

高等学校教学用书

# 电 工 学

中 册

A. C. 卡薩脫金  
M. A. 畢烈卡林著  
И. С. 謝爾蓋葉夫

高等教育出版社

高等学校教学用书



电 工 学  
中 册

A. C. 卡薩脫金  
M. A. 畢烈卡林著  
И. С. 謝爾蓋業夫  
王 众 託 等 譯

高等教育出版社

DL67/118  
本書原系根據蘇聯國立動力出版社(Государственное энергетическое издательство)出版的卡薩脫金(А. С. Касаткин)、畢烈卡林(М. А. Перекалин)、謝爾蓋萊夫(П. С. Сергеев)所著“電工學”(Электротехника) 1952年重編第四版譯出。現又根據1953年重編第五版重加譯校。原書經蘇聯高等教育部審定為高等工業學校非電工專業電工學課程的教學參考用書。中華人民共和國高等教育部1954年批准的“電工學”教學大綱中也規定本書為教學參考書。

本書中譯本暫分三冊出版：上冊包括原書的緒論和第一章至第九章的內容，主要討論直流電路和交流電路、電場和磁場以及電工量測；中冊包括原書的第十章至第十六章，主要內容為變壓器和各種電機——異步電機、同步電機、直流電機、換流機以及交流換向器式電機等；下冊包括原書的第十七章至第二十二章，分別講述電子學、電力傳動、電器、電照、電力網、變電所以及發電廠。

從事本書第四版翻譯與互校工作的為王眾託、蔣德川、王宏禹、王健、鄧偉霖、黃必信，擔任新版修訂工作的是王眾託、蔣德川、黃必信。

## 電 工 學 中 冊

A. С. 卡薩脫金, М. А. 畢烈卡林, П. С. 謝爾蓋萊夫著

王眾託等譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版營業許可證出字第〇五四號)

上海大新印刷廠印刷 新華書店總經售

統一書號 15010·244 開本 860×1168 1/32 印張 7 12/16 字數 199,000

一九五六年四月上海第一版

一九五六年十二月上海第二版

一九五六年十二月上海第三次印刷

印數 2,001—16,500

定價(10) 1.20

# 中 册 目 录

第十章	电机概論	267
10-1	电机的基本定义与分類	267
10-2	电机与变压器的作用原理	268
10-3	用于变压器与电机中的材料	270
10-4	运行情况与額定量	273
10-5	發热与冷却	274
10-6	歷史簡述	274
10-7	苏联的变压器制造与电机制造事業	277
第十一章	变压器	279
11-1	概論	279
11-2	基本構造	281
11-3	变压器的空載情况	284
11-4	任載运行	287
11-5	电压方程式	289
11-6	任載时变压器的向量圖	291
11-7	等效电路	292
11-8	空載試驗	293
11-9	短路試驗	295
11-10	副电压的变化	297
11-11	損失和效率	299
11-12	三相电流的变换	301
11-13	变压器繞組的联接法	301
11-14	联接組	303
11-15	三繞組变压器	305
11-16	自耦变压器	306
11-17	变压器的並联运用	308
11-18	变压器的容量、損耗和尺寸	310
11-19	發热和冷却	312
11-20	变压器的構造	315
11-21	仪用互感器	318

<b>第十二章 異步电机</b> .....	327
12-1. 概論.....	327
12-2. 基本構造.....	328
12-3. 定子和轉子的繞組以及繞組中的感應電動勢.....	329
12-4. 繞組的磁化力.....	338
(a) 單相繞組.....	338
(b) 三相繞組.....	341
12-5. 異步電動機的作用原理和能量圖.....	344
12-6. 电机的电动机、制動及發電機运行情况.....	348
12-7. 与變壓器的類比.....	349
12-8. 異步电机的向量圖.....	355
12-9. 旋轉力矩.....	357
(a) 力矩对磁通 $\Phi$ 和轉子電流的有功分量 $I_2 \cos \psi_2$ 的依賴关系.....	357
(b) 力矩对轉差率的依賴关系.....	359
(c) 最大力矩.....	361
(d) 起動力矩.....	362
12-10. 电机运行的穩定性.....	363
(a) 电动机.....	363
(b) 制動情况.....	365
12-11. 起動.....	366
(a) 总論.....	366
(b) 繞線式电动机.....	366
(c) 鼠籠式电动机.....	368
12-12. 速率調節.....	372
12-13. 等效电路.....	375
12-14. 圓圖.....	377
12-15. 电动机的运行特性.....	381
12-16. 異步變頻机.....	386
12-17. 單相異步电动机.....	387
12-18. 旋轉自耦變壓器.....	391
12-19. 旋轉變壓器.....	392
12-20. 电机的容量、損耗、轉速和尺寸.....	393
12-21. 異步電動机的效率和 $\cos \varphi$ .....	395
12-22. 現代的異步电机.....	397
<b>第十三章 同步电机</b> .....	401
13-1. 概論.....	401
13-2. 空載運轉.....	405
13-3. 三相同步發電机的任載運轉.....	407

