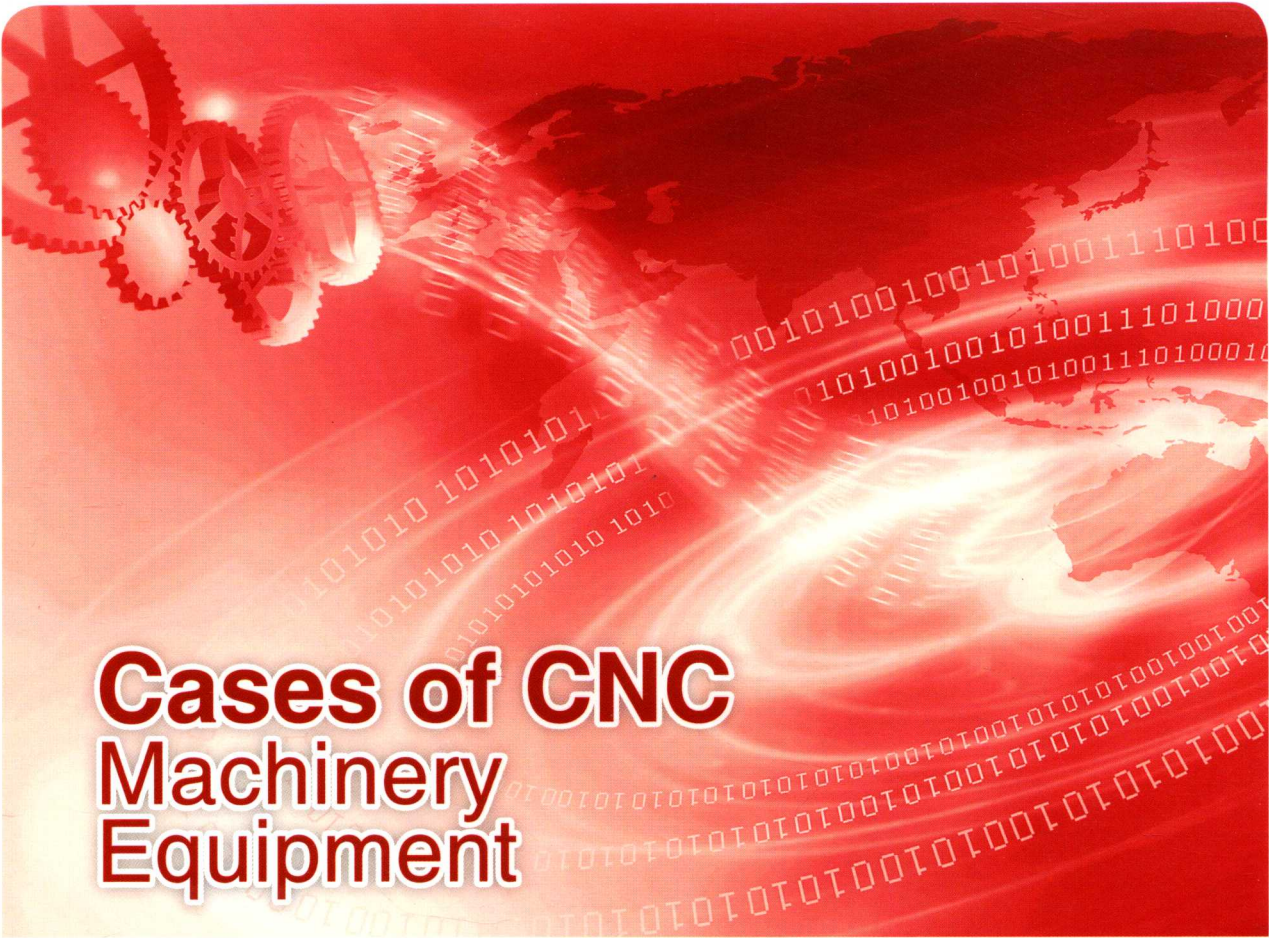




Cases of CNC Machinery Equipment

“数控一代” 案例集

(流体传动与控制卷)

