

武汉理工大学

硕士学位论文

高速开关阀的研究及数字仿真

姓名：林锐

申请学位级别：硕士

专业：机械电子工程

指导教师：明仁雄

20050301

摘 要

随着社会的不断进步, 流体控制技术和计算机控制技术都在不断地飞速发展。高速开关阀是 20 世纪 80 年代发展起来的一种具有响应速度快、结构简单、抗污染能力强、与电子电路配合好等特点的电液控制转换元件。只要控制脉冲频率或脉冲宽度, 就能对流量进行连续的控制, 因此高速开关阀是一种非常有前途的数字阀, 发展这种数字元件将是工业现代化的必然选择。

为了进一步提高高速开关阀的响应频率, 降低其响应时间, 改善其性能。文章首先从高速开关阀的理论出发, 详细地研究和分析其结构、工作原理和磁场分布等, 并根据其电磁特性和机械特性, 建立了数学模型, 然后将数学模型线性化, 转化为传递函数方框图; 结合 MATLAB WITH SIMULINK 仿真工具, 先把数学模型转化为仿真模型, 代入参数后, 采用四阶龙格—库塔仿真方法, 进行数字仿真, 生成动、静态仿真曲线图, 然后研究和分析各种参数对高速开关阀的影响, 得出规律; 再采用 ITAE 准则优化方法, 对高速开关阀的模型进行参数优化, 得到最优参数; 在对高速开关阀数字仿真和优化的基础上, 分别对三组不同参数的高速开关阀进行试验, 以验证仿真结果。通过试验, 包括静态性能和动态性能等, 结果表明改进杠杆比和线圈匝数后的高速开关阀性能有明显提高; 通过上述一系列的研究和分析, 最后研制和开发出新型高速开关阀, 它是由盘式高频电磁铁、杠杆机构以及锥阀组成, 其各种性能都有较大的提高, 能进一步满足工业控制的需求。

作者希望通过该课题的研究, 能够对液压控制技术的发展, 对流体控制技术与计算机控制技术更好地结合, 起到一定地促进作用, 同时也衷心地希望我国的液压控制技术取得飞速的发展。

关键词: 高速开关阀, 脉宽调制信号, 数学模型, 数字仿真, 试验

Abstract

With the development of the society, the technique of hydraulic fluid control and the technique of computer control are making high progress. High speed on/off valve is an excellent conversion element which has been developed since 1980's, it has many merits such as high response speed、good ability of resisting contaminated oil and capability of assorting well with electro circuit. So High speed on/off valve is a promising digital valve, and it is necessary for modernization of industry to develop this digital valve.

Intention of this article is for the sake of further enhancing response frequency of high speed on/off valve, lowering its response time, improving its performance. On the basis of the theory of high speed on/off valve, this thesis studies and analyzes its construction、work principle and magnetic distributing. According to its electromagnetism characteristics and machinery characteristics, we established the mathematics pattern and then turned the mathematics pattern into linearization and converted into the transfer function pane diagram. Using the Matlab with Simulink software, we converted the mathematics pattern into simulation pattern. After filling number into parameter, digital simulation is put into effect by Runge-Kutta arithmetic and all kinds of simulation charts are created. Then studied and analyzed every kind of parameter of the influence of the high speed on/off valve. By the optimization mean with ITAE criteria, the high speed on/off valve model was carried out parameter optimization, we can get optimization parameters. According to different parameters, we have made three teams experiment. From the experiment result, we can know that digital simulation was very successful and performance of the high speed on/off valve was enhanced. Finally, we created the new high speed on/off valve which was composed of the high speed electromagnet、lever machine and taper valve, it can more satisfy the need of the industry control.

Author hopes the thesis's researches can do a little for the development of the hydraulic control technique, and the combination of the hydraulic fluid technique and the computer control technique, Author also hopes heartily the

hydraulic control technique of the our country will develop quickly.

Key words: High speed on/off valve, PWM signal, Mathematics pattern,
Digital simulation, Test.

第1章 绪论

1.1 电液数字阀的发展概况

1.1.1 脉宽调制式数字阀的发展概况^[6]

电液数字阀早期主要应用在一些快速操作的液压系统中。其后，其数字化的特征在计算机控制的液压系统中逐渐受到重视。特别是数字阀与脉宽调节（PWM—Pulse Width Modulation）控制结合后，人们发现只要控制脉冲频率或脉冲的宽度，开关阀就能象其它的数字流量阀一样，对流量进行连续的控制，因此使脉宽调制式数字阀即高速开关阀，成为一种很有前途的数字阀。虽然普通的电磁阀也具有同样的开关数字特征，但普通电磁阀的响应时间较慢，常在几十毫秒级，而且效率低。开关元件的响应速度直接影响系统的控制精度，响应速度越快，控制精度也越高。

目前的电液控制中，虽然模拟控制仍占有一定地位，但是随着微机、单片机和单板机的广泛应用，人们越来越注意到数字控制系统和数字元件的重要性。高速开关阀工作在“开”、“关”两种状态下，与计算机接口非常容易，且价格低廉、抗污染能力强、抗干扰性好、易于维护。通常采用调制脉冲宽度的方法进行控制，构成其电控系统的放大器结构简单，功耗小。

1.1.2 脉宽调制式数字阀的分类和结构^[6]

1.1.2.1 脉宽调制式数字阀的分类

1.1.2.1.1 按工作位置分类

脉宽调制式数字阀按工作位置数目可分为三位四通、二位三通和二位二通三种，而以二位二通最常见。

1.1.2.1.2 按电—机转换装置分类

按电—机械转换装置可分为螺管电磁铁式、盘式电磁铁式和压电晶体式等多种。就输出的力的大小看，螺管电磁铁式、盘式电磁铁式的输出力较大，但这种转换装置受运动部件的影响和线圈匝数的限制，存在电磁时间延迟，动态性

能较差的缺点。用压电晶体驱动的开关阀动态性能最好，切换时间最短，输出力也很大，但输出的位移较小，控制的流量小，且需使用高电压驱动，耗电量

1.1.2.1.3 按阀芯结构形式分类

按阀芯的结构形式可分为圆柱滑阀式、球阀式、锥阀式和喷嘴挡板式。

1.1.2.1.4 按驱动器分类

高速开关阀之所以有很高的响应速度，是因为驱动阀芯运动的驱动器响应速度极高。根据所用驱动器的不同，高速开关阀可分为高速电磁阀、磁致伸缩式高速开关阀、电流变液式高速开关阀、压电式高速开关阀。

1.1.2.2 脉宽调制式数字阀的结构

球阀式结构简单、密封可靠、工艺性好、行程短、动作灵敏，因而动态特性也较好，是一种普遍使用的阀芯结构。但是，球阀式结构由于作用在钢球上的液压力不平衡，受液动力影响，一般做成小通径阀，具体结构见图 3-3 所示。

1.2 高速开关阀在国内、外的发展状况与存在问题

国内外一些单位和科研机构纷纷开展了对高速开关阀的研究工作，开发出多种结构和形式的高速开关阀，但是目前研制出的一些切换速度较快的单级阀流量较小，不能满足工程实际的需要，而二级阀虽然流量大，但切换速度却比较慢。研制一种新型的高速开关阀解决快速性和大流量之间的矛盾就势在必行。到目前为止，高速开关阀性能的评估仍没有统一标准和试验规范。

1.2.1 国外现状

从 1985 年至现今近二十年中，高速开关阀的理论和应用研究越来越得到广泛的重视，日本、法国、美国、英国、加拿大等国都在大力研究与开发，并得到了优先发展。例如：日本的一些高档轿车上使用了高速开关阀控制的液压主动悬架隔振系统；高速开关阀已成功地应用于美国 BKM 公司内燃机全电子燃油喷射系统，作为电控喷油器的关键部件，利用其高速响应和优良的重复性，控制燃油喷射并进行精确的定时控制。除此之外，在车轮防抱制动装置、离合

器自动操纵等领域也广为应用^[44]。到目前为止，高速开关阀已经广泛应用到农业机械、工程机械（起重机、挖掘机）、运输设备、机床、航空器等领域中，但仍存在一些问题，如：

1. 速度不够快。
2. 工作在 PWM 状态下，易于产生压力脉动和冲击，零件易磨损及疲劳破坏。
3. 由于高速开关阀的 PWM 控制最终表现为一种机械信号的调制，因此噪声较大。由于现有的高速开关阀的工作频率均在人的听觉范围之内，故易给人以不适感。

1.2.2 国内现状

自数字阀问世以来，国内不少厂家和研究部门已经研制出许多型式的高速开关阀。但到目前为止，基本上还处于研究试验阶段，还未达到大规模推广应用的程度。以高频电磁铁为驱动器的高速开关阀为例：此类高速开关阀对电磁铁性能要求很高，国内生产的电磁铁难以满足使用要求。在一些柴油机厂家（如一汽锡柴），其所用的电磁铁均为进口^[32]。

国内许多大学也正在进行了研究与开发。例如：浙江大学已经有将稀土超磁致伸缩材料用于柴油机高速开关阀的研究^[32]。

1.3 本课题研究的意义

电液控制阀及其控制技术正得到广泛的应用。电液控制阀一般可分为伺服阀，比例阀和高速开关阀三类。从二十世纪 50 年代以来，广泛使用的电液伺服阀在所组成的电液伺服系统中，其工作精度与快速性均较好，但电液伺服阀也存在一些缺点：如其抗污染性能比较差，对环境要求比较严格，工作可靠性较差，结构比较复杂，零件的加工精度与配合精度较高，通常在几微米之内，价格较昂贵，工作稳定性、重复性比较差。当应用微机与伺服放大器相连时，还必须增设 D/A 转换，当需反馈时，也必须设置 A/D 转换。在频率较高的情况下，电液伺服阀有着不可取代的地位，然而，响应频率在 10Hz 左右时，电液数字阀及其系统经实际运行，不但克服了上述缺点，而且成本大幅度降低。因此，在频率响应要求不高的情况下，欲发展电液数字阀来取代电液伺服阀或电液比例

阀就成为非常有意义的课题。为了说明上述说法，表 1-1 综合了电液比例阀、伺服阀和电液数字阀的性能特点：

表 1-1 电液伺服阀、电液比例阀与电液数字阀之间的比较

项目	电液比例阀	电液伺服阀	电液数字阀
功能	这三种均能实现压力、流量、方向（力、速度、位置）控制		
过滤精度	25 μm	1-5 μm	25 μm 以上
响应时间	40-60 ms	5-10 ms	30 ms 以上
频率响应	约 10 Hz	20-200 Hz	约 10 Hz 以上
价格	一般为普通阀的 3-6 倍	为普通阀的 10 倍以上	同比例阀
可靠性	一般	较差	很高
稳定性	一般	一般	很高
滞环	3%	0.1-0.5	-
重复精度	0.5-1	0.5-1	<0.1

从上表可以看出，响应频率在 10Hz 左右时，电液数字阀具备很多显著的优点，其根本原因就是在于它的工作状态只有“关”与“开”两种，即“0”与“1”，结构上多用球阀或锥阀，它不存在精度很高的间隙配合，因而抗污染性能强，工作可靠，结构简单，价格低廉，稳定性好，不需要 A/D 与 D/A 转换，它产生的数字开关信号可以直接转换成流体脉冲信号，使计算机控制技术和液压流体技术达到有机结合，是一种理想的电液控制转换元件。从今后发展电液数字化方面，电液数字阀是一个最优的方向，发展这种数字元件及其系统将是工业现代化的必然选择。

由电液数字阀和它组成的电液数字控制系统具备一系列的优点，所以今后在机床控制、机器人控制、水电控制、火电控制、飞行器控制、舰船控制、压铸机和塑料注射机的控制、冶金、化工、原子能等行业上均有广阔的前景。

本课题研究意义主要是在现有较为普遍的高速开关阀的基础上，经过研究

和分析，做出一些改进，以满足某些领域内的需求。

1.4 本课题的主要研究内容

本课题主要研究内容就是先对高速开关阀的结构、工作原理、磁场分布等进行理论分析和研究，对其建立数学模型，运用 MATLAB 软件的 Simulink 功能建立仿真模型，进行数字仿真，得到仿真曲线图，研究其静态和动态特性，在仿真的基础上，分析各参数对高速开关阀的影响，通过优化，得到最优参数，以提高高速开关阀的响应频率，最后通过试验进行验证，得到试验结果，在分析和研究的基础上，研制和开发出新型的高速开关阀。

第 2 章 脉宽调制技术

2.1 脉冲调制数字式控制

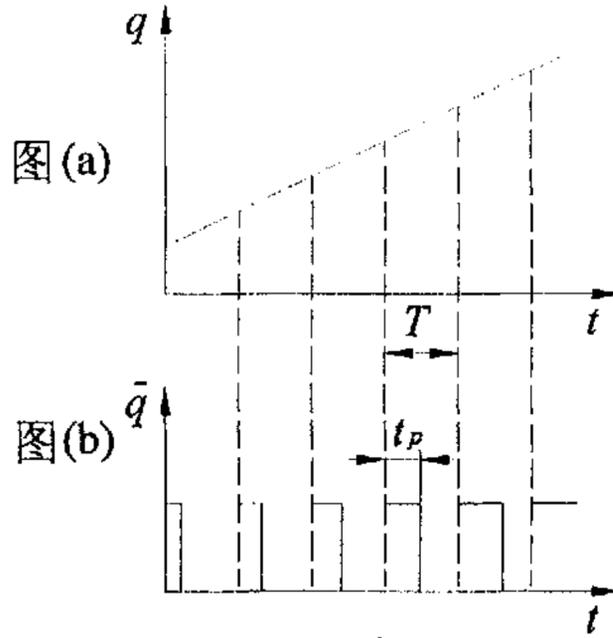
数字式控制是指控制信号的主要部分, 在进行处理和运算过程中, 是以它的数字量的形式来运行的控制形式。随着微型计算机的价格不断下降, 特别是单片机、单板机的价格低廉, 为电液控制系统的数字控制提供了必要的条件。采用计算机的数字式控制是今后液压技术发展的重要方向。采用数字式控制时要对脉冲控制信号进行调制。按调制的参数不同可分为以下几种: 脉宽调制 (PWM——Pulse Width Modulation)、脉幅调制 (PAM——Pulse Amplitude Modulation)、脉码调制 (PCM——Pulse Code Modulation)、脉频调制 (PFM——Pulse Frequency Modulation) 和脉数调制 (PNM——Pulse Numerical Modulation)。

2.2 脉宽调制 (PWM) 式数字阀控制及其工作原理

由高速开关阀组成的系统通常采用时间比率式脉冲调制来达到流量控制的目的, 所谓时间比率式脉冲调节就是常用的脉宽调制。目前技术上比较成熟的高速开关阀一般用于小流量的调速和方向的控制。

脉宽调节控制方法是通过改变占空比, 使一个周期时间内输出的平均值与相应时刻采样得到的信号成比例。如果周期 T 是固定不变的, 通过改变导通时间来改变占空比的控制方式称为脉宽调节控制式 (PWM)。

脉宽调制信号是具有恒频率, 不同开启时间比率的信号, 如图 2-1 所示, 脉宽时间 t_p 对采样周期 T 的比值 t_p/T 为脉宽占空比, 用它来表征采样周期的幅值。用脉宽信号对连续信号进行调制, 可将图 2-1(a) 中的连续信号调制成图 2-1(b) 中的脉宽信号。若调制的对象是流量, 则每个采样周期的平均流量为 $\bar{q} = q_n t_p / T$, 与连续信号处的流量相对应, 式中 q_n ——调制对象的额定流量。



图(a)连续信号 图(b)脉宽调制信号

图 2-1 信号的脉宽调制

脉宽调制 (PWM) 型数字阀的控制系统框图如图 2-2 所示。由微型计算机产生脉宽调制的脉冲序列, 经脉宽调制放大器放大后驱动数字阀, 即高速开关阀, 控制流量或压力。由于作用于阀上的信号是一系列脉冲, 所以高速开关阀也只有与之对应的快速切换的“开”和“关”两种状态, 而以开启时间的长短来控制流量。在闭环系统中, 由传感器检测输出信号反馈到计算机中形成闭环控制。如果信号是确定的周期信号或其他给定信号, 可预先编程存在计算机内, 由计算机完成信号发生功能。如果信号是随机信号, 则信号源经 A/D 转换后输入计算机内, 由计算机完成脉宽调制后输出。在需要作二个方向运动的系统中, 要用二个数字阀分别控制不同方向的运动。与增量式数字阀控制系统相同, 该系统的性能与计算机、放大器、数字阀有关, 三者相互关联。使用时必须有这些配套的装置。

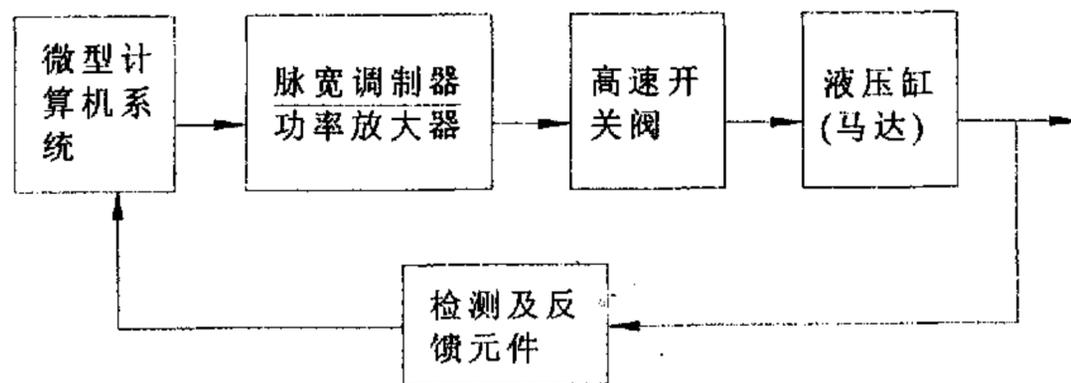


图 2-2 脉宽调制 (PWM) 型数字阀的控制系统框图

以上两种系统可以是开环控制，也可以进行闭环控制。开环控制不存在稳定性问题，控制比较简单。闭环控制精度较高，但控制比较复杂，传感器及 A/D 转换器等价格比较昂贵。

整个控制系统也可仅由模控系统完成，此时将计算机切断，由脉宽调制放大器完成信号的脉宽调制功能。功放部分是相同的。

2.3 液压脉宽调制 (PWM) 系统的优点^[24]