(a) 電樞反應	407
(б) 電樞的漏感抗	411
(в) 電樞繞組的有效電阻	411
(г) 向量圖	412
(д) 特性曲綫	414
13-4. 同步電機的並聯運行	416
(a) 整步及並聯運行的接入	416
(б) 電磁功率和同步功率	421
(в) 激磁的改變和 V-形曲綫	427
(г) 兩台容量相近的發電機的並聯運行	430
13-5. 同步電動機	433
(a) 電機從作為發電機運行到作為電動機運行的轉變	433
(б) 同步電動機的向量圖	434
(в) 同步電動機的電磁功率和同步功率	435
(г) 同步電動機的 V-形曲綫	436
(д) 同步電動機的起動	437
(e) 同步電動機的運行特性	441
13-6. 同步補償機	442
13-7. 有功功率和無功功率在並聯運行的電機之間的分配	443
13-8. 損失和效率	444
13-9. 發熱和冷卻	446
13-10. 我國工廠出品的同步電機	447
<b>第十四章 直流電機</b>	<b>449</b>
14-1. 構造與主要的元件	449
14-2. 用換向器獲得直流	451
14-3. 直流電機的電樞繞組	453
14-4. 電動勢	461
14-5. 磁路及其計算	462
14-6. 電樞反應	464
14-7. 換向	468
14-8. 發電機	475
(a) 發電機按激磁方法的分類	475
(б) 他激發電機	476
(в) 並激發電機	478
(г) 串激發電機	481
(д) 復激發電機	482
14-9. 電動機	483
(a) 總論	483

(6) 並激电动机.....	486
(7) “发电机-电动机”組.....	489
(r) 串激电动机.....	490
(x) 复激电动机.....	491
14-10. 发电机的並联运行.....	491
14-11. 損失和效率.....	493
14-12. 苏联的直流电机.....	494
<b>第十五章 換流机</b> .....	<b>496</b>
15-1. 电动机-发电机組.....	496
15-2. 單樞換流机.....	497
<b>第十六章 交流換向器式电机</b> .....	<b>500</b>
16-1. 概論.....	500
16-2. 單相电动机.....	500
16-3. 三相电动机.....	502
<b>索引</b> .....	<b>1-4</b>

## 第十章 电机概論

### 10-1. 电机的基本定义与分類

电机是國民經濟电气化的主要技術基礎。在工厂里、在農業中、在建筑工地等等場合必須用它來作为电能的來源(發电机)或作为拖动各式各样工作机械的电动机。

用來把机械能变成电能的电机叫作發电机;用來把电能变成机械能的电机叫作电动机。

电机还用來变换电流的種類(例如把交流变成直流)、交流电的頻率、相数,把某一电压的直流电轉換成另一种电压的直流电。这些电机叫轉換机。

电机通常有两个主要部分:叫作轉子的旋轉的部分和叫作定子的固定部分(圖 10-1)。

变压器也算是电机。变压器是一种静止的电磁器具,用來把某一电压的交流电变成同頻率的另一种电压的交流电。虽然它不是一部机器(沒有运动部分),但是它的原理常常和电机的原理一同研究,因为說明变压器运用特性的各量間的基本关系,同样可以应用于电机。

