

电流变液的性能及其应用研究*

姚国治 孟光 方同

西北工业大学振动工程研究所, 西安 710072

摘要 简要介绍电流变液的研究进展, 详细介绍了有关电流变液及其性能的研究, 具体介绍了电流变技术在旋转机械转子系统、汽车发动机支座和悬架系统振动控制中的应用, 概要介绍和分析了电流变液在其它方面的应用以及对电流变技术发展的展望。

关键词 电流变液; 振动控制; 转子系统; 发动机支座; 悬架系统

1 引言

电流变液 (electro-rheological fluid) 是一种具有发展前景和工程应用价值的新材料 (智能材料)。性能良好的电流变液在电场的作用下能产生明显的电流变效应, 即在液态和固态间进行快速可逆的转化, 并保持粘度连续, 无级变化, 整个转化过程仅需几个毫秒, 且可控, 能耗极小, 可与微机结合, 实现实时主动控制。自从 Winslow 在 1947 年报道电流变效应以来已经历了近 50 年, 由于当时的电流变液的电流变效应弱、综合性能指标低, 所以没有引起足够的重视, 到 60 年代后期由于性能较好的电流变液研制成功, 这才开始重视这一技术的研究。到 80 年代各国竞相发展这一技术, 研制出了多种电流变液。研究最多的有英国、日本、美国、前苏联、德国、法国等, 许多大公司都纷纷资助这一技术的发展。到目前为止, 已召开了 5 次专门研究电流变技术和应用的国际会议^[1-4], 与此相关的会议与研讨会也越来越多, 美英著名的科学杂志均已作过报道^[5,6,7]。我国开展此项研究稍晚一些, 中国科学院物理所、化学所、清华大学、北京理工大学、中国科技大学、复旦大学和西北工业大学等都在开展这方面的工作。国内主要是研究电流变液及其性能, 对应用方面的研究较少。随着电流变液性能的提高和研究的发展, 电流变技术已开始渗透到各个领域: 航空航天、机械工程、汽车工程、控制工程和机器人等, 所产生的社会效益越来越大, 部分电流变液已成为商品进入市场。美国能源部的一份报告指出: 电流变液与电流变器件具有很大的市场前景^[8]。通过调节施加的电场强度可以迅速改变电流变液的表观粘度和屈服应力, 利用这种优良的机-电耦合性能设计出的电流变器件, 将在工业技术上引起一场革命, 因而电流变技术也被誉为是

* 本文得到国家自然科学基金及航空科学基金资助。

“继半导体以后的又一次工业革命”。

鉴于国内电流变技术的发展, 本文旨在介绍电流变液的研制现状、性能及其应用的研究进展, 着重介绍其在应用方面的成果, 以促进这一技术在我国的发展。

2 电流变液的研究进展

1947年 Winslow 报道了电流变效应, 并申请了专利^[9]。电流变液是由细微的固体颗粒(分散粒子)均匀分散在绝缘的低粘度母液中制得的悬浮体, 当在悬浮体中施加一高电场时, 固体颗粒在两极板间形成链状的纤维结构, 液体的表观粘度增加几个数量级, 当电场强度达到一定值时, 悬浮体由液态迅速向固态转换。具有很大的抗剪切强度, 当外加电场撤去后, 又由固态迅速转变为液态。通常悬浮体中含有一定量的水, 水能促进电流变液的导电性, 但也限制了其应用的温度范围。早期的电流变液的配方中所加的水基表面活性剂常含有水分, 当温度高于70℃时, 水大量蒸发, 降低了电流变液的导电性; 当温度低于0℃时, 水结成冰, 成为固体晶格结构, 失去了一定的活性, 也就失去了活性剂的作用, 从而影响电流变液的电流变效应^[10]。水的存在还消耗过多的电能, 容易引起电击穿, 对容器有一定的腐蚀性。早期的电流变液易沉淀、电流变效应弱, 综合性能指标低, 不能满足实际应用的要求, 因此限制了电流变技术的应用。

1985年, Block^[11]首先研制成功了有机半导体非水型电流变液, 它克服了含水型电流变液的不足, 提高了电流变液的综合性能指标。Block^[12]等研究了非水型(半导体聚合物)电流变液在电场作用下的流变特性和极化。要在物质中真正做到无水是比较困难的, 尤其是高分子化合物。区分有水与无水的标准是水在电流变液中所起的作用。如果电流变液在除去水分后, 其电流变效应大大削弱, 甚至失去电流变效应, 这种液体就是有水型电流变液。温度对无水型电流变液的电流变效应的影响较小, 温度低于0℃或超过100℃时仍有电流变效应, 部分含高分子电解质的液体在高温时电流变效应反而更明显^[10,13]。当然无水型电流变液中也存在结缔的水。许元泽^[13]等对一种无水的焦化聚丙烯腈作为分散粒子的电流变液进行实验, 发现电流变液有良好的综合性能指标。另外对有水的电流变液的实验表明, 少量水的存在使电流变液在温度低于水的沸点时电流变效应随温度的升高而增强, 而到水的沸点后电流变效应急剧减弱。Garino^[14]等研究了无水型电流变液的母液和固体颗粒的介电常数不一致对电流变液性能的影响。就目前无水型电流变液的发展, 按分散粒子来分有: (1) 离子导体, (2) 金属导体, (3) 半导体, (4) 高分子电解质, 文献[10]分别对这4种类型粒子所制成的电流变液进行了综述。郝田^[15]等将电流变液的固体颗粒分类为无机化合物, 硅铝酸盐型, 有机半导体和高分子型, 另外对母液和添加剂的性能要求作了综述。文献[16—19]综述了电流变液的研究进展。几种美国专利报道的电流变液的最大工作温度和屈服应力见表1。

