

基于混合粒子滤波的故障诊断方法^①

董欣

(渤海大学 管理学院, 锦州 121000)

摘要: 结合了模糊递归神经网络和粒子群算法, 在此基础上改进粒子滤波的故障诊断方法. 故障诊断作为智能控制的研究热点, 其算法层出不穷. 粒子滤波故障诊断作为基于解析模型的状态估计诊断方法的一种, 一直在工业生产中起着重要的作用, 但其自身的缺点也限制了它的进一步发展, 保留粒子滤波的优势, 提出一种基于混合算法的粒子滤波故障诊断方法, 该方法不但一定程度上解决了权值退化的问题, 而且改进了粒子群算法, 并结合神经网络算法在啤酒发酵温控系统中形成了故障检测、预测和辨识为一体的故障诊断方法.

关键词: 粒子滤波; 粒子群优化算法; 免疫原理; 故障诊断; 神经网络

Fault Diagnosis Method Based on Hy- PF

DONG Xin

(School of Management, Bohai University, Jinzhou 121000, China)

Abstract: A novel fault diagnosis method is proposed in this paper which is improved with DRFNN and PSO on basis of PF. There are much more algorithms about fault diagnosis because it has become the spot in intelligent control. As one of status estimation diagnostic methods based on the analytical model, particle filter fault diagnosis has been playing an important role in industrial production. However, it is limited by its shortcoming for its further development, a new particle filter fault diagnosis method based on hybrid algorithm is proposed in this paper, which retains the advantages of the particle filter, and it not only solved the problem of the weight degradation to a certain extent, but also improved particle swarm optimization. A system includes fault detection, prediction and recognized is realized with neural network in the beer fermentation temperature control system.

Key words: PF; PSO; immune principle; fault diagnosis; neural network

故障诊断(fault diagnosis)是工业生产制造中非常重要的一个环节, 对于故障诊断的传统分类方法是基于数学模型、基于知识和基于信号处理三类^[1]. 近年来层出不穷的故障诊断方法已经不能单纯的被划分到其中一类, 所以新的划分方法被提出来, 在文献 5 中对目前出现的故障诊断方法提出了新的划分, 主要分为两大类: 一种是包括基于解析模型方法和数据驱动方法的定量分析方法; 另一种是包括图论方法、专家系统、定性仿真的定性分析法. 其中对于定量分析的研究更为深入, 其中基于解析模型的方法又分为状态估计、参数估计、等价空间. 基于解析模型的故障诊断

方法是利用系统的精确的数学模型和可观测输入输出量构造残差信号, 表示实际值和模型期望值之间的差异, 然后针对残差信号进行故障诊断分析. 粒子滤波器就是属于状态估计这个类别, 而针对非线性系统常用的神经网络是属于数据驱动方法下的机器学习, 与之并列的是支持向量机. 粒子滤波器的使用主要是基于它可以处理噪声服从非高斯分布的非线性系统状态估计问题, 当滤波残差的绝对值超过阈值时, 就可以判断为系统发生故障^[2-4].

粒子滤波(particle filter)又称序列蒙特卡洛估计, 近几年应用十分广泛, 但其中的问题也日益凸现出来,

^① 收稿时间:2012-05-07;收到修改稿时间:2012-05-30

主要是权值退化问题,进而提出了许多解决办法,其中基于粒子群优化的粒子滤波算法作为引进智能算法的代表有着明显的优势^[6-8],保留了粒子群优化算法的可调参数少,易于实现的优势,同时权值退化问题也得到了解决,在实际应用当中起着重要作用.然而对于粒子群优化算法本身存在的缺点,也影响着整个算法的性能,它是通过将新的量测值引入到采样分布之中去,然后利用滤波算法进行优化,持续的更新粒子的速度,从而使采样分布向后验概率比较高的区域运动,提高算法的预估精度,重采样过程中粒子会缺乏多样性,也就是粒子枯竭的问题,最后陷入局部最优.

DRFNN 同时具有递归神经网络和模糊逻辑特点,是一种典型的动态神经网络,其中模糊逻辑具有定性知识表达的能力,所以 DRFNN 在处理参数漂移、强干扰、非线性、不确定性等问题上表现出了较好的性能.动态递归模糊神经网络具有一个特别的递归层,目的是通过前馈神经网络中的附加状态反馈神经元来描述系统的非线性动态行为.也就是存在记忆功能,神经网络作为机器学习的代表,对于故障辨识有更大的优势.递归层能存储系统过去的信息,从而增加网络对动态信息的处理能力.尤其是故障信息的存储,使系统可以在发生故障后立即排查故障种类,采取措施.

