

黎 斌 著

SF₆ 高压电器

斌

第2版



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



SF₆ 高压电器设计

第2版

黎 斌 著



机械工业出版社

本书总结了作者 20 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: 理论分析精练, 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. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2007
ISBN 978-7-111-12057-5

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 (2007) 第 132526 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
李振标

封面设计: 姚毅 责任印制: 邓博

北京京丰印刷厂印刷

2008 年 1 月第 2 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17.75 印张 · 437 千字

4 001—7 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-12057-5

定价: 49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

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. 10

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/IV-2002

符号说明

A	振幅	F_d	地震力
A_e	喷嘴上游区环形截面积	F_D	电动力
A_n	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_k	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_l	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_f	套管风力作用重心高
D_{avp}	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_{ISC}	额定一次对称短路电流
D_{cp}	套管平均直径	I_{IZC}	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}	二次额定电流
d_2	绝缘杆直径	I_0	励磁电流
d_e	动弧触头外径	I_{0N}	励磁安匝
d_k	静弧触头外径	I_r	额定电流
d_p	屏蔽直径	I_l	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_s	开断电流
$E_{50\%}$	雷电冲击负极性电压 50% 击穿场强	I_{sn}	额定短路开断电流
E_r	SF_6 中固体绝缘件沿面切向允许场强	I_{Σ}	累积开断电流

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_c	超行程
K_3	绝缘件电场分布不均匀系数	l_{cp}	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_s	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_n	二次负荷电阻
K_c	触头材料系数	r	半径, 震动阻尼系数
K_d	低温时电强度下降系数	S	铁心截面积
K_e	梅花触头电流分布不均系数	S_1	套管受压体截面积
K_{Fe}	铁心叠片填充因数	S_2	承压面积
K_h	中间电位屏蔽高度比	S_f	受风压面积
K_i	低温时开断能力下降系数, 漏气速率	S_q	受剪切截面积
K_n	CT 变比	S_{iy}	受挤压截面积
K_r	加热器传热系数	T_1	电网一次系统时间常数, 温度
K_s	加热套保温面积与开关散热面积比	T_2	CT 二次系统时间常数, 温度
K_{ssc}	额定对称短路电流倍数	T_r	触头熔点
K_{sc}	剩磁系数	t	电阻投入时间
K_{tf}	额定瞬态面积系数	t_a	平均燃弧时间
K_γ	SF ₆ 低温密度下降系数	t_{ac}	长燃弧时间
L_0	CT 励磁回路电感	t_{ad}	短燃弧时间
L_1	CT 一次回路电感	t_{ak}	切长线起弧点至恢复电压峰值点间隔时间
L_2	CT 二次回路电感	t_d	喷嘴堵塞时间
L_{CT}	CT 二次线圈电感	t_{fr}	故障重复时间
L_d	喷嘴下游长度	t'	第一次开断时间
L_k	瓷套外部干闪距离	t''	第二次开断时间

U_{01}	电阻片工频耐压能力	α	应力集中系数
U_2	二次绕组端电压	α_1	雷电冲击闪络电压计算裕度
U_6	电容器元件耐受电压	α_2	CT二次回路阻抗角
U_a	电弧压降	α_b	短路电流偏移度
U_b	击穿电压, 介质恢复强度	β	加速度放大倍数
U_k	工频耐受电压	γ	SF ₆ /N ₂ 混合比
U_r	额定电压	θ	时间常数
U_{nl}	额定线电压	φ	阻抗角
U_{np}	额定相电压	φ_0	焊接系数
U_R	恢复电压	ψ	铁心损耗角
U_s	工频湿闪耐受电压	δ	CT相位差
U_{th}	雷电冲击耐受电压	δ_1	壳体壁厚
U_{50}	50% 雷电冲击闪络电压	δ_2	法兰厚度
V	体 积	ρ	SF ₆ 密度, 电阻率
V_g	SF ₆ 电弧分解物产气量	ρ_0	SF ₆ 额定气压时密度
v_f	平均分闸速度	ρ_h	喉部气流平均密度
v_h	平均合闸速度	ε_a	复合误差
X	水分浓度	ε	暂态误差
Y	年漏气率	σ	电导率
Z_0	励磁阻抗	$[\sigma_n]$	瓷件内压允许应力
Z_1	CT一次回路阻抗	$[\sigma_w]$	瓷件弯曲允许应力
Z_2	CT二次回路阻抗	ξ	振动阻尼比
Z_{CT}	CT绕组阻抗		

