兵器科学与技术丛书



超磁致伸缩驱动技术及其在电液伺服系统中的应用

何忠波　杨朝舒　周景涛　荣　策　刘国平　著

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

超磁致伸缩驱动技术及其在电液伺服系统中的应用

Giant Magnetostrictive Actuation Technology and Its Applications in Electro-Hydraulic Servo System

何忠波　杨朝舒　周景涛　荣　策　刘国平　著

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书以先进电液伺服阀机电转化元件的驱动需求为背景，充分利用超磁致伸缩致动器输出力大、响应快等优势，提升电液伺服阀的响应速度和控制精度。采用理论建模、仿真分析和实验研究相结合的方法，探讨了嵌套式和叠堆式两种超磁致伸缩致动器及其液压式和机械式等多种微位移放大机构的设计方法、多场耦合建模理论、多平台协同仿真技术和综合测试技术，及其在直接驱动式电液伺服阀中的应用技术。

本书可供车辆动力工程、机械工程、材料科学与技术、电机与电器、液压系统等领域的科研人员阅读，也可供高等院校相关专业的教师和研究生参考。

版权专有　侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

超磁致伸缩驱动技术及其在电液伺服系统中的应用 / 何忠波等著. --北京：北京理工大学出版社，2021.8
ISBN 978-7-5763-0156-4

Ⅰ. ①超… Ⅱ. ①何… Ⅲ. ①电-液伺服阀-磁致伸缩 Ⅳ. ①TH134

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2021）第 164298 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司
社　　址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号
邮　　编 / 100081
电　　话 /（010）68914775（总编室）
（010）82562903（教材售后服务热线）
（010）68944723（其他图书服务热线）
网　　址 / http://www.bitpress.com.cn
经　　销 / 全国各地新华书店
印　　刷 /
开　　本 / 710 毫米×1000 毫米　1/16
印　　张 / 14.25
字　　数 / 249 千字
版　　次 / 2021 年 8 月第 1 版　2021 年 8 月第 1 次印刷
定　　价 / 76.00 元

责任编辑 / 张鑫星
文案编辑 / 张鑫星
责任校对 / 周瑞红
责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

前　言

电液伺服系统由于其输出功率较大、可靠性较高，在装备制造业中起着不可或缺的作用。与此同时，新一代工程装备也朝着机动性更高、可靠性更好的方向不断发展，这就对电液伺服系统提出了更高的要求。电液伺服阀（Electro-Hydraulic Servo Valve，EHSV）是电液伺服系统的核心元件，其频响和可靠性对整个系统起着决定性的作用。但是传统的电液伺服阀存在频响较低、输出滞后明显、精度不足、抗油液污染能力较差、故障率高等一系列缺点。

针对上述问题，本书以先进电液伺服阀的发展方向为背景，以超磁致伸缩致动器（Giant Magnetostrictive Actuator，GMA）为主要研究对象，全面、系统地探讨了超磁致伸缩驱动技术与电液伺服技术的结合方案，进而更好地发挥超磁致伸缩材料（Giant Magnetostrictive Material，GMM）磁机耦合系数高、输出力大、频响高等一系列优良特性，为新一代电液伺服阀的开发提供新的思路。

本书主要研究了两种面向电液伺服阀机电转换元件的 GMA 结构，一种是经典的 GMM 棒与永磁体圆筒的同轴嵌套式结构，另一种是新型的 GMM 棒与永磁体棒轴向交替排布的叠堆式结构。本书系统地介绍了两种 GMA 的结构设计方法、综合测试技术、多场耦合建模理论和闭环控制策略。

同时，针对 GMA 输出位移难以满足伺服阀阀芯位移需求的问题，设计了一系列机械和液压式微位移放大机构，并采用弹性力学、流体力学理论和有限元方法对其进行了动力学分析。

