飞行控制用无刷直流电动机容错运行方式

周元钧 董慧芬 王自强

(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: 双重绕组无刷直流电动机构成的双通道机电作动系统(EMA, Electro-Mechanical Actuator),当一个通道故障时可以采用容错运行方式. 分析了电动机在双绕组工作与单绕组工作时的机械特性、铜损耗与允许转矩. 对样机的机械特性试验曲线分析可知,在相同的电压条件下,两种工作方式的机械特性有相同的理想空载转速,但容错工作时因负载产生的转速降将增大 1 倍. 在功率损耗不变的条件下,容错工作时电动机的允许电流为额定值的 1.4 倍,允许转矩为额定值的 0.7 倍,通过样机的温升试验数据充分验证了这一点. 探讨了双绕组运行时的电流均衡控制方法以及容错工作采取的措施,并用仿真曲线分析了容错工作方式下的动态性能.

关 键 词: 无刷电机; 容错; 机电作动系统

中图分类号: TM 921

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)02-0190-05

Fault-tolerance operation of brushless DC motor for flight control

Zhou Yuanjun Dong Huifen Wang Ziqiang

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

Abstract: The operation of a brushless DC motor with dual-windings for the flight control system was described. The dual-channels electro-mechanical actuator (EMA) is composed of the motor, the fault-tolerance operation mode can be obtained when any channel is failure. The mechanical characteristic, power losses and allowed torque of the motor were analyzed at two cases of normal and fault-tolerance operation modes. From the experimental mechanical characteristics curve, it can be obtained that the no load speeds of two operation modes are same under the same voltage, but the speed drop in the case of the fault-tolerance operation is greater than the normal operation because of the load. Holding the power loss not changed in the case of fault-tolerance operation, the motor allowed current is 1.4 times of the rated current and the allowed torque is 0.7 times of the rated torque, these were validated by the temperature experimental data. The balance control of the dual-windings operation and the control method of the fault-tolerance operating were researched, the dynamic characteristic of the fault-tolerance operation was simulated.

Key words: brushless electric machines; fault-tolerance; electro-mechanical actuator

在采用功率电传[1]的飞行控制系统中,机电作动器 EMA(Electro-Mechanical Actuator)将取代原来的液压作动器[2]. 所研究的无刷直流电动机采用双重绕组结构,构成双通道控制系统,在任何一个通道故障时仍然能够完成飞行任务,实现故障-工作的容错运行方式. 本文讨论了该电动机的运行状态、性能以及控制.

1 双通道机电作动系统

1.1 双通道机电作动系统的结构

双通道机电作动系统的结构框图见图 1,核心部分是双重绕组无刷直流电动机,它由两套独立的功率电路驱动、采用数字信号处理器(DSP)

收稿日期: 2005-01-14

基金项目: 航空科学基金资助项目(01F51016)

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

控制,通过减速器完成控制系统对飞机舵面的控制.

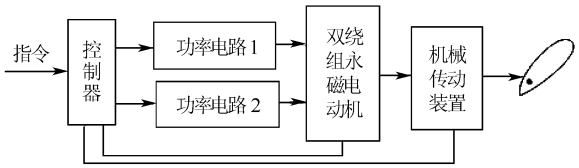
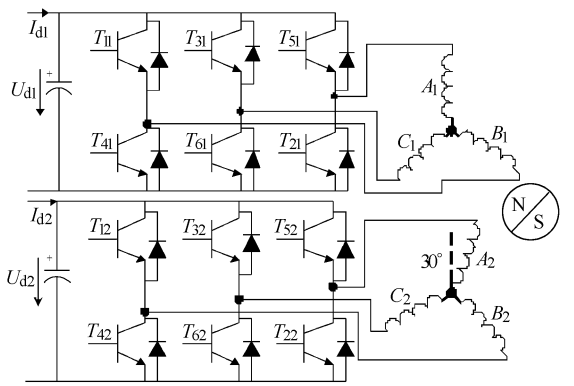
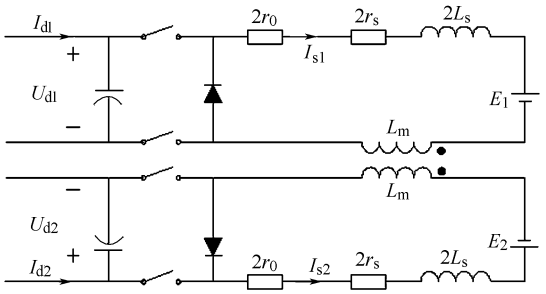


