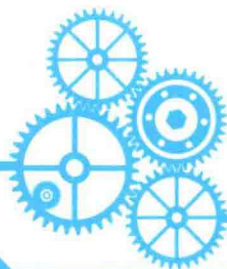


“十二五”国家重点出版物出版规划项目

新概念动能武器系列丛书



电磁弹射原理与技术

赵科义◎编著

兵器工业出版社

“十二五”国家重点出版物出版规划项目
新概念动能武器系列丛书

电磁弹射原理与技术

赵科义 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

航母舰载机电磁弹射器替代现役蒸汽弹射器已成为一种必然和趋势。电磁弹射系统是一个集储能、脉冲功率调节、直线弹射电动机及控制于一体的复杂系统。本书仅对电磁弹射用直线弹射电动机及其控制的基本原理和技术做较详细的阐述与说明,主要包括感应型电磁弹射原理与技术和永磁型电磁弹射原理与技术两大部分。感应型电磁弹射原理与技术部分阐述了直线感应弹射电动机的结构类型、边端效应、磁场分布及电磁推力特性、等效电路及参数分析、电磁参数设计及控制方法等。永磁型电磁弹射原理与技术部分阐述永磁直线同步电动机的总体结构、基本原理、推力特性及参数分析、动子位置检测及自律分散控制技术、绕组分段永磁直线同步弹射电动机的结构、系统模型、电流预测控制原理与方法;此外还对永磁无刷直流直线弹射电动机定子磁链提前换相的原理与控制性能进行了介绍。

本书可供从事电磁弹射、电动机与控制,特别是直线电动机及其控制技术等相关领域中的研究人员使用,也可作为该专业领域研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁弹射原理与技术 / 赵科义编著. — 北京: 兵器工业出版社, 2015. 12

(新概念动能武器系列丛书 / 李治源主编)

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-5181-0170-2

I. ①电… II. ①赵… III. ①电磁场—弹射器 IV. ①TJ866

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第290954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: 北京圣夫亚美印刷有限公司

版 次: 2015年12月第1版第1次印刷

责任编辑: 林利红

封面设计: 揽胜视觉

责任校对: 郭 芳

责任印制: 王京华

开 本: 710×1000 1/16

印 张: 13.25

字 数: 240千字

定 价: 48.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

《新概念动能武器系列丛书》

编审委员会

主 编：李治源

副主编：胡金锁

顾 问：王 莹

编 委：李小鹏 向红军 赵科义 张明安

张 倩 张亚东 周国印 陈庆昌

褚庆国 胡森哲 雷 彬 李 兵

李 超 李惠元 林秀梅 吕庆敖

王育维 杨 帆 俞海燕 辛建国

石志彬 王晓方 卢志刚 李金胜

樊向武 金 灿 王志刚

丛书序言

人类的军事科技发展历史几乎与人类的历史一样漫长，在漫长的发展过程中，人们总是将最先进、最前沿的科学技术首先应用到军事领域，创造出各种各样的武器。从最早的石头、标枪、弓箭开始，直到如今门类齐全、类型众多的新概念武器。

武器的最终目的是杀伤敌人、毁伤目标。从目前的毁伤技术来说，尽管定向能（高功率微波武器和强激光武器）、声能（次声和噪声武器）、生物能（基因武器）、化学能（化学武器）和核能（核武器）等新型毁伤技术不断发展，但受到国际政治、战场环境、作战对象和毁伤效能等各方面的影响，尚难以广泛应用于军事行动；而动能毁伤以其针对目标广泛、毁伤范围可控、毁伤时效快速等特点，使得动能武器成为武器装备发展的主流。因此，以动能毁伤为目标的各类新概念动能武器受到了世界各国的重视也成为了目前新概念武器研究领域的热点，特别是以电能为发射能源的电磁发射动能武器技术方兴未艾。20 世纪 80 年代，电磁轨道炮首次实现了超高速发射，经过不懈努力，电磁轨道炮的最大炮口动能已超越现役的大口径火炮，高功率脉冲电源、轨道烧蚀和刨削等关键技术也已基本突破，随着高功率脉冲电源小型化技术、一体化弹药技术和系统集成与热管理技术的不断进步，新概念动能武器将在不久的将来率先实现军事应用。

