

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.050

双向压扭联轴器滞环颤振补偿技术研究*

刘国文¹ 李胜¹ 阮健¹ 江海兵^{1,2} 申屠胜男¹ 孔晨菁¹

(1. 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014;

2. 衢州学院机械工程学院, 衢州 324000)

摘要: 提出一种针对2D电液比例方向阀的双向压扭联轴器的设计方案,用球型滚轮传递运动,将楔形件的直线运动转换为阀芯的旋转运动,同时放大输出转矩和2D阀芯的扭转角度。建立了压-扭联轴器的动力学方程,用相平面法研究了其颤振补偿间隙特性,采用颤振补偿技术降低压扭联轴器的滞环,达到消除间隙的效果。在建立数学模型和制作样机的基础上,对楔形件直线运动与阀杆旋转角度之间的关系进行了仿真和实验,仿真分析与实验结果基本吻合,实验结果表明:采用颤振补偿技术可有效降低因间隙产生的滞环;颤振幅值为间隙量50%时,滞环约为3.7%,颤振幅值大于间隙量时,滞环小于2%。

关键词: 压-扭联轴器 相平面分析 滞环特性 颤振补偿

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0349-06

Dither Compensation Technology for Hysteresis of Bi-direction Thrust Torsion Coupling

Liu Guowen¹ Li Sheng¹ Ruan Jian¹ Jiang Haibing^{1,2} Shentu Shengnan¹ Kong Chenjing¹

(1. Key Laboratory of E&M, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China

2. College of Mechanical Engineering, Quzhou University, Quzhou 324000, China)

Abstract: A novel design project of bi-direction thrust torsion coupling was put forward for 2D electro-hydraulic proportional directional valve by using spherical roller, the wedge's linear motion could be translated into spool's rotary motion, and the output torque and 2D spool's torsion angle could be amplified. On the basis of the mathematical model, the dynamic characteristic of thrust torsion coupling and the hysteresis characteristics due to backlash were analyzed by using phase-plane analysis method. The backlash was overcome by using dither compensation technology and the effect for eliminating the backlash was achieved. Based on the mathematical model and the prototype, the relationship between linear motion of the wedge and rotation angular displacement of the spool was researched and simulated. Simulation and experimental results were consistent. Experimental results showed that the hysteresis of backlash could be reduced efficiently by using dither compensation technology, the hysteresis was about 3.7% as dither amplitude was half of backlash, and it could be controlled below 2%, as dither amplitude was beyond the backlash. Bi-direction thrust torsion coupling could be used in the 2D electro-hydraulic proportional directional valve and the amplification of the displacement could be realized.

Key words: Thrust torsion coupling Phase-plane analysis Hysteresis characteristic Dither compensation

收稿日期: 2014-07-16 修回日期: 2014-08-11

* 国家自然科学基金资助项目(51375445)、国家国际科技合作专项资助项目(2011DFA72690)、浙江省自然科学基金资助项目(LZ13E050002)、浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)资助项目(2013R403081)和浙江省大学生创新创业孵化资助项目(2014R403097)

作者简介: 刘国文, 讲师, 博士生, 主要从事电液直接数字控制研究, E-mail: guowenliu2002@163.com

通讯作者: 阮健, 教授, 博士生导师, 主要从事流体控制元件及电液直接数字控制研究, E-mail: wxmin@mail.hz.zj.com

引言

2D 阀具有液压导控桥路压力增益大的优点^[1]。即给 2D 阀芯一微小转角,便可使其敏感腔的压力发生较大变化,从而驱动主阀芯轴向运动。压-扭联轴器具有受压后扭转的特性,可将电磁铁推杆的直线运动按比例转换为阀芯的扭转运动。因此,将压-扭联轴器应用于 2D 阀设计。

压-扭联轴器是 2D 电液比例换向阀设计的关键所在,它的非线性将直接影响 2D 电液比例换向阀的性能^[2]。2D 电液比例换向阀的非线性主要产生于其压-扭联轴器,这是由于压-扭联轴器本身所存在的机械间隙、弹簧阻力和摩擦力等因素所致;推杆式、螺旋式等刚性压扭联轴器能传递较大的扭矩,但摩擦力影响较大,且有间隙,滞环较大;簧片式等弹性压扭联轴器,虽不受摩擦力影响,但无法传递较大扭矩,且重复性和线性度较差^[3]。

