

电磁轨道发射装置 优化设计与损伤抑制方法

李小将 王华 王志恒 万敏 武昊然 王卫杰 著

Dianci Guidao
Fashe Zhuangzhi Youhua Sheji
yu Sunshang Yizhi Fangfa



国防工业出版社
National Defense Industry Press

电磁轨道发射装置优化 设计与损伤抑制方法

李小将 王 华 王志恒 万 敏
武昊然 王卫杰 著



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是一本关于电磁轨道发射装置优化设计与损伤抑制方法研究的专著,主要内容由三部分组成,共11章。第1章绪论,主要介绍电磁轨道发射装置组成、工作原理、工作流程、关键技术以及优化设计和损伤抑制方法的研究现状。第2~5章为本书第一部分内容,主要研究电磁轨道发射装置的优化设计。第6~8章为本书的第二部分内容,主要研究电磁轨道发射装置损伤机理及抑制方法。第9~11章为本书的第三部分内容,主要进行电磁轨道发射装置系统模型、优化设计效果与损伤抑制效果的试验验证。

本书内容新颖,前沿性、应用性较强,既可供从事电磁轨道发射技术研究的工程技术人员参考和使用,亦可作为高等院校相关专业的教师和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁轨道发射装置优化设计与损伤抑制方法/李小将等著.
—北京:国防工业出版社,2017.11
ISBN 978-7-118-11475-1

I. ①电… II. ①李… III. ①电磁推进—轨道发射—研究
IV. ①V514

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第302152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100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本710×1000 1/16 印张15¼ 字数270千字

2017年11月第1版第1次印刷 印数1—1500册 定价70.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

电磁轨道发射装置是一种依靠电磁力加速载荷的发射装置,具有载荷初速高、发射成本低、载荷初速易于控制等优点,在军事领域和科学研究领域显示出巨大的应用潜力,备受各国的重视和支持。20世纪70年代,随着脉冲功率技术和材料科学的进步,电磁轨道发射技术得到迅猛发展。特别是在1978年,澳大利亚国立大学马歇尔(Marshall)博士利用电磁轨道发射装置将聚碳酸酯弹丸加速到 5.9km/s ,这一成果震惊了超高速发射领域,引起了各国军方的浓厚兴趣和关注,同时掀起了电磁轨道发射技术的研究热潮。目前,从事电磁轨道发射技术研究的国家主要有美国、俄罗斯、法国、德国、伊朗、澳大利亚等。各国的研究机构在电磁轨道发射脉冲电源技术、发射组件技术、轨道抗烧蚀技术方面开展了大量研究工作,研制的电磁轨道发射装置炮口动能已达到 32MJ ,轨道使用寿命已超过百次发射。

尽管电磁轨道发射装置性能不断提升,但载荷出口速度和动能不高、电枢和轨道损伤引起的发射精度低、轨道可重复发射次数少,仍是制约电磁轨道发射装置实际应用的关键问题。电磁轨道发射装置的优化设计主要是指对轨道和电枢构型及参数的优化设计,它可以起到提高载荷出口速度和动能、提升系统效率、抑制损伤的作用,是提升电磁轨道发射装置性能的重要途径。因此,自电磁轨道发射概念提出以来,电磁轨道发射装置优化设计一直是电磁轨道发射技术的一项重要研究内容。电磁轨道发射装置发射电枢过程中,电枢与轨道处于高压、高速滑动电接触状态,容易发生电磁轨道发射装置的损伤。电磁轨道发射装置的损伤主要包括电枢熔化、电枢转换和轨道刨削。电枢熔化是指电枢在电流焦耳热和摩擦热作用下局部温度超过熔点并脱离电枢的现象。电枢转换是指电枢与轨道间由固体—固体的低压降滑动电接触状态到等离子体电弧接触的高压降接触状态的突然转变。轨道刨削是指电枢和轨道在高速滑动接触时,轨道表面发生的液滴状刨坑损伤现象。上述损伤严重影响载荷的发射精度并缩短轨道的使用寿命,制约了电磁轨道发射装置的实际应用。因此,研究电磁轨道发射装置的损伤抑制方法对电磁轨道发射装置的实际应用具有重要意义。

