

文章编号: 1001-0920(2005)09-1034-04

间歇过程滑动窗口子时段PCA建模和在线监测

郭小萍^{1,2}, 陆宁云³, 高福荣³, 王福利¹

(1. 东北大学 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室, 沈阳 110004; 2. 沈阳
化工学院 信息工程学院, 沈阳 110142; 3. 香港科技大学 化学工程系, 香港 九龙)

摘要: 针对在短期内不容易获得充足建模数据的间歇工业过程, 提出一种间歇过程监视方法, 该方法只需要一次正常间歇操作数据, 利用滑动窗口, 进行子时段划分, 建立初始主元分析(PCA)监测模型, 同时提出了基于子时段PCA模型的在线监测算法和一种模型更新策略。通过在注塑过程的成功应用, 表明了所提出方法的可行性和有效性。

关键词: 间歇过程监测; 主元分析; 多时段建模; 注塑过程

中图分类号: TP277

文献标识码: A

Sub-stage PCA Modeling and On-line Monitoring with Moving Windows for Batch Processes

GUO Xiao-ping^{1,2}, LU Ning-yun³, GAO Fu-rong³, WANG Fu-li¹

(1. Key Laboratory of Process Industry Automation, Ministry of Education, Shenyang 110004, China; 2. School of Information Engineering, Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang 110142, China; 3. Department of Chemical Engineering, Hong Kong University of Science and Technology Clearwater Bay, Kowloon, Hong Kong
Correspondent: Guo Xiao-ping, E-mail: gxping011007@tom.com)

Abstract: For batch processes with difficulties in collecting sufficient data in limited time, a batch monitoring method is proposed. The proposed method uses a single normal batch reference data and moving windows to divide sub-stage and builds an initial PCA monitoring model. The on-line monitoring method and method updating the model are proposed. The application to an injection molding process shows the effectiveness and feasibility of the proposed method for batch industry.

Key words: Batch process monitoring; Principal component analysis; Multi-stage modeling; Injection molding process

1 引言

目前, 广泛应用于间歇过程的多向主成分分析(MPCA)模型, 是将一次间歇操作的所有数据作为一个样本, 虽然可有效监视过程的整体运行状况, 但却很难进一步分析间歇过程中每一子操作阶段的数据特征。这使得基于MPCA的过程监测算法对幅值较小的故障不甚敏感, 而在线的过程监测算法在很大程度上依赖于对未来测量值预估的准确程度^[1~4]。文献[4]利用先验知识对子操作阶段进行划

分, 文献[5]对间歇过程三维数据阵的时间切片PCA负载矩阵进行聚类分析, 有效地实现了子时段的划分, 但其需要充足理想的建模数据。对于操作周期非常长, 很难在短期内取得充足理想建模数据的间歇过程, 本文提出一种基于滑动窗口的子时段PCA建模和在线过程监测方法。它只需要一次正常间歇操作数据, 利用滑动窗口, 提取这个时间窗口内的过程变量间的方差/协方差信息, 进行子时段划分, 建立各子时段PCA监测模型, 同时提出基于子时段PCA

收稿日期: 2004-09-29; 修回日期: 2005-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(60374003)。

作者简介: 郭小萍(1972—)女, 山西大同人, 讲师, 博士生, 从事间歇过程故障检测与诊断的研究; 王福利(1957—), 男, 辽宁辽阳人, 教授, 博士生导师, 从事控制系统故障诊断与容错、系统优化等研究。

模型的在线监测算法和一种模型更新策略 通过在注塑过程的成功应用, 证明了所提出方法的可行性和有效性

2 基于滑动窗口 PCA 模型的子时段建模和监测

2.1 建模数据及标准化

初始建模数据为一次正常的间歇操作周期的数据 $\tilde{X} (K \times J)$, 其中 K 为一次间歇操作的采样样本总数, J 为过程测量量的总数 如图 1 滑动窗口中的数据排列成一个二维矩阵, 标记为 $\tilde{X}_k (n \times J)$, 其中 n 为一个窗口中样本数据的个数, 窗口中的数据按照时间顺序排列, 每一行是过程变量的测量值样本 本文的建模方法折衷考虑了局部模型稳定性和快速故障检测这两个对立的建模要求, 依据多变量统计回归方法中的建模经验^[6], 窗口长度 n 设定为过程变量个数 J 的 2~3 倍 为快速检测故障, 窗口的滑动步长可设定为最小值 1

