

基于滑模变结构电驱动防滑刹车控制系统设计

张庆利^① 孔文泰 彭 波 张 涛 徐方舟

(中国运载火箭技术研究院研究与发展中心 北京 100076)

摘 要 为提高飞机起落架防滑刹车系统的效率和可靠性,针对刹车系统的复杂性及非线性的特点,提出了基于滑模变结构的全电驱动刹车防滑控制系统方案;将滑模变结构的机电设备力闭环的控制策略应用于全电驱动起落架刹车系统,以提高系统响应频率和刹车力闭环控制精度。通过惯性台刹车试验对设计的防滑刹车控制器及其控制策略进行验证。试验结果表明,设计的电刹车系统带宽由传统算法的 2.5 Hz 提高到 7 Hz,力闭环控制精度由 7.5% FS 提高到 2.0% FS。

关键词 滑模变结构,电驱动,起落架,防滑刹车,控制系统

0 引 言

飞机刹车系统是飞机重要的机载设备,其性能的好坏直接影响到飞机地面运动时着陆及滑跑过程中的高效性、稳定性和适应机场跑道的能力。

现代飞机的起降重量与速度越来越大,对防滑刹车系统提出了更高的要求。在小结合系数跑道或混合跑道下,机轮打滑严重,导致系统刹车效率低,并很容易使飞机丧失滑跑方向稳定性。20 世纪 70 年代后期到 80 年代初,为了研究恶劣气候条件下,飞机在小结合系数跑道上着陆时,防滑刹车系统性能恶化并导致滑跑方向难于操纵的原因,NASA 对各种防滑刹车系统进行飞机着陆和试验车轨道试验,研究各系统在不同跑道状况下的响应与性能^[1,2]。

刹车防滑控制技术经过 40 多年的发展,其基本任务就是如何控制和调节机轮刹车时的刹车压力使轮胎不刹死而达到安全滑跑,从而具有最佳的刹车效果。为了适应飞机推力、载重、着陆速度的不断变化,目前较为成熟且高效的防滑刹车系统工作方式

主要分为滑移率刹车控制方式和参考速率-速度差刹车控制方式。随着多电飞机技术的提出,采用电作动机构代替传统的液压作动机构已成为航空技术发展的必然趋势。全电刹车系统采用机电作动机架代替了原来的液压刹车机构,采用数字式刹车控制器取代了传统的模拟式液压刹车控制器,具有在系统重量、安全性、可靠性、经济性、维护性等诸多方面的优点。刹车时对不同刹车控制律以及控制律参数的选择,对飞机刹车效率及刹车系统的稳定性具有重要的影响^[3]。

飞机防滑刹车系统分为两大类:脉冲式刹车和打滑监控式刹车。脉冲式刹车系统工作时,不管机轮是否打滑,它按预先设定的时间间隔交替进行刹车、松刹,直到飞机刹停为止。这类系统的刹车效率次优,但性能稳定。打滑监控式刹车系统通过传感器监测飞机的运动,根据机轮是否打滑进行控制。这类系统的刹车性能可望达到最优。脉冲式刹车由于刹车效率低,不适合未来发展的趋势,将会慢慢淘汰^[4]。

经典控制中 PID 控制器结构简单,容易调节,其设计方法主要有根轨迹法、频域响应法等。根轨迹

① 男,1982 年生,博士,高级工程师;研究方向:空间机器人技术,飞行器总体设计,飞机起落架电气控制技术;联系人,E-mail: zql202qing@163.com
(收稿日期:2018-05-05)

法通过研究系统开环传递函数的零极点,设计控制器将闭环系统的传递函数极点设计在希望的位置上,从而满足系统闭环稳定性和瞬态性能的要求;频域响应法通过研究开环传递函数的频域响应,根据伯德图设计控制器使闭环系统满足设计者对于频域性能的要求。经典控制理论的控制对象是线性定常系统,对于非线性系统无法处理,也不能解决多输入多输出问题^[5-7]。

现代控制理论主要包括最优控制法、极点配置法、卡尔曼滤波法等,它解决的是多输入多输出问题,不仅可以用于线性系统,也可以用于非线性系统^[8,9]。主要通过极点配置法设计状态反馈控制器将多变量系统的闭环极点配置在期望的位置上,从而使系统满足设计者提出的瞬态和稳定性能指标^[10]。特别是最优控制理论,通过对性能的优化可以设计使系统二次型性能指标极小的控制器。利用线性性能指标设计的线性二次型调节器(LQR控制器)控制效果较好,控制精度较高^[11-13]。

