

黎 斌 著

SF₆ 高压电器设计

第3版



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

SF₆ 高压电器设计

第3版

黎 斌 著



机械工业出版社

本书总结了作者30多年来在SF₆高压电器开发工作中的研究成果与设计经验,详尽地介绍了SF₆气体的理化电气特性和SF₆气体管理方面的研究成果,总结了SF₆高压电器的结构设计经验及设计计算方法。作者以超前意识对SF₆金属封闭式组合电器小型化和智能化提出了许多有用的见解,并对该产品的在线监测技术进行了有实用价值的论述。对困惑高压电器行业多年的技术难题(如温度对SF₆湿度测量值的影响、SF₆湿度的限值及其在线监测、日照对产品温升的影响、高寒地区产品的设计与选用等),作者以自己的研究成果作了比较科学的回答。本书还系统地介绍了SF₆电流互感器的设计计算方法,对有暂态特性的CT绕组的工作特性作了深入的分析。

本书特点是:理论分析精炼,设计计算方法适用。

本书可供高压电器研究、设计人员,电力部门研究、设计和管理人员阅读,也可供高等院校相关专业教师、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

SF₆高压电器设计/黎斌著. —3版. —北京:机械工业出版社,
2009.11

ISBN 978-7-111-28569-4

I. S… II. 黎… III. 高压电器-设计 IV. TM510.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第205346号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:牛新国 版式设计:霍永明 责任校对:魏俊云

封面设计:姚毅 责任印制:乔宇

北京京丰印刷厂印刷

2010年1月第3版·第1次印刷

184mm×260mm·21.5印张·530千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-28569-4

定价:80.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

第 3 版前言

我国电力建设的高速发展推动着输变电设备技术的进步和产品的发展，世界一流水平的 800 ~ 1100kV 输变电设备的先后问世，标志着我国跨进了同行业国际先进水平。本书再版仅一年多再次脱销，表现出行业内广大的科技人员学习和研究 SF₆ 高压电器技术的高涨热情。

近年来，作者也与国内外年轻的同行们一起共同学习与探索，深感自己知识不足，跟不上产品快速发展的需要，深感与时俱进的压力。压力之下催人奋进与思考，为更好地让本书为 SF₆ 高压电器的发展服务，作者再次对第 2 版进行修订，补充了一些新技术、新材料和新的产品结构设计信息，同时也修正了某些设计经验数据，清理了书中的个别差错，使本书所介绍的近似量化分析方法更贴近新品开发和工程设计的需要。第 3 版还补充了一些 GIS 重要零部件制造技术和工程实用的 GIS 在线监测技术（例如，不同温度时测量的 SF₆ 密度和湿度的温度折算式、灭弧室烧蚀电寿命折算式对指导其在线监测仪的开发具有工程适用的价值）。

技术在不停地发展，知识需要更新。作者期待读者对本书所提供的知识，一定要结合工作实践在阅读中不断地纠错、完善与发展。

社会责任感激励作者不断地总结、修正和充实 SF₆ 高压电器设计经验，第 3 版又与读者见面了。希望有更多的读者来到这块知识的园地，共同耕耘，开拓高压电器的新天地。

最后，作者对华东电器集团公司在本书第 3 版修订出版工作中给予的关注与支持表示衷心的感谢。

作 者

2009 年 7 月于上海

第 2 版前言

本书自 2003 年初次与输变电设备研究、制造与运行单位的科技人员见面后，受到热烈的欢迎与关注，书店很快脱销，作者常接到求书者关于再版的询问。

高压电器（尤其是断路器）的设计，涉及到高电压绝缘、热力学、气体动力学、等离子体物理、机械制造与材料等多学科的知识，科技人员至今对高压电器一些本质上的理性认识远不够深入，致使产品开发设计工作数十年来一直处在经验传承阶段。可喜的是，通过近半个世纪的努力，我国高压电器研制行业的广大科技人员一代接一代地学习、继承和积累国内外同行的经验；并通过思考加工，使之完善和丰富，使产品开发设计工作和对产品运行状态的分析，脱离了单纯的经验估计，而开始进入到通过近似量化分析之后再行进行结构设计的新阶段。虽然对某些问题（如灭弧室的设计）我们还处在比较朦胧的探索之中，但我们毕竟向着科学精确地分析计算目标前进了一大步。

本书进行修订的目的，就是为了对这种近似量化分析设计方法进行一次阶段性的小结，对本书初版中某些尚未说清楚的问题进行修正与补充。希望这本书能帮助有关人员进行产品结构设计和运行状态分析时，运用书中所介绍的近似量化分析手段，使我们的工作有更高的准确度和效率。这次修订也纠正了本书初版时因种种原因所造成的差错，作者在此向初版读者致歉，并希望参照修订版本改正。

本书修订再版之所以称为是对近似量化分析设计方法的一次“阶段性的小结”，是因为作者工作经历、经验与知识的局限。这种“小结”还有待后来的同仁们进一步地纠错、完善与发展。

作 者
2007 年 10 月

第 1 版代序

高压电器制造业已走过了半个世纪的历程。在这 50 年中，建立起我国自己的产品系列，满足了电力系统和工业部门各个方面的需要。西安高压开关厂承担了一大部分高压和超高压电器的开发工作，近 10 多年来又与日本三菱公司合作生产 126 ~ 550kV SF₆ GCB 和 GIS，这些产品遍及全国各地，运行于各大电站之中，而 SF₆ 电器仍将是今后高压和超高压领域的主导产品和致力于开发的方向。

