复合式余度机电作动系统容错控制与性能分析

周元钧 赵运坤 葛云海

(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: 研究了一种应用于未来多电飞机的复合式余度机电作动系统,它由 2 台双绕组无刷直流电动机组成,形成 4 个电气控制通道和 2 个电动机控制通道的余度结构,具有"单故障工作、双故障安全"的容错能力. 分析了容错工作状态下电动机和逆变器的损耗、减速器的力矩纷争等性能,提出了在"单故障工作"时应采用电动机功率损耗均衡控制方法以获得最佳的综合性能,同时分析了"双故障安全"时系统的输出能力,并通过仿真分析和比较了各种状态下系统的跟踪性能,最后给出一组容错运行状态下电动机的温升试验数据.

关 键 词: 无刷直流电动机; 机电作动系统; 容错控制; 余度

中图分类号: TM 921

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)03-0285-05

Fault-tolerant control method and characteristic analysis of hydraulic redundant EMA system

Zhou Yuanjun Zhao Yunkun Ge Yunhai

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

Abstract: A kind of hydraulic redundant electro-mechanical actuator (EMA) system used in the next generation more power aircraft was focused on, which is made up of two brushless DC motor with dual electrical channels. In such case, the fault-tolerant operation capability of 'fault -operation/fault-safe' was advanced. The loss of inverter and motor and force fighting in the retarder were analyzed. A motor loss balance method by which EMA system would obtain the best synthetic performance under the situation with one channel fault was brought forward. Then the system output capability under the situation with two channels fault was analyzed. The tracking performances under different situations were simulated and analyzed. Finally a set of data of the motor temperature rise examination under fault-tolerant operation was presented.

Key words: blushless DC motor; electro-mechanical actruator; fault-tolerant control; redundancy

随着电力电子技术、电动机技术、材料科学、控制理论等的发展,飞机液压传动系统将逐渐被功率电传(PBW,Power By Wire)系统取代[1],机电作动器(EMA, Electro-Mechanical Actuator)[2]是其中核心技术之一.

具有余度结构的机电作动器为多控制通道的电动机控制系统,在部分通道故障后仍然能够完成飞行任务,使系统的任务可靠性大大提高. 本文提及的复合式余度结构的机电作动器由 2 台双绕组无刷直流电动机、4 台控制电路组成,具有"单故障工作、双故障安全"的容错能力[3].

1 复合式余度机电作动系统

1.1 系统结构

复合式余度机电作动系统结构框图见图 1,它由 2 台双重绕组无刷直流电动机 1 和电动机 2 组成,每台电动机采用 2 套功率电子器件构成的逆变器驱动,输出经机械传动装置实现转矩综合

收稿日期: 2007-12-05

基金项目: 航空基金资助项目(01F51016)

作者简介: 周元钧(1951—),女,江苏镇江人,教授,zhouyuanjun304@163.com.

后变为直线位移运动推动飞机舵面[4]，为两-两余度的复合式结构，其中4套功率电子装置形成4个电气控制通道.

复合式机电作动系统要求1个电气通道故障时不降低性能地完成飞行任务，2个电气通道故障或者1台电动机故障时，允许性能有一定程度的下降，完成保证飞机安全的任务，即“单故障工作、双故障安全”的容错能力.

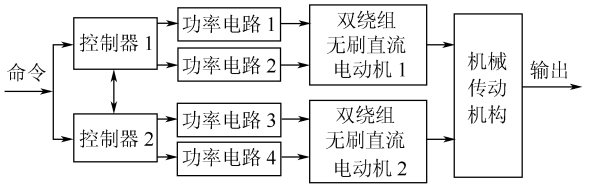


图1 复合式余度机电作动系统结构框图

1.2 EMA的综合转矩

本文提及的无刷直流电动机的2套绕组之间，通过减速器齿轮综合的2台电动机之间，实现的均为转矩综合，得到系统的综合转矩为

$$T_{e\Sigma}=T_{e1}+T_{e2}=K_T(I_{11}+I_{12})+K_T(I_{11}+I_{12})+K_T(I_{21}+I_{22}) \tag{1}$$

式中，T_{e1}，T_{e2}分别为2台电动机的电磁转矩；K_T为转矩系数；I_{11}，I_{12}，I_{21}，I_{22}为4个通道的电流.