液压 PWM 系统的优点：

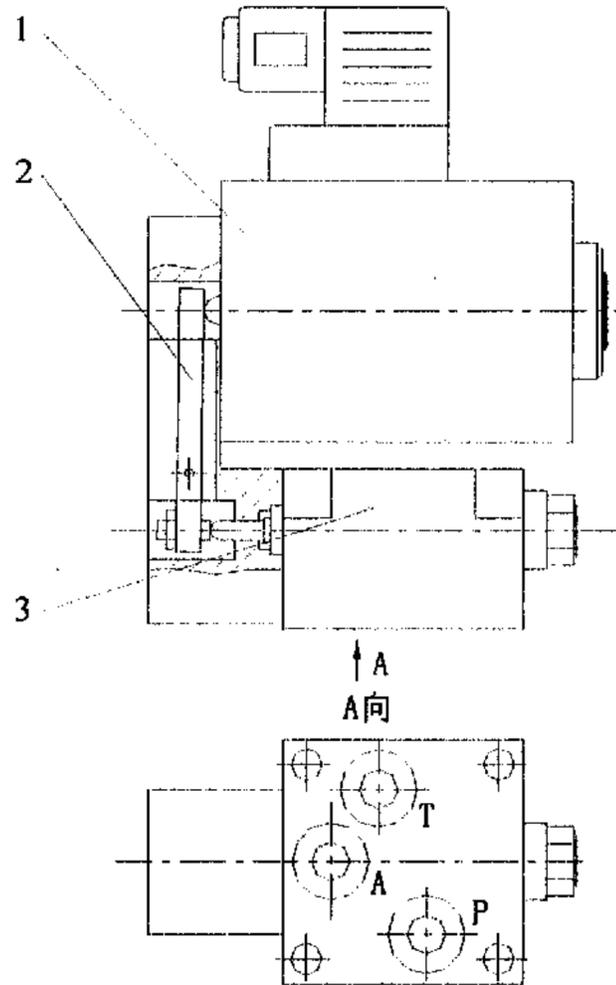
1. 消除了阀控动力机构的非线性，使阀的增益基本维持常数。
2. 通过改变脉宽调制器的参数，也可作为改变系统性能的一个手段，通过静动态特性曲线，发现调制波频率增加，过程反应加快，但超调增加，调制波幅值减小，调制器增益增加，而特性的线性变窄，因此调制波幅值可作为调整 PWM 增益的手段。
3. 抗干扰能力强，因为采用数字控制，对脉宽进行控制，特别是温度变化时对幅值影响大而对脉宽影响小，因而 PWM 对温度变化不敏感。
4. 由于载频振动的影响，PWM 输给阀控元件，消除了非灵敏区，提高了分辨力。
5. 提高了可靠性，不易被污染，减少了堵塞等现象。
6. 维护、加工成本都会降低，油液也无需像伺服阀那样严格过滤。
7. 易于与微机结合，目前有的单片机的数字输出可直接输出 PWM 信号。

第 3 章 高速开关阀数学模型的建立

3.1 高速开关阀的结构和工作原理

3.1.1 高速开关阀的结构

高速开关阀是由高频电磁铁、杠杆机构和 DN6 通径球阀三部分构成，具体结构简图如图 3-1 所示。



1—高频电磁铁；2—杠杆机构；3—DN6通径球阀

图3-1 高速开关阀结构简图

3.1.2 高速开关阀的工作原理

如图 2-2 所示，高速开关阀的工作原理：与伺服阀和比例阀的连续控制方法不同，高速开关阀采用脉冲控制方法。首先计算机根据控制要求发出相应的

脉冲信号，经过脉宽调制器和功率放大器，将脉冲信号调制和放大后送给高速开关阀，然后通过控制高频电磁铁所产生的吸力，利用杠杆机构使得球阀阀芯高速正反向运动，球阀的结构如图 3-2 所示，从而实现液流在阀口处的通断功能，并以开启时间的长短来控制流量。

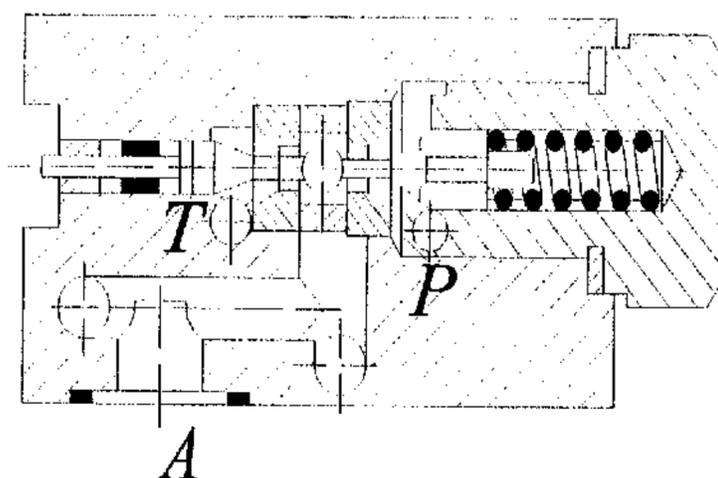


图 3-2 高速开关阀球阀结构

当脉冲信号为高电平时，高频电磁铁通电，通过杆杠机构推动顶杆克服弹簧力向右运动，钢球在顶杆的作用下也一起向右运动，直到钢球顶在阀座上为止。此时 A 腔与 T 腔相通， P 腔封闭。

当脉冲信号为低电平时，高频电磁铁失电，在弹簧和压力油的作用下，推动钢球向左运动，此时，切断 A 腔与 T 腔的通路，使 P 腔和 A 腔相通，实现系统工作。改变占空比可以改变高速开关阀的通断时间，进而改变通过高速开关阀的平均流量的大小，可以实现对执行机构运动速度和方向的控制。

3.2 高速开关阀数学模型的建立

开关控制系统的数学模型可以用设计变量的解析式表达。该方法能使问题求解较为方便。

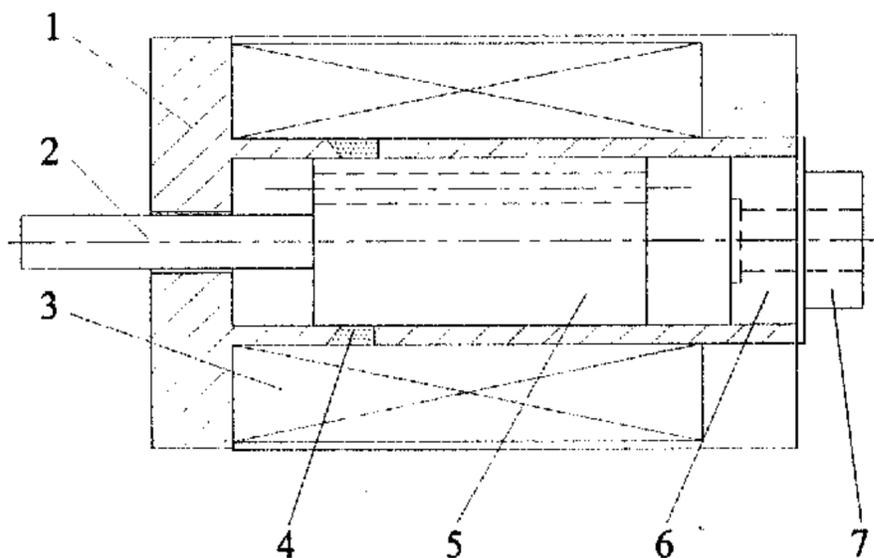
3.2.1 高频电磁铁的分析

高频电磁铁的功能同伺服阀的力矩马达或力马达相似，是一种将电信号转换成机械力和位移的电—机械转换元件，它是高速开关阀的重要组成部分。

3.2.1.1 高频电磁铁的结构

高频电磁铁的结构如图 3-3 所示，由导磁体、铜顶杆、线圈、隔磁环、衔

铁、螺母、顶销等组成。导磁体的左、右两段由导磁材料制成，中间用非导磁的隔磁环焊接，前段做成锥形结构，形成极靴。由于隔磁环比较短，产生的漏磁通近似可以忽略，同时，工作气隙与衔铁的动作方向垂直。因此，衔铁作直线运动时，气隙保持不变，锥形极靴通过优化设计，可以控制磁极的磁性饱和度，以形成水平吸力特性。另外，在这种结构中，衔铁处于静压平衡状态，因此能耐高压。



1—导磁体；2—铜顶杆；3—线圈；4—隔磁环；
5—衔铁；6—螺母；7—顶销

图 3-3 高频电磁铁的结构图

根据电磁学原理，进一步分析高频电磁铁的磁路可知，在线圈电流控制磁势作用下，磁路中的总磁通 Φ 除部分漏磁外，在工作气隙附近被分成两个部分 Φ_1 、 Φ_2 。我们可以画出磁力线分布示意图，如图 3-4 所示。对于导磁体的铁芯来说，其磁导率大大超过真空中的磁导率，所以我们在研究的过程中可以忽略铁芯的磁阻。

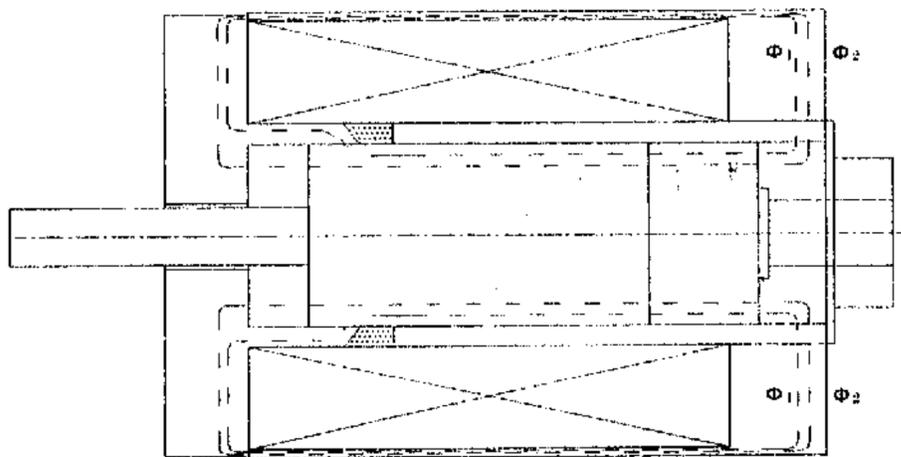


图 3-4 高频电磁铁磁路分布示意图

3.2.1.2 高频电磁铁的静态特性

根据电磁学原理，在匝数为 N 的控制线圈内通以控制电流 i 时，磁路内即产生磁通。衔铁受到的轴向电磁吸力 F 为

$$F = \frac{(iN)^2}{2R_g l} = \frac{(iN)^2}{\frac{2(l_0 - x)^2}{\mu_0 A}} \quad (3-1)$$

式中：

N ——线圈的匝数；

iN ——电流所产生的磁动势，即安匝数；

l ——气隙长度， $l = l_0 - x$ ；

R_g ——气隙磁阻， $R_g = \frac{l}{\mu_0 A}$ ；

A ——气隙部位与磁力线垂直的断面积；

x ——衔铁运动的位移；

μ_0 ——真空导磁率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ ；

l_0 ——气隙初始长度。

3.2.1.2.1 高频电磁铁电磁吸力方程的线性化

很明显，高频电磁铁存在非线性，但由于目前非线性系统的理论和分析方法还不很成熟。用线性系统模型近似描述非线性系统，其优点在于可以利用线性系统许多成熟的计算分析方法和特性，使控制系统的分析、设计更为方便，易于实用^[26]。故在工作区域内，将高频电磁铁的吸力方程进行线性化。

根据电磁吸力方程的特性可知， F 与 i, x 一般为非线性关系，即

$$F = F(i, x) \quad (3-2)$$

显然，得到的方程是非线性的。将公式(3-2)在工作气隙内的某个工作点 (i_0, x_0) 领域展成台劳级数，进行小偏差线性化，即得：

$$\begin{aligned}
 F(i, x) = & F(i_0, x_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial i} \right|_{i=i_0} (i - i_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{x=x_0} (x - x_0) + \left. \frac{\partial^2 F}{\partial i^2} \right|_{i=i_0} (i - i_0)^2 \\
 & + 2 \left. \frac{\partial^2 F}{\partial i \partial x} \right|_{i=i_0, x=x_0} (i - i_0) \cdot (x - x_0) + \left. \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \right|_{x=x_0} (x - x_0)^2 + \dots
 \end{aligned} \quad (3-3)$$

当工作范围限制在工作点 (i_0, x_0) 附近，偏差很小时，可略去偏差中的高阶项，保留一次项，并取增量关系，上式可写成

$$\Delta F = F(i, x) - F(i_0, x_0) \approx \left(\frac{\partial F}{\partial i} \right)_{i_0} \cdot \Delta i + \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)_{x_0} \cdot \Delta x, \quad (3-4)$$

式中， $\Delta i = i - i_0$ ， $\Delta x = x - x_0$ 。

可将式(3-4)写成

$$\Delta F = k_i \Delta i + k_x \Delta x$$

$$\text{或 } F(s) = k_i i(s) + k_x x(s) \quad (3-5)$$

其中：

k_i ——高频电磁铁的电流—力增益，它表示高频电磁铁电流变化引起的力的变化， $k_i = \left(\frac{N^2 i \mu_0 A}{(l_0 - x_0)^2} \right)_{i_0}$ ；

k_x ——高频电磁铁的电磁弹簧刚度，它表示衔铁位移引起的力的变化， $k_x = \left(\frac{N^2 i_0^2 \mu_0 A}{(l_0 - x)^3} \right)_{x_0}$ 。

3.2.2 高速开关阀的数学模型

3.2.2.1 线圈的端电压增量方程

线圈的端电压增量方程为

$$\Delta U = L_c \frac{d(\Delta i)}{dt} + (R_c + r_p)\Delta i + k_e \frac{d(\Delta x)}{dt}$$

$$\text{或 } \Delta U(s) = (L_c s + R_c + r_p)\Delta i(s) + k_e s\Delta x(s) \quad (3-8)$$

考虑到常数的拉氏变换为0, (3-8)可以写成

$$U(s) = L_c s i(s) + (R_c + r_p)i(s) + k_e s x(s) \quad (3-9)$$

其中: R_c ——线圈电阻;

r_p ——放大器内阻;

L_c ——线圈电感;

k_e ——线圈感应电动势系数。

式(3-9)中第一项为衔铁运动时产生的反电动势,该项值的大小与电流的变化成正比。当电流为零时因无磁通,无论衔铁如何运动,该项值为零;当电流较大,引起的磁通也较大,这时衔铁运动使磁通变化所产生的反电动势,比电流较小以及磁通也较小时所产生的反电动势要大。第二项为线圈压降,它是线圈发热的主要原因。第三项为自感电动势。

3.2.2.2 衔铁—阀芯组件的位移运动比例关系

高频电磁铁得电时,产生的推力作用在杠杆上,通过杠杆机构推动球阀的阀芯向左运动,当高频电磁铁失电时,球阀的弹簧推动杠杆机构,使高频电磁铁的推杆恢复原位。

如图 3-5 所示,作用在杠杆机构上的力分别为高频电磁铁作用在杠杆上的力 F_m 和球阀作用在杠杆上的力 F_l 。在本论文仿真和优化中的高速开关阀,作用在杠杆上的高频电磁铁和球阀的顶杆之间的间距为 45mm。

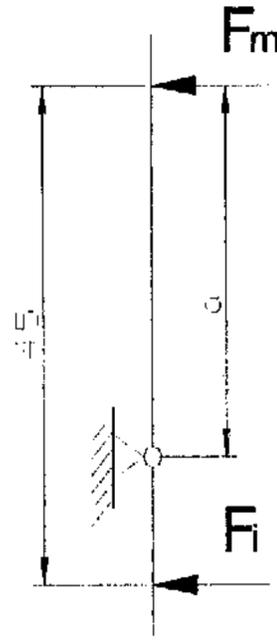


图 3-5 杠杠机构受力示意图

杠杠机构的力平衡方程为

$$F_m \times a = F_i \times (45 - a) \quad (3-10)$$

可以得到衔铁—阀芯的位移关系示意图。

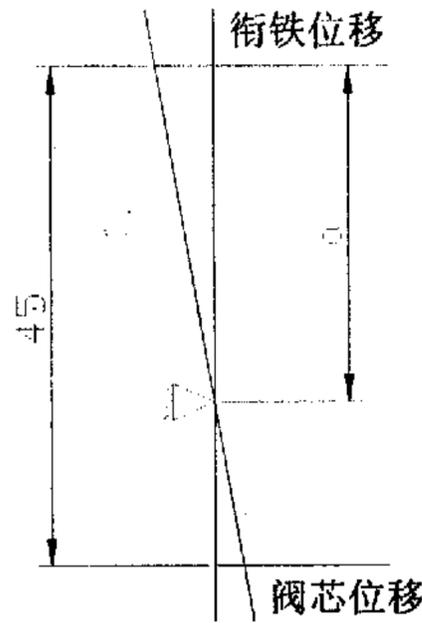


图3-6 衔铁—阀芯组件的位移运动比例关系示意图

如图3-6 所示，衔铁和阀芯的位移比例关系为 $L = \frac{a}{45 - a}$ 。

3.2.2.3 衔铁—阀芯组件的力平衡方程

根据图3-7，通过上述分析，可写出力平衡增量方程式

$$\left(M_m + \frac{M_v}{L}\right) \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + B_m \frac{d\Delta x}{dt} + \frac{k_s}{L} \Delta x + \frac{2C_d W \cos \alpha \Delta p}{L} \Delta x = \Delta F_m \quad (3-11)$$

其中： M_m ——衔铁的质量；

M_v ——阀芯的质量；

k_s ——机械弹簧刚度；

L ——衔铁与阀芯位移比例系数；

C_d ——球阀阀口流量系数，取 $C_d = 0.8 \sim 0.9$ ；

B_m ——阻尼系数；

W ——阀口面积梯度；

α ——阀口射流角，取 $\alpha = 69^\circ$ ；

Δp ——阀口前后压力差。

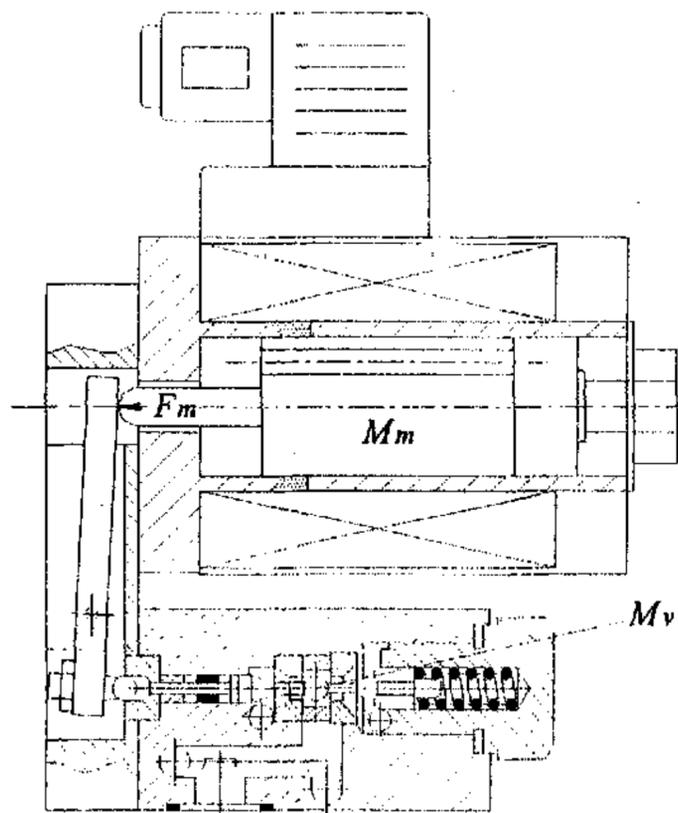


图3-7 高速开关阀结构图

在式(3-11)中，第一项为衔铁—阀芯组件的惯性力；第二项为衔铁的阻尼力；第三项为衔铁—阀芯组件的电磁弹簧力和机械弹簧力；第四项为阀芯受到

的稳态液动力；方程中，尚未考虑作用在阀芯上的液压力等因素的影响。

而电磁力的增量 ΔF_m 按式(3-5)考虑， Δx 前应改为负号，因为电磁力增大时将使轴向工作气隙减小。

$$\Delta F_m = k_i \Delta i - k_x \Delta x \quad (3-12)$$

3.2.3 高速开关阀的传递函数方框图

一个系统可由若干个环节组成，将这些环节以方框表示，其间用相应的变量联系起来，就构成系统的方框图。下面将数学模型转化为传递函数方框图。

合并式(3-11)和式(3-12)，并进行拉氏变换，得

$$(M_m + \frac{M_v}{L})s^2 x(s) + B_m s x(s) + (\frac{k_s}{L} + k_x) x(s) + \frac{2C_d W \cos a \Delta p}{L} x(s) = k_i i(s) \quad (3-13)$$

