

容积室压力的无模型自适应控制研究

张 昱¹, 刘 钊¹, 陆军伟²

ZHANG Yu¹, LIU Zhao¹, LU Jun-wei²

1. 同济大学 机械工程学院, 上海 201804

2. 上海市特种设备监督检验技术研究院, 上海 200062

1. Mechanical Engineering College, Tongji University, Shanghai 201804, China

2. Shanghai Institute of Special Equipment Inspection & Technical Research, Shanghai 200062, China

E-mail: cruisechang@21cn.com

ZHANG Yu, LIU Zhao, LU Jun-wei. Study on model-free adaptive control of volume-chamber pressure. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(36): 206-208.

Abstract: According to the time-varying and nonlinear characteristics of the locomotive pneumatic brake force control, the Model-Free Adaptive Control(MFAC) approach is applied to the volume chamber pressure control, which directly determines the pneumatic brake force. The design of controller is model-free and needs no complex parameter tuning. Based directly on the input and output information of the system, the chamber pressure can be precisely obtained by Model-Free Algorithm. The model-free control is especially useful for real nonlinear systems whose model parameter are very difficult to be identified and time varying. The simulation control results show that the algorithm has such advantages as quick response, high control accuracy and good robustness for nonlinear systems.

Key words: universal model; Model-Free Algorithm(MFA); volume-chamber pressure

摘 要: 为实现对具有非线性、时变和多干扰等特性的机车制动力的精确控制, 提出一种基于无模型控制算法的容积压力控制方法。它不依赖控制系统参数数学模型, 不需要复杂的人工参数整定即可控制时变、多变量等复杂过程, 可以避免建模不精确带来的系统误差, 实现对气室压力的精确控制。仿真试验表明, 该系统具有响应快速、控制精确、适应能力强、控制稳定等优点。

关键词: 泛模型; 无模型算法 MFA; 容积室压力

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.36.059 **文章编号:** 1002-8331(2008)36-0206-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP273.3

1 引言

随着我国铁路客、货运量的不断增大, 城市轨道交通的蓬勃发展, 列车牵引重量与运行速度不断提高, 各种列车对制动系统都提出了更高更新的要求。电空转换单元(又称 EP 转换单元, EP, Electronic-Pneumatic)完成电气指令即电压或电流到空气压力的比例转换, 是当前列车制动系统的必不可少的组成部分。

正常制动时, EP 转换后的容积室压力气体根据列车荷重进行限压, 经中继阀流量放大后传送至制动缸实施制动。是否能转换出精确的容积室压力直接决定着制动缸是否能实施精确的制动力。EP 单元要实现高精度的电空转换, 高度的实时性和连续性等优越性能, 必须要有高精度的传感器结合先进的电子控制技术才能实现, 其中采用适宜的控制算法尤为关键。

2 控制对象

采用高速开关阀、压力传感器和闭环控制器来实现对气缸

容积室压力的控制。列车制动系统的工作环境较恶劣, 故采用抗介质污染能力强的数字式电空比例阀即高速开关阀有利于提高系统可靠性。高速开关阀通常采用脉宽调制(Pulse Width Module, PWM)控制方法。容积室当前气压值通过一个压力传感器实时反馈到 EP 控制单元的 ECU, 通过闭环控制保证容积室的压力与制动电信号相对应, 完成电空转换。容积室压力控制系统结构如图 1 所示。

在设计制动机气缸压力控制试验室调试系统中, 通过上位工控机模拟司机控制器发出制动指令信号, ECU 接收信号计算后得知压力目标值。通过充气和放气两个高速电空阀的通断来控制容积室内气体的质量从而改变其压力。

容积室气压可表示为:

$$P_c = P_{c0} + \frac{RT}{V_c} \int_0^t (q_{in} - q_{out}) dt \quad (1)$$

其中, P_c 为容积室当前压力, P_{c0} 为容积室初始压力, R 为气体

基金项目: 上海市科委重大攻关项目基金(the Significant Tackling Foundation of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality No.061111009)。

作者简介: 张昱(1979-), 男, 在读博士, 主要研究领域为机械控制及信息处理技术; 刘钊(1958-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要研究领域为机器人, 工程机械关键技术; 陆军伟(1982-), 男, 硕士, 主要研究领域为特种设备检验。

