

研究简报

啤酒发酵温度的多变量控制

薛福珍 庞国仲 胡京华 刘勇

(中国科学技术大学自动化系 合肥 230027)

(E-mail: fuzhenxu@ustc.edu.cn)

关键词 啤酒发酵, 多变量解耦, 控制量约束, 优化调节

中图分类号 TP273, TP13

MULTIVARIABLE CONTROL FOR BEER FERMENTATION TEMPERATURE

XUE Fu-Zhen PANG Guo-Zhong HU Jing-Hua LIU Yong

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

(E-mail: fuzhenxu@ustc.edu.cn)

Key words Beer fermentation, multivariable decoupling, control quantity constraint, optimizing adjust algorithm

1 引言

在工业控制领域中,相当广泛的生产过程和生产设备,都是具有强关联的多输入多输出系统. 对这类被控对象,多变量频域技术是一种实用有效的设计方法^[1]. 但有些实际系统,由于系统结构和执行机构等因素,往往限制了控制量的取值范围,影响了控制效果. 为解决这一问题,我们在系统解耦之后,对控制量进行了约束优化调节,并成功用于对啤酒发酵的温度控制,取得了满意的控制效果.

2 啤酒发酵工艺和广义对象的动态特性

啤酒发酵是一个复杂的生化过程,大米和麦芽经糖化工艺制成冷却麦汁,经充氧和接种酵母后进入发酵罐进行发酵. 在发酵过程中,通过控制发酵液的温度和罐压来达到工艺要求的生化指标.

发酵罐的外壁设置了上、中、下三段冷却套,相应设立上、中、下三个测温点和三个偏心气动阀,通过阀门开度调节冷却套内的冰水流量以实现酒体温度的控制. 以阀门开度为控

制量,酒体温度为被控量,该广义对象是一个三输入三输出的多变量系统.机理分析和试验表明,该系统具有大时滞、强关联、时变的动态特性.此外,酵母沉积在发酵罐的锥底部,故下部温度为酵母温度,不宜作为被控量.

现场试验还表明,同时控制上部和中部温度,使之形成一定的温差,有利于提高麦汁的发酵质量和缩短发酵期.因此,对每个发酵罐,我们组成两个 2×2 多变量控制系统.发酵前期多变量控制系统的控制量为上阀和中阀的开度,控制罐内温度成正向温差,使上部温度低于下部温度,以促进麦汁对流.而发酵后期多变量控制系统的控制量为中阀和下阀的开度,减弱对流以利于啤酒中杂质的沉淀.

3 多变量控制

基于被控对象的动态特性,设计啤酒发酵温度的多变量控制系统如图 1 所示.