电机按照它所產生或耗用的电流的種類,分为交流电机和直流电机两种。

交流电机分为同步电机和異步电机。两种电机在運轉时其中都產生旋轉磁場。同步电机的轉子的旋轉速度等于磁場旋轉的速度,而異

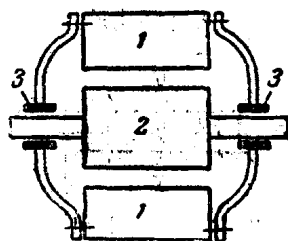


圖 10-1. 电机的一般構造圖:  
1—定子; 2—轉子; 3—軸承。



步电机轉子的旋轉速度和磁場旋轉的速度不同，它与旋轉磁場異步地（不同步地）旋轉（§ 7-5）。

交流电机有單相与多相兩種（多半是三相的）：單相电机產生或耗用單相电流，多相电机則產生或耗用多相电流。

直流电机通常都設有換向器，借以在电机兩端獲得永远在單方向作用的电压。同时換向器用來換接轉子（电樞）繞組中的电流，使得由定子电磁鐵的磁場与轉子繞組中的电流相互作用而生的电磁力的合力，在任何時間都是以單一方向作用于轉子的。后面我們还要研究換向器的構造及其工作原理。

交流換向器異步电机也常应用，这种电机与無換向器的異步电机不同的地方是它可以勻滑而且經濟地調節轉速。但是由于它价格較高，保养复雜，工作的可靠性太低，因此应用范围較为狹窄。

前面所簡略地談到的电机实用分類法並未把所有各种形式的电机都包括在內。今后当研究电机各种形式时，我們只注意到用途与制造各異的交流电机与直流电机。

### 10-2. 电机与变压器的作用原理

电机的作用原理是以电磁感应定律和电磁力定律为基础的。根据

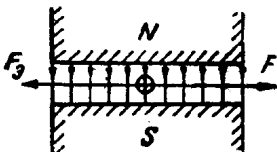


圖 10-2. 电机作用原理之闡述。

上述定律可以獲得說明电机运行过程中各量間的基本关系。为此，參閱圖 10-2。圖中所示为一建立磁場的电磁鐵之兩極。在磁極間的磁場中放置一个導體，其截面用小圓圈來表示。如果移动这个導體，例如从左向右移，

根据电磁感应定律，其中就会發生感应电动势：

$$E = Blv, \tag{10-1}$$

式中  $B$ —導體所在地的磁感应強度； $\frac{1}{\text{韦伯/米}^2}$  或  $\text{特斯拉} (1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2)$

$l$ —導體的有效長度，亦即導體在磁場以內的部分；

$v$ —导体对磁场的相对速度。

感应电动势的方向可按右手定则决定。如果导体的两端与一外电阻接通,那末就有电流沿着导体流动,其方向与电动势相同。这个方向(离开我们)用小十字来表示。

由于导体中电流  $I$  与磁场相互作用的结果,产生了电磁力

$$F_s = BIl, \quad (10-2)$$

其方向按左手定则来决定。

如果要使导体作等速运动,那末要外加一机械力  $F$ ,这个力与  $F_s$  相等,即:

$$F = F_s. \quad (10-3)$$

如果把上面这个力的等式两边都乘以速度  $v$ ,那末就得到功率的等式:

$$Fv = F_s v. \quad (10-4)$$

把(10-2)式的  $F_s$  与(10-1)式的  $v$  代入上式的右边,得出:

$$Fv = EI. \quad (10-5)$$

由此可见,在我们这个蹄形发电机中的机械功率  $Fv$  转换成了电功率  $EI$ 。这个发电机输出到外电路的功率可由下列电压方程式中求出:

$$U = E - IR, \quad (10-6)$$

式中  $U$ —外电阻的端电压;

$IR$ —导体中的电压损失,导体电阻为  $R$ 。

等式两边都乘以  $I$ ,得出:

$$UI = EI - I^2R; \quad (10-7)$$

式中  $UI$ —导体输出到外电路上的电功率(这功率是由机械功率转换而来的总电功率  $EI$  的一部分);

$I^2R$ —导体中电的损失。

这个蹄形电机也可当作电动机运转,也就是说,把电能转换为机械能。在导体上加一个电压  $U$ ,使得导体中的电流  $I$  的方向仍如图 10-2 所示。这时,产生了一个电磁力,根据左手定则,这个力使导体向左移

