

文章编号: 1001-0920(2004)10-1155-04

无模型控制方法对多变量耦合系统控制的应用研究

韩志刚, 蒋爱平, 汪国强

(黑龙江大学 电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 以工业生产中具有耦合环节的控制问题为背景, 讨论了多变量耦合系统的控制问题 指出各环节之间的耦合可以看成是相互间的干扰, 因而克服耦合问题则变成抑制干扰的问题 无模型控制方法具有较好的抑制干扰的能力, 用无模型控制方法对多变量耦合系统进行控制可收到良好的效果

关键词: 多变量; 耦合; 非解耦控制; 无模型控制

中图分类号: TP29

文献标识码: A

Study on control of multivariable coupling systems with model free control method

HAN Zhi-gang, JIANG Ai-ping, WANG Guo-qiang

(Faculty of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China Correspondent: HAN Zhi-gang; E-mail: dewauto@163.com)

Abstract: The control problem for multivariable coupling systems is discussed on the background of control problem for coupling loops in the industry productions The coupling among loops of a system can be treated as disturbances among loops In this way, the problem of overcoming coupling becomes the disturbance attenuation problem. Model free control method has strong ability of resisting disturbance, and better control effect of multivariable coupling system is obtained using model free control method

Key words: multivariable; coupling; non-decoupling control; model free control

1 引言

现代化生产企业的规模效益是一个重要的经济指标, 尤其是连续流程工业, 企业的规模越来越大, 生产工艺和生产装置越来越复杂 生产装置各环节之间往往存在着关联, 所以它是一个多变量耦合系统 在生产过程中对多变量耦合系统进行稳定闭环控制势在必行

例如大庆石化公司热电厂汽机车间高压除氧器的压力控制: 该汽机车间共有 5 个高压除氧器 (如图 1 所示). 高压除氧器系统必须保持汽平衡和水平衡, 需要进行汽压和水量的平衡调节 各高压除氧器

都是一个连通器, 水和汽相互耦合, 干扰较大 所以该系统是一个强耦合、大干扰系统

所有大工业企业自备电站的高压除氧器都具有这种形式, 并且几乎没有一个企业能对这类系统实现闭环自动控制 所以对这类系统控制方法的研究, 具有重要的理论意义和应用价值

用常规的 PD 控制算法对高压除氧器系统实现闭环稳定控制是不可能的, 必须寻求合适的控制方法 耦合的存在是多变量耦合系统难以实现闭环稳定控制的原因之一. 为此, 人们对多变量耦合系统的控制问题进行广泛的研究, 试图克服系统各环节

收稿日期: 2003-11-26; 修回日期: 2003-02-04

基金项目: 国家基础研究重大项目前期研究专项课题 (2001CCA 04000).

作者简介: 韩志刚 (1934—), 男, 河北乐亭人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统控制、无模型控制等研究; 蒋爱平 (1962—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 博士生, 从事无模型控制、医学图像处理等研究

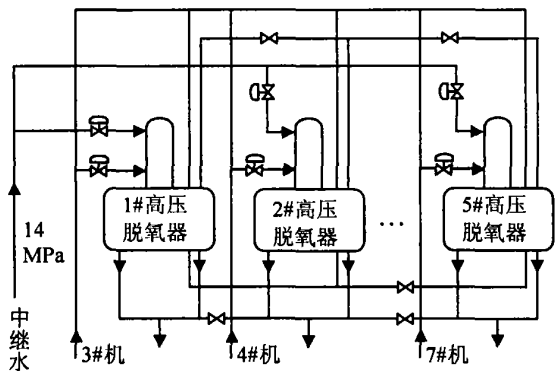


图 1 高压除氧器的基本结构

间的耦合所产生的影响,并对整个系统进行稳定控制.现已提出多种克服耦合的方法,例如线性多变量系统的解耦控制^[1],非线性多变量系统的解耦控制^[2],随机多变量系统的自适应解耦控制^[3,4]等.这类方法的一个共同特点是需要解耦,从而要求运用有效的解耦控制算法,将一个有耦合影响的多变量系统化成多个无耦合的单变量系统.一般说,这类解耦控制算法都需要复杂的数学运算.

有耦合影响的多变量系统是客观存在的实际系统.解耦控制算法仅是改变系统数学模型的形式,而没有把多变量系统真正化成多个无耦合的单变量系统.既然如此,能否找到一种不需解耦便能直接对多变量耦合系统实现稳定控制的方法,最理想的是能找到一种单回路控制方法,用多个这类控制器对多变量耦合系统实现稳定控制.

