

引用格式:朱海荣,张先进,师阳,等.基于PMSM的舰载光电跟踪系统设计[J].电光与控制,2019,26(11):80-84,104. ZHU H R, ZHANG X J, SHI Y, et al. Design of a ship-based electro-optical tracking system based on PMSM[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(11):80-84, 104.

基于PMSM的舰载光电跟踪系统设计

朱海荣¹, 张先进¹, 师阳¹, 李奇²

(1. 江苏工程职业技术学院机电学院, 江苏南通 226014; 2. 东南大学自动化学院, 南京 210096)

摘要:设计了一种永磁同步电机驱动的舰载光电跟踪系统,利用光纤陀螺实时检测光电跟踪器的运动状态,由永磁同步电机通过齿轮间接驱动光电跟踪系统,使其在惯性空间保持稳定。不同于陆基光电跟踪系统,舰船受风浪影响所产生的摇摆运动会耦合到舰载光电跟踪系统,对其跟踪性能产生较大的影响。为了减小舰船摇摆带来的影响,降低齿轮间隙、死区、摩擦、系统模型失配等扰动的影响,设计了舰载光电跟踪系统的干扰观测器(DOB),利用DOB观测出包括舰船摇摆所造成的各种扰动,将其作为补偿信号前馈到控制输入端,减小非线性扰动对系统的影响。实验结果表明,该方法能提高光电跟踪伺服控制单元的抗干扰能力,有效提升系统的控制性能。

关键词:舰载光电跟踪系统; 永磁同步电机; 非线性干扰; 干扰观测器; 扰动补偿

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.11.017

Design of a Ship-Based Electro-Optical Tracking System Based on PMSM

ZHU Hai-rong¹, ZHANG Xian-jin¹, SHI Yang¹, LI Qi²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangsu College of Engineering and Technology, Nantong 226014, China;

2. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A ship-based Electro-Optical Tracking System (EOTS) driven by PMSM through gear system is designed to reduce the effect of ship-swaying caused by winds and waves. The fiber optic gyroscope is used to detect the motion state of EOTS in real time, and the EOTS is stabilized relative to inertial space by servo control unit. Unlike the land-based EOTS, the swaying motion of a ship caused by winds and waves is coupled to the ship-based EOTS, which has a great impact on its tracking performance. A Disturbance Observer (DOB) of the ship-based EOTS is designed to reduce the effect caused by ship swaying, and of the disturbances of backlash, dead zone, friction, system model mismatch, etc. The DOB is introduced to estimate the lumped disturbances of the system, and the estimated value is used in the feed-forward compensation design to improve the disturbance rejection ability. The experimental results show that the proposed scheme can ensure good anti-disturbance ability, which can enhance the control performance of the system.

Key words: ship-based EOTS; PMSM; nonlinear disturbance; disturbance observer; disturbance compensation

0 引言

光电跟踪系统(EOTS)需要实现目标搜索和目标跟踪两个功能,目标搜索时要求跟踪器按预定指令运

动,直至搜索到目标;探测到目标以后,要求光电跟踪器对其实现稳定的跟踪。上述两种工作模式都要求尽量减小光电跟踪器的抖动,以提高跟踪性能。舰船在航行中会受风浪影响,由此产生的摇摆运动会耦合到舰船上的光电跟踪系统,此外,海面上不断变化的风阻力矩也会对光电跟踪系统造成较大的影响,导致舰载光电跟踪系统的控制难度远大于陆基光电跟踪系统,需要专门设计控制系统,以降低舰船摇摆对光电跟踪系统造成的影响。舰载光电跟踪系统的工作原理为:利用光纤陀螺敏感光电跟踪器在惯性空间的运动状

收稿日期:2018-12-11

修回日期:2019-02-26

基金项目:国家自然科学基金(51307089);江苏省高校青蓝工程项目;南通市重点实验室(CP12015007);南通市基础科学研究项目;江苏工程职业技术学院自然科学研究项目(GYKY/2018/2)

