

学校编码: 10384
学号: 23220141153354

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

仿射非线性系统故障可诊断性分析与设计

Research on the Fault Diagnosability Evaluation and
Design of Affine Nonlinear System

胡晓强

指导教师: 彭侠夫 教授

专业名称: 控制工程

论文提交日期: 2017年 月

论文答辩日期: 2017年 月

学位授予日期: 2017年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2017年

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学 号: 23220141153354

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

仿射非线性系统故障可诊断性分析与设计

Research on the Fault Diagnosability Evaluation and Design
of Affine Nonlinear System

胡晓强

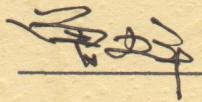
指导教师: 彭侠夫 教授

专业名称: 控 制 工 程

论文提交日期: 2017 年 月

论文答辩日期: 2017 年 月

学位授予日期: 2017 年 月

答辩委员会主席: 

评 阅 人: _____

2017 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）：

12121 姚强

2017年5月14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）：

胡晓强

2017年5月14日

摘要

实际系统大多是非线性的，难以利用线性系统理论建立故障可诊断性的判别条件，再加上噪声干扰的存在，更是在可诊断性评价中引入了随机影响。关于仿射非线性系统故障的可诊断性评价与设计，还没有形成普遍适用的方法。本文基于微分几何理论，针对仿射非线性系统、仿射非线性控制系统以及噪声作用下的仿射非线性系统，对系统故障可诊断性分析与设计方面进行研究，主要内容如下：

定义了非线性系统关于故障的能控性分布与能观性对偶分布。对于同一时间只有一个故障发生的仿射非线性系统，从系统分解的角度给出了非线性系统故障可诊断性的判定条件；在此基础上研究了控制输入对可诊断故障可检测性的影响。

针对存在噪声干扰的单输出仿射非线性系统，分析了扰动噪声的能观性子系统与故障的能观性子系统的差异性，定义了空间相似度、故障漏报率与故障可检测性量化指标；分析对比了两个可检测故障能观子空间之间的差异，定义了故障重复率与故障可分离性量化指标。对于多输出系统，通过将其分解为多个单输出系统进行可诊断性分析。

针对仿射非线性系统满足故障可诊断性的最小数量传感器优化配置问题，提出了一种建立故障传播有向图的新方法，并对贪婪算法进行改进以实现传感器一次故障仍然满足故障可诊断性。以故障能控能观子空间最大为约束条件，建立了优化问题模型，通过改进的 PageRank 算法全局评估各个测点的独立性，以实现测点的传感器优化配置。

将上述理论分析与设计方法应用于点质量卫星控制系统的故障可诊断性问题。再次对其理论推导的正确性和方法的有效性进行验证。

关键词：仿射非线性系统；故障可诊断性；噪声干扰；传感器配置

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

The actual systems mostly are nonlinear and hard to build the criterion of fault diagnosability using linear system theory, not to mention the random effects which noise jamming brings into the systems. There isn't any fault diagnosability evaluation and design method which is universally applicable to affine nonlinear systems. Based on differential geometry theory, this paper studies the fault diagnosability evaluation and design method for affine nonlinear system, affine nonlinear control system and affine nonlinear system under noise. The main contents are arranged as follows:

Fault controllability distribution and fault observability dual distribution are defined. For the affine nonlinear system with one fault at the same time, a differential geometry approach based on system decomposition is proposed on fault diagnosability problem of affine nonlinear systems. On this basis the influence of system control on the fault diagnosability is studied.

For single output affine nonlinear system under noise, three quantitative indexes, similar degree, missing report rate, and fault detection rate, are defined based the difference of observability subsystems between faulty system and non-faulty system. Comparing the observability subsystems between two fault, repeat rate and fault isolation rate are defined to measure how difficulty to separate the faults. For multiple output system, we can analyze its fault diagnosability by converting it into multiple single output systems.

The problem about optimized configuration of minimum number sensors meeting the fault diagnostic is studied. A method is proposed to establish the directional graph of fault propagation. An improved greedy algorithm is offered to achieve the goal that system can still satisfy with fault diagnosability when a sensor is broken. An optimization model, with the constraint of maxing fault controllability and observability subsystem, is proposed. And an improved pagerank algorithm is designed to optimize sensor configuration by globally assessing the independence of every measure point.

