# 电磁理论前沿探索札记

梁昌洪　陈　曦　著

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

# 电磁理论前沿探索札记

梁昌洪 陈 曦 著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 • BEIJING

# 中国科学院院士黄宏嘉为本书题诗

电磁理论　　迅猛发展
涉及领域　　深广无边
大容宇宙　　细至极端
昌洪教授　　学术渊源
新书付梓　　探索前沿
学无止境　　先睹为欢

——为梁昌洪教授所著《电磁理论前沿探索扎记》书此短句

黄宏嘉
2012 年 4 月

# 作者传略

梁昌洪，1943年12月生于上海。1962年加入中国共产党。1965年本科毕业于西安军事电信工程学院物理系微波专业。1967年7月于西安军事电信工程学院物理系天线专业研究生肄业，留校任教，1978年定职为讲师。1980年8月至1982年8月在美国纽约州 Syracuse 大学做访问学者。

梁昌洪教授是 IEEE senior member，1984年9月被遴选为中国电子学会高级会员（现改为会士），1986年5月破格晋升为教授，1986年7月被批准为博士生指导教师。1989年成为中国电子学会微波学会副主任委员，1989年1月任西安电子科技大学副校长，1992年至2002年，任西安电子科技大学校长。

梁昌洪教授长期从事微波和电磁领域的系列研究，四十多年来，他在微波和电磁领域取得了一系列创新性的成果，在铁氧体移相器、孔耦合理论、网络系统分析和电磁场数值计算等方面都有独到的研究，特别是在计算微波、非线性电磁学、微波网络理论方面的研究尤为突出。先后获得省部级科技成果奖十余项，在国内外学术期刊上发表主要论文300余篇，已出版《微波网络及其应用》、《从测量数据谈起》、《计算微波》及其典藏版、《孤立子理论及其应用》、《简明微波》、《话说极限》、《话说对称》、《矢算场论札记》、《复变函数札记》、《科学随想录》、《科学漫谈录》专著11部，《无坐标法》译著1部。其中百万字著作《简明微波》，获2011年陕西省高校优秀教材一等奖，从使用到出版历时12年，在师生中获得了很好的使用效果，为广大学生所接受，现已被多个院校选为教材或专业参考书，如上海交通大学、华南理工大学、杭州电子科技大学等；实地教学录像约45小时，在网上广泛使用，并获得师生一致好评。

梁昌洪教授在国内最早提出计算微波概念，初步建立了计算微波理论，建立了微波宽带耦合器定向 CAD 方法，解决了 Landstofer 弯曲天线阵列最优化问题。在国内最早推动了非线性电磁学和有耗电磁学的研究，建立了国内第一套电磁孤子实验系统。

梁昌洪教授承担和完成了多项重大工程项目，许多项目已完成型号鉴定，应用于实

践。其中，孔耦合系列研究获 1984 年电子部科技进步一等奖，舰用 381 相控阵雷达获 1984 年电子部科技成果一等奖，矩量法系列研究获 1987 年机电部科技成果二等奖，计算微波研究获 1989 年国家教委科技进步二等奖。

梁昌洪教授治学严谨，为人师表，在担任校长期间，尽管行政工作繁忙，他仍一直坚持给本科生讲课。他常以鲁迅的话自勉："时间就像海绵里的水，只要愿意挤，总还是有的"。他常说："如果不想讲课，别说当校长，当个学院院长就可以不讲；你要是想讲，当什么都可以讲。做别的事情也是一样的道理！"梁昌洪教授所培养的博士生中已有 10 余位博导和 1 位长江学者奖励计划特聘教授。其本人 1985 年荣获全国人民教师奖章，1987 年获全国电子工业劳动模范，1988 年获国家有突出贡献专家，1991 年获全国优秀留学回国人员，1992 年获陕西省优秀党员专家，2003 年获首届国家级教学名师称号。他所讲授的"微波技术基础"课程被评为首届"国家精品课程"。