作者简介:朱海荣(1979—),男,江苏张家港人,博士,副教授,研究方向为精密伺服控制系统。

态,由永磁同步电机(PMSM)实时驱动光电跟踪器反向运动,使其在惯性空间保持稳定^[1-2]。

在舰载光电跟踪系统这一类伺服系统中,仍然以“PID + 智能控制”的复合控制方法为主,这些进化的 PID 控制策略不依赖系统的精确数学模型,当系统参数和外部环境变化缓慢时,可以得到较好的控制性能^[3-4]。对于舰载光电跟踪系统来说,除了舰船摇摆造成的耦合影响,还存在风阻力矩、轴系摩擦、质量不平衡力矩、线缆约束、舰船振动等非线性扰动的影响,扰动力矩的补偿也成为专家学者研究的热点。刘京等提出了基于干扰观测器的电流环自适应滑模控制方法,提高了 PMSM 转速伺服系统的鲁棒性和动态响应性能,同时可有效抑制滑模控制系统的抖振^[5];晋超琼等提出了一种基于 Luge 摩擦模型与干扰观测器(DOB)相结合的干扰补偿控制方案,提高了航空光电稳定平台的抗干扰能力^[6];刘丙友等提出一种基于改进型自抗扰控制技术的新颖位置角控制策略,实现了对 PMSM 转子位置角的快速、精确控制^[7];邓永停等提出了基于扰动力矩观测器的力矩补偿方法,增强了大口径望远镜跟踪架伺服控制系统的抗扰动性能,提高了低速跟踪精度^[8]。基于 PMSM 本文设计了一种舰载光电跟踪系统,提出了基于干扰补偿的控制策略,利用干扰观测器观测出舰载光电跟踪系统的扰动,将其作为补偿信号前馈到控制输入端,有效提高了光电跟踪系统的抗干扰能力。

1 系统工作原理

对于负载较小的光电跟踪系统,可以采用力矩电机直接驱动,装置小巧紧凑;对于大型负载,就需要使用大功率直流力矩电机,但其体积庞大、安装不便。利用 PMSM 经过齿轮系间接驱动的方式可以很好地解决这个问题,图 1 为其结构示意图。其中: θ_m 是俯仰轴 PMSM 的转角; θ_l 是光电跟踪器在俯仰方向的转角; θ_b 是舰船在俯仰方向摇摆的角度。

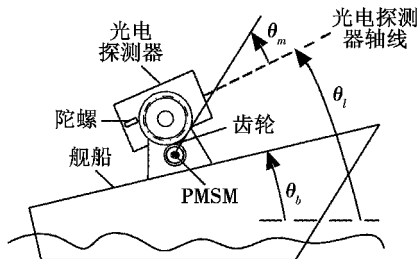


图 1 舰载光电跟踪系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of ship-based EOTS

图 1 中,舰船在风浪作用下各个方向的摇摆均会经过齿轮系耦合到光电跟踪器,需要通过伺服控制单元使光电跟踪器在方位、俯仰和横滚 3 个方向产生对

应的反方向运动,对舰船摇摆的影响进行补偿。以俯仰轴为例,其系统框图如图 2 所示。其中: $\dot{\theta}_m(s)$ 是给定信号; n 为齿轮减速比; T_{dl} 为作用于光电跟踪器支撑轴承的干扰力矩; T_{dm} 为作用于电机转轴的干扰力矩; J_l 为负载的转动惯量; J_m 为电机转轴的转动惯量; G_c 为电流环控制器; G_g 为陀螺传递函数。

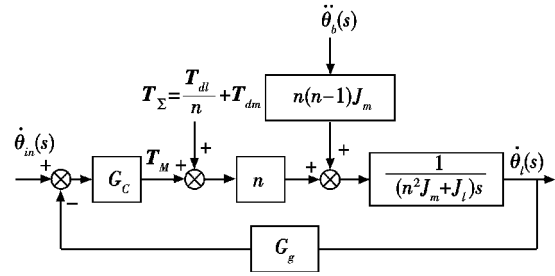


图 2 舰载光电跟踪控制系统框图

Fig.2 Block diagram of ship-based EOTS

PMSM 转轴和光电跟踪器支撑轴的动力学平衡方程为

$$J_m \ddot{\theta}_m = T_M - rF + T_{dm} \tag{1}$$

$$J_l \ddot{\theta}_l = RF + T_{dl} \tag{2}$$

式中: T_M 是 PMSM 的输出转矩; F 为啮合齿轮之间的相互作用力; r 为电机转轴齿轮半径; R 为光电跟踪器支撑轴承齿轮半径,减速比 $n = R/r$ 。

