作	采用无油化设备, 难燃绝缘材料, 长寿命的真空断路器

1.3.2 高压金属封闭开关设备的功能

当前, 高压金属封闭开关设备已具有多方面的功能, 可以满足使用上多方面的要求, 见表 1.4。

表 1.4 高压金属封闭开关设备的功能

功 能	作 用	承 担 器 件
遮蔽功能	防止触电、电磁干扰	外壳
隔离功能	防止事故扩大	隔板
绝缘功能	高压部分绝缘	绝缘介质、套管、支持绝缘子
通电功能	通过电流	母线、导体、触头
控制功能	合分电路	断路器、连锁装置
保护功能	过电流、过电压保护	继电器、断路器、避雷器
计量功能	各种电量计量	互感器、仪表等
监测诊断功能	在线监测、故障诊断	监测诊断装置
维护检修	便于维修	相关装置

1.3.3 高压金属封闭开关设备的分类

(1) 高压金属封闭开关设备按总体结构形式分类如下。

1) 开放式高压金属封闭开关设备见图 1.1。开放式高压金属封闭开关设备只在前面设有面板, 造价低, 但占地面积大, 高压带电部分外露, 且完全处于周围环境中, 不安全, 国内现基本已不生产。

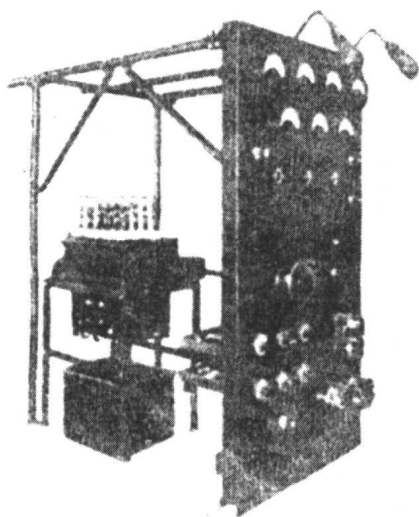


图 1.1 开放式高压金属封闭开关设备

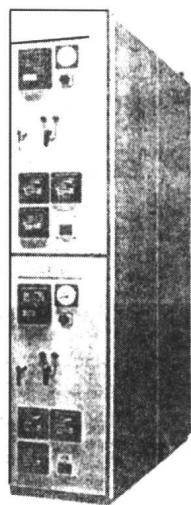


图 1.2 封闭式高压金属封闭开关设备

2) 封闭式高压金属封闭开关设备见图 1.2。封闭式高压金属封闭开关设备外部用接地金属板或金属网作外壳，较开放式增加了安全度，减小了占地面积。周围环境仍能对电气设备造成影响。

3) 密封式高压金属封闭开关设备。密封式高压金属封闭开关设备有完全隔离周围大气的外壳，因而增加了可靠性。根据柜内介质的不同，可分以下三种。

a) SF₆ 气体绝缘式。内充压力约 0.3MPa 或以下的 SF₆ 气体，因而明显缩小了开关柜外形尺寸。此种开关柜的内部结构见图 1.3。这种开关柜通称为 C-GIS (Cubic Gas Insulated Switchgear)，它具有长方体型的外壳，以便与多个圆筒形结构的 GIS 相区别。

