



国防科技图书出版基金

■ 白象忠 赵建波 田振国 著

电磁轨道发射组件 的力学分析

Mechanical Analysis of Electromagnetic
Rail Launcher's Components



国防工业出版社
National Defense Industry Press

责任编辑：冯 晨 cfeng@ndip.cn
责任校对：苏向颖
封面设计：王 媛

电磁轨道发射组件 的力学分析

Mechanical Analysis of Electromagnetic
Rail Launcher's Components



►上架建议：武器/发射技术◀

<http://www.ndip.cn>

ISBN 978-7-118-10046-4



9 787118 100464 >

定价：89.00 元



■ 力学丛书 电磁学 磁学卷 ■

电磁轨道发射组件 的力学分析

Mechanical Analysis of Electromagnetic
Rail Launcher's Components



科学出版社
SCIENCE PRESS



国防科技图书出版基金

电磁轨道发射组件的 力学分析

Mechanical Analysis of Electromagnetic
Rail Launcher's Components

白象忠 赵建波 田振国 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

电磁轨道发射组件的力学分析 / 白象忠, 赵建波,
田振国著. —北京: 国防工业出版社, 2015. 6

ISBN 978 - 7 - 118 - 10046 - 4

I. ①电... II. ①白... ②赵... ③田... III. ①磁轨制
动 - 轨道发射 - 组件 - 动力学分析 IV. ①U260. 356

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 106618 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 17½ 字数 325 千字

2015 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 89.00 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需

要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

电磁轨道发射装置的出现是发射理论和发射技术共同发展的一次飞跃。它具有发射速度快、加速时间短、动能大、成本低、隐蔽性好、能量释放易于控制等优点,任何普通发射技术都不可以替代。所以,在武器装备、航空、航天、能源和运输等领域有广阔且诱人的应用前景,致使电磁发射技术的研究对于国家未来军事和国民经济建设的发展,具有重大而深刻的现实意义与战略意义。

电磁轨道发射过程存在着力、电、热等多重作用,发射系统的性能又要受到很多因素的影响。因此,对其发射装置中一些部件工作状态的研究便成为迫切需要,也是非常有意义的工作。发射轨道、壁板、电枢、身管等组件的工作状态是直接影射精度和发射效率的重要因素。在电磁轨道发射装置的设计过程中,必须保证这些组件具有足够的强度和刚度,即发射过程中轨道的位移和应力的改变均要控制在一定的范围内,只有这样,才能保证电磁轨道的射击精度和使用寿命。这是电磁轨道发射装置设计工作中急需解决的重要问题。

目前,国内外对电磁轨道装置组件的静、动态应力分析及发射组件的强度、刚度的研究工作,还远远落后于发射原理的研究,因而导致已有百余年历史的电磁发射技术研究仍停留在实验阶段。本书正是针对电磁发射装置的关键构件——发射轨道、壁板、电枢和发射身管,在发射状态下的强度、刚度进行理论分析、解析计算和数值分析,从而为延长电磁发射装置的使用寿命、提高发射精度及相关设计计算的方法,以及为进一步加工制造提供必要的理论基础和技术支持。这将对电磁轨道发射系统的结构设计 with 性能优化具有一定的理论意义和应用价值。

电磁轨道发射过程中,发射装置组件实际是在两种非轴对称同步移动载荷作用下进行工作的。所谓两种非轴对称同步移动载荷作用,是指非轴对称移动的集中载荷和同步移动且作用范围随移动位置增加的均布载荷的共同作用。根据发射装置实际构造的不同,可将其简化为不同的力学模型,例如:对于方口径发射装置,轨道受力一般简化为单层弹性基础梁,但考虑壁板及连接件的弹性变形,将其简化为双层弹性基础梁进行计算,就会收到更精确的效果,而且也更加接近于实际;对于圆截面发射装置,计算身管的强度和刚度问题时,通常将其简化为两种非轴对称同步移动载荷作用下的有限长圆柱薄壳,或有限长圆柱厚壳。