本文结合故障检测、故障预测和故障辨识的方法对系统进行维护,其中故障检测使用粒子滤波算法,故障预测和故障辨识使用神经网络,两种方法结合比单一方法更加全面,可以实现故障的排查和解除,使系统更加完善.

1 混沌理论

采用混沌原理初始化粒子群的好处在于提高了初始化种群的遍历能力,混沌同时有随机性和确定性,其内部是有规律变化的,因此对一些看似随机的混沌理论系统仍然可以进行短期的估计和预测.因为这种特殊的特性,混沌理论经常被引入到一些算法当中避免整个过程陷入到局部最优.采用混沌原理来初始化种群比标准的初始种群多了随机性,比其他的改进算法(增加参数控制)减少了人为因素对系统的影响,更加智能自动化.

本文采用混沌原理来初始化粒子种群,增加了种群的多样性,也同时避免复杂化算法而影响算法性能.在混沌系统当中 Logistic 映射和 Lorenz 方程式最为典

型的混沌系统,本文采用的是 Logistic 映射(即虫口模型).设定 x_n 是某种昆虫第 n 年内的个体数目,这个数目与年份有关, n 只取整数,关系函数如下所示:即

$$x_{n+1} = f(x_n), n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n), n = 1, 2, \dots \quad (2)$$

Logistic 映射的取值范围可以设定在 $[0, 1]$ 之间,而参数 μ 则决定了 Logistic 映射的稳定点、周期规律和混沌行为.当 μ 的取值在 $[3.56994567, 4]$ 时系统发生混沌.初始种群时先随机选取序列,然后把序列经过上述公式迭代产生新的运动轨迹,在每条运动轨迹当中都有 m 个序列,这里的 m 称之为种群规模.

2 改进的方法

2.1 标准的粒子群优化算法

Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出了基于群体智能的并行优化算法—粒子群优化方法 (particle swarm optimizer, PSO). 算法中每个粒子代表着一个可能的解,种群规模为 m , 在 D 维空间当中 $S = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_m^k\}$. 在搜索空间中,粒子不断通过 p_i^k 和 p_g^k 向目标点运动.

$$v_j^{k+1} = \omega v_j^k + d_1 r_1 (x_j^* - x_j^k) + d_2 r_2 (x^* - x_j^k) \quad (3)$$

$$x_j^{k+1} = x_j^k + v_j^{k+1} \quad (4)$$

从速度和位置更新公式可以看出,粒子会陷入局部最优,为了改变这种情况许多学者做了很多研究,比如 Carlisle 的自适应 PSO (adaptive PSO, APSO), Blackwell 的“带电粒子”PSO (charged PSO, CPSO), Mullen 的个体最优衰减 PSO (p-best decay PSO, PBDPSO) 等.近几年无论是从计算模型、算法结构还是信息传递的拓扑结构等方面都进行了有效的改进.然而为了控制种群的多样性从而引入额外的机制或者参数,这也增加了更多的待调整的参数.这也将使人为因素对算法结果的影响增大,使算法的自适应和智能性大大减弱.在提高算法的准确性的前提下也不可以牺牲 PSO 算法的简单而高效的性能,如果计算过于复杂,就失去了 PSO 原本的特色.

将免疫遗传算法的思想融入到粒子当中,采用遗传算法的编码机制,染色体将包括粒子的当前位置和速度与前一刻的位置和速度、适应度函数值、惯性权重,也就是 x_j^k 和 v_j^k , x_j^{k-1} 和 v_j^{k-1} , f , ω 构成一个序列

作为染色体的基因,把待解的问题的可能解依然用粒子表示,结合免疫原理(生物免疫系统对于外来的抗体原会自动产生一种相应的抗体来抵御入侵,在生物释放抗体之后,通过抗体和抗原的结合来破坏抗原,根据抗体的浓度,它们之间会产生刺激与抑制反应)可以保持种群的多样性,利用免疫原理中的多样性、亲和度、适应度来调节抗体的被选择机率的大小.借鉴免疫遗传算法中的定义,若有种群规模为 m 每个抗体的长度为 n , 等位基因的种类为 s 则信息熵可定义为 $H_j(m) = \sum_{i=1}^s -P_{ij} \cdot \lg P_{ij}$, 而亲和度可表示为 $A_{u,v} = 1/\geq(1+H(2))$, 亲和度越大说明两种抗体越相似,也就是说两种粒子的轨迹相似,若这样的粒子在种群中所占的比例较大,那么就抑制其被选的可能性.与此同时考虑抗体的适应度也就是粒子的适应度函数值的大小,其值越大,被选择的几率越大.

