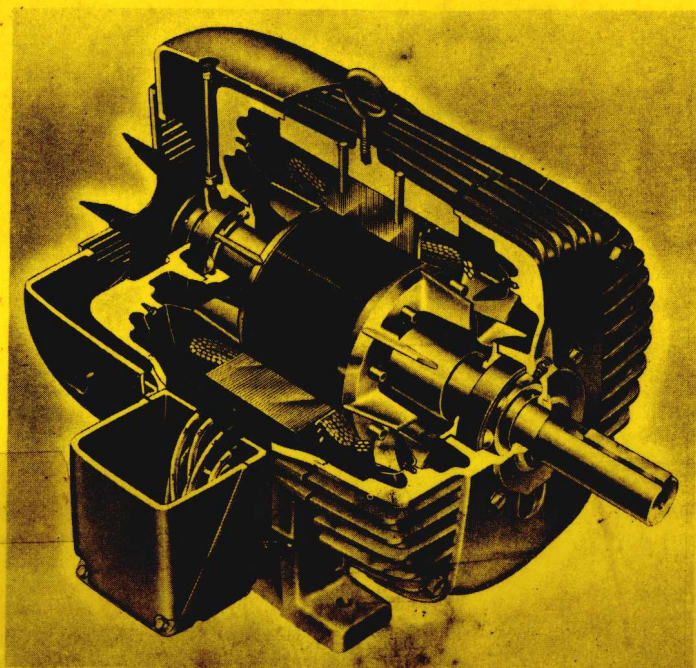


電機機械原理與應用

Electrical Machines

J.D.EDWARDS

李華琛 編譯



復文書局

電機機械

原理與應用

Electrical Machines

江苏工业学院图书馆

Introduction to Principles
and Characteristics

藏

書

J. D. EDWARDS

李華琛 編譯

復文書局

電機機械原理與應用

版權所有

翻印必究

中華民國六十五年十月初版發行

平裝特價

64

著 者 者：

J.D.EDWARDS

編 譯 者：

李

華

琛

發 行 者：

吳

主

和

發 行 所：

復 文 書 局

地址：臺南市東門路421巷28號

電 號：2 0 0 0 3 號

郵 政 劃 撥 帳 戶 32104號

No.28. LANE421 DONG-MEN
ROAD TAINA TAIWAN REPUB-
LIC OF CHINA
TEL: 2 0 0 0 3

行政院新聞局登記證局版台業字第 0 3 7 0 號

譯 者 序

雖然本書的份量並不多，但對於電機械的基本原理與應用皆有相當詳盡的研討。譯者認為其最成功之處在於物理觀念的加強並且內容精簡而有條理；又由於編排的極有系統——由基本的電磁理論和效應開始，依次再介紹直流電機與交流電機，最後再以一般化的電機理論來總結。因此使人讀起來有水到渠成的感覺而不覺其艱澀難懂，進而能洞窺電機的領域。

本書的另一特色在於各類型電機特性的探討，皆自磁場和電流間的相互作用來著手，使人有耳目一新之感，也加強了電機的整體觀念。再者，本書並未涉及高深的數學，僅運用基本的電路理論，電磁效應及工程數學（包括向量、矩陣、微積分與微分方程的求解）。因此不論對於專業或非專業人員來說，此實為極佳的入門書籍。

還有此書並不考慮諧波效應，而以能建立純正弦場的正弦式分佈繞組為著眼點（就交流電機而言）。以原著者的本意而言，諧波的問題實際上是屬於設計上的細節，因此不需在本書中詳加討論。事實上亦是如此，就電機本身的理論言之，實質上並不包括諧波效應；何況諧波問題的研討對於入門的電機書籍並不適合。

