

引用格式:林鲁超,徐开,陈长青,等.单框架控制力矩陀螺转子的稳速控制[J].电光与控制,2019,26(8):95-100. LIN L C, XU K, CHEN C Q, et al. Steady speed control of SGCMG rotor[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(8):95-100.

单框架控制力矩陀螺转子的稳速控制

林鲁超^{1,2}, 徐开^{1,2,3}, 陈长青^{1,2}, 李峰³, 龚泽宇³, 曲直^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130000;

2. 中国科学院大学, 北京 100000; 3. 长光卫星技术有限公司, 长春 130000)

摘要:为满足卫星姿态控制系统对单框架控制力矩陀螺(SGCMG)转子转速的动态以及稳态性能要求,提出了一种基于遗传算法拟双环-锁相环的双模控制方法,并在该方法中引入干扰力矩补偿控制,进而实现干扰情况下的稳速控制。为模拟电流环和转速环控制,利用遗传算法优化两组比例-积分(PI)参数组成参数可变的拟双环控制器,与锁相环组成双模控制可实现转速的快响应、低超调和高精度控制。针对SGCMG框架转动对转子转速产生扰动的问题,分析了扰动产生的原因,推导并结合实验数据得出了框架转速 $\dot{\theta}$ 与干扰力矩 T_d 的关系,在此基础上设计角速率前馈控制器,以力矩补偿的方式对干扰进行抑制。最终,转速波动可抑制到无补偿情况的15%,在期望转速4000 r/min的情况下,转速稳态误差小于0.045%。

关键词:单框架控制力矩陀螺;遗传算法;双环控制;锁相环;框架干扰补偿;转子稳速

中图分类号: TM33 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.08.018

Steady Speed Control of SGCMG Rotor

LIN Lu-chao^{1,2}, XU Kai^{1,2,3}, CHEN Chang-qing^{1,2}, LI Feng³, GONG Ze-yu³, QU Zhi^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun

130000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China;

3. Changguang Satellite Technology Co. Ltd., Changchun 130000, China)

Abstract: To meet the dynamic and steady performance requirements of the satellite attitude control system on the rotor speed of the Single-Gimbal Control Moment Gyro (SGCMG), a dual-mode control method based on genetic algorithm for quasi-dual-loop and phase-locked loop is presented, and the disturbance torque compensation control is introduced to realize the steady speed control of the rotor under interference. To simulate the current loop and speed loop control, the genetic algorithm is used to optimize the two sets of Proportional-Integral (PI) parameters to form a quasi-double loop controller with variable parameters. The dual-mode control consisting of the quasi-double loop controller and the phase-locked loop can realize high-precision control with fast response speed and low overshoot. For the problem that the rotation of the SGCMG frame disturbs the rotor speed, the causes of the disturbance are analyzed. The relationship between the frame speed $\dot{\theta}$ and the disturbance torque T_d is derived by using experimental data. On the basis of the dual-mode controller, the angular rate feedforward controller is designed to suppress the interference in the form of torque compensation, and the fluctuation of the speed can be suppressed to 15% of that under no-compensation conditions. The steady-state error of speed is less than 0.045% when the desired speed is 4000 r/min.

Key words: SGCMG; genetic algorithm; double loop control; phase-locked loop; frame interference compensation; steady speed of rotor

收稿日期:2018-08-20

修回日期:2019-06-02

基金项目:吉林一号超敏捷卫星的分布式控制力矩陀螺可重构技术研究项目(2010204069GX)

作者简介:林鲁超(1993—),男,山东威海人,硕士生,研究方向为卫星姿态控制物理仿真技术。

0 引言

单框架控制力矩陀螺(SGCMG)是一种航天器用高精度姿态控制执行机构。通过驱动飞轮框架转动改变飞轮角动量方向,可以得到大小与框架角速度成正比的控制力矩,输入很小的框架角速度即可得到很大的

