

文章编号: 1001-0920(2004)07-0824-03

面向控制器设计的多变量系统辨识实验信号

张立群, 邵惠鹤

(上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

摘要: 给出一种当多变量系统辨识模型用于控制器设计时的开环实验输入信号。假定系统未建模动态可以用加性不确定性表示, 取实际输出和理想输出误差平方均值最小, 将其与系统辨识最小二乘法相结合, 得到一种最优输入信号的设计方法。因输入信号与控制性能的相关性, 可获得比普通随机信号更好的辨识结果。仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词: 控制相关的辨识; 实验设计; 多变量系统

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Multivariable systems identification signal based on the controller design

ZHANG Li-qun, SHAO Hui-he

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China Correspondent: ZHANG Li-qun, E-mail: zlq@sjtu.edu.cn)

Abstract: The problem of control-relevant experiment design of the multivariable systems is considered. By using the additive error with respect to the model, the mean squared error between the real output and the ideal output is chosen as the performance index. The least square method is used to associated the control performance index with the input signal design. The method is control-relevant, and it can get better result compared to the classical signals. The simulation result shows the effectiveness of the method.

Key words: identification for control-relevant; experiment design; multivariable systems

1 引言

在基于模型的控制中, 控制器性能取决于设计时所采用的系统模型的精确程度。经典的辨识理论追求的是精确估计对象。在很多情况下, 根据辨识模型设计的控制器性能并不仅仅由辨识结果决定, 即精确的开环辨识模型并不一定能得到良好闭环控制性能^[1]。系统辨识的效果受到几个因素制约: 待辨识对象的动态特性; 选取的模型结构和参数化方式; 系统辨识的实验条件等^[2]。实验条件的选取, 如用于激励系统的输入信号, 对辨识得到的模型精确度有很大的影响。因此, 信号设计是系统辨识的第1步也是

重要的一步。由方差渐近理论, Ljung^[2]设计了开环测试信号; Zhu^[3]将其成功地应用于许多工业过程中; Forsell^[4]根据方差渐近理论推导出最优实验条件, 给出了输入信号的功率谱密度和闭环最优控制器, 但其最优解与未知对象的传递函数有关, 缺乏实用性; Cooley^[5]提出采用迭代法设计系统辨识实验输入信号。仿真表明, 由于采用控制相关的输入信号设计方法, 得出的模型更适合于控制器的设计。

本文考虑当未建模动态可以用加性不确定性表示时, 取实际输出和根据真实模型设计的理想控制器下输出间误差的平方均值作为性能指标, 给出了

收稿日期: 2003-06-30; 修回日期: 2003-12-27

作者简介: 张立群(1975—), 男, 山东济南人, 博士生, 从事系统辨识、实验设计的研究; 邵惠鹤(1936—), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 从事工业过程控制、系统辨识的研究

相应系统辨识实验信号设计方法, 并通过仿真说明了该方法的有效性

2 问题描述

考虑多输入多输出线性时不变系统

$$y(t) = G(q)u(t) + d(t), \quad (1)$$

其中: $u(t) \in R^m$ 是输入向量; $y(t) \in R^m$ 是输出变量; $G(q)$ 是 $m \times m$ 维真实对象的传递函数; $r(t) \in R^m$ 是参考输入信号; $d(t)$ 是 m 维输出端白噪声, 假定其均值为 0, 方差为 1; 符号 q 表示移位算子, $q^{-1}u(t) = u(t-1)$; $\hat{G}(q)$ 为 $m \times m$ 维系统辨识模型 闭环系统的控制框图如图 1 所示

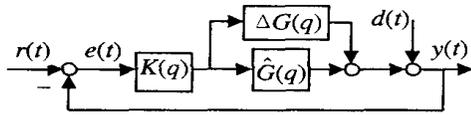


图 1 闭环控制

2.1 评价函数

假定系统辨识的目的是设计闭环控制器 选用实际输出和由补灵敏度函数定义的理想输出间误差平方均值作为衡量辨识模型质量的标准, 即

$$J = E((y(t) - y_d(t))^T (y(t) - y_d(t))). \quad (2)$$

考虑系统的未建模动态用加性不确定性表示,

即

$$G(q) = \begin{bmatrix} G_{11}(q) + \Delta G_{11}(q) & \dots & \hat{G}_{1m}(q) + \Delta G_{11}(q) \\ \vdots & & \vdots \\ \hat{G}_{m1}(q) + \Delta G_{m1}(q) & \dots & \hat{G}_{mm}(q) + \Delta G_{m1}(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{G}_{11} & \dots & \hat{G}_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ \hat{G}_{m1} & \dots & \hat{G}_{mm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta G_{11} & \dots & \Delta G_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ \Delta G_{m1} & \dots & \Delta G_{mm} \end{bmatrix} = \hat{G}(q) + \Delta G(q). \quad (3)$$

