

電磁場理論 課堂演示實驗

Г. А. 列贊諾夫著

高等教育出版社



电磁場理論課堂演示实验

Г. А. 列贊諾夫 著

汪 鎮 藩 譯

高等教育出版社



本書是根据苏联国家技术理論書籍出版社 (Гостехиздат) 出版的列贊諾夫 (Г. А. Рязанов) 著的“电磁場理論課堂演示实验” (Лекционные опыты по теории электро-магнитного поля) 1952 年版譯出的。本書可供高等学校物理教学人員参考。

电 磁 場 理 論 課 堂 演 示 实 驗

Г. А. 列 贊 諾 夫 著

汪 鎮 藩 譯

高 等 教 育 出 版 社 出 版 北 京 玻 璃 廠 170 号

(北京市書刊出版業營業許可証出字第 054 号)

京 華 印 書 局 印 刷 新 華 書 店 總 經 售

統一書号 13010·387 開本 850×1168 $1/32$ 印張 5 $15/16$ 字數 139,000 印數 0001—3,000
1958 年 1 月第 1 版 1958 年 1 月北京第 1 次印刷 定價 (8) 羊 0.70

序

這本書的內容，是敘述電磁場理論底課堂演示實驗，這些理論都屬於綜合性大學和師範學院物理系講授的普通物理學教程的範圍內。其中大部分材料在高等工業學校里也可以採用，超出高等工業學校物理學教程範圍的章節都標以星號。本書材料底編排，是按照實驗事實累積底次序，我們就是根據這些實驗事實確立電磁場的基本定律——麥克斯韋方程式，並接着驗證由麥克斯韋方程式所得出的結果。

我們既然確定了這樣一個任務，即在課堂實驗上建立電磁場理論，當然就應該讓出很大篇幅來討論所演示的現象——對這些現象作物理的解釋，有時還要引入一些簡單的計算。要解決這個任務，需要我們在這本書中編入幾節不包含課堂實驗的材料。這些材料底敘述是按照電磁場基本理論簡明教程的形式，其中所有的原始實驗事實，和從這些實驗事實所得到的的一切主要結論，都有相應的演示實驗加以證明。

雖然我們所採用的建立電磁現象理論的方案與大多數課本中所遇到的方案有本質上的差別，但是，這當然不能妨礙我們在這本書中採用在別的課本中所述的演示實驗，這些課本是按另一種方案編成的。

讀者在本書第一編中會找到我們建立理論底根據，這一編討論一般的問題（第一章），並在那里列出編寫本書的總計劃。

第二編是從研究實物外的磁場的學說開始，到似穩電磁振蕩為止。

第三編討論實物內的磁場的理論。

應該指出：我們所採用的課堂演示實驗，絕不能反映出普通物理學中所研究的一切各種各樣的電磁現象，我們盡量避免在本書中編入大家已知的，或是在其他實驗指南中敘述過的演示實驗。特別是在格拉波夫斯基（М. А. Грабовский）著的“磁學”^①一書中所看到的各種實驗，我們幾乎都不再提到了。不過，有一些大家都知道的演示實驗底解釋，就我們的觀點看來，對於理解往後的實驗是很重要的，這樣的一些演示實驗就是例外。因此需要着重指出：雖然我們所述的大部分演示實驗，都是以應用沖擊電流計為基礎，但是這絕不能說，我們就摒棄了研究磁場的其他方法和其他演示實驗的儀器。

編入第二編的大部分實驗，都是我們在列寧格勒水路運輸工學院講授普通物理時表演過的。在第三編中所述的演示實驗，是在編寫本書的過程中，在工學院實驗室內作出來的。幾乎所有的實驗在任何高等學校里都可以很容易地做造出來，只要那里有一個小工場就可以了。而且在專用器材中只需要30—50千克的不同的截面的漆包綫，和幾千克鉄磁質粉末。

我很感謝彼特羅夫（В. А. Петров），他直接參加了裝置演示實驗的工作，他幫助我實現了我的意圖，我向他表示謝意。

Г. А. 列贊諾夫

① “物理學教學表演”第三冊，蘇聯國立技術理論書籍出版社1949年出版。

目 录

序	vii
---------	-----

第一編

第一章 結論	1
§ 1. 磁場的概念、电磁場	1
§ 2. 在現代理論中关于磁量的概念	1
§ 3. 建立磁場理論的两种方案	2
§ 4. 实物外的磁場、磁矢量	2
§ 5. 实物內的磁場。矢量 B 和 H	3
§ 6. 本書材料編排的次序	8
第二章 仪器和材料	11
§ 7. 演示用的螺綫管	11
§ 8. 測量綫圈	13
§ 9. 万能支架	16
§ 10. 点指示器	18
§ 11. 演示用的鏡式电流計的标度尺	19
§ 12. 冲击測量技术(操縱盤)	19
§ 13. 自感綫圈	22
§ 14. 順磁質	23