收稿日期: 2008-08-13 **修回日期:** 2008-10-23

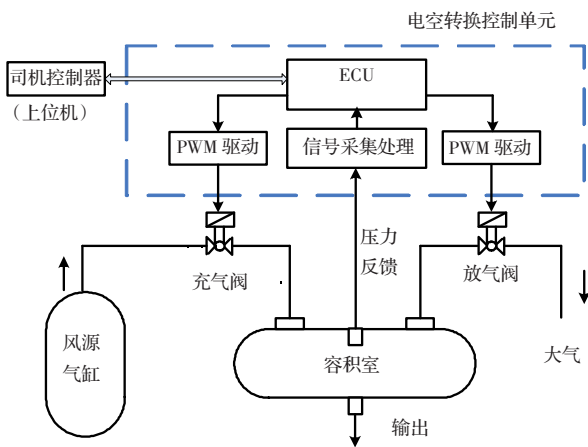


图1 容积室压力控制结构示意图

常数, T 为绝对温度, V_c 为容积室体积, q_{in} 、 q_{out} 分别为充气和放气的质量流量。充气和排气流量分别为:

$$q_{in} = \begin{cases} S_{in} \sqrt{\frac{2}{RT} P_c (P_0 - P_c)} & \frac{P_c}{P_0} > 0.528 \\ S_{in} P_0 \sqrt{\frac{k}{RT} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}} & \frac{P_c}{P_0} \leq 0.528 \end{cases}$$

$$q_{out} = \begin{cases} S_{out} \sqrt{\frac{2}{RT} P_A (P_c - P_A)} & \frac{P_A}{P_c} > 0.528 \\ S_{in} P_c \sqrt{\frac{2}{RT} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}} & \frac{P_A}{P_c} \leq 0.528 \end{cases} \quad (2)$$

其中, S_{in} 、 S_{out} 分别为充气阀和放气阀的有效节流面积, P_0 为风源压力, P_A 为大气压, k 为空气绝热指数。

容积室气压系统具有非线性、时变和滞后等特性, 而且气动系统本身容易受温度、大气压波动和漏气等因素的干扰, 难以建立一个精确的数学模型, 因此采用对模型精确度要求高的传统方法很难获得很好的控制精度, 甚至还可能导致系统的不稳定。无模型算法 (Model-Free Algorithm, MFA) 是全新理念的控制算法, 是新一代控制器的发展方向, 它无需建立控制过程模型, 也不必进行复杂的控制参数整定, 用它进行非线性、时变系统的控制有很好的预期效果。

首先根据气动元件特性对高速开关阀的 PWM 控制信号的占空比进行优化, 在一定占空比下, 以决策出的充气阀或放气阀开通时间为操纵变量, 通过 MFA 算法输出充气阀或放气阀的 PWM 控制信号, 容积室压力值实时反馈到 ECU, 达到压力的精确控制。

3 无模型自适应控制器

无模型自适应控制 (Model-Free Adaptive Control, MFAC) 是自动控制领域中的一种全新的理论和技术。MFAC 的设计不需要受控过程的数学模型结构, 不需要辨识过程, 不需要精确的过程定量知识, 不需要针对某个特定的受控对象进行控制器设计。即使被控对象的动态特性有较大变化也不需要控制器参数进行复杂的人工整定, 并且具有闭环系统稳定性分析和判据定理, 可以确保系统稳定性。

总的来说, MFAC 颠覆了传统控制方法先建立被控系统的数学模型的设计途径, 它以被控对象对控制方法的功能要求为导向, 即采用所谓功能组合控制途径, 是“建模与控制一体化”的产物。无辨识自适应控制算法不需要辨识过程参数, 只需在

线检测过程实际输出及期望输出, 所依赖的是“泛模型”:

$$y(k+1) - y(k) = \phi(k) [\tau u(k) - u(k-1)] \quad (3)$$

式中, y 为输出, u 为输入, τ 为滞后时间, 可以粗略估计, 其中 $\phi(k)$ 必须在线实时地进行估计, 这是泛模型可用的先决条件。引入泛模型可以避免在自适应控制器设计前的数学建模过程。泛模型在反馈过程中得到校正, 它与无模型控制律的基本形式同时存在。

在此模型中, 仅有 $\phi(k)$ 能够变化实现自适应, 因此 $\phi(k)$ 在基本无模型控制律中, 既代表被控对象模型的参数, 又体现它的结构特征。分析表明, 当系统在设定值上处于稳定状态时, $\phi(k)$ 实际上是 $y(k)$ 关于 $u(k)$ 的梯度, 无模型控制律为:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\lambda_k}{a + \|\phi'(k)\|^2} \times \phi'(k) [y_0 - y(k)] \quad (4)$$

其中, $\phi'(k)$ 是 $\phi(k)$ 的估计值, a 是一个适当的常数, y_0 是控制器的目标值, λ_k 为控制参数。 $\phi'(k)$ 是在线实时估计的, 被控对象无论是发生参数性的还是结构性的变化, 都能用 $\phi(k)$ 的变化来描述。这也体现了无模型控制律既是参数自适应的也是结构自适应的。