3 电流变液的性能研究

电流变液在无电场时粘度较低, 基本上是一种牛顿流体。当施加一定的电场强度时, 液体的力学性能发生明显的变化, 液体的粘度增大并渐渐缺乏流动性, 当电场强度大到一定值时, 电流变液迅速由液态向固态转变。这就是电流变液最吸引人的特性。目前的研究都集中于提高电流变液的性能, 分析影响电流变液性能的主要因素, 提出各种模型来解释电流变液的

表 1 电流变液专利简介

序号	美国专利号	最大工作温度(°C)	屈服应力 (N/m ²) (×6.895×10 ⁹)
1	4,744,914	120	0.05(?)
2	4,687,589	150	1.02
3	4,772,407	200	0.36
4	4,702,855	90	56(?)
5	4,502,973	不详	1.2

电流变液中的分散粒子均匀分散在具有粘性不导电的母液中，而粒子与母液的介电常数不同，在电场的作用下，由于介电常数的不同产生的极化力促进悬浮颗粒沿电场方向排成链状（见图 1），这种链状结构具有抗剪切能力。电流变液在电场作用下的剪切力 τ 可以模拟为宾汉（Bingham）模型^[27]：

$$\tau = \eta_p \dot{\gamma} + \tau_d$$

式中 η_p 是塑性粘度， $\dot{\gamma}$ 是切应变率， τ_d 是宾汉或动屈服应力。塑性粘度对高电场不是很敏感，而动屈服应力随电场强度增大而成倍地增加。用插值的方法可得到零切应变率时的应力

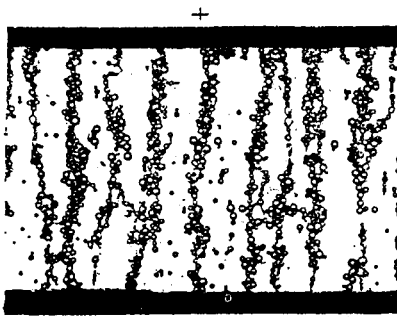


图 1 直径为 0.27 μm 的玻璃珠在硅油中(体积比为 0.4)，施加 2 kV/mm 的直流电场形成的链状结构放大照片^[28]

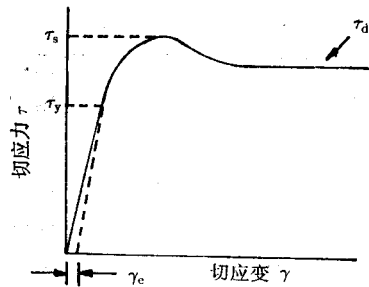


图 2 应力-应变曲线^[28]

值。电流变液的应力-应变曲线如图 2 所示。图上第一个量是弹性屈服应力极限 τ_y ，当应力大于 τ_y 时，撤去外力后材料不能再恢复，并产生永久的变形 γ_e ，在弹性极限处的应变是弹性和塑性变形的过渡。实际上在弹性极限前材料已经失去线性特性，弹性极限仅是材料可逆变化的极限。图 2 中的最大应力是静态屈服应力 τ_s ，这是使材料产生大应变和大变形的最小应力。在大应变时的平稳应力是动屈服应力 τ_d ，这也是可用插值法在应力-应变曲线中求得的零应变率时的应力，即宾汉屈服应力。Yen^[29] 也研究了电流变液的动态特性，得出类似的结论，他还研究了固体颗粒的体积比 (ϕ) 和外加电场强度对电流变液力学性能的影响。在体积比不变，外加电场强度变化时的动应力-应变曲线表现为先是线性突增，然后是过渡阶段，接着又是一个线性增加。对相同电场，不同体积比的实验得出了类似的结论，还得出体积比对电流变液的动应力影响比外加电场强度的大。Bonnecaze^[27] 等从微结构模型研究了电流变液的静、动屈服应力。对有不同体积比和分散粒子-母液介电常数比的电流变液他用非线性弹性应变能理论分析其静态屈服应力，结果发现静态屈服应力随介电常数比的增大而增大，当介电常数比小于或等于 4 时静态屈服应力在体积比为 0.4 时有最大值；动屈服应力也