本文针对 2D 电液比例方向阀设计一种双向压扭联轴器,可放大驱动阀杆转动的扭转力矩和旋转角度,实现位置反馈;球型滚轮元件可避免楔形件上螺旋槽的加工;滚轮点接触滚动能有效减小机械摩擦力等非线性因素的不利影响;利用颤振补偿技术降低滚轮间隙所产生的滞环非线性,起到消除间隙的作用,提高该压扭联轴器的输入输出特性。

1 双向压扭联轴器工作原理

因高压、大流量电液比例阀阀芯受到液动力和摩擦力的影响,难以直接驱动阀芯轴向运动^[4],因而采用压扭联轴器来实现电磁铁直线运动和阀芯旋转运动的转换,将 2D 电液比例方向阀的导阀和主阀融为一体,通过压扭放大驱动技术实现位置反馈。其工作原理如图 1 所示,合理设计楔形件上斜槽的倾斜角度和中心轴的有效长度,阀芯可获得较大的旋转力矩,克服阀芯的摩擦力驱动阀芯顺(逆)时针转动;阀芯左、右端台肩上各开设一对高低压孔 c 和 d,阀体上开设感受通道 f,高低压孔与感受通道相交形成两个微小弓形面积,串联成液压阻力半桥,控制左右敏感腔 e、g 的压力。由于阀芯顺(逆)时针转动,阀右(左)敏感腔的压力升高,左(右)敏感腔的压力降低,阀芯向左(右)运动,中心轴两端的滚轮受到楔形件上斜槽的约束,阀芯轴向移动的同时也产生回转,使阀芯两端敏感腔的压力重新恢复为稳态的平衡值,阀芯到达与比例电磁铁推力成比例的新平衡位置;阀芯位移与电磁铁推力和阀芯旋转角度成线性关系。

双向压扭联轴器工作原理如图 2 所示,中心轴两端的球型滚轮元件在斜槽中滚动,将楔形件的直

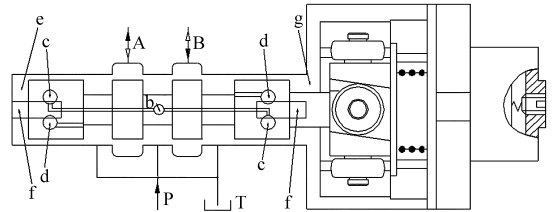


图 1 2D 电液比例阀系统原理

Fig.1 Schematic of 2D electro-hydraulic proportional directional valve

线运动转换为阀杆的旋转运动^[5]。比例电磁铁失电时,压扭联轴器组件通过内、外弹簧和大、小垫片保持初始零位;电磁铁正向通电,连接套筒(与推杆固连)被电磁铁驱动向左,推动楔形件向左运动,使阀杆产生逆时针方向的旋转;电磁铁断电,在外弹簧作用下楔形件右移复位,带动阀杆顺时针复位;电磁铁反向通电时,原理类似,动作相反。电磁铁对楔形件的轴向驱动力相当于直动式比例阀的驱动力,低压、小流量的工况下可实现阀芯直接运动。其阀杆扭转装置如图 3 所示。双向压扭联轴器实物如图 4 所示。