动。于是在导体中产生了电动势  $E$ ，其方向与电流  $I$  相反，也就是与  $U$  相反，这可借右手定則之助而得知。因此，电压  $U$  应该与电动势  $E$  以及导体中电压降  $IR$  相平衡，即

$$U = E + IR_0 \quad (10-8)$$

把上式 (10-8) 两边都乘以  $I$ ，便变成了功率方程式：

$$UI = EI + I^2R_0 \quad (10-9)$$

在这个方程式中， $I^2R_0$  是导体中电的损失， $EI$  是輸入的电功率  $UI$  中变成机械功率  $F_s v$  的那一部分，因为根据 (10-1) 与 (10-2)，我們可以寫出：

$$EI = Blvl = F_s v \quad (10-10)$$

上面这些关系式指出：电机是可逆的，即电机既可当作發电机用，又可当作电动机用。

电机的可逆定理是俄國埃·赫·楞次院士在 1833 年所發現的。这个定理可应用于任何电机。

由此可見，磁場和載流導体的存在是任何电机運轉的必要条件。为了增強磁場，通常使用鋼一類的鉄磁性材料。

当电机工作时，导体与磁場發生相对位移。在一般电机中，这种位移是利用旋轉运动实现的（圖 10-1）。

变压器的作用原理是以互感現象为基础的。通常它由两个圈数不同的繞組所構成。繞組之間有磁的耦合；为了加強磁的耦合，繞組裝在一个鋼制的閉合的導磁体、亦即变压器的鉄心上。一个繞組中的电能借磁場傳送到另一繞組中去。由于繞組的圈数不同，所以可以把一种电压的电流变成另一种电压較原来电压为高或低的电流。

### 10-3. 用于变压器与电机中的材料

为了制造变压器和电机，要用下列材料：結構材料、“活性”材料与絕緣材料。

結構材料用來制成电机与变压器中主要用于傳送或承受机械作用的部分或零件。用于电机中的結構材料,基本上与用于机械制造中的相同:鉄(鑄鉄、鍛鉄)、鋼(鑄鋼、鍛鋼)、有色金屬及其合金和塑體。

活性材料用來作为磁性部分或導电部分,以便在变压器或电机中建立產生电磁过程的必要条件。

电机的某些部分是在复雜的物理条件下工作的。因此对于許多材料同时要提出对于其机械的、磁的、电的性質的要求。

絕緣材料用來把变压器或电机的導电部分与其他部分或各導电部分相互之間在电的方面隔离開來。

(a) **磁性材料**。用于变压器鉄心的磁性材料是一种特制的电工片鋼,含矽量很高(4—5%),厚度通常为 0.5 或 0.35 毫米。利用这种材料,可以大大減少变压器鉄心中因交变磁場而產生的渦流損失。

电机磁系統內的各部分用不同的鉄磁性材料制成:各种等級的电工片鋼、鑄鉄、鑄鋼、鋼板(結構鋼)以及鍛鋼等等。

电机中發生交变磁場的部分,应用含矽量 2%、厚度 0.5 毫米相互絕緣的电工片鋼疊成。

損失系数用來說明片鋼中磁滯損失与渦流損失的大小,即頻率為 50 周/秒,磁感应強度隨時間作正弦变化时每 1 仟克鋼內所損失的功率,磁感应強度的幅值通常取其等于 10 000 高斯。用于一般电机內厚度為 0.5 毫米的片鋼,損失系数約為 3.3 瓦/仟克;用于变压器中,含矽量至 4~5% 的片鋼,当厚度為 0.5 毫米时,損失系数約為 1.4—1.5 瓦/仟克,厚度為 0.35 毫米时,約為 1.3—1.2 瓦/仟克。

我國<sup>①</sup>冶金工厂近年來出產的电工片鋼,具有很高的質量。鑄鉄由于磁性較遜,在磁系統內很少用它。

鑄鋼、鍛鋼以及結構上用的鋼板主要用于电机磁系統中磁場恆定的部分。

<sup>①</sup> 書中“我國”系指苏联,下同——編者註。

(6) **導電材料**。這一類材料中，首先便是銅，因為它是價值較廉的材料，而電阻系數很小。

除了銅以外，有時也用鋁以及某些合金（黃銅、磷銅）來作導體。用於變壓器與電機繞組中的銅線製成圓形或矩形截面，外加各種絕緣。通常用來作絕緣的是，棉紗、天然絲、電話綫絕緣紙、石棉、玻璃絲、特制的珐瑯漆以及特別合成的膠片等等。

