

磁致伸缩电液伺服阀 理论与技术

Theory and Technology of
Electrohydraulic Servo Valves Based on
Giant Magnetostrictive Material

朱玉川 李跃松 著



科学出版社

内 容 简 介

磁致伸缩电液伺服阀理论与技术

朱玉川 李跃松 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书为多项国家自然科学基金与航空科学基金项目研究成果总结,是一本介绍磁致伸缩材料驱动的新型电液伺服阀理论与技术的专著。包括磁致伸缩射流伺服阀与喷嘴挡板伺服阀结构设计及多物理场分析优化;磁致伸缩电-机转换器磁致位移与热致位移的数学建模与补偿控制策略;射流与喷嘴挡板液压放大器数学建模、关键参数设计理论以及流场数值模拟技术;磁致伸缩射流伺服阀与喷嘴挡板伺服阀数学模型、静动态性能等理论与技术。

本书可供从事航空、航天、舰船、兵器、冶金等行业重大机电装备电液伺服控制元件研发的科技工作者、专业技术人员以及高等院校相关专业师生阅读与参考。同时,也可供从事磁致伸缩材料等智能材料与智能结构应用研究的科研、工程技术人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

磁致伸缩电液伺服阀理论与技术/朱玉川,李跃松著. —北京:科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-056948-6

I. ①磁… II. ①朱… ②李… III. ①磁致伸缩-电-液伺服阀
IV. ①TH137.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 049669 号

责任编辑:李涪汁 王宝玲/责任校对:彭涛

责任印制:张克忠/封面设计:许瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天津市新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年3月第一版 开本:720×1000 B5

2018年3月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:380 000

定价:129.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电液伺服系统由于具有功率密度大、响应速度快、抗负载扰动能力强等突出优点而被广泛应用于航空、航天、舰船、兵器、冶金等领域,如飞机舵面操纵、飞机进气道控制、航空发动机燃油控制、飞机推力矢量控制、导弹和运载火箭发射系统控制、雷达天线定位、坦克稳定器、电液负载模拟器、疲劳试验机械与振动试验机械等都离不开电液伺服控制技术。作为电液伺服控制系统核心控制元件的电液伺服阀,是连接电气系统和液压系统的桥梁,其作用是将输入电信号快速、成比例、高精度地转换为大功率液压动力,其性能直接影响并制约着整个电液伺服控制系统的控制精度、响应速度、可靠性和使用寿命等关键性能指标。因此,研制控制精度高、响应速度快、可靠性高的新型电液伺服阀对提升相关行业电液伺服控制系统的性能以及相关重大机电装备的性能都具有重要意义。

电液伺服阀通常由电-机转换器、液压伺服放大器及反馈机构(或平衡机构)三部分构成。电-机转换器目前仍然主要采用由20世纪五六十年代发展成熟的永磁力矩马达与永磁力马达,液压伺服放大器主要采用射流液压放大器、喷嘴挡板液压放大器以及滑阀液压放大器三种结构形式。综合以上三种液压伺服放大器静态性能特点与功率放大能力等因素,射流液压放大器与喷嘴挡板液压放大器主要适合应用于第一级液压放大,而滑阀液压放大器主要用于第二级或功率级液压放大。因此,电-机转换器、射流液压放大器与喷嘴挡板液压放大器实际上成为决定电液伺服阀响应速度、控制精度与可靠性的决定因素。

本书主要从伺服阀用电-机转换器、射流液压放大器与喷嘴挡板液压放大器三个方面开展了相关研究。在伺服阀用电-机转换器方面,随着新型功能材料的发展,尤其是20世纪70年代初美国海军水面武器中心和Iowa大学Ames稀土材料研究所合作发明的超磁致伸缩材料(商品名为Terfenol-D)的出现,由于该材料具有出力大、能量密度高、可靠性高、分辨精度高、频带宽及响应速度快等优点,利用超磁致伸缩材料等智能材料研制新型电-机转换器应用于电液伺服阀,从而提高电液伺服阀的动态性能就成为电液伺服阀理论研究和发展的一个重要方向。本书第1章对国内外智能材料电-机转换器驱动新型电液伺服阀进行了综述,总结了各种新型智能材料驱动的电液伺服阀的主要性能指标与特点。本书第2、3、4章分别从超磁致伸缩执行器多物理场分析优化、磁致位移数学建模与线性补偿、热致位移数学建模与控制策略等方面详细阐述了相关理论与技术研究成果。在射