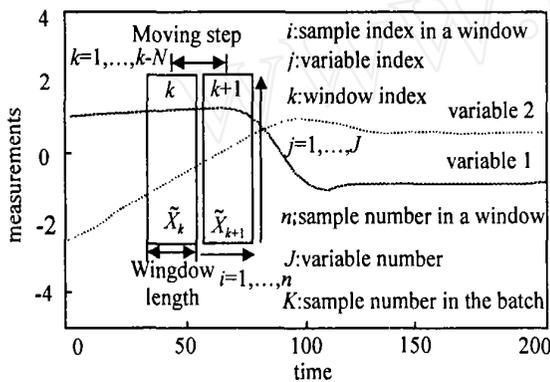


图 1 间歇过程的滑动数据窗口

每个窗口都有自身的均值 u_k 和方差 s_k . 当在线过程监测需要标准化新测量数据时, 为降低标准化本身带来的偏差, 在计算间歇过程的均值和方差轨迹时采用如下的策略: 第 k 个采样时刻数据的均值和方差计算如下:

$$k = \begin{cases} 1 \sim n, \bar{u}_k = \frac{1}{k} \sum_{b=1}^k u_b, \bar{s}_k = \frac{1}{k} \sum_{b=1}^k s_b; \\ n+1 \sim K-n, \bar{u}_k = \frac{1}{n} \sum_{b=k-n+1}^k u_b, \bar{s}_k = \frac{1}{n} \sum_{b=k-n+1}^k s_b; \\ K-n+1 \sim K, \bar{u}_k = u_{K-n}, \bar{s}_k = s_{K-n} \end{cases} \quad (1)$$

即用所有历经过该数据窗口均值的均值、方差的均值作为该时刻过程变量的均值和方差 上面得到的均值和方差轨迹实际上包含 K 个数值 基于滑动窗口的在线监测程序中, 标准化新测量数据时只要调用对应采样时间上的均值和方差即可

2.2 子时段划分 PCA 建模和在线监测

滑动窗口数据经标准化处理后, 进行主成分分析, $\tilde{X}_k = \tilde{T}_k \cdot (\tilde{P}_k)^T$, PCA 模型的负载矩阵 $\tilde{P}_k (J \times J)$ 提取了每个窗口数据的统计信息, 即间歇过程的局部过程特征 根据聚类算法, $(K-n)$ 个窗口 PCA 负载矩阵 \tilde{P}_k 分为 C 个子类, 每个子类中的负载矩阵彼此相似, 而不同子类的负载矩阵显著不同 聚类结果结合过程采样时间用于定义过程的子操作时段 每个子操作时段的表征负载矩阵

$$\tilde{P}_c^* = \frac{1}{n_{c,k}} \tilde{P}_k, \quad c = 1, 2, \dots, C, k = 1, 2, \dots, n_a \quad (2)$$

其中 $n_c (c = 1, 2, \dots, C)$ 为第 c 个子操作时段中的数据窗口个数 类似地, \tilde{P}_c^* 分成主成分子空间的 $\bar{P}_c^* (J \times A_c^*)$ 和残差子空间的 $\hat{P}_c^* (J \times (J - A_c^*))$ 子时段 PCA 模型为

$$t = x \bar{P}_c^*, e = x - x \bar{P}_c^* (\bar{P}_c^*)^T, \quad \text{SPE} = ee^T \quad (3)$$

其中 x 为过程变量的测量值经标准化处理后的值 在线过程监测时, 对过程变量的实时测量值进行标准化处理, 调用相应子时段的 PCA 模型计算 Hotelling- T^2 和 SPE 统计量 T^2 统计量、控制限及 SPE 控制限的确定方法见文献[2]

2.3 子时段模型和控制限的更新

当一次新的间歇操作被过程的初始子时段监测模型确认为正常的操作周期后, 根据建模时得到的子时段信息, 首先将新操作周期各个子时段内的所有数据构成一个大的数据窗口, 然后进行 PCA 分析, 用新得到的子时段 PCA 负载矩阵调整初始的子时段 PCA 模型 由于式(2)中给出的初始子时段表征 PCA 负载矩阵实际上就是第 c 个子操作时段中所有窗口 PCA 模型负载矩阵的平均值, 模型更新操作相当于用新操作周期的子时段 PCA 模型负载矩阵和原子时段 PCA 模型的表征负载矩阵进行简单的平均化处理

同样, 随着新数据的增加, 需要适当调整 T^2 和 SPE 统计量的控制限, 以便包容间歇操作之间正常的随机变动 由于 T^2 的控制限在子时段中定义, 对于大多数间歇过程, 子时段中 T^2 统计量在时间方向上的正常变动范围要比间歇操作之间的随机变动范围大的多, 因此 T^2 统计量的控制限并不会明显受到新闻歇操作数据的影响; 而 SPE 统计量反映的是残差空间的信息, 间歇操作之间正常的随机变动将显著影响数据窗口中 SPE 值的分布 因此, 在模型更新程序中, 变化最大的是 SPE 的统计控制限 第 k 个数据窗口的 SPE 统计控制限决定于 $\tilde{X}_k (n \times J)$ 中数

