

电炮原理

王莹肖峰 编著



国防工业出版社

ISBN 7-118-01300-5



9 787118 013009 >

ISBN 7-118-01300-5/TJ·94

定价：30.50 元

电 炮 原 理

王 莹 编著
肖 峰

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

电炮原理/王莹,肖峰编著. —北京:国防工业出版社,1995.3
ISBN 7-118-01300-5

I. 电… II. ①王…②肖… III. 电气炮-基础理论 IV. TJ399

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 04338 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京市怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 28 $\frac{3}{4}$ 657 千字

1995 年 3 月第 1 版 1995 年 3 月北京第 1 次印刷

印数 1—1000 册 定价:30.50 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

著名科学家、国家“863”高技术研究发展计划倡导者之一王淦昌教授为本书出版的题词：

我首先祝贺电发射领域有一本好的书《电炮原理》问世！

超高速发射物体对增强国防能力、改变人类的生活环境和促进社会文明都有着积极的作用，所以一直是人们长期努力钻研的课题之一。传统的化学推进技术已不能满足人类的进一步要求，因此，从原理和能源上变革发射技术势在必行。

电发射是脉冲功率技术新开辟的一个极有前途的应用领域。与传统的化学推进技术比较起来，具有明显的优越性，为超高速发射物体提供了一条新的道路。

本书的作者远见卓识，敏锐地体察到科学发展趋势，顺应科技发展的需求，以从事脉冲功率技术工作积累的经验，立足理论，重视实践，首先在我国撰写了一本有关电发射方面的专著——《电炮原理》。

此书对电发射器做了科学的分类，全面系统地阐述了各种电发射器的工作原理和相关技术的基础，为这一领域的知识“仓库”构筑起框架。这是一件很有意义的工作，不仅对从事航天、军事和其它科学试验应用电发射技术的人有益，而且对那些想了解电发射技术的人也是有益的。我相信，本书的出版，对我国电发射技术和脉冲功率技术的发展必将起到推动作用，对相关学科的发展亦会大有帮助。这是一本值得一读的书，它能开阔你的眼界和启迪你的思路。

我们要感谢作者和为此书出版做出工作的所有朋友们。

我再次祝贺《电炮原理》一书出版，并衷心祝愿：

我国科学技术日益繁荣！

我国国防科学技术昌盛！

我国脉冲功率技术与电发射技术相互结合，长足进步！

王淦昌

1993, 11, 24

序 (一)

值此电炮技术迅猛发展、正步入实用性试验阶段之际,一本系统阐述电炮物理基础和技术基础的书——《电炮原理》问世了,这无疑是一件可喜可贺的事。

电炮或电(磁)发射器是使用电磁力或电能发射射弹的新型发射装置,其原理的提出已很久远,至少有近百年的历史。在漫长的发展过程中,几起几落,历尽沧桑。

电炮技术从本世纪 70 年代开始出现了突破性进展,究其原因主要有以下几方面:一是脉冲功率技术迅猛发展;二是材料科学及其工程技术有长足进步;三是等离子体物理学的基本理论和实验技术的发展;四是有先进的计算机仿真技术可资利用;五是电炮在军事技术方面具有重要的潜在应用前景。

电炮与传统的化学发射器(火炮、火箭等)相比有许多优点,但最主要的是电炮能发射出具有超高动能的射弹(即超高速弹丸或大质量有效载荷的发射体),这就使得它有可能应用于以下领域:在军事上,无论是战略防御还是战术作战,电炮可能成为新一代的高性能动能武器;在航天技术领域,电炮可能成为陆基对空间的定向发射器,把各种航天器发射到预定的轨道,也可作为推力器,在太空把数吨乃至数百吨的有效载荷按要求进行轨道转移(从某一轨道转移到另一轨道),利用电炮发射的超高速弹丸,还可用于对陨石、卫星、火箭再入大气层的烧蚀和气动性能的实验;在高压物理实验方面,可用电炮作为一种加载工具,对材料进行高压和超高压物态方程的研究;在高能量密度物理研究领域,由于某些电炮可把小质量弹丸加速到 50km/s 以上的速度,因此可能用于碰撞核聚变研究;此外,因多数电炮都是基于直线电动机原理工作的,故也可能借用电炮技术发展地面高速运输工具和金属成形工艺等。