其中: $\hat{G}(q)$ 为辨识模型, $\Delta G(q)$ 为 $m \times m$ 维未建模动态

由式(3)可得, 系统实际输出与理想输出间误差

$$e(t) = S(G - \hat{G})(I + GK)^{-1}K \eta(t) = S(G - \hat{G})(I + \hat{G}^{-1}H \Delta G)^{-1}\hat{G}^{-1}H \eta(t). \quad (4)$$

其中: $S = (I + GK)^{-1}$ 是系统的灵敏度函数, $H = (I + \hat{G}K)^{-1}\hat{G}K$ 是补灵敏度函数, 定义 $\eta(t) = r(t) - d(t)$.

根据小增益定理, 系统能够保证稳定, 如果满足条件

$$\sigma(\hat{G}^{-1}(q)H(q)\Delta G(q)) < 1,$$

$$\forall \omega \in \pi \quad (5)$$

其中 $\sigma(\bullet)$ 表示矩阵的最大奇异值

考虑到式(5), 将式(4)进行 Taylor 展开, 得

$$e(t) = S(q)(G(q) - \hat{G}(q))\hat{G}^{-1}(q)H(q)\eta(t) = S(q)(G(q) - \hat{G}(q))\hat{G}^{-1}(q)H(q)\eta(t). \quad (6)$$

2.2 辨识方法

每次只改变一个输入量 i , 保持其他的不变, 有

$$Z_i = \{u_i(1) \dots u_i(N)\},$$

$$y_j = \{y_j(1) \dots y_j(N)\}, 1 \leq j \leq m.$$

利用广义正交基函数作为模型的表示方法^[6].

第 j 个输出为

$$y_j(t) = \sum_{k=1}^{r_i} \theta_{ik} f_k(q) u_i(t) + d_j(t) = \Phi(t) \Theta_i + d_j(t), \quad (7)$$

$$\Theta_i = [\theta_{i1} \dots \theta_{ik}]^T, \quad (8)$$

$$\Phi(t) = \{f_1(q)u_i(t) \dots f_{r_i}(q)u_i(t)\}. \quad (9)$$

其中: $f_i(q)$ 为一组 r_i 维正交基函数, 不同的输入信号, 模型阶数可取不同值; Θ^T 为待辨识的系数矩阵 采用最小二乘法辨识系统参数^[7]

$$\hat{\Theta}_i = (H_i^T H_i)^{-1} H_i^T y_j, \quad (10)$$

$$H_i = \begin{bmatrix} f_1(q)u_i(1) & \dots & f_{r_i}(q)u_i(1) \\ \vdots & & \vdots \\ f_1(q)u_i(N) & \dots & f_{r_i}(q)u_i(N) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$E\{(\hat{\Theta}_i - \Theta_i)(\hat{\Theta}_i - \Theta_i)^T\} = (H_i^T H_i)^{-1} E\{d_j(t)d_j^T(t)\} = p_i, \quad (12)$$

$$E(\hat{\Theta}_i - \Theta_i) = 0 \quad (13)$$

传递函数在频域中方差和均值为

$$E((G_{ji}(\omega) - \hat{G}_{ji}(\omega))^* (G_{ji}(\omega) - \hat{G}_{ji}(\omega))) = \Lambda_i(\omega)^* E((\hat{\Theta}_i - \Theta_i)(\hat{\Theta}_i - \Theta_i)^T) \Lambda_i(\omega), \quad (14)$$

$$\Lambda_i(\omega) = [f_1(\omega) \dots f_{r_i}(\omega)]^T. \quad (15)$$

其中: $f_k(\omega)$ 是对应的正交基函数 $f_k(q)$ 的频率响应; $\{\bullet\}^*$ 表示共轭转置

2.3 信号设计

由功率谱密度的定义, 式(6)和式(13). 假定输入信号 $r(t)$ 和噪声信号 $d(t)$ 不相关 最小二乘法得到的是无偏估计和 Parseval 定理, 将式(2)转化到频率域 为使计算可行, 用先验模型 $\tilde{G}(q)$ 代替辨识模型 $\hat{G}(q)$. 为简化标注, 下文将省略 t, q 和 ω

$$J = E(e^T e) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \Phi^* d\omega =$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S^* E((G - \hat{G})V (G - \hat{G})^*) S^* d\omega \quad (16)$$

$$V = \tilde{G}^{-1} H^* \Phi H^* \tilde{G}^{-*}.$$

由式(16), 最小化式(2) 输入信号序列即满足

$$\min \int_{-\pi}^{\pi} SE((G - \hat{G})V(G - \hat{G})^*)S^* d\omega, \quad (17)$$

因为 $\text{trace}(AB) = \text{trace}(BA)$, 故

$$\begin{aligned} & (G - \hat{G})_{\text{row } i} V (G - \hat{G})_{\text{row } j}^* = \\ & \text{trace}((\Theta - \hat{\Theta})_{\text{row } i}^T \Gamma V \Gamma^* (\Theta - \hat{\Theta})_{\text{row } j}) = \\ & \text{trace}(\Gamma V \Gamma^* (\Theta - \hat{\Theta})_{\text{row } j} (\Theta - \hat{\Theta})_{\text{row } i}^T). \end{aligned} \quad (18)$$

其中 $\Gamma = \begin{bmatrix} \Lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \Lambda_m \end{bmatrix}$.