最后，介绍了一种基于 GMA 与液压式微位移放大机构结合的新型直驱式

电液伺服阀的设计。样机测试表明，在保证一定流量的前提下，以 GMA 作为伺服阀的机电转换元件，可有效提高其响应速度和可靠性。

上述研究内容涉及机械工程、动力工程、材料科学与工程、仿真技术等多个领域的学科交叉，许多问题需要进一步探讨，本书仅能起到抛砖引玉之效。

由于作者水平有限，书中难免有不足之处，敬请广大读者不吝赐教。

著　者

目　录

第 1 章　引言 ……001

1.1　超磁致伸缩材料理论与工程应用研究进展 …… 002
1.1.1　超磁致伸缩材料及其基本特性 …… 002
1.1.2　超磁致伸缩材料及器件的建模理论 …… 003
1.2　电液伺服阀的研究与发展 …… 005
1.2.1　电液伺服阀工作原理及分类 …… 005
1.2.2　二级电液伺服阀 …… 006
1.2.3　直驱式电液伺服阀 …… 008
1.2.4　电液伺服阀的电–机转换器 …… 010
1.2.5　超磁致伸缩材料在伺服阀电–机转换器中的应用 …… 013

第 2 章　超磁致伸缩致动器结构设计技术 ……015

2.1　嵌套式超磁致伸缩致动器基本结构 …… 016
2.2　嵌套式超磁致伸缩致动器设计方法 …… 017
2.2.1　机械结构设计 …… 017
2.2.2　电磁结构设计 …… 020
2.3　叠堆式超磁致伸缩致动器基本结构 …… 025
2.4　叠堆式超磁致伸缩致动器设计方法 …… 026
2.4.1　偏置磁场设计 …… 026
2.4.2　机电结构优化 …… 033
2.4.3　冷却系统设计 …… 035

本章小结 …… 037

第 3 章　超磁致伸缩致动器测试技术 …… 039

3.1　嵌套式 GMA 测试系统设计 …… 040
3.1.1　实验系统测试内容 …… 040
3.1.2　实验系统及要求 …… 041
3.1.3　实验用超磁致伸缩致动器结构 …… 043
3.1.4　实验仪器选择 …… 044
3.2　嵌套式 GMA 静态实验 …… 046
3.2.1　常温下超磁致伸缩应变随预压应力变化规律 …… 046
3.2.2　超磁致伸缩材料温度特性 …… 046
3.3　超磁致伸缩材料动态实验 …… 047
3.3.1　超磁致伸缩材料准静态特性 …… 048
3.3.2　超磁致伸缩材料高频动态特性 …… 048
3.4　叠堆式超磁致伸缩致动器测试系统设计 …… 054
3.4.1　测试系统设计需求 …… 054
3.4.2　测试系统硬件设计 …… 056
3.4.3　测试系统软件设计 …… 060
3.5　超磁致伸缩材料特性测试 …… 063
3.5.1　不同预压应力下材料磁致伸缩应变的测量 …… 063
3.5.2　不同温度下材料磁致伸缩应变的测量 …… 064
3.5.3　不同驱动频率下材料磁致伸缩应变的测量 …… 065
3.6　超磁致伸缩致动器特性测试 …… 067
3.6.1　磁场强度测量 …… 067
3.6.2　磁化强度和应变分布测量 …… 069
3.6.3　输出位移测量 …… 070
3.6.4　输出力测量 …… 072
本章小结 …… 074

第 4 章　超磁致伸缩致动器建模理论 …… 075

4.1　磁场模型 …… 076
4.1.1　嵌套式 GMA 磁场建模 …… 076
4.1.2　叠堆式 GMA 磁场建模 …… 077
4.2　磁化模型 …… 086

4.2.1 静态磁化模型 …… 087
4.2.2 动态磁化模型 …… 087
4.3 应变模型 …… 088
4.4 位移模型 …… 089
4.4.1 嵌套式 GMA 的单自由度位移模型 …… 089
4.4.2 叠堆式 GMA 的多自由度位移模型 …… 090
4.5 模型参数辨识 …… 096
4.5.1 基于改进 Levy 法的嵌套式 GMA 参数辨识 …… 096
4.5.2 基于改进 PSO 的叠堆式 GMA 参数辨识算法 …… 102
4.5.3 实验验证 …… 107
本章小结 …… 111