第二編

第三章 利用感应方法研究实物外的磁場的性質	26
§ 15. 磁場的有向性	26
§ 16. 決定螺綫管內矢量 B 的方向(螺旋鑽法則)	29
§ 17. 研究磁場的感应方法的第二种方案	29
§ 18.* 研究螺綫管內部的磁場	30
§ 19. 研究磁場的感应方法的第三种方案	31
§ 20. 求矢量 B 的絕對值	32
§ 21. 測定矢量 B 在給定方向上的射影	36
§ 22. 确定矢量 B 在坐标軸上的射影, 并建立某一点的矢量 B	37
§ 23.* 矢量 B 的值与坐标系底選擇無关	41
§ 24.* 矢量 B 的軸矢性	41

§ 25. 建立磁感应线	43
§ 26.* 用感应方法测定地磁场	44
§ 27. 毕奥-萨伐尔定律	46
§ 28. 确定电力恒量	50
§ 29.* 测定磁通量	53
§ 30. 研究永久磁铁内部的磁场	55
§ 31.* 用感应方法(检验螺旋管)测定矢量 B 的环流	57
§ 32. 稳定磁场的麦克斯章第一方程式	59
§ 33.* 测定通电流的电解质内的磁场	63
§ 34.* 在通电流表面上矢量 B 的切向分量突变	66
第四章 洛伦兹力	68
§ 35. 在均匀磁场中转动的线框中的应电动势	68
§ 36. 洛伦兹力	72
§ 37. 作用于磁场中载电流导体上的力	74
§ 38. 电动机的作用原理	76
§ 39. 发电机的作用原理	79
第五章 感应电场	82
§ 40. 根据法拉弟定律确定应电动势的方向	82
§ 41. 麦克斯章第二方程式	84
§ 42. 当圆形螺旋管中的磁场变化时所产生的感应电场的结构	85
§ 43. 接在交流电路上的一个相当长的螺旋管周围的感应电场	87
§ 44. 在感应电场的涡旋空间中, 势的概念无效。测定沿着曲线感应电场的电压	92
§ 45.* 在什么条件下, 可以利用势的概念研究感应电场	94
§ 46. 在位于感应电场中的非均匀回路中电荷底发生	96
§ 47. 罗蒙高夫感应圈	98
§ 48.* 演示基尔霍夫第二定律, 以位于感应电场的涡旋空间中的分支电路作为例子	100
§ 49. 自感现象。磁场能量	102
§ 50. 确立具有很大的自感系数的电路中的稳定状态	103
§ 51. 扳断自感系数很大的电路	104
§ 52. 交流电路中的自感现象	107
§ 53. 感应电场在负载变压器工作时所起的作用	109
§ 54. 电磁振荡	115
§ 55. 电场和磁场的统一	125

第三編

第六章 均匀磁介质中的磁场	127
----------------------	-----

§ 56. 根据斯托托夫方法测定顺磁液体的导磁系数	127
§ 57.* 确定所研究液体的顺磁性	128
§ 58.* 直接测定实物所产生的附加磁场的感应强度	129
§ 59. 利用磁性橡皮进行 § 56、57 和 58 中所述的实验方案	131
§ 60. 安培学说。分子电流面密度与磁化强度矢量间的关系。磁化率	134
§ 61.* 均匀磁介质对于非均匀磁场的影响	136
§ 62.* 在磁介质中发生体分子电流的条件	140
第七章 非均匀磁介质中的磁场	142
§ 63.* 在均匀磁场中的顺磁体	142
§ 64.* 在磁介质中的空腔内部的磁感应强度	146
§ 65.* 矢量 B 的边界条件	153
§ 66.* 利用磁性橡皮演示矢量 B 在两种磁介分界面的切向分量突变	155
第八章 磁场强度(矢量 H)	156
§ 67. 把麦克斯章第一方程式推广于实物内的磁场的场合	156
§ 68.* 以感应方法测定矢量 H	162
§ 69.* 矢量 H 的边界条件	163
§ 70.* 测定媒质的导磁系数(即比值 $\frac{B}{H}$)	166
第九章 几种补充实验	170
§ 71. 磁屏	170
§ 72. 端点的退磁作用	173
§ 73. 均匀磁介质对于永久磁铁的磁场的影响	176
§ 74. 磁介质中磁场的机械表现	178
索引	180

