

# 一门有发展前景的高新技术——电流变技术

魏宸官

(北京理工大学车辆工程学院, 北京 100081)

**[摘要]** 系统和全面地介绍了一门新兴的高新技术——电流变技术, 详细说明了该项技术的发展历史、特征、机理、现状、存在问题以及今后在我国发展该项技术的几点建议。

**[关键词]** 电流变液体; 电流变效应; 电流变技术

## 1 电流变技术发展简史

电流变技术 (Electrorheological Technology, 简称 ER 技术) 是近几年来成为国内外工程科技界人士倾注大量精力的一门高新技术。电流变技术的理论基础是利用某种特殊液体在电场作用下产生的电流变效应, 即在电场的作用或控制下, 液体的粘度可以敏感地变化和快速地增长, 直至在某一电场强度下, 停止流动达到固化, 并且有固体的属性, 即具有明显的抗剪屈服应力, 而且这一效应是可逆、可控和高灵敏度的。

电流变效应, 作为一种特殊的物理现象, 早在 19 世纪末就为物理学者所发现, 由于受当时所用流体的局限, 效应十分微弱, 没有引起工程技术界的重视。20 世纪 50 年代, 美国学者 Winslow W 通过自己的研究工作, 获得了一种具有强烈电流变效应的特殊流体, 即电流变液体, 使人们对这一物理现象开始作出重新的估价, 特别是 Winslow 本人, 首先看到了这种效应的工程应用前景, 并设计和研制了一些工程应用的样品, 因而引起了工程技术领域学者们对电流变效应的重视, 并开始致力于它的工程应用的探索。此后, 电流变效应的工程应用, 作为一种热门的高新技术为人们所追逐, 并为一些国家的政府部门和重要企业集团的决策部门所重视。国防部门 (如英国的国防部、美国的海军部)

重视这一技术, 是认为电流变效应能够解决为发展新型武器和相关系统中存在的一些特殊难题, 如核潜艇的隔音、消声; 直升机中旋翼的共振和飞行控制, 导弹中低温燃料的输送及在空中飞行稳定性的控制等等; 而企业集团, 特别是汽车工业 (如美国的 Ford, GM; 日本的 Toyota, Nissan) 和化学工业 (如美国的 Lubrizol/Rheoactive; 德国的 Bayer, 日本的 Asahi Chemical; 英国的 ER Fluids Development), 则是看重将电流变效应用于工程的电流变技术, 有可能取代已有的技术去开发一系列有市场竞争能力的新产品, 从而占有市场, 获得巨大的经济效益。

电流变技术的兴起和发展虽然历史不长, 但已大致走过了一条高新技术发展的必由之路, 即理论工作者, 特别是物理学者发现了电流变现象, 并从学术和学科发展的角度, 探讨它的机理和规律以及有关的影响因素; 工程技术人员则从电流变现象看到它的工程应用前景, 探讨它的工程应用可能性和现实性, 并扩展它的应用领域, 使之具有更普遍的应用价值, 并发展和形成一门高新技术去开发多种有竞争力的新产品; 至于企业界的人士则是看到了这门新技术开发成功的产品, 具有巨大的潜在市场价值和经济效益, 因而致力于它的商品化和大量生产。社会的需求是高新技术得以发展的动力, 但把发展高新技术的理想变为现实, 必须依靠科技工作

**[收稿日期]** 1999-08-26

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目 (K958901206, K59475015, K59872005)

**[作者简介]** 魏宸官 (1933-), 江苏常州市人, 北京理工大学教授, 博士生导师

者、企业界和决策机构的共识与相互配合才有可能。如果说 50 年代电流变效应转化为有应用前景的电流变技术仅是个别科学家分散和独立的个体行为的话，那么 50 年后的今天，人们已充分认识到了它的重大价值，并且一致肯定了它具有作为一门高新技术的主要特征和广阔的应用前景，开始有计划地把各方面力量组织起来，集中人力物力并力图在短时间内把这一理想变为现实。<sup>[1]</sup>

