

# 智能型隔震系统和电流变体阻尼器设计<sup>\*</sup>

李 黎 唐家祥 熊雷生

(华中理工大学土木工程系 武汉 430074)

**【摘要】** 电流变体 (Electro-Rheological Fluid, 简称 ERF) 的屈服应力  $\tau_y$  能随电流强度变化而变化, 利用它的这个独特性能, 可以制成智能型阻尼器, 其阻尼力的大小也可根据需要随时改变。若把它用于隔震结构中, 与其它隔震装置一起就可形成智能型的隔震系统。

**【关键词】** 电流变体 智能型阻尼器 屈服应力  $\tau_y$

**Abstract** The yielding stress  $\tau_y$  of electro-rheological fluid can be modified by changing electric current strength. Smart damper is available by using such kind of speciality, and the damping force can also be changed freely according to different needs. If it is combined with other isolation devices in isolated structure, a smart isolation system would be created.

**Key words** electro-rheological fluid, smart damper, yielding stress  $\tau_y$

## 一、智能型隔震系统

由 ERF 液体制成的阻尼器称为电流变体阻尼器, 加上基础隔震支座、传感器、计算机和高压电源, 就形成了一个智能型隔震系统, 如图 1 所示。

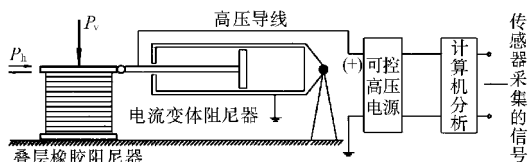


图 1 智能型隔震系统

无地震时, 电流变体阻尼器不工作。当发生地震时, 隔震支座连接钢板处的加速度或位移变化情况被传感器感知, 其信号放大后输入计算机, 由计算机经过分析计算后发出命令, 去调节高压电源的电压, 就可改变电流变体阻尼器的阻尼性能, 以保证上部结构的减震效果并使隔震支座的位移控制在容许范围之内。

## 二、电流变体材料试验

电流变体是一种把高介电常数的固体微粒弥散于低介电常数的绝缘油液中的悬浮液体。没有外部电场作用时, 它能像液体一样流动。加上电场后, 电流变体中的分散微粒

产生电极化, 微粒沿电场方向排列, 并互相吸引, 形成纤维状结构。液体的粘度也随之发生变化, 电场越大, 粘度就越大, 甚至可以变成固体。这种变化可以在毫秒内完成, 而且是可逆的。电流变体在电场作用下大多呈宾汉固体行为, 即有屈服应力  $\tau_y$  存在。只有当外力大于  $\tau_y$  时, 电流变体才会流动,  $\tau_y$  越大, 电流变体的活性就越大。屈服应力  $\tau_y$  随电场强度变化的规律已由静力屈服试验得出, 其结果示于图 2 中。由图 2 可见, 屈服应力  $\tau_y$  的强度取决于电场强度  $E$ , 只有当电场强度  $E$  比临界电场强度  $E_0$  大