控制力矩^[1],这对航天器的姿态控制具有重大意义。

SGCMG 工作时要求陀螺转子保持高精度稳速转动,在受到扰动时转速波动小且转速快速稳定,有良好的动态特性。传统稳速控制主要采用转速、电流双闭环控制,具有良好的启动和抗干扰性能,但这种控制方式在转子控制中存在两种问题:其一,用于大惯量负载速度控制时,稳速系统可能因速度不稳造成震动、谐振、噪声等问题^[2],这将严重影响卫星姿态控制精度;其二,双环控制器实际系统较为复杂,双控制器的参数整定更为困难,故转速、电流双闭环控制难以独立实现转子的高精度稳速控制。基于上述问题,文献[3]提出一种变结构变速积分控制兼顾了飞轮控制系统的动态性能和稳态精度,但该控制方案 0.2% 的稳态精度难以达到 SGCMG 转子的稳速精度要求。随着控制精度要求的不断提高,电子信息领域广泛应用的锁相环(PLL)技术被应用于电机控制领域,其优点是稳速精度高,可达 10^{-4} 量级,但动态响应慢,抗干扰能力差^[4]。由于 PLL 控制具有稳速精度高的特点,目前绝大多数 SGCMG 转子稳速控制都采用 PLL 与其他控制算法相结合的方式实现。文献[5-6]采用电流环和锁相环的双模速度控制,系统具有良好的动态响应性能,可以实现转速高精度稳定,但其难以实现转速的快速稳定;文献[4]提出一种应用于磁悬浮轴承的 SGCMG 转子系统自抗扰-锁相环双模控制方法,可以实现转速的快速稳定与高精度控制,但该方法难以解决在机械轴承支撑的 CMG 转子稳速控制系统中由框架扰动引起的转速波动问题;文献[7]提出一种基于专用锁相环芯片的陀螺飞轮锁相环稳速控制,其具有较高的动态和稳态性能,但同样没有考虑框架扰动带来的问题。针对上述问题,本文研究了一种基于遗传算法(GA)优化的拟双环和锁相环的双模控制方法,并设计控制器对框架转动引起的飞轮转速干扰力矩进行补偿,以实现电机高精度稳定运行。在实际应用中具有良好的转速控制精度和稳定性,具有重要的现实意义。

1 转子稳速控制系统的构成

本文设计的 SGCMG 转子稳速控制系统是由基于 GA 优化的拟双环控制(模式 A)和锁相环控制(模式 B)的双模控制器及干扰力矩补偿控制器组成,如图 1 所示。

其原理是在期望转速点附近设置控制切换带,当系统在启动或受外界未知扰动使转速在切换带外时,控制方式切换为模式 A,利用其动态特性好、无超调的特点使转速快速进入切换带并稳定;当转速误差稳定在切换带内时,控制方式切换为模式 B,使转速进一步

稳定达到高稳定度要求。而对于转子轴系使用机械轴承支撑的陀螺转子稳速控制系统,框架转动过程中势必对稳速系统产生干扰,通过设计角速度前馈干扰力矩补偿控制器对其进行抑制^[8],以防止转速失稳。