中国机械工程学会
流体传动与控制分会

编著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

Cases of CNC
Machinery
Equipment

“数控一代”案例集

(流体传动与控制卷)

中国机械工程学会
流体传动与控制分会

编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

“数控一代”案例集. 流体传动与控制卷 / 中国机械工程学会, 流体传动与控制分会编著. —北京: 中国科学技术出版社, 2016.6
ISBN 978-7-5046-7163-9

I. ①数… II. ①中… ②流… III. ①液压传动—机械工业—技术革新—案例—中国 ②气压传动—机械工业—技术革新—案例—中国 IV. ①F426.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 126998 号

策划编辑	赵 晖 郭秋霞
责任编辑	赵 晖 郭秋霞
版式设计	中文天地
责任校对	杨京华
责任印制	张建农

出 版	中国科学技术出版社
发 行	科学普及出版社发行部
地 址	北京市海淀区中关村南大街16号
邮 编	100081
发行电话	010-62103130
传 真	010-62179148
网 址	http://www.cspbooks.com.cn

开 本	787mm × 1092mm 1/16
字 数	400千字
印 张	19.5
版 次	2016年6月第1版
印 次	2016年6月第1次印刷
印 刷	北京市凯鑫彩色印刷有限公司
书 号	ISBN 978-7-5046-7163-9 / F·815
定 价	124.00元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

编写组织机构

指导委员会

主任：杨华勇
副主任：宋天虎 孔祥东
委员：焦宗夏 李永顺 徐 兵 廖显胜 左晓卫 罗 平

编审委员会

主任：孔祥东
副主任：焦宗夏 徐 兵 李宝仁 赵曼琳 罗 经 王 玲
委员：（按姓氏笔画排列）

丁宇亭	丁坚持	丁忠军	王 昕	王 昭	王少萍
王志民	王益群	尤新荣	牛世勇	艾 超	左哲清
石 岩	叶 骞	田一松	冯世波	权 龙	权凌霄
毕瑞琨	朱笑丛	向树民	刘 城	刘永华	刘邦才
刘宇辉	刘志会	刘昕晖	刘春潮	闫清东	阮 健
孙喜明	芦光荣	李 胜	李松晶	李国强	李跃军
杨 强	杨晓东	肖文晖	吴晓明	何 枫	何友文
何清华	何琪功	邹 波	邹小舟	宋 豫	宋国刚
张 策	张大庆	张军辉	张时剑	张青松	张锡文
陈 江	陈飞飞	陈利明	陈慧宇	苗 蕾	明 飞
周维科	郑金朝	赵如愿	赵金光	赵静一	郝鹏飞
俞 滨	施光林	姚 静	贺 晶	顾梦元	徐其俊
翁之旦	翁振涛	栾大凯	高英杰	高隆隆	郭 勇
唐剑锋	阎耀保	陶国良	曹 伟	曹 剑	曹 涌
彭 刚	韩永庆	程 敏	虞启辉	蔡茂林	翟富刚
缪 云	冀 宏	穆洪斌	魏 巍	魏列江	

总 序

实施“中国制造 2025”，加快我们国家从制造大国迈向制造强国，要以科技创新为主要驱动力，以加快新一代信息技术与制造业深度融合为主线，以推进智能制造为主攻方向。

智能制造——数字化网络化智能化制造是新一轮工业革命的核心技术，是世界各国全力争夺的技术制高点，为中国制造业结构优化和转变发展方式提供了历史性机遇，成为中国制造业“创新驱动、由大到强”的主攻方向。

制造业创新发展的内涵包括三个层面：一是产品创新；二是生产技术创新；三是产业模式创新。在这三个层面上，智能制造——数字化网络化智能化制造都是制造业创新发展的主要途径：第一，数字化网络化智能化是实现机械产品创新的共性使能技术，使机械产品向“数控一代”和“智能一代”发展，从根本上提高产品功能、性能和市场竞争力；第二，数字化网络化智能化也是生产技术创新的共性使能技术，将革命性地提升制造业的设计、生产和管理水平；第三，数字化网络化智能化还是产业模式创新的共性使能技术，将大大促进服务型制造业和生产性服务业的发展，深刻地变革制造业的生产模式和产业形态。

