

摘要

磁流变液是一类新型的智能材料。其基本特征是：在外加磁场的作用下，流变特性在毫秒级内发生急剧变化，由自由流动的液体转变为类似固体的物质，呈现出可控的屈服应力；当磁场消失后，又恢复为自由流动的液体。磁流变液的这一特性使它在汽车、机械、建筑、航空航天、医疗保健、地震防护等诸多领域有广阔的应用前景。目前，用磁流变液制成的应用装置有：减振器(或称阻尼器)、制动器、离合器、液压阀、抛光装置、密封装置、复合构件以及柔性夹具等。其中，磁流变液减振器是目前最广泛的一项应用。

如何使尽可能多的磁力线通过阻尼通道是磁流变液减振器设计的关键。在磁流变液减振器中，垂直于阻尼通道的磁场强度对磁流变效应作用较大，平行于阻尼通道的磁场强度对磁流变效应作用较小。利用这一原理，本文设计一种垂直磁场圆孔节流型磁流变液减振器，即磁场方向垂直于流体的流动方向、阻尼通道是小圆孔的磁流变液减振器。这种结构的优点在于磁场利用率高、导线的引出和密封容易、在不加磁场时又可以作为普通流体减振器使用。

按照机械设计的标准，用 AutoCAD 绘制减振器的装配图和零件图；加工组装后，在 INSTROR 8801 疲劳试验机上进行了试验。输入不同大小的振幅和频率，调节通过线圈的电流以改变阻尼通道内的磁场强度，得到一系列阻尼力—位移的试验曲线和具体数据。试验结果表明：在加磁场前后，磁流变液减振器的阻尼力发生了明显的变化。电流越大，即磁场强度越大，阻尼力就越大；但达到磁化饱和后，阻尼力就基本不再变化。试验结果还发现，随着输入频率的增大，磁流变效应减弱。磁流变液减振器的阻尼特性用宾汉(Bingham)模型来描述。通过修正模型中的参数，得出适合于本实验的数学模型，并应用 MATLAB 中的 Simulink 进行仿真，仿真结果与试验结果吻合较好。

关键词：磁流变液，减振器，垂直磁场，圆孔节流，阻尼力，宾汉模型，仿真

Abstract

Magneto-rheological fluid (MRF) is a kind of smart materials. The essential characteristic is the ability to reversibly change from free-flowing, linear viscous liquid to semi-solid having a controllable yield strength in milliseconds when exposed to a magnetic field. The characteristic makes it have a wide using range including mobile, mechanism, construction, aviation and spaceflight, medical treatment and health care, earthquake protection, etc. Now it has been used on damper, arrester, clutch, hydraulic valve, polishing device, seals, composite set and flexible clamp, etc. The MRF damper is one of the widest used.

It is the key that how to make more magnetic line of force flow through the throttle. As to the MRF damper, the vertical magnetic density is more effect to the Magneto-rheological. According to this theory, design a vertical magnetic field throttle damper. That is the magnetic density is vertical to the MRF flowing direction and the throttle is a small orifice. The advantage is that the magnetic density can be fully used, the leading and seal of the loop is easy and the damper can be used as the common hydraulic damper while there is no magnetic field.

According to the standard of the mechanical design, draw the assemble drawing and the part drawings by AutoCAD. After process and assemble, test it on the setup named INSTROR 8801. Input the different amplitudes and frequencies then regulate the current of the loop, namely regulate the magnetic density of the throttle. The result indicates: The force of the damper changed obviously after adding the magnetic field. The current is greater, namely the magnetic field greater, the force is greater. But when it reached a certain level, the force of the damper changed a little. The result also indicates: The Magneto-rheological effect weakened when the frequency added. The characteristic of MRF damper can be described by Bingham plastic model . Modified the parameters of the model, then find out the most suitable model to this test. Finally simulates the characteristic by MATLAB to test the result.

Keywords: Magneto-rheological fluid, damper, vertical magnetic field, throttle, damper force, Bingham model, simulate

中国民用航空学院学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国民用航空学院或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名： 齐强 日期： 2004.2.22

中国民用航空学院学位论文使用授权声明

中国民用航空学院、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权中国民用航空学院研究生部办理。

研究生签名： 齐强 导师签名： 祁世兴 日期： 04.2.22

前言

在智能材料不断发展的今天,磁流变液(Magneto-rheological fluid 简称 MRF)和电流变液(Electro-rheological fluid 简称 ERF)越来越受到人们的重视。虽然 ERF 在许多方面显示了其良好的应用前景,但是它需要 1~5KV 的高压,而且对杂质过于敏感,因此,安全性和密封性是影响其进一步发展的主要障碍[1]。但 MRF 的剪切应力比 ERF 大一个数量级,而且具有良好的动力学和温度稳定性,功率消耗低,适应范围广,因此,自 90 年代以来,不断涌现出新的 MRF 及其 MRF 装置。

美国 Lord 公司在 MRF 研究和应用方面处于世界领先地位,他们研制的 MRF-132AD、MRF-132LD、MRF-241ES、MRF-336AG 等磁流变液已经在很多装置上得到应用,例如减振器、制动器、离合器、液压阀、抛光装置、气动伺服控制装置、复合构件以及柔性夹具等[2]。这些装置都已经是非常成熟的商业化产品。另外,各西方主要发达国家也竞相研究应用这一技术领域。美国 Notre Dame 大学的 Spencer Jr. 教授及 Carlson 等人设计了一种固定阻尼孔磁流变液减振器,由 3V 的直流电压供给 0~1A 的电流用于产生磁场,可产生 3KN 的阻尼力[1, 3]。Spencer 提出了一种改进的 Bouc-Wen 模型,通过对它的分析,结果表明,这个减振器能很好的满足地震保护的要求。最近,Carlson 又提出了一种应用磁流变液的新方法,即将吸满磁流变液的海绵状材料置于磁极之间,这样也可以产生磁流变效应,省去了复杂的密封结构及工件的精密加工。这种磁流变液减振器正在洗衣机上得到应用[2, 4]。另外, Lord 公司的减振器还在汽车悬架系统、乘客保护系统、人造假肢等方面开始了商业化应用。美国福特汽车公司的 Ginder 等人对磁流变液屈服应力的有限元分析及性能的提高做了研究。美国通用汽车公司的 Foister 和 Gopalswamy 等人研制了磁流变液及磁流变液离合器。美国宾夕法尼亚州立大学的 Farban Gandhi 将磁流变减振器用于飞机水平旋翼叶片的振动控制,提高了其稳定性。美国加州州立大学的 Zhu 和 Liu 等人对磁流变液的流变学,特别是微观结构进行了较多的研究。白俄罗斯的 Kordonski 等人对磁流变液抛光及磁流变液密封的应用做了研究并取得了很大的进展。德国的 BASF AG 的 Kormann 等人已经研制出稳定的纳米级磁流变液。另外,英国的 Neil D. Sims, Roger Stanway (Department of Mechanical Engineering, University of Sheffield), 法国 Nice 大学的 Bossis 和 Cutillas, 韩国的 Kim Kiduck, Lee Jachyong 和 Jeon Doyong, 日本的 Sunakda K, 波兰的 Milechi. Andrzej 以及新加坡南洋理工大学的 W. H. Li 等人都对磁流变液及其应用做了大量的研究[1, 5]。

在我国,从 1996 年才开始有磁流变液的研究。最早的是中国科技大学的唐新鲁发表的《有关电流变液磁流变液机理若干问题的研究》。在磁流变液的研制方面,国内的

科研人员已取得了很大成绩。中国科技大学电流变液、磁流变液研究组采用广泛的物理和化学方法，成功的研制了 KDC-1 磁流变液。该材料有一定的沉降稳定性，较大剪切强度（500mT 时不低于 15Kpa）。金昀等人研制了磁流变液屈服应力测试系统，并进行了一系列的试验。复旦大学的潘胜等人研制了磁流变仪及测量仪器[6]。西北工业大学的余心宏、王立忠对磁流变液内部相互作用的机理及活性剂对磁流变液稳定性的作用机理等方面进行了研究[7]。电子科技大学的杨仕清、张万里，龚捷、谭锐等用球形羰基铁颗粒、硅油和油酸制备了磁流变液。并对其性能进行了实验研究[8]。中国科学院合肥智能研究所与中国科学院传感技术国家重点实验室的张正勇、张耀华、虞承瑞等对以金属颗粒为主体的磁流变液的一般特性进行了实验，发现磁流变液出现磁饱和现象不仅与材料特性有关，而且与配比比例有关；剪切应力不仅与材料的颗粒有关，而且与材料的制备工艺有关[9]。黑龙江化工学院的赵丽、布和巴特儿、田言对磁流变液的制备及国内外进展情况做了研究[10]。

在磁流变液减振器方面，上海交通大学的汪建晓，孟光等人分析了磁流变液减振器的四种非线性模型，即 Bingham（宾汉）模型，非线性双粘性模型，非线性滞回双粘性模型以及 Bouc-Wen 模型。将试验结果和理论值进行比较发现，Bingham 模型只适用于小阻尼情形，磁流变液减振器在低频时效果很好[11]。重庆大学的廖昌荣、余淼、杨建春等廉等人对汽车用磁流变液减振器做了很多研究。他们对影响磁流变液减振器性能的因素、设计准则、阻尼通道的设计、磁芯材料的选择、阻尼力的计算以及体积补偿等问题做了深入的研究。他们还按照长安微型汽车的技术要求设计了磁流变液减振器，并根据长安微型汽车前悬架减振器的技术条件进行了试验测试[12]。哈尔滨工业大学的欧进萍、关新春、杨颀等人对磁流变液减振器在基础隔震方面做了很多研究，提出了可调滞回模型的磁流变液减振器及其试验方法，进行理论分析、试验和算例分析，还建立了阻尼力的 Bouc-Wen 模型，并有多篇论文发表[13]。青岛海洋大学的管友海、李华军、黄维平等人基于现代最优控制理论，建立海洋平台磁流变液半主动控制系统的数学模型，对磁流变液减振器进行了参数设计，分析了它对海洋平台振动控制的有效性。仿真结果表明，采用磁流变液减振器对海洋平台进行半主动控制能够有效的减小平台的动态响应[14]。浙江大学的潘双夏、杨礼康、冯培恩从参数与非参数的角度分析比较了现有模型的特点，并就国内外工程应用现状说明磁流变液的广阔的应用前景，最后提出了对磁流变液进一步研究的策略。对我们今后的科研方向有很大的指导作用[1]。周丽、张志诚运用神经网络技术建立 MR 阻尼器的神经网络模型来模拟其逆向动特性，并设计与之相适应的动控制系统。建立起基于 MR 阻尼器的结构振动控制的有效性分析方法。通过数值仿真结果探讨所提出的结构控制策略的有效性[15]。南京航空航天大学的郭大蕾、胡

海岩等人对磁流变液减振器在车辆悬架半主动控制中的应用做了一定的研究[16]。华北工学院和西安交通大学的杨臻、邱阳、李强等人对磁流变液技术在自动武器上的应用前景作了一定的研究[17]。西安交通大学设计的减振器已有少量的商业应用。该产品当外加电流在 0-1A 之间时,其最大拉力为 0.8KN-2.0KN。该产品可替代现有各类油式阻尼器及相关减振器产品。西南交通大学设计的减振器可用于减振支座、司机座椅支座等场合。此外,国内研究磁流变液及其应用的单位还有同济大学、北方交通大学、北京航空航天大学、石家庄铁道学院、中国科学院长春光机所等[1, 5, 6]。

总之,国内在磁流变液及其应用方面虽有一定的进展,但与国外发达国家尚有很大差距。所研制的磁流变液及减振器还处于试验阶段,远未达到商业化应用的程度。研究范围主要集中在对汽车悬架振动半主动控制及基础隔震等方面。对磁流变液减振器的结构设计缺乏创新,基本上是沿用国外现有的产品。特别是在关键部位,即阻尼通道和磁路的设计上,还比较单一。所以,为了尽快赶超发达国家的研究水平,以期在这一领域占有一席之地,我国的科研人员还应该进行更加深入广泛的研究。

一般液压减振器的阻尼力的大小是不可以改变的,有的虽然可以通过改变节流通道的尺寸达到改变阻尼力的目的,但结构一旦确定,就无法改变,而且结构复杂,不能实现主动或者半主动控制。对于 MR 流体减振器,不需要改变节流通道的尺寸,只需改变通过节流通道内磁流变液的磁场强度,就可以改变阻尼力的大小;且调节方便,可实现半主动控制。这也正是磁流变液减振器的优势所在。

由于在磁场作用下,磁流变液中的可磁化微粒沿着磁场方向排列成链状结构或网状结构,其流变特性发生了变化,在垂直于磁场的方向上流动特性变化最大。因此,在设计磁流变液减振器时,应使阻尼通道内的磁流变液的流动方向垂直于磁场方向,以便充分利用磁流变效应来改变减振器的阻尼力。

根据目前的资料来看,阻尼通道一般有两种形式:即环形节流通道和小圆孔阻尼通道。节流通道是环形的居多,也有节流通道是小圆孔的形式。环形节流通道形式的磁流变液减振器在不加磁场时,其阻尼作用不明显,不能作为普通流体减振器使用。因此,设计一种新型结构的磁流变液减振器是有一定意义的。

磁流变液减振器的阻尼特性包括两个方面:一是磁流变液在阻尼通道内的流变特性;二是节流通道的大小对减振器性能的影响。因此,设计磁流变液减振器的关键是阻尼通道的形式和如何将磁场加到阻尼通道上。

本文设计了一种垂直磁场磁流变液减振器。并通过实验来研究其阻尼特性,然后从理论上加以分析,建立适合于它的数学模型,最后对其性能进行仿真。

第一章 磁流变液简介

1.1 概述

磁流变液(MRF)是当前智能材料研究的一个重要范畴。它最早是在1948年由美国国家标准局的Rabinow发明的,并应用于离合器[18]。巧合的是,几乎与Winslow提出电流变液(ERF)是同时的。但由于当时还难以解决磁流变液的悬浮性、腐蚀性等问题,而且人们没有认识到它的剪切应力的潜在性以及等问题,因此,发展一直缓慢。当时,人们的注意力大多集中在电流变液上。但是,由于电流变液的屈服应力较低,需要1~5KV的高压,其安全性和密封性是一大棘手的问题,因此,从上一世纪90年代,人们才重新认识到了磁流变液的巨大价值和广阔的发展前景[19]。

磁流变液的基本特征是:在外加磁场的作用下,其流变特性在毫秒级内发生变化,由自由流动的液体变为半固体,呈现出可控的屈服应力;而且这种转变是可逆的,当磁场消失后,又恢复为自由流动的液体。磁场对磁流变液的粘度、塑性和粘弹性等特征的影响称为磁流变效应。

1.2 磁流变液的组成

磁流变液一般是由三部分组成,即分散相、基液和稳定剂。分散相即磁性颗粒,一般是微米级或纳米级的固体颗粒。基液一般是非磁性能良好的油,如硅油、矿物油、合成油等。好的基液具有低的零场粘度,大的温度稳定性,不污染环境等特性[6]。由于固体颗粒的密度较大,而一般基液的密度较小,由密度差所引起的磁流变液的固体颗粒的沉降是困扰磁流变液应用的一个问题。为了防止磁流变液的分相,通常是加入不同的添加剂(如油酸),以改善分散相和基液之间的界面特性或用表面处理剂处理磁性颗粒。表面处理剂和固体颗粒主要产生化学键的连接,同时表面处理剂与基液又具有极好的亲和性,从而加强了分散相与基液的亲和,改善了磁流变液的沉降性和不稳定性[20]。

根据性能和组成不同,可以将磁流变液分成以下4种类型[5]。

(1) 微米磁性颗粒—非碱性基液型磁流变液

这是一种典型和常用的磁流变液,采用微米或纳米级软磁材料的磁性颗粒和低磁导率的基液。它具有较强的磁流变效应,屈服应力可达到50~100KPa。使用最多的磁性颗粒是羰基铁粉。磁流变液的颗粒体积分数一般是20~40%,有的高达50%。颗粒直径一般在0.01~50 μm 的范围内。

(2) 纳米磁性颗粒—非磁性基液型磁流变液

用30nm的铁氧化物分散溶于非磁性基液中制成的非胶体悬浮液,它具有几乎与胶

体磁性液体(Colloidal Magnetic Fluid 简称 CMF)几乎完全相同的组成,但在流变性上完全不同[15]。如表 1.1 所示。

表 1.1 MRF 与 CMF 的性质比较

MRF	CMF
Bingham 流体	纯胶体悬浮液
很大的屈服强度	很小或没有屈服强度
非胶体粒子	无沉淀
$0.1\mu m \sim 10\mu m$	$5nm \sim 10nm$
磁化能 $\gg kT$	$kT \gg$ 磁化能
与 ER 流体类似	强磁场时仍保持液体

(3) 非磁性颗粒—磁性基液型磁流变液

用微米级的非磁性颗粒(如 $40 \sim 50\mu m$ 的聚苯乙烯或硅石颗粒)分散溶于磁性基液(如铁磁流体)中制成的悬浮液,虽然铁磁流体作为基液仅具有微小的磁流变效应,但是微小的磁性颗粒形成的链状聚集可与较大的非磁性颗粒结合为类凝胶网状体系,从而使磁流变效应得以加强。

(4) 磁性颗粒—磁性基液型磁流变液

用微米级的磁性颗粒分散溶于磁性基液(如铁磁流体)中制成的悬浮液。磁性基液加强了磁性颗粒间的作用力,从而增强了磁流变效应。Cinder 用 $1 \sim 10\mu m$ 的磁性颗粒分散溶于铁磁流体中制成的磁流变液,当体积分数为 50% 时屈服应力超过 $200KPa$ 。

美国 Lord 公司曾公开了 6 种合金磁流变液的配方(铁、镍、铁—钴合金)和制备方法[21]。例如:

(1) 铁—钴合金磁流变液的制备

取按体积 48% 的 F_c 、50% 的 C_o 和 2% 的 V 所组成的铁—钴合金 112g,与 2.24g 硬脂酸分散剂以及 30g 的 $0.2Pa \cdot s$ 的硅油混合在一起,在这种磁流材料中,铁—钴合金粒子的体积比是 0.3,然后高速分散,使这种磁流变液材料均质,磁流变液材料储存在聚乙烯材料制成的容器中,以供使用。

(2) 铁—镍合金制成的磁流变液

取重量为 94.25g 的铁镍合金粉,其中铁的重量占 92%,镍占 8%,根据硬脂酸或硅油的重量变化,使粒子成分的重量占 25%,然后将基液和铁镍粒子的混合粉,通过高速分散使其磁流变液均质,这种磁流变液储存在聚乙烯材料制成的容器中以备使用。

(3) 铁—钴合金制成的第 2 种磁流变液

取107.63g 铁—钴合金，使铁的重量占48%，钴的重量占50%，根据硬脂酸、硅油或矿物油的重量变化，使其颗粒的重量占25%，通过高速分散过程，使磁流变材料均质，这种磁流变液储存在聚乙烯材料制成的容器中以备使用。

1.3 磁流变液的转变机理

图 1.1 是磁流变液的转变机理示意图[19]。颗粒被当作一些刚性微球，它们代表磁性颗粒，在外加磁场的情况下，可以表征磁流变效应。依照磁畴理论可以解释磁流变效应。在 MR 流体中，每一个小颗粒都可以当作一个小的磁体。在这种磁体中，相邻原子间存在着强交换耦合作用。它促使相邻原子的磁矩平行排列，形成自发磁化饱和区域即磁畴。没有外磁场作用时，每个磁畴中各个原子的磁矩排列取向一致，而不同磁畴磁矩的取向不同。磁畴的这种排列方式使每一颗粒子处于能量最小的稳定状态。因此，所有颗粒平均磁矩为零，颗粒不显磁性。在外磁场作用下，磁矩与外磁场同方向排列时的磁能低于磁矩与反方向排列时的磁能，结果是自发磁化磁矩成较大角度的磁畴体积逐渐减小。这时颗粒的平均磁矩不等于零，颗粒对外显示磁性，按序排列相接成链。当外磁场强度较弱时，链数量少、长度短、直径也较细，剪断它们所需的外力也较小。随外磁场的不断增大，取向与外磁场成较大角度的磁畴全部消失，留存的磁畴开始向外磁场方向旋转，磁流变液中链的数量增加，长度加长，直径变粗，磁流变液对外表现的剪切应力增强；再继续增加磁场，所有磁畴沿外磁场方向整齐排列，磁化达到饱和，磁流变液的剪切应力也达到饱和。

Shulman 等人根据悬浮液的浮动统计理论，从能量损耗的观点得出了一个稳定态模式。由此可以导出悬浮液粘度：

$$\eta = \eta_0 \left(1 + \frac{5}{2} \varphi + \frac{3}{2} \sin^2 \Psi_s \right) \quad (1.1)$$

$$\sin^2 \Psi_s = (1 + \beta^{-2}) - \left[\frac{1}{4} (1 + \beta^{-2})^2 - \beta^{-2} \sin^2 \theta_H \right]^{1/2} \quad (1.2)$$

$$\beta^{-2} = \frac{\mu MH}{4\pi\eta\alpha^3 K} \quad (1.3)$$

式中： η_0 为基液粘度； φ 为颗粒体积分数； Ψ_s 为与磁场有关的量； θ_H 为液体旋转轴和磁场间的夹角； μMH 为力矩； α 为固体颗粒度； K 为速度梯度。

$$\tau = \eta_0 \gamma + \mu_0 H_e^2 \varphi \theta_H \frac{\chi_a^2}{2 + \chi_a} \quad (1.4)$$