若不同输出端噪声互不相关, 则由式(12) 和(14) 得

$$\begin{aligned} & E((G - \hat{G})_{\text{row } i} V (G - \hat{G})_{\text{row } j}^*) = \\ & \text{trace}(\Gamma V \Gamma^* E((\Theta - \hat{\Theta})_{\text{row } j} (\Theta - \hat{\Theta})_{\text{row } i}^T)) = \\ & \begin{cases} \text{trace}(\Gamma V \Gamma^* q_j), & i = j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

$$q_i = \begin{bmatrix} p_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & p_m \end{bmatrix}.$$

由式(19) 可知, 式(17) 只有对角线上的元素非零, 即

$$\begin{aligned} & E((G - \hat{G})V(G - \hat{G})^*) = \\ & \text{trace}(\Gamma V \Gamma^* P) I_m, \end{aligned} \quad (20)$$

$$P = \sum_{k=1}^m q_k.$$

其中 I_m 为 $m \times m$ 维单位矩阵, 式(20) 代入式(17) 得

$$\begin{aligned} & \int_{-\pi}^{\pi} SE((G - \hat{G})V(G - \hat{G})^*)S^* d\omega = \\ & \int_{-\pi}^{\pi} (S \text{trace}(\Gamma V \Gamma^* P) I_m S^*) d\omega = \\ & \text{trace} \left[\int_{-\pi}^{\pi} \text{trace}(\Gamma V \Gamma^* P) S^* S d\omega \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

输入信号的设计最终可表示为

$$\min \int_{-\pi}^{\pi} \text{trace}(\Gamma V \Gamma^* P) S^* S d\omega. \quad (22)$$

对上述的非线性规划问题, 可采用遗传算法求解. 考虑到设计信号时 N 不可能取无穷大, 可用迭代法来提高模型的精度. 小增益定理的引入可以用于模型检验^[7].

3 仿真结果

采用如下模型仿真:

$$G(z) = \frac{1}{1 - 1.5z^{-1}} \begin{bmatrix} 0.202 & -0.118 \\ 0.198 & -0.042 \end{bmatrix}.$$

对上述系统, 假定参考输入信号和噪声均为白噪声. 选取有限脉冲响应模型作为系统辨识模型, f_i

$= q^{-i}$, 则 $f_i(\omega) = e^{j\omega i}$. 输入信号取二进制信号, 幅值可参考信噪比确定, 本文取 ± 1 . 取补灵敏度函数 \hat{H} 为

$$\hat{H} = \frac{0.15z^{-1}}{1 - 0.85z^{-1}} I_2.$$

为达到设计的闭环控制性能, 采用如下的基于模型的控制器的设计方法:

$$K(z) = \frac{0.15z^{-1} \hat{G}^{-1}(z^{-1})}{1 - z^{-1}}.$$

首先, 采用普通伪随机二进制信号得到系统的初始模型; 然后利用本文方法设计输入信号, 信号长度为 100 s, 采用多次迭代的方法提高模型的精度.

经 4 次迭代后设计的输入信号, 只取前 50 s 作图, 如图 2 所示. 其中实线为输入信号 1, 虚线为输入信号 2. 图 3 和图 4 是系统控制性能的比较. 采用阶跃响应测试闭环系统的控制性能, 阶跃信号的幅值取为 1. 实线表示迭代 4 次后系统的阶跃响应曲线, 虚线是根据最初的辨识模型得到的控制效果.