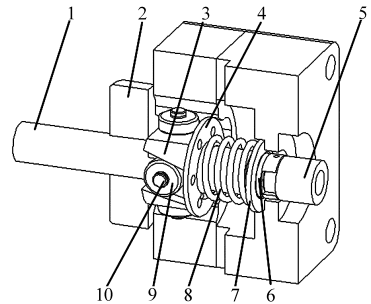


图 2 压扭联轴器结构

Fig.2 Structure of thrust torsion coupling

1. 阀杆 2. 阀体 3. 楔形件 4. 大垫片 5. 连接套筒 6. 卡簧
7. 小垫片 8. 外弹簧 9. 滚轮 10. 中心轴

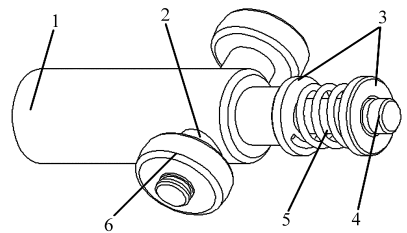


图 3 阀杆扭转装置

Fig.3 Spool torsion equipment

1. 阀杆 2. 中心轴 3. 内垫片 4. 卡簧 5. 内弹簧 6. 滚轮

2 数学模型

2.1 力-扭矩转换分析

如图 5 所示,比例电磁铁推力作用于楔形件,产生作用力 F_m , F_n 为滚轮与斜槽接触力,沿水平和垂直方向分解为 F_x 和 F_y ,其中

$$F_x = F_m \quad (1)$$

$$F_y = F_m / \tan\beta \quad (2)$$

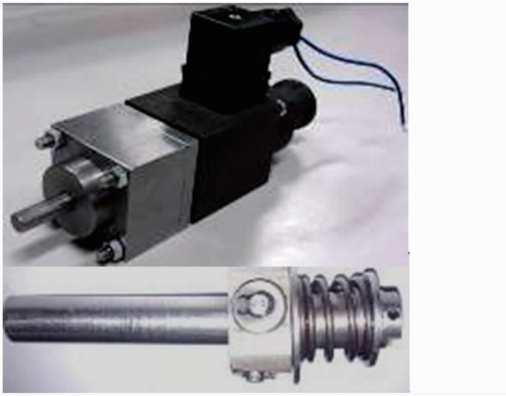


图 4 压扭联轴器实物
Fig. 4 Thrust torsion coupling

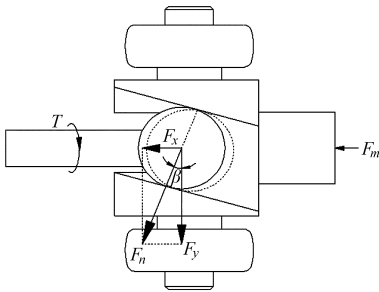


图 5 受力分析
Fig. 5 Force analysis

依据功能互换原理^[6],忽略压扭联轴器中摩擦力等因素的影响,其轴向力-扭矩转换关系为

$$\begin{cases} T = F_m R / \tan\beta \\ \theta = \frac{x_m}{R} \tan\beta \end{cases} \quad (3)$$

式中 T ——联轴器输出的扭矩
 F_m ——比例电磁铁对楔形件作用力
 R ——中心轴传递力的有效半径
 x_m ——楔形件的轴向位移
 β ——斜槽与垂直方向的夹角
 θ ——阀芯转角

2.2 动力学分析

如图 6 所示,楔形件动力学方程为

$$m \ddot{x}_m + B_c \dot{x}_m + k_c x_m + F_x = F_m \quad (4)$$

阀杆动力学方程为

$$J_r \ddot{\theta} + B_\theta \dot{\theta} + k_\theta \theta + T_f = T = 2F_y R \quad (5)$$

$$F_y = F_x / \tan\beta \quad (6)$$

$$\theta = \frac{x_m \pm \varepsilon}{R} \tan\beta \quad (7)$$

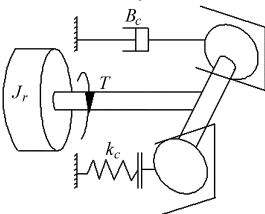


图 6 动力学分析
Fig. 6 Dynamic analysis

式中 m ——楔形件(含比例电磁铁推杆)质量
 J_r ——阀杆转动惯量 B_c, B_θ ——阻尼系数
 ε ——间隙 k_c ——弹簧刚度
 k_θ ——旋转啮合刚度

2.3 颤振补偿数学模型

2.3.1 斜槽非线性

为加工方便,设计楔形件上滚轮接触面为斜槽面而非螺旋面;如图 7 所示,扭转过程中,只有在旋转角度较小时,球型滚轮球心变化高度 Δy 与变化弧 ω 近似相等,二者之间关系为

