

高等學校教學用書

电 机 学

第一册

Л. М. ПИОТРОВСКИЙ 著
竺培勳 孔昌平 譯

高等教育出版社

高等學校教學用書



電 機 學

第一冊

(直流電機)

Л. М. 朴德羅夫斯基著

竺培勳 孔昌平譯

高等教育出版社

本書係根據 1949 年蘇聯國立動力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 出版的朴德羅夫斯基 (Л. М. Плотровский) 著“電機學” (Электрические машины) 譯出的。原書經蘇聯高等教育部審定為動力系及電工系、動力高等學校及電工高等學校用的教科書。

本書綜合地研究電機的各种問題。這些知識是電能和電工高等學校電機製造、發電廠、輸配電及和電機工作有關的其他電工部門各專業組學生所必需的。

本書是專供上述高等學校的學生用的，但對欲繼續在電機領域中深造的現場工程師亦可供參考之用。

參加本書第一冊翻譯和校訂工作的為哈爾濱工業大學電機教研室竺培勳及孔昌平。在翻譯過程中曾得到蘇聯教授沙爾洛夫 (В. П. Соколов) 同志熱心的指導和鼓勵，譯者謹向他表示衷心的感謝。

本書原由龍門聯合書局出版，現轉移我社出版，用該局厚紙型重印。

電 機 學

第一冊

Л. М. 朴德羅夫斯基著

竺培勳 孔昌平譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺 7 號
(北京市書刊出版業營業許可証出字第 054 號)

上海大東集成聯合印刷廠印刷 新華書店發行

統一書號 15010·891 開本 850×1168 1/32 印張 8 6/16
字數 195,000 印數 12,501—17,000 定價 (4) 1.29

1953 年 10 月龍門聯合書局初版

1957 年 2 月新 1 版

1959 年 5 月上海第 5 次印刷

序

這本教科書主要是為我國高等學校電機工程系的學生而寫的，它包括了電機製造的基本章節。在“緒論”中提供了對本課程梗概的說明，作者企圖通過這篇“緒論”說明革命前俄國科學家和發明家在電工重要部份所起的世界性的作用，並說明在偉大十月社會主義革命後蘇聯電機製造的發展。由於這個發展的速度和規模在技術史上是絕無前例的，故作者不得不限制自己，僅按這時期內所進行的巨大工作的主要線索來說明蘇聯電機製造的基本成就。同時，由於篇幅所限，故本書所涉及的關於蘇聯電機製造工業的發展和成就的概觀，僅能視為在這一方面的工作的初步。

在敘述祖國電機製造發展歷史的“緒論”中，作者力求在全書中闡明這個發展的實際內容。現在，我國電機製造達到了這樣高的水平，作者擁有本國的資料又如是豐富，致使作者必須克服許多困難，方克將這些資料在有限的篇幅上寫成一本適合教本的書。

作者和以加里寧命名的列寧格勒工業大學副教授巴爾在滲雜着外國、尤其是出源於英德文的電機專門名詞上進行了巨大的工作。作者毅然拒絕採用那些相似的名詞，即使一些在技術上已成習語的也代之以俄文專門名詞。自然，有些專門名詞不見得全然適當，作者期待着公正的批評。

按照平時自己說明的方式，作者照例地在符號上採用俄文附標，作者認為蘇聯讀者對這種附標易於領悟，故使用俄文附標也較有活力。至於拉丁和希臘文的符號與俄文附標混雜所引起的不方便，依作者的

意見，這是次要的，外表的。並且，常用的拉丁文附標和德文或英文的開始字母是相符合的。

最後，作者僅向在本書最後編校中作了繁重而精細工作的巴爾副教授和安德列伊夫工程師表示深深的感謝。

教授 А. М. 朴德羅夫斯基

列寧格勒 1949 年 7 月

目 錄

緒論	1
----	---

第一篇 直流電機

第一章 直流電機概論	37
------------	----

1. 直流電機發展簡史	37
2. 直流電機的應用範圍	38
3. 換向器式直流電機的工作原理	38
4. 直流電機構造的主要部件	42
5. 電機的外型	47
6. 額定值(蘇聯國家標準183—41)	48

