

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 23220110154112

UDC _____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

控制回路故障诊断的方法研究

Research on Control Loop Fault Diagnosis

张 抗 抗

指导教师姓名: 吉国力 教授

合作导师姓名: 黄 彪 教授 (University of Alberta)

朱豫才 教授 (浙江大学)

专 业 名 称: 控制理论与控制工程

论文提交日期: 2014 年 月

论文答辩时间: 2014 年 月

学位授予日期: 2014 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2014 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

控制回路故障诊断旨在提高工业生产装置操作的安全性与可靠性，一直受到学术界与工业界的广泛关注。工业过程控制回路涉及多种复杂问题，其故障可能存在多种形式。论文研究控制回路中模型预测控制（MPC）的模型失配故障、回路振荡故障，以及基于数据驱动的贝叶斯故障诊断。针对工业现场的实际问题，提出了外加测试信号的模型误差诊断，基于频域分析的回路振荡监测，和基于期望极大化（EM）算法的贝叶斯故障诊断方法。本文具体研究内容如下：

- (1) 针对 MPC 模型失配问题，提出了基于外加低幅正弦测试信号的模型诊断方法。通过获取过程三个频率点上的精确频率响应并与当前 MPC 模型比较，加权形成模型误差矩阵；给出模型诊断误差上界概念，估计相应频率响应的误差上界，评价诊断结果的可靠性。在单回路和多回路控制系统仿真实验中效果良好，将算法开发形成可调用程序，准备应用于实际工业系统。
- (2) 针对控制回路中常见的回路振荡故障，提出了基于频域分析的回路振荡信号监测方法。该方法应用了离散傅里叶变换和瑞利分布的相关性质，计算不同灵敏度条件下的振荡监测阈值。通过仿真数据和实际数据验证了所提方法能在高噪信比环境下监测多种频率振荡。
- (3) 针对控制回路中监测器数据缺失情况，提出了基于 EM 算法的贝叶斯故障检测与分离方法。在 EM 算法的迭代优化步骤中给出了解析表达式使得计算简化。仿真验证环节中引入单容水箱例子和分馏塔控制例子用于方法验证。最后将基于 EM 算法的故障诊断方法与模型诊断算法相结合实施于实际实验室装置，进一步验证了所提方法的实用性。

在所提方法中，模型误差诊断与回路振荡监测作为两种不同的故障监测器应用于控制回路；基于 EM 算法的贝叶斯诊断将多种故障监测器的结果协调统一，形成控制回路全面诊断结果。通过相应的仿真实验、实验室装置测试以及工业数据验证，表明了所提方法的有效性和实用性。

关键词：故障诊断，MPC 模型诊断，振荡监测，贝叶斯诊断，期望极大化算法

Abstract

Control loop fault diagnosis deals with the safety and consistency of control loop operation, thus receiving increasing attention in both academic research and industrial application. Since process control systems are complex, usually faults may occur in different components and represent in different behaviors. This thesis is concerned with different faults related to control system, which includes model error fault in model predictive control (MPC), oscillation detection, and overall control loop diagnosis with missing data problem. In order to handle practical issues, non-disturbing test signal is used to detect the model error; frequency analysis is employed in the oscillation detection approach; as well as the Expectation-Maximization (EM) algorithm is applied to overcome the data missing problem. The major work of this thesis includes:

- (1) Introduce a method of multivariable model error detection in MPC. The idea is to use non-disturbing small sinusoidal test signals to obtain accurate estimates of process frequency responses at several frequency points. Then, the differences between estimated frequency responses and the frequency responses of current MPC model are used to form the model error index matrix which is used to access the model error of the MPC controller. An upper error bound is developed for quantifying the error of frequency response estimation. Simulation studies are used to demonstrate the usage of the method. Thenceforward, a model error detection toolbox has been developed and prepares to be applied in real industrial application.
- (2) Introduce an oscillation detection method by analyzing the magnitude of signal after discrete Fourier transform (DFT). Properties of Raleigh distribution are used to calculate a threshold in order to detect multiple oscillations simultaneously in presence of colored noises based on a statistical confidence level. A simulation example and an industrial case study are provided to verify the effectiveness of the proposed approach.
- (3) Introduce a data-driven approach for fault diagnosis in the presence of incomplete monitor data. The EM algorithm is applied to handle missing data in order to obtain a maximum likelihood solution for the discrete (or categorical) distribution. Because of the nature of categorical distributions, the maximization step of the EM algorithm is shown in this thesis to have an easily calculated analytical solution, making this method computationally simple. Two simulation examples

(single tank water level control system and distillation column system) as well as an experimental study on a balls-in-tubes system are investigated to demonstrate advantages of the proposed approach.

In the proposed methods, model error detection and oscillation detection are applied as independent monitors for different components in control loop, while the Bayesian diagnosis is a systematic approach to synthesize monitors, which provides an ultimate diagnosis result. Several simulation examples, balls-in-tubes experimental study as well as industrial case study are considered to illustrate the efficacy of the proposed method.

