

电流变力矩放大器*

黄宜坚**, 汪海波, 杨进民, 黄豪彩

(华侨大学机电及自动化学院, 泉州 362011)

摘要: 设计和开发一种电流变力矩放大器, 介绍其工作原理、结构特点。在此基础上, 研究结构设计参数间隙、圆盘内外径对机构性能的影响, 并提出多目标规划的电流变力矩放大器的优化设计模型, 从提高放大器放大倍数或提高动态响应速度的角度, 规定权重和子目标的追求值, 从而设计出性能优良的放大器。采用实验拟合法, 识别放大转矩与控制电场成抛物线关系, 利用阶跃和脉冲电场信号研究这种装置的动态性能, 结果表明, 通过多目标规划的优化设计模型得到的电流变力矩放大器, 具有良好的动态性能。

关键词: 电流变液; 力矩放大器; 优化设计; 控制

中图分类号: O373 文献标识码: A

1 引言

电流变技术是一项高新技术^[1], 这里开发一种电流变力矩放大器, 利用 ERF (Electrorheological fluid) 在电场作用下产生附加力矩, 使输出力矩跟踪输入力矩的变化, 并根据负载要求, 放大力矩。Shawarz 研究了稳定转速下电流变圆盘传动器的力矩放大、伺服控制性能^[2]。本文首先介绍放大器地工作原理、结构特点; 研究结构设计参数间隙 h 、圆盘内外径 r_2 和 r_1 对系统性能的影响; 提出多目标规划地电流变机构优化设计模型; 采用实验拟合法, 识别放大转矩与控制电场的关系; 采用阶跃和脉冲信号研究这种装置的动态性能。

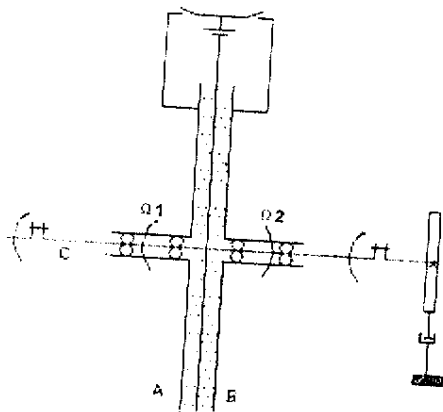


图 1 电流变力矩放大器的工作原理

Fig.1 Work principle of electrorheological moment amplifier

2 电流变力矩放大器的工作原理

如图 1 所示, 任意波形信号发生器产生的指令经放大后, 驱动步进马达转动, 由左边的联轴器传入电流变的中心盘的轴, 它是转动的指令信号。同时, 中间圆盘的轴是通过右边的联轴器带动负载运动。

由于转动的指令信号扭矩很小, 所以, 在左右两个圆盘与中间圆盘之间分别外加电场, 从而通过电流变液, 把外部动力根据负载加在中间圆盘上, 实现了信号力矩的放大。这里左右两个圆盘转动方向相反, 当信号正转时, 电场加在左盘与中

* * 福建省自然科学基金资助项目(No Z9910020)。

** 通讯联系人, Email: sam-whb@163.com

收稿日期: 2001 - 08 - 14; 修回日期: 2001 - 08 - 25。

间盘之间 ;当信号反转时 ,电场加在右盘与中间盘之间。

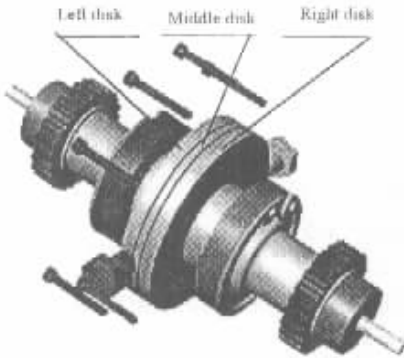


图 2 三维爆炸图

Fig.2 Three - dimension exploded view

电流变力矩放大器的结构的三维爆炸图如图 2 所示。左盘和右盘为主动盘 ,中间盘为从动盘。这里由于采用双圆盘结构 ,其优点在于 (i)两个主动圆盘由一个变速电机通过换向机构产生大小相同 ,转向相反的速度 ,使得当输入控制正反转时 ,输出转矩快速跟踪输入信号。(ii)电流变产生的力矩是由电致引起的屈服应力和剪切引起粘性力两部分组成。由于对于任意输入信号 ,主动盘的转速一定 ,而且比输入信号快。所以 ,两圆盘的相对转速 $\Delta\Omega$ 几乎不变 ,这就使得剪切引起粘性力不随输入信号变化 ,从而便于利用外加电场对放大器进行控制。