第二章 直流電機環型電樞的繞組	49
-----------------	----

1. 概述	49
2. 電樞繞組的分類	49
3. 環型電樞簡單繞組的基本特性	50
4. 環型電樞的單疊繞組	52
5. 環型電樞的單波繞組	59
6. 環型電樞的電勢	62

第三章 鼓型電樞的繞組	64
-------------	----

1. 鼓型繞組的構成原理	64
2. 鼓型電樞簡單繞組的基本特性	65
3. 繞組節距	67
4. 單疊繞組	69
5. 複疊繞組	72
6. 鼓型電樞的單波繞組	76
7. 單波繞組的特殊形式	77
8. 複波繞組	78

9. 繞組的實際繞法	80
10. 鼓型繞組的對稱條件	81
11. 均壓連接(均壓線)	82
12. 混合式特殊繞組	88
13. 各種繞組的比較	90
14. 鼓型電樞繞組的電勢	90

第四章 直流電機空載時的磁路 92

1. 概述	92
2. 直流電樞的磁路	94
3. 空氣隙磁勢	95
4. 齒的磁勢	98
5. 電樞鐵心的磁勢	101
6. 磁軛和磁極的磁勢	102
7. 電樞的磁化曲線	102
8. 漏磁通	103
9. 例題	106

第五章 電樞反應 109

1. 負載時電樞的磁勢	109
2. 交軸和順軸的電樞磁勢	112
3. 電樞反應	114
4. 電動機的電樞反應	118
5. 負載時主磁極的磁勢	118

第六章 換向 119

1. 概述	119
2. 換向過程的本質	120
3. 換向器表面的速度為無窮小時($v_K \approx 0$)的換向	121
4. 電阻換向。條件: $v_K \approx 0$, $r_0 = 0$ 及 $r_{n1} = r_{n2} = r_n = 0$ (即直線換向)	121
5. 電阻換向的普遍情況。條件: $v_K \approx 0$, $r_0 \neq 0$, $r_{n1} = r_{n2} = r_n \neq 0$	123
6. 換向器表面有一定速度時的換向: $v_K \neq 0$; $b_{u0} = b_K$	124
7. 延遲曲線換向。條件: $b_{u0} = b_K$	125
8. 超越曲線換向。條件: $b_{u0} = b_K$	126
9. 火花	126
10. 自感電勢 e_s 的決定, 令 $b_{u0} = b_K$	129

11. 外界磁場感應電勢 e_K , 令 $b_{u1} = b_K$	131
12. $b_{u1} > b_K$ 時的換向	132
13. 換向和換向器上電位分佈的關係	134

第七章 改善換向的方法 135

1. 概述	135
2. 電刷	135
3. 增加換向電路的電阻的各種方法	139
4. 用減少電動勢 $e_r + e_K$ 之和來改善換向	141
5. 電刷自中性線的位移	141
6. 附加磁極	142
7. 例題	144
8. 電位差火花和補償繞組	145
9. 短距繞組和端接不等的繞組的應用	148
10. 裝於槽裏的阻尼器	148
11. B. T. 卡普雅諾夫的實驗換向調整法	149

第八章 電機能量的損失和效率 152

1. 概述	152
2. 損失的分類	152
3. 機械損失	153
4. 鐵損	155
5. 銅損	159
6. 雜損	163
7. 直流電機的總損失	163
8. 直流電機的效率	163

第九章 電機的發熱和冷卻 165

1. 概述 絕緣材料的分類	165
2. 固體發熱的理論	167
3. 發熱條件	171
4. 吹冷表面的散熱	173
5. 電機的發熱	174
6. 溫昇的計算	174
7. 電機的基本工作情況	175
8. 間歇運用的發熱	177