机械产品的数控化和智能化创新具有鲜明的特征、本质的规律，这种颠覆性共性使能技术可以普遍运用于各种机械产品创新，引起机械产品的全面升级换代，这也是“数控一代”和“智能一代”机械产品这样一个概念产生的缘由和根据。

2011 年年初，18 位院士联名提出了关于实施数控一代机械产品创新工程（简称“数控一代”）的建议，中央领导同志高度重视、亲切关怀，科技部、工业和信

息化部、中国工程院联合启动了数控一代机械产品创新应用示范工程，其战略目标是：在机械行业全面推广应用数控技术，在10年内，实现各行各业各类各种机械产品的全面创新，使中国的机械产品总体升级为“数控一代”，同时也为中国机械产品进一步升级为“智能一代”奠定基础。

4年来，全国工业战线的同志们团结奋斗，用产学研政协同创新，数控一代机械产品创新应用示范工程进步巨大、成就卓著，在全面推进智能制造这个主攻方向上取得了重大突破。

中国机械工程学会是实施数控一代机械产品创新应用示范工程的一支重要推动力量。4年来，学会发挥人才优势和组织优势，动员和组织学会系统包括各省区市机械工程学会和各专业分会的同志们广泛参与，着重于推动数控一代工程在各行各业各区域各企业的立地和落实，为企业产品创新助力、为产业技术进步服务。在这个过程中，学会重视发现典型、总结经验，形成了《“数控一代”案例集》。

《“数控一代”案例集》总结了典型机械产品数控化创新的丰硕成果，展示了各行业各区域各企业实施创新驱动发展战略的宝贵经验，覆盖面广、代表性强，对于实现中国机械产品的全面创新升级有着重要的借鉴与促进作用。

衷心祝愿《“数控一代”案例集》持续推出、越办越好，助百花齐放、引万马奔腾，为数控一代机械产品创新应用示范工程的成功、为“中国制造2025”的胜利、为实现中国制造由大变强的历史跨越做出重要贡献。

周济

2015年4月

前 言

装备制造业是一个国家制造业的脊梁，流体传动与控制技术则是装备制造业的精髓。

流体传动与控制技术包括液压、气动和液力技术，是机电产品向自动化、高速化、高效率、高精度、高可靠性、高集成化方向发展不可缺少的关键技术，广泛应用于工程机械、轻工机械、矿山机械、灌装机械、建筑机械、冶金机械、锻压机械、铸造机械、纺织机械、机械制造、汽车工业、船舶工业、航空航天等行业。近 20 年来，通过科技攻关、引进消化、改良创新，国内的流体传动与控制产品基本满足普通机电装备和少量高端应用的需求，部分产品甚至已经达到国际先进水平，并随主机出口欧美和东南亚等国际市场，已成为我国装备制造业提升生产水平和质量、从制造大国走向制造强国的关键部件。流体传动与控制技术融合电子技术、自动化技术、信息技术，采用新材料、新工艺，更是取得了突飞猛进的发展。各类装备的数字化、智能化、信息化、柔性化和网络化进程，既推动流体传动与控制行业迈向新的台阶，又对流体传动与控制技术提出了更高的要求。新型元件和系统的计算机辅助设计、计算机辅助工程、计算机辅助测试等技术的数字化已成为流体传动与控制技术的研究热点和发展方向。

2014 年，习近平总书记号召：推动中国制造向中国创造转变。2015 年，李克强总理在政府工作报告中指出要实施“中国制造 2025”，重点瞄准了智能制造、工业强基、高端装备等战略领域，计划实施的高档数控机床和机器人、航空航天、海洋工程、农机装备等专项，都离不开核心基础零部件和关键技术的支撑作用。

