冗余直接驱动伺服作动系统建模与特性分析

靳红涛 焦宗夏 李成功 周汝胜

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了提高数字式直接驱动伺服作动系统的可靠性,对系统进行了余度配置,电气部分采取三余度,机械部分采取二余度,设计了伺服作动系统的余度配置和管理方案. 对系统的机理进行了深入研究,建立了二余度阀控液压缸、三余度直流无刷电动机等系统各部分的数学模型,分析了余度配置对系统的可靠性和动静态性能的影响. 基于 Matlab 的仿真平台 Simulink 对冗余伺服作动系统进行了仿真分析. 结果表明,系统在电气二次故障、机械一次故障的情况下仍保持较好的动态特性,系统的余度配置和管理方案使系统可靠性得到提高,动静态性能得到改善,为冗余直接驱动式伺服作动系统的研制提供了理论依据.

关 键 词: 冗余; 可靠性; 直接驱动; 伺服控制; 作动系统

中图分类号: V 277.82

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)09-1059-04

Modeling and characteristics analysis of redundant direct drive servo actuating system

Jin Hongtao Jiao Zongxia Li Chenggong Zhou Rusheng

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To improve reliability of the digital direct drive servo actuating system, the system was configured redundantly with the electrical components of three redundancies and the mechanical components of two redundancies. Redundancy configuration and management scheme of the redundant servo actuating system were designed. Mechanism of the actuating system was researched thoroughly. Mathematical models of components of the actuating system such as duplex redundancy valve controlled cylinder and triple redundancy motor were built up. Then effects of the redundancy control on the reliability and characteristics of the system were analyzed. Matlab based simulations to the redundant actuating system were performed. Simulation results show that the redundant actuating system maintains good dynamic characteristics after secondary electrical failure and one mechanical failure. Redundant configuration improves reliability and characteristics of the system. It provides theoretical bases for the design of redundant digital direct drive servo actuating system.

Key words: redundancy; reliability; direct drive; servo control; servo system

伺服作动系统是飞行控制系统的执行机构,其按规定的静态和动态要求,将飞控计算机产生的指令信号转换成飞机操纵机构的机械位移,以控制飞机的运动. 现代飞机伺服作动系统结构比较复杂,是飞控系统中故障率较高的部件. 作为飞机操纵系统的最后一级,伺服作动系统性能及可靠性的好坏,直接影响到飞控系统乃至整个飞机的性能及可靠性[1-2]. 在液压控制中电液伺服阀是一个主要的故障源,液压放大级是伺服阀的高故障率部位,也是无功损耗的来源. 本文中力矩马达直接驱动电液伺服阀的工作方式,去掉了液压放大级,大大简化了作动器结构,使其可靠性明显提高. 为达到更高的可靠性,现代飞控系统多采用冗余技术. 采取冗余技术后,可靠性得到提高的同

收稿日期: 2005-10-09

基金项目: 航空基金资助项目(04E51013); 教育部高校青年教师奖励资助项目

作者简介: 靳红涛(1976-),男,河南夏邑人,博士生, htjin@asee.buaa.edu.cn.

时,伺服作动系统动静态性能也会发生改变.本文中的直接驱动和冗余配置方案在国内外某些先进战机上已有应用,但有关的理论研究有待开展[3-5].本文着重探讨冗余直接驱动伺服作动系统的建模与动静态特性分析,为开发高性能伺服作动系统提供理论基础.

1 系统结构与冗余方案

1.1 系统结构

数字式直接驱动伺服作动系统如图1所示,主要由数字式冗余作动器控制器(ACE,Actuator Control Electronics)、电动机控制器(MCE,Motor Control Electronics)、电动机和阀控液压缸组成.飞行控制计算机将指令信号发送到ACE,ACE输出控制信号,传递给MCE控制冗余伺服电动机,驱动伺服阀,控制作动筒,带动飞机舵面偏转.通过角位移传感器(RVDT,Rotate Variable Differential Transformer)将电动机偏转角反馈给MCE,通过线位移传感器(LVDT,Liner Variable Differential Transformer)将作动筒的位移反馈到ACE,构成双回路控制系统.