9. 允許的溫昇限度和溫度	177
10. 按冷卻方法電機的分類	179
第十章 直流發電機	183
1. 概述	183
2. 直流發電機按激磁方法的分類	183
3. 發電機的電能圖	185
4. 發電機的電勢方程式	185
5. 發電機的電磁轉矩	186
6. 發電機的轉矩方程式	188
7. 發電機的特性	189
8. 他激發電機 空載和短路特性	190
9. 短路三角形的構成	192
10. 他激發電機的工作特性	192
11. 並激發電機 自激的條件	196
12. 並激發電機的特性曲線	197
13. 串激發電機	200
14. 複激發電機	201
第十一章 直流發電機的聯合運用	203
1. 概述	203
2. 並激發電機的並聯運用	203
3. 複激發電機的並聯運用	206
第十二章 直流電動機	208
1. 電動機的可逆原理	208
2. 直流電動機的分類	209
3. 在 $n = \text{常數}$ 時, 直流電動機的能量圖	209
4. 在 $n = \text{常數}$ 時, 電動機的電勢及轉矩平衡方程式	210
5. 在 $n \neq \text{常數}$ 時, 電動機的電勢及轉矩平衡方程式	212
6. 電動機的特性	213
7. 直流電動機的起動方法	214
8. 直接將電動機接入線路	214
9. 變阻器法起動 起動變阻器	215
10. 並激電動機的起動	218
11. 串激和複激電動機的起動特性	219

12. 改變引入電動機電壓的無極阻器起動	220
13. 直流電動機的工作特性	220
14. 並激電動機的工作特性	220
15. 串激電動機的工作特性	224
16. 複激電動機的工作特性	226
17. 直流電動機的調節特性 調節方法	228
18. 藉接在電樞線路中的變阻器來調節速度	229
19. 改變激磁來調節速度	232
20. 直流電動機的掣動	236
21. 改變線路電壓 U_0 來調節速度: 按發電機——電動機(T—M)和按帶有飛輪的發電機——電動機(T—M—M)的電力傳動系統	239
第十三章 直流電機的製造現況及特殊直流電機	242
1. 各種直流電機特性簡述	242
2. 特殊直流電機	246

緒 論

蘇聯電機製造的發展

電機製造是電工技術上最重要的部門之一，它的發展已有百多年了。電機製造發展的各階段取決於當時主導工業的發展，同時，反過來又影響主導工業的發展。在另一方面，為解決電機製造的實際問題，需要進行與它有關的理論研究，首先，當推電學和磁學的研究，因此電工學和電機製造的發展是一個各種因素緊密聯繫、互相作用的複雜過程。在整個發展過程中，俄國科學、技術和創造的思想曾給以全面而深刻的影響，這表現在許多有世界意義的重要的發現上。在回顧之際，我們基本上可分作二個時期來看：即偉大的十月社會主義革命前和革命勝利後。

革命前俄羅斯的重要工業部門如煤、冶金、石油及其他工業都為掠奪性的外資所操縱，電器工業尤其是電機製造工業亦不能例外。在偉大的十月革命以前，這些規模不大的電機製造廠，如在彼德堡的西門子-釐克爾達（Сименс-Шуккерт）和杜夫洛-康司坦紀諾維支（Дюфлон-Константинович），在列菲爾城（Ревел）的“伏打”廠（Вольта），在里加城（Рига）的通用電氣公司（Всесообщая компания электричества）等——僅是裝配性質的，而不是能獨立完成工作的企業。這些工廠及與此類似的工廠的一切工作，都取決於國外投資者的指示。這些投資者，自然對俄國電機製造的發展是不感興趣的，因為俄國電機製造的發展會成為他們的勁敵。處在這些情況下，在革命前的俄羅斯，關於電工方面

的創造思想，就沒有發展的良好條件，而俄國電氣工程師們，儘管他們有着特出的技術創造性，儘管他們作出許多遠超過自己時代的發現，儘管這些發現並決定了以後數十年間世界電工發展的過程，而這些電氣工程師們的事業不能得到應有規模的發展。