负载、电机和舰船间的角度关系为

$$\begin{cases} \theta_l = \theta_{l/b} + \theta_b \\ \theta_m = \theta_{m/b} + \theta_b \\ \theta_{m/b} = n\theta_{l/b} \end{cases} \tag{3}$$

式中: $\theta_{l/b}$ 是光电跟踪器相对舰船的转角; $\theta_{m/b}$ 是 PMSM 相对于舰船的转角。联立式(1)~式(3)可得

$$\dot{\theta}_l(s) = \frac{nT_\Sigma + nT_{dm} + T_{dl} + n(n-1)J_m \ddot{\theta}_b(s)}{(n^2 J_m + J_l)s} \tag{4}$$

为了分析方便,进一步整理式(4)可得

$$\dot{\theta}_l(s) = \frac{G_c/J'}{s + G_c G_g/J'} \dot{\theta}_m(s) + \frac{1/J'}{s + G_c G_g/J'} T_\Sigma + \frac{(n-1)J_m/J'}{s + G_c G_g/J'} \ddot{\theta}_b(s) \tag{5}$$

式中: $J' = nJ_m + J_l/n$; $T_D = T_{dm} + T_{dl}/n$ 。

经分析发现:PMSM 转轴干扰力矩 T_{dm} 、光电跟踪器支撑轴承干扰力矩 T_{dl} 和舰船角运动 $\ddot{\theta}_b(s)$ 都会引起光电跟踪器的角运动,而齿轮间的摩擦力矩会随着传动级数的增加而增加。

2 系统数学模型

PMSM 在 dq 坐标系下的定子电压方程和定子磁链方程分别为^[9]

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + d\psi_d/dt - n_p \omega_m \psi_q \\ u_q = Ri_q + d\psi_q/dt + n_p \omega_m \psi_d \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (7)$$

在 dq 坐标系中: u_d, u_q 为定子电压分量; i_d, i_q 为定子电流分量; R 为等效定子电阻; L_d, L_q 为等效定子电感; ψ_d, ψ_q 为定子磁链分量; ω_m 为 PMSM 角速度; n_p 为 PMSM 的极对数。

对于面装式 PMSM, 其电磁转矩矢量方程为

$$T_M = n_p \psi_f i_q \quad (8)$$

考虑到减速比为 $n = R/r$, 联立式(1)、式(2)和式(8), 再结合式(3)的负载、PMSM 和舰船间的角度关系, 去掉中间变量 $\ddot{\theta}_m$, 可得

$$\ddot{\theta}_l = \frac{nn_p \psi_f i_q + n(n-1)J_m \ddot{\theta}_b + nT_{dm} - T_{dl}}{n^2 J_m - J_l} \quad (9)$$

式(6)的定子电压方程中, 选取定子电流 i_d, i_q 及负载角速度 ω_l 为状态量, 可以得到系统数学模型为

$$\begin{cases} \dot{i}_d = -(R/L)i_d + n_p[n\omega_l - (n-1)\omega_b]i_q + u_d/L \\ \dot{i}_q = n_p[n\omega_l - (n-1)\omega_b]i_d - (R/L)i_q - (n_p \psi_f/L)\omega_l + u_q/L \\ \dot{\omega}_l = \frac{nn_p \psi_f i_q + n(n-1)J_m \ddot{\theta}_b + nT_{dm} - T_{dl}}{n^2 J_m - J_l} \end{cases} \quad (10)$$

式中: ω_b 为舰船角速度, $\omega_b = \dot{\theta}_b(s)$ 。

式(10)光电跟踪系统数学模型中的 i_d 和 i_q 之间存在着耦合, 可以使 d 轴电流参考输入 $i_d^* = 0$, 同时使 $i_d \approx i_d^* = 0$ 和 $i_q \approx i_q^*$ 成立, 以达到近似解耦的效果^[10], 从而把式(10)数学模型简化为

$$\begin{cases} \dot{i}_q = -(R/L)i_q - (n_p \psi_f/L)\omega_l + u_q/L \\ \dot{\omega}_l = \frac{nn_p \psi_f i_q + n(n-1)J_m \ddot{\theta}_b + nT_{dm} - T_{dl}}{n^2 J_m - J_l} \end{cases} \quad (11)$$

