

戴建国 王 程 著

电磁驱动配气机构执行装置 能耗分析与温升研究

DIANCI QUDONG PEIQI JIGOU
ZHIXING ZHUANGZHI
NENGHAO FENXI YU
WENSHENG YANJIU



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

电磁驱动配气机构执行装置 能耗分析与温升研究

戴建国 王 程 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

• 南京 •

内容提要

本专著以一种新型发动机电磁驱动配气机构的执行装置(电磁直线执行器)为对象,从理论分析、数学建模、仿真计算以及试验验证等方面对该执行器的能耗构成、分布及变化情况展开研究和介绍,揭示了电磁直线执行器内能耗的变化规律以及能耗与温升的对应关系,并在此基础上探讨了执行器的降耗与散热技术方案。

本专著可作为新能源汽车、机电系统等研究领域相关技术人员的参考用书,也可作为车辆工程领域的研究生及本科生教辅用书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁驱动配气机构执行装置能耗分析与温升研究/
戴建国,王程著. —南京:东南大学出版社,2016. 12

ISBN 978-7-5641-7033-2

I. ①电… II. ①戴… ②王… III. ①汽车-发
动机-配汽机构-电磁执行器-研究 IV. ①U464. 134

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 025094 号

电磁驱动配气机构执行装置能耗分析与温升研究

著 者 戴建国 王 程
责任编辑 陈 跃(025)83795627

出版发行 东南大学出版社
地 址 南京市四牌楼 2 号
销售电话 (025)83794121
网 址 <http://www.seupress.com>

出 版 人 江建中
邮 编 210096
电子邮箱 press@seupress.com

经 销 全国各地新华书店
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
字 数 150 千字
版 印 次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-7033-2
定 价 18.00 元

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司
印 张 5.75

(凡因印装质量问题,请与我社营销部联系。电话:025-83791830)

前 言

汽车工业的飞速发展,带来了严重的能源与环境问题,大力推进传统汽车节能减排和新能源汽车产业化,成为当前汽车产业亟须解决的重大课题,也是推动汽车产业可持续发展的紧迫任务。新能源汽车产业化是不久的将来汽车节能减排的重要发展趋势,然而在当前过渡发展时期,传统汽车的节能减排更具实际应用价值。

电磁驱动配气机构相比传统发动机内的凸轮驱动配气机构,能实现气门运动规律在运行范围内的全柔性化调节,使得发动机以最佳性能运行在各工况下,可显著提升发动机的动力性和节能环保性能。电磁驱动配气机构的核心驱动部件为电磁直线执行器,其能耗的高低和性能的优劣将直接影响到电磁驱动配气机构的配气系统能耗、高速运动下的适应性以及长时间稳定工作的可靠性等技术指标,进而影响到发动机的动力性和燃油经济性。因此,对电磁直线执行器的能耗及其降耗散热技术的研究具有重要的理论研究意义和实际应用价值。

本专著涉及发动机可变技术、直线电机应用、电磁原理、能量转换与传热等方面的内容,覆盖基础学科领域较广,且在国内外同领域内具有一定的先进性和创新性,可为电磁驱动配气机构及直线驱动装置领域的研究提供技术参考。

本专著获得国家自然科学基金青年项目(51605183)和江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJB460004)的资助与支持,在此表示感谢。

至此,对所有为完成本书提供帮助和支持的专家和学者们表示由衷的感谢!

由于著者水平有限,书中难免会有疏漏或欠妥之处,恳请读者批评指正。

著者

2016年12月

目 录

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 电磁驱动配气机构的研究现状	2
1.3 电磁直线执行器的发展及研究现状	4
1.3.1 直线电机的发展概述	4
1.3.2 直线电机的研究现状	5
1.3.3 电磁直线执行器的能耗研究	7
1.4 面临的主要问题	8
1.5 本专著的内容和结构	9
2 电磁直线执行器的能耗构成分析	11
2.1 电磁直线执行器的能量转换过程	11
2.1.1 电磁驱动配气机构的基本结构	11
2.1.2 电磁直线执行器中的能量转换	12
2.1.3 能耗构成及分类	13
2.2 能耗的数学模型	13
2.2.1 铜耗	14
2.2.2 铁耗	14
2.3 电磁直线执行器的电磁场有限元分析	17
2.3.1 有限元仿真软件	17
2.3.2 电磁直线执行器有限元模型的建立	18
2.3.3 能耗的仿真结果分析	21
2.4 本章小结	22
3 电磁直线执行器的能耗变化研究	24
3.1 电磁直线执行器的能耗分布	24
3.2 变工况下电磁直线执行器的能耗分析	26
3.2.1 变发动机转速的能耗分析	26
3.2.2 变过渡时间的能耗分析	28
3.3 影响电磁直线执行器能耗的因素	29
3.3.1 铜耗的影响因素分析	29



