 清华大学
Tsinghua University

复习、作业、预习

复习：4.1
预习：4.2-4.3

1

 清华大学
Tsinghua University

混合式：网络教学线上直播+线下
网络教学：雨课堂

高电压工程—
之 液体、固体电介质电气性能 (1)

周远翔
zhou-yx@tsinghua.edu.cn
MB: 13911097570
清华大学电机工程与应用电子技术系

专题：高电压绝缘概论


周远翔
清华大学电机工程与应用电子技术系
Email: zhou-yx@tsinghua.edu.cn
MB: 13911097570

3

高电压绝缘概论（学习和研究的内容和目的）


一、绝缘问题与绝缘技术的发展
二、高压绝缘研究的主要内容
三、高压绝缘研究的电介质
四、高压绝缘研究的目的
五、即将介绍的相关内容

4

投票 最多可选4项  设置

引起绝缘问题的主要原因是：

☐ A 经济的发展
☐ B 环境复杂化
☐ C 经济效益
☐ D 可靠性

 提交

5

一、绝缘问题与绝缘技术的发展

1. 绝缘的基本概念和绝缘问题

◆电气绝缘：以电介质隔离不同的电位

◆绝缘问题主要来自三方面

➢一是世界性的电能需求量迅猛增长，发电设备和输变电设备不断向高电压和大容量方向发展所带来的问题

➢二是电工设备使用领域不断扩大，环境因素日益复杂和严酷化所导致的问题

➢三是电工设备的可靠性和经济性不断提高而需要解决的问题

6

2. 高电压、大容量输电带来的绝缘问题

交流输电各电压等级首次出现的时间：

电压/kV 10 50 110 220 287 380 525 735 1150

首次年份 1890 1907 1912 1926 1936 1952 1959 1965 1985

100年来世界上的输电电压等级提高了100倍

直流 (kV) :

±100	±160	±200	±320	±400	±500	±660	±800	±1100
1954							2010	2019

7

单选题 1分

设置

同样的电压，交流输电与直流输电相比，何者输送容量更大、输送距离更远？

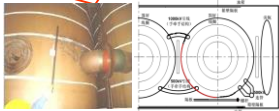
- ☐ A 交流输电
- ☒ B 直流输电
- ☐ C 二者一样
- ☐ D 不一定

提交

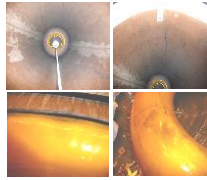
8

我国特高压工程建设过程中，国内、外制造厂均遭遇绝缘放电问题

长间隙、大体积问题



1000 kV变压器在制造过程中的放电故障



首台±800 kV换流变制造过程中的沿放放电故障

By China EPRI

9

超高压设备绝缘放电问题仍然突出



中国500 kV变压器放电故障



500 kV变压器事故起火



巴西500 kV高抗放电故障

10

变压器爆燃模拟试验



11

北京220 kV张莲1电缆线路故障



By Beijing EPC

12

富春江电厂02单元B相电缆故障



By East China EPRI

13

3. 环境复杂化和应用领域扩大带来的绝缘问题

- (1) 电介质的应用环境与能源技术
- (2) 电介质应用于信息与生物技术
- (3) 电工设备与绝缘技术

14

(1) 电介质的应用环境与能源技术

电工设备使用领域由常规向极端条件发展

- ✓ 严酷大气环境、高温、极高温、高真空、高压、高气压：西电东送的高海拔、多尘埃，湿热带，深层石油开采，航空航天
- ✓ 辐射场：核能及应用、电磁弹射、变频、微波、等离子体、高功率脉冲
- ✓ 化学气氛、超低温：浸水、浸油、浸盐卤、低温超导等特殊运行环境

15

外绝缘问题



直流输电



交流紧凑型输电

16



第1次覆雪后憎水性测量 第2次覆雪后憎水性测量
2003年第3次覆雪后绝缘子下表面憎水性



17

绝缘子覆冰闪络过程的电弧发展四阶段



起晕阶段



起弧阶段



电弧发展



临闪电弧

18

绝缘子覆冰闪络后受损情况



19

复合绝缘子表面漏电起痕烧蚀



20

两相流的绝缘问题



50 MW evaporative cooling turbine generator



Model of 200 MW evaporative cooling turbine generator

Evaporative Cooling Technology

By CAS IEE

21

太空绝缘问题



By T. Takada

22

低温绝缘问题

The Applied Superconductivity Laboratory



August 2003: 10m, 10.5 kV / 1.5 kA HTS power cable system



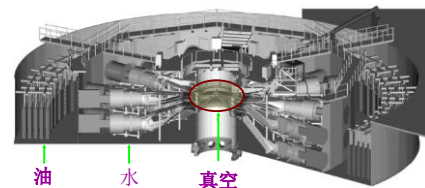
The 75m/10.5kV/1.5kA HTS power cable system has been grid-connected in Gansu Province last year.

