

文章编号 1000-5013(2006)03-0296-04

盘式电流变减速器的设计

田天成 黄宜坚

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要 基于电流变效应原理, 设计盘式电流变减速器. 论述盘式电流变减速器的工作原理、结构特点、计算方法、调速性能, 以及各主要参数对盘式电流变无极减速器中的影响. 试验表明, 电流变减速器具有柔性接入、离合简单、无极调速、动态调整、响应迅速和控制简单等良好品质.

关键词 电流变流体, 电流变效应, 减速器, 激动结构

中图分类号 TH 132; O442; O373

文献标识码 A

电流变效应是指电流变流体(Electrorheological Fluids, 简称 ERF) 在电场作用或控制下, 处于剪切场中流体的粘度发生明显变化的现象. 这种变化能够使液体变稠、变硬直至停止流动, 达到凝固. 当电场消失时, 电流变流体立即变稀, 恢复原来液体状态. 电流变流体在液态和固态之间的转换具有可逆、连续可控、控制简单、响应迅速和能耗低等特性^[1]. 巨电流变(GER) 效应的电流变流体的研究成功, 使此类材料的电流变效应突破通常理论所预测的“上限”, 剪切强度可超过 130 kPa^[2]. 可以肯定, 电流变技术在机电传动与控制系统中具有广阔的工程应用. 目前, 国内在电流变减速方面的应用尚未有全面研究. 本文基于电流变流体的电流变效应, 设计集离合、减速、换向等多功能于一体的盘式电流变减速器.

1 减速原理和设计思路

电流变流体在有无外加电场时, 其粘度有明显差异. 通常情况下, 电流变流体在无外加电场时表现为牛顿流体, 而当其处于电场时表现为 Bingham 流体. 其本构方程分别为牛顿流体($\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$), Bingham 流体($\tau = \tau_y + \eta \cdot \dot{\gamma}$). 其中, τ 为剪切应力(Pa), τ_y 为屈服应力(Pa), η 为动力粘度(Pa·s), $\dot{\gamma}$ 为剪切速率($1 \cdot s^{-1}$). 图 1 为减速原理图, d_1 , d_2 分别为转速的输入、输出端圆盘, 转速分别为 ω_1 , ω_2 ; d_1 与 d_2 的间距为 h , 且两盘等直径、同轴线(半径为 r), 两盘间充满电流变流体. 当 d_1 以转速为 ω_1 驱动, 由流体的内摩擦作用带动 d_2 以 ω_2 同向转动, 两者转速差为 $\Delta \Omega = \omega_1 - \omega_2$, 在两盘间加一可控电压 $U(V)$, 由于电流变流体的电流变效应, 此时 Bingham 流体的本构方程为

$$\tau = k_U \frac{U^2}{h^2} + \eta \cdot \frac{\Delta \Omega \cdot r}{h}. \quad (1)$$

在式(1)中, $k_U(kg \cdot (ms \cdot V)^{-2})$ 为屈服应力-电场系数. 从式(1)可知, 随着外加电压 U 和转速差 $\Delta \Omega$ 的变化, 屈服应力 τ_y 随之变化, 从而控制两盘传递的扭矩和两盘的转速差. 假设有 6 个研究条件. (a) 流体为不可压缩流体. (b) 流体流动为层流. (c) 在垂直于转动轴的平面上, 流动曲线在径向圆面内. (d) 运动是稳态的, 即连续性方程和运动方程中所有对时间的导数均为零. (e) 流体与两盘壁直接接触, 即无滑脱. (f) 不计边缘效应且系统等温^[3]. 则有

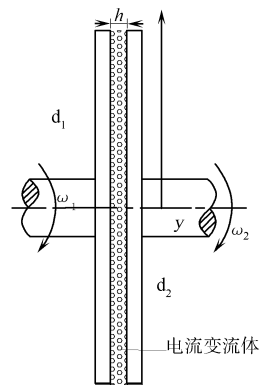


图 1 减速原理图

收稿日期 2005-12-07

作者简介 田天成(1977-), 男, 硕士研究生, 主要从事机电传动与控制技术的研究; 通信作者: 黄宜坚(1945-), 教授, E-mail: yjhuang@hqu.edu.cn