3.3.2 铁耗的影响因素分析	30
3.4 电磁直线执行器的堵动测试试验	31
3.4.1 堵动测试原理	31
3.4.2 试验装置及测试方案	32
3.4.3 堵动状态下铁耗的规律探究	35
3.4.4 试验与仿真的对比	36
3.5 本章小结	36
4 电磁直线执行器的降耗方案研究	38
4.1 内芯切槽方案	38
4.1.1 内芯切槽的降耗原理	38
4.1.2 不同等分切槽方案效果对比	40
4.1.3 内芯切槽对执行器性能的影响	41
4.1.4 方案的综合评价	42
4.2 磁瓦拼接方案	42
4.2.1 电磁直线执行器的永磁体布置形式	43
4.2.2 等效磁荷法建立磁场分布模型	44
4.2.3 拼接方案的效果对比	46
4.2.4 层次分析法确定最优方案	48
4.2.5 最优方案的试验验证	50
4.3 软磁材料优化选择方案	51
4.3.1 常用软磁材料的性能对比	52
4.3.2 铁钴合金与低碳钢对执行器性能的影响对比	52
4.3.3 铁钴合金与低碳钢对执行器能耗的影响对比	53
4.3.4 方案的综合评价	54
4.4 降耗方案的综合分析	55
4.5 本章小结	57
5 电磁直线执行器的热分析	58
5.1 电磁直线执行器的传热理论模型	58
5.1.1 电磁直线执行器中热的产生	58
5.1.2 热传递的方式	58
5.1.3 总传热过程及总传热系数	60
5.1.4 电磁直线执行器中复杂的热交换	60
5.2 电磁直线执行器的温度场仿真	64
5.2.1 电磁场-温度场的耦合	64
5.2.2 热源及环境温度的确定	65
5.2.3 导热系数及对流换热系数的确定	66
5.3 电磁直线执行器的温升分布及变化规律	66

5.4 电磁直线执行器温升变化的影响因素	69
5.4.1 环境温度对执行器温升的影响	69
5.4.2 对流换热系数对执行器温升的影响	71
5.5 本章小结	72
6 电磁直线执行器的温升测试	73
6.1 温升测试方案	73
6.2 测温仪器与试验装置	74
6.2.1 测温仪器的选择	74
6.2.2 温升测试台架及装置	75
6.3 试验测试结果分析	76
6.4 强制风冷措施的探究	77
6.5 本章小结	80
参考文献	81
主要符号说明	82

1 绪 论

1.1 概述

汽车经历了一百多年的发展,其技术成熟度已经达到了前所未有的高度,现已成为人类不可或缺的交通工具。至 2014 年年底,全球汽车的保有量已突破 12 亿辆,而其中我国就有 1.54 亿的保有量,位居世界第二,仅次于美国。工业与信息化部预计 2020 年中国汽车保有量将超过 2 亿辆,可见我国已是全球范围内的汽车消费大国。此外,除了汽车消费量巨大,我国还是一个汽车产销大国。据中国汽车工业协会统计,2014 年我国全年累计生产汽车 2 372.29 万辆,同比增长 7.3%,销售汽车 2 349.19 万辆,同比增长 6.9%,产销量保持世界第一。汽车工业已成为我国国民经济的支柱产业,且仍保持着强劲的增长势头。

伴随着汽车工业的飞速发展,由此带来的能源紧张和环境污染问题也日益突出。据统计,2013 年我国石油表观消费量约为 4.9 亿吨,进口依存度为 57%,而目前汽车用汽柴油消费占全国汽柴油消费的比例已达 55%左右,每年新增石油消费量的 70%以上被新增汽车所消耗,汽车保有量的持续增长所带来的能源紧张问题越发突出。汽车排放中的 CO_2 、 NO_x 以及有害微粒,已经严重影响了城市的空气环境,自 2012 年冬以来,雾霾频繁肆虐着我国北京及广大中东部地区的上空。大力推进传统汽车节能减排和新能源汽车产业化,成为当前汽车产业亟须解决的重大课题,也是推动汽车产业可持续发展的紧迫任务。

新能源汽车产业化是不久的将来汽车节能减排的重要发展趋势,然而在当前过渡发展时期,传统汽车的节能减排更具实际应用价值。作为传统汽车动力源的内燃机,其性能仍有一定的提升空间。提升内燃机的性能,改善其排放的关键是要提高发动机的燃烧效率。当前内燃机提高热效率的技术主要有发动机可变技术、燃油直喷技术、均质压燃技术和轻量化技术等几个发展方向,其中以可变配气机构为代表的发动机可变技术得到了越来越多研究者的青睐。发动机可变配气机构增大了传统内燃机性能大幅提升的可能性。

发动机配气机构经历了常规凸轮驱动配气机构、凸轮驱动可变配气机构和无凸轮驱动配气机构三个发展阶段。其中,凸轮驱动配气机构和凸轮驱动可变配气机构,都或多或少地受凸轮型线的限制,难以满足各种不同工况的动力性和燃油经济性的需求。唯有取消凸轮机构,以直线伺服的方式来直接驱动配气机构,才能实现气门运动规律在运行范围内的全柔性化调节,从而实现发动机以最佳性能运行于各工况下。

电磁驱动配气机构作为无凸轮配气机构的一种重要形式,已得到越来越多国内外相关研究机构的重视。电磁驱动配气机构相比其他无凸轮配气机构,诸如电液驱动配气机构和

电气驱动配气机构等,具有结构系统简单,无需电液介质传递,功率密度高以及重复性好等优点。如图 1.1 所示,与传统凸轮配气机构以及机械式可变配气机构相比,采用电磁驱动配气机构能有效降低发动机的燃油消耗。此外,文献提出应用电磁驱动配气机构可在欧洲行驶工况下改善车辆燃油经济性达 16%~19%,并使发动机低速状态下的扭矩提升 10%~20%。