式中： γ 为剪切率； H_e 为外加磁场强度； χ_a 为颗粒的磁化率。

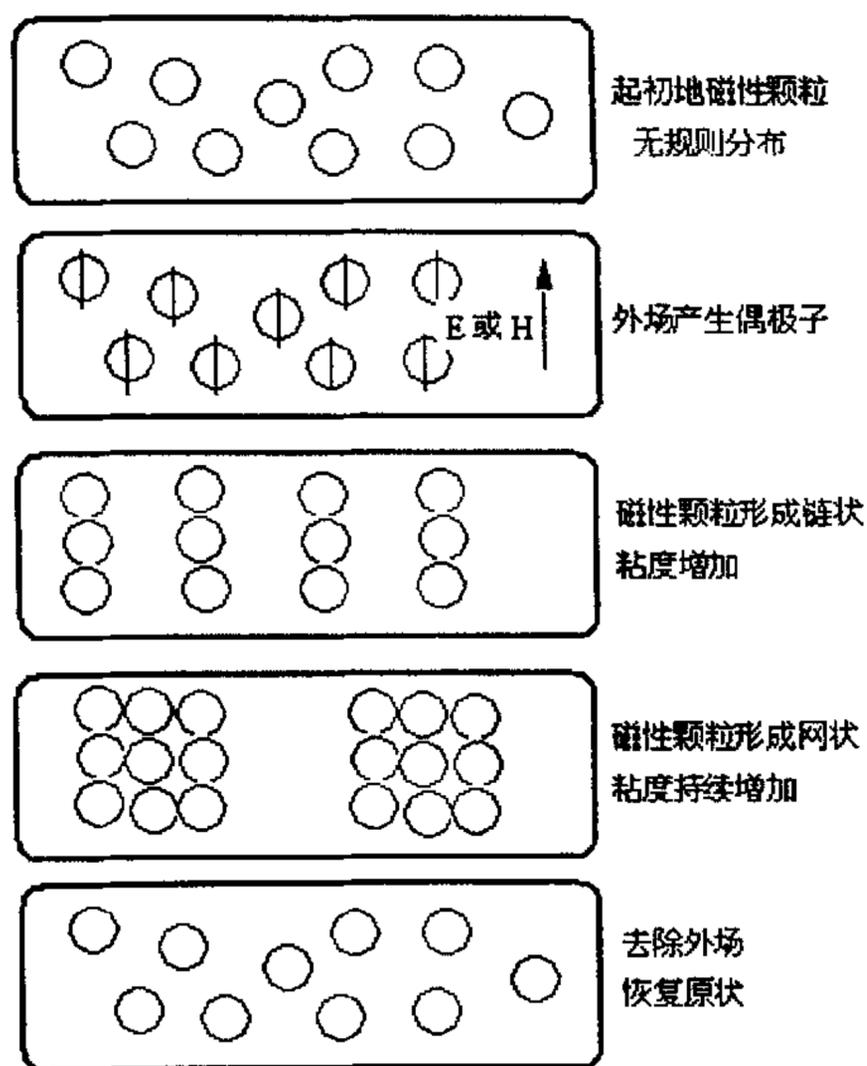


图 1.1 磁流变液的转变机理示意图

1.4 磁流变液的性能

作为一种有广阔应用前景的智能材料，磁流变液应该具有以下性能：

- (1) 磁滞回线狭窄，矫顽力小，磁导率大，尤其是磁导率的初始值和极大值必须很大；
- (2) 具有尽可能大的磁饱和强度，使尽可能多的“磁流”穿过悬浮液，感受磁场的作用，从而提高其剪切屈服强度，至少应达到 $30 \sim 50 \text{KPa}$ ；
- (3) 零场粘度低，在没有磁场的情况下，粘度不应超过 $1.0 \text{Pa} \cdot \text{s}$ ；
- (4) 响应时间短，能跟上控制系统的节奏，一般需要 $1 \sim 2 \text{ms}$ ；
- (5) 能耗低，在电源产生磁场的作用下，产生的热量尽量不要影响到其性能；
- (6) 微粒分散均匀，稳定性高，长时间放置不致失效；
- (7) 适应温度范围广，一般在 $-40 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时不影响其性能；
- (8) 价格低廉，无腐蚀，无污染。

上述性能有些已经基本能够达到，但是，目前的磁流变液由于受技术条件的限制，有些性能还不能完全令人满意。例如，价格偏高。美国 Lord 公司的磁流变液虽然性能比较稳定可靠，但每升约 600 美元的价格，使它难以普遍应用；国产磁流变液虽然价格较低，但性能还不够优良和稳定。另外，磁流变液的沉淀性也是影响其广泛应用的因素，

虽然一般的磁流变液在使用前经过充分振荡就能恢复其性能，但在实际应用中很难做到。再有，在频率较高时性能有所降低，这也是磁流变液应该解决的问题。最后，由于对计算磁流变液的数学模型还不完全准确，因此，如何在理论和实践上对其性能进行统一，还是一个亟待解决的问题。

磁流变液与电流变液的主要物理和化学性质[19, 22]，如表 1.2 所示

表 1.2 磁流变液与电流变液的性质比较

流体名称	ER 流体	MR 流体
功率	2~5 kV, 1~10mA 2~50W	2~25V, 1~2A 2~50W
场强	2~5 kPa (3~5kV·mm ⁻¹) 受击穿电压限制	50~100kPa (150~250kA·m ⁻¹) 受磁场饱和强度限制
粘度 (不加外场)	0.2 ~ 0.3 Pa·s 25℃	0.2 ~ 0.3 Pa·s 25℃
最大能量密度	-10 ³ J·m ⁻³	-10 ⁵ J·m ⁻³
工作温度范围	-25 ~ 125 °C (非离子型, 交流) 10~90°C (离子型, 直流)	-40 ~ 150°C (基液限制)
电流密度	2~15mA·Cm ⁻² (4km·mm ⁻¹ , 25 °C)	可以用永久磁铁加磁场
比重	1 ~ 2.5	3 ~ 4
颜色	任何颜色, 不透明或透明色	褐色、棕色、黑色/不透明
响应时间	毫秒, 准确时间取决于装置设计	毫秒, 准确时间取决于装置设计
微粒尺寸	一般为微米级	一般为微米级
稳定性	不能容忍杂质	大多数杂质无影响

1.5 磁流变液的应用

磁流变液的特性使它在许多领域已经得到应用，例如汽车、机械、地震防护、航空航天、医疗保健、机器人等。目前，它已经应用于减振器、制动器、离合器、液压阀、抛光装置、密封装置、人造膝关节、气动伺服控制装置、复合构件及柔性夹具等。其中，磁流变液减振器是目前国内外最广泛的一项应用。

(1) 磁流变液减振器

磁流变液减振器由于其良好的半主动控制性能，目前已经得到广泛的应用，具体应用本文第三章将分别介绍。

(2) 磁流变液制动器

美国 Lord 公司制造的旋转式制动器是一种可控回转阻力、结构紧凑、运行平稳、功率较低的器件，已经用于自行车式和台阶登攀式健身机。该制动器的剖面图如图 1.2 所示。其外径是 92mm，最大耗散力矩为 7N.m，最大转速为 1000r/min，可把最大机械功率 700W 转变为热能。当最大控制电流为 $I=1A$ （电压为 12V）时，最大控制功率为 10W。它与速度反馈装置连接，可实时控制扭矩。从而迫使练习者保持希望的目标速度。它的简单性和易控制性使它可在广泛的范围内得到应用[23]。

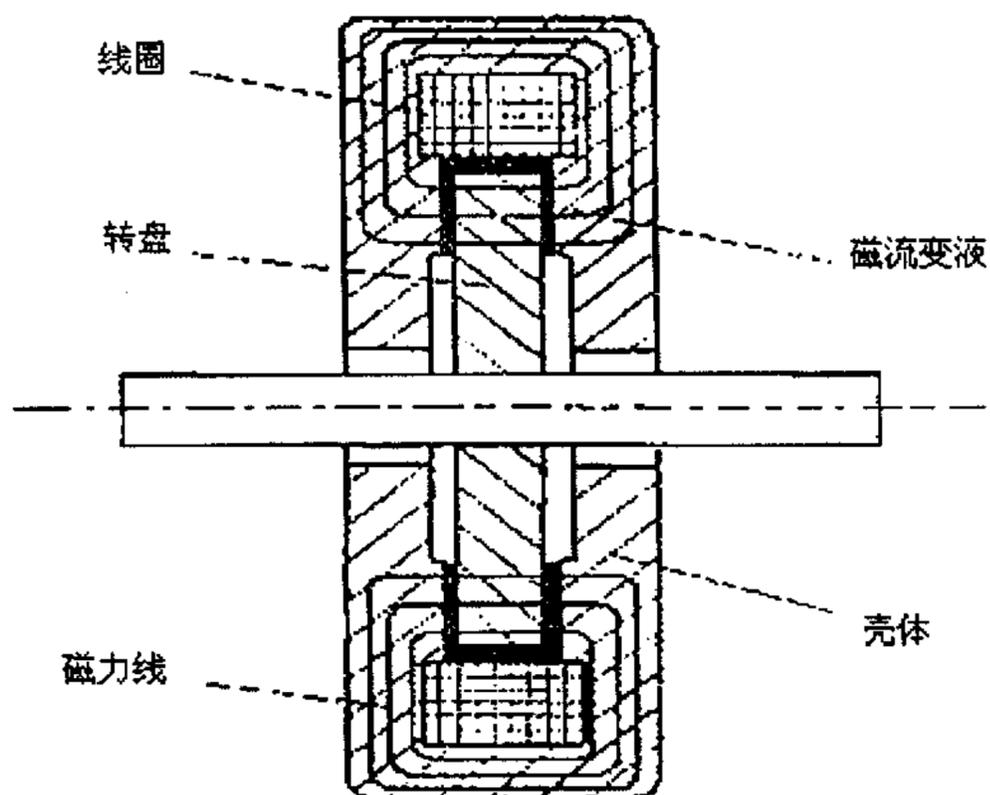


图 1.2 磁流变液制动器

(3) 磁流变液离合器

图 1.3 给出了两种离合器的原理图，(a)是单级同心圆式，(b)是多级平行盘式。由图可知，在主动轴与从动轴的端部，有一间隙很小的容腔，其外壳和内盘分别与主动轴和从动轴相连，在容腔中装入磁流变液，内盘的外端绕有电磁线圈。在未加电源时，没有磁场作用的磁流变液的粘度较低，主动轴转动而没有较大的力矩传递给从动轴，因而，从动轴保持静止。当加入电源后，磁流变液受磁场的作用变粘直至固化，从而产生足够的剪切屈服应力将主动轴的力矩传递给从动轴。在单级同心圆离合器中，磁流变液与周围结构的作用面积小，因而在零场情况下阻尼力小，从而有较高的机械效率，但传动力矩也较小，可应用于小扭矩及高转速的情况。多级平行盘式离合器能产生较大的扭矩，可用于大功率的情况。在这种新型离合器中，放弃了传统的离合传动系统，具有控制简单、无机械冲击、机械磨损小和噪音低的特点[6]。

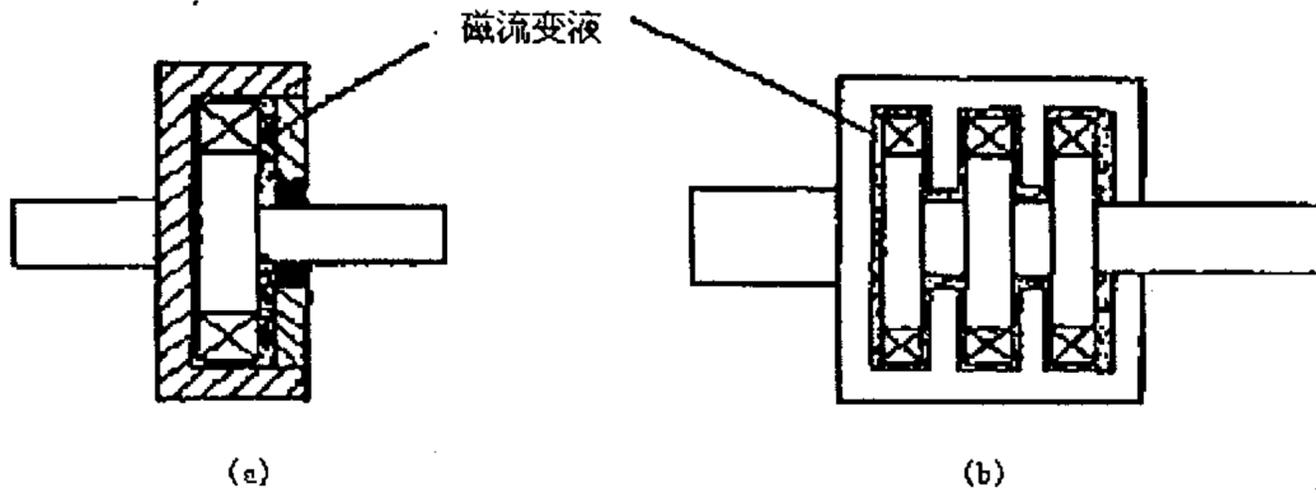


图 1.3 磁流变液离合器

(4) 磁流变液压阀

磁流变液还可以用于可控阀门。图 1.4 是外阻尼力可控液压回路。在该装置中，外激振力、外主动力作用于缸体活塞杆上，使该油缸相当于一个柱塞泵，磁流变液在液压回路中流动，在零场情况下，磁流变液的粘度较小，在回路中产生很小的阻尼力，活塞

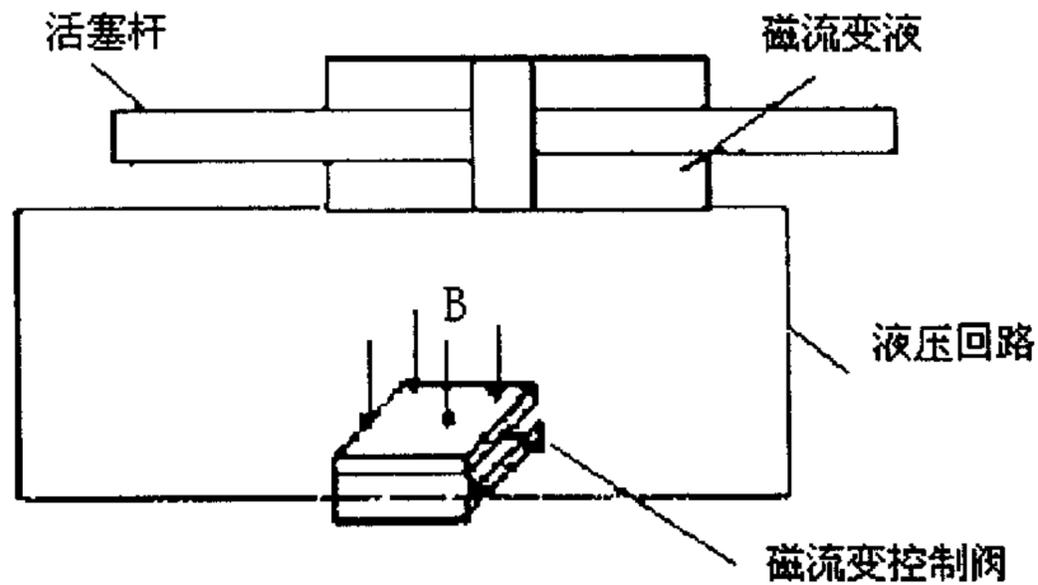


图 1.4 磁流变液控制阀用于液压回路

杆产生的阻力也很小。但加以磁场后，磁流变液粘度变大直至固化，管道流动发生堵塞，在活塞杆上产生相应的大阻力。由于这种结构在外部回路中建立专门的控制阀，并利用设备进行控制，所以这种结构的可控性非常好，而且反应比较敏捷，可在大力矩、大行程的结构中使用[6]。

(5) 磁流变液抛光

磁流变液抛光是一种磁场辅助的流体动力抛光技术，其加工对象主要是玻璃、陶瓷和塑料等非磁性材料。在传统的光学精加工中，是靠覆盖着浆状磨削颗粒的抛光垫与工件的相对运动和浆液的化学作用形成高精度的表面，但在这种方法中不同形状、尺寸的

工件需要专门的抛光垫，不能提供一个适应性强、高效率的光学精加工方法，特别是对于球状或其它复杂形状的工件。磁流变液抛光不仅能纠正光学元件的形状误差，平滑很小的微观不平度，而且加工中不产生表明隔次表面损伤。

如图 1.5 所示，抛光表面的原理图。将含有微米磁性颗粒与磨料的水基磁流变液置于旋转的托盘内，工件安装在旋转的主轴上。旋转托盘将磁流变液送到工件的表面。在工件附近施加磁场，则磁流变液在此处的粘度变大，并被拖入由工件和托盘构成的间隙中。在与工件接触的小区域上产生较高的切应力。使工件表面得以抛磨。主轴由程序控

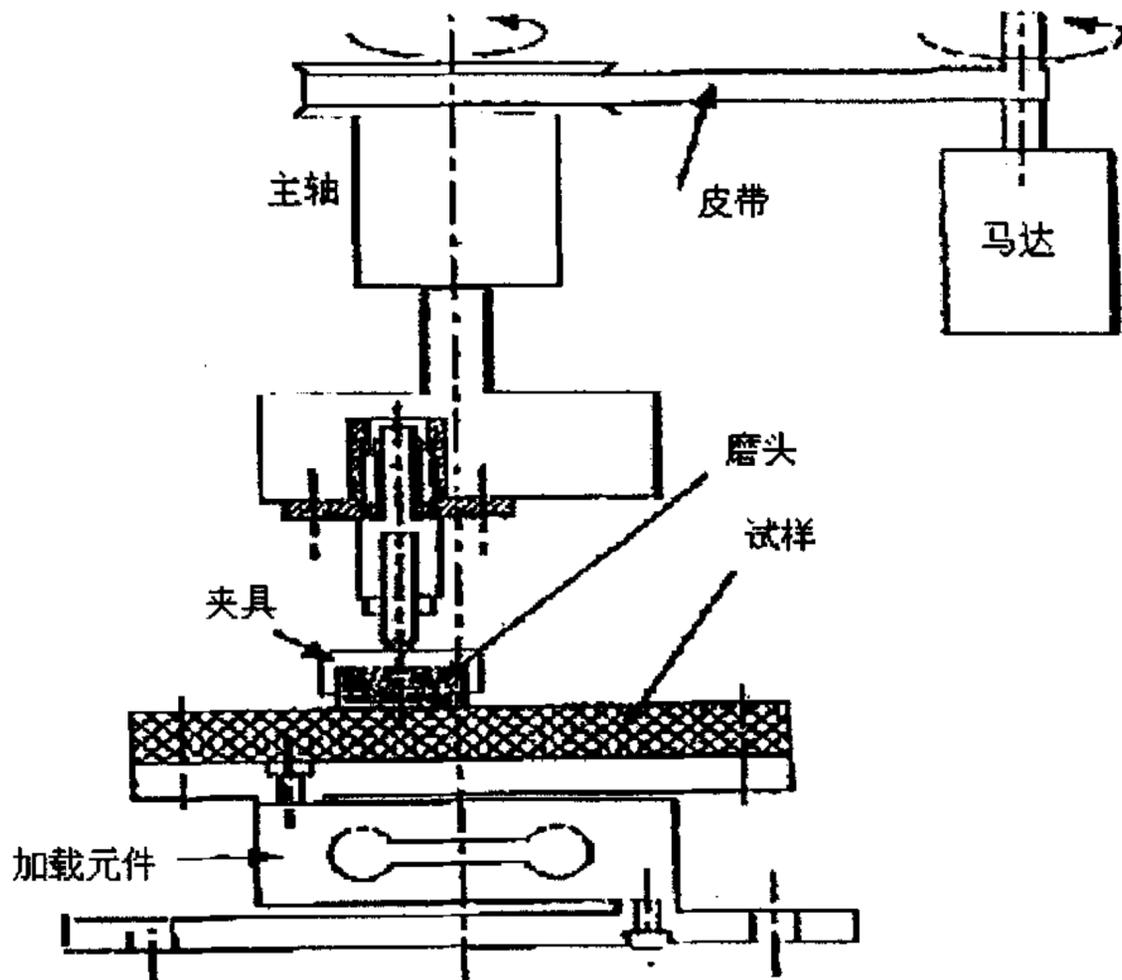


图 1.5 磁流变液抛光原理图

制进行偏转，使工件表面扫过高切应力区域，从而整个工件得以抛光。这种工艺的特点是流体磨具表面具有可控性和与工件表面的一致性。磁流变液抛光技术已成功用于极高精度光学表面的抛光，可将光学材料表面的微观不平度减小到 $0.001\mu\text{m}$ 以下 [6, 23]。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的张峰等人着重研究了磁流变抛光的抛光区特点，指出抛光区的大小为 $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的一个区域，其形状与横倒的英文字母“D”的形状相似。同时，以实验的形式研究了工件的曲率半径、工件浸入磁流变抛光液中的深度、工件轴的摆角等因素对磁流变液抛光区的大小和形状的影响情况。在此基础上，阐明了抛光时间、运动盘的速度、工件与运动盘形成的间隙大小、磁场强度等几

种重要的工艺参数对磁流变液抛光材料去除率的影响。这些为今后实现磁流变抛光的各种工艺参数的最佳匹配，使该技术更加趋于完善有着重要的意义。

(6) 磁流变液用于机械密封

白俄罗斯传热传质研究所使用静态剪切应力 $\tau = 5kPa$ 的磁流变液，在磁场强度 $H = 150kA/m$ 时，磁场线圈电流 $I = 2.5A$ 时，这种密封圈可承受的最大加压压力为 $P^* = 180kPa$ ，是铁磁流体的 3 倍；他们研究了 P^* 的动态过程，发现转动时 P^* 先是迅速上升，在 $35r/min$ 时达到最大值 $330kPa$ ，然后缓慢下降，在 $240r/min$ 时仍能达到 $250kPa$ 。他们发现 P^* 与 H^2 成正比。然而随着磁流变液在磁场中受到剪切作用的增大，作用在轴上的摩擦力矩也增加。因而磁流变液密封在低速转动或静止的场合具有较高的效率，这已在制备磁流变液的设备上得到了使用 [6, 23]。

(7) 磁流变液用于气动伺服控制

Lord 公司与 Parker 气缸生产厂家合作，生产的磁流变液气动伺服阻尼器结构如图 1.6 所示；控制装置工作原理如图 1.7 所示。由于气体的较大的可压缩性，因而气动系

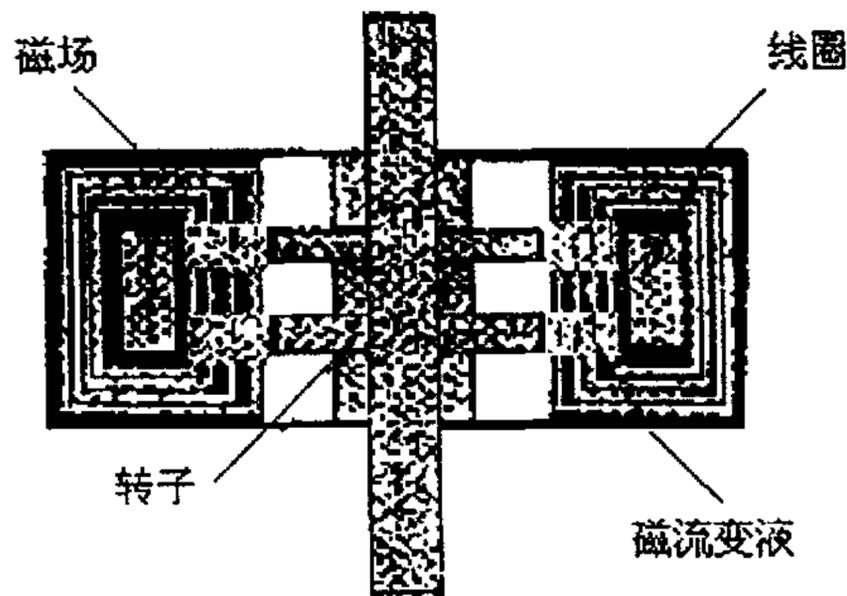


图 1.6 气动伺服控制阻尼器结构图

统实现伺服控制是比较困难的。目前，利用磁流变液装置可实现对气动执行元件进行位置、速度及加速度的控制，旋转式或直线式均可，而且其控制性能足以和传统的电气伺服机械相比。图 1.6 所示的是一种旋转式磁流变液