基金项目 福建省高新技术重点科研基金资助项目(2002H015)

$$M_e = \frac{2\pi k_U}{3} \cdot \frac{U^2}{h^2}(r_2^3 - r_1^3) + \frac{\pi\eta\Delta}{2h}\Omega(r_2^4 - r_1^4). \tag{2}$$

式(2)为机构可传递的最大扭矩, 其中 (r_1, r_2) 分别为圆盘有效面积的内外径. 记 $M_{e1} = \frac{2\pi k_U}{3} \cdot \frac{U^2}{h^2}(r_2^3 - r_1^3)$ 为电致力矩, $M_{e2} = \frac{\pi\eta\Delta}{2h}\Omega(r_2^4 - r_1^4)$ 为粘性力矩, 即 $M_e = M_{e1} + M_{e2}$. 由式(2)可得出

$$\Delta \Omega = \frac{2hM_e}{\pi\eta(r_2^4 - r_1^4)} - \frac{4k_U U^2 (r_2^3 - r_1^3)}{3\eta h (r_2^4 - r_1^4)}. \tag{3}$$

显然, 传动机构在不同条件下承担了过载保护联轴器、减速器和离合器功能.

电流变减速器的设计思路是, 充分利用电流变流体的电致特性, 把电流变特性的柔性接入、离合简单、无极调速、动态调整、响应迅速、控制简单等良好品质引入减速器中, 使离合、反向、调速等多功能整合为一体. 图 2 是电流变减速器传动图. 图中 G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 为传动齿轮, D_1, D_2 为主动盘, D_3 为从动盘, S 为不自锁的反向螺纹副, 使换向时能实现自动调整主从动盘间间距. 齿轮组传动实现 D_2 与 D_1 同源驱动和等速反向. 通过对高压电源的电压调节和开关选择, 使电流变减速器能实现离合、换向、调速等功能.

2 性能参数

以图 2 所示结构, 设传动圆盘 D_1, D_2 和 D_3 的内外径大小相同, 分别记为 r_1, r_2 , D_1 与 D_3 间距为 h_1 , D_2, D_3 间距为 h_2 , 螺纹副最大行程为 l , 当 D_3 与 D_1 间存在电场时, 在电致效应作用下 D_3 随 D_1 转动时, 两者转向相同, 转速差 $\Delta \Omega = \omega_1 - \omega_3$, D_3 与 D_2 转向时, 转速差为 $\Delta \Omega_2 = \omega_1 + \omega_3$.

2.1 可传递最大扭矩

不计其他摩擦阻力, 可传递最大扭矩为

$$T_0 = \frac{2\pi k_U}{3} \cdot \frac{U^2}{h_1^2}(r_2^3 - r_1^3) + \frac{\pi\eta(h_1 + h_2)\Delta \Omega - 2\omega_1 h_1}{h_1 h_2} \cdot (r_2^4 - r_1^4). \tag{4}$$

由式(2)可见, 决定电流变减速器可传递扭矩主要参数包括, 外加电压 U , 屈服应力-电场系数 k_U , 盘内外径 r_1, r_2 , 盘间距 h , 以及电流变流体的动力粘度 η

2.2 调速范围

由式(4)可推导出调速范围为

$$\Delta \Omega = \frac{2T_0 - \frac{4\pi k_U}{3} \cdot \frac{U^2}{h_1^2}(r_2^3 - r_1^3)}{\pi\eta(r_2^4 - r_1^4)} \cdot \frac{h_1 \cdot h_2}{h_1 + h_2} + \frac{2h_1 \cdot \omega_1}{h_1 + h_2}, \quad 0 < \Delta \Omega < \omega_1. \tag{5}$$

2.3 传递效率

一般而言, 电流变减速器两带电圆盘形成一个电容器, 必然有漏导电流和漏导功率损失, 文[4]提出漏导电流和漏导功率^[5]损失的计算公式, 但因其功率损失极小, 在此忽略不计. 在不计轴承等功率损失的情况下, 传递效率可表达为

$$\mu = 1 - \frac{\frac{2\pi k_U}{3} \cdot \frac{U^2}{h_1^2}(r_2^3 - r_1^3)\Delta \Omega_1 + \frac{\pi\eta\Delta}{2} \frac{\Omega_1^2}{h_1}(r_2^4 - r_1^4) + \frac{\pi\eta}{2} \frac{(2\omega_1 - \Delta \Omega_1)^2}{h_2}(r_2^4 - r_1^4)}{[\frac{2\pi k_U}{3} \cdot \frac{U^2}{h_1^2}(r_2^3 - r_1^3) + \frac{\pi\eta}{2} \frac{\Delta \Omega}{h_1} + \frac{(2\omega_1 - \Delta \Omega_1)}{h_2}](r_2^4 - r_1^4)} \omega_1. \tag{6}$$

