

电 介 質 物 理

A. Ф. 华耳特尔主編

A. П. 亞歷山大罗夫, A. Ф. 华耳特尔
B. M. 伍耳, C. C. 古丁, И. M. 高耳德曼 著
Л. H. 札盖姆, Л. Д. 英盖, E. B. 庫夫欣斯基
張和康 鄒兆年 刘耀南 于怡元譯

高等  教育出版社

本書根據蘇聯國立技術理論書籍出版社 (Государственное издательство технико-теоретической литературы) 1932年出版的“電介質物理”(Физика диэлектриков) 譯出。全書共分三篇。第一篇為電場，推求常用平板，圓柱體和球形電極的電場，應用保角和許瓦茲變換法計算具有直角電極的電場，以及電場的測量方法。第二篇為介質的正常性能，包括介質極化，電導，和損耗三大部分，這三種現象彼此間的關係，和頻率或溫度對它們的影響，以及根據不均勻介質模型來計算介質的損耗，以求結合實際。第三篇為介質击穿，敘述介質击穿的規律，分析熱击穿和電击穿，以及在工程應用上絕緣的計算。

本書是高等學校電氣絕緣和電纜技術專業的主要參考書，也是從事於電纜、電機和絕緣材料製造者必需的參考讀物。

本書由於怡元(第一篇)、劉耀南(第二篇第一、二、三章)、鄒兆年(第二篇第四章及第三篇第一、二章)、張和康(余下部份)合譯，陳季丹、陳以鴻校閱。

電 介 質 物 理

A. П. 亞歷山大羅夫, А. Ф. 華耳特爾等著

張和康, 鄒兆年, 劉耀南, 于怡元譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

商務印書館上海廠印刷 新華書店總經售

書號 15010·247 開本 850×1168 1/32 印張 19 10/16 插頁 4 字數 480,000

一九五七年三月上海第一版

一九五七年三月上海第一次印刷

印數 1—8,000

定價(9) 洋 2.90

目 錄

序	7
緒論	9

第一篇 電場

第一章 電場的解析計算法	11
§ 1. 庫倫定律, 電場強度	11
§ 2. 電場利用力線和等位面的圖示法	12
§ 3. 平板電容器的電場	15
§ 4. 球形電容器的電場	18
§ 5. 圓柱形電容器的電場	22
§ 6. 兩平行圓柱的電場	25
§ 7. 兩球的電場	33
第二章 應用於電場研究的保角變換法	39
§ 8. 保角變換的實質	39
§ 9. 圓柱形電容器變換成平板電容器	40
§ 10. 兩平行圓柱變換成圓柱形電容器	42
§ 11. 許瓦茲變換	47
§ 12. 直角對平面	49
§ 13. 具有兩直角的電極對平面	55
§ 14. 半平面對平面	60
§ 15. 羅高夫斯基電容器	62
第三章 不均勻媒質中的電場	64
§ 16. 介電系數 ϵ 的媒質中的電場強度和靜電位勢	64
§ 17. 兩媒質分界處的力線的折射定律	67
§ 18. 雙層平板電容器	68
§ 19. 雙層圓柱形電容器	70
第四章 電場的圖構法	74
§ 20. 圖構法的實質	74
§ 21. 力管	74