经分析,当前刹车防滑控制系统方案存在以下缺点。

(1)刹车电机驱动控制在刹车过程中只采用一套PID调节参数,阶跃信号超调量较大,控制系统鲁棒性不高。

(2)传统PID+PBM防滑控制器框架结构,电刹车系统带宽小,刹车力闭环控制精度较低。

1 全电刹车系统的工作原理

全电刹车系统包含刹车控制器、机电作动控制器、电作动机构、刹车装置(刹车盘)、机轮速度传感器、压力传感器等部件。工作时,机轮速度信号和飞机速度信号反馈到刹车控制器中,刹车控制器产生相应的控制信号输出到机电作动控制器(EMA控制器),再由EMA控制器产生相应的控制信号控制电作动机构,从而输出刹车推力作用于压紧盘,最终压紧刹车动静盘,动静盘摩擦产生摩擦力改变刹车力矩,刹车力矩和结合力矩共同控制机轮的转速,形成一个以机轮速度与刹车力矩为负反馈的双闭环控制系统^[14]。全电刹车系统的工作原理框图如图1所示。

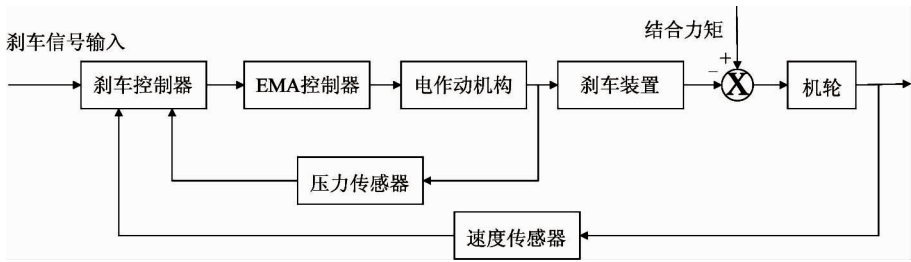


图1 全电刹车系统原理框图

2 电驱动防滑刹车控制器设计

2.1 刹车机轮数学模型

飞机在地面滑跑刹车时,刹车机轮的刹车装置(刹车盘)产生了阻碍飞机运动的刹车力矩,路面和刹车机轮之间存在的摩擦力与刹车机轮的滚动半径的乘积为刹车机轮的结合力矩,刹车装置处于刹车状态时,刹车力矩比摩擦力矩要大,此时结合力矩会导致机轮减速,而在松刹车时,摩擦力矩大于刹车力矩,机轮加速转动^[15]。刹车机轮在地面滑跑刹车时的受力简图如图1所示。

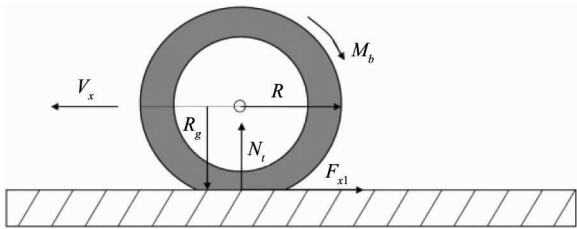


图1 刹车时机轮受力分析

由机轮受力分析可知,机轮的转动由结合力矩与刹车力矩共同控制,机轮速度由刹车力矩与结合力矩之差来控制,即:

$$\dot{\omega} = \frac{M_j - M_b}{J_r} \tag{1}$$

$$v_r = \omega \times R_g \quad (2)$$

式中, ω 、 $\dot{\omega}$ 为机轮的角速度及角加速度, M_j 为结合力矩, M_b 为刹车力矩, J_r 为单个机轮转动惯量, v_r 为机轮的线速度, R_g 为机轮滚动半径。

影响刹车机轮结合力矩的因素主要有刹车机轮受到的垂向上的载荷、刹车机轮滚动半径及轮胎与路面之间的结合系数, 计算公式如下:

$$M_j = f \times R_g = \mu \cdot P_m \cdot R_g \quad (3)$$

式中, μ 为轮胎与地面结合系数, P_m 为主机轮受到的垂向载荷。

在建立模型仿真时, 可由刹车推力 P_b 计算得到刹车力矩, 数学公式如下:

$$M_b = \mu_{mc} \cdot N_{mc} \cdot P_b \cdot (R_l + r_l) / 2 \quad (4)$$

其中, μ_{mc} 为摩擦系数, N_{mc} 为摩擦面面数, R_l 为静盘外半径, r_l 为动盘内半径。

2.2 刹车装置数学模型

刹车盘等装置位于机轮轮毂内, 飞机着陆时其动盘由轮毂带动随机轮一起转动, 而静盘通过刹车壳体与轮轴相连, 不随机轮转动, 多片动盘和静盘相互交错装配以增大摩擦面。当刹车推力由滚珠丝杠送至压紧盘时, 由压紧盘将力均匀地作用到动静盘上, 使动静盘相互挤压。由于动静盘之间存在相对运动, 因此可产生很大的摩擦力矩, 即刹车力矩, 动静盘之间的动能转换成热量释放出来, 使机轮制动。由此可知, 刹车装置的主要作用是把传输过来的刹车推力转换成刹车力矩, 同时也是飞机动能被消耗掉的地方。

如果作近似计算, 丝杠从接触刹车盘到压紧刹车盘的过程中丝杠的压紧距离为 l , 那么刹车推力 P_b 与 l 成正比。

$$P_b = K_l l \quad K_l \text{ 为系数} \quad (5)$$

2.3 机电作动器数学模型

全电刹车系统中直流电机的双闭环直流调速系统结构图如图 2 所示, 其中转速和电流都通过 PI 调节器进行调节。将电机模型简化, 主要考虑控制电压和转速的输入输出关系。