最後，譯者確信本身已盡最大的努力，惟雖校對再三，但錯誤及語意不暢仍在所難免，尚請隨時指正為禱。

譯者 謹識於民國65年7月

註記，單位與符號

本書引用SI單位系統，並且依照英國標準局所推薦的單位名稱及符號；但有一例外：爲了能夠區別電流和磁動勢，我們使用安培匝數來作爲磁勢的單位，而不使用安培爲單位。

符號，縮寫字體和下標的表示法我們是引用電機工程師協會〔2〕和英國標準局〔3〕所推薦的準則。物理量的符號是以斜體字來表示，單位符號則以正楷字體來標示。在電的度量裏，我們使用傳統的方式，以小寫符號代表時變量而以大寫符號表穩定量。

本書中一共使用三種向量：空間相量，時間相量和三度空間向量。因爲時間相量和三度空間向量不致於相混淆，所以在實用上皆以粗體活字來表示，例如 $\mathbf{I}$ ， $\mathbf{B}$ 。但是無論如何必須區別向量和空間相量；我們是在符號上端加一箭頭來表示空間相量，例如 $\vec{\mathbf{B}}$ 。再者矩陣亦以粗體活字來表示。

各個註記系統中，長度、面積和體積微增量的表示法並不一致。經過周詳的考慮，我們選用Stratton〔4〕所引用的方式，其中 ds ， da 和 dv 分別代表長度、面積和體積的微增量。這是一個有一致性且相當方便的註記表示；其允許使用下標 s 表向量的切向分量；且可使用大寫字母來標示有限量；而不會和面積和Poynting向量 $\mathbf{S}$ 或向量位能 $\mathbf{A}$ 相混淆。

以下所列舉的符號與單位僅限於本書中所用到者。進一步的資料可參考以上所指出的參考書籍及Massey〔5〕。

本書引用的單位及其符號一覽表

譯者註：在本書中，同一符號可能代表不同的物理量

符 號	代 表 的 量	單 位	單位的符號
A	面積	平方米	m^2
a	半徑	米	m
B, B	磁通密度	tesla	T
$\vec{B}$	磁通相量	tesla	T
C	電容	法拉	F
da	面積微增量	平方米	m^2
ds	路徑微增量	米	m
dV	體積微增量	立方米	m^3
E, E	電場強度	伏特/米	V/m
E, E	激磁電壓相量；均方根值	伏特	V
E, E	感應電壓相量；均方根值	伏特	V
E, e	電動勢	伏特	V
F, F	機械力	牛頓	N
F	磁動勢	安培匝數	At
F_x	力的 x 方向分量	牛頓	N
f	單位體積所受的力	牛頓/立方米	N/m^3
f	頻率	赫	Hz
g	氣隙長度	米	m
H, H	磁化力	安培匝數/米	At/m
I, I	電流相量；均方根值	安培	A
I_0	無載電流	安培	A
I_{oi}	無載電流的損耗成分	安培	A
I_{om}	無載電流的磁化成分	安培	A
I, i	電流	安培	A
J, J	電流密度	安培/平方米	A/m^2

符 號	代 表 的 量	單 位	單位的符號
j	$\pi/2$ 運算子, $\sqrt{(-1)}$	—	—
J	轉動慣量	仟克·平方米	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
K	轉矩常數	—	—
K	直流電機常數	(伏特·秒/安培·弜 牛頓·米/(安培) ²)	$\text{V} \cdot \text{s} / \text{A} \cdot \text{rad}$ $\text{N} \cdot \text{m} / \text{A}^2$
K_a	電樞常數	(伏特·秒/韋柏·弜 牛頓·米/韋柏·安培)	$\text{V} \cdot \text{s} / \text{Wb} \cdot \text{rad}$ $\text{N} \cdot \text{m} / \text{Wb} \cdot \text{A}$
K_f	場路常數	韋柏/安培	Wb / A
K	導體密度	(弜度量) ⁻¹	(rad) ⁻¹
L	自感	亨利	H
L_m	磁化電感	亨利	H
l	洩漏電感	亨利	H
l	長度	米	m
M	互感	亨利	H
m	相數	—	—
N, n	匝數	—	—
n	匝數法	—	—
n	Steinmetz 指數	—	—
P	功率	瓦特	W
P_e	電功率	瓦特	W
P_m	機械功率	瓦特	W
P	d/dt 運算子	秒 ⁻¹	s ⁻¹
P	極對數	—	—
P_s	單位體積的渦流功率損耗	瓦特/立方米	W / m^3