在新概念动能武器发展过程中，我国紧跟世界兵器科学发展动态，从最开始的动态跟踪、理论探索、验证试验，到今天成为国际电磁发射技术委员会中的重要成员，前后经历了 30 多年的漫长过程。多年来，几代人本着“科技强军”的理想，自力更生，艰苦奋斗，为发展我国新概念动能武器技术，增强我国国防力量做出了无私的奉献，也培育、锻炼了一支成熟的高素质队伍。同时，也可以预见，要实现新概念动能武器的军事应用，还需要继续坚持不懈的努力，克服一系列的科学难关，同时也需要一大批年轻的、杰出的人才投入这个领域，为发展我国的兵器科学而奋斗。

本丛书的编写，既是系统总结 30 多年来积累的宝贵财富，为从事新概

念动能武器研究的专业技术人员提供借鉴和参考，也可为刚进入这一领域的科学工作者提供帮助以尽快熟悉本领域的情况，在较高的起点上开展工作，也能作为与本专业有关的院校、研究所和部队的教学参考材料。

本丛书主要涵盖了电热化学发射技术、电磁轨道发射技术、电磁线圈发射（弹射）技术、电磁装甲防护技术的概述、原理、应用及相关理论与关键技术。

在本丛书的编写过程中，得到了有关单位和领导的大力帮助和支持。主要拟稿者都是本领域各单位具有扎实理论功底和丰富实践经验的学术带头人和技术骨干。经过反复审校、修改补充，本丛书终于编印出版，对参与本丛书编写、出版的所有人员在此一并表示衷心的感谢。

✍️ 81810

前 言

电磁弹射技术是在航母舰载机弹射需求日益迫切的背景下应运而生的。航母电磁弹射器替代现役蒸汽弹射器,已成为一种趋势和必然,必将广泛用于舰载机的弹射起飞。美国海军已确定在下一代“福特”号核动力航母上应用电磁弹射系统。为此,从20世纪80年代中期开始,美国就电磁弹射理论与技术开展了大量的研究工作,并在储能技术、电力电子技术、直线弹射电动机及其控制技术等方面取得了重大突破,先后成功实施了F/A-18E“大黄蜂”战斗机、T-45“苍蝇”教练机和E-2D“鹰眼”预警机的电磁弹射起飞。

我国对电磁弹射技术的研究起步相对较晚,研究水平与美国等世界军事强国相比差距很大。但近10余年来,国内对电磁弹射技术的研究也很重视。华中科技大学对高速大推力直线感应电动机的磁场分布、电磁推力性能计算、电磁设计和控制方法等进行了深入系统的理论研究。海军工程大学对高速长初级直线感应电动机的建模与仿真、纵向边端效应、铁芯饱和时的电动机模型及参数、初级耦合直线感应电动机及其集总参数模型、多定子直线感应电动机间接矢量控制算法、故障模式下的电流过载特性以及任务交班控制策略等进行了深入的理论和试验研究。国防科学技术大学对电磁弹射用永磁无刷直流直线电动机的电磁推力特性及优化、齿槽力补偿控制方法、涡流制动性能、换相控制技术、试验系统及试验等做了研究。哈尔滨工业大学主要对电磁弹射用永磁直线同步电动机及其控制技术开展了相关理论和试验研究。除此之外,国内还有一些单位也在开展电磁弹射技术的研究。总之,国内在电磁弹射技术的研究上已经取得了较丰富的理论研究成果,但反映这些研究成果的著作甚是少见。为推动我国电磁弹射技术的发展,汇总国内相关理论研究成果,特编写本书。

电磁弹射系统涉及储能技术、电力电子技术、直线弹射电动机及其控制技术等诸多复杂的关键技术,其中系统最为核心的是直线弹射电动机,因为它是电磁弹射系统中的动力装置和执行机构。为此,本书仅对直线弹射电动机及其控制技术所涉及的相关理论做了阐述。考虑到直线感应电动