高压开关的设计，过去多依赖于经验和试验中的验证，于是经验的积累对于产品的开发有着极其重要的意义，随着技术的进步和大型计算机的应用，电弧物理和开断技术的研究有了广阔的前景，这是十分可喜的事。然而对于灭弧室的设计，不论对作用于其内的等离子体的物理过程掌握得如何，仍然要通过反复模拟、计算和实物验证来确定结构和尺寸。因而在实际工作中，认真总结经验教训，将感性知识理性化起来，实为不断开发新产品和提高学术水平的不二法则。

黎斌同志将毕生精力贡献在西安高压开关厂，主管过多种新产品的科研、设计和试制工作，尤其在 SF₆ 电器方面他涉足较早、经历得多、考虑尤深，所以他的著作《SF₆ 高压电器设计》一书，当能对现代电力装备的设计、制造、运行和科技管理具有启迪性和先导作用。对于产品设计，经验是具有普遍意义的，但不是全部；只有重视经验，又不囿于经验，善于学习，勇于探索，才能持续深入地把工作或事业推向前进。这些就是我所想的，也是寄希望于后来同仁的。

黎斌
31/11-2002

符号说明

A	振幅	F_d	地震力
A_c	喷嘴上游区环形截面积	F_D	电动力
A_h	喷嘴下游区气流通道截面积	F_f	风力
A_k	喷嘴喉颈截面积	F_j	接触压力
A_r	喷嘴与动弧触头间的气流侧面通道截面积	F_n	端子拉力
A_t	喷嘴下游出口处截面积	F_w	弯曲破坏力
a	加速度	F_{jy}	挤压力
B	磁通密度	F_q	剪切力
B_{bh}	饱和磁通密度	FS	仪表保安系数
b	铁心宽度	f	变比误差, 震动位移
c	线圈包扎厚度	f_{d1}	转动密封圈压紧力系数
D	壳体直径	f_{d2}	直动密封圈压紧力系数
D_1	套管受压体外径	G	喷口 SF ₆ 流量
D_2	套管密封圈外径	H	磁场强度
D_3	套管伞径	H_1	套管高度
D_{am}	电弧直径	H_r	套管风力作用重心高
D_{ap}	电弧平均直径	H_d	地震力作用重心高
D_c	气缸直径	H_n	端子力作用力臂
D_e	动弧触头孔径	I	转动惯量
D_k	喷嘴喉颈直径	I_1	一次电流
D_o	法兰孔中心圆直径	I_{1n}	额定一次电流
D_i	喷嘴下游出口直径	I_{1SC}	额定一次对称短路电流
D_{cp}	套管平均直径	I_{1ZC}	额定准确限值一次电流
d_0	嵌件直径	I_2	二次电流
d_1	套管受压体内径	I_{2n}	额定二次电流
d_2	绝缘杆直径	I_k	额定短时耐受电流
d_e	动弧触头外径	I_0	励磁电流
d_k	静弧触头外径	I_0N	励磁安匝
d_p	屏蔽直径	I_1	临界电流
E	材料弹性模量	I_{OP}	反相故障开断电流
E_1	SF ₆ 中雷电冲击允许场强, 一次电动势	I_L	近区故障开断电流
E_2	大气中瓷件允许工作场强, 二次电动势	I_{PO}	额定仪表保安一次限值电流
E_3	大气中瓷件局部放电起始场强	I_{AC}	短路电流交流分量
E_4	环氧树脂绝缘件内部(嵌件)允许工作场强	I_{DC}	短路电流直流分量
E_b	耐受场强	I_r	额定电流
$E_{50\%}$	雷电冲击负极性电压 50% 击穿场强	I_s	开断电流
E_r	SF ₆ 中固体绝缘件沿面切向允许场强	I_{sn}	额定短路开断电流