气动伺服阻尼器，气动执行元件通过这种磁流变液旋转阻尼器，给气缸施加一定的阻尼力，在活塞两工作位置之间有齿轮和齿条机械把直线运动传递到阻尼器，阻尼器壳体做定子，磁流变液充满转子和壳体之间。当阻尼器线圈不通电时，阻尼力接近于零。当线圈两端电压增加时，间隙中的磁场增加，减振器阻尼力增大；反之，当线圈电压减小时，减振器的阻尼力减小。且在一定负载力范围内，线圈电压达到一定值时，减振器阻尼力可起到刹车作用，减振器又可以做刹车器。所以，磁流变液气动伺服减振器可达到位置和速度控制的目的 [24]。

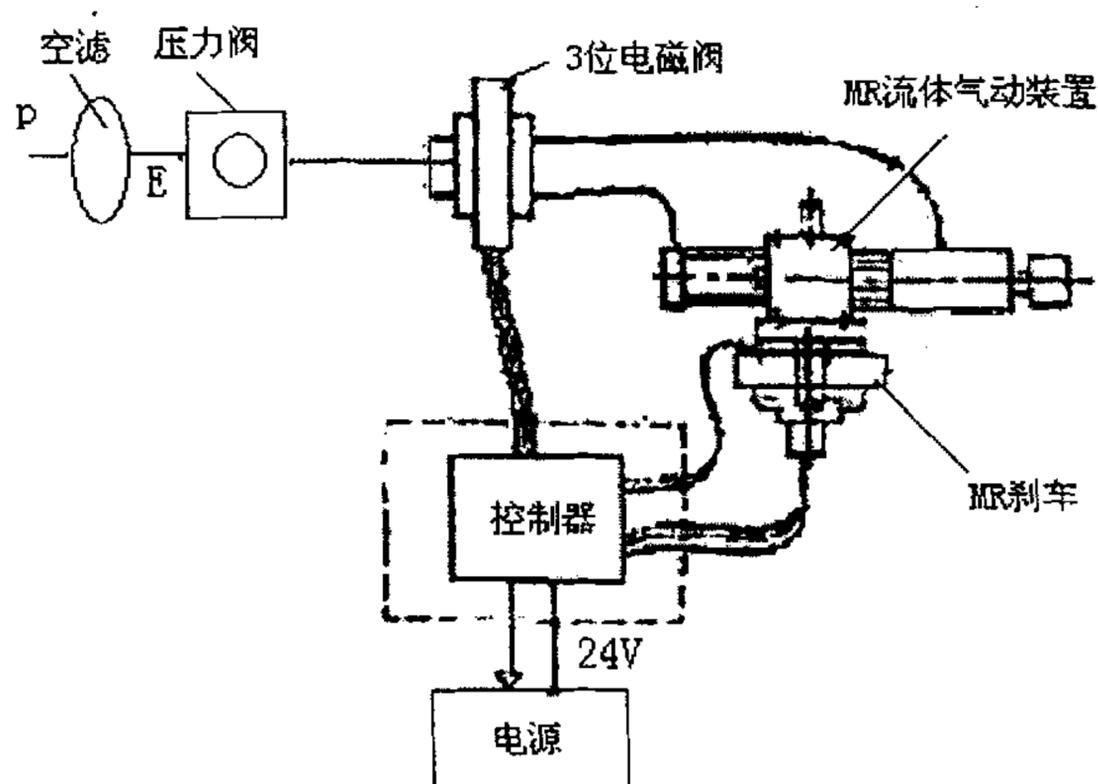


图 1.7 磁流变液气动伺服控制装置工作原理图

(8) 磁流变液用于柔性夹具

在制造过程中，对于加工不规则形状的工件和小型部件，特别需要使用柔性夹具。利用磁流变液应变迅速、屈服强度大等特点，Tang 研究了制造磁流变液柔性夹具的可能性。由于典型磁流变液的屈服应力约为 $100kPa$ ，而这对柔性夹具来说是不够的。为解决此问题，Tang 利用加压的方法迫使流体微观结构由单链变为粗大的柱状，在中等磁场作用下使其屈服应力达到 $800kPa$ 以上，从而满足了精密加工所需的夹具承载能力 [23]。柔性夹具的原理如图 1.8 所示。

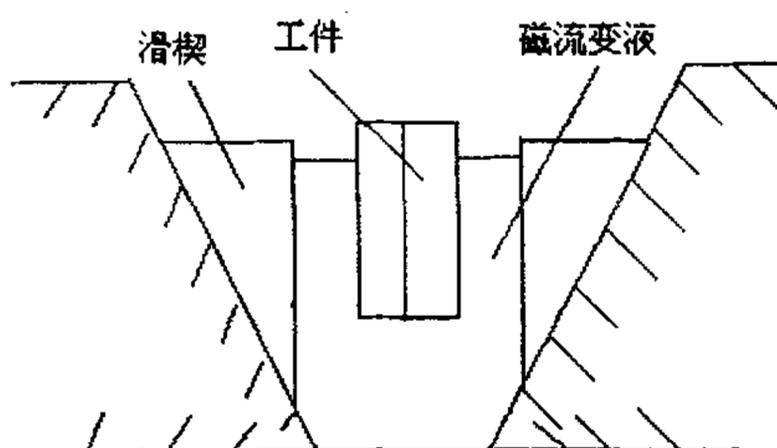


图 1.8 柔性夹具的原理图

(9) 磁流变液用于复合构件

可控的复合构件或结构是把磁流变液作为一种结构元件封闭在相对的夹层中，以形成机械系统的一部分，如板、盘、梁、杆或其它含有这些构件的结构。改变磁场强度就可以改变磁流变液的剪切和压缩/拉伸弹性模量，从而对复合构件或结构的刚度和阻尼

加以控制。这些复合构件或结构可嵌入许多机械系统，以控制其振动和其它特性[23]。

(10) 磁流变液用于微型机械装置

磁流变液技术还可以用于微型机械装置,日本的 Koichi Ozaki 与 Atsushi Korenaga 等人利用磁流变液在交变磁场下诱导流动这一现象,制作了长 100mm, 直径 15mm 的小型磁流变液泵, 该泵在高频交变磁场下产生的 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 的流量与 10Pa 的压强[3]。

(11) 磁流变液在其它方面的应用前景

西安交通大学的杨臻等人探讨了磁流变液技术在自动武器应用中的可行性,认为一些关键技术能够突破,可以应用到自动武器缓冲器上[17]。

文献[25]中等人用 MR 流体作了人体血管网路模拟实验,基本原理是为了切断人体血管向肿瘤供应血液,在肿瘤附近的血管注入 MR 流体,然后给这部分 MR 流体施加磁场,当施加磁场后产生的粘性阻力大于血管压差阻力时,这时的 MR 流体就相当于一个“开关”或“堵塞”,封住了血液流动。使供向肿瘤的血液中断,从而使肿瘤得到控制。虽然这只是一模拟实验,距实际应用还有一段距离,但它确为 MR 流体在医学领域的应用开辟了一条新的途径。

西南交通大学的池茂儒等人从理论上分析了磁流变耦合轮对转向架在小半径曲线和大半径曲线上的受力情况,发现磁流变耦合轮对可以根据需要在控制系统作用下灵活的改变前后轮对的纵向蠕滑力。通过对磁流变耦合轮对轮轨横向力的数值仿真发现,比较理想的模式应该是转向架前轮对耦合而后轮对完全独立。这一规律为磁流变耦合轮对控制系统的研究提供了依据[26]。

第二章 宾汉流体简介

2.1 磁流变液的流变特性

如前所述, MRF 在外加磁场的作用下, 其流变性能很容易改变和控制[19]。MRF 表现出一种非牛顿流体的性质, 其中最明显的变化是剪切力 τ 不再是剪切率 $\dot{\gamma}$ 的线性函数。 $\tau-\dot{\gamma}$ 图中的曲线的斜率即表观粘滞系数随 $\dot{\gamma}$ 的上升反而下降, 这称为剪切稀化 (shear thinning), 与此同时, MRF 呈现一定的屈服应力 τ_y , 即 $\tau < \tau_y$ 时, MRF 的性质类似于固体。当 $\tau > \tau_y$ 时, MRF 出现流动现象。在外磁场的作用下, MRF 的表观粘滞系数 η_p 增加 (液体的实际粘度无变化) 是由于屈服应力的增加造成的, 这种粘塑性行为可以用宾汉 (Bingham) 模型来描述。

$$\text{当 } \tau > \tau_y \text{ 时, } \tau = \tau_y + \eta_p \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

τ_y 并非一个可直接测出的“测量值”, 它是通过外推 $\tau-\dot{\gamma}$ 之间的测量曲线而得到的。Bingham 模型的不足之处在于无法解释剪切稀化现象。

为了探明表观粘滞系数 η_p 随外磁场 H 及剪切率 $\dot{\gamma}$ 的变化关系, Marshall 等人通过引入一个无量纲的 Mason 数表明了粘滞性与磁场的比率。

$$M_n = \frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{2\mu_0 \mu_f (\beta H)^2} \quad (2.2)$$

$$\beta = \frac{\mu_p - \mu_b}{\mu_p + 2\mu_b} \quad (2.3)$$

其中, μ_0 , μ_p , μ_b , μ_f 分别为真空、颗粒、基液和磁流变液的磁导率。 η_0 为基液的粘滞系数。式(2.2)表明了剪切稀化现象。

2.2 牛顿流体与非牛顿流体

2.2.1 定义

如图 2.1 所示的简单剪切流[27]。有一间距为 h 的两平行板, 下平板固定不动, 上平板受横力 F 的作用, 以速度 u_0 沿 x 正方向运动。两平板间充满流体。由于流体是粘附

在平板表面的，因此在 $y=0$ 处，流体是静止的；在 $y=h$ 处，流体以平板速度 u_0 随平板一起运动。

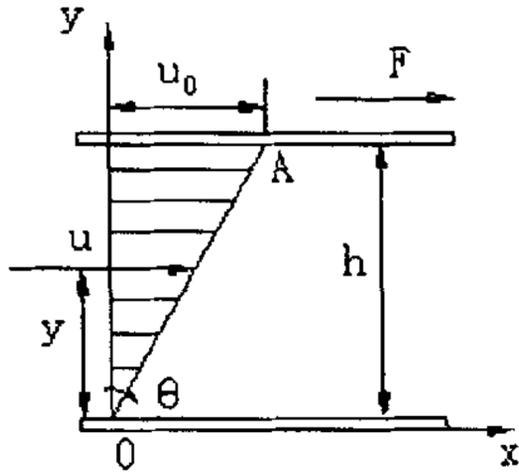


图 2.1 简单剪切流

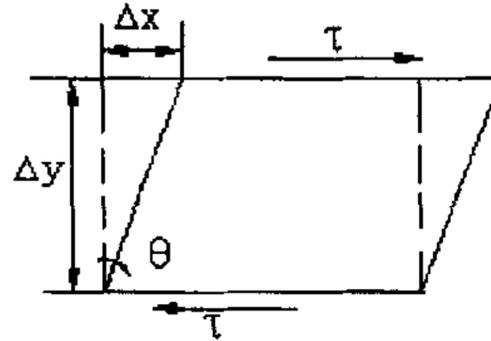


图 2.2 剪应变和剪应变速度

流体内任一点的速度 u 与其纵坐标 y 成正比，即

$$u = \gamma y \quad (2.4)$$

式中， γ 为比例常数。

$$\gamma = \frac{u}{y} = \frac{u_0}{h} = \operatorname{tg} \theta = \operatorname{const} \quad (2.5)$$

γ 是流速梯度，或称剪应变速度， OA 为流速分布线，满足式 (2.5) 流速分布的流动称为简单剪切流。

若平板的面积为 A ，则平板作用在液体上的切应力 $\tau = \frac{F}{A}$ 。

根据力的平衡关系可知，在简单剪切流中，切应力在流体内部是均匀分布的，而切应力的均匀分布必导致流速梯度 γ 在流体内的均匀分布，这就是简单剪切流的特点。对于非简单剪切流， u 与 y 为非线形关系，则

$$\gamma = \frac{d_u}{d_y} \quad (2.6)$$

若将切应力施加在弹性固体上，如图 2.2 所示，上底产生位移 Δx ，下底固定，两底面间距离为 Δy ，剪应变 γ 定义为

$$\gamma = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \operatorname{tg} \theta \quad (2.7)$$

上式说明剪应变即位移梯度，当 θ 角很小时， $\gamma = \text{tg}\theta \approx \theta$ ，剪应变即为直角变形角。流体在切应力作用下不能处于平衡状态，应变随时间持续发展，产生连续的变形，这便是流动。剪应变的时间变化率即剪应变速度用 $\dot{\gamma}$ 来表示，这也就是表征流体流动快慢的物理量。

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dy} \right) = \frac{d}{dy} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{d_u}{dy} \quad (2.8)$$

剪应变速度即为横向速度梯度，其单位是 s^{-1} 。剪应变速度也是直角变形速度，是因为

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.9)$$

牛顿在 1687 年首先提出一个假设：流体流动时，其切应力与剪应变速度成正比，在简单剪切流中，不可压缩流体底牛顿内摩擦定律可表示为

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2.10)$$

式中： μ 为牛顿流体的动力粘度 (Dynamic Viscosity)，它在一定的温度和压力下是常数。

由牛顿流体的定义可知，凡是符合 (2.10) 式的流体，即应力和应变速度之间的关系满足牛顿内摩擦定律的流体都是牛顿流体 (Newtonian Fluid)，凡是不符合 (2.10) 式的流体都是非牛顿流体 (Non-Newtonian Fluid)。

2.2.2 非牛顿流体的分类

对于非牛顿流体，可以把切应力和应变速度之比定义为非牛顿流体的表观粘度 (Apparent Viscosity) 或称粘度函数 (Viscosity Function)。根据在简单剪切流中非牛顿流体的粘度函数是否和剪切持续时间有关，可以把非牛顿流体分成两大类——非时变性非牛顿流体和时变性非牛顿流体。

非时变性非牛顿流体的切应力仅与剪切变形速度有关，即粘度函数仅与应变速度 (或切应力) 有关，而与时间无关。

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}) \quad (2.11)$$

式中： η 为表观粘度或称粘度函数。非时变性非牛顿流体主要包括：

- (1) 剪切稀化流体 (Shear Thinning Fluid)，也称伪塑性流体 (Pseudoplastic Fluid)。
- (2) 剪切稠化流体 (Shear Thickening Fluid)，也称膨胀型流体 (Dilatant Fluid)。
- (3) 宾汉流体 (Bingham Fluid)，也称塑性流体 (Plastic Fluid)。

这三种典型流体的流动曲线和粘度曲线分别如图 2.3 和 2.4 所示。

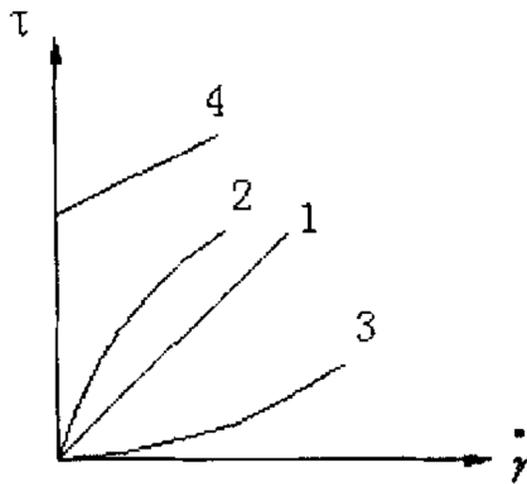


图 2.3 流体的流动曲线

1. 牛顿流体, 2. 剪切稀化流体,
3. 剪切稠化流体, 4. 宾汉流体

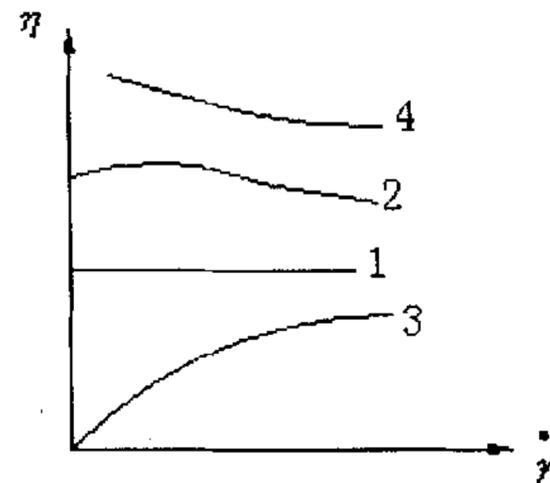


图 2.4 流体的粘度曲线

1. 牛顿流体, 2. 剪切稀化流体,
3. 剪切稠化流体, 4. 宾汉流体

2.3 宾汉 (Bingham) 流体的定义

宾汉流体也称塑性流体。图 2.3 中有宾汉流体的流动曲线。由图可见, 对宾汉体施加的切应力只有超过屈服值 τ_0 时才能产生流动, 且切应力和应变速度成线性关系。宾汉体的本构方程如下:

$$\tau - \tau_0 = \eta_p \dot{\gamma} \quad (2.12)$$

式中: τ_0 为屈服值; η_p 为塑性粘度。二者在一定的温度和压力下是常数。 τ_0 和 η_p 是宾汉流体的二个物质常数。宾汉流体的表观粘度函数为

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \eta_p + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \quad (2.13)$$

宾汉体的流变性质是由其自身内部的结构所决定的。单相是不存在屈服值的。在单相流体中, 作为分散相的颗粒分散在连续相中。屈服值的存在就是由于分散的颗粒间有强烈的相互作用, 从而在静止时形成网状结构。只有在施加的切应力足以破坏网状结构时, 流动才能进行。因此破坏网状结构时的切应力称为屈服值。屈服值的大小与作为分散相的颗粒浓度有关。浓度越低, 屈服值就越小。同时, 屈服值的大小还和颗粒表面的物理化学性质有关, 如果对分散相表面的物质性质人为的加以改变, 就可以达到推迟网状结构的形成, 减弱颗粒间的联系, 从而可以降低屈服值, 增强流动性。宾汉体是工程上应用广泛的一种材料, 如水泥浆、污泥、沥青、石油制品、高含蜡低温原油、牙膏、

油漆以及中等浓度的悬浮液等。

磁流变液在外磁场作用下，内部颗粒形成链状结构，这一点与普通宾汉流体的网状结构不同。文献[17]提到的宾汉模型无法解释剪切稀化现象和文献[18]提到的宾汉模型只适用于小阻尼的情形，关于这两个问题，作者认为，内部颗粒形成的结构不同应该是上述两个问题的原因之一。

2.4 宾汉流体在管道中的流动

2.4.1 均匀流动方程式

取柱面坐标如图 2.5 所示，流体的流速分布为

$$u_{\theta} = u_r = 0$$

$$u_z = u_z(r)$$

由于是轴对称流动，所有变量都与 θ 无关，切应力中只有一个非零分量。

$$\tau_{rz} = \tau$$

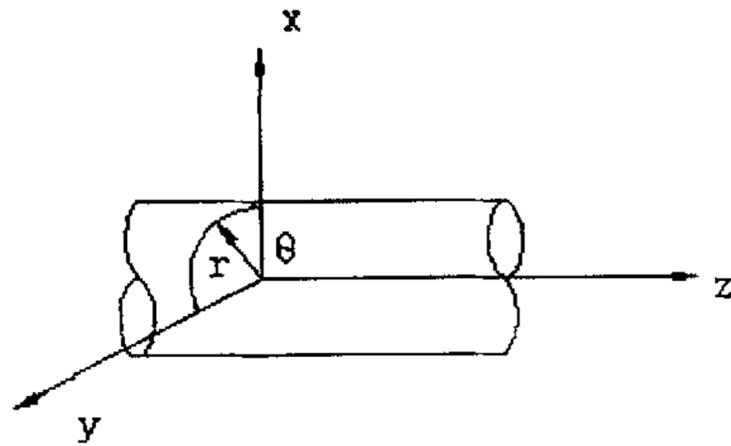


图 2.5 圆管的柱面坐标

又由于是均匀流动，切应力和附加法向力只沿 r 方向有变化而与 z 无关。根据以上条件，柱面坐标的运动方程可简化为：

$$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \rho g_r = 0 \quad (2.14)$$

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho g_{\theta} = 0 \quad (2.15)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau) + \rho g_z = 0 \quad (2.16)$$

经整理后得

$$\frac{\partial p}{\partial r} - \rho g_r = \frac{d\tau_{rr}}{dr} - \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{r} \quad (2.17)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} - \rho g_\theta = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr}(r\tau) + \rho g_z \quad (2.19)$$

式(2.19)中等号右侧与 z 无关, 因 $\frac{\partial p}{\partial z}$ 沿 z 方向是常数, 于是 $\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{\Delta p}{L}$ 。

对式(2.19)积分可得
$$\tau = \frac{\Delta p r}{2L} \quad (2.20)$$

在管壁处
$$\tau_w = \frac{\Delta p R}{2L} \quad (2.21)$$

式(2.20)和(2.21)为均匀流动方程式。

2.4.2 宾汉流体的圆管层流

对于非时变性粘性流体, 其本构方程的一般形式是:

$$\gamma = f(\tau) \quad \text{或} \quad -\frac{du}{dr} = f(\tau) \quad (2.22)$$

对于宾汉体, 其具体形式是:
$$\gamma = \frac{1}{\eta_p}(\tau - \tau_0) \quad (2.23)$$

由式(2.20)可知, 切应力在管轴为零, 在管壁处最大, 在断面上切应力成直线分布。在切应力小于屈服值 τ_0 的区域, 流体将不发生相对运动。如果管壁切应力小于屈服值, 则整个断面上流速都等于零。因此宾汉体在管内产生流动的条件是 $\tau_w > \tau_0$, 即

$$\frac{\Delta p R}{2L} > \tau_0 \quad \text{或} \quad \frac{\Delta p}{L} > \frac{2\tau_0}{R} \quad (2.24)$$