根据式(3-9)和式(3-13)画出传递函数方框图，如图3-9所示。

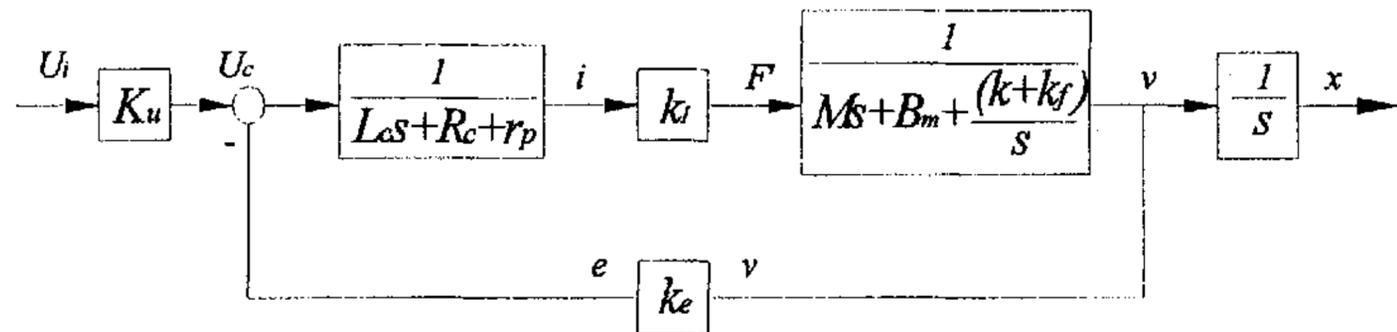


图 3-8 高速开关阀的方框图

图 3-8 中， $k_f = \frac{2C_d W \cos a \Delta p}{L}$ 。

将图 3-8 转化后得

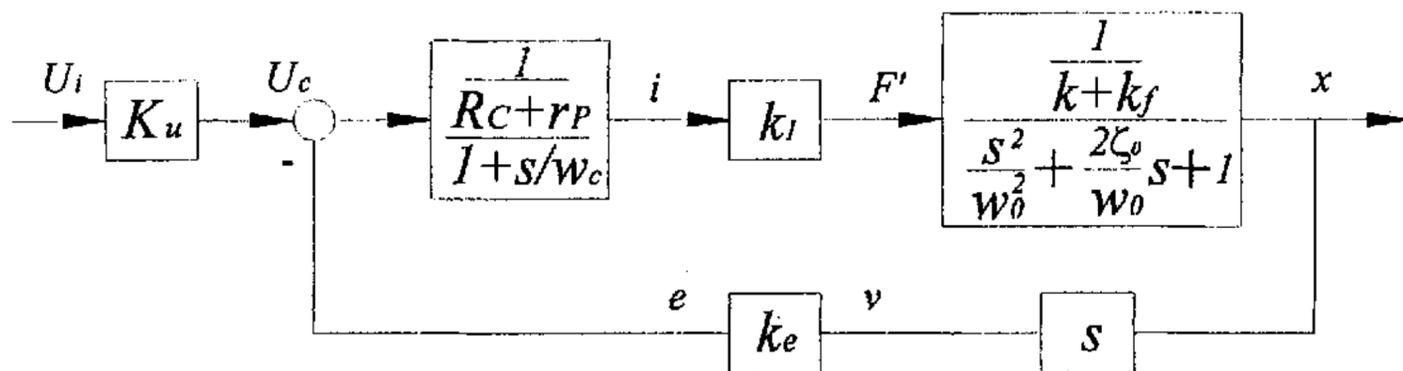


图 3-9 高速开关阀的简化方框图

图 3-9 中, K_u ——放大器电压放大系数;

$$\omega_c \text{——控制线圈的转折频率, } \omega_c = \frac{R_c + r_p}{L_c};$$

$$\omega_0 \text{——衔铁—阀芯组件弹簧质量系统的固有频率, } \omega_0 = \sqrt{\frac{(k + k_f)}{M}};$$

$$\zeta_0 \text{——衔铁—阀芯组件的无因次阻尼比, } \zeta_0 = \frac{B_m}{2\sqrt{(k + k_f)M}};$$

$$M \text{——衔铁—阀芯组件的质量, } M = M_m + \frac{M_v}{L};$$

$$k \text{——机械弹簧与电磁弹簧的合成弹簧刚度, } k = \frac{k_s}{L} + k_x;$$

3.3 本章小结

高速开关阀数学模型的建立是研究和分析高速开关阀的基础, 高速开关阀的数字仿真和改进设计都是建立在数学模型的基础上。本章详细地分析高速开关阀的结构、工作原理以及磁路分布等; 建立了高速开关阀的数学模型, 并用传递函数方框图加以描述。

第 4 章 高速开关阀的数字仿真

4.1 仿真的基本概念和基本知识^{[14][23][25]}

4.1.1 仿真的概念

仿真是以相似性原理、控制论、信息技术及相关领域的有关知识为基础，以计算机和各种专用物理设备为工具，借助物体模型对真实物体进行试验研究的一门综合性技术。

4.1.2 数学仿真

数学仿真就是用数学语言去表达一个物体，并编制程序在计算机上对实际物体进行研究的过程。这种数学表达就是数学模型。数学仿真把研究对象的结构特征或者输入输出关系抽象为一种数学描述（微分方程、状态方程等）来研究，具有很大的灵活性，它可以方便地改变物体结构、参数；而且速度快，可以在很短的时间内完成实际物体很长时间的动态演变过程；精确度高，可以根据需要改变仿真的精度；重复性好，可以很容易地再现仿真过程。

4.1.3 计算机仿真

计算机仿真是在研究物体过程中根据相似原理，利用计算机来逼真模拟研究对象。研究对象可以是实际的物体，也可以是设想中的物体。在没有计算机以前，仿真都是利用实物或者它的物理模型来进行研究的，即物理仿真。物理仿真的优点是直接、形象、可信，缺点是模型受限、易破坏、难以重用。而计算机仿真是将研究对象进行数学描述、建模编程，且在计算机中运行实现，它不怕破坏、易修改、可重用。计算机仿真可以用于研制产品的全过程。

4.2 仿真软件^{[14][23][25]}

MATLAB 与 SIMULINK 简介

MATLAB 是美国 Math Works 公司于 1984 年推出的一套数值计算软件，分为总包和若干个工具箱，可以实现数值分析、优化、统计、偏微分方程数值解、

自动控制、信号处理、图像处理等若干领域的计算和图像显示功能。它将不同数学分支的算法以函数的形式分类成库，使用时直接调用这些函数并赋予实际参数就可以解决问题，快速而且准确。

SIMULINK 是一个用来对动态系统进行建模、仿真和分析的软件包。使用 Simulink 来建模、分析和仿真各种动态系统，是一件非常轻松的事情。它提供了一种图形化的交互环境，只需用鼠标拖动的方法便能迅速地建立起物体的框图模型，它和 MATLAB 的无缝结合使得用户可以利用 MATLAB 丰富的资源，建立仿真模型，监控仿真过程，分析仿真结果。它使数字仿真技术进入到一个崭新的阶段，它不需要过多地了解“数值问题”，而是侧重于系统的建模、分析与设计问题，其良好的人机界面及周到的帮助功能使得它广为科技界和工程界的人们所应用。

4.3 计算机仿真的过程^{[14][23][25]}

计算机仿真的一般过程可以表述如下：

1. 描述仿真问题，明确仿真目的；
2. 项目计划、方案设计与系统定义。根据仿真目的确定相应的仿真结构，规定相应仿真系统的边界条件与约束条件；
3. 数学建模：根据系统的先验知识、试验数据及其机理研究，按照物理原理或者采用系统辨识的方法，确定模型的类型、结构和参数。注意确保模型的有效性和经济性；
4. 仿真建模：根据数学模型的形式、计算机类型、采用的高级语言或其它仿真工具，将数学模型转换成能在计算机上运行的程序或其它模型，也即获得系统的仿真模型；
5. 试验：设定试验环境/条件和纪录数据，进行试验，并记录数据；
6. 仿真结果分析：根据试验要求和仿真目的对试验结果进行分析处理，即整理及文档化。根据分析结果修正数学模型、仿真模型或仿真程序或者修正/改变原型系统，以进行新的试验。模型是否能够正确地表示实际系统，并不是一次完成的，而是需要比较模型和实际系统的差异，不断地修正和验证而完成的。

图 4-1 所示，为计算机仿真过程流程图。

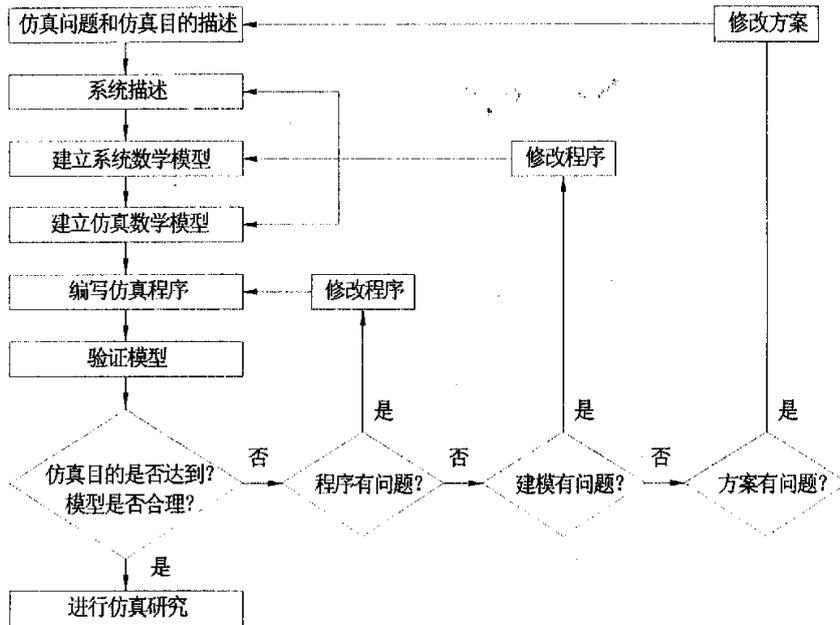


图 4-1 计算机仿真过程流程图

4.4 计算机仿真模型的建立

4.4.1 仿真模型的建立

我们利用 Simulink 子系统技术来建立计算机仿真模型：

1. 首先构建高速开关阀整体模型，如图 4-2 所示，由单位阶跃信号作为输入信号，经过高速开关阀仿真模型模块，输出的信号由示波器显示。

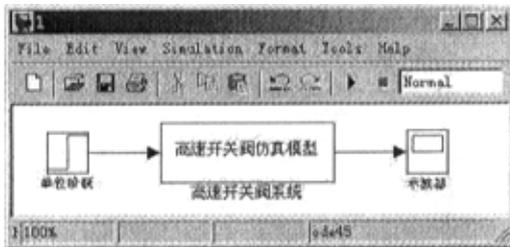


图 4-2 计算机仿真整体模型

2. 然后根据图 3-9 高速开关阀的简化方框图编辑高速开关阀仿真模型模块，

得到图 4-3。

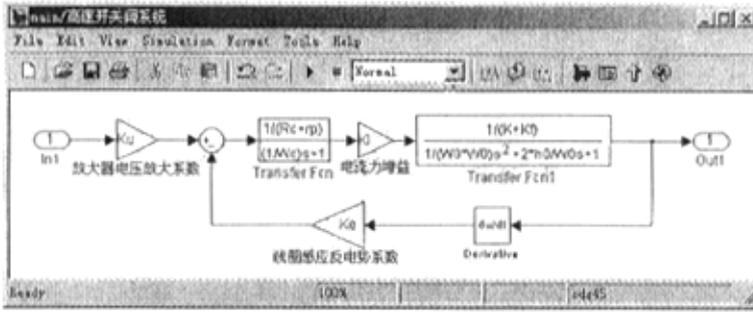


图 4-3 高速开关阀仿真模型模块

4.4.2 仿真模块参数设置

高速开关阀仿真模型建立之后，首先需要按照系统的要求设置仿真模块的各参数。

1. 增益 K_u 是放大器电压放大系数，取值为 200；
2. L 为衔铁与阀芯位移比例系数，取值为 4.6；
3. M_m 为衔铁的重量，取值为 0.260 Kg；
4. 通过测试弹簧刚度为 $k_s = \frac{4.5\text{kgf}}{1.5\text{mm}} = 3.0\text{kgf/mm} \approx 30\text{N/mm}$ ；
5. N 为线圈匝数，取值为 1000 匝；
6. 输入信号的配置，输入信号为单位阶跃信号，其配置如图 4-4 所示。

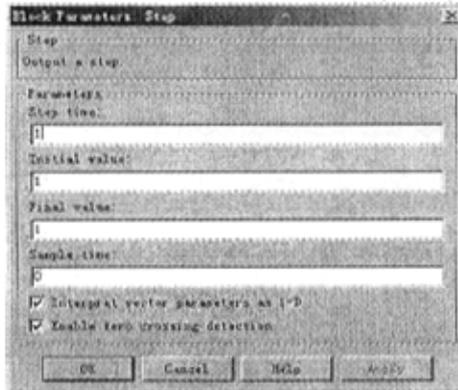


图 4-4 单位阶跃信号的配置

仿真模块中代入参数后，生成的仿真输出曲线如图 4-5 所示：

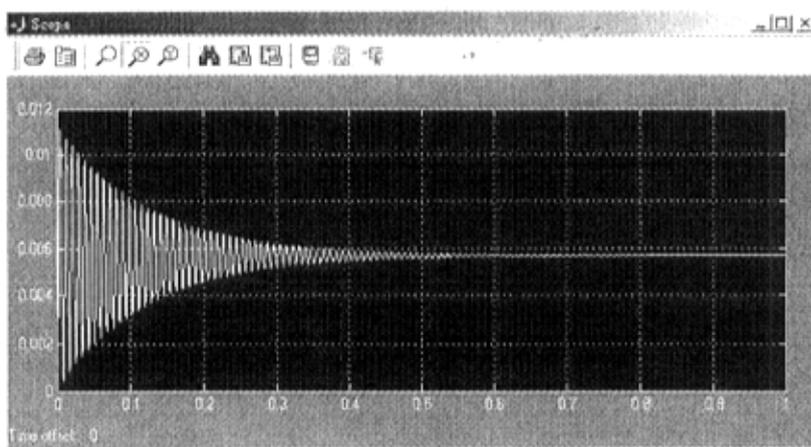


图 4-5 高速开关阀仿真输出曲线图

图 4-5 中，横坐标表示的是时间，单位为秒，纵坐标表示的是阀芯位移，单位为米。

将图 4-5 高速开关阀仿真曲线图进行局部放大后，得到图 4-6。

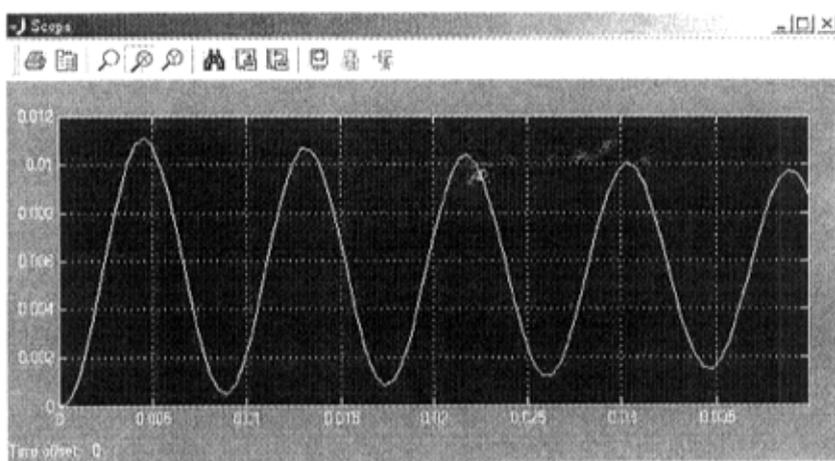


图 4-6 高速开关阀仿真输出曲线放大图

仿真也可通过 MATLAB 编写程序，输入各个初始条件，采用四阶龙格-库塔法求解，选择合理的步长，调用的程序“仿真.m”如下：

```
A=diag(P(:,1));B=diag(P(:,2));
```

```

C=diag(P(:,3));D=diag(P(:,4));
m=length(WIJ(:,1));
W0=zeros(n,1);W=zeros(n,n);
for k=1:m
    if (WIJ(k,2)==0) W0(WIJ(k,1),1)=WIJ(k,3)
    else W(WIJ(k,1),WIJ(k,2))=WIJ(k,3)
    end;
end;
Q=B-D*W;    Qn=inv(Q);
R=C*W-A;    V1=C*W0;
Ab=Qn*R;    b1=Qn*V1;
Y=Yt0';    y=Y(nout);t=T0;
N=round((Tf-T0)/(h*L1));
for i=1:N;
for j=1:L1;
    (下面是调用四阶龙格-库塔法程序块, 求解  $\dot{Y} = A_b Y + b_1 y_0$ )
    K1=Ab*Y+b1*Y0
    K2=Ab*(Y+h*K1/2)+b1*Y0;
    K3=Ab*(Y+h*K2/2)+b1*Y0;
    K4=Ab*(Y+h*K3)+b1*Y0;
    Y=Y+h*(K1+2*K2+2*K3+K4)/6;
end;
y=[y,Y(nout)];
t=[t,t(i)+h*L1];
end;
[t,y']
plot(t,y)
grid on

```

4.4.3 选用的数字仿真方法

对本系统进行计算机仿真, 选用的仿真方法是四阶龙格—库塔法, 它的截

断误差正比于 h^5 。

从递推表达式(4-1)中，可以发现龙格—库塔法的基本思想是：用函数值 $f(t, y)$ 的线性组合来代替 $f(t, y)$ 的高阶导数项，既可以避免计算高阶导数，又可以提高数值计算精度。它的递推表达式为：

$$\begin{cases} y_{k+1} = y_k + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \\ K_1 = f(t_k, y_k) \\ K_2 = f(t_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2}K_1) \\ K_3 = f(t_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2}K_2) \\ K_4 = f(t_k + h, y_k + hK_3) \end{cases} \quad (4-1)$$