经过近似解耦以后, 得到如图3所示的舰载光电跟踪系统的原理框图。图3中: ω^* 是速度参考输入; i_q^* 是 q 轴电流参考输入; G_V 和 G_C 分别是速度环和电流环控制器。

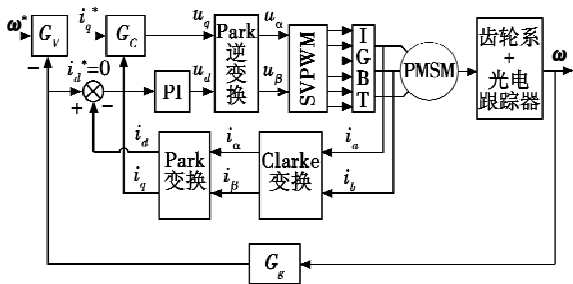


图3 舰载光电跟踪系统原理框图

Fig. 3 Block diagram of ship-based EOTS

3 干扰观测器设计

干扰观测器的基本原理如图4a所示^[11]。图中: $G_p(s)$ 为对象传递函数; $G_n(s)$ 是系统参考模型; d 和 \hat{d} 分别为等效干扰及其观测值; u_0 为前一环节给出的控制量; u 为总的控制输入量; y 为输出量。实际使用中, 通常在干扰观测值 \hat{d} 后面串入一个相对阶次高于 $G_n(s)$ 的低通滤波器 $Q(s)$, 以解决参考模型的逆 $G_n^{-1}(s)$ 无法实现的问题^[12], 由此得到图4b, 即干扰观测器改进原理框图。其中, ξ 为测量噪声, 其他参数与图4a的意义相同。

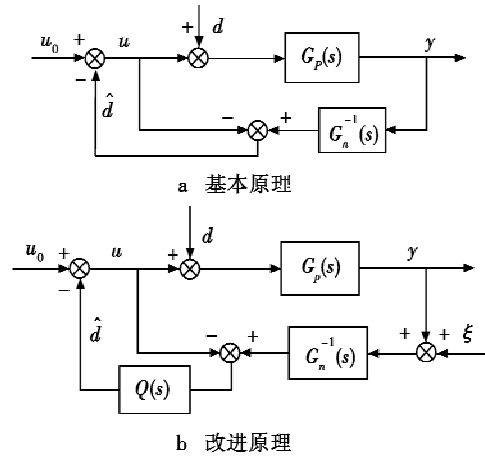


图4 干扰观测器原理框图

Fig. 4 Block diagram of DOB

由图4可以得到输出 y 的表达式, 即

$$y = G_{wy}(s)u + G_{dy}(s)d + G_{\xi y}(s)\xi \quad (12)$$

式中:

$$G_{wy}(s) = \frac{G_p(s)G_n(s)}{G_p(s) + (G_p(s) - G_n(s))Q(s)} \quad (13)$$

$$G_{dy}(s) = \frac{G_p(s)G_n(s)(1-Q(s))}{G_p(s) + (G_p(s) - G_n(s))Q(s)} \quad (14)$$

$$G_{\xi y}(s) = -\frac{G_p(s)Q(s)}{G_p(s) + (G_p(s) - G_n(s))Q(s)} \quad (15)$$

假设系统频带和 $Q(s)$ 的频带分别为 f 和 f_q , 由式(13)~式(15)可知: 当 $f \leq f_q$ 时, $Q(s) \approx 1$, $G_{dy}(s) \approx 0$, 此时系统具备较强的抗干扰性能, 测量噪声相应地被引入干扰观测的前馈量; 当 $f > f_q$ 时, $Q(s) \approx 0$, $G_{\xi y}(s) \approx 0$, 干扰观测器相当于开环, 此时没有前馈作用, 也不会引入测量噪声。对于光电跟踪系统来说, ξ 一般是高频的, 在设计 $Q(s)$ 时, 需要综合考虑 $Q(s)$ 的结构和时间常数, 以降低噪声对系统的影响。设计中, 将低通滤波器记为 $Q_{NM}(s)$ (M 和 N 分别为 $Q(s)$ 的分子阶数和分母阶数), 可以采用文献[13]提出的形式, 即

$$Q_{NM}(s) = \sum_{k=0}^M \alpha_{Nk} (\tau s)^k / (\tau s + 1)^N \quad (16)$$

式中: $\alpha_{Nk} = N! / [k! \cdot (N-k)!]$; τ 为 $Q(s)$ 的时间常数;

