

光电跟踪转台的控制模型辨识

王 昊,刘晶红,邓永停,张雪菲

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘 要: 针对大功率永磁同步电机驱动的光电跟踪转台,提出了一种基于特征系统实现算法的控制模型辨识方法。首先,根据永磁同步电机的矢量控制原理,对白噪声测试系统进行了系统配置;其次,采用功率谱密度函数的分析方法对系统的输入和输出数据序列进行了分析,得到了系统的频率响应函数;最后,通过特征系统实现算法对系统的马尔可夫参数进行了辨识,获得了光电跟踪转台的控制模型。实验结果表明:采用特征系统实现算法可以精确地辨识出光电跟踪转台的控制模型,该控制模型能够较好地反映系统的动态特性,为控制器算法的设计提供了理论依据,具有较好的实用性。

关键词: 光电跟踪转台; 永磁同步电机; 模型辨识; 特征系统实现算法; 马尔可夫参数

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0617007

Control model identification of opto-electronic tracking turntable

Wang Hao, Liu Jinghong, Deng Yongting, Zhang Xuefei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A control model identification method based on eigensystem realization algorithm (ERA), was proposed for the opto-electronic tracking turntable driven by a large power permanent magnet synchronous motor (PMSM). Firstly, the test configuration was designed based on the vector control theory of PMSM. Secondly, the frequency response function of the system was acquired through the power spectrum density function, which analyzed the sequence of the input and output data. Finally, to acquire the control model of the opto-electronic tracking turntable, the ERA was adopted to identify the Markov parameters of the control system. The experiment results demonstrate that the control model of the turntable can be identified accurately through the ERA, and the control model, which reflects the dynamics of the system better, can provide theory basis for the controller design. The results also confirm that the proposed method is practical.

Key words: opto-electronic tracking turntable; PMSM; model identification; ERA; Markov parameters

收稿日期:2015-10-05; 修订日期:2015-11-15

作者简介:王昊(1986-),男,助理研究员,博士,主要从事航空相机自动调焦及光电平台伺服控制方面的研究。Email:15068607@qq.com

0 引言

随着直驱电机技术的发展,国际上很多大型光电跟踪转台采用了直接驱动方式,如10.4 m的 GTC^[1]、8.2 m的 Subaru^[2]、TMT^[3]等,这些转台都以大功率的永磁同步力矩电机作为执行机构。永磁同步电机具有体积小、功率密度高、转矩电流比高、低速性能好等优点^[4],可以实现对目标的低速高精度跟踪。目前,国内大型光电跟踪转台的直驱技术正朝着交流化的方向发展^[5],因此,研究基于永磁同步电机的大型光电跟踪转台伺服控制系统具有重要的意义。

对于大型光电跟踪转台伺服控制系统的设计,通常采用基于频域综合法的经典控制理论或基于状态空间法的现代控制理论^[6-7]。而无论采用哪种方法进行伺服控制系统的设计,都要求获得被控对象的控制模型。工程上测量系统控制模型的方法主要是正弦扫描法^[8-10],该方法能够比较容易获得一定频率区间的系统频率特性,但需要反复测量多个频率点,增加了实验周期。近年来,其他的系统辨识方法也得到了广泛的发展和应用^[11-14],在这些辨识方法中,特征系统实现算法(Eigensystem Realization Algorithm, ERA)以无需多次反复实验和固定系统阶次的优点而得到广泛应用^[15]。系统的阶次是辨识过程中重要的一部分,系统的阶次过低会丢失被控对象的部分动态特性,进而导致系统闭环的不稳定;系统的阶次过高会使控制器设计变得复杂,同时引入不必要的系统动态特性^[16]。ERA 辨识方法可以根据需要合理设置系统阶次,以获得较理想的系统控制模型^[17]。

文中将针对永磁同步电机直接驱动的大型光电跟踪转台,采用基于特征系统实现算法的辨识方法对转台的控制模型进行辨识。主要讨论了基于永磁同步电机的白噪声测试系统配置;基于功率谱密度函数的频率响应函数分析方法和控制模型的马尔可夫参数辨识方法;最后,给出了大型光电跟踪转台的控制模型辨识实例,以说明文中提出的模型辨识方法的有效性和实用性。

