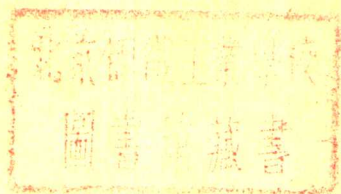


高等学校教学用书

电 工 学

中 册

A. C. 卡薩脫金
M. A. 畢烈卡林 著
И. С. 謝尔盖業夫



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. 謝尔盖萊夫
王 众 託 等 譯

高 等 教 育 出 版 社

本書系根據蘇聯動力出版社（Государственное энергетическое издательство）出版的卡薩脫金（А. С. Касаткин）、畢烈卡林（М. А. Перекалин）、謝爾蓋葉夫（П. С. Сергеев）所著的“電工學”（Электротехника）1952年重編第四版譯出。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書。

本書中譯本分三冊出版：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。

從事本書的翻譯與互校工作的為大連工學院電機教研室王眾託（緒論、第五、六、七、八、九、十、十五、十七、十八、二十和二十二章）、蔣德川（第一、二、三、四和十四章）、王宏禹（第十一和十二章）、王健（第十三、十六、十九和二十一章）；總的校對與校訂則由鄧偉霖、黃必信擔任。

本書原由商務印書館出版，自一九五六年四月起改由我社出版。

電 工 學

中 冊

A. С. 卡薩脫金等著

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 093 (原 554) 開本 850×1168 1/32 印張 76/16 字數 186,000

一九五六年四月上海新一版

一九五六年四月上海第一次印刷

印數 1—2,000

定價(10) 1.10

中 册 目 錄

第十章 電機概論	265
10-1 電機的基本定義與分類	265
10-2 電機與變壓器的作用原理	266
10-3 用於變壓器與電機中的材料	268
10-4 運行情況與額定量	271
10-5 發熱與冷卻	271
10-6 歷史簡述	272
10-7 蘇聯的變壓器製造與電機製造事業	274
第十一章 變壓器	277
11-1 概論	277
11-2 基本構造	279
11-3 變壓器的空載情況	282
11-4 任載運用	285
11-5 向量方程式	287
11-6 向量圖	288
11-7 等效電路	289
11-8 空載試驗	290
11-9 短路試驗	291
11-10 副電壓的變化	294
11-11 損失和效率	296
11-12 三相電流的變換	298
11-13 變壓器繞組的聯接法	299
11-14 聯接組	300
11-15 三繞組變壓器	302
11-16 自耦變壓器	304
11-17 變壓器的並聯運用	306
11-18 突然短路	308
11-19 發熱和冷卻	309
11-20 變壓器的構造	311
11-21 儀用互感器	314

(Б) 激磁的改變和 V-形曲線	417
13-5 同步電動機	420
(а) 電機從作為發電機運用到作為電動機運用的轉變	420
(б) 同步電動機的向量圖	421
(в) 同步電動機的電磁功率和同步功率	422
(г) 同步電動機的 V-形曲線	424
(д) 同步電動機的啓動	424
13-6 同步補償機	427
13-7 並聯運用的電機之間有效功率和反抗功率的分配	427
13-8 突然短路	428
13-9 損失和效率	429
13-10 發熱和冷卻	430
13-11 我國工廠出品同步電機	432
第十四章 直流電機	434
14-1 基本構造與元件	434
14-2 用換向器獲得直流	437
14-3 直流電機的電樞繞組	438
14-4 電動勢	445
14-5 磁路及其計算	446
14-6 電樞反應	448
14-7 換向	452
14-8 發電機	459
(а) 發電機按激磁方法的分類	459
(б) 他激發電機	459
(в) 並激發電機	461
(г) 串激發電機	464
(д) 複激發電機	465
14-9 電動機	466
(а) 總論	466
(б) 並激電動機	469
(в) 串激電動機	472
(г) 複激電動機	473
14-10 發電機的並聯運用	474
14-11 損失和效率	475

14-12 蘇聯的直流電機	477
第十五章 換流機	479
15-1 電動機-發電機組	479
15-2 單樞換流機	480
第十六章 交流換向器式電機	483
16-1 概論	483
16-2 單相電動機	483
16-3 三相電動機	484
索引	487

第十章 電機概論

10-1 電機的基本定義與分類

用來把機械能變成電能的電機叫作發電機；用來把電能變成機械能的電機叫作電動機。此外，電機還用來變換電流的種類（例如把交流變成直流）、交流電的週率、相數，把某一電壓的直流電轉換成另一種電壓的直流電，這些電機叫轉換機。