如果近似认为机械装置为刚性结构，将舵面负载折算到2台电动机的综合转矩上，系统运动式可写为

$$T_{e\Sigma}=J_\Sigma\frac{d^2\theta}{dt^2}+D_\Sigma\frac{d\theta}{dt}+T'_a\theta+T_f \tag{2}$$

式中，J_Σ为系统总转动惯量；D_Σ为系统等效粘性摩擦阻尼系数；T'^{θ}_a为单位铰链力矩；θ为电动机的偏转角度，它与飞机舵面的偏转角近似成正比；T_f为系统摩擦力矩.

1.3 复合式余度EMA工作方式

根据“单故障工作、双故障安全”的容错要求，复合式余度EMA应有4种工作方式.

1）正常方式. 系统无故障时4个电气通道、2台电动机都投入工作，每台电动机输出1/2功率，每台逆变器输出1/4功率.

2）容错方式1. 当有1个电气通道故障时，则1台电动机单通道工作，另一台电动机双通道工作，为双电动机三通道工作状态.

3）容错方式2. 如果2台电动机均有一路电气通道故障，则2台电动机都单通道工作，为双电动机双通道工作状态.

4）容错方式3. 有1台电动机因故障完全不能工作时，为单电动机双通道工作状态.

式(1)中的$T_{e\Sigma}$是工作的电气通道电流产生的转矩之和，当任何通道因故障不能输出转矩时，$T_{e\Sigma}$成为其余电气通道电流产生的转矩之和.

2 功率损耗与转矩(力)纷争

EMA系统在容错状态下，原由故障通道输出的功率必须由其它正常通道分担，即需要进行功率的重新分配，这会导致电动机与逆变器的功率损耗的增加，还会对机械装置产生影响.

2.1 双绕组电动机的功率损耗

根据双重绕组电动机转矩综合的特点，可知在相同的电压条件下，电动机双通道工作与单通道工作电磁状态和转速基本相同，因此可以忽略电动机空载损耗的差别，损耗的变化主要决定于铜损耗. 由于电动机采用120°通电型控制，任何时刻每套绕组有两相绕组通电，得到2台双绕组电动机工作时的铜损耗为

$$\left.\begin{aligned}P_{Cu1}&=(I_{11}^2+I_{12}^2)(2r_s)\\P_{Cu2}&=(I_{21}^2+I_{22}^2)(2r_s)\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中，P_{Cu1}，P_{Cu2}为电动机1和电动机2的铜损耗；r_s为绕组电阻[5-6]. 显然当电磁转矩一定，2套绕组电流相等时铜损耗最小，设此时绕组电流为I_A，则铜损耗为

$$P_{Cu1}=P_{Cu2}=4I_A^2r_s \tag{4}$$

若电动机单绕组工作，并且工作绕组的电流为I_B，不工作绕组的电流为0，其铜损耗为

$$P_{Cu1}=2I_B^2r_s \tag{5}$$

显然根据式(4)和式(5)，若使$I_B=\sqrt{2}I_A$，则2种工作状态下电动机铜损耗相同，这时单绕组工作电动机的转矩为双绕组工作电动机的0.7倍.

2.2 逆变器的功率损耗

无刷直流电动机的逆变器为三相桥结构，采用功率开关器件(IGBT，Insulated Gate Bipolar Transistor)实现. 开关器件的功率损耗包括导通损耗和开关损耗. 为使问题简化特作如下假设：①忽略IGBT在导通时，电流的变化导致的集电极与发射极之间的压降U_{ce}的变化；②认为续流二极管导通时的管压降与IGBT导通时管压降U_{ce}相等.