流液压放大器方面,本书第5、6章提出了基于节流理论和动量定理的射流液压放大器的能量转换和分配模型,并推导出射流液压放大器的理论压力特性、流量特性以及压力-流量特性,通过流场数值模拟修正了理论模型,使得所提出的两种模型对射流液压放大器实际特性具有更准确的理论预测性。在喷嘴挡板液压放大器方面,本书第5、6章提出了基于喷嘴挡板阀综合特性原则的参数设计理论,与传统基于最大压力灵敏度参数设计理论进行了对比,并通过流场数值仿真揭示了关键参数对喷嘴挡板放大器特性影响规律。本书第7、8章分别从磁致伸缩射流伺服阀与喷嘴挡板伺服阀理论模型与实验研究层面进一步揭示了磁致伸缩电液伺服阀静动态特性。最后,本书第9章总结了全书主要研究结论并对后续理论与技术发展进行了展望。

本书是作者近10年来从事超磁致伸缩电-机转换器及其新型电液伺服阀技术的研究工作总结,研究工作得到了国家自然科学基金青年科学基金项目“超磁致伸缩执行器驱动的射流伺服阀关键技术研究”(50805080)、国家自然科学基金面上项目“面向高频大流量电液伺服阀的智能GMA的基础研究”(51175243)、航空科学基金“基于超磁致伸缩材料高频响射流伺服阀的应用研究”(20090752008)、航空科学基金“高频智能超磁致伸缩电液放大器的基础研究”(20110752006)、浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金项目“集电液转换与传感控制一体化的智能GMA的基础研究”(GZKF-201116)、中央高校基本科研业务费项目“智能GMA驱动的四喷嘴挡板阀的基础研究”(NS2010150)、江苏高校“青蓝工程”、江苏高校品牌专业建设工程等项目的资助,在此表示衷心感谢。

本书融入了作者所指导的李跃松博士、王晓露硕士、程清凤硕士、纪良硕士等的研究成果,撰写过程中得到了在读博士研究生高强、在读硕士研究生朱斌、王振宇、李宇阳、罗樟、刘诚、宋昀泽、王睿、李仁强的大力帮助,在此一并向他们表示感谢。

限于作者水平,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评、指正。

朱玉川

于南京航空航天大学

2017年12月

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 电液伺服阀主要组成	1
1.1.1 电液伺服阀概述	1
1.1.2 电-机转换器	2
1.1.3 液压放大器	3
1.2 智能材料及其驱动的新型电液伺服阀	5
1.2.1 压电材料/电致伸缩电液伺服阀	5
1.2.2 形状记忆合金/磁控形状记忆合金电液伺服阀	9
1.2.3 磁流变液电液伺服阀	10
1.2.4 电流变液电液伺服阀	12
1.3 磁致伸缩材料	13
1.3.1 磁致伸缩形变机理	13
1.3.2 超磁致伸缩材料的发展	13
1.4 超磁致伸缩材料在电液伺服阀中的应用	14
1.4.1 超磁致伸缩材料驱动的新型电液/电气伺服阀	14
1.4.2 超磁致伸缩材料驱动的电液伺服阀关键技术	18
1.5 本章小结	19
参考文献	20
第2章 磁致伸缩电液伺服阀及其多物理场优化	23
2.1 超磁致伸缩材料的应用特性	23
2.1.1 磁致伸缩特性	23
2.1.2 压应力特性	25
2.1.3 温度特性	27
2.1.4 倍频特性	27
2.1.5 涡流损耗特性	28
2.2 超磁致伸缩射流伺服阀结构及原理	29
2.3 超磁致伸缩电-机转换器的电磁驱动	30
2.3.1 GMA 磁路模型	30

2.3.2	GMA 磁场分析	32
2.4	超磁致伸缩电-机转换器的热传导	36
2.4.1	GMA 传热模型	36
2.4.2	GMA 热场分析	44
2.5	射流液压放大器的结构参数优化	45
2.5.1	淹没紊动射流理论	45
2.5.2	射流液压放大器优化模型	47
2.5.3	射流液压放大器设计准则	52
2.6	超磁致伸缩驱动型喷嘴挡板阀	55
2.6.1	超磁致伸缩三喷嘴挡板阀的结构与工作原理	55
2.6.2	超磁致伸缩四喷嘴挡板阀的结构与工作原理	56
2.7	本章小结	57
	参考文献	58
第3章	磁致伸缩电-机转换器磁致位移模型与控制	60
3.1	超磁致伸缩电-机转换器磁致位移理论模型研究现状	60
3.1.1	本构耦合模型	60
3.1.2	磁滞建模与控制	61
3.2	基于复数磁导率的超磁致伸缩电-机转换器磁致位移模型	64
3.2.1	基于复数磁导率的磁化模型	64
3.2.2	磁致伸缩模型	70
3.2.3	机械传动的动力学模型	71
3.3	超磁致伸缩电-机转换器的特性分析	72
3.3.1	GMA 位移测试系统	72
3.3.2	GMA 位移输出的静态性能	73
3.3.3	GMA 位移输出的动态性能	76
3.4	超磁致伸缩电-机转换器的驱动技术	84
3.4.1	伺服阀用 GMA 的驱动要求	84
3.4.2	伺服阀用 GMA 驱动器设计	85
3.4.3	实验研究	87
3.5	超磁致伸缩电-机转换器的前馈逆补偿控制	88
3.5.1	前馈逆补偿控制系统及控制原理	89
3.5.2	GMA 的动态逆模型	90
3.5.3	仿真与实验	94
3.6	本章小结	98
	参考文献	99