机和永磁直线同步电动机均可作为弹射电动机，因此本书主要从基于直线感应电动机的感应型电磁弹射原理与技术、基于永磁直线同步电动机的永磁型电磁弹射原理与技术两个方面进行了介绍。

需要特别说明的是：在本书的编写过程中，因笔者学识水平和所掌握资料有限，所阐述的电磁弹射技术并非系统全面，而主要是借鉴了国内诸多研究学者关于直线弹射电动机及其控制方面所取得的理论研究成果。在阐述感应型电磁弹射原理与技术时，主要以双边长初级直线感应单元电动机为例，借鉴了华中科技大学杨通博士的理论研究成果；在阐述永磁型电磁弹射原理与技术时，吸收了哈尔滨工业大学刘吉柱博士、洪俊杰博士以及国防科学技术大学赵宏涛博士等研究学者的理论研究成果。为此，对他们所做的研究工作和所取得的研究成果表示衷心感谢。

在本书的编写过程中，军械工程学院新概念研究所的全体同志给予了大力支持，出版过程中兵器工业出版社提供了热情的服务与帮助，在此一并表示感谢。此外，由于编写过程仓促、笔者学识水平有限，在本书编写过程中难免会出现错误或纰漏，不足之处恳请同行专家和读者批评指正。

赵科义

2015年12月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 电磁弹射的有关概念	1
1.2 航母舰载机电磁弹射器的优势	4
1.3 航母舰载机电磁弹射技术的研究现状	6
1.4 电磁弹射系统中直线弹射电动机的研究现状	10
第 2 章 感应型电磁弹射器原理与技术	13
2.1 感应型电磁弹射器概述	13
2.1.1 感应型电磁弹射器的原理	13
2.1.2 感应型电磁弹射器的结构形式	14
2.1.3 感应型电磁弹射器弹射电动机的端部效应	18
2.2 长初级直线感应弹射电动机内的磁场分析	23
2.2.1 一维气隙磁场方程的建立	23
2.2.2 直线感应弹射电动机高速运行时的磁场特性	30
2.2.3 直线感应弹射电动机端部效应特征参数分析	31
2.2.4 直线感应弹射电动机磁场的一维理论分析	36
2.2.5 直线感应弹射电动机磁场的二维理论分析	41
2.3 长初级直线感应弹射电动机的性能计算	48
2.3.1 基于一维场理论的性能计算	48
2.3.2 入端行波推力特性分析	52
2.3.3 直线感应弹射电动机设计参数对推力和推力因数的影响	54
2.3.4 基于二维场理论的基行波推力计算	60
2.4 长初级直线感应弹射电动机的等效电路	62
2.4.1 基于场路复功率相等的等效电路参数计算方法	62
2.4.2 计及端部效应时直线感应弹射电动机的等效电路	64
2.4.3 考虑无次级覆盖初级部分影响的等效电路及性能计算	69
2.5 长初级直线感应弹射电动机的电磁设计方法	73
2.5.1 设计方法与设计准则	73
2.5.2 主要设计参数的选取	75
2.5.3 初级绕组与铁芯的设计	78

