

基于 Zynq 的光电跟踪系统在线辨识方法设计^{*}史添元^{1,2,3,4} 张 兵^{1,2,3,4} 邓久强^{1,2,3,4} 毛 耀^{1,2,3,4} 王继红^{1,2,3,4}(1. 中国科学院光场调控科学技术全国重点实验室 成都 610209; 2. 中国科学院光束控制重点实验室 成都 610209;
3. 中国科学院光电技术研究所 成都 610209; 4. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 本文提出一种基于 Zynq 平台的光电跟踪系统在线辨识方法,解决了传统辨识方法繁琐低效的问题。通过设计 A/D 与 D/A 模块的数据采集与驱动程序,实现了实时采集与控制,并在 Zynq 上运行 VxWorks 操作系统。利用 FFT 技术实现了频率特性在线测量,并采用带自然选择的混合改进的量子行为粒子群优化算法进行系统辨识。实验结果表明,该方法具有高精度的频率特性测量和准确的系统辨识能力,为光电跟踪系统提供了有效的实时控制与优化手段。

关键词: Zynq; 在线频率特性测量; 系统辨识; 粒子群优化

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Design of online identification method for electro-optical tracking system based on Zynq

Shi Tianyuan^{1,2,3,4} Zhang Bing^{1,2,3,4} Deng Jiuqiang^{1,2,3,4} Mao Yao^{1,2,3,4} Wang Jihong^{1,2,3,4}(1. National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; 2. Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
3. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This article proposes an online identification method for a electro-optical tracking system based on the Zynq platform, addressing the cumbersome and inefficient nature of traditional identification. By designing data acquisition and driver programs for A/D and D/A modules, real-time collection and control are achieved, and running the VxWorks operating system on Zynq platform. The use of FFT technology enables the online measurement of frequency characteristics, and a hybrid improved quantum-behaved particle swarm optimization algorithm with natural selection parameters is employed for system identification. Experimental results demonstrate that this method possesses high-precision frequency characteristic measurement and accurate system identification capabilities, providing effective means for real-time control and optimization of electro-optical tracking systems.

Keywords: Zynq; online frequency characteristic measurement; system identification; particle swarm optimization

0 引 言

光电跟踪系统广泛应用于航空航天、量子通信、天文观测、目标跟踪、自适应光学等科学领域^[1-2]。跟踪控制精度是衡量系统的关键指标,在控制系统设计方法中,基于经典控制理论的频域设计方法是各种控制方法中最成熟的方法。但作为频域设计方法的基础,获得高精度的对象模型参数并不容易,因为在高精度的控制对象开环频率特性数据的获取以及频率特性数据向传递函数快速准确的转化这

两个问题面临诸多挑战。在系统模型辨识的研究中,时域上,Ahmed等^[3]先对微分方程进行数值积分,然后通过辅助变量最小二乘算法辨识传递函数,罗毅成^[4]采用L序列作为激励信号获得转台的脉冲响应数据,再通过最小二乘法拟合得到系统传递函数。Guo等^[5]通过脉冲频率特性测量法与改进的粒子群优化算法对光电跟踪系统的分数阶模型进行辨识,基于辨识结果设计控制器使系统获得了更好的控制性能。在频域辨识方法中,Levy^[6]将最小二乘法引入到传递函数的拟合当中,也称Levy法,该方法计算简单,

原理清晰,在低阶系统的辨识中有较高的精度,得到了广泛的应用。在光电跟踪系统的频域辨识中,胡浩军^[7]利用信号分析仪测得跟踪系统频率特性数据,结合控制对象的传递函数模型选取参数初始值,并针对不同的频率特性分段拟合。雷罗岚^[8]研究了稳态正弦扫频法的频率特性测量方法,对比了频域辨识方法中的 Levy 法及其改进算法。传统的光电跟踪系统辨识方法受限于处理器性能,主要通过信号分析仪直接获取频率特性或在控制器采集数据,离线分析计算,其效率低,且辨识准确度有待提升。因此,在性能更强的处理器内在线完成频率特性数据处理与精确的参数模型辨识对于提高运动平台光电跟踪系统的控制器设计效率与控制能力有重要意义。

当前光电跟踪系主要采用 PC/104、PowerPC、DSP、FPGA 等处理器,基于 PC/104 的工控机的设计方案比较成熟,需要多板卡堆叠使用,降低了系统的可靠性。DSP、FPGA 的运算能力强,在数字信号处理和领域有很大优势,但是随着工程领域的要求不断提高,单一处理器无法同时满足多接口与复杂计算需求,解决思路是增加主控数量将多个处理器叠加使用,比如通过 FPGA 实现外部接口、通过 DSP 实现控制和信号处理,两者通过外部通信总线实现交互。然而 FPGA+DSP 结构的主协处理器一方面两者之间通信非常复杂,另一方面两个处理器叠加,增加了控制器的体积,不利于系统的集成和小型化,其性能无法满足在线辨识的需求。随着应用技术的提高,高性能处理器的引入成为一个备受瞩目的解决方案,其同时兼顾了频率特性在线辨识和闭环控制的能力,无需借助外部设备,降低了成本,提升了系统的可靠性和工作效率,有利于系统的集成化和小型化。

Zynq 处理器是 Xilinx 公司在 2014 年推出的全可编程的可扩展处理平台。它利用系统级片上集成(system on chip, SoC)技术巧妙地将双核 ARM 处理器 Cortex-A9 与 FPGA 封装到一个芯片中,内部通过 AXI 总线进行高速数据交互^[9]。处理系统(processing system, PS)与可编程逻辑(programmable logic, PL)是处理器的两大核心,用户得以在 PS 端进行嵌入式系统开发,在 FPGA 端实现个性化的逻辑功能^[10]。这一架构不仅极大提升了系统通信的可靠性和实时性,同时也解决了嵌入式系统中的数据传输问题,为嵌入式系统高速数据采集处理提供了一种新的解决方法,在实时控制、图像处理等领域有广泛应用^[11-12]。