图 1　双通道机电作动系统的结构

双重绕组无刷直流电动机是系统的核心部件,该电机定子槽中嵌放两套三相集中绕组,互差 30°电角. 电机转子磁极采用钐钴永磁材料,4 对极,表面式结构,使气隙磁场为顶宽大于 120°的梯形波. 电动机最高转速为 10 000 r/min,额定转矩10 N·m,相绕组电阻 0.2Ω[3,4],电机由两套独立的三相桥功率电路驱动,采用 120°导通的两相通电控制方法,结构见图 2a.



a　电动机结构图



b　电动机等效电路

图 2　双绕组无刷直流电动机等效电路

图 1 所示的机电作动系统,是大功率的电磁机构、功率电子装置、微处理器的机电一体化装置. 可靠性分析与数据表明,功率电子装置是可靠性薄弱环节. 双通道机电作动系统是在可靠性薄弱环节采用双余度结构,正常时就系统双通道工作,各输出一半功率,当一个通道故障后由另一通道完成控制任务,实现故障-工作的容错运行方式,能够有效地提高完成任务的可靠性.

1.2　电动机机械特性

1）双绕组机械特性

当电动机的控制采用 120°导通的两相通电控制方法时,图 2a 可以简化为图 2b 等效电路[5]. 系统控制中将母线电压 U_{d1}、U_{d2}作为控制变量,通电绕组的相电流用 I_{s1}、I_{s2}描述,忽略电路换相时的续流影响与电流脉动,根据图 2b 得到线性化的双绕组电机的电压平衡式为

$$\left.\begin{aligned} U_{d1} &= 2(r_0 + r_s)I_{s1} + \\ &2L_s\frac{dI_{s1}}{dt} + L_m\frac{dI_{s2}}{dt} + E_1 \\ U_{d2} &= 2(r_0 + r_s)I_{s2} + \\ &2L_s\frac{dI_{s2}}{dt} + L_m\frac{dI_{s1}}{dt} + E_2 \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中,r_0 为晶体管等效内阻;r_s 为相绕组电阻;L_s 为相绕组自感;L_m 为两套绕组的互感;E_1 与 E_2 分别是两套绕组的反电势,由于绕组参数相同,并且气隙磁场为顶宽大于 120° 电角的梯形波,有 $E_1 = E_2 = K_e\Omega$. 电磁转矩为

$$T_e = K_e(I_{s1} + I_{s2}) \tag{2}$$

稳态机械特性为

$$\Omega = \frac{U_{d1} + U_{d2}}{2K_e} - \frac{r_0 + r_s}{2K_e^2}T_e = \Omega_{02} - \beta_2 T_e \tag{3}$$

式中,Ω_{02}为双绕组工作时的理想空载角速度;β_2为双绕组工作时的机械特性斜率;K_e 为转矩系数.