本书内容分为3部分,共11章。第1章为绪论,介绍电磁轨道发射装置组成、工作原理及工作流程,阐述电磁轨道发射装置关键技术及研究现状,总结电

磁轨道发射装置优化设计和损伤抑制方法研究现状。第一部分(第2~4章)介绍电磁轨道发射装置优化设计,其中第2章建立电磁轨道发射装置电枢动力学模型、脉冲放电电路模型、电感梯度计算模型及相应的仿真模型;第3章分析电磁轨道发射装置性能参数影响,研究基于多目标遗传算法的最优轨道参数设计方法;第4章给出轨道温度场和应力场仿真方法,研究基于温度场和应力场的轨道构型和材料优选;第5章仿真分析构型对接触特性和电热特性的影响,在此基础上进行电枢构型和参数的优化设计。第二部分(第6~8章)介绍电磁轨道发射装置损伤机理及抑制方法,其中第6章分析电枢熔化机理,并研究基于电枢预加速降低接触面热积累的电枢熔化抑制方法和基于炮口分流降低接触电阻焦耳热功率的电枢熔化抑制方法;第7章分析电枢转换机理,并研究基于尾翼分层降低涡流的电枢转换抑制方法;第8章分析轨道刨削机理,并研究基于低密度材料降低碰撞动能传递的轨道刨削抑制方法。第三部分(第9~11章)介绍电磁轨道发射试验,其中第9章介绍电磁轨道发射试验平台的设计、搭建以及试验参数测量方法;第10章试验验证前文建立的模型及轨道和电枢优化设计效果,主要包括系统模型正确性与优势性试验验证、轨道参数优化效果试验验证、电枢构型和参数优化效果试验验证;第11章试验验证电枢和轨道损伤抑制效果,主要包括基于炮口分流的电枢熔化抑制效果试验验证和基于尾翼分层的电枢转换抑制效果试验验证。

本书内容涉及多学科知识,覆盖面广,探索性强。由于作者水平有限,书中难免会有错误和不足,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电磁轨道发射装置概念与电磁力产生机理	1
1.1.1 电磁轨道发射装置概念	1
1.1.2 电磁力产生的机理	1
1.2 电磁轨道发射装置组成与工作流程	3
1.2.1 电磁轨道发射装置组成	3
1.2.2 电磁轨道发射装置工作流程	5
1.3 电磁轨道发射装置关键技术及应用	6
1.3.1 电磁轨道发射装置关键技术	6
1.3.2 电磁轨道发射装置应用	8
1.4 电磁轨道发射装置发展现状	9
1.5 电磁轨道发射装置优化设计与损伤抑制方法研究现状	14
1.5.1 轨道优化设计	14
1.5.2 电枢优化设计	15
1.5.3 电枢熔化机理分析及抑制方法	16
1.5.4 电枢转换机理分析及抑制方法	19
1.5.5 轨道刨削机理分析及抑制方法	22
参考文献	25

第一部分 电磁轨道发射装置优化设计

第 2 章 电磁轨道发射装置系统模型	32
2.1 电磁轨道发射装置系统数学模型	32
2.1.1 电枢动力学数学模型	33
2.1.2 脉冲放电电路数学模型	35
2.1.3 电感梯度计算模型	39
2.2 电磁轨道发射装置系统仿真模型	44
2.2.1 电枢动力学仿真模型	45