$N - M$ 为 $Q(s)$ 的相对阶次, 必须高于 $G_n(s)$ 的相对阶次。

4 光电跟踪系统 DOB 设计

由式(11)的舰载光电跟踪系统数学模型可得

$$\dot{\omega}_l = \frac{nn_p\psi_f i_q + n(n-1)J_m \ddot{\theta}_b + nT_{dm} - T_{dl}}{n^2 J_m - J_l} \quad (17)$$

根据 DOB 设计的需要, 把式(17)改写为

$$\dot{\omega}_l = bi_q + d(t) \quad (18)$$

式中: $b = \frac{nn_p\psi_f}{n^2 J_m - J_l}$; $d(t)$ 为电流形式存在的干扰, $d(t) = \frac{n(n-1)J_m \ddot{\theta}_b + nT_{dm} - T_{dl}}{n^2 J_m - J_l}$ 。

系统中电流到速度输出是一阶环节, 设计一个一阶滤波器 $Q(s) = 1/(\tau s + 1)$, 取系统参考模型 $G_n(s) = b_0/s$, $b_0 = (nn_p\psi_f)/(n^2 J_m - J_l)$, 其中, J_m 是对 PMSM 转轴转动惯量 J_m 的估计, J_l 是对负载转动惯量 J_l 的估计。式(18)进一步写成

$$\dot{\omega}_l = b_0 i_q^* + d_z(t) \quad (19)$$

式中: $d_z(t) = (b - b_0) i_q^* + d(t)$, 对舰载光电跟踪系统支撑轴上各种干扰力矩的过补偿、欠补偿, 舰船运动 θ_b 造成的耦合影响, 以及对参数 b_0 的估计误差都可以在 $d_z(t)$ 中反映出来。

由图 4 的干扰观测器结构可知, DOB 输出为

$$\hat{d} = (yG_n^{-1}(s) - u)/(\tau s + 1) \quad (20)$$

在舰载光电跟踪系统中 $G(s) = b/s$, $G_n(s) = b_0/s$, $y = \omega_l$, $u = i_q^*$, 由此得到

$$\hat{d} = \frac{s\omega_l - b_0 i_q^*}{b_0(\tau s + 1)} = \frac{d}{\tau s + 1} \quad (21)$$

由式(21)可知, 当 τ 足够小时, 有 $\hat{d}(t) \approx d(t)$, 此时, 干扰观测器的观测值能够跟踪上实际扰动值, 在设计中, 可以通过前馈实现对干扰的补偿。图 5 为基于 DOB 的舰载光电跟踪系统框图。

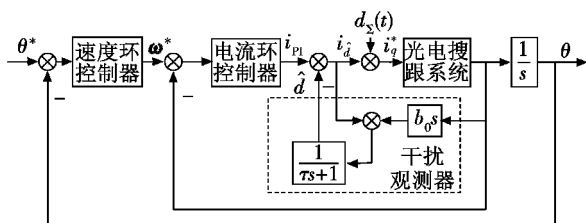


图 5 基于 DOB 的舰载光电跟踪系统结构图
Fig. 5 Block diagram of EOTS based on DOB

5 实验研究

5.1 设备选型

根据文献[14], 当 PMSM 经减速器带动光电跟踪

平台做等角加速度运动时(最大角加速度为 ϵ_m), 可以采用求极值的方法使 PMSM 转轴上承受的总力矩 T_Σ 最小, 来确定减速比 n 。 T_Σ 由 PMSM 转动惯量、摩擦力矩 T_c 、负载转动惯量 J_l 组成, 即

$$T_\Sigma = T_c/n + (J_m + J_l/n^2)n\omega_{\max} \quad (22)$$

当 $\frac{dT_\Sigma}{dn} = J_m\omega_{\max} - \frac{J_l}{n^2}\omega_{\max} - \frac{T_c}{n} = 0$ 时, 可得

$$n_0 = \sqrt{(T_c + J_l\omega_{\max})/(J_m\omega_{\max})} \quad (23)$$

此时, T_Σ 折算到负载上的总力矩为 $T'_\Sigma = n_0 T_\Sigma$, 由于 PMSM 的额定转速 ω_e 满足 $\omega_e \gg \omega_{\max}$, 所选电机的额定功率 P_e 应满足