对于工程应用四阶龙格—库塔法，当步距取很小时，误差是很小的，已完全能够满足仿真精度要求。具体的程序见 4.4.2 中的“仿真.m”。

4.4.4 高速开关阀稳定性分析

Bode 图，即开环对数坐标图，可以利用它来判别系统的稳定性。

将图 3-10 中各参数代入具体数值，得到图 4-7 高速开关阀具体数值方框图。

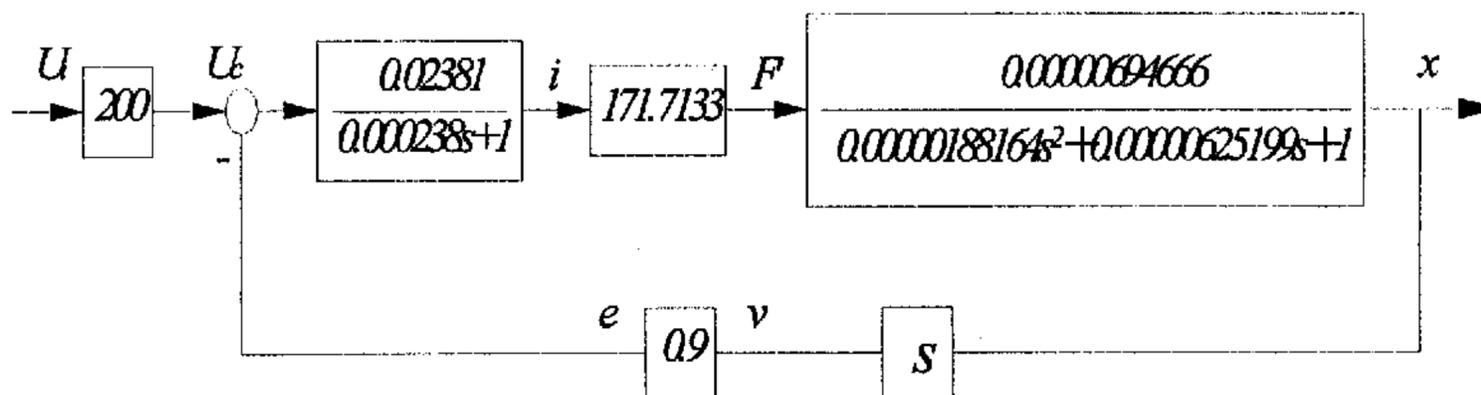


图 4-7 高速开关阀具体数值方框图

使用 MATLAB 软件中 `bode(tf(num,den))` 命令，可以生成 Bode 图。

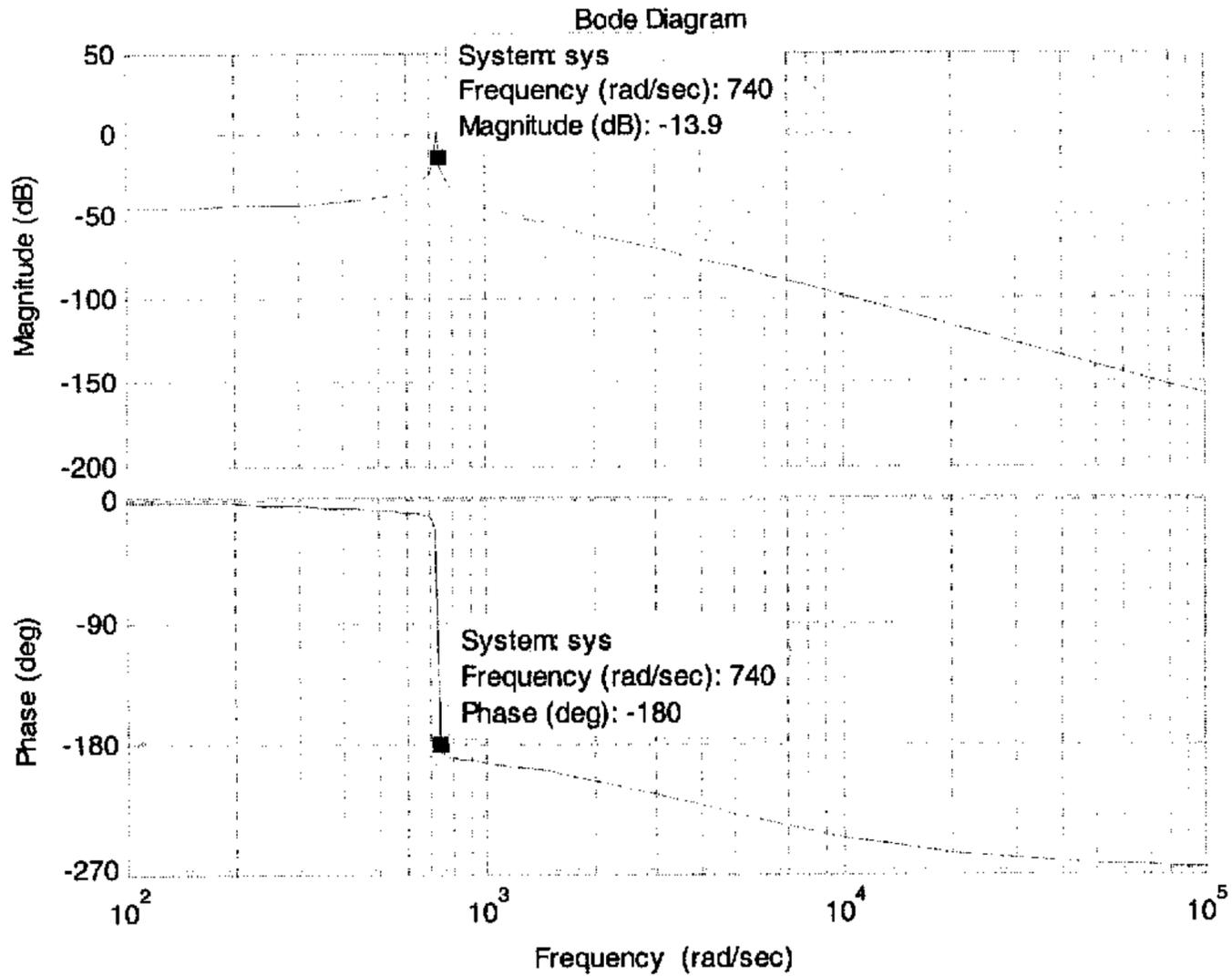


图 4-8 高速开关阀开环系统 Bode 仿真图

根据图 4-8 高速开关阀开环系统 Bode 仿真图,可知高速开关阀的相位裕度 $\gamma=67^\circ$, 幅值裕度 $K_g=13.9\text{ dB}$, 故系统闭环稳定。

4.4.5 高速开关阀流量特性分析

液体流经高速开关阀的流量公式为

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4-2)$$

式中: C_d ——流量系数, 取 0.67~0.74;

A ——通流截面积;

高速开关阀直接根据一系列脉冲电信号进行开关动作, 在出口输出一系列相应的脉冲流体, 这一系列脉冲流体时间平均被当作控制流体输出量。因此高速

开关阀通常采用脉宽调制的方法来控制开关阀的开启时间及关闭时间。使得一个调制周期内阀输出的平均流量 \bar{q} 与相应周期的占空比成正比。设 q_n 为阀全开时的流量，由式(4-3)可得阀在一个周期内的平均流量为：

$$\bar{q} = q_n t_p / T \quad (4-3)$$

导通时间 t_p 与工作周期 T 之比 t_p/T 为占空比。占空比的理论取值范围是 $0 \leq t_p/T \leq 1$ ，但由于阀的开关时间的影响，在占空比很小时阀不能开启，存在死区，占空比接近1时存在饱和特性。所以实际可控范围比上述小。

由式4-3可得，占空比越大，通过高速开关阀进入液压执行元件的平均流量 \bar{q} 越大。液压 PWM 控制模式正是通过改变占空比从而控制高速开关阀的启闭，再进一步控制由高速开关阀组成的整个液压系统。这种调制信号一般由微机(包括单片机)产生，根据不同类型液压系统的工作要求，设计相应的电路，把控制程序输入给计算机，就能实现计算机对液压系统的控制。

4.4.6 高速开关阀仿真研究

在对高速开关阀参数变化进行仿真的过程中，信号源是利用 Simulink 中的信号发生器产生周期性的信号，信号发生器在 Simulink 中图标如图 4-9 所示，它可产生四种信号，分别为正弦信号(sine signs)、方波信号(square signs)、锯齿信号(sawtooth signs)和随机信号(random signs)。在本论文中，高速开关阀数字仿真采用的是方波信号，采用的频率(Frequency)单位为 Hz，具体参数设置如图 4-10 所示。

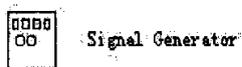


图 4-9 Simulink 中信号发生器图标



图 4-10 Simulink 中信号发生器参数设置

分析参数变化的仿真整体模型如图 4-11 所示，高速开关阀系统模块见图 4-3。



图 4-11 分析参数变化的仿真整体模型

下面我们分别改变高速开关阀的各参数——杠杆比、信号发生器的频率、线圈匝数、衔铁质量以及衔铁空行程等，详细地研究和分析这些参数对高速开关阀的影响，并得出它们的规律，为研制和开发新型高速开关阀打下基础。

为了能清楚地了解参数变化的规律，下面的仿真图中，仿真时间为 0.5 秒，具体设置见图 4-12。

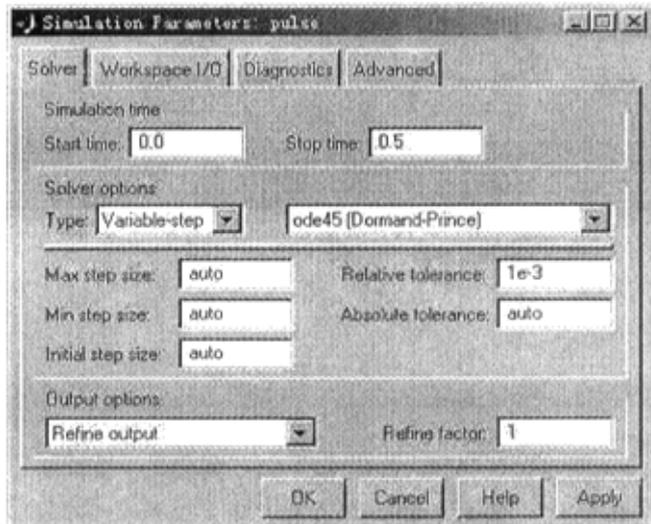


图 4-12 仿真时间设置

4.4.6.1 杆杠比变化对高速开关阀的影响

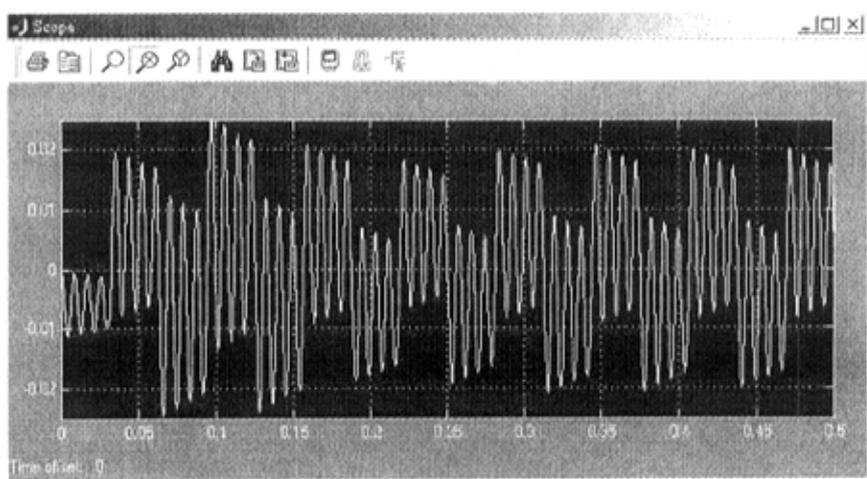


图 4-13 高速开关阀在 $f = 8\text{Hz}$ 、 $L = 4.6$ 时的仿真图

图 4-13 是高速开关阀在 $f = 8\text{Hz}$ 、 $L = 4.6$ 时的仿真曲线图，横坐标表示的时间 t ，单位为秒，纵坐标表示的球阀阀芯的位移 $y(t)$ ，单位为米。

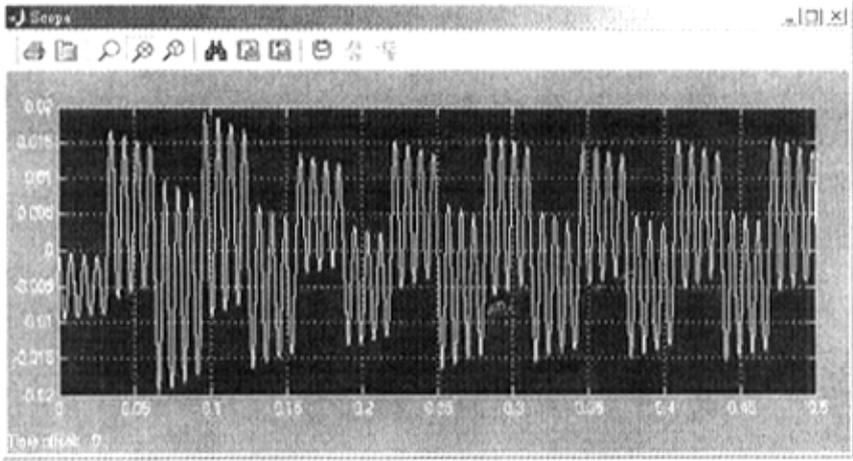


图 4-14 高速开关阀在 $f = 8\text{Hz}$ 、 $L = 1$ 时的仿真图

图 4-14 是在 4-13 的基础上，只改变杠杆比，其它参数不变，从图 4-13 和图 4-14 中，可知采用杠杆比为 4.6 时的高速开关阀输出信号的幅值比采用杠杆比为 1 时的高速开关阀输出信号的幅值要大很多，因此高速开关阀在杠杆比为 4.6 时的性能远比杠杆比为 1 时的性能要好很多，从图 4-16 和图 4-17 中，也能明显的看到这一点。所以选用合适的杠杆比对高速开关阀性能提高有很大的帮助。

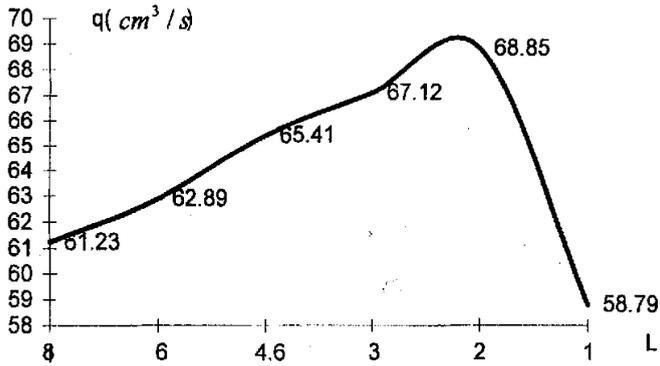


图 4-15 杠杆比和流量之间的关系图

图 4-15 中，只改变参数杠杆比，其它参数都保持不变。根据公式 4-2 和 4-3，可以得到杠杆比和流量之间的关系图 4-15。横坐标表示杠杆比，纵坐标表示的

是通过高速开关阀的流量，单位是 cm^3/s 。根据图 4-15，可以很清楚的发现杠杆比和流量之间的关系，当杠杆比为 2 时，通过高速开关阀的流量最大，因此此时的性能最好。

4.4.6.2 信号发生器频率的变化对高速开关阀的影响

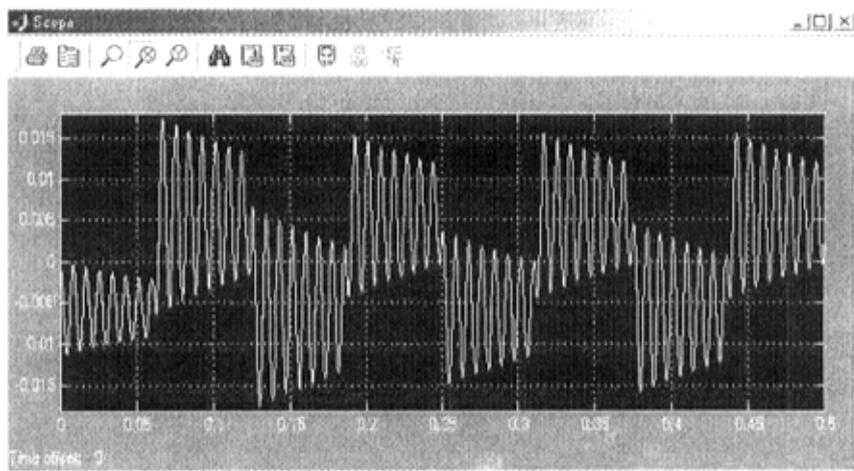


图 4-16 高速开关阀在 $f = 16Hz$ 、 $L = 4.6$ 时的仿真图

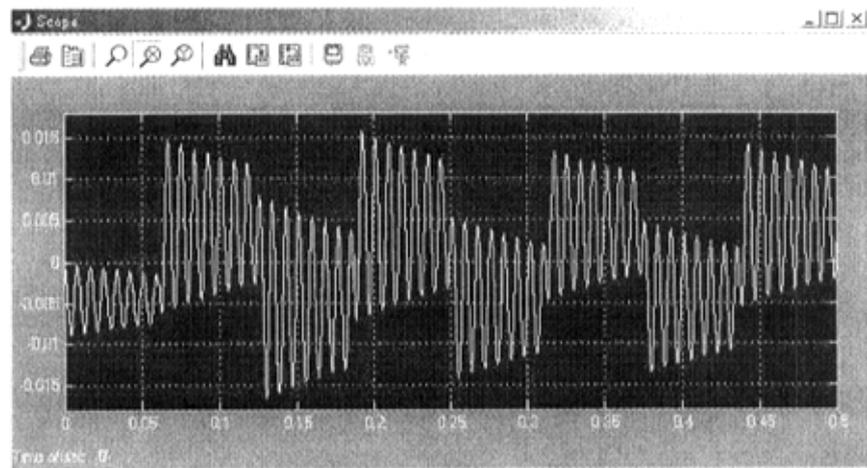


图 4-17 高速开关阀在 $f = 16Hz$ 、 $L = 1$ 时的仿真图

比较图 4-13、图 4-16 和图 4-14、图 4-17，可以发现在其它参数不变的情

况下，随着方波信号的频率不断提高高速开关阀输出信号的幅值是不不断减小的，因此其性能也是不断降低的，当频率达到 22 Hz 时，高速开关阀将停止运动。

4.4.6.3 线圈匝数的变化对高速开关阀的影响

根据轴向电磁吸力公式 3-1，可以发现线圈匝数的变化会直接影响轴向电磁吸力的变化。

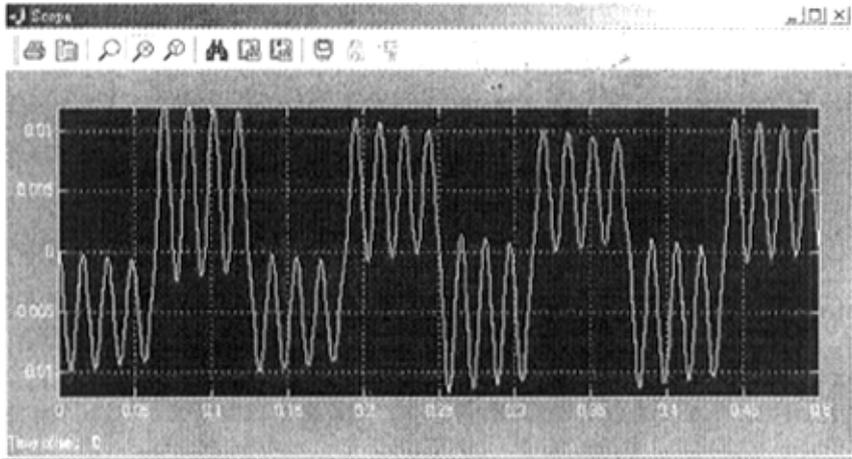


图 4-18 高速开关阀线圈匝数 500 时的仿真图

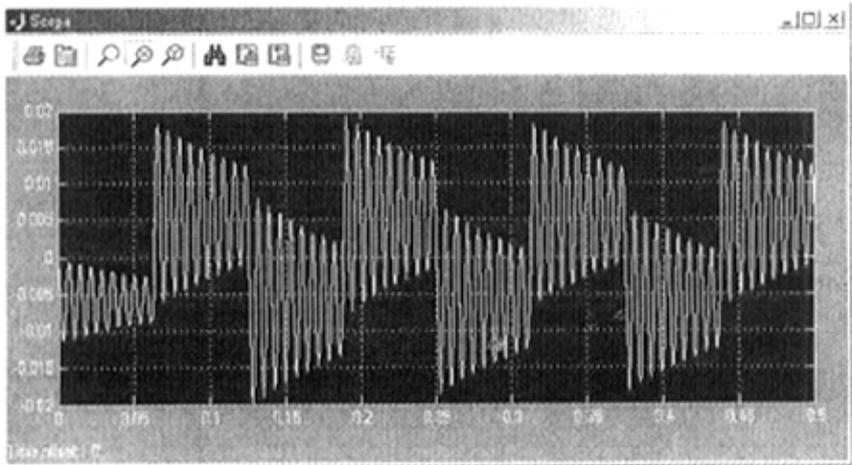


图 4-19 高速开关阀线圈匝数 1200 时的仿真图

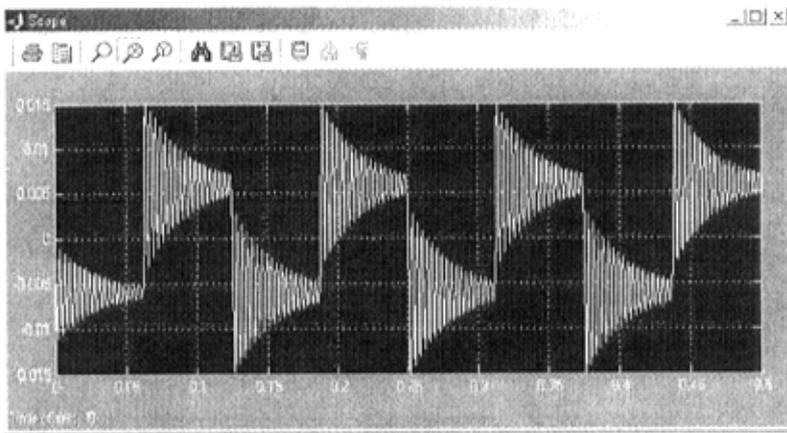


图 4-20 高速开关阀线圈匝数 2500 时的仿真图

从仿真图 4-18、图 4-19、图 4-20 可以看出，线圈匝数对螺管电磁铁的影响是相当大的，进而对整个高速开关阀的影响也是不容忽视的。线圈匝数过少，电流能很快增大，但因线圈匝数少，磁势增大不多，也影响到电磁力的增大，所以动作时间延长，如图 4-18 所示。如果线圈匝数过多，则影响电流和电磁力的增大，因此动作时间也将延长，可以发现在图 4-19、图 4-20 中，线圈匝数提高一倍，而高速开关阀输出信号的幅值反而减小，因此高速开关阀性能反而下降，所以线圈匝数也有最佳值。

