

SF₆

高压电器设计

黎 斌 著

第4版



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



SF₆ 高压电器设计

第 4 版

黎 斌 著



机械工业出版社

本书总结了作者 40 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、断路器电寿命在线监测技术、产品局部放电特性及 UHF 法测量技术、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。本书是相关专业毕业生和研究生快速适应工作的好帮手。

图书在版编目 (CIP) 数据

SF₆ 高压电器设计/黎斌著. —4 版. —北京: 机械工业出版社, 2015.6

ISBN 978 - 7 - 111 - 50614 - 0

I . ①S… II . ①黎… III . ①高压电器 - 设计 IV . ①TM510.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 136919 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 付承桂 责任编辑: 付承桂 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 马精明 责任印制: 李 洋

北京京丰印刷厂印刷

2015 年 8 月第 4 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 25 印张 · 618 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 50614 - 0

定价: 99.00 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

服务咨询热线: 010 - 88361066 机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010 - 68326294 机工官博: weibo.com/cmp1952

010 - 88379203 金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

第 4 版前言

800 ~ 1100kV 特高压 SF₆ 电器已在我国好几条特高压大容量远程输电线上安全运行多年，我国已成为高压/特高压 SF₆ 电器的制造大国。我国经济已进入中高速增长发展的新常态，和其他许多产业一样，输变电设备也将进入产业结构调整、产品创新升级的发展新时期；高压 SF₆ 电器的选型、使用、维护也必将思考和处理许多新的问题——这一历史使命已落在我国高压电器理论研究、设计制造、运行维护等同行年轻一代的肩上。近年来，看到我国高压电器产品的进步，听到本书第 3 版发行不久又传来脱销、希望再改版发行的呼声，让我感受到同行年轻人钻研理论、勤于实践、大胆创新的高潮热情。作者受鞭策而提笔修改本书，向读者介绍第 4 版。

第 4 版除了对一些章节内容作了少许补充修订之外，重点补充了以下内容：

(1) 在第 2 章中，作者再次强调了进一步修改 GB/T 8905—2012 国标的必要性，希望有更多的 SF₆ 电器制造和使用能理解和接受“按相对湿度进行水分的限值和更科学”的理念，促进该国标的修改——尽管这一更改对 IEC 相关标准和传统水分限值观念是个挑战。

(2) 在第 6 章中，着力纠正了盆式绝缘子设计中对“楔形气隙危害”的不理解和处理不当的种种表现，并指出这些不当的设计已随产品进入电网，其中有些也存在于进口产品中，望相关人员注意。

(3) 我国特高压产品有待进一步升级提高，第 4 版在第 9 章中补充了“特高压 GCB 灭弧室设计思路”，企图以敲边鼓的方式打开读者的研发思路。

(4) 为加快 GIS 小型化，作者在第 17 章明确提出：“现在，抓紧研发和积极使用 252kV 三相共箱式 GIS 是时候了”。并对其中的关键技术——GCB 短路开断三相热气流的冷却与排放，提出了结构设计思路。

(5) 由于高压电器产品的设计制造者、运行维护管理者大都毕

业于高电压绝缘或高低电器制造专业，对与 SF₆ 电器局部放电息息相关的微波技术比较生疏——这对研究和应用 SF₆ 电器局部放电智能监测技术是个障碍。在第 4 版中增写了第 18 章“超高频（UHF）局放电磁波的辐射、传输与接收”，将与局放有关的微波技术引入高压行业，有助于从理论上对局放有更深入的理解；在这一章，作者对各种局放传感器的研制方向也提出了一些建议。

(6) 第 19 章中，作者首次提出了 GIS/H·GIS 与电容式复合绝缘母线联姻的可能性，指出了这种有机绝缘母线引入高压/超高压 SF₆ 电器后，具有减少 SF₆ 气体用量、减少开关站占地面积、降低电站投资等环保和经济上的重要意义。

(7) 新增的第 20 章“SF₆ 气体绝缘输电线 GIL 设计”，结合国内已投运的某些进口 GIL 技术提出了一些异议（如 GIL 外壳的支撑方式），对现场电焊连接 GIL 壳体和金属微粒的应对也提出一些新看法，可供有关工作人员参考。