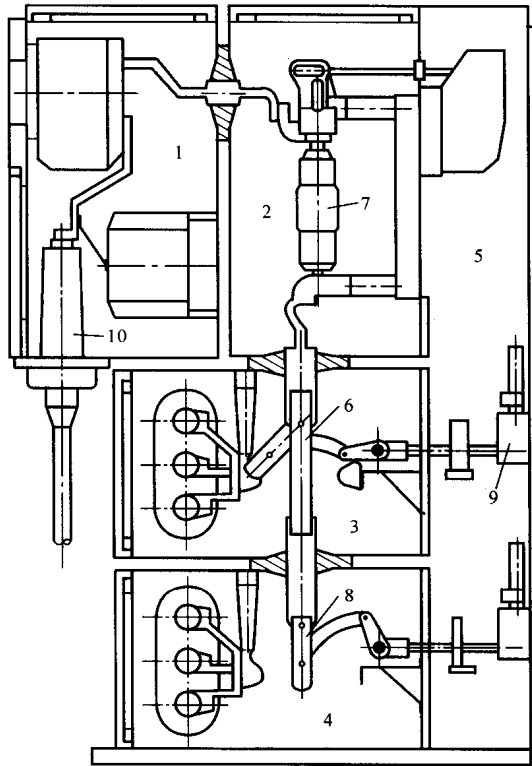


图 1.3 SF₆ 气体绝缘密封式开关柜剖面

1—电流互感器隔室；2—断路器隔室；3—上母线室；4—下母线室；5—控制室；6—母线隔离开关和接地装置；7—真空断路器；8—母线隔离开关和接地装置；9—隔离开关操动机构；10—电缆终端

b) 固体绝缘式。高压绝缘采用环氧树脂材料，因而尺寸更小。

c) 油绝缘式。采用变压器油作为绝缘介质，当前基本不采用。

不同绝缘结构的高压金属封闭开关设备的额定电压分布见表 1.5。

表 1.5 高压金属封闭开关设备的额定电压分布

绝缘介质	额定电压 (kV)						
	3.6	7.2	12	24	36	72	84
空气	△	△	△	△	△	△	△

续表

绝缘介质	额定电压 (kV)						
	3.6	7.2	12	24	36	72	84
SF ₆ 气体		△	△	△	△	△	△
固体		△	△	△			
绝缘油						△	△

(2) 按开关设备内部设备分类如下:

1) 通用型。开关设备的主要设计依据是断路器柜, 其他用途的柜如电压互感器柜、负荷开关—熔断器柜等均具有相同尺寸。

2) 交流接触器—熔断器组合电器。

3) 环网柜。近年来为了适应环网供电和双电源供电的要求而出现的一种开关柜。

(3) 通用型高压金属封闭开关设备内主要电气设备是高压断路器, 根据断路器的安装方式又可分为:

1) 固定式。高压断路器安装在开关柜的固定架构上。

2) 移开式。高压断路器安装在开关柜内可移开的小车上, 以便于维修, 这种结构又称为小车式。这种开关柜的典型结构的剖面图见图 1.4。

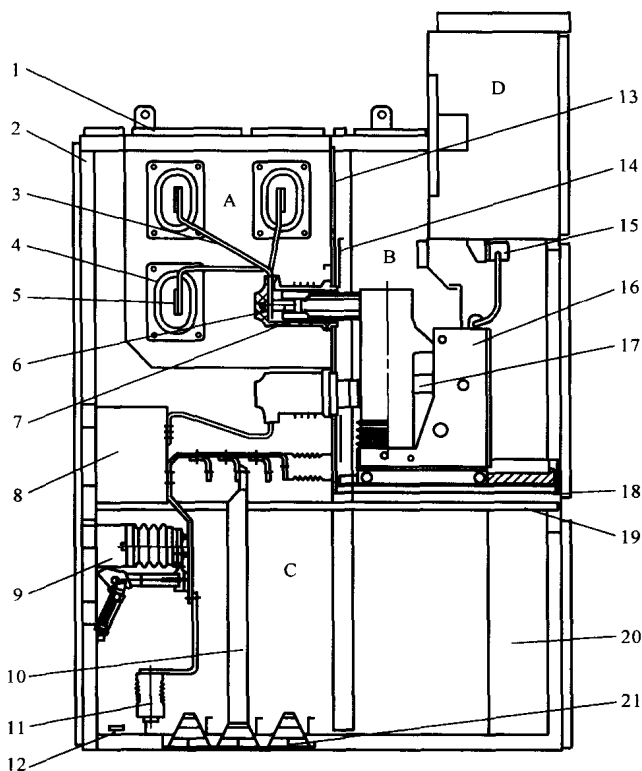


图 1.4 KYN28 剖面图

A—母线室; B—断路器手车室; C—电缆室; D—继电器仪表室

1—泄压装置; 2—外壳; 3—分支小母线; 4—母线套管; 5—主母线; 6—静触头装置; 7—静触头盒; 8—电流互感器; 9—接地开关; 10—电缆; 11—避雷器; 12—接地主母线; 13—隔板; 14—隔板(活门); 15—二次插头; 16—断路器手车; 17—加热装置; 18—可抽出式隔板; 19—接地开关操动机构; 20—控制小母线槽; 21—电缆封板

