

# 基于简化预测控制的液粘调速试验台速比控制

陈光, 吴健, 李珍, 马嵩源, 李浩

(天津电气科学研究院有限公司, 天津 300180)

**摘要:**液体粘性调速离合器是一种新型无极调速装置,于20世纪80年代在国内开始迅速发展并已经广泛应用于大功率风机、水泵调速系统中,但是在技术上仍然具有优化空间。液粘离合器试验台有助于液粘调速技术的理论和实践研究。在设计研发液体粘性离合器试验台的过程中,提出了基于模型预测控制的简化算法,结合高速数据采集系统实现对电液比例阀的精准闭环控制,在额定输入转速下实现输出轴无极调速。通过简化的预测控制算法优化了双闭环液粘调速离合器试验台速比控制,具有更高的稳定精度和更快的响应速度,对液粘调速技术的研究具有重要意义。

**关键词:**液粘离合器;预测控制;试验台;液体粘性传动

**中图分类号:**TP273 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed20165

## Speed Ratio Control of HVD Test-bed Based on Simplified Predictive Control

CHEN Guang, WU Jian, LI Zhen, MA Songyuan, LI Hao

(Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China)

**Abstract:** Hydro-viscous drive clutch is a new type of infinite speed regulating device, which began to develop rapidly in China in the 1980s and has been widely used in the speed regulating system of high-power fans and pumps. but there is still room for progress in technology. The hydro-viscous clutch test-bed is helpful to the theoretical and practical research of hydro-viscous speed regulation technology. In the design process, a simplified algorithm based on the model predictive control was proposed, and the precise closed-loop control of the electro-hydraulic proportional valve was realized by combining the data acquisition system, and the double closed-loop control strategy was adopted to realize the infinite speed regulation. The system has higher stability accuracy and faster responding speed, which is conducive to the study of liquid-viscous clutch.

**Key words:** hydro-viscous clutch; predictive control; test-bed; yhydro-viscous drive(HVD)

液体粘性传动(hydro-viscous drive, HVD)是一种新型的传动方式,这种流体传动方式在20世纪70年代中期发展起来。依据牛顿内摩擦定律,靠液体的粘性和油膜剪切作用产生的动力传递,可以达到100%的效率传递。液体粘性离合器(奥美伽离合器)简称为液粘离合器,作为液粘传动的典型应用通过控制摩擦片之间的油膜厚度传递动力,不仅可以控制离合器的分合还可以控制输出轴的速度和转矩<sup>[1-2]</sup>。由于液粘离合器具有传动效率高以及无极调速的优势,在中大型设备的启动、制动和调速等方面有广阔的应用前景。美国是最早研究此技术的国家之一,早在20世纪60年代末宾夕法尼亚州的费城齿轮公司就

已经开始液粘传动设备的研制,文献[3]遵循雷诺方程假设油膜等温,并分析了摩擦片上的油槽几何形状和方向的影响,计算了油膜厚度对传递转矩、传递转速、啮合时间的作用效果。最早开始研究此技术的Liu J K提出,没有闭环控制的液粘离合器无法被工业传动市场所接受<sup>[4]</sup>。

国内于20世纪80年代才开始着手于此项技术的研究工作,其中711研究所、上海交通大学、杭州齿轮箱厂、北京理工大学、北京起重运输研究所等单位进行了产品研发,积累了一定的基础数据和设计经验<sup>[5-6]</sup>。文献[7]建立了液离合器的传递函数,在其建立的传递函数的基础上提出了闭环PID控制策略。文献[8]在仿真系统上建

立了液粘调速系统模型,采用双闭环控制方式,根据模型参数设计了一套调速性能良好的液粘离合器调速系统。除了传统的PID控制方式,文献[9]曾提出模糊控制方式在液粘调速离合器电液比例阀控制中的应用,通过仿真证明了其控制效果。文献[10-12]则对电液驱动离合器控制系统进行了建模仿真,建立了一个由电动液压阀驱动的湿式离合器模型,采用了预测控制策略来控制离合器活塞的位移并减少网络延时对控制性能的影响。

针对液粘调速离合器的性能试验,根据试验研究需求,开发了一套综合试验台。利用了简化预测控制算法优化电液比例阀的控制,最终通过实际试验验证试验台对离合器的速比精准控制。