自本世纪 70 年代澳大利亚国立大学马歇尔(Marshall)等人用现有的电源把 3g 弹丸加速到 5.9km/s 以后,许多国家的科研机构 and 军方都十分重视电炮的理论和实验研究工作。在我国,中国工程物理研究院流体物理所于 1986 年率先建造了我国第一台导轨炮试验装置,并把 0.34g 弹丸加速到 1.68km/s 的速度。接着,又于 1991 年建成了我国第一门电热炮实验装置,把 20g 弹丸加速到 1.85km/s 的速度,穿透了 30mm 厚钢板,取得了可观的成果。中国科学院等离子体物理所于 1988 年元月也建成了一台导轨炮实验装置,已能把 50g 弹丸加速到 3km/s 。该所还于 1990 年建成了一门线圈炮实验装置,把 44kg 的有效载荷加速到 14m/s 。此外,国内尚有几个单位在进行理论研究或部件性能单元技术的研究工作。

就世界范围而言,现在至少有十几个国家在从事电炮的研究。美国国防部从 1989 年开始,已把“脉冲功率技术”和“电炮”列入每财年向国会两院呈报的《美国国防部关键技术计划》中,且其经费投资强度逐年增加。1990 年,实验室导轨炮弹丸的炮口动能达到 9MJ ,已具有常规火炮达到的水平。近几年,在为实战使用需要而进行的电源小型化、新材料应用和提高弹丸抗峰值加速度破坏性能等方面,也取得了很大的进展,致使美国陆军装备研

究、发展和工程中心(ARDEC)目前正在尤梅(Yuma)试验靶场进行独立的导轨炮试验(见 Army Research, Development & Acquisition, March-April 1992, pp. 41-42)。这是世界上首次用车载电源走出实验室的导轨炮实用性试验。这门用补偿脉冲交流发电机(compulsator)作电源的 90mm 口径的导轨炮,弹丸的炮口动能为 9MJ。计划今年开始打“哑”弹试验,明年发射穿甲弹,并逐步将射程增大到 5km,预计 5 年后把世界上的第一门电磁炮装备部队。这一情况说明,电炮的理论和工程技术的关键问题,现已在美国取得了重大进展。

然而,迄今尚未见到世界上公开出版的系统论述电炮的专著。本书作者正是基于其敏锐的体察与胆识,通过辛勤劳动,编著了这本书。本书至少在以下三个方面值得称道:一是全书结构的完整性和系统性;二是对本领域某些科技术语规范化提出了明确的看法;三是对电炮提出了明确的分类意见。总之,本书的编著和出版是一件十分有意义的工作。全书内容丰富,是一本很有价值的参考书,值得正在从事和关心本领域研究工作的专家和科技人员一读。我相信,本书出版对推动我国电炮技术的发展,必将起到积极的作用。

中国科学院院士
中国工程物理研究院研究员

经福谦

1992 年 9 月 15 日

序（二）

——向致力于武器装备发展研究的开拓者们致敬

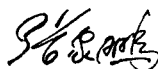
作为在军械战线工作多年的老兵，我为《电炮原理》一书的编辑出版感到欣慰和自豪。这本书之所以能吸引我，是由于电炮尚属世界军事强国竞相发展的一种全新概念的武器。在我国对电炮的研制还是刚刚起步，比较系统的介绍电炮方面的专著这还是首次（在世界上也尚未见到），这是作者近些年来潜心钻研的结晶，为我国及世界电炮的发展作了一件极为有益的工作。