第一編

第一章 緒論

在本書中，我們适当地編入一些我們編寫本書时所遵循的，建立电磁現象理論的总原則。

§ 1. 磁場的概念、电磁場 电磁現象理論的第一根本原則应当是承認場的物質性。

在解釋电底相互作用时，我們得到一个結論：在帶电体周圍的空間內，有一種運動物質的特殊形态——電場——存在，与此相似，在解釋磁底相互作用时，我們不得不假定，在電流和磁鐵周圍的空間內，也有一種物質形态——磁場——存在。譬如說：將磁鐵或電流對於磁針底作用想像為“超距作用”，那就是想傳播一種沒有物質參與其間底運動，也就是想像地把運動和物質割裂開來。電流和磁鐵底磁的“相互作用”，就是它們周圍磁場底表現，就是磁場作用于電流和磁鐵上底結果。

在研究电磁現象的範圍內，發現了磁場和電場之間有很密切的有機聯系。而且終於弄清楚了磁場和電場是物質的統一形态——电磁場——底兩種不同表現、兩個不同方面和兩個不同形式。

§ 2. 在現代理論中關於磁量的概念 在現代的磁場理論中，不應該將磁量（它們底相互作用遵循庫侖定律）的概念作為原始概念。穩定磁場和似穩磁場底一切表現，都應當根據這樣一個概念來解釋，就是認為實物里的帶電粒子底運動是產生磁場的原因。

在确立磁場的基本規律時，也不應當應用“磁量”概念^①。應當將磁量看成為僅僅是一種輔助的計算的概念，這個概念使我們能夠將靜電場的計算方法運用於磁場問題。因為使我們感到興趣的，只是所表演的現象底物理本質，並不是磁場的公式化的計算方法，所以我們完全忽視了“磁量”這一概念。我們要按照安培假說，把磁針看成為變相的螺線管，一般說來，就是把永久磁鐵看成為變相的螺線管。

§ 3. 建立磁場理論的兩種方案 我們已經知道磁場有下列幾種主要表現：磁場對於磁針底作用；磁場對於載電流線圈底作用；磁場對於閉合迴路底感應作用。其中每一種表現都可以用來導入表述磁場性質的量，並用來測定這個量。但是磁針是變相的（分子的）螺線管，所以實際上我們並沒有三條路綫，我們只有兩條路綫可以建立磁場理論：或是從磁場對於載電流導體底機械作用出發；或是以磁場對於迴路底感應作用為基礎。

我們選擇了第二條路綫。電磁感應現象所包含的內容，比磁場對於載電流導體底機械作用所包含的內容要豐富得多，所以，我們以電磁感應現象作為理論基礎，就能得出更多的結論。在電磁感應現象中將更全面地揭發出電磁場的本質，也就是說，認識物質運動的電磁形態底關鍵就在這裡。

測定磁場的感應方法，已廣泛地應用在實踐上，這個方法終於給電磁現象的一切主要規律的演示實驗創造了無比可能性，這對於本書目的來說，也是非常重要的。

§ 4. 實物外的磁場、磁矢量 磁場與實物可以佔據同一空間，

① 在某些物理學和電工學教程中，當確立麥克斯韋第一方程式時，至今還應用這樣方法，即算出“單位磁極”沿着包圍電流的閉合迴路移動時磁場所作底功。（例如：參看 E. A. Илгравф 著的“電與磁”，蘇聯國立技術理論書籍出版社 1950 年出版，原書第 348—350 頁。電力工業出版社出版的中譯本第 376 頁。）

在這種情況下的磁場，有人稱為實物內的磁場。但是，我們的敘述要是從研究比較簡單的情況——實物外的磁場——開始，那就比較自然一些。

無論我們利用磁場的什麼樣的對外表現（磁場對於磁針底作用；磁場對於載電流綫圈底作用；或是磁場對於迴路底感應作用）來進行磁場底實驗研究，都能得出這樣的結論：某一點的磁場性質、磁場的對外表現的強度，都應該用一個矢量來描述。