人们对电流变技术给予很高的期望，英国人在一份有关电流变液体的特别报告<sup>[2]</sup>中称它是“未来技术”，“一些工程师已从这种流体中（即电流变液）看到了第三个机器时代的曙光”；美国能源部编写的一份研究报告指出，“电流变液体具有使某些工业和技术部门引起革命性变化的潜力”<sup>[3]</sup>；工业和技术协会给国会和总统的 1993 年科学和技术政策的报告称，“ER 技术如果获得开发成功，则每年可提供 200 亿美元的产值”；日本的一份供政府专用的报告说<sup>[4]</sup>，“电流变技术能够在广泛的工程领域引起技术革命，例如，在汽车和航空工业中作为传输的中间环节，改变地面和空间的结构环节，机床工具和电子装置和军用领域的通用吸振装置”。

电流变技术作为一门具有可以推动技术进步和革新的高新技术，并不是人们的一种臆想，而是有充分科学依据的现实，同时它的广阔应用领域和巨大的市场前景和潜在的经济效益也是诱人的，从而吸引了十几个国家 60 多个科研机构、高校和企业的众多科技工作者，从事着 ER 技术的科研和开发工作。而且所有参与这项技术开发的人们都深信，一旦此项技术的工程应用获得成功，其经济效益将是十分巨大的。但到目前为止，电流变技术仍然是正在开拓和发展过程中的高新技术，而一门新技术的发展往往是曲折和复杂的，它的成功，需要付出巨大的人力和物力，而且更需要一定的时间。开发的过程是人们艰苦努力工作的过程，其中需要有坚忍不拔的进取精神和克服困难的毅力及持之以恒的耐心。

我国电流变技术的研究始于 80 年代中期，最早是由高校从事工程技术的科研人员，及时参与了当时国际上正处于 ER 技术探索高潮的竞争行列，这个项目在国内首先得到了自然科学基金委的重视，并被列入重大项目予以资助。此后，这一技术在国内有了很大的发展，特别是来自科学院和高等

学校学者的参与，使机理工作和液体材料方面的研究工作获得了快速发展，提供资助的单位也扩大到国防预研基金，国家重点实验室建设基金，中科院及有关省部委的基金资助，因而不到 10 年的时间，国内参与此项科研工作的科研机构 and 高等院校已多达十几个；但与国外相比，令人感到不足的是几乎没有一家公司和企业参与和资助这项高新技术，给此项技术用于工程领域的研究开发带来困难。

## 2 电流变效应的特性和机理

电流变效应是发展电流变技术的基础和根本依据，为此必须对电流变效应的特征和机理有一个全面的认识。

### 2.1 电流变技术作为高新技术的基本特征

电流变效应是指某种特殊液体在电场的作用下，其流动状态或流体的属性发生强烈变化的现象，通俗的理解是指在电场的作用下，流体的表观粘度（或流动阻力）可发生明显的变化，甚至在电场强度达到某一临界值时，液体停止流动而达到固化，并且具有明显的抗剪屈服应力，即由流体的属性转变为一种具有固体属性的物体。

目前常用的电流变液体是一种固体粒子混合于基础液体中的两相悬浮液。对这种液体的电流变效应，其特征如下<sup>[5]</sup>：

(1) 在电场的作用下，电流变液体的表观粘度逐步增大，而且随电场的变化作无级的连续变化，甚至在某一电场强度下，达到固化；但当电场消除后，电流变液体又可回复原始的粘度，这是电流变效应的第一特征，即在电场作用下，电流变液体可在液体和固体属性之间转换，特别是具有明显的抗剪屈服应力出现。

(2) 在电场作用下，电流变液体由液态至固态的转换是可逆的，这是电流变效应的第二个特征。如果这一转换是不可逆的，则此效应就无很大价值。因为，在现实生活中，由液态转为固态的实例很多，如胶水的固化，但它们很难实现快速的可逆转换。

(3) 在电场作用下，电流变液体由液态至固态的转换是可控、无级和连续的，即这一转换可以用一个场强信号（或电压），由人工控制和自动控制来实现，这是它的第三特征。

(4) 电流变效应的控制十分简单，即仅用一个十分容易获得的电压或电场强度信号。

(5) 电流变效应的响应十分灵敏, 一般其响应时间为毫秒级。

(6) 控制电流变效应的能耗低, 即由液态向固态转变, 不像物理现象中的相变, 要吸收或放出大量的能量。

电流变效应极有可能应用于振动的阻尼无级调节和控制; 传动中转速、扭矩和力的无级调节和控制; 运动中位置的精确控制; 高速响应的开关控制以及液体传动中的流量控制和压力控制等等, 并且在这些应用领域, 迅速发展一种工作原理全新的高新技术, 开发一系列新的产品, 并推动这些领域的技术进步和革新。