显然, 电流变减速器几何参数及材质确定后, 在使用中电流变减速器的效率仅与电压和转速差相关, 并随着转速差的增大而降低.

2.4 典型参数设计

取典型参数设计分析电流变减速器的调速范围等特性. (1) 间距 $h_1 = 0.5 \text{ mm}$, $h_2 = 8.5 \text{ mm}$, $l = 8 \text{ mm}$. (2) 盘径 $r_1 = 40 \text{ mm}$, $r_2 = 80 \text{ mm}$. (3) 主动盘转速 $n_1 = 3\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ (即 $\omega_1 = 314.16 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$)

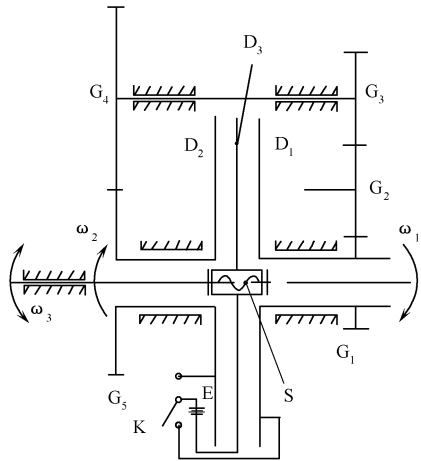


图 2 电流变减速器传动图

s^{-1}). (4) 电流变材质的选取为. 零电场粘度 $\eta_0=0.30\text{ Pa}\cdot\text{s}$, 当外加电压 $U=4\,000\text{ V}$ 时盘间距 $h=1\text{ mm}$, ERF 的屈服应力 $\tau_y=40\text{ kPa}$, ERF 的电致屈服应力的系数为 $k_U=2.5\times10^{-9}\text{ kg}\cdot(\text{ms}\cdot\text{V})^{-2}$. 电流变减速器作连轴器时, 控制电压(U)与传递扭矩(T)和效率(μ)关系, 如图 3 所示. 图 4, 5 是电流变减速器作为调速器时电压与可传递扭矩、传递差 ($\Delta\Omega$) 及效率关系图.

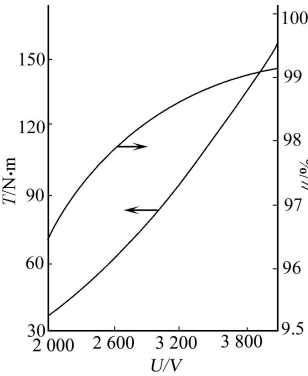


图 3 极限负载扭矩与效率关系图

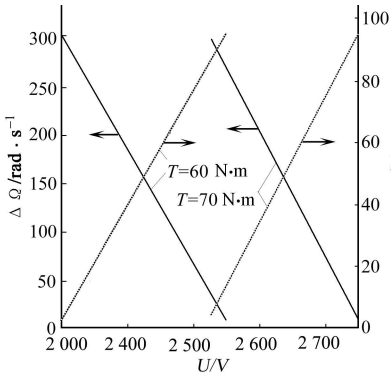


图 4 转速差及效率(μ)与电压关系图

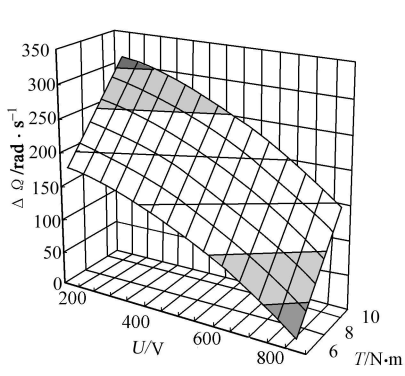


图 5 电压及可传递扭矩与转速差关系图

2.5 各设计参数对其性能影响

内外径、盘间距和螺纹副行程是主要的设计参数, 其对可传递扭矩、调速范围和传动效率的影响分别如图 6~ 11 所示. 盘内外径参数 r_1, r_2 是影响电流变减速器传递力矩的一个重要尺寸, 它与电致力矩