在偉大的十月社會主義革命後，情況有了急劇的轉變。在很短的時間內建立了強大的電機製造工廠，勝利地完成了在國民經濟發展中最複雜而重要的任務，製造出各種技術上高度完善的用於發電、輸電、配電、用電的電機：汽輪發電機、水輪發電機、大型直流電機、中型及小型直流和交流電機、特殊用途的電機及其他各型變壓器等。在電機製造的設計、結構及製造技術上都達到了高度完美的水平。同時，各工廠、高等學校及各研究機關的實驗室廣泛地展開了科學研究工作，培養了大批電機製造技術幹部，他們的工作使蘇聯電機製造有可能超過外國的最高技術水平。

以後將敘述蘇聯電機製造的發展過程，尤其着重第二個時期，因為使學生明瞭蘇聯電機製造的成就，是本書首要任務之一。

1. 俄國電工學的發展

1833年彼得堡科學院院士及彼得堡大學Д. К. 楞次教授深刻地總結了法拉第的電磁感應定律，並闡明了可逆原理，證明以前一直認為獨立存在的電磁迴轉及電磁感應實際上有極密切聯繫；稍後，楞次教授又證明在導線中的感應電勢與導線的直徑及金屬無關。

和楞次後期工作密切地聯系着同時進行着另一個俄國電工學革新者В. Г. 亞哥比的工作。1834年亞哥比就已完成了第一部基於迴轉運動原理的可供實用的直流電動機，在亞哥比以前的電動機在實質上只是體現往復前進運動原理的物理儀器。亞哥比的電動機引起了很大的注意，1837年，在彼得堡科學院組織了一個名為“按亞哥比教授的方法

利用電磁力使機械運動”的委員會。委員會肯定的結論使亞哥比有可能顯著地改进了他的電動機，特別值得注意的是亞哥比當時設計的換向器，直到今天仍保留了它的基本特性，並為各型換向電機不可缺少的一部份。為了實際試驗亞哥比的電動機，決定利用它來運轉船舶，這也就是世界上第一艘電動輪船，這艘輪船於1838年秋季駛行在涅瓦河上。

雖然電動輪船在當時運輸上沒有獲得繼續的運用，但亞哥比這次工作的意義，在於他把許多電機上的問題提上了深入研究的日程，並給有關科學，尤其是理論電工學以重大的影響。繼後不久即樹立了對電動機反電勢正確的觀點——在楞次及亞哥比以前都認反電勢是有害的，初步進行了直流電機的電樞反應的研究，決定與磁力起重有關的條件，研究電流的測量等問題。

和這緊密連系着的是楞次，獨立地、與焦耳無關地，於1844年發現了電學上重要定理之一，即衆所週知的命名為焦耳楞次定理。這時，亞哥比從事電機運用特性，尤其是電機效率問題的研究，說明電動機的工作和供電有密切聯系。亞哥比電動輪船的主要缺點之一，即裝在船上的原電池工作不可靠且價值昂貴，於是接踵地提出建立較為經濟的電源，即發電機的問題。

在改善電動機的同時，亞哥比又從事一系列其他電工問題的研究，最有意義的是在1836年發明的電鍍和有關水雷的研究工作，關於這些問題，在此僅能作簡略的敘述。

電鍍在俄羅斯及國外都引起活生生的興趣和注意，電鍍的裝置在工業用電上是第一個裝置，也是電化學、電冶金的開端。

在從事水雷工作時，亞哥比曾利用感應線圈，即變壓器的雛型經水下電纜傳送衝擊電流至距九公里遠的水雷按裝處，這個孕育着電能變壓遠距傳輸和分配理想的設備，遠遠超過了它自己的時代，直到1870

年末在亞布洛契可夫電燈裝設中才重新被採用和發展，而在 1891 年多里沃-多布羅勿斯基的電力傳輸裝置中獲得更大的發展。

其次、亞哥比的時代及其後不長的一段時間到上世紀七十年代中，可說是直流電在電學中佔統治地位的時代，那時在需要較大電能的場所，直流電機已能順利地應用來代替價值昂貴而效率低的原電池。試圖利用交流電當時遭到急烈的反對和異議，這是由於對交流電路各種問題缺乏研究的緣故，例如愛迪生認為沿街道敷設交流電纜無異於敷設爆炸性的地雷。

