

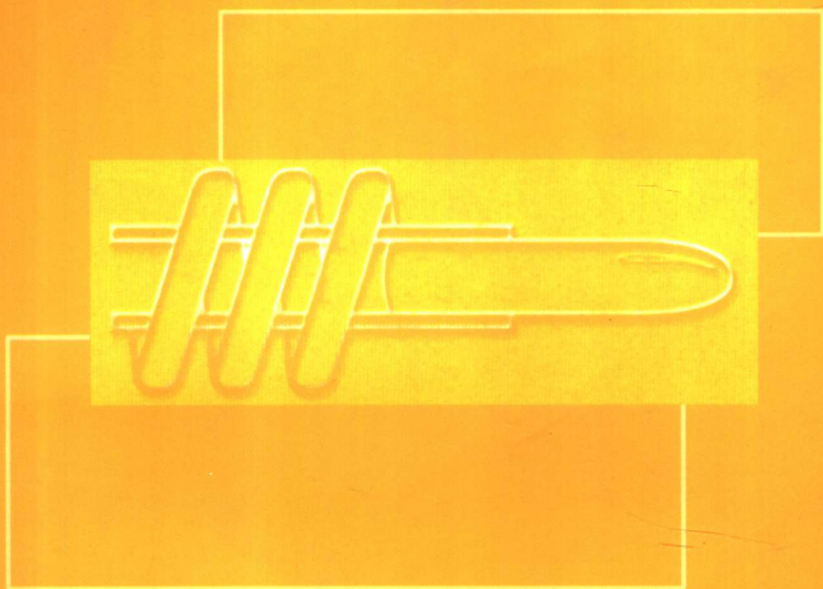
电磁轨道炮的 科学与技术

〔美〕理查德·埃斯特里·马歇尔
(Richard A. Marshall)

〔中〕王莹 (Wang Ying) 著
曹延杰 译 李军 审校

兵器工业出版社

责任编辑：周宜今
封面设计：李 晖



ISBN 7-80172-692-8



9 787801 726926 >

ISBN 7-80172-692-8

定价：16.00元

电磁轨道炮的 科学与技术

[美] 理查德·埃斯特里·马歇尔
(Richard A. Marshall) 著
[中] 王莹 (Wang Ying)

曹延杰 译 李 军 审校

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书共分 10 章。绪论介绍了电磁轨道炮产生的背景及轨道炮的一些概念；第 2 章介绍了轨道炮的研究简史；第 3、4 章分别介绍了固体电枢的物理特性和类型；第 5 章介绍了电磁场测量的要求和方法；第 6 章介绍了等离子体电枢；第 7 章介绍了轨道炮导轨；第 8 章介绍了轨道炮的脉冲电源；第 9、第 10 章及附录分别介绍了轨道炮系统、应用及堪培拉单极发电机电刷设计方面的情况；最后罗列了原著的参考文献。

本书实用性强，对从事电磁发射技术研究的工程技术人员具有较高的参考价值；对对电磁炮感兴趣的军事爱好者而言，也是一本很好的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁轨道炮的科学与技术/(美)理查德·埃斯特里·马歇尔,王莹著,曹延杰译. —北京:兵器工业出版社, 2006. 12

ISBN 7-80172-692-8

I. 电… II. ①理…②王…③曹… III. 火炮—研究 IV. TJ399

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 080372 号

出版发行:兵器工业出版社

发行电话:010-68962596,68962591

邮 编:100089

社 址:北京市海淀区车道沟 10 号

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市登峰印刷厂

版 次:2006 年 12 月第 1 版第 1 次印

责任编辑:周宜今

封面设计:李 晖

责任校对:郭 芳

责任印制:赵春云

开 本:850×1168 1/32

印 张:6

字 数:158 千字

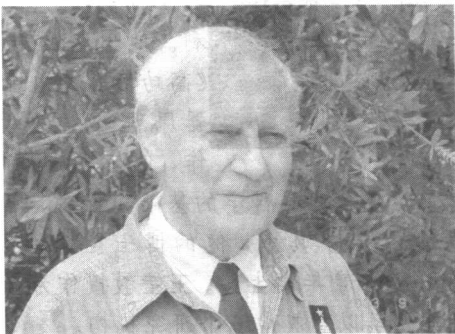
定 价:16.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