第 5 章 超磁致伸缩致动器微位移放大技术 …… 113

5.1 液压式柔性活塞微位移放大机构 …… 114
5.1.1 放大机构基本结构 …… 114
5.1.2 柔性活塞设计理论 …… 116
5.1.3 梯度连接油腔设计 …… 125
5.1.4 放大机构特性仿真 …… 127
5.2 弓张式柔性铰链微位移放大机构 …… 129
5.2.1 放大机构基本结构 …… 129
5.2.2 放大倍数的确定 …… 130
5.2.3 放大机构固有频率的确定 …… 132
5.2.4 放大机构优化设计 …… 134
5.2.5 放大机构有限元分析 …… 137
5.3 二级放大式柔性铰链微位移放大机构 …… 139
5.3.1 理想放大倍数 …… 139
5.3.2 实际放大倍数 …… 139
5.3.3 有限元分析 …… 141
5.3.4 等效刚度分析 …… 141
本章小结 …… 144

第 6 章 超磁致伸缩致动器控制策略 …… 145

6.1 离线 PID 控制策略 …… 146
6.2 在线 PID 控制策略 …… 149

6.3 模糊滑模控制策略 …… 152
6.4 模型预测滑模控制策略 …… 158
本章小结 …… 169

第 7 章 超磁致伸缩致动器驱动电源技术 …… 171

7.1 GMA 等效电路形式 …… 172
7.2 参数辨识及阻抗实验 …… 173
7.3 驱动电路设计 …… 176
7.4 驱动波形设计 …… 177
7.5 实验验证 …… 179
本章小结 …… 183

第 8 章 超磁致伸缩致动器在电液伺服阀中的应用 …… 185

8.1 滑阀组件的设计及分析 …… 186
8.1.1 滑阀基本结构的确定 …… 186
8.1.2 滑阀流量计算 …… 188
8.1.3 阀芯尺寸的确定 …… 188
8.1.4 液动力分析 …… 189
8.2 样机综合试制 …… 190
8.2.1 关键零件的加工与选型 …… 190
8.2.2 样机的装配与调试 …… 192
8.3 超磁致伸缩直驱阀的数值仿真及控制策略 …… 197
8.3.1 仿真模型的搭建 …… 197
8.3.2 伺服阀特性仿真 …… 197
8.3.3 GMM–DDV 的模控制策略仿真 …… 200
8.3.4 控制系统数值仿真 …… 204
8.4 伺服阀特性测试 …… 207
8.4.1 实验平台简介 …… 207
8.4.2 静态特性测试 …… 208
8.4.3 动态特性测试 …… 210
本章小结 …… 212

参考文献 …… 213

第 1 章

引 言

| 1.1 超磁致伸缩材料理论与工程应用研究进展 |

1.1.1 超磁致伸缩材料及其基本特性

1842 年英国物理学家 James Joule 发现镍（Ni）在外加磁场作用下形状和体积会发生改变，这就是磁致伸缩现象（magnetostriction）。1974 年，Clark 等发现三元稀土合金 $Tb_{1-x}Dy_xFe_2$ 当 x=0.73 时在常温下可以产生很大的磁致伸缩应变[1]，故将其称为超磁致伸缩材料（Giant Magnetostrictive Material，GMM）。与压电材料（Piezoelectric，PZT）、形状记忆合金（Shape Memory Alloy，SMA）等智能材料相比，超磁致伸缩材料具有许多优良的特性。表 1–1 所示为三种智能材料性能的对比[2]。

表 1–1 三种智能材料性能的对比

物理特性	PZT	GMM	SMA
延伸率/%	0.1	0.2	5
能量密度/（kJ・m^{-3}）	2.5	20	1
带宽/kHz	100	10	0.5
滞回/%	10	2	30

