

文章编号: 1000-8055(2023)05-1259-11

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210680

分布式电推进飞机双永磁电动机系统控制策略

翁卢晖¹, 姚太克², 张 玄², 张荣格², 卜飞飞¹

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 211106;

2. 中国航发控制系统研究所 系统部, 江苏 无锡 214063)

摘 要: 为了减小气流等其他因素对分布式电推进飞机中各推进电动机带来的负载扰动导致的转速突变, 使得总推力突变或机身左右两侧推力不一致而导致飞机偏航, 需要保证各推进电动机具有良好的抗干扰能力和转速同步性。针对此问题, 提出了一种针对双永磁电机系统的改进交叉耦合控制策略, 采用了改进趋近律的滑模同步控制器。同时设计了一种负载观测器, 该观测器可直接通过位置传感器测得的电机转子位置信号为已知量, 避免了微分突变的引入。对所提出的双永磁电机系统控制策略进行了一系列仿真及实验验证, 仿真与实验结果发现: 在转矩突变时, 该控制策略与传统交叉耦合控制策略相比, 转速突变减小约 50%, 同步误差减小约 18%, 证明了该控制策略与传统交叉耦合控制策略相比具有更高的同步性能和更强的抗干扰能力。

关 键 词: 分布式电推进飞机; 双永磁电动机; 交叉耦合控制; 滑模同步控制器; 负载观测器

中图分类号: V242.5

文献标志码: A

Control strategy of dual permanent magnet motor system for distributed electric propulsion aircraft

WENG Luhui¹, YAO Taike², ZHANG Xuan², ZHANG Rongge², BU Feifei¹

(1. College of Automation Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. System Department, Aero Engine Control System Institute,

Aero Engine Corporation of China, Wuxi Jiangsu 214063, China)

Abstract: In order to reduce the sudden change of speed caused by load disturbance arising from air flow and other factors on each propulsion motor in distributed electric propulsion aircraft, which results in sudden change of total thrust or inconsistent thrust on the left and right sides of the fuselage, it is necessary to ensure that each propulsion motor has good anti-interference ability and speed synchronization. To solve this problem, an improved cross coupling control strategy for dual permanent magnet motor system was proposed, and a sliding mode synchronous controller with improved reaching law was adopted. At the same time, a load observer was designed, which took the motor rotor position signal directly measured by the position sensor as the known quantity, and avoided the introduction of differential mutation. Finally, a series of simulations and experiments were carried out to verify the proposed control strategy of dual permanent magnet motor system. Simulation and experimental results showed that compared with traditional cross coupling control strategies, this control strategy reduced speed mutation by about 50% and synchronization error by about 18% in case of torque mutation, which proved that this control strategy had

收稿日期: 2021-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(52177050)

作者简介: 翁卢晖(1997—), 男, 硕士生, 主要从事伺服系统多电动机协同控制研究。

通信作者: 卜飞飞(1984—), 男, 副教授, 博士, 主要从事航空电源、伺服驱动、发电机、电动机及其控制等研究。E-mail: bufeifei1984@163.com

引用格式: 翁卢晖, 姚太克, 张玄, 等. 分布式电推进飞机双永磁电动机系统控制策略[J]. 航空动力学报, 2023, 38(5): 1259-1269. WENG Luhui, YAO Taike, ZHANG Xuan, et al. Control strategy of dual permanent magnet motor system for distributed electric propulsion aircraft[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(5): 1259-1269.

higher synchronization performance and stronger anti-interference ability compared with traditional cross coupling control strategies.

Keywords: distributed electric propulsion aircraft; dual permanent magnet motors; cross coupling control; sliding mode synchronous controller; load observer

与传统飞机相比,分布式电推进飞机利用电动机相对尺寸近似无关的特性,将大功率电动机系统分解为总功率相等的多个小功率电动机系统分布在机身各处以改善飞机飞行性能及提升容错性^[1]。各个小功率电动机通过减速器驱动各自螺旋桨共同为飞机提供推力^[2]。根据空气螺旋桨理论,螺旋桨旋转产生的阻转矩及推力均与螺旋桨转速及空气密度有关^[3]。当螺旋桨工作时,局部气流可能会对螺旋桨施加径向力,这将会导致推进电动机的负载突变,从而造成电动机转速的突变。而电动机转速的突变又会使得螺旋桨输出的推力突变,导致推进系统整体输出推力的改变,甚至导致机身左右两侧输出的推力不一致,从而产生偏航力矩使得飞机偏航,影响飞机的正常飞行。因此,需要采取合适的协同控制策略,使得系统中某台推进电动机受到扰动而导致转速变化时,其余电动机也能迅速响应该扰动并调整转速。同时提高系统的抗干扰能力,减小电动机转速的波动。

永磁电动机由于具有功率密度高、调速范围广、可靠性高等优点,广泛应用于航空领域^[4]。由于分布电推进系统中各推进电动机的分布往往是沿飞机纵向对称线左右对称的^[5],因此,只需保证左右对称位置处的各组推进电动机两两工作在相同转速下,即可使得该组推进电动机产生的偏航力矩相互抵消,从而保证左右两侧整体偏航力矩也相互抵消,使得飞机不会因偏航力矩而导致偏航^[6]。因此,本文以双永磁电动机系统为对象展开研究,两台永磁电动机各代表机身左右两侧对称位置处的推进电动机。首先对单台永磁电动机的矢量控制系统展开研究。由于采用 PI 控制器的矢量控制系统抗干扰能力有限,在对控制性能要求高的场合或外界扰动很大的场合具有局限性^[7],因此,往往需要设计合适的负载观测器,通过电流环前馈补偿的方式实现其抗干扰能力的提升。开环观测器虽然结构简单,但是不具有实际应用价值^[8-9]。在此基础上,Luenberger 等^[10]提出了一种闭环观测器,该观测器的思想是:首先通过系统建模建立 Luenberger 观测器,将系统的输入量和输出量作为 Luenberger 观测器的输入量,在观

测器内部将实际输出与估计输出作差并反馈,通过合理配置观测器极点及反馈增益,即可使观测状态逐步接近实际状态。

在双电动机协同控制系统中,常常采用由 Koren 于 20 世纪 80 年代提出的交叉耦合控制策略^[11]。然而这种控制策略的同步性不高,在受到扰动时,两台电动机的转速差较大。为了提高该控制策略的同步性,文献^[12]提出了一种转速环采用模糊控制算法与分数阶 PI^λD^μ控制算法相结合的双电动机协同控制策略,但是该控制策略只是通过改善单台电动机控制性能的方式间接减小两台电动机的转速差,而没有直接通过改进协同控制结构的方式提高同步性,因此效果十分有限。文献^[13]提出了一种采用交叉耦合 PID 控制器的结构,一定程度上减小了两台电动机的同步误差。文献^[14]基于滑模控制算法设计了一种双永磁电动机同步控制器,进一步提高了系统的同步性能。然而,滑模控制不可避免的会带来抖振问题,因此,还需要采取合适的方案尽可能减小抖振^[15]。