直流电机的运动方程为:

(1) 电枢回路电压平衡公式

$$u_a(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + E_a(t) \quad (6)$$

式中, $E_a(t)$ 为电枢反电势, $E_a = C_e \omega_m(t)$, 其中 C_e 为反电势系数; $\omega_m(t)$ 为电动机转速。

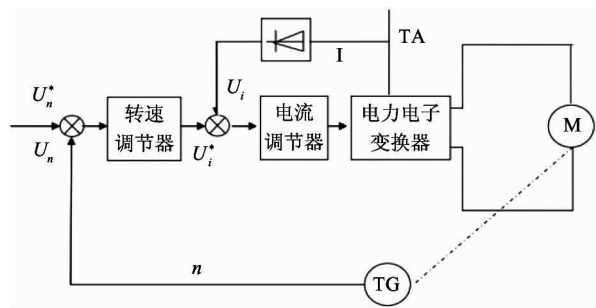


图2 直流调速控制系统结构框图

(2) 电磁转矩方程

$$M_m(t) = C_m i_a(t) \quad (7)$$

式中, C_m 为电动机转矩系数, $M_m(t)$ 为电枢电流产生的电磁转矩。

(3) 电机轴上的转矩平衡方程

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} = M_m(t) - M_c(t) \quad (8)$$

式中, J_m 为电机和负载折合到电机轴上的转动惯量, $M_c(t)$ 为折合到电机轴上的总负载转矩。

由式(4)和式(1)~(3)可得:

$$u_a(t) - E_a = R_a (T_1 \frac{di_a(t)}{dt} + i_a(t)) \quad (9)$$

$$i_a(t) - i_{a1}(t) = \frac{T_m dE_a(t)}{R_a dt} \quad (10)$$

式中, T_m 为电机机电时间常数; T_1 为电枢回路电磁时间常数, $T_1 = \frac{L_a}{R_a}$; $i_{a1}(t)$ 为负载电流, $i_{a1}(t) = \frac{M_{cl}(t)}{C_m}$, $M_{cl}(t)$ 为电机轴上的负载。

在零初始条件下, 对式(9)、(10)的等号两侧进行拉普拉斯变换, 可得到电压与电流间的传递函数为

$$\frac{i_a(s)}{u_a(s) - E_a(s)} = \frac{1}{T_1 s + 1} \quad (11)$$

电流与电动势间的传递函数为

$$\frac{E_a(s)}{i_a(s) - i_{a1}(s)} = \frac{R_a}{T_m s} \quad (12)$$

由上可得直流电机的动态结构框图, 如图 3 所示。

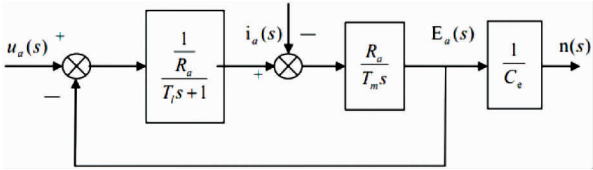


图 3 直流电动机动态结构框图

本系统的转速调节器和电流调节器均采用带限幅作用的 PI 调节器,而脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 电力电子变换器的传递函数为

$$W(s) = \frac{K_s}{T_s s + 1} \tag{13}$$

而转速反馈系数 α 和电流反馈系数 β , 可根据各个调节器的给定值与反馈值计算有关的反馈系数:

$$\alpha = \frac{U_{nm}^*}{n_{\max}} \tag{14}$$

$$\beta = \frac{U_{im}^*}{I_{am}} \tag{15}$$

式中, U_{nm}^* 、 U_{im}^* 分别代表转速环和电流环的最大输入电压,而 $n_{\max}$ 和 I_{am} 分别代表电机最大转速和最大电流。

最终,可得直流电机调速系统的数学模型,如图 4 所示。

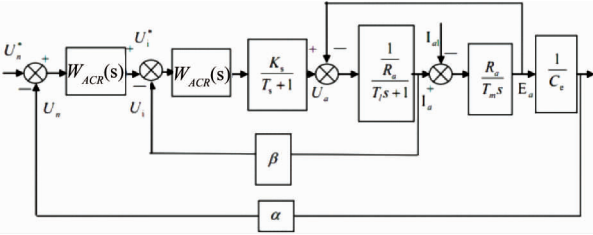


图 4 直流电机调速系统的数学模型

电机驱动滚珠丝杠,将旋转运动转化为直线运动,则:

$$\frac{\int \omega_h dt}{2\pi} = \frac{x_d}{L_0} \tag{16}$$

其中, ω_h 为丝杠送进时的转速, x_d 为螺母上基准点的轴向位移。滚珠丝杠旋转一周,螺母上基准点轴向位移移动 L_0 , 当滚珠丝杠以转速 n_h 送进时,在时刻 t 螺母上基准点轴向移动 x_d 。

