

液位调节系统中混沌运动的最优控制*

王忠勇

蔡远利 刘文江

(郑州大学电子工程系·郑州, 450052) (西安交通大学信息与控制工程系·西安, 710049)

摘要: 本文讨论了液位控制系统的混沌动力学行为, 并基于传统最优控制理论的思想, 成功地对该系统的混沌运动实现了控制, 使系统从混沌运动状态转变到了规则运动状态。

关键词: 液位系统; 最优控制; 混沌

Optimal Control of Chaotic Motions in the Liquid Level Regulation System

Wang Zhongyong

(Department of Electronic Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450052, P. R. China)

Cai Yuanli and Liu Wenjiang

(Department of Automatic Control, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, P. R. China)

Abstract: This paper describes chaotic behavior of a liquid level control system. We use the optimal control method to stabilize this chaotic system, and successfully convert chaos motions in this system to regular motions.

Key words: liquid level system; optimal control; chaos

1 引言(Introduction)

工业控制系统中经常出现导致系统失稳的各种振荡, 对这些振荡, 人们习惯地认为是工业过程中的噪声引起的。但随着混沌动力学理论的出现, 国内外许多学者发现有些振荡由系统的物理本质决定, 是确定性系统所产生的一种复杂运动。由于工业控制过程中的混沌现象往往以“随机振荡”的面目出现, 致使广大控制工程人员难于识别其真面目。因此, 正确区分系统中出现的随机振荡与混沌现象的物理本质, 深入探讨各种形式振荡产生的机理及消除途径, 就显得很有必要。

自 80 年代以来, 已有不少的文献报道了工业控制系统出现的混沌现象^[1]。在抑制和消除系统的混沌方面人们利用传统控制理论也取得了一些成果。Hartley^[2]等利用 PI 调节方法稳定了洛仑兹系统, 使其在混沌区内能跟踪输入信号; Jonston^[3]等利用微分控制使处在双螺旋区的蔡氏电路稳定到了不稳定的平衡点; 另外, Aguirre^[4]等用模型参考自适应控制方法, 控制了 Duffing-veda 振荡器的混沌动力学行为。本文首先简述了液位控制系统中的混沌现象, 然后将最优控制的概念引入到混沌运动的控制中, 通过

使二次型性能指标最小的方法实现了液位调节系统混沌运动的控制, 使系统从混沌运动状态转变到了规则运动状态。

2 液位控制系统的混沌现象 (Chaotic motions of the liquid control system)

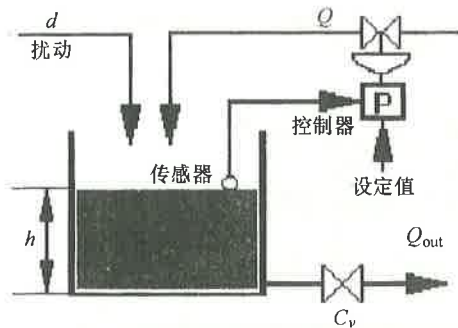


图 1 液位控制系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the liquid control system

Lee 等^[1]研究了图 1 所示液位控制系统的混沌现象。图中 d 为扰动输入, Q 为经控制器作用后流入容器的液体流量, 它的数值大小由传感器检测到的液位高度和设定值 x_{sp} 比较后, 通过比例控制器来调节, Q_{out} 为流出容器的流量。于是有如下微分方程

$$\rho A \frac{dh}{dt} = \rho d + \rho Q - \rho Q_{out}. \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(19402011)及河南省自然科学基金(984060300)资助项目。
本文于 1997 年 1 月 9 日收到, 1997 年 12 月 15 日收到修改稿。

式中 ρ 是液体的密度, A 是容器的横截面积, h 是液位高度.