(8) 在第 22 章中补入了“超高压交流滤波器开断”，介绍了 GCB 在这种工况下所遇到的新问题，分析了现有 GCB 不适应这种工况而发生开关爆炸的事故原因，提出了改进现有开关结构、提高断口绝缘能力的有关措施，也为用户方提出了选择这类开关的建议。

我国高压电器正跨入创新升级的新发展时期，我们怎样把“中国制造”变为“中国创造”，怎样把高压电器“制造大国”变为“制造强国”，是我国输变电行业相关理论研究、设计制造、运行管理人员共同关心的大事。创新发展、理论先行，作者愿为此给正在拼搏中的年轻同行助一臂微力。

鉴于第 4 版有以上多方面的修改补充，也鉴于本书旧版难免有因技术进步而落伍的内容或其他原因造成的词语差错，为利于工作，作者建议本书的爱好者封存旧版本、使用新版本。

黎 斌

2015 年 6 月

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_e	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_f	套管风力作用重心高
D_{acp}	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_t	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_o	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_2	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_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_e	等效开断次数
K_8	气缸余气密度系数	N_{an}	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_{sc}	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_{sf}	额定瞬态面积系数	t	电阻投入时间
K_γ	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_{n1}	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4版前言	
第3版前言	
第2版前言	
第1版代序	
符号说明	
第1章 SF ₆ 的基本特性	1
1.1 SF ₆ 的物理性能	1
1.2 SF ₆ 的气体状态参数	2
1.3 SF ₆ 的化学性能	3
1.3.1 SF ₆ 具有良好的热稳定性	3
1.3.2 SF ₆ 电弧分解过程	4
1.3.3 SF ₆ 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 SF ₆ 电弧分解物中有剧毒的 S ₂ F ₁₀ 吗?	5
1.4 SF ₆ 的绝缘特性	5
1.4.1 SF ₆ 气体间隙的绝缘特性	5
1.4.2 SF ₆ 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 SF ₆ 气体的熄弧特性	15
1.5.1 SF ₆ 气体特性创造了良好的熄弧 条件	15
1.5.2 SF ₆ 中的气流特性	17
第2章 SF ₆ 电器的气体管理	20
2.1 SF ₆ 气体的杂质管理	20
2.1.1 SF ₆ 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 SF ₆ 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SF ₆ 湿度测量值的影响	25
2.2.4 SF ₆ 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 SF ₆ 湿度限值	30
2.2.7 SF ₆ 湿度测量方法	30
2.2.8 SF ₆ 湿度控制方法	31
2.2.9 运行开关的水分处理	32
2.3 SF ₆ 气体的密封管理	32
2.3.1 SF ₆ 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SF ₆ 及充He 检漏)	32
2.3.4 SF ₆ 密度的监控及误差分析	37
附录2.A SF ₆ 湿度测量值的温度折算表	41
附录2.B 充SF ₆ 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 $F_{\text{漏}}$ 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

