

天下文化

知識的世界

The Feynman Lectures on Physics  
The Definitive Edition  
Volume 2

# 電磁與物質 **3**

## ——馬克士威方程

《費曼物理學講義》共有三大卷，

展現了最偉大的物理教師——費曼博士的獨到見解，  
以及縱覽物理學的非凡功力。

第II卷的主題為電磁與物質，共有五冊，

第3冊除了完整介紹馬克士威方程，並涵蓋相關的主題：

交流電路、空腔共振器、波導、相對論觀點下的電動力學。

# The Feynman

# 費曼物理學講義 [II]

By Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands

李精益 譯 高涌泉 審訂

第 11 卷 第 1 期  
2022 年 1 月

第 11 卷 第 1 期

第 11 卷 第 1 期

第 11 卷 第 1 期

第 11 卷 第 1 期

第 11 卷 第 1 期

# 費曼物理學講義 II —— 電磁與物質

## (3) 馬克士威方程

原 著 / 費曼、雷頓、山德士  
譯 者 / 李精益  
審 訂 者 / 高涌泉  
顧 問 群 / 林和、牟中原、李國偉、周成功  
科學館總監 / 林榮崧  
責任編輯 / 徐仕美、林文珠  
美術編輯暨封面設計 / 江儀玲

出 版 者 / 天下遠見出版股份有限公司  
創 辦 人 / 高希均、王力行  
遠見·天下文化·事業群 董事長 / 高希均  
事業群發行人 / CEO / 王力行  
出版事業部總編輯 / 許耀雲  
法律顧問 / 理律法律事務所陳長文律師 著作權顧問 / 魏啓翔律師  
社 址 / 台北市 104 松江路 93 巷 1 號 2 樓  
讀者服務專線 / (02) 2662-0012 傳真 / (02) 2662-0007 ; 2662-0009  
電子信箱 / cwpc@cwgv.com.tw  
直接郵撥帳號 / 1326703-6 號 天下遠見出版股份有限公司

電腦排版 / 極翔企業有限公司  
製 版 廠 / 東豪印刷事業有限公司  
印 刷 廠 / 崇實彩藝印刷股份有限公司  
裝 訂 廠 / 源太裝訂實業有限公司  
登 記 證 / 局版台業字第 2517 號  
總 經 銷 / 大和書報圖書股份有限公司 電話 / (02) 8990-2588  
出版日期 / 2009 年 12 月 28 日 第一版第 1 次印行

定 價 / 360 元

原著書名 / **The Feynman Lectures on Physics, The Definitive Edition Volume 2**  
by **Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands**

Authorized translation from the English language edition, entitled THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS, THE DEFINITIVE EDITION VOLUME 2, 2nd Edition, ISBN: 0805390472 by FEYNMAN, RICHARD P.; LEIGHTON, ROBERT B.; SANDS, MATTHEW, published by Pearson Education, Inc, publishing as Benjamin Cummings.

Copyright © 2006 by California Institute of Technology

Complex Chinese Edition Copyright © 2009 by Commonwealth Publishing Co., Ltd., a member of Commonwealth Publishing Group

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

本書由 Pearson Education, Inc. 授權出版。未經本公司及原權利人書面同意授權，不得以任何形式或方法（含數位形式）複印、重製、存取本書全部或部分內容。

ISBN: 978-986-216-466-2 (英文版 ISBN: 0-8053-9047-2)

書號 : BW1209



天下文化書坊 <http://www.bookzone.com.tw>

# 費曼物理學講義 II

## 電磁與物質

### 3 馬克士威方程

The Feynman Lectures on Physics  
The Definitive Edition  
Volume 2

By Richard P. Feynman,  
Robert B. Leighton, Matthew Sands

李精益 譯  
高涌泉 審訂

*Feynman*

# 費曼物理學講義 II

## 電磁與物質

### 3 馬克士威方程

目錄

## 第18章

### 馬克士威方程組 11

- 18-1 馬克士威方程組 12
- 18-2 新加的一項如何起作用 16
- 18-3 古典物理學的全部 19
- 18-4 行進場 20
- 18-5 光速 28
- 18-6 解馬克士威方程組；位勢與波動方程 30

## 第19章

### 最小作用量原理 35

- 專題演講 36
- 演講後的補充 66

## 第20章

### 馬克士威方程組 在自由空間中的解 69

20-1	自由空間中的波；平面波	70
20-2	三維波	84
20-3	科學想像	87
20-4	球面波	92

## 第21章

### 馬克士威方程組 在有電流與電荷時的解 99

21-1	光與電磁波	100
21-1	由點源產生的球面波	103
21-3	馬克士威方程組的通解	107
21-4	振盪偶極的場	109
21-5	運動電荷的電位勢；黎納—維謝通解	118
21-6	等速運動電荷的電位勢；勞倫茲公式	124