据的 SPE 的分布,当过程拥有新的建模数据时,用

$$\tilde{X}_{k, \text{new}} = \begin{pmatrix} \tilde{X}_k \\ X_{k, \text{new}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

的增广数据窗口的 SPE 值估计 $g_k \chi_{k, k}^2$ 分布的权重和自由度,显然,这样的增广格式可以使窗口中 SPE 的统计分布逐渐趋向于不同间歇操作之间正常的随机扰动分布

3 注塑过程中的应用研究

3.1 注塑过程简介^[5]

注塑过程是一个典型的多操作阶段间歇过程 本文共采集了 10 组正常间歇操作下的过程数据,其中任选一组数据用于建立初始模型,其余用于模型更新 选用了一组带有止逆环故障的数据用于验证

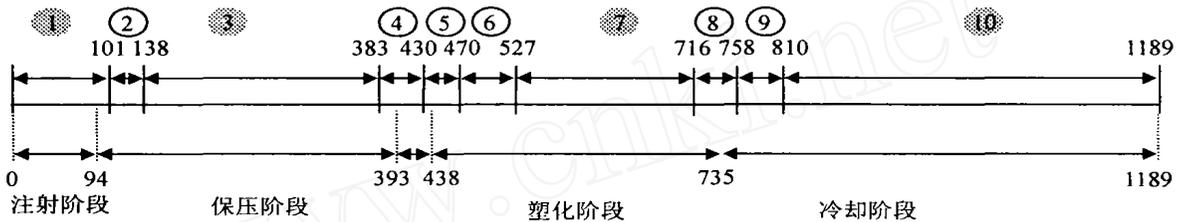
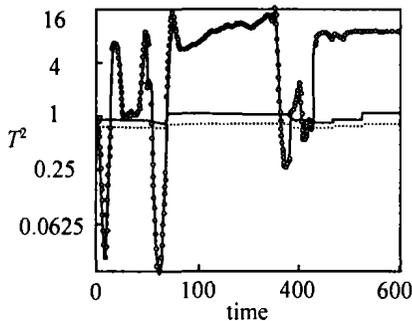
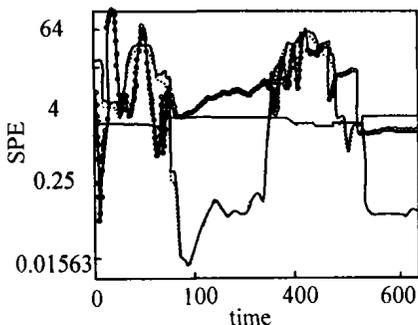


图 2 基于滑动窗口 PCA 模型的子时段划分结果

调用初始的子时段 PCA 模型及对应的 Hotelling- T^2 和 SPE 统计控制限,一个止逆环失效故障下的过程数据的在线监测结果如图 3 所示 由注塑过程的故障知识可知,止逆环故障发生在注射



(a) T^2 监测图



(b) SPE 监测图

图 3 止逆环故障下的过程数据在线监测结果

算法的故障检测和诊断能力 滑动窗口的数据长度为 30,滑动步长为 1.

3.2 实验结果分析

基于滑动窗口 PCA 模型的子时段划分结果如图 2 注塑过程被分成了 10 个子操作时段,其中 4 个比较长的子时段(带阴影的符号 等标记)仍近似对应着注塑过程的物理操作阶段——注射、保压、塑化和冷却 4 个主要的子时段之间还出现了若干零碎的子时段(用不带阴影的符号 等标记),相当于将一个物理操作阶段又细分为“稳态”和“动态”子时段,这样细致的子时段划分在一定程度上可促进对复杂间歇工业过程的认知和理解,也有利于过程操作性能及产品质量的改进

阶段,也影响保压和塑化阶段的过程变量,但是对冷却阶段的过程变量基本没有影响 图 3 的在线监测结果与上述故障知识完全吻合 为了更清楚地显示止逆环故障严重影响的几个操作阶段,冷却阶段的数据未显示于图 3(图中实线为 99% 控制限,虚线为 95% 控制限,点圈线为 T^2 或 SPE 统计量的数值)从图 3 可以看出, T^2 统计量要比 SPE 统计量对止逆环故障更加敏感,这是因为止逆环失效故障不会显著改变过程变量之间时间方向上的方差/协方差结构,但止逆环故障下的过程变量会稍稍偏离正常操作工况下的过程变量曲线,导致主成分得分以及 T^2 统计量显著增大 图 3 也说明只由一次正常间歇操作下的过程数据建立的初始模型确实具备一定的过程监测和故障诊断能力