流体传动与控制技术作为主要的动力系统和控制元件关键技术，是其重要的组成部分。因此，促进流体传动与控制技术和产业的稳健发展是国家的意志，是实现国家战略宏图的使命。

为了将 2012 年国家组织实施“数控一代机械产品创新应用示范工程”已取得的成果总结推广，中国机械工程学会组织编撰《“数控一代”案例集》丛书。流体传动与控制分会积极参与，在中国机械工程学会的领导下，总结流体传动与控制领域数字化技术创新与示范案例，编撰《“数控一代”案例集（流体传动与控制卷）》，其核心是液压气动与液力技术的数字化、网络化、智能化，重点体现技术创新、产品创新、生产创新和模式创新。本卷共收录生产企业、高校、研究所的产品技术与学术研究案例 34 个，涵盖比例伺服阀、电磁换向阀、数字阀、开关阀、多路阀、液压泵、液力变矩器等关键基础元件数字化生产制造与控制技术、计算机仿真分析技术，以及液压气动系统为主机配套的数字化、智能化应用，以期推广相关的学术研究、技术研发和生产管理等方面的优秀成果和经验，为机械装备的转型升级、创新能力的自主提升、数控工程的顺利实施提供重要支持。

在新的机遇和挑战下，流体传动与控制技术要充分发挥优势，不断突破创新，提高竞争实力，必将为中国实施智能制造做出更大的贡献。

《“数控一代”案例集（流体传动与控制卷）》编审委员会
2016 年 1 月

目录

CONTENTS

液压元件

案例 1	2D 数字伺服阀及其数字控制技术	/ 1
案例 2	工程机械用多路阀数字化技术	/ 11
案例 3	先导式大流量电液比例阀数字化技术	/ 21
案例 4	传动液力变矩器数字化制造	/ 33
案例 5	多余度直接驱动伺服阀技术	/ 43
案例 6	低速液压泵 / 马达数字配流与调速技术	/ 51
案例 7	齿轮泵信息化智能测试系统	/ 59
案例 8	带数控芯片的低功耗电磁换向阀	/ 65
案例 9	基于 CAN 总线的数字式直接驱动阀控制器	/ 71

案例 10	液压产品与制造数字化智能化研究	/ 79
案例 11	液压泵马达产品数字化制造应用示范	/ 87
案例 12	液压高速开关阀	/ 95
案例 13	数字化集成控制非关联比例阀	/ 103
案例 14	数字伺服阀数字化设计及制造技术研究	/ 109
案例 15	数字控制变量轴向柱塞泵技术	/ 117

液压系统

案例 16	大型双臂抢险救援工程机械电液数字控制技术	/ 123
案例 17	信息化全工况流动式架桥机	/ 133
案例 18	起重机液压混合动力系统研究	/ 143
案例 19	高精度冷带轧机数字化厚度自动控制（液压 AGC）系统研发	/ 151
案例 20	基于网络化的数字化大型液压载重车	/ 159

- 案例 21** 基于嵌入式数字控制器的电液伺服动态加载装置 / 173
- 案例 22** 移动机械液压产品的数字化技术 / 181
- 案例 23** 数字化快速锻造液压机组 / 193

气动技术

- 案例 24** 无线技术在气动技术产业中的应用 / 201
- 案例 25** 气动系统应用案例——气动人机互动触觉接口 / 209
- 案例 26** 压缩空气系统节能技术 / 215
- 案例 27** 旋流非接触吸盘数字化仿真及优化设计 / 225
- 案例 28** 数字化高压电 - 气伺服阀及高压气动伺服技术 / 229

仿真技术

- 案例 29** 极端环境下电液伺服阀的数字化分析与设计 / 235
- 案例 30** 轴向柱塞泵 / 马达的数字化设计与测试关键技术及应用 / 249

 **31** 液力元件流场仿真技术 / 259

 **32** 液压仿真技术 / 269

 **33** 液压挖掘机多学科联合仿真平台及其应用 / 279

 **34** 锻造液压机组多学科建模及控制优化 / 289

2D 数字伺服阀及其数字控制技术

浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室

2D 数字伺服阀利用伺服螺旋机构将阀芯的旋转运动转化阀芯的直线位移（阀开口），其结构独特，体积小，重量轻，抗污染能力强，响应速度快，具有双冗余度。采用闭环同步跟踪控制算法，实现了其电—机械转换器输出无失步快速精确地跟随输入信号的运动，拓宽了其频宽。采用数字控制技术，不仅减小或消除了滞环和死区，改善了阀本身的动静态性能，而且降低了对加工工艺的要求，降低生产成本。