为了提高双永磁电动机系统的同步性能,同时提高系统的抗干扰能力,针对以上问题,本文从单台永磁电动机系统控制性能与双永磁电动机系统协同控制性能两个角度共同入手,提出了一种改进交叉耦合控制。针对单台永磁电动机矢量控制系统,采用负载观测器的方式减小其受扰动时转速的波动;针对双永磁电动机系统提出了一种改进指数趋近律的滑模交叉耦合控制结构。两者相结合,达到提高系统同步性能和抗干扰能力的目的。

1 永磁电动机矢量控制策略

永磁电动机是一个多变量、强耦合的系统,为方便研究,建立高效可行的数学模型,在理想化假设的基础上^[16],电动机在 d 轴、q 轴下的电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (1)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] \quad (2)$$

式中 u_d 、 u_q 为 d 轴和 q 轴的电压; i_d 、 i_q 为等效的 d 轴、q 轴电流; ω_e 为电动机电角速度; ψ_f 为永磁体等效磁链; R_s 为定子等效电阻; L_d 、 L_q 为 d 轴、q 轴等效电感; p 为电动机极对数。由于本次研究针对的是表贴式永磁电动机, 其 $L_d = L_q$, 因此, 电磁转矩方程可进一步简化为

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q \psi_f \quad (3)$$

矢量控制根据模型等效原则, 将电动机在静止的 ABC 坐标系下的模型变换为同步旋转的 d、q 轴坐标系下的模型, 从而实现了 i_d 、 i_q 的解耦。通过分别控制 i_d 、 i_q , 即可实现对磁链和转矩的分别控制。

在实际使用中, 通常采用 $i_d = 0$ 的矢量控制策略。其控制框图如图 1 所示。 U_{dc} 为三相逆变器直流侧电压, u_α^* 、 u_β^* 为 α 轴、 β 轴给定电压。

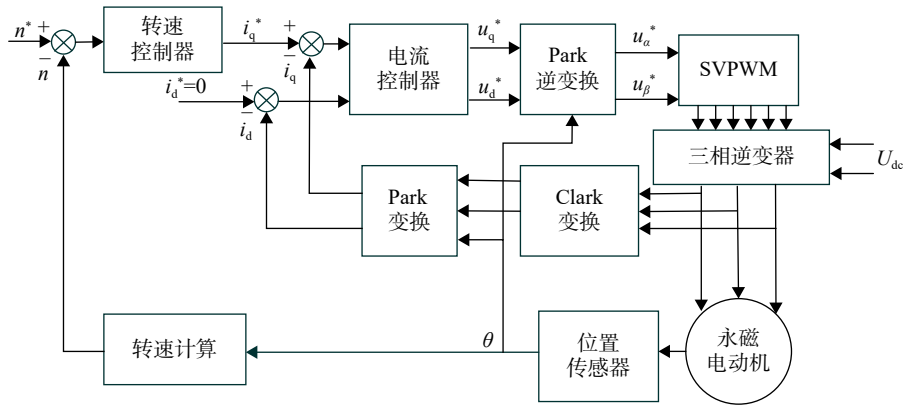


图 1 永磁电动机矢量控制框图

Fig. 1 Vector control block diagram of permanent magnet motor

该控制策略采用电流内环和转速外环构成的双闭环结构。给定转速 (n^*) 与实际转速 (n) 的差值经转速控制器后得到给定交轴电流 (i_q^*)，给定直轴电流 (i_d^*) 保持为 0，两者与电流传感器测得的实际值之差经过电流控制器，并通过 Park 变换后得到给定交轴电压 (u_q^*) 和给定直轴电压 (u_d^*)，经空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 后驱动三相逆变器从而控制永磁电动机。

2 永磁电动机系统的负载观测器设计

分布式电推进系统中, 螺旋桨产生的推力是随推进电动机转速的提高而增大的。而螺旋桨在工作过程中易受到外界环境影响而对推进电动机产生负载扰动。负载扰动导致推进电动机转速的波动, 这会对其产生的推力造成影响, 从而影响飞机的飞行状态。为了提高采用比例积分 (PI) 转速控制器的永磁电动机矢量控制系统的抗干扰能力, 降低电动机受到负载扰动时的转速波动, 从而降低推力波动对飞行状态的影响, 本节运用 Luenberger 观测器的思想对该系统设计负载观测器。永磁电动机的转矩平衡方程为

$$T_e = T_l + J \frac{d\omega_n}{dt} + B_m \omega_n \quad (4)$$

式中 T_l 为负载转矩; J 为转动惯量; B_m 为摩擦因数; ω_n 为机械角速度, $\omega_n = \omega_e / p$ 。

将电磁转矩 T_e 定义为输入, 电角速度 ω_e 和负载转矩 T_l 为状态变量, ω_e 为系统输出, 则被观测测量为 ω_e 和 T_l 。认为在一个采样周期内负载转矩恒定, 则可构建被观系统状态空间表达式

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_e \\ \dot{T}_l \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \omega_e \\ T_l \end{bmatrix} + B T_e \\ \omega_e = C \begin{bmatrix} \omega_e \\ T_l \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{式中 } A = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J} & -\frac{p}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{p}{J} & 0 \end{bmatrix}^T, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}。$$

在构造状态观测器前, 首先要判定被观测系统的能观性^[17]。代数判据的判定方法是若能观性矩阵 N 满秩, 则系统能观。本系统的能观性矩阵为

$$N = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{B_m}{J} & -\frac{p}{J} \end{bmatrix} \quad (6)$$

因此, 其秩为 2, 即为满秩。可见, 所构建的被观测系统是能观的。

根据式 (5), 构建的观测器为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}}_e \\ \dot{\hat{T}}_1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_e \\ \hat{T}_1 \end{bmatrix} + \mathbf{B}T_e + \mathbf{H}(\omega_e - \hat{\omega}_e) \\ \hat{\omega}_e = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_e \\ \hat{T}_1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\hat{\omega}_e$ 、 $\hat{T}_1$ 代表电角速度和负载转矩的观测值； $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \end{bmatrix}^T$, h_1 、 h_2 为常数。

由于电角速度的实际值是通过位置传感器得到的电动机转子位置信号经微分后计算得到的,而微分会将噪声信号放大。为了避免微分突变的引入,本文对该观测器进行了改进。

将式(7)改写为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}}_e \\ \dot{\hat{T}}_1 \end{bmatrix} - \mathbf{H}\omega_e = \left(\mathbf{A} - \begin{bmatrix} h_1 & 0 \\ h_2 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \hat{\omega}_e \\ \hat{T}_1 \end{bmatrix} + \mathbf{B}T_e \\ \hat{\omega}_e = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_e \\ \hat{T}_1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

定义新的观测器状态为

$$\hat{\mathbf{x}}_a = \begin{bmatrix} \omega_e \\ T_1 \end{bmatrix} - \mathbf{H} \frac{\theta}{p} \quad (9)$$