符 號	代 表 的 量	單 位	單位的符號
P_h	單位體積的磁滯功率損耗	瓦特/立方米	W/m^3
q	電荷	庫倫	C
R	電阻	歐姆	Ω
R_e	等效電阻	歐姆	Ω
R_i	鐵損電阻	歐姆	Ω
r	半徑	米	m
S	磁阻	安培匝數/韋伯	At/Wb
s	轉善率	—	—
T	轉矩	牛頓·米	Nm
T_m	機械輸出轉矩	牛頓·米	Nm
T_θ	和角度 θ 有關的轉矩	牛頓·米	Nm
t	應力	牛頓/平方米	N/m^2
t	時間	秒	s
U	磁位降	安培匝數	At
u, u	線性速度	米/秒	m/s
V, V	電壓相量；均方根值	伏特	V
V, v	端電壓，電位差	伏特	V
W	能量，功	焦耳	J
W_e	電能	焦耳	J
W_m	磁能	焦耳	J
W_h	每單位體積的磁滯損耗	焦耳/立方米	J/m^3
X	電抗	歐姆	Ω
X_e	等效電抗	歐姆	Ω
X_m	磁化電抗	歐姆	Ω
X_s	同步電抗	歐姆	Ω
x	洩漏電抗	歐姆	Ω
Z, Z	阻抗	歐姆	Ω

符 號	代 表 的 量	單 位	單位的符號
α, β, γ	一般角度	徑	rad
δ	負載角, 磁場軸的夾角	徑	rad
δ	穿透深度	米	m
ϵ	電壓調整	—	—
η	效率	—	—
θ	角位移, 轉子角	徑	rad
∇	磁導	韋柏/安培匝數	Wb / At
λ_n	Steinmetz 指標	—	—
μ	絕對導磁率 = $\mu_r \mu_0$	亨利/米	H / m
μ_0	導磁常數	亨利/米	H / m
μ_r	相對導磁率	—	—
ρ	單位體積包含的電荷	庫倫/立方米	C / m ³
ρ	電阻係數 = $1 / \sigma$	歐姆·米	Ω m
σ	電導係數 = $1 / \rho$	歐姆/米	S / m
τ	時間常數	秒	s
τ_{em}	機電時間常數	秒	s
Φ	磁通, 每極的通量	韋柏	Wb
Φ_l	漏通量	韋柏	Wb
ϕ	相角	徑	rad
χ	轉子的角位移	徑	rad
ϕ	角位移	徑	rad
Ω, ω	角速率	徑/秒	rad / s
ω	角頻率 = $2\pi f$	徑/秒	rad / s
ω_r	轉子角速率	徑/秒	rad / s
ω_s	同步角速率	徑/秒	rad / s

通用的代號

代表文字	代 表 量
a	電樞
a_v	平均值
f	場
$m, \max$	最大值
n	垂直分量
r	徑向分量
s	切向分量
$1, 2$	主, 次; 定子, 轉子
α, β	表二相系統的量
a, b, c	表三相系統的量
d, q	表二軸電樞
f, g	表二軸場的量
10^6	mega M
10^3	kilo k
10^{-2}	centi c
10^{-3}	mili m
10^{-6}	micro μ
a. c	交變電流
d. c	直 流
e. m. f	電動勢
m. m. f	磁動勢
rev / min	每分鐘的轉數
rev / s	每秒的轉數
r. m. s	均方根

參考書籍

- [1] BRITISH STANDARDS INSTITUTION : BS 3763
(1964). *The international system (SI) units.*
- [2] INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS
(1958). *Symbols and abbreviations for use in
electrical and electronic engineering course.* London.
- [3] BRITISH STANDARDS INSTITUTION : BS 1991
(1967). *Letter symbols, signs and abbreviations.*
- [4] STRATTON, J, A. (1941). *Electromagnetic theory.*
McGraw-Hill , New York.
- [5] MASSEY, B. S. (1971). *Units, dimensional analysis
and physical similarity.* Van Nostrand Reinhold,
London.