一、导言

电液伺服阀作为电液伺服控制系统的关键元件,其性能在很大程度上决定了整个电液控制系统的性能。传统的电液伺服阀主要有喷嘴—挡板阀、射流管阀、动圈式伺服阀、电液比例伺服阀等。喷嘴—挡板阀动态响应速度很快,但是其抗污染能力差,对液体介质的清洁度要求十分苛刻;而射流管阀虽然其抗污染能力在一定程度上有所增强,但却以泄漏功耗更大为代价,其频响也较喷嘴—挡板阀为低;至于比例伺服阀,其对油液的清洁度要求低于电液伺服阀,但是其动态性能介于伺服阀和普通比例阀之间,动态响应仍较喷嘴—挡板伺服阀差。随着航空、航天及现代工业的需要,对电液伺服阀提出更高的技术要求:如更强的抗油液污染能力、高频响、大流量、使用方便和成本低等。传统的电液伺服阀已经难以达到这些要求,新型电液伺服阀的研制始终成为流体控制领域发展的重要课题。

进入信息时代后,机电控制技术的数字化成为必然的发展趋势和人们的共识。电液控制系统实现数字控制有间接和直接两种方法。间接的方法是利用计算机通过 D/A 转换器实现对模拟式电液控制元件(比例阀或伺服阀)的数字控制。直接的方法则在电液控制系统中应用数字阀。数字阀以步进电动机作为电—机械转换接口。步进电动机是一种数字执行元件,它将电脉冲信号转换为角位移信号,因此,它是一种数字式电—机械转换器。步进电动机作为电—机械接口便于实现电液伺服系统数字化控制,其具有数字控制的一般优点,如无需 D/A 转换器、信号传递不受外部环境干扰等。显然,采用数字阀是实现电液控制系统数字化更理想的方式,这不仅因为数字阀具有数字控制的一般优点,更重要的是通过嵌入式数字化控制,可以为电液伺服阀的动静特性的全面提升带来前所未有的机遇。如何把握这一机遇也成为电液控制技术成功与进一步发展的关键所在,这对于高性能的电液伺服阀依靠仿制和大量进口的我国,意义尤为重大。

浙江工业大学自从 20 世纪 90 年代以来一直从事 2D 数字伺服阀及其数字控制的研究,经过 20 多年的努力已建立了独具特色的具有自主知识产权的数字伺服阀及电液直接数字控制技术的理论体系,形成了完整的 2D 数字伺服阀设计方法。

二、2D 数字伺服阀及其数字控制技术

2D 数字伺服阀的结构如图 1 所示。它由阀体、电—机械转换器(步进电动机)、传动机构和角位移传感器等组成。传动机构主要是用来连接电—机械转换器与阀芯,实现运动传递