移开式又可分为手车式、中置式和中落式。

(4) 高压金属封闭开关设备也可根据柜内各部分的分隔方式分为：

- 1) 箱式。柜内无隔板或隔板不全，安全程度较低。
- 2) 间隔式。使用一块或更多的非金属隔板将柜内分割为母线室、电缆室和断路器室等。
- 3) 铠装式。各室均用金属板隔开，安全等级高。

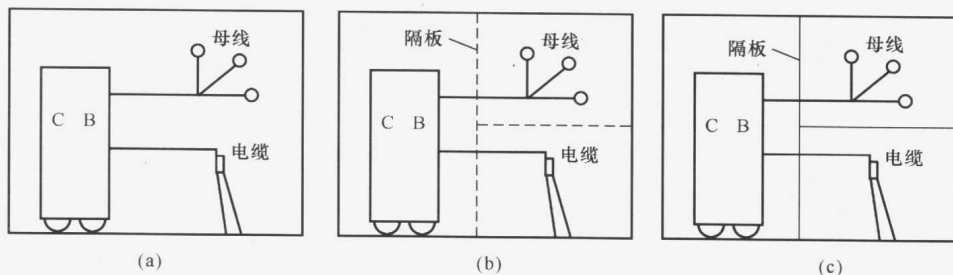


图 1.5 箱式、间隔式和金属铠装式简图

(a) 箱型（无隔板）；(b) 金属封闭型（1个以上金属隔板）；(c) 金属铠装型（全部使用金属隔板）

(5) 从柜体结构的层数看可以有单层、双层甚至三层。

(6) 高压金属封闭开关设备的柜体拼装结构通常有如下两种型式：

1) 焊接式。柜体由多块金属板焊接而成，工时多，劳动强度大，箱体尺寸准确度差，易变形。充气柜为了达到密封，也须采用此种方式。采用折弯的钢板可以减少泄漏及焊接工作量。

2) 组装式。采用螺栓或压拉螺母将金属板固紧形成柜体，柜体尺寸误差小，互换性好。这是当前空气绝缘高压金属封闭开关设备常采用的方式，但由于柜板上打很多孔，柜体强度将受影响。

1.4 历史变迁

1.4.1 高压金属封闭开关设备早期结构

高压组合开关设备的早期结构在 19 世纪末已出现，当时这种设备的主要特征是有一块绝缘前板，当时常称为配电盘（Switch Panel），最早绝缘板是木制，以后又有胶木板、酚醛树脂板、大理石板以及钢板。当前生产的高压金属封闭开关设备几乎全是钢板柜体，只有少数是铝合金柜体。图 1.6 所示是 20 世纪 30、40 年代开关柜的外形。图 1.7 示出了 7.2kV 高压金属封闭开关设备的变迁。

随着上百年的技术进步，高压金属封闭开关设备的品种不断增加，更好地满足了多种用户、多种运行条件下的要求，在技术和经济特性上也取得了长足的进步。现从几个主要方面分述如下。

1.4.2 绝缘技术上的进步

约 100 年来，除了内部电气设备主要是断路器的型式不断更新外，最重要的改变是绝缘结构的改变。绝缘技术上进步的一个重要结果是在 1982 年出现了气体绝缘金属开关设备 C-GIS，以后又出现固体绝缘金属封闭开关设备。

