

GAIBIAN SHIJIE DE MOHUA ZHI SHOU  
DIANJI PINPU

# 改变世界的“魔幻之手”

---

## ——电磁频谱

---

李玉刚 杨存社 / 主编



人民出版社

GAIBIAN SHIJIE DE MOHUAN ZHI SHOU  
DIANJI PINPU

# 改变世界的“魔幻之手” ——电磁频谱

李玉刚 杨存社/主编



人 民 出 版 社

责任编辑: 薛 晴  
文字编辑: 徐 源  
责任校对: 苏小昭  
封面设计: 石笑梦

### 图书在版编目(CIP)数据

改变世界的“魔幻之手”: 电磁频谱 / 李玉刚, 杨存社 主编. — 北京:  
人民出版社, 2018.5

ISBN 978-7-01-019128-7

I. ①改… II. ①李…②杨… III. ①电磁波-频谱-无线电管理 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 058409 号

## 改变世界的“魔幻之手”

GAIBIAN SHIJIE DE MOHUAN ZHI SHOU

——电磁频谱

李玉刚 杨存社 主编

人民出版社 出版发行

(100706 北京市东城区隆福寺街 99 号)

北京中科印刷有限公司印刷 新华书店经销

2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月北京第 1 次印刷

开本: 710 毫米 × 1000 毫米 1/16 印张: 14.25

字数: 200 千字

ISBN 978-7-01-019128-7 定价: 68.00 元

邮购地址 100706 北京市东城区隆福寺街 99 号

人民东方图书销售中心 电话 (010) 65250042 65289539

版权所有·侵权必究

凡购买本社图书, 如有印制质量问题, 我社负责调换。

服务电话: (010) 65250042

## 编委会

主 编：李玉刚 杨存社

副主编：欧孝昆 刘东华 王惠来

成 员：（按姓氏笔画排序）

于 飞 左建国 叶良丰 孙秀志 杨 莉  
陈珊珊 张雷鸣 赵 光 姚 清 顾 娜  
龚 坚 韩朝晖 简 盈

# 序

19 世纪末以来，随着电磁场理论的建立和完善，人类社会逐步进入了电磁时代。从最早使用莫尔斯电报实现简单的信息传递，发展到今天，电磁频谱广泛应用于无线通信、导航定位、广播电视、射电天文等四十余种无线电业务。可以说，这一看不见、摸不着的自然资源，在推动人类文明发展、社会进步中发挥了独特而不可替代的巨大作用，甚至可以称为改变世界的“魔幻之手”。

当前，以新一代信息技术为核心的科技革命浪潮中，电磁频谱资源在维护国家安全、拓展战略空间、推动经济发展、提升综合实力等方面的战略价值日益凸显。很多国家十分重视电磁频谱资源的开发利用。怎样合理高效地利用既有的电磁频谱资源，如何获取更多的电磁频谱资源，如何破解有限的可用资源与高速增长的用频需求之间的矛盾，已成为世界各国共同关注的时代课题。

作为这本书稿的第一位读者。在它即将付梓之时，我想谈一下我读完这本书的几点感受。

一是大道至简。作为科普书，最根本的一点就是要把道理讲明白，让人看得懂，否则就达不到科普的效果。电磁频谱资源的应用与管理是一个涵盖多学科、多业务的复杂系统工程，要把其中涉及的知识讲清楚不是一件容易的事情。本书用风趣鲜活的文风、形象直观的图表、大量形象化的比喻，使抽象的学术理论直观化、通俗化、简单化，将轻于无量、存于无形的电磁频谱活灵活现地展示出来，让读者全面系统地了解它的神秘之处、神奇之效，达到了知识性与可读性的巧妙结合。

二是叙事明理。作为科普书，很重要的一点就是要激发读者读书的欲望，让他们带着兴趣读、带着问题读、带着思考读，达到读有所获的效果。本书每一小节都是一个小故事，最多不超过三千字。有的故事开门见山、深入浅出；有的故事悬疑丛生、扣人心弦；有的故事娓娓道来、循序渐进。通过对大量真实案例的剖析，本书揭示了电磁频谱资源多重的自然属性和重要的战略价值，阐述了科学开发、使用和管理电磁频谱资源的必要性和紧迫性，展望了未来电磁频谱资源应用与管理的发展趋势，以及产生的深远影响，达到了叙事性与说理性的有机统一。