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \tan\beta \quad (8)$$

因此,楔形件斜槽面会对压扭联轴器系统的线性产生不利影响。

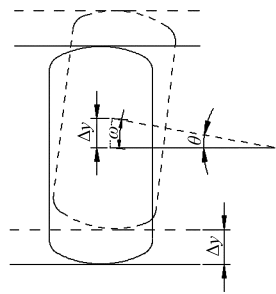


图 7 滚轮变化轨迹
Fig. 7 Roller trajectory

2.3.2 间隙转化

压扭联轴器的电-机械转换器是比例电磁铁,电磁铁推杆与楔形件通过连接套筒联接为一体,故楔形件的直线位移决定了阀杆的旋转角度。

理想情况下,阀杆随楔形件的运动应立即旋转。但实际上滚轮需合适的间隙来保证其正常工作,没有间隙或间隙过小,会导致滚轮卡死,压扭联轴器无法正常工作。间隙转化如图 8、9 所示,其关系为

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \varepsilon_3 \quad (9)$$

$$\varepsilon_4 + \varepsilon_5 = \varepsilon_6 \quad (10)$$

因加工和安装误差等因素的影响,一定程度上增大了间隙所引起的滞环非线性;由于间隙的存在,阀杆并不是随楔形件的运动而立即旋转,而是当楔形件越过全部间隙时,滚轮才开始接触受力,从而产生扭转所需的力矩,因此滚轮传动过程中不可避免地存在空程误差,使得楔形件直线位移和阀杆旋转角度之间不是单值的线性关系,而是表现出滞环非线性;因此,间隙的存在极大地限制了压扭装置系统性能的提高,使系统的实际输出围绕期望值上下波动,轻则影响系统的控制精度,重则出现极限环振荡,甚至造成系统不稳定^[7]。因此本文尝试采用颤振补偿技术来减小滞环对系统性能的影响^[8],达到抑制或消除间隙的效果。

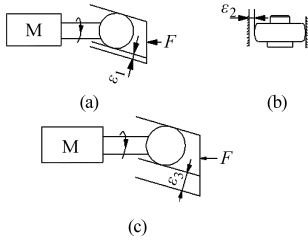


图8 进程间隙转化

Fig.8 Backlash transformation of launching

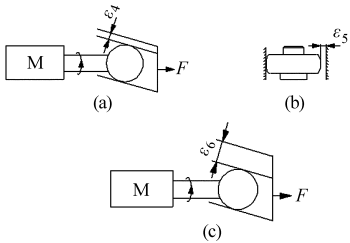


图9 回程间隙转化

Fig.9 Backlash transformation for putting back

2.3.3 颤振补偿机理

间隙颤振补偿的机理为:在比例电磁铁的输入信号上叠加一高频正弦颤振周期信号,该信号颤振频率远高于楔形件的运动频率和固有频率,且周期很短,电磁铁驱动楔形件随着该高频颤振信号作高频颤振运动,且颤振信号不会对系统的稳定性产生影响,压扭联轴器因间隙造成的滞环影响可以得到有效的抑制。

颤振信号表达式为

$$y_d(t) = A_d \sin \frac{2\pi}{T_d} t \quad (11)$$

式中 A_d ——颤振信号的幅值

T_d ——颤振信号周期

2.3.4 间隙特性的相平面分析

相平面分析法是用图解法求解二阶非线性系统的方法,在由 $x - \dot{x}$ 所组成的平面坐标系中,其相轨迹表征系统状态的变化过程。

控制系统间隙特性如图10所示,其数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} k(e(t) - \varepsilon) & (\dot{x}(t) > 0) \\ k(e(t) + \varepsilon) & (\dot{x}(t) < 0) \\ b \text{signe}(t) & (\dot{x}(t) = 0) \end{cases} \quad (12)$$

式中 ε ——间隙宽度 k ——输入特性斜率

$e(t)$ ——输入信号

其描述系统微分方程为

$$\begin{cases} c\ddot{e} + \dot{e} + K_N = 0 & (e \geq \varepsilon) \\ c\ddot{e} + \dot{e} - K_N = 0 & (e \leq -\varepsilon) \\ c\ddot{e} + \dot{e} = 0 & (|e| < \varepsilon) \end{cases} \quad (13)$$

式中 c ——描述函数二阶系数

K_N ——描述函数常数项

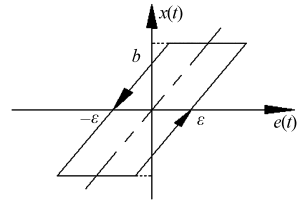


图10 间隙特性

Fig.10 Backlash characteristic

间隙特性中,只有在输入信号越过间隙时,元件才有输出信号产生,处于间隙内时,系统常常产生自持振荡;颤振补偿时,叠加颤振信号(如正弦信号)的振幅 A 小于间隙 ε 时,系统无稳定输出信号;只有当正弦振幅 A 大于间隙 ε 后,输出信号才随着输入信号的变化而及时变化^[9-10]。

