

基于智能检测的发酵过程测控系统集成及应用

王建林¹, 薛尧予¹, 赵利强¹, 李政²

(1. 北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029;
2. 天津工业大学先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300160)

摘要: 发酵测控系统是发酵过程参数智能检测与优化调控的基础, 直接影响着发酵过程的控制性能。该文针对 L-乳酸发酵过程的智能检测, 提出了一种基于智能检测的发酵过程测控系统集成方法, 给出了系统的体系结构及实现方法, 集成了基于虚拟仪器技术的 PXI 总线发酵过程智能测控系统, 给出了系统的软、硬件设计。该系统通过建立软测量模型, 有效地实现了发酵过程不易测量参量的在线估计与控制, 为发酵过程提供了一种新的测控系统。试验研究表明, 将该系统应用到 L-乳酸发酵过程中, 通过在线估计葡萄糖液消耗量, 实现了 L-乳酸发酵过程补料优化控制, 乳酸产量提高 23%, 提高了发酵产物得率。

关键词: 智能系统, 检测, 最优控制, 软测量模型, 发酵过程, L-乳酸发酵

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.05.030

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-05-0178-06

王建林, 薛尧予, 赵利强, 等. 基于智能检测的发酵过程测控系统集成及应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 178-183.
Wang Jianlin, Xue Yaoyu, Zhao Liqiang, et al. Integration and application of intelligent measurement and control system for fermentation process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 178-183. (in Chinese with English abstract)

0 引言

发酵工程是生化工程和现代生物技术及其产业化的基础, 随着发酵技术的不断发展, 对发酵过程测控系统的要求也越来越高。然而, 生物发酵过程机理复杂, 具有高度的非线性、时变性, 发酵过程中的生物参量是关键的过程参量, 由于受其测量水平的限制, 难以实现在线测量, 导致先进控制方法只能停留在理论探讨上, 难以在发酵过程中应用^[1-2]。

为了对发酵过程进行有效地优化控制, 使先进的控制算法与策略得以实际应用, 需要对不易测量的生物参量进行在线检测^[3]。由于受到生物传感技术的限制, 难以实现发酵过程生物参量(如生物量浓度、产物浓度、代谢速度等)的在线测量^[4]。发酵过程生物参量难以在线测量的特征, 直接影响着发酵过程控制和优化水平的提高。目前所使用的基于不同测控单元(如 MCU、IPC、PLC、DCS、FCS)的发酵过程测控系统^[5-7], 多数采用单元式结构, 缺少对不易测量生物参量进行在线检测的测量单元, 导致先进优化控制算法和策略难以在发酵过程中实际应用^[8]。因此, 为实现发酵过程优化与调控, 迫切需要具有智能检测单元的发酵过程测控系统。从发酵过程先验知识和发酵过程机理分析入手, 建立基于生物量软测

量模型的智能检测单元, 构建嵌入生物参量智能检测单元的发酵过程智能测控系统, 已成为实现发酵过程优化与调控的有效途径。

本文针对 L-乳酸发酵过程的智能检测, 提出了一种基于智能检测的发酵过程测控系统集成方法, 该方法将智能检测单元嵌入到测控系统中, 实现不易测量生物参量的在线检测。给出了基于虚拟仪器技术的 PXI 总线发酵过程智能测控系统。

1 发酵过程的智能检测

1.1 生物参量的智能检测方法

近年来, 随着软测量技术的发展, 应用软测量技术研究生物参量在线检测已成为一个重要研究领域^[2]。国内外关于基于软测量建模的在线估计生物参量的研究起始于 20 世纪 90 年代, 到目前为止, 发酵过程生物参量智能检测技术的研究已取得一些进展, 主要研究成果可以按照软测量建模方法的不同分为基于机理模型的智能检测^[9]、基于数据驱动模型的智能检测^[10-11]以及基于将机理模型与数据驱动模型相结合的基于混合模型的智能检测方法^[12-13]。