電機機械原理與應用



註記，單位與符號

第一章 基本原理 1

1-1	緒論	1
1-2	磁場中移動的導體	2
1-3	電磁感應	10
1-4	電磁力效應	16
1-5	磁性物質	26
1-6	磁路	32

第二章 直流電機 46

2-1	基本原理	48
2-2	能量轉換及損耗	59
2-3	直流發電機	62
2-4	直流電動機	65
2-5	直流電機的動態特性	74

第三章 交流系統 **82**

3-1 正弦交變電壓的產生	83
3-2 多相系統	84
3-3 變壓器	89

第四章 交流電機導論 **106**

4-1 分佈繞組和氣隙磁場	107
4-2 正弦分佈場的產生	111
4-3 正弦分佈繞的轉矩	115
4-4 旋轉磁場	117
4-5 旋轉磁場的感應電壓	122
4-6 多極場	127
4-7 交流電機的實際繞組	128

第五章 同步電機 **134**

5-1 同步電機的相量圖及等效電路	135
5-2 同步電機的特性	138
5-3 凸極式同步電機	145

第六章 感應電機 **149**

6-1 電磁效應	150
6-2 等效電路	152
6-3 感應電機的特性	157
6-4 感應電動機的速度控制	165
6-5 單相感應電動機	169

第七章 一般化的電機理論

175

7-1 旋轉電機的同—性	175
7-2 直流電機方程式	180
7-3 交流電機方程式	182
7-4 一般方程式	186
7-5 操作計量	189
7-6 連接矩陣	193
7-7 結 論	197
參考書籍	201
部份習題答案	203
附錄A 氣隙磁場分量和馬克士威應力	205
附錄B 三相至二相的轉換	209
索 引	213

第一章 基本原理

1—1 緒 論

西元1820年奧斯特(Oersted)首次發現電流的磁效應後，次年第一架電動機就被製造出來；法拉第(faraday)在1831年發現的電磁感應現象更使當時的電磁理論趨於完備，由於這些日益齊全電磁理論的應用，促成了電機行業的迅速發展。到1890年，許多旋轉電機已被製造出來，且有許多更為進步更為精巧的改良品在後30年內陸續被製造出。這可說是電機發展的黃金時代，但是發展的領域並不是就此停滯不進，由於有許多根本的現象陸續被探討出來，且隨著他種工業技術的高速進展（例如固態電子學，冷凍學等），在互相運用下，而使電機的發展日新月異。

雖然電機械有甚多的種類，但大部份皆從下面三個主要型式演變而出：簡單直流電機、交流同步電機、交流感應電機。雖然它們都有著表面上的差異，其實它們所依據的原理都是從奧斯特和法拉第所發現的電磁效應推展出來的。這二個效應及相互間的關連，在下述的現象最易被觀察出來——使電流載體在均勻強度的磁場中移動。在本章第二節裏，將詳細討論此情形；在大部份的電機中，導體並不能自由移動，而是被嵌入電機的鐵心槽中，故電磁力不僅作用於導體，尚對

2 電機機械原理與應用

鐵心有所影響，故我們必須更一般化的討論電磁力及感應電壓的產生，第3，4節裏，對此現象將有進一步的研討。磁性物質亦為電機結構中的重要部份，因此在第5節討論磁性物質的特性。此外，磁路的重要性質亦將在第6節中論及。