2.5.4	直线感应弹射电动机设计过程中的电磁计算	80
2.5.5	直线感应弹射电动机的电磁设计流程及样机设计结果	85
2.5.6	直线感应弹射电动机的初步热分析	92
2.6	直线感应弹射电动机控制技术	95
2.6.1	直线感应弹射电动机动态数学模型的建立	95
2.6.2	全压启动特性仿真	100
2.6.3	速度开环与闭环恒压频比控制	102
2.6.4	次级磁场定向控制	110
第3章	永磁型电磁弹射器原理与技术	120
3.1	永磁直线同步弹射电动机的总体结构	120
3.1.1	永磁直线同步弹射电动机的基本原理	120
3.1.2	永磁直线同步弹射电动机的类型及总体结构	121
3.2	永磁直线同步弹射电动机的设计	126
3.2.1	模块化的定子绕组设计	126
3.2.2	轭部厚度及极距对弹射电动机推力密度的影响	129
3.2.3	低速段和高速段永磁直线同步弹射电动机结构参数计算	131
3.3	永磁直线同步弹射电动机中的动子位置检测技术	139
3.3.1	传统磁栅测量信号的处理	140
3.3.2	查表列磁钢信号的处理	141
3.3.3	磁栅位移测量连续位移编码原理及实现	143
3.4	永磁直线同步弹射电动机驱动系统自律分散控制技术	153
3.4.1	自律分散控制体系结构	153
3.4.2	自律分散控制电动机数学模型	155
3.4.3	自律分散控制策略	165
3.4.4	自律分散控制中的闭环	166
3.5	永磁直线同步弹射电动机的解析分析	173
3.5.1	动子永磁体的设计	174
3.5.2	电感参数的解析计算	179
3.6	绕组分段永磁直线同步弹射电动机电流预测控制原理	182
3.6.1	绕组分段永磁直线弹射电动机及其模型	182
3.6.2	电流预测控制方法	185
3.7	永磁无刷直流直线弹射电动机定子磁链提前换相的推力控制	188
3.7.1	定子磁链提前换相的原理	189
3.7.2	定子磁链提前换相的控制性能分析	191
参考文献		195

第1章 概 述

电磁弹射技术是在航母舰载机弹射需求日益迫切的背景下应运而生的,并在储能技术、电力电子技术(或功率调节技术)、直线电动机及其控制等技术不断取得突破的支撑作用下而快速发展起来的。2010年12月18日,美国海军在莱克湖海军基地使用电磁弹射系统(Electromagnetic Aircraft Launch System, EMALS)首次将一架F/A-18E型战斗机成功弹射起飞。2011年9月27日,美国海军再次对布设在全尺寸模拟航空母舰甲板上的新一代航母电磁弹射器进行了试验,将一架E-2D“先进鹰眼”预警机成功弹射起飞,这在电磁弹射器的工程化实际应用方面具有里程碑意义^[1]。

1.1 电磁弹射的有关概念

电磁弹射技术是利用直线弹射电动机产生的电磁力来加速大质量的弹射载荷至其起飞速度的发射技术。直线弹射电动机是构成电磁弹射系统的执行机构,主要用于产生所需的弹射动力和制动力。弹射载荷可为各种类型无人机、固定翼飞机以及重型战斗机等。

电磁弹射技术与电磁发射技术在本质上是相同的,都是利用电磁力来加速载荷的,但是二者之间存在一定差异,主要表现在:电磁发射技术主要用于加速小质量的载荷到超高速,而电磁弹射技术主要用于弹射大质量的载荷到较低的速度^[2]。

电磁发射装置又称电磁发射器,主要包括轨道炮和线圈炮,其主要用于将数十千克的弹丸加速到数百米每秒甚至数千米每秒的高速,对目标进行打击和毁伤。电磁弹射装置又称电磁弹射器,它可将数百千克的无人机甚至20余吨的舰载机加速到数十米每秒或数百米每秒的弹射起飞速度。

电磁弹射系统由能量存储/发电子系统、电力调节子系统、能量分配子系统、直线弹射电动机子系统以及弹射控制子系统构成,其组成框图如图1-1所示^[3]。

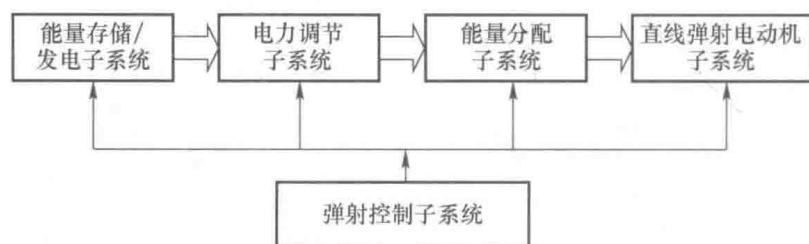


图 1-1 电磁弹射系统的组成框图

对于航母上的舰载机电磁弹射系统而言，它通常还包含能量接口子系统。能量接口子系统的功能在于从航母电力系统吸取电能，并将电能提供给能量存储分系统，驱动惯性储能电动机达到其指定转速。

