

研究论文

气动控制阀静摩擦的 Kano 模型与 检测方法的进一步研究

何熊熊¹, 邹涛¹, 杨悦², 李信³

(¹ 浙江工业大学信息与控制研究所, 浙江 杭州 310014; ² 丹佛斯(上海)自动控制有限公司, 上海 200233;

³ 泰雷兹软件系统上海有限公司, 上海 201206)

摘要: 气动阀门的静摩擦现象在工业过程的控制中非常普遍, 易引起控制系统的波动, 从而影响生产的正常进行。在众多的研究成果中, Kano 提出的气动阀门静摩擦模型与检测方法是简单有效的。但是, Kano 气动控制阀静摩擦模型存在着不足, 本文指出了该模型的缺陷所在, 并给出了改进方案, 使得模型的输入输出与物理过程完全一致; 针对控制阀静摩擦的统计检测方法参数较多的特点, 系统分析了影响检测结果的因素, 总结了检测参数的指导原则。最后, 在 Matlab Simulink 平台下编制了能够描述阀门静摩擦现象的 S-Function 模块, 并进行了模拟仿真, 在扰动存在的条件下讨论了统计检测方法的有效性。

关键词: 气动控制阀; 静摩擦力; 控制器性能评估

中图分类号: TP 206

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 07-1691-07

Further study on Kano's model and detection method for pneumatic valve stiction

HE Xiongxiang¹, ZOU Tao¹, YANG Yue², LI Xin³

(¹ Institute of Information and Control, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, Zhejiang, China; ² Danfoss Industries Ltd. (Shanghai), Shanghai 200233, China;

³ Thales Software Systems (Shanghai), Shanghai 201206, China)

Abstract: Pneumatic control valves stiction is very common in process industry. A big fluctuation of process will be caused by stiction and productivity will also be lowered. Among lots of research results, the method of describing stiction of pneumatic control valves and detecting stiction developed by Kano is simple and effective. However, some defects in the Kano's method are pointed out by the authors. The model structure of pneumatic control valve of Kano was improved to overcome the existing defects so that the input and output were consistent with the physical process. To deal with multiple parameters in the statistical detection method, guide rules were presented through the analysis of the factors that affected the detection results. Finally, the stiction phenomenon was compiled to a module by using the S-function technology in Matlab Simulink. Simulation was made under the Matlab Simulink framework and the statistical detection method under disturbance was discussed.

Key words: pneumatic control valve; stiction; controller performance assessment

2008-04-15 收到初稿, 2008-04-29 收到修改稿。

联系人及第一作者: 何熊熊 (1965—), 男, 博士。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60774021, 60604017)。

Received date: 2008-04-15.

Corresponding author: HE Xiongxiang. E-mail: hxx@zjut.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (60774021, 60604017).

引 言

流程工业过程中存在着大量的控制回路，它们对保障生产顺利进行以及获得高质量产品起重要作用，但是不佳的控制回路性能将直接影响生产过程的产量和质量，具体表现为系统变化缓慢、跟踪能力弱以及系统呈现出显著的振荡，相对而言，振荡会对控制过程带来更加严重的破坏性。而导致控制系统振荡的原因包括以下几个方面^[1]：系统内部存在周期性的外部扰动；控制器的参数整定不当；控制阀存在显著的静摩擦力作用。

随着控制器性能评价研究的深入，研究者将周期性外部扰动问题、控制器的参数整定不当问题与阀静摩擦问题分离开来^[1-3]。由于周期性扰动问题和控制器参数整定不当属于线性范畴，而阀静摩擦现象属于非线性范畴，文献 [4] 定义了非高斯指数 (NGI) 和非线性指数 (NLI) 两个参数来检测信号的非线性。引起回路振荡的最主要的原因是阀门静摩擦，相对于滞回等非线性现象，静摩擦影响更为剧烈。如果控制回路中的阀门具有很强的静摩擦，则必须对它进行维护或更换。因而，如何检测到静摩擦的存在并且能加以定量的研究是很有实际意义的。

