

圆盘式电流变传动机构的性能

杨进民 黄宜坚

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362011)

摘要 圆盘式电流变传动器是电流变传动机构的主要领域, 而机构的功率损耗及其效率又是整个机构动态研究的重要课题. 文中研究装置的粘性功耗及漏导功耗, 提出 1 个新参量——控制能力系数. 该系数可用来研究装置尺寸及材料参数的选取, 其对机构性能的影响.

关键词 电流变流体, 功率损耗, 控制能力系数

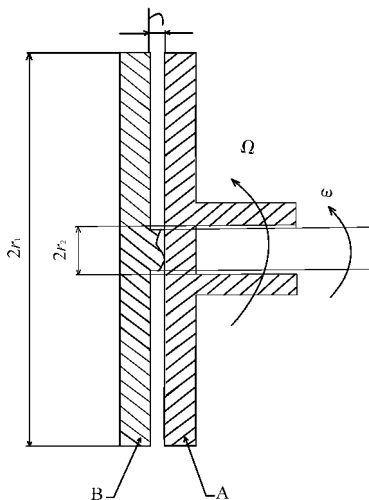
中图分类号 TH 137 TP 215.02+7

文献标识码 A

电流变流体是 1 种新型智能材料, 对其应用研究已引起社会各界广泛的兴趣. 电流变流体是由作为分散相的固体粒子和作为连续相的基础液所组成^[1]. 在电场的作用下, 电流变液的表观粘度可随场强的增大而增大, 甚至在某一电场强度下, 达到停止流动或固化. 但当电场撤除后, 电流变流体又可恢复到原始的粘度, 而且其响应时间为毫秒级^[2]. 这种现象被称之为电流变效应. 利用电流变效应, 可以设计出新一代的离合器、阀门、减振器和隔振器等电流变器件. 此类器件具有结构简单、响应迅速、低噪声和节能等一系列优点. 电流变技术被公认为具有巨大的工程应用前景. 它一旦被突破, 将在汽车、机电、液压技术和机器人等工业中引起技术革命. 根据工作流体在机构中的流动形态, 可将目前已知的各种 ER 机构分成 3 种类型, 即流动模式(flow-mode)、剪切模式(shear-mode)和挤压模式(squeeze-flow mode)^[3]. 本文的圆盘式电流变传动机构, 它是利用剪切流动来传递力矩的.

1 圆盘式电流变传动机构的粘性功率损失

图 1 为圆盘式电流变传动机构工作示意图, 其中圆盘 A 套在圆盘 B 的转轴上. A 盘内径为 r_2 , A、B 盘的外径均为 r_1 , 图 1 圆盘式电流变传动装置简图两盘间距是 h . A 盘为主动盘, B 盘为从动盘. 当充满 ERF 的两盘之间加一电场时, 由于 ERF 的电致屈服应力和粘性剪切应力产生的力矩 T , 带动 B 盘旋转, B 盘转轴右端接负载端. 设



主、从盘的角速度分别为 Ω 和 ω 则两圆盘传递的力矩^[6]为

$$T = \int_{r_1}^{r_2} \tau \cdot 2\pi r^2 dr = \frac{2\pi\tau_y}{3} [r_1^3 - r_2^3] + \frac{\pi\mu\Delta\Omega}{2h} [r_1^4 - r_2^4]. \quad (1)$$

上式中, τ 为流体的剪切应力, τ_y 为流体的屈服应力, μ 为电流变液粘度, $\Delta\Omega = \Omega - \omega$ 为主从动盘的角速度差. ERF 在无外加电场作用时表现为牛顿流体, 在有外加电场作用下表现为 Bing-ham 流体. 因此, 式(1)所得力矩, 第 1 项 T_r 代表电致屈服应力所引起的力矩, 第 2 项 T_μ 代表粘性剪切应力所引起的力矩.

由 $W = T \cdot \Delta\Omega$ 可得电致屈服应力传递的功率为

$$W_r = \frac{2\pi\tau_y\Delta\Omega}{3} [r_1^3 - r_2^3]. \quad (2)$$

由于粘性阻力引起的损失功率为

$$W_\mu = \frac{\pi\mu\Delta\Omega^2}{2h} [r_1^4 - r_2^4], \quad (3)$$

则电机输入的总功率为

$$W_{in} = T_{in}\Omega = W_r + W_\mu. \quad (4)$$

在上述公式中, 电致屈服应力传递的功率为有用功率, 而粘性阻力引起的功率为无用功率.