§ 22. 均勻媒質中電場的圖構法	76
§ 23. 用施比而倫法校核電場的圖構法	78
§ 24. 不均勻媒質中電場的圖構法	80
第五章 電場的實驗研究法	82
§ 25. 實驗法的一般特性	82
§ 26. 普通探針法	83
§ 27. 電解模型法	84
§ 28. 熱探針法	87
§ 29. 電容探針法	88
§ 30. 力線分佈的測量法	93
第二篇 在電強度範圍以內介質的性能	
第一章 介質的極化	97
§ 1. 電場強度、電位移和內電場	97
§ 2. 克勞修斯-莫索諦方程	100
§ 3. 極化系數和德拜理論	102
§ 4. 極化強度的決定、偶極矩的計算和溫度效應	106
§ 5. 偶極矩和分子結構	110
§ 6. 介電系數與頻率的关系	112
§ 7. 薛格涅特鹽	119
第二章 介質的電導系數	123
§ 8. 電流通過氣體的機構	123
§ 9. 氣體中離子的遷移率	130
§ 10. 液體內的離子	133
§ 11. 影響離子遷移率的因素	136
§ 12. 各種因素對液體電導系數的影響	138
§ 13. 膠體系統的電導系數	144
§ 14. 固體介質電導系數的性質	146
§ 15. 固體介質中的極化	149
§ 16. 固體介質的電阻	168
§ 17. 固體介質中的貫穿電流	168
§ 18. 介質中的電解	171
§ 19. 電導系數與溫度的关系	174
§ 20. 固體介質的电子電導	184
第三章 介質損耗	186
§ 21. 介質損耗的分類	186

§ 22. 介質損耗的正規理論	187
§ 23. 固体均匀介質的介質損耗	204
§ 24. 液体介質的介質損耗	214
§ 25. 德拜的偶極損耗准確理論及其証明	224
第四章 不均匀介質中的介質損耗	245
§ 26. 概說	245
§ 27. 不具有表面电導的不均匀介質中的損耗	252
§ 28. 具有表面电導的不均匀介質中的損耗	265

第三篇 介質电强度的破坏

緒論	280
第一章 气体的击穿	283
§ 1. 气体中放电的不同形式	283
§ 2. 不同电极形状时的起始击穿电压	286
§ 3. 气体的击穿电压与压力、时间和頻率的关系	300
§ 4. 撞击游离的理論	307
§ 5. 气体击穿的条件	321
§ 6. 气体击穿时空間电荷的作用	329
§ 7. 不均匀电場中的气体击穿	338
§ 8. 導線上的电量	350
§ 9. 固体介質在气体中的表面击穿(閃絡)	357
第二章 液体介質的击穿	367
§ 10. 液体介質击穿概說, 雜質的影响	367
§ 11. 液体介質击穿現象中的实验規律	370
§ 12. 强电場中液体的电導系数	390
§ 13. 液体介質击穿的机构	395
§ 14. 液体介質中的表面放电和表面击穿(閃絡)。阻擋層的影响	403
第三章 固体介質击穿的一般規律	408
§ 15. 击穿的热形式	409
§ 16. 击穿的电形式	412
§ 17. 击穿的化学形式	414
第四章 固体介質的热击穿	415
§ 18. 瓦格納的基本理論	415
§ 19. 交变电压下單維情形中的热击穿理論	418
§ 20. 击穿电压与时间的关系	480

§ 21. 热击穿理論的實驗檢查	438
§ 22. 热击穿理論在技術計算上的应用	450
第五章 固体介質的电击穿	460
§ 23. 均匀电場中的电击穿	460
§ 24. 不均匀电場中的电击穿	471
§ 25. 消除边缘放电的方法	492
§ 26. 固体介質的不完全击穿	501
§ 27. 晶体的不完全击穿	506
§ 28. 逐步击穿	512
§ 29. 薄層固体介質的击穿	519
第六章 固体介質电击穿理論	523
§ 30. 电場所造成的分子和晶体点陣的破裂	523
§ 31. 計及裂縫的影响时由电場所造成的介質破裂	529
§ 32. 固体介質中放电現象發生和擴張的机构	531
§ 33. 不均匀电場中固体介質的击穿, 最小击穿电压的現象	538
第七章 工程介質和老化	541
§ 34. 击穿电压与电极表面大小的关系	542
§ 35. 介質的老化	543
§ 36. 介質的疲劳	550
§ 37. 漆絕緣	554
§ 38. 电纜紙絕緣	563
§ 39. 高压电机的絕緣	570
附錄	578
附表	593
慣用記号表	604
参考書刊	605
中俄名詞对照表	620
中俄文人名对照表	626