作者在寻求上述问题解决的过程中发现,无模型控制方法无需解耦就能实现对多变量耦合系统的闭环稳定控制.即无模型控制方法自身具有解耦能力,这种能力来源于无模型控制方法的一系列优越的性能,特别是它的快速收敛性能.应用这种方法,可以实现非解耦控制.在无模型控制算法中加入适当的前馈,可使控制效果变得更好.

2 用无模型控制方法控制耦合系统的可 能性

不经过解耦而直接对耦合系统进行控制的方法称为非解耦控制方法.首先对耦合系统的特性进行分析.

例如有 3 个子系统 A_1, A_2, A_3 互相存在着强耦合,即它们的输出、输入都互相关联.常见的耦合是输出之间存在耦合或输入之间存在耦合.无论是哪一种耦合,都可进行如下分析:以环节(系统) A_1 为例,来自环节(系统) A_2 和 A_3 的输出耦合和输入耦

合,可以看成外界对它的干扰.如果控制律有足够的克服这种干扰的能力,那么耦合就会被消除.当然,控制器对系统 A_1 由于系统 A_2 和 A_3 的耦合所产生的干扰进行克服的过程中,同时也会产生对系统 A_2 和 A_3 的干扰,所以每个控制律都应具有对这种互相干扰的抑制能力.如果这类互相干扰能被很快克服,那么相互存在的耦合也就被克服.可见解耦问题可以看成克服相互干扰的问题.

一个控制器的抗干扰能力取决于它克服偏差的能力,收敛速度快克服偏差的能力就强,从而抗干扰能力必然强.所以只要能设计出收敛速度足够快的控制器,那么由于耦合而产生的干扰就能被及时克服.无模型控制方法就具备这种快速收敛的性能,这可从下述分析中看出:

文献[5, 6]对于基本的无模型控制律

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\lambda_k}{a + \hat{Q}(k)} \times \hat{Q}(k) \{y_0 - y(k)\} \quad (1)$$

曾证明:如果存在常数 $\delta > 0$ 和 $\beta > 0$, 满足条件

$$\delta \hat{Q}(k) \leq \beta, \delta \hat{Q}(k) \leq \beta \quad (2)$$

则存在适当的 $\lambda = \lambda$ 使得

$$\lim_{h \rightarrow \infty} y(k+h) = y_0 \quad (3)$$

在证明上述结论时,曾得到

$$\left| y_0 - y(k+h) \right| = \prod_{j=0}^{h-1} \left| 1 - \lambda_{k+j} \Delta_{k+j} \right| \left| y_0 - y(k) \right|, \quad (4)$$

其中

$$\Delta_k = \frac{\hat{Q}(k) \hat{Q}(k)}{a + \hat{Q}(k)} \quad (5)$$

在证明中取

$$\lambda_{k+j} = \frac{a + \beta^2}{2\delta^2}, \quad (6)$$

便得出

$$\left| y_0 - y(k+h) \right| = \left| y_0 - y(k) \right| (1 - 1/2)^h = \left| y_0 - y(k) \right| (1/2)^h, \quad 0, h \quad (7)$$

事实上,基本的无模型控制律的收敛速度还要快得多.因此可以说:基本的无模型控制律的收敛速度是足够快的.

作者在文献[6, 7]中讨论了无模型控制律的设计问题,指出无模型控制方法由两部分组成,即基本的无模型控制律部分和控制律的功能组合部分.功能组合部分包括:反向预调控制方法,控制作用转向加速控制方法,强制稳定控制方法,前馈控制方法,

大时滞控制方法等。它们以算法的形式出现在无模型控制方法之中。功能组合部分加强了无模型控制方法的优良品质, 例如增强了系统的稳定性, 从而进一步加快了控制方法的收敛速度, 这更加强了控制方法的抗干扰能力, 当然它的解耦能力也更强

3 计算机仿真

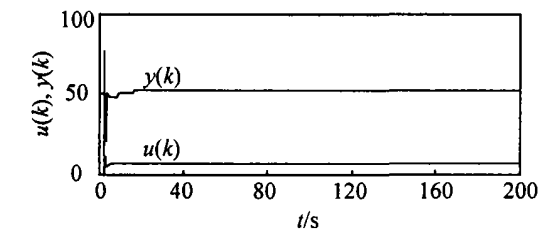
目前在工业生产过程控制中应用的控制器, 绝大多数是经典的 PD 调节器及其变种。对于耦合情况不严重的系统, PD 调节器的控制效果还能令人满意, 但对耦合严重的系统, PD 调节器则显得无能为力。本文以 PD 调节器为基准, 将无模型控制器与 PD 调节器进行比较, 用于说明无模型控制器具备较好的解耦能力