建立理論的方案不同，這個矢量的定義也就不同。但是，在所有的情況下，這個矢量所指的是同一個物理量，這個物理量反映出同一客觀實在的性質。因此，從這個矢量在某一個方案中的定義，可以推出這個矢量在所有其他方案中的定義。例如：從磁場的感應現象出發，給這個矢量下一個定義後，再分析一下運動導體中的電磁感應現象，就可以確立磁場對於載電流綫圈底機械作用定律，就可以表述這個矢量在另一種建立理論的方案中的原始定義。我們把這個量簡稱為磁矢量。

磁矢量場的數學概念使得我們對於磁場的觀念——物質的形態——具體化了，利用這個數學概念還可以表述磁場的主要規律。大家知道，通過一個閉合面的磁矢量通量永遠等於零。在穩定磁場中，磁矢量環流等於該迴路所包圍的電流強度的代數和乘一個恒量（採用高斯單位制時，這個恒量為 $\frac{4\pi}{c}$ ——譯者注）。磁場的能密度決定於磁矢量底平方值。

§ 5. 實物內的磁場、矢量 B 和 H 1. 假如實物外的磁場的一切性質，磁場的一切對外表現，都可以利用一個矢量來描述，那末要表征實物內的磁場的規律性，就得引用兩個矢量。

我們打算這樣，就是從表象的描寫把理論加以推廣^①，在作表

① 即將實物外的磁場理論推廣到實物內的磁場上 —— 譯者注。

象描写时，將实物看作連續媒質。

显然，無論我們選擇哪一種方法来研究实物內某一点的磁場表現，我們都需要在这一点周圍作一个空腔，在这个空腔中可以放置某种測量仪器。原来，在这样情况下，該空腔內的磁場表現与

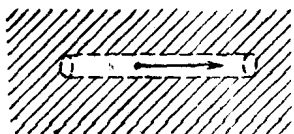


圖 1. 矢量 H 的定義。

空腔的形狀和方位有很重要關係。

从實驗得知：一个無限細長的圓柱形空腔，在其軸綫与磁矢量方向一致时（圖 1），空腔中部的磁矢量为最小值^①；但是，一个無限短而粗的

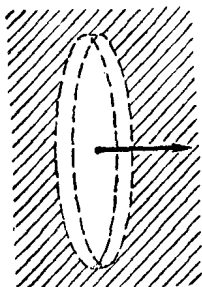


圖 2. 矢量 B 的定義。（пещерка второго вида）。

圓柱形空腔，在其底面与磁矢量方向垂直时（圖 2），空腔中部的磁矢量为最大值。在这时候，第二种空腔的長度和第一种空腔的直徑應該取得这样小，以致于在空腔範圍內的磁場和实物都可以認為是均匀的。我們称第一种空腔为“第一种小腔”（пещерка первого вида），而称第二种空腔为“第二种小腔”

經過簡單的討論，就可以指出：假如用第一种小腔中部的磁矢量的最小值^②，来描述磁場和实物所占据的空間中各点的性質，那么該磁矢量沿着閉合曲綫的环流，跟实物外的磁矢量环流一样，只是决定于該迴路所包圍的电流强度底代数和。假如用第二种小腔中部的磁矢量的最大值^③，来描述空間中各点的性質，那么該矢量通过一个閉合面的通量永远等于零，这也跟实物外所發生的情况一样。實驗也証實了这些結論^③。

① 为了使討論簡單化，我們只是指順磁質而言。

② 我們所指的是空腔在不同方位时的磁矢量值。

③ 參看本节第 3 小节，以及 §67。

在第一种小腔中部的磁矢量的最小值称为磁場强度(矢量 H)，而在第二种小腔中部的磁矢量的最大值称为磁感应强度(矢量 B)^①。

这些概念使我们能够用下列两个方程式表征实物内似稳磁場的主要規律：

$$\oint H_l dl = \frac{4\pi}{c} \sum I; \quad \oint B_n dS = 0,$$

式中 $\sum I$ 是一个給定迴路所包圍的电流强度底代数和， c 表示电动力恒量。

实验表明：在各向同性的媒質中，矢量 H 和 B 的方向相同。二者之比(B/H)可以表征实物的某一給定点的特性，这个比值就是实物的导磁系数，兩者之差可以表征該点的实物的磁化状态。实物内磁場的能密度决定于矢量 B 和 H 底乘积。