第 4 章 磁致伸缩电-机转换器热损耗与热致位移控制	103
4.1 热致位移研究现状	103
4.1.1 热损耗研究现状	103
4.1.2 热致位移抑制研究现状	106
4.2 GMA 热功率损耗模型与分析	109
4.2.1 GMA 结构及其工作原理	109
4.2.2 热功率损耗对 GMA 输出性能的影响	110
4.2.3 热功率损耗理论模型与实验研究	110
4.2.4 降低执行器热功率损耗的方法	117
4.3 基于管式冷却执行器的热场有限元仿真与分析	122
4.3.1 仿真模型的建立	122
4.3.2 稳态传热仿真结果分析	125
4.4 基于腔式冷却执行器的传热数学模型与数值分析	135
4.4.1 腔式冷却执行器结构及工作原理	135
4.4.2 稳态等效热阻模型	136
4.4.3 稳态温度场及热致位移计算模型	138
4.4.4 理论模型计算	144
4.5 超磁致伸缩电-机转换器热致位移控制实验研究	149
4.5.1 温控测试实验平台的搭建	150
4.5.2 管式冷却执行器温控实验结果分析	154
4.5.3 腔式冷却执行器温控实验结果分析	157
4.5.4 管式主动冷却与腔式主动冷却对比分析	160
4.6 本章小结	161
参考文献	162
第 5 章 射流与喷嘴挡板液压放大器的建模理论	165
5.1 射流与喷嘴挡板液压放大器理论研究现状	165
5.1.1 射流液压放大器	165
5.1.2 喷嘴挡板液压放大器	166
5.2 射流液压放大器结构及工作原理	167
5.3 射流液压放大器通流面积的求取	168
5.3.1 通流面积的线性模型	168
5.3.2 通流面积的非线性模型	171
5.4 射流液压放大器模型及特性仿真	174
5.4.1 基于节流理论的射流液压放大器模型	174
5.4.2 基于动量定理的射流液压放大器模型	184

5.5	喷嘴挡板液压放大器的静态特性模型	190
5.5.1	单喷嘴挡板阀的模型	190
5.5.2	双喷嘴挡板阀的模型	193
5.5.3	三喷嘴挡板阀的模型	195
5.5.4	四喷嘴挡板阀的模型	198
5.6	喷嘴挡板液压放大器参数设计理论	201
5.6.1	基于最大控制压力灵敏度的参数设计理论	201
5.6.2	基于综合性能最优的参数设计理论	203
5.7	本章小结	213
	参考文献	214
第6章	射流与喷嘴挡板液压放大器的数值模拟	217
6.1	射流与喷嘴挡板液压放大器流场数值模拟研究现状	217
6.1.1	射流液压放大器	217
6.1.2	喷嘴挡板液压放大器	217
6.2	射流液压放大器流场数值模拟	218
6.2.1	流场数值模拟的数学基础	218
6.2.2	射流液压放大器流场数值模拟	219
6.2.3	射流液压放大器模型的修正	222
6.3	喷嘴挡板液压放大器的流场建模	223
6.3.1	流场模型建立	223
6.3.2	边界条件设置	226
6.4	超磁致伸缩四喷嘴挡板阀的流场分析	226
6.4.1	喷嘴区域的流场分析	226
6.4.2	固定节流孔-喷嘴区域的流场分析	237
6.5	本章小结	244
	参考文献	245
第7章	磁致伸缩电液伺服阀理论模型与特性分析	247
7.1	超磁致伸缩射流伺服阀的理论模型	247
7.1.1	模型构成与各环节方程	247
7.1.2	超磁致伸缩射流伺服阀的模型	251
7.2	超磁致伸缩射流伺服阀的理论特性	252
7.2.1	超磁致伸缩射流伺服阀的静态性能	252
7.2.2	超磁致伸缩射流伺服阀的动态性能	256
7.3	超磁致伸缩三喷嘴挡板阀数学模型	261
7.3.1	模型构成与各环节方程	261

