

文章编号: 1001-0920(2009)06-0953-04

基于群灰色关联分析的化工设备故障诊断

董立新, 顾幸生

(华东理工大学 自动化系, 上海 200237)

摘 要: 针对化工生产设备, 提出一种基于群灰色关联分析的化工生产设备故障诊断方法, 较好地解决了化工设备状态预测和故障模式识别问题. 与传统的灰色关联分析相比, 该方法提高了灰色关联分析的准确性和可靠性, 降低了对单个参考信号的依赖性. 最后将该方法应用于化工设备化学反应器的故障识别, 识别结果显示, 该方法比传统的灰色关联分析效果更佳、更可靠, 具有简便易行、计算量小、不需复杂的诊断设备等优点.

关键词: 群灰色关联; 故障诊断; 化工设备

中图分类号: TP27 **文献标识码:** A

Fault diagnosis based on group grey relational analysis method for chemical equipment

DONGLi-xin, GU Xing-sheng

(Automation Department, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China.

Correspondent: DONG Li-xin, E-mail: lixindong@ecust.edu.cn)

Abstract: A fault diagnosis method based on group grey relational analysis method is proposed for chemical equipment to solve the problems of state prediction and fault-mode recognition of chemical equipment better. In contrast to the traditional grey relation analysis, the proposed method has higher diagnosis accuracy and reliability than the traditional grey relational method and reduces the requirements on data accuracy of the reference signal. It is applied to fault diagnosis for a chemical reactor. The results of instant analysis show that the proposed method has a much better effect than the traditional grey relation analysis. The operation is easy and the diagnosis is quick and reliable, and no complicated devices are needed.

Key words: Group grey relational analysis; Fault diagnosis; Chemical equipment

1 引 言

现代工业生产过程日趋大型化、集成化和精细化. 当系统的某个环节发生故障时, 若不及时处理, 就可能引起故障扩大并导致重大事故的发生. 因此在化工生产中, 针对化工设备建立高效准确的实时故障检测和诊断系统, 消除故障隐患, 及时排除故障, 确保安全、平稳、优质的生产, 已成为整个生产过程的关键所在^[1].

一台运行的化工设备实际上是一个复杂的系统, 这个系统部分信息已知, 部分信息未知, 因而它是一个灰色系统. 故障诊断就是利用已知信息去认识这个含有不可知信息系统的特性、状态与发展趋势, 并对未来作出预测与决策. 灰色系统理论中的灰色预测、关联分析、灰色聚类和灰色决策都可能成为

设备故障诊断的有力工具^[2]. 本文不同于传统灰色关联分析, 提出一种基于群灰色关联分析的化工设备故障诊断方法, 其改进了传统的灰色关联分析方法. 将该方法运用于化工设备化学反应器故障识别, 取得了良好的效果.

2 群灰色关联分析原理

不同于传统灰色故障诊断原理, 群灰色关联分析根据故障类型和灰色参考序列构造要求, 构造多个参考序列组, 其具有一定的关联性和独立性, 此法能有效地解决数据的随机量问题. 这些参考序列组构成灰色参考序列群, 对于灰色参考序列群的灰色关联度(称为群灰色关联度), 文中给出一种新的关联系数计算方法以及群灰色关联度的计算方法. 最后通过得到的群关联度矩阵, 并根据群关联分析实

收稿日期: 2008-05-22; 修回日期: 2008-12-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60774078); 上海市重点学科建设项目(B504).

作者简介: 董立新(1976—), 男, 山东青州人, 讲师, 从事智能控制、故障检测与诊断的研究; 顾幸生(1960—), 男, 江苏海门人, 教授, 博士生导师, 从事工业过程建模、控制与优化等研究.

现故障诊断. 这种构造能提高灰色关联分析的可靠性和准确性.