能量存储/发电子系统可在两次弹射的间隔时间内，从航母上的能量分配系统提取并储存下一次弹射所需的弹射能量，并将储存的能量在 2 ~ 3s 的弹射过程中以脉冲形式快速转换为电能，驱动直线弹射电动机工作。

电力调节子系统的主要功能在于将能量存储子系统输出的电能变换成直线电动机所需的变频变压的电能。

能量分配子系统通过电缆、断路器等连接电力调节子系统和直线弹射电动机子系统。

直线弹射电动机子系统定子、动子之间的磁耦合产生电磁力，并由动子上的拖梭带动弹射载荷加速到弹射起飞速度。当弹射载荷达到弹射起飞速度后，拖梭与弹射载荷之间的连接装置自动解锁，弹射载荷被弹射起飞，动子及拖梭则需在制动电磁力的作用下制动并返回初始弹射位置。

弹射控制子系统的功能在于对其他子系统进行有效的控制，依据输入的弹射参数实时、精确控制通入直线弹射电动机的电流，并可进行全系统的健康诊断与监控。

从电磁弹射系统的构成来看，其关键技术主要有以下 4 个方面^[4]：

1. 储能技术

航母舰载机电磁弹射一次，弹射持续时间虽然不超过 3s，但峰值功率高达数百兆瓦，而航母电站无法直接提供这样的电力需求。因此，需采用储能装置在 45s 的时间内储存 122MJ 的能量。储能技术的难点在于需要找到能量密度很高的储能方式，否则储能装置本身体积、质量超标就不能满足上舰使用的要求。通用原子公司最终采用惯性储能的方法圆满解决了这个问题。航母舰载机电磁弹射系统中的能量存储/发电子系统采用 4 台盘式脉冲交流发电机。盘式脉冲交流发电机为双定子—轴向磁场的永磁电动机，转子既是储存动能的部件，又产生供发电用的磁场，它处于两个定子之间。定子上有两个独立的绕组，其中一个是电动机绕组，另一个是发电

机绕组。

2. 大功率电力调节技术

随着动子速度从零逐渐达到最大,通入直线弹射电动机的电能频率不断升高,电压也不断加大,所以能量存储子系统输出的电能不能直接驱动直线弹射电动机,需要通过电力调节子系统实现电能的变换,其难点在于处理的电能瞬态功率大,需要对高压大电流进行调节。随着大功率固态电力电子器件的不断升级,大功率电力调节技术在民用领域早已广泛应用,为解决大功率电力调节问题奠定了基础。循环环流器是电磁弹射系统中实现电力调节的关键部件,它只在某一时间段接通对弹射起作用的线圈,而不是把整个直线弹射电动机的初级线圈一起接通,从而形成一个随电枢运动的移动电磁波,并通过改变供电电压、频率使电磁弹射器在各种速度上以最高的效率运转。

3. 直线弹射电动机技术

直线弹射电动机是电磁弹射器的执行机构,其主要优势是定子、动子间无机械接触,仅靠电磁力实现电能到弹射动能的转换。直线弹射电动机技术的难点是尽可能提高它的功率密度和能量转换效率,且需要很强的环境适应能力。直线电动机在物流传输、电梯、车床加工等领域研究非常深入,大功率直线电动机在磁悬浮列车等轨道交通领域已经得到广泛应用。不管同步直线电动机,还是直线感应电动机,理论上都能满足电磁弹射的需求。

依据直线弹射电动机类型的不同,不妨将电磁弹射系统分为永磁同步型电磁弹射器和感应型电磁弹射器。永磁同步型电磁弹射器的弹射电动机采用永磁直线同步电动机(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, PMLSM),而感应型电磁弹射器则采用直线感应电动机(Linear Induction Motor, LIM)。