设从动盘(中间盘)的电致效应有效面积的内径为 r_2 ,外径为 r_1 ,主动盘与从动盘的间隙是 h 。ERF 为 Bingham 流体 ,其本构方程为 :

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中 , τ 为剪切应力 ; τ_y 为屈服应力 ; η 为动力粘度 ; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。

设主从动盘的转速差 $\Delta\Omega$ 沿轴线性分布 ,就以得到电流变装置产生的转矩 M_e 为^[3] :

$$M_e = \frac{2\pi\tau_y}{3}(r_1^3 - r_2^3) + \frac{\pi\eta\Delta\Omega}{2h}(r_1^4 - r_2^4) \quad (2)$$

电流变的电致引起的屈服应力可表示为 :

$$\tau_y = k_U \frac{U^2}{h^2} \quad (3)$$

这里 , U 为外加电压 ; k_U 为屈服应力 - 电场系数。

设输出力矩为 M_{out} ,输入力矩为 M_{in} ,于是

$$M_{out} = M_{in} + M_e \quad (4)$$

这样得到装置的力矩放大系数 k_a 为 :

$$\begin{aligned} k_a &= \frac{M_{out}}{M_{in}} \\ &= 1 + \frac{1}{M_{in}} \left[\frac{2\pi k_U U^2}{3h^2} (r_1^3 - r_2^3) + \frac{\pi\eta\Delta\Omega}{2h} (r_1^4 - r_2^4) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

从上式 (5) 知道 ,力矩放大系数 k_a 是由输入力矩 M_{in} 和控制电压 U 决定。根据检测到的输入力矩和负载 ,改变控制电压 U 就可以使输出力矩 M_{out} 跟踪输入信号 ,适应负载的变化 ,这就是电流变力矩放大器的工作原理。

从 (2) (3) 式可知道 , M_e 与外加电场成抛物线关系 ,根据实验数据 ,转矩 M_e 可拟合为无量纲电场强度 E^* 的幂次函数

$$T = \alpha_0 + \alpha_1 E^* + \alpha_2 E^{*2} \quad (6)$$

这里定义 $E^* = E/E_0$, E 是外加电场强度 (kV/mm) , $E_0 = 1$ kV/mm ; α_0 、 α_1 和 α_2 为实验决定系数 ,它们的量纲都不相同。

3 结构的优化设计

电流变力矩放大器的主要性能指标应该是放大系数和动态响应速度。

为了便于分析,这里选取 ERF 性能参量,圆盘结构参数和传动的运行参量的一些典型值。圆盘内径 $r_2 = 6 \text{ mm}$,厚度 $b = 12 \text{ mm}$,圆盘材料密度 $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。当外加电压 $U = 1 \text{ kV}$ 时,零电场粘度 $\eta = 0.10 \text{ Pa s}$,电场产生 ERF 屈服应力 - 电场系数为 $k_{U\gamma} = 4.67 \times 10^{-10} \text{ N/V}^2$,转速差 $\Delta\Omega = 10\pi \text{ rad/s}$ 。

设计电流变力矩放大器不需要考虑调速范围,为了提高传递力矩,两盘的间隙要尽可能小。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 τ_γ 和流体的粘度 η 。为了使电场强度均匀,设间隙 h 允许误差为 $0.02h$,于是,我们考虑了结构的制造加工工艺的特点,提出:设 $50 \text{ mm} < r_1 < 100 \text{ mm}$ 时,可采用 h 和 r_1 的关系为 $0.02/100 = 0.02h/r_1$,即 $h = 0.01r_1$ 。

图 3 绘制了(2)式所表示的电流变产生的 M_e 与 r_2 、 r_1 的关系。可见,随内半径 r_2 的减小、外半径 r_1 的增大,力矩 M_e 增大,这是由于电流变效应有效面积增加的缘故。