基于泛模型对特征参量 $\phi(k)$ 的辨识算法和基本控制算法式在线交互进行。当经过辨识得到 $\phi(k)$ 值以后, 即可以应用控制律对系统进行反馈控制, 控制的结果可得到一组新的观测数据并作为已知数据的一组新数据, 再对下一时刻 $\phi'(k+1)$ 的进行辨识, 交互进行, 则实现辨识与控制的一体化。体现了一种新的控制思想即对象的模型是伴随着反馈控制而不断变化的, 而不断更新的对象模型又为新的控制提供了条件。而且更重要的是在这个辨识与控制进行的过程中有保证控制律收敛的定理。

根据系统条件, 容积室和管路容积都不大, 充放气阀都是高速动作的开关阀。采用 Marsik 和 Strejc 提出的增量式算法, 其控制律为:

$$\Delta u(k) = g(k) [e(k) + 2T_v(k) \Delta e(k) + 2T_v^2(k) \Delta^2 e(k)] \quad (5)$$

其中 $\Delta u(k)$ 为输出增量, $e(k)$ 、 $\Delta e(k)$ 和 $\Delta^2 e(k)$ 分别为控制偏差及其一阶、两阶差分, 分别表征了偏差、偏差变化率和偏差加速度。设 $y(k)$ 为 k 采样时刻的实际输出, y_0 为期望输出, 即理论目标值, z^{-1} 为滞后算子, 它们可分别表示为:

$$\begin{cases} e(k) = y_0 - y_k \\ \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) = (1 - z^{-1})e(k) \\ \Delta^2 e(k) = \Delta e(k) - \Delta e(k-1) = (1 - 2z^{-1} + z^{-2})e(k) \end{cases} \quad (6)$$

$g(k)$ 为控制器增益, $T_v(k)$ 为控制器参数, 显然, 系统的自适应过程就是这 2 个参数的在线校正过程。 $g(k)$ 和 $T_v(k)$ 的校正结果直接影响到控制系统的控制效果。文献[1]给出了一种参数校正方法并证明了其稳定性和收敛性, 其中 $T_v(k)$ 可按下式校正:

$$\Delta T_v(k) = L^* \operatorname{sgn}[\Delta e(k)] - T_v(k-1) |\Delta^2 e(k)| \quad (7)$$

其中 $0.05 \leq L^* \leq 0.1$, $g(k)$ 的迭代算法为:

$$\Delta g(k) = \frac{1}{T_v(k-1)} \delta g(k-1) \quad (8)$$

这里 δ 为小正数, 它的取值范围为 $0.025 \leq \delta \leq 0.05$, 特别需要指出的是 $g(k)$, 它的增加速度反比于 $T_v(k-1)$, 在系统平稳时, 即测量值 $y(k)$ 变化很小时, $g(k) = 0$ 。当 $y(k)$ 变化加快时, $g(k)$ 是一个正变数, 随 $y(k)$ 变化的绝对值增大而增大, $g(k)$ 的存在将使无模型控制器具有克服强干扰的能力。