其中 θ 为位置传感器得到的转子位置的机械角度, $\dot{\theta} = \omega_n$ 。

因此,改进后的负载观测器最终可表示为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}}_e - h_1 \dot{\theta} = \left(-\frac{B_m}{J} - h_1 \right) \hat{\omega}_e - \frac{p}{J} \hat{T}_1 + \frac{p}{J} T_e \\ \dot{\hat{T}}_1 - h_2 \dot{\theta} = -h_2 \hat{\omega}_e \end{cases} \quad (10)$$

根据式(10),构建的负载观测器结构图如图2所示。

则状态误差方程可由式(7)减去式(5)得到

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\tilde{\omega}}_e \\ \dot{\tilde{T}}_1 \end{bmatrix} = (\mathbf{A} - \mathbf{H}\mathbf{C}) \begin{bmatrix} \tilde{\omega}_e \\ \tilde{T}_1 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J} - h_1 & -\frac{p}{J} \\ -h_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\omega}_e \\ \tilde{T}_1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

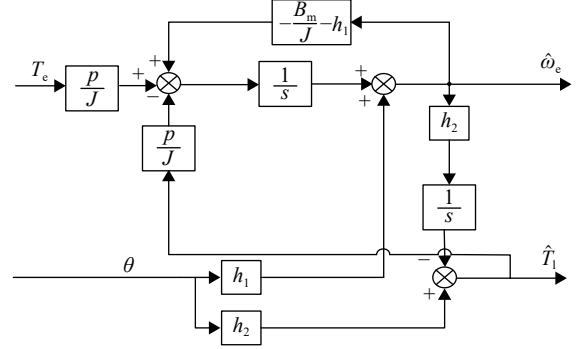


图2 负载观测器结构图

Fig. 2 Structure diagram of load observer

式中 $\tilde{\omega}_e$ 、 $\tilde{T}_1$ 分别表示电角速度和负载转矩的观测误差。 $\tilde{\omega}_e = \omega_e - \hat{\omega}_e$, $\tilde{T}_1 = T_1 - \hat{T}_1$ 。

想要负载观测器收敛,只需保证 $\mathbf{A} - \mathbf{H}\mathbf{C}$ 的特征方程的两个特征根 a_1 、 a_2 都具有负实部即可^[18]。其特征方程为

$$|s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{H}\mathbf{C})| = 0 \quad (12)$$

代入 $\mathbf{A} - \mathbf{H}\mathbf{C}$ 可得

$$s^2 + \left(\frac{B_m}{J} + h_1 \right) s - \frac{h_2 p}{J} = 0 \quad (13)$$

为方便计算,令其两个特征根相等,则可得

$$\begin{cases} 2a_1 = -\frac{B_m}{J} + h_1 \\ a_1^2 = -\frac{h_2 p}{J} \end{cases} \quad (14)$$

因此,解得

$$\begin{cases} h_1 = -2a_1 - \frac{B_m}{J} \\ h_2 = -\frac{a_1^2 J}{p} \end{cases} \quad (15)$$

由此可见,只需要保证 $h_1 > -\frac{B_m}{J}$ 且 $h_2 < 0$, 即可使得负载观测器收敛。

加入所设计的负载观测器后,永磁电动机的矢量控制框图如图3所示。图中, g 为负载转矩

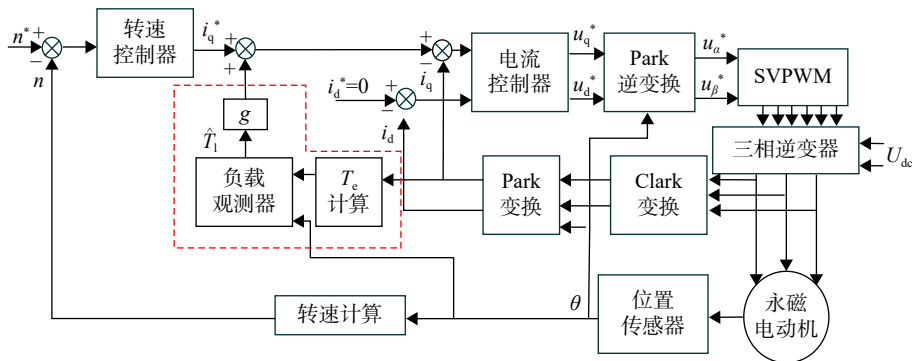


图3 带负载观测器的永磁电动机矢量控制框图

Fig. 3 Vector control block diagram of permanent magnet motor with load observer

补偿系数, $g = 2/(3p\psi_f)$ 。

3 双永磁电动机系统交叉耦合控制

3.1 分布式电推进飞机推力分布规律

对分布式电推进飞机进行推力分析是研究双永磁电动机系统协同控制策略的基础, 文献 [6] 详细对其推力分布规律进行了推导及分析, 接下来对该文献的研究进行总结与概括。

包含四台推进电动机的分布式电推进飞机沿展向布置图如图 4 所示。

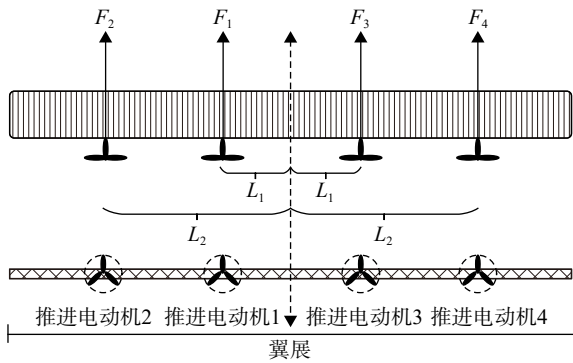


图 4 推进电动机沿飞机展向布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the arrangement of propulsion motors along the aircraft's span

图 4 中, F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 分别表示推进电动机 1、2、3、4 产生的推力; L_1 表示推进电动机 1 和推进电动机 3 到纵向对称线的距离; L_2 表示推进电动机 2 和推进电动机 4 到纵向对称线的距离。因此, 飞机的偏航力矩 M_n 可以表示为

$$M_n = F_1 L_1 + F_2 L_2 - F_3 L_1 - F_4 L_2 \quad (16)$$

在飞机直线飞行时, 要求偏航力矩 M_n 为 0, 即

$$(F_1 - F_3) L_1 + (F_2 - F_4) L_2 = 0 \quad (17)$$

因此, 只需保证 $F_1 = F_3$ 、 $F_2 = F_4$, 即可保证偏航力矩始终为 0, 而由于推力与电动机转速成正比相关, 因此, 可将其等效理解为: 只需保证沿纵向对称线对称分布的两台电动机转速相等, 即可保证飞机的直线飞行。

在以上对分布式电推进飞机推力分析的基础上, 接下来研究合适的双永磁电动机系统协同控制策略, 以保证系统中当某台电动机受扰动而转速突变时, 对称位置处的另一台电动机也能同步改变转速, 从而减小所导致的偏航。