因而,本文基于 Zynq-7020 处理器提出了一种光电跟踪系统频率特性在线辨识方法。相比于传统方法,该方法无需拆卸原有设备,无需外接信号分析仪,具有低成本、高可靠性和高效率的优势,有望推动光电跟踪系统的集成化和小型化。此外,为了解决传统辨识算法在传递函数参数估计中精度不足的问题,本文提出了一种基于带自然选择的混合改进粒子群优化算法的辨识方法(hybrid improved quantum-behaved particle swarm optimization, LTQPSO),从

而实现了光电跟踪系统幅频特性与相频特性数据的传递函数在线拟合,同时为未来嵌入式系统控制器的设计与优化提供了新的思路。

1 系统整体设计

系统以 Zynq-7020 为控制器,结合了外部 A/D 模块 AD7606、D/A 模块 DAC8563 以及功率驱动板。PL 端主要实现外部 A/D、D/A 接口驱动,建立与 PS 端数据传输通路。PS 端运行 VxWorks 操作系统,对采集到的数据进行处理并计算出系统频率特性。最后在处理器内利用带有自然选择的混合改进的粒子群优化算法对频率特性进行拟合,得到系统模型。系统控制框图如图 1 所示。

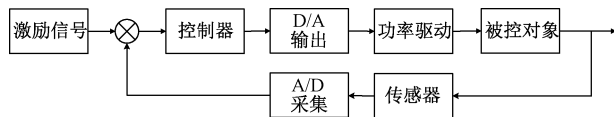


图 1 系统控制框图

2 光电跟踪系统频率特性测量

系统的频率特性与其机电结构和参数紧密相关,这可以通过调整系统的参数或改变系统的组件来调整系统的动态性能,在控制系统中有着广泛的应用。控制系统的频率特性测量主要有两种方法,一种是冲激响应法,另一种是扫频法。冲激响应法需要向系统输入冲激信号,但由于设备的稳定性与分辨率的限制,实际应用中不可能得到理想的冲激信号,实际应用中用来代替冲激信号的窄带脉冲信号其幅值也受到输出功率的限制,能量往往比较小,会导致信噪比低。因此本文采用能够提供更高的频率分辨率,且信号信噪比更高的频率逐点步进变化的正弦稳态扫频法完成频率特性的测量^[13]。将不同频率的正弦信号作为激励加到被测系统上,测得其相应的响应信号,将每个频率的响应与激励的幅值相比,相位相减。由这些计算结果就可以绘出被测系统的幅频和相频特性^[14]。通过对频率特性的分析,可以了解系统对不同频率输入信号的响应情况,包括系统的稳定性、频率衰减特性、相位延迟等信息,这对于控制系统的设计和性能评估非常重要,因此在控制系统中有着广泛的应用。

2.1 激励信号的设计

激励信号为频率按照对数的变化方式逐频率扫频的正弦稳态信号,设测试起始频率为 f_{init} , 终止频率为 f_{ult} , 共测试 N 个频率点,则第 n 个点的频率应为:

$$f_n = 10^{\frac{[\log_{10}(f_{ult}) + (\log_{10}(f_{ult}) - \log_{10}(f_{init})) \cdot n / (N-1)]}{1}} \quad (1)$$

在每个频率点采样多个周期以使系统充分响应,舍弃前两个周期的采样数据,以降低瞬态响应的影响。每个频率点应保证足够测试周期和采样数据,低频时一个周期内采集的数据量大,高频时一个周期采集的数据量较小,因此测试周期数从低频到高频应逐渐增加。

2.2 频率特性计算

快速傅里叶变换 (fast fourier transformation, FFT), 是根据离散傅里叶变换的对称特性而改进得到的快速算法。时域的离散信号在经过 FFT 计算后可得到信号的频谱与相位谱。对激励信号与输出信号进行 FFT 计算, 再用输出信号的 FFT 计算结果除以激励信号的 FFT 结果得到频率特性曲线。对某一频率的输入序列 $x(k)$ 及其对应的输出 $y(k)$ 做 N 点 FFT, 得到的第 k 个点的计算结果 $X(k)$ 和 $Y(k)$ 为:

$$Y(k) = \sum_{n=1}^N y(k) e^{\frac{j2\pi(k-1)(n-1)}{N}}, 1 \leq k \leq N \quad (2)$$

$$X(k) = \sum_{n=1}^N x(k) e^{\frac{j2\pi(k-1)(n-1)}{N}}, 1 \leq k \leq N \quad (3)$$

则系统在这一频率的频率特性为:

$$G(k) = \frac{Y(k)}{X(k)} \quad (4)$$

2.3 信号加窗修正

在信号采样过程中, 会对信号进行截断, 这导致信号的频谱谱线展宽从而导致相邻频率成分的主瓣或旁瓣发生频谱混叠。可以通过对信号加窗来改变信号能量分布, 减小频谱泄漏的影响。本文则对信号加汉宁窗进行修正。汉宁窗可以提高离散频谱分析幅值精度, 抑制假频, 提高信噪比^[15]。 N 个点的汉宁窗的时域与频域表达如式(5)和(6)所示。

$$w(n) = R_N(n) [0.5 - 0.5 \cos(\frac{2\pi n}{N})] \quad (5)$$

$$W(\omega) = 0.5 W_R(\omega) + 0.25 [W_R(\omega - \frac{2\pi}{N}) + W_R(\omega + \frac{2\pi}{N})] \quad (6)$$

其中, $R_N(n)$ 和 $W_R(\omega)$ 分别为 N 点矩形窗的时域和频域表达式:

$$R_N(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$W_R(\omega) = \frac{\sin(\omega N/2)}{\sin(\omega/2)} e^{-j(\frac{N-1}{2})\omega} \quad (8)$$

