

杨俊起 著

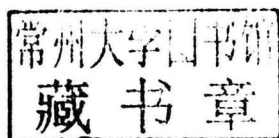
未知输入观测器 设计理论及应用



煤炭工业出版社

未知输入观测器设计 理论及应用

杨俊起 著



煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

未知输入观测器设计理论及应用/杨俊起著. --北京: 煤炭工业出版社, 2018

ISBN 978-7-5020-6529-4

I. ①未… II. ①杨… III. ①故障诊断系统—研究
IV. ①TP277.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 046994 号

未知输入观测器设计理论及应用

著 者 杨俊起
责任编辑 徐 武
编 辑 杜 秋
责任校对 尤 爽
封面设计 安德馨

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010-84657898 (总编室)
010-64018321 (发行部) 010-84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 北京建宏印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 850mm×1168mm¹/₃₂ 印张 5 字数 126 千字

版 次 2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月第 1 次印刷

社内编号 9409 定价 22.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010-84657880

内 容 提 要

本书总结了作者在未知输入观测器设计、基于模型的故障诊断和混沌系统同步及保密通信方面的研究成果。主要包括：在未知输入匹配条件不满足情形下，不确定控制系统的未知输入观测器设计；控制系统具有建模不确定性或外部干扰，同时具有执行器故障和传感器故障两类不同故障的检测、隔离和重构问题；驱动-响应框架下的混沌系统同步及基于混沌系统的保密通信机制。

本书可作为高等学校自动化、信息与计算科学、通信工程、系统工程、控制科学与工程等专业高年级本科生、研究生、教师的参考书，也可供从事相关专业的科研人员、工程技术人员参考使用。



前 言

状态估计或观测器设计自 20 世纪六七十年代由 Luenberger 提出以来,受到了学者的极大关注,已被广泛应用于控制和信号处理领域。对很多实际系统而言,系统状态不完全可测,或者测量的代价太高,使得基于观测器的状态反馈设计无法实施。因此,由观测器产生的状态估计取代不可测的实际状态,用于状态反馈设计是观测器设计的最初目的。此外,观测器或状态估计理论在过程辨识、故障检测与隔离、复杂系统同步、混沌系统保密通信、系统监控等研究领域也具有广泛的应用。

最初的观测器设计并未考虑系统所具有的不确定性或外部施加的未知信息,随着观测器设计理论的发展,学者提出了能够绕开未知输入的影响并估计系统状态的方法,即未知输入观测器设计理论;之后,考虑了同时进行状态和未知输入估计的观测器设计问题,并进一步把该问题的解决思想扩展到具有扰动输出的控制系统。对于未知输入观测器设计,其充分必要条件是,系统的不变零点在左半复平面内且观测器匹配条件成立。然而,对于一些实际的物理系统,观测器匹配条件是一个很强的限制条件,因此突破该匹配条件的限制,进行未知输入观测器设计具有重要意义。

本书针对具有未知输入和扰动输出等不确定信息的控制系统,一方面,在未知输入观测器匹配条件不成立的情况下,研究匹配条件的突破方法,并提出能够对系统状态、未知输入和扰动输出同时进行估计的未知输入观测器设计方法,使得对未知信息



的重构并没有直接用到系统输出信息的微分,避免了因使用系统输出微分而引入高频噪声;另一方面,将提出的未知输入观测器设计方法应用到控制系统的故障诊断领域,考虑系统在具有建模不确定性或外部干扰时执行器故障和传感器故障两类不同故障等复杂情形下的故障诊断问题,以期实现对系统两类故障的检测、隔离和信号重构的目的。此外,在非线性系统未知输入观测器设计的基础上,对混沌系统同步及基于混沌系统的保密通信问题展开研究,通过设计全维或降维未知输入观测器,达到驱动-响应框架下的混沌系统同步。最后提出保密信息还原方法及基于混沌系统的保密通信机制。