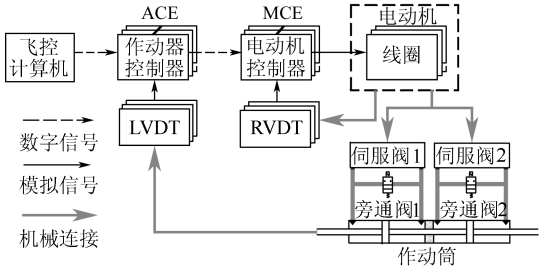

图1 冗余伺服作动系统结构

1.2 系统冗余方案

基于大功率机械部件可靠性高而电气部件可靠性低的特点,为提高系统基本可靠性,减少系统体积和重量,系统电气部分和机械液压部分采取不同的余度配置.系统电气部分为三余度,包括ACE,MCE,伺服电动机,RVDT,LVDT等.借助比较监控和一定的自监控手段可以有效地监测隔离一次故障、二次故障,从而实现故障—工作/故障—工作/故障—安全.机械部分为二余度,包括伺服阀、作动筒、旁通阀和液压能源.借助模型比较监控等手段可以监测隔离一次故障,实现故障—工作/故障—安全.

电气部分采用磁通综合方式,三余度线圈通过电磁综合的方式驱动同一转子;机械液压部分采取作动筒串连的液压力综合形式.系统采取的磁通综合和液压力综合方式大大避免了力纷争,实现电气部分三余度和机械、液压部分二余度的转换.

2 冗余伺服作动系统数学模型

为了有效地对数字式冗余伺服作动系统进行理论分析,必须建立冗余伺服作动系统的数学模型,要求数学模型尽可能简单和准确.系统的建模主要包括阀控液压缸和电动机建模.

2.1 阀控液压缸模型

阀控液压缸由转阀和双出杆对称液压缸组成,其结构原理如图2所示.

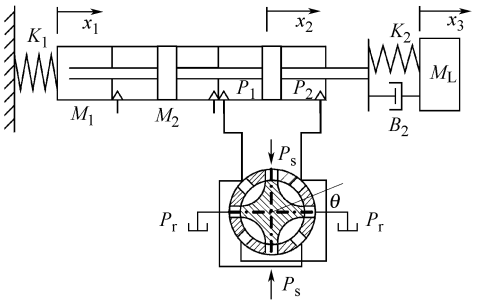

图2 阀控缸原理示意图

设转阀转角为θ(小角度),液压缸两腔压力分别为P_1,P_2,负载压力$P_L=P_1-P_2$.

负载流量方程(对1个液压缸):

$$Q_L = 2C_a WR\theta\sqrt{\frac{P_s - P_r - P_L}{\rho}} \tag{1}$$

流量连续方程(对1个液压缸):

$$Q_L = A\frac{d(x_2 - x_1)}{dt} + C_{tc}P_L + \frac{V_t}{4E_h}\frac{dP_L}{dt} \tag{2}$$

力平衡方程(对2个液压缸):

对活塞:

$$2AP_L = M_2\frac{d^2x_2}{dt^2} + 2B_1\frac{d(x_2 - x_1)}{dt} + K_2(x_2 - x_3) + B_2\frac{d(x_2 - x_3)}{dt} \tag{3}$$

对缸体:

$$2B_1\frac{d(x_2 - x_1)}{dt} - 2AP_L = M_1\frac{d^2x_1}{dt^2} + K_1x_1 \tag{4}$$

对负载M_L:

$$K_2(x_2 - x_3) + B_2\frac{d(x_2 - x_3)}{dt} = M_L\frac{d^2x_3}{dt^2} \tag{5}$$

式(1)~式(5)中,M_1为缸体质量;M_2为活塞质量;M_L为负载质量;A为活塞有效面积;B_1为活塞与缸体之间的粘性阻尼系数;B_2为负载粘性阻尼系数;C_a为流量系数;C_{tc}为液压缸总泄漏系数;E_h为有效体积弹性模量;K_1为液压缸的安装刚度;K_2为活塞与负载之间连接刚度;P_L为负载压力;P_r为回油压力;P_s为进油压力;Q_L为负载流量;R

为转阀阀芯半径;V_t 为液压缸两油腔总容积;W 为阀口的面积梯度;x_1 为缸体位移;x_2 为活塞位移;x_3 为负载位移;ρ 为流体密度.

