

动态系统的时滞估计方法¹⁾

张泳健 周东华

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘要 本文介绍了时滞估计方法的发展状况, 对各种时滞估计方法进行了分类与评述, 指出了当前亟待解决的若干前沿课题, 并对时滞估计的发展前景进行了展望.

关键词 时滞, 参数, 估计, 自适应, 随机过程.

1 引言

时滞估计(Time Delay Estimation: TDE)在许多领域都是一个很重要的问题. 比如在声纳探测、雷达追踪与定位、生物医学工程、地球物理学[1]-[5]、声学、通讯、信号处理等众多学科中都需要对信号的滞后时间作出准确估计. 在过程控制中, 也常常遇到大滞后, 且滞后时间又是时变的被控过程[6, 7]. 滞后时间对被控过程有着很大的影响, 因此对滞后时间或滞后环节的估计, 在控制系统中, 也越来越成为不可忽略的关键因素. 它直接关系到控制算法是否可行, 其控制行为是否有效, 以及控制结果是否收敛等一系列问题. 由此可见, 对信号的时滞估计或对系统滞后时间的辨识有着广泛的应用领域, 它对科学研究和国民经济均具有重要意义.

时滞的种类是多种多样的, 其具体表现形式是复杂的. 到目前为止, 在各个领域所研究的时滞估计问题大致可由下面三类模型描述:

$$I: \begin{cases} x_1(t) = s(t) + n_1(t) \\ x_2(t) = As(t - D) + n_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $s(t)$ 为源信号, $n_1(t), n_2(t)$ 为干扰噪声, D 为时滞, A 为增益. 此模型广泛应用于声学、信号处理等领域.

$$II: y(t) = \sum_{k=1}^K \alpha_k s(t - \tau_k) + n(t) \quad (2)$$

其中, α_k 为各通道信号增益, τ_k 为各通道信号时滞, k 为通道数, $n(t)$ 为随机噪声. 此模型多用于多通道信号时滞估计.

$$III: A(z^{-1})y(k) = z^{-d} B(z)u(k) + v(k) \quad (3)$$

其中, $A(z^{-1}) = 1 - a_1 z^{-1} - \dots - a_{na} z^{-na}$, $B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{nb} z^{-nb}$, $u(k)$ 为输入, $y(k)$ 为输出, $v(k)$ 为噪声, d 为时滞. 此模型多用于过程控制中.

许多复杂的时滞估计模型多是从以上三类模型演变而来的, 他们在这些模型的基础上, 或者时滞出现的位置不同, 或者由线性系统改为非线性系统, 或者由定常时滞变为时变时滞、单通道变为多通道. 因此对上述三种模型的时滞估计的研究具有一定的普遍

¹⁾ 国家自然科学基金会, 863 计划与教育部资助项目

意义。

目前,时滞估计的方法已有很多,它们涉及多门学科,如信号处理,系统辨识,现代控制理论,计算机科学,随机过程理论,统计学及其相关应用学科。现有的时滞估计方法,概括起来可以分为以下几类:1) 基于随机过程的方法; 2) 基于参数估计的方法; 3) 基于现代谱分析的方法; 4) 基于自适应的方法; 5) 其他方法。在下面几节,我们将分别给出各类方法的主要特点。

2 随机过程方法

这类方法主要是采用随机过程的方法以及一些应用数理统计的方法来进行时滞估计。早在 1974 年, Isermann 等人就提出了利用相关分析法来估计时滞, 到目前为止, 采用相关分析法估计时滞已经有了很大发展。文[12]中采用相关分析法和时间序列分析法相结合对模型参数和时滞进行估计, 并可用于存在相关噪声的情形。该算法具有一定的鲁棒性。文[13]采用相关分析法估计大噪信比条件下的时滞, 其性能优于同条件下的极大似然法。统计学经常被用到时滞估计方法中。文[14]提出了两类基于多阶统计量的时滞估计方法, 通过统计得到峰值来达到估计时滞的目的。文[15]提出了一种基于统计决策估计多通道时滞的 RSP (Regression Step Procedure) 算法, 它计算简单, 所需先验知识少, 有一定的使用价值。EM (Estimate Maximize) 算法在时滞估计中也得到了应用。该方法首先对统计数据求期望值, 然后再做极大似然处理, 得出最可能的值作为时滞估计值。但这种方法的计算量比较大, 其应用受到一定的限制[16]-[17]。