本书得到了国家自然科学基金(61403129)、河南省高等学校青年骨干教师资助计划(2015GGJS-064)、河南理工大学博士基金(B2015-30)、河南省科技创新人才项目(164100510004)、河南省科技创新型科研团队(CXTD2016065)、河南理工大学创新型科研团队(T2017-1)的资助。本书的研究成果得到同济大学朱芳来教授的指导和帮助;在本书的编写过程中,得到了河南理工大学电气工程与自动化学院的大力支持,在此表示衷心的感谢。在图书的出版过程中,煤炭工业出版社的徐武编辑为该书的出版提出了很多中肯的修改意见,在此一并感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

作者

2018年2月于河南理工大学



目 次

1 绪论	1
1.1 未知输入观测器的提出和发展	1
1.2 基于未知输入观测器理论的故障诊断	2
1.3 基于观测器理论的混沌系统同步及保密通信	12
1.4 有待解决的问题及其发展趋势	13
1.5 本书主要内容	17
1.6 符号约定	17
参考文献	18
2 输出扰动线性系统 UIO 设计	31
2.1 引言	31
2.2 系统描述与增广系统构造	32
2.3 不匹配条件下未知输入观测器设计	35
2.4 仿真实例	44
2.5 小结	56
参考文献	56
3 不确定线性系统执行器和传感器故障诊断	58
3.1 引言	58
3.2 系统描述与重要引理	59
3.3 基于鲁棒滑模 UIO 的故障检测和隔离	61
3.4 基于鲁棒滑模 UIO 的故障重构	70
3.5 实例仿真	73



3.6	小结	85
	参考文献	86
4	输出扰动非线性系统 UIO 设计	89
4.1	引言	89
4.2	系统描述与引理	90
4.3	基于自适应滑模观测器的状态估计	91
4.4	实例仿真	99
4.5	小结	104
	参考文献	105
5	非线性系统执行器和传感器故障诊断	106
5.1	引言	106
5.2	系统描述与假设	106
5.3	基于高增益观测器的故障检测和隔离	107
5.4	实例仿真	121
5.5	小结	128
	参考文献	129
6	UIO 在混沌同步及保密通信中的应用	130
6.1	引言	130
6.2	问题描述	131
6.3	基于降维观测器的混沌系统同步	132
6.4	混沌同步与保密通信机制	136
6.5	实例仿真	141
6.6	小结	148
	参考文献	148



1 绪 论

1.1 未知输入观测器的提出和发展

自 20 世纪六七十年代 Luenberger 提出观测器设计思想以来^[1], 基于模型的状态估计理论得到了广泛关注。早期的控制系统在没有考虑未知输入, 即模型的参数不确定性、外部干扰、执行器故障等未知信号的情形下, 提出用于估计系统状态的观测器设计方法。但由于实际控制系统中往往具有模型不确定性和受到外部干扰等因素, 针对设计含有未知输入的控制系统, 设计能够估计系统状态或未知信息的未知输入观测器 (鲁棒观测器) 成为关注的热点。

早期未知输入观测器主要采取避免未知输入影响的方法, 而不是去重构未知输入信息, 进而设计全维或降维状态观测器^[2,3], 即研究如何绕开未知输入的影响, 仅估计出系统状态的未知输入观测器设计。后来, 进一步考虑了同时进行状态和未知输入估计的未知输入观测器设计方法^[4-7,8,9]。Corless 和 Tu 给出了状态和输入估计的未知输入观测器存在的充分条件^[8]。在文献 [4] 中, 对一类非线性系统, 基于 Riccati 不等式和线性矩阵不等式技术, 讨论了同时进行状态和输入估计的未知输入观测器设计问题。Trinh 等设计了用于估计状态和输入的降维观测器设计方法^[5,6]。文献 [9] 给出了一种高增益滑模未知输入观测器设计方法, 在突破观测器匹配条件的情况下, 实现了对系统状态和未知输入的估计。

由于观测器设计用到原系统的可测输出信息, 那么当系统具有输出扰动时的观测器设计问题, 成为下一步未知输入观测器设



计研究的重要课题。针对都具有未知输入和扰动输入的未知输入观测器设计问题,已有一些用于处理输出扰动的研究成果^[10-13]。Gao 和 Wang 提出了一种用于解耦输出扰动的比例-微分观测器设计方法,从而实现对系统状态估计的目的^[10]。Ahrens 和 Khalil 提出了一种高增益观测器设计方法,用过增益值切换实现系统状态的估计,并把输入扰动状态估计误差的一个领域内^[11]。Sanfelice 和 Praly 利用在线自适应增益方法处理输出扰动和系统不确定性,发展了一种高增益未知输入给出设计方法^[12]。文献[13]基于描述系统的方法,针对具有输入和输出扰动的控制系统,给出了一种用以估计系统状态、执行器故障、传感器故障的高增益估计技术。