2.2.2	脉冲放电电路仿真模型	45
2.2.3	电感梯度仿真计算模型	47
2.3	仿真算例	49
2.3.1	参数设定与计算	49
2.3.2	仿真结果	50
2.4	小结	51
	参考文献	51
第3章	性能参数影响分析及轨道参数优化	53
3.1	性能指标	53
3.2	性能参数影响分析	54
3.2.1	轨道参数对性能的影响	54
3.2.2	电气参数对性能的影响	59
3.3	基于多目标遗传算法的最优轨道参数设计	61
3.3.1	多目标遗传算法	62
3.3.2	优化问题描述	64
3.3.3	优化流程	64
3.3.4	优化结果与仿真验证	65
3.4	小结	71
	参考文献	72
第4章	基于温度场与应力场仿真的轨道截面构型与材料优选	73
4.1	轨道截面构型与材料优选思路	73
4.2	轨道温度场与应力场仿真	74
4.2.1	多物理场耦合仿真方法	74
4.2.2	轨道热载荷分析与计算模型	75
4.2.3	仿真条件设置	79
4.2.4	仿真过程	80
4.2.5	仿真结果与分析	84
4.3	基于温度场与应力场仿真的轨道构型优选示例	86
4.3.1	轨道截面构型设计	86
4.3.2	不同构型的轨道温度场与应力场仿真与分析	87
4.4	基于温度场与应力场仿真的轨道材料优选示例	90
4.4.1	轨道材料选择	90
4.4.2	不同材料的轨道温度场与应力场仿真与分析	90
4.5	小结	93

参考文献	94
第 5 章 基于接触特性和电热特性分析的电枢构型和参数优化	96
5.1 电枢构型对接触特性的影响	96
5.1.1 C 形电枢接触特性仿真分析	96
5.1.2 电枢构型改进及接触特性仿真分析	99
5.2 电枢构型对电热特性的影响	105
5.2.1 C 形电枢电热特性仿真分析	105
5.2.2 改进构型电枢电热特性仿真分析	107
5.3 电枢优化设计	111
5.3.1 电枢构型优化设计	112
5.3.2 电枢参数优化设计	113
5.4 小结	117
参考文献	117

第二部分 电磁轨道发射装置损伤抑制方法研究

第 6 章 电枢熔化机理分析及抑制方法	118
6.1 电枢熔化机理分析	119
6.1.1 电枢熔化形成机理	119
6.1.2 电枢接触面热流计算与分析	120
6.1.3 电枢熔化过程仿真与分析	124
6.1.4 电枢熔化参数影响分析	128
6.2 基于电枢预加速降低接触面热积累的电枢熔化抑制方法	131
6.2.1 抑制思路	131
6.2.2 抑制方案	131
6.2.3 抑制效果的仿真分析	135
6.3 基于炮口分流降低接触电阻焦耳热功率的电枢熔化抑制方法	136
6.3.1 抑制思路	136
6.3.2 抑制方案	137
6.3.3 抑制效果的仿真分析	142
6.4 小结	143
参考文献	144
第 7 章 电枢转换机理分析及抑制方法	146
7.1 电枢转换机理分析	146

7.1.1	电枢转换形成机理	146
7.1.2	电枢转换模型	149
7.1.3	电枢转换过程仿真与分析	151
7.1.4	电枢转换参数影响分析	158
7.2	基于尾翼分层降低涡流的电枢转换抑制方法	160
7.2.1	抑制思路	160
7.2.2	抑制方案	161
7.2.3	抑制效果的仿真分析	163
7.3	小结	165
	参考文献	166
第8章	轨道刨削机理分析及抑制方法	167
8.1	轨道刨削机理分析	167
8.1.1	轨道刨削形成机理	168
8.1.2	轨道的动态响应分析与接触模式	170
8.1.3	轨道刨削过程仿真与分析	175
8.1.4	轨道刨削参数影响分析	181
8.2	基于低密度材料降低碰撞动能传递的轨道刨削抑制方法	183
8.2.1	抑制思路	183
8.2.2	抑制方案	184
8.2.3	抑制效果的仿真分析	189
8.3	小结	191
	参考文献	192

第三部分 试验设计与验证

第9章	试验平台与试验参数测量方法	194
9.1	试验平台	194
9.1.1	试验平台设计目标要求	194
9.1.2	试验平台组成	195
9.1.3	脉冲电源设计	196
9.1.4	发射装置设计	198
9.1.5	试验系统实现	199
9.2	试验参数测量方法	204
9.2.1	电感梯度测量	204