3.2 传统交叉耦合控制

在双永磁电动机系统中, 最常用的协同控制

策略是交叉耦合控制。传统交叉耦合控制的结构框图如图 5 所示。

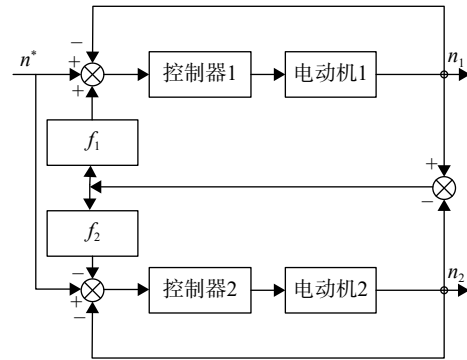


图 5 传统交叉耦合控制结构框图

Fig. 5 Block diagram of traditional cross coupling control structure

由结构图可见, 这种结构的核心思想就是将两台电动机的转速作差后, 经过各电动机的增益系数反馈到各电动机单元的调速系统中^[19]。其中, 各电动机的补偿系数 f_1 及 f_2 与电动机转动惯量有关。当转动惯量相等时, 取 $f_1 = f_2$ 。然而, 这种结构的同步性能十分有限, 当一台系统转速突变时, 两台电动机之间存在较大的同步误差。因此, 在对两台电动机转速同步性要求较高的场合, 如分布式电推进系统中, 需要对该结构进行改进以进一步提高其同步性能。

3.3 改进交叉耦合控制设计

滑模控制 (SMC) 由于具有算法简单、响应速度快、对外界噪声干扰具有很强的鲁棒性等优点。该控制策略与其他控制策略最大的不同点在于其系统的结构可以在动态过程中根据系统当前的偏差有目的的不断变换, 从而迫使系统按照预定滑动模态的状态轨迹运动。对应于该双永磁电动机交叉耦合控制系统, 系统的偏差就是两台永磁电动机之间转速的同步误差。因此, 引入 SMC 算法, 设计 SMC 同步控制器取代原先的补偿系数 f_1 及 f_2 , 可以进一步提高该系统的同步性能, 减小两台永磁电动机之间的同步误差。改进后系统的结构框图如图 6 所示。

定义该系统的状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{n1} - \omega_{n2} \\ x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\omega}_{n1} - \dot{\omega}_{n2} \end{cases} \quad (18)$$

式中 ω_{n1} 和 ω_{n2} 分别是电动机 1 和电动机 2 的机械角速度; 忽略摩擦因数后结合电动机运动方程和转矩方程可得

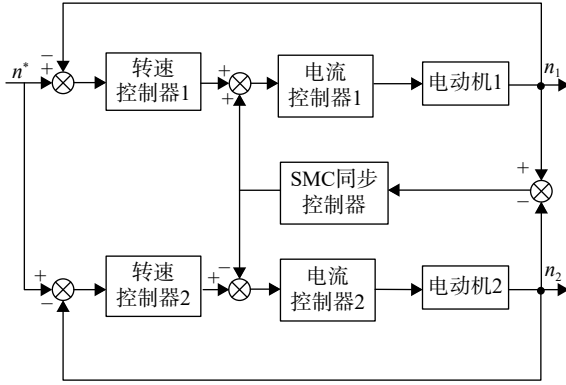


图 6 改进交叉耦合控制结构框图

Fig. 6 Block diagram of improved cross coupling control structure

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{3p\psi_f}{2J} (i_{q1} - i_{q2}) - \frac{1}{J} (T_{11} - T_{12}) \\ \dot{x}_2 = \ddot{x}_1 = \frac{3p\psi_f}{2J} \cdot \frac{d}{dt} (i_{q1} - i_{q2}) \end{cases} \quad (19)$$

定义 $m = \frac{3p\psi_f}{2J}$; $q_{out} = \frac{d}{dt} (i_{q1} - i_{q2})$ 。则

$$\dot{x}_2 = m q_{out} \quad (20)$$

定义滑模面为

$$s_1 = \dot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 \int x_1 dt \quad (21)$$

则

$$\dot{s}_1 = \ddot{x}_1 + k_1 \dot{x}_1 + k_2 x_1 \quad (22)$$

代入式(20)、式(21)可得

$$\dot{s}_1 = m q_{out} + k_1 x_2 + k_2 x_1 \quad (23)$$

在此基础上设计趋近律。指数趋近律可以在远离滑模面阶段以指数级的速度趋近滑模面,而当接近滑模面时,趋近律中的等速趋近项起作用,因此被广泛使用。指数趋近律可以表示为

$$\dot{s}_1 = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s_1) - k s_1 \quad (24)$$

其中 k 和 ε 均为大于 0 的常数。 $-k s_1$ 为指数趋近项、 $-\varepsilon \operatorname{sgn}(s_1)$ 为等速趋近项。通过调节 k 和 ε 的值,即可调节系统的收敛速度和抖振。

然而,当确定好 k 和 ε 的值后,无法根据系统变量与平衡点的距离调节其趋近速度,这会使得当系统变量到达滑模面时抖振现象较为严重。为了减弱滑模控制固有的抖振现象,本文提出了一种改进的指数趋近律,表达式为

$$\dot{s}_1 = -\frac{\varepsilon}{1+\gamma\|x\|_1} \operatorname{sgn}(s_1) - k(1+\gamma\|x\|_1) s_1, \quad \gamma > 0 \quad (25)$$

其中 $\|x\|_1 = \sum_{i=1}^2 |x_i|$ 为状态变量的 1-范数。改进后,当系统的状态变量离平衡点距离较远时, $\|x\|_1$ 较

大,此时指数趋近项起主要作用,由于 $k(1+\gamma\|x\|_1) > k$, 因此改进后的指数项较改进前的指数项的收敛速度更快。当状态变量距离平衡点较近时,由于改进后等速趋近项与改进前相比 $\frac{\varepsilon}{1+\gamma\|x\|_1} < \varepsilon$, 因此可以减弱抖振现象。通过调节参数 γ 的大小即可调节趋近速度和抖振大小。

结合式(23)和式(25),可得

$$q_{out} = -\frac{2J}{3p\psi_f} \cdot$$

$$\left[\frac{\varepsilon}{1+\gamma\|x\|_1} \operatorname{sgn}(s_1) + k_1 x_2 + k_2 x_1 + k(1+\gamma\|x\|_1) s_1 \right] \quad (26)$$

因此, SMC 同步控制器的输出 Δi 为

$$\begin{aligned} \Delta i &= \int_0^t q_{out} dt = i_{q1} - i_{q2} = \\ &= -\frac{2J}{3p\psi_f} \int_0^t \left[\frac{\varepsilon}{1+\gamma\|x\|_1} \operatorname{sgn}(s_1) + k_1 x_2 + \right. \\ &\quad \left. k_2 x_1 + k(1+\gamma\|x\|_1) s_1 \right] dt \end{aligned} \quad (27)$$

接下来对其稳定性进行验证。构造李雅普诺夫函数为^[20]

$$V = \frac{1}{2} s_1^2, \quad s_1 \neq 0 \quad (28)$$

对其求导,得

$$\dot{V}(x) = s_1 \dot{s}_1 =$$

$$\begin{aligned} s_1 \left[-\frac{\varepsilon}{1+\gamma\|x\|_1} \operatorname{sgn}(s_1) - k(1+\gamma\|x\|_1) s_1 \right] = \\ -\frac{\varepsilon s_1}{1+\gamma\|x\|_1} \operatorname{sgn}(s_1) - k(1+\gamma\|x\|_1) s_1^2 \end{aligned} \quad (29)$$