由于输出流量 Q_{out} 和 $\sqrt{h}$ 成正比, 得

$$A \frac{dh}{dt} = d + Q - C_v \sqrt{\frac{\rho g h}{g_c}} \quad (2)$$

引入如下变量

$$\begin{aligned} x &= h/h_0, \quad \bar{d} = d/Q_0, \\ Q &= Q_0(1 + q(t)), \quad T = Q_0 t / A h_0, \\ \bar{C}_v &= \frac{C_v \sqrt{\rho g h_0 / g_c}}{Q_0}. \end{aligned}$$

并用差分方程代替微分方程, 有

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + \Delta T [\bar{d} + (1 + q_n) - \bar{C}_v \sqrt{x_n}], \\ q_n = -k(x_n - x_{sp}), \\ n = 0, 1, \dots \end{cases} \quad (3)$$

式中 ΔT 为采样周期, k 为比例控制器的可调增益, x_{sp} 为设定值, q_n 即是控制.

由于实际过程中, 控制不能无限大, 考虑约束

$$q_{\min} < q_n < q_{\max}.$$

并对上述方程中的常量取如下数值:

$$\begin{aligned} x_{sp} &= 5.1, \quad d = 0.017, \quad Q_0 = 0.00333, \\ \bar{C}_v &= 2.68556, \quad h_0 = 1, \quad \Delta T = 0.08, \\ -1 &< q_n < 0.5, \end{aligned}$$

此时系统能够产生混沌运动. 系统输出即液位高度和控制器比例系数 k 的关系如图 2 所示, 从图中可看到, 在 $k \approx 24.4$ 时, 系统突然进行倍周期分岔, 随着 k 的增大, 系统逐渐过渡到混沌运动状态. 当控制器比例系数 $k > 32.7$ 后, 系统的两片混沌区联为一片, 液位高度在图示范围内变化, 无法达到恒定.

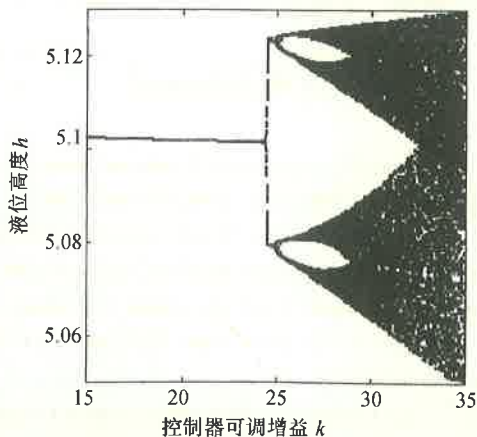


图 2 液位控制系统分岔图

Fig. 2 Bifurcation of the liquid control system

3 混沌系统的最优控制方法 (Optimal control method of chaotic systems)

设系统的运动态行为可用如下形式来描述

$$\xi_{n+1} = f(\xi_n, p). \quad (4)$$

ξ_n 是 $n \times 1$ 状态向量, p 是标量系统参数.

在不动点附近对系统的动力学行为作近似, 并标记 $\xi_F = f(\xi_F, p^*)$, p 为 p^* 邻域内的值, 即 $|p - p^*| < \delta$, 通过局部线性化可得

$$\xi_{n+1} - \xi_F = A(\xi_n - \xi_F) + b(p_n - p^*). \quad (5)$$

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial \xi} \right|_{p=p^*, \xi=\xi_F}, \quad b = \left. \frac{\partial f}{\partial p} \right|_{p=p^*, \xi=\xi_F}. \quad (6)$$

若定义如下性能指标

$$J = \sum_{n=1}^N \{ (\xi_n - \xi_F)^T Q_n (\xi_n - \xi_F) + r_n (p_n - p^*)^2 \}. \quad (7)$$

这里 N 是预先确定的固定的正整数, Q_n 是非负定和对称的正实数矩阵, r_n 为正实数, 扰动序列 p_n ($n = 0, 1, \dots, N-1$) 不受约束, 末态 $p_N = 0$.

问题 混沌系统的最优控制问题就是寻求参数扰动序列 $(p_1^*, p_2^*, \dots, p_N^*)$, 使系统能控制混沌运动到不动点. 若与 p_n^* 相对应的最优轨道为 ξ_n^* , 则 ξ_n^* 和 p_n^* 可使性能指标 J 最小.

