

# 基于知识的多变量非线性系统变结构解耦控制

涂承媛, 曾衍钧.

(北京工业大学, 北京 100022)

**[摘要]** 文章提出了一种基于知识的变结构解耦控制策略, 并用于多变量非线性系统的控制, 避免了传统解耦控制所必须的建模过程, 特别是避免了相应的大量复杂的矩阵运算。阐述了其控制知识库中的一些模块, 给出了其算法要点。提出的策略成功地用于一个  $3 \times 3$  强耦合系统——三绕组加热标准温度源的恒温控制, 得到了温度稳定性和温度均匀性都优于  $1^\circ\text{C}$  的效果, 这是传统方法用于该系统所无法实现的。

**[关键词]** 多变量非线性系统; 解耦控制; 基于知识的变结构解耦

## 1 引言

多变量系统的解耦理论是近二三十年发展起来的自动控制理论的一个重要分支。在多变量控制系统中, 由于耦合的存在, 系统的控制品质会急剧下降, 甚至失控。因此, 多变量系统的解耦是一个困难而又急待解决的问题, 具有重要的学术价值和实用价值。

当前常见的解耦方法有两种: 对角矩阵法和状态变量法<sup>[1, 2]</sup>。无论前者或后者, 都是要在已知系统精确模型的前提下才能使用。

实际上, 对于大多数的过程, 要建立既有足够精度又便于系统分析的数学模型往往相当困难, 甚至无法实现。再加上这两种方法都涉及到矩阵求逆, 运算量很大, 因此, 其应用受到很大限制。近年来, 非线性系统变结构控制理论蓬勃发展<sup>[3~8]</sup>, 它具有远优于单一策略控制理论的灵活性、适应性和高效率。而迄今为止的这类控制理论仅涉及单变量系统, 并且同样未能摆脱精确的数学模型以及大量的矩阵运算, 这就大大限制其应用范围。

然而, 一个熟练的操作者却能就对系统应如何控制迅速做出判断和决策, 达到满意的控制效果。究其根源, 是因为人具有充分的智慧和主观能动性,

在控制实践中无需数学模型, 仅凭经验和知识的积累, 便能进行推理和决策。基于此, 作者将这类控制策略组成为基于知识的变结构解耦控制算法, 用于多变量非线性系统中, 以获取理想的控制品质。

作为应用实例, 下面介绍本文的控制策略用于一个  $3 \times 3$  强耦合系统的高品质控制。

## 2 一个 $3 \times 3$ 系统的变结构解耦控制

### 2.1 被控对象的结构

所谓  $3 \times 3$  系统是指具有三个输入、三个输出的系统。

一般的温度控制系统, 对温场的均匀性要求不高, 所以可采用单变量控制。而这里所要控制的对象是作为计量基准温度源的高温炉, 因此无论是对温度控制的精度、稳定性, 还是对温场的均匀性都有很高的要求。该系统的结构如图 1 所示, 这是一个存在强耦合的三段加热式高温炉, 炉体外缠绕了左、中、右三段炉丝。规定要求是: 在腔体内 100 mm 的区域内, 温场变化不超过  $1^\circ\text{C}$ , 温度稳定性也要优于  $1^\circ\text{C}$ 。

图 1 的 1, 2, 3, 4 为 4 组热电偶, 用于测量温场内 4 个地点的温度, 而上述要求便可表示为 2,

**[收稿日期]** 2001-04-19; **修回日期** 2001-06-07

**[基金项目]** 北京市青年科技骨干培养基金

**[作者简介]** 涂承媛 (1963-), 女, 北京市人, 北京工业大学副教授, 博士研究生

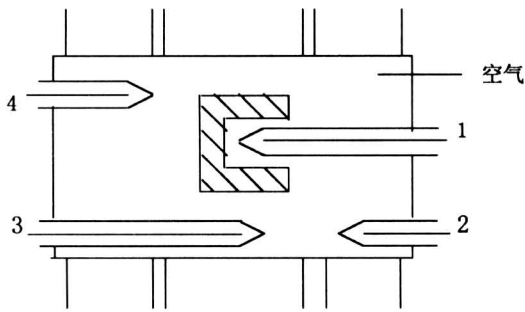


图 1 三段加热式高温炉结构图  
Fig.1 Configuration of three winding heater type high temperature furnace

3, 4 这 3 组热电偶中的任何 2 组热电偶示值之差不超过 1℃ (热电偶 1 测量的温度将作为参考基准, 不参与控制), 而且稳定时间要达到 10 min。