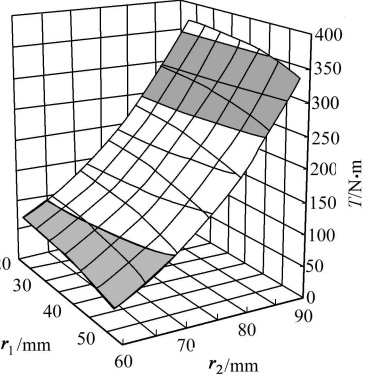


图 6 内外径与可传递扭矩关系图

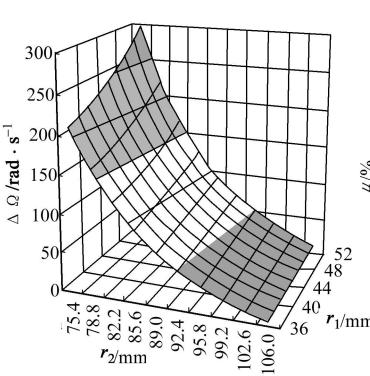


图 7 内外径与转速差关系图

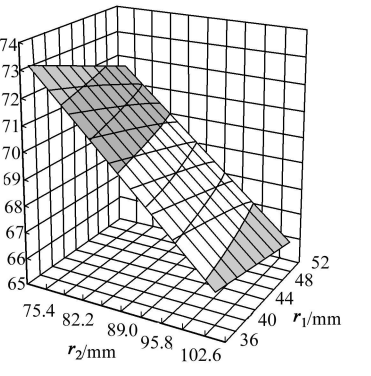


图 8 内外径与传动效率关系图

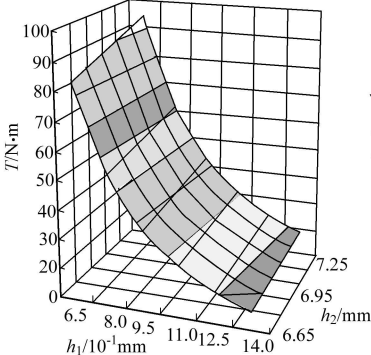


图 9 盘间距与可传递扭矩关系图

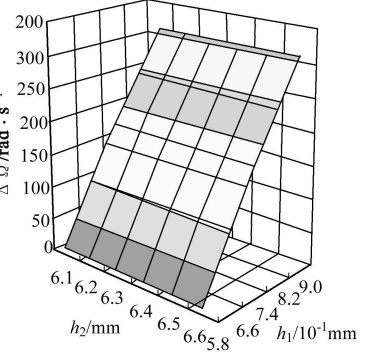


图 10 盘间距与转速差关系图

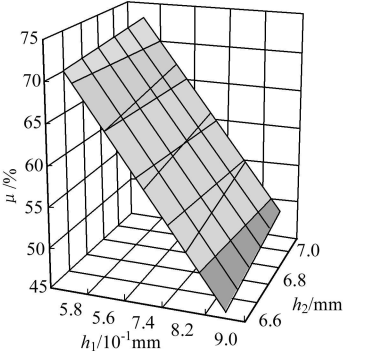


图 11 盘间距与传动效率关系图

成 3 次方抛物线关系、与粘性力矩成 4 次方抛物线关系. 随着的电致力矩和粘性力矩增大, 在其他条件不变时, 增大 r_2 可大幅提升此装置可传递力矩, 但同时导致功率损失增大, 调速范围减小, 输出端转动惯量增大. 对内径 r_1 而言, 其对系统的影响与外径 r_2 相比恰恰相反, 随着 r_1 的增大电致力矩和粘性力矩都将变小, 即机构可传递力矩变小, 同时调速范围会增大、功率损失将增大. 只有将两者同时考虑, 在不同的应用条件下才可得比较好的协调统一.