2 传动机构的漏导功耗

图 2 所示机构可看为一个电容器, 而任何电容器介质的绝缘电阻不可能是无限大. 其中或多或少总有一些漏导电流通过. 这样便产生了能量损耗, 即电容器的漏导功耗. 过大的漏导电流能导致整个机构效率降减, 电流变液变质, 甚至电击穿. 美国的 Chu 认为 $J = cE^n$, J 为电流密度, c 为待定系数, E 为电场强度, n 为 1~5 间的常数^[6]. Henri 和 Jesse^[6]等人提出漏导电流 $i = kU \frac{1Ch}{\mu}$, 其中 K 为待定系数, U 为电场电压, C 为电容. 因外加高压电场而引起的漏导功率, 可用如下公式表示为

$$W_e = JSU = J(Sh)E. \quad (5)$$

式(5)的 S 为圆盘的横截面积, h 为间隙大小. 又因为

$$\left(\frac{T_r}{T_\mu} \right) \cdot W_r = \frac{\frac{2}{3}\pi\tau_y(r_1^3 - r_2^3)}{\frac{\pi\mu\Delta\Omega}{2h}(r_1^4 - r_2^4)} \cdot \frac{2\pi\tau_y\Delta\Omega}{3}(r_1^3 - r_2^3) = \frac{8\pi h \tau_y^2 (r_1^3 - r_2^3)^2}{9\mu(r_1^4 - r_2^4)} = \frac{8}{9} \frac{\tau_y^2}{\mu} \pi h r_1^2 \left[1 - \frac{r_2^3}{r_1^3} \right]^2 \left[1 + \frac{r_2^4}{r_1^4} + \frac{r_2^8}{r_1^8} \right],$$



图 2 圆盘式电流变传动装置的三维结构图

而 $r_1 \gg r_2$. 因此, 上式等于 $\frac{8}{9} \frac{\tau}{\mu} V$. 所以, $V = Sh \frac{8}{9} (\frac{\mu}{\tau}) (\frac{T_r}{T_\mu}) W_r$, 故可得

$$W_e = \frac{8}{9} J (\frac{\mu}{\tau}) (\frac{T_r}{T_\mu}) W_r E, \quad (6)$$

式中 μ 表示电流变流体材料本身的特性, τ 为流体的屈服应力. 所以, $\frac{\mu}{\tau}$ 表征流体材料及外加电场对漏导功耗(图3)影响程度. $\frac{T_r}{T_\mu}$ 表示机构的力矩放大系数, 而 W_r 则表示电致力引起的功率, 为系统有用功. 由式(6), 可看出漏电功耗对有用功的影响.

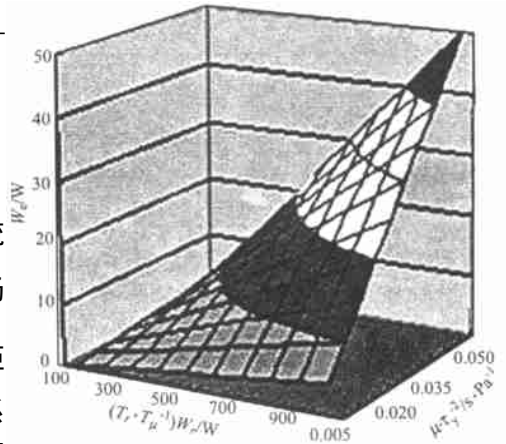


图3 漏导功率和 $\frac{\mu}{\tau}$ 及 $\frac{T_r}{T_\mu} W_r$ 的关系曲线

为便于分析, 选取 ERF 性能及圆盘结构参数和传动运行参量的一些典型值. 圆盘外径, $r_1 = 80 \text{ mm}$, $r_2 = 5 \text{ mm}$, $h = 1 \text{ mm}$. 设主、被动盘的转速差 $\Delta n = 300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 采用的电流变流体的零电场粘度 $(25^\circ \text{C}) \mu = 0.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 在电场为 $3.0 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ 作用下的屈服应力 $\tau = 4.2 \text{ kPa}$, 电流强度为 5 mA . 根据式(6)可描绘出漏导功耗 W_e 与 $\frac{\mu}{\tau}$ 及 $\frac{T_r}{T_\mu} W_r$ 的关系, 如图3所示. 其中电流强度和场强分别取上述典型值.