7.4 超磁致伸缩三喷嘴挡板伺服阀的理论特性	265
7.4.1 模型参数辨识	265
7.4.2 阶跃响应特性	266
7.4.3 正弦响应特性	267
7.5 本章小结	269
参考文献	270
第8章 磁致伸缩电液伺服阀的实验研究	271
8.1 超磁致伸缩射流伺服阀实验研究	271
8.1.1 测试系统	271
8.1.2 误差来源及分析	273
8.2 超磁致伸缩射流伺服阀的测试	274
8.2.1 静态性能测试	274
8.2.2 动态性能测试	276
8.3 超磁致伸缩射流伺服阀理论模型与实验结果对比	284
8.3.1 静态性能对比	284
8.3.2 动态性能对比	285
8.4 超磁致伸缩三喷嘴挡板伺服阀特性的实验研究	289
8.4.1 静态特性测试	289
8.4.2 动态特性测试	292
8.5 本章小结	294
参考文献	295
第9章 磁致伸缩电液伺服阀研究总结与展望	296
9.1 研究总结	296
9.2 研究展望	300

第1章 绪论

1.1 电液伺服阀主要组成

1.1.1 电液伺服阀概述

电液伺服控制集机械、电子、液压、传感和控制等多学科先进技术于一体，其不但是液压技术的一个分支，也是控制领域的一个重要组成部分^[1]。它具有抗负载刚度大、控制精度高、响应速度快、体积小、重量轻、输出功率大、信号处理灵活且易于实现各种参量反馈等优点^[2]，在对控制系统的输出功率、响应速度、控制精度要求较高的航空、航天、舰船及国防军事工业中有着广泛运用^[3]。如飞机进气道控制、推力矢量控制、雷达天线定位、坦克稳定器、电液负载模拟器、飞机机翼及起落架收放的控制、导弹和运载火箭发射系统及飞行的控制等都离不开电液伺服控制技术^[4-8]，如图 1.1 所示。目前，电液伺服系统已成为武器自动化和工业自动化的一个重要方面，电液伺服控制技术的应用与发展被认为是衡量一个国家工业水平和现代工业发展水平的重要标志之一^[9]。



图 1.1 电液伺服系统的应用领域

在电液伺服控制系统中，起到电气部分和液压部分连接作用的电液伺服阀是一个复杂的机电液一体化元件，其既是电液转换和功率放大元件，又是液压执行元件的直接控制部件^[10]。作为电液伺服控制系统中的关键部件，其性能直接关系到整个系统的控制精度和响应速度，也直接影响到系统的可靠性和寿命^[11]。目前，国外已形成完整的电液伺服阀品种和规格系列，并在保持原基本性能与技术指标的前提下，向着简化结构、降低制造成本、产品规格标准化以及提高抗污染能力和可靠性等方向发展^[9]。我国从 20 世纪 60 年代初开始研制电液伺服阀，到目前

能够生产电液伺服阀的主要有中航工业南京伺服控制系统有限公司、中航工业西安飞行自动控制研究所、陕西秦峰液压有限责任公司、中国运载火箭技术研究院第十八研究所、航天科工伺服技术研究所、中国通用技术(集团)北京机床研究所、北京机械工业自动化研究所以及中国船舶重工集团公司第704研究所等单位。

电液伺服阀通常由电-机转换器、液压放大器及反馈机构(或平衡机构)三部分构成。依据前置级的结构形式可分为滑阀伺服阀、双喷嘴挡板伺服阀、射流管伺服阀和偏转板射流伺服阀;按液压放大器的级数可分为单级、两级和三级电液伺服阀^[3]。目前运用最普遍的电液伺服阀为以射流液压放大器为前置级的射流管两级电液伺服阀和以双喷嘴挡板液压放大器为前置级的喷嘴挡板两级电液伺服阀^[12,13]。

1.1.2 电-机转换器

电液伺服阀中电-机转换器的作用是把输入电信号成比例地转换为驱动液压放大器阀芯机械运动的机械能,进而控制液压放大器的液压能。电液伺服阀常用的电-机转换器有力矩马达(输出为机械转动角度)或力马达(输出为机械直线位移)。力矩马达和力马达有动铁式和动圈式两种结构。图1.2为永磁动铁式力矩马达,其特点是结构紧凑、体积小、固有频率高,但是输出转角线性范围窄,适用于驱动喷嘴挡板液压放大器的挡板、射流管液压放大器的射流管或偏转板液压放大器的偏转板。图1.3为永磁动铁式直线力马达,其特点是体积大、加工工艺性好;驱动力大、行程较大;固有频率较低,小于300Hz,适用于直接驱动功率级滑阀液压放大器。