電機通常有兩個主要部分：叫作轉子的旋轉的部分，和叫作定子的固定部分（圖 10-1）。

變壓器也算是電機。變壓器是一種靜止的電磁器具，用來把某一電壓的交流電變成同週率的另一種電壓的交流電。雖然它不是一部機器（如果從這個名詞的嚴格意義來說），但是它的原理常常和電機的原理一同研究，因為說明變壓器運用特性的數量間的主要關係，同樣可以應用於電機。

電機按照它所產生或耗用的電流的種類，分為交流電機和直流電機兩種。

交流電機分為同步電機和異步電機。兩種電機在運轉時其中都產生旋轉磁場。同步電機的轉子的旋轉速度等於磁場旋轉的速度，而異步電機轉子的旋轉速度和磁場旋轉的速度不同，它與旋轉磁場異步地（不同步地）旋轉。這種電機便是從此得名的。

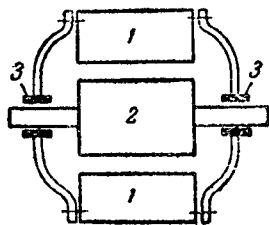


圖 10-1 電機的一般構造圖。
1. 定子，2. 轉子，3. 軸承。

交流電機有單相與三相兩種(多半是三相的):單相電機產生或耗用單相電流,三相電機則產生或耗用三相電流。

直流電機通常都設有換向器,藉以在電機兩端獲得恆在單方向作用的電壓。同時換向器用來換接轉子(電樞)繞組中的電流,使得由定子電磁鐵的磁場與轉子繞組中的電流相互作用而生的電磁力的合力,在任何時間都是以單一方向作用於轉子的。後面我們還要研究換向器的構造及其工作原理。

交流換向器異步電機也常應用,這種電機與無換向器的異步電機不同的地方是它可以勻滑而且經濟地調節轉速。但是由於它價格較高,保養複雜,工作的可靠性太低,因此應用範圍較為狹窄。

前面所簡略地談到的電機實用分類法並未把所有各種形式的電機都全部包括在內。今後當研究電機各種形式時,我們只注意到用途與製造各異的交流電機與直流電機。

10-2 電機與變壓器的作用原理

爲了闡明電機的作用原理,可參閱圖 10-2。其中所示的爲一建立

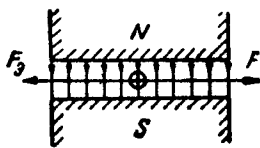


圖 10-2

電機作用原理之闡述。

磁場的電磁鐵之兩極。在磁極間的磁場中放置一個導體,其截面用小圓圈來表示。如果移動這個導體,例如從左向右移,根據電磁感應定律,其中就有感應電動勢,

$$E = Blv; \quad (10-1)$$

產生,式中 B 是導體所在地的磁感應強度;

l 是導體的有效長度,亦即導體在磁場以內的部分;

v 是導體對磁場的相對速度。

感應電動勢的方向可按右手定則決定。如果導體的兩端與一外電阻接通,那末就有電流沿着導體流動,其方向與電動勢相同。這個方向(離開我們)用小十字來表示。

由於導體中電流 I 與磁場相互作用的結果，產生了電磁力

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

其方向按左手定則來決定。

如果要使導體作等速運動，那末要外加一機械力 F ，這個力與 F_s 相等，即：

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

如果把上面這個力的等式兩邊都乘以速度 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 與(10-1)式的 v 代入上式的右邊，得出：

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

由此可見，在我們這個雛形發電機中的機械功率 Fv 轉換成了電功率， EI 。這個發電機輸出到外電路的功率可由下列電壓方程式中求出：

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

式中 U 是外電阻的端電壓；

IR 是導體中的電壓損失，導體電阻為 R 。

等式兩邊都乘以 I ，得出：

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

式中 UI 是導體輸出到外電路上的電功率（這功率是由機械功率轉換而來的總電功率的一部分）；

I^2R 是導體中電的損失。

這個雛形電機也可當作電動機運轉，也就是說把電能轉換為機械能。在導體上加一個電壓 U ，使得導體中的電流 I 的方向仍如圖 10-2 所示。這時，產生了一個電磁力，根據左手定則，這個力使導體向右移動。因而在導體中產生了電動勢 E ，其方向與電流相反，也就是與 U 相反，這可藉右手定則之助而得知。因此，電壓 U 應該與電動勢 E 以及導體中電壓降 IR 相平衡，即