设在半径为 r_0 处的切应力等于宾汉体的屈服值 τ_0 , 这样在 $r \geq r_0$ 区域内, 其切应力大于屈服值, 即 $\tau > \tau_0$, 因此能产生流动。在 $r \leq r_0$ 区域内, 切应力小于屈服值, 因而不能产生相对运动, 只能象固体一样随半径为 r_0 处的液体向前滑动。这样管内固液两态共存, 流动就分为两个区域, 流体质点间无相对运动的部分称为流核区, 流核以外的区域称为速梯区, 如图 2.6 所示:

屈服应力发生在两区的交界面上, 当 $r = r_0$ 时, $\tau = \tau_0$, 代入均匀流动方程式(2.20),

可得
$$r_0 = \frac{2\tau_0 L}{\Delta p} \quad (2.25)$$

随着压差 Δp 的增大，流核半径 r_0 逐渐减小，速梯区的范围逐渐扩大。

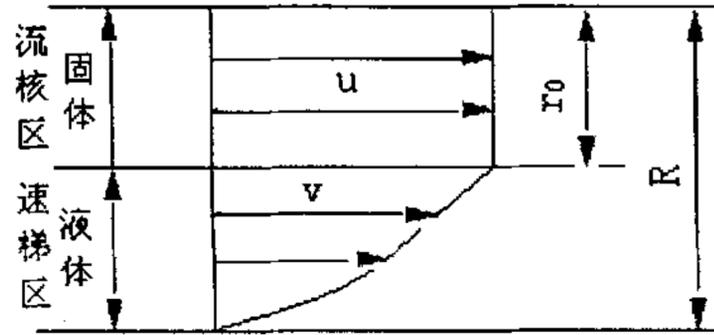


图 2.6 宾汉体的流速分布

设当管壁切应力等于屈服值时的管压降为 Δp_0 ，则

$$\tau_0 = \frac{\Delta p_0 R}{2L} \quad (2.26)$$

这样宾汉体在管路中产生流动的条件便是 $\Delta p > \Delta p_0$ 。将式(2.21), (2.25), (2.26)加

以对比后得
$$\frac{\tau_0}{\tau_w} = \frac{\Delta p_0}{\Delta p} = \frac{r_0}{R} \quad (2.27)$$

(1) 流速分布

对于非时变性粘性流体，速度计算方法为：

对(2.22)积分，可得
$$u = -\int_0^r f(\tau) dr + C$$

根据边界条件，当 $r=R$ 时， $u=0$ ，可得积分常数
$$C = \int_0^R f(\tau) dr$$

因此
$$u = \int_r^R f(\tau) dr \quad (2.28)$$

将式(2.20), (2.21)代入上式，可得

$$u = \frac{R}{\tau_w} \int_{\tau}^{\tau_w} f(\tau) d\tau \quad (2.29)$$

对于速梯区宾汉体有

$$f(\tau) = \frac{1}{\eta_p} (\tau - \tau_0)$$
，代入上式得

$$u = \frac{R}{\tau_w} \int_{\tau}^{\tau_w} f(\tau) d\tau = \frac{R}{2\eta_p \tau_w} [\tau_w^2 - \tau^2 - 2\tau_0(\tau_w - \tau)] \quad (2.30)$$

将(2.20), (2.21)代入，整理得

$$u = \frac{\Delta p}{4L\eta_p}(R^2 - r^2) - \frac{\tau_0}{\eta_p}(R - r) \quad (2.31)$$

对于速度均匀的流核区，其速度为 v_0 ，以 $r = r_0$ 代入上式，得

$$v_0 = \frac{\Delta p}{4L\eta_p}(R^2 - r_0^2) - \frac{\tau_0}{\eta_p}(R - r_0) \quad (2.32)$$

(2) 流量

对于非时变性粘性流体，其流量计算方法为：

$$\text{由 } Q = \int_0^R 2\pi r u dr = 2\pi \int_0^R r u dr \quad (2.33)$$

进行分部积分，再将边界条件 $r=R$ 时， $u=0$ 代入得到

$$Q = \int_0^R \pi r^2 f(\tau) dr \quad \text{以 } r = \frac{R}{\tau_w} \tau \text{ 代入，则上式成为}$$

$$Q = \frac{\pi R^3}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} f(\tau) \tau^2 d\tau \quad (2.34)$$

对于宾汉体得流量可以用下式计算

$$Q = \int_{r_0}^R u 2\pi r dr + v_0 \pi r_0^2 \quad (2.35)$$

将 (2.31), (2.32) 代入并整理得

$$Q = \frac{\pi \Delta p R^4}{8L\eta_p} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{r_0}{R} + \frac{1}{3} \left(\frac{r_0}{R} \right)^4 \right] \quad (2.36)$$

上式就是著名的宾汉方程。它是宾汉在 1921 年首先推导出来的。在流量较大时，流核半径 $r_0 \ll R$ ，上式右端的四次方项可以略去不计，这样上式变为

$$Q = \frac{\pi \Delta p R^4}{8L\eta_p} \left(1 - \frac{4}{3} \frac{r_0}{R} \right) \quad (2.37)$$

以式 (2.26) 代入，得到

$$Q = \frac{\pi R^4}{8L\eta_p} \left(\Delta p - \frac{4}{3} \Delta p_0 \right) \quad (2.38)$$

所以，当流量较大时， Q 与 Δp 成直线关系。

(3) 平均流速与压降

由(2.38)可直接求得宾汉体层流状态下的平均流速

$$v = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{\Delta p R^2}{8L\eta_p} \left(1 - \frac{4}{3} \frac{r_0}{R}\right) \quad (2.39)$$

再以 $r_0 = \frac{2\tau_0 L}{\Delta p}$ 代入，得

$$v = \frac{R^2}{8L\eta_p} \left(\Delta p - \frac{8}{3} \frac{\tau_0 L}{R}\right) \quad (2.40)$$

由上式可以直接给出压降的计算公式

$$\Delta p = \frac{32\eta_p Lv}{D^2} + \frac{16}{3} \frac{\tau_0 L}{D} \quad (2.41)$$

上式中等号右侧的第一项就是当塑性粘度和牛顿粘度相等时牛顿流体的压降。第二项是由于宾汉体存在屈服值 τ_0 所引起的压降。

第三章 磁流变液减振器

3.1 磁流变液减振器的工作原理

如前所述,磁流变液减振器是目前磁流变液应用最为广泛和成熟的装置之一。其基本原理是利用磁流变液在外加磁场作用下,随机分布的磁化颗粒的磁化运动方向大致平行于磁场方向,磁化运动使微粒首尾相连,形成链状结构或复杂的网状结构,从而使磁流变液的流变特性发生变化来实现减振器阻尼力控制[12]。

它主要基于以下3种工作模式:即流动模式、剪切模式和挤压模式。

(1) 流动模式

在流动模式中,如图3.1(a),磁流变液位于两个相对静止的极板之间,由于装置中的压力差而使磁流变液流动。该压力差可分为与磁场无关的粘性分量 Δp_η 和由磁场引起的屈服应力分量 Δp_r ,其大小近似为

$$\Delta p_\eta = \frac{12\eta QL}{h^3 w} \quad (3.1)$$

$$\Delta p_r = \frac{c\tau_y L}{h} \quad (3.2)$$

式中 η 是磁流变液的零场粘度, Q 为体积流速, L 为极板长度, w 为极板宽度, h 为极板间距, τ_y 是施加的磁场强度 H 引起的动屈服应力。参数 c 的最小值为2(当 $\Delta p_r / \Delta p_\eta$ 小于1时),最大值为3(当 $\Delta p_r / \Delta p_\eta$ 大于100时)。流动模式的总压力差近似为 Δp_η 和 Δp_r 之和。

(2) 剪切模式

在剪切模式中,如图3.1(b),磁流变液位于两个相对运动的极板之间,产生剪切阻力。该阻力可以分为粘性力分量 F_η 和由磁场引起的屈服力分量 F_r ,分别为

$$F_\eta = \frac{\eta v L w}{h} \quad (3.3)$$

$$F_r = \tau_y L w \quad (3.4)$$

式中, v 为极板相对运动速度,其余符号意义同前。由剪切式装置产生的阻尼力为 F_η 和 F_r 之和。

通常将剪切模式和流动模式融为一体就形成混合工作模式。

基于混合工作模式磁流变液减振器的阻尼力为

$$F = A \left(\frac{12\eta QL}{h^3 w} + \frac{c\tau_y L}{h} \right) + \frac{\eta v L w}{h} + \tau_y L w \quad (3.5)$$

式中，A 为活塞作用面积。

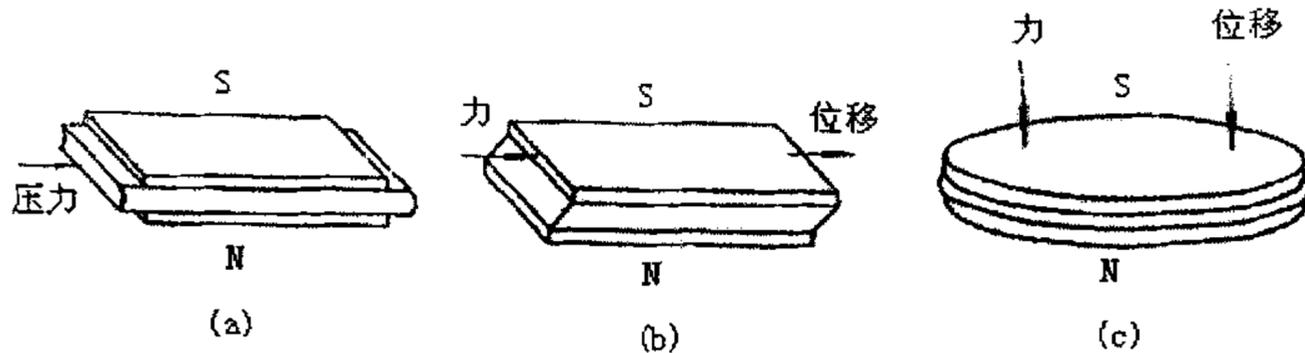


图 3.1 磁流变液减振器的 3 种工作模式

(a) 流动模式

(b) 剪切模式

(c) 挤压模式

(3) 挤压模式

在挤压模式中，如图 3.1(c)，磁流变液位于两个极板之间，一个极板固定，另一个极板相对于它运动，产生挤压效果。

由于流动模式和剪切模式的可调范围宽，可得阻尼力大，以及结构简单等优点而应用和研究最广。工作过程中，平行于磁流变液流动方向的磁力线分量对磁流变效应较小，垂直于磁流变液流动方向的磁力线对磁流变效应作用较大。因此，采用剪切模式和流动模式及混合模式的减振器，磁力线的方向最好垂直于阻尼通道内磁流变液的流动方向。在设计磁流变减振器时应使阻尼通道中的磁流变液的流动方向垂直于磁场方向，以便充分利用磁流变效应来改变减振器的阻尼力[19, 28]。

3.2 磁流变液减振器的结构形式

节流通道的形状和磁场如何作用于节流通道这两个因素决定了磁流变液减振器的结构形式。当前，磁流变液减振器的节流通道一般是环形或节流小孔。磁场方向垂直或者平行于节流通道内流体的流动方向。常见的结构形式有以下三种。

(1) 垂直磁场环形节流通道型

如图 3.2 所示的磁流变液减振器[28]。这种形式的线圈绕在中凹的活塞上。活塞在缸体内往复运动，阻尼通道为活塞与缸筒内壁的环形间隙。线圈产生的磁场沿活塞轴向前进，在活塞端部径向垂直穿过一端阻尼通道，然后再沿缸体折回，垂直穿过另一端的阻尼通道，返回活塞，形成闭合回路。这种减振器的优点是，结构简单，体积小，而阻尼力特别大，并能很好的应用于各种场合。缺点是，不可避免的存在漏磁现象。而且，

由于是混合工作模式，剪切模式的阻尼力远小于流动模式的阻尼力，计算时往往忽略。因此，在理论分析和实验结果上存在一定的误差。但总的来说，这是一种很好的结构。而且在实践中得到了非常普遍的应用。

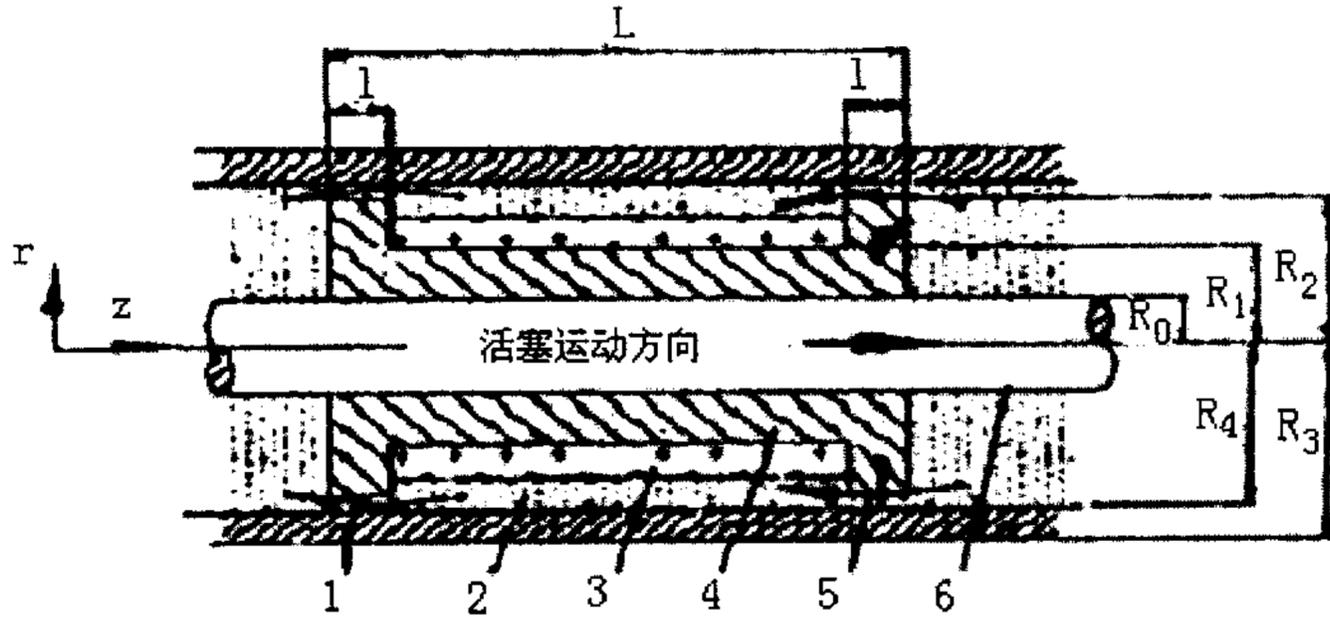


图 3.2 垂直磁场环形节流通道型磁流变液减振器

1.工作缸 2.磁流变液 3.线圈 4.活塞 5.阻尼通道 6.活塞杆

(2) 圆孔阻尼型

如图 3.3 所示的磁流变液减振器[19]。阻尼通道是位于活塞内的节流小孔，活塞内部装有线圈，通过电流以控制磁场的强弱。由于是单杆，因此，左侧有一个蓄能器，用来

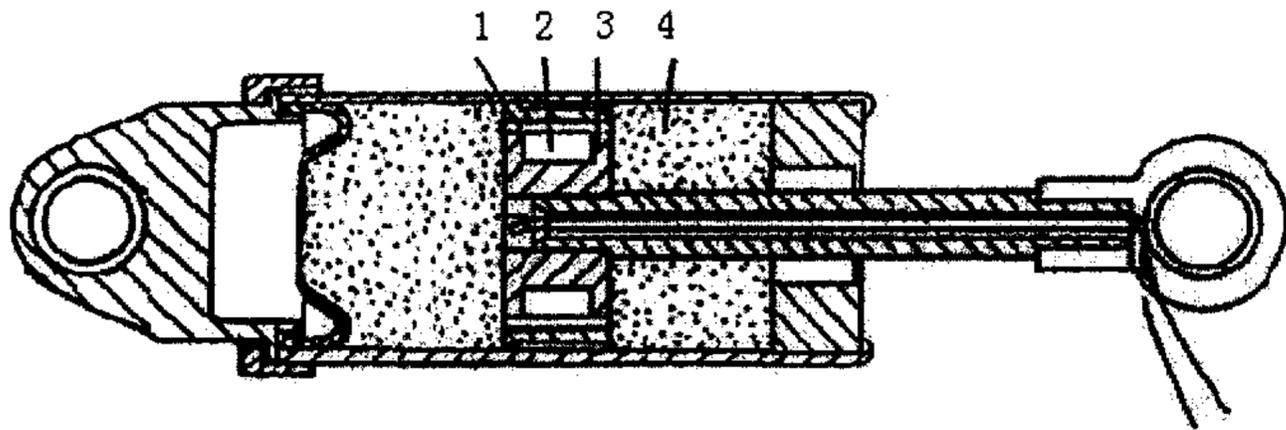


图 3.3 圆孔阻尼型磁流变液减振器

1.阻尼通道 2.线圈 3.活塞 4.磁流变液

来缓冲活塞运动时活塞杆两端液体的体积差造成的冲击，同时，起到减振的作用。这也是一种混合工作模式的减振器。与前一种原理类似，但结构较复杂，实现起来有一定的难度。这也是一种常用的磁流变液减振器。

(3) 旁路式

如图 3.4, 这是一种旁路式的磁流变液减振器[29]。阻尼通道是旁路的环形间隙。这种结构的减振器特点是油缸的技术参数可根据所需的阻尼力大小来设计, 因而可得到较大的阻尼力。但缺点是, 响应较慢, 体积较大, 结构较复杂。

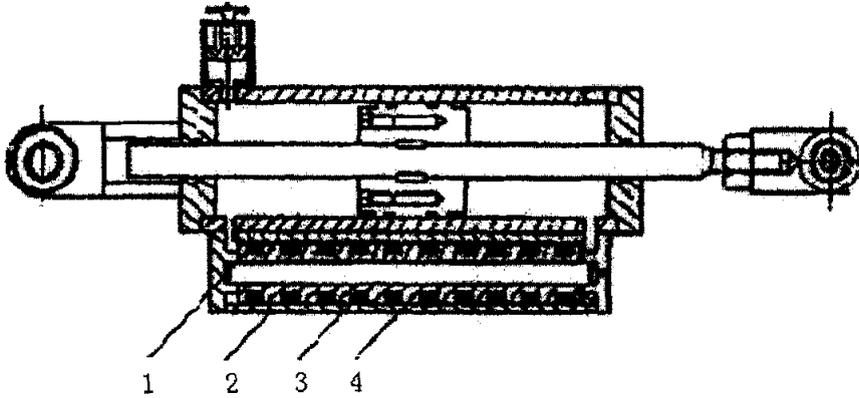


图 3.4 旁路式磁流变液减振器

1. 阻尼通道 2. 缸体 3. 磁芯 4. 线圈

3.3 磁流变液减振器的应用

磁流变液减振器目前已经有比较成熟的应用, 近年来, 人们又不断扩展其应用范围。随着磁流变液技术的提高, 磁流变液减振器也出现了一些新的结构形式, 其性能也不断加以改进。而且, 越来越多的科研人员和单位在从事这方面的工作, 具体说来, 它有以下几个方面的应用。

(1) 磁流变液减振器在汽车上的应用

美国 Lord 公司的 J. David Carlson 及其合作者 Dyke. S. J 研制了一种卡车车座磁流变液减振器, 使卡车车座的振幅降低了 20%~50%, 大大减小了卡车司机在崎岖道路上的危险性[4, 29]。Shtarkman 研制了使用磁流变液的旋转式减振器(吸震器), 可以应用于汽车悬架主动控制系统。将该系统安装于汽车底盘, 经过道路测试, 发现汽车车身振动大大减小, 舒适性(如颠簸、俯仰、横滚)有较大程度的提高。这种减振器在输入电流为 1A 时, 阻力矩可达 5.65~113N·m, 因而可以满足在汽车上应用的要求[23]。

在我国, 重庆大学的廖昌荣, 余淼等人按照长安微型汽车的技术和磁流变液的性能设计和制作了微型汽车磁流变液减振器, 并对它的性能进行了测试。同济大学的张立军等人介绍了应用于汽车工业的结构形式, 以及在制动、传动和减振降噪领域应用的一些器件。比如磁流变液离合器和制动器以及重型汽车座椅悬架系统上的减振器等。他们特

别提出磁流变液发动机悬置主动控制系统。如图 3.5 所示。

研究表明,通过磁流变液主动控制悬置,根据发动机转速信号或者发动机振动的情况进行控制,不仅可以使发动机振动在整个转速范围内大大下降,进而使车内外噪声明显下降,而且可以使发动机体不出现过大的空间位置变动[31]。

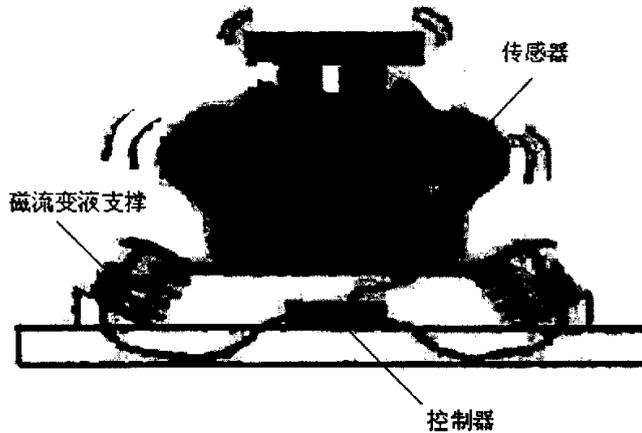


图 3.5 发动机悬置主动控制系统示意图

石家庄铁道学院的申永军等人以磁流变液减振器作为汽车悬架的减振器,研究了一种改进的半主动控制策略在确定性激励和随机激励下的运行效果,研究表明,半主动控制策略的控制效果很好,使汽车的乘坐舒适性显著提高,对安全性和稳定性并没有明显的影响[32]。