2.1 参考数列群与比较数列构造^[3]

假设有 $m * b$ 个参考数列. 参考数列群可构造为

$$\begin{bmatrix} y_1^1 & y_1^2 & \dots & y_1^b \\ y_2^1 & y_2^2 & \dots & y_2^b \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ y_m^1 & y_m^2 & \dots & y_m^b \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中: $\{y_1^w, y_2^w, \dots, y_m^w\} (w = 1, 2, \dots, b)$ 是第 w 组参考序列, 记为 y^w ; b 是参考序列组的数目; m 是每组参考序列的数目. 每组参考序列的形式为 $y_i^w = \{y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(N)\} (i = 1, 2, \dots, m)$. 这里: $y_i(k)$ 是 y_i^w 的第 k 个元素; N 是参考序列的元素个数; m 是第 w 组参考序列的参考序列数目. $\{y_j^1, y_j^2, \dots, y_j^b\} (j = 1, 2, \dots, m)$ 是同一族参考序列, 记为 y_j , 而 y_j 中的每个元素是相同类型故障的参考序列, 其各个分量之间既具有较强的关联性, 同时在某种程度上又有一定的独立性.

比较数列定义为 $x_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(N)\} (i = 1, 2, \dots, n)$. 其中: $x_i(k)$ 是 x_i 的第 k 个元素, n 是比较数列的数目, N 是比较数列元素的个数^[4,5].

2.2 群灰色关联度和群关联矩阵

在上面假设的基础上, 定义如下关联度体^[3]:

$$V_r = \begin{bmatrix} & & & r_{11}^b & r_{12}^b & \dots & r_{1m}^b \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & r_{2m}^b \\ & r_{11}^2 & r_{11}^1 & \dots & r_{1m}^2 & \ddots & \dots \\ \begin{bmatrix} r_{11}^1 & r_{12}^1 & \dots & r_{1m}^1 \\ r_{21}^1 & r_{22}^1 & \dots & r_{2m}^1 \\ \dots & \dots & r_{ij}^1 & \dots \\ r_{n1}^1 & r_{n2}^1 & \dots & r_m^1 \end{bmatrix} & r_{2m}^2 & \ddots & r_{mm}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ r_{n1}^1 & r_{n2}^1 & \dots & r_m^1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

其中 r_{ij}^w 是个体关联度, 表示第 w 组参考序列中的个体参考数列 y_j^w 和比较数列 x_i 的个体关联程度, 可由下式得到^[4,5]:

$$r_{ij}^w = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \zeta_{ij}^w(k). \quad (3)$$

这里 $\zeta_{ij}^w(k)$ 是个体关联系数, 可按下面给出的新方法计算:

$$\begin{aligned} \zeta_{ij}^w(k) = & \left(\min_w \min_j \min_i \min_k / y_j^w(k) - x_i(k) / + \right. \\ & 0.5 \max_w \max_j \max_i \max_k / y_j^w(k) - \\ & \left. x_i(k) / \right) / \left(/ y_j^w(k) - x_i(k) / + \right. \\ & \left. 0.5 \max_w \max_j \max_i \max_k / y_j^w(k) - x_i(k) / \right). \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $\zeta_{ij}^w(k)$ 是 $x_i(k)$ 和 $y_j^w(k)$ 在第 k 个元素处的关联系数, $|y_j^w(k) - x_i(k)|$ 是 $x_i(k)$ 和 $y_j^w(k)$ 在第 k 个元素处的绝对差值, $\min_w \min_j \min_i \min_k / y_j^w(k) - x_i(k) /$ 是 4 层最小距离, $\max_w \max_j \max_i \max_k / y_j^w(k) - x_i(k) /$ 是 4 层最大距离.