2）电机的单绕组工作特性

机电作动系统当一个通道故障时采用单通道工作方式,对电动机而言则是单绕组工作方式,这时使不工作的绕组电流为零,这里设绕组 1 工作,则电压平衡式为

$$U_{d1} = 2(r_0 + r_s)I_{s1} + 2L_s\frac{dI_{s1}}{dt} + E_1 \tag{4}$$

电磁转矩为

$$T_e = K_e I_{s1} \tag{5}$$

稳态的机械特性为

$$\Omega = \frac{U_{d1}}{K_e} - \frac{r_0 + r_s}{K_e^2}T_e = \Omega_{01} - \beta_1 T_e \tag{6}$$

式中,Ω_{01}为单绕组工作时的理想空载角速度;β_1为单绕组工作时的机械特性斜率. 上述两种工作方式比较,可知:

① 电机双绕组工作电磁转矩是两套绕组电流的线性综合;

② 根据机械特性,若双绕组工作时 $U_{d1} = U_{d2}$,

且与单绕组工作 U_{d1} 相等,则空载角速度 Ω_{01} 与 Ω_{02} 相同,但 $\beta_1 = 2\beta_2$,表示负载时转速降增加1倍.

单、双绕组电动机机械特性试验曲线见图3.

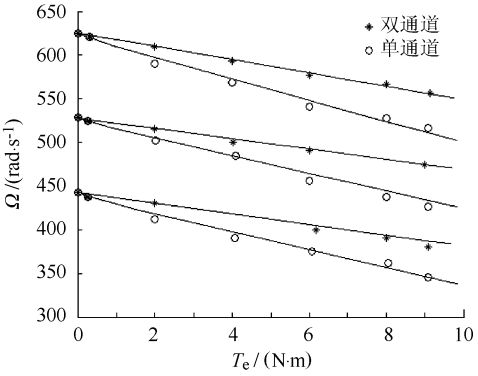


图3 电动机的机械特性试验曲线

2 电动机功率损耗分析

由上述的电动机机械特性可知,双绕组工作与单绕组工作的电机磁状态与转速基本不变,可假定两种工作方式下空载损耗 p_0 相同,只是铜损耗 p_{Cu} 不同.

2.1 双绕组工作铜损耗

电机的额定功率是按双绕组工作为基准设计的,并且认为电压 $U_{d1} = U_{d2}$,则两套绕组电流 $I_{s1} = I_{s2}$,式(1)描述的电动机在两相通电时两套绕组的额定铜损 $2p_{CuN}$ 为

$$2p_{CuN} = p_{Cu1} + p_{Cu2} = 2(I_{s1}^2 + I_{s2}^2) r_s = 4I_N^2 r_s \quad (7)$$

式中,p_{Cu1} 和 p_{Cu2} 分别为两套绕组的铜损耗;I_N 为相绕组的额定电流. 根据式(3)得到电动机的额定电磁转矩为

$$T_{eN} = K_e(I_{s1} + I_{s2}) = 2K_e I_N \quad (8)$$

但是当两个通道控制电压不一致,或者电机制造上的误差、通道器件或绕组发热不均、电子元件的性能不匹配等因素,则可能导致两个通道的电流 $I_{s1} \neq I_{s2}$,式(7)的铜损将发生变化.

根据式(2)可知当电动机负载转矩一定,两套绕组的电流之和不变. 表1为额定负载下电动机铜损耗分析. 表中的数据为标幺值,即

$$I_{s1}^* = I_{s1}/I_N$$
$$I_{s2}^* = I_{s2}/I_N$$
$$p_{Cu1}^* = p_{Cu1}/p_{CuN}$$
$$p_{Cu2}^* = p_{Cu2}/p_{CuN}$$
$$p_{Cu}^* = p_{Cu1}^* + p_{Cu2}^*$$

表1 不平衡状态下电动机的铜损耗

状态	绕组电流 I_{s1}^*	绕组电流 I_{s2}^*	绕组铜损 p_{Cu1}^*	绕组铜损 p_{Cu2}^*	电机铜损 p_{Cu}^*
正常	1	1	1	1	2
不平衡1	1.5	0.5	2.25	0.25	2.5
不平衡2	2	0	4	0	4

由表1可见,当两通道电流不平衡时,将导致电机铜损 p_{Cu}^* 的增大,不平衡情况愈严重,p_{Cu}^* 增大愈多,例如当 I_{s1}^* 与 I_{s2}^* 分别为1.5与0.5时 $p_{Cu}^* = 2.5$,增加了1/4,而当 $I_{s1}^* = 2$ 与 $I_{s2}^* = 0$ 时 $p_{Cu}^* = 4$,为原铜损的2倍. 因此对于图1的电源与功率电路在结构上完全独立的双通道系统,应避免电流不均衡现象.