本书在耦合场理论的基础上,从电磁场、机械场、温度场等多场耦合的基本理论出发,对电磁轨道发射装置中主要构件的轨道、壁板、电枢、身管等在发射过程中

进行力学分析,包括:①发射过程中电磁场分布的计算方法。②发射过程中的电枢推力、轨道相互斥力及轨道在发射过程中的热膨胀带给轨道的接触力的计算。③轨道在电磁力与电枢接触力作用下的变形及应力状态的计算。④将发射轨道简化为单层弹性基础梁的变形及应力的计算。⑤对于三种不同形状电枢工作状态中的变形、应力状态及其优化设计的分析。⑥对发射轨道在假设几种不同形式载荷作用下的动力响应进行了解析计算。⑦将方形炮管的发射轨道简化为双层弹性基础梁,利用广义初参数法进行了解析计算。⑧关于圆形发射管在非轴对称载荷作用下,对其分别简化为薄壁筒、厚壁筒时的静力、动力分析的解析计算。⑨应用 ANSYS 软件对上述内容进行有限元分析,并与理论计算结果进行了比较,相互佐证其结果的正确性。⑩利用 ANSYS 软件对电磁轨道发射装置组件的受力进行了数值模拟,采用 APDL 方法对其进行了有限元动力学仿真,从而佐证了理论分析的可靠性。

本书介绍的主要内容来源于国家自然科学基金资助项目“电磁轨道发射装置组件的强度、刚度计算与模拟实验研究”(项目编号:50875230)的研究成果。为此,对于国家自然科学基金的资助致以衷心的感谢!

在本书写作过程中,基础理论的部分内容参考了国内外公开出版的书籍和文献;部分章节中的理论推导和数值计算内容是作者指导的杨阳、何威、刘文、白春燕、陈铁宁、张益男等研究生学位论文中的研究成果,读者可进一步参阅有关研究成果和参考文献。在此,特向上述作者致谢!

借本书即将出版之际,作者还要特别感谢国防科技图书出版基金的资助,并且对国防工业出版社的热忱指导、精心编辑,直至得以付梓,致以诚挚的谢意!

由于作者水平有限,书中难免出现疏漏甚至谬误,敬请读者批评指正。

作者

2014年11月于燕山大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电磁发射装置产生背景及工作原理	1
1.1.1 产生的背景	1
1.1.2 工作原理	1
1.1.3 电磁发射的特点	3
1.2 电磁发射装置的发展过程	3
1.2.1 发展历史	3
1.2.2 国内外研究现状	8
1.3 电磁发射技术的应用前景	10
1.3.1 电磁发射的军事用途	10
1.3.2 电磁发射的民用前景	11
1.4 本书介绍的主要内容	12
参考文献	13
第 2 章 作用在电磁轨道发射装置组件电磁力的计算	18
2.1 轨道型电磁发射的工作原理	18
2.1.1 轨道	19
2.1.2 电枢	19
2.1.3 发射身管	19
2.1.4 壁板	20
2.2 电磁力的计算	20
2.2.1 麦克斯韦方程组	20
2.2.2 恒定电流电磁场与电磁力的计算	21
2.3 电磁轨道发射装置的电磁场计算	24
2.3.1 轨道线电流在电枢位置产生的磁感应强度	25

2.3.2	轨道面电流在电枢位置产生的磁感应强度	26
2.3.3	轨道体电流在电枢位置产生的磁感应强度	26
2.4	电枢受力分析	27
2.4.1	电枢受力计算	27
2.4.2	电磁发射轨道的电枢效率	27
2.4.3	算例分析	27
2.5	电磁发射轨道受力分析	28
2.5.1	电磁轨道发射过程中轨道间的电磁场	28
2.5.2	电磁轨道发射过程中的力学计算模型	30
2.5.3	两轨道间相互作用的电磁力	30
2.5.4	电枢对轨道的作用力	31
2.5.5	算例分析	32
	参考文献	33
第3章	轨道的力学分析	35
3.1	弹性基础梁的弯曲微分方程及其解	35
3.1.1	弹性基础梁的弯曲微分方程的建立	35
3.1.2	弹性基础梁微分方程解的形式	36
3.2	有限长弹性基础梁的变形及内力方程	36
3.2.1	有限长弹性基础梁变形的挠曲线表达式	36
3.2.2	有限长弹性基础梁变形的内力表达式	37
3.3	不同约束形式发射轨道的静力计算	38
3.3.1	发射轨道简化为两端铰支约束(模型1)的计算	38
3.3.2	发射轨道简化为一端固定、一端自由约束(模型2)的 计算	43
3.3.3	发射轨道简化为一端固定、一端铰支约束(模型3)的 计算	47
3.4	3种不同约束形式下轨道的内力及变形比较	52
3.4.1	3种不同约束形式变形的比较	52
3.4.2	3种不同约束形式内力弯矩的比较	54
3.4.3	数值仿真结果与理论解的比较	54
3.5	电磁发射轨道的动力响应分析	59