作者简介

理查德·埃斯特里·马歇尔

1927年理查德·埃斯特里·马歇尔出生于新西兰奥克兰市奥瓦拉卡郊区。他先后在奥克兰、纳皮尔、惠灵顿和璜加雷就读，后来又回到位于奥克兰的新西兰大学奥克兰学院（当时的名称）学习。1951年他获得了该大学的理学学士学位，1952年又获得了荣誉工学学士学位。同一年他荣获了哈佛大学的萨尔顿斯多尔奖学金，并于1953年获得了哈佛大学理学硕士学位。1979年，由于他的研究工作及发表的一些成果，被授予澳大利亚国立大学哲学博士学位。



在他漫长的工作生涯中，他曾或长或短地供职于许多国家，如新西兰、澳大利亚、加拿大、英国、荷兰、美国以及中国的工业部门、政府机构或大专院校。他最著名的两个工作项目：一个是用于堪培拉单极发电机的1.6MA电刷装置的研究，第二个是由他领导的澳大利亚国立大学电磁轨道炮研究小组的工作。这些工作的有关细节在我们的两本书里都有所提及。

王莹

王莹1938年1月8日生于中国黑龙江省绥化市。1964年毕业于哈尔滨工业大学。在西北核技术研究所工作期间，主要从事脉冲功率技术的研究。从1981年起，在军械工程学院从事电磁发射技术和新概念武器的研究和教学工作。曾任新概念武器研究所



所长以及中国电磁发射学会的主席。

他设计和主持的研究项目包括：中国第一台油线强电流电子束加速器(1MV)的研制及装配工作；电爆炸装置(800kA)；中国第一台电感储能型闪光 X 射线机(400kV)。截至目前，他已申请并获得了 10 项发明专利。他出版的专著(英文版或中文版)有：《高功率脉冲电源》、《电炮原理》、《新概念武器原理》、《电发射物理学》等。通过这些工作，他使电磁发射原理得以系统化，并奠定了新概念武器科学的基础。至今，他指导过的硕博研究生已经超过 30 人。其中，他的博士生李军荣获了世界第一个“Peter Kemmey”青年学生奖。王莹教授作为合作教授和导师，还受聘于武汉大学以及其他 6 个研究机构。

译者简介

曹延杰 山东莱州人，1963 年 6 月出生，2001 年获得博士学位。现在主要从事工程问题数值模拟技术的研究。

李军 四川仁寿人，1968 年 4 月生，1999 年获得工学博士学位。主要从事电磁发射武器技术研究。

译者序

从电磁炮概念的提出到今天，已有逾百年的时间。在长达百年的时间里，电磁炮的发展可谓是历经沧桑，几度夕阳。

1978年，本书的第一作者——澳大利亚国立大学的马歇尔博士(Marshall)等公布了惊人的研究成果：用550MJ的单极发电机和等离子体电枢，在5m长的轨道上把3g聚碳酸酯弹丸加速到5.9km/s的速度。这一重大的成就，从实验上证明了用电磁力可将较重的弹丸加速到超高速的可能性，从此，电磁炮的研究工作开始迈入了新阶段。

马歇尔博士等人的划时代性成就使世界的科学家受到极大的鼓舞和启发，同时引起了各国军方的浓厚兴趣和关注，于是纷纷投入大量的人力、财力对电磁炮进行研究，并建立了不少电磁炮实验室。据报道，目前仍在从事电磁炮研究的国家有美国、俄罗斯、英国、法国、德国、以色列、伊朗等。其中，美国的研究处于领先水平。例如，美国海军正在致力于发展能改变“游戏规则”电磁轨道炮。该炮的口径为155mm，炮口初速为2500m/s，炮口动能为64MJ，射程超过300km。

综观电磁炮近三十年的发展历程，完全有理由相信：随着电力电子技术、脉冲功率技术以及材料技术的发展，电磁炮在未来战场上大显身手的时刻不会太遥远。

原著《RAILGUNS: their SCIENCE and TECHNOLOGY》是马歇尔博士对其近四十年从事电磁炮研究工作的总结。在电磁发射技术蓬勃发展的今天，我们对马歇尔博士的远见卓识和孜孜不