The proposed methods are applied to point mass satellite system. And the

effectiveness of these methods is verified again.

Keywords: affine nonlinear system; fault diagnosability; noise jamming; sensor configuration

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 故障可诊断性分析方法研究概况.....	1
1.2.2 故障可诊断性设计方法研究概况.....	3
1.3 本文主要研究内容.....	5
第二章 仿射非线性系统故障可诊断性定性分析	7
2.1 微分几何理论基础.....	7
2.1.1 分布及其性质.....	7
2.1.2 微分同胚及其性质.....	8
2.1.3 非线性系统的分解.....	9
2.2 无输入情况故障可诊断性定性分析.....	10
2.2.1 故障可检测性定性分析.....	10
2.2.2 故障可分离性定性分析.....	11
2.3 控制作用下故障可诊断性定性分析.....	12
2.3.1 仿射非线性控制系统故障可诊断性分析.....	12
2.3.2 输入对于可诊断性的影响.....	14
2.4 仿真验证.....	16
2.4.1 理论分析.....	17
2.4.2 数值模拟.....	18
2.5 本章小结.....	20
第三章 仿射非线性不确定系统故障可诊断性定量评价	23
3.1 扰动作用下故障可检测性定量评价.....	23
3.2 扰动作用下故障可分离性定量评价.....	26
3.3 仿真验证.....	27
3.3.1 理论分析.....	28
3.3.2 数值模拟.....	29
3.4 本章小结.....	32
第四章 满足故障可诊断性的传感器优化配置研究	33
4.1 基于有向图的传感器优化配置方法.....	33
4.1.1 有向图配置方法的基本概念.....	33
4.1.2 有向图模型的建立.....	34
4.1.3 贪婪算法.....	35
4.1.4 改进的贪婪算法.....	37
4.2 基于优化问题的传感器优化配置方法.....	40
4.2.1 优化问题模型.....	40
4.2.2 PageRank 排序算法.....	42

4.2.3 改进的 PageRank 算法.....	43
4.4 算例仿真试验.....	44
4.4.1 理论分析.....	44
4.4.2 数值模拟.....	47
4.5 本章小结.....	49
第五章 航天器控制系统故障可诊断性实现.....	51
5.1 航天器控制系统数学描述.....	51
5.2 航天器控制系统可诊断性分析.....	52
5.3 航天器控制系统传感器优化配置.....	54
5.4 算例仿真试验.....	56
5.5 本章小结.....	58
第六章 总结和展望.....	59
参考文献.....	61
攻读硕士学位期间发表的学术论文.....	67
致 谢.....	69

Contents

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Background and Significance of the Research.....	1
1.2 Summary of Research.....	1
1.2.1 Research status of Fault Diagnosability Analysis Method.....	1
1.2.2 Research status of Fault Diagnosability design Method.....	3
1.3 Main Contents of the Research Subject.....	5
Chapter 2 Qualitative Analysis of Fault Diagnosability for Affine Nonlinear Systems.....	7
2.1 Differential Geometry Basis.....	7
2.1.1 Distribution and its nature.....	7
2.1.2 Differential homeomorphism and its nature.....	8
2.1.3 Decomposition of Nonlinear Systems.....	9
2.2 Qualitative Analysis of Fault Diagnosability Without Control Input.....	10
2.2.1 Qualitative Analysis of Fault Detectability.....	10
2.2.2 Qualitative Analysis of Fault Isolability.....	11
2.3 Qualitative Analysis of Fault Diagnosability Under Control Input.....	12
2.3.1 Fault Diagnosability Analysis for Affine Nonlinear Control Systems.....	12
2.3.2 The Effect of Control Input on The Fault Diagnosability.....	14
2.4 Simulation Verification.....	16
2.4.1 Theoretical Analysis.....	17
2.4.2 Numerical Simulation.....	18
2.5 Chapter Summary.....	20
Chapter 3 Quantitative Evaluation of Fault Diagnosability for Affine Nonlinear Uncertain System.....	23
3.1 Quantitative Evaluation of Fault Detectability Under Disturbance.....	23
3.2 Quantitative Evaluation of Fault Isolability Under Disturbance.....	26
3.3 Simulation Verification.....	27
3.3.1 Theoretical Analysis.....	28
3.3.2 Numerical Simulation.....	29
3.4 Chapter Summary.....	32
Chapter 4 Research on Sensor Optimal Configuration for Fault Diagnosability.....	33
4.1 Sensor Optimal Configuration Method Based on Directed Graph.....	33
4.1.1 Basic Concept of Directed Graph Configuration Method.....	33
4.1.2 Establishment of Directed Graph Model.....	34
4.1.3 The Greedy Algorithm.....	35
4.1.4 Improved Greedy Algorithm.....	37
4.2 Sensor Optimization Method Based on Optimization Problem.....	40