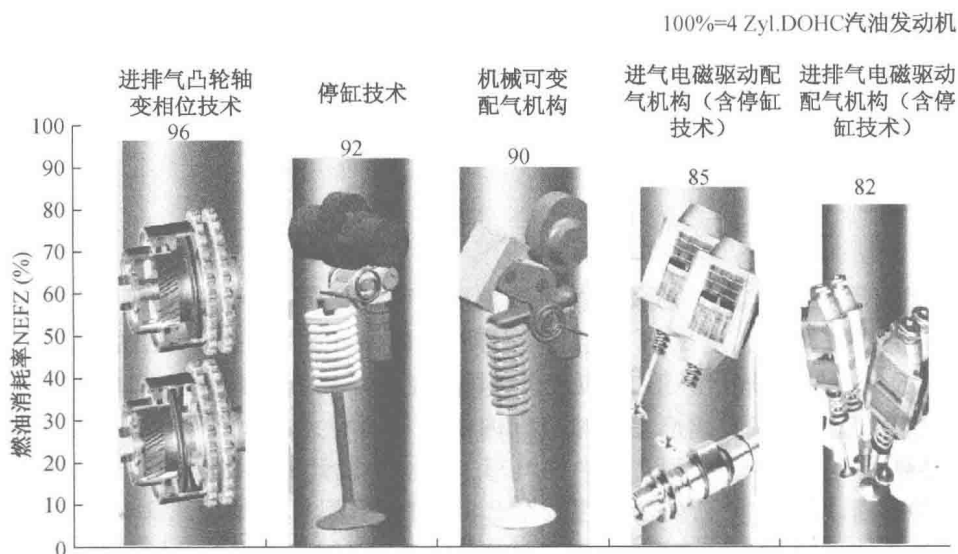


图 1.1 不同配气可变技术的燃油经济性对比

本专著所研究的电磁驱动配气机构的核心驱动部件为电磁直线执行器,其能耗高低和性能优劣将直接影响到电磁驱动配气机构的配气系统能耗、高速运动下的适应性以及长期稳定工作的可靠性等,进而影响到发动机的动力性与燃油经济性。此外,发动机缸盖上的高温以及电磁直线执行器自身的热效应都会对执行器的电磁特性、使用寿命及稳定性产生影响,这对电磁直线执行器的耐高温稳定工作能力提出了要求。

基于上述背景,本专著在课题组所研究的一种动圈式电磁驱动配气机构的基础上,展开了对其核心驱动部件——电磁直线执行器的能耗及其降耗散热技术的研究。同时,本书是江苏省科技支撑计划项目“高性能电磁直线执行器及其运动控制系统研发(BE2008133)”以及国家自然科学基金项目“全可变气门米勒循环发动机的热力学分析与系统集成优化研究(51306090)”的进一步发展和延伸,旨在对电磁直线执行器的基础研究进行更深层次的完善,探究并解决执行器往更高性能发展和更广泛方向应用的关键技术问题。

1.2 电磁驱动配气机构的研究现状

电磁驱动配气机构是无凸轮驱动配气机构的一种重要形式,其特点是利用所装置的电磁力来进行直接驱动。

早在 1994 年,通用公司就提出了双电磁铁双弹簧的驱动方案,开始了关于电磁驱动配

气机构的研究,并对后来电磁驱动配气机构的发展方向产生了深远影响。双电磁铁双弹簧型式的电磁驱动配气机构的原理如图 1.2(a)所示,由两个电磁铁、两个弹簧以及一个衔铁组成,气门直接与衔铁连接,通过电磁力和弹簧力共同作用,驱动气门的运动。目前基于此原理的电磁驱动配气机构仍占主要地位,其中较具代表性的研究机构有德国 FEV 公司、法国法雷奥(Valeo)公司、美国密歇根大学以及加利福尼亚大学等。然而双电磁铁双弹簧的结构存在着驱动力非线性的缺陷,且气门的开启和关闭难以根据发动机的工况进行实时调节,因此,该结构的电磁驱动配气机构严格意义上来讲并不能实现真正的全可变气门技术。