I_{Σ}	累积开断电流	L_g	瓷套外部干闪距离
j	母线许用电流密度	L_h	喷嘴喉颈部长度
j_b	触片许用电流密度	L_n	二次负荷电感
j_k	短时耐受电流密度	L_u	喷嘴与动弧触头端部的间隙
K	弹簧刚度系数, 抗弯刚度	L_x	套管外绝缘爬电距离
K_0	耐电压裕度	l	距离
K_1	E_1 计算经验数据	l_0	全行程
K_2	中间屏蔽电位系数	l_e	超行程
K_3	绝缘件电场分布不均匀系数	l_{ep}	铁心平均磁路长
K_4	绝缘件沿面距离设计裕度	l_k	开距
K_5	长杆绝缘件刚度设计系数	N_1	一次绕组匝数
K_6	平均分闸速度计算裕度	N_2	二次绕组匝数
K_7	CB 断口电压分布不均匀系数	N_s	等效开断次数
K_8	气缸余气密度系数	N_{sn}	额定短路开断电流开断次数
K_9	气缸平均密度系数	p_b	破坏水压
K_{10}	壳体计算直径设计裕度	p_r	额定工作气压
K_{11}	DS 断口电压分布不均匀系数	p_f	风压
K_{12}	壳体厚度设计裕度	Q	漏气量, 吸附剂重量
K_{13}	壳体法兰结构系数	Q_g	SF ₆ 充气量
K_{14}	产气系数	Q_w	SF ₆ 水分含量
K_{15}	吸附系数	R_0	CT 励磁回路电阻
K_{16}	日照温升修正系数	R_1	CT 一次回路电阻
K_a	海拔修正系数	R_2	CT 二次回路电阻
K_b	触头电动力计算系数	R_{CT}	CT 二次绕组电阻
K_{bh}	磁通饱和系数	R_j	接触电阻
K_c	触头材料系数	R_n	二次负荷电阻
K_d	低温时电强度下降系数	r	半径, 震动阻尼系数
K_e	梅花触头电流分布不均系数	S	铁心截面积
K_{Fe}	铁心叠片填充因数	S_1	套管受压体截面积
K_h	中间电位屏蔽高度比	S_2	承压面积
K_i	低温时开断能力下降系数, 漏气速率	S_f	受风压面积
K_n	CT 变比	S_q	受剪切截面积
K_r	加热器传热系数	S_{iy}	受挤压截面积
K_s	加热套保温面积与开关散热面积比	T_1	电网一次系统时间常数, 温度
K_{ssc}	额定对称短路电流倍数	T_2	CT 二次系统时间常数, 温度
K_{sc}	剩磁系数	T_r	触头熔点
K_{if}	额定瞬态面积系数	t	电阻投入时间
K_y	SF ₆ 低温密度下降系数	t_a	平均燃弧时间
L_0	CT 励磁回路电感	t_{ac}	长燃弧时间
L_1	CT 一次回路电感	t_{ad}	短燃弧时间
L_2	CT 二次回路电感	t_{ak}	切长线起弧点至恢复电压峰值点间隔时间
L_{CT}	CT 二次线圈电感	t_d	喷嘴堵塞时间
L_d	喷嘴下游长度	t_{fr}	故障重复时间

t'	第一次开断时间	Z_{CT}	CT 绕组阻抗
t''	第二次开断时间	α	应力集中系数
U_{01}	电阻片工频耐压能力	α_1	雷电冲击闪络电压计算裕度
U_2	二次绕组端电压	α_2	CT 二次回路阻抗角
U_6	电容器元件耐受电压	α_b	短路电流偏移度
U_a	电弧压降	β	加速度放大倍数
U_b	击穿电压, 介质恢复强度	γ	SF ₆ /N ₂ 混合比
U_g	工频耐受电压	θ	时间常数
U_n	额定电压	φ	阻抗角
U_{nl}	额定线电压	φ_0	焊接系数
U_{np}	额定相电压	ψ	铁心损耗角
U_R	恢复电压	δ	CT 相位差
U_s	工频湿闪耐受电压	δ_1	壳体壁厚
U_{th}	雷电冲击耐受电压	δ_2	法兰厚度
U_{50}	50% 雷电冲击闪络电压	ρ	SF ₆ 密度, 电阻率
V	体积	ρ_0	SF ₆ 额定气压时密度
V_g	SF ₆ 电弧分解物产气量	ρ_h	喉部气流平均密度
v_f	平均分闸速度	ε_a	复合误差
v_h	平均合闸速度	ε	暂态误差
X	水分浓度	σ	电导率
Y	年漏气率	$[\sigma_n]$	瓷件内压允许应力
Z_0	励磁阻抗	$[\sigma_w]$	瓷件弯曲允许应力
Z_1	CT 一次回路阻抗	ξ	振动阻尼比
Z_2	CT 二次回路阻抗		