续表

物理特性	PZT	GMM	SMA
磁（电）机耦合系数	0.5～0.6	0.7～0.75	—
居里温度/℃	200～300	380	—

从表 1–1 可以看出，相比于 PZT，GMM 具有较高的延伸率和较大的能量密度，这意味着在同样变形量的条件下，GMM 可以产生更大的输出力，这对于开发大流量的 EHSV 非常重要；GMM 的滞环较 PZT 更低，可控性更好；GMM 居里温度更高，适用于高温环境，且 GMM 材料超过其居里温度后只是暂时失效，待其温度下降到居里温度以下，原有的磁致伸缩效应就会恢复。此外，GMM 采用电流控制方式，避免了 PZT 驱动时上百伏的高压，减轻了电源的负担[3]。但 GMM 的市场化水平还不成熟，生产商较少，成本较高。

1.1.2 超磁致伸缩材料及器件的建模理论

有效、简洁的理论模型对于 GMM 器件的优化设计和精确控制具有十分重要的作用。但由于 GMM 固有的复杂磁滞非线性和多场耦合的工作环境，很难准确地建立其参数模型。国内外许多专家对于 GMM 及其器件的建模问题展开了深入的研究。目前，最为典型的 GMM 器件是超磁致伸缩致动器（Giant Magnetostrictive Actuator，GMA），其典型结构如图 1–1 所示。

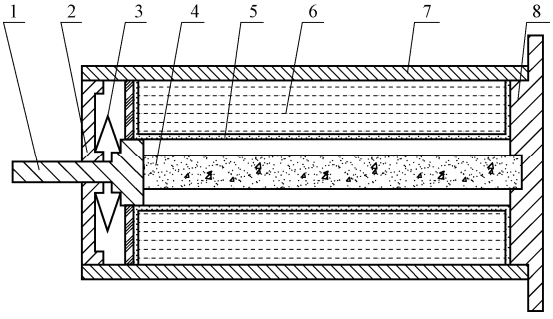


图 1–1 超磁致伸缩致动器的结构

1—顶杆；2—端盖；3—碟片弹簧；4—GMM 棒；5—线圈骨架；6—励磁/偏置线圈；7—外壳；8—底座

对于 GMA 建模问题，主要存在以下两个难点：一是励磁线圈产生的磁场在 GMM 棒轴向、径向的分布问题；二是多场耦合下 GMM 的本构关系以及 GMA 的位移输出模型问题。针对以上问题，国内外学者从不同角度进行了深入的研究。

对于 GMM 棒轴向磁场分布的问题，Michael D.Bryant 基于安培环路定理，

建立了带有磁通负反馈的 GMA 磁路模型及其传递函数表达式[4]；北京航空航天大学张天理等采用解析方法分析了永磁体偏置式 GMA 的轴向磁场均匀性问题，并提出了采用外径和磁化强度逐段变化的柱状永磁体来提高 GMM 棒轴向磁场均匀性的方法[5]；爱尔兰学者 A.G.Olabi 采用数值分析方法，对 GMA 轴向磁场的均匀性进行了仿真以及实验验证[6]。对于 GMM 棒的径向磁场分布问题，东北大学孙华刚基于弹性力学理论和数学物理方法，将 GMM 棒等效成各向同性 GMM 薄片的叠加，建立了 GMM 棒内部磁场径向分布的贝塞尔方程表达式，并求得其解析解[7]。

对于 GMM 的本构关系和 GMA 的输出模型问题，目前的建模手段主要分为两种：

一种是从纯数学角度出发的唯象模型，例如 Preisach 模型、Prandtl-Ishlinskii（P–I）模型、Krasnoselskii-Porovkii（K–P）模型等，这类模型将 GMM 的磁滞现象理解为一系列磁滞算子的加权叠加。最早将 Preisach 模型应用于 GMA 建模的是美国海军水面装备研究中心（NSWC）的 Restorff 和 Clark[8]；然而传统的 Preisach 模型仅仅是对某一激励条件和工作环境下 GMM 磁滞特性的纯数学描述，无法对其磁滞特性的机理进行合理解释，也无法描述激励条件和工作环境变化时的 GMM 磁滞特性。针对以上问题，国内外学者对 Preisach 模型提出了许多改进方法：埃及学者 Adly 等建立了一种 2D-Preisach 模型，并采用神经网络方法对其参数进行辨识，使之可以描述温度变化对 GMM 磁滞特性的影响；美国 Maryland 大学 Xiaobo Tan 博士针对 Preisach 模型无法描述 GMM 率相关（rate-dependent）特性的问题，改进了 Preisach 算子，增强其不同激励频率下磁滞特性的描述能力[9]。

