

几种消除计算机干扰方法的效果的对比研究*

丛 爽 杜浩藩 中国科学技术大学自动化系(230027)

Abstract

There are a lot of disturbances in actual computer control systems. These disturbances, together with the dynamic response of control system, disturb the plant from tracking the reference signal or working steadily on the set point. In order to get high precision control effect, it's need to investigate and analyze sources and elimination techniques of the difference disturbance in actual control system. The paper analyzes some kinds of disturbance in a computer control DC servomotor system and proposes some elimination techniques. Comparison experiences on the actual DC servomotor system prove the validity of these techniques.

Keywords: disturbance, measured noise, filter, statistical method, LMS control

摘 要

在实际的计算机控制系统中,存在多种形式的干扰或扰动,这些干扰或扰动伴随着系统的动态响应而存在,使得被控对象不能很好地跟踪期望信号或平稳地工作在设定点上。为了得到期望的高精度控制效果,需要结合实际控制系统来分析研究不同干扰的来源及其消除方法。本文对一个计算机控制的直流电机随动系统中各种干扰做了分析并提出了几种消除方法,实际电机上的对比实验结果表明这些方法的有效性。

关键词: 干扰,量测噪声,滤波,统计方法,最小方差控制

0 引言

在实际的计算机控制系统的运行过程中,所得到的测试效果会受到各种干扰因素的影响而导致不理想的控制精度。在所有的实际应用系统中均含有各种噪声和扰动,它们或来自被测信号源,或来自传感器以及内部或外界干扰等,这些干扰可能导致诸如电梯的抖动而影响舒适度,或电机速度或位置控制系统的迟滞而影响控制精度。从控制的观点来看,所有被控对象模型以外的因素对系统所产生的作用,都可以被认为是系统内部或外部的某种干扰或扰动对系统的影响,而系统中某些扰动的作用效果均是通过系统传感器测量到的,所以对系统工程师来说,解决由于不明扰动因素对系统的影响,实际上等效于寻找有效地消除系统的干扰所引起的测量噪声的方法。为了进行准确测量和高精度控制,必须消除被测信号中的噪声和干扰,其措施有软硬件两方面。硬件措施如果得当,可将大部分干扰拒之门外,但仍然会有少数干扰进入微机系统,所以软件抗干扰措施作为第二道防线是必不可少的。任何一个实际存在的动态系统通常都具有不同程度的不确定性,这种不确定性可以视为是对确定性系统的扰动,主要有以下三类:①系统传感器的测量具有量测噪声;②系统的输入包含有随机干扰;③系统的模型参数甚至结构具有不确定性。其中前两类是不确定的环境因素或外部扰动,第三类属于不确定的模型因素或内部

扰动。一般而言,对于系统模型确定、只存在外部扰动的问题可以通过随机控制来解决;而在系统模型参数未知或随时间变化的情况下,需要先对模型参数进行估计,然后依照优化性能指标综合最优控制律,进行自适应控制。下面对于前两类系统的干扰分别采用统计、滤波和最小方差控制三种方法进行信号的调节与控制,并通过一个实际的计算机控制下的电机随动系统进行验证和效果对比实验。

1 系统的量测噪声及消除

1.1 量测噪声的影响

用来进行实验的控制系统的硬件部分包括计算机、12 位数模转换板(最大输入/输出范围为[-2048 2048]数字量)、前置功率放大电路板、直流力矩电机和直流测速机。在实验中所考虑的是随动系统的速度调节和速度跟踪问题,因而取电机的速度为被控变量。实验系统中电机的转速是通过转轴和直流电机轴耦合在一起的直流测速机测量得到,并送入嵌在计算机 ISA 槽中的通用数据采集控制板,经过 A/D 转化后由中断转入计算机控制程序。速度测量信号从测量、传输和转换,直到最终传送到计算机控制程序,各环节都可能引入噪声,如来自交流电源的干扰、来自信号通道的干扰和嵌在计算机扩展槽中的数模转换板受到的计算机内部各种器件的电磁干扰等。