By CAS IEE

23

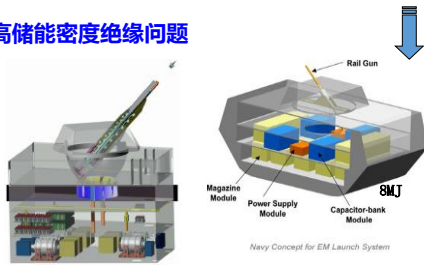
射线辐射绝缘问题

Z箍缩



24

高储能密度绝缘问题



电磁轨道发射系统和轨道炮概念图

25

谐波及轻型直流绝缘问题

Renewable Energy Resources Power Generating Technology



Control system of large-scale wind power generator

By CAS IEE

26

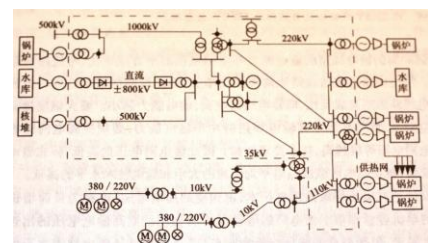
(2) 电介质应用于信息与生物技术

- ◆集成电路及其封装绝缘、印刷电路板绝缘：微纳加工技术背后意味着**强电场绝缘技术**
- ◆生物电介质：生物质的压电效应和热释电效应



27

(3) 电工设备与绝缘技术



电力系统

发电、输/变电、配电、用电

28

输电线路

架空线路

电缆隧道

气体绝缘管道
GIL

29

构成电网的电气设备



晋东南1000kV变电站



负荷中心

30

(3) 电工设备与绝缘技术

- 变压器 • 换流阀 • 电流互感器 • 换流变
- 绝缘子 • 电容器 • 电压互感器 • 换流阀
- 套管 • 电抗器 • 断路器与开关 • 发电机
- 避雷器 • GIS • 柔性直流绝缘 • 电动机
- 电缆 • GIL • 架空线路 •

这些电力设备构成了电力系统的基本元件

没有这些设备，就没有电力系统

没有电介质绝缘材料，就没有电力设备

电介质绝缘材料是电力系统安全可靠稳定的决定性基础！

31

投票 最多可选1项

设置

能否用电缆代替架空线路进行远距离输电？

- ☐ A 同意
- ☐ B 不同意
- ☐ C 无法替代
- ☐ D 无所谓

提交

32

投票 最多可选1项

设置

能否用GIL代替架空线路进行远距离输电？

- ☐ A 同意
- ☐ B 不同意
- ☐ C 无法替代
- ☐ D 无所谓

提交

33

4. 电工设备的可靠性与经济性



◆ 电气设备的高性能、高稳定

◆ 电气设备的小型化

◆ 电气设备的经济性

◆ 适应广泛的应用领域

34

二、高压绝缘研究的主要内容

1. 绝缘理论
2. 绝缘材料
3. 绝缘结构
4. 绝缘测试

35

1. 绝缘理论

从电子运动的轨道理论、能级理论、原子结构理论，到力学统计，构成了电介质绝缘理论的量子力学基础。从这些基础理论出发，对绝缘技术的一些现象及其规律进行理论总结，进而指导绝缘技术



36

2. 绝缘材料

- ◆ 材料性能的认知和提高，新型绝缘材料的开发
- ◆ 绝缘材料的应用经历初期到成熟的过程
- ◆ 借助于结构，开发多功能的协调性组合绝缘结构，从而使绝缘技术发展到一个新的阶段。如：
 - ✓ SF_6 气体和固体组合绝缘
 - ✓ 合成油和薄膜或膜纸组合绝缘
 - ✓ 整体浇注式组合绝缘
 - ✓ 新型纤维和薄膜组合绝缘
 - ✓ 预制式组装绝缘.....