三是以点带面。作为科普书，不能像教科书那样，把所有的知识点都一一罗列出来，逐一进行讲解。本书紧紧围绕“魔幻之手”这一主题，以“改变世界”为主线，以维护拓展国家战略利益、服务信息化武器建设、保障多样化军事行动、服务社会经济发展等多个视角为切入点，通过对典型事例的剖析，阐述电磁频谱在经济和军事领域的战略价值。并且在每个事例后面，以知识链接的形式，对重要的术语、组织机构、技术手段等内容进行详细介绍。这样在不影响全书整体性、连贯性的基础上，又充实了知识内容，达到了重点性与普及性的完美融合。

当前，我国正走在实现“中国梦”的伟大历史征程中。近年来，频谱资源的广泛应用，已经成为发展数字经济，建设智慧城市，推动“互联网+”，实现经济结构战略性调整的重要“引擎”。因此，我们每一个人都有必要去理性地认识电磁频谱，了解其在国家安全、经济发展和国防建设等领域的重大作用，树立电磁领域的大局观和安全观，争做维护国家战略利益的带头人、信息化建设领域的开路人、频谱资源管理领域的明白人。

当您读完此书再次回味它的时候，我想您会“不虚此读”，受益匪浅。我期待着这本书早日与广大读者见面。



## 内容提要

本书是一本介绍电磁频谱相关知识的科普读物，共分七章。其中，第一章介绍电磁频谱的基本概念、自然属性及战略价值；第二章介绍电磁频谱管理工作的发展历程、相关机构及法规标准；第三至第六章着重从维护拓展国家战略利益、服务信息化武器装备建设、保障多样化军事行动、推动经济社会发展四个方面，系统阐述电磁频谱管理所带来的重大而深远影响；第七章瞻望未来电磁频谱管理在社会生活、经济建设以及军事领域面临的机遇和挑战。

本书面向社会大众宣传、普及电磁频谱的基本常识、应用发展以及由此产生的经济和军事效益，适合大中专院校师生、信息化领域工作人员、业余无线电爱好者和军事爱好者参考阅读，也可作为电磁频谱管理领域工作人员入门读本。

# 目 录

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| 序 .....                   | 001        |
| 内容提要 .....                | 001        |
| <b>第一章 神奇的电磁波</b> .....   | <b>001</b> |
| 1.1 麦克斯韦的预言 .....         | 001        |
| 1.2 赫兹的实验 .....           | 008        |
| 1.3 电磁波的“家族” .....        | 010        |
| 1.4 与众不同的自然资源 .....       | 017        |
| 1.5 无形的“摇钱树” .....        | 021        |
| 1.6 战场的“双刃剑” .....        | 023        |
| 1.7 深远的社会影响 .....         | 025        |
| <b>第二章 驾驭“魔幻之手”</b> ..... | <b>029</b> |
| 2.1 电磁频谱管理的“诞生” .....     | 029        |
| 2.2 电磁频谱的国际“管家” .....     | 032        |
| 2.3 走过百年的“国际规则” .....     | 036        |