随介电常数比的增大而增大, 体积比较小时的动屈服应力可看作是 Φ (体积比)的线性函数, 当介电常数比小于或等于 10 时, 动屈服应力在 $\Phi = 0.4$ 时有最大值。从 Bonnacaze 的文章中得出体积比和介电常数比是确定动屈服应力的两个重要参数。通常配制电流变液的粒子体积比不要超过最优值 (0.4), 而介电常数比应小于或等于 10。提高电流变液的动屈服应力的最简便方法是增大介电常数比, 而增大介电常数要考虑实际的可实现性, 由于电流变液消耗的电能随介电常数比的增大而增大, 因此实际的电流变液必须在增加动屈服应力和减小能耗之间寻求折衷方案。研究^[30]表明, 电流变液的特性变化表现为线性粘性, 线性粘弹性, 非线性粘弹性, 塑性或粘弹性-塑性体。小振幅的动力实验用来观察电流变液的线性粘弹性特性, 而中振幅和大振幅的实验用来研究电流变液的非线性动力特性。Gamota^[30] 等将电流变液的响应从流变学角度分为预屈服、屈服与后屈服 3 个阶段。在非零电场作用下, 当屈服应力和应变低于某定值时电流变液被认为是粘性液体; 当屈服应力和应变等于或大于某定值时电流变液被认为是粘弹性液体; 当屈服应力和应变随电场强度变化而急剧变化时电流变液可描述为粘弹性-塑性材料。研究表明, 在预屈服阶段电流变液的变形可用线性粘弹性理论来解释, 而且电流变液的能量储存和能量消耗随电场强度增强而增强; 屈服阶段开始时的切应力或切应变是电场强度的函数; 在后屈服阶段电流变液的表现粘度随外加电场强度的增大而增大。Thurston^[31] 等对在矩形槽内作振荡运动的电流变液的粘弹性进行了研究, 指出电流变液和电场强度的依赖关系是 S 形的, 也就是为了明显增大电流变液的粘性和弹性需要一个最小的电场强度, 随着场强的增强, 粘弹性趋向于饱和, 电场强度继续增加时粘弹性反而减小, 另外突加电场或突然加大电场强度, 电流变液到达平衡状态的时间变长。文献[20, 32]研究了电流变液的高频和中频的力学特性。文献[33]研究了电流变液的粘性与剪切率同电场强度的关系, 而文献[34]研究了电场瞬态变化对电流变液的剪切应力的影响。

由于电流变液的粘弹性随电场强度的变化而变化, 因而将电流变液应用于阻尼器时应了解阻尼器的阻尼特性与电场强度的关系。Stanway^[23, 35] 等提出一个非线性模型, 包含了粘性阻尼和库仑阻尼项, 文献[35]对用电流变阻尼器稳定的质量-弹簧系统进行实验, 来估计阻尼, 实验表明在电流变阻尼器工作范围内 (电场强度 1kV/mm 到 2kV/mm), 粘性阻尼加库仑阻尼的模型是有效的, 文中用等效线性化方法推得了电流变阻尼器的等效线性模型, 可有效地预测实验的频率响应特性。Mottershead 和 Stanway^[36] 还建立了阻尼力与速度的 n 次方成正比的模型, 这个模型只要估计速度和 n 次幂。Stanway^[37] 等对上述模型用有序滤波技术估计了速度和 n 次幂, 对电流变阻尼器的原理机^[24] 进行实验, 对所得数据进行分析, 验证了所提出方法的可行性。

Stevens^[38] 等为研究电流变液在传递扭矩方面的应用, 设计并制造了离合器的原理机, 卫爱霞^[39] 在类似的原理机上做了电流变液传递扭矩实验。传递的扭矩随外加电压的增大和极板间的距离减小而增大, 但极板间距的减小容易引起电场击穿, 并且在无电场时传递的最小扭矩增大。

4 电流变液的应用研究

电流变液的粘度及屈服应力可由外加电场控制, 随着电场强度的增加而急剧上升, 当电场强度达到一定值时, 电流变液由液态向固态转变, 成为粘弹性体, 上面已讲过, 这种变化是

快速可逆的, 所需的电能很小, 非常适用于实时控制。由于可以通过微机控制外加电场的强弱来改变电流变液的力学性能, 进而实现实时主动控制, 因而越来越受到各行业的重视 [40-48]。将这一技术应用于汽车工业, 前途将是美好的。由电流变阻尼器组成的悬架系统可随路面的不同情况调节电场强度, 很容易改变悬架系统的阻尼和刚度, 电流变液的这一特性可达到主动控制汽车振动的目的 [41, 49-54]。装有电流变液的离合器可以减小传动噪声, 提高传动效率, 便于操纵, 可以迅速从静止加速到最大速度 [38, 39, 53-56]。电流变液还可用于转子系统的主动控制 [47, 57-62], 汽车发动机支承的振动控制 [46, 47, 54, 63-70], 柔性结构 (板、梁) 的振动控制 [44, 71] 和作为节流阀体、密封材料、激振器、刹车、安全阀和旋转式粘度计等, 文献 [72] 对这些应用进行了较详细介绍。

电流变液应用于转子系统的研究开始比较晚, Nikolajsen [59] 等首次将电流变技术应用于转子的主动控制。转子振动的主动控制中有盘式电流变阻尼器、电流变控制的质量系统和盘式电流变吸振器。盘式电流变阻尼器结构如图 3(a) 所示, 通过控制外加电场的强度来改变电流变液的粘性, 从而增加转子的支承刚度和外加阻尼。实验研究了外加电场时转子越过临界转速时的响应, 由实验可知, 外加电场可明显减小越过临界转速时的振幅。对转子越过临界速度提出一种控制方案, 图 4 便是用电流变阻尼器抑制临界转速的示意图, 实线是不加电场时的转子振幅, 虚线是外加电场时转子的振幅, 外加电场使转子的临界转速由 Ω_{cr} 增大到 Ω'_{cr} 。具体控制如下: 转子起动时无电场, 当转速到 Ω_1 时, 加电场, 振幅曲线沿虚线前进, 转子越过临界转速 Ω_{cr} 至转速为 Ω_2 时撤去外电场, 振幅曲线又回到实线, 从而达到越过临界转速的目的。因电流变液的响应时间较短, 固化时间小于 1ms。因而在临界转速改变时引起的瞬态振动很小。文献 [60] 对这种控制方法的稳定性进行了数字模拟, 得到和上面相似的结论。孟光 [61] 等对这种开关控制方法在转子振动主动控制中的应用进行了研究, 发现这种方法有利于转子越过临界转速, 可明显降低转子系统的振动。电流变控制的质量系统 [60] 如图 3(b) 所示, 电流变阻尼器安装在轴承的外圈, 和机器弹性连接, 阻尼器内的盘片 and 外壳弹性连接, 当转子运行时, 盘片和外壳相对运动, 剪切填充在阻尼器内的电流变液。不加电场时电流变液只有粘性阻尼, 盘片和外壳的相对振动较大, 随着外加电场强度增大, 电流变液的阻尼增大, 使盘片和外壳耦合, 相对振动减小, 转子的临界转速减小, 当电场强度足够大时, 盘片和外壳粘到一起, 作为一个整体运动, 计算表明转子的振幅不再减小, 但转子的第一阶临界转速降低