因电动机每套绕组任何时刻有两相通电，则每台逆变器有2个IGBT通电，设通电电流为I_C，则电路的导通损耗为

$$P_{on}=2I_CU_{ce} \tag{6}$$

当有m个IGBT工作时，其开关损耗为

$$p_{sw}=\frac{1}{2}mI_CU_Sf(t_r+t_f)$$

式中,U_S 为逆变器直流电源电压;f 为开关频率;t_r 和 t_f 分别为开关器件导通和关断时电流的上升和下降时间. $m=2$ 时的开关损耗为

$$P_{sw}=I_C U_S f(t_r+t_f) \tag{7}$$

于是逆变器的功率损耗 P_{dv} 可近似为

$$P_{dv}=P_{on}+P_{sw}=K_{we}I_C \tag{8}$$

式中

$$K_{we}=2U_{ce}+U_S f(t_r+t_f)$$

显然逆变器的功率损耗与电流 I_C 近似成正比.

2.3　力(转矩)纷争问题

2 台电动机的输出转矩经齿轮结构的减速器实现转矩综合后输出,当 2 台电动机的电磁转矩满足 $T_{e1}=T_{e2}$ 时,机械传动装置受力均匀,工作平稳. 而系统在容错状态时,因部分电气通道不工作,可能导致 $T_{e1}\neq T_{e2}$. 力矩不平衡对于机械传动装置而言,会使力矩综合齿轮和轴承承受单边应力,从而引起齿轮的加速磨损、机械振动等现象,即所谓力(转矩)纷争问题.

因此,在转矩综合的 EMA 系统,应尽可能使 2 台电动机的电磁转矩平衡. 为了分析方便,定义转矩不平衡度为

$$T_{NB}=\frac{|T_{e1}-T_{e2}|}{T_{e1}+T_{e2}}\times 100\% \tag{9}$$

3　容错状态下的功率分配

根据本系统转矩综合的原理,由式(1)可知,各通道功率的重新分配可反映在电流的分配上.

3.1　三通道运行时的功率分配

系统在三通道工作状态时,要求性能不变. 在式(2)描述的运动方程中,为使等号右边的动态转矩和稳态转矩不变,必须使式(1)的综合转矩 $T_{e\Sigma}$ 不变. 原来由 4 个通道产生的转矩改为 3 个通道来产生,则需要增大各通道的电流. 这里设电动机 1 的通道 1 故障.

为了分析方便,假设系统要求输出推力为 F_Z,对应综合转矩 $T_{e\Sigma}=T_Z$,对应的综合电流 $I_Z=T_Z/K_T$,电动机铜损耗 $P_{CuZ}=2(I_Z/4)^2 r_S$,逆变器损耗 $P_{dvZ}=K_{we}I_Z$. 通道功率的重新分配可以采用以下 3 种方式:

1) 电流均衡方式,使正常工作的通道电流相等,则每个通道电流为 $I_{ch}=I_Z/3$. 这时 2 台电动机转矩分别为 $T_{e1}=T_Z/3$, $T_{e2}=2T_Z/3$.

2) 转矩均衡方式,使 2 台电动机的电磁转矩相等,即 $T_{e1}=T_{e2}=T_Z/2$,因电动机 1 单绕组工作,则有 $I_{12}=2I_{21}=2I_{22}$.

3) 铜损耗均衡方式,使 2 台电动机的铜损耗相等,即 $P_{Cu1}=P_{Cu2}$,则根据式(4)与式(5)可知电流应满足 $I_{12}=1.4I_{21}=1.4I_{22}$.

将上述不同方法的通道电流、铜损耗、电磁转矩列于表 1,表中的数据是以 I_Z, P_{CuZ} 和 T_Z 作为基准的标幺值. 对表 1 数据进行分析,将各种均衡方式下的数据与正常方式下数据作比较:

1) 逆变器的功率损耗. 电流均衡使逆变器损耗相等,损耗分别增加 32%,而转矩均衡使一台逆变器的损耗增加了 1 倍,铜损耗均衡使逆变器的损耗分别增加 68% 和 16%.

2) 电动机的铜损耗. 电流均衡使双通道工作电动机增加 78%,转矩均衡使单通道工作电动机增加了 1 倍,都使一台电动机是另一台的 2 倍,而铜损耗均衡使 2 台电动机增加 36% 和 38%,基本保持一致.

3) 转矩的平衡情况. 电流均衡控制不平衡度最大,为 34%,而铜损耗均衡控制居中,为 18%.