梁昌洪教授表示：国内外多位顶级专家的著作，如 R. F. Harrington 的《正弦电磁场》、《矩量法》，R. E. Collin 的《导波场论》，黄宏嘉的《微波原理》（Ⅰ、Ⅱ卷）等，都对他产生极大的影响与鞭策。前辈的工作是带有开创性的，而他则是学生辈，很多工作都是学习和体会前辈著作的结果，而且在今后还要继续学习。

# 《前　言

回顾我所写的书，其形成过程大致可分为两类：一类是有意识创作，如 1985 年版《计算微波》就属此种。1982 年留美归来，我特别想把大洋彼岸的新鲜空气——微波与现代计算机和计算技术结合介绍过来，从而使国内在此领域更上高楼，于是全力以赴，写成此书。另一类则是偶有所发，而后则一发不可收拾，从而形成著作，本书当属此例。

2008 年偶见有文献讨论静电场电荷系统的能量问题，认为应该包括两部分，即电荷之间的相互作用能和**电荷系的固有能**。很清楚，这里所述及的固有能即静电场的自作用能。实际上早在 70 年前，即 1940 年秋，著名美国物理学家 Feynman 就注意到电磁理论的主要问题是电子自作用能无限大的困难，这一困难是由于把电子描述成点粒子而造成的。Feynman 自己提出一个假定：**电子不能对自己产生作用**。经过艰苦的思考，以及和他的导师 Wheeler 反复讨论，终于写成了《超距作用的经典理论——作为物体阻尼抵制的吸收体反作用》，并以两人联名发表于 1945 年的《现代物理评论》上。

由此，我采用了极限数学方法证明了静电场的自作用能始终为零。通俗地说，正如“用力抓住自己的头发离开地球是不可能实现的一件事！”遂成一文并投寄《电气电子教学学报》，承蒙编辑的大胆支持，不仅同意发表，而且从 2008 年开始我就成为该刊的“专栏作家”，到 2011 年历时 3 年，其间共发表札记 18 篇。因为说些真话，所以有些地方均已越过界限，甚至达到“胡言乱语”。当然作为问题的另一方面，这也使我能彻底“摘下面具”，提出自己学习和研究过程中的难点与疑点，坐下来与读者平等而推心置腹地讨论。

应该承认，这正是当前国内不可多得的学术民主环境，它的产生与编辑们宽大的胸怀、高超的眼光密不可分。在此基础上进一步写出各篇的问答录，再加上 1 篇思考和 1 篇札记教学，计 20 篇，这就是本书的形成过程。

特别指出，札记所涵盖的内容极为广泛：从静电场自作用能、广义电磁惯性到电磁对称。其中，既有提出问题的 Fermat 原理之谜，又有深入讨论数学方法的电荷多极子和电流多极子，最后还有提炼总结的电磁理论之美。本书突出了电磁理论的思想、概念、

方法和工程应用。

坦率地说，完成一本书后作者最关心的是是否有读者？是否有价值？但是，静下心来反思，这将取决于两方面条件：一是作者的水平和努力程度；二是当前的环境和氛围。如此看来，这个问题还不能用短期的眼光去考察。

回顾从1980年以来30多年的实际情景，十分令人深思：1980年吴万春教授和我完成《微波网络及其应用》，正好遇到文革后1978年拨乱反正，压抑多年的广大青年（有的已应该算做中年）学生，个个摩拳擦掌，对于学习的饥渴性无与伦比。不仅反映在学校教学，而且作为我本人还收到大量要求参加学习和回答问题的信件，特别是当年77班和78班学生的学习动力，至今依然历历在目。

到1988年翻译美国陈惠青名著《电磁波理论——无坐标法》时，情况已有很大不同。我经常说中国的环境大致是10年一个变化。当时学术已成为次要兴趣，加之此书曲高和寡，其情况与《微波网络及其应用》（1980）和《计算微波》（1985）已不能同日而语。

再到2006年出版《简明微波》，这时社会上的经济规则已相当直白。只要做一件事必然有人会问：能否赚钱？赚多少钱？因此，尽管这本书对于宽广的专业均有较好的参考价值，但因为不能与赚钱直接挂钩，于是也只能隅于一角。