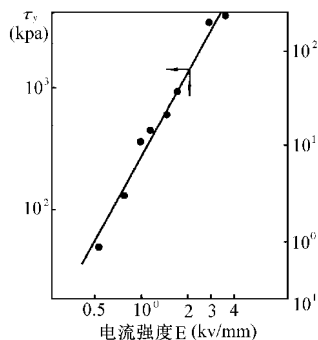


图 2 电场强度  $E$  对屈服应力的影响

\* 国家自然科学基金资助, 批准号: 59578028

时, 电流变体的  $\tau_y$  才上升, 其变化几乎是直线。由于电流变体的这种特殊性能, 可以被用来制造智能型阻尼器。

### 三、电流变体阻尼器设计简介

本研究设计了一个单筒体外循环式电流变体阻尼器, 它由一个主油缸、一个辅助油缸、活塞、泄流孔、ERF 液体和电极板等组成, 见图 3。

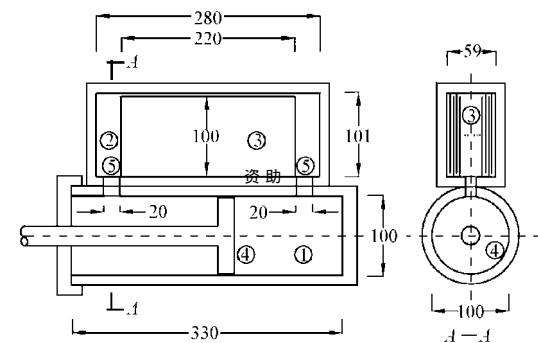


图 3 电流变体阻尼器

注: ①—主油缸; ②—辅助油缸;  
③—电极板; ④—活塞; ⑤—泄流孔

主油缸长  $l_1 = 33.0\text{cm}$ , 内直径  $d_1 = 10.0\text{cm}$ , 活塞的最大行程为  $\pm 10.0\text{cm}$ , 泄流口的直径  $d_2 = 2.0\text{cm}$ , 辅助油缸长  $l_2 = 28.0\text{cm}$ , 有 15 个高压电极板, 14 个接地电极板, 连同外壳共形成了 30 个电场, 每个电极板的长  $l_3 = 22.0\text{cm}$ , 宽  $h = 10.0\text{cm}$ , 厚  $t = 0.1\text{cm}$ , 其面积  $S_1 = l_3 \times h = 220.0\text{cm}^2$ , 两个电极板之间的距离  $\delta = 0.1\text{cm}$ 。

### 四、阻尼力计算

电流变体阻尼器的阻尼力  $F$  是由两部分组成的, 一部分是由 ERF 的特性引起的, 称为电致流动阻尼力  $F_E$ , 另一部分是由液体的粘性所引起的, 称为本底流动阻尼力  $F_N$ , 即

$$F = F_E + F_N \quad (1)$$

其中,  $F_E$  只与电场的强度有关, 而与振动频率无关, 可以表达如下:

$$F_E = 2S_1 n \tau_y \quad (2)$$

式中  $n$  —— 电场总数。

假设电场的最大强度  $E_{\max} = 4\text{kN/mm}$ , 则相应的屈服应力为:

$$\tau_y = 5.0\text{kPa} = 0.5\text{N/mm}$$

因此本阻尼器的最大设计电致流动阻尼力

为:

$$F_{E\max} = 2 \times 220 \times 30 \times 0.5 = 6600\text{N} = 6.6\text{kN}$$

这也就是说, 通过控制电场强度  $E$ , 电致流动阻尼力可以控制在  $0 \sim 6.6\text{kN}$  范围内。

$F_N$  是一个与流动速度有关的量, 它包括由 ERF 液体在两个电极板之间流动时引起的粘性阻尼力  $F_{N1}$  和由泄流孔引起的阻尼力  $F_{N2}$ , 即:

$$F_N = F_{N1} + F_{N2} \quad (3)$$

对于不可压缩的恒定流动, 两电极板间的速度分布  $u_x$  为抛物线, 取  $x$ 、 $y$  坐标分别平行和垂直于电极板, 原点置于两电极板的中心时, 则有:

$$u_x = -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \left( \frac{\delta^2}{4} - y^2 \right) \quad (u_y = u_z = 0) \quad (4)$$

式中  $p$  —— 两个电极板之间液体的应力强度;

$\mu$  —— ERF 液体的粘度 (单位:  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ );

$\delta$  —— 两电极板间的距离。

由于  $\frac{dp}{dx} = C$  (常数), 因此:

$$u_x = -\frac{1}{2\mu} C \left( \frac{\delta^2}{4} - y^2 \right) \quad (5)$$

液体的平均速度

$$\bar{u}_x = \frac{1}{\delta} \int_{-\delta/2}^{\delta/2} u_x dy \quad (6)$$

把公式 (5) 代入公式 (6) 中, 得:

$$\begin{aligned} \bar{u}_x &= \frac{1}{2\mu} C \int_{-\delta/2}^{\delta/2} \left( \frac{\delta^2}{4} - y^2 \right) dy \\ &= -\frac{\delta}{12\mu} C \end{aligned} \quad (7)$$

假设活塞的平均速度是  $v$ , 根据连续条件有:

$$\frac{1}{4} \pi d_1^2 v = \bar{u}_x \delta n = -\frac{n \delta^3 h}{12\mu} C \quad (8)$$

式中  $h$  —— 电极板的宽度。

由公式 (8), 我们可以得到:

$$C = -\frac{3\mu \pi d_1^2 v}{n \delta^3 h} \quad (9)$$

由于

$$\frac{dp}{dx} = C \quad (10)$$

由公式 (9)、(10) 可以得到:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = -Cl_3 = \frac{3\mu \pi d_1^2 v l_3}{n \delta^3 h} \quad (11)$$

活塞上的阻尼力为:

$$F_{N1} = \frac{1}{4} \pi d^2 \Delta p = \frac{3 l_3 \pi^2 d_1^4}{4 n \delta h} \mu_v \quad (12)$$