紗包綫廣泛應用於一般變壓器與電機中。

較小的電機多使用以珐瑯漆絕緣的導綫。耐熱的珐瑯漆與合成塑膠在蘇聯經過多次的理論與實驗研究的結果，業已獲得廣泛的實際應用。

電刷對於電機的運用具有重大的意義。電刷壓在旋轉的滑環或換向器上，滑環或換向器則與轉子上的繞組相連接。這樣一來，便有了滑動接觸，於是繞組和外電路聯了起來。

(B) **絕緣材料**。絕緣應該認為是變壓器和電機的主要構成部分之一。它在很大的程度上決定了變壓器和電機的工作的可靠性。

用來使繞組絕緣的材料，其耐熱性決定了繞組的容許溫度，因而也決定了活性材料的負載（導體的電流密度，鐵心的磁感應強度）。絕緣材料的热傳導性、耐潮性與化學耐性都是有着很大意義的。

絕緣材料還要具有足夠的機械強度，因為在繞組絕緣的過程中，在把繞組安裝到變壓器的鐵心或電機上去的時候，以及在變壓器和電機運行的情況下，絕緣都要經受相當大的機械力。

雲母絕緣在各種絕緣材料中居第一位。它能夠最完善地滿足上面所列举的各種要求。雲母是它的原材料。把雲母裂成碎片，可製成雲母紙、雲母帶和雲母箔，雲母紙是用雲母碎片借特制的粘膠所成的薄片。雲母帶由一層薄的雲母裂片製成，兩面用紙裱上。雲母箔由1至3層雲母裂片製成，貼在紙上，做成葉片狀。雲母帶與雲母箔是比較貴重的絕緣材料，主要用於高壓電機（3000伏以上）。

最常用的絕緣材料是纖維質材料：紙、紙板、布帶、織品等。其主要优点是机械強度与韌性較高而成本較低。但是未經浸漆的纖維材料具有吸潮性，热傳導性很差，介电強度也不高，因此它們要經過浸漆以后才用來作为电机的絕緣材料，这样可以大大改善其性能。

用來包复導体的矽-有机化合物絕緣材料，在苏联經過斯大林獎金獲得者克·亞·安德里亞諾夫(К. А. Андрианов)教授及其同事的建議和研究，具有很大的实际用途。

为了改善电机絕緣的性能，必須使用浸漬用的与包复用的漆，也有用由瀝青、干性油与松脂所組成的特种化合物。

現代的变压器通常都制成油冷式的。鉄心与繞組都放在盛有特制变压器油的槽內。变压器油的原料由石油分餾而得。

用于电机的絕緣材料，依据它們的耐热性分成數級。其中A級和B級最为常用。

**A級絕緣：**浸过漆或浸在油里的棉紗、絲、紙和其他相類的有机物。此外也包括被称作珞瑯的化合物，它用于制造珞瑯綫①。

**B級絕緣：**含有粘料在內的云母、石棉、玻璃絲的制成品。

#### 10-4. 运行情况与額定量

电机或变压器在它們原來預定的情况下工作，叫作額定运行情况。表示它特征的，是記載在电机或变压器名牌上的所謂額定量。

通常电机和变压器是預定用于額定連續运行情况的，在这种情况下，它們運轉的时间可以无限制，而其各部分的温度高于空气的温度的数值，不致超过國定全苏标准(ГОСТ 183-41与ГОСТ 401-41)所容許的数值。

其他的額定运行情况——短时运行与間歇运行——主要是作为說明用于电气鉄道、吊車、升降机以及压缩机等等的电机的特性的(見第

① 俗稱漆包綫——譯者註。

十八章)。

### 10-5. 發热与冷却

任何能量的轉变都同时有損失發生。在电机特别是在变压器中,虽然損失是很小的,但是不僅效率与之有关,而且电机与变压器的尺寸也取決于它。这些尺寸應該这样考慮: 务須使得由于鉄損、繞組中的損失以及摩擦損失所產生的热量,能夠在發热部分的溫度較高于周圍媒介質的溫度时,發散到周圍媒介質中去。溫度升高不能大于由所用絕緣材料的耐热性能所規定的数值。