根据以上分析可知,电流均衡对逆变器最为有利,但转矩不平衡度最大;转矩均衡没有力纷争问题,但使 1 台电动机和逆变器的损耗增大;电动机铜损耗均衡能使 2 台电动机温升相等,其它性能居中,被确定为综合性能最好.

3.2　容错运行时的允许转矩

根据前面的分析,容错方式 1 宜采用电动机铜损耗均衡方式,而容错方式 2 和方式 3 为双通道运行,只能采用电流均衡方式. 现在据此来分析系统在容错状态下输出功率的能力,对于转矩综合系统,也就是输出转矩的能力.

为分析系统在容错运行时转矩的输出能力,提出以电动机的铜损耗不超过额定值 P_{CuN} 为准则,即电动机工作在额定温升时系统的输出转矩. 得到各种方式下的通道电流、电动机铜损耗和转矩如表 2 所示,表中数据是将系统正常工作时 $T_{e\Sigma}$ 的额定值 T_{eN}、相应的通道额定电流、电动机的额定铜损耗 P_{CuN} 作为基准的标幺值.

表 1　三通道运行各种控制方式的通道电流、电动机铜损耗和电磁转矩数据　%

工作方式	通道电流				电动机铜耗		电磁转矩		
	I_{11}^*	I_{12}^*	I_{21}^*	I_{22}^*	P_{Cu1}^*	P_{Cu2}^*	T_{e1}^*	T_{e2}^*	T_{NB}^*
正常方式	25	25	25	25	100	100	50	50	0
电流均衡	0	33	33	33	89	178	133	67	33
转矩均衡	0	50	25	25	200	100	50	50	0

电动机铜损耗均衡	0	42	29	29	136	138	41	59	18

表 2 正常方式、容错状态 1～3 的系统的输出能力 %

工作方式	通道电流				电动机铜耗		电磁转矩		
	I_{11}^*	I_{12}^*	I_{21}^*	I_{22}^*	P_{Cu1}^*	P_{Cu2}^*	T_{e1}^*	T_{e2}^*	$T_{e\Sigma}^*$
正常方式	25	25	25	25	100	100	50	50	100
容错方式 1	0	35	25	25	100	100	35	50	85
容错方式 2	0	35	0	35	100	100	35	35	70
容错方式 3	25	25	0	0	100	0	50	0	50

由表 2 可见，在 P_{CuN} 的限制下容错方式 1 能输出额定转矩 T_{eN} 的 85%，容错方式 2 能输出 T_{eN} 的 70%，而容错方式 3 只能输出 T_{eN} 的 50%. 由于是转矩综合系统，即可得到在不同的容错方式下，系统分别能够输出额定功率的 85%，70% 和 50%.

4 系统的仿真与试验

复合式余度机电作动器控制系统如图 2 所示，为位置、转速、电流反馈的三闭环控制系统.

当系统正常工作时应使参数 $k_{11}=k_{12}=k_{21}=k_{22}=1/4$. 如果 1 个通道故障(设为通道 11)，根据表 1 电动机铜损耗均衡原则，设置三通道运行时参数为 $k_{12}=7/17$，$k_{21}=k_{22}=5/17$. 对于其它容错运行方式，同样按照表 2 通道电流的比例设置 k_{11}～k_{22} 为相应的数值.