更值得稱道的是亞布洛契可夫勇敢的倡議，他於 1878 年完成了供給他所發明的燈泡(亞布洛契可夫之燭)的交流電源設備。自然，在這工作中，亞布洛契可夫是要克服許多困難，首先就是沒有能用的交流發電機，他解決了這個問題，完成了一個為今日同步發電機的雛型的結構：激磁繞組置於轉子上，直流電自直流電機經集流環流於轉子繞組，而定子即為電樞，在電樞繞組中產生感應電勢。這部發電機的定子具有數個獨立的繞組，每一繞組可供電於數個串聯的電燈。亞布洛契可夫的照明系統被稱為“分光制”，亞布洛契可夫的發電機獲得廣泛的推廣，實質上這就是一具多相發電機，因每一繞組獨立工作時，各繞組中的電勢的角差決定於各繞組在定子上位置的相角差。但亞布洛契可夫發電機的各相尚未互相連接起來，這個工作到多里沃-多布羅勿斯基研究三相系統時才完成。

為了改善自己照明系統的工作，亞布洛契可夫作出用一個電源供電的線路圖，他建議在主線路中串聯一種設備，他稱此為感應線圈，於是每一感應線圈即成為一個獨立的電源。亞布洛契可夫的感應線圈由二個電磁相連的線圈和一個開口的磁路組成，實質上即是一個變壓器。亞布洛契可夫在 1876-1877 年獲得發明專利特許證，關於這一點可從

楓欽 (Фонтен) 所寫的巴黎世界照明展覽會的報告獲得證明，同時法國“電照社”(Электрическое освещение) 的公報對承認亞布洛契可夫為電工發展中重要設備變壓器的發明者，亦毫無異議，並承認亞布洛契可夫是第一個應用變壓器為工業服務的人。

在亞布洛契可夫之後不久——1882 年，在莫斯科工業展覽會陳列有另一位俄國發明家烏薩梗的變壓器，構造稍異，但與亞布洛契可夫變壓器的原理相同，其目的也是自一電源供應數個電燈之用。

雖然亞布洛契可夫的裝置已證明了交流電實際應用的可能性，而直流電在本世紀初仍未被淘汰；其原因一方面是由於直流電路本身的發展，一方面是由於供電區域及供電量有限。決定性的發展是和多里沃-多布羅勿斯基的名字分不開的，是和他實際運用三相制於輸配電能的工作分不開的。

由於我們俄羅斯人民的努力，關於輸送電能的問題在 1880 年前已有相當了解，賓羅斯基根據自己在當時規模甚大的實驗，在他的論文“藉電流將水力輸送至任何距離”中，已表明了水力的利用有偉大的前途和任何長距離輸電的可能性的英明遠見。此後在 1880 年拉契洛夫在電氣雜誌上發表的論文“機電工作”中，奠下了長距離輸送大量電能的理論基礎；遲後一年，1881 年，丹勃列參加巴黎一屆世界電氣工作者大會時，作了一篇關於“電能輸送”的報告，得到與拉契洛夫相同的結論。

電能輸送的初步經驗證明：輸送的電能愈大、線路愈長，則電壓應愈提高，始能得到設備的經濟運用。在這一點上交流電的可能性最大，因為用變壓器可任意變化電壓，在 80 年代後，對電能需求的顯著的增加和用電區域的擴大為交流電揭開了一個寬廣的遠景。但全面利用交流電仍存有技術上的缺點，因為當時沒有適用的交流電動機，當時的單相同步和換向器電動機尚未達到能用於工業的境界。1885 年費拉里斯發