3 基于带自然选择的混合改进量子行为粒子群优化算法的传递函数拟合

光电跟踪系统通常采用复合轴结构以实现高精度的跟踪, 在主轴机架的基础上安装一个工作范围较小, 但精度高, 频带更宽的快速反射镜 (fast steering mirror, FSM)。FSM 的跟踪控制精度往往决定了系统的跟踪控制精度^[16], 已知 FSM 系统模型一般由惯性环节、二阶振荡环节以及高频段的机械谐振环节构成^[7]。其开环传递函数 $G(s)$ 如式(9)所示。其中 $k, f_1, f_2, f_3, f_4, \xi_1, \xi_2, \xi_3$ 为待辨识的参数。

$$G(s) = \left(\frac{k}{\frac{s}{2\pi f_1} + 1} \right) \cdot \left(\frac{1}{\left(\frac{s}{2\pi f_2} \right)^2 + \left(\frac{2\xi_1 s}{2\pi f_2} \right) + 1} \right) \cdot$$

$$\left(\frac{s}{\frac{s}{2\pi f_3} + 1} + \frac{2\xi_2 s}{2\pi f_3 + 1} + 1 \right) \cdot \left(\frac{s}{\frac{s}{2\pi f_4} + 1} + \frac{2\xi_3 s}{2\pi f_4 + 1} + 1 \right) \quad (9)$$

在得到传递函数的模型与频率特性数据后, 辨识问题则转化为式(5)中参数的估计与频率特性曲线的拟合问题。通过评估频率特性曲线的拟合情况得到参数估计的最优值, 可得到系统的对象模型^[17]。本文可以通过 MATLAB 中的拟合工具箱或者手动调整参数来拟合曲线, 但是得到的结果往往不是最佳参数, 而且过程复杂, 效率低。经典的辨识方法 Levy 法通过最小二乘法拟合频率特性数据, 对简单对象的辨识中有较好的精度, 但在参数较多的高阶对象的辨识中, 辨识结果的准确度会大幅下降^[18]。

1995 年提出的粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 可以快速求解出系统模型的参数^[5,19]。粒子群优化算法中, D 维解空间的 N 个粒子在解空间中运动, 并由速度决定它的运动方向和距离, 粒子通过追随自身的个体最优位置与群体的全局最优位置调整位置。

然而标准 PSO 算法需要控制的参数过多, 且已经被证明无法收敛于全局最优解^[20]。本文基于带有自然选择的 LTQPSO 算法拟合光电跟踪系统的模型^[21]。

在量子行为粒子群 (quantum-behaved particle swarm optimization, QPSO) 算法中, 粒子的位置更新方程为:

$$x_{i,j}(t+1) = p_{i,j}(t) \pm \alpha \cdot |m_i(t) - x_{i,j}(t)| \cdot \ln(1/u), \quad (1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq D) \quad (10)$$

其中, $p_{i,j}(t)$ 为吸引子, u 为 $(0,1)$ 上均匀分布的随机数, $\mathbf{X}_i(t) = (x_{i,1}(t), x_{i,2}(t), \dots, x_{i,D}(t))$ 为粒子的位置向量, 参数 $L_{i,j}(t)$ 表示为:

$$L_{i,j}(t) = 2 \cdot \alpha \cdot |m_i(t) - x_{i,j}(t)| \quad (11)$$

其中, α 为缩胀系数, 随迭代次数增加线性减小, $m_i(t)$ 定义为所有粒子最佳位置的平均值, 其向量形式表示为:

$$\mathbf{m}(t) = (m_1(t), m_2(t), \dots, m_D(t)) = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{i,1}(t), \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{i,2}(t), \dots, \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{i,D}(t) \right) \quad (12)$$

为了提高收敛性, 将粒子的吸引度方程改写为:

$$p_{i,j}(t+1) = G_j(t) + \varphi \cdot (P_{i,j}(t) - G_j(t)) \quad (13)$$

局部吸引子 $p_{i,j}(t+1)$ 与群中最佳位置 $G_j(t)$ 与当前粒子 $p_{i,j}(t)$ 的最佳位置之差有关。它的位置 $x_{i,j}(t+1)$ 与当前粒子的平均位置 $m_i(t)$ 和粒子本身的位置 $x_{i,j}(t)$ 之间的差有关。在 QPSO 算法的基础上, 为了判断是否找到最优解, 算法定义单个粒子的进化速率 $r_i(t)$ 为:

$$r_i(t) = \frac{F(G(t))}{F(P_i(t))} \quad (14)$$

其中, $F(G(t))$ 和 $F(P_i(t))$ 分别为当前粒子全局最佳位置的适应度值和当前粒子最佳位置的适应度值。因

此,对于问题的最优解, $r_i(t)$ 的值越高,表示进化速度越快,如果 $r_i(t)$ 的值为 1,表明算法找到了最优解。

在每个粒子的 D 维解空间中,设定粒子最佳位置的标准差为: $\sigma_p(t) = (\sigma(P_{i,1}(t)), \sigma(P_{i,2}(t)), \dots, \sigma(P_{i,D}(t)))$, 其中, $\sigma_x(t) = (\sigma(x_{i,1}(t)), \sigma(x_{i,2}(t)), \dots, \sigma(x_{i,D}(t)))$ 为当前位置的标准差,定义群体离散度 $gs_{i,j}(t)$ 为:

$$gs_{i,j}(t) = (gs_{i,1}(t), gs_{i,2}(t), \dots, gs_{i,D}(t)) = \left(\frac{\sigma(P_{i,1}(t))}{\sigma(x_{i,1}(t))}, \frac{\sigma(P_{i,2}(t))}{\sigma(x_{i,2}(t))}, \dots, \frac{\sigma(P_{i,D}(t))}{\sigma(x_{i,D}(t))} \right) \quad (15)$$

$gs_{i,j}(t)$ 反映了粒子的分散程度和粒子群的多样性,当 $gs_{i,j}(t) = 1$ 时,最佳位置 $P_{i,j}(t)$ 与当前位置 $x_{i,j}(t)$ 相等。

将参数引入到式(10)中,可得混合改进的 QPSO 迭代公式:

$$p_{i,j}(t+1) = G_j(t) + \varphi \cdot r_i(t) \cdot (P_{i,j}(t) - G_j(t)) \quad (16)$$

$$x_{i,j}(t+1) = p_{i,j}(t+1) \pm \alpha \cdot |m_i(t) - gs_{i,j}(t) \cdot x_{i,j}(t)| \cdot \ln(1/u) \quad (17)$$

为了提高准确度,算法引入自然选择的过程,根据个体的适应度对所有粒子排序,选出最佳粒子群代替最差粒子群。计算平均最优解时,不考虑粒子群排序的变化。 N 种群大小的自然选择过程为:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}(t)) = (X_1(t), F(X_2(t)), \dots, F(X_N(t))) \quad (18)$$