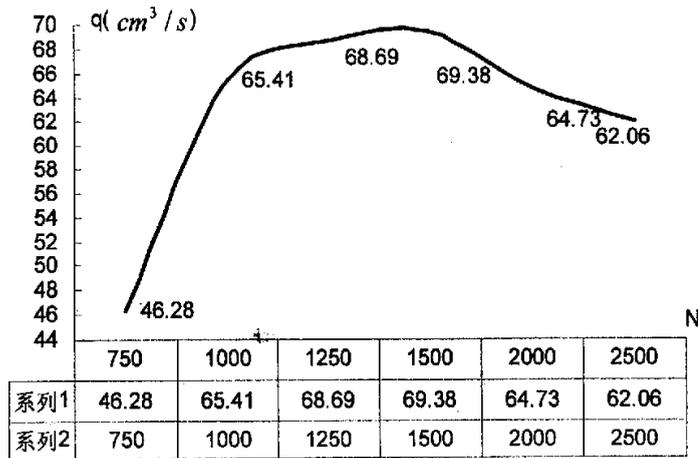


图 4-21 线圈匝数和流量之间关系图

图 4-21 中，只改变线圈匝数，其它参数都保持不变。根据公式 4-2 和 4-3，可以得到线圈匝数与通过高速开关阀流量之间的关系图 4-21。图中纵坐标表示的是通过高速开关阀的流量，单位为 cm^3/s ，横坐标表示的是线圈匝数。根据图 4-21，可以很清楚的发现线圈匝数和流量之间的关系，当线圈匝数为 1500 时，通过高速开关阀的流量最大，因此相对于流量而言，此时的性能最好。

4.4.6.4 衔铁质量的变化对高速开关阀的影响

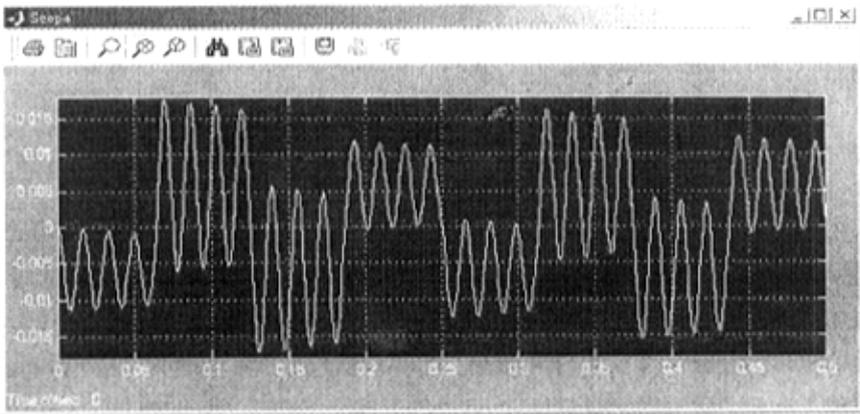


图 4-22 高速开关阀衔铁质量=0.5Kg 时的仿真曲线图

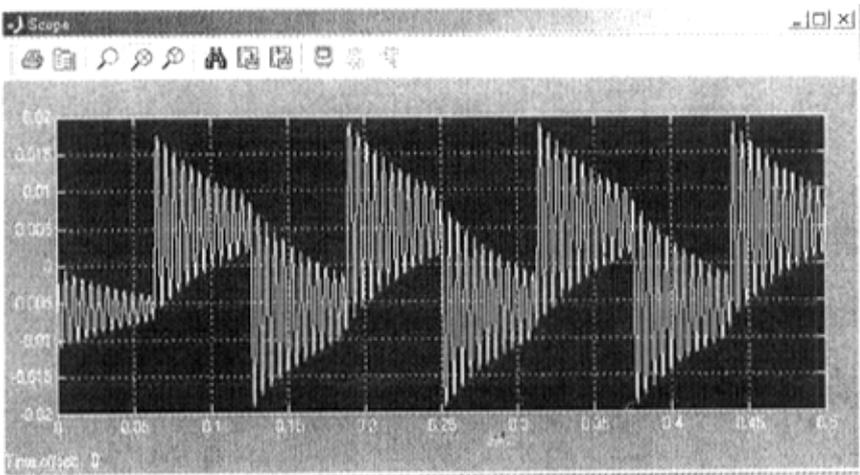


图 4-23 高速开关阀衔铁质量=0.1Kg 时的仿真曲线图

从图 4-22、图 4-11（衔铁质量为 0.26Kg）、图 4-23 可以很明显的看出，随着衔铁质量的不断上升，高速开关阀输出信号的幅值不断减小，因此其性能

也不断下降，所以在设计的过程中，尽量要使用密度较小的材料，降低质量。但同时在降低质量的同时也要考虑到衔铁半径的影响，衔铁半径的变化会影响衔铁的质量，当衔铁材质一定时，半径越大，质量也越大。

4.4.6.5 衔铁空行程的变化对高速开关阀的影响

衔铁空行程最佳值的形成是因为当空行程太小时衔铁运动的惯性力和电磁力难以克服阀上的力，使动作时间急剧上升。在实际设计时，要考虑到摩擦力、电磁力等受干扰变化。

4.5 本章小结

数字仿真是研究和分析高速开关阀的关键。其具体实现主要是通过利用 Matlab with Simulink 软件来完成的。本章中建立仿真模型后，分别对高速开关阀的一些参数进行了仿真分析，例如：杠杠比、信号发生器的频率、线圈匝数、衔铁质量及衔铁空行程等，得到这些参数的变化对高速开关阀的影响。为后续的试验打下基础。

第 5 章 高速开关阀的参数优化

5.1 ITAE 准则优化方法

无论是设计者还是使用者，都希望液压元件和系统是最优的，然而电液数字系统的组成比较复杂，为此，专家们经过了大量的研究，最后找到了 ITAE 准则优化方法，即参数优化方法，ITAE 准则优化方法是一个集合了系统的快速性、稳定性和准确性的综合指标，它通过计算机仿真，可以找出最优参数，并能绘出最优曲线。

5.2 基于 ITAE 准则优化方法的优化模型^[58]

ITAE 准则可以表示为

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$$

式中： $e(t)$ 是指单位阶跃响应的误差，如果输出信号为 $y(t)$ 则

$$e(t) = \frac{y(\infty) - y(t)}{y(\infty)}$$

设 n 阶系统闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{\omega_n^n}{s^n + a_{n-1}\omega_n s^{n-1} + a_{n-2}\omega_n^2 s^{n-2} + \dots + a_1\omega_n^{n-1} s + \omega_n^n}$$

很显然，对于单位阶跃输入， $y(\infty) = 1$ ，稳态误差 $e(\infty) = 0$ 。

取 $\omega_n = 1 \text{ rad/s}$ ，可得标准优化模型

$$\Phi(s) = \frac{1}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + a_{n-2}s^{n-2} + \dots + a_1s + 1}$$

非标准模型和标准模型，只是前者较后者时间缩短了 ω_n 倍。所以，如果给定了非标准模型的性能指标，就可以确定 ω_n 值。两者频率特性的形态也相同，只是前者较后者频率值增大 ω_n ，根据上述关系，如果给定了非标准模型的性能指标，就可以确定 ω_n 值。

一般的系统数学模型不会等于按优化目标函数确定的非标准优化模型。因此，必须引入校正环节。

加入校正环节后，传递函数为：

$$\Phi(s) = \frac{K_v / b_{n-1}}{s^n + \frac{b_{n-2} + K_v a_{n-1}}{b_{n-1}} s^{n-1} + \dots + \frac{1 + K_v a_1}{b_{n-1}} s + \frac{K_v}{b_{n-1}}}$$

可以得出下列方程组

$$\left. \begin{aligned} a_k &= \frac{b_{k-1} + K_v a_k}{b_{n-1}} \quad k = 1, 2, \dots, n-1 (b_0 = 1) \\ a_0 &= \frac{K_v}{b_{n-1}} \end{aligned} \right\}$$

解上述关于 $K_v, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}$ 的方程组，设计变量全部确定。

表 5-1 表示了单位阶跃响应 ITAE 准则闭环传递函数的最优形式。

表 5-1 阶跃响应 ITAE 准则的最优形式

$\Phi(s) = \frac{a_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + a_{n-2}s^{n-2} + \dots + a_1s + a_0} \quad a_0 = \omega_n^n$
$s + \omega_n$
$s^2 + 1.4\omega_n s + \omega_n^2$
$s^3 + 1.75\omega_n s^2 + 2.15\omega_n^2 s + \omega_n^3$
$s^4 + 2.1\omega_n s^3 + 3.4\omega_n^2 s^2 + 2.7\omega_n^3 s + \omega_n^4$

5.3 用 ITAE 准则优化方法对高速开关阀参数进行优化

把参数代入高速开关阀的方框图，可知本论文中研究的高速开关阀的最高阶数为 3 阶。

5.3.1 求标准优化模型及动态指标

根据 ITAE 准则最优化方法中的阶跃响应 ITAE 准则最优形式（表 5-1）可知，对于 3 阶系统，非标准优化模型可以表示为

$$\Phi^*(S) = \frac{\omega_n^3}{s^3 + 1.75\omega_n s^2 + 2.15\omega_n^2 s + \omega_n^3} \tag{5-1}$$

式中： ω_n 待定。

令 $\omega_n = 1$ ，可得标准优化模型

$$\Phi^*(S) = \frac{1}{s^3 + 1.75s^2 + 2.15s + 1}$$

式中，所有的系数都已知了，可以应用数字仿真软件求出标准优化模型的动态指标。

可以从图 5-1 中得到 $\omega_b^0 = 0.769 \text{ rad/sec}$ ，伯德图如下：

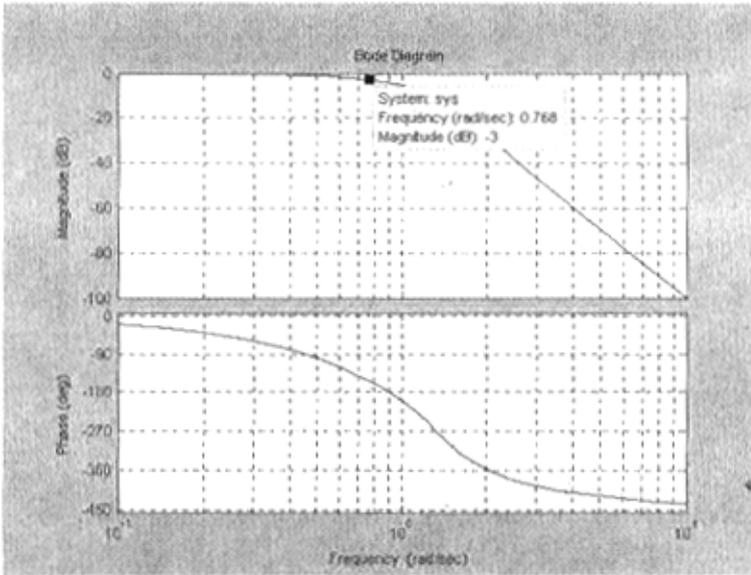


图 5-1 标准优化模型的伯德图

截止频率 $\omega_b = 40 \text{ Hz}$ ，根据公式 $\omega_n = \omega_b / \omega_b^0$ ，可以得到 $\omega_n = 40 \times 2\pi / 0.769 = 326.82 \text{ rad/sec}$ ，为了充分保证频宽，取 $\omega_n = 450 \text{ rad/sec}$ 。

5.3.2 设计校正环节

系统固有部分的传递函数为

$$G(s) = \frac{5.68 \times 10^7}{4.4783s^3 + 1.8831 \times 10^4 s^2 + 2.4425 \times 10^6 s + 1}$$

$$= \frac{1.27 \times 10^7}{s^3 + 4.204 \times 10^3 s^2 + 5.45 \times 10^5 s + 0.223}$$

对于 3 阶优化系统，可采用以下所示的反馈校正。由于 K_v 已知，共有 2 个设计变量，即： a_1, a_2 。由下面方框图可得系统的闭环传递函数为：

$$G(S) = \frac{K_v}{s^3 + (4.204 \times 10^3 + a_2 K_v)s^2 + (5.45 \times 10^5 + a_1 K_v)s + (0.223 + K_v)} \quad (5-2)$$

比较 (5-1) 和 (5-2) 两式的系数，可得下列方程组

$$\begin{cases} 4.204 \times 10^3 + a_2 K_v = 1.75 \times \omega_n \\ 5.45 \times 10^5 + a_1 K_v = 2.15 \times \omega_n^2 \end{cases}$$

解方程组得： $a_2 = -2.69 \times 10^{-4}$ ， $a_1 = -8.63 \times 10^{-3}$ 。

经校正优化后的系统的伯德图如下：

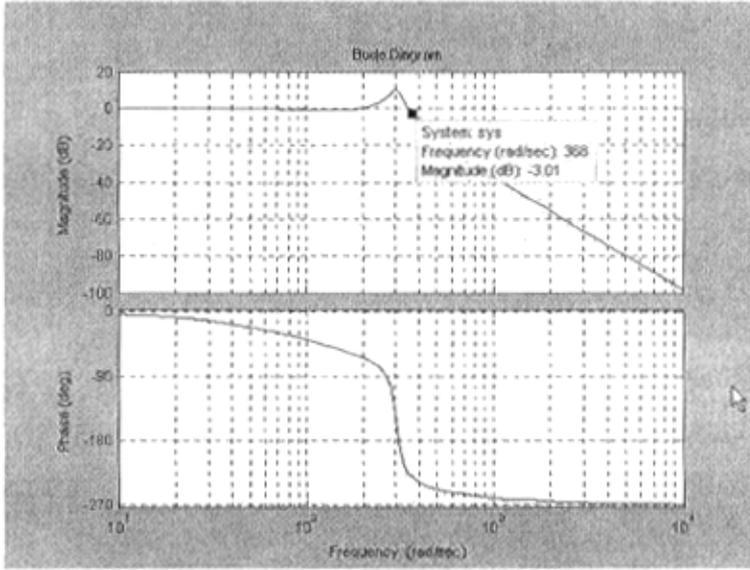


图 5-2 经校正优化后的系统的伯德图

由图 5-2 可知经过运用 ITAE 准则的优化方法，校正后的系统的频宽为 $f_{-3dB} = \omega_{-3dB} / 2\pi = 368 / 2\pi = 58.57 \text{ Hz}$ 。

5.3.3 设计优化后参数

当线圈匝数为 1500 匝，通过电流为 2.4 安，杠杆比为 2:1 时，初始气隙为 2mm，工作气隙为 1mm 时，高速开关阀的 bode 图和运用 ITAE 准则优化后的 bode 图相似，和上章仿真的结果一致。

5.4 本章小结

优化对于改善系统性能起着非常重要的作用，最优化方法主要解决参数优化的问题。文章中优化主要用到的是 ITAE 准则优化方法，它是大量专家们经验的总结。经过优化后，可以明显改善高速开关阀的性能。

第 6 章 高速开关阀的试验

6.1 高速开关阀的试验方案

高速开关阀的试验方案：如图 6-1 所示，图中由低频信号发生器发出脉冲信号（方波信号），经过前置级信号放大和功率放大后，控制高速开关阀的动作，油马达和测速电机相连，带动测速电机一起转动，高速开关阀产生的信号和测速电机产生的信号一起传输到动态分析仪中，经过动态分析仪对信号的分析、处理，最后在计算机中显示高速开关阀的各种性能曲线。具体的高速开关阀现场连接见图 6-5 所示。

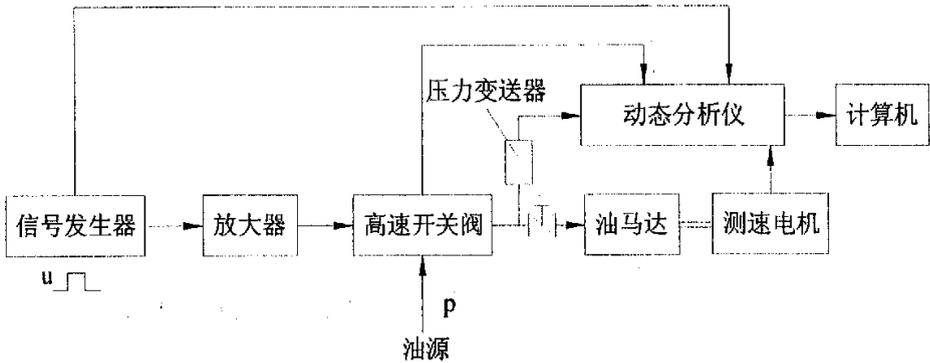
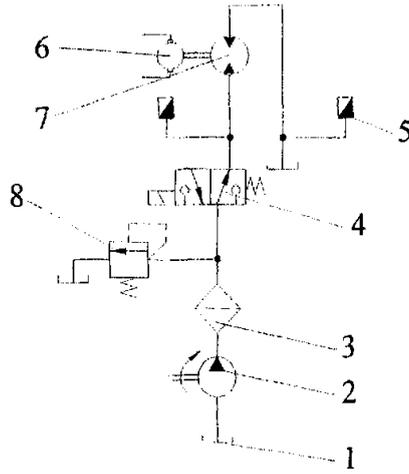