Key Words: Fault diagnosis, MPC model error detection, Oscillation detection, Bayesian diagnosis, Expectation-Maximization algorithm.

目 录

摘要	I
第一章 绪论	1
1.1 问题的提出与研究意义.....	1
1.2 控制回路性能评估综述.....	2
1.2.1 最小方差控制基准	2
1.2.2 用户自定义基准.....	3
1.2.3 输入输出方差基准	3
1.2.4 针对 PID 控制器和 MPC 控制器的性能基准.....	3
1.3 控制回路诊断综述.....	4
1.3.1 回路振荡诊断	4
1.3.2 阀门粘滞诊断	4
1.3.3 回路非线性诊断.....	5
1.3.4 模型失配诊断	5
1.4 贝叶斯框架下的控制回路诊断	5
1.4.1 控制系统的全面诊断问题	5
1.4.2 贝叶斯诊断介绍.....	7
1.5 本文主要研究内容.....	8

第二章 基于低扰动实验的 MPC 模型误差诊断	11
2.1 MPC 控制系统的频率响应分析	12
2.2 模型误差诊断方法	14
2.2.1 三个频率点的频率响应估计	14
2.2.2 模型误差矩阵	16
2.2.3 模型误差诊断步骤	17
2.3 频率响应估计的误差上界	18
2.3.1 单输入单输出系统的频率响应误差上界.....	19
2.3.2 多输入多输出系统的频率响应误差上界.....	21
2.4 模型诊断仿真测试	23
2.4.1 单输入单输出闭环系统仿真.....	23
2.4.2 多输入多输出闭环系统仿真.....	26
2.5 面向实际工业系统的模型诊断软件研发	30
2.5.1 系统框架设计	30
2.5.2 系统功能实现	31
2.5.3 软件实现展示	32
2.6 小结	34
第三章 控制回路振荡监测	37
3.1 基于频域分析的回路振荡监测	37
3.1.1 高斯白噪声环境下的回路振荡监测.....	38
3.1.2 高斯彩色噪声环境下的回路振荡监测	42

3.2 仿真测试	44
3.3 实际工业数据测试.....	47
3.3.1 数据分析与振荡监测.....	47
3.3.2 讨论与比较.....	51
3.4 小结	53
第四章 基于数据驱动的贝叶斯故障诊断.....	55
4.1 数据驱动的贝叶斯诊断理论.....	56
4.1.1 控制回路诊断问题的提出	56
4.1.2 问题描述.....	57
4.1.3 贝叶斯诊断理论.....	59
4.1.4 水位控制系统的故障诊断仿真	63
4.2 数据相互依赖的贝叶斯诊断.....	67
4.2.1 模式相互依赖情况	68
4.2.2 模式与证据相互依赖情况	71
4.3 小结	72
第五章 基于缺失数据的故障检测与分离.....	73
5.1 故障诊断中的数据缺失问题.....	73
5.2 期望极大化算法	76
5.3 基于 EM 算法的贝叶斯诊断.....	80
5.3.1 似然度分布参数估计推导	80

5.3.2 单种类型数据缺失的结果比较与算法分析	84
5.4 水位控制系统的故障诊断仿真	86
5.5 分馏塔控制回路故障检测仿真	89
5.6 实际装置的测试实验	92
5.6.1 实验装置介绍	93
5.6.2 使用 EM 算法处理缺失数据	96
5.7 小结	99
第六章 总结与展望	101
6.1 总结	101
6.2 展望	102
参考文献	103
攻读博士学位期间的学术论文发表及科研工作	113
致谢	117

Contents

Abstract	III
Introduction	1
1.1 Background and significance of the study	1
1.2 A brief literature overview on Control Performance Monitoring (CPM) .	2
1.2.1 Minimum-variance control benchmark	2
1.2.2 User-specified benchmark	3
1.2.3 Input-output variance benchmark	3
1.2.4 State-of-the-art PID controller monitoring and MPC performance monitoring	3
1.3 An overview on control loop diagnosis	4
1.3.1 Detection of oscillating control loops	4
1.3.2 Valve stiction diagnosis	4
1.3.3 Detection of loop nonlinearities	5
1.3.4 Diagnosis of model plant mismatch	5
1.4 Overall control loop diagnosis based on Bayesian framework	5
1.4.1 Issues on overall control loop diagnosis	5
1.4.2 An introduction on Bayesian diagnosis method	7
1.5 Outline of the thesis	8
MPC Model Error Detection based on Small Test Signal	11
2.1 Frequency analysis in MPC systems	12
2.2 Model error detection method	14
2.2.1 Three-points frequency response estimation	14
2.2.2 Model error index matrix	16
2.2.3 Model error detection procedure	17
2.3 Upper error bounds of frequency response estimates	18
2.3.1 Frequency response upper error bounds of SISO processes	19