## 第22章

### 交流電路 129

22-1	阻抗	130
22-2	發電機	139
22-3	理想元件網路；克希何夫法則	144
22-4	等效電路	153
22-5	能量	155
22-6	梯狀網路	159
22-7	濾波器	163
22-8	其他電路元件	170

## 第23章

### 空腔共振器 177

23-1	實際電路元件	178
23-2	高頻時的電容器	182
23-3	共振腔	190
23-4	腔模態	198
23-5	空腔與共振電路	203

## 第24章

### 波導 207

24-1	傳輸線	208
24-2	矩形波導	214

24-3	截止頻率	220
24-4	導波的速率	222
24-5	觀測導波	224
24-6	波導銜接	226
24-7	波導模態	231
24-8	另一種看待導波的方法	232

## 第25章

### 按相對論性記法的電動力學 239

25-1	四維向量	240
25-2	純量積	245
25-3	四維梯度	251
25-4	按四維記法的電動力學	256
25-5	運動電荷的四維勢	257
25-6	電動力學方程式的不變性	259

## 第26章

### 場的勞侖茲變換 263

26-1	運動電荷的四維勢	264
26-2	等速點電荷的場	268
26-3	場的相對論性變換	275
26-4	用相對論性記號表示的運動方程式	287



# 費曼物理學講義 II

目錄

## 電磁與物質

### 1 靜電與高斯定律

關於理查·費曼

修訂版序 費曼最寶貴的遺產

紀念版專序 最偉大的教師

費曼序

前言

第 1 章 電磁學

第 2 章 向量場的微分

第 3 章 向量積分學

第 4 章 靜電學

第 5 章 高斯定律的應用

第 6 章 各種情況下的電場

第 7 章 各種情況下的電場（續）

第 8 章 靜電能量

第 9 章 大氣中的靜電

## 2

# 介電質、磁與感應定律

中文版前言

第10章 介電質

第11章 介電質內部

第12章 靜電類比

第13章 靜磁學

第14章 各種情況下的磁場

第15章 向量位勢

第16章 感應電流

第17章 感應定律

### 3 馬克士威方程

- 第18章 馬克士威方程組
- 第19章 最小作用量原理
- 第20章 馬克士威方程組在自由空間中的解
- 第21章 馬克士威方程組在有電流與電荷時的解
- 第22章 交流電路
- 第23章 空腔共振器
- 第24章 波導
- 第25章 按相對論性記法的電動力學
- 第26章 場的勞侖茲變換

### 4 電磁場能量動量、折射與反射

- 第27章 場能量與場動量
- 第28章 電磁質量
- 第29章 電荷在電場與磁場中的運動
- 第30章 晶體內部的幾何結構
- 第31章 張量
- 第32章 緻密材料的折射係數
- 第33章 表面反射

## 磁性、彈性與流體

- 第34章 物質的磁性
- 第35章 順磁性與磁共振
- 第36章 鐵磁性
- 第37章 磁性材料
- 第38章 彈性學
- 第39章 彈性材料
- 第40章 乾水之流動
- 第41章 濕水之流動
- 第42章 彎曲空間
- 中英、英中對照索引





## 第18章

# 馬克士威方程組

- 18-1 馬克士威方程組
- 18-2 新加的一項如何起作用
- 18-3 古典物理學的全部
- 18-4 行進場
- 18-5 光速
- 18-6 解馬克士威方程組：位勢與波動方程

## 18-1 馬克士威方程組

在這一章，我們將回到第 1 章中做爲我們起點的馬克士威方程組，這是由四個式子組成的完整方程組。到目前爲止，我們已經片段的研究過馬克士威方程組；現在是加入最後一部分，並將它們全部拼合起來的時候了。對於可能隨時間任意變化的電磁場，我們將擁有完整且正確的理論。本章中談到的任何事，若與從前所敘述的矛盾，則以本章爲準、從前爲非——因爲從前所敘述的只適用於諸如穩定電流或固定電荷這類特殊情況。雖然先前每寫下一個方程式時，我們都很小心指出其限制，但這一切條件很容易受到忽略，因而將錯誤的方程式學得太好。現在我們準備給出全部真理，而不附帶（或幾乎不附帶）任何限制條件。

整套馬克士威方程組列於表 18-1 中，其中包括用語言和數學符號兩種表達方式。語言等同於方程式，這一事實到現在應已是熟悉的了——你們應該能從一種形式變換至另一種形式。