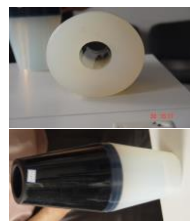
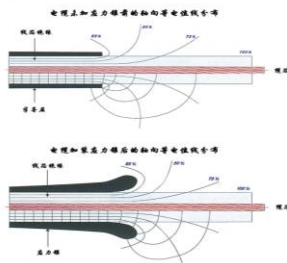
37

3. 绝缘结构

- ◆ 材料的物理、化学结构：整个绝缘技术水平的提高也体现在能形成良好绝缘结构的绝缘材料上，如聚酯、聚酰亚胺薄膜、漆包线、无溶剂漆、聚芳酰胺纤维纸等
- ◆ 设备绝缘结构（组合、优化、工艺）：由于整体性要求，绝缘材料转化为绝缘结构还需要经过必要的工艺处理。这些绝缘工艺往往具有一定的独特性，并且在相当大的程度上决定着绝缘结构的质量

38

结构优化研究



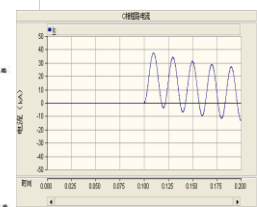
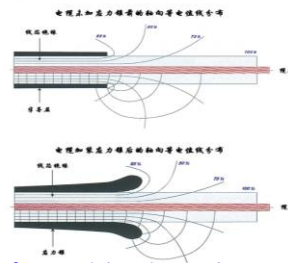
Stress cone design and computation

Some of our research

High Voltage Lab
Tsinghua University

39

结构优化研究



Simulation results of short-circuit current in some cable line

Stress cone design and computation

Some of our research

High Voltage Lab
Tsinghua University

40

4. 绝缘测试

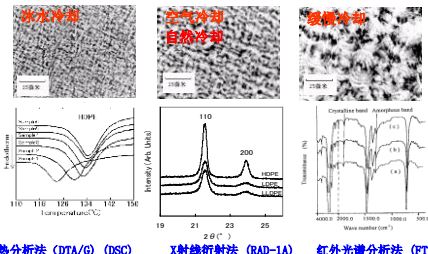
设备绝缘测试与诊断
工程上常规
绝缘电阻
泄漏电流
局部放电
损耗因数
耐压试验
.....

材料分析
实验室层面
显微镜观察法
扫描电镜 (SEM)
热分析法 (DTA/G) (DSC)
X射线衍射法 (RAD-1A)
红外光谱分析法 (FTIR)
.....

绝缘材料性能表征

41

显微镜观察法：PE电介质的形态



热分析法 (DTA/G) (DSC)

X射线衍射法 (RAD-1A)

红外光谱分析法 (FTIR)

Some of our research

42

三、高压绝缘研究的电介质

- 气体绝缘电介质：空气、 SF_6 ，放电机理、外绝缘
- 液体绝缘电介质：极化、电导、损耗、老化、击穿
- 固体绝缘电介质：极化、电导、损耗、老化、击穿

总结： 电介质、理论、结构工艺、测试评价

43

四、即将介绍的内容

- ◆ 液体、固体电介质电气性能
- ◆ 绝缘测试与诊断
- ◆ 高电压产生和测量技术（高电压试验技术）

更为详细的绝缘理论与技术，将在秋季的专业课程
《电介质材料与绝缘技术》中介绍

44

祝：

大家学习愉快，成为优秀绝缘专家！

45



混合式：网络教学线上直播+线下
网络教学：雨课堂

高电压工程— 之 液体、固体电介质电气性能 (1)

周远翔

zhou-yx@tsinghua.edu.cn

MB: 13911097570

清华大学电机工程与应用电子技术系



第4章 液体、固体电介质的电气性能

- 4.1 电介质电气性能的基本概念
- 4.1.1 电介质物质结构的基本知识
- 4.1.2 电介质电气性能的划分
- 4.1.3 常见液体和固体电介质的电气性能参数
- 4.2 液体、固体电介质的极化、电导与损耗
- 4.3 液体电介质的击穿
- 4.4 固体电介质的击穿
- 4.5 电介质中的空间电荷
- 4.6 组合绝缘
- 4.7 电介质的其他性能

47

本章概念

核心概念：

电介质电气性能，表征电介质电气性能的主要参数
电介质，极化，电导与损耗，小桥击穿，电击穿，热击穿
电化学击穿，老化，累积效应，空间电荷，油纸绝缘
电介质中的电场

关于电介质的其他性能：

热性能，耐热等级，耐寒性，机械性能
吸潮性能，化学性能，抗生物性

48

投票 最多可选4项

你认为下列材料是否是电介质?