图6-1 高速开关阀试验方案

6.2 高速开关阀试验液压原理

如图6-2所示，高速开关阀试验液压原理：图中二位三通高速开关阀4是常开的，当高速开关阀4的高频电磁铁失电时，从液压泵2出来的液压油经过过滤器3，通过高速开关阀，驱动油马达7转动，油马达带动测速电机6同步转动。由于油马达的额定排量一定，为 15ml/r ，测速电机标定为转速3000转时的电压为 50V 。通过测量测速电机的电压就可以测得通过油马达的流量。当高速开关阀4的高频电磁铁得电时， $P \rightarrow A$ 关闭； $A \rightarrow T$ 开启从液压泵2出来的液压油经过过滤器3，通过高速开关阀，直接回油箱，油马达7停止转动。具体的液压系统现场图片见图6-3。



1—油箱；2—液压泵；3—过滤器；4—二位三通高速开关阀；
5—压力应变器；6—测速电机；7—油马达；8—溢流阀

图6-2 高速开关阀试验液压原理图

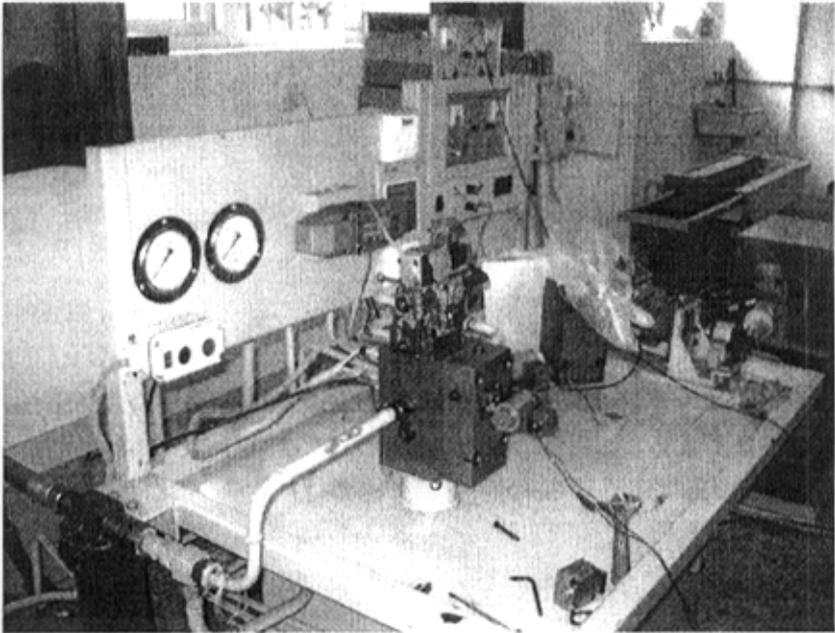


图6-3 液压系统的现场图片

6.3 高速开关阀试验电路

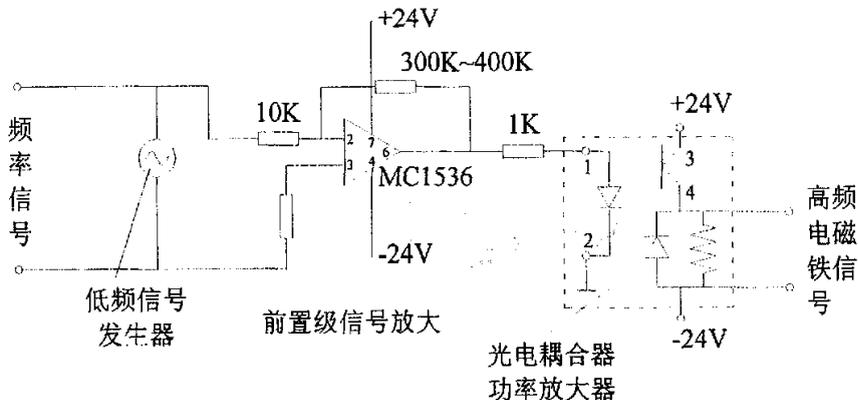


图 6-4 高速开关阀试验电路图

如图6-4高速开关阀试验电路如图所示：低频信号发生器产生的频率信号、高速开关阀中高频电磁铁产生的频率信号、测速电机产生的电压信号和压力应变器产生的压力信号一起传输到动态分析仪中，由计算机处理后产生相应曲线。具体的高速开关阀现场电路见图6-5。

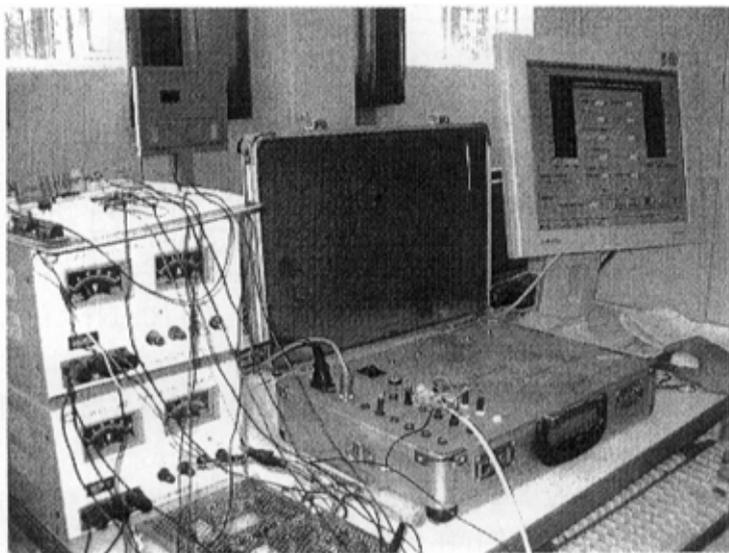


图6-5 高速开关阀现场电路

6.4 高速开关阀试验主要内容

6.4.1 高速开关阀试验分组

为了更好地分析和研究高速开关阀中高频电磁铁产生的电磁力、杆杠比以及信号发生器产生的频率信号对高速开关阀开关频率和性能的影响。分别对以下三组高速开关阀进行试验。

第一组：采用市场上较为普遍的高速开关阀进行试验，它的具体参数如表 6-1 和表 6-2 所示。

高频电磁铁的技术参数为：

表 6-1 高频电磁铁的技术参数

额定电压	24V
额定吸力	30N
额定行程	3mm
全行程	6.5mm
通电持续率	100%
线圈耐温等级	B
衔铁重量	0.055 Kg

球阀的技术参数为：

表 6-2 球阀的技术参数

名称	通径	工作位数	通油路数	额定工作压力	电源电压
球阀	NG6	二位	三通	31.5MP _a	直流 24V

这组高速开关阀的电磁吸力较小，大小为 30N，作用在杠杆上的高频电磁铁的推杆和球阀的顶杆之间的间距为 28mm，杆杠比为 4.6: 1。

第二组：取消杆杠机构，采用连接板，让高频电磁铁直接推动球阀动作。高频电磁铁和球阀的技术参数见表 6-1 和表 6-2。

第三组：在第一组的基础上，我们将高频电磁铁的输出力改变为 55N，具体参数见表 6-3 所示。作用在杠杆上的高频电磁铁的推杆和球阀的顶杆之间的

间距为 45mm，改变杠杆比为 2: 1，球阀的具体参数不变，如表 6-2 所示。

表 6-3 高频电磁铁的具体参数

额定电压	24V
额定吸力	55N
额定行程	4mm
全行程	≥ 8.5mm
通电持续率	100%
线圈耐温等级	B
衔铁重量	0.260 Kg

6.4.2 高速开关阀的试验标准

对高速开关阀的试验，目前国内外尚无标准，因为高速开关阀的性能不仅与它本身有关，而且与放大器，微机的软、硬件及传感器，动态分析仪.....等有关。我们在试验中主要进行静态特性试验：即静态流量特性试验。

6.4.3 高速开关阀的静态试验

静态性能包括空载流量特性，即输出的平均流量与输入信号的脉宽占空比的关系曲线，它基本反映了阀对系统的控制能力。

静态特性（主要特性）——空载流量——输入脉冲之间的关系。对高速开关阀而言，测量它的输入脉冲数(N)与输出流量之间的关系。由此可知其线性度、滞回、死区、饱和等性能指标，以便使用时掌握其特点，也是评定阀性能的重要指标。

由频率 ⇔ 流量（电压）的关系转换为

频率 ⇔ 流量（脉宽×脉高h）

⇒ 流量与 $f(t_p/T)$ 关系

步骤如下：

1. 已知油马达排量 $V_m = 15cm^3 / r$ 。

测速电机标定为每分钟转速 3000 转时的电压为 50V。

可算得电压为 1V 时，测速电机的转速为 $60r / min = 1r / s$ ，即转换系数

$$\beta = 1r/sV。$$

$$\text{所以 } q = V_m \beta V = 15Vcm^3/s。$$

2. 在不同频率下，测得输出电压 V 值。

$$\text{则 } q = 15Vcm^3/s。$$

$$\text{体积 } \Delta = q \times t_p = 15Vt_p$$

3. 在不同频率下，转换成幅值高 h 与 t_p 之间的关系。

$$\text{即 } h = \frac{\Delta}{t_p}$$

4. 在此基础上，选择一定周期 T ，算得 $q = f(t_p/T)$

第一组工作压差为 $7MPa$ 时高速开关阀空载流量特性：即 $q(V) = f(t_p/T)$ 的参数如表6-4所示。

表6-4 第一组工作压差 $7MPa$ 时阀空载流量特性参数

频率 (Hz)	脉宽 (ms)	输出电压 (V)	输出流量 (cm^3/s)	输出体积 (cm^3)
4	125	4.23	63.45	7.93
6	83.3	3.37	50.55	4.186
8	62.5	2.35	35.18	2.20
10	50	1.49	22.28	1.11
12	41.7	0.97	14.55	0.61
14	35.7	0.62	9.30	0.33
16	31.3	0.31	4.58	0.14
18	27.8	0.09	1.35	0.04

根据表6-4第一组工作压差为 $7MPa$ 时阀空载流量特性的参数，我们可以画出第一组工作压差为 $7MPa$ 时阀空载流量特性曲线，如图6-6所示。

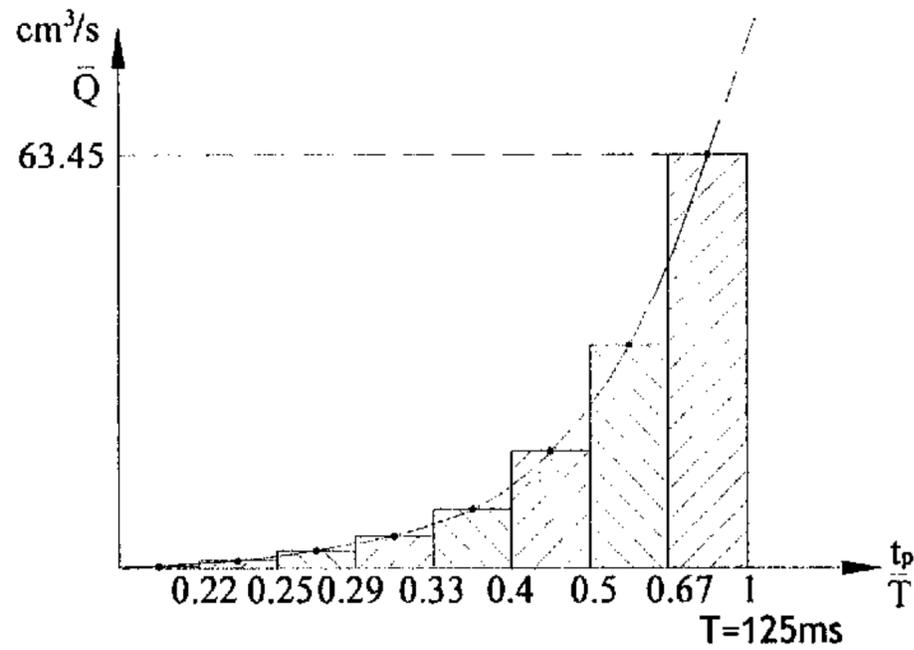


图6-6 第一组阀工作压差在7MPa时空载流量特性曲线

第一组工作压差为10MPa时高速开关阀空载流量特性：即 $q(V) = f(t_p/T)$ 的参数如表6-5所示。

表6-5 第一组工作压差10MPa时阀空载流量特性参数

频率 (Hz)	脉宽 (ms)	输出电压 (V)	输出流量 (cm ³ /s)	输出体积 (cm ³)
4	125	4.63	69.45	8.68
6	83.3	3.57	53.48	4.46
8	62.5	2.64	39.53	2.47
10	50	1.56	23.4	1.17
12	41.7	0.99	14.78	0.62
14	35.7	0.52	7.73	0.28
16	31.3	0.29	4.35	0.14
18	27.8	0.07	1.05	0.03

根据表6-5第一组工作压差为10MPa时阀空载流量特性的参数，我们可以画出第一组工作压差为10MPa时阀空载流量特性曲线，如图6-7所示。

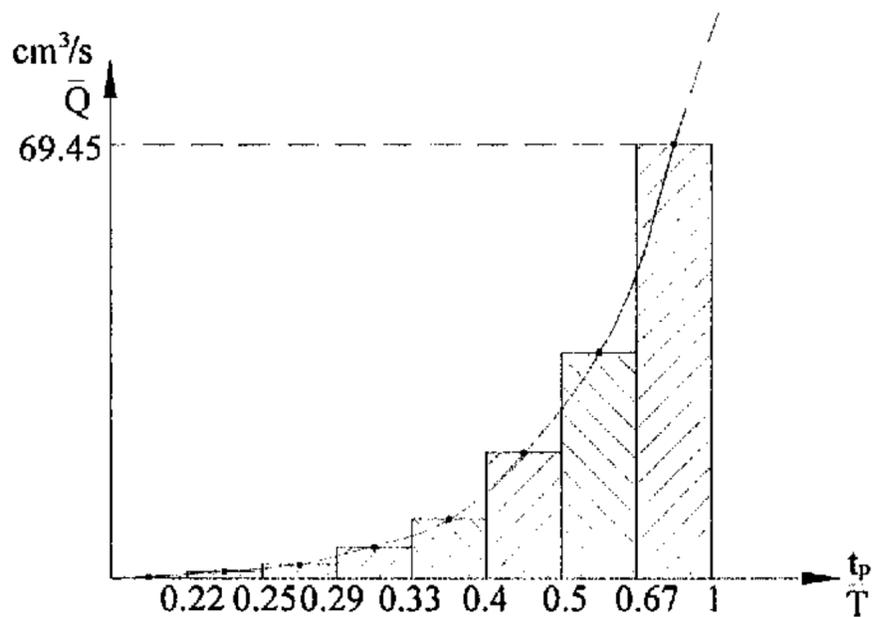


图6-7 第一组阀工作压差在10MPa时空载流量特性曲线

由于第二组阀在试验的过程中，当频率为12Hz 情况下，测速电机输出的电压信号几乎为零，通过高速开关阀的流量为零。因此，我们可以推断：用高频电磁铁直接推动球阀，其性能较差。这与仿真时杠杆比为1时，性能较差一致。

与第一组高速开关阀一致，第三组阀的空载流量特性曲线分别如图 6-8 和图 6-9 所示。

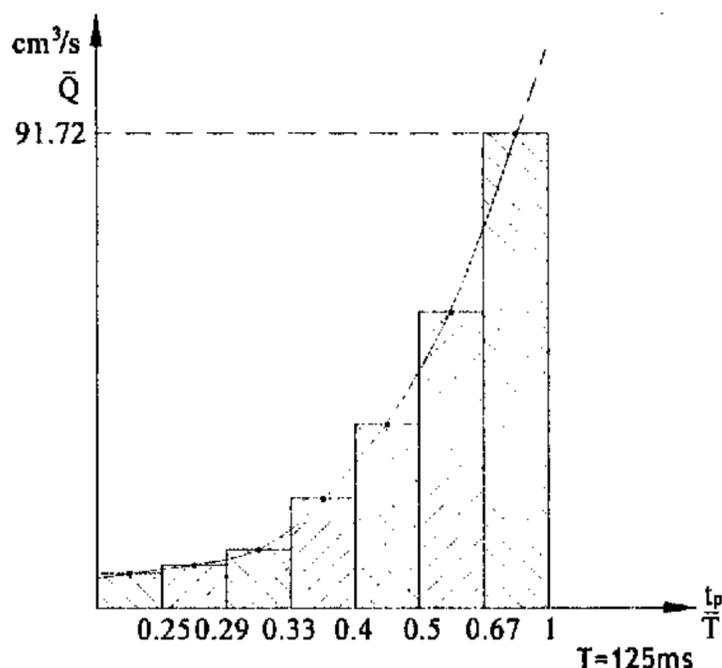


图6-8 第三组阀工作压差在7MPa时空载流量特性曲线

从上述图中，我们可以发现仿真和试验中，参数一致的情况下，通过高速开关阀的流量相似。

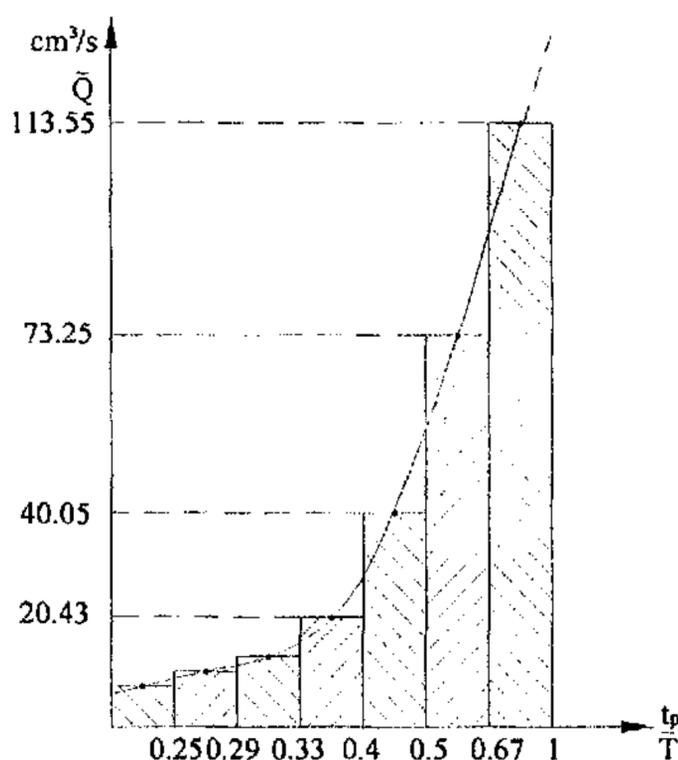


图6-9 第三组阀工作压差在10MPa时空载流量特性曲线

脉宽取点数越多，则台阶越小，当点数 $n \rightarrow \infty$ 时，就变成一条准连续曲线，如空载流量特性曲线所示。

6.5 高速开关阀试验结论

对上述试验进行分析，我们可以得知这三组阀在试验过程中，第三组阀的各项性能均最好：

1. 根据图6-8、图6-9可知，第三组流量特性 $\bar{q} = f(\frac{t_p}{T})$ 曲线陡且直。
2. 根据图 6-9 可知，在 $p = 10MPa$ 下，流量近似为 $8L/min$ 。
3. 频率范围在 25Hz 左右。
4. 线形度、重复度均较好。