4.1.2 允许雷电冲击场强值 E_1 的选择	55	与运行可靠性	77
4.2 252~363kV 出线套管内绝缘设计	56	5.5.6 水分入侵芯体对复合绝缘子机械强度的影响	78
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——	
4.3.1 中间电位内屏蔽的作用	57	气体间隙、环氧树脂浇注件、	
4.3.2 中间电位内屏蔽的设计	58	真空浸渍管（筒）件	79
4.3.3 中间电位及接地屏蔽设计尺寸的验算	59	6.1 SF ₆ 气隙绝缘结构设计	79
4.3.4 中间屏蔽支持绝缘子设计	60	6.1.1 气隙电场设计基准	79
4.4 套管外绝缘设计	60	6.1.2 SF ₆ 气隙中电极优化设计	79
4.4.1 瓷件基本尺寸及耐受电压的计算	60	6.2 环氧树脂浇注件设计	81
4.4.2 高海拔、防污秽型瓷套设计	62	6.2.1 绝缘件电场设计基准	82
4.4.3 瓷套外屏蔽设计	62	6.2.2 典型的绝缘筒（棒）结构设计	82
4.5 瓷套机械强度设计	64	6.2.3 绝缘筒（棒）机械强度设计	84
4.5.1 瓷套法兰胶装比	64	6.2.4 盆式绝缘子设计 10 个要点	86
4.5.2 瓷质与工艺	64	6.2.5 盆式绝缘子强度要求	96
4.5.3 瓷套内水压与抗弯强度设计	65	6.3 真空浸渍环氧玻璃丝管（筒）设计	96
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	6.3.1 真空浸渍管（筒）性能	96
4.6.1 中间电位屏蔽尺寸的优化设计	66	6.3.2 真空浸渍管（筒）绝缘件电气结构设计	97
4.6.2 中间电位屏蔽的加工工艺方案设计	67	6.3.3 真空浸渍管（筒）绝缘件机械强度设计	99
第5章 硅橡胶复合绝缘子的特点和设计	69	第7章 合闸电阻及并联电容器设计	101
5.1 复合绝缘子的特点和应用	69	7.1 合闸电阻额定参数的选择	101
5.2 伞裙材料的选用	70	7.1.1 电阻值 R	101
5.3 绝缘子芯体（筒、棒）材料的选择	71	7.1.2 电阻投入时间 t	102
5.4 复合绝缘子设计的四点要求	72	7.1.3 电压负荷	102
5.4.1 机械强度设计要求	73	7.1.4 电阻两次投入的时差 Δt	102
5.4.2 刚度设计要求	74	7.2 电阻片的特性参数	102
5.4.3 电气性能设计要求	74	7.3 合闸电阻设计计算	103
5.4.4 胶装及密封设计要求	75	7.3.1 设计步骤	103
5.5 复合绝缘子长期运行的可靠性	76	7.3.2 计算实例（一）	103
5.5.1 绝缘子表面亲（疏）水性与污闪	76	7.3.3 计算实例（二）	105
5.5.2 硅橡胶疏水性的迁移与运行可靠性	76	7.4 合闸电阻的触头及传动装置设计	106
5.5.3 HTV 硅橡胶的高能硅氧键与运行可靠性	76	7.4.1 合闸电阻投切动作原理	106
5.5.4 抗电蚀能力与运行可靠性	77	7.4.2 电阻片安装方式设计	107
5.5.5 硅橡胶护套及伞裙组装工艺设计		7.4.3 电阻触头及分合闸速度设计	108
		7.5 并联电容器设计	110
		7.5.1 并联电容器容量设计（800kV 双断口串联 T·GCB 计算例）	110
		7.5.2 电容元件及电容器参数选择	111
		7.5.3 电容器组的结构设计	112

第 8 章 GCB/GIS 的电接触和温升 ...	113	9.3 喷嘴设计	137
8.1 接触电阻	113	9.3.1 上游区设计	138
8.2 梅花触头设计	114	9.3.2 喉颈部设计	139
8.2.1 动触头设计	114	9.3.3 下游区设计	142
8.2.2 触头弹簧圈向心力计算	114	9.3.4 喷嘴材料	143
8.2.3 触片设计	115	9.4 气缸直径的初步设计	144
8.2.4 触指电动稳定性设计	115	9.4.1 气缸直径 D_0 与机构操作力 F	144
8.2.5 触指热稳定性设计	116	9.4.2 气缸直径 D_0 的经验设计值	145
8.3 自力型触头设计	117	9.5 分闸特性及其与喷嘴的配合	146
8.3.1 导电截面及触指数设计	117	9.5.1 分闸初期应有较大的加速度	146
8.3.2 接触压力计算	117	9.5.2 分闸速度对自能式灭弧室开断性能的影响	147
8.3.3 触头材料及许用变形应力	118	9.5.3 分闸后期应有平缓的缓冲特性	147
8.3.4 旋压成形插入式触头(自力型触头的进化)	118	9.5.4 分闸特性与喷嘴的配合	147
8.3.5 铜钨触头及其质量控制	118	9.5.5 调整分、合闸速度特性的方法	147
8.4 表带触头的设计与制造工艺	119	9.6 缓和断口电场的屏蔽设计	148
8.4.1 表带触头的特点	119	9.7 双气室自能式灭弧室的发展	148
8.4.2 表带触头的设计	119	9.7.1 40.5~145kV 自能式灭弧室逐步完善稳定	148
8.4.3 表带触头的材料、制作工艺及表面处理	120	9.7.2 触头双动灭弧室的产生	149
8.4.4 电动稳定性与热稳定性核算	120	9.7.3 双动双气室灭弧室设计要点	149
8.5 螺旋弹簧触头设计	121	9.7.4 对双气室和单气室灭弧室的评价	150
8.5.1 螺旋弹簧触头的特点	121	9.8 近似量化类比分析法在灭弧室设计中的应用	151
8.5.2 螺旋弹簧触头及弹簧槽设计	121	9.8.1 252kV、40kA 灭弧室开断试验结果分析与改进	151
8.5.3 触头通流能力核算	125	9.8.2 252kV、50kA 单气室自能式灭弧室的增容设计	154
8.5.4 接触压力、接触电阻与热稳定性核算	125	9.8.3 800kV 灭弧室设计要领	155
8.5.5 单圈接触压力的测试值	126	9.8.4 特高压 GCB 灭弧室设计思路	156
8.5.6 单圈接触电阻的测试值	127	9.9 机构操作功及传动系统强度计算	158
8.5.7 弹簧触头焊点强度分析及焊点结构设计	128	9.9.1 运动件等效质量计算	158
8.5.8 弹簧触头不能用于隔离开关主触头	130	9.9.2 机构操作功计算	160
8.5.9 铜丝线径 d_0 的选择	130	9.9.3 弹簧机构的分、合闸弹簧设计	162
8.5.10 弹簧触头安放位置的选择	130	9.9.4 液压机构储能碟簧设计	162
8.5.11 弹簧触头接触电阻的稳定性	130	9.9.5 开关操作系统强度计算	165
8.5.12 弹簧触头的选用和表面处理	132	第 10 章 密封结构设计	167
8.6 导体发热与温升计算	132	10.1 密封机理	167
第 9 章 GCB 灭弧室数学计算模型的设计与估算	135	10.2 影响 SF ₆ 电器泄漏量的因素	167
9.1 平均分闸速度 v_f 的设计	135		
9.2 触头开距 l_k 及全行程 l_0 设计	137		