由于左、中、右三区间彼此热交换剧烈, 整个炉膛成为一个时变、大延时的强耦合系统, 因此, 很难建立其数学模型, 即使建立了数学模型, 也因其建模所需在线运算时间太长, 而无法用于实时控制。再加上系统的时变性, 系统参数需要不断辨识, 离线方法是不适用的。

然而, 人们却能凭借自己的经验进行操作, 而获得满意结果。于是, 下面便模拟人的思维方式进行系统设计。

### 2.2 变结构解耦控制器的系统设计

如上所述, 该系统是一个 3×3 (三输入、三输出) 强耦合系统, 如图 2 所示。其中  $A_2, A_3, A_4$  是炉丝 2, 3, 4 的输入电流,  $t_2, t_3, t_4$  是热电偶 2, 3, 4 的测量温度。

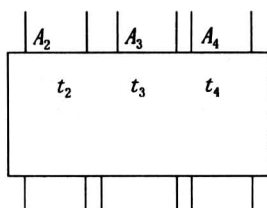


图 2 加热电流与炉膛温度分布图  
Fig.2 Heater currents and the temperature distribution in the chamber of a furnace

任一加热电流的变化——如  $A_2$  的变化, 不仅影响温场 2 的温度  $t_2$ , 同时也影响温场 3、4 的温度  $t_3, t_4$ , 因此, 对这样一个强耦合系统, 必须进

行解耦控制。设计思路: 通过变结构解耦软件的作用, 把一个有耦合的多变量系统变成多个无耦合的单变量系统 (对于本例, 则是把这个 3×3 强耦合系统, 变成三个单变量系统), 然后按照单变量策略进行控制。具体方法: 把  $t_3$  作为主控变量, 对其实行完全的单变量控制策略, 而对  $t_2, t_4$  的控制策略则有所不同, 在利用软件补偿环节去耦的前提下, 实行伪单变量控制。整个控制系统的简要框图见图 3。

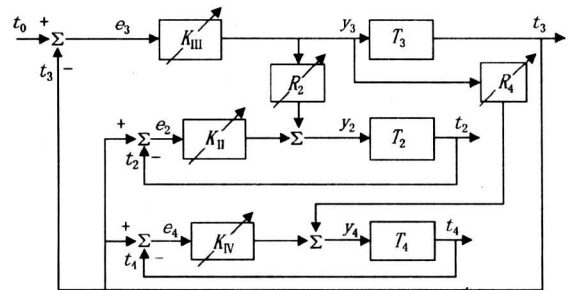


图 3 变结构解耦控制系统框图  
Fig.3 Block diagram of a variable-structure de-coupling control system

图 3 中,  $T_2, T_3, T_4$  分别代表同被控量  $t_2, t_3, t_4$  相应的被控子对象 (即炉膛内的相应被控子区间的温场),  $K_{III}, K_{II}, K_{IV}, R_2, R_4$  分别代表相应的控制器, 其控制方程组为:

$$y_3 = f_3(e_3, \dot{e}_3, e_{\Sigma 3}, K_{P3}, K_{I3}, K_{D3}) = K_{P3} e_3 + K_{I3} e_{\Sigma 3} + K_{D3} \dot{e}_3 \quad (1)$$

$$y_2 = f_2(e_2, \dot{e}_2, e_{\Sigma 2}, K_{P2}, K_{I2}, K_{D2}, y_3, R_2) = K_{P2} e_2 + K_{I2} e_{\Sigma 2} + K_{D2} \dot{e}_2 + R_2 y_3 \quad (2)$$

$$y_4 = f_4(e_4, \dot{e}_4, e_{\Sigma 4}, K_{P4}, K_{I4}, K_{D4}, y_3, R_4) = K_{P4} e_4 + K_{I4} e_{\Sigma 4} + K_{D4} \dot{e}_4 + R_4 y_3 \quad (3)$$

不难看出, 式 (1) 所代表的控制器  $K_{III}$  (主控制器) 执行纯单变量控制,  $e_3 = t_3 - t_0$ 。

这里, 所采用的解耦控制策略完全是模拟专家在控制过程中的思维方法, 并将其制成一个个功能模块存储在知识库中, 随用随取。

在控制实践中, 采用了微分分离与积分分离算法、隐式微分与隐式积分算法及变结构参数控制算法 (见参考文献 [10~11]), 还采用了输入跟踪解耦、输出跟踪解耦以及可调解耦系数等策略:

- 1) 输入跟踪解耦 在式 (2) 中,  $e_2 = t_3 - t_2$

起着主导作用，也就是说，该辅调器的功能在于使  $e_2$  的稳态值趋于零。即要求  $t_2$  一直跟踪  $t_3$  上升，以实现炉腔内空间温场的均衡。不言而喻，由  $e_2$  派生出的  $e_2$  和  $e_{\Sigma 2}$  也将对  $y_2$  的值产生一定约束，与此同时，起着加权作用的各系数  $K_{P2}, K_{I2}, K_{D2}$  也对  $y_2$  的值产生相应的约束，总的目的都在于实现  $t_2$  对  $t_3$  的跟踪解耦。同样，式 (3) 中引入的相应变量  $e_4, e_4, e_{\Sigma 4}, K_{P4}, K_{I4}, K_{D4}$  的目的均在于实现  $t_4$  对  $t_3$  的跟踪解耦。

2) 输出跟踪解耦 为了更有效地实现  $t_2$  对  $t_3$ ，以及  $t_4$  对  $t_3$  的跟踪解耦，有时还需考虑输出  $y_3$  的耦合作用，因此式 (2) 和式 (3) 中分别考虑了  $y_3$  通过相应的加权系数  $R_2$  和  $R_4$  对  $y_2$  和  $y_4$  进行约束。

3) 解耦系数在线可调 在图 3 中，除了主控器的结构参数组  $K_{III} = \{K_{P3}, K_{I3}, K_{D3}\}$  能在线可调外，解耦控制器的结构参数组  $K_{II} = \{K_{P2}, K_{I2}, K_{D2}\}$ ， $K_{IV} = \{K_{P4}, K_{I4}, K_{D4}\}$ ， $R_2, R_4$  都是在线可调的，以实现参数自适应的功能。

### 3 实时控制的结果

前面曾介绍过，该解耦控制系统的被控对象是作为计量基准温度源的高温炉。在很长一段工作区域内，需要炉温有长期稳定性以及宽温场均匀性，作者成功地实现了这些技术指标。

控制结果见表 1 至表 3，表中  $n$  为采样序号， $t_2$  为温区 2 的温度， $t_3$  为温区 3 的温度， $t_4$  为温区 4 的温度， $t_0$  为温度设定值。 $e_2 = t_3 - t_2$ ， $e_4 = t_3 - t_4$ ， $e_3 = t_0 - t_3$ 。实际选取采样时间为 70 s。同表中 3 种  $t_0$  值的控制结果对应的曲线见图 4 至图 6。

表 1  $t_0 = 300^\circ\text{C}$  时实测温度及其偏差

Table 1 Values of measured temperature and deviation at  $t_0 = 300^\circ\text{C}$

$n$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$e_2$	$e_3$	$e_4$
1	299.7	300.4	299.4	0.7	-0.4	1.0
2	299.9	300.4	299.5	0.5	-0.4	0.9
3	300.1	300.5	299.6	0.4	-0.5	0.9
4	299.9	300.4	299.6	0.5	-0.4	0.8
5	300.0	300.5	299.7	0.5	-0.5	0.8
6	299.9	300.6	299.7	0.7	-0.6	0.9
7	299.9	300.6	299.9	0.7	-0.6	0.7

续表

$n$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$e_2$	$e_3$	$e_4$
8	299.8	300.7	299.8	0.9	-0.7	0.9
9	299.7	300.6	299.9	0.9	-0.6	0.7
10	300.1	300.7	300.0	0.6	-0.7	0.7
11	300.1	300.7	300.0	0.6	-0.7	0.7
12	299.9	300.7	300.3	0.8	-0.7	0.4
13	299.8	300.7	300.2	0.9	-0.7	0.5
14	299.8	300.7	300.3	0.9	-0.7	0.4
15	299.9	300.6	300.5	0.7	-0.6	0.1
16	299.9	300.8	300.6	0.9	-0.8	0.2
17	299.9	300.8	300.7	0.9	-0.8	0.1
18	299.9	300.9	300.6	1.0	-0.9	0.3
19	299.7	300.7	300.9	1.0	-0.7	-0.2
20	300.2	301.0	300.8	0.8	-1.0	0.2

表 2  $t_0 = 400^\circ\text{C}$  时实测温度及其偏差

Table 2 Values of measured temperature and deviation at  $t_0 = 400^\circ\text{C}$

$n$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$e_2$	$e_3$	$e_4$
1	399.9	400.8	401.1	0.9	-0.8	-0.3
2	399.4	400.4	400.5	1.0	-0.4	-0.1
3	399.0	399.9	399.7	0.9	0.1	0.2
4	398.8	399.5	399.1	0.7	0.5	0.4
5	398.6	399.3	399.0	0.7	0.7	0.3
6	398.8	399.4	399.0	0.6	0.6	0.4
7	399.2	399.7	399.2	0.5	0.3	0.5
8	399.5	400.0	399.6	0.5	0.0	0.4
9	399.7	400.2	399.5	0.5	-0.2	0.7
10	400.1	400.3	399.5	0.2	-0.3	0.8
11	400.6	400.4	399.8	-0.2	-0.4	0.6
12	401.0	401.0	400.1	0.0	-1.0	0.9