由此可见，试验和仿真的结果一致。

第7章 新型高速开关阀的研制

7.1 新型高速开关阀的设计原则

高速开关阀的设计原则：因为高速开关阀有其特殊的方面，只用普通的开关阀控制结构，是不能满足其要求的。而要提高它的开关特性，应从高速开关阀的几个延时特性方面着手，设计时必须从以下几方面考虑：

1. 电磁磁路动态反应尽可能快, 减小其电流延时;
2. 高速开关阀开启和关闭时的力尽可能最大, 减小其运动延时;
3. 运动质量降低, 减小其惯性延时;
4. 系统成本最低。

根据上述的仿真、优化和试验，我们可以知道采用合适的杠杆机构有助于高速开关阀性能的提高，减小其运动延时。因此，在新型高速开关阀的研制过程中仍然采用杠杆机构，杠杆比为 2: 1。很明显，要研制新型高速开关阀，其运动部件的惯性应该比较低，所以采用滑阀结构不理想。靠电磁场直接驱动球阀的缺点是磁通密度很弱，因此产生的推力也很小，为此在新型高速开关阀的结构中采用随意浮动盘作为衔铁可以很好地克服上述缺点，提高电磁铁的吸力。

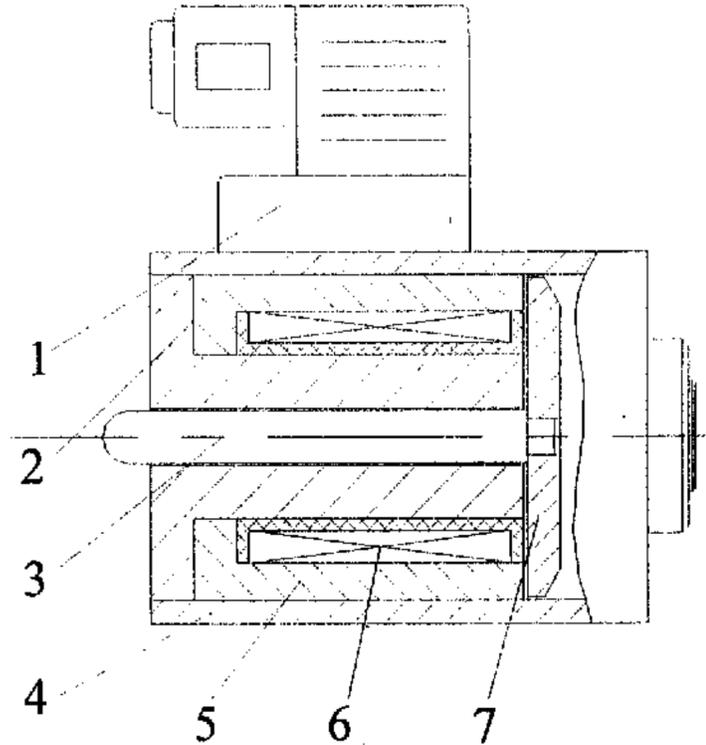
高速开关阀的开关机理是通过电磁力和弹簧的复位力驱动阀芯移动以达到阀的开和关。通过分析高速开关阀的数学模型和仿真结果，可知影响电磁阀的开关速度有以下几个方面。

1. 阀芯的运动延时。这是由牛顿力学原理决定的。由于阀芯质量的存在，使阀芯移动必须克服很大的牛顿惯性力，产生运动延时。减小运动延时的方法是增大驱动力和减小阀芯质量。

2. 电路的电流延时。电磁感应定理决定线圈电流不能很快上升到最大值，从而使阀开启时电磁力不能较快提升，以致不能克服摩擦力和弹簧力开启阀芯。同样阀关闭时弹簧力不能马上克服还未下降的电磁力，造成电流延时。电流延时与线圈电阻、限流电阻、线圈匝数、线圈电压等都有关系。

3. 其他延时。由于磁滞现象形成的剩磁以及磁路中的涡流也是影响电磁阀开关速度的因素。

7.2 新型高速开关阀的结构



1—电磁铁插座；2—铁芯轴；3—铜顶杆；4—外罩；
5—铁芯套；6—线圈；7—衔铁

图 7-1 新型高频电磁铁结构

新型高速开关阀的结构如图 7-1 所示，由电磁铁插座、铁芯轴、铜顶杆、外罩、铁芯套、线圈和衔铁等组成；图中的衔铁是由磁性材料构成的，故当线圈被激励时，同缠绕线圈的磁性材料一起构成强磁通线，新型高频电磁铁磁力线分布示意图如图 7-2 所示。衔铁受到电磁力和球阀中弹簧力的相互作用，磁力线随着衔铁的移动呈非线性变化。

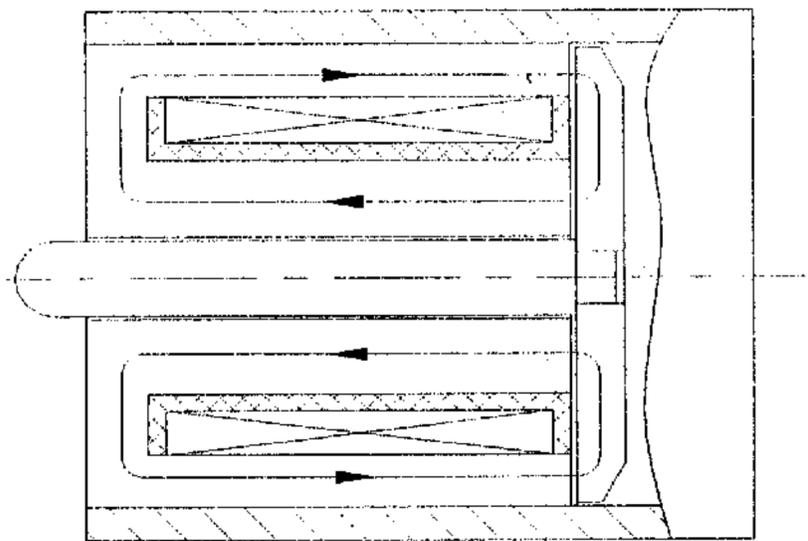


图 7-2 新型高频电磁铁磁力线分布示意图

7.3 新型高频电磁铁的设计

在设计高频电磁铁过程中，我们拟定采用直流螺管式电磁铁驱动，这种驱动方式具有较大的位移特性。由于铁磁材料的磁化曲线的非线性，以及漏磁等因素，使磁路的计算变的非常复杂。因此，在设计过程中我们借助了一些经验数据和图表。

高速开关阀中的高频电磁铁的动作时间在很大程度上决定了整个阀的动作时间。

7.3.1 新型高频电磁铁的结构

如图7-3所示，电磁铁尺寸的选择，要使每一整条磁路都达到近似均匀的磁通密度。

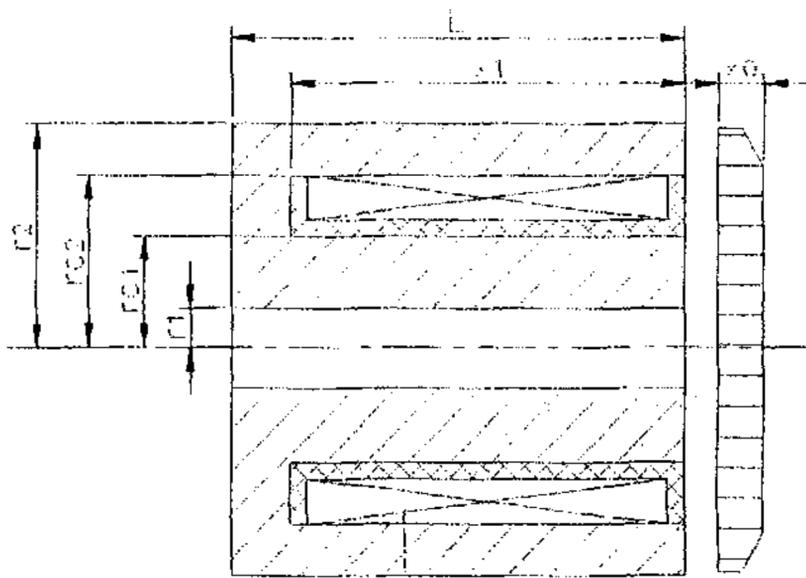


图7-3 新型高频电磁铁结构简化图（线圈与衔铁的几何尺寸）

于是近似地有：

$$RC1^2 - R1^2 = R2^2 - RC2^2 = 2RC1 \times X0 = 2RC1 \times (L1 - X1) \quad (7-1)$$

取

$X0 = 6.5; L = 48.5; X1 = 42; RC1 = 14; RC2 = 20; R2 = 24; R1 = 4$ 时，公式7-1近似成立。

设计时，初步确定线圈导线直径为0.35毫米，安匝数为1500匝，通过电流为2.4安。衔铁的工作气隙为1毫米。

高频电磁铁的初步设计主要涉及四个基本方程。即电磁吸力方程，磁势方程，电压方程和发热方程。

7.3.1.1 高频电磁铁的吸力方程

要使电磁铁能够工作，应保证它在任何位置上都有足够的电磁吸力，迫使衔铁做机械运动，完成预定的任务。

在电磁铁打开时，气隙处的磁通与铁芯处的磁通并不相等，且气隙磁通分布很不均匀。为了计算方便，采用等效气隙磁导法较为简便。

根据轴向电磁吸力公式 (3-1)

$$F = \frac{(iN)^2}{2R_g l} = \frac{(iN)^2}{\frac{2(l_0 - x)^2}{\mu_0 A}}$$

将数值代入公式，其中 μ_0 是空气导磁率，其值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$ ， l_0 是气隙初始长度，其值为 2 mm 。

$$F = \frac{(2.4 \times 1500)^2}{\frac{2 \times (2 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-3})^2}{4\pi \times 10^{-7} \times (10^{-3} \times 12 \times 10^{-3})}} = 90.88 \text{ N}$$

新型高频电磁铁产生的轴向吸力为 90.88 N ，几乎是差不多大小的原高频电磁铁产生的轴向吸力的两倍，能很好的提高其性能。在初步设计中，我们采用仿真和优化生成的最佳杆杠比是 $2:1$ ；这样，推动球阀的力大小为 $90.88 \times 2 = 181.76 \text{ N}$ 。

7.3.1.2 高频电磁铁的初始磁感应强度

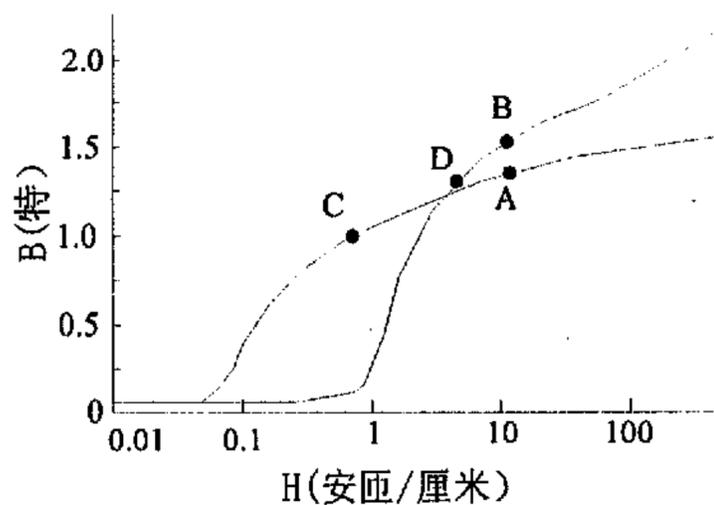


图7-4 磁性材料的磁化曲线

高频电磁铁线圈加上额定电压后,由于系统中存在着电磁惯性(来源于电感电路的过渡过程)和机械惯性(来源于衔铁、阀芯等运动件的质量及摩擦力、弹簧力、液流阻力等)使衔铁及阀芯的运动有一滞后时间 t_{on} 。同样,断电时衔铁回位运动也有一滞后时间 t_{off} 。为了减小衔铁运动时间,一般选择较高的初始磁感应强度值。

在普通电磁铁的设计中为了提高磁系统的效率,初始磁感应强度通常选在磁化曲线图7-4中的C、D点附近。但是对于高速开关阀用的高频电磁铁,初始磁感应强度小则意味着衔铁和阀芯运动时间较长。为了减小衔铁和阀芯的运动时间,初始磁感应强度应选在磁化曲线的饱和段。但是考虑到功率损耗、发热等因素,初始磁感应强度也不宜选在深饱和状态。根据设计实践,对于高频电磁铁材料电工纯铁DT4C和铁镍合金1J50,初始磁感应强度值分别选在图7-4的A点和B点最为理想或称“最佳点”。此时初始磁感应强度值较高而磁场强度 H 值也不过大。

7.3.2 新型高频电磁铁的材料

新型高频电磁铁采用直流螺管电磁铁,因直流无磁滞损耗(但仍有涡流),铁芯本身损耗小,故可用电工纯铁棒(用这种材料加工也容易)。

7.4 新型高速开关阀锥阀的设计

高速开关阀一般采用球阀式和锥阀式结构。球阀式结构简单,密封可靠,工艺性好,行程短,动作灵敏,因而动态特性也较好,是一种普遍使用的阀芯结构。但是,球阀式结构由于作用在钢球上的液压力不平衡,受液动力影响,只能做成小口径阀。锥阀式结构通过高低压平衡设计,可以消除液动力的影响,克服球阀式结构液压力不平衡问题,是高速开关阀的一种较理想的阀芯结构形式。因此,新型高速开关阀采用锥阀。

7.5 新型高速开关阀的控制方式

新型高速开关阀的控制方式采用PWM控制方式,在PWM控制方式中,周期 T 是恒定不变的,通过改变导通脉宽 T_p 来改变占空比。只要 T 足够小,PWM控制的精度可以很高。该方法的优点是PWM信号产生方便,无论用计算机通

过编程产生 PWM 信号，或是硬件来产生都是比较简单。

7.6 本章小结

通过前面章节对高速开关阀研究和分析，本章中提出新型高速开关阀，在高频电磁铁中采用盘式结构，利用杠杠机构，推动锥阀工作。新型高速开关阀的性能有很大的提高。

第 8 章 工作总结与展望

8.1 工作总结

随着社会的不断进步，电液控制技术的发展在不断前进，本课题正是在适应电液控制技术发展的情况下，并结合所研究的高速开关阀实际出发，提出将盘式高频电磁铁、杠杆机构与锥阀结合起来，研制出“新型高速开关阀”，使得该阀的各项性能都有很大提高，同时还保证了该阀具有了相当的先进性。

作者的主要工作体现在以下几点：

1. 为了更好地研究高速开关阀，先对高速开关阀的结构进行了详细的分析，结合高速开关阀的电气特性和机械特性，建立了高速开关阀的数学模型，并用传递函数方框图表示。

2. 利用建立的数学模型，结合仿真软件 MATLAB，建立了高速开关阀的仿真模型，通过对仿真模型的研究，分别分析了高速开关阀的静、动态性能，以及在改变高速开关阀的参数下，分析其性能上的变化。

3. 在对高速开关阀参数仿真分析后，结合 ITAE 准则优化方法，对其进行优化，得到优化后的曲线，并分析出高速开关阀的最优参数。

4. 在数字仿真和优化的基础上，对高速开关阀进行试验，以验证仿真的结果，为研制新型高速开关阀提供基础。

5. 通过试验，研制出新型高速开关阀。

8.2 全文展望

在过去的近一年的时间里，我和老师们密切的合作，在高速开关阀方面进行了比较深的研究，对电液控制系统也有了深刻的体会。但由于我是初次接触这样的课题，所以在对高速开关阀的分析和仿真过程中，也有不完善和值得探讨的地方。在论文的最后，我小结了几点，作为课题今后工作和努力的方向：

1. 完善高速开关阀的数学模型，尽可能的使建立的模型接近实际的物体。由于我初次做这方面的工作，某些方面总有些不足之处。

2. 进一步学习掌握 Simulink 的功能，加深对高速开关阀的数字仿真。

3. 进一步学习掌握优化方法，加强对高速开关阀的参数优化。

4. 在后面的试验研究过程中, 采用的编制程序的方法来产生 PWM 信号, 进一步改进试验方法。

5. 进一步完善新研制的高速开关阀, 提高其各种性能。

6. 进一步探索传统的液压技术与计算机控制技术的结合, 并将之更好地应用到实际生产中去, 进一步地促进机电液一体化技术的发展。

致 谢

首先，我要深深地感谢导师明仁雄教授，本文是在明老师精心指导下完成的。在两年多研究生学习期间，明老师从各方面都给予我极大的关怀和悉心的教导。明老师严谨求实的治学态度、渊博的专业知识将使我受益终生。我在学习期间取得的每一点进步都与明老师的关怀密不可分，令我终生难忘。在此论文完成之际，谨向明老师致以深深的敬意和衷心的感谢！

作者要衷心地感谢万会雄老师、徐兴斋老师、刘永健老师，本论文的选题得到了万老师、徐老师、刘老师热心指导，万老师、徐老师、刘老师精深的学术造诣和治学严谨态度都使作者永难忘怀！

同时，作者要感谢师弟邹哲维，谢谢他长期以来对我学习和生活上的支持和帮助！

最后，作者要深深感谢父母多年来对我的养育之恩。我要深深地感谢妻子胡俐娟的理解、支持和无私的奉献。没有她的无私奉献，就不可能有作者今天的所取得的成绩。

谨以此文献给所有关心、帮助和支持过我的人们！

感谢在百忙之中评阅本论文的专家、学者和各位人士！

参考文献

- [1] 雷天觉, 杨尔庄, 李寿刚.新编液压工程手册.北京理工大学出版社, 2001
- [2] 明仁雄, 万会雄.液压与气压传动.机械工业出版社, 2003
- [3] 林建亚, 何存兴.液压元件.华中理工大学出版社, 1997
- [4] 张桂香, 王辉.计算机控制系统.电子科技大学出版社, 2002
- [5] 李壮云, 葛宜远.液压元件与系统.机械工业出版社, 1999.5
- [6] 黎启柏.电液比例控制与数字控制系统.机械工业出版社, 1997.6
- [7] 王春行.液压控制系统.机械工业出版社, 2000
- [8] 田中裕久.液压与气动的数字控制及应用.重庆大学出版社, 1992
- [9] 宋俊, 殷庆文.液压系统优化.机械工业出版社, 1996.12
- [10] 李福义.液压技术与液压伺服系统.哈尔滨工程大学出版社, 1992.12
- [11] 卢长耿, 李金良.液压控制系统的分析与设计.煤炭工业出版社, 1991.2
- [12] 刘胜, 彭侠夫, 叶瑰昀.现代伺服系统设计.哈尔滨工程大学出版社, 2001.8
- [13] 宋俊, 王淑莲.液压元件优化.机械工业出版社.1999.9
- [14] 吴振顺.液压系统仿真与 CAD.哈尔滨工业大学出版社.2000.11
- [15] 章宏甲, 黄谊.液压传动.机械工业出版社, 1992.12
- [16] 李寿刚.液压传动.北京理工大学出版社, 1993.3
- [17] 何存兴, 张铁华.液压传动与气压传动.华中理工大学出版社, 1998.1
- [18] 李瀚荪.电路及磁路.中国广播电视大学出版社, 1998.10
- [19] 吴良宝, 倪善生.液压测试技术.上海交通大学出版社, 1995.6
- [20] 秦曾煌主编.电工学(上、下).高等教育出版社, 1998.5
- [21] 曾光奇, 胡均安主编.工程测试技术基础.华中科技大学出版社, 2000.11
- [22] 关景泰编著.机电液控制技术.同济大学出版社, 2003.2
- [23] 阮沈勇、王永利、桑群芳编.MATLAB 程序设计.电子工业出版社, 2004.1
- [24] 王占林.近代液压控制.机械工业出版社, 1997.8
- [25] 姚俊, 马松辉编著.Simulink 建模与仿真.西安电子科技大学出版社, 2002.8
- [26] 张晓华.控制系统数字仿真与 CAD.机械工业出版社, 1999.10
- [27] 申水文, 张建武, 葛安林, 罗邦杰.提高高速开关阀性能的仿真研究.机床与液压, 1998.5