为了对比的方便,首先给出电机控制系统在零输

* 中科院优秀青年学者奖资助项目

入情况下测量得到的系统输出,如图 1 所示。随机噪声上下占有 ± 15 个数字量,可见该电机控制系统存在着严重的噪声干扰。实验系统的控制周期是 10ms,在每一控制周期内先获得当前系统的速度输出,再根据一定的控制算法计算得到控制量并通过数模转换板对电机进行控制。

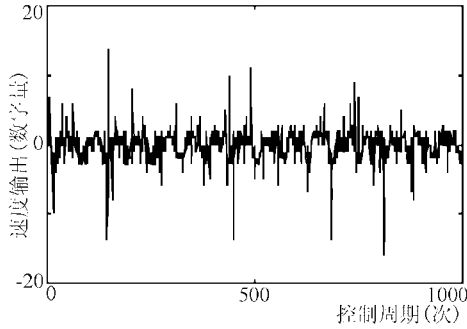


图 1 零输入时测量到的系统输出值

在实际系统控制中,量测噪声的存在严重影响系统下一步的模型辨识和控制器设计。系统模型是系统的输入输出数据通过某种辨识算法(如 Armax 模型辨识算法)得到的,大量量测噪声的存在可能使辨识得到的模型具有较高的阶次且不能很好的逼近实际系统。利用不理想的模型得到的控制算法的控制效果一般也是不好的。因此,必须对量测得到的系统输出进行预处理,尽可能的从受噪声污染的量测信号中还原出电机的“真实”速度信号。最直接的方法是充分利用计算机控制系统的计算能力,构造数字滤波器来达到目的。

1.2 消除量测噪声的滤波器设计

量测信号中的高频噪声可以通过设计低通滤波器来消除,问题是如何设计出一个简单实用的滤波器。一个理想低通滤波器具有如下频率特性:对信号中低于截止频率的频率分量的增益为 1,高于截止频率的频率分量的增益为 0,依照最小方差准则设计一个无限冲击响应(IIR)滤波器来逼近理想低通滤波器,这可以运用 Matlab 的信号处理工具箱中的 yulewalk 函数来实现。截止频率的选取应该在不影响系统特性的基础上尽可能的低。考虑到系统的主导时间常数即电机的机电时间常数约为 800ms,其频率为 1.3Hz,按照扩大 4 到 6 倍的原则,截止频率应该选择 8Hz 以上。实际仿真实验表明为了逼近较小截止频率的理想低通滤波器,IIR 滤波器的阶次将变得很高,不利于实际计算机控制算法实现。通过实际滤波效果实验,在所做的实验系统中选取截止频率为 15Hz,IIR 滤波器阶次为 2,由此得到的离散型滤波器传递函数为:

$$F(Z^{-1}) = \frac{Bh(Z^{-1})}{Ah(Z^{-1})} = \frac{0.1792 + 0.2295Z^{-1} + 0.1787Z^{-2}}{1 - 0.6700Z^{-1} + 0.2572Z^{-2}}$$

图 2 是实际电机控制系统的开环阶跃响应曲线

中已到达稳态响应的一段,输入给系统的期望信号为 600 数字量。作为对比,前 500 个控制周期是没有加入滤波器时系统的响应信号,从中可以看出存在最大跨越大于 15 个数字量的尖峰噪声;而 500~1000 之间的控制周期是加入所设计的滤波器的系统响应信号,从图中可以看出基本上除去了尖峰噪声,滤波后系统速度信号变化范围约为 ± 5 个数字量。