放大器的力矩输入、输出都通过中间圆盘,中间盘两面有轴,所以转动惯量 J 为:

$$J = \pi\rho\left(\frac{1}{2}br_1^4 + lr_2^4\right) \quad (7)$$

这里, ρ 为材料的密度; b 为中间盘厚度; l 为中间盘一端轴长度。

电流变放大器的主要优点是动态响应速度快,这里定义单位转动惯量传递的转矩为设计的目标函数之一 F_{TJ} ,用式(2)除以式(7)就得到:

$$F_{TJ} = M_e/J \quad (8)$$

这里取 $l = r_1$,图 4 绘制了(8)式所表示的单位转动惯量传递的转矩 F_{TJ} 与 r_2 、 r_1 的关系。可见,随内半径、外半径的增大,函数 F_{TJ} 减少。

这里采用目标规划问题的数学模型。我们使传递力矩的目标函数 M_e 、单位转动惯量所传递的力矩的目标函数 F_{TJ} 在设计变量 r_2 、 r_1 的可行域中,尽可能接近它们的目标值 \hat{f}_1 、 \hat{f}_2 ,由于力矩、单位转动惯量所传递的力矩的量纲和变化范围不同,为了便于加权。定义:

$$f_i = \frac{F_i - \hat{f}_i}{\beta_i - \alpha_i} \quad (i = 1, 2) \quad (9)$$

这里, F_i 为目标值; α 和 β 为目标在 r_i 的约束范围内最小和最大值。下标 1、2 分别代表力矩、单位转动惯量所传递的力矩。这里采用:

$$\hat{f}_i = \xi_i(\alpha_i + \beta_i) \quad (i = 1, 2) \quad (10)$$

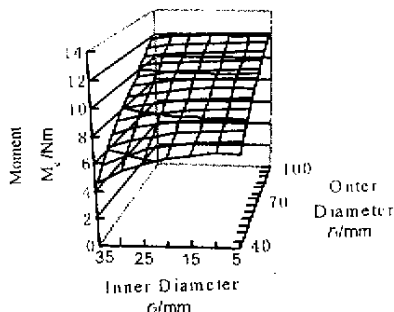


图 3 力矩 M_e 与 r_2 、 r_1 的关系

Fig. 3 Relation of moment (M_e) and r_2 and r_1

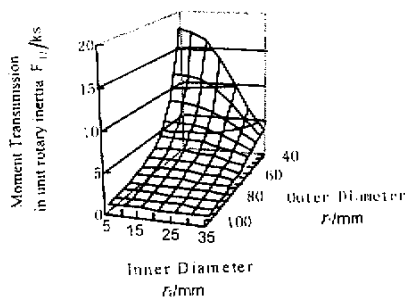


图 4 F_{TJ} 与 r_2 、 r_1 的关系

Fig. 4 Relation of F_{TJ} and r_2 and r_1

式中 ξ_i 为子目标值系数。这样, f_i 的数值限于 0 和 1 之间。我们引入权 $\lambda_i (0 \leq \lambda_i \leq 1, i = 1, 2)$, 于是得到二维的规划目标函数 F 的优化模型, 设计变量为 $\mathbf{r} = [r_1 \ r_2]^T$,

$$\begin{cases} \min_{r_i \in D} F = \sum_{i=1}^2 \lambda_i |f_i| \\ \text{s.t.} & r_{i\min} \leq r_i \leq r_{i\max} \quad (i = 1, 2) \\ & \alpha_i \leq f_i \leq \beta_i \quad (i = 1, 2) \end{cases} \quad (11)$$

图 5 绘制了表 1 给出的不同的 λ_i 、 ξ_i 时, 目标函数 F 与 r_2 、 r_1 的关系。其中, \mathbf{r}^* 是设计变量的最优点, F^* 是设计变量为最优点时的目标函数值。

表 1 不同的 λ_i 、 ξ_i 时, 目标函数 F 与 r_2 、 r_1 的关系

Table 1 Relation of F and r_2 , r_1 in different λ_i , ξ_i

| λ_1 | λ_2 | ξ_1 | ξ_2 | \mathbf{r}^* | F^* | Curved face |
|-------------|-------------|---------|---------|----------------|-------|-------------|
| 0.5 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | $[44.5]^T$ | 0.289 | Fig. 5a |
| 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | $[46.5]^T$ | 0.175 | Fig. 5b |
| 0.7 | 0.3 | 0.7 | 0.7 | $[94.10]^T$ | 0.209 | Fig. 5c |
| 0.7 | 0.3 | 0.6 | 0.6 | $[76.15]^T$ | 0.159 | Fig. 5d |