周圍媒介質(空气)的溫度定作  $35^{\circ}\text{C}$ 。对于 A 級絕緣材料,容許的溫度可以比周圍媒介質高  $55-75^{\circ}\text{C}$ ; 对于 B 級材料則是  $70-95^{\circ}\text{C}$  (上述容許溫升的限度依繞組的制造情况及溫度的量測方法而定)。

与上述根据長时期經驗所決定的溫度容許数值相对应的絕緣材料的使用寿命約为 20—25 年。如果容許的溫度加高,則其寿命顯著減少。这时絕緣“陈老”,首先就使其机械性能惡化(絕緣變脆,机械方面不再堅固了)。

热的發散不僅与冷却面積的尺寸有关,同时和經過它的空气(或其他气体)移动強度有关。应用正确选择的冷却系統(通風系統)促成了电机制造与变压器制造的進步,使得我們有可能制造功率極大(每座 150 000 千瓦)的电机和变压器。

### 10-6. 歷史簡述

決定电机与变压器作用原理的最重要的物理定則之一——电磁感应定律——是米·法拉第(М. Фарадей)在 1831 年所創立的。

1833 年,彼得堡科学院院士、彼得堡大学教授埃·赫·楞次提出了它的研究結果,他深刻地概括了电磁感应定律,列出了可逆性原理,指出:受电磁力作用而發生的旋轉与电磁感应这两种現象之間有着密切

的關係。

埃·赫·楞次後來的許多研究工作是與俄國院士波·謝·亞可比的工作相聯系的。亞可比是第一個旋轉電機的發明者，他又發明了換向器式電機的構成部分中不可缺少的換向器。



波里斯·謝苗諾維奇·亞可比(1801—1874)。

院士。最傑出的發明家和實踐家。第一個電動機的發明者。和埃·赫·楞次一起研究出電機的基本原理。電鑄的發明者。打字電報機的發明者。

亞可比所製造的電動機，是世界上第一台應用於實際的電動機。這台電動機用來驅動小舟，在涅瓦河上航駛(1837)。亞可比在改善他的電動機的同時，還致力於許多電工學上的其他問題。他在地雷方面的研究是具有重大意義的。亞可比利用感應線圈把電能的脈衝經過9公里送到埋地雷的地方。這樣，就第一次實現了電能借感應線圈的轉換而傳輸到別的地方去。

但是應該把變壓器認為是巴·尼·亞勃羅契闊夫所發明的，在十九世紀的七十年代，他把變壓器首先應用於工業設備中。

從亞可比發明電動機開始，到十九世紀的八十年代，實用電工學的



發展主要地是在改善直流电机的方向前進。直流电机在許多情形下用來代替价格昂貴、效力低微的電池。

交流电的第一个实用設備是巴·尼·亞勃罗契闊夫在 1878 年所制成的，用它來供应“亞勃罗契闊夫之燭”。这时他制造了一部交流發电机，繞組是在定子上的，由旋轉电磁鐵的磁場來在其中感应而產生交流电。电磁鐵的繞組中通以直流电，直流电流是得自特別的直流發电机，並借滑环及加于其上的电刷之助而送到轉子中去。这个交流發电机是现代同步电机的雛形。

当时用于亞勃罗契闊夫的，“电燭”設備中叫作感应綫圈的东西，具有兩個用磁通联系起來的繞組，裝在一个断开的鐵心上。这种感应綫圈用來轉变交流电流，实际上就是变压器。



克拉夫基·伊波里多維奇·孫菲尔(1885—1946年)。

苏联科学院院士。电机理論方面許多作品的作者。促進我國电机制造發展的發明家。

在十九世紀八十年代的中間，即使是由于我們的同胞伏·亞·皮落茨基、德·亞·拉契諾夫的研究工作顯示了交流电輸电的优点，但是大家还是要選擇直流系統，因为当时还没有足夠完备的交流电动机。