式中: $\mathbf{F}(\mathbf{X}(t))$ 为粒子群的适应度值向量,粒子位置向量 $\mathbf{X}(t)$ 为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_1(t) = (x_{1,1}(t), x_{1,2}(t), \dots, x_{1,D}(t)) \\ \mathbf{X}_2(t) = (x_{2,1}(t), x_{2,2}(t), \dots, x_{2,D}(t)) \\ \dots \\ \mathbf{X}_N(t) = (x_{N,1}(t), x_{N,2}(t), \dots, x_{N,D}(t)) \end{cases} \quad (19)$$

通过对适应度值的比较,对粒子从最佳位置到最差位置进行排序:

$$\begin{cases} \mathbf{X}'(t) = (X'_1(t), X'_2(t), \dots, X'_N(t)) \\ \mathbf{F}(\mathbf{X}'(t)) = (F(X'_1(t)), F(X'_2(t)), \dots, F(X'_N(t))) \end{cases} \quad (20)$$

根据评价函数以及自然选择参数,更新粒子位置向量:

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{X}}(t) = (\tilde{X}_1(t), \tilde{X}_2(t), \dots, \tilde{X}_S(t)) \\ \tilde{\mathbf{X}}_k(t) = (X'_1(t), X'_2(t), \dots, X'_T(t)), (1 \leq k \leq S) \end{cases} \quad (21)$$

式(21)中: $\tilde{\mathbf{X}}(t)$ 为更新后的粒子位置向量, S 为自然选择参数,一般取 2, T 为选择的最佳位置个数。两个参数的关系为: $T = N/S$ 。LTQPSO 的粒子进化速率 $r_i(t)$ 对 $P_{i,j}(t)$ 和 $G_j(t)$ 产生影响,群体离散度 $gs_{i,j}(t)$ 控制粒子位置的更新,这两个动态参数增强了算法的局部搜索能力。LTQPSO 每次迭代会产生不同的粒子群,因此具有全局收敛性。

在对光电跟踪系统传递函数的拟合中,设定适应度评价函数为:

$$y = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L [h \sqrt{(m(k) - \hat{m}(k))^2} + \sqrt{(ph(k) - \hat{ph}(k))^2}] \quad (22)$$

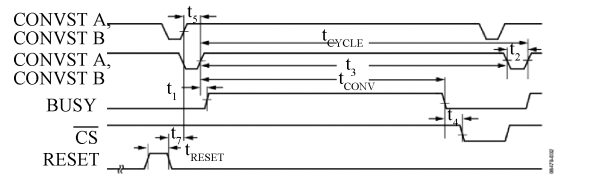
其中, $m(k)$ 和 $ph(k)$ 是频率特性测试结果的幅值和相位, $\hat{m}(k)$ 和 $\hat{ph}(k)$ 则是拟合得到的传递函数的幅值相位; $1 \leq k \leq L$, h 为加权值。通过 LTQPSO 算法将每次迭代得到的传递函数幅值和相位与系统频率特性做差并得到适应度值 y 。适应度值越低,代表参数估计值越接近真实值,传递函数拟合得越准确。

4 系统软件设计

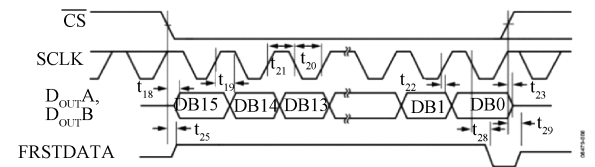
Zynq 的开发分为 PL, PS 两个部分。在 PL 端实现与 D/A 模块和 A/D 模块通信的 SPI 主设备驱动,在 PS 端通过 AXI 总线读取 PL 端的寄存器的 A/D 模块采集到的数据,并向 DA 模块的配置寄存器下发输出指令。

4.1 AD7606 驱动模块设计

在本设计中 AD7606 采用串行输出、双通道共同输出模式。首先需先将 PAR/SER/BYTE SEL 引脚拉高,选择串行模式。将 CONVSTA 和 CONVSTB 引脚短接后,施加一个转换开始信号以开启模拟量转换。当 BUSY 的输出出现下降沿,表明数据转换完毕,可供读取。此时拉低使能信号 $\overline{\text{CS}}$, 通过 SCLK 引脚给出 64 个时钟,接着分别读取 D_{OUT}A 输出的通道 1~4 的数据和 D_{OUT}B 上输出的通道 5~8 的数据。在读取通道 1 时,输出信号指示引脚 FRSTDATA 会在 $\overline{\text{CS}}$ 的下降沿变为高电平。AD7606 的主要时序要求如图 2 所示。



(a) CONVST 时序-转换后读取模式时序



(b) 通道1串行读取时序

图 2 AD7606 部分时序图

在设计 A/D 驱动时,几个重要时序如表 1 所示。其驱动程序状态转换流程图与 PL-PS 数据传输图分别如图 3、4 所示。在一次数据读取完成后,通过 AXI-LITE 将 8 个通道的数据 DATA_CHx 更新到 AD_CHx 寄存器组,同时将写入完成标志寄存器 AD_DONE 置为 1, ARM 端通过轮询该标志位读取 A/D 采集的数据。用 Verilog 实现 AD7606 的驱动主要信号 AD_DONE, AD_CSN, AD_CHx 等主要信号的 ILA 波形如图 5 所示。

表 1 AD7606 部分时序要求

| 参数 | 意义 | 时序要求 |
|------------------|--------------------------------------|------------|
| $t_{(1)}$ | CONVST 高电平至 BUSY 高电平 | 40 ns(max) |
| f_{clk} | SCLK 频率 | 20(max) |
| $t_{(2)}$ | CONVST 低电平时长 | 25 ns(min) |
| $t_{(4)}$ | BUSY 下降沿至 $\overline{\text{CS}}$ 下降沿 | 0(min) |

表 2 DAC8563 部分时序要求

| 参数 | 意义 | 时序要求 |
|-------------------|----------------------|------------|
| $t_{(1)}$ | SCLK 下降沿到 SYNC 下降沿时间 | 10 ns(min) |
| $t_{(2)}$ | SCLK 周期 | 20 ns(min) |
| $t_{(4)}$ | SYNC 高电平持续时间 | 80 ns(min) |
| $t_{(6)}/t_{(7)}$ | SCLK 低/高电平时间 | 8 ns(min) |
| $t_{(8)}$ | SCLK 下降沿到 SYNC 上升沿 | 10 ns(min) |