2.4 滑移率式 PID 控制器设计

2.4.1 控制器输入

当刹车制动未启动,机轮在路面上自由滚动,不存在相对滑动趋势,这时轮胎与路面之间仅有滚动摩擦力,没有滑动摩擦力;当刹车制动启动后,轮胎受到了纵向力作用,轮胎与路面的接触点就会产生纵向的相对运动或者运动趋势,从而使得轮胎中心的纵向速度与圆周上的线速度产生差异,可用滑移率来表示这种差异的大小。滑移率是度量机轮制动程度的一个参数,其定义是机轮对地面的相对滑动量。滑移率的计算公式如下:

$$\sigma = \frac{v_x - v_r}{v_x} \quad \sigma \in [0,1] \tag{17}$$

$$v_r = \omega \times R_g \tag{18}$$

式中, v_x 为飞机航向滑跑速度, v_r 为机轮的线速度, ω 为机轮转速, R_g 为机轮滚动半径。

机轮刹车时,轮胎与地面的摩擦非常复杂,轮胎与跑道间的结合系数并不是一个常量,而是受多种因素影响的变量。理论研究和实践证明,结合系数受到滑移率的影响最为重要,由图 5 可以看出,要达到最大的结合系数,就要尽可能控制滑移率在结合系数最大值对应的滑移率附近^[16]。

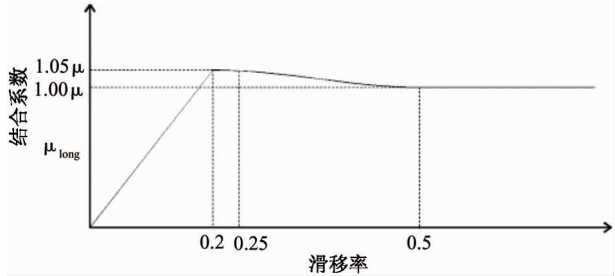


图 5 滑移率与结合系数之间的关系

因此,采用滑移率控制方式刹车时,飞机速度信号、机轮速度信号经过速度传感器输入到刹车控制器中,同时测量并采集机轮滚动半径值,经过计算得到实际滑移率的数值,计算公式如式 (17) 和 (18) 所示。将计算得到的实际滑移率与最佳滑移率 $\sigma_m = 0.2$ 相比,最佳滑移率与实际滑移率的差值 $\varepsilon = \sigma_m - \sigma$ 作为刹车控制器的输入信号,输入到 PID 控制器中进行调节,期望刹车机轮的实际滑移率始终保持在最佳滑移率附近,以提高刹车系统的工作效率。

2.4.2 防滑刹车控制律设计

由于全电刹车系统采用双闭环控制,控制部分

既包括对滑移率的控制,又包括对刹车力矩的控制,两个控制器均采用 PID 控制,其中刹车力矩处在内

环,滑移率处在外环。整个刹车系统的控制框图如图 6 所示。

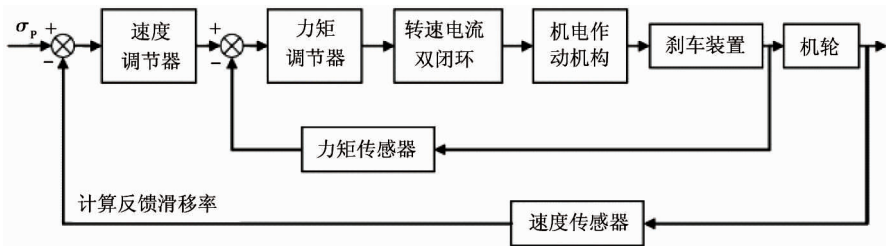


图 6 全电刹车系统控制框图

PID 控制算法是利用比例、积分、微分三个基本环节对系统输入值和反馈的系统输出值进行比较后产生的偏差信号进行一定的处理,从而实现对系统进行调节控制,系统一般由 PID 控制器和被控对象组成,其原理框图如图 7 所示。

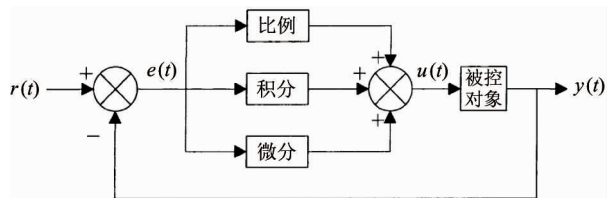


图 7 PID 控制系统原理图

PID 控制器根据给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $y(t)$ 构成控制偏差:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (22)$$