利用 Matlab/Simulink 搭建压扭联轴器控制系统的仿真模型,得到其相轨迹如图11所示^[11]。

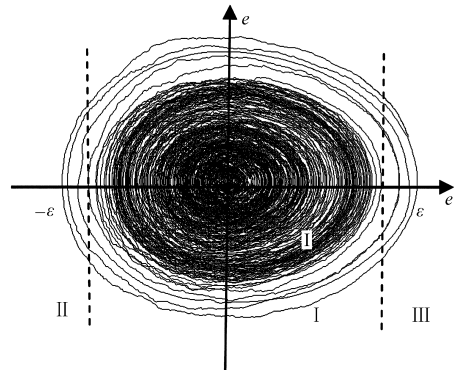


图11 相轨迹

Fig.11 Phase trajectory

I区可视为振幅小于间隙的情形,即 $A < \varepsilon$ 时,相轨迹为自持振荡过程,随着颤振幅值不断增加,表现为混沌状态,由于存在间隙,楔形件与滚轮不能及时接触,颤振不能及时起作用;II和III区中,即 $|A| > \varepsilon$ 时,相轨迹趋向于封闭曲线,此时正弦颤振信号完全越过了间隙,楔形件直动的同时,滚轮及时滚动,阀杆扭转^[12-15]。

2.3.5 仿真结果

方程式(4)~(8)构成双向压扭联轴器的数学模型。为更清楚地了解间隙等非线性因素对系统性能的影响,根据上述数学模型,利用龙格-库塔算法仿真计算出阀杆角位移^[16-19],再根据比例电磁铁特性换算出与楔形件直线位移之间的关系。

在输入三角信号上叠加一高频正弦颤振信号,输入信号如图12所示,仿真结果如图13所示,从图中可以看出,在采用颤振补偿技术后,楔形件直线位移与阀杆旋转角度之间的滞环特性得到明显改善。设置正弦颤振信号的幅值为间隙量的50%,滞环宽度约为4%左右;幅值超过间隙量时,滞环宽度降到1.9%以内,且跟随效果明显提高。可见,采用颤振补偿技术能降低间隙等非线性

性因素对系统性能的影响,达到消除间隙的预期目的,提升系统性能,为其在2D电液比例换向阀

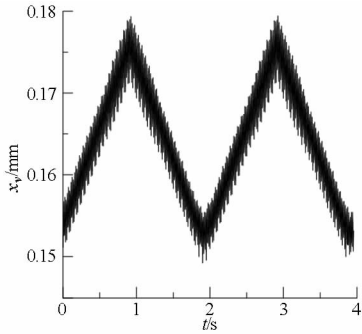


图 12 叠加颤振信号的输入信号

Fig. 12 Input signal with dither signal superimposition

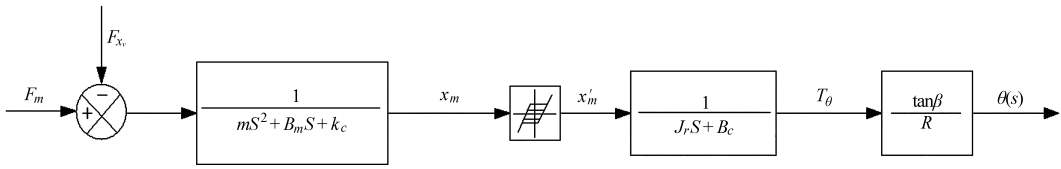


图 14 压扭联轴器数学模型

Fig. 14 Mathematical model of thrust torsion coupling

表 1 结构参数

Tab. 1 Structural parameters

参数	数值
转动惯量 $J_r / (g \cdot cm^2)$	320
阀杆台肩半径 R / mm	4.05
楔形件质量 m / g	3.5
楔形件最大行程 x_{max} / mm	1.0
弹簧刚度 k_c	10
滑动阻尼系数 B_m	10.25
转动阻尼系数 B_c	23.83