另一种是从材料本征关系出发的物理模型，根据器件磁–机耦合特性的强弱，又分为强耦合模型和弱耦合模型。对于弱耦合问题，通常对 GMM 的磁化特性和 GMA 的动力学特性分别建模，再利用 GMM 的输出力将两部分模型耦合在一起；对于强耦合问题，通常采用有限元方法（Finite Element Method，FEM）在不同积分域内，同时分析 GMA 的磁–机耦合特性[10, 11]。

目前主要用于描述 GMM 磁化特性的模型是由 D.C.Jiles 和 D.L.Atherton 于 1983 年提出的 Jiles-Atherton（J–A）模型，该模型基于微磁学理论，将铁磁材料的磁滞现象理解成不可逆的畴壁移动和磁畴转动[12]；随后 D.C.Jiles 考虑了涡流损耗和异常损耗对铁磁材料磁化特性的影响，于 1994 年建立了动态 J–A 模型[13]；此外，Sablik 考虑了预应力对于铁磁材料磁滞特性的影响，对 J–A 模型进行改进，建立了 J–A–S 模型[14]。由于传统 J–A 模型表达式中的 5 个参数相互耦合，将其用于 GMM 的磁滞建模，一个突出的问题是模型的参数辨识问题，

D.C.Jiles 利用主磁滞回线的 5 个特殊点推导出参数的隐式方程组，通过连续迭代辨识模型参数[15]；Peter Kis[16]，Erik Etien[17]采用最小二乘法对 J–A 模型进行参数辨识，并给出了相应迭代初值的估算方法；近年来模拟退火[18, 19]、遗传算法[20–22]、差分进化[23]等大量现代优化算法被应用于 J–A 模型的辨识之中，相对于传统梯度算法其全局搜索能力得到了有效提高。

目前对于 GMM 的力磁耦合行为，最为常用的是基于能量最小原理建立的二次畴转模型，F.T.Calkins 将二次畴转模型与 J–A 模型结合，建立了 GMM 的应变模型[24]；在此基础上，天津大学郑加驹、河北工业大学曹淑英等将 GMA 的应变–位移模型等效为二阶系统，结合 Calkins 的应变模型建立了描述 GMA 输入电流与输出位移关系的非线性动力学模型，并将信赖域算法和遗传算法结合，辨识了 GMA 准静态和动态模型中的未知参数[25, 26]；为了弥补二次畴转模型在描述磁化强度和磁致伸缩应变关系上的不足，万永平、方岱宁等提出双曲正切模型，可更好地表述高场情况[27]下 GMM 的输出位移。郑晓静、孙乐基于双曲正切模型提出了考虑偏置磁场和预压应力的 GMM 耦合模型，更好地解释了 GMM 的 ΔE 效应和 GMA 谐振峰值的漂移问题[28]。在此基础上，Wang 等建立了考虑交变应力和涡流效应的多场耦合动力学模型，并将其有效地运用于振动主动控制领域[29]。

值得一提的是，近年来一些学者开始研究 GMA 的模型简化问题：意大利学者 F.Braghin 等将 GMA 等效成线性定常系统，并将其应用于振动主动控制[30, 31]。这种线性化模型尽管无法描述 GMA 的滞回特性，但可以有效降低系统控制器设计的难度，具有较强的工程意义。

1.2 电液伺服阀的研究与发展

1.2.1 电液伺服阀工作原理及分类

人类最早的液压伺服元件可以追溯到公元前 240 年古埃及人发明的“水钟”，而现代意义上的电液伺服阀（Electro-Hydraulic Servo Valve，EHSV）通常指起源于 20 世纪 40 年代的单级射流管阀和单级喷嘴挡板阀。现代 EHSV 通常由电–机转换器、液压放大器（先导阀和主阀）、反馈机构三部分组成。电–机转换器的作用是将激励电信号转化成机械信号，控制液压回路；由于传统的

