

# 基于电流变材料的智能结构

费仁元, 王 民

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100022)

**摘 要:** 综合评述了国内外基于电流变材料的智能机械结构的研究的进展与应用。内容包括电流变材料性能、电流变效应理论及电流变材料在动力传动装置中、在阀控液压伺服驱动系统中、在机器人技术中、在振动控制中和在机械制造加工系统中应用的进展。

**关键词:** 电流变材料; 智能结构; 振动控制

**中图分类号:** TB34; TH161

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2001)04-0394-06

## 1 电流变材料研究进展

电流变材料是由易极化的细小颗粒悬浮于绝缘液体介质中组成的胶体悬浮液。当电场施加于电流变材料时,分散颗粒排列成链以至材料特性可以从液态向固态转变,而且这样的转变是迅速的(ms级)、电依赖的和可逆的。电流变材料的连续介质多是矿物油、硅油或合成的碳氢化合物液体,悬浮微粒一般是直径1~100 μm的金属氧化物、复合金属氧化物等无机材料、半导体聚合物、高分子聚合物以及液晶等高分子物质。电流变材料中除了分散颗粒和绝缘介质之外,还常常为了提高ER材料的分散稳定性及提高ER效应加入稳定剂(主要是一些表面活性剂)和活化剂(包括一些小分子极性物质,如水、醇或酸等)。

目前已报道的电流变材料多达几百种,对电流变材料在电场作用下由液态向固态转变这一效应的机理认识也多有不同,较为流行的有Winslow的诱导成纤理论<sup>[1]</sup>、Klass和Martinek的双电层理论<sup>[2]</sup>和颗粒极化理论<sup>[3]</sup>。其中颗粒极化理论越来越得到大多数研究者的认同:当受到外加电场作用时,电流变体中的固体微粒会产生类似半导体材料的极化现象,相互吸引,从而形成沿电场方向首尾相接的颗粒微粒链,致使液流受阻。而且随着电场强度的增加,极化的固体粒子越来越多,液体的流动会越来越困难;电场强度增大至一定程度时,液体流动完全停止,出现所谓“固化”现象。

## 2 电流变材料在动力传动装置中的应用

电流变流体为新一代电-机耦合系统提供了良好的接口,利用这一性质设计出的新一代传动离合器、制动器等,与传统的产品相比,具有质量轻、灵敏度高、响应快、噪声小、能耗低,易于实现电子和微机控制等一系列突出的优点。

### 2.1 电流变液力偶合装置<sup>[4]</sup>

电流变液力偶合装置是根据电流变效应设计出的一种新型液力偶合装置,它是靠主动、被动件之间的电流变材料的剪切作用来传递动力的。通过施加电压,改变电流变流体的粘度,即可改变主、被动件之间传递的力或力矩。此种离合器利用电流变材料的“液-固”之间瞬时可逆变化的特点,不仅避免了普通液力偶合装置中常见的冲击载荷和噪声,而且具有结构简单、无磨损和操作方便的优点。

收稿日期: 2000-12-27.

作者简介: 费仁元(1941-),男,教授,博士生导师。

电流变液力偶合装置有两种类型,一种是同轴圆柱的,另一种是平行盘式的.将电流变流体充满的两个圆筒或平板之间.当不加电场时,电流变材料成液态,主动件和被动件可以相对自由旋转,几乎不传递扭矩.当在主、被动件之间施加一电场时,电流变材料变稠,从而在主被动件间传递力矩.

## 2.2 电流变马达<sup>[5]</sup>

电流变马达分为直线马达和旋转马达两种,都是基于尺蠖运动原理工作的.由于电流变材料具有快速的“固-液”转变特性,尺蠖运动的工作频率大大增加.

电流变直线马达的工作原理如图1所示,其由两个电流变“开-合”离合器和用于控制两离合器间距离的具有电控伸缩特性的压电陶瓷材料组成.通过控制两电流变离合器的开合和压电陶瓷的伸缩及其工作频率,可使其沿直线以不同的速度前进或后退.电流变旋转马达工作原理与直线马达类似.