9.2.2	脉冲电流测量	205
9.2.3	电枢速度测量	206
9.2.4	电容器组充电电压与炮口电压测量	207
9.3	小结	208
	参考文献	208
第10章	系统模型与优化设计效果试验验证	209
10.1	试验内容确定	209
10.2	系统模型正确性与优势性验证	210
10.2.1	电枢动力学模型与脉冲放电电路模型验证	210
10.2.2	电感梯度计算模型验证	215
10.3	轨道参数优化效果试验验证	217
10.4	电枢构型和参数优化效果试验验证	221
10.4.1	构型优化效果试验验证	221
10.4.2	电枢参数优化效果试验验证	222
10.5	小结	223
	参考文献	224
第11章	损伤抑制效果试验验证	225
11.1	试验内容确定	225
11.2	基于炮口分流的电枢熔化抑制效果试验验证	225
11.2.1	试验方案	226
11.2.2	试验与结果分析	227
11.3	基于尾翼分层的电枢转换抑制效果试验验证	229
11.3.1	试验方案	230
11.3.2	试验与结果分析	230
11.4	小结	234
	参考文献	234

第 1 章 绪 论

电磁轨道发射技术是 20 世纪初提出并得到发展的一项重要工程技术。经过 100 多年的发展,电磁轨道发射技术已经取得了许多关键技术突破,并在军事、航天、高速撞击、材料科学等领域显示出巨大的应用潜力,已引起世界各国的广泛关注。本章对电磁轨道发射技术进行概述,首先介绍电磁轨道发射装置的概念与电磁力产生机理、电磁轨道发射装置组成和 workflow;然后介绍电磁轨道发射装置关键技术及应用;最后归纳总结电磁轨道发射装置发展现状及其优化设计与损伤抑制方法研究现状。

1.1 电磁轨道发射装置概念与电磁力产生机理

1.1.1 电磁轨道发射装置概念

电磁轨道发射装置是一种依靠轨道与电枢间相互作用电磁力加速载荷的发射装置^[1]。由于依靠电磁力加速载荷的设想最初来源于军事应用,因此电磁轨道发射装置也称为电磁轨道炮。实际上它可以被看成是最简单的电动机^[2]。按照馈电方式、轨道结构等不同可将电磁轨道发射装置分为简单电磁轨道发射装置、串联增强(层叠式、平面式、保护板式)型电磁轨道发射装置、分散馈电型电磁轨道发射装置、外场增强(常规导体和超导体)型电磁轨道发射装置、多轨(圆口径和方口径等)型电磁轨道发射装置、超导悬浮电枢型电磁轨道发射装置,以及多相型电磁轨道发射装置等。由于电磁轨道发射装置使用电能进行发射,与传统的化学发射装置(火炮、火箭等)相比具有载荷初速高、发射成本低、载荷初速易于控制等优点,在军事、航天、超高速撞击试验等领域显示出巨大的应用潜力。

1.1.2 电磁力产生的机理

电磁轨道发射装置依靠电枢电磁力加速载荷,电枢受到的电磁力实际是磁场作用于载流导体的安培力。图 1.1 所示为电流流过轨道和电枢产生安培力示意图。

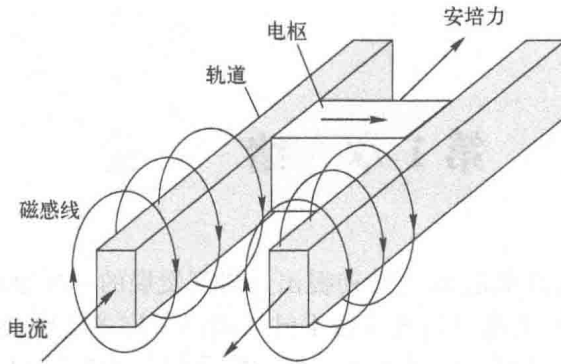


图 1.1 电流流过轨道和电枢产生安培力示意图

电枢发射时,通常由脉冲电源向轨道和电枢提供脉冲大电流,根据法拉第电磁感应定律,电流通过轨道时,会在轨道附近激发出磁场,磁场与流过电枢的电流相互作用产生安培力,安培力推动电枢向前运动,实现发射弹丸的功能。

