

文章编号 1000-5013(2001) 01-057-04

# 圆盘式电流变传动机构的优化设计

檀美德 黄宜坚 汪海波 俞铁岳

(华侨大学机电工程系, 泉州 362011)

**摘要** 应用电流变流体技术于机械系统和流体控制系统, 可实现无移动件或少移动件的机构, 改善系统的动态品质. 文中讨论圆盘式电流变传动机构的优化设计, 以及机构的动态品质、电流变流体的物理性能和装置的结构参数. 给出圆盘直径、剪切速度、极化力和粘性力之间的关系.

**关键词** 电流变液, 传动机构, 优化设计

中图分类号 TH 137 : TP 215.02<sup>+</sup>7

文献标识码 A

电流变流体(ERF)是新型的智能软物质.它具有“液”、“固”态转化的可逆性、连续可控性和响应的快速性等高技术特征,在机电传动与控制系统中有广泛应用前景<sup>[1]</sup>.电流变传动机构是电流变技术应用的重要方面,常用的电流变传动机构有圆盘式和套筒式两种.在国内外电流变传动装置的研究中,还未见到从机械结构的动态参数上,讨论结构尺寸的相关文献.本文介绍了圆盘式电流变传动机构的工作原理、提出动态参数优化的数学模型.研究圆盘直径、间隙、ERF 粘度和转速对圆盘式电流变传动机构单位转动惯量所传递力矩的影响.

## 1 圆盘式电流变传动机构的工作原理

如图 1 所示,两个平行圆盘 A 和 B, A 盘套在 B 盘的转轴上, A 盘内径为  $r_2$ , 两盘的外径均为  $r_1$ , 两盘间距  $h$ . 盘 A 为主动盘, 盘 B 为从动盘. 当充满 ERF 的两盘之间加一电场时, 由于 ERF 的粘性产生剪切力矩  $T$ , 带动 B 盘旋转. 设主、从盘转速分别为  $Q$  和  $\omega$ . 这就是圆盘式电流变传动机构的工作原理. 现在计算力矩  $T$ .

### 1.1 假设条件

我们假设 7 个条件. (1) 流体为不可压缩. (2) 流动为层流. (3) 垂直于转动轴的平面上, 流动曲线是圆(即速度是半径的函数, 而径向和轴向都不流动). (4) 运动是稳态的, 即连续性方程和运动方程中所有时间导数均为零. (5) 流体与离合器壁直接接触, 即无滑脱. (6) 不计边缘效应. (7) 系统等温.

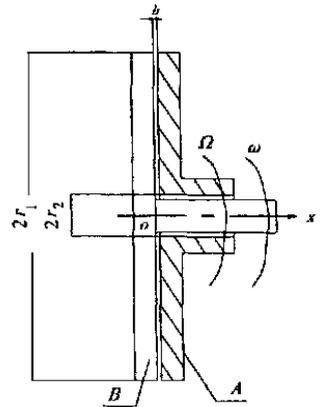


图 1 圆盘式电流变传动机构  
工作原理示意图

## 1.2 圆盘端面剪切流动公式

设  $\omega$  沿  $x$  轴线性分布, 即  $\omega = \frac{x}{h}\Omega$  则剪切应变率为

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dx} = \frac{d(r\omega)}{dx} = \frac{r}{h}\Omega, \quad (1)$$

$r$  为液层的半径, 且  $r_2 < r < r_1$ . 把 ERF 作为 Bingham 流体, 其流体方程为

$$\tau = \tau_y + \eta_{pl}\dot{\gamma}, \quad (2)$$

式中  $\tau_y$  是流体的屈服应力,  $\eta_{pl}$  是流体的塑性黏度. 对于  $A, B$  间任一点液层的半径  $r$  处微元  $2\pi r \cdot dr$  的扭矩为

$$dT = \tau \cdot 2\pi r^2 dr. \quad (3)$$

将式(1), (2)代入式(3)并积分, 得到扭矩为

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

## 2 传动机构的优化模型

电流变传动机构的一个主要优点是动态性能好, 而机械结构对发挥 ERF 响应速度关系很大. 设计的重点是圆盘的外径  $r_1$ . 从动盘的转动惯量为

$$J = \frac{1}{2}Mr^2 = \frac{1}{2}\pi b\rho r_1^4, \quad (5)$$

式中  $M$  是从动盘质量,  $B$  是盘厚度,  $\rho$  是材料密度. 所以可以用从动盘的单位转动惯量所传递扭矩  $F(F = T/J)$ , 来描写电流变传动机构的动力学品质. 根据一般机械加工精度, 半径  $r_1$  为 100 mm 时, 跳动是 0.02 mm. 由电磁学理论得知, 电场强度  $E$  正比于外加电场, 反比于间隙  $h$ . 电场强度直接影响流体的屈服应力和塑性黏度分别为  $\tau_y$  和  $\eta_{pl}$ . 为了使电场强度均匀, 设允许误差为 0.02  $h$ . 因此,  $h$  和  $r_1$  的关系为  $h = 0.01 r_1$ . 于是可得