現了二相電流構成的迴轉磁場，用這個原理並做出了幾個二相異步電動機的模型，主要的是用來作為示範儀器而已。1886年美國節斯那也獨自創造出一種構造較完善的二相異步電動機，於是二相制較有進展。但由於多里沃-多布羅勿斯基倡儀在傳送及利用電能上採用其所研究的三相制，所以二相制沒有得到進一步的發展。多里沃-多布羅勿斯基證明三相制比二相制節省導線，亦即較為經濟，他看到三相制超過二相制的決定性的優點在於他所研究的三相電動機的優良特性，在這方面，他進行了巨大的創造性的工作，證明三相電流如二相一樣可以構成迴轉磁場，他並研究出三相異步電動機的主要型式：實心轉子及疊片轉子單鼠籠式、雙鼠籠式、捲線式，這些構造直到今天仍保留其主要特性。

多里沃-多布羅勿斯基同時進行了三相變壓器構造的研究，1890年初步設計出環形鐵心，然後改進為今日一般使用的三根鐵心放在一平面上的三相變壓器，他又進行了許多理論的研究和各型電機的結構設計工作，可以這樣說，他已經研究了三相制中所有的基本問題。

多里沃-多布羅勿斯基研究的三相制引起了熱烈的興趣和全面的重視。儘管某些異議和攻擊，三相制由於它在技術上突出的優點，不久即在各線制中佔了主導地位。這使多里沃-多布羅勿斯基在1899年參加彼得堡舉行的一屆全俄電工代表會議上的報告中，有理由說：“今日三相制的優點從各方面都得到評價，二相制的設備已很少應用了，即有應用亦僅僅說明某些人們的偏執性尚未消除罷了”。

三相制不斷地迅速地達到了全面的發展，直到今天仍保持其首要地位。最近牽涉到超遠距離400-500仟伏電壓輸電時，引起了直流輸電問題的重新抬頭，但多里沃-多布羅勿斯基已遠見到三相制的利用範圍，曾說：“輸電線路電壓在500仟伏以上，利用直流較為合理”。

和三相制有同樣重要意義的是多里沃-多布羅勿斯基發明的三相

異步電動機，尤其是鼠籠式，其構造簡單、經濟、可靠。因此在上世紀90年代中在歐美工業中獲得廣泛應用。各種技術領域中電力設備的加速發展，接着首先就要求電能系統各必需部件的發展，包括發電機、變壓器及儀表的製造，保護裝置、配電網各方面工作的發展。因此，我們有理由可以這樣說，1891年，即初次運用三相制起，為電工發展新階段的開始，這個發展一直繼續到今天。故多里沃-多布羅勿斯基，即使不涉及此間未提起的他所從事過的其他工作，亦當名列世界電工創始人的前列。

在俄羅斯有許多多里沃-多布羅勿斯基事業的承繼者，使俄羅斯電工得以深入發展，如 P. Θ. 克拉索 (莫斯科電廠之一即以此命名)，Г. М. 克爾希夏洛夫斯基，Л. Б. 克那辛、М. А. 夏節列。

上面僅敘述到和電機製造有密切聯繫的人物和其工作，其他因超出本書的範圍故從略；在敘述蘇聯電機製造發展第二時期時將更有所限制，因為此時期的發展更為全面，包括的問題更為廣泛，數量繁多且具有更大的規模性。

2. 偉大的十月社會主義革命後的電機製造

偉大的十月社會主義革命後，蘇聯電機製造的發展完全服務於國家電氣化的偉大任務，黨和政府在国内戰爭結束後基於列寧斯大林偉大的全俄電氣化計劃 (ГОЭЛРО)，將這個任務提上了日程。

在很短的一段時間內，在企業中建立了第一流的電機製造工廠，如在列寧格勒的“電力”(Электросила)和“電氣工作者”(Электрик)二廠，在莫斯科的變壓器廠和“幾那姆”(Динамо)工廠，在哈爾科夫省的電動機和汽輪發電機工廠，在烏拉爾以加里寧命名的電機工廠等。這些工廠最初的生產是混合性的，例如在“電力”工廠，起初同時生產大型電機、變壓器、小型電動機、汞弧整流器等，後來變壓器的製造轉交給莫斯科變壓器工廠 (МТЗ)，今日“電力”工廠專門製造重型成套的電機，而“幾