然而,上述众多关于未知输入观测器的设计方法,大多是在观测器匹配条件满足的情形下提出的,本书主要研究在匹配条件不满足时,考虑系统同时具有未知输入和输出扰动的未知输入观测器设计方法及其应用。

1.2 基于未知输入观测器理论的故障诊断

1.2.1 控制系统故障诊断的意义

现代科学技术迅猛发展,工业系统的规模、复杂程度和自动化、智能化水平越来越高,使得对控制系统的可用性、费用、效率、可靠性、安全性和环境保护等问题的研究变得越来越重要。安全性对核反应堆、化工系统、飞机系统等是非常重要的,对汽车、高速运输火车等系统也同样重要。如果系统出现故障而不能及时检测并采取相应的措施排除掉,就可能导致整个系统失效、瘫痪,故障的后果往往是极其严重的,如人身伤亡、对环境的冲击破坏以及经济损失等。为了保障实际系统的可靠性、可维护性和安全性,迫切需要一个监控系统来监督整个控制系统的运行状态,对检测到的系统变化或故障信息采取相应措施,防止灾难性事故的发生。同时,能够在故障发展早期发现并指示故障的



在线监控和故障诊断技术对提高系统的可靠性是非常重要的。早期的故障诊断可避免造成人员伤害和设备的灾难性事故,精确的诊断能帮助人们做出正确的决策,进行紧急修复和抢救。因此,故障诊断成为保证系统处于良好运行状态的一项重要任务。

自动化装置趋于复杂的发展趋势以及控制系统不断增长的高可用性和高可靠性的要求,一直刺激着故障诊断技术的发展。有效的数学建模方法、状态估计方法、系统辨识技术以及计算机技术的快速发展与进步,是故障诊断技术发展的强大推动力。基于观测器的故障诊断方法可以更充分地利用系统内部的深层信息,有利于实现故障隔离、辨识以及重构,因而得到了广泛应用和更多关注。传统基于观测器的故障诊断方法主要是利用对残差信号的分析来判断故障发生的情形,由于残差信号并不能直接反映故障对系统状态的影响,因而基于观测器产生残差进行故障诊断是一种间接方法。近年来,故障重构方法为基于观测器的故障诊断技术带来一种新思路,故障重构的思想是,根据被故障影响的过程变量的测量值估计出故障值,并对故障信号进行跟踪。因此,利用故障重构在实现故障检测和隔离的同时,还可以辨识故障类型,估计故障的严重程度,为系统采取有效措施消除故障,同时也为判断故障对生产过程的影响提供更充分的依据,是故障容错技术的基础。

在基于观测器的故障检测和隔离研究中,若是没有充分考虑实际系统中存在的噪声、扰动、模型参数摄动及建模误差等不确定性因素,将严重影响故障检测与诊断的性能,导致对故障的漏报或误报。此外,装备系统所具有的复杂而多样的非线性特征,也给研究工作增加了不少难度。总之,在非线性被控对象模型存在不确定性的情况下,保障故障检测与诊断的准确性,是基于观测器的故障诊断研究中一个难点和热点问题。

1.2.2 传统的故障检测、隔离和重构方法

当控制系统本身或执行器、传感器出现故障时,需要故障诊



断系统进行检测,并能够辨识和隔离故障。故障诊断算法包括故障检测、故障隔离和故障辨识。基于硬件冗余^[14-17]进行故障诊断是传统的故障诊断方法,它能够运用多传感器、执行器、计算机和软件进行测量,从而实现故障诊断。硬件冗余有两种情形:一种是利用同样的或类似功能的传感器测量同一变量;另一种是利用不同种类的传感器测量不同的变量,但它们的输出值是彼此相关的。然而,基于硬件冗余方法遇到的主要问题是,增加了额外设备、维护费用和容纳冗余设备的空间。另一个可供选择的故障诊断方法是基于解析冗余的方法,它是通过分析系统输入和测量输出之间的冗余关系产生残差信号,这种方法的优点是不需要增加额外的硬件。在解析冗余方法中,对不同变量进行一致性检查所产生的差异称作残差信号;此外,解析冗余方法是通过运用被监控系统的数学模型实施的,因此也被称为基于模型的故障诊断方法。由于解析冗余不需要增加额外硬件设备,具有成本低、易实现的特点,一直都是故障诊断技术研究的主要方向。