由于 ε 、 k 和 $\gamma\|x\|_1$ 恒大于 0, 因此 $\frac{\varepsilon s_1}{1+\gamma\|x\|_1} \operatorname{sgn}(s_1)$ 恒大于 0, $k(1+\gamma\|x\|_1)$ 也恒大于 0, 因此 $s_1 \dot{s}_1 < 0$, 满足滑模可达性条件。因此,所设计的 SMC 同步控制器是稳定的。

4 仿真实验与分析

为了验证所提出的控制策略,在 MATLAB/Simulink 环境下搭建了仿真模型。由于本文所研究的内容主要是作为分布式电推进飞机双永磁电动机系统控制策略的可行性验证,为了便于在实验室条件下的实验,电动机均采用与实际飞机相比较小功率的永磁电动机。同样地,在仿真中也采用较小功率的永磁电动机。但是,在小功率双永磁电动机系统中本文所提控制策略的仿真和实验结果具有一定的代表性,可以证明该控制策略

的可行性。永磁电动机参数如表1所示。表中, U_n 为永磁电动机的额定电压; ψ_f 为永磁体磁链; R_s 为定子等效两相绕组的电阻; L_s 为定子等效两相绕组的电感。

表1 永磁电动机参数

Table 1 Parameters of permanent magnet motors

U_n/V	$n/(r/min)$	ψ_f/Wb	$p/\text{对}$	R_s/Ω	L_s/mH
24	3 000	0.014 28	2	0.34	0.92

首先对负载观测器的有效性进行仿真验证。仿真工况设计为: 电动机给定转速 2 000 r/min。开始时电动机工作在空载状态下。在 0.2 s 时突加 0.2 N·m 负载, 在 0.4 s 时突卸 0.2 N·m 负载。仿真对比结果如图7所示。其中, 图7(a)为带负载观测器的矢量控制系统(即图3所示系统)与不带负载观测器的矢量控制系统(即图1所示系统)的仿真对比结果; 图7(b)为负载观测器的负载观测值与负载实际值的仿真对比结果。

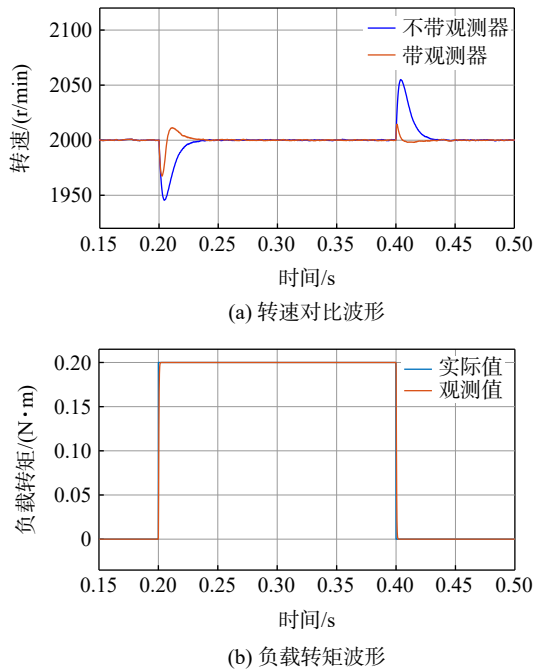


图7 负载观测器仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms of load observer

由以上波形可见, 所设计的负载观测器能够快速且精确的观测到负载转矩, 带该负载观测器的系统在受到负载转矩扰动时, 转速的波动要明显小于不带该负载观测器的系统, 由此可见, 该负载观测器能够提高采用PI转速控制器的永磁电动机矢量控制系统的抗干扰能力。

接着在负载观测器的基础上对所设计的改进交叉耦合控制的有效性进行仿真验证。仿真工况

设计为: 两台电动机给定转速均为 2 000 r/min。开始时两台电动机均工作在螺旋桨负载状态下。在 0.2 s 时电动机 1 突加 0.2 N·m 负载, 0.4 s 时电动机 1 突卸 0.2 N·m 负载。根据空气螺旋桨理论, 螺旋桨负载转矩在其他条件均相同的情况下随着转速的提高而提高。采用传统交叉耦合控制的仿真波形如图8所示, 采用改进交叉耦合控制的仿真波形如图9所示。

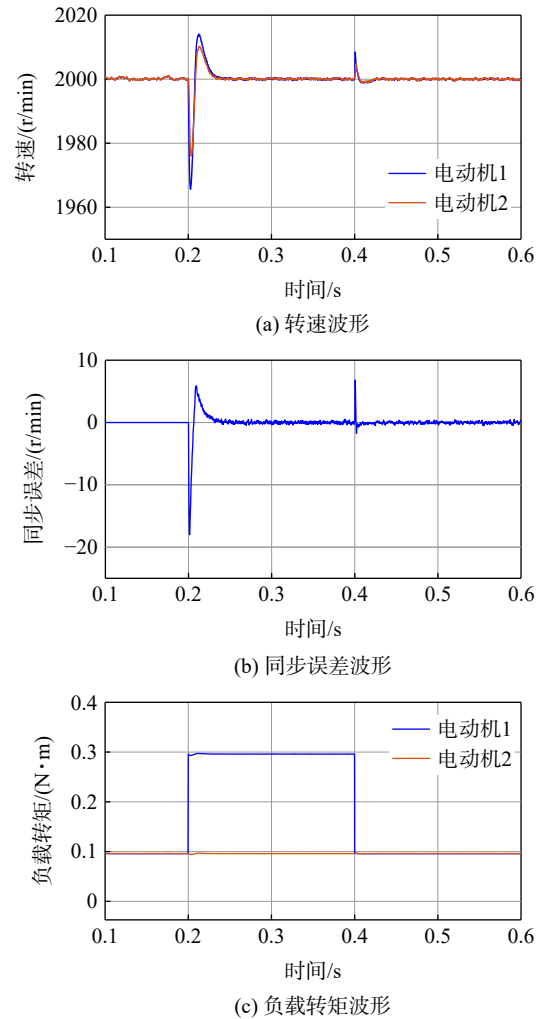
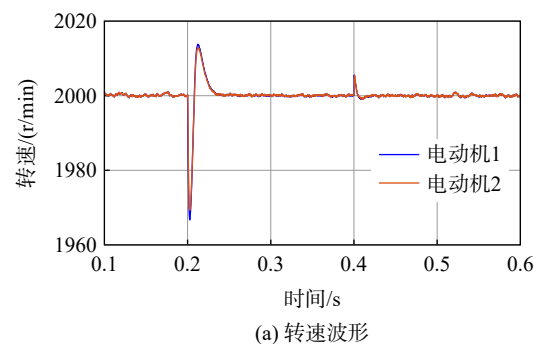


图8 传统交叉耦合控制仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of traditional cross coupling control