和力矩放大作用。角位移传感器实时检测步进电机转子的角位移，以实现步进电机转子角位移的闭环同步跟踪控制。

1. 2D 数字伺服阀的阀体（液压伺服螺旋机构）的研究

2D 伺服阀其阀体部分主要由阀套和阀芯等组成，见图 2。其中，P 口为进油口，T1 口和 T2 口为回油口，A 口和 B 口为负载口。阀右腔通过小孔 b、阀芯杆内通道和小孔 a 与进油口 P 相通，右腔压力为进油口的压力（系统压力），而右腔面积在设计上为左敏感腔面积的一半。在阀芯左端台肩上开设有一对高低压孔；在阀芯左端开设有一螺旋槽。螺旋槽和高低压孔相交构成一液压阻尼半桥，该液压阻尼半桥控制了阀左敏感腔的压力。在静态时，若不考虑摩擦力及阀口液动力的影响，左敏感腔压力为入口压力的一半，阀芯轴向保持静压平衡，此时，高低压孔与螺旋槽相交的弓形面积相等。当阀芯以逆时针（面对阀芯伸出杆）的方向转动时，高压孔与螺旋槽相交的弓形面积增大，低压孔与螺旋槽相交的弓形面积减小；于是，左敏感腔的压力升高。左敏感腔的压力升高推动阀芯右移。阀芯右移的结果是高低压孔又回到螺旋槽的两侧，高低压孔和螺旋槽的相交面积又重新相等，左敏感腔的压力恢复为入口压力的一半，阀芯重新保持轴向力平衡。若阀芯以顺时针的方向转动，变化则正好相反。在 2D 数字伺服阀中，阀芯角位移与轴向位移（主阀开口）之间的转换运动与普通的机械螺旋机构的转换运动相一致，不同之处在于阀芯的轴向运动由液压驱动，因此实现 2D 数字伺服阀阀芯转角与轴向位移转换的导控结构也称为液压伺服螺旋机构。从结构和工作原理可以看出 2D 数字伺服阀为一双级位置反馈液压流量伺服阀。

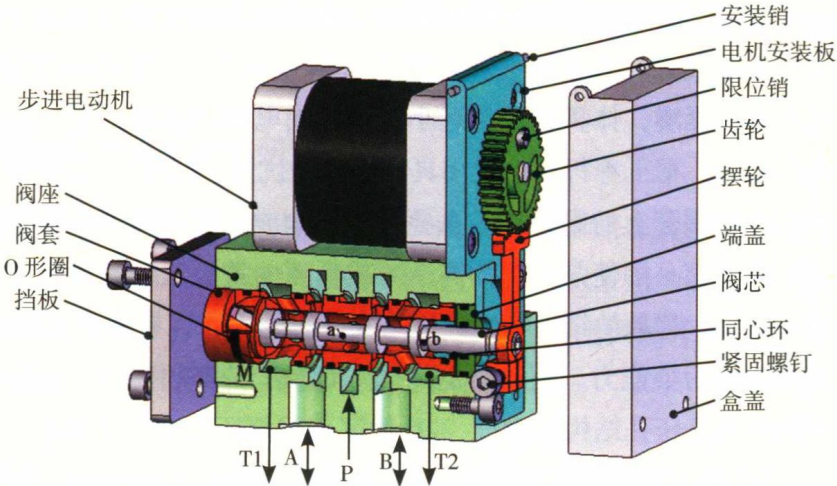


图 1 2D 数字伺服阀

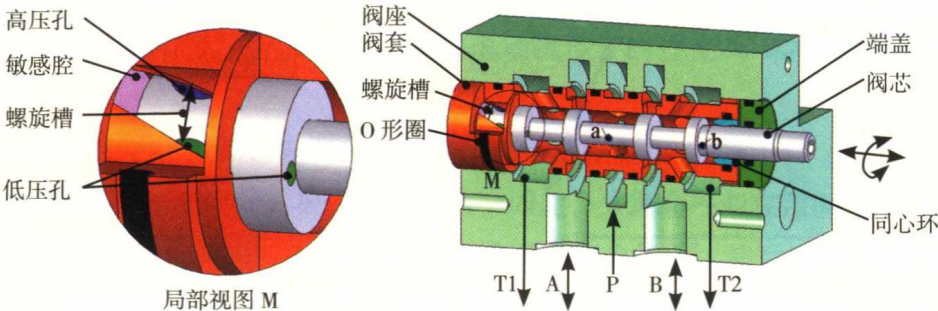


图 2 2D 数字伺服阀阀体

2D 数字伺服阀利用伺服螺旋机构将阀芯的旋转运动转换为阀芯轴向运动从而实现伺服阀液压功率放大，其集导控和主阀芯于单一阀芯上，这种独特的结构使得 2D 数字伺服阀的结构简单、紧凑，体积和重量远小于传统的电液伺服阀，这一优点使得其在大流量伺服阀以及航空航天、军工等行业的应用具有巨大的优势。另外，2D 数字伺服阀的导控由阀芯上高、低压小孔和阀套上的螺旋槽的重叠面积所构成的液压阻尼桥路实现，导控油路口径比较大，极不容易堵塞，即使某一侧的高压（或低压）重叠区域被堵塞，阀芯的力平衡将被破坏而产生轴向移动，移动的结果将增大被堵塞区域的面积而有利于清除堵塞物，因此，2D 数字阀具有很强的抗污染能力。同时，也降低了对加工精度的要求，此外在设计上采用对称的双螺旋槽和两对高低压孔结构的设计，2D 数字伺服阀还具有双冗余度，提高了工作可靠性。