2.2 故障诊断方法步骤

步骤 1. 初始化,随机抽取种群,确定种群规模、最大迭代次数和抗体长度.

步骤 2. 把初始种群经过 Logistic 映射, μ 的取值为 3.57, 随机生成 m 序列作为新的种群.

步骤 3. 初始化粒子的速度和位置,确定学习因子和惯性权重的大小.

步骤 4. 当迭代次数小于最大的迭代次数时,执行以下循环操作

- 1) 计算各抗体(粒子)的适应度值,按照大小排序.
- 2) 计算各抗体之间的亲和度值,相似抗体浓度大的被选择机率小,浓度小的被选择机率大,根据 $P_{sel}(i) = \delta C_i (1 - F(i)/F_{max}) + \lambda F(i)/F_{max}$ 来选择抗体.
- 3) 重复 1) 找到适应度最大的两个抗体作交叉变异操作.
- 4) 根据速度和位置更新公式更新粒子的速度和当前位置,并同步更新粒子群的全局极值.

步骤 5 获取状态输出,求出残差,分析残差,进行故障诊断.

3 仿真

故障诊断的发展已经比较成熟,但是故障预测和分类却一直一直是研究热点,神经网络作为数据驱动的故障诊断方法的一种,在非线性系统中有着良好的表现,基于解析模型的方法和数据驱动的方法是

两类不同类型的方法,但在实际应用当中系统的复杂性和故障的多种多样使得一种方法不能同时满足故障诊断和预测,在一个系统中结合两种方法可以实现故障检测、故障预测和故障辨识.在本文中基于混合算法的粒子滤波算法实现了对系统的故障检测,改进的粒子群算法可以实现对系统的故障预测,而模糊递归神经网络的记忆功能可以实现对故障的分类也就是故障辨识.

采用啤酒发酵罐的温控系统作为测试对象,啤酒的发酵过程一般采取预测控制为主,由于其过程是在啤酒酵母的参与下,对麦汁的某些组成进行性代谢而将其口味变为啤酒风味而成的,而酵母对温度的要求又十分精确,当温度变化时,酵母有可能会早期沉淀、衰老、死亡等状况影响啤酒本身的口味.在控制过程中尽量避免有故障发生,若发生故障要尽早采取措施.

发酵罐的单温段对象模型为 $G(s) = \frac{1.48e^{-380s}}{6731s^2 + 396s + 1}$ 取种群规模为 500, 采样时间

点为 0, 1, ..., 600. 残差阈值设定在 -0.15~0.15 方差 $Q=1$, $b=b_0=25$, 代价因子 $C_{false}=0.2$, $C_{miss}=0.8$. 其中故障的发生由参数 b 的调变模拟, $0 \leq k \leq 300$ 时系统工作正常工作,当 $301 \leq k \leq 600$ 时, b 跳变为 $5b_0$. 仿真结果中根

据公式 $rmse = \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (x_i - \hat{x}_i)^2 \right]^{1/2}$ PSO-PF 和 IPSO-PF

的均方根误差为 1.6821、1.3012, 所以从这点可以看出基于混合算法的粒子滤波算法的诊断方法的精确度得到了一定的提高.

图 1 和 2 中可以看出,基于混合算法的粒子滤波算法明显优于基于传统的粒子群优化的粒子滤波算法.改进后的粒子滤波故障诊断优化了权值问题,使其保持了多样性,提高了故障诊断的精确性,一定程度上增强了粒子滤波的中粒子的滤波能力.在系统当中,故障预测部分的误报率和漏报率已经得到了验证,最后对故障诊断中的故障辨识进行仿真.

从图 3 中可以看出,系统刚开始时,神经网络对系统故障存储信息不多,所以在排查辨识时会有波动,在系统基本稳定之后,对系统的故障种类有了全面的存储,再对其辨识,基本处于稳定状态.