当传动圆盘 D_3 随着传动圆盘 D_1 正转时, h_1 为传动圆盘 D_1 与 D_3 的最小间距, h_2 为传动圆盘 D_2

与 D_3 的最大间距, 这是一个极限尺寸; 反之, 当 D_3 随着 D_2 反转时 h_1 最大、 h_2 最小. 不论 D_3 正反转, 在正常平稳运转时有 $h_1 - h_2 = l$. 同理, $h_1 + h_2 = \text{const.}$ 当传动圆盘 D_3 随着 D_1 正转时, h_1 与粘性力矩成反比, 它的 2 次方与电致力矩成反比, 与转速差成正比, 即随着 h_1 的减小电致力矩和粘性力矩增大, 但转速差范围在减小. h_2 是反向磨擦阻力大小的主要影响因素, 随着 h_2 增大, 传动圆盘 D_2 作用于传动圆盘 D_3 的流体内摩擦力矩减小, 其功率损失减小, 电流变减速器的效率得到提高. 但需要注意的一个问题是, h_2 不能无限的大, 应考虑电流变减速器能完成反向动作时尽管此时 h_2 最大, 而适当的电压条件下, 传动圆盘 D_2 作用于 D_3 的力矩大于传动圆盘 D_1 作用于 D_3 的力矩, 并能很容易的使螺纹副相互运动, 即传动圆盘 D_3 旋近到 D_2 , 使 h_2 变化到最小.

3 控制方式

图 12 为电流变减速器控制方块图, $u(t)$ 为欲输出扭矩或转速差的输入信号, $y(t)$ 为实际输出扭矩或转速差. 当电流变减速器几何尺寸确定、电流变流体选定后, 通过电压的调整, 对电流变减速器的输出扭矩和速度进行调节.

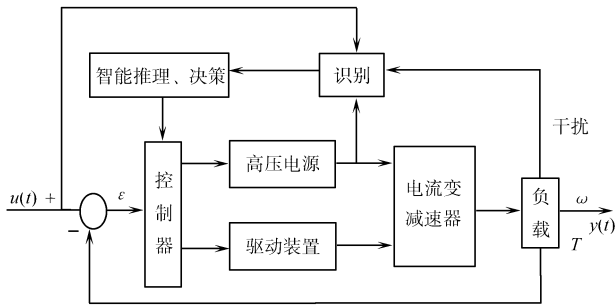


图 12 电流变减速器控制系统方块图

4 结束语

(1) 电流变减速器结构简单, 减速范围广, 可实现离合、调速、换向等多功能于一体, 应用前景广泛. (2) 通过电流变流体的本构特性和减速工作原理, 可以比较准确的计算传递力矩、转速差和控制电压的关系. 电流变减速器可以实现恒扭矩、恒转速差等力矩与速度输出, 且控制方法简单可靠, 具有响应速度快等良好的变速、变矩品质. (3) 通过从动盘的反向螺纹设计, 实现了多盘式电流变减速器对盘间距的自动调节. 通过对电流变减速器几个主要参数进行分析讨论, 可以为电流变减速器的设计提供理论参考. 此种电流变减速器是实现机电一体化的新途径.

参 考 文 献

1 黄宜坚, 朱石沙, 李之达, 等. 电流变学[M]. 长沙: 湖南师范大学出版社, 1996 23~ 25
2 温维佳, 黄先祥, 杨世和, 等. 巨电流变效应及其机理[J]. 物理, 2003, 32(12): 777~ 779
3 黄宜坚, 黄豪彩, 汪海波, 等. 圆盘式电流变传动机构的研究[J]. 机床与液压, 2002, (1): 35~ 36
4 Gavin H, Hoagg J, Dobossy M. Optimal design of MR dampers[J]. Smart Structure, 2001, (8): 220~ 224
5 Walter E Palmer: United States Patent, 5094328[P]. 1994 10

Design of Disc Electrorheological Fluid Speed Reducer

Tian Tiancheng Huang Yijian

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

Abstract Based on the electrorheological affecting principium, design of disc electrorheological fluid speed reducer is presented. The working principle, structural characteristics, calculation method, the performance of speed adjustment, and the influences of the main parameters on disc electrorheological fluid speed reducer are stated. The experimental results have shown that the speed reduced has the advantages such as flexible insterting, simple connecting and disconnecting, nonr grade speed adjustment, dynamic adjusting, rapid response and simple control.

Keywords electrorheological fluid, affecting principium, speed reducer, design