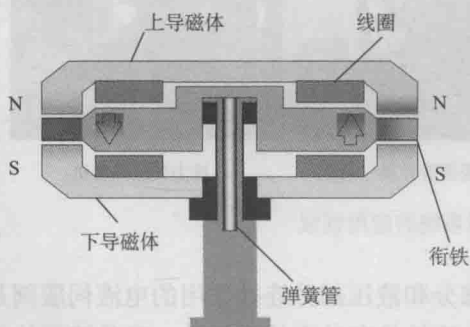


图 1.2 永磁动铁式力矩马达

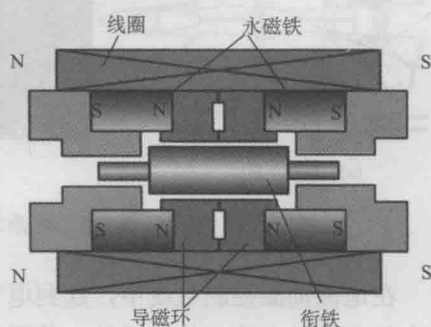


图 1.3 永磁动铁式直线力马达

如图 1.4 和图 1.5 所示,动圈式力马达主要由可动线圈、平衡弹簧、极化磁场元件(激磁线圈或永久磁铁)等组成。可动线圈悬置于工作气隙中,极化磁场(激磁式、永磁内磁式和永磁外磁式等)在工作气隙中形成极化磁通,当控制电流加到

动圈上时,动圈就会受到电磁力的作用而运动,电磁力克服弹簧力和负载力,使动圈产生一个与控制电流成比例的位移。

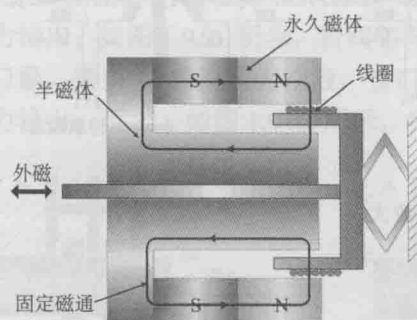


图 1.4 永磁外磁动圈式力马达

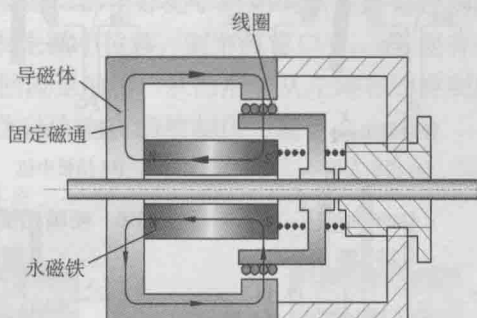


图 1.5 永磁内磁动圈式力马达

1.1.3 液压放大器

电液伺服阀中的液压放大器是一种液压功率比例放大元件,以电-机转换器的机械输出为输入,将小功率的微位移电-机转换器的机械运动放大为大功率的流体压力和流量,既是一种能量转换元件,又是一种功率放大元件,目前其结构形式主要是:喷嘴挡板阀、射流型阀(包括射流管液压放大器和偏转板液压放大器)和滑阀。其中喷嘴挡板阀和射流型阀由于响应快、功率放大能力小,常作为两级或多级电液伺服阀的前置液压放大器,滑阀相比于喷嘴挡板阀和射流型阀响应较慢,但流量增益和压力增益大,功率放大能力强,常被用于末级液压功率放大器。

如图 1.6 所示为双喷嘴挡板液压放大器结构原理图,双喷嘴挡板阀由两个单喷嘴挡板阀以推挽形式连接而成,如图 1.6(b)所示,当挡板处于中位时,两喷嘴前腔控制压力相等,无控制压力输出;如图 1.6(a)所示,若挡板向左发生微小位移,则左侧控制压力增大,右侧控制压力减小,从而产生从左向右的控制压力输出;反之,如图 1.6(c)所示,则产生从右向左的控制压力输出。

如图 1.7 所示为射流管液压放大器的结构原理图,射流管射出的液流冲到接收器的两个接收孔上,两个接收孔分别将液流再次转换为压力能。如图 1.7(b)所示,当射流管处于中位时,两个接收孔接收的流体能量相等,无控制压力输出;如图 1.7(a)所示,若射流管向左发生微小位移,则左侧接收孔接收的流体能量增大,右侧接收孔接收的流体能量减小,从而形成从左向右的控制压力输出;反之,如图 1.7(c)所示,则产生从右向左的控制压力输出。