宏观上,电枢受到的作用力是磁场对电枢整体产生的安培力;微观上,电枢受到的作用力则是电枢所有体积元内部电荷受到洛伦兹力的合力^[3]。图 1.2 所示为电枢体积元内部电荷受到的洛伦兹力示意图。

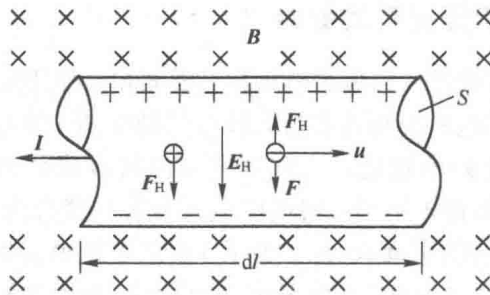


图 1.2 电枢体积元内部电荷受到的洛伦兹力示意图

假设电枢内部长度为 dl 的体积元中通有电流 I , 体积元的截面积为 S , 单位体积中的自由电子数为 n , 电子的电量为 e , 自由电子运动速度为 u , 有磁感应强度为 B 的磁场作用于该体积元, 其方向垂直于电流方向。

由洛伦兹力定律 $F = -eu \times B$ 可知, 体积元内部电子受到向下的洛伦兹力。在洛伦兹力作用下, 电子发生侧向漂移, 体积元的下侧积聚大量负电荷, 上侧积聚正电荷, 其间形成一横向霍尔电场 E_H 阻碍电子的侧向漂移运动。当霍尔电场力 $F_H = -e E_H$ 与洛伦兹力平衡时, 即

$$E_H = -u \times B \quad (1.1)$$

电子在等大反向的霍尔电场力和洛伦兹力作用下,做无规则漂移的定向移动,而晶格中正电荷只受霍尔电场力 F_H 的作用,所有体积元中的正电荷所受霍尔电场力合力的宏观效果正是电枢所受的安培力。

电枢体积元内正电荷数等于自由电子数,所以导体中正电荷所受霍尔电场力的合力 dF 与自由电子所受霍尔电场力的合力大小相等、方向相反,即

$$dF = -NF_H = NeE_H = -Neu \times B \quad (1.2)$$

将 $N = ndlS$ 代入式(1.2)得

$$dF = -ndlSeu \times B \quad (1.3)$$

将 $j = -neu, I = j \cdot S$ 代入式(1.3),并考虑 dl 方向与 j 方向相同,则可以得出体积元所受电磁力为

$$dF = Idl \times B \quad (1.4)$$

由式(1.2)和式(1.4)可知,载流电枢受到的安培力就是磁场作用于电枢导体内自由电子上的洛伦兹力的宏观效应。安培力无论在数值上还是方向上都与自由电子所受到的洛伦兹力的合力相同。

1.2 电磁轨道发射装置组成与工作流程

1.2.1 电磁轨道发射装置组成

电磁轨道发射装置是利用电磁力加速物体的发射装置,其设计和应用的目的就是在短时间内将载荷加速到高速运动状态,主要由充电电源、脉冲电源、轨道及固定结构、电枢、测量系统和控制系统组成。图1.3给出了一种常见的电容储能型电磁轨道发射装置基本组成。

(1) 充电电源。充电电源是电磁轨道发射的能量来源,主要作用是给脉冲电源提供能量。

(2) 脉冲电源。脉冲电源的作用是为发射装置提供脉冲大电流,目前用于电磁轨道发射的脉冲电源可以分为电容储能型、电机储能型和电感储能型3类,其中电容储能型脉冲电源技术最为成熟,应用最为广泛。电容储能型脉冲电源主要由电容器组、调波电感、续流二极管、大功率开关等部分组成。为了达到较大的放电电流和获得合适的电流波形,电磁轨道发射装置通常由多个脉冲电源模块同时供电,并且各脉冲电源模块之间采用时序放电的工作模式。