$$P_e \geq (1.6 \sim 2.2)(T_c + J_l\epsilon_m)\omega_{\max} \quad (24)$$

根据舰载光电跟踪系统性能指标的要求, 以方位轴为例, 选择 TYSZ-500-71M 型交流 PMSM, 减速比为 100, PMSM 参数如表 1 所示。配套德国科比 F5-M/S 系列驱动器, 选用 VG091-3AM 型光纤陀螺, 用于测量光电跟踪平台在惯性空间的角速度。

表 1 方位轴 PMSM 参数

Table 1 PMSM parameters of azimuth axis

额定功率/kW	额定转速/(r·min ⁻¹)	扭矩/(N·m)	负载转矩/(kg·m ²)	最大加速度/(°·s ⁻²)
5	5000	10	467	102.6

5.2 工作机理

某模拟舰载光电跟踪平台的伺服部分主要由 PMSM、智能功率模块(IPM)、控制算法单元和信号采集单元构成。IPM 根据 SVPWM 信号将电源输入转换成三相交流电驱动 PMSM; 控制算法单元中的速度控制器、电流控制器和 SVPWM 信号处理部分, 用于实现速度和电流的闭环控制和坐标变换; 信号采集单元用于获取光电跟踪平台的位置、速度和 PMSM 电流信息。系统具体工作流程如下:

- 1) 实时采集光电跟踪平台的速度和 PMSM 的电流信息, 把平台的转速作为速度调节器的反馈信号;
- 2) 对采集的电流信号进行 Clarke 变换和 Park 变换, 得到 dq 坐标系下的电流值, 将电流 i_d 和 i_q 分别作为两个电流调节器的反馈信号;
- 3) 对两个电流调节器的输出信号 U_d 和 U_q 进行 Park 反变换, 得到 $\alpha\beta$ 坐标系下定子相电压参考值;
- 4) 根据电压参考值 U_α, U_β 和转子位置, 利用 SVPWM 技术产生 PWM 控制信号, 控制 IGBT 逆变出 PMSM 所需的驱动信号。

5.3 实验结果

在某模拟舰载光电跟踪系统中, PMSM 的电流环均采用 PI 调节器, 速度环分别采用常规 PI 控制策略和 P + DOB 控制策略。首先将 DOB 控制律离散化, 即

$$\begin{cases} u_0(k) = k_p(\omega^* - \omega(k)) \\ u(k) = u_0(k) - \hat{d}(k) \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\hat{d}(k) = \frac{1}{1+gT} \{ \hat{d}(k-1) + gb_0[\omega(k) - \omega(k-1)] - gT\dot{\omega}^*(k-1) \}$, $g = 1/\tau$ 。

在 DSP 中实现时, 将当前采样时刻 k 的值和上一采样时刻 $k-1$ 的值分别代入相应变量 $\Omega(k)$ 和 $\Omega(k-1)$, 其中, $k-1$ 时刻的采样值在前一控制周期中通过中间寄存器进行存储。

在模拟舰船小幅度晃动和大幅度晃动的状态下, 分别给舰载光电跟踪系统 $10^\circ/0.5\text{ Hz}$ 的速度跟踪指令, 开展目标探索任务。实验中把 PI 控制器与 P+DOB 控制器的参数均调至最佳, PI 控制器参数为 $k_p = 0.45$, $k_i = 30$; P+DOB 控制参数为 $k_p = 0.4$, $g = 800$ 。

在模拟舰船小幅度晃动的状态下, 常规 PI 控制与 P+DOB 控制的实验效果分别如图 6a 和图 6b 所示, 其中, 红色曲线为实际角度信号曲线, 蓝色曲线为跟踪误差信号。经对比发现: P+DOB 控制的跟踪效果优于常规 PI 控制的跟踪效果, 由于舰船晃动幅度较小, 此时舰船耦合的影响也较小, 采用常规 PI 控制策略尚能满足跟踪误差小于 0.5° 的设计要求。