基于解析模型的残差产生的方法可分为基于观测器的方法、等价空间方法、辨识和参数估计方法、结构化残差集方法和固定方向残差矢量方法,具体可以参看文献[18-20];而在所有基于模型的故障诊断方法中,基于观测器的故障诊断方法是目前最主要的方法之一。图1-1给出了基于解析模型的故障检测和隔离原理。

基于解析模型的故障诊断方法通过被诊断对象的可测信息和由模型表达的系统信息进行比较,从而产生残差,并对残差进行分析和处理,从而实现故障检测和隔离。该方法需要建立被诊断对象的精确数学模型,优点是充分利用系统的内部知识。基于数学模型的故障检测、隔离和重构方法,其步骤包括残差产生和残差评价两个阶段。根据残差生成方法的不同,可以将控制系统的故障检测、隔离和重构技术分为以下几类:

(1) 基于观测器状态估计的故障检测。在基于观测器或滤

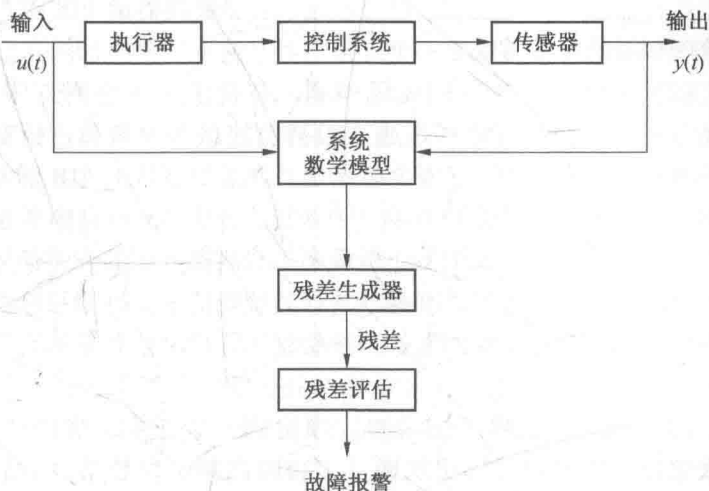


图 1-1 基于模型的 FDI 方法原理图

波器的故障诊断方法，是利用系统的可测信息对系统无故障情况下的输出进行估计。其基本思想是：重构被控过程状态，通过与可测变量比较，构成残差序列，从残差序列中把故障检测出来，并做进一步的故障分离、估计与决策，即故障隔离和重构。该方法主要研究如何提高检测系统对建模误差、扰动和噪声等未知输入的鲁棒性以及系统对早期故障的灵敏度等方面。确定性系统^[21-25]可采用经典的 Luenberger 观测器进行估计，而随机性系统则可以通过卡尔曼滤波器的方法进行估计。本书主要针对基于观测器的故障诊断方法实现对控制系统的故障检测、隔离和重构。基于观测器产生系统输出的估计信息后，通过加权输出估计误差来产生残差，进而通过残差判断系统故障发生与否；在已有的文献中，观测器增益选择的灵活性导致了各种各样的故障检测和隔离方案的提出。控制系统状态空间模型以及观测器在控制理论中被广泛应用，如飞机横轴自动驾驶仪采用检测滤波法，水翼艇、机器人、三容水箱采用观测器方法，天然气管线采用自适应