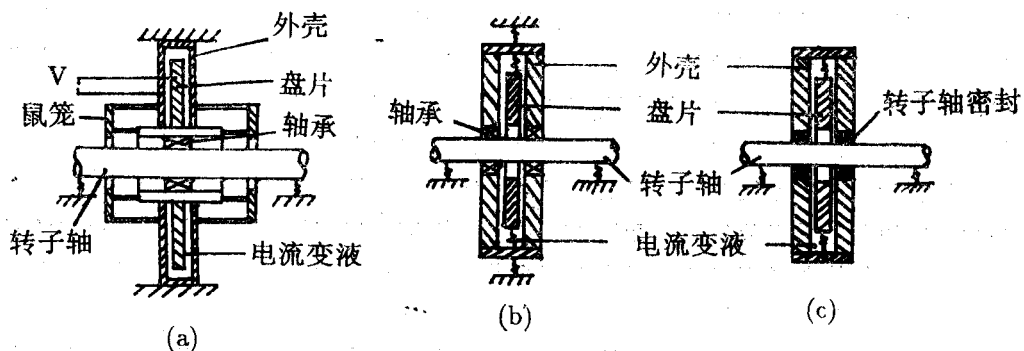


图 3 用于转子振动控制的电流变阻尼器示意图 [60]

很多,这是由于附加质量的结果。这里电流变液不是作为减振材料而是作为连接材料,这种方法不是消除共振而是重新分布共振速度。电流变液动力吸振器^[60]如图3(c)所示,吸振器安装在转子上,随转子一起运动,而盘片的外圈支承在吸振器内,吸振器内充满电流变液,外加电场后改变电流变液的粘性,从而改变动力吸振器的频率,调节吸振器的频率使和转子某阶临界转速相同以消除临界转速,计算后发现可大大地减小其共振时的峰值。进一步增强电场强度,因盘片和吸振器“粘”在一起,可能反而使响应的峰值增大,当盘片和吸振器的相对振动最大时有最佳的吸振效果。挤压油膜阻尼器在转子振动控制和稳定性中应用较广,文献[62]用电流变液填充到挤压油膜阻尼器内,结构如图5所示,和以往的挤压油膜阻尼器的不同点在于通过控制加在极板上的电场强度来调节支承的阻尼,对其所作的实验表明转子的第一、第二阶临界转速随电场增强而增大,从实验还得出通过控制电场强度的大小可为每一模态提供一个合适的阻尼。

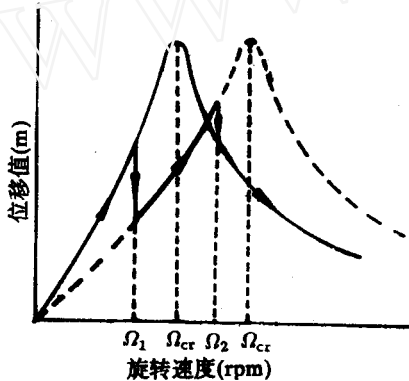


图4 电流变阻尼器消除临界转速的原理图^[60]

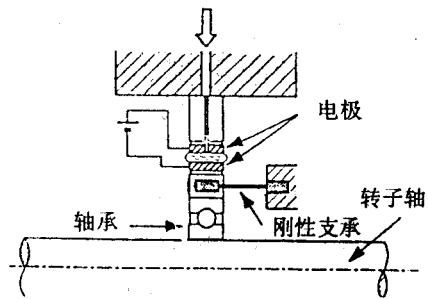


图5 电流变阻尼器^[62]

随着乘客对汽车的舒适性提出越来越高的要求,汽车设计者必须提高汽车的减振效果。为了更好地隔离高频噪音,需要发动机支座的刚度和阻尼较小,但在加速或受瞬态冲击时,发动机的阻尼和刚度太小容易引起共振。为减小发动机的振幅,进而减小发动机室的体积,需要有大的刚度和阻尼,这是一个矛盾,为解决这个矛盾发展了一种液压橡胶支座^[66]。用流体的惯性力减小某一频率的垂直刚度,从而提高在这一频率的减振效果并能兼顾其它频率的性能。最好的解决方法是结合主动控制,利用传感器的信号来改变支座的阻尼和刚度^[66],但这种阻尼和刚度的改变是有限的并且不连续,电流变阻尼器作为支座可克服上述缺点^[46,67-70]。Ushijima^[66]等将液压支座进行改进,上下腔内充满电流变液,在上下腔的分界层内设置阀型电极,在电场作用下流过极板的电流变液的粘度发生变化,从而改变了支座的阻尼,在正弦型外激励作用下,分别研究了极板间不加电场,加恒定电场,加矩形电场和加矩形电场且矩形电场的相位比外激励超前 135° 时的传递率。矩形电场的周期是外激励周期的一半。研究表明最后两种控制的效果较好。根据拟 Sky Hook 模型,只要加一矩形电场就能满足要求,而最后一种情况的控制效果最优。因电流变支座不能提供根据拟 Sky Hook 模型理论控制所需的大阻尼,同时外加高电场不仅使阻尼增大而且也使动刚度增加,通过调节外加高电场的相位可以抵消因动刚度的增大而引起的传递率增大。文献[67]中还用谐波线性化方法(harmonic linearization method)求解了上述拟 Sky Hook 模型。Petek^[68]等提出自适

