

# 大偏载情况下双马达同步驱动控制建模及研究实现

## Modeling and Realization of Dual-Motor Synchronization-Control (DMSC) Under Large Partial Load

中国人民解放军 91336 部队 徐东东 孙志朋 韩红斌 刘少强

**[摘要]** 针对某三轴液压飞行仿真转台研制中的关键技术,经过详细的建模仿真,研究压差均衡控制策略对负载变形的抑制效果和 PID 控制参数对负载变形的影响。经过试验验证,该方案合理可行,能取得较好的动静态技术指标,最终该同步方案成功应用于某三轴液压飞行转台。

**关键词:** 液压马达 同步控制 压差

**[ABSTRACT]** In order to solve the key technology of one three-axis hydraulic motion simulator, modeling and simulation are deduced. The differential pressure balancing control algorithm is adopted to compensate the load deformation induced by the parameter asymmetry of hydraulic motor subsystems controlled by two-valve and the PID algorithm is used to improve the global performance of the system. The result of experiment shows that the project takes out the better dynamic and static performance. At last, the project is applied to one three-axis hydraulic motion simulator successfully.

**Keywords:** Hydraulic motor Synchronization control Differential pressure

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.10.086

液压传动系统由于具有结构轻巧、传动比大、运行平稳、有效防止过载,易于实现无级调速和自动化、自动控制及远距离操纵等显著优点,在科研实验室、武器装备、工程机械中广泛应用<sup>[1]</sup>。三轴飞行姿态液压仿真转台是由外框、中框和内框组成的一种高精度的试验设备,在航空、航天等军工行业有着广泛的应用。不论是卧式还是立式液压三轴飞行仿真转台,在其结构设计中,为减轻其框架重量,缩小液压马达的结构尺寸,增加框架组件的结构强度,提高转台总体的动静态性能指标,大多数转台的中框架或外框架会采用双液压马达同步驱动方式。因此,双马达同步驱动技术就成为三轴液压飞行仿真转台研制中的一个关键技术<sup>[2-3]</sup>。

### 1 双马达同步控制系统建模

三轴飞行仿真转台电液位置伺服系统控制精度和

动态特性都要求较高<sup>[4]</sup>,而且对于某型三轴液压仿真转台,由于特殊的应用需求,内框滚动轴系为中空液压马达结构,整个偏离俯仰轴线 10 多厘米,造成俯仰轴偏载较大,提升了同步控制难度。

对于以中空液压马达为负载的双马达同步控制系统,同步的一个重要目标是要使系统运动时中空液压马达的变形达到最小,从而避免中空液压马达因为变形导致泄漏加剧、卡死等故障的发生<sup>[5]</sup>。

为了直观地考察双马达同步系统负载的变形,建立如图 1 所示简化的单弹簧双惯量系统模型。

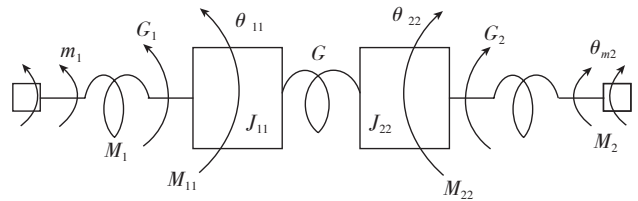


图1 双马达同步控制系统简化模型  
Fig.1 Simple model of DMSC

参照文献[6] 阀控中空液压马达系统的建模过程,得到两阀控马达的数学模型如下:

$$\begin{cases} x_{vi} = K_{vi}U_{vi} \\ Q_{fi} = K_{Qi}x_{vi} - K_{ci}p_{fj} \\ Q_{fi} = D_{mj} \frac{d\theta_{mj}}{dt} + \frac{V_{mj}}{4E_y} \frac{dp_{fj}}{dt} + C_{slj}p_{fj} \\ D_{mj}p_{fj} = J_{mj} \frac{d^2\theta_{mj}}{dt^2} + B_{mj} \frac{d\theta_{mj}}{dt} + M_j \\ M_j = G_j(\theta_{mj} - \theta_k) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $U_{vi}$ 、 $x_{vi}$ 、 $Q_{fi}$  分别为伺服阀  $i$  的输入信号、阀芯位移与输出流量;  $\theta_{mj}$ 、 $p_{fj}$ 、 $M_j$  分别为阀控马达  $j$  的角位移输出、负载压力与输出扭矩;  $\theta_k$  为惯量块  $k$  的角位移,其余符号参照表 1,  $i, j, k=1, 2$ 。

负载的动力学模型为:

$$\begin{cases} M_{11} = M_1 = G_1(\theta_{m1} - \theta_1) \\ J_1\ddot{\theta}_1 = M_1 - G(\theta_1 - \theta_2) \\ M_{22} = M_2 = G_2(\theta_{m2} - \theta_2) \\ J_2\ddot{\theta}_2 = M_2 + G(\theta_1 - \theta_2) \end{cases} \quad (2)$$