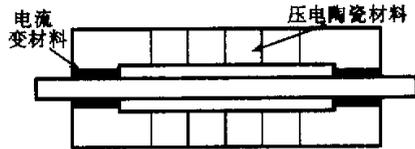


图1 基于电流变材料的直线马达机构示意图

## 3 电流变材料在阀控液压伺服驱动系统中的应用

利用电流变材料快速的“固-液”变化特性,人们对“场控液压装置”(fieldcontrolled hydraulic)进行了大量的研究.在液压系统中电流变材料最典型的应用就是电流变液阀,它可通过调控电场强度,来快速改变液阀的开合状态.文献[6]中介绍了改进的一液缸(直径37 mm,行程25 mm),用来驱动一质量块(活塞、加速度计和负载质量).活塞由一个泵和4个桥连的电流变液阀驱动.在开环控制的条件下,这个装置可给负载30 g的加速度,同时频率可达到200 Hz. Phillips<sup>[7]</sup>对两泵两电流变液阀驱动的活塞/液缸装置进行了高频动态模型分析,并首次采用了闭环控制. Brooks<sup>[8]</sup>设计了一种能提供频率在0~2 kHz,为26 kN的电流变阀控驱动装置.文献[6]还介绍了一种微型三通阀的设计,其尺寸为12 mm×12 mm×12 mm,当电场强度在0~5 kV/mm变化时,其可以提供0.35 MPa的压力变化量.

## 4 电流变材料在机器人技术中的应用

### 4.1 机器人臂杆位置精密控制

工业机器人臂端位置控制一般是利用伺服电机的编码盘进行半闭环控制,这种方法无法对末端执行件的位置进行精确控制.因此人们尝试利用直接测得的臂端位置信号进行全闭环控制,但由于机器人臂杆、驱动系统的柔性大,很难采用上述方法对机器人臂杆进行控制. Takesue 和 Naoyuki<sup>[9]</sup>设计了一种基于电流变材料的具有可控阻尼的机器人臂杆结构,在机器人臂端位置控制中,通过调控臂杆的阻尼特性参数,提高了机器人臂端位置闭环控制的精确度.

### 4.2 机器人指尖接触力的控制

机器人在完成抓取动作时,经常会因为抓取力控制不好而导致被抓取物滑脱或被抓坏. LI Tie-jun<sup>[10]</sup>利用电流变材料研制了一种具有半主动特性的柔性机器人手指,可通过改变电场强度调节电流变材料的阻尼性能以保证机器人指端与被抓物体之间的接触力大小合适.

## 5 电流变材料在振动控制中的应用

电流变材料在振动控制中的应用一般归入半主动控制中,半主动控制可被视为可控的被动控制,它所需的外部能量很小.半主动控制既具有主动控制的控制范围宽、适应性强,又具有被动控制的可靠性.但往往因为控制执行机构的响应速度跟不上,而使其应用范围受到限制.基于电流变材料的振动控制系统

利用电流变材料对电信号达到 kHz 的响应频率,极大地提高了振动控制执行机构的响应速度,目前任何其它机械式系统都无法做到这一点。这样,可使它完全由计算机来直接控制,迅速地改变系统对外界干扰的响应,从而达到抑制振动的效果。

由电流变材料制成的振动控制结构大部分是各种形式的阻尼器,但在特定的条件下它也可以提供弹性力作为控制力施加于被控结构上。其工作方式主要有 3 种:节流式、剪切式和挤压流动式。

### 5.1 节流式

节流式是指电流变材料通过相对静止的正负电极的间隙,因为节流作用,在电极的两端形成压力差,这个压力差可由施加的电场强度来调节。再利用转换机构可将压力差转化为力或力矩。这个由电压控制的力或力矩就可作为控制力施加于振动体上来抑制振动。此种结构的典型如图 2 所示。ER 节流阀通过改变电极间电场强度控制两个空腔间的压力差来调节阻尼力  $f_d$ 。类似的结构有很多。节流式的优点是输出力或力矩较大,功率消耗小。缺点是它的零电场阻尼力较大,阻尼的调节范围受到限制;内压过高,密封要求严格。