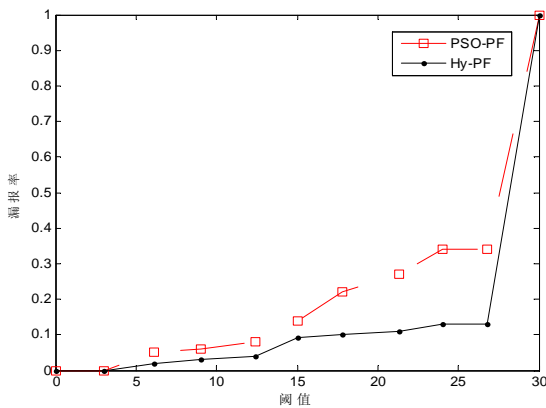


图 1 PSO-PF 和 Hy-PF 的漏报率仿真结果

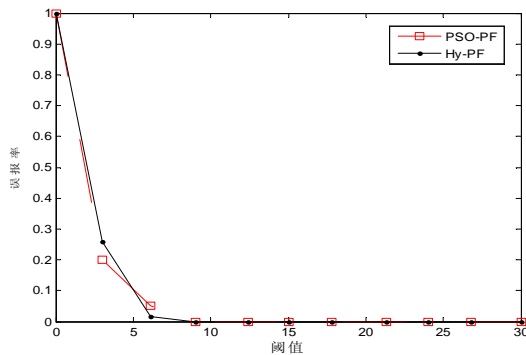


图 2 PSO-PF 和 Hy-PF 的误报率仿真结果

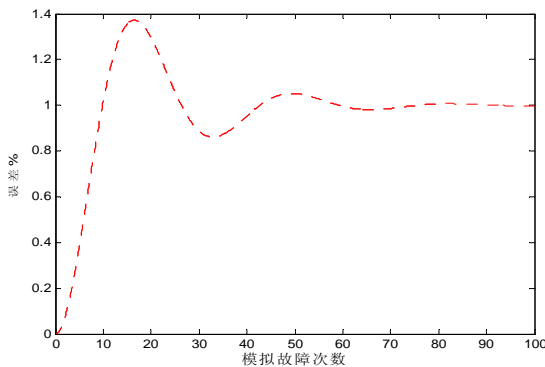


图 3 系统模拟故障诊断误差仿真结果

4 结语

本文在改进了传统的粒子群优化算法的基础之上结合遗传免疫理论,提出了一种基于混合算法的粒子滤波算法,混沌理论的运用使粒子群初始化时就优于传统的初始种群,增加了种群的多样性.利用故障检测、故障预测和故障辨识的方法对系统的故障诊断提出了一个新的方向.

参考文献

- 1 Frank PM. Fault diagnosis in dynamics systems using analytical and knowledge-based redundancy: a survey and some new results. *Automatica*, 1990,26(3):459-474.
- 2 Palade V, Bocaniala CD. *Computational Intelligence in Fault Diagnosis*. Springer, 2010.
- 3 Baah GK, Podgurski A, Harrold MJ. The Probabilistic Program Dependence Graph and Its Application to Fault Diagnosis. *Software Engineering, IEEE Trans. on*, 2010, 36(4):528-545.
- 4 Yoshimura M, Frank PM, Ding X. Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems. *Journal of Process Control*, 1997,7(6): 403-424.
- 5 Patton RJ, Frank PM, Clark RN. *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. London: Springer-Verlag, 2000.
- 6 周东华,叶银忠.现代故障诊断与容错控制.北京:清华大学出版社,2000.
- 7 周东华,胡艳艳.动态系统的故障诊断技术. *自动化学报*, 2009,35(6):748-758.
- 8 Baker RS, Corbett AT, Aleven V. More accurate student modeling through contextual estimation of slip and guess probabilities in Bayesian knowledge tracing. *ITS2008: Proc. of the 9th International Conference on Intelligent Tutoring Systems*. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 406-415.

(上接第 202 页)

参考文献

- 1 杨俊柯,杨贯中,杨建学.基于领域本体的学习资源管理系统框架研究. *科学技术与发展*, 2005,5(11):708-711.
- 2 Antoniou G, van Harmelen F. 陈小平等译. *语义网基础教程*. 北京:机械工业出版社, 2008.86-87.
- 3 史伟.基于 Protégé 的 VF 教学本体建模方法研究. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2008,29(4):314-316.
- 4 赵蔚,刘秀琴,邱百爽.语义网自适应学习系统中领域本体的构建. *吉林大学学报(信息科学报)*, 2008,26(5):514-517.
- 5 刘光蓉. “C 程序设计”课程内容体体构建. *电化教育研究*, 2008,12:42-45.