把本设计相应的数据代入公式 (12), 得:

$$F_{N1} = \frac{3 \times 0.22 \times 3.14^2 \times 0.1^4}{4 \times 30 \times 0.001^3 \times 0.1} \mu_v \\ = 54227.8 \mu_v$$

由泄流孔引起的阻尼力  $F_{N2}$ :

$$F_{N2} = \frac{(\pi d_2^2/4)^3}{(\omega d_1^2/4)^2} \times \frac{\gamma}{2g} \times v^2 \\ = \frac{\pi d_2^6/4}{\alpha^2 d_1^4} \times \frac{\rho}{2} \times v^2 \quad (13)$$

式中  $\gamma$ ——ERF 的比重;

$g$ ——重力加速度;

$\alpha$ ——理论与实际的流动修正系数。

把相应的数值代入式 (13), 得:

$$F_{N2} = 2.455 \frac{\rho v^2}{\alpha}$$

总本底阻尼力为:

$$F_N = F_{N1} + F_{N2} = 54227.8 \mu_v + 2.455 \frac{\rho v^2}{\alpha}$$

经试验 ERF 液体的材料常数为:

$$\mu = 2.52 \times 10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{s} \quad \rho = 1069 \text{kg/m}^3$$

$$\alpha = 0.95$$

因此, 当  $v = 0.4 \text{m/s}$  时,

$$F_N = 1011.9 \text{N} = 1.0 \text{kN};$$

当  $v = 2.0 \text{m/s}$  时,

$$F_N = 14364.7 \text{N} = 14.4 \text{kN}.$$

把  $F_N$  值与  $F_{\text{Emax}}$  相加, 就可获得本设计的电流变体阻尼器的阻尼力:

$$F = (1.0 \sim 14.4) + 6.6 = 7.6 \sim 21.0 \text{kN}$$

## 五、被控高压电源

为了提供所需的电场强度, 本阻尼器要求最大的输出电压为  $V_{\text{max}} = 6 \sim 8 \text{kV}$ 。同时它必须能按接收到的信号随时改变其大小, 输出电压为直流, 其反馈速度必须达到毫秒数量级。

对输出功率的要求, 由于 ERF 液体是由半导体物体组成的, 当电场强度  $E = 3 \sim 4 \text{kV}$ , 其漏电密度系数  $i < 10^2 \mu\text{A/cm}^2$ , 取:

$$i = 60 \mu\text{A/cm}^2$$

电极板的面积  $A = 10 \times 22 \times 2 \times 15 = 6600 \text{cm}^2$

最大的输出电流:  $I_{\text{max}} = iA = 60 \times 10^{-6} \times 6.6 \times 10^3 = 0.396 \text{A}$

最大输出功率:  $P_{\text{max}} = I_{\text{max}} \times V_{\text{max}} = 0.396$

$$\times (6 \sim 8) \times 10^3 = 2.376 \sim 3.168 \text{kW}$$

由于电源工作于最高输出电压时间是极短的, 因此电源可以短时超载, 实际功率不需要这么大。

## 参 考 文 献

- [1] 吴水珠等, 电流变体材料及其应用, 材料导报, 1995, 6: 47 ~ 50
- [2] 吴忠等, ERF—用于振动控制的新材料, 噪声与振动控制, 1994

(上接第 26 页)

(2) 对于纵、横墙上设置的构造柱要求, 补充相应的构造柱间距的限制。从而使构造柱在防止墙体突然倒塌中起更大的作用。

(3) 对混凝土小型空心砌块的补充主要在芯柱的设置方面, 由于允许建造层数和高度的提高, 对小砌块承重墙体的要求亦有所提高, 为此, 对芯柱间距的限制是必不可少的。

芯柱作为提高小砌块墙体的抗震能力是十分重要的。但对于防止此类墙体的突然倒塌, 以及芯柱的最小截面难以保证时, 设置构造柱同样是十分有效的措施。为此, 相应补充了这方面的内容。

6. 对底部框架-剪力墙结构中托墙梁的规定

这是以往规范中不够明确的。作为承托上部承重墙体的框架梁的设计计算, 在理论上并未完全解决, 尤其抗震设防地区, 按允许“裂而不倒”的概念, 承重墙体可以带有裂缝工作, 因此就不是静力设计时的概念, 托墙梁可以考虑“内拱”作用, 从而对墙梁上的荷载可以折减。

此次修订中的原则是, 承托四层和四层以下的墙梁在计算弯矩时, 上部荷载不折减; 当超过四层, 且跨中  $1/2$  区段内墙体仅有一个洞口时, 可仅取四层荷载。