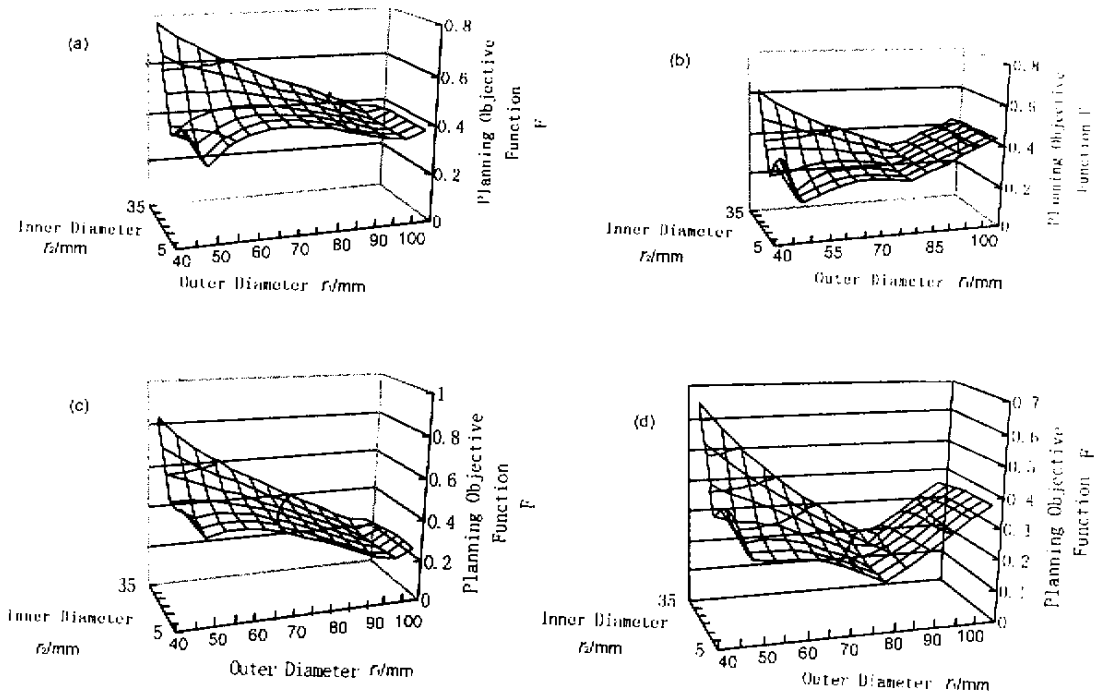


图 5 F 与半径 r_2 、 r_1 的关系

Fig. 5 Relation of F and r_2 and r_1 .

从图 5 看到, 最优点随 λ_i 、 ξ_i 的值而变化。要求力矩放大系数较大, 则 r_1 、 r_2 较大; 要求力矩放大系数和动态性能兼顾, 则 r_1 、 r_2 较小。

4 实验原理

直流电机通过皮带轮和齿轮副使左右两圆盘以不同的方向转动,实验中采用转速为 60 rpm。圆盘间注入电流变液,这里采用的电流变液是德国 RWE - DEA 公司生产的 ERF - 175/177。实验得到的 35.8℃ 时电流变性能如图 6 所示。从图 6 中看到,随着外加电场强度的增加,表观粘度变大;随着剪切率变大,表观粘度变小,这种现象在高电场下,尤其明显,即所谓的剪切变稀现象。