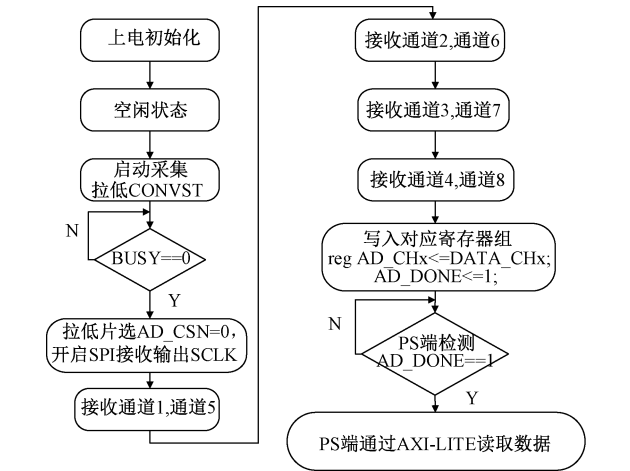


图 3 AD7606 驱动流程图

表 3 DAC8563 寄存器配置指令

| DAC8563 工作模式 | 寄存器配置指令 |
|--------------------|----------------|
| 复位 | (0x28, 0x0001) |
| DAC 通道 A 与通道 B 上电 | (0x20, 0x0003) |
| 启用内部参考和复位 DAC 增益=2 | (0x38, 0x0001) |
| 写 DAC-A 输入寄存器并更新 | (0x18, data_a) |
| 写 DAC-B 输入寄存器并更新 | (0x19, data_b) |

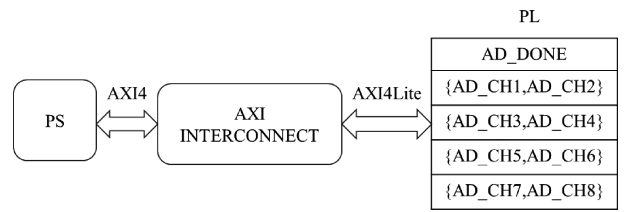


图 4 AD7606 模块 PL-PS 数据传输

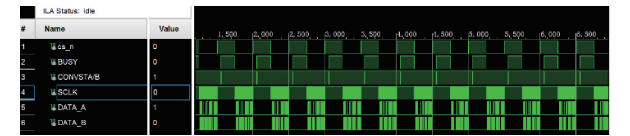


图 5 AD7606 部分信号波形

4.2 DAC8563 驱动模块设计

DAC8563 同样采用 SPI 串行接口,每次传输 24 位数据。DAC8563 采用同步模式,即 LDAC 引脚接地,此时数据会在时钟线的第 24 个下降沿到来之后更新。其主要时序如图 6 所示,部分时序参数如表 2 所示。

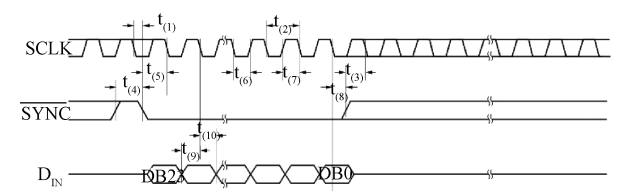


图 6 DAC8563 时序图

数据有效时,引脚 SYNC 为低电平。SPI 通信过程中, SCLK 下降沿时采集数据,空闲时则为高电平。在设计 DAC8563 的驱动时,通过 SPI 向 DAC8563 的寄存器中写入不同数据,实现工作模式的配置,其主要的指令数据如表 3 所示。

指令数据的前半部分由 2 位无效位、3 位指令码和 3 位地址码组成,后半部分为 16 位数据码。DAC 模块的驱动程序状态转换流图和 PS-PL 数据传输图分别如图 7、8 所示,ARM 端写入寄存器 PL_DAC_START 为 1,并将相应指令写入到寄存器 PL_DAC_DATA 中,PL 端启动 SPI 传输。当检测到 PL_DAC_START 寄存器的相应位出现上升沿时,读取 PL_DAC_DATA 中的 24 位指令数据,并通过 SPI 发送给 DAC8563。Verilog 实现 PL 端 DAC8563 的驱动主要 3 个信号使能、数据、时钟的 ILA 波形如图 9 所示。

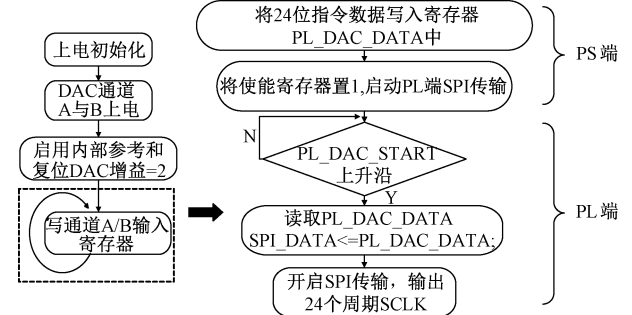


图 7 DAC8563 驱动流程图

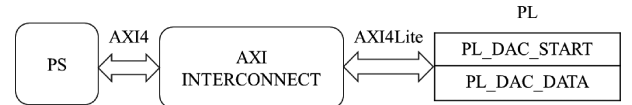


图 8 DAC8563 驱动模块 PL-PS 数据传输

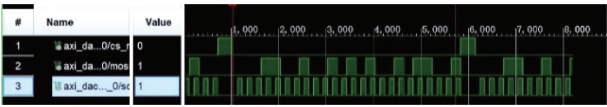


图 9 DAC8563 部分信号波形

4.3 VxWorks 系统在 Zynq 平台的运行

VxWorks 是一种易于移植、强实时性、高可靠性的嵌入式操作系统,在通信、航天等领域有广泛的应用^[22],适用于光电跟踪系统。因此本文的 PS 端程序运行于 VxWorks 操作系统下,其串口调试界面如图 10 所示。