这样, 在关联度体的基础上, 可以得到一个群关联度矩阵 R_{group} , 其定义为

$$R_{group} = \begin{bmatrix} \tilde{r}_{11} & \tilde{r}_{12} & \dots & \tilde{r}_{1m} \\ \tilde{r}_{21} & \tilde{r}_{22} & \dots & \tilde{r}_{2m} \\ \dots & \dots & \tilde{r}_{ij} & \dots \\ \tilde{r}_{n1} & \tilde{r}_{n2} & \dots & \tilde{r}_{nm} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

其中群灰色关联度 \tilde{r}_{ij} 定义为

$$\tilde{r}_{ij} = \frac{1}{b} \left(\sum_{w=1}^b (r_{ij}^w)^p \right)^{1/p}, \quad p = 1, 2, \dots. \quad (6)$$

群关联度 \tilde{r}_{ij} 表示的是第 i 个比较数列和第 j 族参考信号的整体关联程度, 而群关联度矩阵 R_{group} 则代表了比较数列和这些族参考信号总体上的相互关联关系.

2.3 群灰色关联分析流程

群灰色关联分析的整个计算流程可以清楚地用一个框图说明, 如图 1 所示.

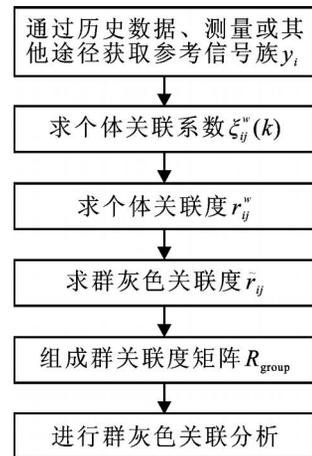


图 1 群灰色关联分析的计算流程

3 群灰色关联分析在化工设备故障识别中的应用

3.1 识别对象

以某化学反应器的故障诊断为例, 应用本文提出的算法进行仿真研究. 反应器的 3 个主要输入控制变量 $x(i) (i = 1, 2, 3)$ 分别为温度、压力和入料流量. 反应器的主要故障形态为低转化率, 催化剂低选择性和催化剂熔结^[6,7]. 群灰色关联分析用于化工设备故障识别的基本原理如图 2 所示.

3.2 诊断流程

诊断流程步骤如下:

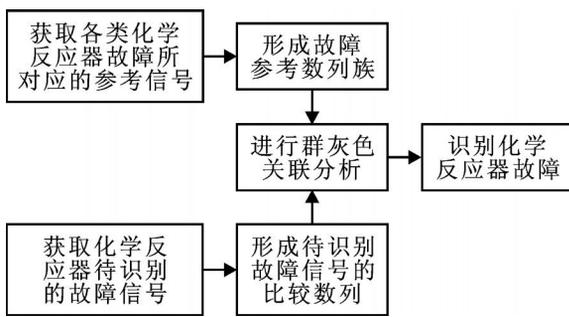


图 2 群灰色关联分析用于反应器故障识别的原理框图

Step1 参考数列和比较数列的构造. 根据故障类型和灰色参考序列构造要求, 构造 3 个参考序列组用于研究, 且这 3 个参考序列组构成一个灰色参考序列群. 其中每组参考数列又包含 4 个分量, 其形式为

$$\begin{bmatrix} y_1^1 & y_1^2 & y_1^3 \\ y_2^1 & y_2^2 & y_2^3 \\ y_3^1 & y_3^2 & y_3^3 \\ y_4^1 & y_4^2 & y_4^3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

这里 $\{y_i^1, y_i^2, y_i^3\}$ ($i = 1, 2, 3, 4$) 是反应器第 i 类故障的 3 个参考信号的特征数列. 当 $i = 1$ 时, 代表反应器正常参考数列; 当 $i = 2$ 时, 代表反应器为低转化率故障数列; 当 $i = 3$ 时, 代表催化剂低选择性故障数列; 当 $i = 4$ 时, 代表催化剂熔结故障数列. 而 $\{y_j^1, y_j^2, y_j^3, y_j^4\}$ ($j = 1, 2, 3$) 则代表第 j 组参考信号. 不同组之间没有先后顺序.

待检序列与标准序列的构成相似, $x_j = \{x_j(1), x_j(2), x_j(3)\}$ ($j = 1, 2, \dots, n$). 其中: n 为待检序列个数; x_j 的 3 个元素对应反应器故障的 3 个主要输入控制变量, 即温度、压力和入料流量.