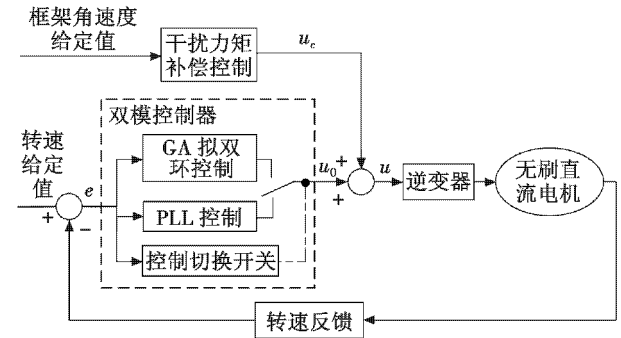


图 1 稳速电机控制系统构成

Fig. 1 Control system of steady speed motor

2 控制系统设计

2.1 基于遗传算法(GA)优化的拟双环控制

转速、电流双闭环控制器的特点是转速和电流可以分别控制,在转速误差较大时保持最大力矩值输出,以最快的速度使转速跟上给定值;而在转速接近给定值时,系统转矩自动减小,以避免转速超调过大^[9],但这种控制方式的实际系统较为复杂,且双控制器的参数整定更为困难。在目前的 PID 参数寻优方法中,单纯型法、Z-N 调节法^[10-11]等基于特定的经验公式,整定精度低,在复杂系统的参数整定中难以获得良好的效果;而遗传算法作为一种全局寻优的优化方法,具有对初始信息依赖小、快速高效寻优等优点,对于参数整定有很好的效果。为此,本节设计基于 GA 优化的拟双环控制以实现转速、电流双闭环控制功能。

基于 GA 优化的拟双环控制是一种控制参数可变的 PI 控制器。首先优化整定出一组参数用于系统启动或大误差状态,使系统具有电流环保持最大力矩值输出的能力,而在转速接近期望转速时使用优化整定的另一组参数使系统快速稳定。

2.1.1 无刷直流电机控制系统数学模型

根据无刷直流电机运行的物理规律,给出被控电机的数学模型为

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (1)$$

$$e(t) = K_e w(t) \quad (2)$$

$$T_e(t) = K_t i(t) = T_d(t) + J \frac{dw(t)}{dt} \quad (3)$$

式中: $u(t)$ 为电机相电压; R 为电枢电阻; L 为电枢电感; $i(t)$ 为相电流; $e(t)$ 为反电动势; K_e 为反电势系数;

$w(t)$ 为转子角速度; $T_e(t)$ 为电磁平均转矩; K_t 为转矩系数; $T_d(t)$ 为干扰力矩; J 为电机转动惯量。

求解式(1)~式(3), 并对结果进行拉氏变换就得到电机控制的数学模型为

$$W_m(s) = \frac{K_t}{JLs^2 + JRs + K_e K_t} \quad (4)$$

由式(4)得 PI 控制电机模型如图 2 所示。

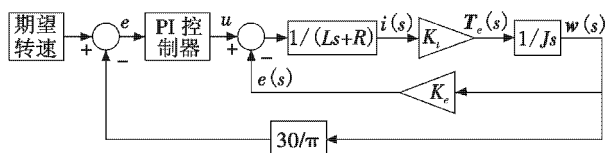


图 2 PI 控制电机模型

Fig. 2 PI control motor model

2.1.2 基于遗传算法的 PI 控制参数整定

在遗传算法中, 适应度函数的设计, 即评价指标的选择, 是影响优化效果的关键因素^[12]。对系统输入阶跃信号, 在权衡了控制系统的快速性、准确性和稳定性等控制因素后, 设计拟电流环适应度函数和拟转速环适应度函数分别为

$$J_1 = w_1 \int_0^{t_c} [0.002 - i(t)]^2 dt + w_2 t_s \quad (5)$$

$$J_2 = w_3 \int_0^\infty e^2(t) dt + w_4 \int_0^\infty u^2(t) dt + w_5 \sigma_p + w_6 t_s \quad (6)$$

式中: t_c 为期望加速时间; w_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) 为加权值, 根据对控制效果的要求选取; $(0.002 - i(t))$ 为系统的限定电流值与系统实际电流的差值函数; $e(t)$ 为误差函数; $u(t)$ 为控制量函数; σ_p 为超调量; t_s 为调整时间。

首先, 采用 Z-N 调节法则对控制器的参数进行整定, 得到 PI 控制参数分别为 $K_p = 1.35$, $T_i = 0.0006173$ 。在此基础上, 利用 GA 搜索拟电流环、拟转速环 PI 参数的最优值。通过选择适当的加权值, 并经过遗传算法 2000 代的优化过程后得到了最终结果: 拟电流环 $K_p = 0.00216$, $T_i = 0.00594$; 拟转速环 $K_p = 9.268$, $T_i = 0.795$ 。