目前，阀门静摩擦的检测研究在国际过程控制届已经逐渐成为热点研究问题^[5-9]。由于阀门静摩擦现象比较复杂，为了便于研究与模拟，对阀门静摩擦现象进行建模成为首要的任务。比较成熟的方法主要有两种，分别由 Choudhury^[8] 和 Kano 等^[7] 提出。相比较而言，Kano 模型使用范围更广泛，而且易于实现，但 Kano 模型也存在一定的漏洞，即当阀位处于阀门物理输出的上界或下界时，模型输出与其物理性质不符。本文在原有模型的基础上，增加了两个约束条件，完善了模型结构，使得阀位处于任何物理有效的位置上时，模型的输入、输出都是物理上合理的。

阀静摩擦的检测方法大致可以分为两大类：一是由 Kano 提出的一种基于控制器输出与过程输出统计特性的阀静摩擦检测方法，它是基于统计方法的检测手段^[7,10-11]；二是基于模式识别的方法^[8-9,12]。相比较而言，基于统计方法的阀静摩擦检测方法准确度较高，受控制器参数选择 (tuning) 的影响较小。相反，基于模式识别的方法存在着一定的检测盲区，而且受控制器参数选择和扰

动影响较大，但是，Kano 提出的基于统计方法的阀静摩擦检测手段涉及 3 个阈值参数和两个评价指标，如何合理地设置阈值参数和利用评价指标来正确判定阀门是否存在静摩擦现象是工业过程控制中需要解决的一个问题。本文考虑了实际过程中可能存在的测量噪声、控制器以及传感器精度问题，给出了指导阈值参数选择的原则。

1 Kano 气动阀静摩擦模型原理及存在的问题

气动阀门具有机构简单、动作可靠、稳定、输出力矩大、安全防爆等特点，广泛地应用于石油、化工生产领域。气动阀门的结构原理^[2]如图 1 所示。气动阀门由执行结构和阀体两部分构成。执行结构由膜片、推杆和平衡弹簧组成，它是气动阀门的推动装置，推动阀芯 (塞子) 动作，使得流经阀体的液体流量受到阀芯所处位置的影响。阀芯与阀杆相连，阀杆的移动受到密封装置所产生的静摩擦的影响。如果控制器输出信号所产生的推动力不能克服静摩擦力，阀芯的位置将不会发生改变，直到弹力与气压力之差大于最大静摩擦力 f_s 时，阀芯将产生突然的移动，如图 2 所示。详细的控制器输出与阀芯位置的动力学关系见文献 [7-8, 13-14]。

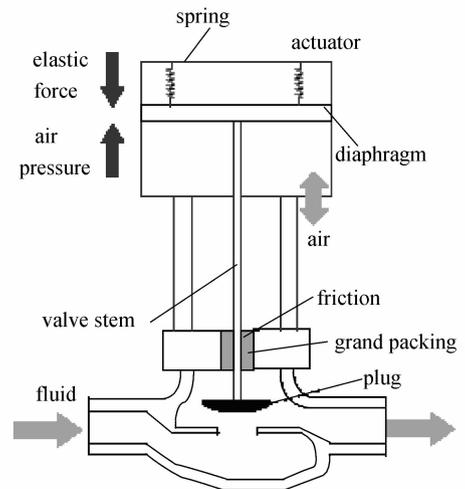


图 1 气动阀门结构

Fig. 1 Structure of pneumatic control valve

为了更好地研究阀门静摩擦现象，Kano 等^[7]给出了阀门静摩擦模型的框图表示法，由于该模型简单有效，可以同时处理确定性与随机事件，在模拟与研究阀门静摩擦现象中被广泛使用^[9]。Kano 模型有如下几个重要的参数。

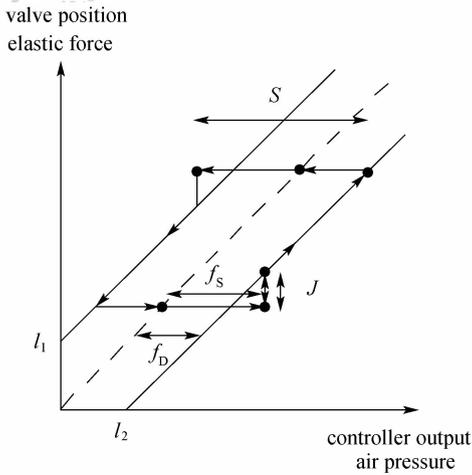


图 2 阀静摩擦存在下的控制器输出与阀芯位置关系
Fig. 2 Relation between controller output and valve position under valve stiction