其他研究磁流变液减振器在汽车或者机车上的应用的单位还有西安交通大学[33, 34]、江苏大学[35]、上海交大[36]等。

(2) 磁流变液减振器在地震防护中的应用

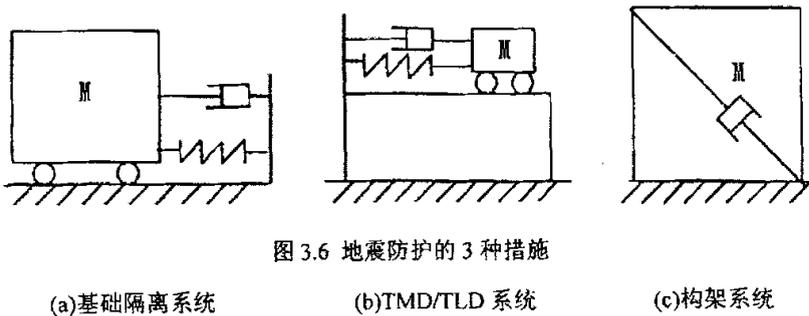
美国 Notre Dame 大学的 Spencer Jr. 教授及 Carlson 等人设计了一种固定阻尼孔磁流变液减振器,由 3V 的直流电压供给 0~1A 的电流用于产生磁场,最大耗能不足 4W,即在普通的干电池供电时,可以连续工作 1 个多小时,可产生 3kN 的阻尼力。通过对建筑物模型进行分析,可以使三层高的建筑物的第三层地板位移响应减少 74.5%,加速度响应减少 47.6%。他们还设计了一种用于建筑物及桥梁地震保护的磁流变液减振器,这个实物模型长 1m,重 250kg。可以产生 200kN(20t)的阻尼力[1]。

我国学者关新春、欧进萍等设计制作了磁流变液耗能器,并试验研究了它的磁场强度、阻尼特性等,为此类耗能器在主动控制中的应用打下了基础[13]。

湖南科技大学的王修勇等人采用数值仿真和现场试验的方式对磁流变液减振器的减振性能进行了研究。数值仿真计算评估了磁流变液减振器安装高度、外部激励、减振

器输入电压等参数对拉索系统模态阻尼比的影响,结果表明磁流变液减振器具有良好的阻尼可调特性,调节减振器的输入电压可以获得拉索系统的最佳模态阻尼比;现场试验表明,安装该减振器后,拉索系统的模态阻尼比提高 3~6 倍,并存在一最优电压值,在该电压下模态阻尼比达到最大;实际风雨振时的现场观测结果显示,磁流变液减振器具有很好的减振效果;拉索磁流变液减振器减振技术已经在岳阳洞庭湖大桥全桥实施,解决了该桥的风雨振问题[37]。

中国民航学院的祝世兴教授将地震防护措施归纳为 3 类:一是基础隔离;二是调谐质量减振器(简称 TMD)或调谐液体减振器(简称 TLD);三是构架系统,如图 3.6 所示。



上述控制策略虽然已在地震工程中得到了成功的应用,但它们也面临着成本,外部动力的可靠性、刚度、机构复杂、频率的响应范围的挑战。如果将图 3.6 中的减振器用 MR 流体减振器取代,上述问题有的就可以应刃而解了。它们不仅可以实现被动控制变为半主动控制,而且还具有动力要求低、能量输出大、高的动力范围、高的刚度和结构简单等优点。MR 流体减振器另一个优点是一旦磁场失效(这在地震中有可能发生的事),仍能保持较好的阻尼性能(零外场时的阻尼性能)[22]。

(3) 磁流变液减振器在医学上的应用

美国 Lord 公司和德国 Biedermann Motech 制造商合作,利用磁流变液人造膝关节减振器生产了修复性假肢[24]。工作原理如图 3.7 所示。人造膝关节减振器和磁流变液减振器的基本原理一致,也是利用减振器缸筒和活塞之间线圈控制的磁场的变化,来改变磁流变液的屈服应力,从而改变活塞和缸筒之间的阻尼力。当线圈输入电压较小时,磁场较弱,阻尼力较小;当磁场输入电压增加时,阻尼力增大。

传统的步进马达控制假肢缺少一定的稳定性,电池和电气控制的磁流变液膝关节机械可在几毫秒内适应了变化的地形,通过传感器和软件控制调整膝关节的运动,给出更好的控制来适应行走速度,下山、重载和轻载,斜坡、楼梯及地形变化,因而提高了安装假肢者走路的稳定性、平衡性并省力。同时由于磁流变液的使用,使减振器的响应速

度得到提高，因而可采用先进的神经网络方法进行实时控制，使人造膝关节能有效地帮助截肢者恢复自然的步伐。

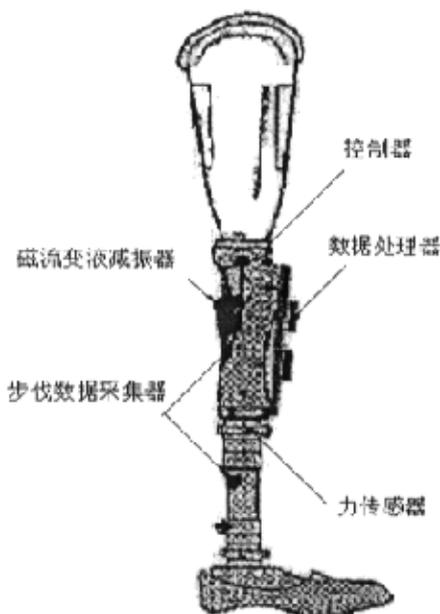


图 3.7 磁流变液减振器用于人造膝关节

(4) 磁流变液减振器在其它方面的应用

磁流变液减振器用于直升飞机旋翼系统的稳定性控制的研究是近年来磁流变液在航空工业领域的新进展。Marathe 将剪切模式磁流变液减振器的 Bingham 塑性模型与旋翼的空气力学模型结合在一起形成一个力学系统模型，用开关控制和线性反馈控制两种方案理论分析减振器的控制效果，发现磁流变液减振器在地面共振稳定性控制方面用开关控制方案能提供充足的阻尼；而在向前飞行时如果空气动力阻尼足够，可使用开关控制，如果需要附加的阻尼，就需要使用线性反馈控制[5]。

美国 Lord 公司的 Carlson 为了降低磁流变液减振器的成本，又提出了一种应用磁流变液的新方法。将吸满磁流变液的海绵状材料置于磁极之间以产生磁流变液效应，可省去复杂的密封结构及工件的精密加工。这样的装置称为磁流变液海绵装置。一种磁流变液海绵减振器正在自动洗衣机上获得应用[5]。

青岛海洋大学的管友海，黄维平针对磁流变液减振器对海洋平台的半主动控制效果进行研究，建立了海洋平台 MR 半主动控制结构的数学模型，提出了基于现代最优控制理论的半主动控制方法，并对磁流变液减振器的性能及恢复力模型进行了介绍，对磁流变液减振器的参数进行了设计，以某典型的固定式导管架平台为算例，数值分析了 MR 减振器对海洋平台主动控制的有效控制，仿真结果表明，采用磁流变液减振器对海洋平

台进行半主动控制能够有效的减小平台的振动响应[14]。

华南理工大学的孙树民，梁启智根据一种具有隔震构造的独桩平台型式，采用半主动磁流变液减振器对其地震反应进行控制。数值计算结果表明：半主动磁流变液减振器可以有效的控制隔震独桩平台在地震作用下的位移响应[38]。

3.4 磁流变液减振器的阻尼力分析和数学模型

描述磁流变液减振器的力学模型主要有非线性 Bingham 塑性模型、非线性双粘性模型、非线性滞回双粘性模型、Bouc-Wen 模型、改进的 Bouc-Wen 模型、非线性粘弹性—塑性模型等[11]。前三种模型的力—速度关系曲线为分段连续的，而后三种模型的力—速度关系曲线为分段光滑的。对图 3.2 所示形式的减振器，下面简单的介绍前 4 种模型。

(1) 非线性 Bingham 塑性模型

在线形减振器的模型上加上屈服力，就可以得到非线性 Bingham 塑性模型。若用 A_p 和 x 分别表示活塞的有效截面积和速度，则体积流速 $Q = A_p x$ 。由式(3.1)和

$$F_d = (\Delta p_\eta + \Delta p_r) A_p, \text{ 令}$$

$$C_{po} = \frac{12\eta L_p A_p}{h^3 w} A_p \quad (3.6)$$

再由 $F_y = \frac{c\tau_y L_p}{8} A_p$ 得阻尼力 F_d 为

$$F_d = C_{po} x + F_y \operatorname{sgn}(x) \quad (3.7)$$

式中， L_p 为活塞表面上磁力线垂直穿过区域的长度， h 为环状间隙得间距，

$$h = \frac{(D_2 - D_1)}{2}, \quad D_1 \text{ 和 } D_2 \text{ 分别为活塞直径和缸筒内径， } w \text{ 为等效极板宽度，}$$

$$w = \pi(D_1 + D_2)/2,$$

C_{po} 为磁场引起的屈服力。

由式(3.7)可以看出，阻尼力由两部分组成，一部分是粘性阻尼力 $C_{po} x$ ，另一部分是库仑阻尼力 $F_y \operatorname{sgn}(x)$ 。该模型假定在屈服前是刚性的，且不流动。因此，当作用于减振器的外力 $f(t) < F_y$ 时，活塞杆的速度为 0，一旦施加到减振器上的力超过了屈服力，材料就是非零屈服应力的牛顿流体了。

(2) 非线性双粘性模型

与 Bingham 塑性模型假定在屈服前磁流变液是刚性的不同, 非线性双粘性模型假定在屈服前和屈服后磁流变液都是塑性的, 但是屈服前的阻尼系数 C_{pr} 应该比 C_{po} 大得多, 如图 3.8(b)所示。

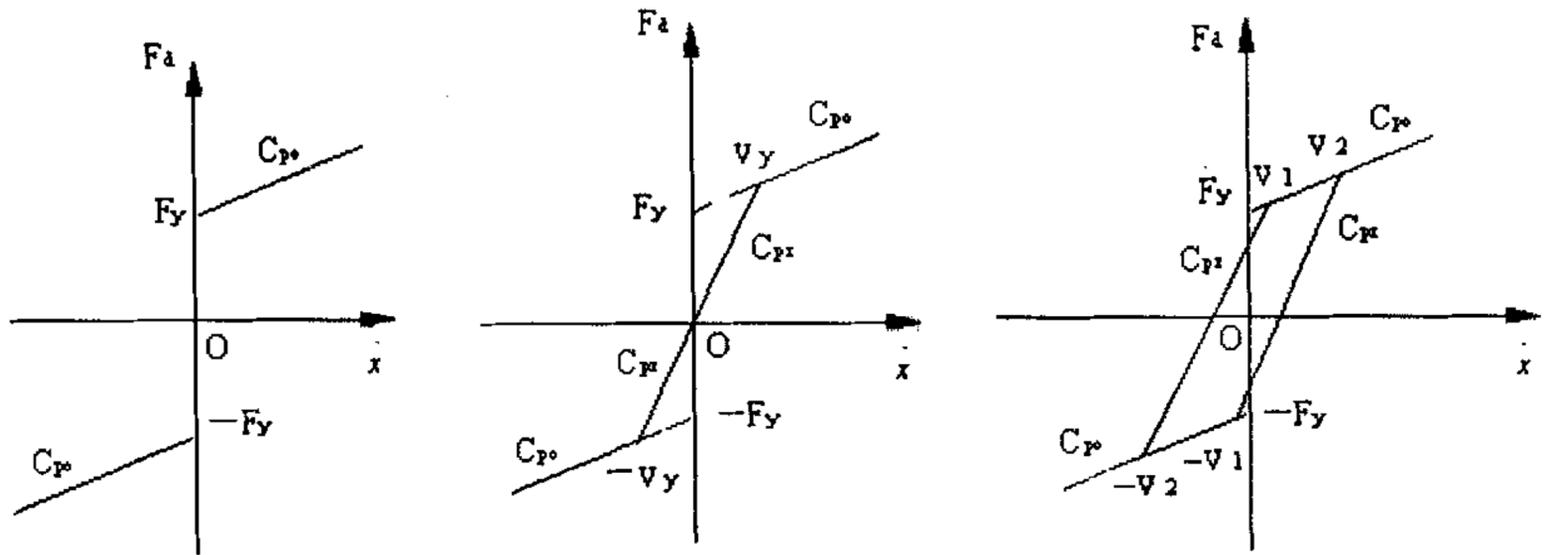


图 3.8 分段连续的非线性减振器模型

(a) 非线性 Bingham 塑性模型 (b) 非线性双粘性模型 (c) 非线性滞回双粘性模型

(3) 非线性滞回双粘性模型

试验研究表明, 减振器的阻尼力-速度关系呈现明显的屈服前滞后现象, 因而在双粘性模型的基础上提出了一种具有 4 个参数的非线性滞回形双粘性模型。这 4 个参数是屈服前的阻尼系数 C_{pr} 、屈服后的阻尼系数 C_{po} 、屈服力 F_y 和阻尼力为零时的速度 v_0 。

阻尼力-速度关系如图 3.8(c)所示:

(4) Bouc-Wen 模型

非线性滞回双粘性模型虽然反映了阻尼力-速度关系的屈服前滞后现象, 但它是不光滑的分段曲线, 与实验观察到的较为光滑的曲线仍有一定的差距。于是, 提出了一种具有光滑过渡曲线的模型来拟和实验结果, Bouc-Wen 模型就是其中的一种。它易于进行数值计算、通用性强、能反映各种滞回曲线并已经广泛应用于滞回系统建模。其计算式为

$$F_d = C_{po} \dot{x} + \alpha_B z \tag{3.8}$$

其中, 渐进变量 z 由下式给出:

$$\dot{z} = -\gamma \left| \frac{\dot{x}}{z} \right| |z|^{p-1} - \beta x |z|^p + A \dot{x} \tag{3.9}$$

通过调节模型的参数 γ , β 和 A , 可以控制回程曲线的线性度以及从屈服前到屈服后转

变阶段的光滑度。 α_B 是控制系统和磁流变液决定的系数,取 $\alpha_B = F_y / Z_0$,式中 Z_0 为 $Z-x$ 关系曲线上回程段与 Z 轴的交点。如图3.9所示。因此式(3.7)又可以写成

$$F_d = C_{po} \dot{x} + F_y \frac{Z}{Z_0} \quad (3.10)$$

比较式(3.7)和式(3.10)可以发现, Bouc-Wen 模型相当于将 Bingham 塑性模型中的符号函数替换为有光滑过渡曲线的滞回形状函数。

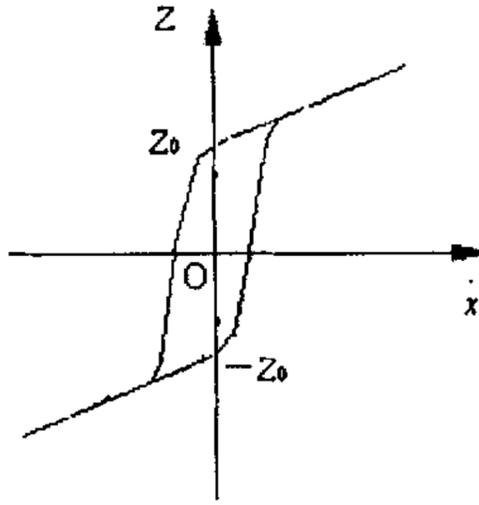


图 3.9 Bouc-Wen 模型

第四章 磁流变液减振器的设计

4.1 结构设计

根据磁流变液的流变特性和液压减振器的特点，作者设计了一种新型的磁流变液减振器。其结构示意图如图 4.1 所示：左端的 1 是联接盘，目的是在做实验时用来固定在试验机的一个夹头上；与此相对的活塞杆的右端固定在试验机的另一夹头上。左右端盖和缸筒组成了减振器的外壳，用双头螺柱连同联接盘一起装配固定。活塞和活塞杆做成一体，可以在缸筒内壁沿轴向运动。活塞中间是空的凹槽，节流孔开在轴向的活塞上，具体结构可见图 4.2。

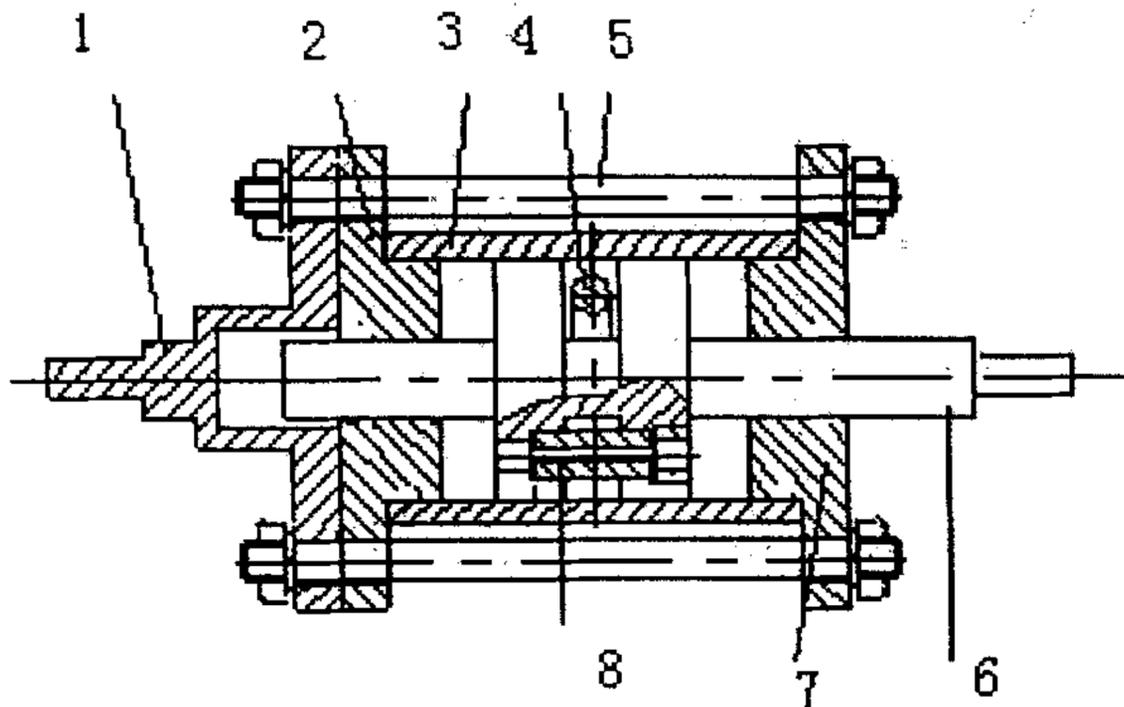


图 4.1 磁流变液减振器的结构示意图

1.联接盘 2.左端盖 3.缸筒 4.磁芯 5.双头螺柱 6.活塞杆 7.右端盖 8.阻尼通道

该课题要达到的试验目的有 2 个，一是试验磁流变液在圆孔阻尼通道内的流变特性；二是试验阻尼孔的大小对减振器性能的影响。这两者就组成了磁流变液减振器的阻尼特性。按照上述的要求，设计的关键是阻尼通道的形式和如何将磁场加到阻尼通道上。

由于在外磁场作用下，磁流变液中的可磁化微粒沿着磁场方向排列成链状结构或网状结构，其流变特性发生了变化，在垂直于磁场的方向上流动特性变化最大。因此，在设计磁流变液减振器时，应使阻尼通道内的磁流变液的流动方向垂直于磁场方向，以便充分利用磁流变效应来改变减振器的阻尼力。

按照第三章所述，阻尼通道一般有两种形式：即环形节流通道的和小孔阻尼通道。从

所掌握的资料来看，节流通道的居多，如图 3.2 所示；也有节流通道的形式，但它们几乎都是同一种结构形式，如图 3.3 所示。因此，设计一种新型结构的磁流变液减振器是有一定意义的。根据前面的分析，该论文设计的双杆小孔节流通道的减振器，其工作原理如图 4.2 所示。

完整的装配图和具体零件图按照机械制图的标准，用 AutoCAD 加以绘制。

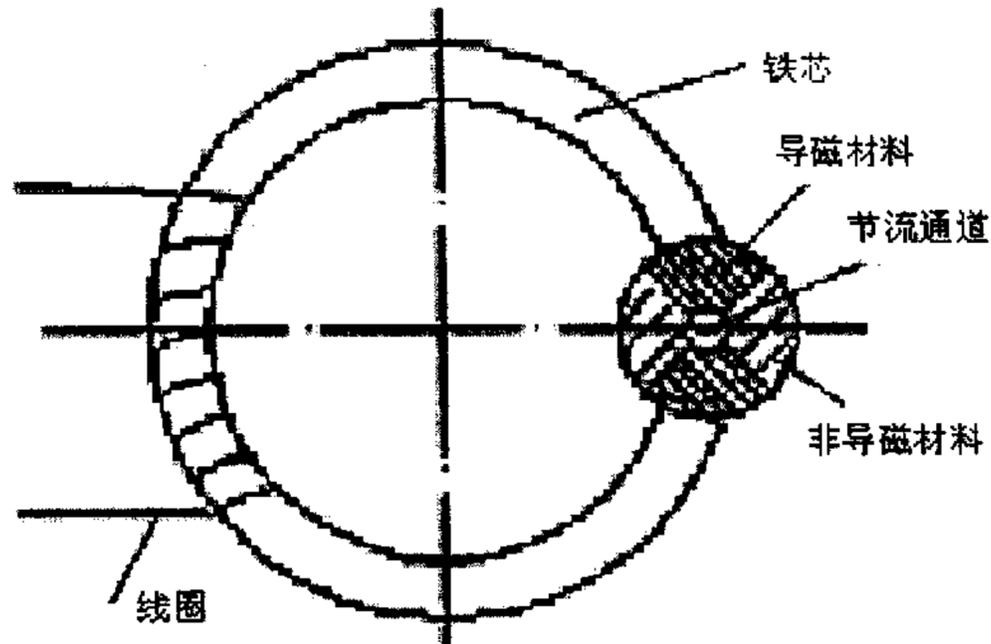


图 4.2 节流通道的示意图

线圈绕在环形铁芯上，匝数一定，置于中空的活塞内。两块导磁材料与另外两块非导磁材料组成柱体，中间的小圆孔是节流通道的入口，直径约为 2~3mm。通电线圈产生的磁场沿环形铁芯进入一块导磁材料，穿过阻尼通道内的磁流变液，再经过另一块导磁材料形成闭合回路。实际上，图 4.2 也是闭合磁路的示意图。在后面的磁路计算中将用到它。这种结构的优点在于：