此外, 从工程技术角度来看, 利用电流变效应在上述领域开发出来的新产品; 一般可具有如下的特点<sup>[6]</sup>:

使控制和调节具有无级连续变化的性能; 主要工作构件无磨损, 寿命长; 工作柔和、噪音低, 响应速度快; 结构简单、可靠, 控制的能源消耗低; 易于和计算机技术相结合, 形成智能化控制。

因此, 利用电流变效应开发的新产品与已有的产品相比, 有明显的优势和市场竞争能力。正是由于电流变效应的上述特征, 以及其广泛的应用领域和市场竞争中的明显优势, 人们才意识到了电流变技术是一门有应用前景和市场价值的高新技术。

这也就是为什么进入 20 世纪 80 年代和 90 年代, 一些先进的技术大国如美国、英国、德国、日本、法国竞相投入人力物力从事电流变效应的基础研究, 以及电流变效应的工程技术应用研究, 并力促电流变技术开发的产品尽快商品化、产业化的原因。

## 2.2 电流变效应的机理

从宏观的角度看, 电流变效应是在电场作用下, 液体的流动阻力或剪切应力逐步变化和增加的过程。这一过程可以用以下的公式来描述, 即

$$\tau = \mu_0 \frac{dv}{dh} + \tau_R(E)$$

式中,  $\tau$ ——液体流动中所产生的剪切应力或流动阻力;

$\tau_R$ ——电流变液体在电场作用下, 逐步固化或稠化所引起的剪切应力, 通常称作电致屈服应力;

$\mu_0$ ——基础液的粘度;

$dv/dh$ ——液体在与流动垂直方向上, 单位

距离上的速差或剪切速率, 在零电场下,  $\tau_R = 0$ , 此时的电流变液体一般应具牛顿流体的性质, 即  $\mu_0$  保持为常数,  $\tau$  随  $dv/dh$  的增大而增大, 当施加电场后,  $\tau_R(E)$  逐步增大, 此后的  $\tau$  由两部分组成, 流体不完全遵循牛顿流体的性质, 特别在固化以后, 当  $dv/dh \rightarrow 0$  时,  $\tau = \tau_R$ , 而在未固化以前则  $\tau$  由  $\mu_0 \frac{dv}{dh}$  和  $\tau_R$  两部分组成。

电流变液体的电流变效应也可以认为是液体粘度逐步增大的过程, 但这一粘度或普通液体的粘度有所区别, 因而称之为表观粘度, 如以  $\mu_R(E)$  表示, 则

$$\mu_R(E) = \mu_0 + \frac{\tau_R(E)}{dv/dh}$$

所有上述两种表达方式, 液体都必须处于运动状态, 即  $dv/dh$  不应等于零。同时, 可以看出, 当  $dv/dh$  减小时, 即剪切速率很低时,  $\frac{\tau_R(E)}{dv/dh}$  将十分大, 也就是  $\mu_R(E)$  会比  $\mu_0$  有极大增长, 但当  $dv/dh$  增大时,  $\mu_R(E)$  将逐步与  $\mu_0$  接近。

为了说明电流变效应的机理, 很明显必须探讨在电场作用下,  $\tau_R(E)$  或  $\mu_R(E)$  的增长原因。

通过大量的微观观察和试验研究, 对于以两相悬浮液为基础的电变液体普遍认为电流变效应的产生是由于悬浮液中的固体粒子在电场的诱导下产生极化, 极化后的粒子相互作用, 在电场中, 首先在两极之间形成链(或纤维), 当电场进一步加强时, 链间相互作用, 而成柱(或纤维束), 两相电变液体中的固体粒子从电场为 0 时的无序排列, 到电场作用下逐步地在两极的流道间成为有序排列, 直到成为稳定的固化结构是电流变液体表观粘度  $\mu_R(E)$  或剪切屈服应力产生和逐步增大的原因, 这种分析已经被大量的微观研究所证实。