① stp, stp=0 意味着阀芯位置处于运动状态, stp=1 意味着阀芯位置处于停滞状态。

② u_s , 阀芯处于停滞状态时的初始控制器输出。

③ d , $d = \pm 1$ 表示摩擦力的方向。

④ f_s , 图 2 中所示的静摩擦力。

⑤ f_D , 图 2 中所示的动摩擦力。

⑥ S , 最大摩擦力, 定义式为

$$S = f_s + f_D$$

⑦ J , 滑跳的幅度, 定义式为

$$J = f_s - f_D$$

对 Kano 模型进行详细分析后, 发现该模型存在一定的缺陷, 即当阀位处于阀门物理输出的上界或下界时以及初始点不在图 2 中的 l_1 或 l_2 时, 模型输入、输出与其物理性质不符。假设控制器的输出为一周期性正弦信号 (图 3), 根据 Kano 模型得到相应的阀芯位置状态图 (图 4)。这里取 $S=10$, $J=4$, 即 $f_s=7$ 。

显而易见, 图 4 中有两个错误 (见图中椭圆区域): ①从控制器输出信号上看, 该信号从 0 增大到 20, 相应地阀芯位置应随之发生相应的变化, 由于静摩擦的存在, 只有当弹力与气压力之差大于最大静摩擦力 f_s 时, 阀芯位置才会产生相应的滑跳, 对应的控制器输出器输出信号应等于 f_s ; ②当控制器输出信号第二次从 0 增大到 20 时, 滑跳的位置发生了变化, 从理论位置 f_s 变成了 S 。

2 Kano 气动阀静摩擦模型改进算法

Kano 模型的流程框图是一种理想情况下的程

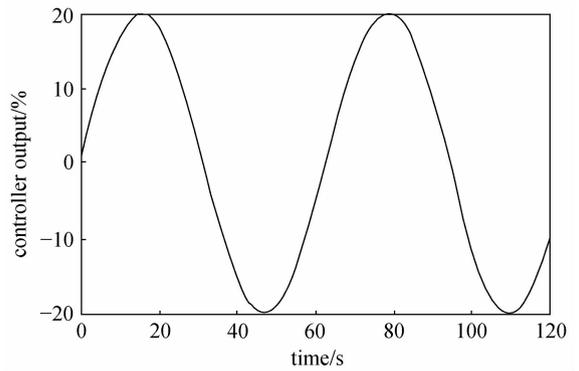


图 3 控制器输出信号

Fig. 3 Controller output signal (sine)

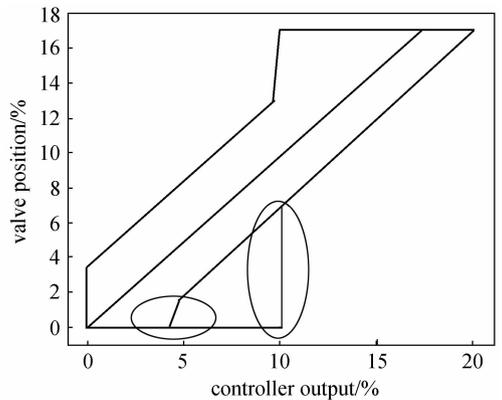


图 4 不正确的阀芯位置状态

Fig. 4 Incorrect relation between controller output and valve position

序框图, 理想情况是指由阀位运行轨迹 l_1 和 l_2 构成的近似平行四边形完全处于控制器输出和阀芯位置的物理边界内且阀位初始状态 u_s 位于 l_1 或 l_2 上。而当阀位处于阀门物理输出的上界或下界时以及初始点不在 l_1 或 l_2 时, 按照 Kano 模型的程序框图编写模型程序将产生错误的阀芯位置状态变化。由上述分析得知, Kano 模型的流程图有缺陷的部分集中在如图 5 所示的这个局部, 模型的其余部分都是正确的。根据图 2 所示的控制器输出与阀芯位置关系规则, 只需将图 5 中的判据阈值重新设定即可, 则该流程图局部修改如图 6 所示。