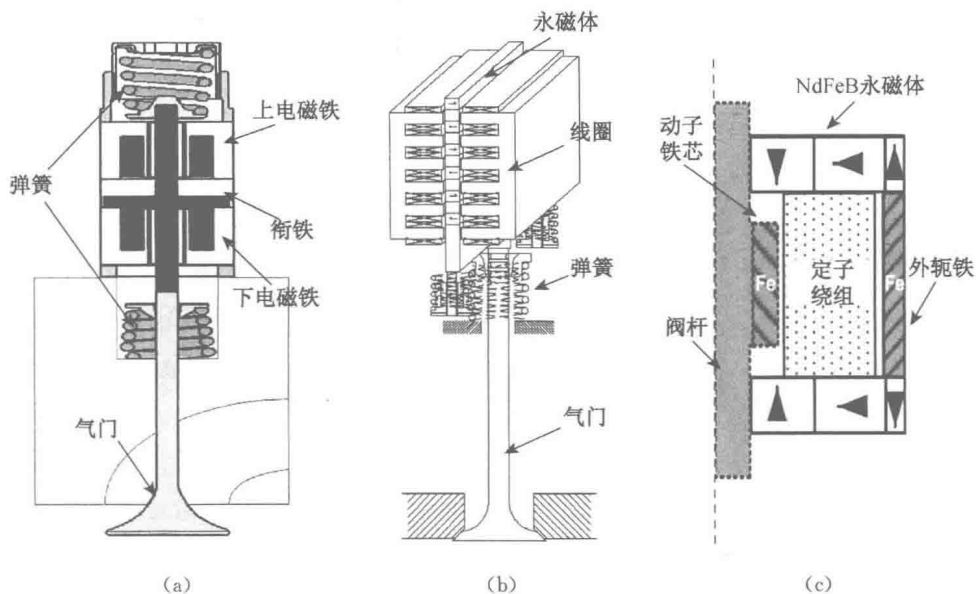


图 1.2 几种电磁驱动配气机构结构示意图

除此之外,还有其他一些电磁驱动配气机构型式正在被尝试和探究。

德国凯泽斯劳滕大学和 Compact Dynamics 公司都对动磁式磁阻型电磁驱动配气机构进行了研究,如图 1.2(b)所示。该结构也是基于弹簧-质量-振子系统的原理,通过改变定子线圈中的电流来改变磁场分布,从而控制驱动装置的电磁力和动子的运动。此类结构的电磁驱动配气机构,基于变磁阻工作原理,电流一定时电磁力与动子位置呈正弦关系,而不利于对动子的控制。

美国 Engineering Matters 公司提出了一种动铁式电磁驱动配气机构的方案,结构如图 1.2(c)所示。此方案在磁路中加入了永磁体,通电线圈与永磁体共同形成的磁场作用驱动内部铁芯做往复直线运动,从而带动气门进行上下运动。当内芯处于极限位置时,永磁体能产生保持力,从而减小电磁线圈的保持电流,降低系统能耗。由于内芯在行程范围内受永磁体产生磁场的电磁力随位置变化,且易受结构尺寸的误差影响,因此电磁线圈所通电流的控制难度较大,该型式的配气机构位置控制精度较低。

国内关于电磁驱动配气机构的研究仍然停留在理论技术探究阶段,离实际应用尚有较大距离,与国外领先的科研机构或公司也存在一定差距。其中,清华大学和浙江大学均对双电磁铁型电磁驱动配气机构进行过研究,基本结构及技术方案与国外相关研究类似,对其开展了一些仿真与实验测试,然而由于实际样机体积大且响应慢,性能欠佳,还不足以应

用到发动机中。

为了打破国外关于电磁驱动配气机构技术的垄断和封锁,也为了促进电磁驱动配气机构的技术提升和产品化应用,课题组提出了一种新型电磁驱动配气机构,如图 1.3 所示。配气机构的核心驱动部件是一种动圈式电磁直线执行器,该直线执行器较常规音圈直线电机在驱动力、行程等性能上均有明显提高。近年来,课题组一直致力于该电磁驱动配气机构的分析、设计及控制方面的研究,并对其进行了多轮样机的试制及测试,验证了其可行性。研究表明,课题组所提出的电磁驱动配气机构能有效改善汽车动力装置的经济性和动力性,具有广阔的应用前景和重要的研究意义。其中,作为配气机构的核心驱动部件,电磁直线执行器的性能提升则是目前最为关键和最为迫切的研究重点。

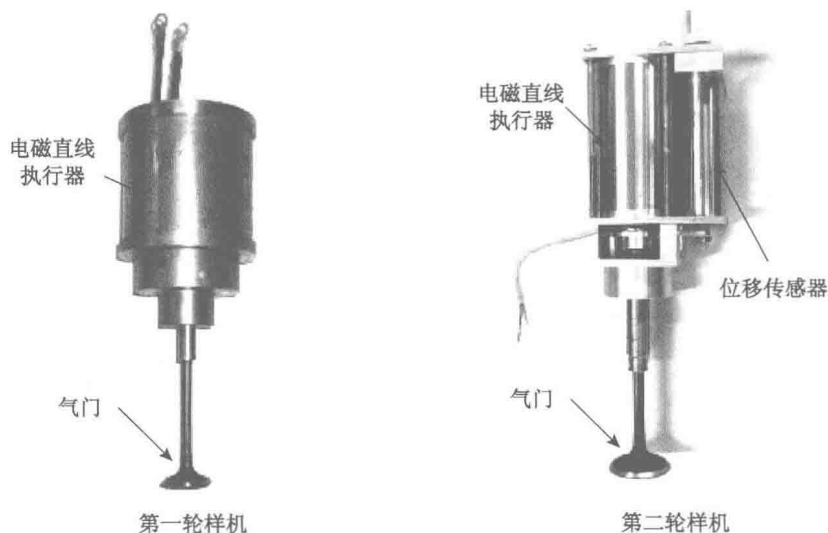


图 1.3 本专著所研究电磁驱动配气机构实物图

1.3 电磁直线执行器的发展及研究现状

电磁直线执行器是一种将电能直接转换成直线运动形式的机械能而无需通过任何中间转换装置的部件,是实现高频响、高精度、低功耗等更高要求的直线运动控制的关键,又可称为“直线电机”。

1.3.1 直线电机的发展概述

直线电机的由来最早可追溯到 1840 年惠斯登(Wheatstone)提出的直线电机雏形,距今已有 170 多年,但并没有获得实质意义上的成功。1890 年美国匹兹堡市的市长曾在他的一篇文章中首次提到了直线电机及其专利,想将直线电机用于织布机的梭子中,但限于当时制造技术、工程材料以及控制技术的水平,最终也是以失败而告终。不过直线电机的全新概念已点燃了科学家们的热情。1937 年,德国的肯柏(Kemper)首次提出了利用直线电机来驱动磁悬浮车辆的概念。1945 年,美国西屋(Westinghouse)电气公司首先研制成功电