2.2 锁相环控制器

SGCMG 转子在高精度稳速阶段采用 PLL 控制器。PLL 技术也称作自动相位控制技术, 是一种能够实现系统输出信号相位跟踪输入信号相位的技术, 主要由鉴频鉴相器 (PFD)、环路滤波器 (LF) 和压控振荡器 (VCO) 组成。PFD 给出参考频率和反馈频率的相位差, 同时还用作频率控制, 根据频差和相差给出对应控制的信号。LF 用于滤除控制信号中的高频成分并作为超前校正环节改善环路性能, 其输出 u_c 控制 VCO 的输出频率向参考频率靠近, 直至消除频差而锁定。与电子锁相环不同的是, 这里的 VCO 由无刷直流电机、

功率放大器共同组成。PLL 系统如图 3 所示。

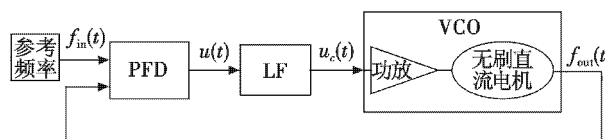


图 3 PLL 系统框图

Fig. 3 PLL system

该系统采用电机控制专用锁相环芯片 UC3633, PFD 是一个数字电路, 可响应两个输入信号的上升沿。当输入之间存在频差时, 系统进入频率捕获阶段, 若参考频率更高, 则 PFD 输出高电平 (5 V), 使电机进行加速; 反之, PFD 输出低电平 (0 V), 使电机进行减速。当两输入信号具有微小频差时, 系统进入相位捕获阶段, 锁相环对输入信号进行相位调整, 其鉴相范围为 $[-2\pi, 2\pi]$, PFD 根据两个信号的相对相位使输出平均值处于 $0 \sim 5$ V 之间某一值附近波动, 维持电机工作于预定转速。PFD 工作特性如图 4 所示。

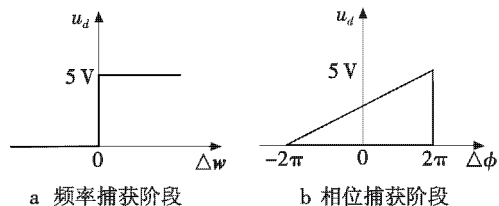


图 4 PFD 工作特性图

Fig. 4 Performance chart of PFD

实际使用中, 将电机一路霍尔信号输送给 PFD, 参考频率设为 800 Hz (对应的电机转速为 4000 r/min)。LF 输出的控制信号经过 DSP 的 AD 转换后, 产生脉宽调制信号 (PWM), 经过逆变桥各功率管放大后, 对电机转速进行控制。

2.3 框架转动引起的转子转速干扰补偿控制

SGCMG 工作时, 伺服系统驱动框架转动, 强制转子角动量方向发生改变以输出力矩。SGCMG 系统如图 5 所示。由于姿控平台须具有快速机动能力, 框架进行高动态响应时转子角动量方向快速改变将对转子轴承产生额外的径向载荷, 其引起的干扰极易使 PLL 控制失锁, 转子转速失稳、震荡, 这将严重影响系统的稳定性和输出力矩精度。

本节针对框架转动对转子转速的干扰, 设计一种角速率前馈控制器, 以力矩补偿的形式对干扰进行抑制, 并进行实验验证。如图 5 所示: 转子沿 y 轴对称, 设转子的赤道转动惯量为 J_r , 极转动惯量为 J_z , 转子绕自转轴的角速度为 w , 则转子角动量为 $H = J_z w$ 。框架轴相对惯性空间转动的转角为 θ , 相应的角速度和角加速度分别为 $\dot{\theta}$ 和 $\ddot{\theta}$ 。