电 介 質 物 理

A. Ф. 华耳特尔主編

A. П. 亞歷山大罗夫, A. Ф. 华耳特尔
B. M. 伍耳, C. C. 古丁, И. M. 高耳德曼 著
Л. H. 札盖姆, Л. Д. 英盖, E. B. 庫夫欣斯基
張和康 鄒兆年 刘耀南 于怡元譯

高等  教育出版社

本書根據蘇聯國立技術理論書籍出版社 (Государственное издательство технико-теоретической литературы) 1932年出版的“電介質物理”(Физика диэлектриков) 譯出。全書共分三篇。第一篇為電場，推求常用平板，圓柱體和球形電極的電場，應用保角和許瓦茲變換法計算具有直角電極的電場，以及電場的測量方法。第二篇為介質的正常性能，包括介質極化，電導，和損耗三大部分，這三種現象彼此間的關係，和頻率或溫度對它們的影響，以及根據不均勻介質模型來計算介質的損耗，以求結合實際。第三篇為介質击穿，敘述介質击穿的規律，分析熱击穿和電击穿，以及在工程應用上絕緣的計算。

本書是高等學校電氣絕緣和電纜技術專業的主要參考書，也是從事於電纜、電機和絕緣材料製造者必需的參考讀物。

本書由於怡元(第一篇)、劉耀南(第二篇第一、二、三章)、鄒兆年(第二篇第四章及第三篇第一、二章)、張和康(余下部份)合譯，陳季丹、陳以鴻校閱。

電 介 質 物 理

A. П. 亞歷山大羅夫, А. Ф. 華耳特爾等著

張和康, 鄒兆年, 劉耀南, 于怡元譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

商務印書館上海廠印刷 新華書店總經售

書號 15010·247 開本 850×1168 1/32 印張 19 10/16 插頁 4 字數 480,000

一九五七年三月上海第一版

一九五七年三月上海第一次印刷

印數 1—8,000

定價(9) 2.90

目 錄

序	7
緒論	9

第一篇 電場

第一章 電場的解析計算法	11
§ 1. 庫倫定律, 電場強度	11
§ 2. 電場利用力線和等位面的圖示法	12
§ 3. 平板電容器的電場	15
§ 4. 球形電容器的電場	18
§ 5. 圓柱形電容器的電場	22
§ 6. 兩平行圓柱的電場	25
§ 7. 兩球的電場	33
第二章 應用於電場研究的保角變換法	39
§ 8. 保角變換的實質	39
§ 9. 圓柱形電容器變換成平板電容器	40
§ 10. 兩平行圓柱變換成圓柱形電容器	42
§ 11. 許瓦茲變換	47
§ 12. 直角對平面	49
§ 13. 具有兩直角的電極對平面	55
§ 14. 半平面對平面	60
§ 15. 羅高夫斯基電容器	62
第三章 不均勻媒質中的電場	64
§ 16. 介電系數 ϵ 的媒質中的電場強度和靜電位勢	64
§ 17. 兩媒質分界處的力線的折射定律	67
§ 18. 雙層平板電容器	68
§ 19. 雙層圓柱形電容器	70
第四章 電場的圖構法	74
§ 20. 圖構法的實質	74
§ 21. 力管	74

§ 22. 均勻媒質中電場的圖構法	76
§ 23. 用施比而倫法校核電場的圖構法	78
§ 24. 不均勻媒質中電場的圖構法	80
第五章 電場的實驗研究法	82
§ 25. 實驗法的一般特性	82
§ 26. 普通探針法	83
§ 27. 電解模型法	84
§ 28. 熱探針法	87
§ 29. 電容探針法	88
§ 30. 力線分佈的測量法	93
第二篇 在電強度範圍以內介質的性能	
第一章 介質的極化	97
§ 1. 電場強度、電位移和內電場	97
§ 2. 克勞修斯-莫索諦方程	100
§ 3. 極化系數和德拜理論	102
§ 4. 極化強度的決定、偶極矩的計算和溫度效應	106
§ 5. 偶極矩和分子結構	110
§ 6. 介電系數與頻率的关系	112
§ 7. 薛格涅特鹽	119
第二章 介質的電導系數	123
§ 8. 電流通過氣體的機構	123
§ 9. 氣體中離子的遷移率	130
§ 10. 液體內的離子	133
§ 11. 影響離子遷移率的因素	136
§ 12. 各種因素對液體電導系數的影響	138
§ 13. 膠體系統的電導系數	144
§ 14. 固體介質電導系數的性質	146
§ 15. 固體介質中的極化	149
§ 16. 固體介質的電阻	168
§ 17. 固體介質中的貫穿電流	168
§ 18. 介質中的電解	171
§ 19. 電導系數與溫度的关系	174
§ 20. 固體介質的电子電導	184
第三章 介質損耗	186
§ 21. 介質損耗的分類	186