2.2 单绕组工作铜损耗

电动机一套绕组电流为零,只有一套绕组工作时输出额定转矩,电机铜损耗将增大1倍,见表1.

若单绕组工作时不允许铜损增加,可以使工作绕组的铜损等于电机的额定铜损,则由式(7)

$$2I_{s1}^2 r_s = 4I_N^2 r_s \quad (9)$$

可以得到允许电流为

$$I_{s1} = \sqrt{2} I_N = 1.414 I_N \quad (10)$$

允许电磁转矩为

$$T_{e1N} = K_e I_s = 1.414 K_e I_N = 0.707 T_{eN} \quad (11)$$

由此可知,如果要使电动机在单通道工作时铜损耗不增加,则工作绕组的允许电流是额定电流 I_N 的1.4倍,允许电磁转矩为额定转矩 T_{eN} 的70%.

原理样机的额定转矩为10 N·m,额定电流 $I_N = 16.5$ A,额定铜损耗为220 W,于是得到单通道工作时工作绕组的允许电流为24 A,允许转矩为7 N·m.

2.3 温升试验

在散热条件不变时电动机的损耗决定了温升,由于上述的结论是采用式(1)、(2)以及式(4)、(5)描述的线性化数学模型得到的,忽略了电流脉动、换相中续流等因素,其结果是近似的.

图4为原理样机的温升试验曲线,试验中电机转速选择为作动器工作时的平均转速2 500 r/min. 图中曲线"*"为双通道工作负载转矩为额定值10 N·m的实验数据,两套绕组的电流分别为16 A、16.5A,稳态温升 $\tau = 46$℃. 曲线"○"为

单通道工作负载转矩为 6.6 N·m 的实验数据,工作绕组的电流为 22 A,温态温升为 $\tau=45$℃.

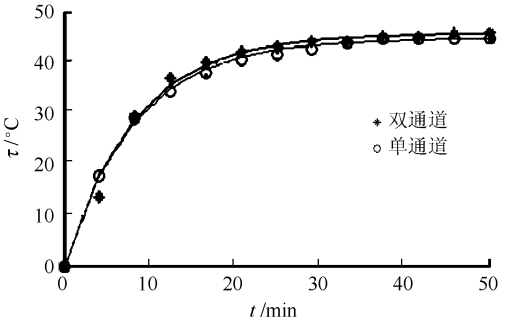


图 4　温升试验曲线

由图 4 可见,试验中单通道工作时工作绕组的电流是额定电流 I_N 的 1.373 倍,而负载转矩是额定电流的 0.666 倍. 在相同的温升时,单通道工作时的电流略低于 $1.4I_N$,转矩也略低于 $0.7T_{eN}$.

根据以上原理样机试验数据,电动机工作在 EMA 系统的平均转速 2 500 r/min 时,额定负载下的温升不大于 50℃,发热时间常数为 15 min. 如果将电机额定温升确定为 50℃,当环境温度最高为 60℃时,电动机的工作温度不大于 110℃,电动机工作是安全的.

3　EMA 系统与控制

机电作动器(EMA)完成对飞机舵面的驱动,是位置控制系统,电动机经减速器与滚珠丝杠驱动飞机的舵面,电动机负载的总转矩为

$$T_{L\Sigma}=J_\Sigma\frac{d^2\theta}{dt^2}+D_\Sigma\frac{d\theta}{dt}+T'^{\theta}_{a}\theta+T_f \qquad (12)$$

式中,J_Σ、D_Σ 是电机轴上系统的转动惯量与阻尼系数;T'^{θ}_{a} 为舵机单位偏转角产生的铰链力矩折合到电机轴上的等效值;T_f 为系统摩擦力矩;θ 是电动机的偏转角,它与舵面偏转角 θ_a 的关系为 $\theta=i\theta_a$;i 为减速比. 机电作动系统的任务是完成飞行控制系统关于舵面偏转角 θ_a 的控制命令.