PID 控制规律为

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (23)$$

式中, $e(t)$ 为系统偏差, $u(t)$ 为 PID 控制器的输出值, k_p 为比例系数, k_i 为积分系数, k_d 为微分系数。

在全电刹车系统中,给定值 $r(t)$ 即为最佳滑移率 0.2,实际输出值 $y(t)$ 为通过速度传感器测得的速度信号计算出来的实际滑移率,系统偏差 $e(t)$ 即为最佳滑移率与实际滑移率的差值, $u(t)$ 为该速度调节 PID 控制器的输出值。若系统偏差为正数,说明实际滑移率小于最佳滑移率,机轮处于欠刹车状态,则输入到刹车力矩控制器的刹车力矩偏差信号值变大,给刹车电机的电压增大,电机转速增加,丝杠前进,压紧刹车动静盘,从而增大刹车力矩;反之,若系统偏差为负,说明实际滑移率大于最佳滑移率,

机轮打滑严重,系统处于过刹车状态,此时速度调节 PID 控制器的输出值为负,输入到刹车力矩控制器的偏差信号也为负,控制电机反转,丝杠后退,松开刹车盘,达到减小刹车力矩、解除机轮打滑严重的现象,保证滑移率在最佳给定值附近,提高刹车效率。

速度调节 PID 控制器的输出值经过放大器 K_{ig} , 得到速度调节控制器放大器放大的输出值 ΔMb , 具体公式为

$$\Delta Mb = K_{ig} \cdot u(t) \quad (24)$$

ΔMb 也是刹车力矩信号值。对刹车力矩的控制也采用 PID 控制方法,其主要目的是根据输入的目标刹车力矩和实际刹车力矩的差值,产生输入到电机驱动器的电压信号,调节直流电机转速,使实际刹车力矩跟踪目标刹车力矩。此刻期望的目标刹车力矩由上一时刻的刹车力矩与刹车力矩增量相加得到,经过一定的放大倍数后与此刻的实际刹车力矩相比较得到误差控制量,再经过 PID 控制输出。具体公式如下:

$$Mb_t = Mb_m + \Delta Mb \quad (25)$$

$$e_{Mb}(t) = Mb_t - Mb_r \quad (26)$$

Mb_t 为目标刹车力矩, Mb_m 为力矩传感器反馈的上一时刻的刹车力矩, ΔMb 为速度调节控制器放大器的输出值, Mb_r 为力矩传感器的实际反馈刹车力矩, $e_{Mb}(t)$ 为刹车力矩调节器的输入偏差值。

PID 力矩控制器控制规律为

$$u_T(t) = k_{pT} e_{Mb}(t) + k_{iT} \int e_{Mb}(t) dt + k_{dT} \frac{de_{Mb}(t)}{dt} \quad (27)$$

式中, $u_T(t)$ 为刹车力矩 PID 控制器的输出值, k_{pT} 为比例系数, k_{iT} 为积分系数, k_{dT} 为微分系数。

刹车力矩 PID 控制器的输出值 $u_T(t)$ 经过电压放大器 K_{un} , 得到刹车电机电压信号, 控制电机正转或反转, 具体公式为

$$U_n = K_{un} \cdot u_T(t) \quad (28)$$

对于两个 PID 控制器, 需要分别对其积分环节和微分环节进行饱和值限制, 防止积分器和微分器的输出值超过实际物理取值范围。

速度 PID 控制器:

$$\begin{aligned} \max(k_I \int e(t) dt) &\leq a_I, \max(k_D \frac{de(t)}{dt}) \leq a_D \\ \min(k_I \int e(t) dt) &\geq b_I, \min(k_D \frac{de(t)}{dt}) \geq b_D \end{aligned} \quad (29)$$

刹车力矩 PID 控制器:

$$\begin{aligned} \max(k_{IT} \int e(t) dt) &\leq a_{IT}, \max(k_{DT} \frac{de(t)}{dt}) \leq a_{DT} \\ \min(k_{IT} \int e(t) dt) &\geq b_{IT}, \min(k_{DT} \frac{de(t)}{dt}) \geq b_{DT} \end{aligned} \quad (30)$$

式中, a_I 为速度 PID 控制器积分环节的输出上限, a_D 为速度 PID 控制器微分环节的输出上限, b_I 为速度 PID 控制器积分环节的输出下限, b_D 为速度 PID 控制器微分环节的输出下限; a_{IT} 为刹车力矩 PID 控制器积分环节的输出上限, a_{DT} 为刹车力矩 PID 控制器微分环节的输出上限, b_{IT} 为刹车力矩 PID 控制器积分环节的输出下限, b_{DT} 为刹车力矩 PID 控制器微分环节的输出下限。

2.5 基于滑模变结构控制器设计

滑模切换面设计的目的在于保证系统的稳定性和满足性能指标要求的动态特性, 保证系统状态一旦进入滑模面便能沿其稳定地趋向状态原点。即使得滑模函数 $S=0$ 。

在本文设计的防滑刹车控制率中, 飞机防滑刹车控制系统控制的目标是, 维持滑移率保持在最佳滑移率 δ_p 不变。滑移率的公式为

$$\delta = \frac{x_1 R_j - x_2}{x_2} \quad (31)$$

式中, x_1 为机轮角速度, x_2 为飞机地速, R_j 为机轮滚转半径。

因此在整个刹车控制过程中, 要调节机轮的刹车力矩使飞机机轮的滑移率 $\delta = \delta_p$ 恒定不变, 假设

力跟踪误差为零, 即 x_1 和 x_0 的比值恒定:

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{R_j}{1 + \delta_p} \quad (32)$$

针对刹车系统的控制目标, 我们可以定义系统的滑模切换面为

$$S(x) = Cx = \left[\frac{1 + \delta_p}{R_j} - 1 \right] x = x_2 \frac{1 + \delta_p}{R_j} - x_1 \quad (33)$$

在防滑刹车的过程中, 我们以刹车盘压力为控制对象, 由于 t 在切换面 $S=0$ 上的控制力矩是间断的, 可能是正向, 也可能是反向的力矩。在这里, 我们用某种意义上的力矩平均值 (u_{eq}) 代替传统的切换控制, 使得刹车系统沿着 $S=0$ 的切换面移动, 以保证滑动模态的稳定。

对于刹车系统在滑模面的运动, 恒有:

$$S(x) = 0, \dot{S}(x) = 0 \quad (34)$$

则有以下等式成立:

$$S(x) = x_2 \frac{1 + \delta_p}{R_j} - x_1 \quad (35)$$

$$\dot{S}(x) = \dot{x}_2 \frac{1 + \delta_p}{R_j} - \dot{x}_1 \quad (36)$$

将式(5)、(6)代入式(4), 根据滑动动力学和防滑刹车系统数学模型, 则有:

$$\dot{S}(x) = f_2(x) \frac{1 + \delta_p}{R_j} - f_1(x) + u_{eq} \frac{k_b}{I} = 0 \quad (37)$$

经求解得出:

$$u_{eq} = \left[f_1(x) - f_2(x) \frac{1 + \delta_p}{R_j} \right] \frac{I}{k_b} \quad (38)$$

令 $u_h = k\eta$, $k \geq \frac{I}{k_b}$, 则输出的制动力矩为

$$\begin{aligned} u &= u_{eq} - u_h \cdot \text{sgn}(s) \\ &= \left[f_1(x) - f_2(x) \frac{1 + \delta_p}{R_j} \right] \frac{I}{k_b} \\ &\quad - k\eta \cdot \text{sgn}\left(x_2 \frac{1 + \delta_p}{R_j} - x_1\right) \end{aligned} \quad (39)$$

在切换面附近邻域, 由于惯性与滞后的影响, 在滑动运动上通常有一个抖振的叠加分量; 另一方面切换开关的非线性, 也将引起抖动。抖振不仅会损坏系统的可执行元件, 而且还会引起自激运动, 从而导致系统的不稳定。采用 Ambrosino 切换函数法来

削弱变结构控制中的抖振问题,采用 Ambrosino 切换函数代替以上符号函数。

$$u = \left[f_1(x) - f_2(x) \frac{1 + \delta_p}{R_j} \right] \frac{I}{k_b} - k\eta \cdot \frac{s}{|s| + \delta} \quad (40)$$

其中, $s = x_2 \frac{1 + \delta_p}{R_j} - x_1$

3 防滑刹车试验

3.1 传统控制算法的测试结果

按照传统的防滑刹车算法,在某机型的飞机刹车系统在飞机总装状态下,开展了牵引滑跑试验,刹车指令和刹车力的响应曲线如图 8 所示。

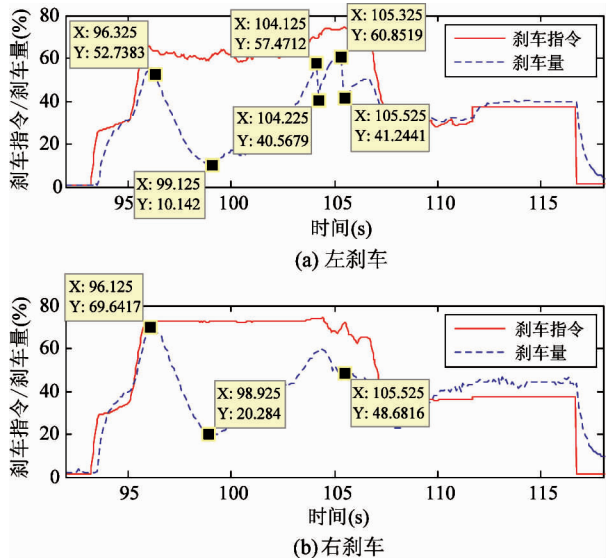
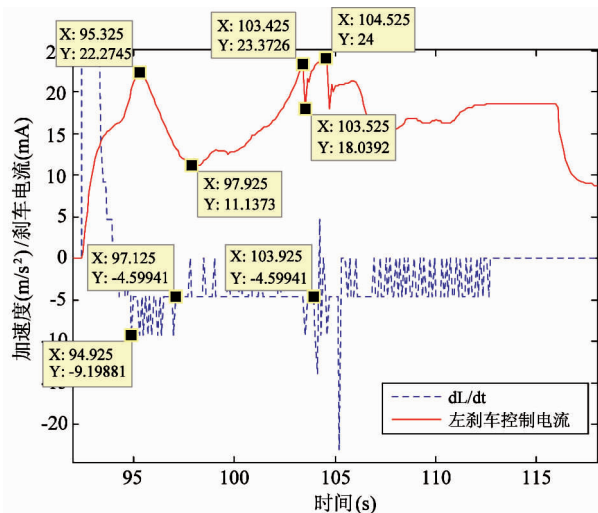