- (1) 流体沿着节流孔的方向流动，通电线圈产生的磁场从一块导磁材料穿过节流孔内的磁流变液进入另一块导磁材料，因此磁场方向垂直于流体的流动方向。
- (2) 由于整个回路中磁流变液的磁阻最大，因此大部分的磁动势都降落在它上面，整个回路中损失的磁场很少。
- (3) 活塞两端有 O 型橡胶密封圈，导线通过中空的活塞和活塞杆引出，这样就解决了减振器的泄漏和导线的磨损问题。
- (4) 在不加磁场时，可以作为普通流体减振器使用，只是阻尼力比原来较小。这样就增加了减振器的应用范围。

4.2 元件的选择

4.2.1 磁芯和导磁材料的选择

作为磁流变液减振器的磁芯，应该使用软磁材料。其种类较多，有纯铁、硅钢、铁镍系

合金、铁钴系合金、铁铝系合金、磁温度补偿合金、非晶磁性材料、软磁铁氧体等。由于它们的性能相差较大，因此，应用也各不相同。图 4.3 所示的是各种磁芯材料的相对磁导率与磁感应强度的关系曲线[39]。

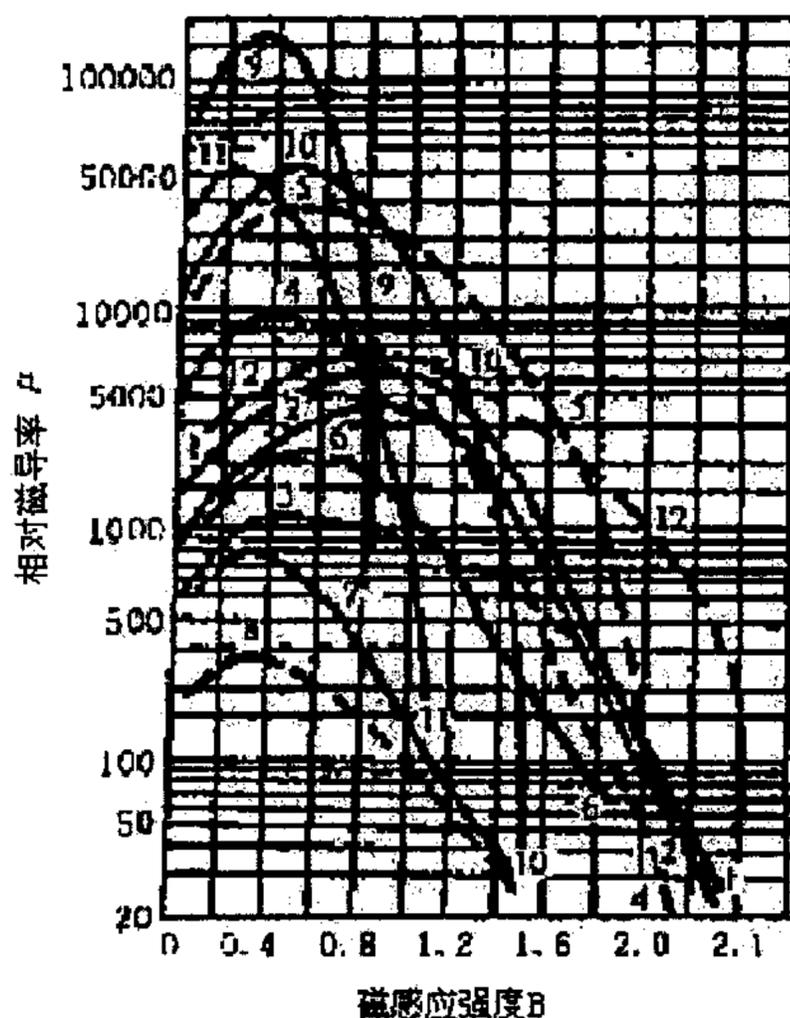


图 4.3 磁芯材料的相对磁导率与磁感应强度的关系曲线

1. 工业纯铁 2. 10 号钢 3. 20 号钢 4. 电工低碳钢 5. 冷轧电工钢 6. 可锻铸铁 7. 灰口铸铁
8. 白口铸铁 9. 坡莫合金(1J79) 10. 坡莫合金(1J50) 11. 坡莫合金(1J54) 12. 钴钢

作为磁芯的材料应该具有以下性能。

(1) 磁导率高。在通电电流产生磁场的情况下，当线圈匝数一定时，通以不大的电流就能产生较强的磁感应强度。一般要求磁流变液减振器的阻尼通道内的磁场强度要达到 $0.3 \sim 0.6T$ ，选择磁芯材料时应将最大磁导率作为主要依据。如图 4.4 是各种材料的磁导率与磁感应强度的关系曲线。

(2) 材料的磁滞回线所包围的面积狭小，矫顽力小，磁滞损耗少。

如图 4.5 是材料的磁滞回线。 $B-H$ 曲线上，每一点的 B 和 H 之比就是该材料在相应 H 值的磁导率 μ ，铁磁质的磁导率不是常数，其相对磁导率 μ_r 也不是常数。当外磁场从 0 开始逐渐增加到饱和点 m 时，材料的磁化曲线如图中 om 所示。如果从饱和点 m 开始减小 H 值，这时的 $B-H$ 关系并非按原曲线 mo 退回，而是沿着它上面的另一条曲线 mr 变化。当 $H=0$ 时， B 并不为 0，而是等于 B_r ，即仍保留一定的磁性， B_r 称为剩磁。

为了消除剩磁，必须加反向磁场，当反向外磁场为 H_c 时， $B=0$ ， H_c 称为矫顽力。从剩磁状态到完全退磁的一段曲线 rc 称为退磁曲线。再加反向磁场，则材料反向磁化，同样达到饱和点 m' 。如果这时减小反向磁场直到 H 为正，则曲线将沿 $m'r'c'm$ 变动，完成一个循环。由此可见， B 的变化总是滞后于 H 的变化，这称为磁滞现象。材料在交变磁场内反复磁化的过程中，其磁化曲线是一具有方向性的闭合曲线，称磁滞回线。磁滞回线狭小即是矫顽力小，磁滞损耗少[40]。

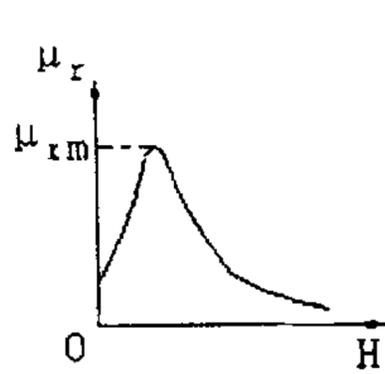


图 4.4 磁导率与磁感应强度的曲线

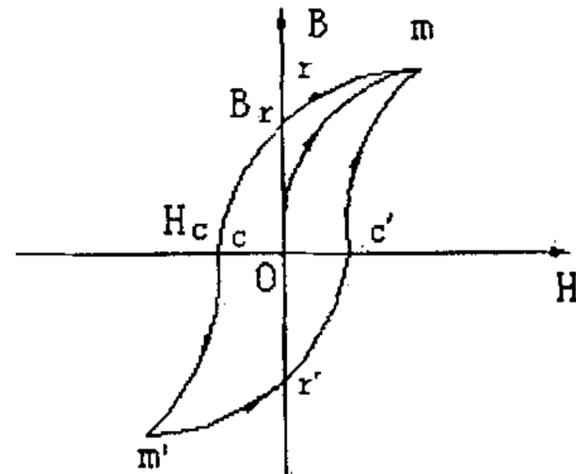


图 4.5 材料的磁滞回线

如上所述，电工纯铁 DT4 不但能满足要求，而且价格便宜，加工性能好，因此选择它作为磁芯材料。同时，选择它作为如图 4.2 所示的节流通路上的导磁材料。

其电磁性能如表 4.1 所示：

表 4.1 DT4 的电磁性能

矫顽力 H_c 不大于 (A/m)	最大磁导率 μ 不小于 (H/m)	磁感应强度 (B/T) 不小于 (T)				
		B200	B300	B500	B1000	B2500
96	7.5×10^{-3}	1.2	1.3	1.4	1.5	1.62

注：B200，B300…发表表示磁场强度为 200A/m，300A/m…时的磁感应强度

其力学性能如表 4.2 所示：

表 4.2 DT4 的力学性能

棒材直径	抗拉强度 σ_b (MP_a)	伸长率 δ_s (%)	收缩率 ψ (%)
≤ 60	265	26	60
> 60	265	24	65

4.2.2 导线的选择

(1) 导线的选择首先要考虑它所能承受的最大电流，不能因为电流过大而使线圈太热，甚至烧毁，因而影响磁感应强度的产生。

(2) 考虑环形导磁材料的公称直径和断面直径，以计算所能缠绕的线圈匝数。

(3) 还要考虑活塞中的安放空间大小，不能因为缠绕后太粗而导致安装困难。

(4) 要考虑导线的磨损问题。由于导线在活塞中有一定的运动，因此，必须保证导线不能因为磨损而漏电甚至短路。

综合考虑以上因素，选择型号为 QQ-1 缩醛漆包铜圆线，规格为 $\Phi 0.34$ ，国标号为 GB6109.3-85。其优点是：抗冲击性优；耐刮性优；耐水解性好。

4.2.3 密封圈的选择

由装配图可以看出，该减振器需要多处密封。但由于减振器腔内设计压力不是很大，所以都选择 O 型橡胶密封圈就可以达到密封效果，而且密封槽容易加工，O 型橡胶密封圈价格便宜，购买方便，装配简单。

由装配图可以看出，活塞杆与上、下端盖的配合需要密封。考虑到活塞杆需要运动，因此将密封槽开在端盖的内孔里。选用国标号为 GB1235-76、规格为 20×2.4 的 O 型橡胶密封圈。

缸筒的内孔与上、下端盖的外圆的配合需要静密封，考虑到加工工艺和装配工艺，因此将密封槽开在端盖配合表面的外圆上。选取国标号为 GB1235-76，规格为 50×3.5 的 O 型橡胶密封圈。

由于将活塞分为两部分，中间放置缠绕线圈的磁芯，而且导线也需要从此处的中空的活塞杆里引出，因此，也需要在活塞两端进行密封。由于缸筒是静止的、活塞是运动的，因此只能将密封槽开在活塞上，此处的密封属于动密封。虽然动密封对材料和配合表面的要求更高，但 O 型橡胶密封圈具有良好的耐磨性，因此，仍然可以选用 GB1235-76，规格为 50×3.5 的 O 型橡胶密封圈。后来的试验结果也表明，这种密封方式可以达到要求。

从装配图上还可以看出，有一处不起眼的地方，但正是这个小地方是对密封要求最严格的。这就是阻尼通道圆柱体两个端面的密封。此处的结构是：阻尼通道圆柱体放在活塞轴向内的阶梯孔中，用一个中空的螺堵头定位。由于阻尼通道圆柱体也是中空的，而且壁很薄，无法在它的外圆上开密封槽；活塞上的阶梯孔与活塞外圆最外端的距离很小，也无法在阶梯孔内表面开密封槽。因此，这里只能进行端面密封。影响此处密封效果的两个主要因素：一是此处由于是阻尼通道，必然压力特别大；二是密封的端面很小，一旦有密封不严的地方，势必会出现泄漏。后来在试验过程中果然出现了泄漏的问题。

解决办法是：拧紧用于定位的螺堵头，使 O 型橡胶密封圈与端面之间紧密接触，没有空隙。或者使用石棉垫片作为密封垫，拧紧就可以了。

4.3 磁流变液的选择

磁流变液的性能直接影响试验的效果。根据目前所掌握的资料来看，国内有三个单位配制过磁流变液，但还没有形成成熟的商品，多数还处于试验阶段。这三家单位是中国科技大学、复旦大学和重庆仪表材料研究所。本试验所用的磁流变液是中国科技大学科技实业总公司研制的 KDC-1 磁流变液。主要负责人员有江万权博士和陈祖耀教授等。其主要性能指标如下。

(1) 主要成分：

羰基铁粉，球形，颗粒大小 $3\sim 10\mu\text{m}$ ，硅油，其它添加物质。

(2) 外观：

灰黑色粘稠液体，有位置差时可以自由流动；无毒或毒性低微，颗粒体积分数约为 30%，密度 $d \approx 1.8 \sim 2.2\text{g/ml}$ 。

(3) 稳定性：

新制备的 MRF 无明显分层、沉降现象，使用时搅拌均匀即可直接使用。长期静置会出现磁性颗粒下沉，搅拌即可恢复分散状态，使用前应尽量搅拌均匀。如果出现下层板结分层现象，需用力搅拌直至全部体系均匀才可使用。材料本身具有很高稳定性，放置一年其性质不会产生显著变化。

(4) 响应特性：

对磁场响应迅速，高磁场下，毫秒级可以达到最大屈服应力。

(5) 温度特性：

使用温度范围为： $-40\sim 150^\circ\text{C}$ 。在温度较低时，具有相对较大的初始粘度；温度较高时，屈服应力略有下降。

(6) 流变性能：

其特性曲线包括剪切应力—剪切率的关系曲线、剪切应力—磁感应强度曲线、无外加磁场时塑性粘度—剪切率的关系曲线、磁流变液感应磁场—外磁场关系曲线。

图 4.6 和图 4.7 分别是剪切应力对剪切率的关系曲线和剪切应力对磁感应强度曲线。

其中图 4.7 中的曲线 1 是 KDC-1MRF 曲线，曲线 2 是 LORD 公司 MRF-132LD 曲线。二者比较，发现在同样大小的磁感应强度下，KDC-1MRF 的动态剪应力比 MRF-132LD 的稍大，说明它的磁流变效应稍强。

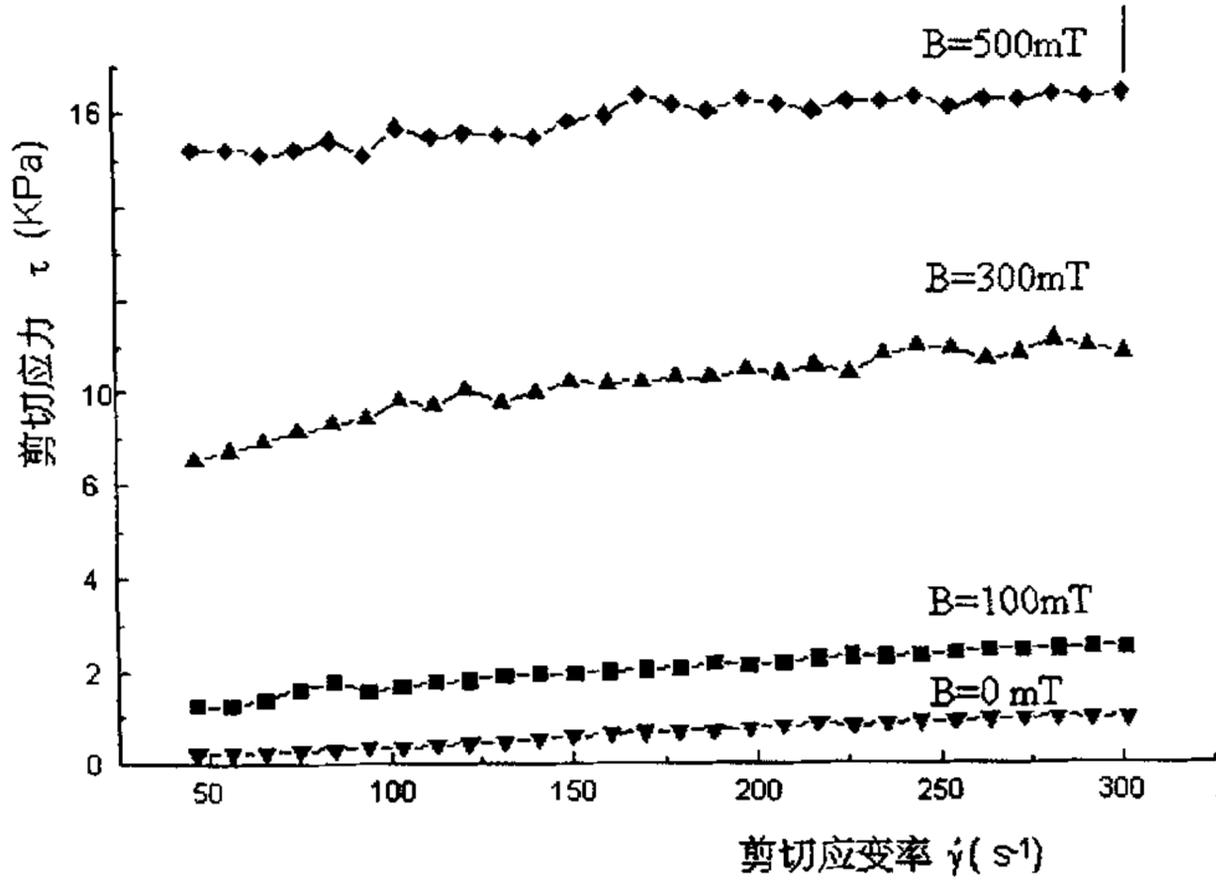


图 4.6 KDC-1 MRF 剪切应力对剪切率关系曲线

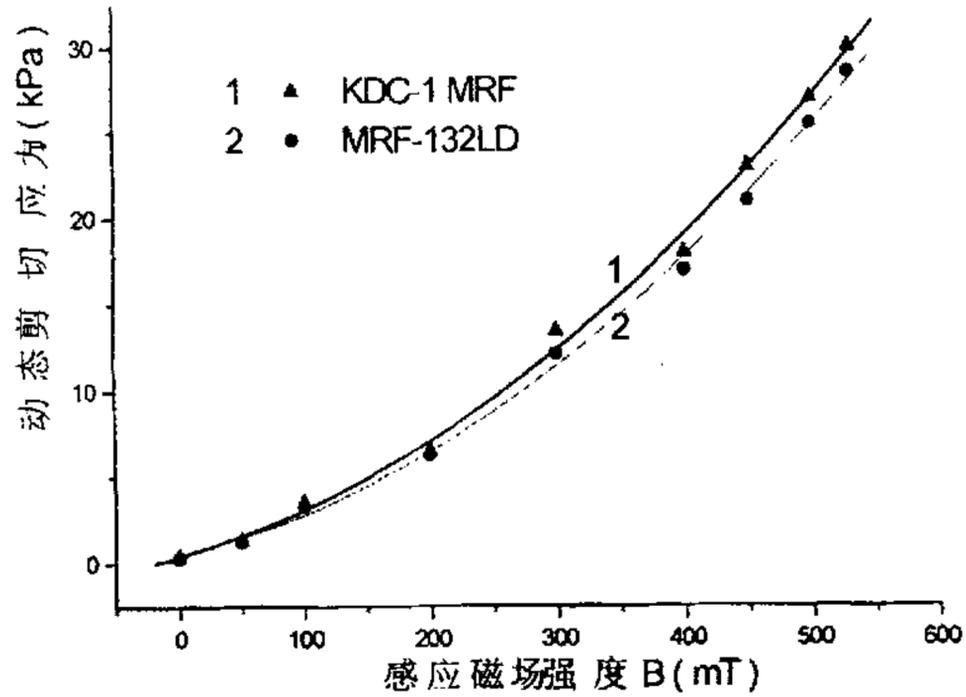


图 4.7 KDC-1 和 LORD 公司产品剪切应力与磁感应强度关系

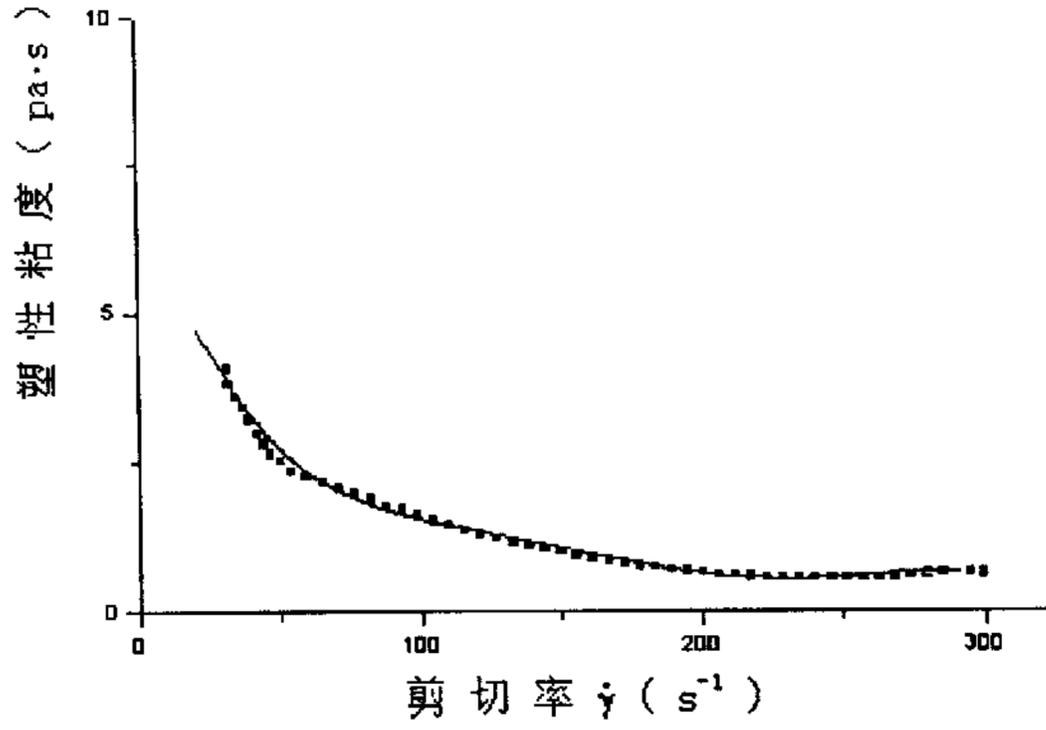


图 4.8 无外加磁场时塑性粘度与剪切率的关系

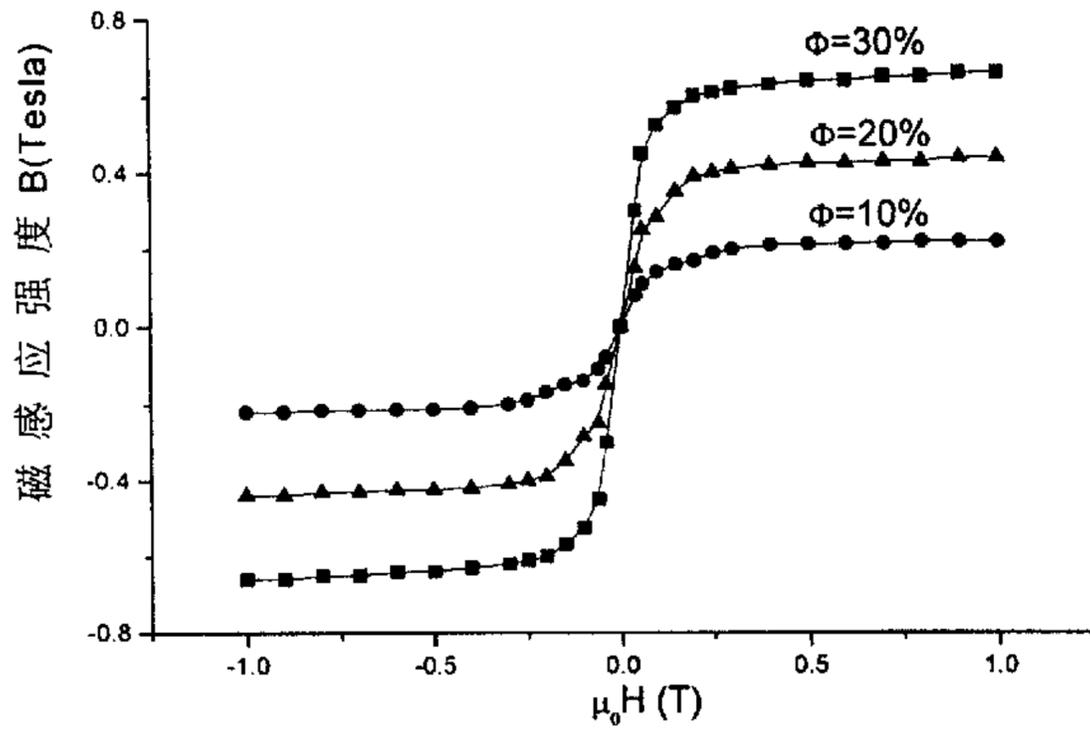


图 4.9 KDC-1 磁流变液感应磁场与外磁场关系

第五章 实验过程与结果

5.1 实验过程

5.1.1 组装减振器

按照装配图上所列的明细表,将需要加工的零件加工完成,购全所需的标准件,准备好工具后,就可以组装减振器了。

首先将线圈缠绕在磁芯上。缠绕时要保证线圈缠绕均匀,紧密。由于是手工缠绕,因此,此工序稍显复杂。磁芯的公称直径是 D 为 34mm,端面直径是 D_0 为 8mm,导线的直径是 d 为 0.32mm。根据公称直径可得磁芯的内周长

$$l = 2\pi\left(\frac{D}{2} - \frac{D_0}{2}\right) = 2\pi \times 13 \approx 81\text{mm}$$