$$F = T/J = \left\{ \frac{4\tau_y}{3}[r_1^3 - r_2^3] + 100\eta_{pl}\Omega[r_1^3 - r_2^4] \right\} / \rho b r_1^4, \quad (6)$$

其它的设计参数为  $r_2 = 20$  mm,  $b = 10$  mm, 选取  $\eta_{pl} = 4.3$  Pa·s,  $\tau_y = 7.8 \times 10^3$  kg·m<sup>-3</sup>. 将上述参数代入式(6), 可得

$$F = \left[ (0.7179 + 0.05513\Omega) \frac{1}{r_1} - 5743 \frac{1}{r_1^4} - 8820\Omega \frac{1}{r_1^5} \right] \times 10^5. \quad (7)$$

从式(7)可以看到, 不同的主动盘转速, 有响应的最佳圆盘外径  $r_1$ . 对于  $\Omega = 30$  r·min<sup>-1</sup>, 我们可获得一维的优化模型. 它即设计变量是  $r_1$ , 目标函数是  $\min F_m(r_1) = - (0.891 \frac{1}{r_1} - 5743 \frac{1}{r_1^4} - 27694.8 \frac{1}{r_1^5}) \times 10^5$ , 约束条件是  $20(\text{mm}) < r_1 < 300(\text{mm})$ .

## 3 优化模型的解

根据上面的目标函数, 采用 Fibonacci 法或黄金分割法, 求一维的优化模型的最优点和最优值. 因此, 可得到最优解  $r_1 = 30.0$  mm, 最优值  $F_m = -2455$ .

图 2 为选优后, 设计的圆盘式电流变传动机构. 它是由左右两个主动盘和中间从动盘构成, 两端齿轮用于带动主动盘转动, 以实现正反转, 中心轴与从动轴相连, 输出转矩. 整个装置安装在绝缘的外壳中, 主动盘是用滚动轴承套在输出轴上, 并用塑料套隔离.

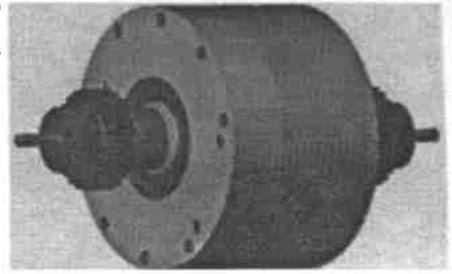


图 2 圆盘式电流变传动机构

## 4 讨论

### 4.1 单位转动惯量传递扭矩与圆盘外径的关系

图 3 为主盘转速  $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时, 单位转动惯量传递扭矩与圆盘外径的关系曲线. 从图中可以看出, 单位转动惯量传递扭矩是圆盘外径变化. 外径接近盘内径的范围, 单位转动惯量传递扭矩变化较剧烈, 过了极值点, 变化较为平缓.

### 4.2 主盘转速与最优圆盘半径的关系

由式(7)作三维图(图 4). 从图可看出, 对于不同的主盘转速, 存在同样的最优圆盘半径.