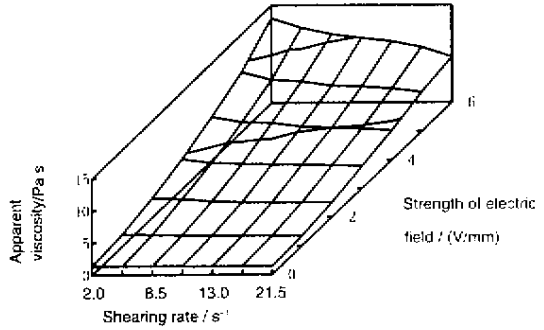


图 6 电流变液的流变性能

Fig.6 Rheologic performance of electrorheological fluid

检测装置如图 7 所示。在 PC 上装有插板

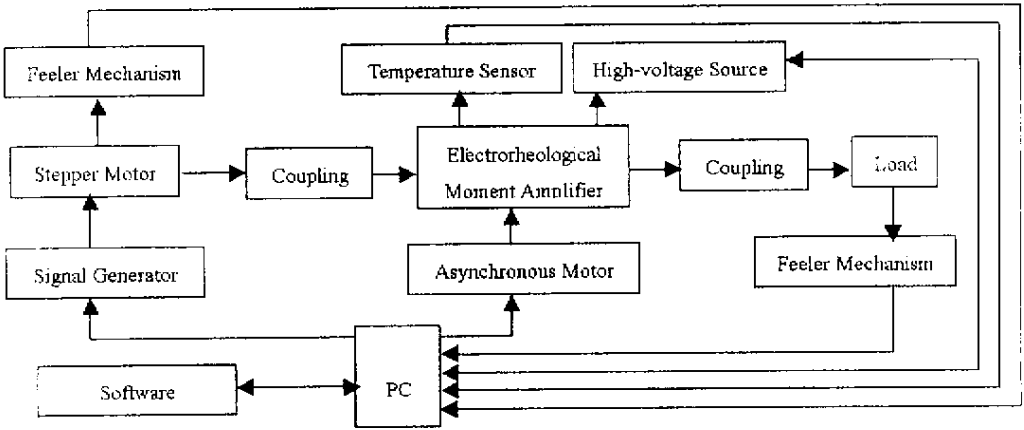


图 7 实验原理图

Fig.7 Experiment simplified schematic

DT2812A, 并利用软件 TurboLab 和 Software ToolKit für DT2812A 进行数据采集与控制。从力矩传感器获得步进马达通过柔性联轴器传递的转动力矩 M_{in} 和增加了电流变液辅助力矩的输出力矩 M_{out} 。根据系统识别的结果获得到应加在左盘或右盘与中间圆盘之间的电压,由计算机控制得高压电源输出电压和电子开关方向。利用直径为 150 mm,宽 15 mm 的木圆盘与钢带之间的摩擦力矩为负载,这种结构简单、且静摩擦力矩与动摩擦力矩相差较小。由实验得到的数据拟合式(6)的曲线如图 8 所示。