3 实验

为验证仿真结果,更好地研究压扭联轴器的间隙特性及颤振补偿技术,设计了实验方案,并搭建了实验平台,如图 15、16 所示。

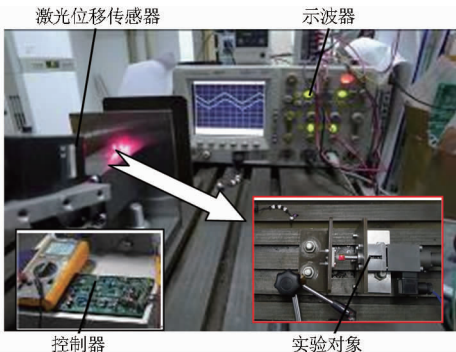


图 15 实验装置

Fig. 15 Device of experimental system

信号发生器产生输入三角波信号,由控制器在输入信号中叠加不同幅值的高频正弦颤振信号,作用于电磁铁,控制楔形件的直线运动;双向压扭联轴

上的应用奠定基础。其数学模型如图 14 所示,其结构参数如表 1 所示。

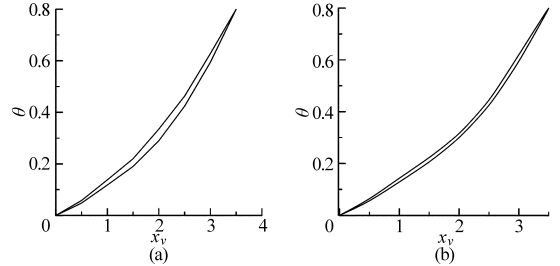


图 13 $x_v - \theta$ 仿真结果

Fig. 13 Simulation results

(a) 颤振信号幅值为间隙量 50% (b) 颤振信号幅值超过间隙量

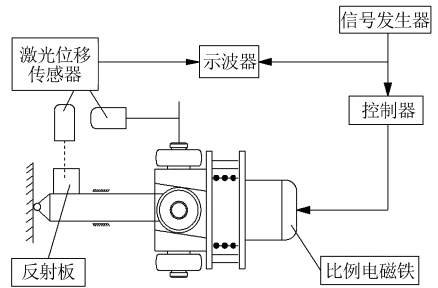


图 16 实验方案

Fig. 16 Schematic of experimental system

器将楔形件的直线运动转换为阀杆的旋转运动;楔形件的直线位移和阀杆的旋转角度由激光位移传感器测量,激光位移传感器投射在贴有铜片的反射板上,并与阀杆固接,数字示波器显示和记录不同颤振幅值信号下楔形件位移与阀杆旋转角度,得到二者之间的关系曲线。

图 17 表明,当设置颤振信号幅值为间隙量的 50% 时,滞环被明显削弱,约为 3.7%;当颤振信号幅值超过间隙量时,滞环被控制在 2% 以内,并且跟

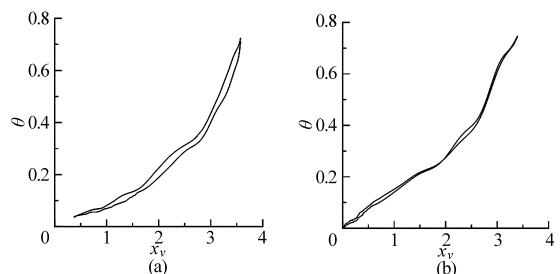


图 17 实验结果

Fig. 17 Experiment results

(a) 颤振信号幅值为间隙量 50% (b) 颤振信号幅值超过间隙量

随效果得到提高,实验结果与仿真结果基本一致;由于电磁铁磁滞、摩擦力和其他因素影响,滞环不能完全消除,采用颤振补偿技术可以明显抑制由间隙引起的滞环非线性,提高压扭联轴器的输入输出特性和响应速度。

4 结论

(1)提出了双向压扭联轴器的设计方案,将楔形件的直线运动转化为阀杆的旋转运动;楔形件上用斜槽代替螺旋槽,简化了加工工艺;采用球型滚轮而非滚动轴承传递运动,利用滚轮点接触取代轴承的面接触,减小了摩擦阻力,且不易被卡死。