倦的敬业精神非常敬佩，感到有责任把他的工作介绍给更多的对电磁炮关注的读者。如果我们的工作能对电磁发射技术的发展有一点帮助的话，我们将感到莫大的欣慰。

王向阳、张玮、吴占胜、刘文彪、王成学、邹本贵、何静等参与了部分章节的翻译工作，在此，对他们的劳动深表谢意。

在翻译过程中，译者的博士生导师、我国电磁发射技术的倡导者、本书作者之一王莹教授给予了无私的帮助，在此，向王老师表示深深的敬意。

由于我们的水平所限，书中难免有疏漏之处，敬请专家、读者给予指正。

译者

2006年5月（烟台）

序

把物体加速到越来越高的速度一直是人类长期持续追求的目标。最初，人类使用纯粹的体力来抛射物体，后来，使用存储的机械能和机械弹射器，再后来，随着中国黑火药的发明，人类开始利用化学火炮或火箭中的化合物燃烧或爆炸来完成各种需要高速度的发射任务。这些技术的进步使得发射速度从人力抛的石块或棒球所能达到的每秒几十米增加到爆炸驱动的金属片的每秒数千米。但是，到目前为止，以前试图利用电能和电发射器达到极高速度的尝试，都以一连串令人沮丧的、失败的结果而告终。自20世纪初开始，人们为发展高速电磁炮付出了大量的努力，但是1957年的美国“超高速冲击会议”对电磁发射技术的现状作了总结，得出了“在不久的将来用电磁炮获得超高速是不可能的”的结论。

20世纪70年代末，令人瞩目的奇迹发生了：由理查德·马歇尔博士和约翰·巴伯博士在堪培拉的澳大利亚国立大学进行的试验获得了成功。他们利用一个大型的单极发电机(550MJ)，在5m长的轨道上把一重3g的聚碳酸酯弹丸完好无损地加速到5.9km/s。这是电磁炮发射速度的世界纪录，它无疑证明了电磁炮可以跨入超高速领域。巴伯博士在其博士学位论文中记述了指导他们的开拓性研究取得成功的基础物理学和技术方面的问题。

尽管电磁发射结构类型繁多，但直到今日，只有电磁轨道炮成为利用电能把相当质量的物体加速到超高速的唯一实用工具。由理查德·马歇尔教授和王莹教授所著的《电磁轨道炮的科学》与

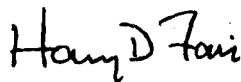
技术》一书，对轨道炮这个既重要又令人振奋的超高速研究手段给予了非常实用的介绍。在书中，他们首先对理解轨道炮的工作过程所需的基础电磁学知识作了简要的介绍，接着对早期的研究工作（包括堪培拉的划时代的努力）进行了简要的描述。书中还提供了颇有价值的实用信息，以帮助读者理解利用电磁轨道炮及其电源获得超高速所涉及的物理和工程问题。

本书是当今世界两位领袖级专家撰写的权威性专著。马歇尔教授不仅建立了电磁发射器的超高速纪录，率先在高性能脉冲电源上使用固体电刷，发展了用于高性能轨道炮的等离子体电枢和固体电枢，提出了很多种新颖的轨道炮和功率电源结构方案。为了肯定他取得的卓著成就，国际电磁发射技术委员会常务委员会授予了他第一个 Peter Mark 奖章，以“表彰其对电磁发射科学和技术发展所做的突出贡献”。王莹教授前些年编著了多本关于脉冲电源和电磁发射技术的专著。他的早期作品《电炮原理》和《新概念武器原理》为中文版，在西方不能得到。《电磁轨道炮的科学与技术》的姊妹篇——《电发射物理学》，也是与马歇尔博士的合著。这两本专著均为英文版。

王莹教授发起、组织、指导了中国电磁发射的研究，积极倡导电磁发射技术的发展和應用。

马歇尔和王莹两位教授关于电磁轨道炮著作的一个最重要的贡献，是为那些对这个崭新且重要的领域感兴趣的实验者提供了详细实用的数据和指导。该专著连同《电发射物理学》以及电磁发射会议的论文集，为应用电磁能推进物体到超高速以及开拓全新的发射领域，提供了极其重要的知识宝库。