表1 双马达同步控制系统参数名义值

符号	含义	数值
$K_{Q1}$	伺服阀的流量增益	$6.01\text{m}^2/\text{s}$
$K_{v1}$	伺服阀阀芯位移增益	$2.6 \times 10^{-4}\text{m/V}$
$D_{m1}$	液压马达的弧度排量	$2.6 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{rad}$
$V_{m1}$	液压马达工作腔、阀控和两者间连接管路总容积	$2.4 \times 10^{-3}\text{m}^3$
$J_{m1}$	液压马达转轴转动惯量	$9.22 \times 10^{-2}\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$B_{m1}$	马达转轴粘性阻尼系数	$5 \times 10^{-3} (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})/\text{rad}$
$K_{ce1}$	总流量—压力系数 ( $K_{ce1} = K_{ci} + C_{si}$ , $K_{ci}$ 为伺服阀流量压力系数, $C_{si}$ 为马达外泄漏系数)	$1.88 \times 10^{-10} (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})/\text{rad}$
$G_j$	马达与负载的连接刚度	$3.2 \times 10^6 (\text{N} \cdot \text{m})/\text{rad}$
$J_j$	负载的转动惯量	$25\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$E_y$	油液的等效体积弹性模量	$7 \times 10^8 \text{N}/\text{m}^2$
$G$	负载间的连接刚度	$1.6 \times 10^7 (\text{N} \cdot \text{m})/\text{rad}$

式中,  $M_{11}$  为惯量块 1 的驱动扭矩,  $M_{22}$  为惯量块 2 的驱动扭矩。惯量块 1、2 之间的变形, 不仅与驱动力矩有关, 还与两部分的结构分布有关, 只有惯量分布均匀、几何结构对称的负载, 在保证一致的驱动力时, 才能使惯量块 1、2 之间没有变形, 即  $\theta_1 = \theta_2$ 。

由式(1)、(2)得双马达同步系统方框图, 如图 2 所示。

## 2 同步控制律设计

同步控制方案的设计目的是为了消除两个马达运动状态(位移、速度、加速度)或输出力的差异, 即使  $\theta_1 = \theta_2$ 。对于负载为中空液压马达的同步系统, 还有一

个重要设计目标是使中空液压马达的变形最小<sup>[6]</sup>。基于这样的设计目标, 选择马达运动状态差值和负载变形作为反馈, 采用双马达同步精度、同步误差校正的控制方案。该方案在理论上是合理的, 但在工程实践上, 测量马达运动状态差值和负载变形量却不太实际。

另外, 考虑到双马达同步系统两个通道不对称特性主要来自阀控马达的内泄漏, 因此, 采取如下同步控制策略:

(1) 以马达压差差值为同步信号补偿两个通道泄漏特性的不对称;

(2) 以马达 1 角位移信号为主反馈信号, 采用 PID 控制改善同步系统的品质。硬件配置如图 3 所示。



图3 实际配置的双马达同步控制系统  
Fig.3 Actual configuration of DMSC

马达 1 和马达 2 的控制信号为:

$$\begin{cases} U_1 = \left( K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S \right) (R - \theta_{m1}) - a(p_{f1} - p_{f2}) \\ U_2 = \left( K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S \right) (R - \theta_{m1}) + a(p_{f1} - p_{f2}) \end{cases} \quad (3)$$

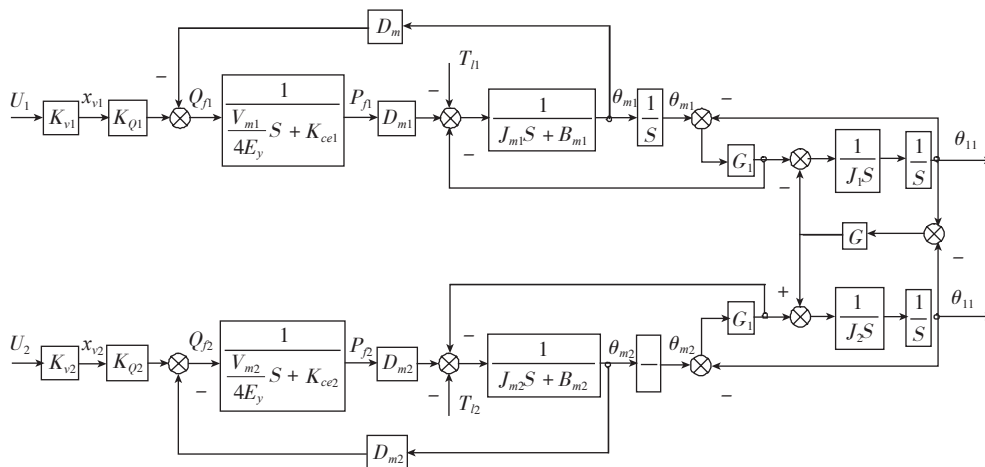


图2 双马达同步控制系统方框图  
Fig.2 Block diagram of DMSC



导,得到最大速度和最大加速度响应曲线,最大响应速度达到  $300^\circ/\text{s}$ ,最大加速度达到  $35000^\circ/\text{s}^2$ ,静态、动态性能都满足技术指标要求。图6为双马达同步驱动控制在某三轴液压转台上的成功应用。