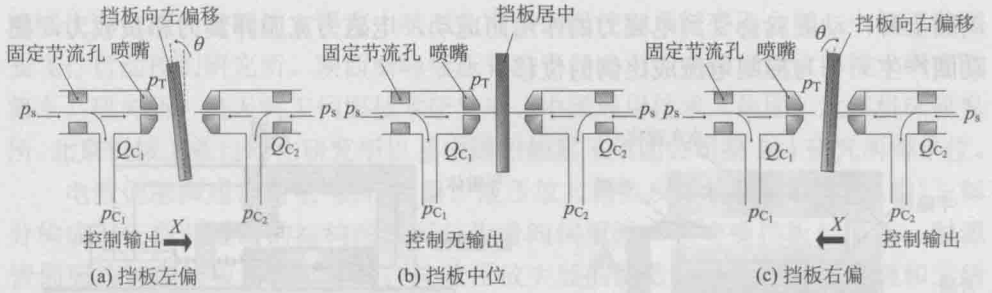


图 1.6 喷嘴挡板液压放大器

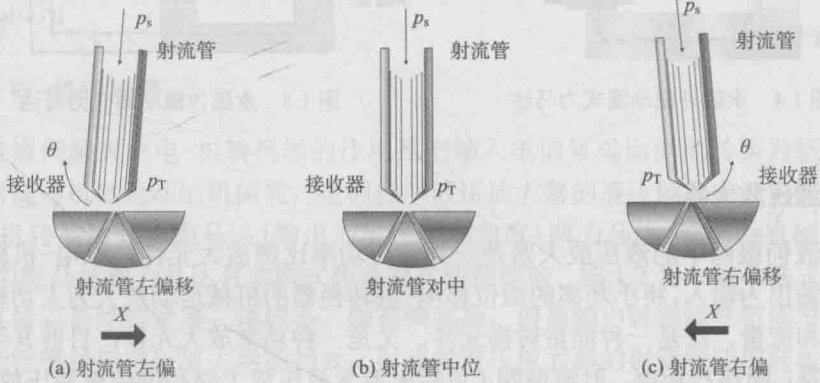


图 1.7 射流管液压放大器

如图 1.8 所示为偏转板液压放大器的结构原理图，其工作原理与射流管液压放大器类似，与射流管液压放大器的主要区别是其射流片不动，两接收孔中能量的分配是通过位于射流片中间的偏转板的运动来实现的。由于偏转板惯量较之射流管小，因此其响应速度较射流管液压放大器快。

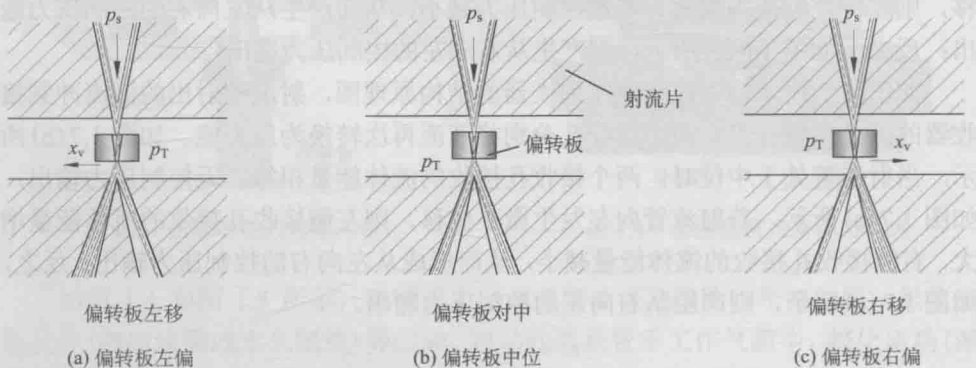


图 1.8 偏转板射流液压放大器

如图 1.9 所示为滑阀液压放大器的结构原理图,滑阀是节流式控制元件,基于节流原理,即以改变液流回路中节流孔(液阻)的大小进行流体的控制,如图 1.9(b)所示,当阀芯处于中位时,四个节流口都正好处于封闭的状态,无控制压力输出;如图 1.9(a)所示,若阀芯向左发生微小位移,则节流窗口 C_1 、 C_2 便有开口量,窗口 C_2 流进压力油液,窗口 C_1 回流至油箱,从而形成从左向右的控制压力输出;反之,如图 1.9(c)所示,则产生从右向左的控制压力输出。