$$U = E + IR。 \quad (10-8)$$

把上式兩邊都乘以 I ，便變成了功率方程式：

$$UI = EI + I^2R。 \quad (10-9)$$

在這個方程式中， I^2R 是導體中電的損失， EI 是輸入的電功率 UI 中變成機械功率 F_v 的那一部分，因為根據(10-1)與(10-2)，我們可以寫出：

$$EI = BlvI = F_v。 \quad (10-10)$$

上面這些關係式指出：電機是可逆的，即電機既可當作發電機用，又可當作電動機用。

電機的可逆定理是俄國埃·赫·楞次院士在 1833 年所發現的。這個定理可應用於任何電機。

由此可見，磁場和載流導體的存在是任何電機運轉的必要條件。通常使用鋼一類的鐵磁性材料，以加強磁場。

當電機工作時，導體與磁場發生相對位移。在一般電機中，這種位移是藉旋轉的方法實現的(圖 10-1)。

變壓器的作用原理是以互感現象為基礎。變壓器普通由兩個圈數不同的繞組所構成。繞組之間有磁的耦合；為了加強磁的耦合，繞組裝在一個鋼製的閉路的導磁體、所謂變壓器的鐵心上。一個繞組中的電能藉磁場送到另一繞組中去。由於繞組的圈數不同，所以可以把一種電壓的電流變成另一種電壓較原來電壓為高或低的電流，而兩個繞組的功率在實際上相差得很小。

10-3 用於變壓器與電機中的材料

為了製造變壓器和電機，要用下列材料：結構材料、“效能”材料與絕緣材料。

結構材料用來製成電機與變壓器中主要用於傳送或承受機械作用的部分或零件。用於電機中的結構材料，基本上與用於機械製造中的

相同：鐵（鑄鐵、鍛鐵）、鋼（鑄鋼、鍛鋼）、有色金屬及其合金、塑體。

效能材料用來作為磁性部分或導電部分、以便在變壓器或電機中建立產生電磁過程的必要條件。

電機的某些部分是在複雜的物理條件下工作的。因此對於許多材料同時要提出對於其機械的、磁的、電的性質的要求。

絕緣材料用來把變壓器或電機的導電部分與其他部分或各導電部分互相之間在電的方面隔離開來。

(a)磁性材料：用於變壓器鐵心的磁性材料是一種特製的電工片鋼，含矽量很高(4—5%)，厚度通常為0.5或0.35毫米。利用這種材料，可以使變壓器鐵心中因磁場的變化而產生的渦流損失大大減少。

電機磁系統內的各部分用不同的鐵磁性材料製成：各種等級的電工片鋼、鑄鐵、鑄鋼、片鋼（結構鋼）以及鍛鐵等等。

電機中發生交變磁場的部分，應用含矽量2%厚度0.5毫米、相互絕緣的電工片鋼疊成。

損失係數用來說明片鋼的磁滯損失與渦流損失的特性，即週率為50週/秒，磁感應強度隨時間作正弦變化時每一仟克鋼內損失的功率，磁感應強度的幅值通常取其等於10000高斯。用於一般電機內厚度為0.5毫米的片鋼，損失係數約為3.3瓦/仟克；用於變壓器中，含矽量為4—5%的片鋼，當厚度為0.5毫米時，損失係數約為1.4—1.5瓦/仟克，厚度為0.35毫米時，約為1.3—1.2瓦/仟克。

我國冶金工廠近年來出產的電工片鋼，其質量甚高。鑄鐵由於磁性較遜，在磁系統內很少用它。

鑄鋼、鍛鋼以及結構上用的片鋼主要用於電機磁系統中磁場恆定的部分。

(b)導電材料：這一類材料中，銅推首選，材料價值較廉，電阻係數很小。

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、電話線絕緣紙、石棉、玻璃絲、特製的珐瑯漆以及特別合成的膠片等等。

紗包線廣泛應用於一般變壓器與電機中。

非大型電機，多使用以珐瑯漆絕緣的導線。耐熱的珐瑯漆與合成塑體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。

電刷對於電機的工作具有重大的意義。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聯接。這樣一來，便有了滑動接觸，藉此而把繞組和外電路聯接起來。通常應用碳-石墨電刷、石墨電刷。金屬-石墨電刷。後者主要應用於低壓直流電機的換向器與滑環。