2.3.2	Frequency response upper error bounds of MIMO processes . . .	21
2.4	Simulation examples	23
2.4.1	SISO process closed-loop case study	23
2.4.2	MIMO process closed-loop case study	26
2.5	MPC model error detection software development	30
2.5.1	System framework design	30
2.5.2	Realization of system functions	31
2.5.3	Results of software implementation	32
2.6	Conclusions	34
Detection of Oscillating Control Loops		37
3.1	The oscillation detection techniques	37
3.1.1	The detection with Gaussian white noise	38
3.1.2	The detection with Gaussian colored noise	42
3.2	Simulation study	44
3.3	Industrial data analysis	47
3.3.1	Data analysis and oscillation detection	47
3.3.2	Discussion and comparison	51
3.4	Conclusions	53
Data-driven Bayesian Approach for Control Loop Diagnosis		55
4.1	Data-driven Bayesian approach for control loop diagnosis	56
4.1.1	Control loop diagnosis	56
4.1.2	Preliminaries	57
4.1.3	Bayesian control loop diagnosis	59
4.1.4	Fault diagnosis for a simulated water level control system	63
4.2	Bayesian methods for control loop diagnosis in presence of data depen- dency	67
4.2.1	Underlying mode dependency	68
4.2.2	Temporal dependent evidences and modes	71
4.3	Conclusions	72

An Expectation Maximization Approach to Fault Diagnosis with Missing Data	73
5.1 Missing data problem in fault diagnosis	73
5.2 An introduction on Expectation-Maximization algorithm	76
5.3 Bayesian control loop diagnosis based on EM algorithm	80
5.3.1 Likelihood distribution parameters using the EM algorithm	80
5.3.2 Comparison between the EM and Bayesian approaches for single missing data pattern	84
5.4 Fault diagnosis on simulated water level control system with missing data	86
5.5 Fault diagnosis on simulated distillation column system with missing data	89
5.6 Experiment verification for the balls-in-tubes system	92
5.6.1 Experimental apparatus and design objective	93
5.6.2 Missing data handling with EM algorithm	96
5.7 Conclusions	99
Concluding Remarks and Future Work	101
6.1 Concluding remarks	101
6.2 Recommendations for future work	102
Bibliography	103
Publications	113
Acknowledgements	117

表格

1.1	贝叶斯诊断示例	8
2.1	单变量系统 MPC 模型误差诊断结果 (1次测试)	25
2.2	单变量系统 85.7% 误差上界确认 (1000次测试)	26
2.3	多变量系统 MPC 模型误差诊断结果 (1次测试)	28
2.4	多变量系统 85.7% 误差上界确认 (1000次测试)	29
3.1	工业数据回路振荡分析	50
4.1	证据数据举例	58
4.2	系统行为模式取值	62
4.3	历史数据 D_{m_1}	63
4.4	似然度参数更新	63
4.5	传感器运行模式	65
4.6	故障检测与分离算法参数设置	66
5.1	不完整数据举例	73
5.2	不完整数据的可能实现	74
5.3	单种类型数据缺失举例	74
5.4	单种类型数据缺失的可能实现	84
5.5	故障检测与分离算法参数设置	86
5.6	分馏塔控制系统运行模式	90
5.7	分馏塔控制系统中监测器选择	90
5.8	针对分馏塔系统的故障诊断参数设置	91
5.9	采用 EM 算法诊断实验装置故障参数设置	97

插图

1.1	现代自动化系统层次结构	1
1.2	典型控制回路框图	6
1.3	论文内容框架图	9
2.1	开环系统框图	12
2.2	闭环模型诊断测试框图 ($p \geq m$)	12
2.3	闭环模型诊断测试框图 ($m > p$)	13
2.4	闭环系统频率响应框图	13
2.5	单变量控制效果对比图	25
2.6	单变量模型误差诊断结果	26
2.7	多变量控制效果对比图	28
2.8	多变量模型误差诊断结果	29
2.9	系统设计框架	30
2.10	系统架构图	32
2.11	系统软件主界面	33
2.12	系统软件实验页面	34
3.1	时域中的正弦信号与高斯白噪声	41
3.2	信号的频率响应与振荡监测阈值	41
3.3	高斯彩色噪声环境回路振荡监测框图	45
3.4	仿真时域信号	46
3.5	频域中的仿真信号	47
3.6	归一化后的输出量	48
3.7	回路振荡监测结果	49
3.8	工业信号振荡详细分析	52
4.1	典型控制回路框图	56
4.2	单容水箱液位控制系统	64
4.3	三个传感器输出（无偏情况）	66

4.4	三个传感器输出 (y_1 有偏)	67
4.5	贝叶斯诊断交叉验证	68
4.6	数据相互依赖问题	68
4.7	系统模式相互依赖	69
4.8	模式数据与证据数据存在相互依赖	71
5.1	证据数据恢复前后比较	87
5.2	故障诊断交叉验证结果	88
5.3	分馏塔控制系统	89
5.4	分馏塔系统中似然度参数恢复对比	92
5.5	分馏塔系统诊断交叉验证	93
5.6	乒乓球管道装置照片	94
5.7	乒乓球管道装置原理图	95
5.8	装置阶跃响应	96
5.9	证据数据比较	98
5.10	交叉验证结果	98

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库