软测量技术被认为是解决发酵过程生物参量在线检测的一种非常实用的方法^[14], 但其工程化应用并不多, 解决基于软测量的智能检测技术在生物发酵过程的工程化应用问题是本文解决的一个关键问题。发酵过程的智能检测单元是构建整个发酵过程智能测控系统的核心, 实现不易测量生物参量的在线检测, 并借助控制单元实现对关键参量的优化调控, 这是智能测控系统与普通测控系统的本质区别。基于智能检测的发酵过程测控系统

收稿日期: 2011-06-25 修订日期: 2011-08-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20476007, 20676013); 中央高校基本科研业务费项目(ZY1110)

作者简介: 王建林(1965-), 男, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为工业过程智能检测与智能测控系统。北京 北京化工大学信息科学与技术学院, 100029。Email: wangjl@mail.buct.edu.cn

中的智能检测单元通过融合先验知识库和历史数据库数据，经过软测量建模构建相应的软测量模型；硬件传感器通过数据采集设备采集到测量数据，对测量数据进行预处理，结合软测量模型和在线的状态估计方法，实现对不易测量生物参量的准确估计。同时智能检测单元中的在线修正模块，利用状态估计和控制单元输出以及系统实时测量数据，通过先验知识库所提供的校正数据，对软测量模型进行在线校正，提高系统在线检测精度。

1.2 L-乳酸发酵过程智能检测

在 L-乳酸发酵过程中，由于微生物和代谢状况无法实时在线测量，发酵工艺技术人员必须根据离线的化验分析数据适当修正补料速率。至今为止，如何在线通过在线检测发酵生物参量，通过反馈控制好中间补料，仍是亟待解决的难题^[15]。

根据发酵过程中营养液消耗情况进行补料控制是发酵过程优化的主要方向，利用采样分析发酵液中营养液浓度，针对营养液消耗情况进行有针对性的补料控制设置是目前国内外发酵控制设备所实现的主要功能，但是目前的优化控制方法，必须人工进行补料策略设置，在发酵过程中需要人工值守，无法实现给定优化条件下的智能自动补料控制。利用所开发的基于智能检测的测控系统平台可以在无人值守情况下，利用智能检测模块估算营养液消耗情况，按照所设定葡萄糖浓度大小进行补料添加，从而实现自动的发酵过程优化控制。

在流加补料发酵过程中，随着发酵的进行，发酵后期要连续不断地补充营养物质，要求葡萄糖浓度维持在一定范围内，使微生物按照优化的生长轨迹生长，从而获得高产的微生物代谢产物。

通过对 L-乳酸发酵过程的分析，由于乳酸发酵控制系统可测变量有限，随着发酵过程乳酸菌消耗葡萄糖产生 L-乳酸，发酵液 pH 值会不断降低，但是发酵中通过开关控制添加碱液将发酵液 pH 值维持在 6.5 以维持菌体生长所需环境，所以加碱量 V_{NaOH} 是反应葡萄糖消耗的一个关键辅助变量。同时，由于发酵过程具有很强的时变性，发酵时间 t 也被作为一个输入变量。

支持向量机 (SVM, support vector machine) 方法是 Vapnik^[16] 于 20 世纪 90 年代中期提出的一种基于统计学习理论的机器学习算法，它用结构风险最小化归纳原则代替经验风险最小化归纳原则，以克服人工神经网络的固有弱点，提高模型的泛化能力。由于支持向量机较好地解决了小样本、过学习、高维数、局部最优等实际难题，具有很强的泛化能力，因此，基于支持向量机的智能检测已在发酵过程领域得到应用^[17-18]。

本文使用 SVM 方法建立辅助变量与葡萄糖液消耗量 S 之间的软测量模型。软测量模型可以描述为

$$\hat{S} = SVM_S(V_{NaOH}, t) \quad (1)$$

式中， \hat{S} 为葡萄糖液消耗量的估计值，为软测量模型的输出， g 。SVM_S 利用 SVM 所建立的葡萄糖液消耗模型； V_{NaOH} 为加碱量，mL； t 为时间，h。采用 ε -SVR 进行建模^[19]，在 ε -SVR 模型中选用径向基 RBF 核函数，模型一

