

过程系统在线鲁棒优化控制方法

夏圜世 俞金寿 蒋慰孙

(华东化工学院)

摘 要

生产过程系统优化控制的主要任务是迅速地跟踪过程系统最优操作条件的变化^[1]。然而由于实际过程系统的模型以及测量信息具有不确定性,因而研究具有鲁棒性的优化控制方法具有一定的价值。为此提出了基于一定长度优化序列以及不确定区间最优化的优化控制方法。

关键词: 优化控制,鲁棒性,不确定系统。

一、在线鲁棒优化控制算法

对于具有直接控制层的过程系统,其优化控制问题可以定义为

$$\begin{aligned} & \text{Max}_{\{s_p(k+1), s_p(k+2), \dots, s_p(k+l)\}} J[s_p(k+1), s_p(k+2), \dots, s_p(k+l), \hat{u}(k+1|k), \\ & \quad \hat{u}(k+2|k), \dots, \hat{u}(k+l|k), \hat{x}(k+1|k), \hat{x}(k+2|k), \dots, \hat{x}(k+l|k)], \\ \text{s.t. } & \begin{cases} \hat{y}(k+j|k) = h[\hat{x}(k+j|k), \hat{u}(k+j|k), \hat{d}(k+j|k)], \\ \hat{y}(k+j|k) \in [s_p(k+j) - \Delta, s_p(k+j) + \Delta], \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, l). \end{aligned} \quad (1)$$

式中, Δ 为直接控制层控制效果的参数, l 为优化的设定值序列长度, $\{s_p(k+1), s_p(k+2), \dots, s_p(k+l)\}$ 为设定值序列, $\hat{u}(k+j|k)$, $\hat{x}(k+j|k)$, $\hat{y}(k+j|k)$, $\hat{d}(k+j|k)$ 分别为控制量、状态、输出及干扰序列的估计值。

在此优化控制问题中,估计量 \hat{u} , \hat{x} , \hat{y} 都具有一定程度的不确定性。定义:

$$\hat{z} = [\hat{u}^T, \hat{x}^T, \hat{y}^T]. \quad (2)$$

在过程系统中,这些不确定量都可用不确定区间来表示,即

$$\hat{z} \in [\hat{z}_l, \hat{z}_u]. \quad (3)$$

为了提高优化控制系统的鲁棒性,采用下述不确定区间的最优化方法:

(1) 将不确定区间 $[\hat{z}_l, \hat{z}_u]$ 分为四个小区间,即 $[\hat{z}_l, \hat{z}_{m1}]$, $[\hat{z}_{m1}, \hat{z}_m]$, $[\hat{z}_m, \hat{z}_{mu}]$, $[\hat{z}_{mu}, \hat{z}_u]$ 。通常可取

$$\begin{cases} \hat{z}_{m1} = \hat{z}_u - 0.618(\hat{z}_u - \hat{z}_l), \\ \hat{z}_m = 0.5(\hat{z}_u + \hat{z}_l), \\ \hat{z}_{mu} = \hat{z}_l + 0.618(\hat{z}_u - \hat{z}_l). \end{cases} \quad (4)$$

(2) 对于每一小区间进行最优化, 可分别得到 s_{pl}^* , s_{pml}^* , s_{pmu}^* 和 s_{pu}^* .

(3) 根据每一小区间的最优值综合实际的 s_p^* . 在此可用

$$s_p^* = 0.2(s_{pl}^* + s_{pu}^*) + 0.3(s_{pml}^* + s_{pmu}^*). \quad (5)$$

二、例

微生物链丝菌生产和红霉素生物合成速度的数学模型为^[3]:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \mu(T, \text{pH})x_1 \left[1 - \left(\frac{x_1}{x_{1f}(T, \text{pH})} \right)^{a(T, \text{pH})} \right], \\ \frac{dx_2}{dt} = b_1(T, \text{pH})x_1 - b_2(T, \text{pH})x_2. \end{cases} \quad (6)$$

式中,

$$\begin{cases} \mu = 0.075 - 0.065\text{pH} + 0.05\text{pH}^2 + 0.519\text{pH} \cdot T, \\ x_{1f} = 9.26 + 24.85T - 4.19\text{pH} + 21.0T^2 + 3.5\text{pH}^2, \\ b_1 = 0.008 - 0.015T - 0.002T^2 - 0.008\text{pH}^2 + 0.03\text{pH} \cdot T, \\ b_2 = 0.013 - 0.025T - 0.004T^2 - 0.01\text{pH} + 0.054\text{pH} \cdot T, \\ a = 2.0. \end{cases} \quad (7)$$

约束条件为:

$$\begin{cases} 28^\circ\text{C} \leq T \leq 40^\circ\text{C}, \\ 6.4 \leq \text{pH} \leq 7.2. \end{cases} \quad (8)$$