电流变液体在电场作用下的极化包括两部分: 基础液的极化, 即电粘效应; 粒子的极化或粒子在基础液中的链化效应, 而电流变液体产生的电流变效应, 应是两者的综合。

对两相悬浮液, 电流变效应所产生的电致抗剪屈服应力  $\tau_R(E)$  主要是由粒子的链化效应所产生, 电粘效应可以改变电流变液体的基液粘度, 但不能产生电致抗剪屈服应力。但是, 在流动状态下的电粘效应, 可以引起随剪切速率增大而增高的剪切力。因此, 对于有强电粘效应的基础液, 这部分效应不应忽略。

大量的研究表明，粒子的极化有两种可能，一是发生在粒子内部的极化，包括电子云极化、离子极化和偶极子转向极化；二是发生在粒子与基础液接触处的界面极化，其最主要的形式是双电层极化。

### 3 电流变技术发展的现状及问题

一个成熟的新产品能够进入市场至少应具备几个条件，即必须有优于现有产品的优良性能；有令人信服的使用可靠性和足够长的寿命；必须在价格上有竞争能力；便于大量生产或者在大量生产时没有困难。

但是，目前用电流变技术开发成功的样品，都难以满足上述要求，其核心的原因之一是，现有水平的电流变液体其性能指标还不能满足开发各种新产品在性能、寿命、可靠性及成本方面的要求，因为可供使用的电流变液体的新产品，对电流变液体本身提出了很高的要求<sup>[7,8]</sup>，例如：

满足工程应用要求的力学性能，目前要求在场强低于 3 kV/mm，容积比低于 30% 的情况下，抗剪屈服应力达到 20 kPa，但目前最好的电流变液体只能达到 5 kPa 以下；

较广的温度工作范围，一般应在 -50℃ ~ 150℃ 之间；

良好的物理性能的稳定性，最重要的是在高速离心场和重力场以及高剪切率 and 高温作用下，能够保持不沉淀，不变质，或不产生明显的相分离现象，以及长期工作的性能稳定性；

良好的化学稳定性，包括粒子、基础油的稳定性，不老化且性能稳定；

良好的电学性能，包括极化能力、耐压、电导、介电性能的稳定；

要求低的电流密度和电能消耗以防止过度发热；

无毒及不对环境造成污染和腐蚀。

根据 1986~1991 年的统计，有关电流变液体的专利已达 125 项之多（统计很不全，特别没有包括 1991 年至 1999 年的数字），但能够提供商品应用的几乎没有。国际上只有几家可提供科研试验用的样品。

除了电流变液体的性能达不到市场要求以外，新产品的要求发展要求工程技术人员能够充分利用电流变效应在结构上设计出满足使用要求的产品，但是

利用机械设计方法去充分显示电流变效应的功能却是一个新的课题。在这方面，工程技术经验不足，成熟的产品需要通过反复的实践和修改，方能达到实用，而这一切需要时间。对于利用电流变效应所开发的新产品，给予它们的时间还很短，因此，近几年来尽管大量出现了有关电流变液体的新型装置的发明专利和实用新型专利，但市场上却很少见到成功使用的产品。根据 1986~1991 年的统计，有关电流变液体装置的专利已有 138 项之多，有个别项目近期可能走向市场。

在结构设计方面，除了装置本身以外，还包括应配置可供实用、质量轻、体积小的高压可调电源以及相应的闭环控制系统。

为了推动此项技术的进展，有几项重要工作要做，即加强对电流变效应的基础理论和高性能的电流变液体的研究；加强电流变技术的工程应用和开发新产品的研究；完善电流变效应及电流变技术研究所需要的测试手段，建立先进的电流变实验室；与生产部门合作，完善电流变液体及电流变液体新产品的生产开发和组织准备。

此外，这些有待开展的工作是紧密相关的，基础理论就内容来说是揭示电流变效应的机理，找到获得有强烈影响电流变效应的各种措施。机理研究的目的是为指导研制高性能的电流变液体指明方向和提供依据，背离了这一点，就会把研究工作变成学院式的纯理论性探讨。高性能电流变液体的研制是发展电流变液体新产品的关键，必须使电流变液体的开发和研制目标针对工程应用，因此，其性能的提高与完善，必须依据工程应用的需要和满足工程应用的要求为其奋斗目标。因此，电流变液体的研制，一方面要吸收基础理论研究的成果，得到研制高性能电流变液体的理论依据，同时又必需与工程技术人员密切合作，研制符合新产品使用所要求的电流变液体。至于电流变技术的工程应用和新产品开发，这是本项科研工作的最终目的，工程技术人员责任是应用机械设计的技巧，充分利用电流变效应的特长，开发出一系列新产品。