共有 3 个参数需要确定： C 、 γ 和 ε 。 C 是 SVM 模型中对误差项的惩罚系数， γ 是 RBF 核函数中的参数， ε 是回归模型中的不敏感损失函数值。对于 C 和 γ 的取值，采用网格搜寻和 ν 折交叉验证的方法选择最佳参数取值，从而保证 SVM 回归能够具有对未知输入的准确预测。根据输入系统的噪声水平选择 ε 参数，选择合适的 ε 值作为模型在泛化能力和训练精度 2 个指标中的折中。

利用离线采样的模型输入输出数据进行 L-乳酸发酵过程葡萄糖消耗量软测量模型的建立，将得到的软测量模型作为智能检测模型嵌入到发酵测控系统中，实现对葡萄糖消耗量的在线估计。

2 基于智能检测的发酵过程测控系统集成方法

现有的发酵过程测控系统通过硬件传感器、数据采集设备等采集发酵过程信息并进行控制。基于智能检测的发酵过程测控系统通过对发酵过程进行分析，对先验知识和可测参量进行处理，建立不易测量生物参量的软测量模型，并构建基于生物参量的软测量模型的智能检测处理单元，实现生物发酵过程不易测量生物参量的在线估计及优化控制。图 1 为所提出的基于智能检测的发酵过程测控系统体系结构。

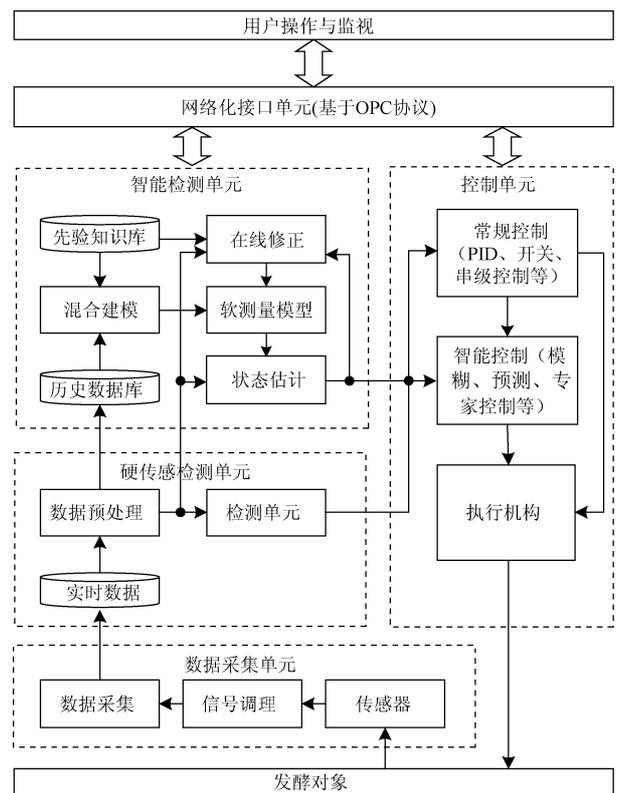


图 1 基于智能检测的发酵过程测控系统体系结构
Fig.1 Architecture of measurement and control system based on intelligent measurement for fermentation process

基于智能检测的发酵过程测控系统体系结构中各单元的功能如下：

1) 数据采集单元：对硬件传感器信号进行采集，通过信号调理和数据采集模块，将发酵对象的测量信息从模拟量转化为数字量，作为发酵过程测控系统的实时测

量数据。

2) 硬传感检测单元: 对硬件传感器采集到的可测量信息进行实时处理和运算, 为智能检测单元和控制单元提供符合要求的实时数据。

3) 智能检测单元: 智能检测单元是基于智能检测的发酵过程测控系统体系结构中关键组成单元, 该单元融合了过程对象的先验知识, 通过对发酵对象的分析, 进一步获取到有关被控对象的各种参数信息, 包括分析仪器离线采样的过程质量参量和历史数据。智能检测单元利用硬传感检测单元的可测量信息和先验的过程对象信息, 通过软测量建模实现不易测量关键生物参量的在线检测。