§ 22. 介質損耗的正規理論	187
§ 23. 固体均匀介質的介質損耗	204
§ 24. 液体介質的介質損耗	214
§ 25. 德拜的偶極損耗准确理論及其証明	224
第四章 不均匀介質中的介質損耗	245
§ 26. 概說	245
§ 27. 不具有表面电導的不均匀介質中的損耗	252
§ 28. 具有表面电導的不均匀介質中的損耗	265
第三篇 介質电强度的破坏	
緒論	280
第一章 气体的击穿	283
§ 1. 气体中放电的不同形式	283
§ 2. 不同电极形状时的起始击穿电压	286
§ 3. 气体的击穿电压与压力、时间和頻率的关系	300
§ 4. 撞击游离的理論	307
§ 5. 气体击穿的条件	321
§ 6. 气体击穿时空間电荷的作用	329
§ 7. 不均匀电場中的气体击穿	338
§ 8. 導線上的电量	350
§ 9. 固体介質在气体中的表面击穿(閃絡)	357
第二章 液体介質的击穿	367
§ 10. 液体介質击穿概說, 雜質的影响	367
§ 11. 液体介質击穿現象中的实验規律	370
§ 12. 强电場中液体的电導系数	390
§ 13. 液体介質击穿的机构	395
§ 14. 液体介質中的表面放电和表面击穿(閃絡)。阻擋層的影响	403
第三章 固体介質击穿的一般規律	408
§ 15. 击穿的热形式	409
§ 16. 击穿的电形式	412
§ 17. 击穿的化学形式	414
第四章 固体介質的热击穿	415
§ 18. 瓦格納的基本理論	415
§ 19. 交变电压下單維情形中的热击穿理論	418
§ 20. 击穿电压与时间的关系	480

§ 21. 热击穿理論的實驗檢查	438
§ 22. 热击穿理論在技術計算上的应用	450
第五章 固体介質的电击穿	460
§ 23. 均匀电場中的电击穿	460
§ 24. 不均匀电場中的电击穿	471
§ 25. 消除边缘放电的方法	492
§ 26. 固体介質的不完全击穿	501
§ 27. 晶体的不完全击穿	506
§ 28. 逐步击穿	512
§ 29. 薄層固体介質的击穿	519
第六章 固体介質电击穿理論	523
§ 30. 电場所造成的分子和晶体点陣的破裂	523
§ 31. 計及裂縫的影响时由电場所造成的介質破裂	529
§ 32. 固体介質中放电現象發生和擴張的机构	531
§ 33. 不均匀电場中固体介質的击穿, 最小击穿电压的現象	538
第七章 工程介質和老化	541
§ 34. 击穿电压与电极表面大小的关系	542
§ 35. 介質的老化	543
§ 36. 介質的疲劳	550
§ 37. 漆絕緣	554
§ 38. 电纜紙絕緣	563
§ 39. 高压电机的絕緣	570
附錄	578
附表	593
慣用記号表	604
参考書刊	605
中俄名詞对照表	620
中俄文人名对照表	626

本主义國家，但是对絕緣材料的生產問題和应用問題到現在还没有給予足夠的注意，这个工業部門是最落后的部門之一。它的增長速度顯著地落后於整个工業的增長速度。这种情况不能不影响到科学研究工作，因为研究所的成果常常因为工厂生產基礎薄弱而不能付之实现。因此提高絕緣工業是最迫切的任务之一。