力牵引飞机弹射器,以直线感应电动机为动力,成功将一架喷气式飞机在航母上 165 m 的行程内弹射起飞,这一成功案例使得直线电机受到了越来越多的重视。自 1955 年以后,直线电机进入了全新的研究开发阶段,其中以英国莱思韦特(Laithwaite)教授为代表的研究团队,在直线感应电机方面的理论探究与样机研制都取得了卓越的成绩,推动了直线电机领域的发展。1980 至今,随着高性能永磁体材料的出现以及电控技术的提升,直线电机开始进入一个飞速发展阶段,不同结构形式、不同激励方式以及不同工作原理的直线电机应运而生。世界上以日本和美国为代表的一些发达国家,诸如德国、英国、法国以及瑞典等,都在直线电机领域具备较强的研究和开发能力,尤其是日本,其研究人员之多和应用范围之广是世界首屈一指的。

国内直线电机的研究始于 20 世纪 70 年代初。浙江大学首先进行了直线感应电机领域的研究,并对直线电机的相关外文技术文献进行了翻译和出版。国内其他具有代表性的研究机构,诸如中科院电工所、西安交通大学、上海大学、南京理工大学、太原工业大学以及焦作矿业学院等,都在直线电机的不同应用领域取得了一定成绩,但相比国外,仍有较大差距,这已引起了众多国内研究机构的重视。

1.3.2 直线电机的研究现状

直线电机发展至今技术已经愈发成熟,其众多优点在传统旋转电机未能企及的领域得到了充分发挥。国外以欧美和日本为代表的一些发达国家在直线电机领域造诣颇深,许多成熟的直线电机产品也已经在诸多行业得到了广泛应用。

隶属于罗克韦尔自动化(Rockwell Automation)公司的美国 Anorad 公司是全球直线电机技术的先驱及领导者之一,其直线电机产品主要分为铁芯、无铁芯以及真空型三大类。其中,铁芯直线电机产品主要用于大推力场合,推力范围在 30~11 000 N 之间;无铁芯产品用于高速高精度运动定位的场合,推力范围在 8~2 000 N 之间;真空型直线电机主要用于高真空环境下的直线驱动。

德国的西门子(Siemens)公司在直线电机领域也有较深的研究,其直线电机的最大力可高达 20 700 N,进给速度超过 1 200 m/min,效率极高。目前西门子最新的两类直线电机产品是 1FN3 型和 1FN6 型。1FN3 型直线电机带有磁性次级部分,具有极高的力与尺寸比和动态性。1FN6 型则具有一个无磁铁的次级部分轨道,具有力密度和能效高、热膨胀程度低等优点,适合较长的移动路径。

除此之外,国外还有许多其他知名直线电机或直线驱动器的供应商,诸如美国的丹纳赫(Danaher)、艾罗德克(Aerotech)公司,德国的力士乐(Rexroth)、通快(Trumpf)公司,日本的三菱(Mitsubishi)、发那科(Fanuc)、三洋(Sanyo)公司等,都在直线驱动领域有突出的研究和产品。

另外,国外一些高校及科研院所一直在致力于研发新型的直线电机。

为了获得较大的推力和力常数,日本横滨国立大学设计了一种螺线型直线电机,如图 1.4 所示。定子采用螺旋状铁磁材料,并在其上绕制线圈,动子由另外的螺旋状铁磁材料和附在其上的永磁体组成,充分利用了电机的气隙磁场,使得其额定推力达到 2 000 N,力常数达到 538 N/A。相比一般永磁同步直线电机和直线感应电机,推力得到了成倍的增加,效果显著。该电机型式借鉴了盘式电机的优点,充分增加了电机气隙面积,结构新颖独特,

不过加工和装配难度较大。

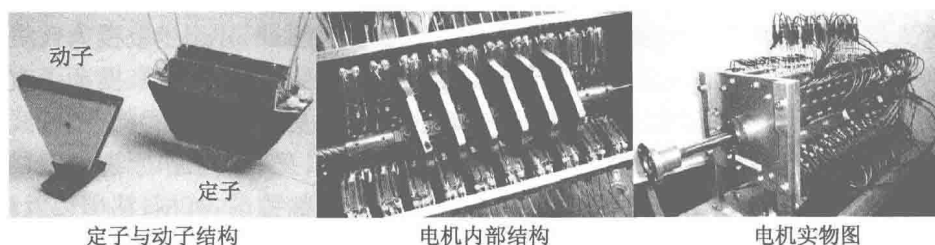


图 1.4 大推力螺旋型直线电机

澳大利亚悉尼理工大学的 Haiwei Lu 及其团队致力于研究尺寸小于 10 mm 的微型直线电机,如图 1.5 所示,以应用于小型机器人中。该直线电机应用了轴向磁通的永磁材料, Haiwei Lu 等人完成了结构和磁路设计、有限元分析以及样机试验等工作,为微型直线电机应用于小型机器人的研究奠定了良好的基础。然而由仿真计算和试验测试数据可以发现,该结构的直线电机存在一定的推力波动问题。