4) 控制单元: 控制单元包括常规控制、智能控制和执行机构 3 个模块。常规控制有 PID、开关、串级控制等。智能控制有模糊、预测、专家控制等。执行机构发送控制命令, 对各种开关和泵阀等进行控制, 实现对发酵过程的调控。

5) 网络化接口单元: 采用基于 OPC 协议的以太网标准接口, 实现控制层与用户操作层的数据交换。

6) 用户操作与监视: 根据所执行的功能不同, 分为操作站、监控站和维护站。主要为用户提供人机交互操作界面, 用户可以查看发酵过程实时趋势并对整个系统进行相关配置和维护操作, 并通过智能测控系统所提供的网络化接口单元与测控单元进行信息交互。

以 PLC、DCS 为主控单元的测控系统中, 智能检测与控制算法难以嵌入底层测控系统, 因此, 基于虚拟仪器技术, 采用高可靠性智能处理设备(如 PXI 总线、PAC 系统、工控机等), 以及通用编程软件, 实现基于智能检测的发酵过程测控系统, 克服了现有测控系统难以实

施智能检测与控制的缺点, 能够更好地对发酵过程进行优化调控。

3 基于 PXI 总线的发酵过程测控系统集成

3.1 系统硬件设计

根据所提出的基于智能检测的发酵过程测控系统体系结构, 基于 PXI 总线虚拟仪器技术, 研制了基于虚拟仪器技术的发酵过程测控系统。PXI 总线是在 CompactPCI 规范定义的 PCI 总线的基础上进一步扩展而成, 是测量、数据采集与处理的优秀平台^[20]。采用基于 PXI 总线的虚拟仪器技术能够为智能测控系统软测量建模提供可靠稳定且完全能够满足系统运算要求的测试平台。PXI 总线虚拟仪器系统具有检测精度高、实时性好、模块化、抗干扰能力强等特点, 智能程度优于 PLC 系统, 适合发酵测控系统进行不易测量生物参量的在线检测与优化调控。

如图 2 为基于 PXI 总线系统的发酵过程测控系统硬件框图。发酵罐所采集的主要变量包括 pH 值, 温度, 溶解氧浓度和乙醇浓度等。系统通过控制冷却水开关保证发酵罐在恒温条件下工作; 通过控制搅拌速率使发酵液充分混合; 通过控制补碱泵的开关和转速大小实现 pH 值的控制; 通过控制补料泵的开关和转速大小实现对发酵过程中营养液流加的控制, 这是发酵过程优化控制中的一个重要控制参数。PXI-8186 零槽控制器将采集到的参数值进行运算处理, 包括基于软测量模型的智能检测单元的实现, 得到不易测量生物参量值, 同时将检测和计算出的参量值通过 OPC 接口实时传送到上位机进行实时曲线显示和流程图更新。