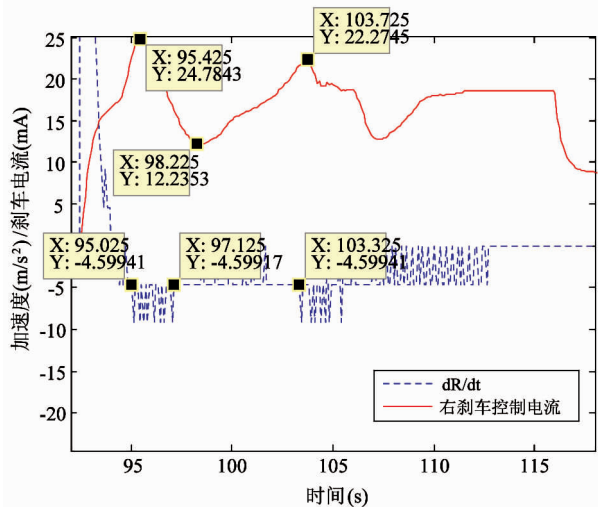
图 8 刹车指令和刹车量响应曲线

由上图可知,飞机飞行控制系统在主轮承载 0.65 s 后开始发出刹车指令。整个刹车过程中,左刹车量最大偏差为 2.5%,右刹车量最大偏差为 7.1%。由刹车指令和刹车量的实际响应结果可知,左右刹车在 96.125 s 时开始进入防滑保护,并在刹车过程中多次启动防滑保护。通过分析轮速减速率和刹车控制电流的实际变化曲线(如图 9 所示),当轮速变化超过 5 m/s^2 时,刹车启动相应防滑保护功能;当轮速变化低于 5 m/s^2 时,刹车响应呈现出恢复趋势,开始正常响应上位机控制发出的刹车指令,

与防滑保护触发条件的设计状态一致。由惯性台试验滑跑刹车指令和刹车量响应曲线可知,系统刹车量偏差较大约为 7.1%,系统响应频率较低。



(a) 左轮速dL/dt和控制电流



(b) 右轮速dR/dt和控制电流

图 9 轮速变化和刹车控制电流

3.2 改进型控制算法的测试结果

为了提高系统控制精度和系统响应,采用本文设计的基于滑模变结构的防滑刹车算法,在惯性台上开展了防滑刹车性能试验^[17],通过飞控计算机模拟设备周期性发送不同频率的正弦波刹车力指令信号,刹车信号响应试验结果如图 10~12 所示。