对此问题有如下定理^[5]:

定理 混沌系统最优控制问题的最优参数扰动序列是

$$\begin{cases} p_n^* = -L_n A (\xi_n^* - \xi_F) + p^*, \\ p_N^* = 0, \\ n = 0, 1, \dots, N-1. \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$L_n = \frac{1}{b^T S_{n+1} b + r_n} b^T S_{n+1}. \quad (9)$$

S_n 为对称的非负定矩阵, 它通过下面递推公式确定.

$$\begin{cases} S_N = Q_N, \\ S_n = A^T S_{n+1} A - \frac{1}{b^T S_{n+1} b + r_n} A^T S_{n+1} b b^T S_{n+1} A + Q_n, \\ n = N-1, \dots, 1, 0. \end{cases} \quad (10)$$

由 p_n^* , 再通过 (5) 式即可确定系统的最优轨道 ξ_n^* .

该定理依据离散变分法很容易得证.

上述的讨论是建立在线性化方程 (5) 之上, 因而定理只适用于 ξ_F 的局部区域, 另一方面, 参数微

扰大小的限制由 $|p_n^* - p^*| < \delta$ 给出, 和(8)式合并得

$$|L_n A(\xi_n^* - \xi_F)| < \delta. \quad (11)$$

此式定义了宽度为 $2\delta/|L_n A|$ 的条形区域, 只有 ξ_n^* 在这个条形区域内, (8) 式的最优参数扰动才能起控制作用. 当 ξ_n^* 在这个条形区域外时, 选择使控制参数保留在它的标称值 $p_n^* = p^*$ 上. 故对于任意 ξ_n^* , 由下式确定控制

$$p_n^* - p^* = -L_n A(\xi_n^* - \xi_F) \times u(\delta - |L_n A(\xi_n^* - \xi_F)|). \quad (12)$$

这里 u 是非线性函数. 其定义为

$$u(\alpha) = \begin{cases} 0, & \alpha > 0, \\ 1, & \alpha < 0. \end{cases} \quad (13)$$

4 液位调节系统混沌运动的控制 (Control of chaotic motions in the liquid level regulation system)

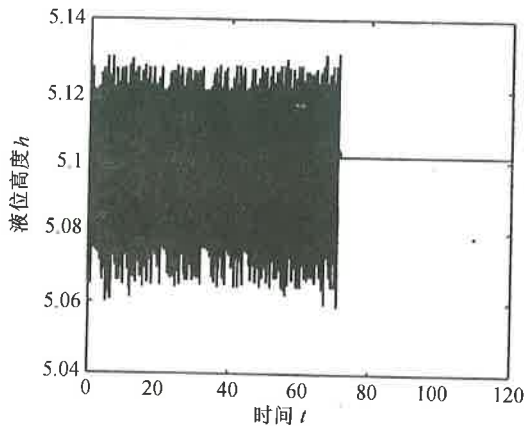


图3 液位高度变化曲线

Fig. 3 Liquid height versus time response curve

5 结论 (Conclusions)

1) 由于实际系统的控制量往往具有约束, 因而这种系统的分岔现象是突然发生, 而且混沌振荡的范围比不加约束时要小.

2) 利用传统的最优控制方法可以对系统的混沌运动实现控制. 但采用这种方法控制混沌时, 由于对系统进行了线性化, 从而要求系统的参数在其标称值的邻域内变化.

3) 传统的最优控制量往往是具有实际意义的控制信号, 如作用力、力矩、电压等, 而混沌系统的控制输入是系统参数扰动.

4) 从图2可知系统在 $k < 24$ 时不产生混沌现象, 因此, 如果能对系统的混沌特性分析清楚, 只要实际情况允许, 使系统不产生混沌现象的最简便方

考虑 $k = 30$ 时系统混沌运动的控制, 即 k 作为扰动参数 p , 其标称值 $p^* = 30$, p 在标称值的邻域 δ 范围内变化. 在 p^* 处得系统的不动点

$$x_F' = 5.513705, \quad x_F = 5.101315,$$

显然 x_F' 不符合要求, 由 x_F 得系统的线性化方程为

$$x_{n+1} - x_F = -1.447561(x_n - x_F) - 0.000105(p - p^*). \quad (14)$$

依据前述方法对系统进行控制.