由式(1)~式(5)可得阀控液压缸的结构方框图,见图 3. 图中 $G_1 = 1/[C_{tc} + V_t s/(4E_h)]$, $G_2 = K_2/(M_L + B_2 s + K_2)$.

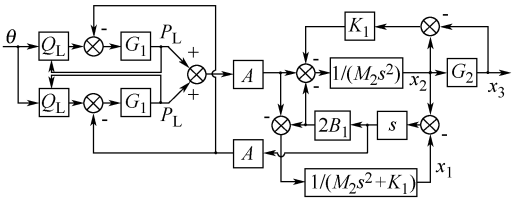

图 3　阀控缸结构方框图

2.2　电动机模型

三余度电动机为稀土永磁直流无刷电动机(BLDCM,Brushless DC Motor),电动机有 3 套绕组对应冗余伺服作动系统的 3 个电气余度,3 套绕组沿轴向均匀分布,通过磁通综合作用于同一转子. 余度电动机三通道绕组结构和电气特性完全相同,下面分析其中一个通道.

电动机工作方式为两相导通星形三相六状态,绕组电流为方波,反电动势为梯形波. 假定三相绕组、转子磁场分布等完全对称,忽略磁路饱和,不计涡流和磁滞损耗,忽略三通道绕组间的互感,三相绕组为星形连接且无中性线,单通道电机定子三相绕组电压的平衡方程式见文献[6-7].

单通道电动机电磁转矩的表达式为

$$T_e = P_e/\omega = (e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C)/\omega \quad (6)$$

三余度电动机转子的运动方程为

$$T_{e1} + T_{e2} + T_{e3} - T_L - B\omega = J\frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

式中,i_A,i_B,i_C 为三相定子电流;e_A,e_B,e_C 为三相定子反电动势;T_{e1},T_{e2},T_{e3} 为三通道的电磁转矩;P_e 为电磁功率;T_L 为负载转矩;B 为阻尼系数;ω 为转子转速;J 为转子转动惯量.

采用电流滞环控制方案,同时采用 PI 速度闭环和 PID 转角位置闭环,以提高其频宽. BLDCM 的控制系统方框图如图 4.

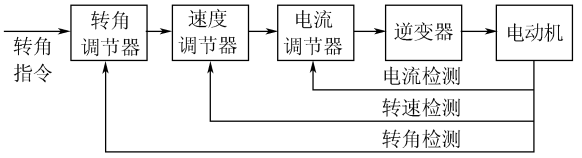

图 4　BLDCM 控制系统框图

采用 Matlab/Simulink 中的模块库建立如图 5 的三余度永磁 BLDCM 仿真控制模型框图.

BLDCM 仿真控制系统模型主要包括电动机本体模块、参考电流模块、电流滞环控制模块、电压逆变模块、中点电压模块、转矩计算模块等. 参考电流模块根据电流幅值信号(I_S)和转子位置信号(Theta)给出三相参考电流(I_{ABCR}),输出给电流滞环控制模块;电流滞环控制模块根据 I_{ABCR} 和三相实际电流(I_{ABC})输出逆变控制信号(Out_{ABC});电压逆变模块根据电流滞环控制模块给出的逆变控制信号(In_{ABC})和 Theta 输出三相端电压(U_{ABC});中点电压模块根据电压逆变模块输出的三相端电压(U_{ABCI})和电动机反电动势(E_{ABC})得到电动机绕组电压(U_{ABCO}). BLDCM 模块中 Pos 为转子角度信号,plf 模块为反电动势函数.