简单地说,永磁同步型电磁弹射器是依据永磁同步电动机的工作原理工作的,而感应型电磁弹射器是依据感应电动机的工作原理工作的。由于电磁弹射器是直接驱动载荷做直线运动的,所以电磁弹射器所采用的弹射电动机均为直线电动机,这无疑使得电磁弹射用电动机具备了直线电动机的典型特征,如纵向端部效应、定子绕组或初级绕组的不对称等普通旋转电动机中所不具备的典型特征。

4. 弹射控制技术

电磁弹射系统需要通过实时、闭环控制,才能依据设定的弹射参数精确控制弹射末速度和弹射过程中加速度的目的。弹射控制技术的难点在于对直线弹射电动机的实时反馈控制,以及对各种信息的组网、交互与处理。

电磁弹射系统所需的控制技术在工业及信息领域有大量的方法可借鉴,如矢量控制技术、直接转矩控制技术、工业总线技术及计算机技术等。

1.2 航母舰载机电磁弹射器的优势

目前,航母上仍采用蒸汽弹射器以实现舰载机的弹射起飞,但随着现代战机性能、质量和速度的提高,蒸汽弹射器已难以满足发展需求。为此,电磁弹射器发展受到了美国等军事强国的高度重视。航母舰载机电磁弹射器与蒸汽弹射器相比,其技术优势如下^[1,3,4]。

(1) 弹射能力更强。蒸汽弹射器通过机械方法控制注入汽缸的蒸汽,推力无法精确控制,输出的能量调节范围也很有限,过重或过轻的飞机都无法弹射。这就是目前美国现役航母上无法装备重型舰载机和轻型无人机的重要原因。航母舰载机电磁弹射系统的最大弹射能力比蒸汽弹射器高出约29%,弹射动能最高达122MJ,且其输出能量调节范围大,这是现役的蒸汽弹射器所无法比拟的。

(2) 弹射性能更好。典型蒸汽弹射器的加速度峰均比为1.15~1.2,在某些情况下实际加速度峰均比可达2以上,且弹射末速度误差可达2.57m/s以上。由于蒸汽弹射器推力不稳定,舰载机机体受力不平衡而易损。而航母舰载机电磁弹射系统通过优化弹射曲线,采用闭环反馈实时控制手段,加速度峰均比可达到1.05,弹射末速度误差可控制在0~1.5m/s以内。此外,航母舰载机电磁弹射系统产生的电磁推力可控,加速平稳,可大幅度减小对舰载机组件产生的冲击作用,从而有利于舰载机的结构设计和提高舰载机的使用寿命,同时也能缓解飞行员的身心压力。

蒸汽弹射器从冷态启动时,通常预热时间长达24h,而电磁弹射器的准备时间不到15min,这大大提高了战场应急反应能力和作战效率。另外,蒸汽弹射器能量转换效率仅为4%~6%,而电磁弹射系统的弹射效率比蒸汽弹射器高10倍,可达60%以上。

(3) 弹射可靠性更高。蒸汽弹射器是一个高温高压的复杂机械系统,全系统的固有可靠性不高,两次重大故障间的平均周期约405周。航母舰载机电磁弹射系统采用四能量链冗余结构,在弹射过程中可容忍一个能量链出现故障。在保证弹射任务完成的情况下,其可靠性大大提高,两次重大故障间的平均周期可达1300周以上。此外,由于蒸汽弹射器为开口汽缸结构,为保持活塞运动时汽缸内压力,需要采用金属密封条,受损更换极为频繁;而电磁弹射系统依靠定子、动子之间电磁场的非物理接触传力特

性,取消了许多高磨损的机械设备,从而使系统使用寿命大大提高。

(4) 装置适装性更好。美国现役航母一座 C-13 型蒸汽弹射器的总质量为 538t, 体积超过 1100m^3 , 而电磁弹射系统的质量小于 280t, 体积小于 425m^3 。此外, 蒸汽弹射器大部分质量位于上层甲板, 会导致船体重心升高, 不利于航行稳定; 而电磁弹射系统可灵活布置, 从而可避免蒸汽弹射器本身所带来的不足。