图 10 VxWorks 串口调试界面

软件的主程序采用中断方式运行。PL 端产生一个 20 kHz 的中断信号作为外部中断通过 IRQ_F2P 提供给 PS 端。任务之间的同步采用信号量机制,中断响应函数检测所有任务共同维护的标志位 TASK_FLAG,释放不同的信号量以切换任务。任务在获取信号量后退出等待,开始运行。主程序流程如图 11 所示。

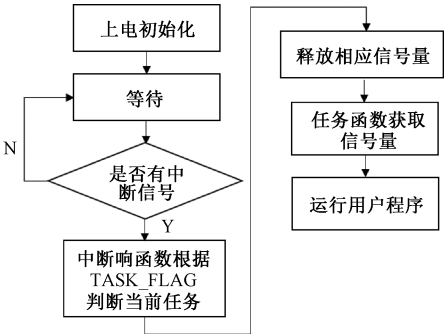


图 11 主程序框图

5 实验验证

在线辨识程序由频率特性测量和传递函数拟合两个部分构成。系统先释放频率特性测量任务的信号量,在频率特性计算完毕后得到两个数组:幅值数组和相位数组。然后中断函数开始释放传递函数拟合任务信号量,根据幅值和相位数组执行辨识算法程序,估计出系统模型待辨识的参数值。

5.1 频率特性测量程序设计

如图 12 所示,当频率特性测量程序获取到中断响应函数释放的信号量时,计算当前 DAC8563 输出的电压,判断是否记录数据以及切换下一频率。由于嵌入式处理器实现

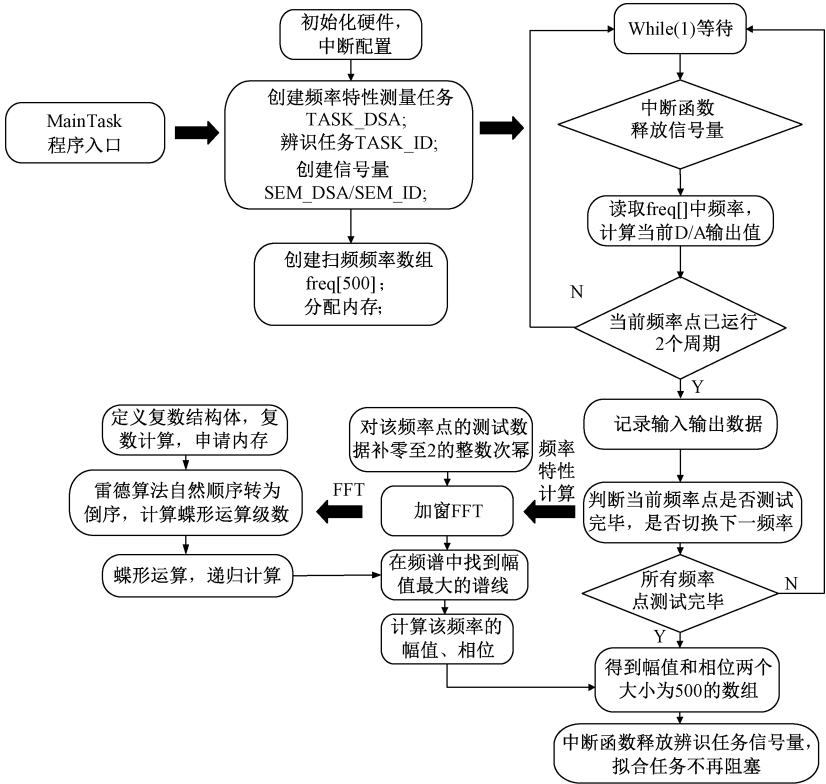


图 12 频率特性计算程序流程图

任意点数 FFT 需要消耗大量的时间和资源,因此本设计采用基 2-FFT 算法。对补零后点数为 2 的整数次幂的序列加汉宁窗,最后通过基 2-FFT 计算出该频率输入输出的幅值比和相位差。将所有频率点组合起来,得到系统的频率特性。

为了验证频率特性测量方法的准确性,搭建特性已知的 RC 电路进行测试,系统的实物图如图 13 所示,包括 Zynq-7020 开发板,AD7060 模块、DAC8563 模块、线性功率放大板与待测电路板。初始频率 1 Hz,终止频率 1 kHz,共记录 500 个频率点。



图 13 频率特性测量实物图

经测试得到的频率特性与误差如图 14 所示,与仿真结果相比,测量结果在低频($<500\text{ Hz}$)误差较小,幅值误差在 0.5 dB 以内,相位误差在 5 deg 以下。表明了系统频率特性测量的准确可靠性。

5.2 FSM 频率特性测量

本文对某 FSM 进行辨识,其结构如图 15 所示,主要由镜面、音圈电机、电涡流传感器、柔性机构、弹簧板等组成。对其在 1~1 kHz 频率范围进行频率特性测量,结果如图 16 所示。

5.3 传递函数拟合

在 Zynq 平台实现 LTQPSO 算法对频率特性测量结果进行拟合的程序流程图如图 17 所示。对 FSM 的频率特性分别通过模型辨识的经典算法 Levy 与 PSO、QPSO、以及 LTQPSO 算法进行拟合并将得到的传递函数绘制成频率特性曲线,算法的部分参数设定如表 4 所示,实验结