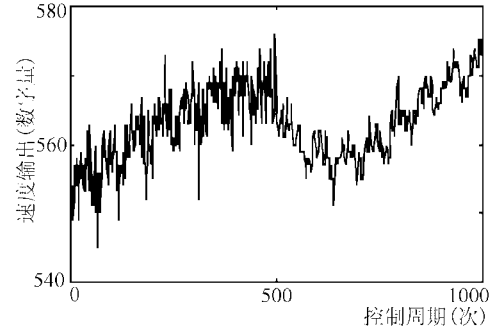


图 2 系统阶跃响应在没有滤波和具有滤波情况下的对比实验

1.3 采用统计方法消除尖峰干扰

仔细分析数据采集系统中的尖峰噪声,从理论上来说这些尖峰干扰只可能是数据采集通道引入的噪声而不是实际电机的速度跳变(因为对于实际具有惯性的电机系统不可能有那么大的加速度)。假如在一个控制周期内连续对电机转速采样 n 次,在采样间隔很小且采样噪声符合高斯分布情况下, n 次速度采样信号 $v_1, v_2, \dots, v_n$ 应近似服从高斯分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 。由统计学的理论可知,大多数的采样样本都集中在样本均值附近,偏离样本均值较远的样本可以认为是一些“异常”样本,即受到噪声严重污染的样本,表现为尖峰信号,从而我们可以用统计方法除去这些尖峰干扰。对一个控制周期中的 n 个连续采样样本,计算其均值和方差的无偏估计:

$$\hat{\mu} = \left(\sum_{i=1}^n v_i \right) / n, \quad \sigma = \sqrt{\frac{(v_i - \hat{\mu})^2}{n-1}}$$

样本出现在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 范围内的概率为:

$$P(\mu - 3\sigma < x < \mu + 3\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \int_{\mu - 3\sigma}^{\mu + 3\sigma} e^{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}} dx = 0.9973$$

从而可以将 3σ 作为误差界限,剔除在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 之外的采样样本,取剩余样本的均值作为这一控制周期的速度信号。我们将统计方法用于尖峰干扰的消除中,在实际电机速度控制系统实验中取 $n=5$,即在 10ms 控制周期中连续采样 5 次。图 3 给出了实际控制系统在 600 数字量阶跃输入下的电机速度响应曲线,图中曲线 y_2 是经过统计方法去噪后系统阶跃稳态响应中的一段,经过统计方法处理后系统速度信号变化范围为大约为 5 个数字量。曲线 y_1 是作为对比的

采用滤波器去噪后系统阶跃稳态响应中与 y_2 响应相同的一段。由对比可见,在本系统中采用所设计的统计方法对尖峰干扰的消除作用比用 1.2 节中设计的滤波器的滤波效果要好:不仅消除了尖峰干扰,而且还具有一定的对阶跃响应的调节作用。

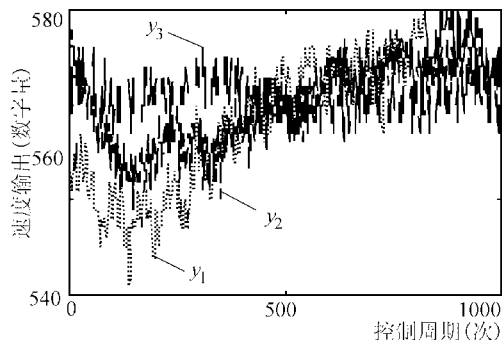


图 3 3 种不同方法的对比实验响应

1.4 统计方法和滤波方法比较

利用统计方法和滤波器方法都能得到较好的滤除尖峰干扰的效果。数字滤波器设计和实现方便,可以在控制系统的不同阶段灵活应用,但是需要信号和噪声频谱的一些先验信息;而统计方法主要用来剔除测量信号中的“坏”样本,相对地对硬件的要求比较高,因为需要在一个控制周期内完成 n 次连续采样、统计分析和控制量计算等工作,要求系统具有较快的运算速度。在实际系统中可以灵活应用这两种方法,如可将统计方法作为数据采集系统的一部分,而在系统的适当环节中运用滤波器对信号做进一步处理。