电–机转换器多采用永磁式力矩电机，其输出力较小，无法直接驱动主阀，所以必须采用“先导阀–主阀”的二级结构，即电–机转换器驱动负载力较小的先导阀（通常为喷嘴挡板阀或射流管阀），由先导阀带动主阀工作。对于这种多级结构的 EHSV 而言，由于其传递函数中存在积分环节，阀芯的初始位置与输入电流无关，所以需要反馈机构对阀芯进行定位。电液伺服阀的发展历史和现代电液伺服阀的分类[32, 33]如图 1–2 所示。

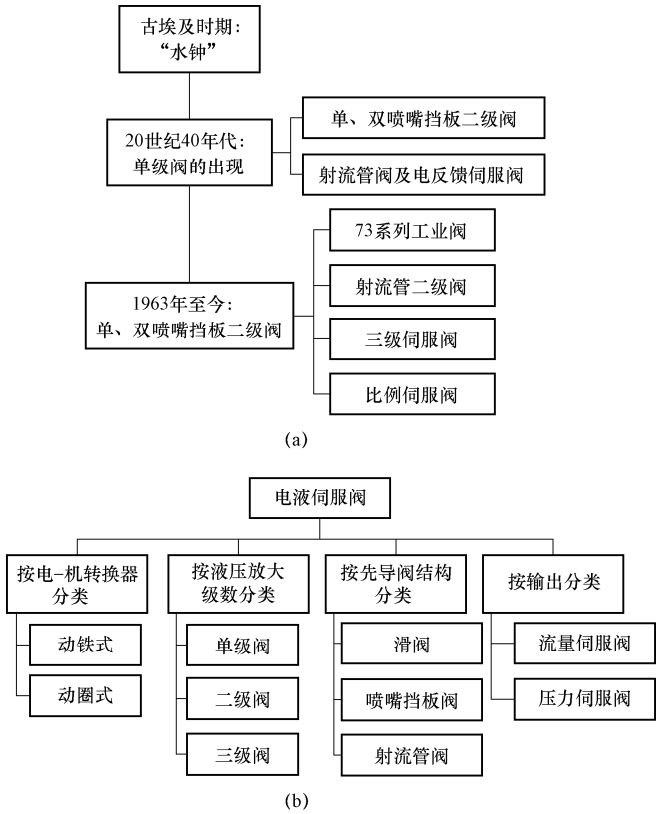


图 1–2　电液伺服阀的发展历史及现代电液伺服阀的分类

（a）发展历史；（b）分类

1.2.2　二级电液伺服阀

现代 EHSV 的主流产品是以射流管阀和喷嘴挡板阀为代表的二级或三级伺服阀，本节将对这两种伺服阀的发展情况分别介绍。

1. 喷嘴挡板阀

喷嘴挡板阀是目前比较常见的二级 EHSV，图 1–3 所示为 MOOG 公司 D631 型双喷嘴挡板阀结构。其最大流量可达 30 L/min，响应时间为 25 ms[34]。其工作原理为：压力油从 P 口进入，再经过喷嘴与挡板之间的间隙流至溢流空间，在断电条件下，挡板处于两喷嘴中间位置。阀芯两端油压相等，处于中位。当通入某一极性的电流时，挡板发生偏转，导致两端容腔压力不相等，带动阀芯运动。喷嘴挡板阀具有体积小、灵敏度高的特点，但同样具有中位泄漏量大、容易因油液污染而造成堵塞等缺点[35]。