A 铁

B 等离子体

C 空气

D 变压器油

提交

4.1.1 电介质物质结构的基本知识

1. 电介质的基本概念

(1) 电介质的基本概念

具备无传导电子绝缘体的物理特性，在电场中可发生极化的固体、液体和气体，总称为电介质

(2) 电介质的地位

电介质与导体、半导体和磁性材料一样，是电工材料的重要组成部分，是构成电工设备不可或缺的基础

(3) 电介质的用途

功能材料：绝缘、储能、压电、热释电、光电、铁电材料

绝缘材料：高绝缘电阻用于绝缘，高介电常数用于储能

2. 形成分子和聚集体的各种键

(1) 离子键

正、负离子由静电库仑力结合成分子，即为正负离子间形成的离子键（如NaCl）。

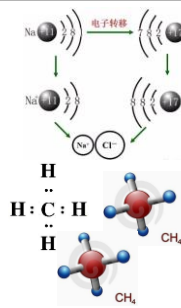
(2) 共价键

由电负性相等或相差不大的两个或几个原子通过共有电子对结合起来，达到稳定的电子层结构，称之为（如 CCl_4 、 CH_4 ）。

(3) 分子键

分子以相互间的吸引力结合在一起（范德华力），形成分子键。

(4) 其它?



3. 电介质的分类（按照化学结构，可分为3类）

(1) 非极性和弱极性电介质

分子由共价键结合，由非极性分子组成的电介质称**非极性**电介质，如 N_2 、PTFE（聚四氟乙烯）。

有些非极性电介质由于存在分子异构或支链，多少有些极性，称**弱极性**电介质，如PS（聚苯乙烯）。

(2) 极性电介质

由极性分子组成的电介质。如PVC（聚氯乙烯）、PMMA（有机玻璃）等。

(3) 离子性电介质

没有个别的分子，只以固体的形式存在。分为**晶体**和**无定形**两类。如石英、云母、陶瓷。

无机材料一般以离子键结合，有机材料以分子键结合

有机材料分子内部以共价键结合

4.1.2 电介质电气性能的分类

(1) 电介质的电气性能	(2) 表征电气性能的主要参数
1) 介电特性(dielectric property) 指电介质的极化和损耗特性	1) 相对介电常数 ϵ_r
2) 电气传导特性(electrical conduction property) 如载流子移动、高场强下的电气传导等	2) 电阻率（or电导率）
3) 电气击穿特性(electrical breakdown property) 包括劣化、击穿、伏秒等	3) 击穿电压（or电气强度）
4) 二次效应(secondary effect) 如空间电荷、陷阱、局域态中心、界面、化学结构、形态、杂质和环境等的影响	4) 损耗角正切（or损耗因数） $\tan\delta$

4.1.3 常见液、固电介质的电气性能参数

- 依据极性的电介质分类

电气性能参数与极性有密切的关系，常见液体、固体电介质电气性能参数按照极性的不同，分为**非极性**（或弱极性）、**极性**、**强极性**。

- 电气性能参数测试条件

(1) 温度，电压波形（AC/DC，冲击冲击电压，频率）、幅值，电介质的厚度（电极间的距离）。

(2) 对于液体，有纯净度要求（品质）。

常见液体电介质的电气性能参数

液体种类	液体名称	相对介电常数	电阻率/($\Omega \cdot \text{cm}$)	电介质损耗角正切	击穿电压/kV	纯净程度
中性	变压器油	2.2	2×10^{12}	/	/	未净化(80℃)
		2.1	5×10^{14}	$<10^{-3}$	>40	净化(80℃)
		2.1	2×10^{15}	$<10^{-3}$	>40	两次净化(80℃)
	电容器油	2.1	$>10^{15}$	$<10^{-3}$	75	高度净化(80℃)
		2.2	10^{15}	$<3 \times 10^{-3}$ (100℃)	>60	
	电缆油	2.6	5×10^{15}	9.6×10^{-3}	>60	
极性	硅油	2.53	$>5 \times 10^{15}$	$<10^{-3}$	65	
	三氯联苯	5.5	10^{14}	$<10^{-3}$	>50	工程用(80℃)
强极性	蓖麻油	4.5	10^8	$<10^{-2}$	>35	工程用(20℃)
	水	81	10^8	/	/	高度净化(20℃)
强极性	乙醇	25.7	10^8	/	/	净化(20℃)