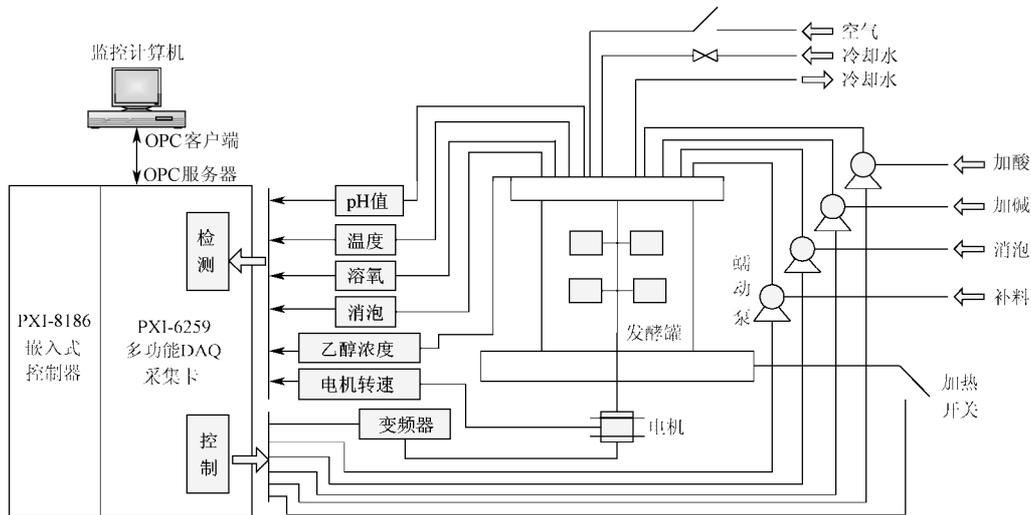


图 2 基于 PXI 总线的发酵过程测控系统硬件框图

Fig.2 Hardware schematic diagram of measurement and control system for fermentation process based on PXI bus

3.2 系统软件设计

图 3 为基于智能检测的发酵过程测控系统软件框图。系统软件由测控任务管理调度、数据管理调度、测控任务运行、数据接口软件、网络接口软件和用户层软件组成, 整个软件系统采用 LabVIEW 图形化编程语言实现。

1) 测控任务管理调度: 是整个系统的核心单元, 负责对整个测控系统的任务和操作进行管理调度, 保证系统正常可靠地运行, 包括系统组态、任务管理和操作配置等模块。

2) 数据管理调度: 负责维护和处理系统的实时数据

和历史数据，并对数据进行管理调度。

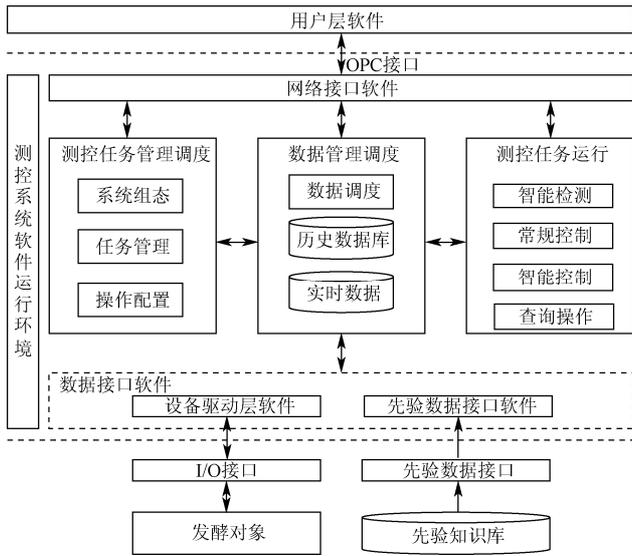


图 3 基于智能检测的发酵过程测控系统软件框图

Fig.3 Software schematic diagram of measurement and control system based on intelligent measurement for fermentation process

3) 测控任务运行：实现用户所规定的各种测控任务，包括智能检测、常规控制、智能控制、查询操作等。

4) 数据接口软件：由设备驱动层软件和先验数据接口软件组成。设备驱动层软件负责对发酵对象的 I/O 接口进行采集和控制，其软件功能分为 2 个部分，一部分是通过数据采集装置进行发酵过程数据的采集，经过处理后将采集到的数据送入数据管理调度单元。另外一部分是控制软件部分，通过接收数据管理调度单元的命令数据，对发酵罐装置进行控制，主要是各种泵、阀的调节，从而实现对发酵过程的优化与控制。先验数据接口软件负责对先验知识库的数据进行采集，包括专家知识的输入和离线仪表分析数据的录入。