蒸汽弹射器多个部件之间由高温高压的管路连接, 且弹射汽缸必须整体安装, 在航母上的总体安装与布置难度较大。电磁弹射系统在设计过程中可采用模块化设计, 直线弹射电动机可分段安装与拆卸, 各个部件通过电缆或信号网络连接, 布置灵活, 适装性更好。

(5) 运行与维护成本更低。蒸汽弹射器一次弹射作业需消耗 614kg 蒸汽, 耗用航母大量的淡水资源和加热淡水所需的能源; 而电磁弹射系统在 3s 的弹射时间内功率约为 100MW, 折算下来仅消耗约 $83\text{kW} \cdot \text{h}$ 电能。蒸汽弹射器弹射作业和维护保养需要众多人员参与, 这大大提高了其全寿命周期的运行与维护成本。电磁弹射系统采用电气化信息化手段, 简化了操作方法, 并可实现全系统的状态监控和故障自诊断, 人力需要可减小 30%, 维护工作量大大降低, 平均故障修复时间大大减小, 节省了全寿命周期的运行与维护费用。

航母舰载机电磁弹射系统与蒸汽弹射器的主要参数对比如表 1-1 所示^[3]。

表 1-1 航母舰载机电磁弹射系统与蒸汽弹射器主要参数对比

比较参数	电磁弹射器 EMALS	蒸汽弹射器 C-13	EMALS 对 C-13 的性能评价
最大弹射能量/MJ	122	95	更大
弹射飞机质量/t	0.2~45	20~35	范围更宽
弹射末速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	28.3~102.9	69.4~97.2	速度范围更宽
末速度误差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0~1.5	2.57~3.60	末速度误差小
加速度峰均比	目标值 1.05	设计值 1.15~1.2, 实际值可能大于 2	加速度变化小
能量转换效率(%)	60	4~6	能量转换效率高
准备时间	15min	24h	作战效率高
重大故障平均周期/周	1300 以上	405	可靠性高
人力需求	不详	不详	减少 30%
系统质量/t	280	538	减少近 50%
系统体积/ m^3	425	1100	减小约 61.4%

航母舰载机电磁弹射系统与现役的蒸汽弹射器相比,具有巨大优势。航母舰载机电磁弹射系统适应了航母电气化信息化发展的需要,其取代落后的蒸汽弹射器将成为必然。

1.3 航母舰载机电磁弹射技术的研究现状

早在 1945 年,美国西屋公司(Westinghouse Company)就研制出一种被称为 Electropult 的电磁飞机弹射装置,该系统将质量为 5000kg 的飞机在 160m 的距离内,在 4.2s 内从静止加速到了 185km/h,产生的推力达到 75.6kN,相电流为 7kA。然而受到当时科技水平和工业水平的限制,大功率脉冲电源技术并不成熟,这一技术最终未能获得应用^[5]。

美国卡曼电磁公司于 1986 年设计制造了一台用于原理验证的半尺寸实验样机,实验过程中该样机产生了 119000lb (529.5kN) 的推力,演示了完整的电磁加速和减速控制。随后,卡曼电磁公司与海军空战中心在莱克赫斯特一起完成了舰载机电磁弹射系统关键部件验证阶段的工作,制造并测试了全尺寸系统的硬件,对设计原理和预期性能,特别是可控性、推力和效率进行了验证。全尺寸的舰载机电磁弹射系统能产生 1290kN 的推力,效率大约为 70%^[4]。