这里, 重新定义了两个逻辑判定的阈值变量 S_{crit} 和 J_{crit} , 它们可由下述简单的逻辑判断来确定

If $u_s \geq y(t) + f_s$ or $u_s \leq y(t) - f_s$ then

$S_{crit} = S, J_{crit} = J$

Else

$S_{crit} = (S+J)/2, J_{crit} = (S+J)/2$

End

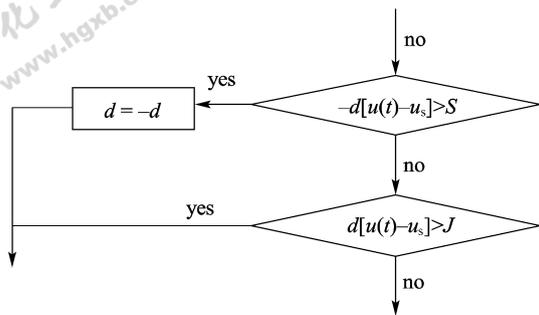


图 5 Kano 模型的流程图局部 (存在缺陷)

Fig. 5 Local flow chart of Kano model

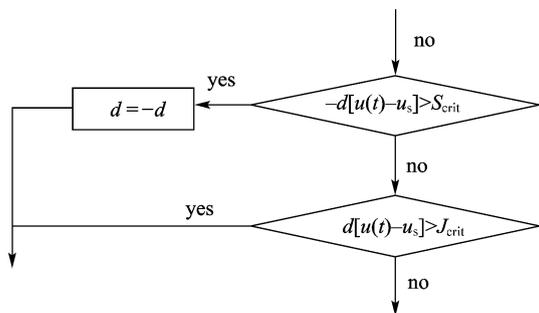


图 6 修改后的 Kano 模型的流程图局部

Fig. 6 Modified local flow chart of Kano model

使用修改后的 Kano 模型逻辑框图, 采用图 3 所示的正弦信号作为控制器输出信号, 相应的正确的阀芯状态如图 7 所示。

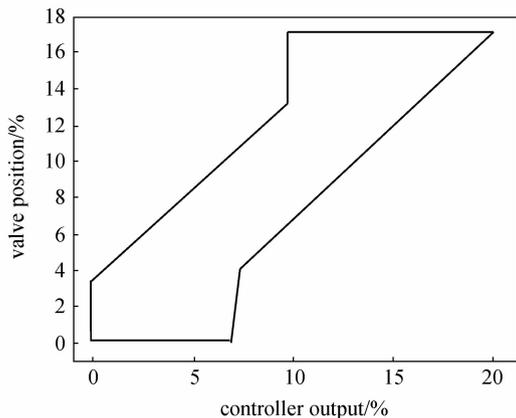


图 7 正确的阀芯位置状态

Fig. 7 Correct relation between controller output and valve position

3 基于统计的气动阀静摩擦检测算法及其参数给定原则

3.1 Kano 静摩擦检测方法的原理与算法

Kano 静摩擦检测方法原理^[7]: 如果控制阀存在静摩擦现象, 则存在这样的数据区, 即控制器输

出发生变化而阀芯位置没有发生变化。

基于统计原理的 Kano 静摩擦检测算法步骤:

(1) 计算阀芯位置 y 的偏差, $\Delta y(t) = y(t) - y(t-1)$;

(2) 找到满足条件 $|\Delta y(t)| < \epsilon$ 的数据区间, ϵ 为一阈值;

(3) 在已发现的数据区间内, 计算控制器输出 u 的最大偏差 (极大值与极小值之差), 定义为 \tilde{u} ; 同理, 计算阀芯位置最大偏差 \tilde{y} ; 给定两个阈值参数 ϵ_u 对应于 \tilde{u} , ϵ_y 对应于 \tilde{y} ;

(4) 判定阀静摩擦现象发生, 当 $\tilde{u} \geq \epsilon_u$, 对应于 $\tilde{y} \leq \epsilon_y$, 反之, 静摩擦现象没有发生;