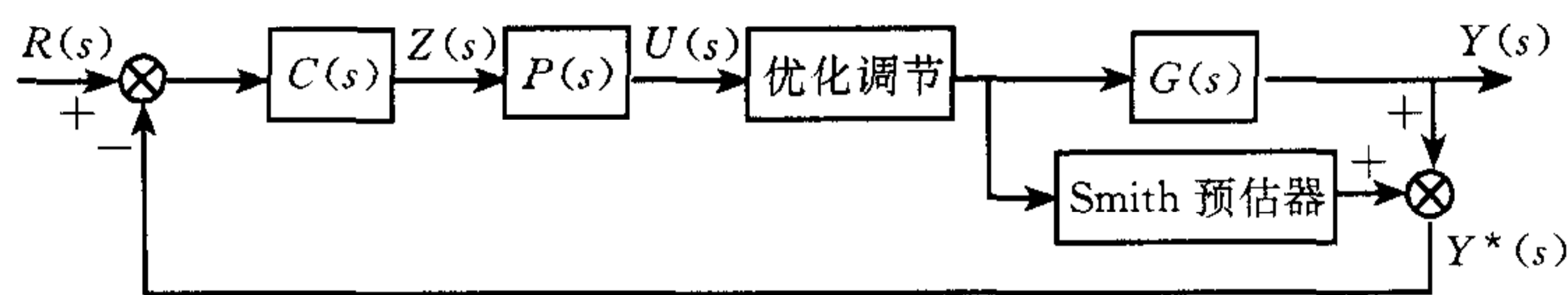


图 1 发酵温度多变量控制系统

3.1 Smith 预补偿和多变量解耦

首先设计多变量 Smith 预估器 $\bar{G}(s) = G_0(s) - G(s)$,对系统时滞进行补偿.其中广义对象 $G(s) = (g_{ij}(s)e^{-\tau_{ij}^*})_{1 \leq i, j \leq m}$, $G_0(s) = G(s) |_{\tau_{ij}=0}$.显然,据图 1 以 $Y(s), Y^*(s)$ 为输出的闭环系统具有相同的闭环特征方程^[1],而且均不包含时滞项.

然后,采用多变量频域方法对系统进行解耦设计.根据 $G_0(s)$ 的特点设计预补偿常阵 $P(s)$,使补偿后系统的前向传递函数矩阵 $G_0(s)P(s)$ 为对角优势阵,进而对各个回路设计主控制器 $C(s)$,使得到的闭环系统不仅稳定,而且具有良好的稳态和瞬态性能.

3.2 优化调节

很多实际问题中,控制量的取值是有限制的.但控制器的运算结果往往超出这一约束条件,这就涉及到如何将控制器的运算结果转化为满足约束条件的控制量的问题.这一问题的数学描述为:在 R^n 空间中某实体 D 内求一点,使其与给定点的关系达到某给定指标下的最优(n 为控制量的个数).