大家知道，进入 80 年代以来，世界新技术革命的蓬勃发展，武器的更新换代越来越快，其发展趋势已从普通兵器向高技术兵器转化，研制和发展高技术武器，是世界各国军队的一个共同点。从近些年几场局部战争可以看出，先进的武器装备在现代战争中的作用大大加重。举世瞩目的海湾战争就是一场现代高技术装备的集中较量，参战国家是第二次世界大战以来最多的一次，投入的武器装备种类最全、水平最先进，为取得作战胜利的一方提供了保证。从中使我们清楚地认识到，武器装备在现代战争中的重要作用已是今非昔比。现今世界各发达国家按照各自的战略思想的变化，针对现代战争的特点，都在加紧改进和完善武器装备，使武器装备的发展已呈现出前所未有的深刻变化。

面对世界格局由旧质态向新质态的转变，特别是新技术的突破和高技术的发展，我军建设迈进了一个新的历史时期，发展现代技术和装备这是历史赋予我们的使命和责任。当今武器装备的发展离不开现代科学技术的进步和应用，可以说新型武器装备的各种性能集中反映了高新技术的成果，这是促使各种武器装备向高、精、尖方向发展的强大推动力。就电炮而言，它是利用电磁力或电能来发射弹丸的，可使弹丸的速度达每秒几千米到几万米，这是常规火炮望尘莫及的。尽管它还叫“炮”，但从原理和工作看，它已不再是传统火炮的概念了，无疑它将成为第三代或另一类发射武器。它的出现不仅使世界兵器家族里又增加新的成员，而且必将带动其它相关学科的发展。因此，我们只有依靠科技进步，才能推进武器装备的发展。

这是一本好书，不仅是从事电炮和常规兵器研究者的参考书，而且也是从事武器装备维修和管理人员以及关心国防建设和武器发展的广大读者的可读之物。

我感谢作者为新兵器的发展所做出的巨大努力和贡献！



总后勤部军械部部长

一九九二年八月十日

前 言

电炮其实质乃是一种新型的超高速电(磁)发射装置。它的概念虽然远超出“炮”的范畴,但作为一个简明的俗称,“电炮”或“电磁炮”二词已为人们所接受。本书之所以用“电炮”取代传统的“电磁炮”称谓,是因为后者的概念不能包容方兴未艾的电热炮,以及考虑到电(磁)发射器领域的长远发展的缘故。

近百年来,从电(磁)发射概念的提出,到各种原理、不同结构的电炮家族的形成,电炮的发展可以说是历经沧桑,几度夕阳。近 10 余年来,由于科学技术的发展,电炮已开始步入实用化研究阶段。一些科技和军事强国,不惜投入巨资竞相发展。例如,美国在 1991~1995 财年间投资 5 亿零 9 百万美元研制电炮。

在当前世界范围内向高新技术兵器转化之际,为适应我国国防现代化的需要,我们在多年研究成果和积累资料的基础上,编著了《电炮原理》一书,奉献给广大读者。

本书在编写中,力求全面、系统地总结这一领域内的研究成果。书中重点地论述了各种电炮(导轨炮、线圈炮、重接炮、电热炮和混合炮)的工作原理和理论基础,并对电炮的主要部件,如电源、电枢、炮管及弹丸等,进行了较深入的分析和论述。它的出版,将对从事电(磁)发射、战略战术武器、航天、脉冲功率技术、高压物理试验以及受控核聚变和等离子体物理等专业技术人员,提供一本有价值的参考书。