(5) 计算静摩擦发生区间长度与区间长度的比值 ρ , 计算静摩擦发生区间 \tilde{u} 的平均值 σ 。

检测依据: 当 ρ 接近于 1 时, 出现阀静摩擦现象的概率越高; 反之, 当 ρ 接近于 0 时, 则阀不存在静摩擦。 σ 可用作量化静摩擦的度量。

3.2 指导原则

通过大量的仿真研究, 总结如下几点阀静摩擦的指导原则。

(1) ϵ 为检测发生静摩擦现象所在时间段的重要参数, 该参数与控制系统 (DCS) 精度直接相关, 因而选择该参数时, 至少应该大于控制系统圆整误差的 2 倍^[15], 但随着 DCS 系统精度不断提高 (12 位 AD), 控制系统精度已经不成问题了。但由于该算法还要测量阀芯的所在位置, 所以该传感器的误差也要考虑在内, 同样, ϵ 至少应该大于该误差的 2 倍。

(2) 随机误差将对该算法的检测结果产生一定的影响。由于该算法是一种离线算法, 可以对阀芯位置测量信号进行平滑。增加 ϵ_u 有助于提高 σ 的检测精度, 但降低了 ρ 。在一定的信噪比下, 噪声对检测结果影响不大。

(3) 阀静摩擦现象可导致系统振荡, 当系统存在较大的滞后特性时, 滞后特性将与静摩擦现象产生叠加, 干扰静摩擦的检测结果。该问题的理想解决方案是首先根据 Smith 预估补偿方法设计控制器, 然后对经过平滑后的数据使用该算法。

(4) 数值 ρ 是静摩擦现象存在的重要依据, 但由于噪声的影响 (较小的信噪比), 将使得 ρ 发生显著变化, 可以肯定 ρ 与数据的方差直接相关。一般来说, 经过平滑后的数据, 当 $\rho \geq 0.5$ 时, 可以认为系统存在着静摩擦现象。

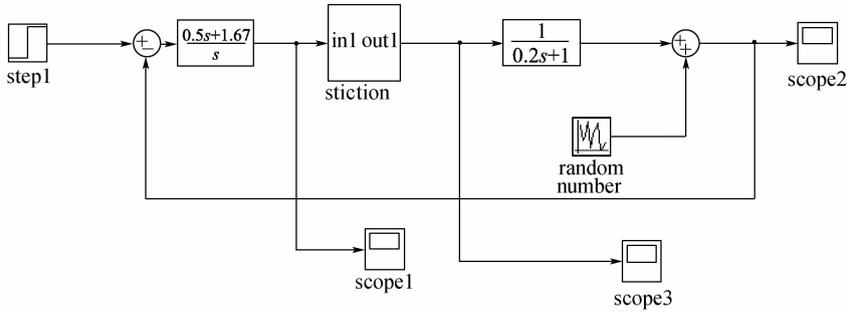


图 8 Simulink 仿真模块

Fig. 8 Simulink simulation module framework

4 仿 真

采用文献 [7] 中流量控制系统进行仿真验证。被控过程的传递函数为

$$P_F = \frac{1}{0.2s + 1}$$

控制器参数选择：比例增益为 0.5，积分时间为 0.3 s。

结合修改后的 Kano 模型程序框图，在 Matlab Simulink 仿真框架下编写了 S-Function 模块，并依此建立了用于验证阀门静摩擦性质的仿真平台（图 8）。为了符合工业过程的真实情况，在流量的输出信号上增加了方差为 0.1 的正态分布随机噪声。此外，为避免由阀门物理限制导致的积分饱和现象的出现，仿真中将阶跃信号的终值设定为 50。

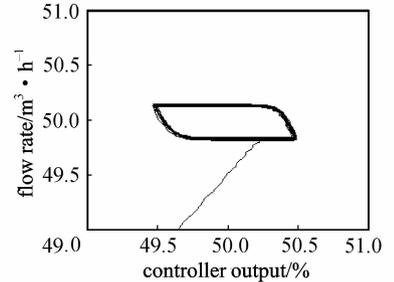
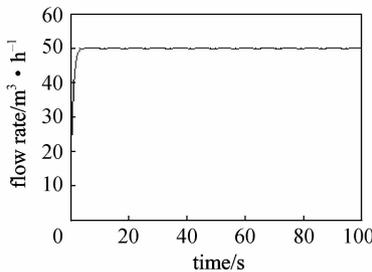
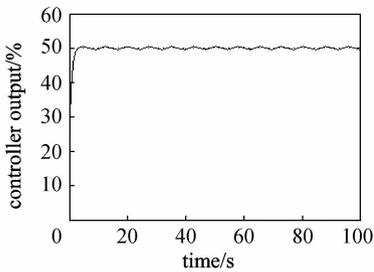
选择了 3 组静摩擦参数^[10]，见表 1。