### 1 液粘离合器试验台结构

液粘调速技术在国内起步较晚,与美国等国家相比仍然处于相对落后的水平,因此对于液粘调速技术的进一步研究很有必要。开发一套液粘离合器试验系统具有重要的研究意义,试验台主要用于液粘离合器的各项性能试验,试验数据将有助于此项技术的研发与改进。试验台结构图如图1所示,主要包括:电机及其变频控制系统、液压控制系统、数据采集系统。

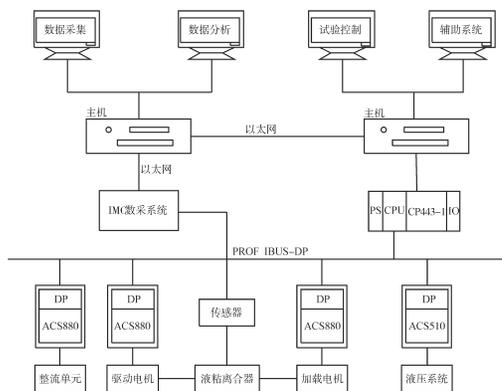


图1 液粘离合器试验台结构图

Fig.1 Structure diagram of HVD test-bed

如图1所示,液粘离合器试验台采用变频电机驱动、电力测功机加载,控制系统上位机采用LabVIEW语言开发用户界面,下位机的电机控制系统主要包括变频调速装置和PLC控制器。数据采集使用了IMC高速采集设备,配合上位机界面和高精度传感器构成数据采集系统。液压系统包含润滑油路、操纵油路以及回油油路,配合

用户界面以及可编程逻辑控制器构成液压系统,可实现液压系统的温度、流量以及压力的自动控制。系统通讯网络控制包括控制网(industrial ethernet 工业以太网)和设备网(Profibus-DP 现场控制总线、CAN总线),自主开发基于socket套接字通讯的IMC.Studio软件和LabVIEW软件之间的数据双向通信,实现IMC设备采集的试验件数据和主控系统的数据交互。

液粘离合器是液粘传动的典型应用,依据内摩擦定律改变油膜厚度将会改变油膜剪切作用力,就可以改变传递的转矩。在实际的系统以调节电液比例阀的开口度大小调节操纵油路的油压,操纵油路油压的改变导致进入离合器油缸中的油压也会改变,相应的油膜厚度随之变化,传递力矩随之变化,以此来实现无极调速。

本系统是一个单输入单输出的系统,系统输入为油压,输出为转速,通过改变操纵油路油压即可以达到改变输出转速的目的。如今多数的速比控制系统均采用双闭环控制策略,内回路为油压控制回路,外回路是速度控制回路,如图2所示。

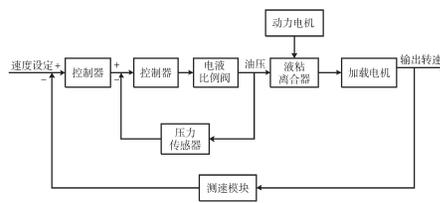


图2 双闭环速比控制框图

Fig.2 Block diagram of double closed Loop speed ratio control

由图2可以看出,当动力电机输入稳定的转速时,双闭环控制系统设定的输出转速与加载电机测速模块测量的实时转速经过PID控制器计算,得出控制量作为内回路液压控制回路的输入设定,与实测压力经过PID计算得出相应的控制信号。控制信号通过放大电路最终给到电液比例阀上控制开口度,得到相应的操作压力。即传统的双闭环控制方式,但是由于受油温、输入转速等因素的影响,系统具有一定的非线性。同一组PID参数很难适应所有的工况,这就导致控制效果的下降,系统鲁棒性变差。

### 2 预测控制简化算法

1980年动态矩阵控制(dynamic matrix control,DMC)算法被提出来。动态矩阵控制也属于预测控制的范畴,对于阶跃响应比较容易获得的

系统动态矩阵控制较为理想,因为它的预测模型就是系统的阶跃响应。由于DMC控制同样具有预测控制的优点,因而它具有比较好的鲁棒性而且能够有效地消除静态误差<sup>[13]</sup>。同时由于本系统中阶跃响应比较容易获取,使用动态矩阵预测控制来优化试验台速比控制具有很大的可行性。