目 录

第3版前言

第2版前言

第1版代序

符号说明

第1章 SF₆的基本特性 1

1.1 SF₆的物理性能 1

1.2 SF₆的气体状态参数 2

1.3 SF₆的化学性能 3

1.3.1 SF₆具有良好的热稳定性 3

1.3.2 SF₆电弧分解过程 4

1.3.3 SF₆与开关灭弧室材料的
化学反应 4

1.3.4 水和氧等杂质产生酸性有
害物质 4

1.3.5 SF₆电弧分解物中有剧毒
的S₂F₁₀吗? 5

1.4 SF₆的绝缘特性 5

1.4.1 SF₆气体间隙的绝缘特性 5

1.4.2 SF₆中绝缘子的沿面放电特性 11

1.4.3 减小金属微粒危害的措施 13

1.5 SF₆气体的熄弧特性 15

1.5.1 SF₆气体特性创造了良好的熄
弧条件 15

1.5.2 SF₆中的气流特性 17

第2章 SF₆电器的气体管理 20

2.1 SF₆气体的杂质管理 20

2.1.1 SF₆气体的毒性 20

2.1.2 生物试验方法 20

2.1.3 电弧分解气体的毒性及处理 21

2.2 SF₆气体的湿度管理 23

2.2.1 水分进入开关的途径 23

2.2.2 水分对开关性能的影响 23

2.2.3 温度对SF₆湿度测量值的影响 25

2.2.4 SF₆湿度测量值的温度折算 28

2.2.5 用相对湿度标定湿度限值科学
准确 28

2.2.6 SF₆湿度限值 30

2.2.7 SF₆湿度测量方法 30

2.2.8 SF₆湿度控制方法 31

2.2.9 运行开关的水分处理 32

2.3 SF₆气体的密封管理 32

2.3.1 SF₆开关设备的密封结构 32

2.3.2 密封环节的清擦与装配 32

2.3.3 工程适用的检漏方法(真空
监视、肥皂泡监视、充SF₆
及充He检漏) 32

2.3.4 SF₆密度的监控及误差分析 37

附录2.A SF₆湿度测量值的温度折
算表 41

附录2.B 充SF₆检漏一个密封环节允
许漏气浓度增量ΔC及单点
允许漏气率F_漏的计算 46

附录2.C 充氮检漏允许泄漏率计算 48

第3章 GCB/GIS总体设计 49

3.1 设计思想的更新 49

3.2 简单就是可靠、简单就是效益 49

3.3 GCB/GIS总体设计的核心 50

3.4 GCB/GIS总体结构设计要求 50

3.4.1 GCB灭弧室及操动机构的
选择 50

3.4.2 罐式与瓷柱式GCB的合理
分工 51

3.4.3 高低档参数有机搭配 51

3.4.4 结构整体化设计 52

3.4.5 环境因素的影响 52

3.5 GCB/GIS可靠性的验证试验 53

3.5.1 电寿命试验 53

3.5.2 机械强度试验 53

3.5.3 高低温环境下的操作试验 53

3.5.4 耐风沙、暴雨、冰雪及污
秽试验 53

第4章 T·GCB/GIS出线套管 设计 54

4.1 40.5~145kV出线套管内绝缘设计 54

4.1.1	中心导体设计	54	设计与运行可靠性	77
4.1.2	允许雷电冲击场强值 E_i 的选择	55	5.5.6	水分入侵芯体对复合绝缘子机械强度的影响
4.2	252~363kV 出线套管内绝缘设计	56		77
4.3	550~1100kV 出线套管内绝缘设计	57	第6章 SF₆ 电器绝缘结构设计—— 气体间隙、环氧树脂浇注件、 真空浸渍管(筒)件	
4.3.1	中间电位内屏蔽的作用	57	6.1	SF ₆ 气隙绝缘结构设计
4.3.2	中间电位内屏蔽的设计	58	6.1.1	气隙电场设计基准
4.3.3	中间电位及接地屏蔽设计尺寸的 验算	59	6.1.2	SF ₆ 气隙中电极优化设计
4.3.4	中间屏蔽支持绝缘子设计	60	6.2	环氧树脂浇注件设计
4.4	套管外绝缘设计	60	6.2.1	绝缘件电场设计基准
4.4.1	瓷件基本尺寸及耐受电压的 计算	60	6.2.2	典型的绝缘筒(棒)结构设计
4.4.2	高海拔、防污秽型瓷套设计	62	6.2.3	绝缘筒(棒)机械强度设计
4.4.3	瓷套外屏蔽设计	62	6.2.4	盆式绝缘子设计 10 个要点
4.5	瓷套机械强度设计	64	6.3	真空浸渍环氧玻璃丝管(筒)设计
4.5.1	瓷套法兰胶装比	64	6.3.1	真空浸渍管(筒)性能
4.5.2	瓷质与工艺	64	6.3.2	真空浸渍管(筒)绝缘件电气 结构设计
4.5.3	瓷套内水压与抗弯强度设计	65	6.3.3	真空浸渍管(筒)绝缘件机械 强度设计
4.6	550kV SF ₆ 电流互感器支持套管中 间电位屏蔽设计实例	66	第7章 合闸电阻及并联电容器 设计	
4.6.1	中间电位屏蔽尺寸的优化 设计	66	7.1	合闸电阻额定参数的选择
4.6.2	中间电位屏蔽的加工工艺方 案设计	67	7.1.1	电阻值 R
第5章 硅橡胶复合绝缘子的特点和 设计		69	7.1.2	电阻投入时间 t
5.1	复合绝缘子的特点和应用	69	7.1.3	电压负荷
5.2	伞裙材料的选用	70	7.1.4	电阻两次投入的时差 Δt
5.3	绝缘子芯体(筒、棒)材料的选择	71	7.2	电阻片的特性参数
5.4	复合绝缘子设计的四点要求	72	7.3	合闸电阻设计计算
5.4.1	机械强度设计要求	73	7.3.1	设计步骤
5.4.2	刚度设计要求	74	7.3.2	计算实例(一)
5.4.3	电气性能设计要求	74	7.3.3	计算实例(二)
5.4.4	胶装及密封设计要求	75	7.4	合闸电阻的触头及传动装置设计
5.5	复合绝缘子长期运行的可靠性	76	7.4.1	合闸电阻投切动作原理
5.5.1	绝缘子表面亲(疏)水性与 污闪	76	7.4.2	电阻片安装方式设计
5.5.2	硅橡胶疏水性的迁移与运行 可靠性	76	7.4.3	电阻触头及分合闸速度设计
5.5.3	HTV 硅橡胶的高能硅氧键与 运行可靠性	76	7.5	并联电容器设计
5.5.4	抗电蚀能力与运行可靠性	77	7.5.1	并联电容器容量设计(800kV 双断口串联 T·GCB 计算例)
5.5.5	硅橡胶护套及伞裙组装工艺		7.5.2	电容元件及电容器参数选择
			7.5.3	电容器组的结构设计
			第8章 GCB/GIS 的电接触和温升	