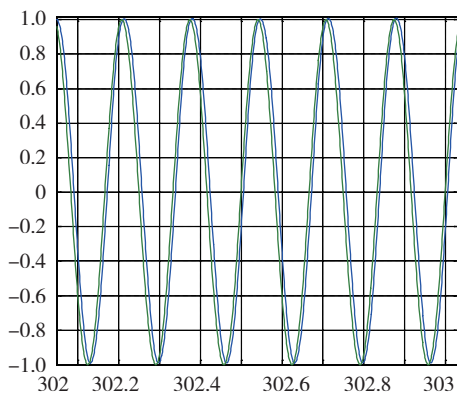


图5 双十指标(6Hz)曲线  
Fig.5 6Hz curve

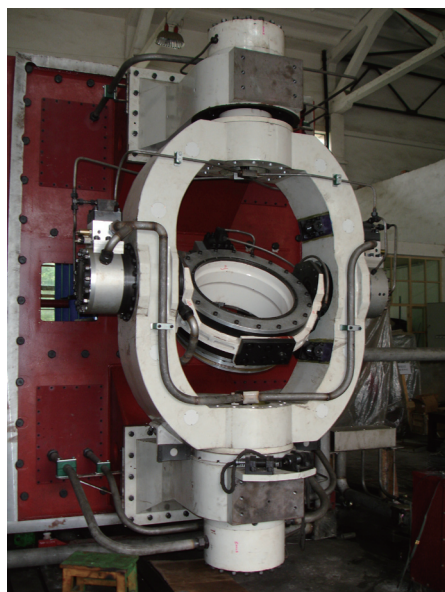


图6 双马达同步驱动控制在某三轴液压转台上的应用  
Fig.6 Application of DMSC on three-axis hydraulic motion simulator

### 参考文献

- [1] 徐东东,万红坡,孙志朋,等.基于LabVIEW的液压泵站远程监控系统设计与实现.液压气动与密封,2011(8):41-43.
- [2] 李尚义,赵克定,吴盛林.三轴飞行仿真转台总体设计及其关键技术.宇航学报,1995,16(2):63-66.
- [3] 李军伟,赵克定.液压仿真转台中枢等同式同步控制系统的研究.液压与气动,2004(12):31-32.
- [4] 于双,王旭永,陶建峰.三轴转台中枢双马达驱动控制技术研究.液压与气动,2006(8):46-49.

[5] 陶建峰,王旭永,刘成良,等.负载变形敏感双马达同步驱动系统建模与仿真.系统仿真学报,2007,19(7):1574-1578.

[6] 陶建峰.电液伺服转台及其关键技术研究[D].上海:上海交通大学,2008.

(责编 玲犀)

(上接第85页)

### 2.6 衬套设计

飞机结构设计中,衬套一般用在不同材质的结构件之间,避免轴与孔直接接触挤压、摩擦等。有些时候,也用作轴向定位件使用。

襟翼驱动连杆中所用衬套根据功能主要分为两种:

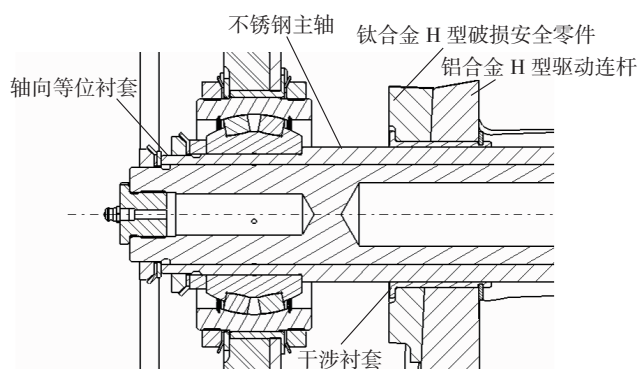


图10 2类典型衬套(干涉衬套、轴向定位衬套)  
Fig.10 Two kinds of typical bush (frozen bush, locate bush)

一种干涉衬套以大干涉量装配在孔内,以提高孔的挤压强度、疲劳性能等;一种作为轴向定位件以间隙配合装配在轴上,如图10所示。

### 3 结论

在一定的结构空间内,根据运动机构设计和设计分离面来进行襟翼驱动连杆的结构设计。整个驱动机构按破损-安全多传力结构来设计与校核。

为确保驱动连杆功能的有效实施,结构设计时除考虑强度因素外,还须注意结构件的防转、防松,轴承的选择与润滑,限位机构的设计,衬套的选择与应用,以及维护方便等因素。

### 参考文献

- [1] 牛春匀.实用飞机结构工程设计.北京:航空工业出版社,2008.
- [2] 王远达,梁永胜,王宏伟.飞机结构的耐久性与损伤容限设计.飞机设计,2009,29(1):37-43.
- [3] 严少波,黄建国.飞机后缘襟翼运动同步性设计和计算.民用飞机设计与研究,2011(1):20-24,32.

(责编 日午 亿霖)