对于 2×2 解耦控制器,控制量的取值范围限制在 U 平面的矩形区域内,如图 2 所示,

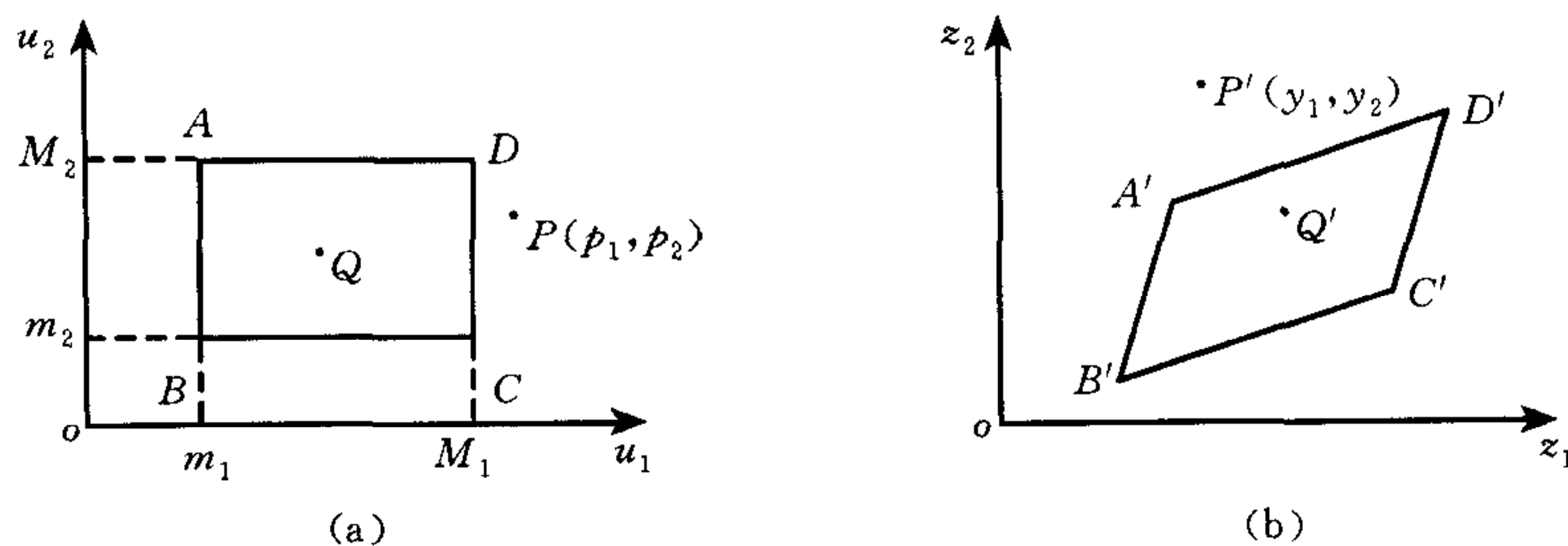


图 2 控制量取值范围

点 $P(p_1, p_2)$ 表示解耦控制器的运算结果. 显然, 若 $P \in ABCD$, 则控制量可直接取运算结果; 但若 $P \notin ABCD$, 则控制量取值就必须在 $ABCD$ 内求一点 Q , 使其与 P 的指标为最优. 我们取指标 $J = (P - Q)^T R (P - Q)$, 其中, 对称正定阵 $R = S^T S$ (S 为可逆阵). 作映射变换 $z = Su$, 则矩形 $ABCD$ 被映成平行四边形 $A'B'C'D'$, P 点被映成 P' 点, 而指标函数 $J = (P' - Q')^T (P' - Q')$ 正好是点 P', Q' 之间的距离.

对图 1 所示系统, 中温要严格复现工艺曲线, 上温与中温之差应满足工艺要求, 以及发酵罐冷却带的设计, 使发酵罐上阀、中阀和下阀的开度受到限制, 因此预补偿器的输出受到了约束. 实验表明, 当在约束范围内选择合适的预补偿器输出, 最大限度减小对主控制器的输出约束时, 就能得到满意的温控效果. 控制量取值的优化调节方法实现如下.

设主控制器离散化后的输出为 $z_1(k), z_2(k)$, 预补偿器的输出为 $u_1(k), u_2(k)$, 则

$$\begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} z_1(k) \\ z_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(k) \\ z_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11}z_1(k) + p_{12}z_2(k) \\ p_{21}z_1(k) + p_{22}z_2(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} z_1(k) \\ z_2(k) \end{bmatrix} = P^{-1} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11}u_1(k) + q_{12}u_2(k) \\ q_{21}u_1(k) + q_{22}u_2(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

取二次型指标函数

$$J(k) = w_1^2 [z_1(k) - (q_{11}u_1(k) + q_{12}u_2(k))]^2 + w_2^2 [z_2(k) - (q_{21}u_1(k) + q_{22}u_2(k))]^2 = (x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 \quad (3)$$

其中 w_1, w_2 为主控制器对角元的加权系数. 由式(3)可见, 在矩形 $ABCD$ 内求 $u_1(k), u_2(k)$ 使 J 最小的问题转换为: 在平行四边形 $A'B'C'D'$ 内求一点 Q' , 使其到点 $P'(y_1, y_2)$ 的距离最近.

1) 若 $P'(y_1, y_2)$ 落在 $A'B'C'D'$ 内部, 则 $\min J = 0$. 最优控制量的取值为给定点本身

$$u_1(k) = p_{11}z_1(k) + p_{12}z_2(k), \quad u_2(k) = p_{21}z_1(k) + p_{22}z_2(k);$$

2) 若 $P'(y_1, y_2)$ 落在 $A'B'C'D'$ 外, 则 $z_1(k), z_2(k)$ 不满足约束条件. 因 $P'(y_1, y_2)$ 与 $A'B'C'D'$ 在同一平面, 故距离 $P'(y_1, y_2)$ 最近的点必在 $A'B'C'D'$ 的四条边上. 与之对应, 在 U 平面上, 使 J 取值最小的点必在 $ABCD$ 某边上. 最优控制量取为: 在 AB 边上, $u_1 = m_1$, 若 $\frac{dJ(m_1, u_2)}{du_2} = 0$, 在 $m_2 \leq u_2 \leq M_2$ 有解 β_1 , 则记录点 (m_1, β_1) , 并求目标值 $J(m_1, \beta_1)$. 同理, 可分别求得 CD, BC, AD 边上记录点 $(M_1, \beta_2), (\alpha_1, m_2), (\alpha_2, M_2)$, 及相应的目标值 $J(M_1, \beta_2), J(\alpha_1, m_2), J(\alpha_2, M_2)$.

最后从 $(m_1, m_2), (m_1, M_2), (M_1, m_2), (M_1, M_2), (m_1, \beta_1), (M_1, \beta_2), (\alpha_1, m_2), (\alpha_2, M_2)$ 中选择使 J 取值最小的点, 作为优化调节后的控制量 $(u_1(k), u_2(k))$.