8.1 接触电阻	106	特性	136
8.2 梅花触头设计	107	9.5.4 分闸特性与喷嘴的配合	136
8.2.1 动触头设计	107	9.6 缓和断口电场的屏蔽设计	136
8.2.2 触头弹簧圈向心力计算	107	9.7 双气室自能式灭弧室的发展	137
8.2.3 触片设计	108	9.7.1 40.5~145kV 自能式灭弧室	
8.2.4 触指电动稳定性设计	108	逐步完善稳定	137
8.2.5 触指热稳定性设计	109	9.7.2 触头双动灭弧室的产生	137
8.3 自力型触头设计	110	9.7.3 双动双气室灭弧室设计要点	138
8.3.1 导电截面及触指数设计	110	9.7.4 对双气室和单气室灭弧室的	
8.3.2 接触压力计算	110	评价	139
8.3.3 触头材料及许用变形应力	111	9.8 近似量化类比分析法在灭弧室	
8.3.4 旋压成形插入式触头		设计中的应用	139
(自力型触头的进化)	111	9.8.1 252kV、40kA 灭弧室开断试验	
8.3.5 铜钨触头及其质量控制	111	结果分析与改进	140
8.4 表带触头的设计与制造工艺	112	9.8.2 252kV、50kA 单气室自能式灭	
8.4.1 表带触头的特点	112	弧室的增容设计	142
8.4.2 表带触头的设计	112	9.8.3 800kV 灭弧室设计要领	143
8.4.3 表带触头的材料、制作工艺		9.9 机构操作功及传动系统强度计算	145
及表面处理	113	9.9.1 运动件等效质量计算	145
8.4.4 电动稳定性与热稳定性核算	113	9.9.2 机构操作功计算	146
8.5 螺旋弹簧触头设计	114	9.9.3 弹簧机构的分、合闸弹簧	
8.5.1 螺旋弹簧触头的特点	114	设计	148
8.5.2 螺旋弹簧触头及弹簧槽设计	114	9.9.4 液压机构储能碟簧设计	149
8.5.3 弹簧触头接触电阻的稳定性	120	9.9.5 开关操作系统强度计算	151
8.5.4 弹簧触头的选用和表面处理	122	9.10 调整分、合闸速度特性的方法	152
8.6 导体发热与温升计算	122	第10章 密封结构设计	154
第9章 GCB 灭弧室数学计算模型的		10.1 密封机理	154
设计与估算	124	10.2 影响 SF ₆ 电器泄漏量的因素	154
9.1 平均分闸速度 v_f 的设计	124	10.3 O 形密封圈和密封槽的设计	157
9.2 触头开距 l_k 及全程程 l_0 设计	126	10.3.1 O 形密封圈直径 (外径 D)	
9.3 喷嘴设计	126	与线径 d_0 的配合	157
9.3.1 上游区设计	127	10.3.2 密封圈材质的选用	157
9.3.2 喉颈部设计	128	10.3.3 密封圈表面要求	159
9.3.3 下游区设计	131	10.3.4 密封槽尺寸设计	159
9.3.4 喷嘴材料	132	10.4 SF ₆ 动密封设计	160
9.4 气缸直径的初步设计	133	10.4.1 转动密封唇形橡胶圈设计	160
9.4.1 气缸直径 D_c 与机构操作力 F	133	10.4.2 X 形动密封圈设计	160
9.4.2 气缸直径 D_c 的经验设计值	134	10.4.3 矩形密封圈直动密封设计	162
9.5 分闸特性及其与喷嘴的配合	135	10.5 密封部位的防水防腐设计	162
9.5.1 分闸初期应有较大的加速度	135	第11章 GIS 中的 DS、ES 和母线	
9.5.2 分闸速度对自能式灭弧室开		设计	165
断性能的影响	136	11.1 三工位隔离开关的基本结构	165
9.5.3 分闸后期应有平缓的缓冲			