表 1 静摩擦参数

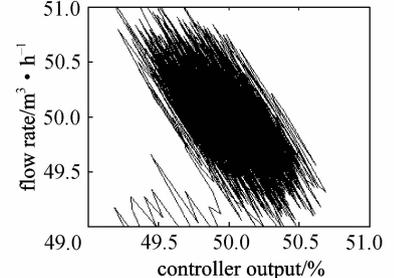
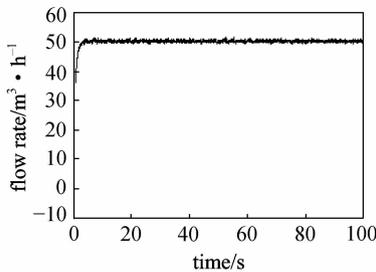
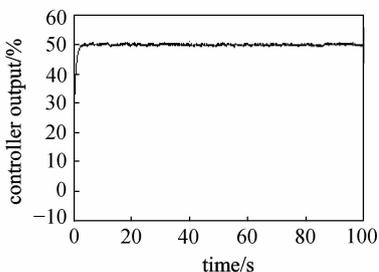
Table 1 Parameter of stiction model

Case	S/%	J/%
1(no stiction)	0	0
2(weak stiction)	1	0.3
3(strong stiction)	5	1

根据本文提出的指导原则，选定了如下的检测参数： $\epsilon = 0.1$ ， $\epsilon_u = 0.2$ ， $\epsilon_y = 0.2$ 。仿真结果如图 9 所示，检测结果见表 2。可见，虽然噪声的出现对检测结果产生了一定的影响，但可检测性是无误的，而且，以无扰动情况作为基准，检测结果的正确率超过了 80%。



(a) S=1, J=0.3 (without disturbance)



(b) S=1, J=0.3 (with disturbance)