3.5.1	发射轨道动力学方程的建立	59
3.5.2	方程的求解	60
3.5.3	算例分析 1	64
3.5.4	算例分析 2	66
3.6	电磁发射轨道临界速度分析及 ANSYS 的模拟仿真	69
3.6.1	电磁发射轨道动力学模型	69
3.6.2	基于 ANSYS 电磁发射轨道临界速度分析	70
	参考文献	73
第 4 章	方口径电磁轨道发射装置组件的力学分析	74
4.1	方口径电磁轨道发射装置轨道及壁板的静力分析	75
4.1.1	集中载荷和均布载荷作用下双层梁挠曲线方程的建立	76
4.1.2	集中载荷 F 作用下双层梁的力学分析	80
4.1.3	均布载荷 q 作用下双层梁的力学分析	83
4.1.4	载荷 $F+q$ 作用下双层梁的力学分析	86
4.1.5	模型参数对双层梁系统受力影响的研究	89
4.2	电枢力和电磁力共同作用下电磁发射组件的动力学分析	102
4.2.1	双层梁动力学微分方程式的建立	102
4.2.2	集中载荷作用下双层梁的动态响应	109
4.2.3	均布载荷作用下的上梁动态响应	114
4.2.4	组合载荷作用下的双层梁动态响应	119
4.2.5	模型参数对双层梁系统动态响应影响的研究	122
	参考文献	142
第 5 章	非轴对称载荷作用下圆口径发射身管的力学分析	143
5.1	非轴对称载荷作用下的有限长圆柱薄壳的静力分析	143
5.1.1	有限长圆柱薄壳的静力方程	143
5.1.2	非轴对称载荷作用下的静位移及静应力的解析解	146
5.1.3	薄壳静力问题解析解和有限元解的对比分析算例	151
5.1.4	薄壳静力问题的参数分析算例	154
5.2	非轴对称载荷作用下的有限长圆柱厚壳的静力分析	157
5.2.1	有限长圆柱厚壳的静力方程	158

5.2.2	非轴对称载荷作用下位移及应力的静力理论解	169
5.2.3	厚壳静力问题解析解和有限元解的对比分析算例	171
5.2.4	厚壳静力问题的参数分析算例	173
5.3	非轴对称载荷作用下有限长圆柱薄壳的动力响应	177
5.3.1	有限长圆柱薄壳的动力方程	178
5.3.2	非轴对称载荷作用下动位移及动应力的解析解	179
5.3.3	薄壳动力问题解析解和有限元解的对比分析算例	182
5.3.4	薄壳动力问题的参数分析算例	185
5.4	非轴对称载荷作用下有限长圆柱厚壳的动力响应	189
5.4.1	有限长圆柱厚壳的动力方程	189
5.4.2	非轴对称载荷下有限长圆柱厚壳的动力理论解	191
5.4.3	厚壳动力问题解析解和有限元解的对比分析算例	192
5.4.4	厚壳动力问题的参数分析算例	194
附录 I	199
附录 II	209
参考文献	211
第 6 章	不同结构形式的电枢在发射过程中的应力分析	212
6.1	电枢的结构尺寸对电枢工作应力的影响	212
6.1.1	电枢的形状对电枢工作应力的影响	212
6.1.2	V 形电枢的尺寸变化对电枢应力状态的影响	213
6.1.3	U 形电枢的尺寸变化对电枢应力状态的影响	218
6.1.4	马鞍形电枢的尺寸变化对电枢应力状态的影响	220
6.2	电枢在电磁场中的受力分析	223
6.2.1	轨道 - 电枢模型分析	223
6.2.2	建立轨道 - 电枢模型	224
6.2.3	电枢电流密度和焦耳热分析	227
6.2.4	电枢受力分析	230
参考文献	234
第 7 章	发射轨道局部接触应力的计算	235
7.1	轨道局部应力场的计算模型	235