动态矩阵预测控制法算法结构如图3所示。

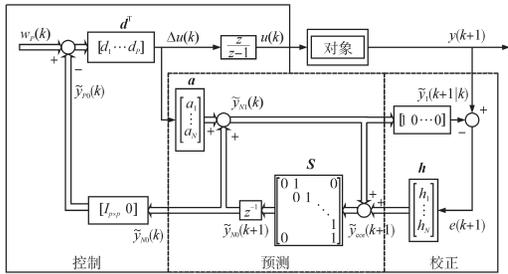


图3 动态矩阵算法结构  
Fig.3 Structure of DMC

图3中,  $\Delta u(k)$  为最终实际算法给出的控制量增量,一方面图3中,控制量增量与前一个时刻的控制量  $u(k+1)$  相加即可以得到实际的某一个时刻作用于对象的控制量,另一方面  $\Delta u(k)$  与模型向量  $a$  相乘得到此控制增量下的模型预测输出,其中  $\Delta u(k)$  是由系统期望输出值  $w_p(k)$  与预测输出值  $\tilde{y}_{p0}(k)$  的偏差与控制向量  $d^T$  点乘得到。模型的预测误差  $e(k+1)$  由被控对象实际输出  $y(k+1)$  与前一个运算周期的模型预测值  $\tilde{y}_1(k+1|k)$  相减得到,模型预测误差与加权矩阵  $h$  相乘得到矫正误差  $\tilde{y}_{cor}(k+1)$ ,矫正误差与前一个周期的预测值相加然后通过移位矩阵  $S$  相乘得到移位之后的模型初始预测值  $\tilde{y}_{n0}(k+1)$ ,取  $\tilde{y}_{n0}(k+1)$  中的前  $P$  个元素构成系统的反馈,与系统期望输出  $w_p(k)$  相减即可以得到系统控制误差然后进入下一轮运算。

动态矩阵算法具有3个重要的参数分别是建模时域( $N$ )、优化时域( $P$ )以及控制时域( $M$ )。通过上述算法计算过程不难看出虽然计算了未来( $M$ )个时刻的控制量增量,但是实际应用到系统中的只是  $\Delta u(k)$  的值,而  $\Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+M+1)$  的计算仅仅是为了方便计算预测下一个计算周期的  $\Delta u(k)$  的值<sup>[13]</sup>。最终作用于对象的控制量实际上只有1个,但是  $M$  决定了计算控制增量的个数,若  $M$  很大,根据上述计算方法则不难发现计算量将会特别大,若只计算1个控制增量又会影响系统控制效果<sup>[14]</sup>。因此降低系统运

算量只能通过降低原矩阵运算的维度来实现,参考了阶梯式集结策略将原预测算法的多维矩阵运算映射到1个序列函数上,从而将1个多维度的矩阵运算简化为1维的数学运算,大大降低了整个预测过程的计算量,有助于在实际系统中实现动态矩阵预测控制算法<sup>[15]</sup>。

综上所述可以得出  $\Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+M+1)$  的计算不必太精确,可选用1个平滑的曲线计算得出,因此本文中选用一阶指数形式的函数对  $\Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+M+1)$  的值进行计算,如下为计算的过程:

$$\Delta u(k+i) = \gamma^i \Delta u(k) \quad 1 \leq i \leq M-1 \quad (1)$$

式中:  $\gamma$  为集结系数。

由式(1)可以看出当确定了  $\gamma$  值时,未来  $M$  个时刻的控制增量  $\Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+M+1)$  均可仅根据当前时刻控制增量  $\Delta u(k)$  的值计算得出,集结矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} 1 \\ \gamma \\ \vdots \\ \gamma^{M-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

原预测控制算法中控制量增量的计算个数由  $M$  个被降低到1个而且集结矩阵也可以根据预先选定的集结系数  $\gamma$  离线计算得出,这就大大降低了算法的计算量。

为了保证单调性,  $\gamma$  的选择一般是大于零的常数。当  $0 < \gamma < 1$  时,根据式(1)可以看出未来时刻的控制量增量是递减的,随着步数的增加越往后的值将会越小,同时对系统的影响因子也会变小,这就表明在前几个时刻控制量的变化更为明显,因此控制器的响应将会更快,当  $\gamma > 1$  时,表现出的情况将与之相反<sup>[15]</sup>。

动态矩阵控制算法预测模型如下:

$$\tilde{y}_{PM}(k) = \tilde{y}_{p0}(k) + A \Delta \mathbf{u}_M(k) \quad (3)$$

式中:  $A$  为由阶跃响应系数  $a_i$  组成的  $P \times M$  维矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & \cdots & \cdots & 0 \\ a_2 & a_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ a_p & \cdots & \cdots & a_{p-M+1} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \mathbf{u}_M(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+M+1|k) \end{bmatrix}$$