在撰写本书时,我们力求正确地建造起电炮体系的完整框架,并对电炮家族加以科学地分类和定名。由于电炮是一门多学科交叉和蓬勃发展的高新技术,有关它的名词术语、概念和符号等,目前尚未有统一的规定,因此本书试图根据现实情况,对涉及的有关术语、符号加以规范化、标准化。例如“导轨炮”,有人认为应称“轨道炮”为宜;国外文献中的 *re-strike arc* 和 *secondary arc*,我们均定名为“再点火”,也可能有不同的看法。尽管我们在引用时反复推敲,但还可能有不妥之处。为了便于读者阅读使用,本书在正文前列出了符号表,书末附有汉英术语对照索引。还应指出,有些术语采用缩略语更能为专业人员所接受,如计算机中的 RAM 比用“随机存储器”更为通用。考虑这一情况,本书也采用了一些以英文缩写词表达的专门术语,如 MHD(磁流体动力学)、CPA(补偿脉冲交流发电机)、MFCG(磁通压缩发生器)、CAP(燃烧增强等离子体)、VISAR(可用于任意反射表面的激光速度干涉仪)等。同理,在某些场合,如矩阵中,以 i 代替 dI/dt ,显得更为简练、醒目,而且容易辨认。

在本书正式出版之际,我们特别感谢著名科学家、国家“863”高科技计划倡导者王淦昌教授为本书题词之鼓励;中国科学院院士经福谦研究员和解放军总后勤部军械部部长张家鹏高级工程师,他们在百忙中分别为本书作序;任兆杏研究员和郭增基副研究员分别主审了本书的全部书稿;沈克明、宁兆元、王永诚、戴松元、程健、李伟如、朵英贤、姚文凯、杨海升、吴为民等 11 位专家、学者参加了审稿,他们为本书的编写提出了许多宝贵意见。

浦发教授、王永悦研究员、宋丕极教授、马富学教授、王祖光教授、孙履师教授、饶德桀、胡国强研究员和胡君威副教授对作者撰写本书给予了鼓励、支持和帮助;刘爱文、高德

香等同志对本书的资料搜集、整理,以及有关的实验也做了不少的工作。

我们还对暂居海外的李燕京女士表示由衷的谢意,她促成本书早日出版的一片赤诚之意我们将铭记在心。

作者*

1992年8月21日

* 王莹 教授。1963年毕业于哈工大电物理专业。现工作在解放军军械工程学院(石家庄,050003);
肖峰 研究员。1966年毕业于华东师范大学物理系。现工作在中国兵器工业第208所(北京昌平1023信箱,102202)。

目 录

主要符号表	1
第一章 绪论	5
1.1 电炮产生的背景	5
1.2 电炮的发展	7
1.2.1 电磁炮的发展	7
1.2.2 电热炮的发展	8
1.2.3 电炮现状	10
1.3 电炮的前景	11
1.4 电炮的分类	14
参考文献	16
第二章 导轨炮	17
2.1 简单导轨炮	17
2.1.1 机电模型	17
2.1.2 控制方程	20
2.1.3 能量分析	24
2.1.4 转换效率	26
2.1.5 炮口电弧	30
2.1.6 后坐力	32
2.2 分散馈电的导轨炮	34
2.2.1 分散馈电导轨炮的演进	34
2.2.2 分散储能炮的仿真方法	35
2.2.3 分散储能炮理论分析	37
2.2.4 分散电流导轨炮	43
2.3 分段导轨炮	44
2.3.1 性能概述	44
2.3.2 效率分析	47
2.4 串联增强的导轨炮	49
2.4.1 层叠式增强	50
2.4.2 平面式增强	52
2.4.3 保护板增强	55
2.5 外场增强的导轨炮	58
2.5.1 常规导体增强	60