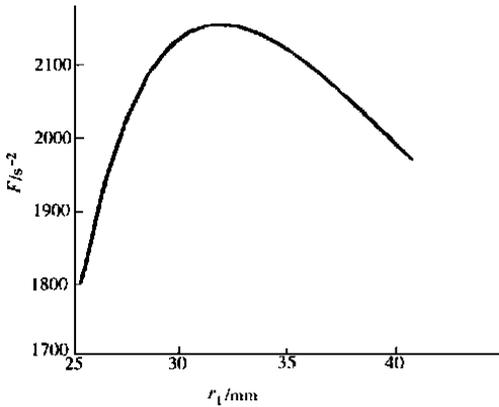


图 3 单位转动惯量传递扭矩与圆盘外径的关系

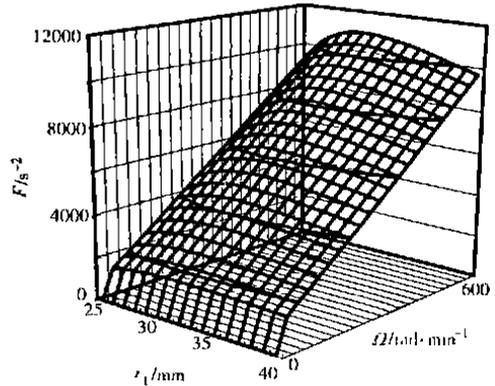


图 4 主盘转速与最优圆盘半径的关系

### 4.3 盘转速与单位转动惯量传递扭矩的关系

从图 4 还可以看到, 单位转动惯量传递扭矩随主盘转速的升高而增加. 不过, 当转速过高时, 由于 ERF 存在剪切变稀问题<sup>[6]</sup>. 所以, 对于不同的 ERF, 要求适当的转速范围.

### 4.4 电场引起 ERF 的极化力与粘性力对 T/J 的影响

在式(6)的右边提取  $\eta_{bl} \Omega$  由此可得

$$F = \frac{T}{J} = \eta_{bl} \Omega \left[ \frac{4}{3} \cdot \frac{\tau_y}{\eta_{bl} \Omega} [r_1^3 - r_2^3] + 100 [r_1^3 - r_2^4 / r_1] \right] / \rho b r_1^4, \quad (10)$$

式中  $\frac{\tau_y}{\eta_{bl} \Omega}$  代表 ERF 的极化力与两盘转速差引起的剪切力之比. 代入式(6), 由使用的有关参数可得

$$F = [(0.23075 \frac{\tau_y}{\eta_{bl} \Omega} + 17.3102) \frac{1}{r_1} - 1846 \frac{\tau_y}{\eta_{bl} \Omega} \frac{1}{r_1^4} - 2769600 \frac{1}{r_1^5}] \times 10^3. \quad (9)$$

利用式(11)可作图5, 它描写了极化力与粘性力( $\eta$ )对 T/J 的影响. 可见, 当极化力远大于粘性

力时,单位转动惯量传递扭矩迅速增大.这时,只要圆盘外径大于最优半径,就可以获得较大的传递扭矩,而系统的响应速度仍然较好.

#### 4.5 从动盘厚度对最优圆盘半径的影响.

两圆盘之间距离对最优圆盘半径无影响,但在同样的外加电场下,两盘间距小时,目标函数值变小.

#### 4.6 两圆盘间距对最优圆盘半径的影响.

从动圆盘的厚度对最优圆盘半径无影响.但厚度大,最优半径的目标函数值变小.

## 5 结束语

电流变流体技术应用于机械系统和流体控制系统,将会带来一场液压革命,同时也是未来制动技术的革命.

## 参 考 文 献

- 1 黄宜坚,朱石沙,李之达等.电流变学[M].长沙:湖南师大出版社,1997.1~10
- 2 汪萍.机械优化设计[M].武汉:中国地质大学出版社,1991.29~42
- 3 李天剑.电流变液体的计算机模拟及电流变减振器的研究[D]:[学位论文].北京:北京理工大学车辆工程系,1997.51~53

# Optimization Design of Disk Type Electrorheological Transmission Mechanism

Tan Meide Huang Yijian Wang Haibo Yu Tieyue

(Dept. of Electromech. Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** The mechanism with a few or without moving pieces can be realized and dynamic character can be improved by applying technique of electroheological body to mechanical system and fluid control system. A discourse is made on the optimization design of disk type electrorheological transmission mechanism. The discourse relates to dynamic character of the mechanism, physical performance and structural parameters of the device. It also gives the relation between diameter of disc and speed of shear as well as the relation between force of polarization and force of viscosity.

**Keywords** electrorheological fluid, transmission mechanism, optimization design

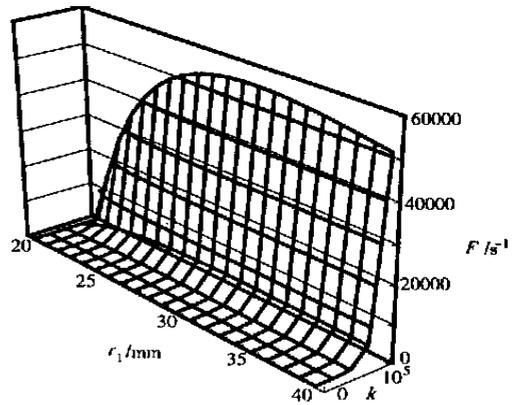


图5 极化力与粘性力对  $T/J$  的影响