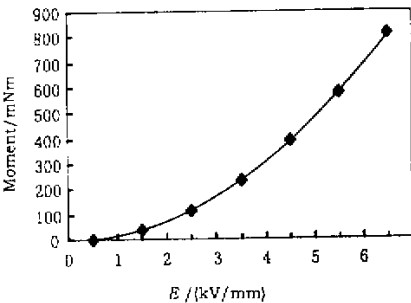


图 8 转矩与电场强度的关系

Fig.8 Relation of moment and electric field strength

本文中,利用计算机控制的步进电机产生不同的输入信号,调速电机的输入用来控制装置形成的剪切场。通过上述实验得到的结果来分析圆盘式电流变放大器的动态性能。

5 实验结果

通过输入阶跃电场,测出输出转矩大小,如图 9 所示。输入脉冲电场信号,得到的结果如图 10 所示。

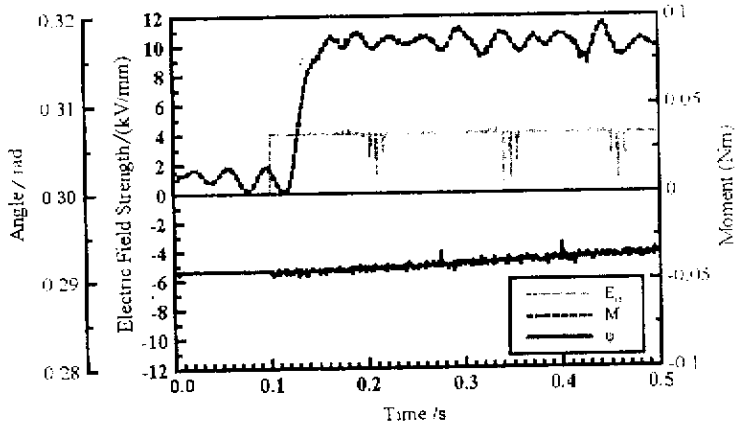


图 9 加阶跃电场的响应

Fig.9 Response to step electric field

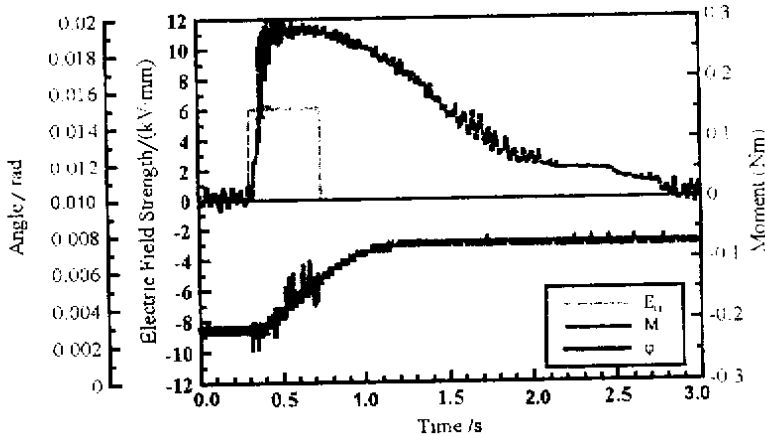


图 10 加脉冲电场的响应

Fig.10 Response to pulse electric field

从实验曲线可以看出:(1)从图 9 和 10 可以看出,输出转矩的变化相对于输入的电场信号是滞后的,其影响因素有两个:一个是实验装置中转动圆盘本身的惯性作用;一个是测量输出转矩的传感器是位于联轴器之后,这使得传感器获得的信号要受到联轴器的影响。(2)图 9 中输出转矩的曲线是波动的,因为负载是在变化的,输出转矩要与负载相匹配,那么,输出转矩也应随着负载的变化而变化,即呈现波动状态。(3)图 10 中当外加电场信号消失后,装置的输出转矩并没有立即变为零,而是有一个过程,其影响因素是实验装置中零件的惯性。

6 结论

1. 采用双主动盘结构设计的电流变力矩放大器,对于正反两方向的转矩,只要接换高压

电源的开关 就快速放大正反两方向的力矩。主动盘采用恒定的高于输入信号的转速,使粘性剪切产生的力矩稳定,放大器易于控制。

2. 圆盘式电流变力矩放大器的圆盘间隙 h 在 ERF 击穿电场和装置绝缘条件允许下,可以尽可能的小。因为它不依靠间隙来决定调速范围。但从使用和结构制造精度考虑, h 和圆盘外径 r_1 要满足: $h \geq 0.01r_1$ 。

3. 圆盘外径和内径是机构设计的主要设计变量。采用本文给出的多目标规划的电流变放大器优化设计模型,可以从提高放大器放大倍数或提高动态响应速度的不同角度,规定权重和子目标的追求值,从而设计出性能优良的放大器。

4. 采用式(6)拟合方法,根据负载变化,可以有效地控制电流变力矩放大器。本文设计的装置与控制系统,是一个电流变力矩伺服放大系统,所设计电流变力矩放大器装置,具有良好的动态性能。从图9和图10可以看出,能在0.01s的时间内作出响应。

参 考 文 献

- [1] Wei Chenguan(魏宸官). Electrorheological Technology(电流变技术), Beijing Institute of Technology Press(北京理工大学出版社), 2000, 1
- [2] Schwarz S. Elektrorheologische Fluide – Charakterisierung und Anwendungen, Doktor – Arbeit, Universitaet der Bundeswehr Hamburg, 1997, 9
- [3] Huang Yijian(黄宜坚), Zhu Shisha(朱石沙), et al. . The Electrorheology(电流变学), Hunan Normal University Press(湖南师范大学出版社), 1997, 235

Electrorheological Moment Amplifier*

Huang Yijian**, Wang Haibo, Yang Jinmin, Huang Haocai

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362011)

Abstract An electrorheological moment amplifier is developed and its work principle and structure characteristics are explained. Then, we research the effects of structural parameters on performance of mechanism and present optimization design methods and control methods. With a view of enhancing the amplification coefficient or increasing the speed of dynamic response, the expectation values of objectives and the weight are obtained and the amplifier with good performance could be designed. In this paper, the parabolic relation between moment amplified and electric field is decided by experimental fit method. And step and pulse electric field signals are used to study the dynamical properties of the device. As the result of experiments, it is confirmed that the electrorheological moment amplifier has good dynamic performance through optimization design methods.

Key words Electrorheological fluid, Moment amplifier, Optimization design, Control

* Project supported by the National Science Found of Fujian Province(No. Z9910020).

** To whom correspondence should be addressed, Email: sam-whb@163.com