应支承，他们对发动机支座受发动机安装不平衡激起的稳态振动和路面的瞬态激励进行了研究。研究表明，外加高电场使共振峰值减小，使共振频率向高频移动，这是因为电流变支座的阻尼和动刚度增大了，但高频时增大阻尼反而使传递率增大，故大阻尼只有在频率接近共振频率时才需要。前面已提到温度是影响电流变液性能的一个因素，文中对在 0℃ 和 100℃ 时的支座进行了实验，尽管温度升高使电流变液的粘性降低，支座的共振频率偏移减小，传递率增大，但外加电场后，电流变液仍表现出良好的减振效果。最后对无控制的支座、被动液压支座和电流变主动控制支座进行了实验比较，发现只有电流变支座可通过调节阻尼有效地隔离发动机的振动、控制路面激起的振动，并有效地抑制低频和高频振动，前面的文章中是利用电流变液的大剪切力，而 Sproston^[69] 则利用电流变液体的抗压性能，研究了发动机支座的性能。模型中的极板运动方向和电流变液的流动方向垂直，模型如图 6 所示，它可以成十倍地减小传递率，理论计算结果和实验结果相符合。

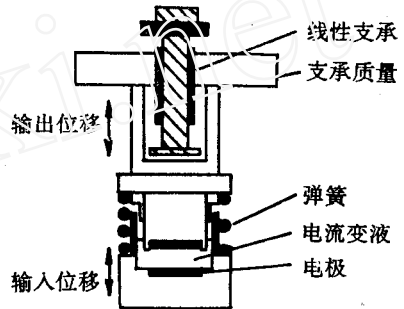


图6 发动机支座原理机^[69]

为了改善乘客的舒适性和操纵的安全性，对悬架系统也提出越来越高的性能要求，特别是在豪华型汽车中。随着电流变技术的发展，大的汽车公司已开始研究电流变液在汽车悬架系统中应用的可能性，研究各种类型的电流变减振器。减振器的基本型有^[70]：(1)固定极板式，(2)滑动极板式，如图 7 所示。在固定极板式中，由于电流变效应使流过极板的液体受阻，导致液体压力升高，产生阻尼力；在滑动极板式中，由于电流变效应在极板间产生剪切力，阻止了极板的相对运动，使液体压力升高而产生阻尼力。文献[53]对滑动极板式的减振器进行了理论分析和实验研究。指出当无电场时振幅最大，随着电场强度的增大稳态响应减小，当电场强度达到电流变液能承受的最大值时，稳态响应达到最小值。文献[51]介绍了设计的电流变减振器的具体结构，对常规的液压减振器的结构进行了改进，充分考虑到在控制电路失灵时减振器仍可作为常规的液压减振器使用。将设计的减振器在电液模拟振动台进行减振特性的试验表明，它能根据外电场的情况提供相应的阻尼。森下信^[52]等对他们设计的电流变阻尼器进行了减振特性试验，并分别在 4 自由度和 7 自由度的汽车上进行数字模拟，证明使用电流变阻尼器可改善乘客的舒适性和操纵的安全性，文献[49]作者设计了具体的电流变减振器，并在福特雷鸟 (Ford Thunderbird) 高级汽车上进行比较试验，指出，电流变减振器在不改变原来阻尼器大小的前提下具有很高的可靠性和很好的减振效果，这便于实现半主动控制。

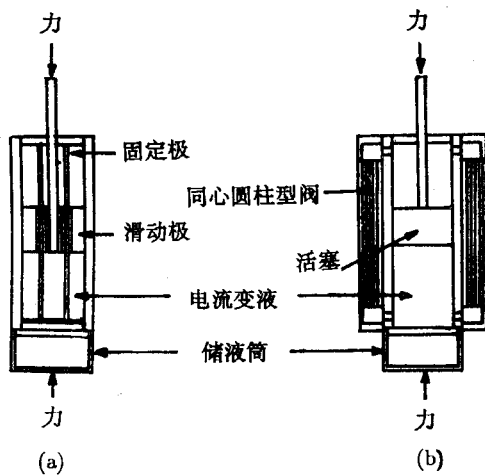


图7 两种基本类型的减振器^[70]
(a) 滑动极板式； (b) 固定极板式

进，充分考虑到在控制电路失灵时减振器仍可作为常规的液压减振器使用。将设计的减振器在电液模拟振动台进行减振特性的试验表明，它能根据外电场的情况提供相应的阻尼。森下信^[52]等对他们设计的电流变阻尼器进行了减振特性试验，并分别在 4 自由度和 7 自由度的汽车上进行数字模拟，证明使用电流变阻尼器可改善乘客的舒适性和操纵的安全性，文献[49]作者设计了具体的电流变减振器，并在福特雷鸟 (Ford Thunderbird) 高级汽车上进行比较试验，指出，电流变减振器在不改变原来阻尼器大小的前提下具有很高的可靠性和很好的减振效果，这便于实现半主动控制。