|                               |                       |            |
|-------------------------------|-----------------------|------------|
| 2.4                           | 我国无线电管理的“前世今生” .....  | 039        |
| 2.5                           | 我国无线电管理的“总章程” .....   | 044        |
| 2.6                           | 我国频谱资源管理的“基本法” .....  | 046        |
| 2.7                           | 我国用频秩序管控的“尚方宝剑” ..... | 050        |
| 2.8                           | 没有“规矩”不成方圆 .....      | 052        |
| 2.9                           | 失之毫厘，谬以千里 .....       | 055        |
| <b>第三章 抢占国家战略利益的制高点 .....</b> |                       | <b>059</b> |
| 3.1                           | “逐鹿”国际舞台 .....        | 059        |
| 3.2                           | “纸卫星”的由来 .....        | 064        |
| 3.3                           | 竞逐移动通信标准的国际赛场 .....   | 066        |
| 3.4                           | 东方升起导航新星 .....        | 069        |
| 3.5                           | 打造中国的“太空工厂” .....     | 073        |
| 3.6                           | 探访“广寒宫” .....         | 076        |
| 3.7                           | 守卫无形的“电磁边疆” .....     | 080        |
| 3.8                           | 发人深省的“萨德”事件 .....     | 083        |
| <b>第四章 信息化武器从这里走入战场 .....</b> |                       | <b>087</b> |
| 4.1                           | 神秘的美军电子靶场 .....       | 087        |
| 4.2                           | B-52 战略轰炸机长寿的秘诀 ..... | 090        |
| 4.3                           | 气球上的“千里眼” .....       | 092        |
| 4.4                           | 信息化武器装备的“人生大考” .....  | 095        |
| 4.5                           | 让雷达不再弱不禁“风” .....     | 097        |
| 4.6                           | 无人机隐形的“翅膀” .....      | 099        |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 4.7 碧波下的“幽灵” .....             | 102        |
| <b>第五章 电磁频谱像“子弹”一样重要 .....</b> | <b>107</b> |
| 5.1 拯救俄太平洋舰队的“电磁迷雾” .....      | 107        |
| 5.2 二战中的“听风者” .....            | 109        |
| 5.3 “俾斯麦”号的不归路 .....           | 112        |
| 5.4 “福莱斯特”号自爆的罪魁祸首 .....       | 115        |
| 5.5 “谢菲尔德”号沉没的背后 .....         | 119        |
| 5.6 贝卡谷地的无形硝烟 .....            | 122        |
| 5.7 海湾战争的“天空之眼” .....          | 126        |
| 5.8 出其不意的“斩首”行动 .....          | 129        |
| 5.9 诱捕“坎大哈野兽”的天网 .....         | 132        |
| <b>第六章 世界因你而精彩 .....</b>       | <b>139</b> |
| 6.1 指尖上的生活 .....               | 139        |
| 6.2 智慧小镇 .....                 | 146        |
| 6.3 斩断“电信诈骗”的毒瘤 .....          | 150        |
| 6.4 猎捕城市上空的“黑色幽灵” .....        | 154        |
| 6.5 让 MH370 的悲剧不再重演 .....      | 159        |
| 6.6 最后一根救命稻草 .....             | 162        |
| 6.7 光平方与 GPS 频率之争 .....        | 166        |
| 6.8 揪出攻击鑫诺卫星的“黑手” .....        | 170        |
| 6.9 为 G20 峰会保驾护航 .....         | 174        |
| 6.10 想说爱你并不容易 .....            | 178        |

第七章 路在脚下延伸 ..... 183

7.1 频谱战：异度空间打响的枪声 ..... 183

7.2 赛博空间：二次元世界的终极进化 ..... 187

7.3 军民融合下的频谱管理 ..... 190

7.4 基于认知无线电的频谱管理 ..... 192

7.5 在万米高空网上冲浪 ..... 195

7.6 电子标签：物联网的第二代身份证 ..... 200

7.7 基于规则的频谱管理 ..... 202

参考文献 ..... 208

后 记 ..... 212

索 引 ..... 213

## 第一章

# 神奇的电磁波

公元前六七世纪，人类就已经发现了磁石吸铁、磁针指南以及摩擦生电等现象，但还只是停留在感性认识的阶段，直到 16 世纪，才开始系统地研究这些现象。起初人们只是把电、磁作为两个独立的领域进行研究，后来经过库伦、高斯、欧姆、奥斯特、安培、法拉第等一批科学家的不断探索，到了 19 世纪二三十年代才把两者关联起来，从此进入了电磁理论发展的崭新阶段。