10.3 O形密封圈和密封槽的设计	170	12.7.3 铸件壳体气密性监控	195
10.3.1 O形密封圈直径(外径 D)与 线径 d_0 的配合	170	12.8 壳体制造的质量管理	196
10.3.2 密封圈材质的选用	170	第13章 吸附剂及爆破片设计	197
10.3.3 密封圈表面要求	172	13.1 吸附剂设计	197
10.3.4 密封槽尺寸设计	172	13.1.1 F—03 吸附剂性能简介	197
10.4 SF ₆ 动密封设计	173	13.1.2 F—03 吸附剂活化处理	197
10.4.1 转动密封唇形橡胶圈设计	173	13.1.3 吸附剂用量设计	198
10.4.2 X形动密封圈设计	173	13.2 爆破片设计	199
10.4.3 矩形密封圈直动密封设计	175	13.2.1 爆破片的选型与安装	199
10.5 密封部位的防水防腐蚀设计	175	13.2.2 爆破压力设计	199
第11章 GIS中的DS、ES和母线 设计	178	13.2.3 压力泄放口径设计	199
11.1 三工位隔离开关的基本结构	178	第14章 环温对SF₆电器设计的 影响	200
11.2 DS及ES断口开距设计	179	14.1 日照对SF ₆ 电器及户外隔离开关 温升的影响	200
11.3 DS断口触头屏蔽设计	180	14.1.1 考虑方法	200
11.4 DS分合闸速度设计	181	14.1.2 日照温升试验	200
11.5 1100kV GIS—DS、ES设计的特殊 问题	181	14.1.3 试验值分析	200
11.6 快速接地开关设计	183	14.1.4 结论	201
11.7 GIS母线设计	184	14.2 高寒地区产品的设计与应用	202
11.7.1 波纹管设计	185	14.2.1 降低额定参数使用	202
11.7.2 可拆卸母线外壳设计	186	14.2.2 开关充SF ₆ +N ₂ 混合气体	203
11.7.3 绝缘支持件设计	186	14.2.3 (SF ₆ +CF ₄)混合气体的 应用	206
第12章 SF₆电器壳体设计	188	14.2.4 经济实用的低温产品设计 方案——加热保温套设计	207
12.1 壳体电气性能要求	188	14.2.5 高寒地区(-40/-50℃)产品 的选择	209
12.2 壳体材质及加工工艺选择	188	第15章 SF₆电流互感器绕组设计	210
12.3 壳体电气尺寸设计	189	15.1 CT误差及准确级	210
12.4 焊接壳体设计与计算	189	15.1.1 CT误差的产生	210
12.4.1 焊接壳体强度设计因素	189	15.1.2 CT准确级	212
12.4.2 焊接壳体壁厚设计	190	15.2 影响CT电流误差的因素	213
12.4.3 焊接圆筒端盖(法兰)及盖 板厚度设计	191	15.2.1 一次电流的影响	213
12.4.4 焊接圆筒端部封头强度设计	191	15.2.2 二次绕组匝数 N_2 的影响	213
12.4.5 焊接结构及焊缝位置设计	191	15.2.3 平均磁路长度 l_{cp} 的影响	213
12.5 铸铝壳体设计与计算	193	15.2.4 铁心截面积 S 的影响	213
12.5.1 铸铝壳体强度设计因素	193	15.2.5 铁心材料的影响	213
12.5.2 铸造壳体厚度设计	193	15.2.6 二次负荷的影响	214
12.6 壳体耐电弧烧蚀能力设计	195	15.2.7 绕组阻抗 Z_{CT} 的影响	214
12.7 壳体加工质量监控设计	195	15.3 测量级和保护级绕组设计及误差 计算步骤	214
12.7.1 壳体强度监控	195		
12.7.2 焊缝气密性监控	195		