2.5.2 超导体增强	60
2.6 炮口分流的导轨炮	65
2.7 多轨导轨炮	69
2.7.1 圆口径四轨炮	70
2.7.2 方口径四轨炮	72
2.7.3 保护板增强四轨炮	74
2.7.4 非对称的多轨炮	77
2.8 分立电极导轨炮	78
2.9 超导悬浮电枢导轨炮	81
2.10 同轴轨导轨炮	84
2.11 多相导轨炮	86
2.11.1 问题的提出	86
2.11.2 多相导轨炮概念	86
2.11.3 多相 CPA-导轨炮的特性	88
参考文献	91
第三章 线圈炮	93
3.1 线圈炮理论基础	93
3.1.1 基本原理	93
3.1.2 磁悬浮浅论	98
3.1.3 设计原则	101
3.1.4 换向	106
3.2 电刷换向的螺旋线圈炮	109
3.2.1 设计准则	110
3.2.2 能量转换	113
3.2.3 网孔-矩阵法分析	116
3.3 无刷螺旋线圈炮	120
3.3.1 消磁波线圈炮	120
3.3.2 外电压换向的线圈炮	121
3.4 直流电枢分立驱动的线圈炮	123
3.4.1 单相激励	124
3.4.2 双相激励	126
3.5 单级脉冲感应线圈炮	129
3.5.1 脉冲感应加速原理	129
3.5.2 麦金尼(Mckinney)分析法	132
3.5.3 哈特(Hart)分析法	134
3.5.4 伯纳德斯(Bernardes)分析法	135
3.6 同步感应线圈炮	138
3.6.1 数学模型	139
3.6.2 MHD 模型和品质因数	141
3.6.3 θ 线圈炮	143

3.7 异步感应线圈炮	148
3.7.1 原理	148
3.7.2 电枢电流数学模型	151
3.7.3 性能分析	152
3.7.4 电容器激励	158
3.7.5 发电机激励	164
3.8 磁化弹丸行波炮	170
3.8.1 加速原理	170
3.8.2 典型炮	172
3.9 磁阻线圈炮	174
参考文献	178

第四章 重接炮	180
4.1 概述	180
4.1.1 重接炮的提出背景	180
4.1.2 重接炮性能简介	181
4.2 板状弹丸重接炮	183
4.2.1 重接原理	183
4.2.2 性能分析	186
4.2.3 电枢(或弹丸)电流计算	190
4.3 柱状弹丸重接炮	192
4.3.1 特性	192
4.3.2 数值分析用模型	194
参考文献	197

第五章 电热炮	198
5.1 引言	198
5.2 细管侧限放电型电热炮	199
5.2.1 单管式	199
5.2.2 多管式	201
5.3 等离子体药筒型电热炮	202
5.4 等离子体箍缩型电热炮	204
5.4.1 接触式 Z 箍缩电热炮	205
5.4.2 非接触式 Z 箍缩电热炮	210
5.4.3 θ 箍缩电热炮	217
5.5 爆炸导体电热炮	221
5.5.1 一般分析	222
5.5.2 气化-爆炸波理论模型	224
5.6 电子束电热炮	227
5.7 随行电极电热炮	229
5.7.1 长弧电热炮	229

5.7.2 电热弹丸型电热炮	232
5.8 药室放电型电热炮	233
5.8.1 单电极对型	233
5.8.2 多电极对型	234
5.8.3 药筒型	234
5.9 液态工质 CAP 炮	236
5.9.1 放电管等离子体性状模型	238
5.9.2 燃烧室内工质的物化状态	241
5.9.3 工作流体	244
5.9.4 一类实用电路	248
5.10 侧注入等离子体电热炮	250
5.10.1 结构和原理	250
5.10.2 细节说明	252
参考文献	253
第六章 混合炮	255
6.1 电热-导轨炮	255
6.2 导轨-线圈炮	258
6.2.1 分立线圈驱动型	258
6.2.2 连续线圈感应型	261
6.3 火炮-导轨炮	263
6.3.1 线膛型	263
6.3.2 滑膛型	265
6.4 磁通聚集加强炮	266
6.4.1 磁通聚集感应线圈炮	266
6.4.2 变动量电磁火炮	268
6.5 “火炮”馈电的导轨炮	269
6.6 磁压缩等离子体炮	273
6.7 电磁火箭炮	275
6.7.1 基本原理	276
6.7.2 理论分析	278
参考文献	280
第七章 电源	281
7.1 电炮对电源的要求	281
7.2 脉冲功率电容器	286
7.2.1 高压脉冲电容器	286
7.2.2 双电层电容器	287
7.2.3 电池-电容器联合电源	289
7.3 补偿脉冲交流发电机	290
7.3.1 主动 CPA	292