与电气絕緣問題关联着的理論性和生產性的問題，虽然非常重要，到現在在文献中还是講得很少。關於这些問題的基本参考書完全沒有，这不能不使絕緣技術的發展受到阻碍。絕緣材料局有鑒於此，就提出了編著一套相应的参考書的問題。本書就是这套叢書的第一本。

本書由列寧格勒电气物理研究所同人集体執筆。在編著本書时，廣泛地利用了电气物理研究所絕緣部門和物理技術研究所實驗室中的資料。

書中所述資料表达了介質科学的現況。

今后在介質方面的研究工作，無疑地將擴展和确定我們在这个領域里的認識，何況我們在这个領域里，目前正進行着非常有力的科学研究工作。由於这些研究的結果，我們的观点非常可能有某种改变。在介質物理学的許多个別問題上，現在还没有公認的解釋。關於这些問題，著者並不把所有的解釋罗列出來，而只敘述著者所贊同的理論。

参加本書編著工作的有下列同志：第一篇由 J. H. 札盖姆執筆；第二篇第一章由 C. C. 古丁，第二章由 A. II. 亞歷山大罗夫，第三章由 A. Ф. 華耳特尔，第四章由 E. B. 庫夫欣斯基執筆；第三篇第一、二、四、六章由 A. Ф. 華耳特尔和 Л. Л. 英盖，第三、五兩章由 B. M. 伍耳，第七章由 И. M. 高耳德曼執筆。

著者

列寧格勒 1932年9月

緒 論

法拉第最早给出了“介質”这概念的定义,用这名词來“定出被电力所直通或橫貫地作用着的那种物質”[Paraday: Experimental Researches in Electricity (电学的試驗研究), Vol. 1, p. 361, London, 1839]。这个正式定义到現在还是正确的。在現代的情況下,科学使我們可以从物質本身的結構來解釋电力可能在介質中作用的原因。任何物質都由不同性的电荷組成。在介質中,这些电荷牢固地互相联系;相反地在导体中,电荷間的联系很弱,在很小的外力的作用下,电荷就能移动。由於电荷間存在着多少比較牢固的联系,介質在一定限度內对电力有反作用,而轉入緊張状态;只要这反作用存在,电力本身就有可能存在。在导体中,联系很弱的“自由”电荷对电力沒有顯著的反作用,因此导体中可能有的电力是很小的。

当然,像任何分界一样,將物質分成介質和导体是一种慣例。不僅有許多物質,即半导体,是介於介質与导体之間的,而且同一物質由於外界条件的不同,並由於所受电力的作用条件的不同,可能或是导体或是介質。例如許多通常称做介質的物質(玻璃,晶体),在高温下是导体。高温下的气态金屬是介質。水在直流电压和低频下是导体,而在冲击电压下則是介質。最后,所有已知的介質在足夠强的电場中都变成导体。

介質对所受电力發出阻力时,發生变化:它受到电解,在它內部積聚起空間电荷,它被通过的电流加热。这些变化的程度与我們在介質中所造成的电場有关。因此,關於介質中电場的形狀和

強度的明确的概念,是研究介質中所發生的过程的先決条件。

介質在电力作用下發生变化时,也使电場本身發生改变。只要指出介質中所形成的空間电荷引起的电場的那些根本变化就已經足夠了。介質与电場間的这个互相作用經常必須注意,如果利用靜电学的普通公式來計算的話。因为介質中所發生的变化的發展需要一些時間,所以在剛接通电压后,靜电学公式通常是可用的。过程繼續發展时,这些公式就不可直接利用。因此,为了对現象獲得正确的理解,就必須利用电动力学的定律,而不是靜电学的。