根据这一思路推断，显然不能对这本札记的期望值过高，它至多是一件文化商品，正如著名电视主持人白岩松所发现的一个规则——一本《新华字典》的售价在任何时期都与1斤猪肉的价格极为接近。我所能期望的是随着时间的变迁，学术和文化终将又成为人们追踪的热点。

特别指出，优秀的青年学者陈曦为本书作出很多贡献。

# 目录

C O N T E N T S

## 札记一 静电场的自作用能


0 引言 // 1

1 静电场的自作用能 // 2

1.1 $2a\times2a\times2a$ 均匀电荷分布立方体的静电总自作用能 // 3

1.2 体积为$V$的任意形状电荷系统的静电总自作用能 // 4

2 场计算法和源计算法 // 5

2.1 场求解法 // 5

2.2 源计算法 // 6

3 结语 // 8

答问录 // 8

推荐人物 // 10

附录 // 12

参考文献 // 16


## 札记二 时谐场和复数场的对应研究


0 引言 // 17

1 时谐场一次量的复数场表示 // 18

1.1 实部表示准则 // 18

1.2 微积分准则 // 18

1.3 本构算子准则 // 18

2 时谐场的二次量与复数场表示 // 19

3 三个主要定理 // 21

3.1 能量Poynting定理 // 21

3.2 无耗单口系统的Foster定理 // 22
3.3 Lorentz互易定理 // 22
4 结语 // 23
答问录 // 23
推荐人物 // 25
参考文献 // 27

## 札记三 静电场与恒定电流场的转化与统一

0 引言 // 28
1 两种场的转化和统一 / 29
2 Poynting矢量 $\bar{S}$ 伴谬 / 31
3 结语 / 32
答问录 / 33
推荐人物 / 36
参考文献 / 37

## 札记四 电荷多极子和电流多极子

0 引言 // 38
1 $f(R)$ 的广义Taylor展开 // 38
2 电荷多极子 // 39
3 多极子的矩阵表示 // 42
4 电流多极子 // 43
5 相对论中四维电流多极子 // 46
6 结语 // 46
答问录 // 46
推荐人物 // 50
参考文献 // 51

## 札记五 电磁波极化及其应用

0 引言 // 52
1 椭圆极化波 // 52
2 极化转换和矩阵表示 // 58
3 极化的工程应用 // 61
4 结语 // 62
答问录 // 62
推荐人物 // 64
参考文献 // 64

## 札记六 电荷守恒和电流守恒

0 引言 // 65
1 电荷守恒 // 66
2 电流守恒 // 68
3 电流——电荷守恒 // 69
4 应用实例 // 69
5 结语 // 70
答问录 // 71
推荐人物 // 75
附录 // 77
参考文献 // 78

## 札记七 电磁互易对称性和无耗对称性

0 引言 // 79
1 Lorentz互易对称性 // 80
2 厄密（Hermite）无耗对称性 // 82
3 网络型Foster定理，广义惯性 // 85
4 电磁互易对称性和无耗对称性 // 86
5 结语 // 88
答问录 // 88

推荐人物 // 92
参考文献 // 94

## 札记八 电磁对称和对称算子

0 引言 // 95
1 二次型对称 // 95
2 一次型对称 // 100
3 辛内积和电磁辛正交 // 101
4 结语 // 102
答问录 // 102
推荐人物 // 104
参考文献 // 106

## 札记九 平面镜像法与有源保角变换

0 引言 // 107
1 平面介质镜像统一模型 // 108
2 导体圆柱的有源保角变换 // 110
3 复杂导体的有源保角变换 // 114
3.1 带裂缝圆柱问题 // 114
3.2 双板之间的线电荷 $\rho_l$ // 115
4 结语 // 117
答问录 // 118
推荐人物 // 123
参考文献 // 124

## 札记十 论电磁损耗

0 引言 // 125
1 三个定理 // 126
2 损耗评价 // 128

3 损耗系统特性 // 132
4 电磁损耗带来的困难 // 133
5 结语 // 133
答问录 // 134
推荐人物 // 141
参考文献 // 142