2. 試問：是否可以把我們所引用两个矢量中的某一个矢量当作基本矢量呢？又是哪一个矢量可以这样呢？

这个問題，要看我們是怎样理解那个表征实物内的磁場的基本矢量的概念。

假如这里所談論的是測定这些矢量的方法，或是列出場的方程式，那么，显然在我們所研究的表象理論的範圍內，沒有任何根据可以用来指出二者之中哪一个矢量是基本矢量。

假如我們所指的是磁場对于载电流导体底机械作用，或是磁場对于閉合迴路底感应作用，那就應該將矢量 B 作为基本矢量，因为磁場作用于载电流导体上的力，以及在迴路中所發生的应电动势，都可以根据在实物外磁場的場合中所用的公式来求，这时只

① 在一般情況下，当所指的是反磁質时，矢量 H 决定于第一种小腔中部的磁矢量值，这种小腔的軸綫与磁矢量方向一致，而矢量 B 决定于第二种小腔中部的磁矢量值，这种小腔的底面与磁矢量方向垂直。“最大”和“最小”这些字都要刪去。

要用矢量 B 代替公式中的磁矢量就可以了。在这里，矢量 B 就是决定实物內的磁場的对外表現的磁矢量。但是，我們要指出：按上述意思來說，在磁場表現的个别情況下（确定那作用于長磁針上的力矩时，这时磁針的軸綫与矢量 B 和 H 交成一个很小的角度），却以矢量 H 作为磁矢量。

其次，当考究非均匀媒質中的磁場，或是沒有整个被媒質所充满的磁場时，使用矢量 H 要方便得多，因为矢量 H 的环流与电流（它是实物內發生磁場的起因）之間存在很簡單的关系，而且借助虛構的磁荷概念（磁荷产生一个附加磁場），可以很清楚地解析矢量 H 的边界条件，这样就可以利用靜电学中的許多公式（参看§2）。所以，首先是决定矢量 H 的場，至于矢量 B 則認為是矢量 H 和 μ 的乘积。誰要解决类似的数学問題，誰就会在这时候將矢量 H 看成为基本矢量，这是很自然的。

3. 为了解析实物对于磁場底影响，特别是为了說明在实物中的空腔內部的磁矢量底測定結果如何依賴于空腔的形狀和方位，人們曾經提出兩種关于实物結構及其磁化機構的假說。

其中第一种假說現在已經被放弃了，在这一种假說中，認為实物是磁偶極子底总合，而在第二种假說中，則認為实物是元电流底总合，这种假說已經在原子物理学中得到証实。

依照这两种假說中的每一种假說，我們都可以借着一个磁矢量，而把描述实物內的磁場归結为描述实物外的磁場，但是，在这时候要將磁矢量的真正微觀值和平均宏觀值区别开来。

根据磁偶極子的假說，在实物內作一个空腔时，在空腔表面就出現磁荷，由这磁荷所形成的磁場依賴于磁荷底分布，而磁荷底分布却依賴于空腔的形狀和方位。如果空腔是第一种小腔，它的軸綫与磁矢量方向一致，那么發生在空腔表面的磁荷在空腔中部所产生的磁場可以忽略不計，这一点是很容易理解的。因此，从这样

观点看来,在第一种小腔中部的磁矢量的最小值,等于作空腔以前的同一点的磁矢量的平均宏观值。这样一来,采用磁偶極子的假說后,自然就把磁矢量命名为磁場强度——矢量 H 。

如果空腔是第二种小腔,它的底面垂直于总磁場的磁矢量,那么發生在空腔表面的磁荷,在空腔中部所产生的磁場的磁矢量有最大可能值^①,理論指出:这个最大可能值应等于 $4\pi J$,在这里 J 是 1厘米^3 内所含有的磁偶極子的总磁矩。所以,按照这种假說,在这样取向的第二种小腔中部的磁矢量,比在作空腔以前同一点的磁矢量的平均宏观值大 $4\pi J$:

$$B = H + 4\pi J.$$

实物中的空腔内的磁矢量与空腔形状和方位間的关系,在分子电流的假說中完全是按另一种方式解析。从这种观点看来,在这样空腔的表面有分子电流圍繞着。

在順磁質中,圍繞着第一种小腔(其軸綫与小腔中的磁矢量的方向一致)表面的分子电流,在小腔中部形成一个反向磁場。理論指出:这个反向磁場的磁矢量是最大值,它等于 $4\pi J$,在这里, J 表示在这种情况下每一立方厘米的該实物中所含有的元电流底总磁矩。