对控制增量矩阵  $\Delta \mathbf{u}_M(k)$  进行集结简化,可以得

到:

$$\Delta u(k) = H\Delta u(k) \quad (4)$$

最终得出简化后的算法模型如下:

$$A\Delta u_M(k) = \begin{bmatrix} a_1 & \cdots & \cdots & 0 \\ a_2 & a_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ a_p & \cdots & \cdots & a_{p-M+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \gamma \\ \vdots \\ \gamma^{M-1} \end{bmatrix} \Delta u(k)$$

$$= \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 + \gamma a_1 \\ \vdots \\ a_p + \gamma a_{p-1} + \cdots + \gamma^{M-1} a_{p-M+1} \end{bmatrix} = A_2 \Delta u(k)$$

$$\tilde{y}_{PM}(k) = \tilde{y}_{p0}(k) + A_2 \Delta u(k) \quad (5)$$

简化后的算法中由于模型和集结因子已提前得知因此 $A_2$ 可以在离线情况下提前算出来。

### 3 试验验证

在实际试验过程中电液比例阀具有一定的非线性,当比例阀开口度在线性区工作时,使用PI控制器可以取得较好的控制效果,但是随着使用时间增加,比例阀的非线性区和滞环将会越来越大,导致PI控制器难以取得好的控制效果。

在试验台设计调试的过程中,仍然使用双回路的闭环控制策略(见图2)。外环是速比控制环,仍然使用PID控制器;内环为压力环,使用简化后的模型预测控制算法代替PI算法,同时比例阀的阶跃响应特性比较容易获取,简化后的算法并没有增加过多的计算量。

首先在某一个压力稳定的工况下采样时间0.1 s,给比例阀1个阶跃信号,获得比例阀的阶跃响应曲线如图4所示。

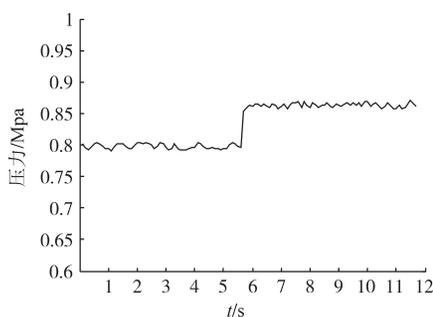


图4 阶跃响应  
Fig.4 Step response

根据阶跃响应模型设置建模时域 $N=300$ ,预测步长 $P=25$ ,控制步长 $M=2$ ,内环压力环的控制效果如图5所示。

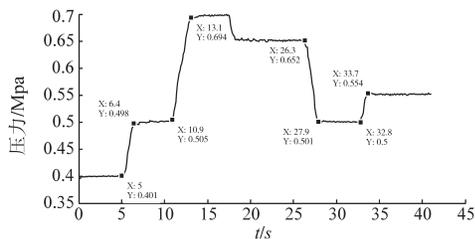


图5 压力闭环系统响应

Fig.5 Response of pressure closed-loop system

首先设定操纵压力0.4 Mpa,然后在稳定时分别给定0.1 Mpa, 0.2 Mpa, -0.05 Mpa, -0.15 Mpa, 0.05 Mpa的给定值阶跃,获得如图5所示的响应曲线。可以看出系统基本上无任何超调,给定0.1 Mpa的阶跃时系统稳定时间在1 s左右,给定0.2 Mpa的阶跃时系统稳定时间在2 s左右,稳态精度为0,控制效果较好。