(a) 转速波形

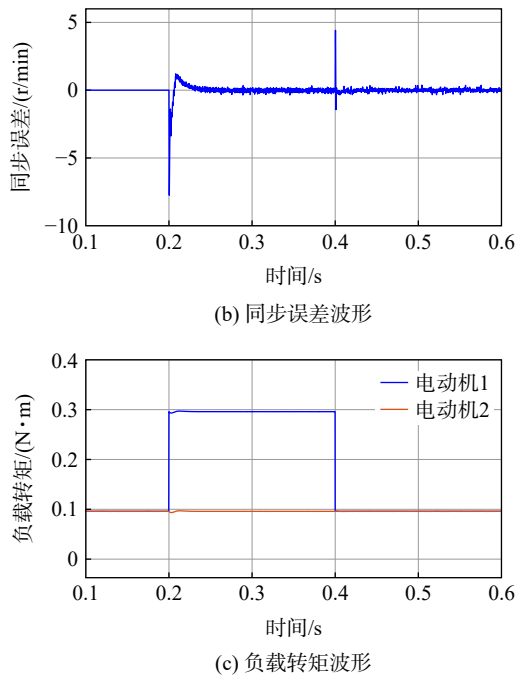


图 9 改进交叉耦合控制仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms of improved cross coupling control

由以上波形可见,当电动机 1 突加 $0.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 负载时,采用传统交叉耦合控制时两台电动机的最大同步误差在 18 r/min 左右,而采用改进交叉耦合控制时两台电动机的最大同步误差只有约 7 r/min ,当电动机 1 突卸 $0.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 负载时,采用传统交叉耦合控制时两台电动机的最大同步误差在 7 r/min 左右,而采用改进交叉耦合控制时两台电动机的最大同步误差只有约 4.5 r/min 。因此,该改进交叉耦合控制能够提高双永磁电动机系统的同步性能。

5 实验验证与分析

在仿真验证的基础上,搭建了实验平台。实验平台如图 10 所示。

实验平台主要由两组永磁电动机对拖平台、上位机以及数字信号处理器(DSP)下载器构成。每组对拖平台由一台推进电动机及其驱动控制器以及一台负载模拟发电机及其驱动控制器构成。推进电动机工作在电动状态,负载模拟发电机工作在发电状态用以模拟螺旋桨负载特性。单组对拖平台的结构图如图 11 所示。图中 T_1^* 为给定转矩。

负载模拟发电机控制方式与推进电动机最大不同之处在于其采用的是转矩外环。其控制框图如图 12 所示。

首先对对拖平台的螺旋桨负载模拟功能进行实验验证。由图 11 可见,负载模拟发电机的给定转矩由推进电动机实际转速经螺旋桨模型计算后得到。因此,想要实现对螺旋桨负载特性的模拟,首先需要得到螺旋桨负载转矩与转速之间的关系。查阅相关资料,得到某型号螺旋桨在一定工作环境下经实验得到的负载转矩与转速的关系曲线如图 13 所示。

将负载模拟发电机的给定转矩按此关系曲线设置。推进电动机从 0 r/min 加速至 2000 r/min ,

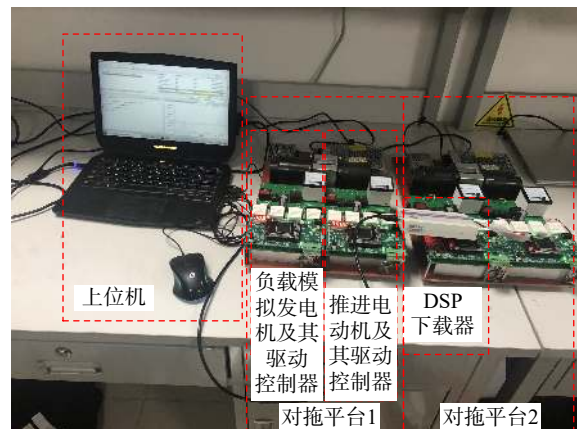


图 10 实验平台

Fig. 10 Experimental platform

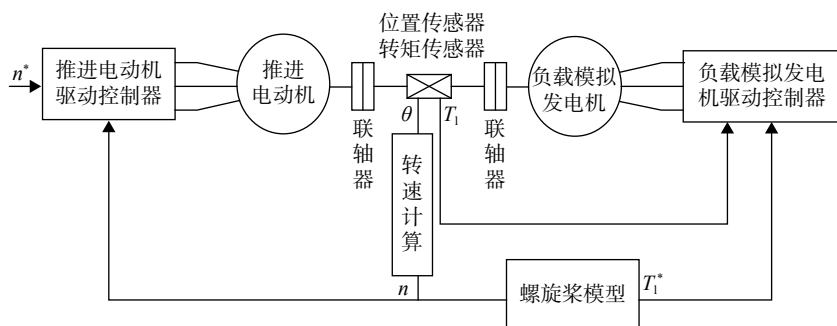


图 11 对拖平台结构图

Fig. 11 Structural diagram of towing platform

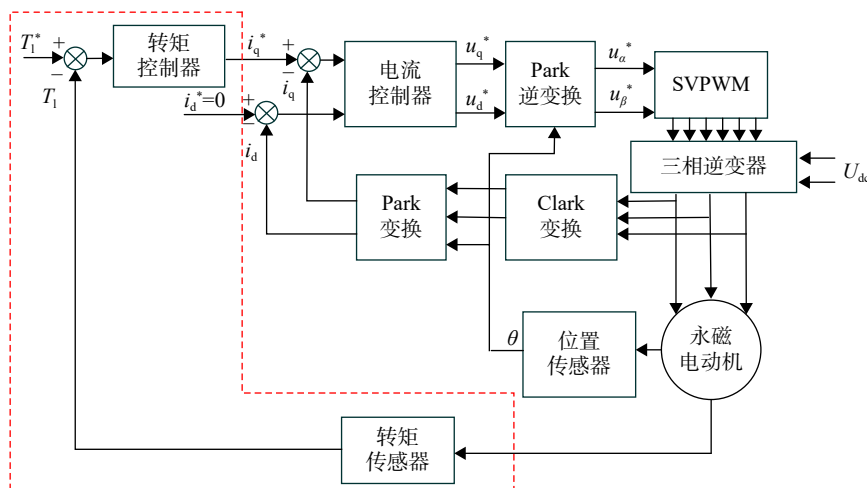


图 12 负载模拟发电机控制框图

Fig. 12 Control block diagram of the load simulation motor

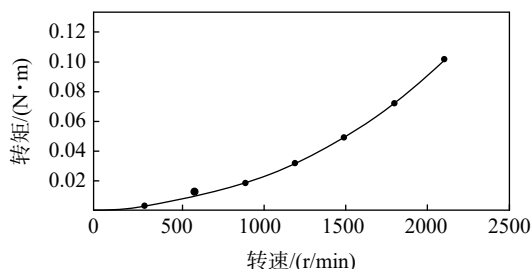


图 13 螺旋桨负载转矩与转速关系曲线

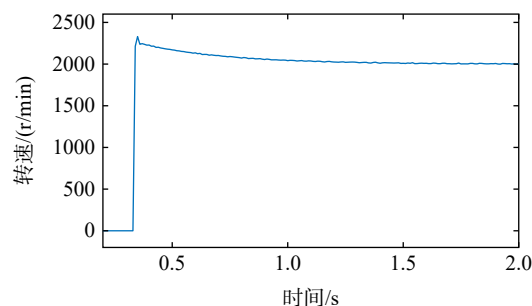
Fig. 13 Relation curve between load torque and speed of propeller