Step2 根据式(4)和(3)计算个体关联系数和个体关联度.

Step3 计算群灰色关联度并形成群关联度矩阵. 根据式(6)计算群灰色关联度. 在本文诊断研究中, 取式(6)中 $p = 2$, 得到如下群灰色关联度计算公式:

$$\tilde{r}_{ij} = \frac{1}{b} \left(\sum_{w=1}^b (r_{ij}^w)^2 \right)^{1/2} \quad (8)$$

根据式(8)计算群关联度矩阵中的群关联度 \tilde{r}_{ij} , 从而得到群关联度矩阵(式(5)).

Step4 根据关联序, 识别故障. 将群关联度矩阵(式(5))中每行群关联度 \tilde{r}_{ij} 按大小顺序排列起来, 即可得到关联序^[4,5].

3.3 故障诊断实例与分析

这里用 10 个案例进行诊断测试, 采用基于群关联度分析方法诊断, 并与传统的灰色关联分析诊断进行比较. 根据基于群关联度分析方法诊断的原理及流程, 得到对应的群关联矩阵, 它们的每一行有 4 个分量, 第 1 ~ 第 4 个分量依次代表反应器测试信号与正常状态, 催化剂低选择性故障, 催化剂熔结故障, 反应器低转化率故障的关联强度. 关联度的值越大, 表示关联程度越紧密. 这里, 关联度的值为最大者即为反应器输入检测信号的故障类型.

基于群灰色关联分析与传统灰色关联分析的诊断结果见表 1. 表中故障类型的表示方式为: 正常用 0 表示, 催化剂低选择性故障用 1 表示, 催化剂熔结故障用 2 表示, 反应器低转化率故障用 3 表示.

诊断 10 个测试数据, 基于群灰色关联分析诊断全部正确; 而基于传统灰色关联分析诊断错误 3 个, 诊断正确 7 个. 与传统的灰色关联分析相比, 本文方法至少具有以下优点:

1) 采用群关联度分析诊断能有效地解决数据的随机量问题. 所提分析方法可应用于参考信号具有较强分散性和独立性的领域, 而传统的灰色关联

表 1 基于群灰色关联分析诊断结果

序号	入口温度 10 ⁻³ °F	入口压力 10 ⁻² Pa	进料速率 10 ⁻³ lb/min	基于群灰色关联分析诊断输出				实际故障类型	群灰色关联分析诊断结果	传统灰色关联分析诊断结果
				0.550	0.525	0.448	0.507			
1	0.4	1.0	0.21	0.550	0.525	0.448	0.507	0	0(正确)	0(正确)
2	0.4	0.9	0.2	0.478	0.430	0.374	0.433	0	0(正确)	0(正确)
3	0.4	1	0.18	0.546	0.501	0.469	0.536	0	0(正确)	0(正确)
4	0.3	1	0.2	0.491	0.439	0.434	0.486	0	0(正确)	3(错误)
5	0.325	0.9	0.2	0.419	0.365	0.354	0.419	0	0(正确)	3(错误)
6	0.418	1.02	0.19	0.510	0.472	0.446	0.488	0	0(正确)	0(正确)
7	0.381	0.92	0.185	0.469	0.406	0.384	0.480	0	0(正确)	3(错误)
8	0.5	1	0.18	0.467	0.433	0.528	0.475	2	2(正确)	2(正确)
9	0.37	1	0.2	0.543	0.483	0.450	0.545	3	3(正确)	3(正确)
10	0.35	0.8	0.2	0.405	0.348	0.327	0.411	3	3(正确)	3(正确)

分析对于这种情况则容易产生错误的分析结果。

2) 改进了传统的关联分析方法,提高了诊断正确率和可靠性。所提方法的效果不依赖于单个参考信号,而是取决于参考信号群的整体性能,所以它比传统方法的准确性和可靠性更高。