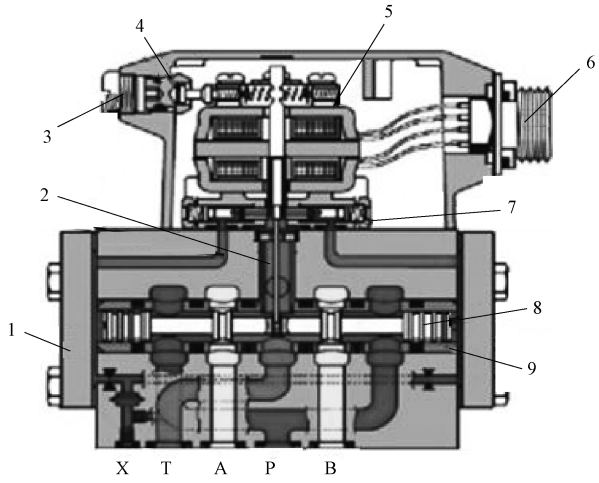


图 1–3 D631 型双喷嘴挡板阀（美国 MOOG 公司）结构

1—主阀体；2—反馈弹簧杆；3—零位调节保护盖；4—零位调节杆；5—力矩马达；6—电缆线接口；7—力矩马达底座；8—阀芯；9—阀套

2. 射流管阀

图 1–4 所示为一种射流管伺服阀的结构，其工作原理为：射流管可以绕中心转动，接收器上有两个圆形斜孔，分别与执行机构两腔连接。射流管处于零位时，两小孔接收到的喷射能量的输出压力也相等，执行机构处于静止状态；当射流管发生右偏转，喷口偏移 x 后，接收器中右孔 B 接收到的能量大于左孔 A 的能量，因此右孔压力升高，而左孔压力降低，从而推动负载向左运动；同理，当射流管发生左偏转后，右孔压力降低，而左孔压力升高，将推动负载向右运动。射流管阀被认为是喷嘴挡板阀的替代者，具有抗污染能力强（可通过 0.2 mm 的污染颗粒[32]）、工作效率高（≥70%[36]）等优点，同时也存在对油温比较敏感、动态特性差的缺点。此外，射流管阀的加工非常困难，例如其弹簧

管内孔要求：圆度≤0.5 μm，直线度≤2 μm，表面粗糙度 Ra≤0.05 μm，加工难度很大[37]。

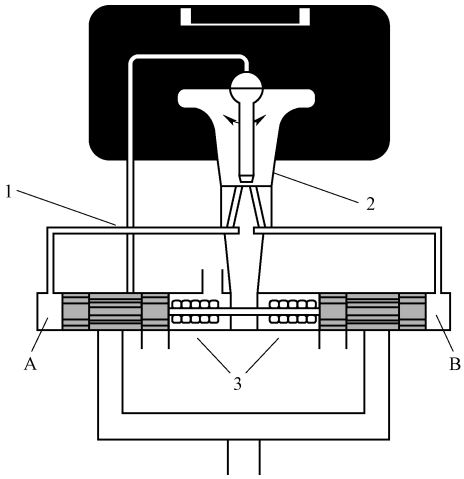


图 1–4　射流管伺服阀的结构

1—接收器；2—射流管；3—弹簧

1.2.3　直驱式电液伺服阀

直驱式电液伺服阀（Direct Drive Valve，DDV）是一种新型的单级电液伺服阀。DDV 的电–机转换器直接驱动主阀运动，阀芯位移信号通过线性差动变压器（Linear Voltage Differential Transformer，LVDT）、电涡流等位移传感器采集，并反馈给控制元件实现阀芯的精确定位。DDV 的出现标志着二级 EHSV 向单级 EHSV 的回归，代表了电液伺服控制元件的发展方向。其优势主要有以下几个方面：

（1）结构简单、零件较少，使得 EHSV 的可靠性大大提高；

（2）无先导级静态泄漏；

（3）驱动机构直接驱动阀芯产生位移，响应速度大大提升；

（4）滞环较小，线性化程度较高；

（5）系统的阶次较低，有利于控制器的设计；

（6）伺服阀的抗油液污染能力较强。

由于具有以上优势，DDV 自 20 世纪 80 年代产生以来，逐渐成为伺服阀研究领域的一个热点，尤其是在对于 EHSV 快速性和可靠性要求很高的先进战斗机作动系统之中。例如美军 F–22“猛禽”战斗机、B–2“幽灵”轰炸机[38]、瑞典 JAS–39“鹰狮”战斗机、欧洲 EF2000“台风”战斗机、中国台湾 IDF 战斗机等[39]。