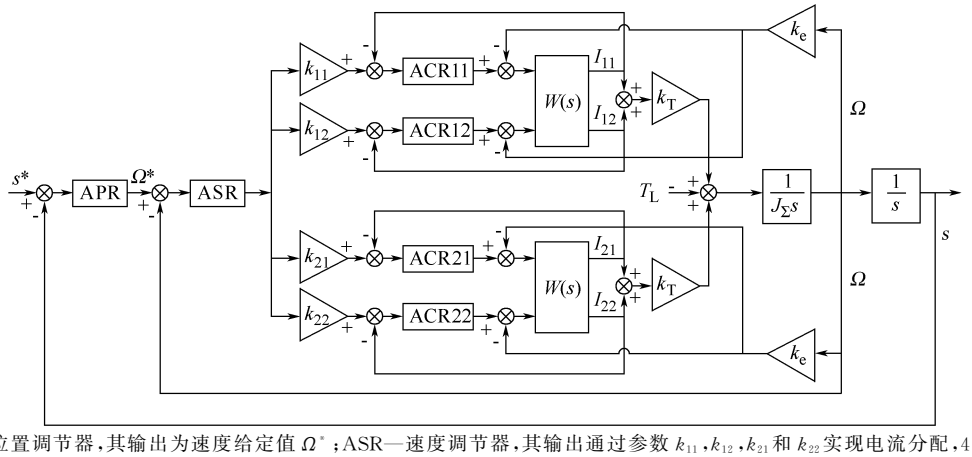
4.1 “故障-工作”容错性能分析

首先对系统在四通道和三通道运行情况进行仿真，以分析“故障-工作”模式下系统的性能. 仿真结果如图 3 所示.

图 3 可见，三通道工作时系统的位置跟踪的幅值和四通道工作时一致，但在相位上存在一定差异. 这是由于三通道运行时转矩允许值较小，需要较长时间维持在最大转矩下工作，从而导致了相位的差异. 但同时可见，三通道运行时综合转矩并未完全达到最大值，存在着提高的裕量，并且如果使电动机稍微过载，即可获得与四通道相同的性能.

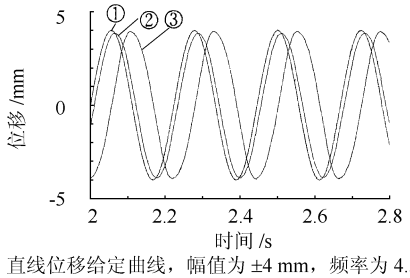
4.2 “故障-安全”容错性能分析

同样的方式对双通道运行情况进行仿真，以分析系统在“故障-安全”模式下的性能. 仿真结果如图 4 所示.



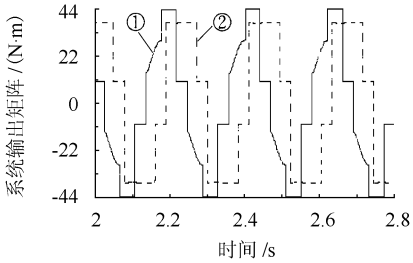
APR—位置调节器，其输出为速度给定值 Ω^*；ASR—速度调节器，其输出通过参数 k_{11}，k_{12}，k_{21} 和 k_{22} 实现电流分配，4 个电流调节器 ACR11～ACR22 独立地对 4 个通道电流 I_{11}，I_{12}，I_{21} 和 I_{22} 的进行闭环控制；$W(s)$—双绕组无刷直流电动机电流与电压的传递函数[3]；K_e—反电势与转速的换算系数；K_T—电磁转矩与电枢电流的转换系数；T_L—负载转矩；J_Σ—折算到电机轴上的转动惯量.

图 2 复合式余度 EMA 的控制系统结构



① — 直线位移给定曲线，幅值为 ±4 mm，频率为 4.5 Hz 的正弦波；② — 四通道工作时的位移输出；③ — 三通道工作时的位移输出.

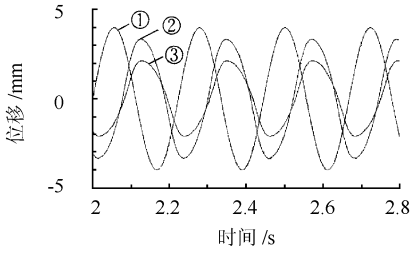
a 位置跟踪情况



① — 四通道工作；② — 三通道工作.

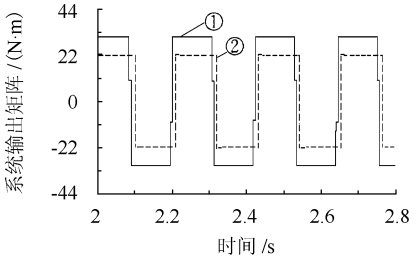
b 系统输出转矩

图 3 故障-工作模式下的仿真曲线



① — 直线位移给定曲线，幅值为 ±4 mm，频率为 4.5 Hz 的正弦波；
② — 四通道工作时的位移输出；③ — 三通道工作时的位移输出.

a　位置跟踪情况



① — 容错方式 2；② — 容错方式 3.