3.1　电流均衡控制

表 1 说明由双绕组电动机构成的系统应该实现电流均衡控制,如图 5 所示,这是包括了位置、转速和电流反馈的闭环控制系统. 系统采用两个电流调节器 ACR1、ACR2、一个速度调节器 ASR 和一个位置调节器 APR 实现,ASR 的输出与两个 ACR 的给定值相同,通过各自 ACR 的调节作用,控制 U_{d1} 和 U_{d2} 的大小,使两套绕组电流保持一致,图中的传递函数 $W(s)$ 为式(1)所描述的电压 U_{d1}、U_{d2} 与电流 I_{s1}、I_{s2} 的关系.

在该控制系统中,当电机与电路构成的通道参数一致时,两个 ACR 将分别控制电压 $U_{d1}=U_{d2}$,而使两个通道电流 $I_{s1}=I_{s2}$,使电机工作在平衡状态. 而当两个通道参数不一致时,由于给定电流相同,两个 ACR 将分别控制电压 $U_{d1}\neq U_{d2}$,使两个通道电流 I_{s1}、I_{s2} 跟踪给定值,仍然能够得到 $I_{s1}=I_{s2}$.

3.2　容错运行

由于电动机在单绕组工作时允许转矩 T_{e1N} 是额定转矩 T_{eN} 的 0.7 倍,要使单通道系统完成舵面控制任务,可以采用以下措施.

1)温升不变

当一个通道故障后,系统处于单通道运行状态,根据前面的分析在电机保持温升不变时,工作绕组相电流为额定值的 1.4 倍,转矩为额定值的 0.7 倍. 根据式(12)描述的电动机的负载转矩,其中铰链力矩 $T'^{\theta}_{a}\theta$ 与摩擦力矩 T_f 是不可改变的,只能减小系统的加速度 $d^2\theta/dt^2$ 与速度 $d\theta/dt$,从而实现 $T_{L\Sigma}\leqslant T_{e1N}$. 该方式使系统的动态响应大大降低.

2)功率不变

单绕组工作时保持电机输出功率不变,则绕组电流为 $2I_N$,其结果是铜损耗增加导致电动机温升增加. 例如原理样机的电机工作温度将达到

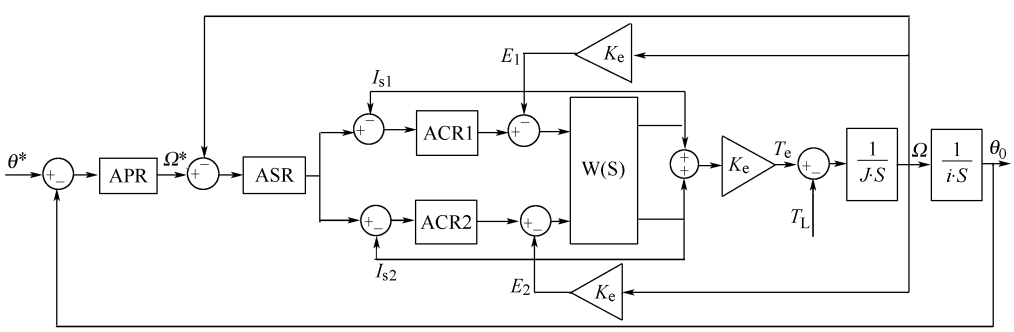
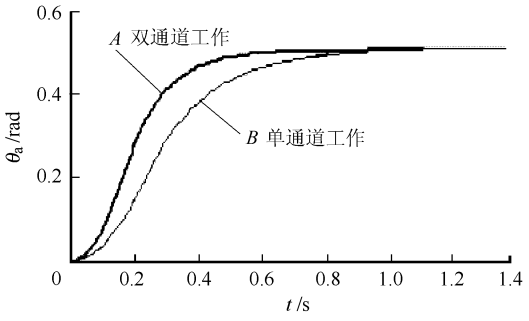