### 1.1 麦克斯韦的预言

1831 年，法拉第发现电磁感应现象，成为科学界轰动一时的大事。而就在同一年，麦克斯韦出生在苏格兰古都爱丁堡的一个律师家庭。这也许就是历史的安排，让这个呱呱坠地的小孩在未来去破解法拉第发现的“电磁迷雾”。

在家庭环境的影响下，麦克斯韦从小就受到很好的科学启蒙和熏陶，逐渐展现出了在数学方面的天赋。14 岁时他在《爱丁堡皇家学会学报》上发表了一篇数学论文——《论卵形曲线的机械画法》。该问题只有大数

学家笛卡尔研究过，而麦克斯韦提出的方法比笛卡尔的要更简便，这让审定论文的教授非常吃惊。1850年，19岁的麦克斯韦进入赫赫有名的剑桥大学三一学院数学系学习，在著名数学家霍普金斯的指导下，麦克斯韦的数学天赋得到了充分发挥。

1854年，23岁的麦克斯韦刚从剑桥毕业不过几星期就阅读了法拉第的名著——《电学实验研究》。他一下子就被书中新颖的电磁实验和独到的理论见解所吸引。但是，在这厚厚的三卷《电学实验研究》中，都是一些定性的文字描述，竟然没有一个数学公式。正是由于这个缘故，当时许多理论物理学家都不承认法拉第的学说，认为它不过是一些实验记录。在麦克斯韦看来，虽然法拉第的电磁理论都是基于文字描述，但是他提出的“力线”概念却隐含着人们尚未发现的、具有革命性的真理。作为一位理论物理学家，麦克斯韦很清楚，物理学是离不开数学的。他意识到，缺乏数学上的高度概括，也许正是这位大师在理论研究方面的弱点。这位初出茅庐的青年科学家决心用数学的力量承载起法拉第的天才思想。

经过一年多的潜心研究，1856年2月，麦克斯韦在剑桥《哲学学报》上发表了第一篇电磁学论文——《论法拉第的力线》。在这篇论文中，麦克斯韦通过数学方法，把法拉第关于电流周围存在“力线”这一思想成功地概括为一个数学方程，使法拉第的电磁学说第一次有了定量的表述形式。1860年夏天，29岁的麦克斯韦登门拜访了年近七旬的法拉第。两位伟大的科学家跨越了年龄的鸿沟，对电磁理论的发展进行了一次思想的碰撞。法拉第认为这位青年人真正理解了他的思想精髓，并鼓励他要继续探索、突破创新。从此，麦克斯韦接过这位伟大先驱者的火炬，开始向电磁领域的纵深挺进。

为了研究变化的“力线”，麦克斯韦建立了一个新模型。他想象，空间里充满着小球，这些小球可以旋转，它们被更小的粒子在空间上间隔开。那些小粒子就像是钢珠轴承。麦克斯韦假设这些小球质量很小但有

限，并有一定的弹性。因为任何一个小球的变化都会引起其他小球的变化，如此一来，就可以把电力线、磁力线和机械系统作类比进行研究。

经过六年时间的研究，1862年，麦克斯韦在英国《哲学杂志》上发表了第二篇电磁学论文——《论物理学的力线》。他利用上述理论模型，推导出两个非常精练的数学公式，不仅完美地解释了法拉第的电磁感应实验，还可以解释迄今为止人们所发现的一切有关电和磁的现象。

在法拉第电磁感应实验中，变化的磁场可以在闭合电路中引起电流。麦克斯韦认为，这是由于变化的磁场在闭合电路周围产生了一个电场，这个电场推动闭合电路导体中的电荷定向移动，形成了电流。他还认为，变化的磁场在其周围空间产生电场，是一种普遍现象，与电路是否闭合没有必然关系。因此，麦克斯韦预言电磁波的传播速度只由电磁基本性质决定。

麦克斯韦进一步思考发现，变化的磁场产生电场，变化的电场产生磁场，二者密切联系，互为因果，形成一个不可分割的统一体——电磁场。因此，麦克斯韦在《论物理学的力线》中大胆地预言：这种交变的电磁场以波的形式由近及远地向空间传播开去，就会形成当时人们尚不知道的电磁波（如图1—1所示）。电磁波的形成就像鸡生蛋，蛋生鸡，鸡又生蛋，蛋又生鸡……不断繁衍。就这样，今天给我们生活带来无限便