国外还有其他一些高校或研究机构在直线电机技术方面继续进行着探究,诸如日本油研工业株式会社、美国德克萨斯 A&M 大学、土耳其伊斯坦布尔科技大学、英国谢菲尔德大学以及日本的信州大学等。

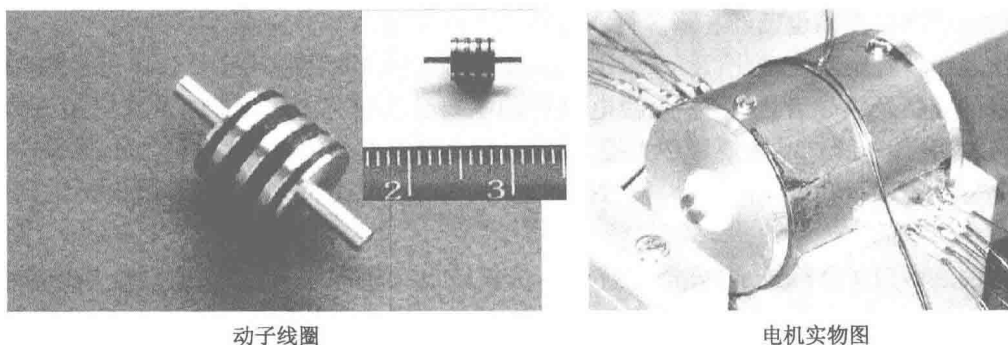


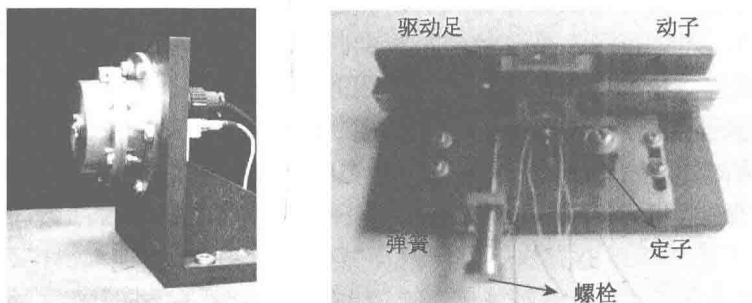
图 1.5 轴向磁通的微型电磁直线执行器

国内关于直线电机的研究起步较晚,但发展速度迅猛,目前已有越来越多的高校及科研院所对直线电机领域有了较为深入的研究,其中比较突出的有中国科学院电工研究所、浙江大学、清华大学、华中科技大学等院校及机构。

浙江大学是国内研究直线电机技术最早的院校,并成立了国内首家直线电机与现代驱动研究所,其研究内容主要包括直线电机及其控制技术、磁悬浮驱动技术及控制、现代新颖驱动技术与智能化系统等方面。承担了一批国家重大和重要的科研和工程项目,为推动国内直线电机技术的发展和应作出了重要贡献。

清华大学的精密测试技术及仪器国家重点实验室与机械工程系合作设计了一种应用于金刚石切削加工车床高速伺服刀架的正应力轴对称直线执行器,如图 1.6(a)所示。通过优化结构参数和控制策略,使得最终设计的直线执行器行程控制在 100 μm ,而最大加速度能达到 500 G,从而有效满足切削加工的高精度及快速响应需求。南京航空航天大学研究

设计了一种新型非共振压电直线电机,如图 1.6(b)所示,该电机基于叠层型压电陶瓷,在一定频率范围内,驱动足纵向振幅保持不变,且最大幅值为 900 nm,电机最大无负载速度为 4.8 mm/s,最大输出推力为 4.5 N。



(a) 正应力轴对称直线执行器 (b) 新型非共振压电直线电机

图 1.6 国内高校设计研究的两款直线电机样机图

国内还有其他众多高校及科研院所在直线电机新结构及新技术方面有了不小的突破,诸如华中科技大学研制的高响应短行程直线直流电机,东南大学发明了一种新型哈尔巴赫(Halbach)平面电机以及哈尔滨工业大学设计的新型无刷直流直线电机等,都在不同应用领域为直线电机技术的发展作出了贡献。

1.3.3 电磁直线执行器的能耗研究

本专著所研究的电磁直线执行器,属于圆筒型动圈式直线电机,将其称为执行器,主要是突出其作为运动控制执行元件的特点,区别于普通的性能指标相对较低的或作为动力应用的直线电机。圆筒型动圈式的直线电机型式相比扁平型或其他直线电机型式,具有结构紧凑、线性度高、功率密度大等优点,但也存在内部能耗较高、温度上升快且散热能力差的缺点。

目前针对电磁直线执行器的能耗分析以及温升研究方面的文献为数尚少。关于电磁直线执行器内部能耗的分类及分布情况的研究仍存在较大空白,而这方面的研究却是后续执行器的温升分析乃至性能进一步提升的重要基础。

罗马尼亚蒂米什瓦拉政治大学(University “Politehnica” of Timisoara)的波尔达(Boldea)教授及其团队在对永磁直线执行阀进行能耗分析时,考虑到钕铁硼(NdFeB)永磁体的温度系数较高,磁性能的热稳定性较差,其正常工作温度不能超过 150℃,而永磁直线执行阀的工作温度可高达 310℃,因此 NdFeB 永磁材料不能满足该执行阀的工作需求,从而选择了能适应高温工作的钐钴(SmCo)永磁体材料。得益于 SmCo 材料可以达到较低的功率损耗及热损耗,因此,Boldea 教授认为绕组的欧姆损耗即铜耗,是影响直线执行阀工作的重要因素,而铁芯损耗可以忽略,并通过建立数值模型结合有限元分析得出最终铁芯损耗只有铜耗的 1/25 左右。但 Boldea 教授并没有给出永磁直线执行阀的能耗测试以及温升测试数据验证,模型的准确性有待考证。