2 平稳随机干扰下的最小方差控制

对于被控对象的输入端具有扰动输入 V_k 和被控对象的输出端具有量测噪声 N_k 的控制系统,在 V_k 和 N_k 都是平稳(弱平稳)随机干扰序列情况下,可以等效为一个平稳随机干扰序列作用于被控对象的输出端,根据平稳随机序列的白噪声模拟,又可等效为白噪声干扰序列经过一个滤波器加到对象的输出端。通过 Armax 模型辨识算法得到平稳随机干扰项,求解使系统输出的方差最小的最优化问题得到最小方差控制律,使得系统稳定在工作点(最小方差调节)或以最小方差跟踪参考信号(最小方差控制)。在本实验中,系统模型参数事先通过模型辨识算法离线获得并假定模型参数不随时间变化。在我们的实际系统中辨识得到系统的 Armax 模型为:

$$A(z^{-1})=1-0.9973z^{-1}$$

$$B(z^{-1})=0.0019+0.0091z^{-1}$$

$$C(z^{-1})=1+0.1795z^{-1}$$

由于系统为非最小相位系统,必须用广义最小方差控制器算法,即在优化函数中加入对控制量的加权项,由此得到的一个广义最小方差控制律为:

$$u(k)=-0.1882u(k-1)+1.1773r-1.1746y(k)$$

其中 $u(k)$, $u(k-1)$ 为第 k 和 $k-1$ 个控制周期的控制量, $y(k)$ 为第 k 个控制周期的系统输出, r 仍然是幅值为 600 数字量的系统输入。在实际系统中运用所设计的广义最小方差控制律得到的控制效果如图 3 中 y_3 曲线所示。与前两种方法相比,从图中的曲线 y_1 和曲线 y_2 可以看出,虽然电机在阶跃控制信号下已经达到了阶跃响应的平稳段(本图的横坐标 1~1000 对应实际系统控制周期 2001~3000),但是由于摩擦力等干扰使电机速度有较大波动,而运用最小方差控制律后使电机平稳工作在设定值附近,在 1000 个控制周期内整个速度幅值偏差大约只有 ± 5 个数字量。

3 消除干扰方法在 PID 控制中的效果

我们将消除量测噪声的滤波方法和统计方法分别加入到采样系统中,并作为采样系统的一部分,用软件方法来改善硬件系统的不足,由此得到一个更纯净、有效的采样系统。为了对上述 3 种消除干扰方法的性能进一步进行比较,在电机控制系统中,分别采用不同软件去噪方法结合 PID 控制进行对比实验,系统的期望函数为幅值 400 的正弦输入。为了对比的方便,图 4 给出了实验系统响应的跟踪误差曲线。图中 y_1 是没有采用消除干扰方法的原系统在 PID 控制器作用下的系统跟踪误差,从图中可以看出系统误差的最大幅值超过 ± 15 个数字量; y_2 是滤过波的量测信号与 PID 控制器结合后的系统跟踪误差曲线,此时最大的误差幅值在 ± 10 个数字量以内; y_3 是用统计方法对量测信号作处理后再采用 PID 控制的系统跟踪误差曲线,它的最大误差幅值只有 ± 5 个数字量左右,取得了最佳控制效果。由此可见,干扰消除方法的恰当使用能极大提高具有噪声干扰的实际控制系统的控制精度。

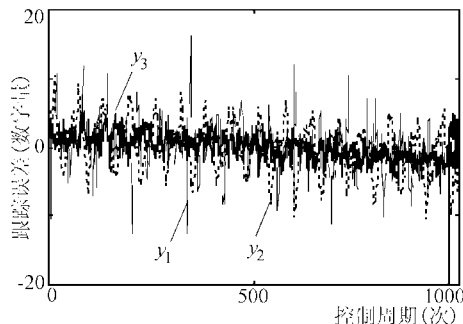


图 4 PID 控制器作用下的不同去噪方法的对比结果

参考文献

- 1 李树英.随机系统的滤波与控制.国防工业出版社,1991
- 2 周凤岐.现代控制理论及其应用.电子科技大学出版社,1994
- 3 刘学平.数据采集集中随机尖峰干扰的消除方法.微型电脑应用,1998(6):91~92

[收稿日期:2002.5.22]