2D 数字伺服阀的结构参数主要有高、低小孔的半径、初始弓高（螺旋槽和高、低孔初始接触高度）、敏感腔长度以及工作压力等。不同的结构参数对阀的动态特性的影响是不一样的。图 3 给出了不同结构参数对阀频率特性的影响。从图 3 可以看出，增加初始弓高、高

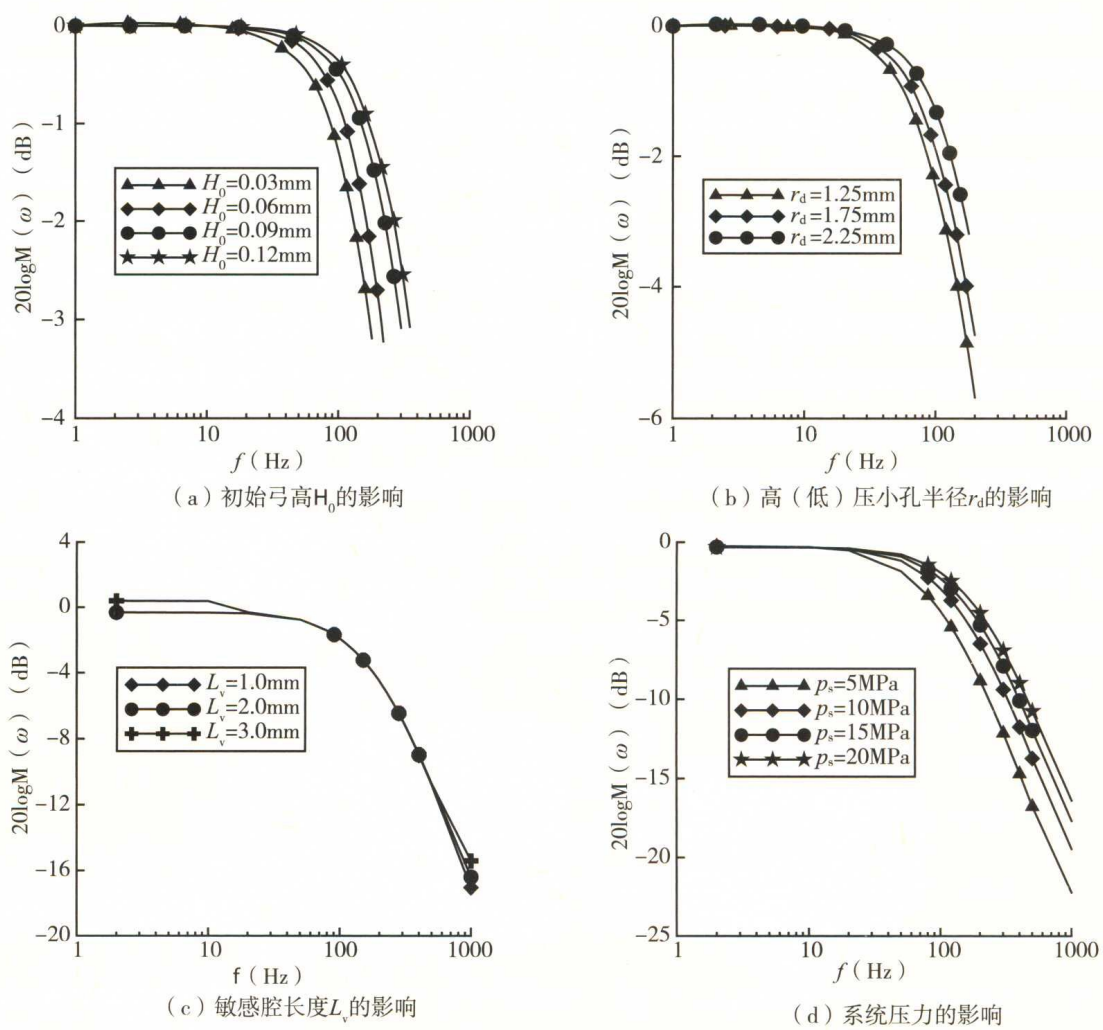


图 3 不同结构参数对阀频率特性的影响

(低)压小孔的半径以及系统工作压力可以提高阀的响应速度和频宽，而敏感腔长度对阀的响应速度和频宽无明显作用。

2. 2D 数字阀的电 - 机械转换器控制的研究

2D 数字伺服阀多采用步进电动机作为电 - 机械转换器。图 4 为两相混合式步进电动机的结构图。步进电动机传统上以步进的方式工作时阀的分辨率有限，虽然采用细分的方式可以提高阀的分辨率，但降低了阀的频响，存在着阀的分辨率和响应速度之间的矛盾，因此，步进电动机作为 2D 数字伺服阀电 - 机械转换器，需采用新的工作方式。

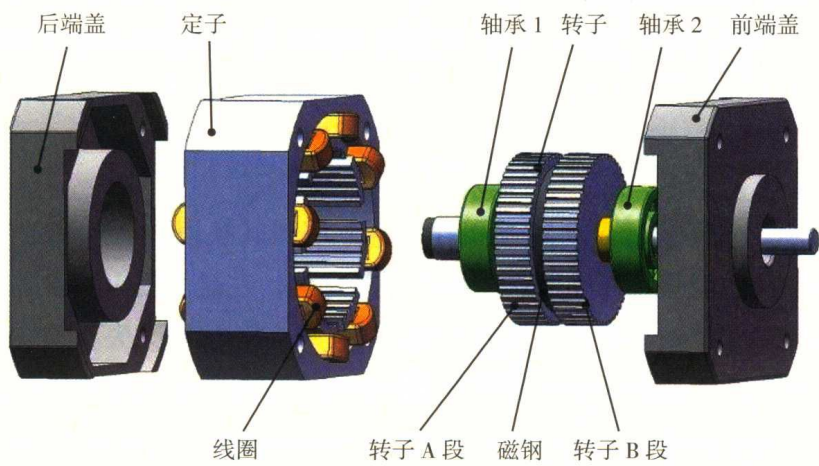


图 4 两相混合式步进电动机结构图