7.2	平面弹性理论边界问题借助化归黎合问题的解法	236
7.2.1	当 $G(t) = 1$ 的情形	236
7.2.2	问题 $F^+ = gF^- + f$ 的解	237
7.2.3	对于半平面的一般形式	239
7.3	分布载荷作用下的应力场	243
7.4	电枢与轨道接触的刚印问题	244
7.4.1	水平基底刚印作用于半平面的问题	244
7.4.2	轨道与电枢间的接触问题	245
7.5	算例及结果分析	246
	参考文献	249
第8章	发射过程中电枢运动特性参量的一种简捷算法	250
8.1	电枢运动特性参量的基本方程	250
8.2	特性参量的简捷算法	252
8.2.1	回路电流解析式的导出	252
8.2.2	发射过程参数的计算流程	252
8.2.3	时间步长与收敛准则的选定	254
8.3	算例	254
8.3.1	算例 1	254
8.3.2	算例 2	255
	参考文献	256

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and Working Principle of Electromagnetic Launching System	1
1.1.1 Background	1
1.1.2 Working Principle	1
1.1.3 Characteristics of Electromagnetic Launching	3
1.2 Development Process of Electromagnetic Launching System	3
1.2.1 History	3
1.2.2 Research Status at Home and Abroad	8
1.3 The Application Prospects of Electromagnetic Launching Technology ..	10
1.3.1 Military Applications of Electromagnetic Launching	10
1.3.2 Civilian Applications of Electromagnetic Launching	11
1.4 The Main Contents Presented in This Book	12
Reference	13
Chapter 2 Calculation of Electromagnetic Forces Beared by Components of Electromagnetic Rail Launchers	18
2.1 Working Principle of Rail Electromagnetic Launcher	18
2.1.1 Rail	19
2.1.2 Armature	19
2.1.3 Launching Barrel	19
2.1.4 Siding	20
2.2 Calculation of Electromagnetic Forces	20
2.2.1 The Maxwell Equations	20
2.2.2 Calculation of Electromagnetic Field and Electromagnetic Force Produced by Constant Current	21
2.3 Calculation of Eletromagnetic Field of Electromagnetic Rail Launchers	24

2.3.1	Magnetic Flux Density in Armatures Generated by an Assumed Line Current in Rails	25
2.3.2	Magnetic Flux Density in Armatures Generated by an Assumed Surface Current in Rails	26
2.3.3	Magnetic Flux Density in Armatures Generated by an Assumed Body Current in Rails	26
2.4	Load Analysis of Armatures	27
2.4.1	Load Calculation of Armatures	27
2.4.2	Armatures' Efficiency of Electromagnetic Launching	27
2.4.3	Example Analysis	27
2.5	Load Analysis of Electromagnetic Launching Rails	28
2.5.1	Electromagnetic Field between Rails during Launching Process	28
2.5.2	The Mechanical Model during Launching Process	30
2.5.3	Interaction Electromagnetic Force between Rails	30
2.5.4	Force Applied on Rails by Armatures	31
2.5.5	Example Analysis	32
	Reference	33

Chapter 3 Mechanical Analysis of Electromagnetic Launching Rails 35

3.1	Bending Differential Equation and Corresponding Solution of Elastic Foundation Beams	35
3.1.1	Establishment of Bending Differential Equations of Elastic Foundation Beams	35
3.1.2	Differential Equations Solutions of Elastic Foundation Beams	36
3.2	Deformation and Internal Force Equations of Finite – length Elastic Foundation Beams	36
3.2.1	Deflection Curve of Finite – length Elastic Foundation Beams	36
3.2.2	Internal Forces of Finite – length Elastic Foundation Beams ...	37
3.3	Static Calculation of Rails with Different Constraints	38
3.3.1	Static Calculation of Rails Simplified as Both Ends Hinged(Model 1)	38
3.3.2	Static Calculation of Rails Simplified as One End Fixed and the Other Free(Model 2)	43