在底面垂直于磁矢量的第二种小腔中部,分子电流的磁場非常弱,所以这个磁場可以忽略不計。根据这种假說,該点的磁矢量的平均宏观值就再不是矢量 H ,而是矢量 B 了,矢量 H 比这个平均宏观值小 $4\pi J$:

$$H = B - 4\pi J.$$

这样一来,采用分子电流的假說后,自然把磁矢量命名为磁場感应强度(矢量 B)。

現在,我們再来講矢量 B 和 H 中哪一个矢量應該作为基本矢

① 我們是指第二种小腔在不同方位时。

量的問題，我們就會知道：在舊的磁場微觀理論中，矢量 H 是基本矢量，矢量 B 是作為輔助量，借助這個輔助量，就能夠表達磁場的一個基本性質，這個基本性質用下列方程式表示：

$$\oint B_n dS = 0.$$

相反地，在現代的磁場微觀理論中，矢量 B 是基本矢量，矢量 H 作為輔助量，借助這個輔助量，就能將麥克斯韋第一方程式推廣到實物內的磁場的場合：

$$\oint H_t dl = \frac{4\pi}{c} \sum I.$$

大家知道，利用磁量概念的舊理論觀念跟實際情況不相符合。根據現代關於實物結構的觀點，可以証實這樣一個概念：假如我們能夠測定出在物理的小體積內所有各點（包括原子內部的所有各點）的磁矢量的真正微觀值（不管用哪一種方法），然後求出其平均值，這個平均值就跟第二種小腔中部的磁矢量的最大值相同，而跟第一種小腔中部的磁矢量的最小值不相同。實物內的磁場對於電流底機械作用，以及其感應現象，都決定於矢量 B 。而不決定於矢量 H ①，這一事實就是以分子電流概念為基礎的第二種觀點的證據。

從一開始，在研究實物外的磁場時，我們就徹底地採用分子電流的假說，把磁矢量命名為磁感應強度（矢量 B ）。

雖然，描述實物外的磁場性質的量，如果命名為“磁場強度”，那是比較合適的，但是，按照已經習慣了的表象理論的術語，我們應當仍舊用這個術語來表明輔助量 $B = 4\pi J$ 。

§ 6. 本書材料編排的次序 1. 前已指出：在我們編寫本書時所採用的方案中，電磁感應現象占主要地位。下面我們擬出編寫本書方案底輪廓。

① 在特殊情況下，磁場對於磁針底作用決定於矢量 H （參看本節第2小節），這種情況是這樣解析，即放在媒質內的磁針隨時都可以看成是放在第一種小腔內部的磁針。

研究磁場的感應現象，可以立刻發現磁場的有向性，可以給矢量 $\mathbf{B}$ 下个定义 (§5)，又可以建立三種利用檢驗綫圈測定該矢量的感應方法底方案。將這種研究磁場的方法加以發展，就能建立一種利用檢驗螺綫管測定矢量 $\mathbf{B}$ 的綫積分及其環流的方法。關於電磁感應現象的更進一步的實驗事實，使我們還能夠找到一種利用檢驗迴路測定矢量 $\mathbf{B}$ 的通量的方法。

利用電磁感應方法，全面地進行磁場結構的實驗研究以及磁場與電流間的關係的實驗研究，就可以得到下列的主要規律：

$$\Delta \mathbf{B} = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} [\Delta \mathbf{I} \mathbf{r}]; \textcircled{1}$$

$$\oint \mathbf{B}_t d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c} \sum I; \quad \oint \mathbf{B}_n dS = 0,$$

式中 c 是一個有量綱的恒量，實驗表明：這個恒量等於光在實物外的速度。從這些關係式得出的一切結果，都被實驗所証實了。在建立理論的第一階段中，電磁感應現象暫時還只是起了一種輔助作用，在這一階段中，並沒有討論到這種現象的本質。

當穩定磁場研究得相當完善後，我們才把注意力集中在解析運動導體中的電磁感應現象，這樣就引出洛倫茲力的假說，然後以實驗驗證由這個假說所得出的結論。從洛倫茲力的概念可以推出磁場的一切機械表現，可以解析電能轉換為機械能的這種“機構”，同樣也可以解析機械能轉換為電能的“機構”。這就是建立理論的第二階段。

然後（建立理論的第三階段），將注意力集中在解析靜止導體中的電磁感應現象上，這樣就引出渦旋感應電場的概念，這種電場的性質就成為新的實驗對象。然後，將電磁感應定律改寫成麥克斯韋第二方程式，並驗證由這個方程式所得出的一系列結果。

我們所看到的一切似穩電磁過程（自感現象、變壓器中底過

① 參看 §28。