4 控制系统设计

采取方波函数建模和最小二乘数据处理, 得到广义对象的数学模型(以 #07 罐为例)为

$$G_1(s) = \begin{bmatrix} \frac{-1.43044e^{-240s}}{7466.73s^2 + 435.89s + 1} & \frac{-0.615915e^{-240s}}{4844.18s^2 + 286.25s + 1} \\ \frac{-0.2301e^{-540s}}{2949.87s^2 + 139.08s + 1} & \frac{-0.914839e^{-480s}}{8147.96s^2 + 515.95s + 1} \end{bmatrix} \quad (\text{发酵前期}),$$

$$G_2(s) = \begin{bmatrix} \frac{-0.615\ 915e^{-240s}}{4\ 844.18s^2 + 286.25s + 1} & \frac{-0.859\ 148e^{-240s}}{6\ 241.28s^2 + 450.76s + 1} \\ \frac{-0.914\ 839e^{-480s}}{8\ 147.96s^2 + 515.95s + 1} & \frac{-0.416\ 558e^{-540s}}{7\ 679.75s^2 + 444.95s + 1} \end{bmatrix} \quad (\text{发酵后期}).$$

对 Smith 预补偿后的等效无时滞系统,用自加权准优势化算法^[2],设计预补偿常阵为

$$P_1(s) = \begin{bmatrix} 1.0 & -0.553 \\ -0.674 & 1.0 \end{bmatrix}, \quad P_2(s) = \begin{bmatrix} 1.0 & -1.213 \\ -1.972 & 1.0 \end{bmatrix}.$$

据开环传递函数矩阵 $G_1(s)P_1(s), G_2(s)P_2(s)$ 的对角元的特性,设计主控制器矩阵为

$$C_1(s) = \begin{bmatrix} -3.0 - \frac{0.006}{s} & 0 \\ 0 & -3.0 - \frac{0.006}{s} \end{bmatrix}, \quad C_2(s) = \begin{bmatrix} 2.4 + \frac{0.004}{s} & 0 \\ 0 & 2.5 + \frac{0.005}{s} \end{bmatrix}.$$

由 $G_1(s), P_1(s), C_1(s), G_2(s), P_2(s), C_2(s)$ 组成图 1 所示的发酵前期和发酵后期多变量控制系统. 系统实际运行曲线如图 3 所示,控制精度小于 $\pm 0.15^\circ\text{C}$. 较之单变量控制,多变量控制使罐内的温度分布更加合理,从而缩短了发酵周期,提高了生化指标.