表1 本文优化控制方法的结果

时 间 t (小时)	控 制 量		状 态 估 计 值			
	温度 T ($^\circ\text{C}$)	pH 值	参数 $a = 2.0$		参数 $a = 1.5$	
			x_1 (克/升)	x_2 (克/升)	x_1 (克/升)	x_2 (克/升)
0	37.00	7.20	0.1000	0.0000	0.1000	0.0000
20	40.00	7.20	0.9432	0.0449	0.9432	0.0449
40	40.00	7.20	7.2190	0.6304	7.2190	0.6304
60	39.69	7.18	33.8829	3.5138	30.6332	3.0808
80	39.22	7.15	49.8834	10.8744	49.8438	10.4375
100	39.22	7.15	49.9947	16.0223	49.9983	15.7698
120	39.22	7.15	50.0125	18.6925	49.9861	18.5384
140	39.22	7.15	50.0075	20.6106	50.0262	20.5203
160	39.22	7.15	49.9943	21.7245	49.9047	21.6612
180	39.22	7.05	49.9677	22.2832	49.8917	22.2432
200	38.75	6.94	49.9250	22.6880	49.9857	22.6798
220	38.01	6.74	49.9497	22.9396	49.9863	22.9246
240	37.52	6.64	50.0655	23.0863	50.0481	23.0831
260	37.52	6.64	49.9119	23.1612	49.9998	23.1630
280	37.52	6.64	49.9978	23.2107	50.0147	23.2112
300	37.52	6.64	50.0354	23.2571	50.0263	23.2545

目标函数为:

$$J = 0.1(x_2(k+1) + x_2(k+2)) + 0.2(x_2(k+3) + x_2(k+4)) + 0.5x_2(k+5). \quad (9)$$

表 2 最优控制方法的结果

时 间 t (小时)	控 制 量		状 态 估 计 值			
	温度 T (°C)	pH 值	参数 $a = 2.0$		参数 $a = 1.5$	
			x_1 (克/升)	x_2 (克/升)	x_1 (克/升)	x_2 (克/升)
0	37.00	7.20	0.1000	0.0000	0.1000	0.0000
20	39.04	7.01	0.9432	0.0449	0.4003	0.0137
40	40.00	7.17	8.1192	0.7230	7.7801	0.4640
60	39.41	7.18	36.8072	3.9287	19.8986	1.7594
80	39.15	7.13	49.9212	11.3292	25.8999	6.3691
100	39.15	7.13	49.9963	16.2867	26.0710	9.2057
120	39.15	7.13	49.9714	18.8584	28.0090	10.1449
140	39.15	7.13	50.0148	20.6982	28.2145	11.0848
160	39.15	7.13	49.9268	21.7670	27.8996	11.8608
180	39.00	7.05	50.0515	22.3131	27.9504	12.3737
200	37.18	6.84	49.9410	22.7216	28.0344	12.9079
220	35.81	6.67	50.0138	22.9308	27.8676	13.3468
240	36.04	6.60	50.0267	23.0885	28.3400	13.6913
260	37.83	6.56	49.9622	23.1690	27.9578	14.0088
280	38.55	6.54	50.0060	23.2189	28.0720	14.2605
300	38.50	6.53	50.0153	23.2612	28.2697	14.4684

表 3 定常控制量的结果

控制量: $T = 37^\circ\text{C}$ $\text{pH} = 7.2$

时 间 t (小时)	状 态 估 计 值			
	参数 $a = 2.0$		参数 $a = 1.5$	
	x_1 (克/升)	x_2 (克/升)	x_1 (克/升)	x_2 (克/升)
0	0.1000	0.0000	0.1000	0.0000
20	1.0505	0.0492	1.1452	0.0663
40	5.7305	0.4736	8.8291	0.7839
60	22.8500	2.1218	32.1001	3.3160
80	38.7927	7.1693	34.6428	6.7306
100	39.0011	11.1810	33.5928	9.1710
120	38.9922	13.3546	33.5805	10.7950
140	39.0357	14.9822	31.6318	12.2379
160	38.9243	15.9721	33.4866	13.2647
180	38.9644	16.4901	33.5512	13.9274
200	39.0077	16.8915	31.8903	14.5386
220	38.9836	17.1357	33.4781	14.9566
240	39.0512	17.2978	34.7656	15.2472
260	38.9680	17.3913	31.9036	15.5510
280	39.0769	17.4542	34.5539	15.6751
300	39.0442	17.5047	31.6485	15.8493

采用本文方法得到的结果如表 1 所示,采用最优控制算法得到的结果如表 2 所示,而采用常值控制序列得到的结果如表 3 所示。另外当模型参数 a 从 2.0 摄动到 1.5 时,其相应的控制结果也列于表中。

三、结 论

本文提出的在线鲁棒优化控制方法通过采用不确定区间优化方法和一定长度优化序列,可以兼顾系统的整体性能以及闭环系统的动态特性,这对于提高过程系统的优化控制算法的鲁棒性是有益的。另外该优化控制算法能够跟踪过程系统最优操作条件的变化,具有一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Arkun, Y. et al., Optimizing Control of Industrial Chemical Processes—State of the Art Review, Proc. of JACC, WP5-A (1980).
- [2] Biegler, T. Z. et al., Strategies for the Optimization of Chemical Processes, Review in Chemical Engineering, 3(1986), 1-47.
- [3] Armiger, W. B., Computer Applications in Fermentation-Technology, Biotech. & Bioeng. Symp. (1979), No. 9, 303-320.

AN ON-LINE OPTIMIZING CONTROL TECHNIQUE WITH ROBUSTNESS FOR PROCESS SYSTEM

XIA QUANSHI YU JINSHOU JIANG WEISUN
(East China University of Chemical Technology)

Key words—Optimizing control; robustness; uncertain systems.