11.2 DS及ES断口开距设计	166	温升的影响	186
11.3 DS断口触头屏蔽设计	167	14.1.1 考虑方法	186
11.4 DS分合闸速度设计	168	14.1.2 日照温升试验	186
11.5 1100kV GIS—DS、ES设计的 特殊问题	168	14.1.3 试验值分析	186
11.6 快速接地开关设计	170	14.1.4 结论	187
11.7 GIS母线设计	171	14.2 高寒地区产品的设计与应用	188
11.7.1 波纹管设计	172	14.2.1 降低额定参数使用	188
11.7.2 可拆卸母线外壳设计	173	14.2.2 开关充SF ₆ +N ₂ 混合气体	189
11.7.3 绝缘支持件设计	173	14.2.3 (SF ₆ +CF ₄)混合气体的 应用	192
第12章 SF₆电器壳体设计	174	14.2.4 经济实用的低温产品设计方案 ——加热保温套设计	193
12.1 壳体电气性能要求	174	14.2.5 高寒地区(-40/-50°C) 产品的选择	195
12.2 壳体材质及加工工艺选择	174	第15章 SF₆电流互感器绕组设计	196
12.3 壳体电气尺寸设计	175	15.1 CT误差及准确级	196
12.4 焊接壳体设计与计算	175	15.1.1 CT误差的产生	196
12.4.1 焊接壳体强度设计因素	175	15.1.2 CT准确级	198
12.4.2 焊接壳体壁厚设计	176	15.2 影响CT电流误差的因素	199
12.4.3 焊接圆筒端盖(法兰)及盖板 厚度设计	177	15.2.1 一次电流的影响	199
12.4.4 焊接圆筒端部封头强度 设计	177	15.2.2 二次绕组匝数N ₂ 的影响	199
12.4.5 焊缝结构及焊缝位置设计	177	15.2.3 平均磁路长度l ₀ 的影响	199
12.5 铸铝壳体设计与计算	179	15.2.4 铁心截面积S的影响	199
12.5.1 铸铝壳体强度设计因素	179	15.2.5 铁心材料的影响	199
12.5.2 铸造壳体厚度设计	179	15.2.6 二次负荷的影响	200
12.6 壳体耐电弧烧蚀能力设计	181	15.2.7 绕组阻抗Z _{CT} 的影响	200
12.7 壳体加工质量监控设计	181	15.3 测量级和保护级绕组设计及 误差计算步骤	200
12.7.1 壳体强度监控	181	15.3.1 绕组及铁心内径设计	200
12.7.2 焊缝气密性监控	181	15.3.2 铁心设计	200
12.7.3 铸件壳体气密性监控	181	15.3.3 确定绕组的结构及阻抗	201
第13章 吸附剂及爆破片设计	183	15.3.4 测量级绕组误差计算步骤	202
13.1 吸附剂设计	183	15.3.5 稳态保护级(5P、10P)绕组 误差计算步骤	203
13.1.1 F—O3吸附剂性能简介	183	15.4 0.2级和5P级CT绕组设计及误差 计算示例	203
13.1.2 F—O3吸附剂活化处理	183	15.4.1 0.2级、FS5、126kV、2× 300/5A、30VA绕组设计及 误差计算(第一方案)	203
13.1.3 吸附剂用量设计	184	15.4.2 0.2级、FS5、126kV、2× 300/5A、30VA绕组改进设计 及误差计算(第二方案)	205
13.2 爆破片设计	185	15.4.3 252kV、5P25、2×300/5A、	
13.2.1 爆破片的选型与安装	185		
13.2.2 爆破压力设计	185		
13.2.3 压力泄放口径设计	185		
第14章 环温对SF₆电器设计的 影响	186		
14.1 日照对SF ₆ 电器及户外隔离开关			

50VA 绕组设计及误差计算	206	16.3.7 与各标准间隔对应的就地控制柜及气体监控柜的标准化	238
15.5 暂态保护特性绕组的基本特性参数	208	16.3.8 GIS 与电缆接口件标准化	238
15.5.1 设计暂态保护特性绕组的原始数据	208	16.3.9 GIS 与变压器接口件标准化	241
15.5.2 额定二次回路时间常数 T_2	209	16.4 GIS 图样和设计文件的标准化及分类管理	243
15.5.3 额定瞬变面积系数 K_d	209	16.4.1 GIS 图样的标准化设计及管理	243
15.5.4 铁心剩磁系数 K_m	209	16.4.2 GIS 基本间隔气体系统图的标准设计	244
15.5.5 暂态特性 CT 绕组的分级	209	16.4.3 GIS 基本单元的配套表 (MX 表) 及各种汇总表的标准设计	244
15.6 暂态磁通密度增大系数 K_d 与暂态误差 $\hat{\epsilon}$	210	16.4.4 GIS 基本间隔的配套表及各种汇总表的标准设计	244
15.6.1 CT 铁心未饱和时的暂态过程	210	16.4.5 GIS 工程设计通知书	245
15.6.2 CT 暂态面积系数 K_d	211	16.4.6 GIS 通用设计文件的标准化	245
15.6.3 暂态误差计算式	212	第 17 章 GIS 小型化和智能化设计	
15.7 暂态特性绕组设计计算步骤和计算示例	213	(在线监测技术及应用)	246
15.7.1 TPY 绕组计算步骤	213	17.1 一次元件小型化	246
15.7.2 550kV、1250/1A、10VA、TPY 绕组计算示例	214	17.2 二次监控智能化的目的与构成	248
15.7.3 550kV、2500/1A、15VA、TPY 绕组计算示例	216	17.3 开发可靠性高、寿命长的信息传感器	248
15.8 铁心饱和及其对暂态绕组工作特性的影响	217	17.3.1 电流传感器	248
15.9 影响 CT 暂态特性的因素及其改善措施	218	17.3.2 电压传感器	251
15.10 CT 罩及 CT 线圈屏蔽设计	220	17.3.3 分合位置传感器	253
附录 15.A SMC101 等合金磁化曲线图	220	17.3.4 分合速度传感器	254
第 16 章 GIS 设计标准化	228	17.3.5 弹簧储能传感器	254
16.1 GIS 设计非标准化的弊病	228	17.3.6 SF ₆ 气体密度及低湿度传感器	255
16.2 GIS 设计标准化的重要意义	228	17.3.7 温度、湿度传感器	255
16.3 GIS 结构设计标准化	229	17.3.8 故障定位传感器	255
16.3.1 GIS 基本元件标准化	229	17.3.9 压力传感器	255
16.3.2 GIS 基本接线间隔标准化的主要要求	229	17.3.10 氧化锌避雷器 (MOA) 泄漏电流传感器	256
16.3.3 126kV GIS 标准化的基本接线间隔	229	17.3.11 局部放电传感器	256
16.3.4 252kV GIS 标准化的基本接线间隔	233	17.4 PISA 和光纤传输技术	257
16.3.5 与各标准间隔对应的 GIS 主回路联结件及其内导标准化	238	17.5 智能化就地控制柜和保护单元	257
16.3.6 与各标准间隔对应的辅件标准化	238	17.5.1 智能化就地控制柜和保护单元的构成	257
		17.5.2 电站二次系统的更新与简化	258
		17.6 GIS 运行状态分析软件及按运行状态维修 GIS	258
		17.6.1 GIS 运行状态巡检仪	258