1—2 磁場中移動的導體

在磁場中移動的導體將感應出電壓；電流載體在磁場中將受一電磁力。上面二個現象可從基本的電磁理論推演而出。這些電磁原理對於導體可在磁場中移動的電機裝置，提供了基本依據。在前面已經指出：雖然大部份的電機械有種種不同的型式，但如果對以下二節所推導的觀念有深切的領悟，則不難對電機械有入門的了解。在這些章節中所推導的公式都能適用於許多實際的電機裝置。我們將在第二章對這些重要的結果加以驗證。

移動中導體的感應電壓

考慮這麼一個情況——導體在強度為 B 的磁場中以線性速度 u 移動（如圖1—1），若使此導體下面的引線和一伏特計連接，則在伏特計的刻度表上有一讀數被讀出，這表示在這電路上有感應電壓產生。描述運動電荷受力的羅倫茲方程式（Lorentz equation）可用以解釋此現象。

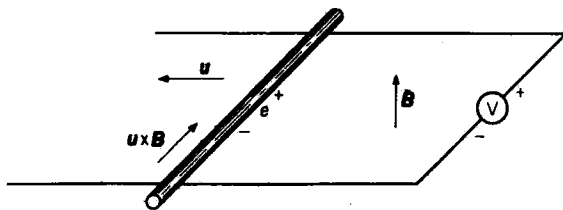


圖 1—1

羅倫茲方程式：

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \text{ 牛頓} \quad (1-1)$$

其中： q 表電荷的帶電量，以庫倫為單位。

$\mathbf{E}$ 表電場強度，以伏特/米為單位。

$\mathbf{u}$ 表線性速度，以米/秒為單位。

$\mathbf{B}$ 表磁場強度，以 teslas 為單位。

若導體起先靜止，則將無電場 $\mathbf{E}$ 且伏特計沒有讀數出現。當導體以線性速度 $\mathbf{u}$ 移動，則導體內電荷將受一力，其為 $q \mathbf{u} \times \mathbf{B}$ 。此時自由電荷（導體中的傳導電子）將在此力的作用下開始運動，故在導體的一端將有負電荷的堆積（accumulation），而在另一端留下相同電量的正電荷，此刻將建立一靜電場 $\mathbf{E}$ 。電荷堆積的現象將繼續進行直至靜電力 $q\mathbf{E}$ 和電磁力 $q\mathbf{u} \times \mathbf{B}$ 相抗衡。當此二力平衡時，淨力為零，電荷將不再移動，此時我們可得到：

$$\mathbf{E} = -\mathbf{u} \times \mathbf{B} \quad (1-2)$$

其中 $\mathbf{u} \times \mathbf{B}$ 可認為移動中導體的感應電場，恰和電荷堆積所形成的靜電場 $\mathbf{E}$ 大小相等但方向相反。由於有電場 $\mathbf{E}$ 存在，故在導體的二端有一電位差存在，此電位差可用電場 $\mathbf{E}$ 沿導體二端點 P 、 Q 任一路徑的線積分來表示：

$$V = - \int_P^Q \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (1-3)$$

此數值將被連接於導體二端的伏特計測得。由 1-2 式，若令 $V = e$ 則

$$e = \int_P^Q \mathbf{u} \times \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (1-4)$$

e 可認為在磁場中移動導體的感應電壓。在 1-4 式的線積分中，積分路徑若取導體的軸向路徑，此路徑可用一向量 $\overrightarrow{PQ}$ 來表示，其長度為 l 。如果 $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{B}$ 和 $\overrightarrow{PQ}$ 三者皆互相垂直，則感應電場 $\mathbf{u} \times \mathbf{B}$ 將和 $\overrightarrow{PQ}$ 平行，感應電場的方向可由右手螺釘法則（right-hand screw rule）決定。又若此磁場沿軸向方向為均勻分佈，則 1-4 式可改