5) 网络接口软件：为系统提供网络化功能，负责用户层软件与系统各个单元模块进行数据的交互。采用 OPC 接口，网络接口软件设计成为智能测控系统的 OPC 服务器，用户层软件作为 OPC 客户端与测控系统进行数据交互。

6) 用户层软件：客户端上位机采用 OPC 通讯的方式与 PXI 总线系统进行通讯，利用 LabVIEW 中共享变量引擎的 OPC 服务器，用程序标识符 (ProgID) National Instruments.Variable Engine 将共享变量引擎与所开发的 OPC 客户端相连。在 OPC 客户端中，可浏览所有由共享变量引擎发布的数据项。这样的数据接口设计使上位机的程序开发可以采用不同的技术手段来实现，只要满足 OPC 接口协议，就可以通过以太网接口从 PXI 系统中获取到发酵过程中的实时数据，并对发酵过程控制参数进行配置，同时采用 OPC 接口方式，方便用户根据需要增加新的监控计算机。

基于智能检测的发酵过程测控系统软件中各个模块单元均通过规定的统一接口进行数据的交互，这种设计模式使软件的封装性和可复用性得到增强，各个单元模

块设计只要符合统一的接口规定就可以进行替换。网络接口软件将所有过程数据封装为统一的 OPC 接口，使得上层用户可以以统一的方式进行访问。这种方式屏蔽了数据的异构性，且涉及的层更少，降低系统的复杂性的同时有效提升可靠性。由于在网络接口软件中实现了数据的集成，用户层人机交互软件的设计便有了很好的灵活性以及扩展性，从而大大节省成本、降低应用软件开发难度。

4 试验与分析

采用基于 PXI 总线的发酵过程测控系统实现 L-乳酸的发酵优化控制，图 4 为 L-乳酸发酵过程智能测控系统实物图。根据离线提的葡萄糖浓度分析结果，建立 L-乳酸葡萄糖液消耗模型，利用发酵过程中的 17 组离线采样分析数据作为模型样本数据进行 SVM 模型的训练，所建立的 SVM 软测量模型参数选择采用对 C 和 γ 进行网格搜索的 5 折交叉验证方法。得到的 SVM 模型参数为 $\epsilon=0.01$, $C=64$, $\gamma=2^{-7}$ 。图 5 为所建立的软测量模型输出结果，可以看出基于软测量模型的智能检测输出结果准确地反映了发酵过程实际葡萄糖液消耗量。

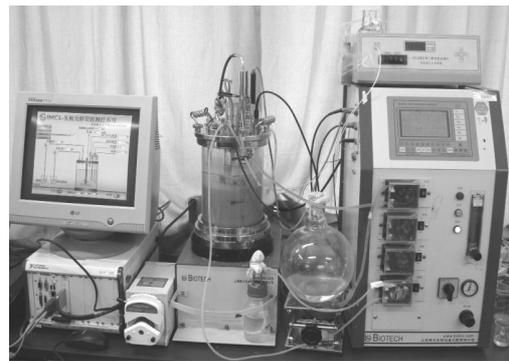


图 4 L-乳酸发酵智能测控系统

Fig.4 Picture of intelligent measurement and control system for L-lactic acid fermentation