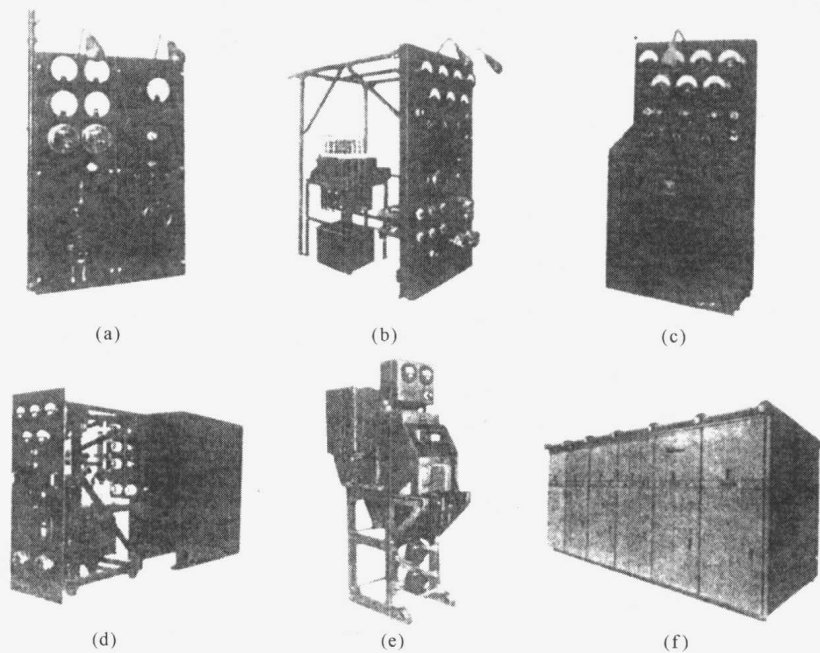


图 1.6 20 世纪早期的开关柜

(a)大理石配电盘(1932 年);(b)钢板配电盘(1935 年);(c)长椅式配电盘(1935 年);
(d)小车式开关柜(1938 年);(e)铠装式开关柜(1940 年);(f)单元封闭式配电盘

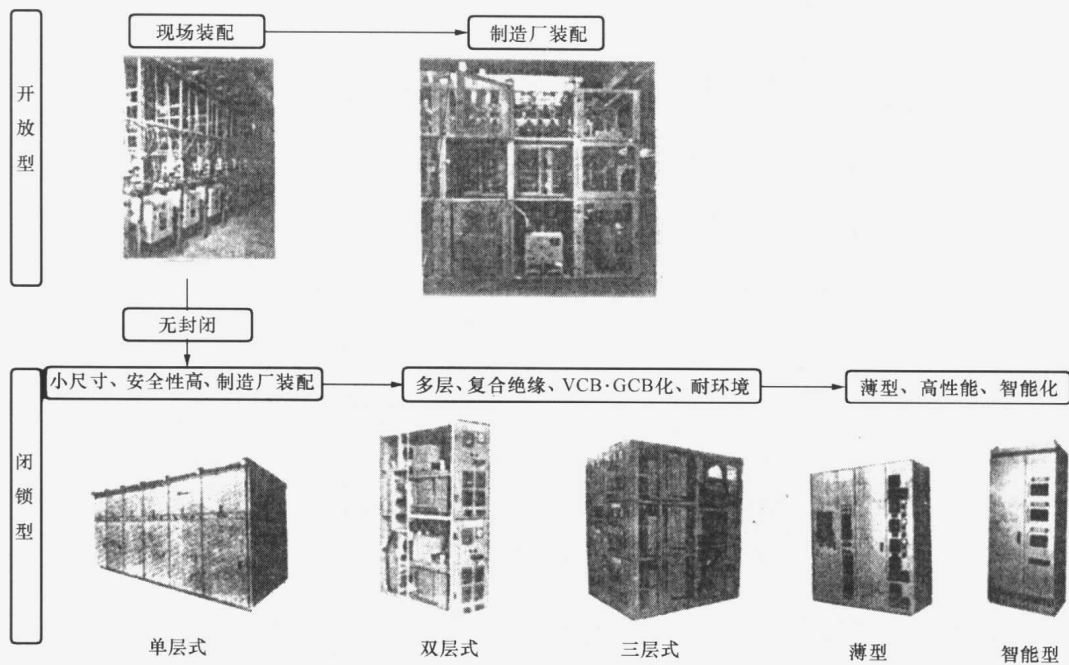


图 1.7 7.2kV 高压金属封闭开关设备的变迁