### 5.2 剪切式

1963 年,Olson 和 Eige 在他们的报告中第一次提出了剪切式振动阻尼器。剪切式就是指电流变材料位于两个相对平行移动或旋转的电极间,由克服电流变材料剪切应力所产生的阻力作为控制力,施加于被控对象。它的典型结构如图 3 所示。

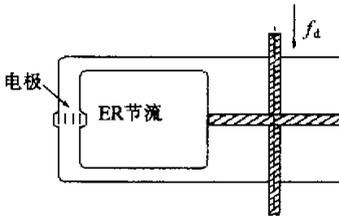


图2 Masami Nakano设计的吸振器<sup>[11]</sup>

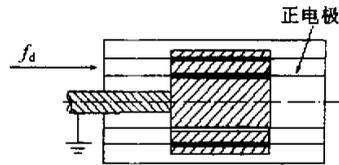


图3 Coulter等人设计的剪切式ER阻尼器

Coulter 等人设计的剪切式阻尼器<sup>[12]</sup>用于控制直线运动的振动体,它的正电极是固定的,负电极(活塞)克服两电极间电流变材料的剪切应力做直线运动,通过调节电极间的电场强度来直接控制阻尼力  $f_d$  的大小。剪切式的优点是它的零电场阻尼较低,相对移动部件间摩擦较小,比节流式有更大的阻尼调节范围。理论模型简单,控制精确。但因为电流变材料屈服应力的限制,输出的控制力或力矩较小。此外,保持两电极间的距离在相对运动中恒定是比较困难的。

### 5.3 挤压流动式

除了节流式和剪切式振动控制结构外,还有一种挤压流动式阻尼器。电流变材料处于两电极之间,当两电极相互靠近时电流变材料被压缩,当两电极相互分开时电流变材料处于拉伸状态。正负电极可以一端固定(阻尼式),也可以都是活动的(振动隔离式)。挤压流动式 ER 阻尼器的使用条件是振动的幅度不是很大(小于正负电极间最大距离);最早的挤压式 ER 阻尼器是由 Stevens 在 1985 年提出的。他在拉伸测试机上对挤压式和剪切式 ER 阻尼器作了性能测试,测试结果表明挤压式 ER 阻尼器可提供的最大应力是剪切式 ER 阻尼器的 10 倍。其典型结构如图 4 所示。它是 Hartel 在 1988 年提出的“具有液力阻尼的弹性元件”的结构简图<sup>[13]</sup>。在圆柱形弹性橡胶壳体内,多个电

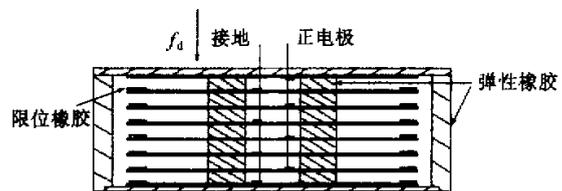


图4 Hartel设计的挤压流动式减振装置<sup>[14]</sup>

极平行排列。由弹性橡胶壳提供静态初始负载；由电极间的电流变材料提供阻尼力 $f_d$ ，这个阻尼力是施加于正负电极间电场强度的函数。它可被用于机动车辆发动机的振动隔离座等场合。

另外一种采用挤压流动式的 ER 阻尼装置就是可控的挤压薄膜阻尼器<sup>[14]</sup>。它在结构上类似传统的油膜阻尼器，多用于旋转机械装置上。采用了 ER 膜替代油膜后，便可通过调控电场强度使阻尼器在不同的振动模式下都可处于最佳阻尼值。

### 5.4 梁结构的振动控制

将电流变材料用于悬臂梁的振动控制中，已有大量的学者进行了研究，研究多是采用如图 5 所示的一种三明治式的层合梁结构。1990 年 Coulter 和 Duclos<sup>[15]</sup> 采用此种结构，将电流变材料作为一种粘弹材料层置于两个采用金属铝制成的弹性层之间，发现对这个多层结构采用电压控制的方法可以很方便地调节层合梁的有效阻尼和弯曲刚度。