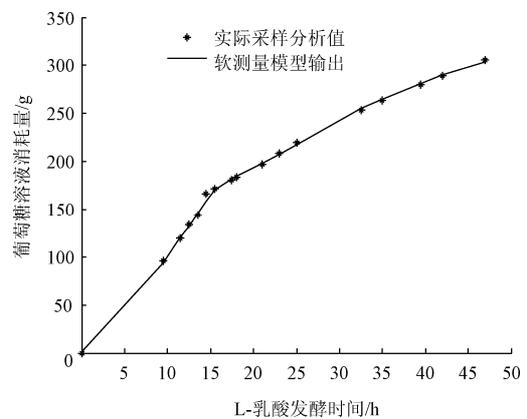


图 5 葡萄糖液消耗模型

Fig.5 Glucose liquid consumption model

在线测得葡萄糖液消耗量后，将系统应用到葡萄糖液加补料优化控制中，根据葡萄糖量的实际消耗情况，进行流加量的反馈调整，试验结果如图 6。图 6 为一次实际的

L-乳酸发酵优化控制中离线采样获得的葡萄糖浓度。

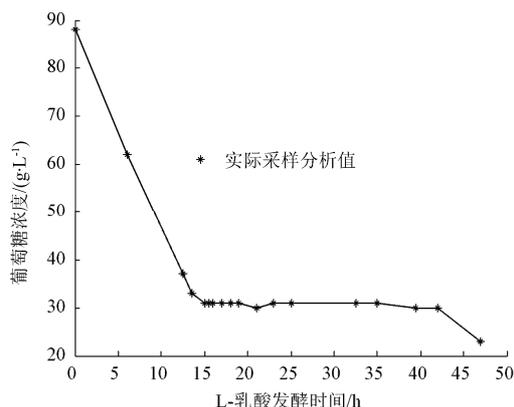


图6 L-乳酸发酵过程葡萄糖浓度变化

Fig.6 Glucose liquid concentration of L-lactic acid fermentation

发酵初期葡萄糖浓度为 88 g/L, 15 h 之后开始进行自动补料控制, 通过估算葡萄糖的消耗量, 根据计算结果自动反馈进行葡萄糖补料控制, 可以将葡萄糖浓度维持在 30 g/L, 持续到 42 h 之后, 停止自动补料。通过维持稳定的葡萄糖浓度值, 可以保证菌体的正常代谢过程, 从而大大提高发酵的产物得率, 最终所得到的 L-乳酸产量达到 160 g/L, 高于一般人工设置流加速度进行控制所达到的 L-乳酸产量 130 g/L, L-乳酸发酵过程优化后产量提高了 23%, 大大提高了 L-乳酸的发酵产物的得率。