离合器的噪声、传动效率和响应速度一直是汽车设计关心的主要问题,根据电流变液能够传递扭矩的特点,研究者已在这方面做了不少工作^[37,38,53,54,70],目前电流变液离合器的

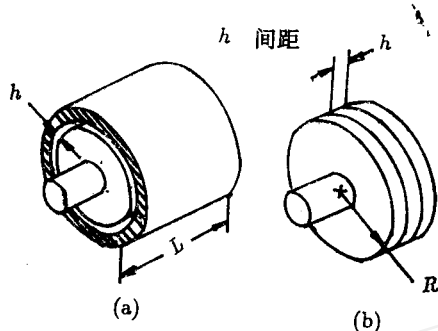


图8 同心圆筒型和平板型离合器^[34]
(a) 同心圆筒型; (b) 平板型

基本类型有两种:同轴圆筒型和平板型(如图8)。平板型在文献[38]和[39]中已进行了原理性实验。电流变离合器所传递的转矩与工作面的面积、电流变液的屈服应力相关,提高电流变液的屈服应力或增加工作面的面积都可以达到提高传递转矩的目的。实验表明,利用电流变离合器可以在较宽的范围内调速。文献[53]对多片式的电流变离合器进行了理论计算和实验研究,多片式电流变离合器可以在很大范围内连续可变地控制转矩和速度,理论和实验都表明,传递的

扭矩和片的相对旋转速度成正比,并随着电场强度的增强而增大。这种离合器可以满足传递大转矩的要求,但在无电场时传递的最小转矩也相应地增大,这不利于在汽车上实际应用。

由于电流变液具有上述优点,受到汽车工业领域的重视,但就目前的电流变液的性能和设计出的结构而言,应用到实际汽车中还有一定的距离,Hartsock^[54]和Duclos^[70]等分别对电流变液在离合器、阻尼器和发动机支座应用的可能性作了讨论,认为目前的电流变液可以用于发动机支座中,但还不能在离合器和阻尼器上应用。Duclos^[70]还对能满足离合器和阻尼器(固定极板式和滑动极板式)使用的电流变液提出性能要求。Hartsock^[54]等根据电流变液的发展情况假设了近期和远期的电流变液性能,并根据这些性能对电流变液在汽车阻尼器、发动机支座和离合器上的应用进行了数学模拟,得到和文献[70]中相似的结论,即目前的电流变液只能满足发动机支座的要求,近期的电流变液能用于固定极板式减振器,对滑动极板式只是接近要求,远期的电流变液能满足所有的使用要求。对电流变液在离合器上的应用提出了改善的方法,一是提高电流变液的性能,二是改进离合器的设计。

电流变液作为一种理想的材料,不仅可用于转子系统、汽车工程等,还可用于其它方面。Ehrgott^[71]研究了电流变液在自适应结构中的应用,用脉冲控制法研究电流变阻尼器在频率0—15 Hz的随机激励下的响应,施加电场后含电流变液结构的位移可减小20%到60%。将电流变液填充在复合梁中^[73],外加电场后复合梁的力学特性发生了变化,施加一定的电场时,弹性模量增大,梁在共振频率时峰值减小,且共振频率向高频移动,同时损失因子大大增加,用类似于转子越过临界转速时的开关控制方法,可以避开系统的共振频率,减小响应峰值,在多频激励时可以使系统的响应最小。其它有关电流变液应用的情况可参阅文献[74—77]。另外液晶作为一种均一性材料,在电场作用下也可产生电流变现象,通过改变外加的电场强度可以改变液晶的性能,并且可逆,这一特点的应用前景非常广阔,有关的研究可参阅文献[78—84]。

需要进一步研究的问题是,为了更好地了解电流变现象,应从理论上分析产生电流变效应的机理,并对其力学性能和特性进行分析,给出描述其力学及其特性的数学表达式,分析影响电流变液性能的主要因素,研制性能良好的电流变液。能实用的电流变液应具有如下良好性能:稳定性好,就是在使用和储存过程中不发生化学分解,没有固体颗粒沉淀现象发

生；工作温度范围宽；消耗的电能小；零电场时粘度较低，施加一定的电场时具有很大的屈服应力；流体对电场的反应快，工作频带宽。设计出的电流变液结构要求体积小，所需的电流变液少，具有良好的散热和循环装置，控制回路尽可能简单，反应快，迟滞小，控制电流变液的高压电源体积小、重量轻，并有足够的功率。

根据我国对电流变液及其应用的研究现状，应从两个方面来突破：1. 研制性能良好的电流变液；2. 研制和设计电流变液结构，如在转子系统、汽车发动机支座、汽车悬架系统等具有很大应用前景和经济效益的结构，并向其它方面渗透。