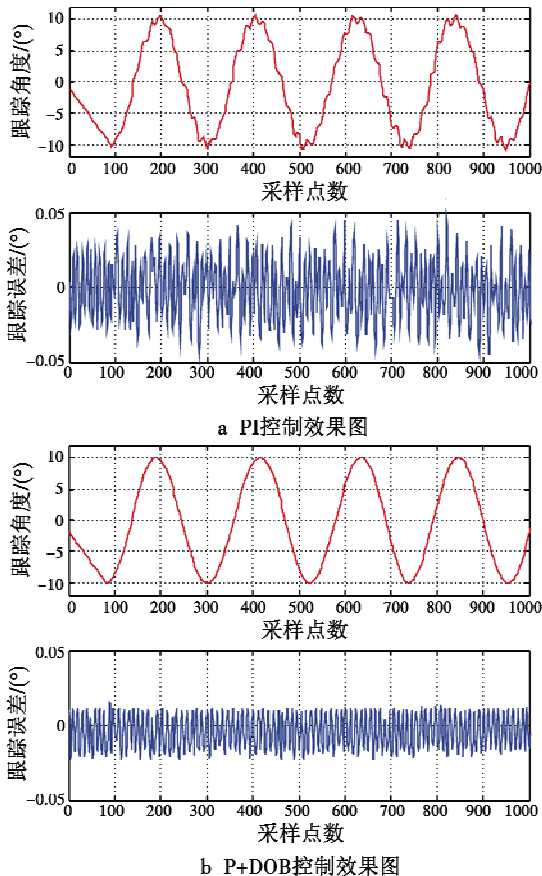


图6 小幅度晃动状态下光电跟踪系统的跟踪曲线
Fig. 6 Tracking curve of EOTS under slight shake

在模拟舰船大幅度晃动状态下, PI 控制与 P+DOB 控制的实验效果分别如图 7a 和图 7b 所示。经对比发现: 由于舰船晃动幅度较大, 此时舰船耦合的影响也较大, 采用常规 PI 控制策略不能满足跟踪误差小于 0.5° 的设计要求; 而 DOB 有很好的抗干扰能力, 取得了较好的跟踪效果。

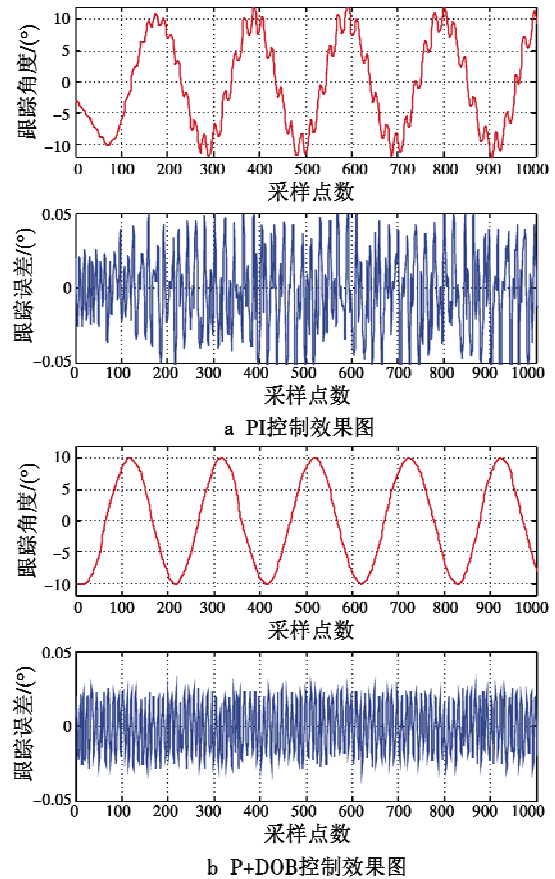


图7 大幅度晃动状态下光电跟踪系统的跟踪曲线
Fig. 7 Tracking curve of EOTS under sharp shake

6 结束语

基于永磁同步电机设计了一种光电跟踪系统, 利用矢量控制的方法对 PMSM 进行坐标变换, 采用 i_d 为零的电流型解耦方法, 以减小 i_d 和 i_q 的耦合影响; 在此基础上设计了光电跟踪系统的干扰观测器, 降低了舰船运动耦合、齿轮间隙、非线性摩擦、系统模型失配以及其他干扰因素对光电跟踪系统的影响。实验结果表明, 无论在舰船小幅度还是大幅度晃动下, P+DOB 控制策略均取得了较好的控制效果, 有较高的工程应用价值。