(3) 轨道及封装结构。轨道的作用是传导电流、产生电磁力并支撑电枢运动,通常由导电性和耐磨性良好的金属材料制成,轨道的长度、宽度、间距等参数对电枢可达到的速度具有重要影响,是电磁轨道发射装置重要的设计参数。轨

道的截面形状对电接触性能有重要的影响,常用的轨道截面形状主要有矩形、跑道形、D形等。轨道封装结构起到固定轨道、使轨道与其他结构绝缘的作用,一般采用耐高温、绝缘性能良好的环氧树脂材料加工制作。

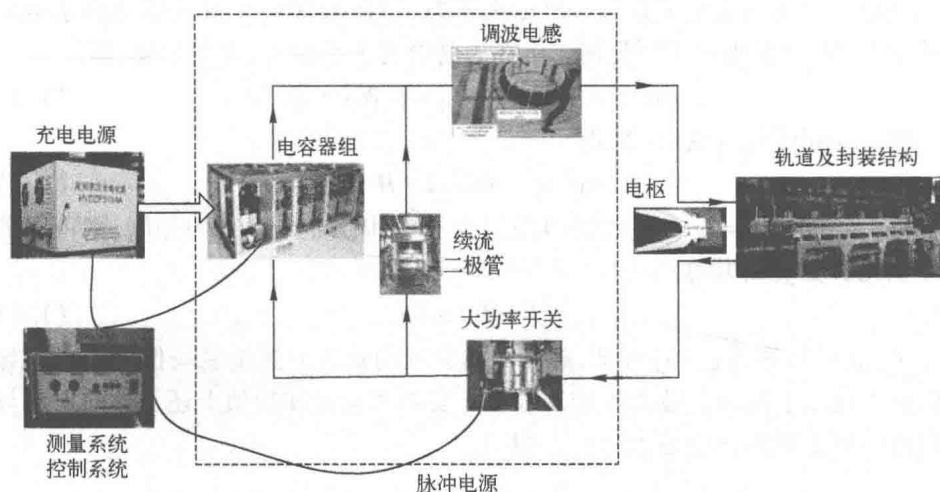


图 1.3 电容储能型电磁轨道发射装置基本组成

(4) 电枢。电枢在工作时也需要通过脉冲大电流,是承载电磁力的主要部件,起到推动弹丸或其他载荷运动的作用,电磁轨道发射装置性能的优劣在很大程度上取决于电枢设计。按照工作时的形态可将电枢分为等离子体电枢、固体电枢和混合电枢。等离子体电枢是由高温高压等离子体传导电流的电枢形式,电枢可以在电磁轨道发射装置中直接产生。例如,将铜丝或铝箔置于载荷之后,借由脉冲大电流使铜丝或铝箔汽化形成等离子体电枢。早期的电磁轨道发射装置多采用等离子体电枢,并实现了小质量载荷的超高速发射,但是等离子体电弧会对轨道造成较强的烧蚀。目前试验研究中更多的是采用固体电枢,固体电枢是通过固态金属传导电流的电枢形式,一般由金属片叠成或由块状金属加工制成,固体电枢电阻小、压降低,速度在 3km/s 以下时固体电枢具有更好的性能。混合电枢由固态导体以及跨接在该导体和轨道间的等离子体电刷组成,混合电枢同样会对轨道造成烧蚀。

(5) 测量系统。测量系统的主要作用是用来测量电磁轨道发射装置的状态参数,主要包括脉冲电源的充电电压、炮口电压、放电电流和电枢内弹道位置。电压的测量方法较多,采用较大的电阻分压方式即可实现。状态参数中放电电流和电枢速度测量与其他领域中电流和速度的测量有较大差异。由于放电电流强度可达到兆安级,常规电流测量方法已不能满足要求,一般采用罗氏线圈测量

主回路附近的磁场变化,再通过数学计算换算为主回路中的电流。电磁轨道发射中电枢内弹道位置的测量一般采用 B 点环线圈测量磁场变化来实现,获得电枢的位移后可以通过取微分的方式得到电枢的内弹道速度。