该算法计算量小, 简便可行, 对于需要快速响应的系统特别适用。

4 仿真试验

容积室压力控制系统无模型控制算法流程图如图 2 所示。

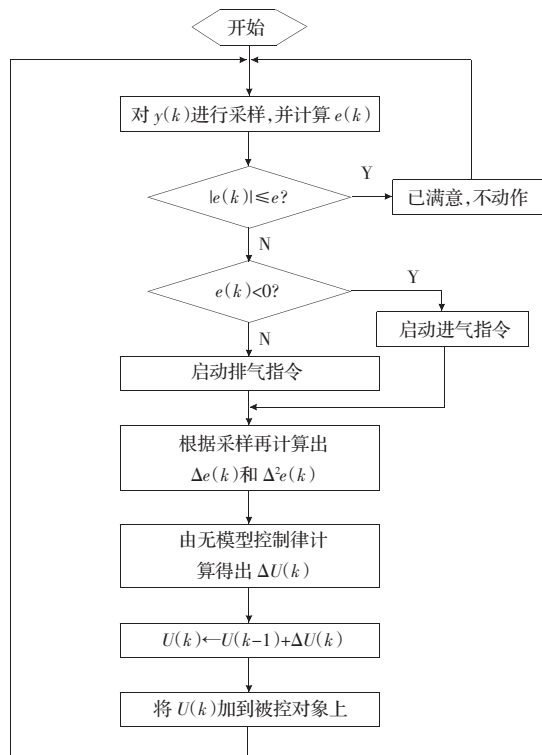


图 2 无模型控制算法压力控制流程图

在反馈到实时压力值后, ECU 首先将其与目标值进行比较得出控制偏差值 $e(k)$, 设计时预置了一个死区范围 ε , ε 为一个小正数, 当偏差值 $e(k)$ 的绝对值小于 ε 时, 就停止进气阀、排气阀的动作, 这样可以减少高速开关阀的动作次数。即当压力 P_c 达到控制精度范围内时, 不进行两个开关阀的动作, 从而延长其使用寿命。而 $e(k)$ 的正负可以判断出当前容积室压力是低于还是高于目标值, 从而判定是进行进气还是放气动作。以单位方波信号为参考输入, 周期为 5 s, 采样周期 $T=10$ ms, 以试验机构中 0.5 L 的容积室, 开关阀全开度声速流量充气升压为被控对象, 取泛模型 MFAC 中的学习速率 $\rho_i=0.25$, 惩罚因子 $\lambda=0.2$ 进行仿真, 结果如图 3 所示。在 $t=3$ s 时刻对系统进行定值干扰, 系统响应如图 4 所示。

(上接 180 页)

强了整个算法的安全性; 异或矩阵和置换矩阵的先后使用, 使得整个加密算法既有较好的加密效果, 又有较强的安全性。

(3) k_1, k_2 的不同, 使得两个异或矩阵各不相同, 进一步增强了对图像的加密效果; 而它们的不同也使得两个置换矩阵各不相同, 从而极大地提高了整个算法的安全性。

7 结语

以混沌理论为基础, 文章利用 Logistic 混沌映射给出了一种灰度图像加密算法, 通过仿真实验和分析表明, 该算法具有较好的加密效果和较强的安全性。

参考文献:

[1] Wang Yuan-zhi, Ren Guang-yong, Jiang Ju-lang, et al. Image encryption method based on chaotic map[C]/2nd IEEE Conference on

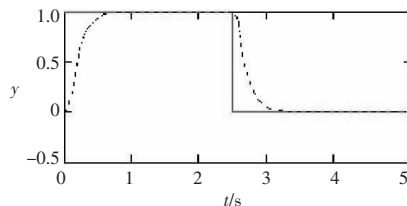


图 3 容积室压力 MFA 控制系统响应

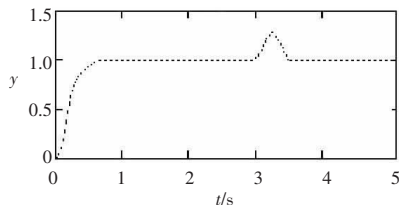


图 4 系统定值干扰仿真

5 结论

采用无模型自适应控制方法控制容积室压力, 通过无模型算法产生 PWM 信号控制阀的动作实现对机车气制动容积室的压力控制。系统响应迅速, 抗干扰和自适应能力强, 动、静态性能良好, 甚至当对象模型发生较大变化时, 仍能保证系统有较好的控制性能, 对于一类非线性气压控制系统具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] Marsik J, Strejc V. Application of identification free algorithms for adaptive control[J]. Automatic, 1989, 25(2): 273-277.
- [2] Friedrichs M S. A model-free algorithm for the removal of baseline artifacts[J]. Journal of Biomolecular NMR, 1995(5): 147-153.
- [3] 曹荣敏, 侯忠生. pH 值中和反应过程的无模型学习自适应控制[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(28): 191-194.
- [4] 韩志刚. 无模型控制器理论与应用的进展[J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(2): 1-6.
- [5] 吴萌岭, 陈龙安, 胡波. 微机控制直通电空制动系统研究与试验[J]. 铁道学报, 2000, 22(2): 99-103.
- [6] 侯忠生. 非参数模型及其自适应控制理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 40-45.
- [7] Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2007, 2007: 2558-2560.
- [8] Guan Zhi-hong, Huang Fang-jun, Guan Wen-jie. Chaos-based image encryption algorithm[J]. Physics Letters A, 2005, 346(1/3): 153-157.
- [9] 孙鑫, 易开祥, 孙优贤. 基于混沌系统的图像加密算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(2): 136-139.
- [10] Pareek N K, Patidar V, Sud K K. Image encryption using chaotic logistic map[J]. Image and Vision Computing, 2006, 24(9): 926-934.
- [11] 张雪锋, 罗祖军, 高川. 基于混沌序列的数字图像加密算法[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(19): 61-62.
- [12] Wei Jun, Liao Xiao-feng, Wong K W, et al. Cryptanalysis of a cryptosystem using multiple one-dimensional chaotic maps[J]. Physics Letters A, 2007, 363: 277-281.
- [13] Dang P P, Chau P M. Image encryption for secure Internet multi-media applications[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2000, 46(8): 395-403.
- [14] 冯登国. 密码学导引[M]. 北京: 科学出版社, 1999.