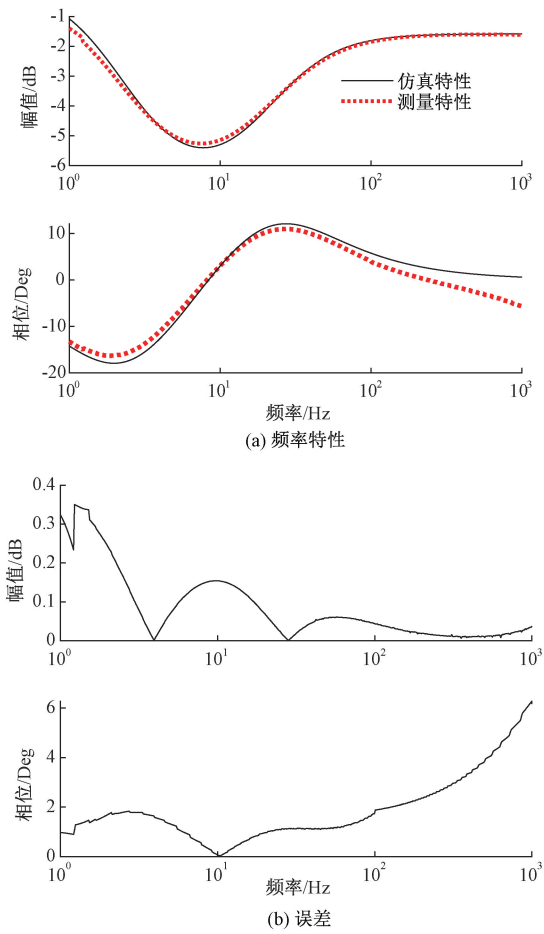


图 14 二阶 RC 电路频率特性测量结果

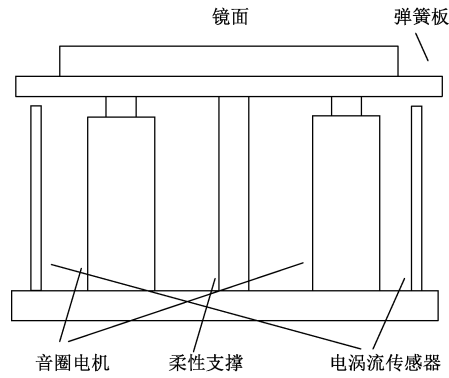


图 15 FSM 结构示意图

果如图 18 所示。

4 种方法的拟合适应度值如表 5 所示。实验结果表明,Levy 法的拟合结果较差,对模型中的高频谐振部分几乎没有拟合,PSO 在高频的拟合误差有所下降,但整体误差仍然比较高。QPSO 对高频的拟合比较好,而低频部分的拟合误差较大。基于 LTQPSO 的拟合方法在全频段的曲线拟合情况好,其适应度值最低,辨识结果最准确。

根据辨识得到的参数,可以写出系统的传递函数为:

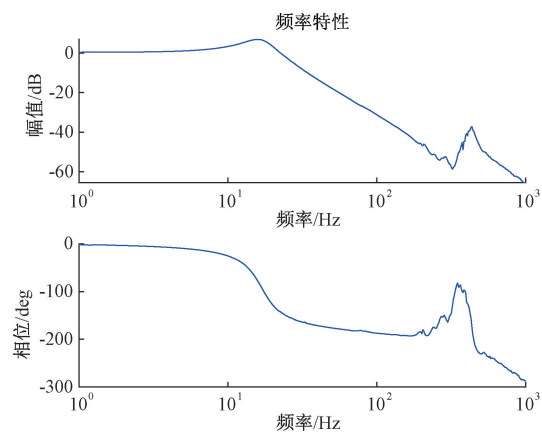


图 16 FSM 频率特性测量结果

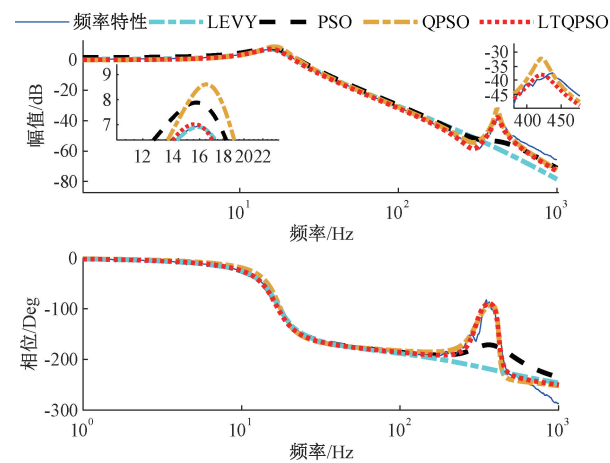


图 18 传递函数拟合结果对比图

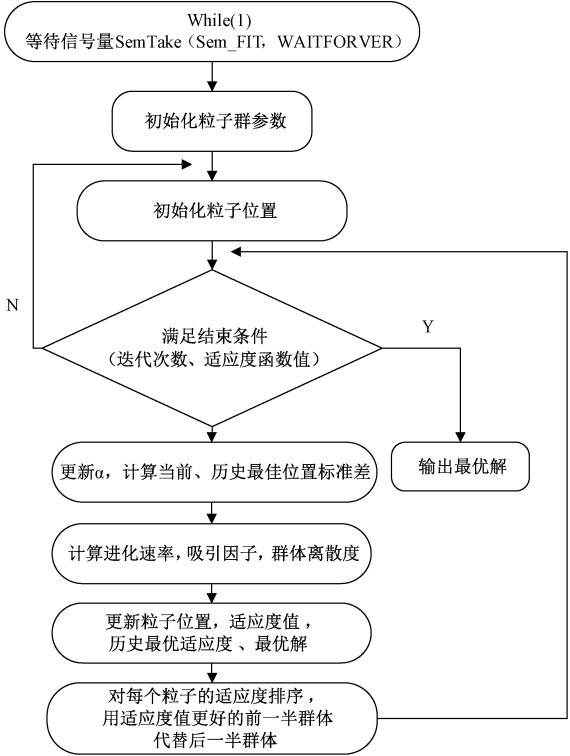


图 17 VxWorks 中 LTQPSO 拟合算法的程序流程图

表 4 粒子群算法参数设定

| 参数 | 设定值 | 含义 |
|-----|-----|-----------|
| N | 50 | 迭代次数 |
| M | 50 | 种群规模 |
| D | 8 | 解维度 |
| h | 25 | 适应度函数幅值权重 |

表 5 适应度值对比

| 方法 | Levy | PSO | QPSO | LTQPSO |
|------|-------|-------|------|--------|
| 适应度值 | 14.71 | 11.05 | 6.88 | 4.35 |

$$G(s) = \frac{4.989 \times 10^8 s^2 + 2.696 \times 10^{11} s + 2.043 \times 10^{15}}{8.533s^5 + 2.594 \times 10^4 s^4 + 6.901 \times 10^7 s^3 + 1.786 \times 10^{11} s^2 + 9.747 \times 10^{12} s + 1.954 \times 10^{15}} \quad (23)$$