介質中电荷間的联系不是絕对的,在足夠大的电場強度下,这种联系破坏,發生所謂介質击穿的現象。这时物質从介質状态轉入導體状态,介質丧失了电強度。

因为在解釋介質中所發生的过程时,电場具有很重大的意义,所以本書第一篇講述關於电場的理論。第二篇敘述当介質处在不足以破坏其电強度的电場中时,介質內部所發生的現象,即介質極化、电流穿透介質的通过和介質損耗。最后第三篇敘述並解釋电強度破坏——介質击穿——的过程。

第一篇 電場

第一章 電場的解析計算法

§1. 庫倫定律. 電場強度 我們从丰富的實驗資料知道, 兩個帶電體以某一個力相互作用着。

對於兩個點電荷而言, 實際上就是對於大小比相互間距離小得多的兩個電荷而言, 它們之間的力 (如果電荷处在真空內) 由庫倫定律決定:

$$\mathbf{F}_{1,2} = \frac{q_1 q_2}{r^3} \mathbf{r}_{1,2}。 \quad (1)$$

这里 $\mathbf{F}_{1,2}$ —電荷之間相互作用着的力的矢量, q_1 和 q_2 —電荷的電量, r —它們之間的距離, $\mathbf{r}_{1,2}$ —矢量, 其量值等於兩電荷之間的距離 r , 其方向从第一個電荷指向第二個電荷。

註 庫倫定律 (方程 1) 在矢量形式中時, 可用來決定力 $\mathbf{F}_{1,2}$ 的作用方向。在同性電荷的情形中, 力 $\mathbf{F}_{1,2}$ 与矢量 $\mathbf{r}_{1,2}$ 符号相同, 从第一個電荷作用在第二個電荷上的力是順着 $\mathbf{r}_{1,2}$ 的方向的 (排斥力)。在異性電荷的情形中, 力 $\mathbf{F}_{1,2}$ 与矢量 $\mathbf{r}_{1,2}$ 符号相反, 从第一個電荷方面作用在第二個電荷上的力指向第一個電荷 (吸引力)。

利用庫倫定律, 我們可以確定電荷的單位。

在絕對靜電單位制中取作電荷的單位的是這樣一個電荷, 它与另一相等的電荷相距 1 厘米時, 以 1 達因的力作用於另一電荷。用於實際測量時, 這個單位太小, 所以常用一個放大的單位。稱做庫倫

$$1 \text{ 庫倫} = 3 \times 10^9 \text{ 絕對靜電單位 (靜庫)}。$$

電荷的存在总是使在其中發生電力作用的媒質獲得特殊情況。

媒質的這種狀況我們稱做電場。電場的最重要的特性——它的強度——可在量的方面從庫倫定律決定。如果將方程(1)改寫成

$$F = Eq, \quad (2)$$

則電場強度 E 在數值上就與作用於單位電荷的力相等。

電場強度的絕對單位可從方程(2)確定。顯然，在電場的某一點作用於單位電荷的力等於 1 達因時，這點的電場強度就是一個絕對靜電單位。

§ 2. 電場利用力線和等位面的圖示法 電場的圖示可以借助於力線。所謂力線，就是在空間的所有各點上都與電場強度的方向一致的線。因為在某一點的電荷上，只能作用着完全確定的一個力，所以通過空間的每一點只能作一根力線。如果這樣地作出力線，使通過垂直於力線的每一平方厘米截面的力線數等於這平方厘米中心點的電場強度的值，於是就獲得電場的全圖。

的確，有了這種圖，就可以決定每一點的電場強度的大小和方向：每一點上矢量 E 的方向與通過這點的力線的方向符合，其大小則由力線的密度決定。

電場的另一種圖示法根據於電位的概念。當電荷在電場內移動時，或者消耗功，或者作出功。在靜電學上我們證明，如果電荷 q 從 A 點移動到 B 點，則所消耗的或獲得的功與電荷從 A 點移向 B 點時所取的途徑無關。因此，電荷 q 在電場內每一點具有完全確定的位能 W ，並且因此可以決定電場內兩點間的位能差 $W_A - W_B$ 。 $W_A - W_B$ 等於電荷從 A 點移向 B 點時所消耗的或獲得的功。

如果我們將這功歸算到一個正電荷，則