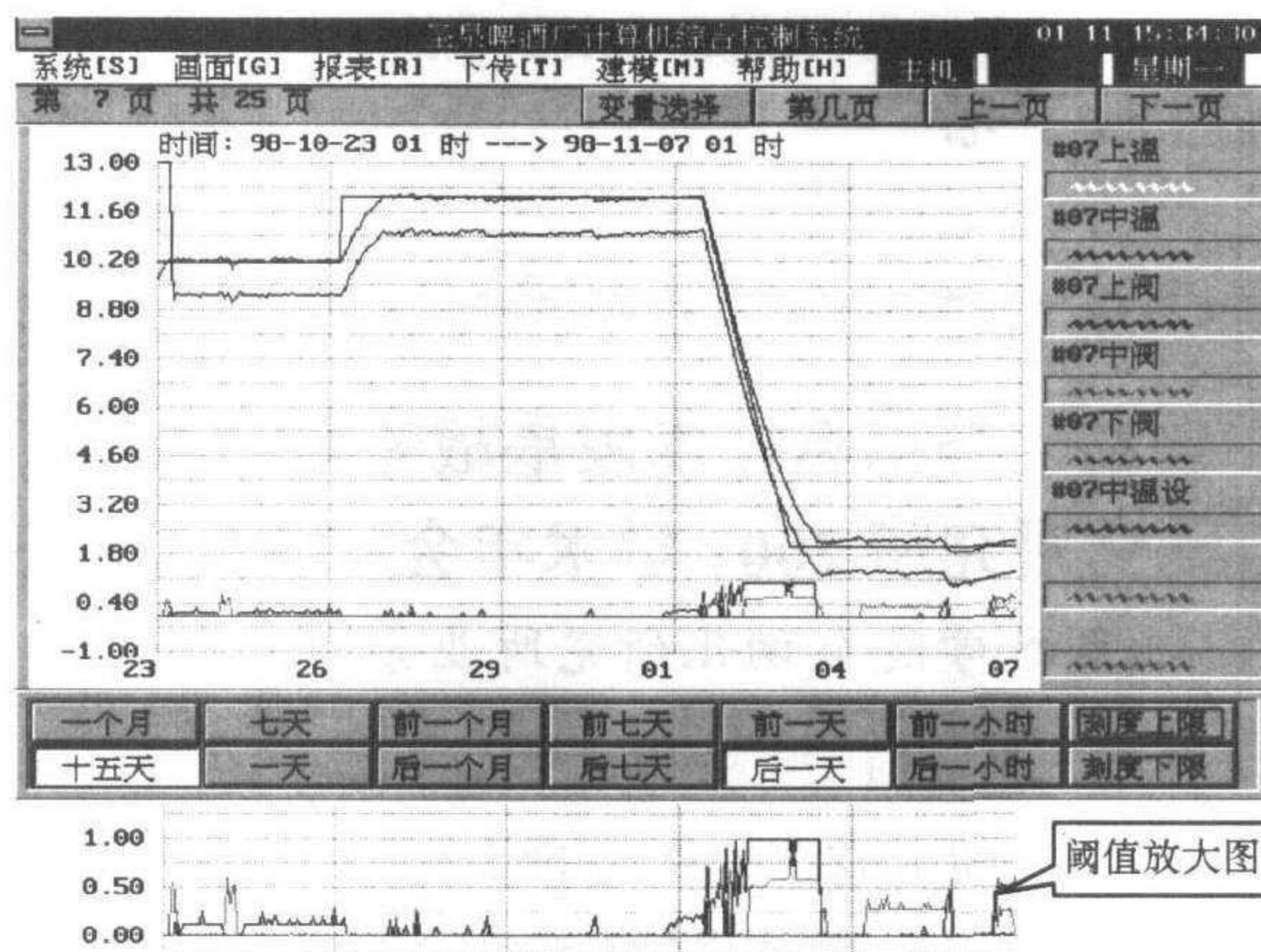


图 3 发酵温度控制曲线示例

5 系统鲁棒稳定性

由于采用试验建模,只能得到系统的近似模型,故采用 Smith 预补偿时,必然出现失配. 设广义对象变化的模型为 $\hat{G}(s) = (\hat{g}_{ij}(s)e^{-\hat{\tau}_{ij}s})_{1 \leq i, j \leq m}$, $G_0(s)$ 为系统名义模型, $\Delta(s) = \hat{G}(s) - G(s)$ 为摄动模型,则对 $Y^*(s)$ 的输出摄动形式如图 4 所示.