(2)为保证滚轮在楔形件斜槽中的正常滚动,

设计中需留有合适的间隙,导致系统滞环非线性;相平面分析表明,利用颤振补偿技术,可降低压扭联轴器的滞环,起到消除间隙的效果;设置颤振幅值为间隙量的50%时,滞环约为3.7%,颤振幅值超过间隙时补偿效果最好,滞环小于2%。

(3)颤振幅值变大时实验曲线发生局部变形扭转,主要为测量误差(激光位移传感器反馈的信号为阀芯角位移而非精确旋转角度和反射板上铜片表面不平)等因素所致;从实验曲线可判断:滞环小于2%,局部变形扭转包络在比例控制的范围之内,且其跟随效果良好。

(4)实验曲线中取局部线性段即可满足比例控制的要求,在2D电液比例换向阀上实现位移放大。

参 考 文 献

- 1 阮健,裴翔,李胜. 2D电液数字换向阀[J]. 机械工程学报, 2000, 36(3): 86-89.
Ruan Jian, Pei Xiang, Li Sheng. 2D digital directional control valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(3): 86-89. (in Chinese)
- 2 左强,李胜,阮健. 2D电液比例方向阀弹性压扭联轴器研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 327-333.
Zuo Qiang, Li Sheng, Ruan Jian. 2D electro-hydraulic proportional directional valve elastic thrust torsion coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 327-333. (in Chinese)
- 3 左强. 半桥导控型2D电液比例换向阀的原理、理论分析及实验研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2014.
- 4 王春行. 液压控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
- 5 成大先. 机械设计手册1~5卷[M]. 5版. 北京:化学工业出版社, 2008.
- 6 Bu F P, Yao B. Nonlinear adaptive robust control of hydraulic actuators regulated by proportional directional control valves with deadband and nonlinear flow gains[C]//Proceedings of the American Control Conference, Chicago, Illinois, June, 2000.
- 7 李胜,阮健,孟彬. 2D数字阀滞环颤振补偿技术研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 208-214.
Li Sheng, Ruan Jian, Meng Bin. Dither compensation technology for hysteresis of 2D digital valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 208-214. (in Chinese)
- 8 圣国梁. 基于MATLAB对齿轮间隙非线性动力学仿真研究[J]. 电子机械工程, 2008, 24(5): 58-60.
Sheng Guoliang. Simulated study on the gear gap non-linear dynamics based on MATLAB[J]. Electro-mechanical Engineering, 2008, 24(5): 58-60. (in Chinese)
- 9 李友善. 自动控制原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1981.
- 10 Arafa H A, Rizk M. Identification and modeling of some electrohydraulic servo valve non-linearities[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1987, 201(2): 137-145.
- 11 宋志安,曹连民,黄靖,等. MATLAB/Simulink与液压控制系统仿真[M]. 2版. 北京:国防工业出版社, 2012.
- 12 Ruan J, Burton R, Ukrainetz P. An investigation into the characteristic of a two dimensional "2D" flow control valve[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2002, 124(1): 214-220.
- 13 Lu Yongxiang. Entwicklung vorgestenerter proportional ventile mit 2-weg-einbauventile als stellglied und mit gerateinterner rnuokfuhrnng[D]. Aachen: Aachen TH, 1981.
- 14 Bora Eryilmaz, Bruce H Wilson. Unified modeling and analysis of a proportional valve[J]. Journal of the Franklin Institute, 2006, 343: 48-68.
- 15 Herbert E Merritt. Hydraulic control systems [M]. New York: John Wiley & Sons, 1967.
- 16 白继平,贾文昂,阮健. 2D高频转阀液动力矩研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 320-326.
Bai Jiping, Jia Wenang, Ruan Jian. Numerical study on flow moment of 2D high frequency rotary valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 320-326. (in Chinese)
- 17 郝允志,薛荣生,陈建,等. 比例电磁阀开环-闭环复合控制算法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 314-319.
Hao Yunzhi, Xue Rongsheng, Chen Jian, et al. Open loop-closed loop compound control algorithm of proportional solenoid valve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 314-319. (in Chinese)
- 18 吴根茂,邱敏秀,王庆丰,等. 实用电液比例技术[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2006.
- 19 Gerald C Anderson. Three-way proportional valve; US, 4569273[P]. 1986-02-11.
- 20 Donald A Slevenplper. Proportional valve; US, 3599675[P]. 1971-08-17.