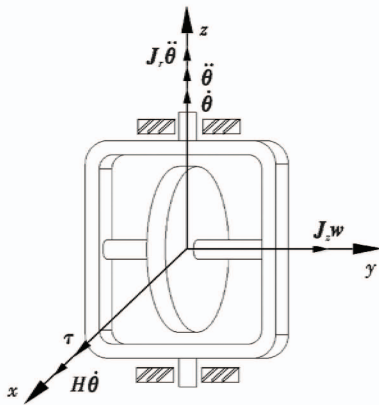


图 5 SGCMG 系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of SGCMG system

当转子绕框架轴转动具有角加速度 $\ddot{\theta}$ 时,产生转动惯性力矩 M_I ,其方向与角加速度的方向相反,表达式为

$$M_I = -J_r \ddot{\theta} \quad (7)$$

由于转子具有角动量 H ,当转子绕框架轴以角速度 $\dot{\theta}$ 转动时,产生陀螺力矩 M_c ,其表达式为

$$M_c = H \dot{\theta} \quad (8)$$

绕框架轴作用在高速转子上的外力矩设为 M ,因此飞轮绕框架轴的力矩平衡方程为

$$M = J_r \ddot{\theta} + H \dot{\theta} \quad (9)$$

为简化扰动模型,可忽略式(9)中的 $\dot{\theta}$ 项。因为 SGCMG 框架角加速度 $\ddot{\theta}_{\max} = 30 \text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}^2$,其引起的附加力矩为 $0.0298 \text{ N} \cdot \text{m}$,这对于 SGCMG 样机 $2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的额定输出力矩是十分微小的,故可忽略。因此,由框架转动引起的轴承径向载荷及其引起的干扰力矩分别为

$$F = \frac{M}{l} = \frac{H \dot{\theta}}{l} \quad (10)$$

$$T_d = \alpha F d \quad (11)$$

式中: l 为转子质心到轴承中心的距离; α 为摩擦系数; d 为轴承内圈半径。由此可以得到框架角速度与干扰力矩的关系为

$$T_d = \frac{\alpha H \dot{\theta} d}{l} \quad (12)$$

由于摩擦系数 α 难以直接测得,而通过实验易得特定框架角速度 $\dot{\theta}$ 下飞轮开环转速的变化情况,即 $\dot{\theta}$ 与转子角速度 $\dot{\omega}$ 的对应关系。根据 $T_d = J_r \dot{\omega}$,可以避免求解摩擦系数 α 转而直接得到 $\dot{\theta}$ 与干扰力矩 T_d 的对应关系。

在转子稳速状态下,使框架以特定角速度 $\dot{\theta}$ 转动,记录转子转速变化情况,观察转速变化曲线发现 $\dot{\omega}$ 近似为常数,故设在特定 $\dot{\theta}$ 下 T_d 为常量。对每种状态下

的干扰力矩测量 10 次求均值,由此得到 $\dot{\theta}$ 与 T_d 的对应关系如表 1 所示。

表 1 框架转速与干扰力矩的对应关系

Table 1 Relationship between frame speed and disturbance torque

| SGCMG 输出力矩 $T/(\text{N} \cdot \text{m})$ | 框架角速度 $\dot{\theta}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ | 飞轮干扰力矩 $ T_d /(\text{N} \cdot \text{m})$ |
|---|--|---|
| 0.1875 | 0.0373 | 0.0502 |
| 0.375 | 0.0746 | 0.0862 |
| 0.75 | 0.1492 | 0.1188 |
| 1.125 | 0.2238 | 0.1278 |
| 1.5 | 0.2984 | 0.1295 |
| 2.0 | 0.4014 | 0.1365 |

对得到的 $\dot{\theta}$ 和 T_d 数据进行拟合,得到

$$T_d = \begin{cases} 0 & |\dot{\theta}| < 0.037 \\ -11.5 * |\dot{\theta}|^4 + 15.9 * |\dot{\theta}|^3 - 7.7 * |\dot{\theta}|^2 + 1.643 * |\dot{\theta}| - 0.0002557 & |\dot{\theta}| \geq 0.037 \end{cases} \quad (13)$$

根据实验,当 $\dot{\theta}$ 小于 0.037 rad/s 时, T_d 很小且 PLL 控制器可以克服扰动而不失锁,故 T_d 设为 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

设计框架干扰力矩补偿系统如图 6 所示, G_p 为锁相环控制器, G_m 为电机, G_c 为框架干扰补偿控制器, K_z 为框架角速度与干扰力矩对应关系, K_n 为前馈系数,用于在实际控制时缩小数学模型与实际系统的控制误差。