1 模型测试方法

1.1 永磁同步电机数学模型

为了简化分析,作如下假设:(1) 转子永磁磁场

在气隙空间成正弦分布,定子电枢绕组中的感应电动势也为正弦分布;(2) 忽略定子铁心饱和,认为磁路线性,电感参数不变;(3) 不计铁心涡流和磁滞损耗;(4) 转子上无阻尼绕组。采用 $i_d=0$ 的矢量控制方式,PMSM 控制系统框图如图 1 所示,PMSM 在 dq 轴坐标系下的数学模型:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d - \omega L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u_q = Ri_q - \omega L_d i_d + \omega \psi_a + L_q \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

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

$$K_t = \frac{3}{2} p \psi_a \quad (3)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - B\omega - T_l \quad (4)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴电压; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流;对于表面式 PMSM 的电感满足 $L_d=L_q=L$, L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; R 为定子电阻; p 为极对数; ω 为转子机械角速度; J 为转动惯量; T_e 为电磁转矩; T_l 为负载转矩; B 为摩擦系数; K_t 为转矩系数; ψ_a 为永磁体励磁磁链。

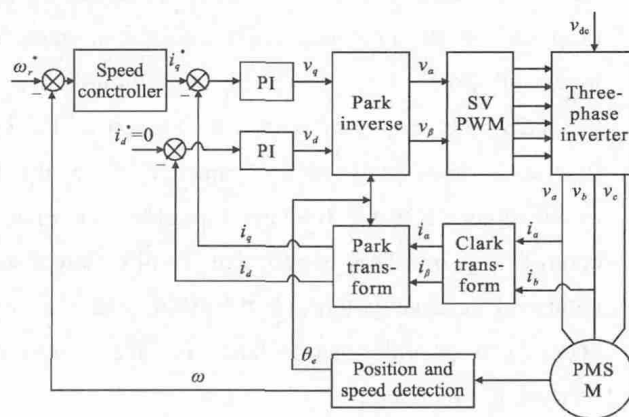


图 1 永磁同步电机矢量控制框图

Fig.1 Control block diagram of PMSM

1.2 测试系统配置

在永磁同步电机采用 $i_d=0$ 的矢量控制方式后,使得永磁同步电机的控制类似于他励直流电机的控制。对电机施加一定的 q 轴电压 u_q , d 轴仍然采用电流闭环控制,则电机将以一定的速度开环运行。光电跟踪转台的开环测试系统配置如图 2 所示,可以采用两种方法对系统进行开环测试,方法 1:断开 q 轴电流控制器,在 q 轴电流控制器输出处对系统施加

电压白噪声 u_q , 通过计算机同步记录转台的编码器响应数据; 方法 2: 断开速度控制器, 在 q 轴电流控制器的指令输入端对系统施加电流白噪声 i_q , 通过计算机同步记录转台的编码器响应数据。方法 1 辨识的控制模型包括驱动放大部分、电机部分和机械耦合部分; 方法 2 辨识的控制模型包括电流闭环控制器、驱动放大部分、电机部分和机械耦合部分, 由于电流控制器的带宽通常在 100 Hz 左右, 因此, 电流环的引入对控制模型的辨识影响较小。文中采用方法 1 对系统进行控制模型辨识。

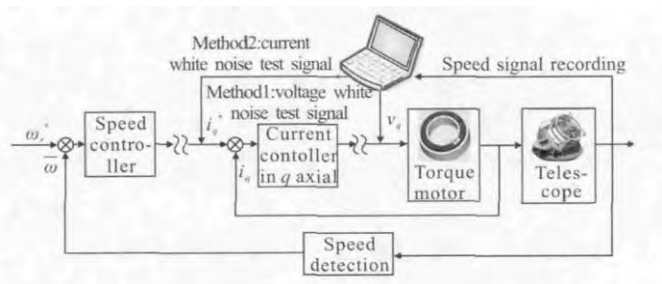


图 2 光电跟踪转台开环测试系统配置

Fig.2 Open loop test configuration for the opto-electronic tracking turntable

2 频率特性测量方法

通过对控制系统输入白噪声序列 u , 可以得到系统对激励的响应序列 y , 对系统的输入和输出序列进行分析可以得到系统的频率响应函数(FRF)。假设输入和输出序列的数据采样长度为 N , 采用如下步骤进行数据分析: (1) 为了估计结果的平滑性, 采用取平均值的方法将采样数据平均分为 n 段, 第 i 段输入和输出数据分别表示为 $u_i, y_i (i=1, \dots, n)$; (2) 对序列 u_i 和 y_i 分别进行傅里叶变换(FFT)得到 $U_i(\omega)$ 、 $Y_i(\omega)$; (3) 输入和输出序列的功率谱密度函数表示为:

$$P_{yy}(\omega) = \frac{2}{nT} \sum_{i=1}^n U_i^*(\omega) Y_i(\omega) \quad (5)$$

式中: $U_i^*(\omega)$ 为 $U_i(\omega)$ 的共轭; $T=nt_s$ 表示每段数据总的采样时间; t_s 表示数据采样周期。

(4) 激励信号的功率谱密度函数表示为:

$$P_{uu}(\omega) = \frac{2}{nT} \sum_{i=1}^n |U_i(\omega)|^2 \quad (6)$$

(5) 系统响应输出的功率谱密度函数表示为:

$$P_{yy}(\omega) = \frac{2}{nT} \sum_{i=1}^n |Y_i(\omega)|^2 \quad (7)$$

(6) 系统的传递函数表示为:

$$G(\omega) = \frac{P_{yy}(\omega)}{P_{uu}(\omega)} \quad (8)$$

(7) 为了更好地对系统的传递函数表达式(4)进行估计质量的评价, 定义如下相干函数:

$$\varphi(\omega) = \frac{|P_{yy}(\omega)|^2}{P_{uu}(\omega) P_{yy}(\omega)} \quad (9)$$

$\varphi(\omega)$ 的数值介于 0~1 之间, 单位值 1 表示输入输出序列的良好线性关系和记录的数据中没有扰动; 较低的相干函数值是由于转台转动时的各种扰动引起的, 同时也说明光电跟踪转台控制系统中存在较多的非线性因素, 例如风载和轴系摩擦。

在进行数据采样时应该遵循 Nyquist 采样定理, 因为通常情况下的信号分析频率范围是已知的, 因此, 数据的采样频率 f_s 满足:

$$f_s = 2f_n \quad (10)$$

式中: f_n 为信号分析频率的最大值。

对于大功率永磁同步电机驱动的大型光电跟踪转台控制系统的电流环带宽通常小于 100 Hz, 因此, 信号的采样频率取 $f_s=200$ Hz。过大的采样频率不仅不能够获得更多的转台结构动态信息, 反而增大了数据文件的大小和数据分析、计算的时间。

3 转台的控制模型辨识方法

3.1 马尔可夫参数

因为系统辨识记录数据的都是离散时间域的输入、输出序列, 因此, 系统的控制系统模型采用离散状态空间模型表示:

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= Ax_i + Bu_i \\ y_i &= Cx_i + Du_i \end{aligned} \quad (11)$$

对于一个有 s 个输入和 r 个输出的系统, 它的 p 阶可控矩阵 C_p 和可观矩阵 O_p 分别表示为:

$$\begin{aligned} C_p &= [B \ AB \ \dots \ A^{p-1}B] \\ O_p &= [C \ CA \ \dots \ CA^{p-1}]^T \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $p \geq \max(s, r)$ 。

在采样时间 $T=[0 \ pt_s]$ 内的可控格拉姆矩阵 W_c 和可观格拉姆矩阵 W_o 定义为:

$$W_c = C_p C_p^T, W_o = O_p O_p^T \quad (13)$$

假设系统的初始条件为零, 输入序列为 $u_0=1$, $u_i=0, i=1, 2, 3 \dots$ 则系统的脉冲响应序列为:

$$y_0 = D$$

$$\begin{aligned} y_1 &= CB \\ y_2 &= CAB \\ &\vdots \\ y_k &= CA^{k-1}B \end{aligned} \quad (14)$$

系统在 kt_s 采样时刻的脉冲响应为 $y_k=CA^{k-1}B$, 则马尔可夫参数矩阵为 $h_k=CA^{k-1}B$, 马尔可夫参数序列中包含了系统模型参数 (A, B, C, D) , 因此, 马尔可夫参数序列可用于系统的模型辨识。