注：击穿电压的间隙距离为2.5 mm。未作说明的参数为20℃、工频电压下的测量结果。

55

常见固体电介质的电气性能参数

种类	名称	相对介电常数	电阻率/($\Omega \cdot \text{cm}$)	电介损耗因数 $\tan \delta$	击穿强度/(kV $\cdot \text{mm}^{-1}$)
非极性或弱极性	聚氯乙烯	2.0	10^{14}	$<2 \times 10^{-3}$ (1 MHz)	40
	聚乙烯	2.25~2.35	10^{14}	3×10^{-3} (1 MHz)	18~24
	聚丙烯(高密度)	2.2~2.4	10^{14}	<0.05	20~28
	交联聚乙烯	2.3	10^{14}	3×10^{-3}	35
	聚四氟乙烯	2.0~2.1	$>10^{15}$	$<2 \times 10^{-3}$	>200 (dc, 304 sec)
	聚苯乙烯	2.4~2.6	10^{14}	$<4 \times 10^{-3}$	>110 (dc)
	腈类	4.0~4.5	10^{14}	$10^{-1} \sim 2 \times 10^{-1}$	100~300 (dc)
	氟乙烯树脂	3	10^{14}	0.4 (1 MHz)	10~20
	丁基橡胶	2.3~2.5	10^{14}	$3 \sim 8 \times 10^{-3}$ (1 MHz)	10~25
	乙丙橡胶	2.0	10^{14}	<0.10	30~40
极性	硅橡胶	3.5	10^{14}	10^{-3} (1 MHz)	15~20
	聚酯薄膜	3.2	10^{14}	3×10^{-3}	100 (dc)
	有机树脂	3.5	10^{14}	$4 \sim 10 \times 10^{-3}$	10~15
	聚酯树脂	3.0	10^{14}	0.005	17~22
	丙烯酸	3.3~4.4	10^{14}	10^{-3}	20
	电绝缘漆	3.5	10^{14}	3×10^{-3}	30~40
	电瓷漆	3.3~3.4	10^{14}	2×10^{-3}	20
	聚苯乙烯	2.3~2.5	10^{14}	0.00~0.10 (1 MHz)	18~16
	尼龙 6	4.1	$10^{14} \sim 10^{15}$	0.008	12
	尼龙 66	4.0	10^{14}	0.01	15~19
离子性	石英玻璃	3.5~4.5	10^{14}	$8 \sim 80 \times 10^{-3}$ (1~10 MHz)	25~40
	硼玻璃	4.5~5.0	$>10^{15}$	$15 \sim 30 \times 10^{-3}$ (1~10 MHz)	20~35
	铅玻璃	7~10	$>10^{15}$	$5 \sim 40 \times 10^{-3}$ (1~10 MHz)	5~20
	金云母	5.0~6.0	$10^{13} \sim 10^{15}$	$5 \sim 50 \times 10^{-3}$ (0.1~1 MHz)	$50 \sim 400$ (dc, 0.05~0.1 mm)
	白云母	6.0~8.0	$10^{13} \sim 10^{15}$	$1 \sim 50 \times 10^{-3}$ (0.1~1 MHz)	$50 \sim 120$ (dc, 0.05~0.1 mm)
	电瓷(棒形)	5.5~6.5	10^{13}	$3 \sim 5 \times 10^{-3}$ (1~10 MHz)	18~45
	金红石	100	$10^{12} \sim 10^{13}$	0.4	15~25
	钛酸钡	几千至上万	10^{11}	0.03	5~20

58

小结

◆专题：高电压绝缘概论

电气绝缘，绝缘问题（三个问题），绝缘研究和学习的内容和目的，电气设备

◆电介质

构成电介质的键，电介质电气性能，表征电介质电气性能的参数，常见液体、固体电介质电气性能参数

57



高电压工程—

之液体、固体电介质电气性能 (1)

第一讲 The End

谢谢！

58