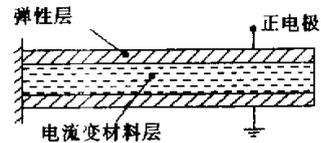


图5 层合梁结构示意图

## 6 电流变材料在机械制造加工系统中的应用

### 6.1 超精加工中的应用

在超精金属切削加工中，工作台超精定位能力是一个关键问题，但外界很小的扰动都将使工作台定位分辨率达不到纳米级的设计要求。Hidenori Shinno<sup>[16]</sup> 提出了在超精定位工作台的滑动导轨上安上电流变材料阻尼器的设计方案，通过调控电场强度，可以使外界的干扰在极短的时间内被消除掉。在他们的实验中装有电流变阻尼器的工作台定位精度达到 2 nm。

### 6.2 切削颤振在线抑制中的应用

基于通过在线改变切削系统动态特性来抑制颤振这一新的控制策略，利用电流变材料设计了一种具有在线可调动态特性的智能化镗杆<sup>[17]</sup>，通过连续小范围地改变镗削系统固有频率，成功地实现了切削颤振的在线抑制。

详细的镗杆结构图如图 6 所示，图中  $L_1$  为镗杆的悬伸长度； $L_2$  为杆的装卡长度；正电极为薄壁钢圈，支撑套与正电极相对的部分作为电流变材料的负极（也就是接地），两电极间隙为 0.5 mm。正电极与镗杆间有绝缘套，电流变材料的密封靠 2 个 O 形圈来保证。采用激振器对镗杆激振测试表明在电场强度在 0~2 kV/mm 时，镗杆固有频率有近 30 Hz 的变化量。

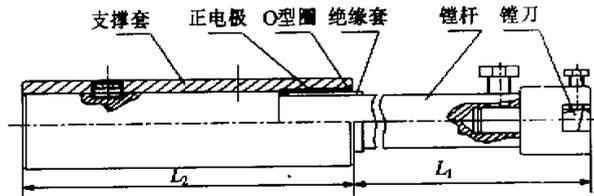


图6 智能型镗杆结构

颤振是切削系统的自激振动，是切削过程产生的动态切削力激起的切削系统的共振。利用智能型镗杆动态特性可控的特点，可通过颤振预报来在线改变切削系统动态特性，达到避开系统共振、抑制颤振的效果。镗削颤振预报控制系统原理如图 7 所示。

采用图 7 所示控制原理进行切削颤振的在线预报控制实验结果如图 3 所示。实验系统建立在 CA6140 车床上，工件悬臂卡置在主轴上，镗刀则安装在特制刀架上。采集的振动信号为镗杆端部水平方向的加速度信号。图 8 为一次切削颤振预报控制全过程的振动加速度信号，从图中可以看到，在颤振振幅

还没有增大很多时, 颤振就被抑制下去, 在工作表面也没有发现留下明显的振痕。

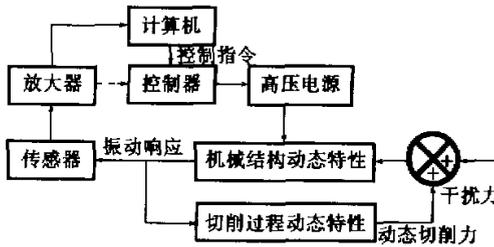


图7 镗削加工切削振动监控原理框图

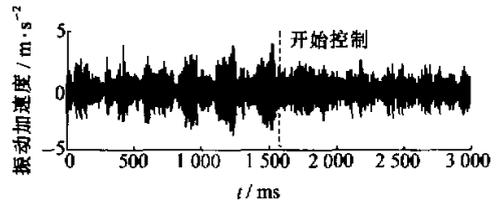


图8 在线镗削颤振预报控制实验结果

## 7 研究展望

电流变材料及其智能机械结构的研究在近年来已取得了显著进展。目前基于电流变材料的振动控制是其最成功的应用领域, 其最有希望的应用领域在于基于它的智能结构的自适应快速控制, 在土木工程、航空、汽车和家用电器上都有潜在的应用前景。但这些研究成果进入实用前还需进行大量的深入研究, 解决存在的许多瓶颈问题。需在大量的实验数据基础上去揭示电流变材料的一些特征, 对其工作过程建立精确的数学模型, 还要寻找智能结构新的设计方法和制造方法, 对基于电流变材料的智能结构建立控制模型以便于控制。