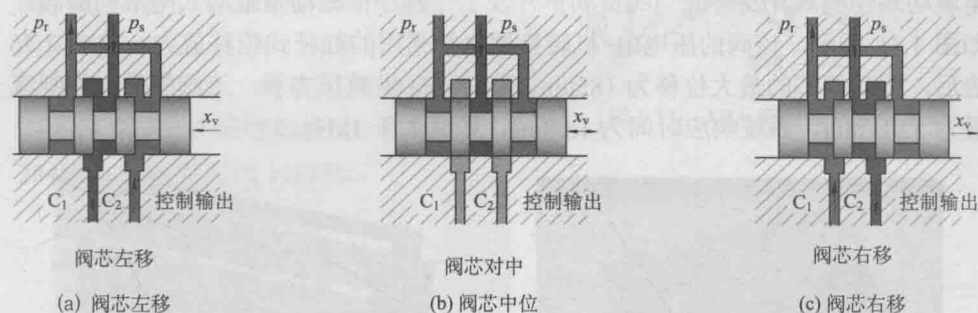


图 1.9 滑阀液压放大器

1.2 智能材料及其驱动的新型电液伺服阀

1.2.1 压电材料/电致伸缩电液伺服阀

压电材料(PZT)和电致伸缩材料(PMN-PT)都是电介质,在其极化方向上施加一定强度的电场,则会引起材料的机械变形,去掉电场后又能恢复到原状态,此种材料做成的电-机转换器具有输出力大、响应速度快、控制精度高等优点。

1880年,法国的科学家P.居里和J.居里两兄弟首次发现石英晶体具有压电效应,从此开启了压电学的历史。在压电材料受到机械应力的作用时,压电材料的表面会出现与应力成正相关的束缚电荷,这种现象称为正压电效应;反之,当压电材料处在外部电场的作用下,则压电材料会产生和外部电场的强度、方向相关的应变,这种现象称为逆压电效应。压电材料的正压电效应和逆压电效应实际上是电能和机械能相互转化的过程,利用正压电效应,压电材料可以将机械能转化为电能,可以被用来制作各类传感器。压电材料的逆压电效应可以将电能转化为机械能,利用该效应则可以制作各类驱动器^[14],如压电式压力传感器是利用压电材料所具有的压电效应所制成的。由压电材料制成的压电元件受到压力作用时产生的电荷量与作用力之间成线性关系,通过测量电荷量可知被测压力大小,此外,利用压电材料还可以制成加速度传感器、变压器等。

美国 MOOG CSA 能源公司的 Lindler 和 Anderson^[15]在给美国空军实验室的报告中提到了一种压电直接驱动式伺服阀,如图 1.10 所示,积层式压电驱动器的位移经过杠杆式位移放大机构进行放大,进而推动阀芯做往复运动。通过放大后阀芯的位移达到 $300\mu\text{m}$,在供油压力为 1500psi (约 10MPa)下,阀的最大控制流量约为 $9\text{L}/\text{min}$,频宽达到 300Hz 。

吉林大学程光明等^[16]在国家“863”高技术研究发展计划项目“高速精密压电驱动式伺服阀开发研究”的资助下开发了一种压电驱动型直动式电液伺服阀,如图 1.11 所示,该阀的压电电-机转换器也是采用的杠杆式位移放大,放大 2.76 倍后,驱动阀芯的最大位移为 $185\mu\text{m}$ 。在 7MPa 供油压力下,该阀的最大控制流量为 $5.9\text{L}/\text{min}$,系统响应时间为 1.08ms ,频宽大于 1kHz 。

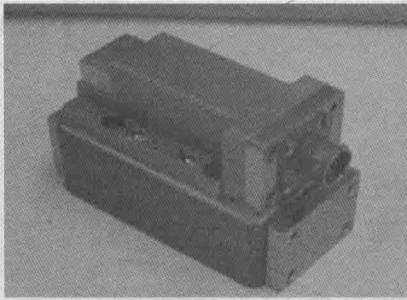


图 1.10 压电直驱式伺服阀

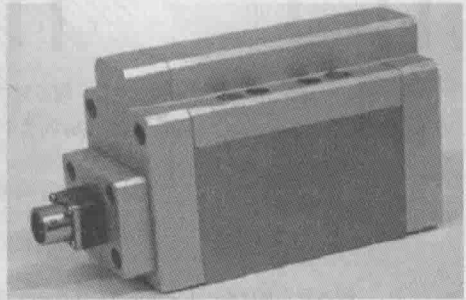


图 1.11 压电直驱式伺服阀

北京航空航天大学官长斌与焦宗夏提出一种压电叠堆直接驱动伺服阀(PDDSV)^[17],如图 1.12 所示,其阀芯驱动机构由四部分组成:固定在传动杆上的压电作动器、阀芯、碟形弹簧杆和弹簧驱动盘。在供油压力 21MPa 时,该伺服阀在 5V 最大输入电压时,其空载流量为 $4.45\text{L}/\text{min}$, -3dB 频宽为 710Hz ,阀芯位移阶跃响应时间为 0.52ms 。