目 录

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

1.5 SF₆气体的熄弧特性 14

1.5.1 SF₆气体特性创造了良好的
熄弧条件 14

1.5.2 SF₆中的气流特性 16

第2章 SF₆电器的气体管理 19

2.1 SF₆气体的杂质管理 19

2.1.1 SF₆气体的毒性 19

2.1.2 生物试验方法 19

2.1.3 电弧分解气体的毒性及处理 20

2.2 SF₆气体的湿度管理 22

2.2.1 水分进入开关的途径 22

2.2.2 水分对开关性能的影响 22

2.2.3 温度对SF₆湿度测量值的影响 24

2.2.4 用相对湿度标定湿度限值
科学准确 27

2.2.5 SF₆湿度限值 28

2.2.6 SF₆湿度测量方法 29

2.2.7 SF₆湿度控制方法 30

2.2.8 运行开关的水分处理 30

2.3 SF₆气体的密封管理 30

2.3.1 SF₆开关设备的密封结构 30

2.3.2 密封环节的清擦与装配 31

2.3.3 检漏方法 31

2.3.4 SF₆密度的监控 33

第3章 GCB/GIS总体设计 36

3.1 设计思想的更新 36

3.2 GCB/GIS总体设计的核心 36

3.3 GCB/GIS总体结构设计要求 37

3.3.1 GCB灭弧室及操动机构的
选择 37

3.3.2 罐式与瓷柱式GCB的
合理分工 38

3.3.3 高低档参数有机搭配 38

3.3.4 结构整体化设计 38

3.3.5 环境因素的影响 38

3.4 GCB/GIS可靠性的验证试验 39

3.4.1 电寿命试验 39

3.4.2 机械强度试验 39

3.4.3 高低温环境下的操作试验 39

3.4.4 耐风沙、暴雨、冰雪
及污秽试验 40

第4章 T·GCB/GIS出

线套管设计 41

4.1 40.5~145kV出线套管内
绝缘设计 41

4.1.1 中心导体设计 41

4.1.2 允许雷电冲击场强值E₁
的选择 42

4.2 252~363kV出线套管内绝缘设计 43

4.3 550~1100kV出线套管内绝缘
设计 44

4.3.1 中间电位内屏蔽的作用 44

4.3.2 中间电位内屏蔽的设计 45

4.3.3 中间电位及接地屏蔽
设计尺寸的验算 45

4.3.4 中间屏蔽支持绝缘子设计 46

4.4 套管外绝缘设计	46	6.3.2 抗拉强度设计	68
4.4.1 瓷件基本尺寸及耐受电压 的计算	46	6.3.3 抗弯、抗扭强度设计	68
4.4.2 高海拔、防污秽型瓷套设计	48	6.3.4 抗剪与抗压强度设计	69
4.4.3 瓷套外屏蔽设计	49	6.3.5 嵌件的处理	69
4.5 瓷套机械强度设计	50	6.4 盆式绝缘子设计	69
4.5.1 瓷套法兰胶装比	51	6.4.1 盆式绝缘子各部位允许场强	70
4.5.2 瓷质与工艺	51	6.4.2 消除楔形气隙的不良影响	70
4.5.3 瓷套内水压与弯曲强度设计	51	6.4.3 利用屏蔽坑减小三交区场强	70
4.6 550kV SF ₆ 电流互感器支持套管 中间电位屏蔽设计实例	53	6.5 真空浸渍环氧玻璃布管绝缘件 设计	71
第5章 硅橡胶复合绝缘子 的特点和设计	55	第7章 合闸电阻及并联 电容器设计	72
5.1 复合绝缘子的特点和应用	55	7.1 合闸电阻额定参数的选择	72
5.2 伞裙材料的选用	56	7.1.1 电阻值 R	72
5.3 绝缘子芯体(筒、棒)材料的选择	57	7.1.2 电阻投入时间 t	72
5.4 复合绝缘子设计的四点要求	58	7.1.3 电压负荷	73
5.4.1 机械强度设计要求	59	7.1.4 电阻两次投入的时差 Δt	73
5.4.2 刚度设计要求	60	7.2 电阻片的特性参数	73
5.4.3 电气性能设计要求	60	7.3 合闸电阻设计计算	74
5.4.4 胶装及密封设计要求	61	7.3.1 设计步骤	74
5.5 复合绝缘子长期运行的可靠性	62	7.3.2 计算实例(一)	74
5.5.1 绝缘子表面亲(疏)水性 与污闪	62	7.3.3 计算实例(二)	76
5.5.2 硅橡胶疏水性的迁移与运行 可靠性	62	7.4 合闸电阻的触头及传动装置设计	77
5.5.3 HTV 硅橡胶的高能硅氧 键与运行可靠性	62	7.4.1 合闸电阻投切动作原理	77
5.5.4 抗电蚀能力与运行可靠性	63	7.4.2 电阻片安装方式设计	78
5.5.5 硅橡胶护套及伞裙组装机 设计与运行可靠性	63	7.4.3 电阻触头及分合闸速度设计	79
5.5.6 水分入侵芯体对复合绝缘子 机械强度的影响	63	7.5 并联电容器设计	81
第6章 SF₆ 电器用环氧树脂浇注及真空 浸渍管绝缘件设计	65	7.5.1 并联电容器容量设计(800kV 双断口串联 T. GCB 计算例)	81
6.1 设计基准	65	7.5.2 电容元件及电容器参数选择	82
6.2 典型的绝缘筒、棒设计	66	7.5.3 电容器组的结构设计	83
6.2.1 沿面放电距离的确定	66	第8章 GCB/GIS 的电接触设计	84
6.2.2 绝缘筒(棒)直径 $D(d)$ 的设计	67	8.1 接触电阻	84
6.2.3 屏蔽罩设计	67	8.2 梅花触头设计	85
6.3 绝缘筒(棒)机械强度设计	67	8.2.1 动触头设计	85
6.3.1 许用应力	67	8.2.2 触头弹簧圈向心力计算	85
		8.2.3 触片设计	86
		8.2.4 触指电动稳定性设计	86
		8.2.5 触指热稳定性设计	87
		8.3 自力型触头设计	88
		8.3.1 导电截面及触指数设计	88
		8.3.2 接触压力计算	88