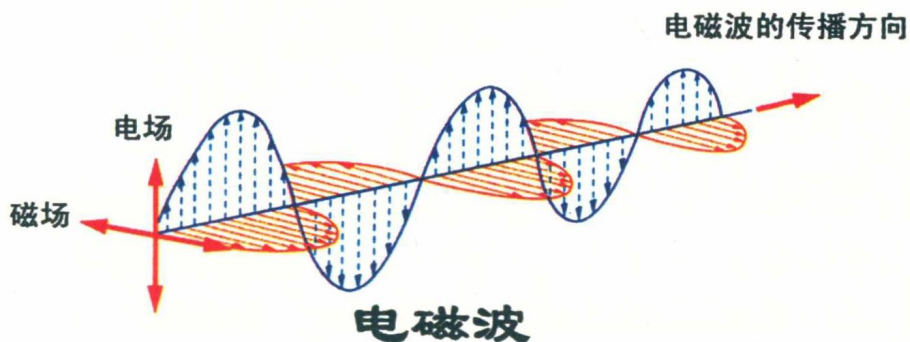


图1—1 电磁波的产生

捷的无线电波，被当时年仅 31 岁的麦克斯韦所预言。此外，在该论文的第三部分，麦克斯韦首次提出了光的电磁学说的观点：“我们几乎不可回避这样的推论：光是由电磁现象引起的在同种媒质中的横波。”这是人类在认识光的本质方面的又一大进步。

这是个惊人的发现，但绝大部分科学家却没有对此表态。他们认为麦克斯韦的“小球”模型并没有原创性，用这个模型尝试对电磁和光作解释是有缺陷的。当所有人都预计麦克斯韦下一步要完善这个模型的时候，麦克斯韦却把这个模型放到一边，转而运用动力学原理，从头开始构建电磁场理论。

1864 年 10 月 27 日，麦克斯韦在英国皇家学会上宣读了他的第三篇电磁学论文——《电磁场动力学》，首次明确地提出了电磁场的概念。麦克斯韦对《论物理学的力线》中构建的数学模型进行了优化，建立了由 20 个等式和 20 个变量组成的电磁场方程组。虽然这个方程组与我们今天所熟悉的麦克斯韦方程组还有一些差异，但是它概括了各个电磁学的实验规律，能够完整和充分地反映电磁场客观运动规律的理论。根据这组公式，麦克斯韦计算出电磁波的传播速度正好等于光速，并大胆地断定，光也是频率介于某一范围之内的一种电磁波。1885 年，英国物理学家奥利弗·赫维赛德运用矢量表征方法，简化了麦克斯韦方程组，将其用简洁、对称、完美的四个数学公式表示出来，即现在人们所看到的麦克斯韦方程组。

$$\begin{cases} \operatorname{div} E = \rho / \varepsilon \\ \operatorname{div} H = 0 \\ \operatorname{curl} E = -\mu \partial H / \partial t \\ \operatorname{curl} H = \varepsilon \partial E / \partial t + J \end{cases}$$

其中， $E$  和  $H$  分别是空间任意点电场力和磁场力的矢量， $\varepsilon$  和  $\mu$  分别是电和磁的基本常量， $\rho$  是电荷密度， $J$  是电流密度矢量。这组公式融

合了电的高斯定律、磁的高斯定律、法拉第定律以及安培定律。可以说，宇宙间任何的电磁现象，皆可由此方程组解释。2014 年，麦克斯韦方程组被英国科学期刊《物理世界》评选为“最伟大的公式”。

就这样，法拉第当年关于光的电磁理论的朦胧猜想由麦克斯韦变成了科学理论，成为 19 世纪科学史上最伟大的创新。此后不久，麦克斯韦辞去伦敦国王学院教授的工作，回到家乡格伦莱庄园系统地总结近年来的研究成果，撰写电磁学专著。