(6) 控制系统。控制系统主要作用是控制脉冲电源的充电、脉冲电源放电、脉冲电源剩余电压的泄放等。由于电磁轨道发射过程中涉及高压、大电流,控制系统通常都是通过光纤进行控制信号的传输,以此来控制系统和主回路之间的电气隔离。

1.2.2 电磁轨道发射装置工作流程

电磁轨道发射装置每次发射电枢一般需经过发射准备、电枢发射和发射后处理 3 个阶段,每阶段的主要内容如图 1.4 所示。

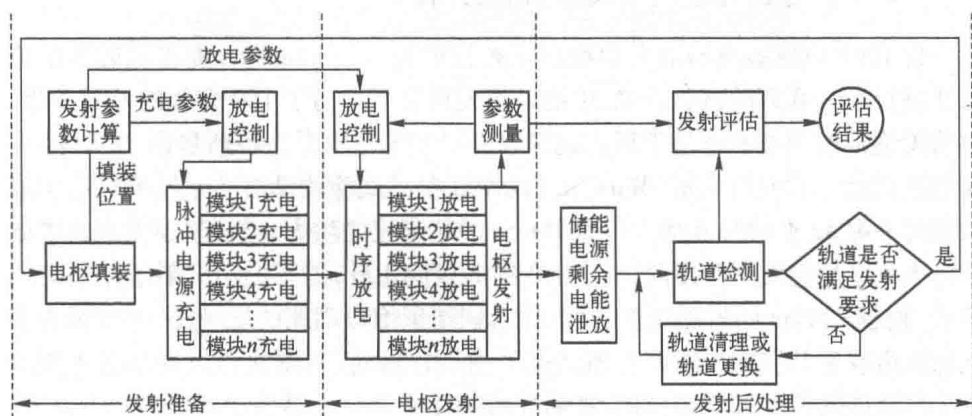


图 1.4 电磁轨道发射装置工作流程

(1) 发射准备阶段。此阶段主要进行发射参数计算、电枢(载荷)填装和脉冲电源的充电(蓄能)等电枢和载荷发射前的准备工作。载荷出口速度通过调节脉冲电源的放电参数来实现,因此电枢发射前需要根据载荷的质量和想要达到的出口速度计算脉冲电源充电电压、放电时序、内弹道长度等参数。计算获得上述参数后,可由控制系统生成相应的控制信号,进行电枢和载荷的装填、脉冲电源各模块的充电等过程。电枢尺寸通常略大于电磁轨道发射装置的口径,填装时一般需要专用的填装机构。电枢填装深度要大于 4 倍口径,这样才能保证馈入电流的轨道产生最大电磁力。

(2) 电枢发射阶段。此阶段主要进行电枢发射和状态参数的测量。控制系统生成脉冲电源各模块的触发放电信号,各电源模块时序放电,轨道和电枢通过脉冲电流,产生电磁力,实现电枢和载荷的发射。此过程中的脉冲电流、炮口电

压、电枢速度等状态参数被测量记录,用于反馈控制放电参数和发射后处理阶段的评估等工作。

(3) 发射后处理阶段。此阶段主要进行脉冲电源剩余电能的泄放、轨道检测和发射评估等工作。电枢发射完毕后脉冲电源中一般会剩余部分电压,通常需要将其泄放后才能进行下一次脉冲电源充电。此外,还需要进行轨道的检测和清理等,若轨道损伤严重,还需要进行轨道的更换。电枢发射阶段测量获得的状态参数此时用于评估该次发射的效果。

1.3 电磁轨道发射装置关键技术及应用

1.3.1 电磁轨道发射装置关键技术

自1901年挪威奥斯陆大学物理学教授伯克兰(Birkeland)提出电磁炮的概念并进行了一系列的试验以来,电磁轨道发射装置经历了100多年的发展历程,目前无论是理论技术还是工程实践都取得了长足进步^[4]。特别是在1978年,澳大利亚国立大学的马歇尔(Marshall)教授宣布其试验团队在5m长的轨道上成功地将一颗3g重的弹丸加速到5.9km/s的超高速之后^[5],电磁轨道发射装置的研究进入了快速发展的新时期。2010年12月10日,美军成功试射了出口动能33MJ、射程204km的电磁轨道炮样机^[6],刷新了炮口动能的记录,同时也标志着电磁轨道发射装置距离军事应用又进了一步。然而,电磁轨道发射装置想要在军事或其他领域实际应用,还需要解决以下3个关键技术问题。