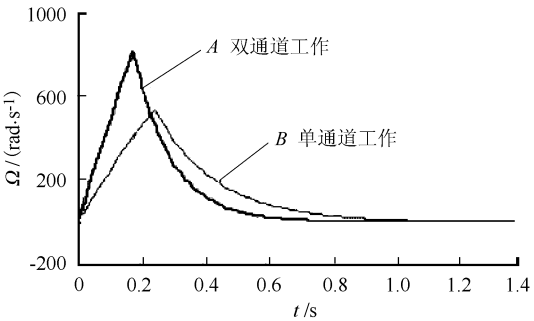
图 5　电流均衡控制的双通道系统结构图

130℃,但由于电机绝缘材料为 H 级,允许温度为150℃以上,因此电机能够正常工作. 缺点是高温对电机轴承润滑,绝缘材料寿命有一定的影响,电机会受到损伤.

本系统采用折中的方法,首先适当提高电机的允许温升,比额定温升提高 15℃ 左右,将单通道时允许转矩 T_{e1N} 选择为 $0.85T_{eN}$,同时在控制系统的设计中,采用动态响应稍慢的控制律,使 $T_{L\Sigma} \leqslant 0.85T_{eN}$. 动态响应仿真结果如图 6 所示.



a 舵面位置



b 电动机转速

图 6 两种工作方式下动态过程的仿真

图 6 为给定舵面偏转角 $\theta_a = 0.52$ rad(30°)的仿真结果,折合到电机轴上的最大铰链力矩为 6 N·m. 由图 6b 的角速度曲线可见,单通道工作时系统的角加速度、最大角速度都比较小,其中双通道工作电机角加速度为 2 200 rad/s^2,而单通道工作时角加速度为 1 100 rad/s^2,近似为双通道的 1/2,最高角速度双通道方式为 800 rad/s,而单通道方式仅为 570 rad/s. 由图 6a 的舵面位置曲线,双通道工作完成舵面控制的时间为 0.8 s,而单通道方式为 1.1 s.

4 结束语

本论文所研究的电动机有双绕组工作与单绕组工作两种运行方式,后者是在一个通道故障时的容错工作方式. 在相同的电压条件下,两种工作方式的机械特性有相同的理想空载转速,但单绕组工作时因负载产生的转速降将增大 1 倍. 在功率损耗不变的条件下,容错工作时电动机的允许电流为额定值的 1.4 倍,允许转矩为额定值的 0.7 倍. 在双绕组运行时需要采用电流均衡控制,而在容错运行时,为防止电机过热需要降低负载,从而影响系统响应速度.

参考文献 (**References**)

[1] Croke S, Herrenschmidt J. More electric initiative power-by-wire actuation alternatives[R]. CH3431-4/94/ 0000-1338,1994

[2] Jensen S C, Jenney G D, Dawson D. Flight test experience with an electromechanical actuator on the F-18 systems research aircraft digital avionics systems conferences[A]. In: Proceedings of the 19th DASC[C]. IEEE, 2000. 2E3/1 ~2E310

[3] 朱耀忠,王自强. 飞行控制用无刷直流电动机的电磁设计[J]. 北京航空航天大学学报,2000,26(3):307 ~310
Zhu Yaozhong, Wang Ziqing. Consideration of the electromagnetic design of brushless DC motor for flight control[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000,26(3):307 ~310(in Chinese)

[4] 王自强,朱耀忠,陈杰峰. 飞行控制用无刷直流电动机的结构设计[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(9):779 ~782
Wang Ziqiang, Zhu Yaozhong, Chen Jiefeng. Consideration in the structure design of brushless DC motor for flight control[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003,29(9):779 ~782(in Chinese)

[5] 周元钧. 双绕组无刷直流电动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)