冗余 BLDCM 和普通 BLDCM 的仿真控制模型结构类似,单通道 BLDCM 模块如图 6 所示;电动机梯形波反电动势采用分段线性法建立,图中 L 为三相定子自感;M 为三相定子间互感;R 为定子电阻. 转矩计算模块结构如图 7 所示.

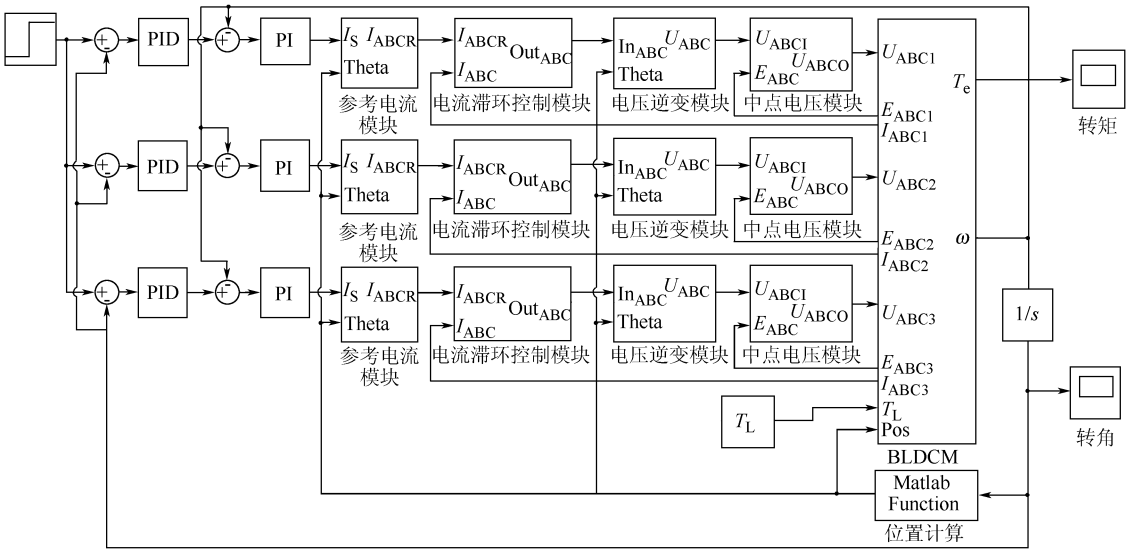

图 5　三余度 BLDCM 仿真控制模型框图

2.3 系统模型

Matlab 环境中封装后系统仿真模块见图 8.