## 札记十一 电磁理论中的复参量和复定理

0 引言 // 143
1 复频率 $\tilde{\omega}=\omega'-\mathrm{j}\omega''$ // 144
2 复相角 $\tilde{\theta}=\theta'-\mathrm{j}\theta''$ // 144
3 复频率电磁定理 // 147
4 带任意负载的无耗传输线 // 151
5 结语 // 153
答问录 // 154
推荐人物 // 157
参考文献 // 159

## 札记十二 复算子 $\mho$ 与二维静场

0 引言 // 160
1 复算子 $\mho$ // 161
2 复算子积分定理 // 162
3 复偏导数 // 164
4 二维静电场的复算子形式 // 165
5 二维稳流磁场的复算子形式 // 167
6 结语 // 168
答问录 // 168
参考文献 // 172

## 札记十三 电磁波多层媒质传播的[C]网络新理论

0 引言 // 173
1 基本模型 // 173
2 特殊角度 // 176
3 电磁波传播[C]网络 // 177
4 工程实例 // 181
5 能量守恒 // 182
6 结语 // 184
答问录 // 184
推荐人物 // 191
参考文献 // 191

## 札记十四 电磁理论中的矩阵变换

0 引言 // 192
1 二维坐标转动和向极坐标的矩阵变换 // 193
2 三维坐标矩阵变换 // 195
3 算子∇矩阵变换 // 199
4 纵向场向横向场的矩阵变换 // 201
5 结语 // 203
答问录 // 203
推荐人物 // 207
参考文献 // 207

## 札记十五 电磁辐射的最小方向性挑战

0 引言 // 208
1 Maxwell体系不存在各向同性解 // 208
2 最小方向性天线 // 211
3 最小方向性阵列 // 213
4 结语 // 216
答问录 // 216

推荐人物 // 221
附录 A　y 方向偶极子参量和电场 $\tilde{E}_{\theta'}$ // 222
附录 B　二维 8 元图的相位 // 224
参考文献 // 225

## 札记十六 Fermat原理之谜

0　引言 // 226
1　自然规律的表述形式 // 227
2　极小值还是极大值 // 228
3　相速 $v_p$ 还是群速 $v_g$ // 230
4　能量 $E$ 和作用量 $S$ // 232
5　物理量还是空间 // 234
6　电磁最小作用量原理 // 234
7　结语 // 235
答问录 // 236
推荐人物 // 245
参考文献 // 246

## 札记十七 论电磁惯性

0　引言 // 247
1　电磁惯性 // 249
2　静电惯性 // 250
3　Green函数与静电惯性 // 252
4　任何天线元都无法构成理想子波源 // 253
5　结语 // 253
答问录 // 254
推荐人物 // 257
参考文献 // 257

## 札记十八 电磁理论之美


0 引言 // 258
1 电磁理论的简单美 // 259
2 电磁理论的对称美 // 260
3 电磁理论的转化美 // 261
3.1 电和磁的相互转化 // 262
3.2 空间变化与时间变化的相互转化 // 262
4 电磁理论的统一美 // 262
5 美的两重性 // 263
6 结语 // 264
答问录 // 264
推荐人物 // 267
参考文献 // 268


## 札记十九 关于电磁理论的若干思考


0 引言 // 269
1 对称性和不对称性 // 270
2 无耗和有耗 // 273
3 四维Minkovski空间和 $\overline{\overline{L}}_6$ // 289
4 静场和交变场 // 294
5 学科发展的生命在于创新 // 296
6 结语 // 299
参考文献 // 300