韩国光州科学技术研究所的李宪(Heon Lee)等人,对应用于直线压缩机的直线振荡驱动器的铁耗通过三种不同途径进行了计算和研究,三种方法都是基于采用 Ansys 有限元软

件以及爱泼斯坦铁耗测试曲线进行的分析。通过建立 2D 和 3D 的有限元模型来展开计算,并与试验测试数据进行比对,得到 2D 有限元模型与试验数据的误差小于 10%,而 3D 有限元模型的误差则更大一些,这主要是由于 3D 模型中并未考虑磁漏和叠层的影响所致。但 Heon Lee 在其专著中并未对直线振荡驱动器的铁耗测试进行较为详细的描述,试验测试方法也未见说明。

为了降低圆筒状密闭直线电机的内部温度,提升其工作性能,北京航空航天大学的王大或博士等提出利用磁性流体来提高直线电机的导热效率,有利于将电机内芯及线圈的热量通过磁性流体向外散发出去,从而有效降低电机内部的温度。此方法新颖独特,降温散热效果良好,在微小型电机冷却散热应用中是一个具有重要意义的方案,但装配及密封难度较大。

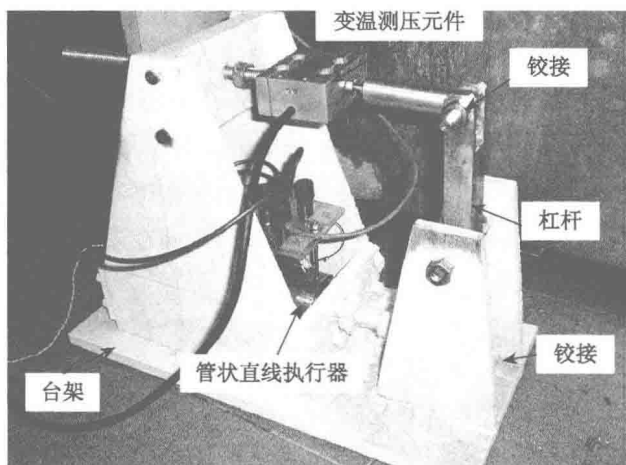


图 1.7 管状直线执行器的液氮冷却装置图

意大利的费比诺教授 (Fabrizio Marignetti) 尝试对管状直线执行器的动圈进行液氮冷却,装置如图 1.7 所示。通过试验可以发现,经过液氮冷却的动圈要比无冷却方式的动圈温度低约 90%,降温效果显著。然而利用液氮进行冷却的方案中,装置体积庞大,结构较为复杂且价格昂贵,难以将其应用于微小型空间及批量工业上。

此外,在电磁直线执行器的温升分析方面,还有其他一部分科研工作者做了一些重要的探究工作。哈尔滨工业大学的黄旭珍等人对高负载下管状永磁直线电机的温升进行了计算和

试验分析,并探讨了所研究电机的极限工况;波兰奥波莱工业大学的安杰伊教授 (Andrzej Waindok) 对自己所研究的直线执行器进行了温升影响研究,研究表明,随着温度的升高,执行器的永磁体性能参数、最大电流密度等都有所下降,影响了直线执行器的工作性能。

1.4 面临的主要问题

对电磁驱动配气机构的研究,旨在改善发动机进排气性能,提升发动机的动力性和燃油经济性。然而电磁驱动配气机构的高能耗及长时间工作产生的高温很大程度上制约了其性能进一步的提升和发展,因此,对配气机构核心驱动部件——电磁直线执行器的能耗分析及降耗散热技术研究是电磁驱动配气机构研究逐步深入的迫切需要。

本专著研究的电磁直线执行器具有良好的特性以及广阔的应用前景,但其性能仍有较大的提升空间。对电磁直线执行器的能耗进行分析,并研究降耗散热方案来提升执行器的性能,有利于提升执行器的工作稳定性和高负荷运作能力,从而进一步提高电磁驱动配气机构的工作性能。对电磁直线执行器的能耗分析及降耗散热技术研究主要面临以下几点

挑战:

(1) 能耗的准确计算,以及试验验证。电磁直线执行器能耗的计算主要基于斯坦梅茨方程,并借助有限元仿真软件进行计算分析。电磁直线执行器的能耗与执行器的激励、结构布置以及所采用材料的特性都密切相关,能耗计算的准确与否将直接影响到后续能耗变化规律及分布情况的深入分析,因此能耗的测试试验验证是必不可少的。电磁直线执行器的能耗测试,尤其是铁耗数据的测量是本研究的一大难点。中国科学院上海技术物理研究所的熊超和浙江大学的王龙一等人在对动磁式直线振荡电动机功率损耗进行研究时,完成了电机的能耗测试。通过将电机定子与定子紧固且通过模具调节定子组件的位移,来使得测量实验过程中,控制输入电能只转化为铜耗和铁芯损耗,而没有任何的机械损耗,以方便测量电机的铁芯损耗。熊超等人采用该方法有效测量了电机在不动状态下的能耗,但未对电机的能耗进行数学建模计算,通过仿真计算与试验数据比对,便于进一步分析电机动态下的能耗。