3.1 非耦合情形

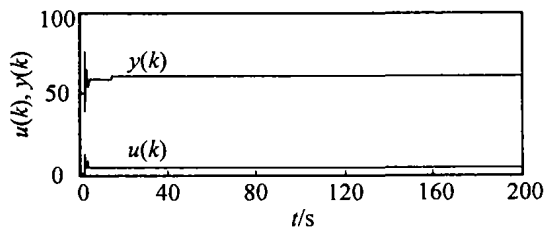
这里对无模型控制器与 PD 调节器的解耦能力进行仿真比较。为了比较的公平性, 将无模型控制器与 PD 调节器的参数都整定到最佳态, 对下述系统进行控制:

$$y(k+1) = 1.5y(k) - 0.56y(k-1) + 0.5u(k), \quad (8a)$$

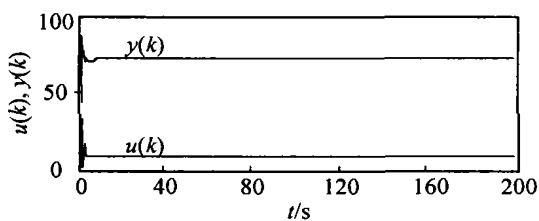
$$y_1(k+1) =$$



(a) $y(k+1)$



(b) $y_1(k+1)$



(c) $y_2(k+1)$

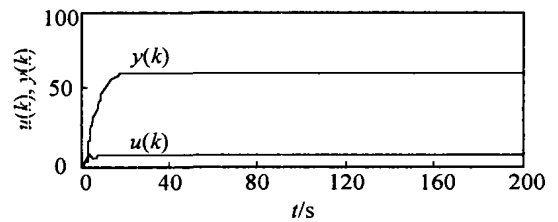
图 2 无模型控制器的控制结果

$$1.5y_1(k) - 0.56y_1(k-1) + 0.5u_1(k), \quad (8b)$$

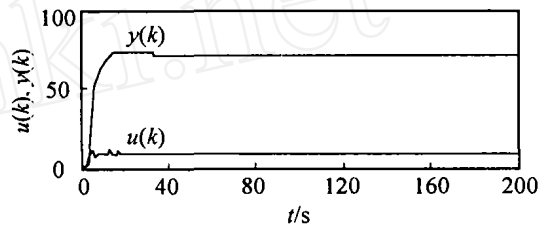
$$y_2(k+1) =$$

$$1.5y_2(k) - 0.56y_2(k-1) + 0.5u_2(k). \quad (8c)$$

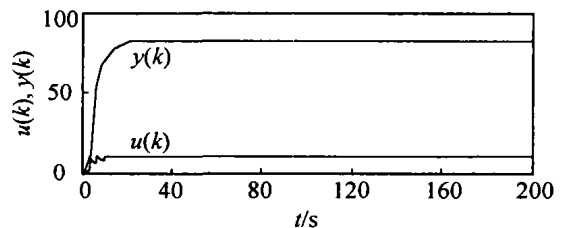
控制结果如图 2 和图 3 所示



(a) $y(k+1)$



(b) $y_1(k+1)$



(c) $y_2(k+1)$

图 3 PD 调节器的控制结果

由上述结果可以看出, 无模型控制器和 PD 调节器对系统 (8) 的控制都收到了良好的效果, 但无模型控制器的收敛速度远快于 PD 调节器

3.2 耦合情形

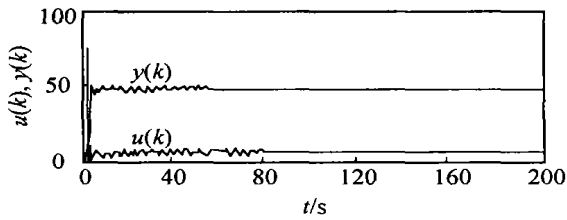
下面考虑 3 个被控系统之间存在耦合的情况。所考虑的系统是在系统 (8) 的基础上增加了耦合项, 即

$$y(k+1) = 1.5y(k) - 0.56y(k-1) + 0.5u(k) + \sin(y_1(k)), \quad (9a)$$

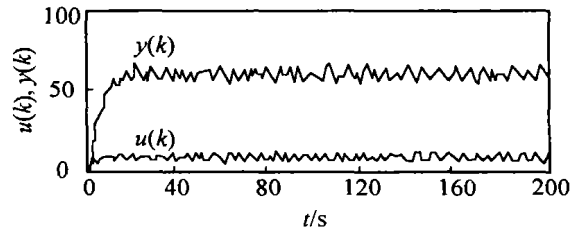
$$y_1(k+1) = 1.5y_1(k) - 0.56y_1(k-1) + 0.5u_1(k) - \cos(y_2(k)), \quad (9b)$$