状态估计方法^[15]，众多现实应用使得基于观测器的 FDI 方法成为该领域最流行的方法之一。

(2) 基于等价空间的故障检测。在基于等价空间方法中，残差信号（或奇偶矢量）是通过对被监控系统测量值进行适当的一致性检验产生的。已有文献指出，基于观测器的 FDI 和基于奇偶矢量的 FDI 方法之间存在一些对应关系^[26]，即奇偶矢量方法等价于采用最小拍观测器。由最小拍观测器生成的残差信号等价于非最小拍观测器生成且经滤波后的残差信号，这就意味着与没有任何限制的基于观测器的方法相比，等价空间关系法在设计上缺少一些灵活性。

(3) 基于参数辨识技术的故障检测。基于系统辨识技术，参数估计方法得到了较快发展^[27,28]，因而基于参数估计的故障诊断方法得到了快速发展。在该方法中，故障通过诸如摩擦力、电阻、电感和电容等物理系统参数进行反映给出，故障检测的基本思想是：用传统的参数估计方法对实际的过程参数进行在线估计，其结果和无故障情况下的参考模型参数进行比较，从而判断故障是否发生。应当指出，基于参数估计的故障检测方法的突出限制是输入信号应假设是持续的。假如输入信号提供了用来估计系统参数的足够信息，那么这个假设是满足的；然而，一些工业系统并不允许输入连续的激励信号到工业生产过程中^[29]。

(4) 基于结构化残差集的故障隔离。在实现对控制系统的故障检测之后，下一步是从众多的故障中隔离出某一特殊的故障，即故障隔离。如果控制系统本身出现故障，或执行器与传感器出现故障，可以通过故障隔离技术将执行器或传感器故障从其他故障中辨识出来。对于故障检测，仅仅需要一个残差信号即可实现；而对于故障隔离则需要一个残差集。完成故障隔离的一种方法是，设计一个结构性残差集合，使得其中每个残差只对一个故障子集敏感，而对其他故障集具有鲁棒性。对某一特定故障敏感而对其他故障不敏感的残差集称为结构化残差集，其设计过程



包含两个步骤：第一步，根据指定的故障隔离任务确定残差和故障之间的敏感性和不敏感性；第二步，根据残差对特定故障的敏感与不敏感性，设计残差生成器。在第二步中，可以利用诸如基于观测器的方法或基于等价空间法的残差生成技术来设计残差集。结构化残差集的主要优点是：故障诊断分析问题被简化为确定残差集中的哪些残差超过了它们各自阈值的问题。目前已有一些结构化残差生成方案被提出，请参看文献 [19] 和 [30]。在专用残差集中^[30]，所有的故障能够被同时检测，然而对于一些实际系统，设计这样的残差集是非常困难的，且没有获得其他期望性能要求以及对不确定性和建模误差具有鲁棒性的设计自由度。更为重要的是，设计结构化残差集的必要条件独立于故障信号。在文献 [19] 中，介绍了一种广义残差集方法，尽管该方法对不确定性和模型误差具有鲁棒性，但是它仅仅能够检测单一故障。

(5) 基于固定方向残差矢量的故障隔离。故障隔离的另一种方法是设计方向残差矢量，即在残差空间内，方向残差矢量在某一固定、与某具体故障有关的方向上响应某具体的故障，即

$$r[t|f_i(t)] = \alpha_i(t)l_i \quad i \in \{1, 2, \dots, g\}$$

其中，常矢量 l_i 是残差空间中第 i 种故障的特征方向， α_i 是一标量，其依赖于故障的大小和动态特性。基于固定方向残差，故障隔离问题就变成确定所生成的残差矢量与哪一个已知故障方向最接近的问题。为了可靠地隔离故障，每个故障特征只能与唯一的一类故障有关^[14]。

总的来说，与方向残差矢量方法相比，结构化残差集方法的求解更灵活。因为方向残差矢量方法的设计目标是产生满足故障方向接近这一可隔离条件的一个残差向量，而结构化残差集方法中只要求生成残差集，所以具有更大的设计灵活度。