3.2 辨识算法

辨识算法的基础是 Hankel 矩阵, Hankel 矩阵的前两项 H_1, H_2 表示为:

$$\begin{aligned} H_1 &= \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & \cdots & h_p \\ h_2 & h_3 & \cdots & h_{p+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ h_p & h_{p+1} & \cdots & h_{2p-1} \end{bmatrix} \\ H_2 &= \begin{bmatrix} h_2 & h_3 & \cdots & h_{p+1} \\ h_3 & h_4 & \cdots & h_{p+2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ h_{p+1} & h_{p+2} & \cdots & h_{2p} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

Hankel 矩阵的前两项 H_1, H_2 与可控矩阵 C_p 、可观矩阵 O_p 的关系为:

$$\begin{aligned} H_1 &= O_p C_p \\ H_2 &= O_p A C_p \end{aligned} \quad (16)$$

公式(16)矩阵的表达式不依赖于系统的坐标系的变化。在系统辨识过程中, 可控矩阵 C_p 和可观矩阵 O_p 是未知的, 但是, 可以采用对 H_1 和 H_2 矩阵分解的方法进行系统模型参数的辨识。

$$\begin{aligned} H_1 &= P Q \\ H_2 &= P A Q \end{aligned} \quad (17)$$

由公式(17)可以得到系统矩阵 A 的表达式为:

$$A = P^+ H_2 Q^+ \quad (18)$$

矩阵 P^+, Q^+ 分别为矩阵 P, Q 的伪逆矩阵, 满足以下关系:

$$\begin{aligned} P^+ &= (P^T P)^{-1} P^T, Q^+ = Q^T (Q Q^T)^{-1} \\ P^+ P &= I, Q^+ Q = I \end{aligned} \quad (19)$$

矩阵 B 由矩阵 Q 的前 s 列求取, 矩阵 C 由矩阵 P 的前 r 行决定:

$$\begin{aligned} B &= Q E_s, E_s = [I_s \ 0 \ \cdots \ 0]^T \\ C &= E_r^T P, E_r = [I_r \ 0 \ \cdots \ 0]^T \end{aligned} \quad (20)$$

对于公式(17)中 Hankel 矩阵 H_1 的分解可以采用

LU、QR 或者奇异值分解的方法, 但是, 通过奇异值分解的方法得到的状态空间模型更具均衡代表性。

3.3 求取马尔可夫参数

实际系统的模型辨识通常采用白噪声激励序列, 而不是单一的脉冲序列。为了从输入、输出数据序列中获得马尔可夫参数, 定义马尔可夫参数矩阵:

$$H = [D \ CB \ CAB \ \cdots \ CA^{p-1}B] = [h_0 \ h_1 \ h_2 \ \cdots \ h_p] \quad (21)$$

输入和输出测量矩阵分别表示为:

$$\begin{aligned} Y &= [y_0 \ y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_q] \\ U &= \begin{bmatrix} u_1 & u_1 & u_2 & \cdots & u_p & \cdots & u_q \\ 0 & u_0 & u_1 & \cdots & u_{p-1} & \cdots & u_{q-1} \\ 0 & 0 & u_0 & \cdots & u_{p-2} & \cdots & u_{q-2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & u_0 & \cdots & u_{q-p} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

输入、输出序列与马尔可夫参数矩阵的关系为:

$$Y = HU \quad (23)$$

如果矩阵 U 是满秩的, 则 Hankel 矩阵为:

$$H = YU^+, U^+ = U^T(UU^T)^{-1} \quad (24)$$

对于含有噪声的实测输入、输出数据序列, 采用取平均和相关的方法进行马尔可夫参数的辨识, 对公式(23)两边同乘以 U^T , 得到如下表达式:

$$E(YU^T) = HE(UU^T) \quad (25)$$

式中: $E(\cdot)$ 为取平均, 输入、输出序列的互相关矩阵 $R_{yu} = E(YU^T)$, 输入序列的自相关矩阵 $R_{uu} = E(UU^T)$ 。在 R_{uu} 非奇异的条件下, 得到马尔可夫参数矩阵为:

$$H = R_{yu} R_{uu}^+ \quad (26)$$

互相关 R_{yu} 和自相关 R_{uu} 满足表达式:

$$R_{yu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i U_i^T, R_{uu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i U_i^T \quad (27)$$