7.3.2 被动 CPA	294
7.3.3 选择被动 CPA	296
7.3.4 高电压发电机	298
7.4 增频发电机	300
7.5 变磁通旋转压缩发生器	303
7.5.1 普通 MFCG 理论基础	303
7.5.2 变磁通旋转 MFCG	304
7.6 圆盘交流发电机	306
7.6.1 单转子结构	306
7.6.2 多转子结构	307
7.7 HPG-电感器组合电源	308
7.7.1 单极发电机 (HPG)	308
7.7.2 电感储能器	310
7.8 特种脉冲磁流体发电机	312
7.8.1 RBR 脉冲磁流体发电机	312
7.8.2 磁流体电容器	315
参考文献	317

第八章 电枢	319
8.1 电枢的一般分析	319
8.1.1 概述	319
8.1.2 电枢的效率分析	320
8.1.3 模型的改进	323
8.2 固体电枢	325
8.2.1 固体电枢的结构	325
8.2.2 固体电枢的电流分布	328
8.2.3 固体电枢的最小质量	329
8.2.4 固体电枢的材料选择	331
8.3 等离子体电枢	333
8.3.1 等离子体电枢的形成	333
8.3.2 等离子体电枢作用过程及状态变化	335
8.3.3 再点火电弧控制技术	338
8.3.4 烧蚀对等离子体电枢性能的影响	340
8.3.5 等离子体电枢的磁流体动力学特性	343
8.3.6 等离子体电枢模型综述	345
8.4 混合电枢	348
8.5 过渡电枢	350
8.6 线圈炮电枢和电枢电刷	351
8.6.1 电枢的电和热载荷	351
8.6.2 多匝线圈电枢的机械结构	353
8.6.3 电枢电刷的理论分析	354
参考文献	357

第九章 炮管设计分析	358
9.1 概述	358
9.1.1 设计要求	358
9.1.2 一般分析方法	359
9.2 导轨炮炮管结构及其机械特性	360
9.2.1 大口径高强度导轨炮炮管	360
9.2.2 V形块结构增强导轨炮炮管分析	362
9.2.3 超导外磁场增强导轨炮(SARG)炮管	366
9.2.4 其它	369
9.3 导轨炮的电热特性	372
9.3.1 速度趋肤效应及求解电流分布的方法	372
9.3.2 电感和电流分布	376
9.3.3 趋肤深度、电阻和温度分布	379
9.3.4 导轨电阻和温度的关系	382
9.4 炮管内膛材料	383
9.4.1 炮管材料研究试验和进展	383
9.4.2 绝缘体材料的选择和评价	385
9.4.3 导轨材料及其烧蚀	387
9.5 线圈炮炮管的机械响应	389
9.5.1 集总参数分析方法	389
9.5.2 炮管线圈模型	390
参考文献	392
第十章 实验用弹丸	394
10.1 概述	394
10.2 典型弹丸结构	395
10.2.1 早期实验用弹丸	395
10.2.2 探索中的实用弹丸结构	396
10.2.3 两种结构新颖的弹丸	397
10.2.4 电磁电热弹丸	399
10.3 弹丸在膛内运动时的阻力模型	402
10.3.1 摩擦阻力	402
10.3.2 烧蚀阻力和电枢粘滞阻力	404
10.3.3 磁场增强导轨炮的弹丸振荡	405
10.4 拟用弹丸的设计实例分析	406
10.4.1 小圆口径尾翼稳定弹丸	407
10.4.2 方口径的质量稳定弹丸	410
10.4.3 高速穿甲弹模拟分析简介	413
参考文献	415

附录 主要诊断技术	416
A.1 脉冲电流的测量	416
A.2 用 B 点探头测量变化磁场	420
A.3 脉冲电压的测量	422
A.4 弹丸速度和位移的测量	426
A.5 等离子体的温度测量	430
A.6 等离子体密度和成分等的测量	433
A.7 其它测量	436
参考文献	438
汉英术语对照索引	440