8.3.3 触头材料及许用变形应力	88	的增容设计	117
8.3.4 铤压成形插入式触头 (自力型触头的进化)	89	9.8.3 800kV 灭弧室设计要领	118
8.4 表带触头的设计与制造工艺	89	第10章 密封结构设计	120
8.4.1 表带触头的特点	89	10.1 密封机理	120
8.4.2 表带触头设计	89	10.2 影响 SF ₆ 电器泄漏量的因素	120
8.4.3 表带触头的材料、制作 工艺及表面处理	90	10.3 O形密封圈和密封槽的设计	123
8.4.4 电动稳定性与热稳定性核算	90	10.4 SF ₆ 动密封设计	124
8.5 螺旋弹簧滑动触头设计	91	10.4.1 转动密封设计	124
8.5.1 螺旋弹簧触头的特点	91	10.4.2 直动密封设计	125
8.5.2 A型螺旋弹簧触头设计要点	91	10.4.3 X形动密封圈设计	125
8.5.3 B型螺旋弹簧触头设计	92	第11章 GIS中的DS和ES设计	127
第9章 GCB灭弧室数学计算模型的设计与估算	98	11.1 DS及ES断口开距设计	127
9.1 平均分闸速度 v_i 的设计	98	11.2 DS断口触头屏蔽设计	127
9.2 触头开距 l_k 及全程 l_0 设计	100	11.3 DS分合闸速度设计	128
9.3 喷嘴设计	100	11.4 快速接地开关合闸速度设计	128
9.3.1 上游区设计	100	11.5 1100kV GIS-DS、ES设计的特殊问题	129
9.3.2 喉颈部设计	102	第12章 SF₆ 电器壳体设计	131
9.3.3 下游区设计	104	12.1 壳体电气性能要求	131
9.3.4 喷嘴材料	106	12.2 壳体材质及加工工艺选择	131
9.4 气缸直径的初步设计	107	12.3 SF ₆ 电器壳体设计	132
9.4.1 气缸直径 D_c 与机构操作力 F	107	12.4 壳体强度设计与计算	132
9.4.2 气缸直径 D_c 的经验设计值	107	12.4.1 壳体强度设计	132
9.5 分闸特性及其与喷嘴的配合	108	12.4.2 壳体壁厚设计	133
9.5.1 分闸初期应有较大的加速度	108	12.4.3 圆筒端盖(法兰)厚度设计	133
9.5.2 分闸速度对自能式灭弧室 开断性能的影响	109	12.4.4 圆筒端部封头强度设计	133
9.5.3 分闸后期应有平缓 的缓冲特性	109	12.5 壳体加工质量监控设计	134
9.5.4 分闸特性与喷嘴的配合	110	12.5.1 壳体强度监控	134
9.6 缓和断口电场的屏蔽设计	110	12.5.2 焊缝气密性监控	134
9.7 机构操作功估算	111	12.5.3 铸件壳体气密性监控	134
9.7.1 确定分闸弹簧功	111	第13章 吸附剂及爆破片设计	135
9.7.2 合闸弹簧设计	112	13.1 吸附剂设计	135
9.7.3 调整分、合闸速度 特性的方法	113	13.1.1 F-03 吸附剂性能简介	135
9.8 近似量化类比分析法在灭弧室 设计中的应用	114	13.1.2 F-03 吸附剂活化处理	135
9.8.1 252kV、40kA 灭弧室开断试验 结果分析与改进	114	13.1.3 吸附剂用量设计	136
9.8.2 252kV、50kA 单气室自能式灭弧室		13.2 爆破片设计	137
		13.2.1 爆破片的选型与安装	137
		13.2.2 爆破压力设计	137
		13.2.3 压力泄放口径设计	137
		第14章 环温对 SF₆ 电器设计的影响	138
		14.1 日照对 SF ₆ 电器及户外隔离	

开关温升的影响	138	原始数据	158
14.1.1 考虑方法	138	15.5.2 额定二次回路时间	