4 结 论

本文提出了基于群灰色关联分析化工设备故障诊断方法,并将该算法应用于某化学反应器的故障识别。故障诊断实例表明该方法可行。与传统的灰色关联分析相比,基于群灰色关联分析化工设备故障诊断方法降低了对单个参考信号的依赖性,提高了灰色关联分析的准确性和可靠性。该方法简单且计算量小,不需要复杂设备,值得推广于实际的工业故障诊断中。

参考文献(References)

- [1] 黄道,宋欣.神经网络在化工过程故障诊断中的应用[J].控制工程,2006,13(1):6-10.
(Huang D, Song X. Application of neural networks to chemical fault diagnosis [J]. Control Engineering of China, 2006, 13(1): 6-10.)
- [2] 罗佑新.灰色系统理论在化工设备故障诊断中的应用[J].化工装备技术,1996,17(6):11-14.
(Luo Y X. The application of grey system theory in the chemical equipment fault diagnosis [J]. Chemical Equipment Technology, 1996, 17(6): 11-14.)
- [3] Lixin Dong, Dengming Xiao. Insulation fault diagnosis based on group grey relational grade analysis method for power transformer [J]. J of Southeast University (English Edition), 2005, 21(2): 175-179.
- [4] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社,1991.
(Deng J L. Grey system theory course [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1991.)
- [5] Deng Julong. Introduction to grey system theory [J]. J of Grey Systems, 1989, 1(1): 1-24.
- [6] 刘敏.神经网络在化学反应器故障诊断中的应用[J].聊城师院学报,2000,13(1):51-54.
(Liu M. Fault detection in the chemical reactors using artificial neural networks [J]. J of Liaochers University, 2000, 13(1): 51-54.)
- [7] 孙京浩,李秋艳,杨欣斌,等.基于蚁群算法的故障识别[J].华东理工大学学报,2004,30(2):194-198.
(Sun J G, Li Q Y, Yang X B, et al. Research on fault identification based on ant colony algorithm [J]. J of East China University of Science and Technology, 2004, 30(2): 194-198.)
- [4] Hua C C, Guan X P, Shi P. Adaptive fuzzy control for uncertain interconnected time-delay systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 153(3): 447-458.
- [5] Zheng F, Wang Q G, Lee T H. Adaptive robust control of uncertain time delay systems [J]. Automatica, 2005, 41(8): 1375-1380.
- [6] Tong S C, Li H X. Direct adaptive fuzzy output tracking control of nonlinear systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 128(1): 107-115.
- [7] Jiang X F, Xu W L, Han Q L. Observer-based fuzzy control design with adaptation to delay parameter for time-delay systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 152(3): 637-649.
- [8] Haddad W M, Hayakawa T, Chellaboina V S. Robust adaptive control for nonlinear uncertain systems [J]. Automatica, 2003, 39(3): 551-556.
- [9] 姜偕富,费树岷,冯纯伯.具有状态时滞线性系统对时滞参数的自适应控制[J].控制理论与应用,2002,19(5):704-708.
(Jiang X F, Fei S M, Feng C B. Memory feedback control for linear time-delay system with adaptation to delay parameter [J]. Control Theory and Applications, 2002, 19(5): 704-708.)
- [10] 何率天,达飞鹏.模糊时滞系统的状态反馈控制器设计及其稳定性分析[J].东南大学学报,2006,36(4):657-661.
(He S T, Da F P. Design and stability analysis of state feedback controller for fuzzy time-delay systems [J]. J of Southeast University, 2006, 36(4): 657-661.)
- [11] 何率天,达飞鹏.一种带调节因子的状态反馈控制设计[J].自动化学报,2008,34(5):613-616.
(He S T, Da F P. Design of state feedback control with adjustable parameter [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(5): 613-616.)
- [12] Han Q L. Absolute stability of time-delay systems with sector-bounded nonlinearity [J]. Automatica, 2005, 41(12): 2171-2176.

(上接第 952 页)