3 传动机构的效率

由式(4), 可知主动盘 A 所提供的功率 W_{in} , 由粘性阻力功率损失 W_μ 和电致屈服应力传递的功率 W_r 组成. 因此, 可用 W_μ 与 W_{in} 的比值, 计算传动机构的机械效率 η_μ .

$$\eta_\mu = \frac{W_r}{W_{in}} = \frac{W_r}{W_r + W_\mu} = \frac{\frac{2}{3} \pi \tau \Delta \Omega (r_1^3 - r_2^3)}{\frac{2}{3} \pi \tau \Delta \Omega (r_1^3 - r_2^3) + \frac{\eta \mu \Delta \Omega^2}{2h} (r_1^4 - r_2^4)}. \quad (7)$$

同样, 因为 $r_1 \gg r_2$, 故由式(7)可得

$$\eta_\mu = \frac{\frac{2}{3} \tau}{\frac{2}{3} \tau + \frac{r_1}{h} \mu \Delta \Omega}. \quad (8)$$

将式(8)中 τ , μ , $\Delta \Omega$ 取上述典型值, 讨论圆盘外径和间隙对机械效率的影响, 如图4所示. 机械效率随着圆盘外径的增大而降低, 随着间隙的增大而提高.

将式(8)中 r_1 和 h 视为已知值, 讨论转速差和粘度对机械效率的影响. 由图5可看出, 转速差和机械效率的增加都会引起机械效率的降低.

定义机构的控制能力系数用无量纲 K_r 来表示. 用它表征系统结构参数与电流变材料的性质对机构放大力矩能力的影响, 控制能力系数的高低直接决定着系统性能的好坏. 控制能力系数可用如下公式表为

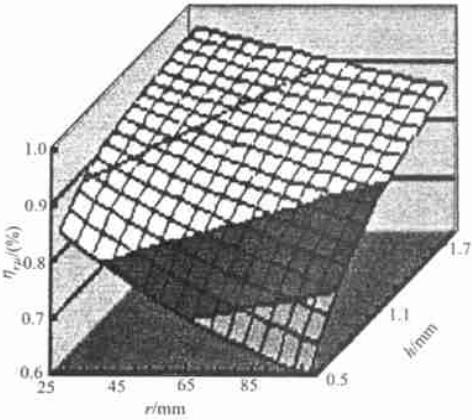


图 4 效率与半径及间隙关系

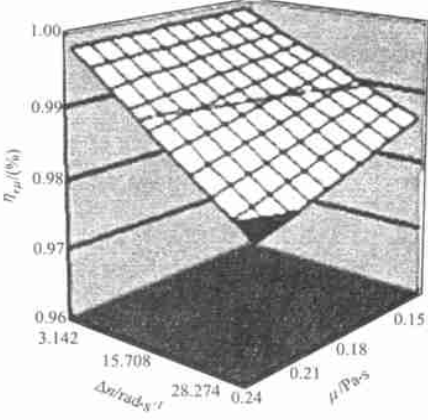


图 5 效率与粘度及转速差关系

$$1 - [(\frac{2}{3} \pi \tau (r_1^3 - r_2^3)) / (\frac{\pi \mu \Delta \Omega}{2h} (r_1^4 - r_2^4))]. \tag{9}$$

略去 r_2 的影响, 可得

$$K_r = 1 - \frac{3 \mu \Delta \Omega r_1}{4 \tau h}. \tag{10}$$

将式(10)中的 $\tau, \mu, \Delta \Omega$ 取典型值, 可得如图 6 所示的关系曲线. 从中, 我们可看出圆盘外径和间隙与控制能力系数的关系. 如将式(10)中的 $\Delta \Omega, r_1, h$ 看作已知值, 则可得图 7 所示的关系曲线. 由图可以看出 K_r 与 μ, τ 的关系. 由于 $\tau = A E^2$ 的式中 A 为常数, E 为电场强度, 由此可得出控制能力系数与场强的关系.