1873 年，麦克斯韦的经典巨著《电磁通论》出版了。它充分继承了奥斯特、安培、法拉第等人在电和磁领域的研究成果，以电磁学实验和动力学原理为依据，对电磁现象作了系统、全面的阐述，成为一部经典的电磁理论著作。此时人们通过他前几篇卓有见地的论文而逐渐地接受了他的理论观点。这本书刚一出版，就成为当时物理学界的一大新闻。他的朋友、学生以及科学界的人士争相购买，以求先睹为快，书很快就被抢购一空。《电磁通论》的问世标志着电磁理论的宏伟大厦，经过几代人的不懈努力，终于巍然矗立起来！

从 19 世纪 50 年代到 60 年代，麦克斯韦用了十年左右的时间，完成了三次里程碑式的跨越：从理论上总结了人类对电磁现象的认识，建立了完整的电磁场理论体系，揭开了“电磁迷雾”。他不仅科学地预言了电磁波的存在，而且揭示了光、电、磁现象的内在联系及统一性，成为 19 世纪物理学发展史上最辉煌的研究成果。他建立的电磁理论，成为经典物理学的支柱之一，是科学史上一个划时代的理论创新。

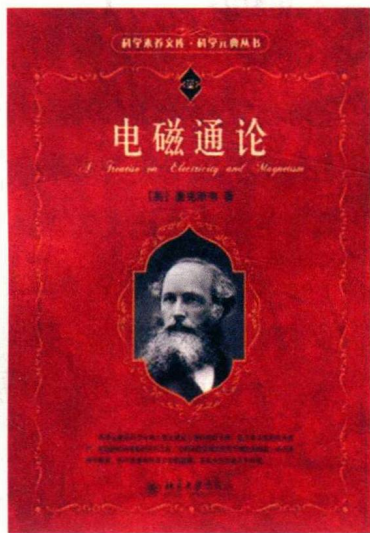


图 1—2 《电磁通论》

遗憾的是，在麦克斯韦生活的那个时代，很多人并不知道有电磁波存在，加之他的电磁学说非常超前、艰深难懂，他的预言和理论很长时间不被人理解。直至他去世九年后的 1888 年，德国科学家赫兹终于用实验证实了电磁波的存在。1898 年，马可尼又进行了多次实验，不仅证明光是一种电磁波，而且发现了更多形式的电磁波，如 X 线、 $\gamma$  线、红外线、紫外线等，所有这些射线都可以用麦克斯韦方程组加以分析。至此，麦克斯韦的预言终于得到了大家的认可。如今，电磁理论广泛应用于经济建设、国防军事和社会生活等各领域，正在深刻影响和改变着我们这个世界。



【人物简介】麦克斯韦，全名詹姆斯·克拉克·麦

克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1831—1879)，英国物

理学家、数学家，经典电动力学的创始人，统计物理学的奠基人之一，被誉为“电波之父”。

麦克斯韦是继法拉第之后又一位集电磁学大成于一身的伟大科学家，但他生前所获得的赞誉远不如法拉第，生活也远不如法拉第幸运。他一生都不被人理解：中学时代他的服装不为同伴理解；大学时代他的言语不为听者理解；到后来，他的学说也是很长时间没有知音。直到他

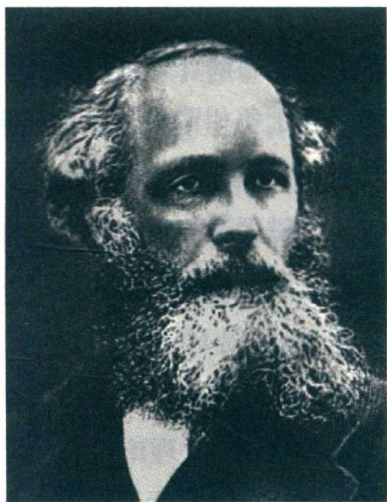


图 1—3 麦克斯韦

去世九年后，在赫兹证明了电磁波存在时，人们才意识到他的伟大，并认为他是“自牛顿以后世界上最伟大的数学物理学家”。