感谢国家自然科学基金和航空科学基金对本课题的资助。西北工业大学物理系赵晓鹏教授对本文提出了宝贵的意见和建议，在此深表谢意。

参 考 文 献

- 1 Conrad H, Sprecher A F, Carlson J D (eds). Proceedings of the First International Symposium on ER Fluids, North Carolina State University Engineering Publications (1989)
- 2 Carlson J D, Sprecher A F, Conrad H (eds), Proceedings of the 2nd International Conference on ER Fluids, Technomic, Lancaster, P A (1990)
- 3 Tao R (ed) . Proceedings of the 3rd International Symposium on ER Fluids, World Scientific, Singapore (1992)
- 4 Tao R (ed) . Proceedings of the 4th International Symposium on ER Fluids, World Scientific, Singapore (1994)
- 5 Halsey T C. Electrorheological fluids, *Science*, **258** (30 Oct. 1992) : 761—776
- 6 Whittle M, Bullough W A. The structure of smart fluids. *Nature*, **358** (30 June, 1992) : 373
- 7 Halsey T C, Martin J E. Electrorheological fluids. *Scientific American*, (Oct. 1993) : 58—64
- 8 美国能源部报告: DE-RP03-91ER30172 (1992)
- 9 美国专利号: No. 2417 (1947)
- 10 Filisko F E. In: Tao R (ed). Proc. the 3rd Int. Conf. ER. World Scientific (1992) : 116—128
- 11 Block H, Kelly J P, U.K. Patent 2170510 A (1985)
- 12 Block H, Rattray P, Watson T. In: Tao R (ed) . Proc. the 3rd Int. Conf. ER. World Scientific (1992) : 93—115
- 13 Xu Yuan-Ze, et al. In: Tao R (ed). Proc. the 3rd Int. Conf. ER. World Scientific(1992): 129—141
- 14 Garino T J, Adolf D, Hance B. In: Tao R (ed) . Proc. the 3rd Int. Conf. ER. World Scientific (1992) : 167—174
- 15 郝田, 陈一泓, 徐懋, 许元泽. 电流变学研究进展. *力学进展*, **24**, 3 (1994) : 315—335
- 16 Jordan T C, Shaw M T. Electrorheology. *IEEE Trans. Electr. Insulat.*, **24**, 25 (1989): 849—878
- 17 Block H, Kelly J P. Electro-rheology. *J. Phys. D*, **21** (1988) : 1661—1677
- 18 赵晓鹏, 罗春荣, 周本濂. ER 流体特性及其研究现状. *材料科学与工程*, **4** (1993) : 1—8
- 19 朱克勤, Tao R. 电流变液和电流变效应. *力学进展*, **24**, 2 (1994) : 154—162
- 20 Gamota D R, Filisko F E. *J. Rheol.*, **35**, 3 (1991) : 399—425
- 21 Klass D L, Martinek T W. *J. Appl. Phys.*, **38** (1967) : 67—80
- 22 Bullough W A, Foxon M B. *J. Sound & Vib.*, **56** (1978) : 35—44
- 23 Stanway R, Mottershead J E. *Trans. Inst. Meas. Contr.*, **8** (1986) : 9—16
- 24 Stevens N G, Sproston J L, Stanway R. *J. Electrostatics*, **15**, 2 (1984) : 275—283
- 25 Stevens N G, Sproston J L, Stanway R. *J. Electrostatics*, **17** (1985) : 181—191
- 26 Stevens N G, Sproston J L, Stanway R. *J. Applied Mech., Trans. ASME*, **54** (1987) : 456—458
- 27 Bonnacaze R T, Brady J F. *J. Rheol.*, **36**, 1 (1992) : 73—115
- 28 Conrad H, Chen Y, Sprecher A F. In: Tao R (ed) . Proc. the 3rd Int. Conf. ER. World Scientific (1992) : 195—218
- 29 Yen W S, Achron P J. *J. Rheol.*, **35**, 7 (1991) : 1375—1384
- 30 Gamota D R, Filisko F E. In: Tao R (ed). Proc. the 3rd Int. Conf. ER. World Scientific (1992): 246—263