14.1.2 日照温升试验	138	常数 T_2	159
14.1.3 试验值分析	138	15.5.3 额定瞬变面积系数 K_{if}	159
14.1.4 结论	139	15.5.4 铁心剩磁系数 K_{re}	159
14.2 高寒地区产品的设计与应用	140	15.5.5 暂态特性 CT 绕组的分级	159
14.2.1 降低额定参数使用	140	15.6 暂态磁通密度增大系数 K_{td} 与	
14.2.2 开关充 $SF_6 + N_2$ 混合气体	141	暂态误差 $\hat{\varepsilon}$	160
14.2.3 经济实用的低温产品设计方案		15.6.1 CT 铁心未饱和时的暂态	
——加热保温套设计	144	过程	160
第 15 章 SF_6 电流互感器		15.6.2 CT 暂态面积系数 K_{td}	161
绕组设计	146	15.6.3 暂态误差计算式	162
15.1 CT 误差及准确级	146	15.7 暂态特性绕组设计计算步骤	
15.1.1 CT 误差的产生	146	和计算示例	163
15.1.2 CT 准确级	148	15.7.1 TPY 绕组计算步骤	163
15.2 影响 CT 电流误差的因素	149	15.7.2 550kV, 1250/1A, 10VA,	
15.2.1 一次电流的影响	149	TPY 绕组计算示例	164
15.2.2 二次绕组匝数 N_2 的影响	149	15.7.3 550kV, 2500/1A, 15VA,	
15.2.3 平均磁路长度 l_p 的影响	149	TPY 绕组计算示例	166
15.2.4 铁心截面积 S 的影响	149	15.8 铁心饱和及其对暂态绕组	
15.2.5 铁心材料的影响	149	工作特性的影响	167
15.2.6 二次负荷的影响	150	15.9 影响 CT 暂态特性的因素	
15.2.7 绕组阻抗 Z_{ct} 的影响	150	及其改善措施	168
15.3 测量级和保护级绕组设计		附录 SMC101 等合金磁化曲线图	170
及误差计算步骤	150	第 16 章 GIS 设计标准化	177
15.3.1 绕组及铁心内径设计	150	16.1 CIS 设计非标准化的弊病	177
15.3.2 铁心设计	150	16.2 GIS 设计标准化的重要意义	177
15.3.3 确定绕组结构及阻抗	151	16.3 GIS 结构设计标准化	178
15.3.4 测量级绕组误差计算步骤	152	16.3.1 GIS 基本元件标准化	178
15.3.5 稳态保护级 (5P、10P)		16.3.2 GIS 基本接线间隔标准化的	
绕组误差计算步骤	153	主要要求	178
15.4 0.2 级和 5P 级 CT 绕组设计及		16.3.3 126kV GIS 标准化的	
误差计算示例	153	基本接线间隔	178
15.4.1 0.2 级, FS5, 126kV, $2 \times$		16.3.4 252kV GIS 标准化的	
300/5A, 30VA 绕组设计及		基本接线间隔	182
误差计算 (第一方案)	153	16.3.5 与各标准间隔对应的 GIS 主回路	
15.4.2 0.2 级, FS5, 126kV, $2 \times 300/$		联结件及其内导标准化	187
5A, 30VA 绕组改进设计		16.3.6 与各标准间隔对应的辅件	
与计算 (第二方案)	155	标准化	187
15.4.3 252kV, 5P25, $2 \times 300/5A,$		16.3.7 与各标准间隔对应的就地控制	
50VA 绕组设计计算	156	柜及气体监控柜的标准化	187
15.5 暂态保护绕组的基本特性参数	158	16.3.8 GIS 与电缆接口件标准化	187
15.5.1 设计暂态保护特性绕组的		16.3.9 GIS 与变压器接口件	