4.2.1 Optimization Problem Model.....	40
4.2.2 The Pagerank Sorting Algorithm.....	42
4.2.3 Improved PageRank Algorithm.....	43
4.4 Simulation Verification.....	44
4.4.1 Theoretical Analysis.....	44
4.4.2 Numerical Simulation.....	47
4.5 Chapter Summary.....	49
Chapter 5 Fault Diagnosability of Spacecraft Control System.....	51
5.1 Mathematical Description of Spacecraft Control System.....	51
5.2 Fault Diagnosability Analysis of Spacecraft Control System.....	52
5.3 Sensor Optimal Configuration of Spacecraft Control System.....	54
5.4 Numerical Simulation.....	56
5.5 Chapter Summary.....	58
Chapter 6 Summarization and Prospect.....	59
References.....	61
Published and Accepted Papers of Author.....	67
Acknowledge.....	69

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

伴随着科技的迅猛发展，当今工业系统的规模和复杂程度都在不断提高，系统运行的安全性与可靠性得到越来越多的关注。故障诊断技术作为提高系统运行的可靠性、降低系统运行风险的重要方法，在几十年中得到了迅速的发展。但是，这些故障诊断方法关注的是对故障信号的处理方法，并没有考虑诊断系统对于故障发生的可诊断能力。

故障可诊断性主要指当发生一个或多个故障时，诊断系统检测并识别故障原因的能力，包括故障可检测性和故障可分离性。其研究主要包括 2 个方面：1) 故障可诊断性评价，即在给定的系统输出情况下，针对研究的故障集合，给出其可检测、不可检测，分离和不分离等结论；2) 故障可诊断性设计，又称为满足故障可诊断性的测点优化配置，即针对研究的故障集合，给出使系统最大程度满足故障可检测与可分离的最优测点集合。

就目的而言，对故障可诊断性的评价是量化系统故障诊断能力的一个重要问题。第一，故障可诊断性对于系统既定故障构建诊断系统或某一诊断系统的可行性进行判断。第二，故障可诊断分析对于已知的故障检测与分离算法(FDI)的性能进行了评估。第三，故障可诊断性分析结果对于故障诊断系统的构建具有指导意义。

为了实时监测系统的状态，及时检测并分离故障，需要给系统配置一定数量的传感器。一般来说，系统配置的传感器越多，采集到的状态信息越完整，故障诊断效果越好。然而，由于技术和经济等原因，可供系统使用的资源具有一定的限制，这就要求必须研究如何在有限资源条件下，合理、节约地分布监控传感器，以尽快地检测出故障征兆，这是满足故障可诊断性的传感器优化配置要研究的问题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 故障可诊断性分析方法研究概况