(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，其耐熱度決定了繞組容許的過熱度，因而決定了效能材料的負載（導體的電流密度，鐵心的磁感應強度）。絕緣材料的熱傳導性，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，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。它能夠最好的滿足上面所列舉的各種要求。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藉特製的黏膠所成的薄片。雲母帶由一層雲母薄的裂片製成，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

優點是機械強度與韌性較高而成本較低。但是未經浸油的纖維材料具有吸潮性，熱傳導性很差，介電強度也不高，因此它們要經過浸油以後才用來作為電機的絕緣材料，這樣可以大大改善其性能。

用來覆蓋導體的矽-有機化合物絕緣材料，在蘇聯經過斯大林獎金獲得者克·亞·安德里亞諾夫教授及其同事的建議和研究，具有很大的實際用途。

爲了改善電機絕緣的性能，必須使用浸漬用的與覆蓋用的漆，也有用由瀝青、乾性油與松脂所組成的特種化合物。

現代的變壓器通常都製成油冷式的。鐵心與繞組都放在盛有特製變壓器油的情內。變壓器油的原料由石油分餾而得。

10-4 運行情況與額定量

電機或變壓器在它們原來預定的情況下工作，叫作額定運行情況。表示它特徵的，是記載在電機或變壓器名牌上的所謂額定量。

通常電機和變壓器是預定用於額定連續運行情況的，在這種情況下，它們運轉的時間可以不受限制，而其各部分的溫度高於空氣的溫度的數值，不超過國定全蘇標準 (ГОСТ 183—41 與 ГОСТ 402—41) 所容許的數值。

其他的額定運行情況——短時運行與間歇運行——主要是作為說明用於電氣鐵道、吊車、升降機以及壓縮機等等的電機的特性的。

10-5 發熱與冷卻

任何能量的轉變都同時有損失發生。在電機特別是在變壓器中，雖然損失是很小的，但是不僅效率與它有關，而且電機與變壓器的尺寸也和它有關。這些尺寸應該這樣考慮：務須使得由於鐵損、繞組中的損失以及摩擦損失所產生的熱量，能夠在發熱部分的溫度高於周圍媒介質的溫度時，發散到周圍媒介質中去。溫升不能大於由絕緣材料的耐熱

性能所規定的數值。

周圍媒介質(空氣)的溫度假定是 35° 。當珐瑯漆與有機材料——棉織品、絲、紙等用油浸漬或泡在油中——當作絕緣材料的時候，容許的溫度可以比周圍媒介質高 $55-75^{\circ}$ ；當用雲母、石棉、玻璃絲的製成品來作絕緣的時候，溫升可達 $75-95^{\circ}$ (上述容許溫升的限度依繞組的製造情況與溫度的量測方法而定)。

根據長時期經驗所決定的溫度容許數值，絕緣材料的耐用期間約為 20—25 年。如果容許的溫度加高，則其壽命顯著減少，而且溫度加得愈高，則壞得愈快。這時絕緣“陳老”，首先就使其機械性能惡化(絕緣變脆，機械方面不再堅固了)。

熱的發散不僅與冷卻面積的尺寸有關，同時和經過它的空氣(或其他氣體)移動強度有關。應用正確選擇的冷卻系統(通風系統)促成了電機製造與變壓器製造的進步，使得我們有可能製造功率極大(每座 150,000 仟瓦)的電機和變壓器。

10-6 歷史簡述

決定電機與變壓器作用原理的最重要的物理定則之一——電磁感應定律——是米·法拉第在 1831 年所創立的。

1833 年，彼得堡科學院院士、彼得堡大學教授埃·赫·楞次提出了它的研究結果，他深刻地概括了電磁感應定律，列出了可逆性原理，指出：受電磁力作用而發生的旋轉與電磁感應這兩種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鮑·希·亞可比的工作相聯繫的。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分中不可缺少的換向器。他所製造的電動機，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(1838)。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 1836 年所發明的電鍍，以及在地雷方面電的應用是具有重大意義的。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藉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，在上一世紀的七十年代，他把變壓器首先應用於工業設備中。