标准化.....	190	19.1.1 地震裂度.....	227
16.4 GIS 图样和设计文件		19.1.2 地震频率与地震周期.....	227
的标准化及分类管理	192	19.1.3 地震波形.....	227
16.4.1 GIS 图样的标准化设计		19.1.4 地震加速度.....	228
及管理.....	192	19.2 产品动力特性参数	229
16.4.2 GIS 基本间隔气体系统图		19.2.1 产品自振频率 f_g	229
的标准化设计.....	193	19.2.2 振动阻尼与阻尼比 ξ	229
16.4.3 GIS 基本单元的配套表 (MX 表)		19.2.3 弹性元件的刚度及弹性	
及各种汇总表的标准化的.....	193	模量.....	229
16.4.4 GIS 间隔的配套表及各种		19.2.4 共振时的加速度 (振幅)	
汇总表的标准化.....	193	放大系数 β	230
16.4.5 GIS 工程设计通知书	194	19.3 高压电器设备抗震设计	232
16.4.6 GIS 通用设计文件		19.3.1 自振频率 f_g 和阻尼比 ξ	232
的标准化.....	194	19.3.2 加速度的放大系数 β	232
第 17 章 GIS 小型化和智能化设计		19.3.3 强度估算.....	233
(在线监测技术及应用)	195	19.3.4 位移估算.....	233
17.1 一次元件小型化	195	19.3.5 提高高压电器设备抗震能力	
17.2 二次监控智能化	197	的措施.....	234
17.2.1 开发可靠性高、寿命长		19.4 高压电器设备抗震能力的验证	234
的信息传感器.....	197	19.4.1 计算机进行抗震能力计算.....	234
17.2.2 PISA 和光纤传输技术	205	19.4.2 抗地震性能试验.....	235
17.2.3 智能化就地控制柜和		第 20 章 GCB/GIS 的典型开断、CT/VT	
保护单元.....	205	的运行及设计注意事项.....	237
17.2.4 GIS 运行状态分析软件及按运行		20.1 断路器的典型开断	237
状态维修 GIS (局放分析及电		20.1.1 BTF 开断.....	237
寿命监测)	206	20.1.2 SLF 开断	239
17.2.5 GCB 智能操作	214	20.1.3 反相开断.....	241
第 18 章 GIS 的派生产品		20.1.4 并联开断.....	242
——H·GIS 的设计	215	20.1.5 空载变压器开断.....	243
18.1 H·GIS 及 PASS 的定义和结构		20.1.6 切合电容器组及空载长线.....	243
特征	215	20.1.7 切电抗器.....	247
18.1.1 H·GIS	215	20.1.8 发展性故障开断.....	248
18.1.2 PASS	218	20.2 GIS-DS 的典型切合操作	248
18.2 AIS、GIS、H·GIS 及 PASS 的		20.2.1 切合母线转换电流(环流)	248
特点分析	221	20.2.2 切小电容电流.....	249
18.2.1 结构和功能对比.....	221	20.3 GIS-FES 的分合操作	250
18.2.2 对 H·GIS 和 PASS 的评议	221	20.3.1 FES 短路关合	250
18.3 选用 H·GIS 的技术经济分析	223	20.3.2 FES 切合感应电流.....	250
18.4 550kV H·GIS 使用示例	223	20.4 电网不同工况对 CT 的不同要求	250
18.5 复合电器的演变	224	20.4.1 测量级绕组.....	251
第 19 章 高压 SF₆ 电器的抗震设计 ...	227	20.4.2 5P 及 10P 稳态保护级绕组	251
19.1 地震特性参数	227	20.4.3 暂态保护用绕组 (TP)	252
		20.4.4 10% 误差曲线.....	252