国际电磁发射技术学会常务委员会主席



2003年10月

哈里·D·费尔博士是位于奥斯汀的得克萨斯大学的高级技术研究所(IAT)的所长,也是该所的创始人。IAT 是美陆军依附大学而建的一个研究中心,该中心重点研究超高速物理学和电动力学。作为一名富有经验的实验室主任、项目管理者及物理学家,费尔博士不断地发起、指导和管理许多对国家具有重大意义的多学科复杂技术攻关。其中包括 DARPA (美国



Dr. Harry D. Fair

国防部高级研究计划局)、陆军和海军三方合作的装甲及反装甲项目,陆军推进项目,战略防御计划中的先进动能技术项目,以及陆军关于爆炸和反物质材料的固态物理和化学项目等。费尔博士拥有特拉华州立大学的固态物理学博士学位和化学物理学硕士学位;拥有印第安纳州立大学物理学的学士学位。

前 言

本书所提供的材料是第一作者近 40 年的工作成果，其中大部分是他在这段时间所做试验的总结，还包括一些在试验前或试验后所做的分析。书中提供了大量的帮助读者理解本书所需的基础物理方面知识，这些知识有助于那些对该领域感兴趣的读者，在该领域做出他们自己的贡献。

若没有澳大利亚纳税人的援助，书中的许多工作很可能无法开展。例如，堪培拉单极发电机的设计和建造就花了大约 200 个年工时，花费的资金大约等于又一个 100 个年工时。建造堪培拉轨道炮花了相当于大约 20 个年工时的资金，做试验又花了相当于 5 个年工时的资金。在此，我们对纳税人的奉献深表谢意。

其次，我们应该感谢已故教授，马克·奥利芬特爵士的远见卓识及对我们的鼓励，他生前是澳大利亚国立大学物理研究学院的创办主任。在他的积极倡导下，建成了三号堪培拉单极发电机。我们还要感谢工程物理系的全体职员，特别是技术人员，他们的努力工作使单极发电机和轨道炮得以运转。

我们还要感谢英国牛津大学的莱斯利·C. 伍兹教授，在他的帮助和鼓励下开始筹划本书；感谢澳大利亚墨尔本的大卫·R. 萨德丁博士，我们与他通过电话和电子邮件就许多细节，特别是 8.9 节和 8.10 节进行了详细的讨论；感谢得克萨斯州奥斯汀的史蒂芬·布莱斯博士，他撰写了 10.3 节并校对了手稿；还要感谢我的妻子，她也校对了手稿。

著者

2003 年 10 月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 轨道炮产生的背景	(1)
1.2 轨道炮	(2)
1.3 作用于电枢的力	(5)
1.4 作用于电枢的“ $J \times B$ ”力	(6)
1.5 毕奥—萨伐定律	(7)
1.6 电流层轨道炮	(10)
1.7 4 倍口径法则	(12)
1.8 实际轨道炮面临的问题	(13)
1.9 高频电感梯度 L'	(14)
1.10 低频电感梯度 L'	(16)
1.11 导轨对的磁阻分布	(18)
1.12 分层导轨的低频电感梯度 L'	(19)
1.13 轨道炮系统的力平衡	(20)
2 轨道炮研究简史	(23)
2.1 一些早期的电炮	(23)
2.2 二战后的研究	(25)
2.3 堪培拉的研究工作	(27)
2.4 世界各国对轨道炮的研究	(29)
3 固体电枢的物理特性	(32)
3.1 电枢问题	(32)
3.2 传统接触理论	(32)

3.3	磁悬浮力	(33)
3.4	接触生热	(35)
3.5	多接触点的评估	(35)
3.6	电流在导体中的扩散	(37)
3.7	速度趋肤效应	(41)
3.8	载流量和载流特征量	(42)
3.9	电枢加热	(42)
3.10	铝的实际载流量	(44)
3.11	过冷效应对作用能力的影响	(46)
3.12	理论速度极限	(47)
4	固体电枢的类型	(49)
4.1	堪培拉轨道炮	(49)
4.2	多叶电枢	(50)
4.3	Okaloosa 电枢试验发射装置(OAT)	(51)
4.4	实际电枢尺寸的确定	(52)
4.5	多排电枢	(53)
4.6	梯度电阻率的采用	(55)
4.7	调位电枢	(56)
4.8	单叶电枢	(58)
4.9	单排导体电枢	(59)
4.10	单体电枢	(60)
4.11	准流体电枢	(62)
4.12	固体电枢的小结	(66)
5	电磁场测量的要求和方法	(67)
5.1	炮口电压	(67)
5.2	B 点环线圈	(68)
5.3	利用罗果夫斯基线圈测量电流	(70)
6	等离子体电枢	(72)
6.1	等离子体电枢概述	(72)