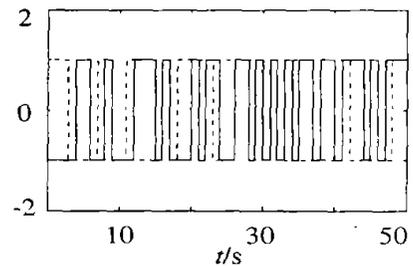


图 2 设计输入信号

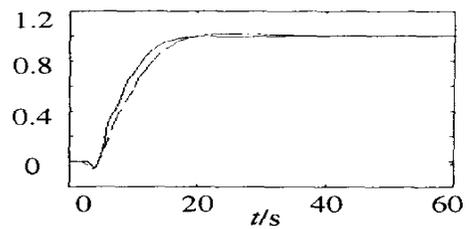


图 3 输出 1 的比较

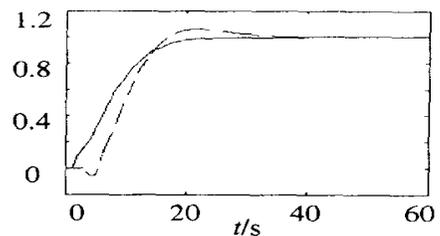
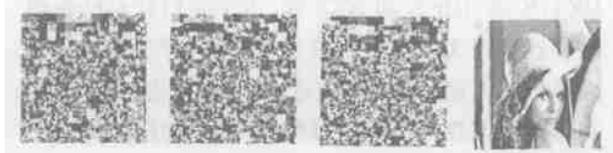


图 4 输出 2 的比较

(下转第 830 页)

1 000 时的解密结果 可见, 解密密钥相差 1 时, 解密结果就完全不可理解, 因此具有较高的密钥敏感性



(a) 加密 (b) 解密 (c) 解密 (d) 解密
图3 密钥敏感性实验

6 结 论

文中提出一种以向量量化编码、分形编码和图像马赛克编码等基于图像库的编码方法为基础的图像和视频的安全传输方案 理论分析表明, 它具有较高安全性, 并且其多级安全性的特点使其适合多种应用场合 实验结果表明, 加密方案具有较好加密效果和较高的密钥敏感性 本文中图像库的选择采用随机抽取的方法, 为了适合更广泛的应用, 可通过统计方法来产生, 这有待继续研究

参考文献(References):

- [1] Chen Tung-shou, Chang Chin-chen, Hwang Min-shiang. A virtual image cryptosystem based upon vector quantization [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 1998, 7(10): 1485-1488
- [2] Cheng Howard, Li Xiaobo. Partial encryption of compressed images and videos[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2000, 48(8): 2439-2451
- [3] Tang L. Methods for encrypting and decrypting MPEG video data efficiently[A]. *Proc of the Fourth ACM Multimedia Conf (ACM Multimedia 96)* [C]. Boston, 1996. 219-230
- [4] Yen Jiu-cheng, Guo Jiu-in. A new MPEG encryption system and its VLSI architecture[A]. *IEEE Workshop on Signal Processing Systems* [C]. Taipei, 1999. 430-437.
- [5] Qiu G, Varley M R, Terrell T J. Image coding based on visual vector quantization[A]. *IEE Conf Publication* [C]. Edinburgh, 1995. 301-305
- [6] Jacquin A. Image coding based on a fractal theory of iterated contractive image transformations [J]. *IEEE Trans Image Processing*, 1992, 1(1): 18-30
- [7] Finkelstein A, Range M. Image mosaics[A]. *Proc of the EP 98 and RIDT 98 Conf* [C]. St Malo, 1998. 11-22
- [8] Lin Ken K, Gray Robert M. Vector quantization of video with two codebooks[A]. *Data Compression Conf Proc*[C]. Snowbrid, 1999. 537.
- [9] Lazar M S, Bruton L T. Fractal block coding of digital video[J]. *IEEE Trans on Circuits & Systems for Video Technology*, 1994, 4(3), 297-308
- [10] Litwinowicz P. Processing images and video for an impressionist effect[A]. *Proc of the ACM SIGGRAPH Conf on Computer Graphics*[C]. California, 1997. 407-414

(上接第826页)

4 结 论

本文设计了一种当系统的未建模动态可表示为加性不确定性时的系统辨识最优输入信号设计方法 取实际输出与根据实际模型设计的理想控制器下输出间误差的平方均值最小作为性能指标 用正交基函数表示辨识模型, 结合最小二乘法和小增益定理, 给出辨识实验输入信号设计方法 仿真结果证明了方法的有效性

参考文献(References):

- [1] Gevers M, Ljung L. Optimal experiment designs with respect to the intended model application[J]. *Automatica*, 1986, 22(5): 543-554
- [2] Ljung L. *System Identification: Theory for the User* [M]. 2nd ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1999.
- [3] Yucai Zhu, F Butoyi. Case studies on closed-loop identification for MPC [J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(4): 403-417.
- [4] Forssell U, Ljung L. Some results on optimal experiment design[J]. *Automatica*, 2000, 36(5): 749-756
- [5] Cooley B L, Lee J H. Control-relevant experiment design for multivariable systems described by expansions in orthonormal bases[J]. *Automatica*, 2001, 37(2): 273-281.
- [6] Van den Hof, Heuberger O M J, Boker P S C. System identification with generalized orthonormal basis functions[J]. *Automatica*, 1995, 31(12): 1821-1834
- [7] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版, 1998