由于可使用定量或定性模型对系统进行描述，故障可诊断性评价也划分为基于

定量模型和定性模型两个方面，其大体分类可见图 1-1。

基于定量模型的故障可诊断性评价又将故障可诊断性划分为两种定义：基于系统属性的故障可诊断性与基于性能的故障可诊断性^[1,2]。第一种定义将故障的可检测性与可分离性单纯的归为系统所具有的某一基本属性，与拟采取的故障诊断算法无关，其关注的是故障与输出之间的联系。文[3]–[8]基于该种思想，从不同角度提出了多种衡量系统可诊断性的指标：(Del Gobbo D, 1999)针对线性系统，通过分析对比故障输出范数与扰动输出范数之间的大小关系，定义了一种简单的故障可检测性指标^[3]；同样针对线性系统解析模型，(Basseille M, 1999)基于故障传递函数的可逆性、故障扩展状态系统的可观性定义了故障的可检测性^[4]；(Eriksson D, 2011, 2013, Li W, 2015)将系统故障的可诊断问题转化为多元分布相似度评价问题^[5-8]。(Papakostas D K, 1996, Hines J W, 2006)通过对比量化无故障输出分布与故障输出分布的差异性，将概率统计的理论运用到故障的可检测性分析之中^[9,10]。相对的，第二种定义将故障的可检测性与可分离性做为衡量某种特定 FDI 算法的性能指标，主要关注故障与残差之间的关联。(Staroswiecki M, 1999)结合无故障系统分析冗余关系 (ARRs) 与故障模型，对非线性系统的故障可检测性进行了定性评价^[11]。(Kościelny J M, 2006, Low C B, 2010)通过故障残差关联矩阵 (FSM) 对故障的可检测性与可分离性进行了分析^[12,13]。统计思想同样被用于基于性能的故障可诊断分析，(Hines J W, 2006)使用残差的自灵敏度与模型不确定度，建立了仪器校正检验 (ICV) 性能指标，而 (Basseille M, 1999) 则使用了 Kullback 距离对无故障分布与故障分布的距离进行了度量。(Nyberg M, 2002)细分了强可检测性与弱可检测性的区别，并基于线性系统模型，对两者各提出了几种度量指标^[14]。除此之外，亦有一些其他的方法通过信息熵、符号有向图 (SDG) 或 Petri 网对故障的可检测性进行度量^[15-17]。

微分几何方法是一种常用的分析与设计非线性系统的工具^[18,19]。(Persil C D, 1999)通过不可观分布将仅受单个故障影响的子系统分离出来，通过滤波器设计的可行性对故障的可诊断性进行分析^[20]。(Peng X, 2015)基于输出不变性原理给出了故障可检测性的判定方法，并设计了衡量整个仿射非线性控制系统故障可检测性的指标^[21]。(李文博, 2015)通过对故障特征向量与不变最小对偶分布的空间相似性度量，对故障的可诊断性进行了量化评价^[22]。(林立雄, 2015)通过求取故障相对输出的故障特征指数，给出了仿射非线性系统故障可检测性的判定方法^[23]。(Xing Z, 2016)针对扰动作用下的仿射非线性控制系统，提出只有当存在与扰动解耦而与故障不解

耦的输出时, 该故障才可以在扰动影响下实现可诊断性^[24]。

对于不能准确建立定量模型的系统, 为了分析故障的可诊断性, 需要根据故障影响建立故障的关联矩阵或关联关系图, 或研究受到故障影响的变量集合, 通过定性模型分析故障集合与可测信息之间的关联情况, 给出故障的可诊断性判定结果(基于关联关系图的故障可诊断性评价、基于数据驱动的故障可诊断性评价)^[25-28]。