20.4.5	CT 参数要求对 CT 结构设计的影响	253	21.1.1	电场计算方法	256
20.4.6	CT 使用注意事项	254	21.1.2	LVQB-252 SF ₆ 电流互感器 三维电场计算 (示例)	256
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	254	21.1.3	GCB 灭弧室电场计算及电场 优化设计	260
20.5.1	电压互感器的误差	254	21.2	应力与变形分析	260
20.5.2	电磁式电压互感器运行 注意事项	255	21.3	抗震计算	262
20.5.3	电容式电压互感器的特点	255	21.4	灭弧室开断能力计算	263
第 21 章	计算机辅助设计	256	参考文献		267
21.1	高压电场数值计算	256	第 1 版后记		269

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列于表 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 γ (kg/m ³) / (20°C, 0.1MPa 时)	6.07	1.19
热导率 λ / [W/(m·K)] (20°C 时)	0.130	0.0257
比定压热容 c_p / [J/(kg·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 θ_f / °C	2000	7000
声速 c / (m/s) (20°C 时)	134	343
熔点 θ_r / °C (0.23MPa 时凝点)	-50.8	
沸点 θ_b / °C (0.1MPa 时液化点)	-63.8	-194
临界温度 θ_c / °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 (20°C, 0.1MPa 气态)	1.0021	1.0005
气体常数 / [J/(kg·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

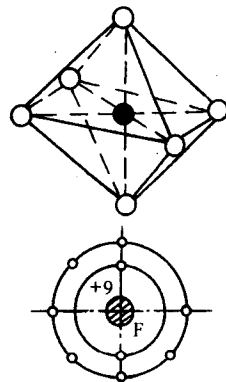


图 1-1 SF₆ 分子结构及 F 原子结构

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 气体在这个较低的温度范围内在 $2000 \sim 2500\text{K}$ 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。

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。

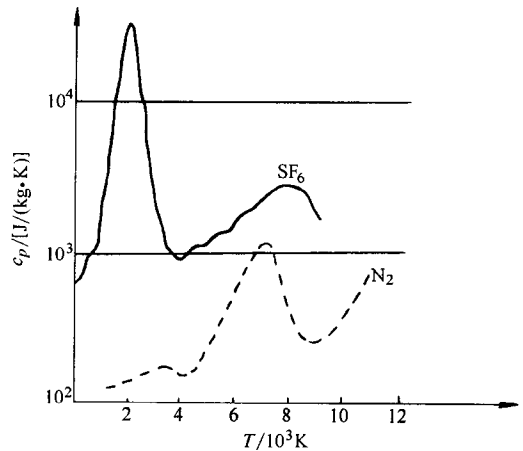


图 1-2 SF_6 和 N_2 (空气) 在高温时的比定压热容 c_p

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)；

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 (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