采用随机过程理论估计时滞的方法还有很多, 如: 广义的互相关函数方法, 平均方差函数法, 平均绝对值误差函数法。这三种方法比较直观易懂, 使用起来比较方便, 而且无需先验知识。但是, 这三种方法受噪声的影响比较大, 尤其当存在相关噪声或有色噪声的时候, 时滞估计会产生比较大的偏差, 因此在应用中有一定的局限性。现在已有不少学者对这些方法做了进一步改进, 使得在噪声条件下可提高时滞估计的精度[8]-[11]。文[18]利用投影技术, 由因果律出发, 通过变差的分解, 经 F 检验确定时滞因子, 等等。这些方法都是随机过程理论的应用, 均能达到时滞估计的目的[19]-[20]。

3 参数估计方法

极大似然(ML)估计是一种常用的方法。本质上, 极大似然法就是求出使似然函数最大的一个参数作为估计值, 其估计是一致、有效的。但是极大似然法很难得到无偏估计, 并有可能导致非线性估计或多值优化问题, 有时还要考虑计算量的问题, 因此其应用受到一定限制[21]-[25]。线性均方估计的原理就是采用正交性原理确定各个系数使估计值的均方误差达最小[26]-[27]。而且它常与自适应方法相结合使用, 可以收到比较好的时滞估计效果。最小二乘在系统辨识和参数估计中是最经常使用的方法, 最小二乘结构中待估计参数与噪声项无关即可保证无偏估计。在时滞估计方法中, 有的是直接采用最小二乘法来估计时滞[28]。有一类方法是扩展 B²-多项式方法, 把时滞作为待辨识参数的一部分来估计时滞[29]。基本最小二乘法, 递推最小二乘法, 加权最小二乘法等等构成了最小二乘类方法。许多时滞估计方法都是由这些最小二乘类方法演变发展而来的, 可见这类方法有着极其广泛的应用[30]-[33]。

在递推估计中, 当前估计值仅由前一时刻的估计值和当前观测值决定, 而与过去的观测值无关。递推算法适合于在线参数估计, 与批处理方法相比, 递推估计算法计算量

小, 跟踪迅速, 估计准确. 在时滞估计中, 递推算法与不同的理论相结合, 产生出多种时滞估计递推算法, 以达到在线迅速估计时滞的目的[32], [33]-[37].

4 现代谱分析方法

利用给定的 n 个样本数据估计一个平稳随机信号的功率谱密度叫做谱分析. 在雷达信号处理中, 由回波信号功率谱密度、谱峰的宽度、高度和位置, 可以确定运动目标的位置、辐射强度和运动速度. 在被动式声纳信号处理中, 谱峰的位置可给出鱼雷的方向. 在生物医学工程中, 功率谱密度的峰形和波形可显示癫痫发作的周期, 等. 在这些领域中, 用现代谱分析的方法估计时滞是切实可行的.

文[38]中以参量法极点分解为模式, 提出了一种奇异值分解的新算法, 以实现多辐射源多传感器环境的被动时滞估计. 该算法不仅能够抑制信噪比, 并且具有计算稳定性好、精度高等优点. 文[39]在特征分解法之一的 PRONY 法的基础上, 利用插值和 Z 变换, 得到了求解时滞的算法. 该方法基本解决了不允许指数信号叠加时时滞的求解问题, 结果有一定的抗噪性, 且可以快速实现. 文[40]中采用类似二维 ESPRIT 的转移不变技术估计时滞所产生的相角移动, 进而估计出时滞. 文[41]提出了一种基于子空间的方法, 通过信号和噪声的子空间的匹配, 并用扩展 MUSIC 和 ESPRIT 方法得到时滞估计.

另外, 还有一些现代谱分析法, 如最大似然谱估计等, 在时滞估计中也有不同程度的应用.

5 自适应方法

在实际的时滞估计过程中, 很多情况是对信号和噪声的先验知识了解的比较少, 或者其统计特性随时间而变化, 而且时滞本身也随时间变化. 在这种条件下, 用自适应的方法估计时滞会取得比较好的估计效果, 而且便于在线实现.

文[29, 33, 42]把递推最小二乘法与自适应法相结合, 形成 RLS 自适应方法, 可以对时滞达到实时跟踪, 在线估计. 其基本原理是使恢复误差最小化, 或等价于预报误差最小化. 其中, 最小二乘法可以根据实际情况选取. 最小均方(LMS)自适应滤波器方法是通过调节权系数, 使线性组合器的输出信号与期望响应之间误差的均方值取最小值, 以达到对时滞的最佳估计. 这类方法应用比较多, 可以获得比较快速的收敛性, 对时滞变化跟踪迅速[43]-[48].