令

$$N = 1500, \quad \delta = 56,$$

$$Q_n = 1, \quad r_n = 1, \quad n = 0, 1, \dots, N-1,$$

则将系统的混沌运动控制到了不动点 x_F . 在初态 $x(0) = 5.111106$ 的情况下施加控制(12)式, 所得的液位高度时间响应曲线如图3所示, 其相应的最小参数扰动序列如图4所示. 可见系统施加控制后, 大约经过72秒, 系统的混沌运动得以消除.

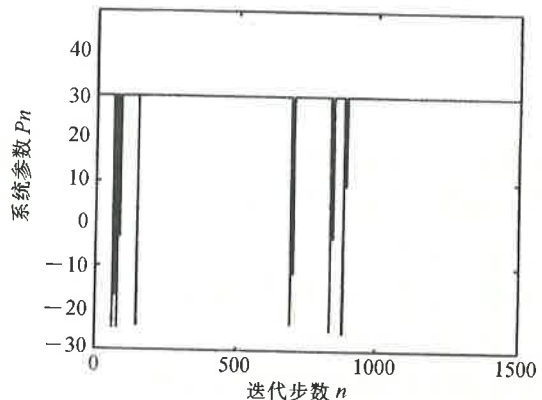


图4 系统参数扰动序列

Fig. 4 Perturbation sequence of system parameter

法是避开系统产生混沌的参数变化区域.

参考文献 (References)

- 1 Lee J S and Chang K S. Applications of chaos and fractals in process systems engineering. J. Proc. Contr., 1996, 6(2/3): 71 - 87
- 2 Hartley T T and Mossayebi F A. Classical approach to controlling the Lorenz equations. Int. J. Bifurcation and Chaos, 1992, 4(6): 1687 - 1695
- 3 Johnston G A and Hunt E R. Drivative control of the steady state in Chua's circuit driven in the chaotic region. IEEE Trans. on Circuit and System, 1993, 40(11): 833 - 834
- 4 Aguirre L A and Billings S A. Model reference control of regular and chaotic dynamic in the Duffing-Veda oscillator. IEEE Trans. on Circuit and System, 1994, 41(7): 477 - 490
- 5 Chen G. Optimal control of chaotic system. Int. J. Bifurcation and Chaos, 1994, 4(2): 461 - 463

本文作者简介

王忠勇 1965 年生. 1988 年哈尔滨工程大学研究生毕业, 1998 年在西安交通大学获工学博士学位, 现为郑州大学副教授. 研究方向为非线性控制系统中的混沌与分叉, 过程控制等.

蔡远利 1963 年生. 1990 年在西北工业大学获工学博士学位,

1991 年 ~ 1992 年为西安交通大学力学博士后流动站研究人员, 现为西安交通大学副教授. 研究方向为非线性控制系统中的混沌与分叉, 神经网络控制技术, 飞行器制导、控制与仿真等.

刘文江 1934 年生. 1956 年交通大学研究生毕业, 现为西安交通大学教授, 博士生导师. 目前的研究方向是参量检测及过程控制等.

(上接第 257 页)

周亚平 1963 年生. 1984 年毕业于中国科学技术大学自动化系. 现为中国科学技术大学管理科学系副教授, 并在中国科学技术大学自动化系攻读在职博士学位. 主要从事经济管理系统, 排队网络性能指标灵敏度仿真估计及优化等方面的研究.

杨孝先 1937 年生. 1958 年毕业于云南大学数学系, 现为中国科学技术大学数学系教授. 长期从事随机系统控制、优化及应用方面的研究.

奚宏生 1950 年生. 1977 年毕业于中国科学技术大学数学系, 现为中国科学技术大学自动化系教授. 长期从事鲁棒控制, 离散事件动态系统及其应用等方面的研究.

孙德敏 1939 年生. 1964 年毕业于中国科学技术大学, 并留校任教至今. 现为中国科学技术大学自动化系主任, 教授, 博士生导师, 中国自动化学会理事, 中国自动化学会控制理论专业委员会委员. 长期从事工业控制过程先进控制和优化及伺服系统综合方面的研究.