推进电动机转速与负载模拟发电机转矩波形如图 14 所示。

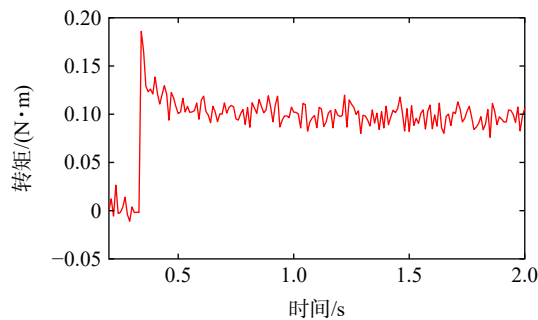
由波形可见, 当推进电动机转速从 0 加速至 2 000 r/min 时, 负载模拟发电机转矩也随之从 0 逐渐提高, 转矩与转速的关系与图 13 的关系曲线基本符合。由此可见, 该对拖平台能够实现螺旋桨负载的模拟。

接着, 对负载观测器的有效性进行实验验证。实验工况设计为: 推进电动机给定转速 2 000 r/min。开始时推进电动机工作在螺旋桨负载状态下。在某一时刻突加 0.2 N·m 负载, 以模拟推进电动机受到负载扰动的情况, 待转速稳定后突卸 0.2 N·m 负载, 即扰动消失。实验对比结果如图 15 所示。

由实验结果可见, 当突加 0.2 N·m 负载时, 不带观测器的永磁电动机矢量控制系统转速突降约 107 r/min, 而带本文所设计的负载观测器的系统转速突降只有 48 r/min 左右; 当突卸 0.2 N·m 负载时, 不带观测器的永磁电动机矢量控制系统转速突升约 102 r/min, 而带观测器的系统转速突升只有 48 r/min 左右。由此可见, 本文所设计的负



(a) 推进电动机转速波形



(b) 负载模拟发电机转矩波形

图 14 对拖平台的螺旋桨负载模拟实验波形

Fig. 14 Experimental waveforms of propeller load simulation on towing platform

载观测器能够有效提高系统的抗干扰能力, 从而降低由负载扰动导致的分布式电推进系统所输出的推力与需求推力不匹配现象。

在此基础上, 验证改进交叉耦合控制策略的可行性。实验工况设计为: 电动机 1 和电动机 2 给定转速均为 2 000 r/min。开始时两台推进电动机均工作在螺旋桨负载状态下。在某一时刻, 电动机 1 突加 0.2 N·m 负载, 以模拟分布式电推进系统中某台推进电动机受到负载扰动的情况, 待转速稳定后, 电动机 1 突卸 0.2 N·m 负载, 即扰动

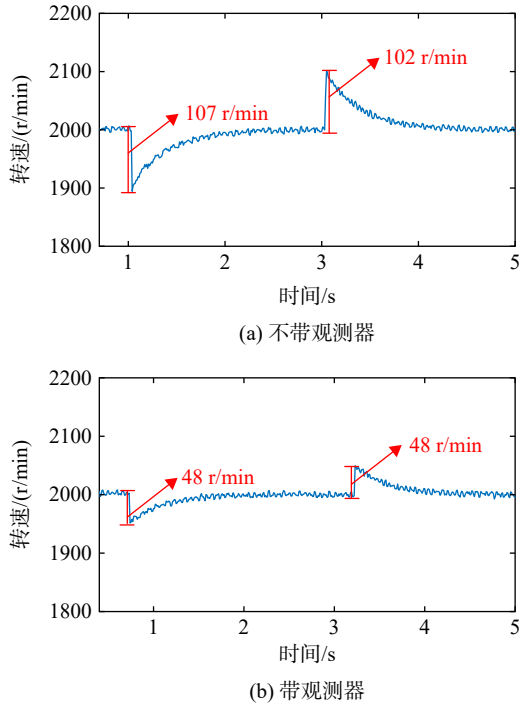


图 15 负载观测器实验波形

Fig. 15 Experimental waveforms of load observer

消失。传统交叉耦合控制的实验结果如图 16 所示。改进交叉耦合控制的实验结果如图 17 所示。

由实验结果可见,在电动机 1 突加 $0.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 负载时,采用传统交叉耦合控制时两台电动机之间存在最大为 24 r/min 的同步误差,而采用改进交

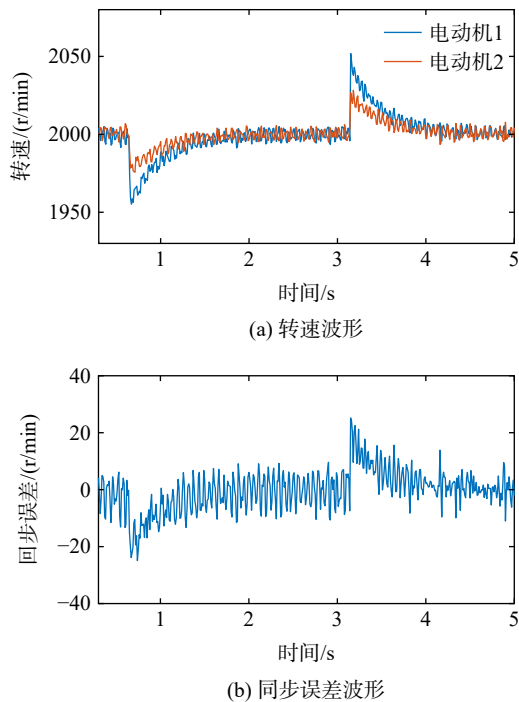


图 16 传统交叉耦合控制实验波形

Fig. 16 Experimental waveforms of traditional cross coupling control

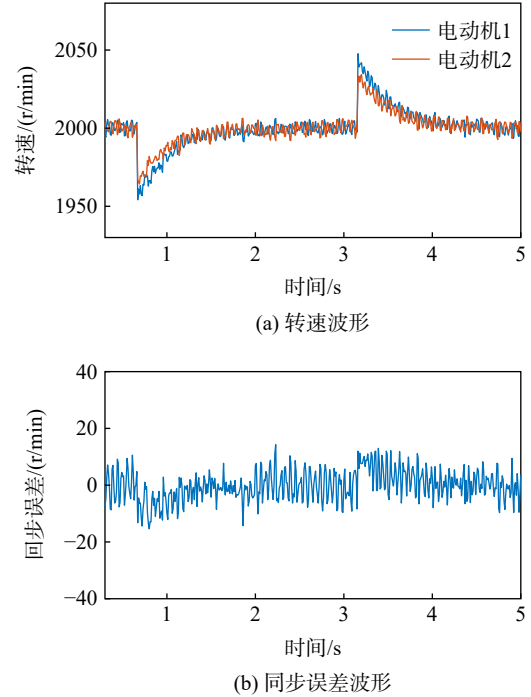


图 17 改进交叉耦合控制实验波形

Fig. 17 Experimental waveforms of improved cross coupling control

叉耦合控制时只有约 15 r/min 的同步误差;在电动机 1 突卸 $0.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 负载时,采用传统交叉耦合控制时的同步误差同样有约 24 r/min ,而采用改进交叉耦合控制时只有约 13 r/min 同步误差。因此,本文所设计的改进交叉耦合控制策略能有效提高系统的同步性能,从而减小因分布式电推进系统中某台电动机因负载扰动引起的转速变化而导致飞机的偏航。