17.6.2	局部放电分析软件	259			
17.6.3	电寿命分析软件(电寿命折算 及在线监测技术)	264			
17.6.4	SF ₆ 密度及湿度分析软件	269			
17.7	GCB智能操作	270			
第18章 GIS的派生产品——					
	H·GIS的设计	271			
18.1	H·GIS及PASS的定义和结构 特征	271			
18.1.1	H·GIS	271			
18.1.2	PASS	274			
18.2	AIS、GIS、H·GIS及PASS的 特点分析	277			
18.2.1	结构和功能对比	277			
18.2.2	对H·GIS和PASS的评议	277			
18.3	选用H·GIS的技术经济分析	279			
18.4	550kV H·GIS使用示例	279			
18.5	复合电器的演变	280			
第19章 高压SF₆电器的抗震设计					
19.1	地震特性参数	283			
19.1.1	地震裂度	283			
19.1.2	地震频率与地震周期	283			
19.1.3	地震波形	283			
19.1.4	地震加速度	284			
19.2	产品动力特性参数	285			
19.2.1	产品自振频率 f_g	285			
19.2.2	振动阻尼与阻尼比 ξ	285			
19.2.3	弹性元件的刚度及弹性模量	285			
19.2.4	共振时的加速度(振幅)放 大系数 β	286			
19.3	高压电器设备抗震设计	288			
19.3.1	自振频率 f_g 和阻尼比 ξ	288			
19.3.2	加速度的放大系数 β	288			
19.3.3	强度估算	289			
19.3.4	位移估算	289			
19.3.5	提高高压电器设备抗震能力的 措施	290			
19.4	高压电器设备抗震能力的验证	290			
19.4.1	用计算机进行抗震能力计算	290			
19.4.2	抗地震性能试验	291			
第20章 GCB/GIS的典型开断、CT /VT的运行及设计注意					
	事项	293			
20.1	断路器的典型开断	293			
20.1.1	BTF开断	293			
20.1.2	SLF开断	295			
20.1.3	反相开断	297			
20.1.4	并联开断	298			
20.1.5	空载变压器开断	299			
20.1.6	切合电容器组及空载长线	299			
20.1.7	切电抗器	303			
20.1.8	发展性故障开断	304			
20.2	GIS—DS的典型切合操作	304			
20.2.1	切合母线转换电流(环流)	304			
20.2.2	切小电容电流	304			
20.3	GIS—FES的分合操作	307			
20.3.1	FES短路关合	307			
20.3.2	FES切合感应电流	307			
20.4	电网不同工况对CT的不同要求	307			
20.4.1	测量级绕组	308			
20.4.2	5P及10P稳态保护级绕组	308			
20.4.3	暂态保护用绕组(TP)	309			
20.4.4	10%误差曲线	309			
20.4.5	CT参数要求对CT结构设计 的影响	310			
20.4.6	使用CT时注意事项	311			
20.5	两种电压互感器的特征及运行中 应处理好的主要问题	311			
20.5.1	电压互感器的误差	311			
20.5.2	电磁式电压互感器运行时注意 事项	312			
20.5.3	电容式电压互感器的特点	312			
第21章 计算机辅助设计					
21.1	高压电场数值计算	314			
21.1.1	电场计算方法	314			
21.1.2	LVQB—252 SF ₆ 电流互感器三 维电场计算	314			
21.1.3	GCB灭弧室电场计算及电场 优化设计	318			
21.2	应力与变形分析	318			
21.3	抗震计算	320			
21.4	灭弧室开断能力计算	321			
参考文献					325
第1版后记					327

第 1 章 SF₆ 的基本特性

1.1 SF₆ 的物理性能

六氟化硫 (SF₆) 气体在高压电器行业已得到广泛的应用, 它的基本物理性能以及与空气的比较见表 1-1。

表 1-1 SF₆ 与空气的物理性能参数

项 目	SF ₆	空气
相对分子质量 m	146	28.8
气态密度 $\gamma/(\text{kg}/\text{m}^3)$ (20°C, 0.1MPa 时)	6.07	1.19
热导率 $\lambda/[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ (20°C 时)	0.130	0.0257
比定压热容 $c_p/[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ (20°C, 0.1MPa 时)	0.66×10^3	1.01×10^3
绝热指数 K (20°C)	1.08	1.40
游离温度 $\theta_f/^\circ\text{C}$	2000	7000
声速 $c/(\text{m}/\text{s})$ (20°C 时)	134	343
熔点 $\theta_s/^\circ\text{C}$ (0.23MPa 时凝点)	-50.8	
沸点 $\theta_b/^\circ\text{C}$ (0.1MPa 时液化点)	-63.8	-194
临界温度 $\theta_c/^\circ\text{C}$	45.6	-146.8 (N ₂) -118.8 (O ₂)
临界压力 p_c/MPa	3.77	N ₂ (3.39) O ₂ (5.06)
相对介电系数 ϵ_r (20°C, 0.1MPa 气态)	1.0021	1.0005
气体常数 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	56.2	287
临界压力比 $p_0/p_k = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$	0.59	0.53