式中: n 表示数据被平均分为 n 段。

通过上述辨识算法得到系统的状态空间模型后, 可以建立基于模型的控制系统仿真程序, 如图 3 所示, 通过仿真程序对控制器算法进行设计和优化, 从而缩短光电跟踪转台控制系统的设计和调试周期。

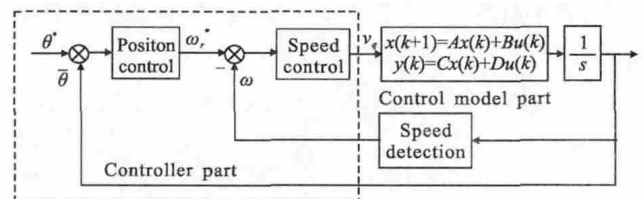


图 3 光电跟踪转台控制系统仿真模型框图

Fig.3 Simulation model block diagram of the control system of tracking turntable

4 实验

为了验证文中提出的控制模型辨识方法,对某一型号大型光电跟踪转台进行了控制模型辨识。该转台控制系统的硬件组成如图 4 所示,由伺服控制器、驱动器、编码器和基于永磁同步电机的直驱转台组成。伺服控制器采用 TMS320F28335 DSP 和 EP3C40F324 FPGA 作为核心控制芯片;功率驱动器使用 IPM 模块 PS21A79 设计;编码器采用 Renishaw 公司的增量式圆光栅,其分辨率达到 $0.016\ 875''$;电机采用 IDAM 公司的大功率永磁同步力矩电机。为了较好地覆盖转台的频率范围,编码器数据的采样频率设置为 200 Hz。

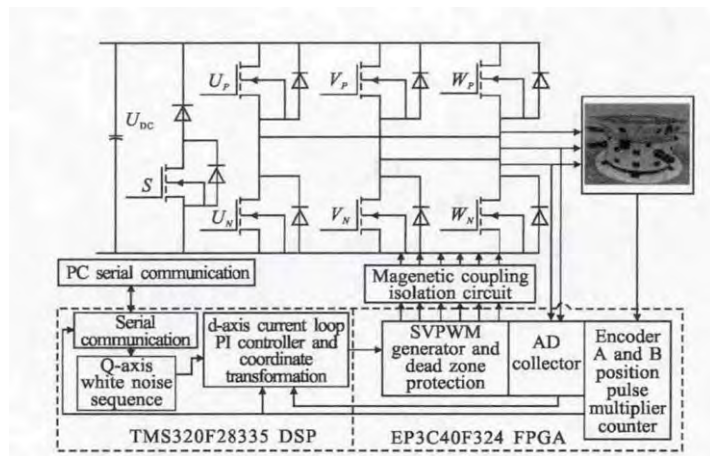


图 4 光电跟踪转台模型辨识的硬件系统框图

Fig 4 Hardware block diagram for the identification of the opto-electronic tracking turntable

电机的 q 轴电压白噪声输入序列如图 5 所示,考虑到电机的响应速度,白噪声序列的给定频率不能太高,过高的白噪声给定频率导致系统无法快速响应输入,因此,白噪声的给定频率与系统的采样频率相同,均为 200 Hz。白噪声数据的长度决定了辨识的最低频率,数据长度越长,频率特性曲线越平滑;但是,数据长度受到控制器的内存限制,选择 5 000 个采样数据即可满足数据分析要求。电压白噪声的幅值应能够激励转台的转动,太小的电压白噪声幅值无法克服轴系摩擦;过大的电压白噪声幅值造成转台较大幅值的转动,甚至可能影响转台上的负载,电压白噪声的幅值为最大允许电压幅值的 5%。光电跟踪转台对电压白噪声的响应序列如图 6 所示。