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

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

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

式中 p ——压力 (Pa);
 γ ——气体密度 (kg/m^3);
 T ——气体的热力学温度 (K)。

根据式 (1-2), 当气体密度 γ 不同时, 可得到 SF_6 气体压力与温度按不同的斜率成线性变化的关系, 算出的气体压力-温度曲线族见图 1-3。

SF_6 气体的临界温度 (即可能被液化的最高温度) 为 45.6°C , 在常温时有足够的压力就可液化。

SF_6 气体压力等于和高于其饱和蒸气压时, SF_6 气体就液化。不同温度下, SF_6 饱和蒸气压也不同 (见表 1-2)。

从图 1-3 和表 1-2 可得到 SF_6 电器在不同气压下允许的最低工作温度及 SF_6 气压随温度的变化关系。

例如, 某产品在 20°C 时的操作闭锁压力 (即开关允许的最低工作气压) 为 0.5 (或 0.4) MPa (表计压力)。从图 1-3 上 t 轴 $+20^\circ\text{C}$ 处向上作垂直虚线, 对应产品最低工作绝对气压 0.6 (或 0.5) MPa 处点两点 B_1 (或 B_2), 过 B_1 (或 B_2) 点参考相邻密度 $40\text{kg}/\text{m}^3$ (或 $30\text{kg}/\text{m}^3$) 线作斜线 $T_1 B_1 C_1$ (或 $T_2 B_2 C_2$), 从饱和蒸气压曲线 AA' 上的交点 C_1 (或 C_2) 向下作垂直虚线与 t 轴交于 -30°C (或 -37°C)。得

到: 开关 SF_6 操作闭锁表计气压为 0.5 (或 0.4) MPa (20°C 时), 对应的最低工作温度为 -30°C (或 -37°C)。 -40°C 时对应的最低允许工作表计气压为 0.34 MPa (20°C 时)。

表 1-2 SF_6 气体的饱和蒸气压 p_b (表计气压值)

温度/ $^\circ\text{C}$	-70	-60	-50	-40	-35	-30	-20	-10	0	10	20	30
饱和蒸气压 p_b /MPa	0.07	0.11	0.23	0.34	0.42	0.50	0.68	0.93	1.24	1.61	2.06	2.59

1.3 SF_6 的化学性能

1.3.1 SF_6 具有良好的热稳定性

单纯的 SF_6 气体, 热稳定性高, 加热至 500°C 时不会分解。 SF_6 与某些绝缘物 (如硅树脂层压板) 接触时, 加热到 $160 \sim 200^\circ\text{C}$ 就分解, 水分存在时, 能加速分解。因此国际电工委员会 (IEC) 推荐 SF_6 产品最高使用温度为 180°C 。

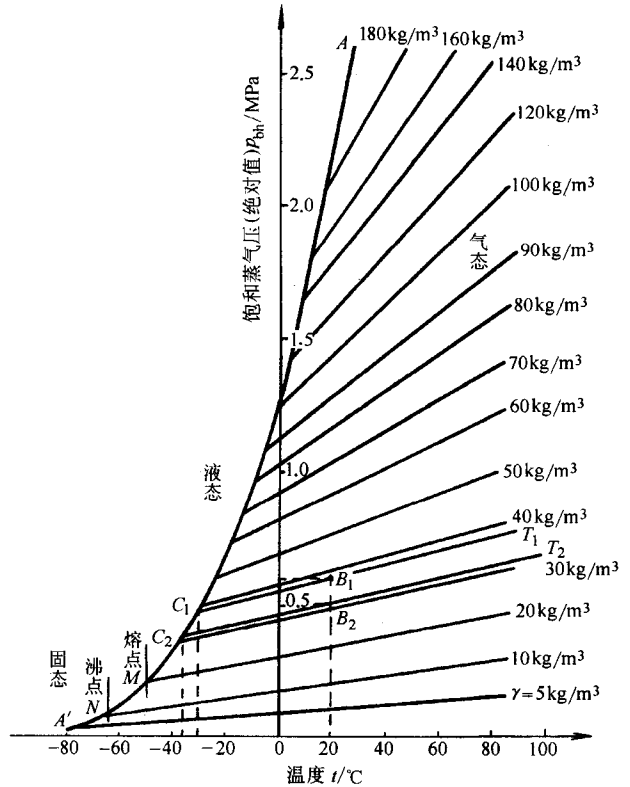


图 1-3 SF_6 气体的状态参数