15.3.1	绕组及铁心内径设计	214	16.1	GIS 设计非标准化的弊病	242
15.3.2	铁心设计	214	16.2	GIS 设计标准化的重要意义	242
15.3.3	确定绕组的结构及阻抗	215	16.3	GIS 结构设计标准化	242
15.3.4	测量级绕组误差计算步骤	216	16.3.1	GIS 基本元件标准化	243
15.3.5	稳态保护级 (5P、10P) 绕组 误差计算步骤	217	16.3.2	GIS 基本接线间隔标准化的主要 要求	243
15.4	0.2 级和 5P 级 CT 绕组设计及误差 计算示例	217	16.3.3	126kV GIS 标准化的基本接线 间隔	243
15.4.1	0.2 级、FS5、126kV、 $2 \times 300/5A$ 、 30VA 绕组设计及误差计算 (第一方案)	217	16.3.4	252kV GIS 标准化的基本接线 间隔	248
15.4.2	0.2 级、FS5、126kV、 $2 \times 300/5A$ 、 30VA 绕组改进设计及误差计算 (第二方案)	219	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	252
15.4.3	252kV、5P25、 $2 \times 300/5A$ 、50VA 绕组设计及误差计算	220	16.3.6	与各标准间隔对应的辅件 标准化	252
15.5	暂态保护特性绕组的基本特性 参数	222	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	252
15.5.1	设计暂态保护特性绕组的 原始数据	222	16.3.8	GIS 与电缆接口件标准化	252
15.5.2	额定二次回路时间常数 T_2	223	16.3.9	GIS 与变压器接口件标准化	255
15.5.3	额定瞬变面积系数 K_{if}	223	16.4	GIS 图样和设计文件的标准化及 分类管理	257
15.5.4	铁心剩磁系数 K_{re}	223	16.4.1	GIS 图样的标准化设计及管理	257
15.5.5	暂态特性 CT 绕组的分级	223	16.4.2	GIS 基本间隔气体系统图的 标准化设计	258
15.6	暂态磁通密度增大系数 K_{id} 与暂态 误差 ε	224	16.4.3	GIS 基本单元的配套表 (MX 表) 及各种汇总表的标准化的	258
15.6.1	CT 铁心未饱和时的暂态过程	224	16.4.4	GIS 基本间隔的配套表及各种 汇总表的标准化	258
15.6.2	CT 暂态面积系数 K_{id}	225	16.4.5	GIS 工程设计通知书	259
15.6.3	暂态误差计算式	226	16.4.6	GIS 通用设计文件的标准化	259
15.7	暂态特性绕组设计计算步骤和计算 示例	227	第 17 章 GIS 小型化和智能化设计 (在线监测技术及应用)	260	
15.7.1	TPY 绕组计算步骤	227	17.1	一次元件小型化	260
15.7.2	550kV、1250/1A、10VA、TPY 绕组计算示例	228	17.2	二次监控智能化的目的与构成	263
15.7.3	550kV、2500/1A、15VA、TPY 绕组计算示例	230	17.3	开发可靠性高、寿命长的信息 传感器	263
15.8	铁心饱和及其对暂态绕组工作特性 的影响	231	17.3.1	电流传感器	263
15.9	影响 CT 暂态特性的因素及其改善 措施	232	17.3.2	电压传感器	265
15.10	CT 罩与 CT 线圈屏蔽设计	234	17.3.3	分合位置传感器	268
附录 15. A	SMC101 等合金磁化曲线图	234	17.3.4	分合速度传感器	268
第 16 章 GIS 设计标准化		242	17.3.5	弹簧储能传感器	268
			17.3.6	SF ₆ 气体密度及低湿度 传感器	269
			17.3.7	温度、湿度传感器	270