在 SF₆ 所有的物理性能中, 我们最感兴趣的是由分子结构形成的负电性和较低的游离温度形成的高导热性。

SF₆ 分子结构是对称的八面体, 见图 1-1, 硫 (S) 原子居其中, 六个角上是氟 (F) 原子, S 与 F 原子间以共价键连接。SF₆ 等效直径为 4.58Å (Å 为非法定计量单位, 1Å = 0.1nm) 比水分子的等效直径 (3.2Å) 要大, 同容积同气压的 SF₆ 比空气重 5.1 倍。

六个顶向上的 F 原子是非常活泼的原子, 在原子核外, 内层电子数为 2, 外层电子数为 7, 仅缺一个电子便达到稳定的电子层分布。原子核最外层电子数超过 4 时, 便有吸附外部电子的能力, 随外层电子数增加, 其吸附电子的能力也增加, 外层电子数为 7 的氟原子在卤族元素中具有最大的电子亲合能 (4.1eV), 因此, 具有很强的吸附电子的能力。SF₆ 特有的强力吸附电子的能力, 称为负电性。SF₆ 的负电性比空气高几十倍。极强的负电性使 SF₆ 气体具有优良的绝缘性能, 电

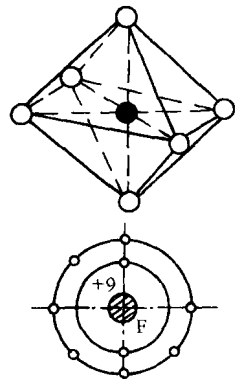


图 1-1 SF₆ 分子结构及 F 原子结构

极间在一定的场强下发生电子发射时，极间自由电子很快被 SF_6 吸附，大大阻碍了碰撞电离过程的发展，使极间电离度下降而耐受电压能力增强。这一负电性对于开断电弧电流过零后触头间的绝缘恢复也十分有利。因此， SF_6 气体被用于高压开关设备作为绝缘和熄弧介质，而使开关性能大大提高。

SF_6 气体另一个特性是较低温度时的高导热性。电弧弧套（弧心外围区）的平均温度常在 $1000 \sim 3000\text{K}$ ， SF_6 气体在这个较低温度范围内在 $2000 \sim 2500\text{K}$ 时就急剧分解， 4000K 附近全分解成 F 和 S 的单原子。 SF_6 在弧套区分解时，要从电弧吸取大量的热能，因此 SF_6 在 2000K 附近，其比定压热容 c_p 就急剧增长，出现导热尖峰，见图 1-2。而空气在弧套温度区没有热游离过程，因此 c_p 变化很小， N_2 的游离温度为 7000K ，只有很接近弧心的少数空气才会产生游离。由此可知，在电弧弧套温度区内， SF_6 比空气具有高得多的导热能力。

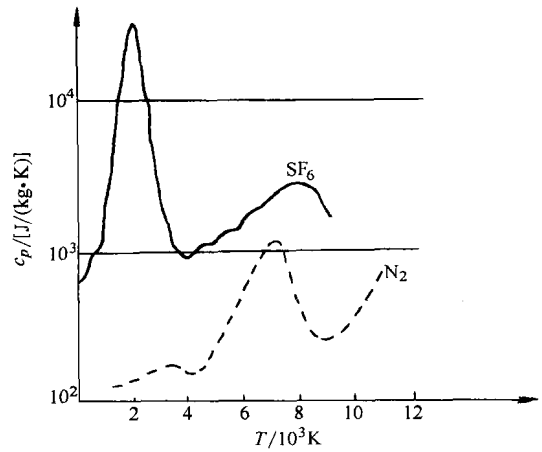


图 1-2 SF_6 和 N_2 （空气）在高温时的比定压热容 c_p

从能量平衡观点看，熄弧过程是电弧的电能转换成热能被熄弧介质吸收带走的过程。利用 SF_6 作熄弧介质，不仅靠气吹的作用从弧区排除能量，而且还利用 SF_6 分解过程中发生的能量转换从弧区吸收大量热能，因此使 SF_6 气体具有优良的熄弧能力。

1.2 SF_6 的气体状态参数

理想气体的状态方程为

$$p = \gamma RT \quad (1-1)$$

式中 p ——气压 (MPa) (工程中也有用非法定单位 kgf/cm^2 ， $1\text{kgf}/\text{cm}^2 \approx 0.1\text{MPa}$)；

γ ——气体密度 (kg/m^3)；

R ——气体常数 ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)， SF_6 为 $56.2\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ；

T ——气体的热力学温度 (K)。

SF_6 气体分子质量大，分子间相互吸力较大，尤其是当气体压力达到 0.3MPa 以上时，由于分子间距离被压缩、密度增大而使分子间吸力进一步增大（分子与容器壁间的碰撞力减弱），导致气体压力不再符合理想气体状态方程式 (1-1)，随密度的增加，实际压力的增长要比理想值低。

比较准确而实用的 SF_6 气体状态参数计算式可用 Beattie-Bridgman 公式表达

$$p = 56.2\gamma T(1+B) - \gamma^2 A \quad (1-2)$$

$$A = 74.9(1 - 0.727 \times 10^{-3}\gamma)$$

$$B = 2.51 \times 10^{-3}\gamma(1 - 0.846 \times 10^{-3}\gamma)$$