由完全补偿条件有

$$K_z + G_c(s) \frac{J_r K_r s}{(Ls + R) J_r s + K_r K_t} = 0 \quad (14)$$

则有框架干扰补偿控制器

$$G_c(s) = -\frac{K_z [(Ls + R) J_r s + K_r K_t]}{J_r K_r s} \quad (15)$$

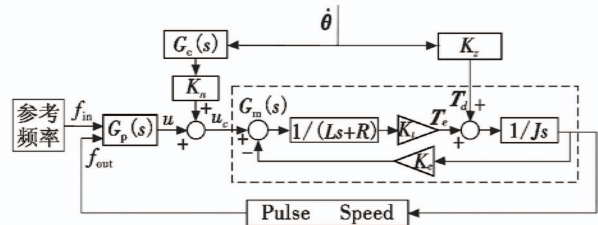


图 6 干扰力矩补偿控制

Fig. 6 Disturbance torque compensation control

3 实验结果及分析

利用 SGCMG 进行了实验研究,检验了稳速系统在实际工作状态下的稳速性能,采用 DSP28335 作为系统主控制器, UC3633 作为锁相环控制芯片。转子稳速系统主要参数如表 2 所示。

表 2 转子稳速系统主要参数
Table 2 Main parameters of steady speed system of the rotor

| 参数名称 | 参数值 |
|---|---------|
| 电枢电阻 R/Ω | 1.1 |
| 电枢电感 L/H | 0.001 1 |
| 转矩系数 $K_t/(N \cdot m \cdot A^{-1})$ | 0.108 |
| 反电势系数 $K_e/(V \cdot r \cdot min^{-1} \cdot s^{-1})$ | 0.054 |
| 电机极对数 P | 12 |
| 框架最大角速度 $\dot{\theta}_{max}/(rad \cdot s^{-1})$ | 0.401 4 |
| 框架最大角加速度 $\ddot{\theta}_{max}/(rad \cdot s^{-2})$ | 0.523 6 |
| 转子极转动惯量 $J_z/(kg \cdot m^2)$ | 0.012 |
| 转子赤道转动惯量 $J_x/(kg \cdot m^2)$ | 0.005 7 |
| 转子额定转速 $n/(r \cdot min^{-1})$ | 4000 |
| 转子角动量 $H/(N \cdot m \cdot s)$ | 5 |
| 最大输出力矩 $T/(N \cdot m)$ | 2 |

给定期望转速 4000 r/min, 转子升速曲线与临界捕获状态如图 7 所示, 在启动阶段, 系统采用基于 GA 优化出的两组 PI 参数组成的拟双环控制, 实现了大力矩输出与小超调、快速稳定的要求。从系统锁相环临界捕获时的放大图(图 7b)可以看出, 系统转速最终稳定在 4000 r/min 附近, 系统速度误差处于较小的波动范围内, 其速度精确度优于 0.015%。

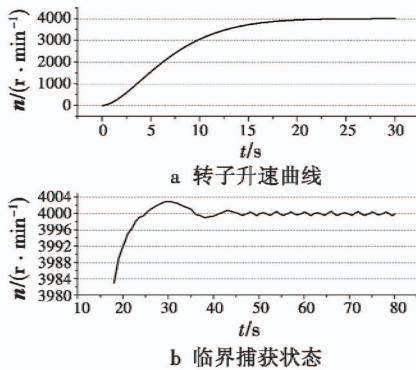


图 7 转子升速曲线与临界捕获状态

Fig. 7 Rotor speed curve and critical capture state

补偿控制系统依赖系统模型, 因此实际系统中的非理想因素(主要是角速率滤波和模型误差)将影响前馈补偿的效果。经大量实验, 在实际系统中选取低通滤波器为二阶, 截止频率为 230 Hz, 前馈系数为 1.2, 可以得到比较好的补偿效果。实验时, 飞轮初始转速为 4000 r/min, 在 20 s 时框架角速度从 0 rad/s 起以角加速度 0.02 rad/s^2 加速到 0.4 rad/s 后稳速转动。观察无补偿和有补偿状态下飞轮转速的变化情况。无干扰补偿状态如图 8 所示, 转速波动很大, 振幅达到 20 r/min, 转速的波动将严重影响 CMG 的力矩输出精度。加入干扰补偿状态如图 9 所示, 转速误差减小到无补偿状态下的 15%。