从原理上讲, 任何过程均可以用有限冲激响应(FIR)模型来近似. 自适应 FIR 滤波器因其易理解和简单易行而得到大量应用. 但是在噪声情况下, 很难得到精确 FIR 模型, 只能给出近似的估计, 而且对有些问题, 这种方法的计算量明显增大, 其应用受到一定限制. 目前已有一些改进的自适应 FIR 滤波器方法应用于时滞估计[49]. 自适应无限冲激响应滤波器(IIR)也是热门研究方向之一. 与自适应有限冲激响应滤波器相比, 自适应 IIR 滤波器的主要优点是: 与系数个数相同的自适应 FIR 滤波器相比, 它可提供好得多的滤波性能. 一个具有足够高阶数的自适应 IIR 滤波器可以准确地描述一个未知的零、极点系统的模型, 而自适应 FIR 滤波器只能近似这样的系统. 为了得到同样性能, IIR 滤波器一般只需要使用比 FIR 滤波器少得多的系数. 由于计算复杂性潜在地降低, 自适应 IIR 滤波器在许多应用中将取代已广泛使用的自适应 FIR 滤波器. 文[49]采用的就是基于自适应 IIR 滤波器的方法估计时滞, 具有比较好的收敛性和跟踪性.

文[50]给出了一种基于梯度衰减法的自适应时滞估计方法. 用梯度法来调整 IIR

滤波器的系数使均方误差最小,再经过适当的处理即可得到时滞估计值.此方法还可以估计采样时间非整数倍的时滞.但这种估计方法有时会导致一些复杂的非线性问题,其应用受到一定制约.文[51]介绍了一种在非高斯噪声条件下,运用梯度型自适应方法估计时滞的方法,一定程度上可以克服噪声的干扰.文[52]给出一种简明的算法,并体现出了梯度型自适应方法的快速收敛性和良好的跟踪性.文[53]提出了一种包括时变时滞在内的参数估计方法.其基本思想是:由模型参考自适应方法使参考模型的时滞 d_m 在线跟踪真实模型时滞 d ,在此基础上利用最小二乘法辨识过程参数 a_i, b_i .可见,该方法是一种参数辨识的混合算法.它着重解决了这样两个问题:1)离散滞后时间的估计算法;2)在模型变结构的情形下,(滞后时间变化相当于模型结构发生变化),如何实现不同模型结构下“新”、“旧”估计参数之间的转换.

此方法算法简便,实用性强,为时变时滞系统的自适应控制提供了一种重要手段.图1给出了这种方法的基本原理.

6 其他方法

小波变换和小波分析方法是八十年代后期发展起来一种新型信号处理方法,它正日益受到人们的重视.文[54]采用快速傅立叶变换优化离散小波尺度因子,进而估计宽带时滞.随着小波分析理论的发展,它在参数估计和时滞估计方面的应用还有待进一步的研究与探索[55].