$$y_2(k+1) = 1.5y_2(k) - 0.56y_2(k-1) + 0.5u_2(k) + \cos(y(k-1)). \quad (9c)$$

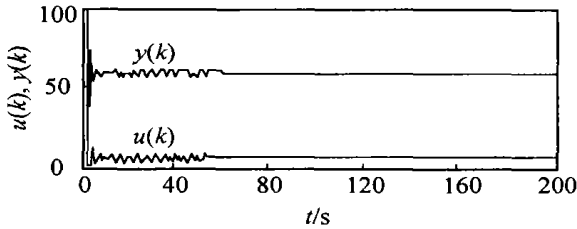
分别用无模型控制器和 PD 调节器对其进行控制,



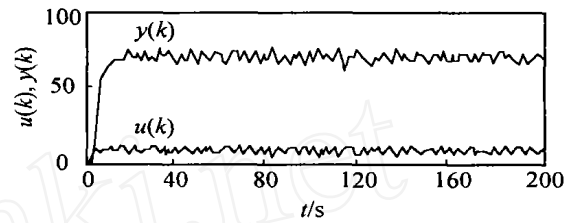
(a) $y(k+1)$



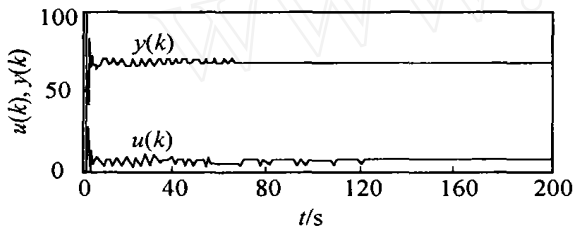
(a) $y(k+1)$



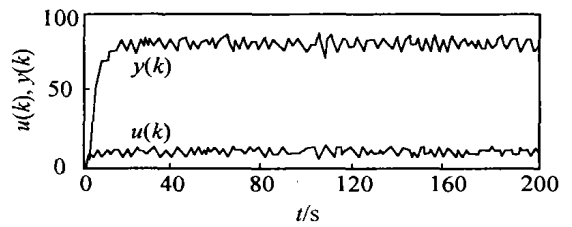
(b) $y_1(k+1)$



(b) $y_1(k+1)$



(c) $y_2(k+1)$



(c) $y_2(k+1)$

图4 无模型控制器的控制结果

图5 PD调节器的控制结果

控制结果如图4和图5所示

由仿真结果可以清楚地看到,无模型控制方法的解耦能力比PD调节器强很多

上述仿真结果进一步证明了本文结论的正确性:由于无模型控制方法的收敛速度快,从而抗干扰能力强,所以它具备很好的解耦能力;而目前在过程控制中大量应用的PD调节器则不具备这种性质

由耦合所导致的干扰往往是可测量的,在控制方法的设计中应充分利用这一特性,例如可将可测量的干扰信号作为前馈引入控制方法.事实证明,在无模型控制器中加上适当的前馈项,可使耦合系统的控制效果得到一定的改善

4 实际应用效果

作者将无模型控制方法应用于大庆石化公司热电厂汽机车间高压除氧器的压力控制系统,具体方案如下:

在高压除氧器2#,3#,4#应用无模型控制方法各形成一个控制回路,目标是将高压除氧器的汽压控制在0.5MPa,允许误差为0.02MPa.每个高压除氧器用一套带有前馈的无模型控制算法进行单闭环控制,高压除氧器的汽压测量值为主控输入,以

水流量阀门和2台高压除氧器的汽压阀门信号为前馈,计算汽压阀门的开度,控制现场汽压执行机构

系统经5个高压除氧器连通而成,如图1所示.设想只要中间的3个高压除氧器实现了闭环稳定控制,则其余的2个即可随之稳定.实践证明了这种设想的正确性.以2#高压除氧器为例,控制方案如图6所示,其中NNAC为无模型控制器