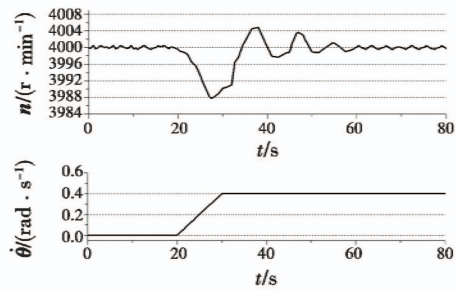


图 8 无干扰力矩补偿状态转速曲线

Fig. 8 Speed curve with no disturbance torque compensation

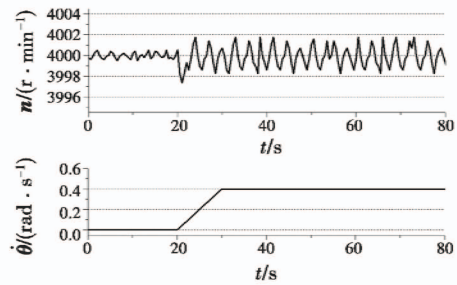


图 9 有干扰力矩补偿状态转速曲线

Fig. 9 Speed curve with disturbance torque compensation

从实验结果中可以看出, 角速度前馈补偿控制抑制了框架转动带来的扰动, 提高了飞轮转速的稳定度, 也说明了飞轮转子对框架系统存在反作用。

4 结论

本文提出了一种基于遗传算法的拟双环—锁相环的双模控制方法, 并在该方法中引入干扰力矩补偿控制。在拟双环模式下可以将 SGCMG 转子转速快速稳定到锁相范围内, 在 PLL 模式下可对转速实现高精度稳定。在机械轴承支撑的 SGCMG 转子系统中, 框架转动将对转子转动产生扰动, 影响系统的稳定性。干扰力矩主要取决于与 $\dot{\theta}$ 相关的陀螺力矩, 因而在双模控制器的基础上, 设计基于角速度前馈的干扰力矩补偿控制器抑制框架转动带来的扰动, 实验结果验证了该方法可以将转速波动减小到较为理想的程度, 满足应用需求。

考虑到 SGCMG 实际工作时转子转速波动主要由框架扰动引起, 因此, 若框架机动速度情况不变, 通过对某一固定转速下的干扰力矩 T_d 参数重新拟合得到对应补偿控制参数, 即可实现对任意转速的稳速控制。但在工程应用中, 当转子转速较低(小于 2500 r/min)时, 框架转动引起轴承载荷变化带来的干扰力矩 T_d 难以得到准确测量值, 该补偿控制方案难以对干扰力矩进行抑制。该项目对 2500 ~ 5000 r/min 转子转速进行实验时, 稳速方案基本可以达到 4000 r/min 的稳速精度。