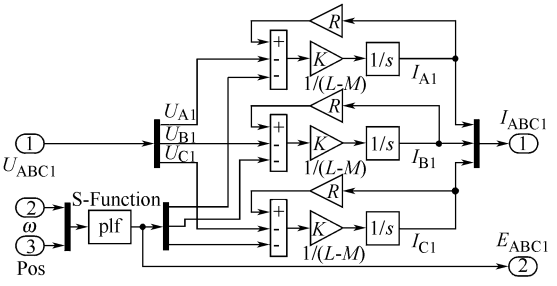

图 6 单通道 BLDCM 模型框图

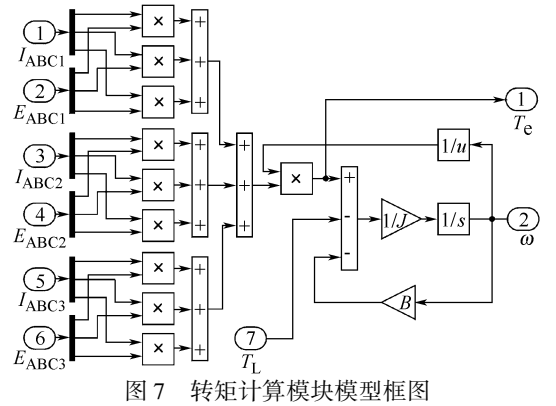

图 7 转矩计算模块模型框图

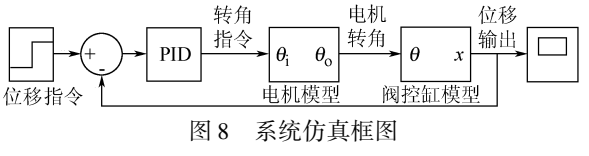

图 8 系统仿真框图

3 仿真分析

为了分析冗余配置对伺服系统的影响,对冗余数字式伺服作动系统在不同故障模式下进行仿真分析,电气通道有正常、一次故障、二次故障 3 种工作状态,机械通道有正常、一次故障 2 种工作状态,整个伺服系统有 6 种工作状态,在此仅分析伺服系统完好和最恶劣的工作状态下的频率特性. 系统无故障时电气通道三余度、机械通道二余度时系统的闭环特性曲线见图 9,可见,伺服作动系统在 20 Hz 以内有较好的频率特性.

电气通道二次故障和机械通道一次故障下,电气通道和机械通道均为单通道运行,伺服系统的闭环特性曲线见图 10. 从仿真结果可以看出,电气通道和机械通道均为单通道时伺服系统频率特性基本没有降低,在 20 Hz 范围内幅频特性几乎没有降低,在接近 20 Hz 时比正常工作时相位滞后稍大.

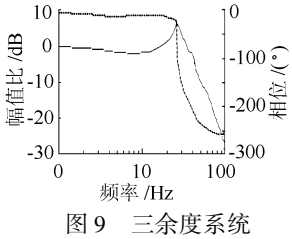

图 9 三余度系统频率特性曲线

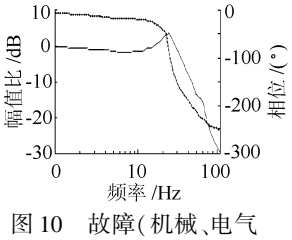

图 10 故障(机械、电气单通道)系统频率特性曲线

4 结 束 语

本文数字式直接驱动式伺服作动系统的冗余配置方案可以使伺服系统在电气部件二次故障和机械部件一次故障的情况下工作,大大提高系统的可靠性. 在分析系统数学模型的基础上对系统进行了建模,通过仿真分析验证了系统在采用冗余控制方法后,系统可靠性得到提高的同时伺服系统频率特性也得到了改善.

参考文献 (References)

[1] 付永领,裴忠才,王占林. 伺服作动系统的余度控制[J]. 北京航空航天大学学报,1999,25(5):531-534
Fu Yongling, Pei Zhongcai, Wang Zhanlin. Redundance control of servo actuator system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 25(5): 531-534 (in Chinese)

[2] 叶宏,曾广商. 三余度数字伺服控制系统建模与动静态特性研究[J]. 固体火箭技术,2003,26(1):71-75
Ye Hong, Zeng Guangshang. Modeling and analysis of static and dynamic characteristics of triplex redundance digital servo control system[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2003, 26(1): 71-75 (in Chinese)

[3] Bolduc L P. X-33 redundancy management system[J]. IEEE Aerosp Electron Syst Mag, 2001, 16(5): 23-28

[4] Lyshevski S E. Direct-drive flight actuators: new challenging problems in nonlinear analysis and control of servo-systems [C]//Proc Am Control Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2000, 2: 1098-1102

[5] Lyshevski S E. High-performance direct-drive flight actuators: advanced technology demonstration [C]//IEEE Conf Control Appl Proc. Piscataway, NJ: IEEE, 1999, 2: 1229-1234

[6] 纪志成,沈艳霞,姜建国. 基于 Matlab 无刷直流电机系统仿真建模的新方法[J]. 系统仿真学报,2003,15(12):1745-1749
Ji Zhicheng, Shen Yanxia, Jiang Jianguo. A novel method for modeling and simulation of BLDC system based on Matlab[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2003, 15(12): 1745-1749 (in Chinese)

[7] 杨浩东,李榕,刘卫国. 无刷直流电动机的数学模型及其仿真[J]. 微电机,2003,36(4):8-10
Yang Haodong, Li Rong, Liu Weiguo. Mathematic model and simulation of BLDC[J]. Micromotors. servo Technique, 2003, 36(4): 8-10 (in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)