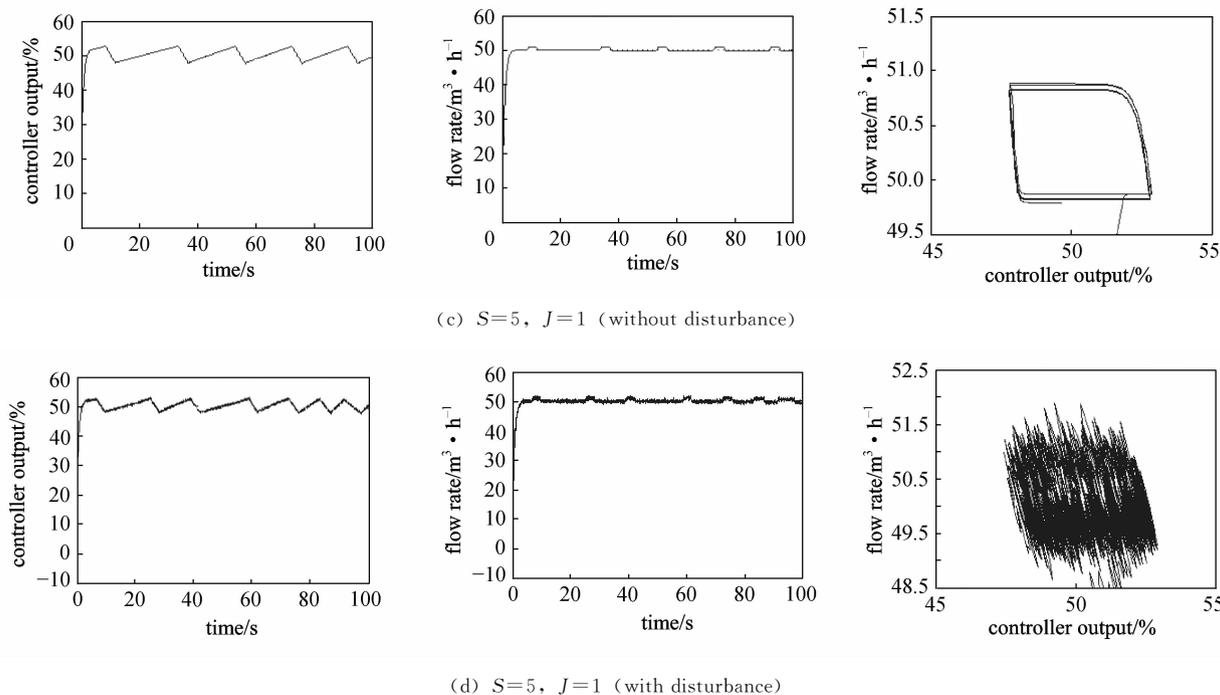


图 9 仿真曲线

Fig. 9 Simulation results

表 2 静摩擦检测结果

Table 2 Detecting results of stiction model

S	J	Without disturbance		With disturbance	
		σ	ρ	σ	ρ
0	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.3	0.9809	0.9704	0.9111	0.9990
5	1	4.8290	0.9346	3.9358	1.0000

5 结 论

针对气动控制阀静摩擦的 Kano 模型中存在的漏洞, 本文在原有模型基础上, 增加了两个约束条件, 完善了模型结构, 使得阀位处于任何物理有效位置上时, 模型的输入、输出都是物理上合理的。并在考虑实际过程中可能存在的测量噪声、控制器以及传感器精度问题的基础上, 给出了指导统计监测方法的参数选择原则。控制阀静摩擦现象是导致控制过程振荡的重要原因, 通过一定的检测手段, 可以自动对阀的静摩擦进行量化。对于一些轻微或中等程度的静摩擦问题, 可以通过合理地调整控制器的参数来解决。

References

[1] Bialkowski W L. Dreams vs reality: a view from both sides of the gap//Proceedings of Control Systems. Whistler, BC, Canada, 1992; 283

[2] Thornhill N F, Hagglund T. Detection and diagnosis of oscillation in control loops. *Control Engineering Practice*, 1997, **5**: 1343

[3] Choudhury M A A S, Shah S L, Thornhill N F. Diagnosis of poor control-loop performance using higher-order statistics. *Automatica*, 2004, **40**: 1719

[4] Choudhury M A A S, Thornhill N F, Shah S L. A data-driven model for valve stiction//Proceedings of ADCHEM. Hong Kong, China; 2003

[5] Choudhury M A A S, Thornhill N F, Shah S L. Modeling valve stiction. *Control Engineering Practice*, 2005, **13**: 641

[6] Cook P A. Nonlinear Dynamical Systems. London: Prentice-Hall International, 1986

[7] Kano M, Maruta M, Shimizu K, Kugemoto H. Practical model and detection for valve stiction//Seventh International Conference on Dynamics and Control of Process Systems (DYCOPS7). Cambridge, USA; 2004

[8] Choudhury M A A S, Shah S L, Thornhill N F, Shook D S. Automatic detection and quantification of stiction in control valves. *Control Engineering Practice*, 2006, **14**: 1395

[9] Yoshiyuki Yamashita. An automatic method for detection of valve stiction in process control loops. *Control Engineering Practice*, 2006, **14**: 503

- [10] Desborough L, Miller R. Increasing customer value of industrial control performance monitoring—Honeywell experience. *Proceedings of Process Control*, 2002, **6**: 172
- [11] Thornhill N F, Huang B, Zhang H. Detection of multiple oscillations in control loops. *J. Process Control*, 2003, **13**: 91
- [12] Taha O, Dumont G A, Davoes M S. Detection and diagnosis of oscillations in control loops//Proceedings of 35th Conference on Decision and Control. Kope, Japan; 1996
- [13] Muller F. Simulation of an air operated sticky flow control valves//Proc. of the 1994 Summer Computer Simulation Conference. California, 1994: 742
- [14] Horch A. A simple method for detection of stiction in control valves. *Control Engineering Practice*, 1999, **7**: 1221
- [15] Wang Changli (王常力), Luo An (罗安). Distributed Control System (DCS) Design and Application Example (分布式控制系统 (DCS) 设计与应用实例). Beijing: Electric Industry Press, 2004