在上一世紀的八十年代以前，從亞可比發明電動機開始，實用工學的發展主要地是在改善直流電機的方向前進。直流電機在許多情形下用來代替價格昂貴，效力低微的電池。

交流電的第一個實用設備是巴·尼·亞勃羅契闊夫在 1878 年所製成的，用它來供應“亞勃羅契闊夫之燭”。這時他製造了一部交流發電機，繞組是在定子上的，由旋轉電磁鐵的磁場來在其中感應而產生交流電，電磁鐵的繞組中通以直流電，直流電流是得自特別的直流發電機、藉滑環及加於其上的電刷之助而送到轉子上去的。這個交流發電機是現代同步電機的雛形。

當時用於亞勃羅契闊夫的“電燭”設備中叫作感應線圈的東西，具有兩個用磁通環鏈起來的繞組，裝在一個斷開的鐵心上。這種感應線圈用來轉變交流電流，實際上就是變壓器。

在十九世紀八十年代的中間，即使是由於我們的同胞伏·亞·皮落茨基、得·亞·拉契諾夫的研究工作顯示了交流電輸電的優點，但是大家還是要選擇直流系統，因為當時還沒有足夠完備的交流電動機。一直到八十年代的末期，我們的同胞米·奧·多利沃-多勃羅沃利斯基才發明了目前應用最廣的三相異步電動機。

多利沃-多勃羅沃利斯基發明了並且研究了三相異步電動機所有主要類型的構造。他又發明了三相變壓器。在他的指導下，實現了世界上第一次三相輸電，距離是 175 公里，這曾經於 1891 年在萊茵河畔的法蘭克福舉行的展覽會上表演過。同時在他的領導下製出了許多交



克拉夫基·伊波里多維奇·孫菲爾

(1885—1946年) 蘇聯科學院院士。電機理論方面許多作品的作者。促進我國電機製造發展的發明家。

流電的儀表和電器。

在這次展覽會之後，關於選擇系統電流種類的問題由於使用三相電流而解決了。從這個時候起，電工技術開始有鉅大的發展。修建了大發電廠，長的輸電線，產生了用於工廠與作坊的電工設備。

莫斯科莫洛托夫動力學院的教授，後來的科學院院士克·伊·孫菲爾在電機方面極有成效的研究工作對於蘇聯電機製造方面有着很大的貢獻。

10-7 蘇聯的變壓器製造與電機製造事業

在沙皇時代的俄國差不多沒有自己的電機製造工業。在彼得堡、莫斯科、里加、萊維爾的幾家小工廠並不是獨立自主的，而是屬於外國公司的，他們根本就不想發展俄國的電機製造業。這些工廠實際上不如說是手工業的裝配廠，利用外國來的零件裝配一些電機。

在工廠中工作的，大半是外國工程師。

即使是在這樣一種條件下，俄國還是有着自己天才的工程師和學者。他們只有偉大的十月社會主義革命以後才能儘量施展所長，而在蘇聯發展電氣化的事業中，起了很大的作用。

當他們參加到實現列寧的全俄電氣化計劃時，擴大和修建了發電廠和電機製造廠。

電氣工程以及其最重要的部分——電機製造也只是在蘇維埃時代才得到真正的發展。大製造廠很快的便建立起來。

蘇聯的工業教育部門和工廠培養出來了質量很高，能解決複雜的技術問題的新的專門幹部。

在蘇維埃政權的年代裏，主要是頭兩個斯大林五年計劃的時期內，我國的電機製造業便經歷了國外的技術所走的半個世紀的道路。

蘇聯的電機製造工業，在迅速地掌握了電機的新類型，普遍地在生產中培養了以廣泛的計劃性為基礎的社會主義勞動體系以後，在質的方面和量的方面，在第二個五年計劃以後，就達到了國外的技術水平。

目前，在蘇聯的工廠中製造着各種基本的與特殊的變壓器與電機——直流電機與交流電機、大型的發電機與變壓器。蘇聯電機製造方面的成就，應歸功於我們計劃經濟制度與蘇聯人民在所有國民經濟部門工作中的高漲情緒。

我國技術的力量特別在偉大的衛國戰爭年代裏顯示出來。在這些年代裏，修建了新的電機製造廠，這些工廠供應了工業和軍事技術所必需的電機和變壓器。

目前，在我國中部、在烏克蘭、在烏拉爾、在西伯利亞、在格魯吉亞、在阿爾美尼亞、在拉脫維亞，都有電機製造廠，這些工廠每年能製出成百萬的各種不同型式的電機和變壓器來。

蘇聯的電機製造者保持了自己光榮的同胞——華·伏·彼得洛夫、埃·赫·楞次、鮑·希·亞可比、亞·格·斯托列托夫、巴·尼·亞勃