参 考 文 献

- [1] 杨凤闹,徐开,李峰. 基于能耗约束的控制力矩陀螺可重构性分析[J]. 电光与控制,2017,24(3):77-80.
- [2] 徐春雷,韩长远. 基于锁相环和双模速度双重控制的永磁无刷直流电机的研究[J]. 电气传动自动化,2016,38(1):21-24.
- [3] 武俊峰,吴一辉,安静,等. 姿控飞轮变结构变速积分控制的实现[J]. 光学精密工程,2010,18(1):149-155.
- [4] 王灿,刘刚,王志强. 一种永磁无刷直流电机自抗扰-锁相环双模控制方法[J]. 微电机,2010,43(1):33-37.
- [5] 张利,房建成,刘刚. 有位置传感器无刷直流电机双模速度控制系统[J]. 微电机,2004,37(3):33-36,48.
- [6] 姚嘉,刘刚,房建成. 控制力矩陀螺用高速高精度无刷直流电机控制系统[J]. 微计算机信息,2005,15(3):3-5.
- [7] 张佳为,赵辉,马克茂. 陀螺飞轮的锁相环稳速控制[J]. 电机与控制学报,2010,14(12):86-90,95.
- [8] CUI P L, YAN N. Research on modeling of the agile satellite using a single gimbal magnetically suspended CMG and the disturbance feedforward compensation for rotors[J]. Sensors, 2012, 12(12):16964-16987.
- [9] 杨鹏,王飞,贾春奇,等. 无刷直流电机闭环控制仿真系统的研究[J]. 微电机,2013,46(11):76-78.
- [10] MILLAN P, ORIHUELA L, BEJARANO G, et al. Design and application of suboptimal mixed H_2/H_∞ controllers for networked control systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(4):1057-1065.
- [11] LEE J D, KHOO S Y, WANG Z B. DSP-based sliding-mode control for electromagnetic-levitation precise-position system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2):817-827.
- [12] 刘成颖,刘龙飞,孟凡伟,等. 基于遗传算法的永磁直线同步电机伺服系统参数设计[J]. 清华大学学报:自然科学版,2012,52(12):1751-1757.
- (上接第 94 页)
- [4] 刘英,黄军玲,谢家雨. 直升机平台孔缝耦合仿真分析[J]. 电光与控制,2016,23(4):101-104.
- [5] 胡溥宇,赵昱,杨锦鹏,等. 任意平面波辐照下开孔矩形腔体屏蔽效能快速计算方法[J]. 电工技术学报,2018,33(15):3651-3660.
- [6] 彭强,周东方,侯德亭,等. 带缝隙矩形腔的屏蔽效能传输线法修正及扩展分析[J]. 强激光与粒子束,2013,25(9):2355-2362.
- [7] 汪柳平,高攸纲,沈远茂,等. 装有 PCB 有孔矩形腔屏蔽效能的传输线法分析[J]. 电波科学学报,2008,23(4):740-744.
- [8] 毛湘宇,杜平安,聂宝林. 基于 TLM 的机箱孔缝电磁屏蔽效能数值分析[J]. 系统仿真学报,2009,21(23):7493-7497.
- [9] 范杰清,郝建红,柴培华. 基于扩展传输线法的异型腔电场屏蔽效能[J]. 电工技术学报,2014,29(5):228-232,238.
- [10] 马银才,张兴媛. 航空机载电子设备[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
- [11] 田东,陈少昌. 复杂矩形腔屏蔽效能分析[J]. 电光与控制,2010,17(10):93-96.
- [12] ROBINSON M P, BENSON T M, CHRISTOPOULOS C, et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(3):240-248.
- [13] KRAFT C H. Modeling leakage through finite apertures with TLM [C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1994:73-76.
- [14] 杨正桃. 民用和军用飞机机载电子设备电磁兼容性要求比较[J]. 计算机工程应用技术,2009(7):124-125.
- [15] GONSCHOREK K H. 设备设计与系统集成的电磁兼容[M]. 杨自佑,崔强,译. 北京:机械工业出版社,2014.
- [16] 杨楠. 双层加载电路板屏蔽腔屏蔽效能研究[J]. 现代电子技术,2013,36(22):5-9.
- [17] GUPTA K C, GARG R, BAHL I, et al. Microstrip lines and slotlines[M]. Norwood, MA: Artech House, 1979.
- [18] 魏光辉,李凯,潘晓东,等. 含孔缝金属腔体电磁场增强效应的形成机理仿真[J]. 高电压技术,2014,40(6):1637-1643.
- [19] HU T, CHEN D, FOROUSHIAN F, et al. Shielding effectiveness analysis and modification of the coupling effect transmission line method on cavities with multi-sided apertures[J]. Electronics, 2018, 52(7):1-14.
- [20] 罗静雯,杜平安,任丹,等. 一种基于 BLT 方程的孔缝箱体屏蔽效能计算方法[J]. 物理学报,2015,64(1):010701-1-010701-8.