在 LTQPSO 的传递函数拟合结果中,1~1 kHz 整体拟合数据的适应度为 4.35;对中低频部分(<500 Hz)进行适应度函数计算可得适应度值为 1.897,表明拟合误差主要集中在高频部分,低频部分误差小,能满足光电跟踪系统后续分析的需求。高频部分的拟合误差主要来源于系统在高频机械谐振处的低信噪比导致的频率特性测量结果失真。

综上,如图 19 所示,与传统光电跟踪系统辨识方法相

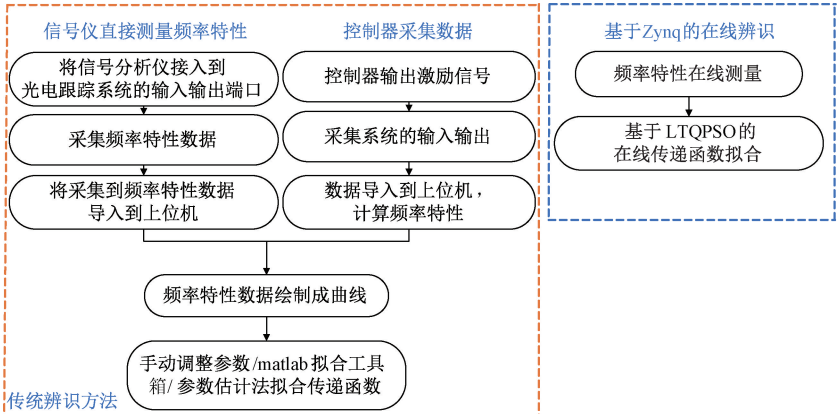


图 19 传统辨识方法与本文在线辨识方法流程对比

比,本方法能够简化系统模型辨识流程,提高辨识效率与准确度。

6 结 论

本设计以 Zynq 处理器为核心,提出了光电跟踪系统的在线辨识方法。首先设计了光电跟踪系统的频率特性测量方法,然后通过带自然选择的混合改进量子行为粒子群优化算法的传递函数拟合方法得到光电跟踪系统的传递函数参数模型。相比于传统的辨识方法,本方法在基于 Zynq 的控制器内实现,不需要外接设备,也不需要在上位机中离线分析计算,提高了效率;此外,通过实验对比验证了本方法的基于带自然选择的混合改进量子行为粒子群优化算法的拟合算法能提高传递函数的拟合准确度,满足后续光电跟踪系统控制器的设计需求,也为未来系统的进一步优化和应用提供了重要的指导。

从实验结果中能发现在高频部分因信噪比过低而导致的频率特性测量结果失真,因此需要进一步对传感器进行误差分析并补偿,从而提高辨识准确度。

参考文献

- [1] 李志俊,毛耀,亓波,等.量子光通信中位置修正单检测控制方法[J].光电工程,2022,49(3):22-36.
- [2] 夏文强,何秋农,段倩文,等.基于传感器优化与鲁棒预测的等效加速度前馈[J].光电工程,2021,48(11):3-12.
- [3] AHMED S, HUANG B, SHAH S. Identification from step responses with transient initial conditions [J]. Journal of Process Control, 2008(2): 18.
- [4] 罗毅成.经纬仪跟踪转台模型的辨识[D].长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2005.
- [5] GUO T, DENG J Q, MAO Y, et al. Improved particle swarm optimization fractional-system identification algorithm for electro-optical tracking system[J]. Fractal and Fractional, 2023, 7(3): 264.
- [6] LEVY E. Complex-curve fitting [J]. Automatic Control Transactions on, 1959, 4(1): 37-43.
- [7] 胡浩军.运动平台捕获、跟踪与瞄准系统视轴稳定技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2006.
- [8] 雷罗岚.跟踪控制系统辨识技术研究[D].成都:中国科学院研究生院(光电技术研究所),2016.
- [9] 王莹. Xilinx 可扩展处理平台: ZYNQ 嵌入式处理器与 FPGA 集成的独特创举[J]. 电子产品世界, 2012, 19(2): 27-32.
- [10] 何宾,张艳辉. Xilinx Zynq-7000 嵌入式与实现[M]. 北京:电子工业出版社,2016.
- [11] 田慧,管雪元,姜博文.基于 Zynq 的数据采集系统的研究与设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(2): 135-141.
- [12] 刘阳,冯进良,黄伟,等.基于 FPGA 的三目半全局匹配算法设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 202-210.
- [13] 李文杰.频率特性测试仪系统的设计[D].南京:南京航空航天大学,2005.
- [14] 刘旺锁,吉顺祥,陈冬.基于虚拟仪器的扫频仪的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2007(9): 78-80.
- [15] 余海强.离散密集频谱的校正方法研究[D].北京:北京化工大学,2009.
- [16] 马佳光,唐涛.复合轴精密跟踪技术的应用与发展[J]. 红外与激光工程, 2013, (1): 218-227.
- [17] 王帅,陈涛,李洪文,等.光电跟踪伺服系统的频率特性测试与模型辨识[J]. 光学精密工程, 2009, (1): 78-84.
- [18] 张新勇,王合龙,刘昇.机载光电稳定平台的模型辨识研究[J]. 光电与控制, 2014, 21(3): 5.
- [19] LIU B, WANG L, JIN Y, et al. Improved particle swarm optimization combined with chaos[J]. Chaos Solitons Fractals. 2005, 25, 1261-1271.
- [20] 郭世凯,孙鑫.基于改进粒子群算法的机器人路径规划[J]. 电子测量技术, 2019, 42(3): 54-58.
- [21] XUE T, LI R F, TOKGO M, et al. Trajectory planning for autonomous mobile robot using a hybrid improved QPSO algorithm [J]. Soft Computing. 2017, 5(17): 2421-2437.
- [22] 胡曙辉,陈健.几种嵌入式实时操作系统的分析与比较[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2007(5): 5-9.

作者简介

史添元,硕士研究生,主要研究方向为光电跟踪系统抗扰控制技术。

E-mail:shitianyuan21@mails.ucas.ac.cn

王继红(通信作者),高级工程师,主要研究方向为光束控制中的精密探测跟踪技术。

E-mail:wangjihong19@sina.com