### 参考文献:

- [1] WINSLOW W M. Induced fibrillation of suspensions[J]. *J Appl Phys*, 1999, 20: 1137.
- [2] KLASS D L, MARTINEK T W. Electroviscous fluids[J]. *J Appl Phys*, 1967, 38: 67.
- [3] TAO R, SUN J M. Three-dimensional structure of induced ER solid[J]. *Phys Review Letters*, 1991, 57(3): 398-401.
- [4] JOHNSON ANDREW R, BULLOUGH WILLIAM A, M J. Dynamic modeling and performance of a high-speed electrorheological traversing mechanism[A]. *Proceedings of SPIE Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers[C]*. Bellingham, WA, USA, 1997. 516-527.
- [5] HANS K T. ERF based precision linear drive system[A]. *Electrorheological Fluid[M]*. R Tao. Singapore: World Singapore Science, 1994. 515-524.
- [6] STANWAY R, SPROSTON J L, EL-WAHED A K. Applications of electro-rheological fluids in vibration control: a survey[J]. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5, 463-482.
- [7] PHILLIPS R W. Engineering applications of fluids with a variable yield stress[D]. California University of California, 1969.
- [8] BROOKS D A. Applicability of simplified expressions for design with electro-rheological fluids[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1993, 4(3): 409-414.
- [9] TAKESUE, NAOYUKI. Precise position control of robot arms using a homogeneous ER fluid[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1999, 19(2): 55-60.
- [10] LI Tie-jun. Research on robot soft fingertip with semiactive behavior[J]. *Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering*, 1998, 9(1): 10-12.
- [11] MASAMI Nakano, TAKUYA Yonekawa. Active damper using electrorheological suspension and its application to vibration isolation control[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, 1996, 62(593): 33-40.
- [12] COULTER J P, WEISS K D, DAVID C J. Engineering applications of electrorheological materials[J]. *Journal*

- of Intelligent Material Systems and Structures, 1993, 4(2): 248-259.
- [13] HARTEL V. Spring Element with Hydraulic Damping[P]. US Patent, 4773632, 1988.
- [14] SHIN Morishita, Jun'ichi Mitsui. Controllable squeeze film damper[J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 1992, 114(3): 354-357.
- [15] DON D L, COULTER J P. Analytical and experimental investigation of electrorheological material based adaptive beam structures[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1995, 6(6): 846-853.
- [16] HIDENORI Shinno, HITOSHI Hashizume. Nanometer position of a linear motor-driven ultraprecision aerostatic table system with electrorheological fluid dampers[J]. Ann of CIRP, 1999, 48(1): 289-291.
- [17] WANG Min, FEI Renyuan. Improvement of machining stability using a tunable-stiffness boring bar containing an electrorheological fluid[J]. Smart Mater Struct, 1999, 8: 511-514.

## Research Development of Electrorheological Fluid-Based Intelligent Structures

FEI Ren-yuan, WANG Min

( College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,  
Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China )

**Abstract:** The electrorheological(ER) fluid is a kind of intelligent materials with versatile abilities. Material properties of ER fluids are dependent on the applied electrical field and can be directly controlled by computer. ER fluids-based intelligent structures can respond to the control signal swiftly and steadily, and the control method is simple and direct. This paper presents an application-oriented review of ER fluid-based intelligent structures. The application researches covered in this review paper are in the fields of traversing mechanism, actuator, field-controlled hydraulic servo system, robotic technology, vibration control and manufacturing automation.

**Key words:** electrorheological fluid; intelligent structure; vibration control