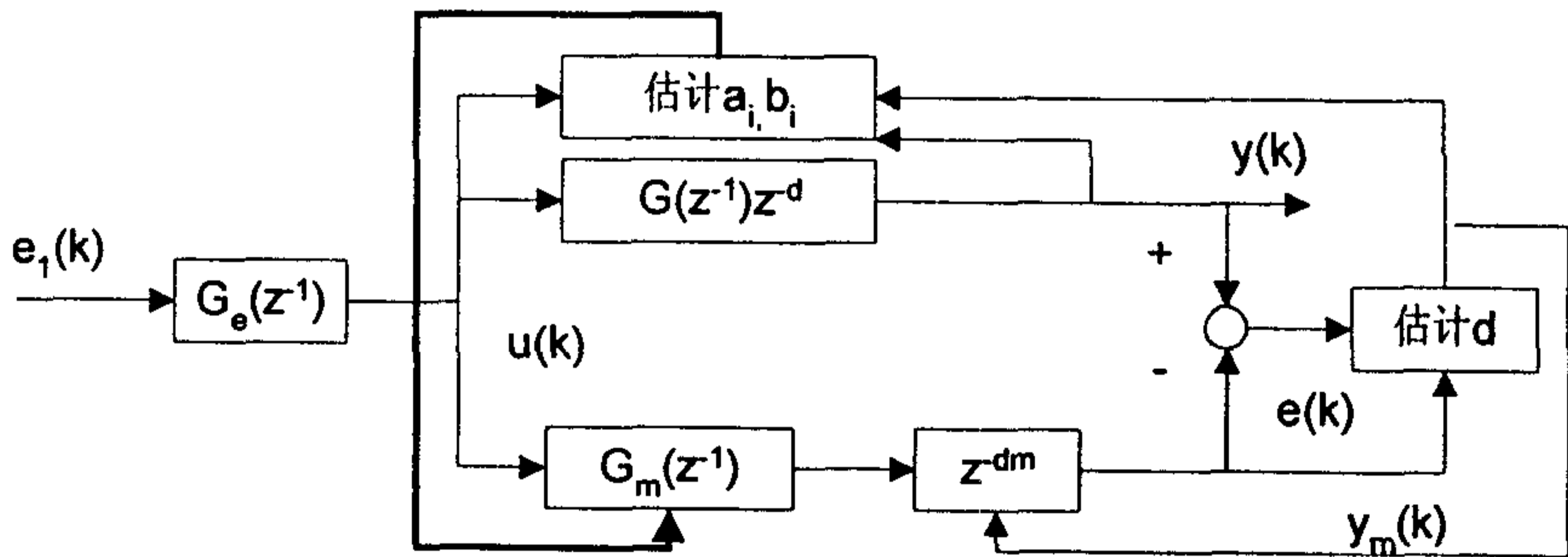


图1 模型参考自适应方法结构框图

文[56]提出了一种基于信号积分的时滞估计方法.该方法首先将源信号和时滞信号归一化或称作标准化.并将两个标准化后的信号相减,用两者差值在全样本空间积分,积分结果即为所求时滞.在有噪声的情况下,做相应的改进,可以达到比较好估计效果.此方法有一定新意.文[57]提出了一种基于加权傅立叶变换的有效时滞估计方法,把时滞估计问题转化成频域非线性匹配问题来处理,进而估计时滞.文[58]提出了一种鲁棒时滞估计方法.文[59]提出了一种基于离散时间的时滞估计方法,等等[60].现有的时滞估计方法还有很多,它们或是另辟蹊径,或是对已有方法的改进和在某一方面的应用.总之,殊途同归,均能够在一定程度上解决时滞估计问题,其中,有些方法很值得借鉴.我们在文[61-63]中提出了一种估计一类非线性系统时变时滞与参数的遗传算法方法,可以用于时变规律未知的时变时滞的在线估计.仿真结果验证了此方法的有效性.

7 结论与展望

基于随机过程的时滞估计方法原理直观易懂, 使用简便, 但比较容易受噪声影响. 尤其当噪声相关时, 其估计精度会受到很大影响. 基于参数估计的时滞估计方法, 其性能与参数估计方法有关. 其中最小二乘法得到广泛应用, 但有时参数的扩展会导致计算量增加; 而且当系统存在大时滞时, 其算法收敛性会变差; 在过程控制中, 时滞的估计与模型阶次密切相关, 许多在线时滞估计方法要求对模型阶次有较多或较准确的先验知识, 而阶次有时也是变化的, 这给时滞估计带来一定的困难, 算法有待进一步改进. 基于现代谱分析的时滞估计方法从频谱的角度估计时滞, 有时会引入非线性环节, 增加问题的复杂性. 基于自适应的时滞估计方法, 比较适于在线估计, 有利于算法的实现, 并对时变时滞有较好跟踪性能.

到目前为止, 比较成功的时滞估计方法主要是针对线性时不变定常系统的, 这也是一种最简单的情况. 然而许多实际系统的模型是复杂的, 在实际过程中, 有很多非线性环节, 他们将导致系统的非线性, 从而给系统辨识和时滞估计带来很大困难. 非线性系统的时滞估计问题还没有得到很好的解决, 因此非线性系统的时滞估计已成为一个亟待解决的前沿课题. 另外, 由于在实际过程中时滞不是一成不变的, 所以有必要对时变时滞进行在线实时辨识, 这样才有可能及时跟踪时滞的变化. 目前已有的许多在线时滞估计算法大多属大样本结果, 只有在样本足够大时, 才能近似地加以利用. 由此可见时变时滞的在线估计问题, 实际上还没有很好解决. 另外, 当系统时滞很大时, 时滞估计算法还有待进一步的研究.

时滞估计的实用性和针对性都很强, 针对不同的对象, 已经有很多有效的时滞估计方法, 因此只有在实际应用中才能体现出这些方法的价值, 同时又可发现新的问题. 随着各种理论方法的发展及其在时滞估计中的应用, 时滞估计方法正处在不断地发展之中. 可以预见, 时滞估计方法将会在实际应用中发挥出越来越重要的作用.

参 考 文 献

(共 63 篇, 略)

张泳健 男, 1974 年生, 1997 年毕业于清华大学自动化系获硕士学位. 现为清华大学自动化系硕士研究生, 已发表论文 6 篇, 研究方向是动态系统的时滞估计, 故障诊断等.

周东华 男, 1963 年生, 1990 年毕业于上海交通大学自动控制系获博士学位. 现为清华大学自动化系教授, 博士生导师. 中国自动化学副秘书长, 已在国内外学术刊物上发表论文 60 余篇, 出版学术专著 2 部. 研究方向是: 过程辨识, 动态系统的故障诊断与容错控制等.