(1) 脉冲电源小型化技术。电磁轨道发射装置发射弹丸过程中的峰值功率可达到吉瓦级,常规电源无法支撑这样的瞬态大功率需求,一般要采用脉冲电源。尽管当前脉冲电源性能已显著提高,但是其小型化水平仍不能满足电磁轨道发射装置机动性要求。电容储能是目前技术比较成熟的脉冲电源储能方式,应用也最为广泛。图1.5所示为美国海军研究实验室使用的电容储能型脉冲电源模块^[7]。

电容储能型脉冲电源主要由电容器、晶闸管开关、调波电感、续流硅堆、吸能电阻等元器件组成。电容储能密度最高可达到 $4\text{MJ}/\text{m}^3$ 水平,采用电容储能的脉冲电源能量密度一般可达到 $1\sim 2\text{MJ}/\text{m}^3$,要使弹丸发射动能达到10MJ以上,电容储能脉冲电源体积一般要在 100m^3 以上,十分庞大^[8]。电机储能型脉冲电源是脉冲电源的一个新发展方向,电机储能的能量密度比电容储能能量密度高出约一个量级,但是功率量级相对较低,目前仍达不到瞬态功率要求。脉冲电源的另一个发展方向是电感储能,电感储能的能量密度高于电容,功率密度高于电机

储能,主要的技术难题在于能量导出和控制过程需要关断大电感电流,电流突变和充电回路中的漏磁场能量,使得关断开关两端会产生很大的电压应力,超出半导体开关的承受极限。

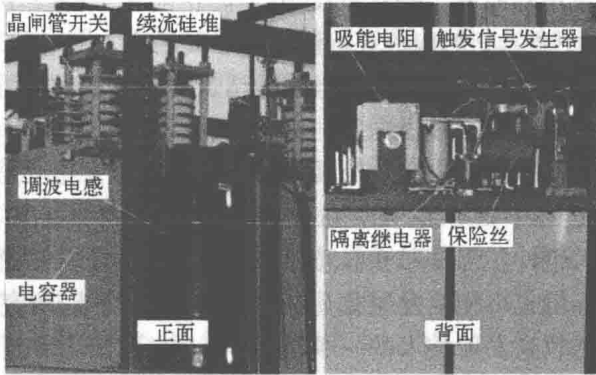


图 1.5 电容储能型脉冲电源模块

(2) 轨道长寿命技术。轨道寿命短是现阶段阻碍电磁轨道发射装置实际应用的主要因素之一。早期电磁轨道发射试验装置多采用等离子体电枢,等离子体电弧对轨道有极强的烧蚀作用,轨道使用寿命十分有限。20 世纪 90 年代后,固体电枢技术开始被广泛采用,使得轨道寿命有了较大提升,但是使用固体电枢仍然存在着轨道损伤问题。电磁轨道发射装置在工作过程中,轨道不仅承载兆安级大电流,同时也与电枢之间保持着数千米每秒的滑动电接触,在这样的极端工作条件下,轨道和电枢接触面会发生熔化、转捩、切削等问题^[9]。图 1.6(a)~(c)分别为发生熔化后的电枢、电枢转捩后的轨道和轨道上的刨坑。



图 1.6 3 种电磁轨道发射装置的损伤现象

电枢熔化后的部分金属材料会残留在轨道表面,使轨道变得不平顺,使得电枢滑动阻力增大,电枢发射精度下降;电枢转捩过程中产生的高温等离子体对轨道有极强的烧蚀作用,使轨道表面氧化,接触性能下降;切削使电枢两翼受力不均匀,电枢运动不平稳,刨坑的存在容易引起后续发射的连续刨削^[10],一次刨削