1995 年美国海军空战中心(NAWC)飞行器分部的 Doyle M. R. 和 Samuel D. J. 等人提出了一种飞机电磁弹射系统的方案^[6]。在他们提出的 EMALS 方案中,由 4 个六相转盘发电机提供基本储能,在最高转速 6400r/min 时每个发电机可以储存 121MJ 能量,并向匹配的负载提供 81MJ 的能量。能量转换工作由周波变换器完成,它把转盘发电机提供的 1700V、6400A 的交流电源转换为 0~644Hz,0~1520V 的调频调压电源后向负责推进的无槽型永磁直线同步电动机供电。牵引滑块就是电动机的动子,它包含 160 块永磁磁极,气隙长度 6.35mm,气隙磁密为 0.896T。发射轨道实质上就是电动机定子,它高 0.686m,宽 0.076m,发射段长度为 103m,其后是制动段。为了提高电动机的工作效率,定子采用分段工作的模式,每个分段的长度为 0.64m,只有动子滑块覆盖的定子段才会导通工作。整个系统的效率虽然比较高,但由于发射过程中能量很大,因此电源、推进部分都采用了主动散热的方案。

20 世纪 90 年代末,美国海军确定将 CVX 航母(即现在的 CVN-78 航母)作为舰载机电磁弹射系统的目标平台。1999 年 12 月,海军空战中心与诺斯罗普·格鲁曼公司和通用原子公司领导的团队,签订了为期 48 个

月的舰载机电磁弹射系统项目定义与风险降低阶段并行合同。其最大成果就是研制出一套包括能量储存和转换部件的全尺寸舰载机电磁弹射系统地面演示系统,并在1/2长度弹射上弹射了重量载荷的飞行器。2004年4月,通用原子公司被选定继续承担系统开发与验证阶段的工作,并获得了1.45亿美元的5年合同。通用原子公司与奎奈蒂克北美公司、加藤工程公司、柯蒂斯-莱特机电公司、德克萨斯大学机电中心、Alion科技公司、STV公司和L-3通信脉冲科学公司组成核心承包商团队,协作研究舰载机电磁弹射系统^[4]。

通用原子公司将舰载机电磁弹射系统定义为一个兆瓦级(300MW)的电力系统,它综合了发电机、储能系统、电源转换整流器、采用脉冲调制控制的逆变器、30万lb推力的直线感应电动机(作为弹射电动机),以及具有故障检测诊断功能的先进闭环控制系统^[4]。其中,储能发生器的电力来自航母配电系统,在弹射间隙充电;电源转换设备封装成紧凑的固态模块,安放在甲板下的舱室中,它从能量储存系统获取电力,然后转换成电压/电流适合的能量波;弹射电动机将电流转换成电磁力,用以驱动动子滑块以加速舰载机,它结构紧凑并实现了模块化;连接舰载机的动子滑块与蒸汽弹射器类似,但电动机中的电流在完成弹射过程后反向,用以使动子滑块刹车制动;控制系统对弹射电动机的电流进行实时精确控制,平稳加速舰载机并优化其离舰速度,以适应不同重量舰载机的弹射需求。

2007年,通用原子公司和美国海军团队完成了系统开发与验证项目的设计评审,并开始生产、设计用于测试组件和集成系统的硬件/软件^[4]。2008年3月,舰载机电磁弹射系统中的能量存储子系统的发电机组件在加藤公司完成工厂验收测试,12个能量存储子系统中1个用于组件级测试、4个用于系统级测试。全尺寸模拟的舰载机电磁弹射系统在2008年开始地面安装,2008年9月初完成了第一阶段高循环测试,以验证电力热力设备以及能量存储子系统的舰上循环率,共进行了1万次模拟弹射试验。2009年4月开始第二阶段高循环测试,涉及全动力系统测试(包括主电源接口子系统和相关软件)以及环境认证测试。

然而就在此时,美国海军对舰载机电磁弹射系统项目的成本、技术成熟度以及进度延误的忧虑不断增加,于是对舰载机电磁弹射系统用于“福特”号航母的可行性进行了重新评估。经过评估,美国海军倾向于在使用新技术、节省全寿命费用的基础上继续推进舰载机电磁弹射系统,以及避免更改“福特”号航母的设计,避免重新使用蒸汽弹射器可能导致的设计成本增加和进度延误。美国海军最终与通用原子公司签订了全套部件的首批生产合同,但制定出严格的固定价格条款以限制成本增加和进度拖延,