6.2	等离子体电枢结构	(73)
6.3	等离子体电枢温度	(75)
6.4	等离子体电枢速度极限	(78)
6.5	固体电枢向等离子体电枢的转换	(79)
6.6	混合电枢	(84)
7	轨道炮导轨	(86)
7.1	概述	(86)
7.2	轨道炮的炮膛结构	(86)
7.3	固体导轨	(87)
7.4	分层导轨	(88)
7.5	带斜槽的导轨	(89)
7.6	导轨表面的损伤机理	(91)
7.7	导轨表面剥落	(92)
7.8	解决方法	(95)
8	轨道炮的脉冲电源	(96)
8.1	总体性能要求	(96)
8.2	单极发电机	(98)
8.3	全铁旋转单极发电机	(102)
8.4	自励空芯单极发电机	(103)
8.5	电容器	(106)
8.6	磁通压缩发生器	(106)
8.7	爆炸驱动磁通压缩发生器	(108)
8.8	旋转磁通压缩发生器	(109)
8.9	补偿式脉冲交流发电机(CPA)	(110)
8.9.1	电感减小与磁通压缩	(111)
8.9.2	单组件、高重复利用率的电源	(112)
8.9.3	得克萨斯大学机电中心的 CPA 研究	(113)
8.9.4	小结	(117)
8.10	脉冲交流发电机	(118)

8.10.1	提高交流发电机系统的功率密度	(119)
8.10.2	典型的交流发电机系统	(120)
8.11	磁通泵	(124)
8.12	惯性飞轮与压力容器储能的比较	(130)
8.13	磁通泵的燃烧驱动	(133)
9	轨道炮系统	(135)
9.1	对轨道炮的一般要求	(135)
9.2	电感器馈电的轨道炮	(135)
9.3	增强型轨道炮	(137)
9.4	单极发电机馈电的轨道炮系统	(139)
9.5	电容器馈电的系统	(140)
9.6	电容器馈电的系统中组件的选定	(141)
9.7	分布式能量储存器馈电的轨道炮	(143)
9.8	采用“主动”储能器的分布能量储存系统	(144)
9.9	“被动”储存式分布储能系统	(146)
10	应用	(148)
10.1	武器	(148)
10.2	过山车和飞行器弹射	(148)
10.3	冲击物理	(149)
10.4	空间发射	(150)
附录	(152)
I.	堪培拉单极发电机电刷的设计	(152)
II.	汉英术语对照索引	(155)
参考文献	(161)

1 绪 论

1.1 轨道炮产生的背景

在详细介绍轨道炮之前，有个问题需要回答：为什么我们对轨道炮感兴趣？

简单的回答是，与常规火炮相比，轨道炮的性能指标在很多方面更加优越。

纵观常规火炮 700 年的发展史，人们的兴趣是如何用火炮把弹丸加速到更高的速度。对于火炮来说，弹丸的初速越高意味着其射程就越远，这是炮手所希望的。在射程一定的前提下，弹丸初速的提高意味着缩短其飞行时间，从而提高弹丸的命中率。

在过去的大约 40 年里，另外一个原因引起了军方对提高弹丸初速的关注：即杆状弹丸具有穿透坦克装甲的能力。弹丸的穿甲性能随着速度的增加而提高。到目前为止，野战火炮弹丸的炮口速度不超过 1.7km/s ，这主要是由火药燃气的性质所决定的。火药燃气压力在给弹丸加速的同时，也给本身加速。很明显弹丸的速度受到火药燃气最大速度的限制，火药燃气必须跟得上弹丸才能对其加速。弹丸的最大速度大概等于火药燃气的声速。实际上，当弹丸沿炮膛加速时，由于绝热膨胀火药燃气开始降温，在火药燃气开始降温冷却之前，弹丸的出口速度就已经接近于燃气的声速[Corner (1991), Krier and Summerfield (1979), Stiefel (1988), Lukasiewicz (1952)]。

气体动力炮要得到更高的速度，显然要利用具有更高声速的