由于磁芯是开口的,所以不会在它上面完全缠满线圈。去掉开口端的约 11mm 的长度,因此,最多可以缠绕的匝数为:

$$n = \frac{81-11}{0.32} \approx 218$$

实际缠绕 180 匝。

缠绕完成后可以用胶布将导线固定在磁芯上,使其不致松散脱落。将导线的两端头从中空的活塞杆引出,注意不要将导线的包漆磨损,以免引起漏电。然后把磁芯放入活塞的凹槽内,将阻尼通道圆柱体沿轴向的阶梯孔插入,同时穿过磁芯的开口,磁芯的开口卡住阻尼通道圆柱体,再用定位螺堵头将阻尼通道圆柱体压紧(期间应放入密封垫片),这样就同时解决了阻尼通道圆柱体和磁芯的定位问题。实验过程证明,这种定位方式牢固可靠,而且拆装方便,易于更换。

其余的装配工作比较简单,将 O 型橡胶密封圈套入密封槽内,然后将活塞装入缸筒内(安装前先在活塞和缸筒内壁上涂抹润滑油),再装上端盖(或下端盖),安双头螺栓、垫片、螺帽,然后装下端盖(或上端盖),拧紧螺帽将两个端盖压紧。这样减振器的整体外观就安装完毕。

在向内腔灌注磁流变液时,为了使内部的空气完全排出,应先将活塞运动到最低端,从上端盖的排气孔慢慢注入磁流变液,灌满后用螺塞封口。再将活塞慢慢拉回至减振器内腔的中间位置就可以了。

上端盖在上面留一个排气孔,它既可以作为磁流变液的注入口,也可以作为磁流变液的排放口。实验完成后,将活塞拉至最低端,卸下螺塞,就可以将磁流变液倒出。

5.1.2 实验原理

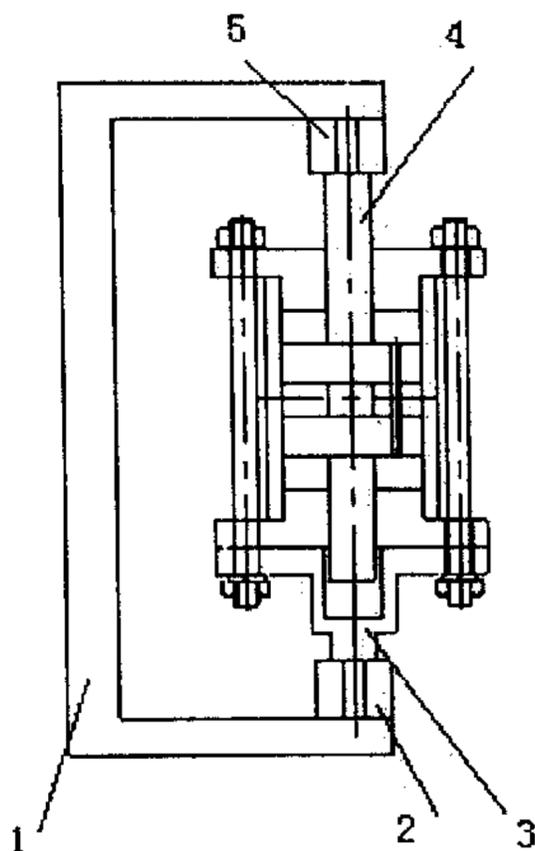


图 5.1 试验原理图

1.试验机悬臂 2.下夹头 3.联接盘 4.活塞杆 5.上夹头

如图 5.1 所示的是该试验的原理示意图。试验机的上、下夹头分别装卡活塞杆和联接盘。由于缸筒和联接盘固定在一起，因此，当输入激振力后，活塞与缸筒产生相对运动。调节输入的振幅、频率等因素，即可得到阻尼力的试验数据以及试验曲线等。

5.1.3 实验前的准备工作

(1) 电源的准备

该实验应该采用稳定的直流电源产生磁场。因为交流电的大小时刻改变的，而方向也是交变的，因此会产生交变的磁场，这样就不能使磁流变液的流变特性处于稳定状态。

该实验所用的直流电源最大输出电压为 32V，最大输出电流是 3A。实验时，将从磁流变液减振器中引出的导线分别接电源的正负极，在回路中还需要串联一个阻值为 3Ω 、最大功率是 12W 的电阻，以消耗整个回路中的产生的热量。

实验过程中要加的电流大小分别设定为为 0、0.5、1.0、1.5A。由于磁场强度的大小只与电流强度的大小有关，因此只要从直流电源输出一个稳定的电流值就可以了。先准备一个万用表，在加电流之前测得输出电流值，然后在将电路接通，就可以在磁流变液减振器的阻尼通道内得到一定的磁感应强度。

实验过程中有一个剩磁的问题，即上一次的磁场不会随电流的阻断而立即消失。解决办法是加反向磁场或者停顿较长的一段时间后再加磁场。

(2) 保存实验数据

由于要测得多组数据，因此不能将数据混淆。

先进行节流孔直径是 3mm 的试验，要加的振幅为 0.5mm、1mm、2mm、4mm 等，要加的频率分别为 0.1Hz，0.2Hz，0.5Hz，1Hz，2Hz，4Hz 等，然后在不同的振幅和频率组合下，加不同的电流。实验完成一次，保存其数据。

再进行节流孔直径是 5mm 的试验，加不同的振幅、频率和电流值。保存所有的实验数据，最后整理分析。

文件的命名分别如表 5.1 所示：

表 5.1 直径为 3mm 的节流孔的实验数据文件名

		振幅			
		0.5mm	1mm	2mm	4mm
频率	电流				
	0.1Hz	0			qq012
0.5A				qq512	qq514
1A				qq1012	qq1014
1.5A				qq1512	
0.2Hz	0	C0502	C1002	qq022	qq024
	0.5A	C050205	C100205	qq522	qq524
	1A	C050210	C100210	qq1022	qq1024
	1.5A			qq1522	
	2A	C050220	C100220		
0.5Hz	0	C0505	C1005	qq052	qq054
	0.5A	C050505	C100505	qq552	qq554
	1A	C050510	C100510	qq1052	qq1054
	1.5A			qq1552	
	2A	C050520	C100520		
1Hz	0	C0510	C1010	qq102	qq104
	0.5A	C051005	C101005	qq5102	qq5104
	1A	C051010	C101010	qq10102	qq10104
	1.5A			qq15102	

	2A	C051020	C101020		
2Hz	0	C0520	C1020	qq202	qq204
	0.5	C052005	C102005	qq5202	qq5204
	1A	C052010	C102010	qq10202	qq10204
	1.5A			qq15202	
	2A	C052020	C102020		
4Hz	0	C0540	C1040		
	0.5	C054005	C104005		
	1A	C054010	C104010		

5.1.4 实验步骤

- (1) 启动 INSTROR 8801 疲劳试验机, 启动应用程序 SAX(Single Axis MAX);
- (2) 装夹磁流变液减振器, 调整平衡位置;
- (3) 输入一组振幅和频率值, 设定振动循环次数, 开始试验;
- (4) 一组循环结束后, 保存实验数据和图像;
- (5) 设定直流电源的输出电流值, 接通电流回路, 重复步骤(3)和(4);
- (6) 改变直流电源的输出电流值, 重复步骤(3)和(4)。

5.2 实验结果

实验数据的保存方式有三种: 位移-阻尼力曲线; Excel 格式的数据, 记录了所有实验过程中的时间间隔、位置和负载(阻尼力)的大小与方向; 记事本格式的数据, 包括循环次数、每个循环内的最大和最小位置以及最大和最小负载(阻尼力)等。

(1) 数据处理

实验过程中可以在显示器上显示每一个循环内的阻尼力-位移曲线, 但是以图像形式存在的, 可以得到直观印象。

从 Excel 文件中取一个稳定的周期值, 绘制其位移-阻尼力曲线图。仅从曲线的变化来看, 在振幅和频率一定的条件下, 加磁场前后, 阻尼力有了非常明显的变化。如图 5.2 所示, 节流孔直径为 3mm 的减振器, 其振幅设定为 2mm, 频率是 0.1Hz, 不同电流时的曲线图。系列 1、2、3、4 分别是电流为 0、0.5A、1A、1.5A 时的实验曲线。由图可见, 加磁场后整个曲线所包围的面积显著增大, 增大了约为 50%。随着电流的增大, 到 1A 后曲线所包围的面积也虽然也逐渐增大, 但增加量很小, 说明基本达到磁化饱和程度。再加大电流, 曲线也不会发生变化。

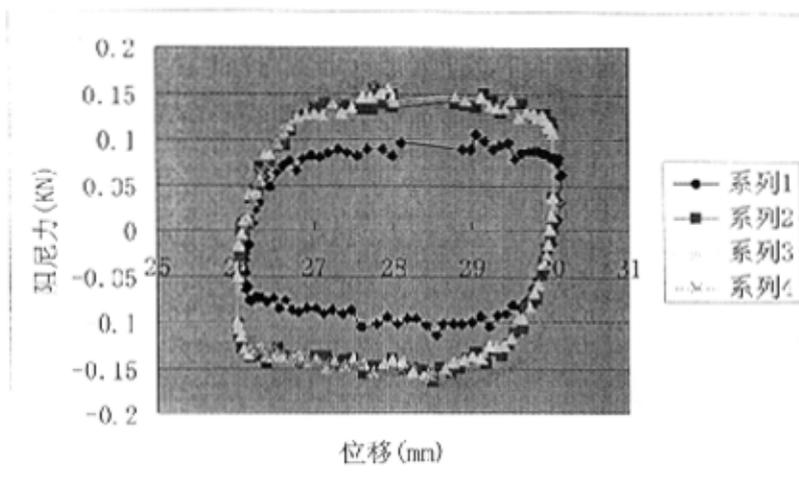


图 5.2 振幅为 2mm、频率为 0.1Hz、电流分别为 0、0.5A、1A、1.5A 时的曲线图

1.电流为 0 2.电流为 0.5A 3.电流为 1A 4.电流为 1.5A

图 5.3 所示的为振幅是 2mm，频率是 0.2Hz，电流分别为 0、0.5A、1A、1.5A 的一组实验曲线。

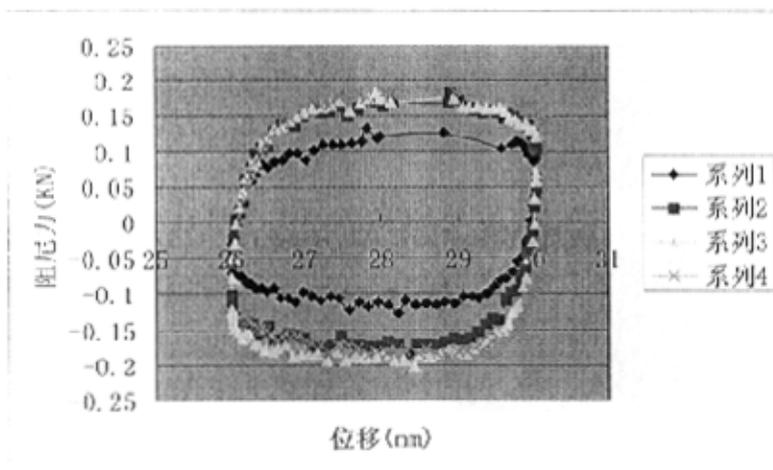


图 5.3 振幅为 2mm、频率为 0.2Hz、电流分别为 0、0.5A、1A、1.5A 时的曲线图

1.电流为 0 2.电流为 0.5A 3.电流为 1A 4.电流为 1.5A

与上图类似，加磁场前后，阻尼力也发生了明显的改变，增大了约为 40%，但没有上图的变化量大。两图比较，不同的只是频率的变化，说明在频率增大时，磁流变效应有所减弱。

图 5.4 所示的为，振幅是 2mm，频率是 0.5Hz，电流分别为 0A、1A、1.5A 的一组实验曲线。

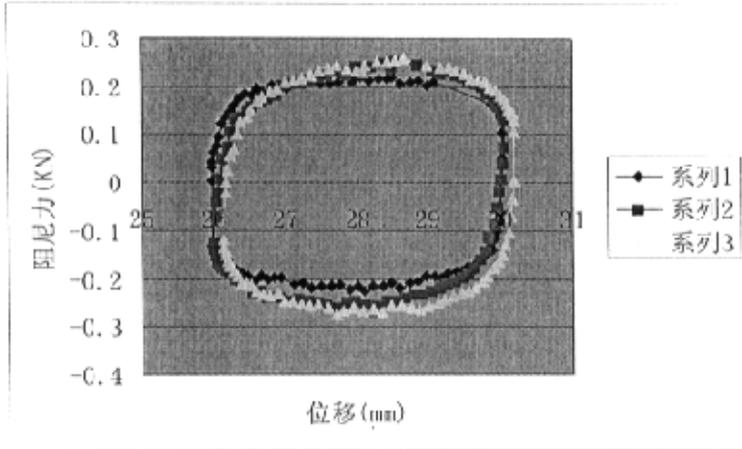


图 5.4 振幅为 2mm、频率为 0.5Hz、电流分别为 0、1A、1.5A 时的曲线图

1.电流为 0 2.电流为 1A 3.电流为 1.5A

由图可见，当频率增加后，磁流变液减振器的阻尼力只增加了很小一部分，而且随电流的变化，阻尼力也没有发生明显的变化。说明在较高的频率时，磁流变液减振器的阻尼效果较差。但如果不加磁场，仍然可以作为普通流体减振器使用。

图 5.5 所示的为振幅 2mm，频率是 1Hz，电流分别为 0、1A、1.5A 的一组实验曲线。

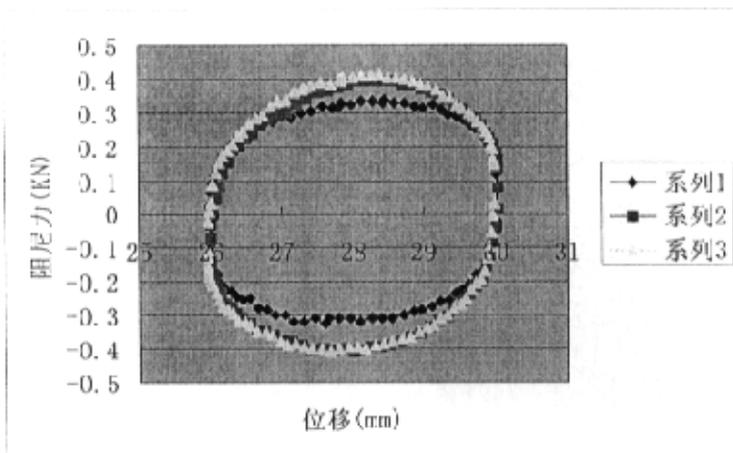


图 5.5 振幅为 2mm、频率为 1Hz、电流分别为 0、1A、1.5A 时的曲线图

1 电流为 0 2 电流为 1A 3 电流为 1.5A

(2) 其余两种格式的数据，由于较多，在此不一一列举。

5.3 小结

通过对该磁流变液减振器的试验发现：不论是加磁场前还是后，节流孔的尺寸大小对阻尼力的变化影响最大。在节流孔直径为 3mm 时，磁流变液减振器的阻尼力很大，而且随着频率、振幅和磁场的变化都有很大的变化；而当节流孔直径为 5mm 时，减振器的阻尼力变得小，节流孔几乎不起作用，随着频率、振幅和磁场的变化，其阻尼力的变化也很微小。说明节流孔直径在 3mm 以下时，该减振器的才有较好的作用效果。这对于以后在设计类似减振器是提供了参考价值。

其它影响阻尼力的因素有：频率和振幅的变化、磁场的强弱、振幅的大小以及零件的加工精度等。

当振幅一定时，频率的增大会使阻尼力增大；同样，频率一定时，振幅的增大也能使阻尼力增大。

加磁场后，阻尼力发生明显的变化，而且还随磁场的增大而增大，但是达到磁化饱和以后，磁场的变化对阻尼力已经几乎没有影响。

零件的加工精度对阻尼力也有一定的影响，活塞和缸筒之间的摩擦力以及活塞杆与上下端盖之间的摩擦力都对阻尼力有一定的影响。因此，在以后的设计和试验中应该注意，提高零件的加工精度，以降低摩擦力，增加减振器的使用寿命。

通过对实验数据的比较和总结，发现当振幅在 2mm 左右，频率在 0.1Hz 和 0.2Hz 时，该磁流变液减振器的变阻效果非常好，加磁场后，阻尼力可以增加 50% 左右。当频率增加到 0.5Hz 直至 1.0Hz 时，该减振器的变阻效果就比较差，只改变了 10~20%。原因是磁流变液的内部颗粒在高频时散乱无序，不能形成有效的柱状或者网状结构，因此磁流变效应减弱。这说明在一定振幅和频率范围内，磁流变液减振器的磁流变效应非常明显；除此之外，由于受到上述因素的影响，磁流变效应较弱。对于不同种类的磁流变液，其最佳的工作条件和范围应由实验确定，具体问题有待于进一步探讨。

第六章 建模与仿真

6.1 磁场强度的计算

由于一切物质都是磁介质，弱磁性材料和强磁材料的磁导率相比只相差 $10^{-3} - 10^{-4}$ 倍，因此某些磁路的漏磁通的数值有时可占到总磁通的20%以上，因而漏磁通的计算往往使磁路计算复杂化；另外，磁路的磁阻不是定值，它的变动范围极大，铁磁材料的磁导率是一变值，最大磁导率和起始磁导率可相差约50倍；再从磁滞现象来看，磁导率的大小和磁化的过程也有所不同。这些问题使磁路的计算很困难，精确度也不易很高。在工程上只能对磁化曲线和磁阻等作一定的假设和忽略。

对于每一种强磁性物质来说，如果外加磁化场强 H 一定，那么它具有的磁感应强度 B 也一定。单位磁场强度在物质中所产生的磁感应强度，即 $\mu = \frac{B}{H}$ 叫做绝对磁导率。它是磁化曲线上任一点 B 和 H 的比值，也就是该点与坐标原点连线的斜率。绝对磁导率表示物质磁化的难易程度。真空绝对磁导率通常以 μ_0 表示，在国际单位制中是 $4\pi \times 10^{-7} H/m$ ，物质的绝对磁导率与真空绝对磁导率之比叫做相对磁导率 μ_r 。

如图4.2所示的串联磁路，根据磁路的欧姆定律，磁动势等于各部分的磁压降之和，即

$$iN = \sum H_i l_i \quad (6.1)$$

i 为通电电流， N 为线圈匝数， H_i 为各材料内的磁场强度， l_i 为回路内各材料的长度。

$$\text{又 } B_i = \mu_i H_i, \quad B_i = \frac{\Phi_i}{S_i}$$

忽略漏磁，则串联回路内的磁通量相同。所以式(6.1)又可以写为

$$iN = \Phi \sum \frac{l_i}{\mu_i S_i} \quad (6.2)$$

根据设计的具体数值，分别计算，得

$$l_1 = \pi D - 10 = \pi \times 34 - 10 \approx 97 \text{ mm}$$

$$l_2 = 5 - 0.75 = 4.25 \text{ mm}$$

$$l_3 = 1.5 \text{ mm}$$

$$S_1 = \pi d^2 / 4 = \pi \times 8^2 / 4 \approx 50 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = S_3 \approx \pi d_0^2 / 4 = 24 \times \pi \times 3 / 4 \approx 56 \text{ mm}^2$$

从 KDC-1 曲线上可以看出, 当外磁场强度 $\mu_0 H$ 约为 0.2T 时, 磁感应强度趋于饱和, 此时 $B=0.45\text{T}$, 得

$$H = \frac{0.2}{4\pi \times 10^{-7}} = 1.59 \times 10^5 \text{ A/m}$$

所以此时的磁导率为 $\mu_3 = B/H = 0.45/1.59 \times 10^5 = 2.83 \times 10^{-6} \text{ H/m}$ 可得

$$\text{节流通道内 MRF 的磁阻 } R_3 = \frac{l_3}{\mu_3 S_3} = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{2.83 \times 10^{-6} \times 56 \times 10^{-6}} = 9.46 \times 10^6 / \text{H}$$

$$l_1 \text{ 段的磁阻 } R_1 = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} = \frac{97 \times 10^{-3}}{7.5 \times 10^{-3} \times 50 \times 10^{-6}} = 2.59 \times 10^5 / \text{H}$$

$$l_2 \text{ 段的磁阻 } R_2 = \frac{l_2}{\mu_2 S_2} = \frac{4.25 \times 10^{-3}}{7.5 \times 10^{-3} \times 56 \times 10^{-6}} = 1.0 \times 10^4 / \text{H}$$