第一個方程式—— $\mathbf{E}$  的散度等於電荷密度除以  $\epsilon_0$ ——是普遍正確的。無論對於靜態場或動態場，高斯定律永遠都成立。穿過任一閉合面的  $\mathbf{E}$  通量正比於其內部的電荷。第三個方程式是相對應的磁場普遍定律。由於不存在磁荷，所以穿過任一閉合面的  $\mathbf{B}$  通量總是等於零。第二個方程式，即  $\mathbf{E}$  的旋度等於  $-\partial\mathbf{B}/\partial t$ ，就是法拉第定律，我們在前兩章中已討論過。它也是普遍正確的。最後一個方程式有些新東西。我們以前只看到對穩定電流適用的那一部分。在那種情形下，我們說過， $\mathbf{B}$  的旋度等於  $\mathbf{j}/\epsilon_0 c^2$ ，但普遍正確的方程式還有一個新的項，是由馬克士威（James Clerk Maxwell, 1831-1879，英國物理學家）發現的。

表 18-1 古典物理學

馬克士威方程組

$$\text{I. } \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{穿過一閉合面的 } \mathbf{E} \text{ 通量}) = (\text{內部電荷}) / \epsilon_0$$

$$\text{II. } \nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{環繞一迴路的 } \mathbf{E} \text{ 的線積分}) = - \frac{d}{dt} (\text{穿過迴路的 } \mathbf{B} \text{ 通量})$$

$$\text{III. } \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{穿過一閉合面的 } \mathbf{B} \text{ 通量}) = 0$$

$$\text{IV. } c^2 \nabla \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{j}}{\epsilon_0} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad c^2 (\text{環繞一迴路的 } \mathbf{B} \text{ 的積分}) = (\text{穿過迴路的電流}) / \epsilon_0 + \frac{d}{dt} (\text{穿過迴路的 } \mathbf{E} \text{ 通量})$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{電荷守恆} \\ \nabla \cdot \mathbf{j} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{穿過一閉合面的電流通量}) = - \frac{d}{dt} (\text{內部電荷}) \end{array} \right]$$

力的定律

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

運動定律

$$\frac{d}{dt} (\mathbf{p}) = \mathbf{F}, \quad \text{其中 } \mathbf{p} = \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (\text{愛因斯坦修正後的牛頓定律})$$

重力

$$\mathbf{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{e}_r$$

在馬克士威的相關工作之前，電學和磁學的已知定律就是我們從第3章到第17章中所學到的。特別是穩定電流的磁場，其方程式僅知道為

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{j}}{\epsilon_0 c^2} \quad (18.1)$$



馬克士威開始考慮這些已知定律，並將它們表成微分方程，正如我們此處所做的。（雖然當時  $\nabla$  這一符號尚未發明，但今天我們稱為旋度與散度的那些微分組合式，主要是由於馬克士威，才首次顯示其重要性。）他接著注意到(18.1)式有些奇怪之處。假如我們取這個方程式的散度，左邊將是零，因為旋度的散度總是等於零。所以這個方程式要求  $\mathbf{j}$  的散度也等於零。但假若  $\mathbf{j}$  的散度為零，則從任一閉合面流出的總電流通量也將是零。

來自一閉合面的電流通量，等於在此表面內電荷減少的量。一般說來，這肯定不應該是零，因為我們知道電荷可以從一處移至另一處。事實上，方程式

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (18.2)$$

幾乎就是我們對  $\mathbf{j}$  的定義。此方程式表明了電荷守恆這個極為基本的定律——任何電荷流動都必須來自於某一供應源。馬克士威體認到這一難題，並建議可在(18.1)式等號的右邊加進  $\partial \mathbf{E} / \partial t$  這一項來加以避免；於是他得到表 18-1 中所列的第四個方程式：

$$\text{IV.} \quad c^2 \nabla \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{j}}{\epsilon_0} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

在馬克士威的時代，人們還不習慣用抽象的場來思考。馬克士威利用一個將真空看成好像是某種彈性固體的模型來討論他的概念。他也嘗試用此機械模型來解釋其新方程式的意義。當時他的理論並沒有廣獲接受，有不少阻礙存在，首先是由於他的模型，其次則是由於起初尚未有實驗上的確認。今天，我們有更好的瞭解：真正要緊的是方程式本身，而不是用來得到它們的模型。我們只要問方程式是真還是假。這要經由做實驗來回答，而無數實驗都證實了馬克士威方程組。假如將馬克士威用以建立其大廈的鷹架搬開，我