(2) 降耗散热方案的提出。电磁直线执行器的性能提升与自身能耗高低有很大的关系,能耗的降低有利于提高执行器的工作效率、输出特性以及运行稳定性。能耗减少也将会带来执行器运行温升的下降,从而提高执行器的高负荷运作能力以及长时间工作寿命。日本信州大学的 Utsuno M 对动铁式直线振荡电机在正弦电流激励和方波电压激励两种不同激励方式下的能耗进行了分析和对比,探讨了激励源对直线电机能耗的影响。由数据对比可以发现,激励源的不同对直线电机的能耗将产生较大的影响,因此可以考虑通过优化控制策略来改进激励的输入,以达到改善直线电机能耗的目的。华北电力大学的赵海森博士在对超高效异步电机的损耗及降耗措施进行研究时,通过基于时步有限元的分析方法优化定子槽型以及改进定子侧结构件的设计,以达到降低异步电机能耗的目的。由此可见,在对执行器能耗深入分析的基础上,改进执行器的相关结构能在一定程度上降低其能耗。

(3) 电磁直线执行器的性能提升研究。作为发动机电磁驱动配气机构的核心驱动部件,电磁直线执行器虽已具备高频响、高精度、高功率密度等优点,但长时间高负荷稳定工作仍存在较大问题,性能提升还有很大空间。罗马尼亚的 Boldea 教授在分析永磁直线执行阀的能耗时,将耐高温能力更好的 SmCo 永磁材料取代温度系数高、热稳定性差的 NdFeB 永磁材料,对永磁直线执行阀的能耗降低起到了一定的促进作用。东南大学的黄学良等人正在设计和研究一种用于驱动高精度平面电机的无铁永磁直线电机时,将永磁体 Halbach 阵列型和径向阵列型两种样机进行了对比研究,得到 Halbach 阵列型样机的推力常数相比径向阵列型提高了 1.37 倍,电动势幅值提高了 1.5 倍且波形正弦性较好,有效增大了无铁直线电机的气隙磁通密度,改善了磁场分布特性。综上可知,从优化电磁直线执行器的材料选择、改善磁场分布特性以及提升控制精度等方面着手,有利于电磁直线执行器的性能优化和提升。

1.5 本专著的内容和结构

本专著以应用于一种新型电磁驱动配气机构的电磁直线执行器为研究对象,以提升电磁直线执行器乃至其所应用的电磁驱动配气机构的性能为目标,通过理论分析、数学建模、

仿真计算和试验测试相结合的方法,对执行器的能耗及其降耗散热技术展开细致和深入的分析。本专著各章节主要内容安排如下:

第一章:绪论。介绍课题研究的背景及意义,阐明电磁直线执行器作为电磁驱动配气机构核心部件对其性能影响的重要性。综述国内外关于电磁驱动配气机构的研究现状,进而介绍直线电机的发展和研究现状,其中,着重阐述作为一种特殊直线电机的电磁直线执行器的相关研究,尤其是其能耗、温升以及测试方面的研究现状。最后,提出电磁直线执行器的能耗分析及降耗散热技术研究所面临的问题。

第二章:电磁直线执行器的能耗构成分析。从能量守恒的角度分析电磁直线执行器的能量转化过程,并通过对电磁直线执行器的能耗构成进行深入研究,明确执行器能耗的细化分类。借助电磁场有限元仿真软件 Ansoft Maxwell,对电磁直线执行器展开有限元建模和仿真,从而探究电磁直线执行器的电磁特性及能耗状况,为后续执行器的性能分析和能耗规律性研究奠定基础。

第三章:电磁直线执行器的能耗变化研究。对电磁直线执行器的能耗分布及不同工况下的能耗变化规律展开研究,并进一步分析执行器能耗的影响因素。提出能耗的堵动测试方案,搭建试验台架以开展堵动测试研究。由试验测试结果细致分析堵动状态下的铁耗变化规律,以验证电磁直线执行器能耗理论分析的准确性与可靠性。

第四章:电磁直线执行器的降耗方案研究。在对电磁直线执行器能耗分布及变化规律研究的基础上,从执行器的结构改进及材料优化选择等方面对其节能降耗方案展开探究。提出几种有效的降耗方案,并进一步分析各方案的优缺点及可行性,最后综合评价各降耗方案对执行器的节能降耗以及性能提升的促进作用。

第五章:电磁直线执行器的热分析。在电磁直线执行器能耗分析的基础上,开展对执行器的生热及热变化的研究。利用总传热的概念建立电磁直线执行器的热交换模型,并采用电磁场-温度场双向耦合的方式,建立基于 Ansoft Maxwell 与 Ansys Workbench 联合仿真的有限元模型,仿真分析电磁直线执行器的温度分布及温升变化情况,并进一步探究环境温度和对流换热系数两种因素对执行器的影响。

第六章:电磁直线执行器的温升测试。为了验证电磁直线执行器的温度场模型的准确性,开展对执行器的温升测试试验,并在实际工况下探究执行器的温升变化规律。从测试方案的确定、测温仪器的选择以及测试台架的搭建等方面介绍执行器的温升测试试验,并对测试试验结果进行细致分析。最后,对电磁直线执行器的强制风冷方案展开深入分析和试验测试,为后续执行器的冷却散热乃至进一步性能提升研究奠定基础。