## 札记二十 札记教学


1 基础在“货” // 302
2 关键用“心” // 304
3 贵在创“新” // 306
4 方法在“悟” // 310
5 目标是“道” // 311

札记一

# 静电场的自作用能

静电场能量$W_e$是一个非常重要的基本概念。目前文献大多是从点电荷系$\{q_i\}$做功来讨论$W_e$的。十分明显，由于点电荷的自作用存在发散困难，因而在它的$W_e$中并不包含自作用能。进一步把问题推广到分布电荷系统，这时储能可表示为$W_e = \frac{1}{2}\iiint\limits_{V} \rho(\vec{r}')\,\varphi(\vec{r}')\mathrm{d}v'$，但对它的理解有不同意见。例如，文献[3]认为，这种情况下“它们不仅包含了电荷之间的相互作用能，同时也包括了电荷系固有能。”本文将严格证明：在$W_e$公式中静电场的自作用能始终为零。值得提出，自作用能的问题还可引申到哲学层面作深入探讨。著名美国物理学家费曼（Feynman）为消除电子点模型的发散困难曾经作过很大的努力。文中还提及，在采用$W_e = \frac{1}{2}\iiint\limits_{V} \rho(\vec{r}')\varphi(\vec{r}')\mathrm{d}v'$计算储能时必须采用六重积分，否则会产生计算错误。

## 0 引 言

本文是电磁场理论教学札记之一。做功是联络力学、电磁学、热学甚至化学等各种不同领域能量的公共纽带。因此，在讨论静电场储能$W_e$时，现有文献[1,2]大多也是从点电荷系$\{q_i\}$ $(i=1,2,\cdots,N)$做功开始的。

我们考虑由$q_1, q_2, \cdots, q_N$所组成的点电荷系分布于一个有限空间内。首先设想将电荷$q_1$缓慢地（不计动能）移至无穷远处，这时具体电场力做功是

$$W_1 = q_1\varphi_1 = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0}\left(0 + \frac{q_2}{r_{12}} + \frac{q_3}{r_{13}} + \cdots + \frac{q_N}{r_{1N}}\right)$$

然后，再把$q_2$移走，有

$$W_2 = q_2\varphi_2 = \frac{q_2}{4\pi\varepsilon_0}\left(0+0+\frac{q_3}{r_{23}}+\cdots+\frac{q_N}{r_{2N}}\right)$$

最后移走$q_N$，有$W_N = 0$。

电场力所做的全部功恰好等于原电荷系$\{q_i\}$的静电储能

$$W_e = W_1 + W_2 + \cdots + W_N = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N} q_i\varphi_i \tag{1-1}$$

其中

$$\varphi_i = \sum_{j=i+1}^{N} \frac{q_j}{4\pi\varepsilon_0 r_{ij}} \tag{1-2}$$

由上述推导明显看出：电荷系$\{q_i\}$的静电储能$W_e$只包含相互作用能。因为电荷$q_i$在本处的电位必然会出现“无穷”的发散结果，这是点电荷模型所存在的固有困难。

现在，若把式（1-1）推广到分布电荷系统，即$dq = \rho(\vec{r}')dv'$，于是

$$W_e = \frac{1}{2}\iiint_v \rho(\vec{r}')\,\varphi(\vec{r}')dv' \tag{1-3}$$

这时产生了不同的理解，例如文献[3]即认为式（1-3）“它们不仅包含了电荷之间的相互作用能，同时也包含了电荷系的固有能”。

本文将严格证明：在储能$W_e$公式中，静电场的自作用能始终为零。要么在电荷或线电荷条件下，由于模型的固有问题会产生发散而无法考虑；要么在分布电荷条件下自作用能依然为零。同时，在采用源方法计算$W_e = \frac{1}{2}\iiint_v \rho(\vec{r}')\varphi(\vec{r}')dv'$时必须采用六重积分，否则会产生计算错误。

## 1 静电场的自作用能

现在，我们研究分布电荷系统中的静电场自作用能，即式（1-3）中$W_e$的自作用部分。首先要明确：什么是自作用能，即系统的固有能。定义分布系统中任意一点$\vec{r}'$处的电荷在$\vec{r}'$处所具有的能量，累加后即为该系统的自作用能。

可以把上述定义转换成计算一个边长$2\varDelta\times2\varDelta\times2\varDelta$的微分立方体内均匀分布体电荷密度为$\rho$，然后令$\lim\limits_{\varDelta\to0}$，如图 1-1 所示，所以只须计算$2\varDelta$立方体中心处的电位$\varphi$即可。同时我们提出，微分立方体所用的是本地坐标，而与系统坐标无关。