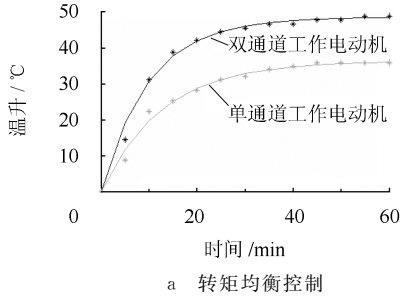
b　系统输出转矩

图 4　故障-安全模式下的仿真曲线

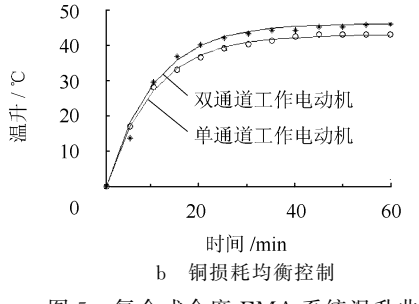
由图 4a 可见，系统位置幅值出现了较大下降，尤其容错状态 3 最为明显. 其原因由图 4b，无论是曲线①还是曲线②，综合转矩都基本维持在最大允许转矩，性能已无进一步改善的余地. 分析表明，要使输出位移幅度达到给定值，只能降低给定信号频率，即降低系统的快速性.

4.3　电动机温升性能试验

图 5 为三通道系统长期运行时 2 台电动机的温升试验曲线，其中图 5a 为转矩均衡控制时 2 台电动机的温升曲线. 试验中为防止单绕组工作电动机温升过高，负载转矩为 12 N·m，单绕组工作



a　转矩均衡控制



b　铜损耗均衡控制

图 5　复合式余度 EMA 系统温升曲线

电动机的温升为 48℃，双绕组工作电动机的温升为 36℃，2 台电动机温度差 12℃.

图 5b 为铜损耗均衡控制时 2 台电动机的温升曲线，试验中负载转矩为 16 N·m，电动机 1 的温升为 43 ℃，双绕组工作电动机的温升为 46 ℃，由于通道的参数略有差异，而使 2 台电动机的温升有 3 ℃差异，基本上实现了功率损耗的均衡.

5　结　论

本文通过分析与仿真，得到复合式余度机电作动系统的容错性能为：①在单通道故障的三通道工作状态时，采用电动机铜损耗均衡为综合性能最佳的控制方法，并且仿真表明能够使系统性能基本不下降，具有“单故障工作”的容错能力；②双通道故障后的双通道工作状态下，系统只能在降低快速性的状况下运行，表明只能作到“双故障安全”的要求.

参考文献（References）

[1] Croke S, Herrenschmidt J. More electric initiative power-by-wire actuation alternatives[R]. CH343124/94/000021338, 1994

[2] Cloyd J S. Status of the United States Air Force's more electric aircraft initiative[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1998, 13(4): 17－22

[3] 周元钧. 双绕组无刷直流电机的数学模型与转矩特性[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 12－16
Zhou Yuanjun. Mathematical model and torque characteristics on a brushless DC motor with dual-windings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(4): 12－16(in Chinese)

[4] 张龙. 余度机电作动器控制电路与故障检测技术研究[D]. 北京：北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 2005
Zhang Long. Control circuit and faults inspection of composite quadruple redundancy electro-mechanical actuator [D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005(in Chinese)

[5] 朱耀忠，王自强. 飞行控制用无刷直流电机的电磁设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(2): 58－61
Zhu Yaozhong, Wang Ziqiang. Consideration in the electromagnetic design of brushless DC motor for flight control[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(2): 58－61(in Chinese)

[6] 周元钧，董慧芬，王自强. 飞行控制用无刷直流电机容错运行方式[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(2): 190－194
Zhou Yuanjun, Dong Huifen, Wang Ziqiang. Analysis on the fault-tolerant dynamic performance of a brushless DC motor with double channels[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(2): 190－194 (in Chinese)