内环整定结束之后,调整外环速比环的PID参数,参数设置为比例增益 $k_p=0.4$ ,积分 $k_i=0.005$ ,死区设置为0.006 Mpa。

图6为速比闭环系统响应试验曲线。

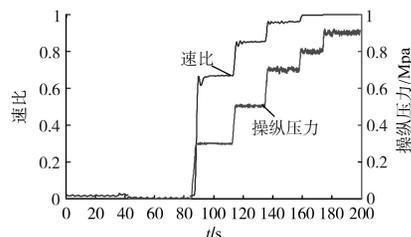


图6 速比闭环系统响应

Fig.6 Response of speed ratio closed-loop system

图7为双闭环速比控制效果试验曲线。

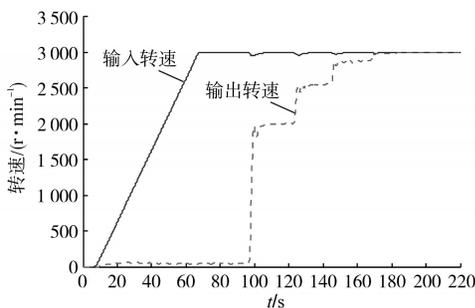


图7 双闭环速比控制效果

Fig.7 The result of double closed-loop speed ratio control

输入转速3 000 r/min稳定状态下,分别给定速比0.66, 0.83, 0.95, 1.0, 对应加载电机转速2 000 r/min, 2 500 r/min, 2 850 r/min, 3 000 r/min, 调节效果如图6、图7所示。改进后的双闭环速比控制,超调控制在50 r/min,稳态精度20 r/min,调节

时间2 s左右,系统具有更快的响应速度、更精确的控制精度。

#### 4 结论

本文结合变频电机、变频器、可编程控制器、数据采集系统等硬件单元以及LabVIEW 人机界面开发软件和液压系统,搭建了液体粘性离合器试验测试平台。该平台有助于液粘离合器的相关研究与验证工作。本文简述了动态矩阵预测控制算法及其简化算法,优化了双闭环速比控制系统。试验验证该平台在速比控制过程中具有更高的控制精度和更好的控制效果。

#### 参考文献

[1] 黄家海. 液粘调速离合器流体剪切传动机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

[2] 谷昭军. 液粘调速系统性能检测设计与研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2008.

[3] Razzaque M M, Kato t. Effects of a Groove on the Behavior of a Squeeze Film Between a Grooved and a Plain Rotating Annular Disk [J]. ASME Journal of Tribology, 1999, 121(4): 808-815.

[4] Razzaque M M, Kato t. Effects of Groove Orientation on Hydrodynamic Behavior of Wet Clutch Coolant Films[J]. ASME Journal of Tribology, 1999, 121(1): 56-61.

[5] 田宇琦. 液体粘性调速离合器机电液总体仿真技术研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2015.

[6] 姜剑勇. 液体粘性调速离合器试验系统的研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

[7] 魏哀官, 刘金奎. 四轮驱动汽车用液体粘性离合器的理论和试验研究[J]. 北京理工大学学报, 1995, 15(18): 6-8.

[8] 毛飞鸿, 张金乐, 杜明刚. 液粘调速系统双闭环控制设计[J]. 车辆与动力技术. 2014(3): 14-18.

[9] 洪跃, 刘宝运, 金士良, 等. 模糊控制在液体粘性离合器中的应用[J]. 机械设计与研究, 2008, 24(1): 58-60, 67.

[10] Razzaque M M, Kato T. Squeezing of a Porous Faced Rotating Annular Disk over a Grooved Annular Disk[J]. STLE Tribology Transactions, 2001, 44(1): 97-103.

[11] Anon. Oil Shear Clutch[J]. Power Transmission Design, 1979, 21(6): 55-61.

[12] Balau A E, Caruntu C F, Lazar C. Simulation and Control of an Electro-hydraulic Actuated Clutch[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(6): 1911-1922.

[13] 刘有飞, 吴刚, 魏衡华, 等. 阶梯式动态矩阵控制及在温度控制系统中的应用[J]. 中国科学技术大学学报, 2002(3): 347-352.

[14] 王凯宸. 基于物理平台的大延迟对象预测控制算法研究及实现[D]. 保定: 华北电力大学, 2017.

[15] 朱娜娜. 模型预测控制简化算法的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

收稿日期: 2019-04-17

修改稿日期: 2019-05-29

### 《电气传动》改半月刊致读者

《电气传动》创刊于1959年,是中国电气传动自动化领域具有权威性的核心刊物,是北大中文核心期刊、中国科学技术信息所“中国科技论文统计源期刊”,主要报道国内外电气传动自动化领域先进技术,发表科研成果和总结实践经验的文章,在国内外相关行业有着广泛的影响。

新的时代赋予了期刊新的使命,为响应习近平总书记“广大科技工作者要把论文写在祖国的大地上”的号召,更好地为广大作者、读者服务,经天津市新闻出版局批准,从2021年1月1日开始,《电气传动》杂志由月刊改为半月刊,每月出版2期。改版后,《电气传动》将加快出版频率,扩大载文量,更快地发表优秀论文。