31. Thurston G B, Gaertner E B. *J. Rheol.*, **35**, 7 (1991) : 1327—1343
32. Gamota D R, Filisko F E. *J. Rheol.*, **35**, 7 (1991) : 1411—1426
33. Rajagopal K R, Wineman A S. *Acta Mechanica*, **91** (1992) : 57—75
34. Ginder J M, Ceccio S L. *J. Rheol.*, **39**, 1 (1995) : 211—234
35. Stanway R, Sproston J L, Stevens N G. *J. Electrostatics*, **20** (1987) : 167—184
36. Mottershead J E, Stanway R. *J. Sound & Vib.*, **105**, 2 (1986) : 309—319
37. Stanway R, Sproston J, Firoozian R. *J. Dyn. Sys. Meas. and Contr.*, **111** (1989) : 91—96
38. Stevens N G, Sproston J L, Stanway R. *J. Mech. Trans. Auto. in Design, Trans. ASME*, **110** (1988) : 182—188
39. 卫爱霞. 电流变流体的研制及其性能的测试, 北京理工大学博士论文 (1991)
40. Bullough W A, Stringer J D. 3rd Int. Fluid Power Symp, Turin, May 1973. B.H.K.A., Cranfield, U.K., Paper No. F3: 37—51
41. Bullough W A, Foxon M B. The application of an electroviscous damper to a vehicle suspension system. 3rd Int. Fluid Power Symp., Turin, May 1973, B.H.K.A., Cranfield, U.K., Paper No. F3
42. Shulman Z P, Gorodkin R G, et al. *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **8** (1981) : 29—41
43. Kim Y S, Wang K W. *Mech. Syst. and Sig. Proc.*, **7**, 4 (1993) : 335—347
44. Ehrgott R C, Masri S M. Presented at the U.S. -Italy-Japan Workshop on Structural Control and Intelligent Systems (1992)
45. Gandhi M V, Thompson B S, Chci S B. *J. Sound & Vib.*, **135**, 3 (1989) : 511—515
46. Duclos T G. SAE 870963
47. Brooks D A. New direction in vibration control. IMechE (1992) : 125—129
48. Zheng Lou, Ervin R D, Filisko F E. In: Tao R (ed). Proc. the 3rd Int. Conf. ER. World Scientific (1992) : 453—464
49. Petek N K. SAE 920275
50. Morishita S, Mitsui J. SAE 910744
51. 魏宸宸, 傅昱. 电流变液体及其在汽车减振器上的应用. 兵工学报坦克装甲车与发动机分册, 3(1993): 33—38
52. 森下信, 三井纯一, 黑田洋司. 电流变液体在减振器上的应用. 日本机械工程学会论文集 (C编), **56**, 524 (1990) : 928—934
53. Wu X M, Stanway R, Sproston J L. ISATA.-Proc. 2. 22nd Int. Symp. Automat. Technol. and Automat., 14th-18th, May, 1990, Florence, Croydon (1990) : 823—830
54. Hartsock D L, Novak R F, Chaundy G J. *J. Rheol.*, **35**, 7 (1991) : 1305—1326
55. Johnson A R, Bullough W A, et al. In: Tao R(ed). Proc. the 3rd Int. Conf. ER. World Scientific (1992) : 424—441
56. Stangroom J E. In: Tao R (ed). Proc. the 3rd Int. Conf. ER. World Scientific (1992) 442—452
57. Dimarogonas A D, Kollias A. *STLE J. of Tribology Transactions*, **35**, 4 (1992) : 611—618
58. Tichy J. *STLE J. of Tribology Transactions*, **36**, 1 (1993) : 127—133
59. Nikolajsen J L, Hoque M S. *J. Vib. and Acoustics, Trans. ASME*, **112** (1990) : 440—443
60. Kollias A, Dimarogonas A D. 3rd Int Conf. Adaptive Struct. Technomic Publishing Company, Inc. (1993) : 176—193
61. 孟光, 殷达章, 姚国治. 电流变阻尼器在转子振动主动控制中的实验研究. 首次全国电流变学术会议论文集, 上海 (1995) : 123—130; 将发表于《航空动力学报》
62. Morishita S, Mitsui J. Proc. the 8th Int. Conf. on Rotordynamic. Lyon, France, Sept. 10-12 (1990) : 277—282
63. Morishita S, Mitsui J, et al. 日本机械学会论文集 (C编), **58**, 551 (1992) : 2045—2050
64. Morishita S, Mitsui, J. SAE 922290
65. Bullough W A, Peel D J. SAE 881786
66. Ushijima T, Takano K, Kojima H. SAE 880073
67. Ushijima T, Takano K, Naguchi T. SAE 881787
68. Petek N K, Gondie R J, Boyle F P. SAE 881785
69. Sproston J L, Stanway R, et al. *J. Electrostatics*, **32** (1994) : 253—259
70. Duclos T G. SAE 881134
71. Ehrgott R, Masri S. 3rd Int. Conf. Adaptive Struct., Technomic Publishing Company, Inc. (1993): 161—175
72. Gorodkin R G, et al. *Fluid Mechanics-Soviet Research*, **8**; 4 (1974) : 48—61
73. Sprecher A F, Chci Y, Conrad H. First Joint U.S./Japan Conf. on Adaptive Structure. Technomic

- Publishing Company, Inc. (1991) : 560—574
- 74 Oppermann G, et al. Proc. the 2nd Int. Conf. on Electrorheological Fluids. Technomic Publishing Co. (1990) : 287—299
- 75 Carlson J D, Duclos T G. Proc. the 2nd Int. Conf. on Electrorheological Fluids. Technomic Publishing Co. (1990) : 353—367
- 76 Ghandi M V, et al. *J. of Composite Mats.*, **33** (1989) : 1232—1255
- 77 Scott D, Yamaguchi J. *Automotive Engineering*, **93**, 11 (1985) : 75—79
- 78 Yamaguchi R, Sato S. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 1, **33**, 7A (1994) : 4007—4011
- 79 Okada H, Watanabe M, et al. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 1, **33**, 6A (1994) : 3518—3519
- 80 Sakaigawa A, Yokoi S, Nohira H. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 2 Letter, **33**, 8A (1994) : L1103—L1105
- 81 Hiller S, Pikin S A, et al. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 2 Letter, **33**, 8A (1994) : L1096—L1099
- 82 Hiller S, Pikin S A, et al. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 2 Letter, **33**, 8B (1994) : L1170—L1173
- 83 Nobuhiro H O, Kawatsuki. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 1, **33**, 1i (1994) : 6268—6272
- 84 Fontana M D, Abdi F, Wojcik K. *J. Appl. Phys.*, **77**, 5 (1995) : 2102—2106

STUDIES ON THE PROPERTIES OF ELECTRO-RHEOLOGICAL FLUID AND ITS APPLICATIONS

Yao Guozhi Meng Guang Fang Tong
Northwestern Polytechnical University, Xian 710072

Abstract Electro-Rheological (ER) fluid is a kind of new smart material which is very useful to industrial applications as its mechanical properties can be changed very quickly and also reversely by applied electric field.

In this paper, the research advances in the materials and the characteristics of ER fluid are reviewed at first, the applications of ER fluid to the vibration control of rotating machineries and to the engine mount and suspension system of vehicles are reviewed in detail. The applications of ER fluid in other fields and the future developments of the ER technique are also discussed.

Keywords *ER fluid; vibration control; rotor system; vehicle engine mount; suspension system*