参考文献

- [1] 王春阳, 彭业光, 史红伟, 等. 光电稳定平台线性自抗 (下转第 104 页)

- ACM Siggraph Computer Graphics, 1977, 11(2):242-248.
- [6] 李胜亮,管莉,张凌,等. 基于阴影映射的实时软阴影算法及实现[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(1):214-217.
- [7] FERNANDO R. Percentage-closer soft shadows[C]//ACM SIGGRAPH Sketches, 2005:35-43.
- [8] DONNELLY W, LAURITZEN A. Variance shadow maps[C]//The Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, 2006:161-165.
- [9] GUENNEBAUD G, BARTHE L, PAULIN M. Real-time soft shadow mapping by backprojection[C]//The 17th Eurographics Conference on Rendering Techniques, 2006:227-234.
- [10] GUENNEBAUD G, BARTHE L, PAULIN M. High-quality adaptive soft shadow mapping[J]. Computer Graphics Forum, 2007, 26(2):525-533.
- [11] ATTY L, HOLZSCHUCH N, LAPIERRE M, et al. Soft shadow maps: efficient sampling of light source visibility[J]. Computer Graphics Forum, 2006, 25(4):725-741.
- [12] BARNABAS B, LASZLO S K. Real-time soft shadows with shadow accumulation[C]//The 17th Eurographics Conference on Rendering Techniques, 2006:53-56.
- [13] SCHWARZ M, STAMMINGER M. Bitmask soft shadows[J]. Computer Graphics Forum, 2007, 26(3):515-524.
- [14] STAMOUR J F, PAQUETTE E, POULIN P. Soft shadows from extended light sources with penumbra deep shadow maps[C]//Proceedings of Graphics Interface, 2005:105-112.
- [15] SINTORN E, EOSEMANN E, ASSARSSON U. Sample-based visibility for soft shadows using alias-free shadow maps[J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(4):1285-1292.
- [16] KIM S G, LEE S K. Mipmap-based deferred soft shadow mapping[J]. Journal of KIISE, 2016, 43(4):399-403.
- [17] 袁昱纬,全吉成,刘宇,等. 基于 BVH 的自适应阴影图算法[J]. 光电子技术, 2017, 37(2):130-135.

(上接第 84 页)

- 抗控制器设计[J]. 电光与控制, 2018, 25(11):112-115.
- [2] 杨影,李之珂,王爽,等. 基于轴转矩扰动观测器的伺服系统扭振抑制研究[J]. 电工技术学报, 2018, 22(10):10-18.
- [3] 刘胜,郭晓杰,张兰勇. 六相永磁同步电机新型单向滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(10):10-19.
- [4] 刘旭东,李珂,张奇,等. 基于非线性扰动观测器的永磁同步电机单环预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7):2153-2162.
- [5] 刘京,李洪文,邓永停. 基于干扰观测器的永磁同步电机电流环自适应滑模控制[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5):1229-1241.
- [6] 晋超琼,张葆,李贤涛,等. 基于干扰观测器的光电稳定平台摩擦补偿策略[J]. 吉林大学学报:工学版, 2017, 47(6):1876-1885.
- [7] 刘丙友,竺长安,郭兴众,等. 基于改进型 ADRC 的永磁同步电机转子位置角控制方法[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(12):24-33.
- [8] 邓永停,李洪文,刘基,等. 于扰动力矩观测器的大口径望远镜低速控制[J]. 光学精密工程, 2017, 25(10):2636-2643.
- [9] 刘旭东,李珂,孙静,等. 基于广义预测控制和扩展状态观测器的 PMSM 控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(12):1613-1619.
- [10] 易伯瑜,康龙云,冯自成,等. 基于扰动观测器的永磁同步电机预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2016, 9(31):37-45.
- [11] 朱斌. 自抗扰控制入门[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2017.
- [12] LI S H, ZONG K, LIU H X. A composite speed controller based on a second-order model of permanent magnet synchronous motor system[J]. Transactions of the Institute of Measurement & Control, 2010, 32(1):522-541.
- [13] LI S H, LIU Z H. Adaptive speed control for permanent magnet synchronous motor system with variations of load inertia[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8):3050-3059.
- [14] 廖晓钟,刘向东. 控制系统分析与设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.