由以上试验结果可知,设计的电刹车系统带宽由传统算法的 2.5 Hz 提高到 7 Hz,力闭环控制精度由 7.5% FS 提高到 2.0% FS。

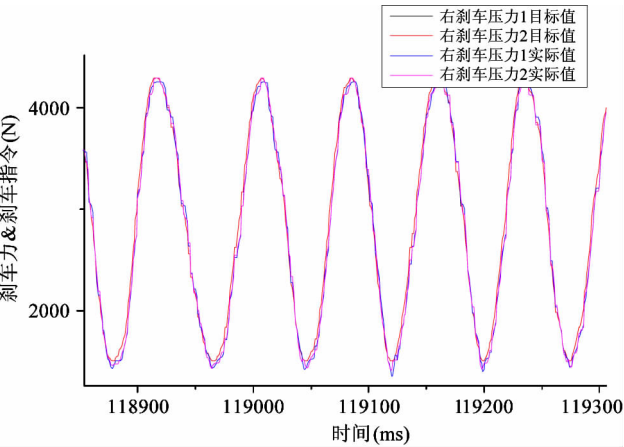


图 10 2 Hz 刹车力和刹车指令响应曲线

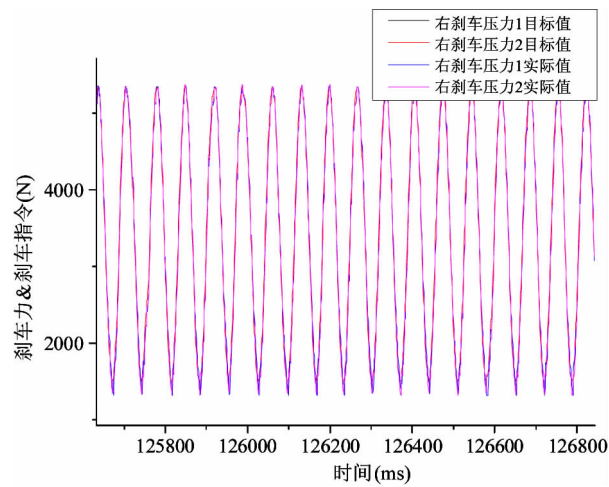


图 11 7 Hz 刹车力和刹车指令响应曲线

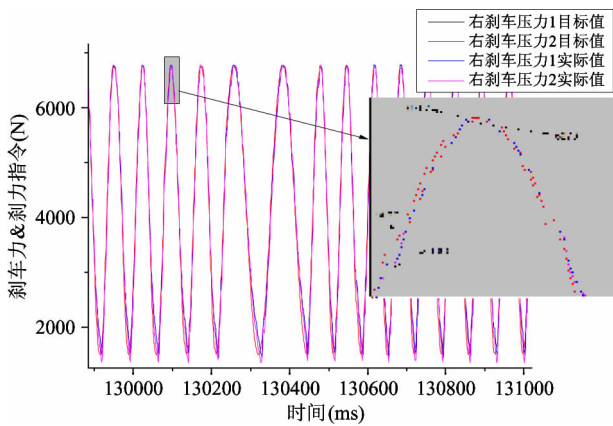


图 12 刹车力和刹车指令频率交变状态下响应曲线

4 结论

为提高飞机防滑刹车系统的效率和可靠性,提出了基于滑模变结构的刹车防滑控制系统方案,以

减小系统对阶跃信号超调量,提高系统刹车力控制精度。惯性台刹车试验的结果表明,设计的电刹车系统带宽提高到 7 Hz,力闭环控制精度由 7.1% FS 提高到 2.0% FS。

参考文献

[1] 李波. 飞机防滑刹车系统关键技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 2008

[2] 王纪森. 非线性控制理论在防滑刹车系统中的应用研究[D]. 西安: 西北工业大学机电学院, 2001

[3] 高泽迥. 飞机设计手册: 起飞着陆系统设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002

[4] Tanner J A, Stubbs S M. Behavior of aircraft antiskid braking systems on dry and wet runway surfaces: a slip-ratio-controlled system with ground speed reference from unbraked nose wheel [J]. *Brakes*, 1977. 35-42

[5] McGowan J A. Expansion of flight simulator capability for study and solution of aircraft directional control problems on runways, NASA-CR-145281 [R]. Washington: NASA, 1978

[6] Barnes A G. Simulator Assessment of Take-off and Landing[M]. Paris: Advisory Group for Aeronautical Research and Development, 1963

[7] Barnes A G, Yager T J. Simulation of aircraft behaviour on and close to the ground, NASA-TM-87460 [R]. Washington: NASA, 1985

[8] Hitch H. Aircraft ground dynamics [J]. *Vehicle System Dynamics*, 1981, 10(4-5): 319-332

[9] Khapane P D. Simulation of asymmetric landing and typical ground maneuvers for large transport aircraft[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2003, 7(8): 611-619

[10] Clark S K. Mechanics of pneumatic tires[J]. *Technical Report Archive & Image Library*, 1971, 78(3): 68

[11] Pacejka H B. In-plane and out-of-plane dynamics of pneumatic tyres[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1981, 10(4-5): 221-251

[12] Szostak H, Rosenthal T, Wade A R. An interactive tire model for driver vehicle simulation, STI-TR-1227-1-V₂ [R]. Alexandria: National Technical Information Service, 1988

[13] Pacejka H B, Sharp R S. Shear force development by pneumatic tyres in steady state conditions: a review of

- modelling aspects [J]. *Vehicle System Dynamics*, 1991, 20(3-4): 121-175
- [14] Takahashi T, Pacejka H B. Cornering on uneven roads [J]. *Vehicle System Dynamics*, 1988, 17(S1): 469-480
- [15] 徐冬苓, 李玉忍. 飞机起落架数学模型的研究 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(4): 831-833
- [16] 李玉忍, 薛晶, 马瑞卿, 等. 飞机制动过程滑移率寻优方法研究 [J]. 西北工业大学学报, 2008, 26(4): 488-491
- [17] 马继杰. 制动器惯性台架电模拟惯量性能和关键技术研究 [D]. 长春: 吉林大学机电学院, 2010

Design of the control system of electric drive anti-skid braking system based on sliding mode variable structure

Zhang Qingli, Kong Wenqin, Peng Bo, Zhang Tao, Xu Fangzhou

(Research and Development Center of China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076)

Abstract

In order to improve the efficiency and reliability of the aircraft's landing gear anti-skid braking system, the scheme of the all-electric anti-skid braking control system based on sliding mode variable structure is proposed, aiming at the complexity and nonlinear characteristics of the braking system. The force closed-loop control strategy of mechanical and electrical equipment with sliding mode variable structure is applied to the all-electric drive landing gear braking system to improve the system response frequency and the closed-loop control accuracy of braking force. The design of the anti-skid brake controller and its control strategy are verified by the inertial brake test. The test results show that the bandwidth of the designed electric brake system is increased from 2.5 Hz of the traditional algorithm to 7 Hz, and the force closed-loop control accuracy is increased from 7.5% FS to 2.0% FS.

Key words: synovial variable structure, electric drive, landing gear, anti-skid brake, control system