6 结 论

本文以分布式电推进飞机为研究对象,针对分布式电推进飞机左右两侧推进电动机受扰动导致转速突变,进而导致螺旋桨产生推力突变使得推进系统整体输出推力的改变,甚至导致机身左右两侧输出的推力不一致,从而产生偏航力矩使得飞机偏航的问题,提出了一种适用于双永磁电动机系统的改进交叉耦合控制策略。该控制策略在传统的交叉耦合协同控制策略基础上,引入了变趋近律滑模同步控制器。同时针对单台电动机矢量控制系统设计了一种负载观测器,该观测器可直接通过位置传感器测得的电动机转子位置信号为已知量,避免了微分突变的引入。通过仿真和实验证明,得到了以下结论:

1) 采用负载观测器可以提高采用 PI 转速控

制器的永磁电动机矢量控制系统的抗干扰能力, 减少负载突变时的转速波动, 从而降低由负载扰动导致的分布式电推进系统所输出的推力与需求推力不匹配现象;

2) 采用变趋近律滑模同步控制器的改进交叉耦合控制策略可以提高双永磁电动机系统的同步性能, 从而减小因分布式电推进系统中某台电动机因负载扰动引起的转速变化而导致飞机的偏航。

参考文献:

- [1] 黄俊. 分布式电推进飞机设计技术综述[J]. 航空学报, 2021, 42(3): 13-29.
HUANG Jun. Overview of distributed electric propulsion aircraft design technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(3): 13-29. (in Chinese)
- [2] 高明, 余伟臣, 王杉杉, 等. 太阳能无人机能源系统的多维耦合建模[J]. 航空学报, 2021, 42(7): 398-413.
GAO Ming, YU Weichen, WANG Shanshan, et al. Multidimensional coupling modeling of solar UAV energy system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(7): 398-413. (in Chinese)
- [3] 刘沛清. 空气螺旋桨理论及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [4] 周广飞, 侯博川, 杨建华, 等. 基于动态补偿的多电机控制算法[J]. 航空学报, 2020, 41(增刊1): 157-162.
ZHOU Guangfei, HOU Bochuan, YANG Jianhua, et al. Multi motor control algorithm based on dynamic compensation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(Suppl.1): 157-162. (in Chinese)
- [5] 朱炳杰, 杨希祥, 宗建安, 等. 分布式混合电推进飞行器技术综述[J]. 航空学报, 2022, 43(7): 025556.1-025556.17.
ZHU Bingjie, YANG Xixiang, ZONG Jian'an, et al. Overview of distributed hybrid electric propulsion vehicle technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(7): 025556.1-025556.17. (in Chinese)
- [6] 程雪梅. 分布式推力矢量控制在超长航时无人机中的应用[J]. 飞行力学, 2011, 29(6): 72-75.
CHENG Xuemei. Application of distributed thrust vector control in ultra long endurance UAV[J]. Flight Dynamics, 2011, 29(6): 72-75. (in Chinese)
- [7] 金童. 基于自适应周期扰动观测器的永磁同步电机控制系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
JIN Tong. Research on permanent magnet synchronous motor control system based on adaptive periodic disturbance observer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [8] 张博翰. 基于负载转矩补偿的电动汽车永磁轮毂电机矢量控制研究[D]. 江苏 镇江: 江苏大学, 2020.
ZHANG Bohan. Research on vector control of permanent magnet hub motor of electric vehicle based on load torque compensation [D]. Zhenjiang Jiangsu: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)
- [9] 武康. 基于扩张状态观测器的几类不确定非线性系统抗干扰控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
WU Kang. Research on anti disturbance control of several classes of uncertain nonlinear systems based on extended state observer[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [10] LUENBERGER D G. Observing the state of a linear system[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1964(2): 74-80.
- [11] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1980, 102(4): 265-272.
- [12] 郭松. 双永磁同步电机同步协调控制系统研究[D]. 江苏 镇江: 江苏科技大学, 2017.
GUO Song. Research on synchronous coordinated control system of dual permanent magnet synchronous motor[D]. Zhenjiang Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [13] 刘大伟, 高钦和, 陈志翔, 等. 双电机同步交叉耦合PID控制器的设计与试验验证[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 31-35.
LIU Dawei, GAO Qinhe, CHEN Zhixiang, et al. Design and experimental verification of double motor synchronous cross coupling PID controller[J]. Electric Machines and Control Application, 2019, 46(9): 31-35. (in Chinese)
- [14] 李莉, 谷鑫. 双永磁同步电机滑模同步控制仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(9): 331-335, 369.
LI Li, GU Xin. Simulation research on sliding mode synchronous control of dual permanent magnet synchronous motor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 34(9): 331-335, 369. (in Chinese)
- [15] 王飏, 林少军, 柯吉. 带有滑模观测器的永磁同步电机改进型PID控制[J]. 微电机, 2021, 54(7): 66-72, 112.
WANG Biao, LIN Shaojun, KE Ji. Improved PID control of permanent magnet synchronous motor with sliding mode observer[J]. Micromotors, 2021, 54(7): 66-72, 112. (in Chinese)
- [16] 吴航. 基于滑模观测器的表贴式永磁同步电机无位置传感器控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
WU Hang. Research on sensorless control strategy of surface mounted permanent magnet synchronous motor based on sliding mode observer[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [17] HUANG Xianghui, GUAN Penglin, PAN Hongguang, et al. Research on grey predictive control of PMSM based on reduced-order luenberger observer[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021, 16(5): 2635-2646.
- [18] ZAKARIA B, ZINEB K, ABDEIHADI E. Fuzzy improvement on luenberger observer based induction motor parameters estimation for high performances sensorless drive[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, 15(5): 2179-2197.
- [19] 李书领, 段松凯, 李书良. 基于迭代优化的多电机交叉耦合控制方法研究[J]. 电气传动, 2021, 51(7): 46-51.
LI Shuling, DUAN Songkai, LI Shuliang. Research on multi motor cross coupling control method based on iterative optimization[J]. Electric Drive, 2021, 51(7): 46-51. (in Chinese)
- [20] CAO Songyin, LIU Jun, YI Yang. Non-singular terminal sliding mode adaptive control of permanent magnet synchronous motor based on a disturbance observer[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(15): 629-634.

(编辑: 张 雪)