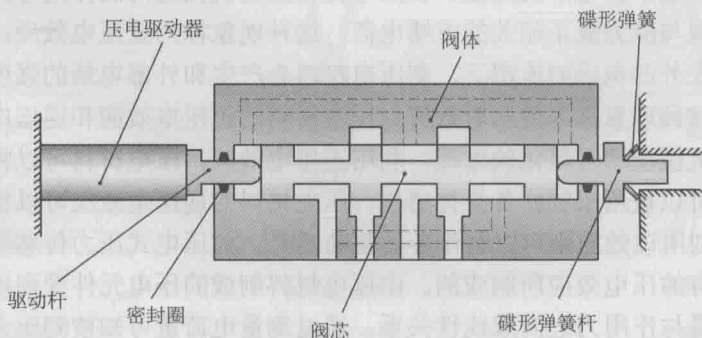


图 1.12 压电叠堆直接驱动伺服阀(PDDSV)结构图

印度 Karunanidhi 等^[18]基于压曲型位移放大压电执行器(amplified piezoelectric actuator, APA)设计了一种压电驱动的两级双喷嘴挡板伺服阀,如图 1.13 所示,其最大输出流量 10.5L/min,最大控制压力 20MPa,具有优于传统双喷嘴挡板伺服阀的动态特性。在 100%阶跃流量输出下,响应时间 0.8ms,如图 1.14 所示;在 20MPa 阶跃压力输出时,响应时间 0.9ms,如图 1.15 所示。在频域指标上,相频宽可达 284Hz,幅频宽可达 1380Hz。

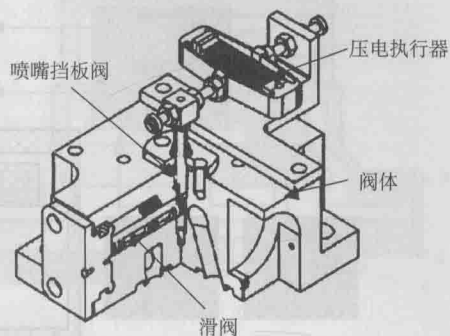


图 1.13 APA 双喷嘴挡板伺服阀

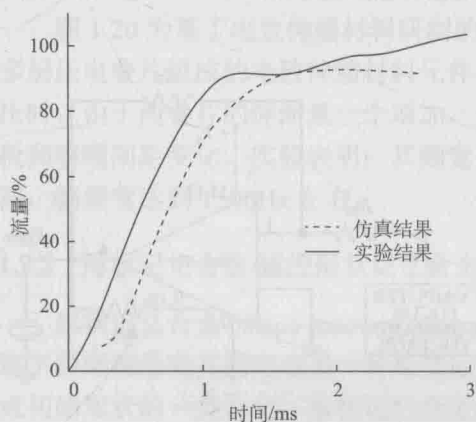


图 1.14 流量阶跃响应

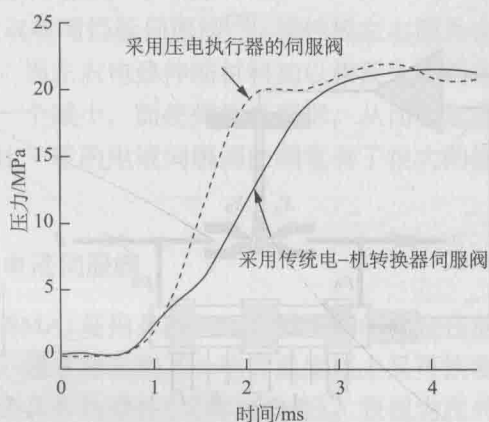


图 1.15 压力阶跃响应

韩国首尔大学 Bang 提出一种铰链微位移放大大型压电电-机转换器驱动的喷嘴挡板两级电液伺服阀,如图 1.16 所示^[19]。经试验测试,铰链微位移放大大型压电电-机转换器频率响应超过 500Hz。在 21MPa 供油压力下,伺服阀样机的幅频宽约为 150Hz,相频宽约为 200Hz。

波兰波兹南工业大学 Sędziak 和 Regulskid 设计了一种以压电弯曲执行器作为挡板的电反馈喷嘴挡板伺服阀^[20],将压电薄片作为控制元件,如图 1.17 所示,压电弯曲执行器的偏转相对于施加的控制信号而变化,引起内部控制压力 p_A 和 p_B 的改变,当到达设定位置时,控制器和弯曲执行器的复位信号使其恢复到中间位置。同时为了获得压电弯曲执行器的高精度偏转,设计了一个特殊的高压放大器,如图 1.18 所示,该功率放大器包括一个交流变压器、一个带有滤波器的直流整流器和基于 PA91 (APEX) 模块的两个通道功率放大器。