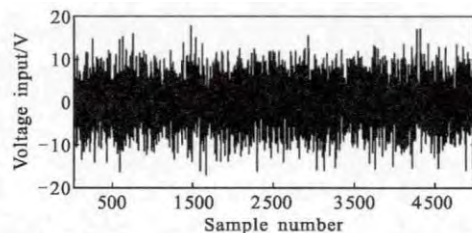


图 5 模型辨识的白噪声输入序列

Fig.5 White noise sequence for the model identification

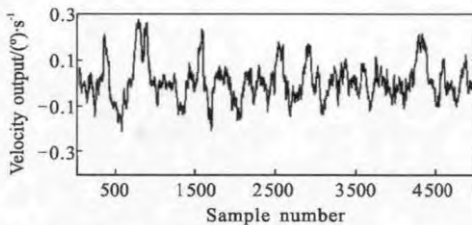


图 6 模型辨识的白噪声响应序列

Fig.6 Response sequence of the white noise for the model identification

采用功率谱密度函数对输入、输出序列进行分析,得到系统的频率响应函数的频率幅值曲线如图 7 所示,由图可以看出:该光电跟踪转台的锁定转子频率(LRRF)为 50 Hz 左右。光电跟踪转台测试数据的相干函数曲线如图 8 所示,由图可以看出:在 1~40 Hz 范围内,相干函数值大于 0.8,在该频段内认为频率特性估计比较准确;在反谐振峰值处相干函数值较小,这是因为光电跟踪转台在该频率处对激励的响应幅值很小,甚至未做出响应。

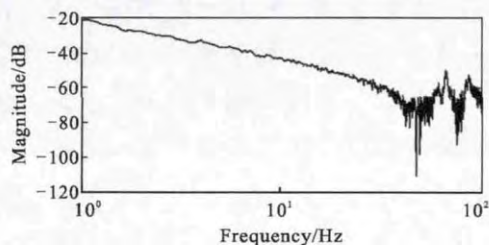


图 7 光电跟踪转台频率响应函数的幅值曲线

Fig.7 Magnitude of the FRF for the opto-electronic tracking turntable

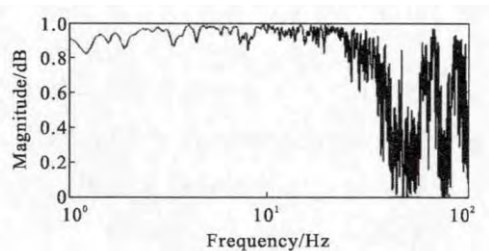


图 8 转台测试数据的相干函数

Fig.8 Coherence function of the turntable test data

通过特征系统实现算法对该光电跟踪转台进行控制模型辨识,选择系统的辨识阶次为 6 阶,辨识模型的频率特性如图 9 和 10 中的实线所示,通过对

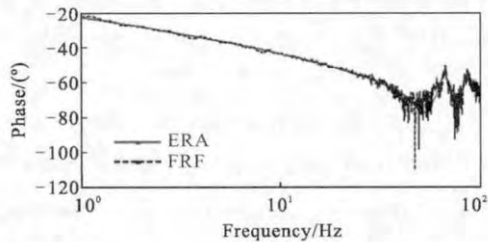


图 9 采用 ERA 辨识的光电跟踪转台传递函数幅值曲线

Fig.9 Magnitude of the turntable transfer function identified through ERA

模型即可很好地拟合实验数据,反映系统的动态特性;控制模型的锁定转子谐振频率为 53.68 Hz。

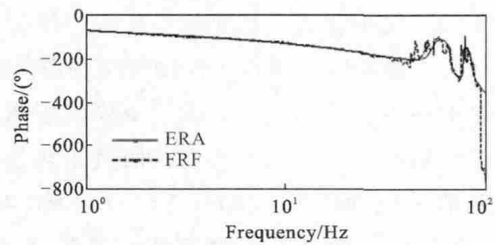


图 10 采用 ERA 辨识的光电跟踪转台传递函数相位曲线

Fig.10 Phase of the turntable transfer function identified through ERA

比图中频率响应函数曲线(虚线)可以看出:6 阶辨识

采用特征系统实现算法得到的系统矩阵 A 、 B 、 C 、 D 为:

$$A = \begin{bmatrix} 0.9968 & -0.0601 & 0.0006 & -0.0048 & 0.0043 & 0.0048 \\ 0.0661 & 0.5764 & 0.2052 & -0.0819 & 0.2703 & 0.0759 \\ 0.0025 & 0.2305 & -0.6048 & -0.7195 & 0.1893 & 0.0643 \\ -0.0004 & 0.0758 & 0.5573 & -0.5596 & -0.5950 & 0.1413 \\ 0.0118 & 0.1253 & -0.4539 & 0.2798 & -0.6339 & 0.5529 \\ 0.0051 & -0.1351 & -0.2111 & -0.1141 & -0.3425 & -0.7646 \end{bmatrix}$$