又因为 Φ 相同, 所以 $\Phi = B_2 S_2 = 0.45 \times 56 \times 10^{-6} = 2.52 \times 10^{-5} \text{ Wb}$

所以整个回路中的磁动势为

$$iN = \Phi \Sigma R_i = 2.52 \times 10^{-5} \times (9.46 \times 10^6 + 2.59 \times 10^5 + 2 \times 2.52 \times 10^4) = 246 \text{ A}$$

所以, 当线圈缠绕 180 匝时, 可以施加电流 $i = 246/180 = 1.37 \text{ A}$

此时, 已达到磁化饱和, 若继续加大电流, 则阻尼通道内的磁场强度几乎不发生变化。

6.2 阻尼力的计算

6.2.1 频率为 0.2Hz 时的阻尼力

(1) 未加磁场的阻尼力

在未加磁场时, 作为普通流体减振器, 其阻尼力计算公式为:

$$Q \approx \xi \frac{\rho A^3}{2A_0^2} v^2 \quad (\text{kgf}) \quad (6.3)$$

式中, ξ —阻力系数, 油液减振器的阻力系数一般为 $\xi = 2 - 2.5$;

ρ —油液密度; A —活塞有效面积; A_0 —节流孔面积; v —活塞的相对运动速度

取 $\xi = 2.5$ ，油液密度 $\rho \approx 2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ；

计算得 $A = 1.75 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ，

$$A_0 = 7.06 \times 10^{-6} \text{ m}^2，$$

实验中得到的阻尼力，是流体产生的阻尼力和摩擦力之和。由于该减振器的加工条件有限，各零件的配合面没有进行磨削，因而表面较粗糙，缸筒内壁和活塞之间的摩擦力以及上、下端盖和活塞杆之间的摩擦力都比较大；另外活塞上的密封圈与缸筒内壁配合较紧密，因此，使得它们之间的摩擦力也非常大。

当 $f=0.2$ 时， $Q = 1.7 \text{ kg} = 16.6 \text{ N}$ 。

从实验结果来看，取 10 个循环的最大值，总阻尼力的平均值为

$$\begin{aligned} f_{\max 1} &= (0.111 + 0.110 + 0.112 + 0.109 + 0.109 + 0.110 + 0.110 + 0.118 + 0.108 + 0.112) / 10 \\ &= 0.1109 \text{ KN} = 110.9 \text{ N} \end{aligned}$$

所以此时得到摩擦阻力约为 94.3N。

(2) 加磁场后的阻尼力

由前所述，由于磁场的作用，阻尼力为

$$F = \frac{12\eta l A^2}{r^3 w} x(t) + \frac{c \pi l}{r} A \operatorname{sgn}(x) + \pi l w + f \operatorname{sgn}(x) \quad (6.4)$$

上式右端第一项是由于磁流变液的流动模式的阻尼力，第二项是由于磁场的作用而使阻尼力产生的改变量，第三项是剪切模式的阻尼力，第四项是摩擦力。由于第二项比第一项小的多，因此可以忽略不计。

式中，A 为活塞的有效面积， $A = 1.75 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

τ 为此时的磁流变液剪切屈服应力，

由曲线图 4.7 查得 $\tau = 8.3 \times 10^3 \text{ Pa}$

r 为节流孔的半径，

$$r = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}，$$

l 为阻尼通道的长度， $l = 24 \times 10^{-3} \text{ m}$

w 为节流孔的周长， $w = 9.42 \times 10^{-3} \text{ m}$

c 为阻尼系数，根据节流孔的形状和大小由试验结果来确定。

在频率为 0.2Hz、振幅为 2mm、电流的值为 0.5A 时，

由实验结果得到的总阻尼力约为

$$F_1 = (0.167 + 0.165 + 0.165 + 0.165 + 0.165) / 5 = 0.1654 \text{ KN} = 165.4 \text{ N}$$

所以 $\Delta F_1 = 165.4 - 110.9 = 44.5N$

将各设计数值代入(6.4)式, 得阻尼系数 $c = 0.19$ 。

6.2.2 频率为 0.1Hz 时的阻尼力

由实验得到, 加磁场前的最大阻尼力约为 0.093KN, 加 0.5A 的电流后, 减振器的最大阻尼力约为 0.145KN。增加约为 0.52KN。

6.2.3 频率为 0.5Hz 时的阻尼力

加磁场前的最大阻尼力约为 0.232KN, 加 1A 的电流后, 减振器的最大阻尼力约为 0.270KN。增加约为 0.038KN。

6.2.4 频率为 1.0Hz 时的阻尼力

加磁场前的最大阻尼力约为 0.365KN, 加 1A 的电流后, 减振器的最大阻尼力约为 0.398KN。增加约为 0.033KN。

6.3 仿真

应用 MATLAB 中的 Simulink, 进行仿真, 得到频率为 0.2Hz 时、加磁场前后的曲线图, 如图 6.1 所示。图 6.2、6.3、6.4 分别为频率为 0.1Hz、0.5Hz 时、1.0Hz 时、加磁场前后的仿真曲线图。

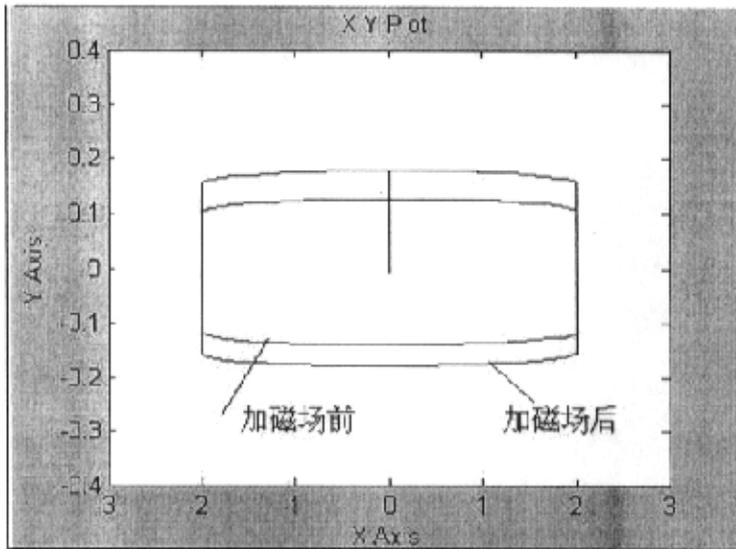


图 6.1 频率为 0.2Hz 时的仿真曲线图

横轴 x 表示位移, 单位 mm; 纵轴 y 表示阻尼力, 单位 KN。

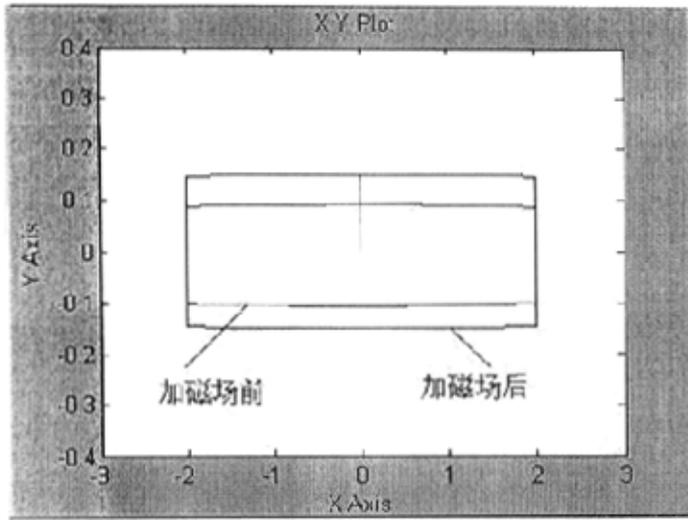


图 6.2 频率为 0.1Hz 时的仿真曲线图

横轴 x 表示位移，单位 mm；纵轴 y 表示阻尼力，单位 KN。

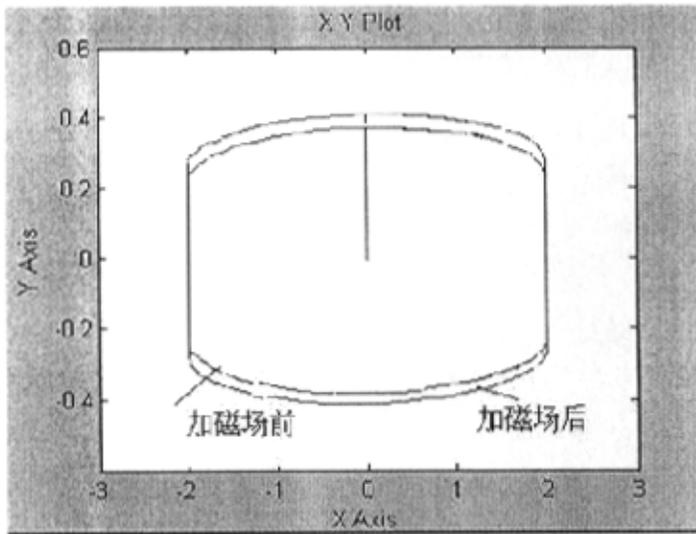


图 6.3 频率为 0.5Hz 时的仿真曲线图

横轴 x 表示位移，单位 mm；纵轴 y 表示阻尼力，单位 KN。

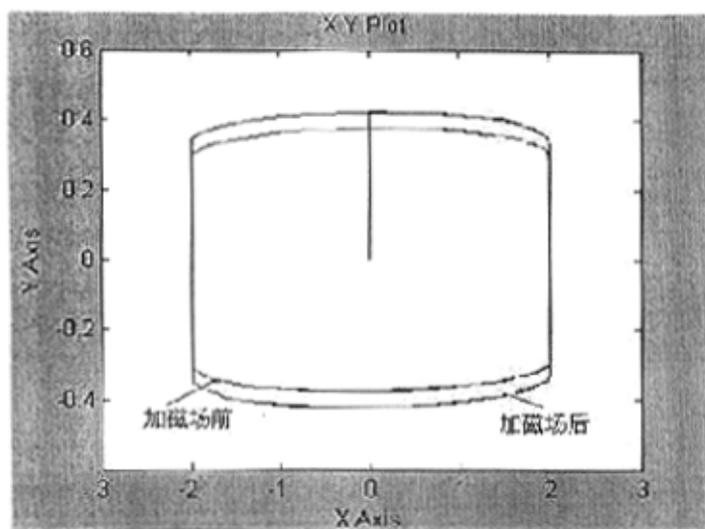


图 6.4 频率为 1.0Hz 时的仿真曲线图

横轴 x 表示位移，单位 mm；纵轴 y 表示阻尼力，单位 KN。

结 论

(1) 设计一种新型的垂直磁场圆孔型磁流变液减振器。其主要特点是：节流通道的节流孔，磁场方向垂直于节流孔内流体的流动方向。这种结构的优点主要在于：磁场利用率高，导线的引出和密封简单，不加磁场时可以作为普通流体减振器使用。缺点是装配稍显复杂。

(2) 按照机械设计标准，利用 AutoCAD 绘制装配图和所有的零件图。重点解决减振器的磁路问题、节流通道的尺寸问题、材料的选择问题、密封问题、零件加工问题和装配等问题。采用中国科技大学研制的 KDC-1 磁流变液作为试验用的磁流变液。该磁流变液具有屈服应力较大、响应速度较快、温度适应范围比较广等优点，但长时间放置会有明显的分层现象。

(3) 熟悉 INSTRON 8801 疲劳试验机的性能和操作方法；解决试验过程中遇到的减振器泄漏、流体的灌装与排放、电流的调节、导线发热、导磁材料的退磁以及试验数据的保存等问题。

(4) 通过多次试验，结果证明：在节流孔直径为 3mm 时，磁流变液减振器的阻尼力很大，而且随着频率、振幅和磁场的变化都有很大的变化；而节流孔直径为 5mm 时，减振器的阻尼力很小，节流孔几乎不起作用，随着频率、振幅和磁场的变化，其阻尼力的变化也很小。通过对实验数据的比较和总结，发现当振幅在 2mm 左右，频率在 0.5Hz 以下时，该磁流变液减振器的效果较好。说明在一定振幅和频率范围内，磁流变液减振器的减振效果非常明显。

(5) 修正宾汉模型的某些参数，计算阻尼力，得到适合于本文的数学模型。通过对计算结果和试验结果的比较，说明宾汉模型在低频时非常适用于该磁流变液减振器；但随着频率的增大，误差较大。利用 MATLAB 中的 simulink 进行仿真研究。结果表明，仿真结果和试验结果在低频时吻合较好，在频率较高时误差较大。

(6) 论文的不足和有待研究的问题：磁流变液减振器的结构有待于优化设计，阻尼孔的大小也需要稍加调整；由于任何材料都是磁导体，因此磁场有一定的损失，计算磁场强度时有一定的误差；又因为宾汉模型不能完全描述磁流变液的特性，因此，需要探索频率较高时更适用于它的数学模型。

致 谢

首先，我要感谢我的导师祝世兴教授。在我攻读硕士研究生期间，他为我倾注了大量的精力。他不仅拥有渊博的知识，而且具有深远的前瞻性见解，使我在研究方向上有一个明确的前进目标和计划。正是在他的指引下，我才在磁流变液减振器领域迈出了重要一步。他严谨的治学态度、认真负责的工作作风、高尚的做人原则无时无刻不影响和激励着我，为我树立了一个真正的科研工作者的风范。正是在他的悉心指导、热心帮助和无私资助下，我的论文才得以顺利完成。在此，我谨对我的导师表示衷心的感谢和良好的祝愿！

其次，我要对实习工厂的王江厂长表示感谢，正是他对我设计的减振器的加工提供了无私的帮助；我还要对疲劳实验室的王旭东老师表示感谢，他对我的实验提供了大量的帮助。同时，我也要研究生办公室的赵拥军、李晨阳、董永春等老师的关心和帮助表示衷心的感谢；

另外，我要对所有任过课的老师表示感谢，他们使我学习到了许多新鲜知识；我还要对所有关心和帮助我的同学表示感谢，他们使我感受到了集体的温暖和合作的愉快。

最后，我要感谢我的父母、家人和所有的朋友，感谢他们给了我巨大的支持和鼓励，使我顺利完成了学业。

参考文献

- [1] 潘双夏, 杨礼康, 冯培恩. 磁流变液减振器控制应用的研究动态. 汽车工程. Vol. 24 No. 3 2002:254~258
- [2] <http://www.lord.com/>
- [3] Spencer B F, Dyke Jr, S J, Sain M K etc. Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 23(3):230~238
- [4] Carson I David, Weiss Keith D. Magnetorheological materials based on alloy particles. U S Pat 5382373
- [5] 汪建晓, 孟光. 磁流变液研究进展. 航空学报. Vol. 23 No. 1 2002:6~12
- [6] 王琪民, 徐国梁, 金建锋. 磁流变液的流变性能及其工程应用. 中国机械工程. Vol. 13 No. 3 2002:267~270
- [7] 余心宏, 王立忠. 磁流变流体稳定性机理分析. 航空制造工程. 1998 年第 6 期:7~8
- [8] 杨仕清, 张万里, 龚捷等. 磁流变液的流变学性质研究. 功能材料. 1998, 29(5):550~552
- [9] 张正勇, 张耀华, 虞承端等. 磁流变液的特性研究. 功能材料与器件学报. Vol. 7 No. 4 Dec. 2001:340~344
- [10] 赵丽, 布和巴特儿, 田言. 磁流变液的研究. 化学工程师. Sum 87 No. 6 Dec. 2001:19~20
- [11] 汪建晓, 孟光. 磁流变液阻尼器用于振动控制的理论及实验研究. 振动与冲击. Vol. 20 No. 2 2001:39~45
- [12] 廖昌荣, 余淼, 陈伟民等. 汽车磁流变减振器设计原理与实验测试. 中国机械工程. Vol. 13 No. 16:1391~1394
- [13] 欧进萍, 关新春. 磁流变耗能器性能的试验研究. 地震工程与工程振动. Vol. 19, No. 4:76~81
- [14] 管友海, 李华军, 黄维平. 海洋平台磁流变阻尼器半主动控制研究. 青岛海洋大学学报. 32(4):650~656
- [15] 周丽, 张志成. 基于磁流变阻尼器的结构振动优化控制. 振动工程学报. Vol. 16 No. 1 Mar. 2003:109~113
- [16] 郭大蕾, 胡海岩. 基于磁流变阻尼器的车辆悬架半主动控制研究 — 建模与直接自适应控制. 振动工程学报. Vol. 15 No. 1 Mar. 2002:60~64
- [17] 杨臻, 邱阳, 李强. 磁流变液技术在自动武器上的应用前景. 华北工学院学报. Vol. 22

No. 3 2001:194~197

- [18] Rabinow J. The Magnetic Fluid Clutch. AIEE, Transactions, 1948, 67:1308~1315
- [19] 杨大智. 智能材料与智能系统. 天津. 天津大学出版社. 2000 年
- [20] 吴旻, 张秋禹, 罗正平等. 磁流变液制备的最新进展. 材料导报. Vol. 16 No. 1 2002:42~44
- [21] 刘丁雷, 李德才, 袁祖贻. 磁流变液的发展及应用. 新技术新工艺. 1999 年第 6 期:14~15
- [22] 祝世兴, 梁中, 李乔治. 电流变流体和磁流变流体在工程上的应用. 稀有金属. Vol. 27 No. 5 2003:621~627
- [23] 汪建晓, 孟光. 磁流变液装置及其在机械工程中的应用. 机械强度. 2001, 23(1):50~56
- [24] 李松晶. 磁流变流体的两种新应用. 机床与液压. 2001. No. 4:130
- [25] George A Flores, Rongsheng Sheng, Jing Liu. Medical application of Magnetorheological fluid—A possible new cancer therapy. Proceedings of the 7th International conference on Electro- Rheological Fluids and Magneto-Rheological Suspensions, Honolulu, Hawaii, 1999:716~723.
- [26] 池茂儒, 张卫华, 王开文等. 磁流变耦合轮对耦合度对轮轨力的影响. 铁道学报. Vol. 25, No. 1:30~33
- [27] 沈崇棠, 刘鹤年合编. 非牛顿流体力学及其应用. 高等教育出版社. 1989 年.
- [28] 廖昌荣, 余淼, 杨建春等. 汽车磁流变减振器设计中值得注意的若干技术问题. 汽车技术. 2001 年第 5 期:10~14
- [29] 张绪祥, 关丽, 翟大中等. ER/MR 智能阻尼器结构的研究现状. 武汉化工学院学报. Vol. 23 No. 4 2001:51~53
- [30] Dyke Jr, S J, Spencer B F, Sain M K etc. Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction. Smart Mater Struct, 1996, 5(5):565~575
- [31] 张立军, 余卓平, 靳晓雄. 汽车工业用磁流变液器件应用前景分析. 汽车技术. 2002 年第 5 期:32~35
- [32] 申永军, 杨绍普, 刘献栋. 采用磁流变阻尼的一种改进型半主动控制汽车悬架研究. 振动、测试与诊断. Vol. 21 No. 4 Dec. 2001:253~257
- [33] 倪建华, 张智谦, 张陵等. 基于磁流变阻尼器的车辆悬架半主动控制研究. Vol. 17 No. 1 2003:46~49
- [34] 孙清, 张可, 周进雄等. 新型磁流变阻尼器及其在结构振动半主动控制中的应用. 西

- 安交通大学学报. Vol. 37 No. 1 2003:92~95
- [35]谢俊, 刘军, 马履中. 汽车磁流变减振器流变力学特性的研究. 江苏大学学报. Vol. 23 No. 6 2002:26~29
- [36]陈吉安, 赵晓昱. 应用于汽车减振的磁流变液阻尼器的设计原理. 汽车技术. 2002 年第 8 期:9~13
- [37]王修勇, 陈政清, 倪一清等. 斜拉桥拉索磁流变阻尼器减振技术研究. 中国公路学报. Vol. 16 No. 2:52~56
- [38]孙树民, 梁启智. 隔震独桩平台地震反应的半主动磁流变阻尼器控制研究. 振动与冲击. Vol. 20 No. 3 2001:61~64
- [39]林其壬, 赵佑民. 磁路设计原理. 北京. 机械工业出版社. 1987
- [40]高联辉. 磁路和铁磁器件. 北京. 高等教育出版社. 1982
- [41]Gavin H P, Hanson R D, Filisko F E. Electrorheological Damper I :Analysis and Design. Transaction of the ASME J. Appl,Mech,1996,63:676~682
- [42]Dimock Glen A, Lindler Jason E, Wereley Norman M. Bingham Biplastic Analysis of Shear Thinning and Thickening in Magnetorheological Damper. SPIE(2000) Vol 3985,paper No49
- [43]Bednarek Stanislaw. The gaint transverse magnetoresistance in a magnetorheological suspension with a conducting carrier. J Magnetism & Magn Mater,1999,202:574
- [44]Dyske S J. Spencer Jr D F, Sain M K et al. Experimental Study of MR Damper for Seismic Protection. Smart Mater. &Struct.,7(5):693~703
- [45]Anderw N. Control of a Dynamic Vibration Absorber with Magneto-rheological Damping. SPIE, 2000,4073:252
- [46]Lindler J, Werely N M. Analysis and Testing of Electrorheological Byass Shock Absorber. SPIE, 1998,3327:226~275
- [47]Fujita, Jeyadevan T, Yamaguchi G, et al. Viscosity and damping of functional fluids that respond to both magnetic and electric fields. Powder Technology, 1999,101(3):279~287
- [48]Stammers, Sireteanu C W. Vibration control of machines by use of semi-active dry friction damping. Journal of Sound and Vibration, 1998,209(4)671~684

在校期间的研究成果

- [1] 垂直磁场圆孔型阻尼器的实验研究. 齐强, 祝世兴, 蔡长青. 机床与液压. 2004. No. 1
- [2] 电流变流体和磁流变流体在工程上的应用. 祝世兴, 蔡长青, 齐强. 全国磁性流体学术会议. 2003年1月, 哈尔滨
- [3] 磁流变液阻尼器的实验研究. 周佳诚, 蔡长青, 齐强. 佳木斯大学学报. 2004. No. 1
自然科学版