非线性系统的 FDI 方案设计和分析问题得到了广泛研究^[29]，其中大多数是对线性系统 FDI 方法的扩展。为解决非线性系统的



FDI 问题, 一些基于观测器的 FDI 方法得到了快速发展, 其中包括被扩展到非线性系统未知输入观测器方法^[31]、自适应非线性观测器方法^[32]和非线性系统滑模观测器方法^[33-35]。Persis 和 Isidori^[36,37]扩展了 Massoumnia 的方法^[30], 文献 [36] 给出了非线性系统故障检测和隔离有解的充分必要条件; 文献 [37] 进一步扩展了文献 [36] 中的结论, 并将其应用到具有输出噪声的状态仿射系统。Hammouri 等^[38]运用几何学方法讨论了一类双线性系统的故障检测和隔离问题。在文献 [39] 中, 非线性几何学方法被成功地应用到遭到不同类型执行器故障的某飞行器非线性纵向模型中。

(6) 基于观测器的故障重构技术。在基于模型的故障检测、隔离和重构技术中, 基于观测器设计方法实现 FDI 的思路是: 通过系统的已知信息设计故障检测观测器, 以观测器的输出和系统实际输出之差的函数作为残差来确定系统是否发生故障。然而, 多数已有的故障检测方法只是检测了故障是否发生, 而不考虑究竟是执行器出现了故障还是传感器出现了故障, 或者是哪个执行器或传感器出现了故障。为了达到控制的目的, 还需要进一步确定哪个执行器或哪个传感器通道发生了故障, 从而达到故障隔离的目的。然而当故障发生时, 故障检测和隔离技术并不能给出故障信号的频率、大小等更为详细的信息, 而故障重构技术不但可以指出故障是否发生, 还可以还原故障信号的波形, 为进一步进行控制系统容错控制打下了基础, 因此故障重构技术对控制系统的稳定性等研究具有更大意义。

在基于解析模型的故障重构技术中, 一种是设计滑模观测器并利用等价输出注入的概念重构故障^[32]; 另一种是本书中设计的故障重构方法, 其实质是借助输出微分估计对故障信号进行最小二乘意义上的代数重构。

1.2.3 基于观测器的故障检测、隔离和重构

控制系统故障诊断得到国内外学者的广泛重视, 在基于观测



器的 FDI 方法中, 具体可分为基于滑模观测器的 FDI、基于自适应观测器的 FDI、基于描述系统的 FDI、基于线性矩阵不等式 (LMI) 技术或 H_∞ 观测器的 FDI 方法。

在基于滑模观测器的 FDI 方法中, 其中, 文献 [40] 针对不确定动态系统, 以滑模观测器为基础, 利用状态和输出变换以及奇异值分解等方法对系统进行降阶, 提出了一种鲁棒故障重构观测器, 并在此基础上讨论了执行器故障检测方法, 给出了一种执行器故障重构方法。王莹等针对不确定控制系统的故障诊断问题, 提出一种利用滑模观测器进行故障检测与重构的方法, 实现了系统的执行机构和传感器故障重构^[41]。栾家辉等针对导弹姿态控制系统的故障情况, 阐述了一种基于滑模观测器的故障诊断方法^[42]。文献 [43] 提出基于滑模观测器的非线性系统鲁棒残差生成与故障检测方法, 并针对机电系统中常见的仿射非线性系统执行器故障诊断问题, 提出了鲁棒故障重构与容错控制集成设计方法。于金咏在文献 [44] 中将基于滑模观测器的线性系统故障重构方法应用于车辆发动机电子节气门控制系统的执行器故障和传感器故障重构问题中。何静利用滑模变结构对未知输入扰动的不变性, 移除外界扰动对残差的影响, 使残差只对故障信号敏感, 从而提高故障检测的准确性^[45]。Edwards 提出一种特殊的滑模观测器, 用以解决故障检测和隔离问题, 利用等价输出注入的概念重构故障信号, 使得即使系统存在故障的情况下, 也能利用滑模运行得到保证, 从而在一定条件下重构故障^[36], 该方法在文献 [46] 和 [47] 中被 Tan 和 Edwards 进行了推广, 考虑了传感器故障出现的情况。文献 [48-50] 对不确定线性或非线性控制系统, 基于滑模观测器实现了状态估计和故障重构。申忠宇等在 Edwards 滑模观测器设计思想的基础上, 提出具有未知输入干扰的鲁棒滑模观测器设计方法, 采用奇异值分解技术, 使设计的鲁棒滑模观测器对系统不确定性以及外界干扰具有鲁棒性^[51]。文献 [52] 给出了一种基于自适应全维和降维观测器的故障检