$$B = [0.0001 \quad -0.0019 \quad 0.0004 \quad 0.0001 \quad -0.0004 \quad -0.0006]^T$$

$$C = [5.7052 \quad 0.1840 \quad -0.0767 \quad 0.0861 \quad -0.1455 \quad -0.0605]$$

$$D = [0]$$

在辨识得到系统矩阵和锁定转子谐振频率后,以此为理论依据进行系统的控制算法仿真。在进行控制系统设计时,系统的带宽设计通常以锁定转子谐振频率为依据,速度环的带宽最大不超过锁定转子谐振频率的 60%,位置环的带宽为锁定转子谐振频率的 20%~30%。

5 结 论

文中提出了一种基于特征系统实现算法的大型光电跟踪转台控制模型辨识方法。在永磁同步电机矢量控制基础上,采用 q 轴开环电压白噪声对系统进行了激励,同时记录系统的速度响应;采用功率谱密度函数对输入、输出数据进行了分析,得到了系统的频率特性;最后利用特征系统实现算法对系统的马尔可夫参数进行了辨识,从而获得了系统的控制模型。实验结果表明,采用特征系统实现算法可以精确地辨识出光电跟踪转台的控制模型,该控制模型

为控制器的设计提供了理论依据,该模型辨识方法也可以应用到有刷直流电机伺服控制系统中,具有较好的实用性。

参考文献:

- [1] Jorge P, Consolacion A, Alfredo O, et al. Telescope structures, enclosures, controls, assembly/integration/validation, and commissioning[C]//SPIE, 2000, 6: 640.
- [2] Takeshi N, Wataru T, Toshiyuki S, et al. Telescope control systems III[C]//SPIE, 1997, 3112: 124.
- [3] Jerry N, Sanders G H. Ground-based and Airborne Telescopes[C]//SPIE, 2006: 626728-1.
- [4] Zhu Z Q. Recent advances on permanent magnet machines [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(3): 1-11.
- [5] Hu Wei, Wang Li, Zhang Zhenchao, et al. Design and implementation of servo control system of large aperture telescope based on DSP[J]. *Micro Motor*, 2010, 43(8): 38-

40. (in Chinese)
- [6] Wang J L. Study on TV tracking system of O-E theodolite to track and acquire fast moving targets [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. Chinese Academy of Science, 2002. (in Chinese)
- [7] Gawronski W, Lim K B. Balanced and H₂ controllers[C]// Proceedings of the 1994 IEEE American Control Conference, 1994: 1116–1122.
- [8] Wang J L, Chen T, Fang Zh H, et al. Measurement of tracking gimbal frequency response in engineering [J]. *Opt and Precision Eng*, 2001, 9(S): 4–7. (in Chinese)
- [9] Cascone E, Mancini D, Schipani P. Galile-O telescope model identification[C]//SPIE, 1997, 3112: 343–350.
- [10] Wang Shuai, Chen Tao, Li Hongwen, et al. Frequency characteristic test and model identification for O-E tracking servo system[J]. *Opt and Precision Eng*, 2009, 17(1): 79–83.
- [11] Ewins D J. Modal Testing [M]. 2nd Edition. England: Research Studies Press, 2000.
- [12] Juang J N, Phan M, Horta L G, et al. Identification of observer/kalman filter markov parameters: theory and experiments[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1993, 16(2): 320–329.
- [13] Ljung L. System Identification [M]. New Jersey: Englewood Cliffs, 1987.
- [14] Li Hui, Wu Junhui, Zhu Xia, et al. Analysis and tracking principle for rate gyroscope laser seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1337–1341. (in Chinese)
- [15] Juang J N. Applied System Identification [M]. New Jersey: Englewood Cliffs, 1994.
- [16] Juang J N, Pappa R S. An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1985, 8(5): 620–627.
- [17] Juang J N, Pappa R S. Effect of noise on modal parameters identified by the eigensystem realization algorithm [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1986, 9(3): 294–303.