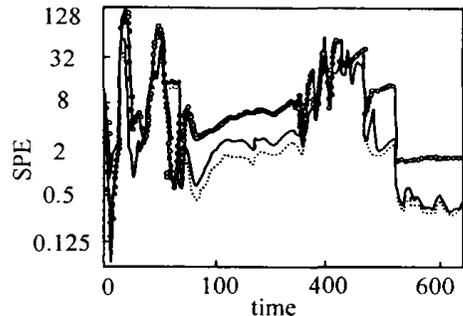


图 4 模型更新后止逆环故障下的过程数据 SPE 在线监测结果

模型经10次更新后,对于图3中被监测的止逆环故障数据,其在线监测SPE控制图如图4所示,与图3的SPE图比较,图4的SPE统计控制限经10次调整后,控制限存在显著的差异。调整后的子时段模型及统计控制限随着新增加的建模数据逐渐趋向于正常间歇操作之间的统计分布,而且在某些时段的过渡之间(如在350~450之间),其对故障的监测能力提高了。

4 结 论

本文提出的子时段PCA建模、监测方法,具有以下特点:

1) 初始模型只需要一次正常操作的数据,适合那些过程反应慢、间歇操作周期长、数据采集比较困难的间歇工业过程;

2) 多模型建模方式 在每个不同相关性特征的子数据空间分别建立子模型,不同操作阶段切换不同的子模型,提高检测幅值较小故障的能力;

3) 准确性 在线监测算法不需要预测将来的测量数据,可实现快速的故障检测和诊断,因此与其他需要利用状态预报的各种诊断技术相比精度更高;

4) 此方法容易推广应用于不等长间歇工业过程

参考文献(References)

- [1] Nomikos P, MacGregor J F. Monitoring of Batch Processes Using Multiway Principal Component Analysis[J]. *AICHE J*, 1994, 40(8): 1361-1375.
- [2] Nomikos P, MacGregor J F. Multivariate SPC Charts for Monitoring Batch Processes [J]. *Technometrics*, 1995, 37(1): 41-59.
- [3] Ündey C, Cinar A. Statistical Monitoring of Multistage, Multiphase Batch Processes [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2002, 22(10): 40-52.
- [4] Kourti T. Multivariate Dynamic Data Modeling for Analysis and Statistical Process Control of Batch Processes, Start-ups and Grade Transitions [J]. *J Chemometrics*, 2003, 17(1): 93-109.
- [5] Lu N Y, Gao F R, Wang F L. A Sub-PCA Modeling and On-line Monitoring Strategy for Batch Processes [J]. *AICHE J*, 2004, 50(1): 255-259.
- [6] Johnson R A, Wichern D W. *Applied Multivariate Statistical Analysis* [M]. New York: Prentice Hall, 2002.
- [6] Zhao J, Nie H. Sufficient Conditions for Input to State Stability of Switched Systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(2): 252-257.
- [7] 王泽宁, 费树岷, 冯纯伯. 一类开关切换系统的输出反馈镇定[J]. *控制与决策*, 2003, 18(2): 169-174.
(Wang Z N, Fei S M, Feng C B. Output Feedback Stabilization for a Class of Switching Systems [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(2): 169-174.)
- [8] 王仁明, 关治洪, 刘新芝. 一类非线性切换系统的稳定性分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(1): 68-71.
(Wang R M, Guan Z H, Liu X Z. Stability Analysis of a Kind of Nonlinear Switched Systems [J]. *System Engineer and Electric Technology*, 2004, 26(1): 68-71.)
- [9] Costa O, Fragoso M. Stability Results for Discrete Time Linear Systems with Markovian Jumping Parameters [J]. *J Mathematical Analysis Application*, 1993, 179: 154-178.
- [10] Morozan T. Stability and Control for Linear Systems with Jump Markov Perturbations [J]. *Stochastic Analysis Application*, 1995, 13(1): 91-110.
- [11] Fragoso M, Costa O. Mean Square Stabilizability of Continuous-time Linear Systems with Partial Information on the Markovian Jumping Parameters [J]. *Stochastic Analysis Application*, 2004, 22(2): 99-111.
- [12] Cheng D. Stabilization of Planar Switching Systems [J]. *System Control Letter*, 2004, 51(2): 79-88.
- [13] Cheng D, Zhang L. Adaptive Control of Linear Switched Systems [A]. *CD C03 [C]*. Hawaii, 6260-6264.
- [14] Petersen IR. A Stabilization Algorithm for a Class of Uncertain Linear Systems [J]. *System and Control Letter*, 1987, 8(1): 351-357.
- [15] Xue F, Guo L. Necessary and Sufficient Conditions for Adaptive Stabilizability of Jump Linear Systems [J]. *Communications in Information and Systems*, 2001, 1(2): 205-224.
- [16] Hecke E. *Lecture on the Theory of Algebraic Number* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981.

(上接第1033页)