5 结论

本文提出的基于智能检测的发酵过程测控系统, 能够实现发酵过程不易测量生物参量的在线检测与优化调控, 构建的发酵过程智能测控系统的体系结构及实现方法正确可行。基于虚拟仪器技术的 PXI 总线发酵过程测控系统满足智能测控系统的功能要求, 嵌入的智能检测单元能够有效地实现不易测量生物参量的在线检测, 为先进的优化控制算法在发酵过程测控系统中的应用提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] Bogaerts Ph, Vande Wouwer A. Software sensors for bioprocesses[J]. ISA Transactions, 2003, 42(4): 547—558.
- [2] Komives Claire, Parker Robert S. Bioreactor state estimation and control[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2003, 14(5): 468—474.
- [3] Assis Adilson Jose de, Filho Rubens Maciel. Soft sensors development for on-line bioreactor state estimation[J]. Computers and Chemical Engineering, 2000, 24(2/7): 1099—1103.
- [4] 常玉清, 王福利, 王小刚, 等. 基于支持向量机的软测量方法及其在生化过程中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(3): 241—244.
Chang Yuqing, Wang Fuli, Wang Xiaogang, et al. Soft sensor modeling based on support vector machines and its applications to fermentation process[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(3): 241—244. (in Chinese with English abstract)
- [5] 朱湘临, 刘叶飞, 孙谧, 等. 海洋微生物酶反应器智能控制系统的研制[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 185—191.
Zhu Xianglin, Liu Yefei, Sun Mi, et al. Development of intelligent control system for bioreactor of marine microbial enzymes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(9): 185—191. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王斌, 庄健, 王孙安. 啤酒发酵过程的智能监控系统研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 197—200.
Wang Bin, Zhuang Jian, Wang Sun'an. Intelligent monitoring and control system for beer fermentation process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(3): 197—200. (in Chinese with English abstract)
- [7] Liu Yenchun, Wang Fengsheng, Lee Wenchien. On-line monitoring and controlling system for fermentation processes[J]. Biochemical Engineering Journal, 2001, 7(1): 17—25.
- [8] Cheruy A. Software sensors in bioprocess engineering[J]. Journal of Biotechnology, 1997, 52(3): 193—199.
- [9] Ko Chih-Lung, Wang Fengsheng. On-line estimation of biomass and intracellular protein for recombinant Escherichia coli cultivated in batch and fed-batch modes[J]. Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers, 2007, 38(3/4): 197—203.
- [10] Riverol C, Cooney J. Estimation of the ester formation during beer fermentation using neural networks[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(4): 585—588.
- [11] Desai Kiran, Badhe Yogesh, Tambe Sanjeev S, et al. Soft-sensor development for fed-batch bioreactors using support vector regression[J]. Biochemical Engineering Journal, 2006, 27(3): 225—239.
- [12] Chen L, Bernard O, Bastin G, et al. Hybrid modeling of biotechnological processes using neural networks[J]. Control Engineering Practice, 2000, 8(7): 821—827.
- [13] James Scott, Legge Raymond, Budman Hector. Comparative study of black-box and hybrid estimation methods in fed-batch fermentation[J]. Journal of Process Control, 2002, 12(1): 113—121.
- [14] Sciascio Fernando di, Amicarelli Adriana N. Biomass estimation in batch biotechnological processes by bayesian gaussian process regression[J]. Computers and Chemical Engineering, 2008, 32(12): 3264—3273.
- [15] Li Zheng, Lu Jike, Zhao Liqiang, et al. Improvement of L-Lactic acid production under glucose feedback controlled culture by Lactobacillus rhamnosus[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2010, 162(6): 1762—1767.
- [16] Vapnik V N. The Nature of Statistical Learning Theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1995.
- [17] Zhong Weimin, Pi Daoying, Sun Youxian. SVM based soft sensor for antibiotic fermentation process[A]. IEEE international conference on systems, man and cybernetics[C]/IEEE, 2003(1): 160—165.
- [18] Wang Jianlin, Yu Tao, Jin Cuiyun. On-line estimation of biomass in fermentation process using support vector machine[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2006, 14(3): 383—388.

- [19] Wang Jianlin, Zhao Liqiang, Yu Tao. On-line estimation in fed-batch fermentation process using state space model and unscented Kalman filter[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, 18(2): 258—264.
- [20] National Instruments Corporation. PXI Specification: PCI eXtensions for Instrumentation An Implementation of CompactPCI (Revision 2.0)[M]. Austin: National Instruments Corporation, 2000.

Integration and application of intelligent measurement and control system for fermentation process

Wang Jianlin¹, Xue Yaoyu¹, Zhao Liqiang¹, Li Zheng²

(1. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 10029, China;

2. Key Laboratory of Advanced Textile Composites (Tianjin Polytechnic University), Ministry of Education, Tianjin 300160, China)

Abstract: Measurement and control system of fermentation process is the basis of parameters measurement and optimal regulation in fermentation process, directly influencing the optimal control performance of the fermentation system. Considering the intelligent measurement of L-lactic acid fermentation process, an integration method of measurement and control system based on intelligent measurement for fermentation process was proposed. The system architecture and implementing method were presented. The intelligent measurement and control system using PXI bus based on virtual instrument technology for fermentation process was integrated, and its hardware and software design were given. By constructing soft-sensor model in this system, the unmeasurable variables of fermentation process can be effectively estimated and controlled on-line. It provides a new measurement and control system for fermentation process. The experiment results show that the glucose liquid consumption can be estimated on-line by using the system in the L-lactic acid fermentation process, and the real-time closed loop optimal fed-control can be realized, furthermore, the production of L-lactic acid increases by 23%, as compared with the traditional manual control.

Key words: intelligent systems, measurements, optimal control systems, soft-sensor model, fermentation process, L-lactic acid fermentation