从这些数据可以看出，在  $t_0 = 300^\circ\text{C}$ ， $400^\circ\text{C}$ ， $600^\circ\text{C}$  等实验点处，炉温的长期稳定性 ( $t_3$  的稳定性) 优于  $1^\circ\text{C}$ ，而炉膛内 100 mm 区间的温场均匀性 (即  $|t_3 - t_2|$ ， $|t_3 - t_4|$  的值) 也优于  $1^\circ\text{C}$ ，完全达到设计要求。

表 3  $t_0 = 600\text{ }^\circ\text{C}$  时实测温度及其偏差

Table 3 Values of measured temperature and deviation at  $t_0 = 600\text{ }^\circ\text{C}$

$n$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$e_2$	$e_3$	$e_4$
1	599.6	600.4	600.3	0.8	-0.4	0.1
2	599.5	600.3	599.9	0.8	-0.3	0.4
3	599.9	600.1	599.7	0.2	-0.1	0.4
4	600.1	599.7	599.0	-0.4	0.3	0.7
5	599.9	599.7	599.0	-0.2	0.3	0.7
6	600.0	599.6	599.0	-0.4	0.4	0.6
7	600.0	599.8	599.0	-0.2	0.2	0.8
8	600.0	599.8	599.1	-0.2	0.2	0.7
9	600.1	599.9	599.2	-0.2	0.1	0.7
10	600.1	600.0	599.4	-0.1	0	0.6
11	600.5	600.1	599.5	-0.4	-0.1	0.6
12	600.5	600.2	599.7	-0.3	-0.2	0.5
13	600.6	600.3	599.9	-0.3	-0.3	0.4
14	600.5	600.3	600.2	-0.2	-0.3	0.1
15	600.7	600.5	600.4	-0.2	-0.5	0.1
16	600.5	600.5	600.5	0	-0.5	0
17	600.4	600.5	600.4	0.1	-0.5	0.1
18	600.2	600.3	600.4	0.1	-0.3	-0.1

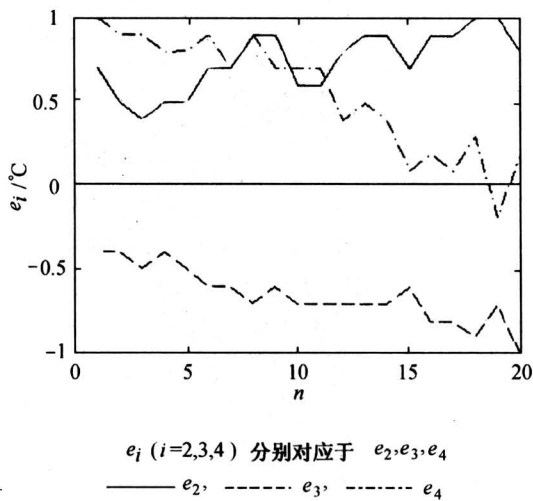


图 4  $t_0 = 300\text{ }^\circ\text{C}$  时的近稳态温偏曲线  
 Fig.4 Temperature-deviation curves for near-stable state at  $t_0 = 300\text{ }^\circ\text{C}$

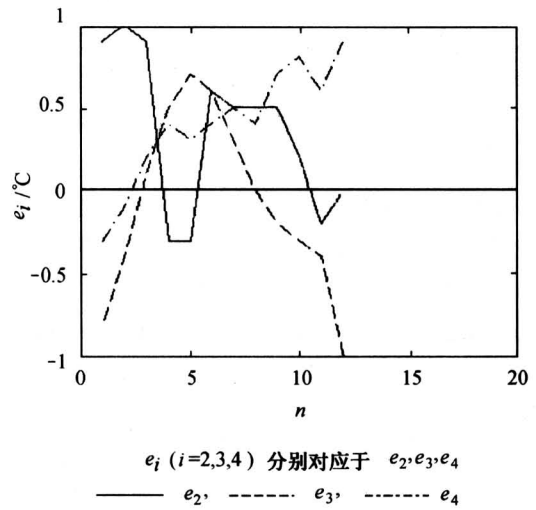


图 5  $t_0 = 400\text{ }^\circ\text{C}$  时的近稳态温偏曲线  
 Fig.5 Temperature-deviation curves for near-stable state at  $t_0 = 400\text{ }^\circ\text{C}$