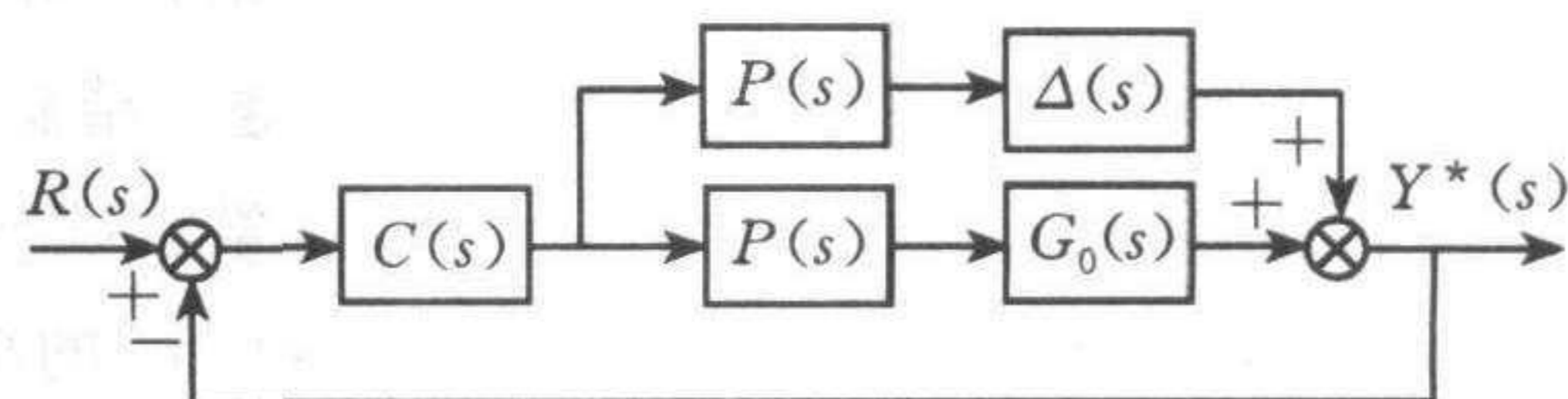


图 4 图1系统的等效摄动系统

已知名义系统 $G_0(s)$ 稳定,根据时滞系统鲁棒稳定性定理^[3],只要在失配时和对象摄动时,摄动系统仍满足对角优势,则摄动系统为鲁棒稳定. 实际系统的稳定运行表明系统具有良好的鲁棒稳定性.

6 结束语

啤酒发酵温度的多变量控制及在控制量受约束情况下的优化调节,在国内尚未见报道.它已成功用于安徽圣泉啤酒厂的啤酒发酵温度控制.二年多的运行情况表明,该控制系统可靠性高,适应性强.它提高了啤酒的产量和质量,降低了能耗,取得 600 多万元的年经济效益.

参 考 文 献

- 1 庞国仲,白方周等.多变量控制系统实践.合肥:中国科学技术大学出版社,1990,372~395
- 2 白方周,庞国仲等.多变量频域理论与设计技术.合肥:中国科学技术大学出版社,1990,179~186
- 3 庞国仲,孙丽华等.多变量时滞系统鲁棒稳定性.自动化学报,1997,23(1):100~102

薛福珍 硕士、现为中国科学技术大学自动化系副教授.主要从事控制理论与应用、控制系统计算机辅助设计、集散控制系统的开发与应用等方面研究工作.

庞国仲 现为中国科学技术大学自动化系教授.主要从事控制理论、控制工程、控制系统计算机辅助设计、集散控制系统的开发与应用等研究.



自动化与信息技术发展战略研讨会

暨中国科学院自动化研究所 2001 学术年会(CASIA CAIT2001)召开

中国科学院自动化研究所业务办公室

由中国科学院自动化研究所举办的为期三天的“自动化与信息技术发展战略研讨会暨中科院自动化所 2001 学术年会”于 10 月 20 日在自动化所落下帷幕.本次大会是在自动化所建所 45 周年的喜庆日子里进行的,也是自动化所有史以来规模最大的一次所内学术交流大会.

大会在三天期间共举办了一场特邀报告和一场专题报告,近十位中外著名的自动化与信息技术领域的专家,登台作了精彩报告,传播最新的科学知识,介绍学术研究进展.10 月 18 日下午的特邀报告专场,包括著名的美国工程院院士、哈佛大学教授何毓琦先生作的“The no free lunch theorem and system optimization”、著名的 IEEE Computer Society 主席 Benjamin W. Wah 教授作的“Optimization of nonlinear constrained problems and its engineering applications”及著名的 IEEE ITS Council 主席 Daniel J. Dailey 教授作的“The IEEE intelligent transportation systems council, an international collaboration to help people travel smarter”三个报告.百余人聆听了他们精彩的报告.在 10 月 19 日和 20 日,又进行了 6 个学术专题报告,其中包括应邀到会的美国 Arizona 大学系统与工业工程系主任 Ronald G. Askin 教授“Towards a complete model for manufacturing cell formation”的报告.

自动化所 2001 年学术会议论文集共收录了 85 篇论文.全部论文以口头报告或墙报形式在 10 月 19 日和 20 日进行交流.大会还评选出了优秀学生论文一等奖一名,二等奖二名.