实际上，混合式步进电动机从原理上讲是永磁感应子式同步电动机。它通过转子分段错齿和转子轴向永磁励磁，在结构上实现了多极对数永磁感应子式同步电动机的思想。因此，我们可以采用同步电机的工作原理实现对步进电动机的同步控制。其工作原理如图 5 所示。当 A、B 两相绕组中通入相位差为 $\pi/2$ 的正弦电流 i_a 、 i_b ，则在步进电动机内部产生一旋转磁场 θ_m 。在此旋转磁场 θ_m 作用下，转子同步转动，输出角位移 θ 。当两相绕组中的电流交变一个周期，转子转过一个齿距。因此，如果能控制步进电动机绕组的电流 i_a 、 i_b ，也就控制了步进电动机内部的旋转磁场 θ_m ，从而控制了步进电动机转子的位置 θ ，实现转子在任意位置快速精确定位。

为了防止步进电动机失步，失调角在工作中必须被限制在 $(-\pi) \sim \pi$ 之间 ($\pm$ 半个齿距角)。由于在失调角 $\pm \pi/2$ 处，输出转矩最大，因此，失调角一般在限制 $(-\pi/2) \sim (\pi/2)$ 之间。要做到这一点，必须实时检测步进电动机转子的角位移，然后通过限制旋转磁场 θ_m (通过控制两相绕组的电流来实现) 使失调角满足上式，实现旋转磁场对转子角位移的跟踪控制。