17.3.8	故障定位传感器	270	18.4.4	传感器的特性	295
17.3.9	压力传感器	270	18.5	外部干扰的抑制	297
17.3.10	氧化锌避雷器 (MOA) 泄漏 电流传感器	270	18.6	局放源定位	298
17.3.11	局部放电传感器	270	18.6.1	信号幅值定位	298
17.4	PISA 和光纤传输技术	272	18.6.2	信号时差定位	298
17.5	智能化就地控制柜和保护单元	272	18.6.3	平分面法定位	298
17.5.1	智能化就地控制柜和保护 单元的构成	272	18.7	内置式传感器的研究方向	299
17.5.2	电站二次系统的更新与简化	272	18.7.1	圆盘形电容耦合传感器	299
17.6	GIS 运行状态分析及按运行 状态维修 GIS	273	18.7.2	偶极天线	301
17.6.1	GIS 运行状态巡检仪	273	18.8	外置式传感器的研究方向	302
17.6.2	局部放电分析软件	273	18.8.1	缝隙传感器的设计	302
17.6.3	电寿命分析软件 (电寿命折算 及在线监测技术)	277	18.8.2	矩形喇叭传感器的设计	304
17.6.4	SF ₆ 密度及湿度分析软件	281	18.8.3	平面等角螺旋天线	305
17.7	GCB 智能操作	282	18.9	传感器的馈电与阻抗匹配	306
第 18 章 超高频 (UHF) 局部放电 电磁波的辐射、传输与 接收			18.9.1	传感器的馈电	306
18.1	超高频 (UHF) 局部放电电磁波的 特征	284	18.9.2	接头	307
18.1.1	GIS 局部放电电磁波的频率与 波长	284	18.9.3	输入阻抗与负载阻抗的匹配	307
18.1.2	采用 UHF 法检测 GIS 局放的 必要性	284	18.10	超高频法局放诊断系统	307
18.2	GIS 超高频局放电磁波的种类及 特征	284	18.11	GIS 局放定期检测与全时在线监测	308
18.3	GIS 局放电磁波的辐射与传播	285	第 19 章 SF₆ 复合电器 H · GIS 的特点、 应用与发展		
18.3.1	电磁波辐射	285	19.1	H · GIS 及 PASS 的定义和结构 特征	309
18.3.2	电磁波发射	286	19.1.1	H · GIS	309
18.3.3	GIS 中局放电磁波的传播方式	286	19.1.2	PASS	312
18.3.4	局放电磁波传输的三种工况	289	19.2	AIS、GIS、H · GIS 及 PASS 的特点 分析	315
18.3.5	GIS 中局放电磁波的传输 特点	291	19.2.1	结构和功能对比	315
18.3.6	微波传输中的阻抗匹配	291	19.2.2	对 H · GIS 和 PASS 的评议	315
18.4	UHF 局放电磁波的接收	292	19.3	选用 H · GIS 的技术经济分析	317
18.4.1	局放信号的两种接收方式—— 电容耦合与电磁感应	292	19.4	550kV H · GIS 使用示例	317
18.4.2	接收天线的效率和增益	294	19.5	复合电器的演变	318
18.4.3	传感器的相对输出功率	295	19.6	电容式复合绝缘母线在 GIS/H · GIS 开关站的应用	320
			19.6.1	电容式复合绝缘母线的结构	320
			19.6.2	电容式复合绝缘母线的特性	321
			19.6.3	电容式复合绝缘母线与 GIS/H · GIS 配合使用及意义	322
第 20 章 SF₆ 气体绝缘输电线路 GIL 设计			第 20 章 SF₆ 气体绝缘输电线路 GIL 设计		
			20.1	GIL 的特点	326
			20.2	GIL 的应用	326