- [28] 黄维纲, 王旭永, 王显正, 钟廷修. 高速电磁开关阀开关特性的机理研究. 上海交通大学学报, 1998.10
- [29] 杨继隆, 阮健, 俞浙青. 电磁高速开关阀的设计方案研究. 机床与液压, 2001.3
- [30] 杨树兴. 气动高速开关阀用电磁铁研究. 机床与液压, 1997.6
- [31] 张胜昌, 许仰曾, 钟廷修, 施光林. 基于新性能预测方法的超高速电磁开关阀的研究. 液压气动与密封, 2001.10
- [32] 金国庆. 新型压电式高速开关阀的研究. 硕士学位论文, 2003
- [33] 李玉贵, 杨晓明, 高学杰. PWM 高速开关阀静特性研究. 太原重型机械学院学报, 2002.3
- [34] 黄向东, 丁凡, 寿松乔, 路永祥. 直流螺管电磁铁的动特性研究. 机床与液压, 1997.5
- [35] 王小传, 连理枝. 电磁铁的结构、参数和常见的故障现象. 机电工程, 2003.3
- [36] 刘少军, 黄中华, 饶大可, 李庆春. 一个高速开关阀控液压系统的模糊控制研究. 机床与液压, 2003.1
- [37] 张小军, 凌宁, 朱国伟, 崔可润. 新型高速开关阀的设计与研究. 机床与液压, 2001.6
- [38] 刘少军, 夏毅敏等. 高速开关电磁阀的 PWM 控制及改进技术. 机床与液压, 1998.4
- [39] 杨襄璧, 李光, 刘忠. 高速开关阀的电液控制系统的研究. 凿岩机械气动工具, 2001.2
- [40] 杜巧连, 陈旭辉, 吴文山等. PWM 高速开关阀的特性分析与应用研究. 液压气动与密封, 2002.6
- [41] 莫波, 陈汉超, 杜民. 一种高速开关阀的工作原理及测试系统设计. 液压与气动, 2003.6
- [42] 刘顺安, 王同建等. 新型数字高速开关阀为导阀的电液比例多路换向阀. 工程机械, 2000.11
- [43] 程珩. 液压阀的试验建模方法. 振动、测试与诊断, 2000.9
- [44] 刘忠, 杨襄璧, 赵宏强, 张新. 基于高速开关阀的液压控制系统及其控制方式的应用研究. 凿岩机械气动工具, 1998.4
- [45] 陆豪, 曾思等. 基于 PWM 的高速开关阀式电液伺服系统的非线性时域仿真研究. 机床与液压, 2002.3
- [46] 贾鹏光, 吕伟华. 日本数字调速阀静动态性能的研究. 重庆大学学报, 1994.3
- [47] 陈冬生, 曾孟雄. 数字式电液控制的特点及发展趋势. 液压与气动, 1997.4
- [48] 朱建公, 刘传慧. 提高数字阀电液控制系统精度的方法探讨. 西南工学院学报, 1999.3
- [49] 阮健, 李胜, 杨继隆. 液压及气动阀直接数字控制的新途径. 中国机械工程, 2000.3
- [50] 石延平. PCM 与 PWM 电液数字阀测控试验台的设计. 淮海工学院学报, 2003.9
- [51] 张慧慧, 程胜. PWM 高速开关阀气动装置在精确位置控制中的应用. 北京工业大学学报, 1994.10

- [52] 谢庆涛, 高建臣, 吴平东. PWM 电液位置控制系统自调整模糊控制器的研究. 兵工自动化, 1997.2
- [53] 徐秀芬, 赵克定, 许宏光, 吴盛林. PWM 控制的气液联控伺服系统的实现与试验研究. 液压与气动, 2004.1
- [54] 万会雄, 明仁雄, 刘安平. 大型水轮机调速器逻辑式电液调节系统的研制. 武汉理工大学学报, 2002.2
- [55] 曾庆良等. 大流量安全阀的动态特性分析与计算机仿真. 煤矿机械, 1999.8
- [56] 朱春雨, 卢启龙等. 电控柴油喷射用高速强力电磁阀的数字仿真与试验验证. 车用发动机, 1997.5
- [57] 吕宏庆等. 电液控制技术的现状和发展趋势. 重庆工业高等专科学校学报, 1999.3
- [58] 宋俊, 王莉, 刘树敏. 电液伺服系统 ITAE 准则参数优化. 沈阳工业大学学报, 1996.10
- [59] 缪兴兵, 王存堂等. 新型数字同步阀建模及动态仿真. 机床与液压, 2003.3
- [60] 李自光, 杨国平, 颜荣庆. 新型平衡阀系统计算机仿真及参数优化研究. 中国公路学报, 1998.7
- [61] 陈锦耀, 李欣. 数字式调压阀的静动态特性分析. 工程机械, 2000.10
- [62] 潘权, 颜荣庆等. 新型液压平衡阀动态特性研究. 长沙交通学院学报, 2003.9
- [63] 李绍安, 程刚, 钱圆圆. 共轨喷油器高速电磁阀的开发. 车用发动机, 2003.10
- [64] 张利平, 魏泽鼎. 新型电液数字溢流阀的开发研究. 制造技术与机床, 2003.8
- [65] 阮健, 李胜, 杨继隆. 电液(气)直接数字控制的新方法. 浙江工业大学学报, 1999.9
- [66] Control of Wheel Slip Ratio Using Sliding Mode Controller with Pulse Width Modulation SEONGHO CHOI, and DONG-WOO CHO Vehicle system dynamics
- [67] Position Estimation in Solenoid Actuators Rahman, Muhammed Fazlur.; Cheung, Norbert Chow. IEEE transactions on industry applications
- [68] Noritsugu T. PWM mode electro pneumatic servo system for position control [J]. Trans Soc Instrum & Control Eng, 1984, 20(5):754~764.
- [69] Ruan J. and Burton R Direct Digital Control of a 2D Directional Valve Proceedings of Sixth Scandinavian Conference on Fluid Power, Tampere, Finland, Vol.2, 1999:pp.135~148
- [70] Chen Baojiang, Cao Fan. A study on the static characteristics of typical composite high-speed on-off valves. Journal of Beijing Institute and Technolgy, Jan 1994, 3(1):75~81
- [71] Takashi Kajima, Yoshihisa Kaawamura. Development of a high-speed solenoid valve: investigation of the energizing circuits. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Aug 1993, 40(4): 428~435

- [72] Yang Shuxing. On the describing functions of PWM pneumatic high-speed on-off valves. Journal of Beijing Institute and Technology, 1993, 2(2):170~176
- [73] Cui, P., Burton, R. And Ukraintz, P.R. Design and Assessment of a Digital On/Off Valve Proceeding of the 1992 International Fluid Power Exposition and Conferece(IFPE'92), Chicago, March, 1992
- [74] S.G.Lee and H.S.Cho On the DEVELOPMENT OF A PWM Control-Based Pneumatic Servo Mechanism inter Symposiumon Fluid Control and Measurement. Tokyo, 1985
- [75] Accurate position control of a pneumatic actuator using on/off solenoid valves van Varseveld, Robert B.; Bone, Gary M. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics
- [76] Carol Sturman, Eddie Sturman. Breakthrough in digital valves. Machine Design, 1994, 66(4): 37~42
- [77] Y.F.Xiong and S.LeQuoc.Adaptive control of A Synchronizing Servo-System. SAE921621
- [78] Muto.T.Digital Control of Hydraulic Actuator System Operated by Different Pulse Width Modulation.JSME.Int.J.Vol.33,No.4,1990,PP641~ 647。
- [79] 田中裕久著, 阳正锡等译.液压与气动的数字控制及应用.重庆大学出版社, 1992

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 林锐, 明仁雄, 邹哲维, 况群意.远传式数显阀位开度指示器.阀门, 2004.4
- [2] 林锐, 明仁雄, 胡俐娟, 方健家.“液压与气压传动”MCAI 网络课件的研究与开发.机床与液压, 2004.10

作者：[林锐](#)
学位授予单位：[武汉理工大学](#)

参考文献(80条)

- 参考文献
- 雷天觉, 杨尔庄, 李寿刚 新编液压工程手册 2001
- 明仁雄, 万会雄 液压与气压传动 2003
- 林建亚, 何存兴 液压元件 1997
- 张桂香, 王辉 计算机控制系统 2002
- 李壮云, 葛宜远 液压元件与系统 1999
- 黎启柏 电液比例控制与数字控制系统 1997
- 王春行 液压控制系统 2000
- 田中裕久, 阳正锡 液压与气动的数字控制及应用 1992
- 宋俊, 殷庆文 液压系统优化 1996
- 李福义 液压技术与液压伺服系统 1992
- 卢长耿, 李金良 液压控制系统的分析与设计 1991
- 刘胜, 彭伏夫, 叶瑰鸣 现代伺服系统设计 2001
- 宋俊, 王淑莲 液压元件优化 1999
- 吴振顺 液压系统仿真与CAD 2000
- 章宏甲, 黄道 液压传动 1992
- 李寿刚 液压传动 1993
- 何存兴, 张铁华 液压传动与气压传动 1998
- 李瀚荪 电路及磁路 1998
- 吴良宝, 倪善生 液压测试技术 1995
- 秦曾煌 电工学 1998
- 曾光奇, 胡均安 工程测试技术基础 2000
- 关景泰, 温济全 机电液控制技术 2003
- 阮沈勇, 王永利, 桑群芳 MATLAB程序设计 2004
- 王占林 近代液控控制 1997
- 姚俊, 马松辉 Simulink建模与仿真 2002
- 张晓华 控制系统数字仿真与CAD 1999
- 申水文, 张建武, 葛安林, 罗邦杰 提高高速开关阀性能的仿真研究 1998(05)
- 黄维纲, 王旭永, 王显正, 钟廷 高速电磁开关阀开关特性的机理研究 1998(10)
- 杨继隆, 阮健, 俞浙青 电磁高速开关阀的设计方案研究[期刊论文]-机床与液压 2001(3)
- 杨树兴 气动高速开关阀用电磁铁研究 1997(06)
- 张胜昌, 许仰曾, 钟廷修, 施光林 基于高性能预测方法的超高速电磁开关阀的研究[期刊论文]-液压气动与密封 2001(6)
- 金国庆 新型压电式高速开关阀的研究[学位论文]硕士 2003
- 李玉贵, 杨晓明, 高学杰 PWM高速开关阀静特性研究[期刊论文]-太原重型机械学院学报 2002(1)
- 黄向东, 丁凡, 寿松乔, 路永祥 直流感管电磁铁的动特性研究 1997(05)
- 王小传, 连理枝 电磁铁的结构、参数和常见的故障现象[期刊论文]-机电工程 2003(3)
- 刘少军, 黄中华, 饶大可, 李庆春 一个高速开关阀控压系统的模糊控制研究[期刊论文]-机床与液压 2003(1)
- 张小军, 凌宁, 朱国伟, 崔可润 新型高速开关阀的设计与研究[期刊论文]-机床与液压 2001(6)
- 刘少军, 夏毅敏, 郭淑娟, 朱梅森 高速开关电磁铁的PWM控制及改进技术[期刊论文]-机床与液压 1998(4)
- 杨襄璧, 李光, 刘忠 高速开关阀的电液控制系统的研究[期刊论文]-凿岩机械气动工具 2001(2)
- 杜巧连, 陈旭辉, 吴文山, 金向平, 倪兆荣 PWM高速开关阀的特性分析与应用研究[期刊论文]-液压气动与密封 2002(3)
- 莫波, 陈汉超, 杜民 一种高速开关阀的工作原理及测试系统设计[期刊论文]-液压与气动 2003(6)
- 刘顺安, 王同建, 牛铭奎 新型数字高速开关阀为导阀的电液比例多路换向阀[期刊论文]-工程机械 2000(11)
- 程珩 液压阀的实验建模方法[期刊论文]-振动、测试与诊断 2000(3)
- 刘忠, 杨襄璧, 赵宏强, 张新 基于高速开关阀的液压控制系统及其控制方式的应用研究[期刊论文]-凿岩机械气动工具 1998(4)
- 陆豪, 曾思, 朱成林, 黄玉平, 何友文 基于PWM的高速开关阀式电液伺服系统的非线性时域仿真研究[期刊论文]-机床与液压 2002(3)
- 贾鹏光, 吕伟华 日本数字调速阀动态性能的研究 1994(03)
- 陈冬生, 曾孟雄 数字式电液控制的特点及发展趋势[期刊论文]-液压与气动 1997(4)
- 朱建公, 刘传慧 提高数字阀电液控制系统精度的方法探讨 1999(03)
- 阮健, 李胜, 杨继隆 液压及气动阀直接数字控制的新途径[期刊论文]-中国机械工程 2000(3)
- 石延平 PCM与PWM电液数字阀测控实验台的设计[期刊论文]-淮海工学院学报(自然科学版) 2003(3)
- 张慧慧, 程胜 PWM高速开关阀气动装置在精确位置控制中的应用 1994(10)
- 谢庆涛, 高建臣, 吴平东 PWM电液位置控制系统自调整模糊控制器的研究 1997(02)
- 徐秀芬, 赵克定, 许宏光, 吴盛林 PWM控制的气液联控伺服系统的实现与试验研究[期刊论文]-液压与气动 2004(1)
- 万会雄, 明仁雄, 刘安平 大型水轮机调速器逻辑式电液调节系统的研制 2002(02)
- 曾庆良 大流量安全阀的动态特性分析与计算机仿真[期刊论文]-煤矿机械 1999(8)
- 朱春雨, 卢启龙, 欧阳明高 电控柴油喷射用高速强力电磁阀的数字仿真与试验验证[期刊论文]-车用发动机 1997(5)
- 吕宏庆 电液控制技术的发展和趋势 1999(03)
- 宋俊, 王莉, 刘树敏 电液伺服系统ITAE准则参数优化 1996(10)
- 缪兴兵, 王存堂, 张弼, 殷敏 新型数字同步阀建模及动态仿真[期刊论文]-机床与液压 2003(3)
- 李自光, 杨国平, 颜荣庆 新型平衡阀系统计算机仿真及参数优化研究[期刊论文]-中国公路学报 1998(3)
- 陈锦耀, 李欣 数字式调压阀的静动态特性分析[期刊论文]-工程机械 2000(10)
- 潘权, 颜荣庆, 李自光, 贺尚红 新型液平衡阀动态特性研究[期刊论文]-长沙交通学院学报 2003(3)
- 李绍安, 程刚, 钱圆圆 共轨喷油器高速电磁阀的开发[期刊论文]-车用发动机 2003(5)
- 张利平, 魏泽鼎 新型电液数字溢流阀的开发研究[期刊论文]-制造技术与机床 2003(8)
- 阮健, 李胜, 杨继隆 电液(气)直接数字控制的新方法[期刊论文]-浙江工业大学学报 1999(3)
- Control of Wheel Slip Ratio Using Sliding Mode Controller with Pulse Width Modulation SEONGHO CHOI, and DONG-WOO CHO Vehicle system dynamics
- Muhammed Fazlur Cheung, Norbert Chow Position Estimation in Solenoid Actuators Rahman
- Noritsugu T PWM mode electro pneumatic servo system for position control 1984(05)
- Ruan J, Burton R Direct Digital Control of a 2D Directional Valve 1999
- A Study on the Static Characteristics of Typical Composite High Speed On-Off Valves[期刊论文]-JOURNAL BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY 1994(1)
- Takashi Kajima, Yoshihisa Kaawamura Development of a high-speed solenoid valve: investigation of the energizing circuits 1993(04)
- On the Describing Functions of PWM Pneumatic High-Speed On-Off Valves[期刊论文]-JOURNAL BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY 1993(2)
- Cui P, Burton R, Ukraintz P R Design and Assessment of a Digital On/Off Valve 1992
- S G Lee, H S Cho On the DEVELOPMENT OF A PWM Control-Based Pneumatic Servo Mechanism inter Symposium Fluid Control and Measurement 1985
- Robert B. Bone Gary M Accurate position control of a pneumatic actuator using on/off solenoid valves van Varseveld
- Carol Sturman, Eddie Sturman Breakthrough in digital valves 1994(04)
- Y F Xiong, S LeQuoc Adaptive control of A Synchronizing Servo-System[SAE921621]
- Muto T Digital Control of Hydraulic Actuator System Operated by Different Pulse Width Modulation 1990(04)
- 田中裕久, 阳正锡 液压与气动的数字控制及应用 1992

相似文献(2条)

- 学位论文 何青玮 高速开关阀控制的可调阻尼减振器的研究 2002
该文基于高速开关阀技术建立了一个阻尼可调减振器并设计了相应的半主动隔振实验系统,在此基础上对减振器的阻尼调节特性以及悬架控制方法作了初步的研究与探讨。该文的主要工作成果如下: 1. 以流量特性试验为基础得出减振器内部的节流流量特性,详细分析减振器的运动过程并建立了更逼近真实减振器特性的非线性模型。2. 提出了以结构简单、价格低廉且抗污染性强的高速开关阀作为调节阻尼的控制阀,并在此基础上建立了可调阻尼减振器的数学模型。3. 在分析高速开关阀的开关特性的基础上,设计并制作了相应的功率驱动电路,能够满足实验系统以及高速开关阀开关频率的需要。4. 设计并建造了一套半主动悬架实验系统。5. 应用模糊控制理论,在天棚阻尼控制策略基础上针对半主动悬架模型建立了采用高速开关阀调节减振器阻尼的模糊控制器,通过数字仿真证实了这种控制方法的有效性。6. 通过实验验证了减振器的阻尼调节特性以及所设计的模糊控制算法是可行的。
- 学位论文 丁伟 钻机盘式刹车液压高速开关阀工作理论研究 2004
本文论述的钻机制动系统液压控制中采用高速开关阀对刹车钳缸进行压力控制,开关阀的通断动作由脉宽调制信号控制,PWM信号由80C51单片机定时器通过软件编程产生;高速开关阀的功率驱动电路采用双电压驱动,扩大了阀控制的线性范围。文中对刹车钳缸的工作特性和液压控制元件高速开关阀的静态特性进行了分析,应用Matlab/Simulink对它的动态特性进行了建模和仿真,分析了PWM信号占空比和钳缸压力输出的关系;研究了不同的调制频率对钳缸压力脉动输出的影响,建立了钳缸压力控制的闭环系统,仿真结果表明,通过不同的PWM控制字决定高速开关阀不同的占空比进而决定输出的流量和刹车钳缸的压力。

引证文献(2条)

1. [杨树军, 周中锐, 苏利杰](#) [车辆换挡用数字比例溢流阀试验研究](#)[期刊论文]-[液压与气动](#) 2009(2)
2. [杨玉涛, 张小栋](#) [高速电磁阀模型建立及响应特性研究](#)[期刊论文]-[测控技术](#) 2008(6)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y688240.aspx

下载时间: 2010年5月30日