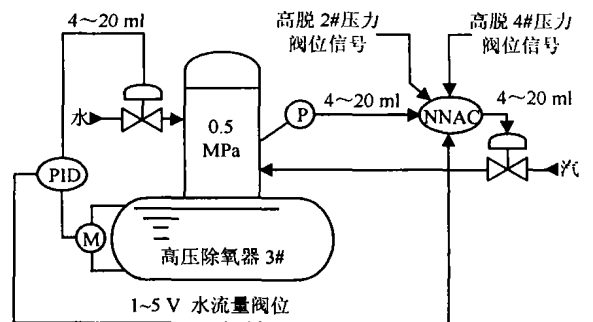


图6 高压除氧器控制方案

在无模型控制器的控制下,该高压除氧器系统长时间处于闭环稳定运行状态,这从实践上证实了无模型控制方法具备很强的解耦能力.其他实际应用参见文献[8] (下转第1162页)

为: $V_{CAP} = +200\text{ V}$ 用恒压源代替, 并联RLC作为每相负载, 星型连接, 负载有功1 kW, 无功500 Var, $F = 60\text{ Hz}$, 相电压有效值200 V, 开关频率1 080 Hz 仿真结果如图3和图4所示 输出线电压的谐波频谱中基波占主要成分, 验证了MMC的良好性能

5 结 论

本文对三电平MC进行建模和仿真 三电平MC输出相电压波形比两电平MC多一个电平, 因而输出线电压波形更接近于正弦波, 谐波含量降低 MMC的开关器件多, 输出功率大, 适合大功率、高电压的场合, 但过多的器件在高频下工作时, 开关损耗大, 发热温升严重 超过三电平的变换器结构复杂, 对其建模和控制相对困难, 必须借助于计算机辅助分析 MMC对称性的结构类似于一个Cuk电路, 这一特性在交流励磁风力发电领域非常有用, 输入电压可随转子转速(风速)的变化而变化, 因而成为研究此类变换器的一个热点

参考文献(References):

- [1] Osama A, AlNaseem. Modeling and space vector control of a novel multilevel matrix converter for variable-speed wind power generators[D]. Colorado: University of Colorado, 2001.
- [2] Zhang L, W Athanasas C, Shepherd W. Application of a matrix converter for the power control of a variable-speed wind-turbine driving a doubly-fed induction generator[A]. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* [C]. Japan, 1994: 906-911.
- [3] Dengming Peng, Ferd C Lee, Dushan Boroyevich. A novel SVM algorithm for multilevel three-phase converters[A]. *2002 IEEE 33rd Annual, IEEE Power Electronics Specialists Conf* [C]. Australia, 2002: 2: 509-513.
- [4] Robert W Erickson, Osama A, AlNaseem. A new family of matrix converters[A]. *The 27th Annual Conf of the IEEE Industrial Electronics Society* [C]. USA, 2001: 1515-1520.
- [5] Takayoshi Matsuo, Steffen Bernet, Stephen R Colby, et al. Modeling and simulation of matrix converter/induction motor driver[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1998, 46: 175-195.
- [6] Katsuhiko Ogata. *Modern Control Engineering* [M]. The Fourth Edition. USA, Prentice Hall, 2001.

(上接第1158页)

5 结 论

本文说明了相互耦合的系统可看成是相互间具有可量测干扰的系统, 于是解耦问题则变成克服相互干扰的问题; 同时指出无模型控制方法具有很强的抗干扰能力, 所以它具有很好的解耦功能, 可实现对多变量耦合系统的直接非解耦控制 仿真比较和实际应用效果进一步证明了本文的结论

参考文献(References):

- [1] 韩京清, 许可康. 线性控制系统理论——构造性方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 高为炳. 非线性控制系统导论[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [3] 柴天佑. 多变量自适应解耦控制及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] Witemark B, Middleton R, Goodwin G C. Adaptive decoupling of multivariable systems[J]. *Int J Control*, 1987, 46(6): 1993-2009.
- [5] Han Zhi-gang, Qin Bin. Direct adaptive control for nonlinear systems[J]. *Systems Analysis Modeling Simulation*, 1997, 28: 301-315.
- [6] 韩志刚. 无模型控制器的设计问题[J]. *控制工程*, 2002, 9(3): 19-22.
(Han Zhi-gang. Designing problem of model free controller[J]. *Control Engineering*, 2002, 9(3): 19-22.)
- [7] 韩志刚. 一类复杂系统非建模控制方法的研究[J]. *控制与决策*, 2003, 18(4): 398-402.
(Han Zhi-gang. Study on non-modelling control method for a class of complex systems[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(4): 398-402.)
- [8] 韩志刚. 无模型控制器的应用[J]. *控制工程*, 2002, 9(4): 22-25.
(Han Zhi-gang. The application of model free controller[J]. *Control Engineering*, 2002, 9(4): 22-25.)