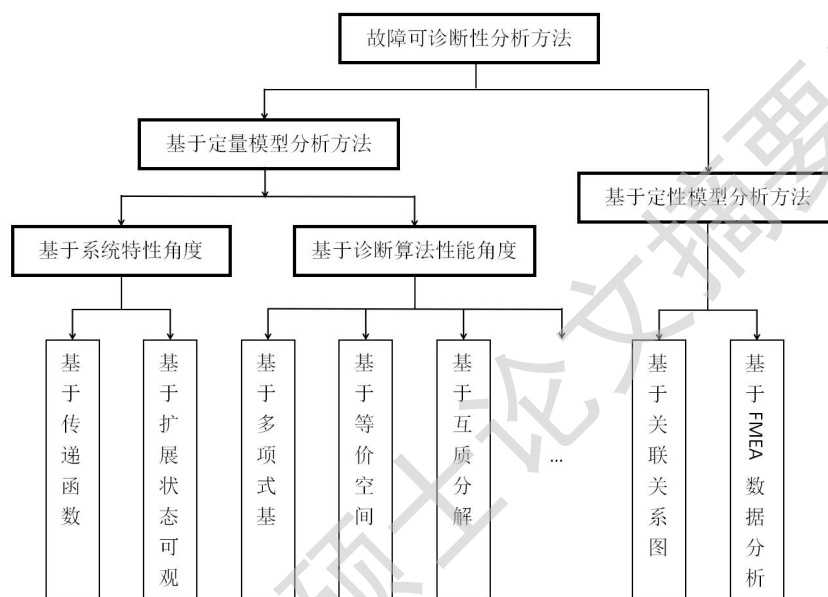


图 1-1: 故障可诊断性分析方法

1.2.2 故障可诊断性设计方法研究概况

传感器优化配置问题的研究始于 20 世纪 70 年代末, 讨论的优化设计指标主要是: 配置成本、状态可估计性、状态估计精度和状态观测系统的可靠性等。以满足故障可诊断性为优化目标的研究还相对较少, 相较于故障诊断领域, 其传感器优化配置的研究还相当不充分, 而且理论研究还很不完善。现今, 满足故障可诊断性的传感器优化配置方法, 大体上可以划分为两大部分: 基于定性模型分析的测点优化配置与基于优化问题的测点优化配置。

基于定性模型分析的方法首先建立故障影响的定性模型, 再依据图论的知识对测点进行传感器的优化配置。根据建立定性模型的方法不同, 又可以分为基于故障传播关系的测点优化配置与基于变量约束关系的测点优化配置。基于故障传播关系的测点优化配置方法首先建立描述故障传播关系的有向图(DG)或符号有向图(SDG),

然后根据建立的故障传播有向图，研究故障传播路径，寻找受到故障影响的状态变量集合，并以故障和状态变量为节点，建立相应的二分图，在此基础上以一定的准则搜寻测点，获取最优配置的测点集合。(Rao, 1999)从系统的实际物理结构中导出系统的有向图(DG)，以改进的贪婪算法求出最小传感器配置子集^[29]。(刘睿, 2014)以航天器部件为例对上述方法进行了工程上的实现^[30]。与 Rao 不同，(魏环, 2012)将贪婪算法可能引入的冗余配置集中于算法的后半部分进行分析与删除^[31]。(宋其江, 2009)引入模糊概率，提出了一种改进的 EPSDG 模型，集成了更多的定量信息^[32]。(Commault, 2003)基于线性系统的状态空间描述，讨论了有向图最大链路的规模与系统故障可诊断性的关系，将有向图进行了等价分解与降维后实现了对传感器的优化配置^[33]。(张博, 2011)基于 Petri 网建立了离散事件系统的故障诊断模型，并利用图论方法开发了机械系统诊断传感器优化配置算法^[34]。(Lambert, 1977)运用故障树的分析方法，通过研究故障源对于过程变量的影响进行传感器的优化配置^[35]。基于变量约束关系的优化配置方法，先对系统的定性或定量模型进行分析，给出测点之间的约束关系链，再根据故障的影响模式将其添加到关系链中，最后通过提取其中的关键变量求得最优测点配置方案。对于线性或非线性微分代数方程，文[36-38]使用 Dulmage-Mendelsohn 分解技术，将系统的微分代数方程组分为 3 个部分：过约束部分、完全约束部分与欠约束部分。过约束部分由系统中的冗余关系式组成，包含于该部分中的故障在现有的输出条件下便具有可检测性；完整约束部分中的变量数量与等式数量相同，各变量唯一确定，包含于该部分中的故障，在现有的输出条件下不具有可检测性，但可以通过提取测点之间的偏序关系，添加测点，并以最少传感器数量实现该部分故障可诊断配置；欠约束部分中的变量数量多于等式数量，包含于该部分中的故障，用此方法无法获取满足故障可诊断性的测点优化配置方案。

基于优化问题的测点优化配置以故障信息获取效率、最大概率检测故障、传感器系统可靠性、传感器配置的经济性等一个或多个为优化目标，以传感器数量、故障可检测性、故障可分离性等为约束条件，建立传感器优化问题，以各种优化算法搜寻传感器的最优配置子集。(Azam, 2004)引入故障发生概率的概念，提出了一种基于优化问题的模型，通过有效的算法训练，确定了对多故障组合诊断的传感器配置^[39]。(Rosich, 2008)以一种增量迭代算法，避免了(Sarrat, 2008)所使用的穷举法中出现的计算复杂度随候选传感器数量的增加而呈现指数增长的缺点^[40, 41]。(桂卫华, 2007, 彭涛, 2012)讨论了线性系统等价空间的故障观测器，将传感器配置问题

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