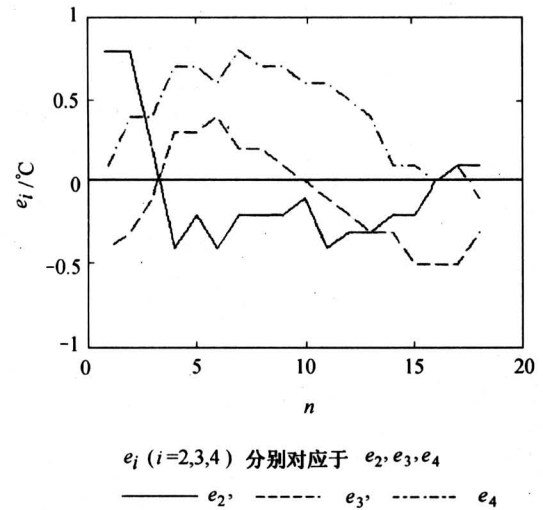


图 6  $t_0 = 600\text{ }^\circ\text{C}$  时的近稳态温偏曲线  
 Fig.6 Temperature-deviation curves for the near-stable state when  $t_0 = 600\text{ }^\circ\text{C}$

#### 4 小结

多变量非线性系统的解耦控制一直是一个实用而困难的课题，作者避开了传统解耦实践中困难的建模过程，另辟蹊径，提出了基于知识的变结构解耦策略。文中以一个 3 输入、3 输出的强耦合系统为实例，阐述了所采用的一整套控制策略，并将这

些源于领域专家和熟练操作人员的“专家系统”设计成一个个功能模块,存入其知识控制策略库中,依据控制进程的需要而随用随取。功能模块包括微分分离和积分分离算法模块、隐式微分及隐式积分算法模块、输入跟踪解耦算法模块、输出跟踪解耦算法模块、解耦系数在线可调算法模块等,特别是其中的输入跟踪解耦算法、输出跟踪解耦算法和解耦系数在线可调等三项,是作者提出的变结构解耦控制策略的创新核心点,并已成功地用于强耦合非线性系统的控制,获得了理想的控制效果,有其理论价值和实用价值。

需要指出,所提出的基于知识的变结构解耦控制策略,仅对少数的专门对象进行了控制实践。作者下一步的工作,是将其用于更广泛的被控对象,从而总结出一套通用性强、控制品质满意的多变量非线性系统控制策略。

#### 参考文献

- [1] 刘晨晖. 多变量过程控制系统解耦理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984
- [2] 王永. 解耦控制系统[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1985
- [3] 温香彩. 广义非线性系统的变结构控制理论[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(1): 87~90
- [4] 严星刚, 林辉, 戴冠中. 一类非线性大系统的鲁棒变结构跟踪控制[J]. 控制对策, 1999, 14(3): 261~263
- [5] 姚琼芸, 宋立志, 温洪. 离散变结构控制系统的比例—等速—变速控制[J]. 控制与决策, 2000, 15(3): 329~332
- [6] 刘永清, 温香彩. 广义系统的变结构控制[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1997
- [7] Fang G, Jiang Y A. Variable structure based decentralized adaptive control[J]. IEEE Control Theory Appl, 1995, ( ): 142~149
- [8] Bartoszewicz A. Remark on “discrete-time variable structure control system”[J]. IEEE Trans on Ind Electr, 1996, 44(1): 235~238
- [9] Gao W B, Wang Y F, Homaifa A. Discrete-time variable structure control system[J]. IEEE Trans Ind Electr, 1995, 42(2): 117~122
- [10] 涂承媛. 自动控制中的隐式积分与隐式微分作用机理[J]. 科学通报, 1990, 35(1): 80
- [11] 涂承媛. 一种变结构参数型控制的机理, 科学通报[J]. 1990, 35(12): 957

## Knowledge-Based Variable Structure Decoupling Control of a Nonlinear Multivariable System

Tu Chengyuan, Zeng Yanjun

(Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

[Abstract] A knowledge-based variable-structure decoupling is developed, and be utilized to control a nonlinear multivariable system, so as to avoid the model-establishing process, especially avoid large amount of complex matrix operations required for the conventional decoupling control. Some modules in the knowledge base of this kind of control are described, and the main points of the related algorithms are introduced. Strategies described in this paper have been successively utilized to the set-point temperature control of a  $3 \times 3$  strong coupled system — a three winding heater type standard temperature source, and an effect that the temperature stability as well as temperature homogeneity all better than  $1^\circ\text{C}$  has been attained, which is impossible for the conventional control method.

[Key words] nonlinear multivariable system; decoupling control; knowledge based variable structure decoupling