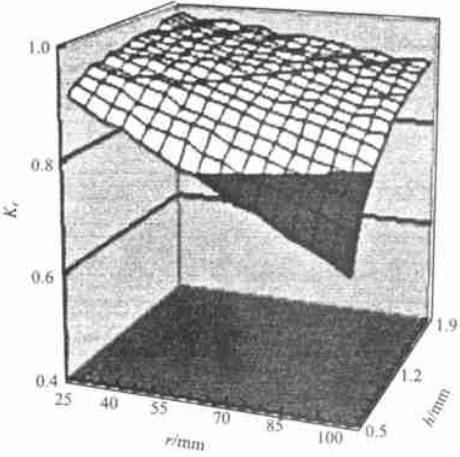


图 6 控制能力系数与半径和间隙关系

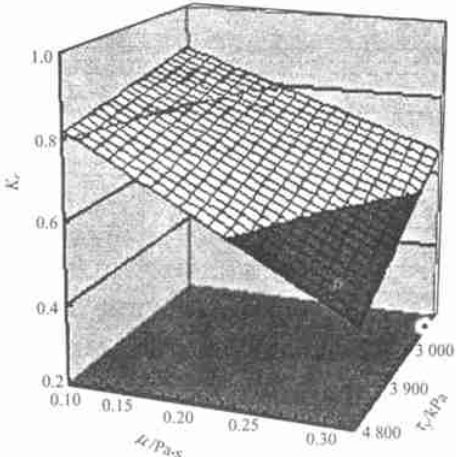


图 7 控制能力系数与粘度和屈服应力关系

4 结束语

(1) 圆盘外径是提高机构机械效率的关键尺寸. 它与电致屈服应力力矩 T_r 成 3 次方抛物线关系, 而与粘性力传递力矩 T_μ 成 4 次方抛物线关系. 圆盘外径的增加, T_r 和 T_μ 都会增加,

而机械效率和控制能力系数则随之降低. 所以, 在设计圆盘式电流变传动装置时要着重加以考虑, 应选取适当的圆盘外径. (2) 机构的漏导功率会降低机构传递力矩的性能. 由式(6)可知, W_e 与 $\frac{\mu}{\tau_y}$ 和 $\frac{T_r}{T_\mu} W_r$ 均成正比. 为了保证机构的可靠性, 应尽量降低漏导功率. (3) ERF 的零电场粘度 μ 的增大, 将会使粘性力传递力矩 T_μ 增大. 那么, 由于粘性阻力引起的损失功率 W_μ 亦会相应增大, 因而会引起机构的机械效率 μ_{rm} 的变小. (4) 机构的控制能力系数是机构性能好坏的关键. 如式(10)所示, 它与圆盘外径成反比, 与间隙大小成正比, 与电流流体粘度也成反比, 而与电致屈服应力成正比. 在机构的优化设计及选取电流变材料时, 应先对控制能力系数加以估算.

参 考 文 献

- 1 Martin J E, Odinek J, Halsey T C, et al. Structure and dynamics of electrorheological fluids[J]. Physical Review, 1998, 57(1): 756 ~ 759
- 2 Kamath G M, Wereley N M. A nonlinear viscoelastic-plastic model for electrorheological fluids[J]. Smart. Mater., 1997, (6): 351 ~ 359
- 3 王晓杰, 张培强, 刘云平等. 锥形挤压式电流变液阻尼器模型的理论和实验研究[J]. 振动工程学报, 2000, 13(1): 23 ~ 28
- 4 黄宜坚, 黄豪彩, 江海波等. 圆盘式电流变传动机构的研究[J]. 机床与液压, 2002, (1): 35 ~ 37
- 5 Conrad H, Sprecher A F. Characteristics and mechanisms of electrorheological fluids[J]. J. Stat. Phys., 1991, (64): 1 073 ~ 1 091
- 6 Gavin H, Hoagg J, Dobossy M. Optimal design of M R dampers[J]. Smart Structure, 2001, (8): 220 ~ 224

Performance of Disk Type Electrorheological Actuator

Yang Jinmin Huang Yijian

(College of Electromech. Eng. & Auto., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

Abstract Among electrorheological actuators, disk type one is principal one, while its power loss and its efficiency are important subject of dynamic study on entire actuator. The authors deal with power loss of viscosity and power loss of leakage conductance of actuator; and advance control ability coefficient as a new parameter, which can be used for studying the effect of choosing dimension and material parameters for actuator on its performance.

Keywords electrorheological actuator, power loss, control ability coefficient