最后，所有有关电流变技术的研究工作，离不开完善和先进的测试手段和良好的实验条件，这需要花费大量的资金。根据我国的人力物力条件，我们认为应该充分利用合作和开放的渠道，充分利用国内各单位已有的测试设备，只有在国内不能解决的情况下才考虑购置或引进，以最大限度地节约科

研投入,但是前提条件是必须有完整的体系以保证整个研究工作的质量和精确性。而新产品的生产工作,则是新产品开发最终能否进入市场的最终归宿。

根据多年来我们的体会,在科研工作的智力和人力投入方面,我们并不比任何国家差,但是在实验手段的投入和生产方面的投入,则往往难以得到保证,以致使我们科技人员的许多宝贵成果只能停留在样品和论文阶段,不能转化为商品,创造效益。十分值得借鉴的是日本人对开发电流变技术的作法,日本真正投入电流变技术的科研和工程应用不能算太早(大致在1988年前后),但日本人十分重视工程应用和产品的开发工作,他们的资金投入并不只依靠国家和一般的基金资助,而是由大的企业集团直接投资进行开发。目前在日本是由最有实力的大企业,如丰田、三菱、日产等集团公司出面组织的,他们资金雄厚,测试手段先进,与生产联系紧密,因此在1993年第四届电流变学术会议期间,许多专家预测电流变技术的真正收益者将首先是日本人。我们目前虽然已有不少的人力和物力投入了科研工作,但资助仅限于国家和部门的科研基金,其资助强度十分薄弱,同时几乎与生产单位没有联系,而且也没有一个有实力的企业集团来资助这项高新技术的开发,这是我们深为担忧的,笔者非常希望一些有眼光的企业家能投入这项有前景的高新技术开发资助的行列。

#### 4 几点建议

面对这样一项多学科交叉的高新技术的开发,依靠一个单位和几个人的力量是绝对不可能的。有鉴于此,进入90年代后,一些发达国家都已开始组织起来,并依靠高校、研究机构、工厂企业的联合,形成大规模的联合攻关态势。例如,英国就是在国防部的授意下,把全英国从事研究电流变液体及工程应用的单位以辛迪加的方式组织起来,其中包括著名的大学5所,研究机构和工厂企业9所,分别从事机理、材料、工程应用及产业化的工作。日本为急起直追并超越其它国家,在通商产业省的组织下,通过细致地调研,也组织了几家学校、研究机构和工厂企业,集中了足够的人力和物力实现着他们的开拓计划。根据统计,从1988年至1991年内,日本就发表了有关电流变液体的专利95项,有关工程应用的专利21项,论文11篇,三项总数

跃居世界首位。美国也相应地进行了组织工作,海军部、陆军部及能源部以及国家实验室,也分别联系了12所大学,8家公司参与这项工作。

我国从1986年开始这项工作以来,前5年只有几个单位从事这项工作,且主要是国家自然科学基金予以资助。进入90年代以后,国内参与这项研究的高等学校和科研机构已多达13所之多,中科院所属的机构也有4个,资助的单位也由国家自然科学基金转入各单位的上级机构和省、部级机构。如中科院基金、省部的科研基金、国防预研基金、博士点基金等。唯一不足的是,没有一个公司和企业部门加入这个行列,但是就目前的情况而言,不论是由政府机构出面或各单位自己联合出面,组织起来,协调各方力量,分工合作,合理利用资金和人力已显得十分迫切。根据我国的特点,我们认为在充分调查研究的基础上,由一个权威机构把各方面组织起来,制定一个周密计划,并分工合作是十分必要的,这也是我们在这项技术的发展上能否取得成功的关键。

从技术上来说,攻关的方向和目标如下:

##### 4.1 基础理论研究

除了进一步弄清电流变效应的机理和影响它的有关因素外,目前应该集中精力探讨电流变效应所导致的固化后的抗剪屈服应力(或表观粘度)的极值问题。就目前情况看,如果限制容积比在0.30~0.40之间,场强限制在3 kV/mm以内时,最大的电致屈服应力大致只能达到4~5 kPa,显然,这一指标距离要求的工程应用还存在一定距离。据推测,未来要求的电流变液体,其固化后的抗剪屈服应力应能达到40 kPa(预期可能是20 kPa),因此,为理论研究领域提出了一项重要的课题,即电流变效应产生的固态抗剪屈服应力,能否达到40 kPa这一数值;如粒子的极化作用所产生的力不能超过或达到这一数值,则应及时扭转这一方向,另外探求能够使流体受控固化的其它途径。

##### 4.2 电流变液体的粒子材料

目前已获得的具有电流变效应的粒子材料虽然很多,但所能获得的性能指标均没有达到预期的数据。

目前,较现实的性能要求是在容积比为0.3~0.4,场强3 kV/mm时,剪切屈服应力达到4 kPa左右,但这一性能应该长时间在工作状态下稳定,此外要求的工作温度范围为-40℃~150℃,另外

不会沉淀，引起相分离。

我们应该把力量集中于能搞出 1~2 种达到上述要求的流体，并尽快投入较大生产，以降低成本。目前，国际上价格约为 500 美元/L。

#### 4.3 工程应用

我们认为应该向极有可能获得成功的样品投入人力和物力，集中于 1~2 种有重大影响和经济效益的新产品开发上，并尽快实现产业化，降低生产成本。目前工程应用需要开展的工作有以下几个方面：

首先是解决关键技术问题，其重点不是经济效益，而是体现利用电流变液体的特长，攻克某些关键的难题，特别是国防应用和民品中的攻关项目。

其次，在于商品化和市场效益的问题。目前，集中于汽车工业中的减振、调速、开关、密封，近期应集中精力搞小功率的离合器和减振器及隔振装置。

在资金的筹集方面，除了依靠基金和国家立项资助外，可以利用各部门的基金，更重要的依靠有发展眼光的赢利企业的投资。目前，我国正大力提倡科教兴国，在科研上更大力提倡创新精神，有一个良好的社会大环境，因此有理由认为，含有高新知识含量并具有发展前景的 ER 技术，必然会引起相关人士和机构的重视。

#### 参考文献

- [ 1 ] 魏宸官. 关于电流变技术工程应用的现状、前景及问题 [C]. 上海：首次全国电流变学术会议论文集，1995
- [ 2 ] Constance J A. Special report on electrorheological fluids [R]. Future Technical Insights Inc. : A probing look at strategic technologies that will significantly affect industry
- [ 3 ] A research needs assessment [R], Final Report: electrorheological fluids (ERF), prepared for U S department of Energy, Office of Energy Research, Office of Program Analysis. May, 1993
- [ 4 ] JPRS Report: Science and technology developments in electrorheological fluids [R]. for official use only, April 24, 1992 (Smart Fluid Research Association Committee)
- [ 5 ] 魏宸官. 电流变液体及电流变技术 [J]. 兵工学报, 1995, (1): 45~64
- [ 6 ] 魏宸官, 肖革文. 电流变液体及其潜在的工程应用 [J]. 北京理工大学学报, 1998, (5): 573~576
- [ 7 ] Wei Chenguang, Wei Aixia. Research on some aspects of electrorheological technology and electrorheological fluids [C]. Proceedings of the 1st international symposium on fluid power transmission and control, Beijing: October 13~15, 1991, 625~627
- [ 8 ] Wei Chenguang, Wei Aixia. The research in the applications of ER technology in engineering [C]. Proceedings of the 3rd international conference on electrorheological fluids, Carbondale, Illinois, USA: October 15~16, 1991, 465~469

## A New High-tech Development with Potential Wide Applications——Electrorheological Technology

Wei Chenguang

(School of Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

[Abstract] A new high-tech development with potential wide applications——electrorheological technology (ERT) is introduced in this paper, in which following contents are included. The Definitions of ER effect and ERT, background and history of research and development of ERT worldwide, understanding and mechanism of ERT, potential engineering applications of ERT, principal problems and obstacles in the development of ERT are presented. In addition, some suggestions for ERT development in China are proposed.

[Key words] ERF; effect of ER; ERT