



华夏英才基金学术文库

杨光红 王 恒 李霄剑 著

# 基于模型的线性控制 系统故障检测方法



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)



华夏英才基金学术文库

# 基于模型的线性控制 系统故障检测方法

杨光红 王 恒 李霄剑 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书介绍了基于模型的线性控制系统故障检测方法,突出了基于稳态和依赖于伺服信号的检测技术,解决了小幅值卡死故障检测问题。此外,本书对线性不确定系统的同时故障检测与控制器设计问题作了详细阐述。利用有限频方法刻画故障和干扰的频域特征,结合广义 KYP 引理来设计各种故障检测系统,是本书的又一特点。

本书可供高等院校相关专业本科生、研究生以及对故障检测感兴趣的科研工作者、工程技术人员参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

基于模型的线性控制系统故障检测方法/杨光红,王恒,李霄剑著.

—北京:科学出版社,2010  
(华夏英才基金学术文库)

ISBN 978-7-03-029070-0

I. 基… II. ①杨… ②王… ③李… III. 线性控制系统-故障检测  
IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 186694 号

---

责任编辑:王志欣 汤 枫/责任校对:刘小梅

责任印制:赵 博/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2010年9月第一版 开本: B5 (720 × 1000)

2010年9月第一次印刷 印张: 11 3/4

印数: 1—3 000 字数: 227 000

定价: 40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

随着工业过程和航空航天领域对系统可靠性和安全性要求的提高,故障检测已经成为当前研究的热门课题之一。故障检测方法大体可以分为基于数据和基于模型两种。基于数据的方法主要是通过采集系统数据,利用一些统计分析的工具来确定系统有无故障,该方法主要应用于各种生产过程的故障监测,如化工生产、半导体生产过程等。在对系统建立精确数学模型的基础上,人们提出了基于模型的故障检测方法。这一方法可以快速检测系统已经发生的故障,适用于一些飞行控制系统等。需要指出的是,虽然基于模型的方法已经得到长足的发展,但是某些故障检测技术问题远远没有解决。例如,采用加权函数来刻画故障频率范围,会带来不准确性,无法检测小幅值卡死故障等。

本书在作者近年来工作的基础上,给出了新的基于模型的故障检测方法,解决了频率加权带来的不准确性问题,可以准确地刻画故障和干扰的有限频特征;提出了基于稳态和基于有限频伺服信号的故障检测方法,可以有效地检测幅值很小的卡死型故障,尤其是中断故障。这是已有故障检测技术无法解决的。另外,本书针对实际系统中常常存在的不确定性情况,研究系统含有多胞不确定性时的故障检测问题。将本书的一些结果用于 VTOL 飞机和 F-18 战斗机的故障检测滤波器或观测器设计,仿真算例验证本书提出方法的优越性和有效性。

全书共 11 章。第 1、2 章系统地分析和总结了故障检测这一前沿研究领域的发展现状及研究方法,给出与本书相关的一些预备知识。第 3、4 章分别研究线性系统没有不确定性、具有不确定性时的故障检测问题。通过同时满足  $\mathcal{H}_2$  和  $\mathcal{H}_\infty$  性能指标,故障敏感性和干扰的鲁棒性都得到了增强,引入新提出的广义 KYP 引理来描述这两个有限频性能指标,可以对有限频性能指标进行直接处理,避免了加权函数引入的保守性。第 5、6 章分别考虑具有多胞不确定性的线性系统、线性参数变化系统的同时故障检测与控制问题。第 7 章主要考虑的是对线性不确定系统的故障估计问题。第 8 章研究一类不确定状态反馈跟踪控制系统的执行器卡死故障检测问题。第 9、10 章分别研究综合故障检测与控制、同时滤波与故障检测问题。第 11 章研究带有时变有限频伺服信号的反馈控制系统故障检测问题。第 8~11 章的共同特点是可以检测任意小的执行器或传感器卡死型故障。

本书研究内容得到国家自然科学基金(编号 60821063、60974043)、973 计划(编号 2009CB320604)、“111 计划”(编号 B08015)等的长期大力支持。我们的工作得到中国科学院院士张嗣瀛教授、中国工程院院士柴天佑教授及众多相关人员的

悉心指导和热情帮助,在此向他们表示衷心的感谢。最后,非常感谢华夏英才基金对本书出版的资助。

由于作者水平有限,本书难免存在不妥之处,恳请读者不吝指教。

作 者

2010年6月于沈阳

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 故障检测技术 .....	1
1.2.1 故障检测技术分类 .....	1
1.2.2 基于模型的故障检测方法 .....	2
1.3 本书的主要工作 .....	4
<b>第 2 章 预备知识</b> .....	8
2.1 一些引理 .....	8
2.2 本书使用的符号 .....	10
<b>第 3 章 基于有限频的故障检测方法</b> .....	11
3.1 有限频 $\mathcal{H}_\infty$ 指标 .....	11
3.1.1 有限频 $\mathcal{H}_\infty$ 指标定义 .....	11
3.1.2 由 GKYP 引理得出的 $\mathcal{H}_\infty$ 指标 .....	12
3.2 故障检测观测器设计 .....	13
3.2.1 故障灵敏性条件 .....	15
3.2.2 干扰抑制条件 .....	17
3.2.3 稳定性条件 .....	19
3.2.4 故障检测观测器设计 .....	20
3.3 仿真算例 .....	20
3.4 结论 .....	23
<b>第 4 章 线性不确定系统的故障检测滤波器设计</b> .....	24
4.1 问题描述 .....	24
4.1.1 系统模型 .....	24
4.1.2 问题描述与预备知识 .....	26
4.2 故障检测滤波器设计：一个特殊情况 .....	27
4.3 故障检测滤波器设计：一般情况 .....	31
4.3.1 干扰抑制条件 .....	31
4.3.2 故障检测目标条件 .....	33
4.3.3 故障检测滤波器设计方法 .....	36

4.4	仿真算例	37
4.5	结论	39
<b>第 5 章</b>	<b>线性不确定系统的同时故障检测与控制器设计</b>	<b>40</b>
5.1	问题描述	40
5.1.1	系统模型	40
5.1.2	问题描述与预备知识	42
5.2	同时故障检测与控制	43
5.2.1	控制条件	43
5.2.2	故障检测条件	45
5.3	解决方案	47
5.3.1	第 1 步: 状态反馈设计	48
5.3.2	第 2 步: 输出反馈设计	49
5.3.3	阈值求解	51
5.4	仿真算例	51
5.5	结论	53
<b>第 6 章</b>	<b>线性参数变化系统的同时故障检测与控制器设计</b>	<b>54</b>
6.1	问题描述与预备知识	54
6.1.1	问题描述	54
6.1.2	预备知识	56
6.2	检测器/控制器设计条件	58
6.2.1	故障检测条件	58
6.2.2	控制性能条件	60
6.2.3	稳定性条件	61
6.3	检测器/控制器设计的 LMI 条件	62
6.4	阈值设计	68
6.5	仿真算例	68
6.6	结论	72
<b>第 7 章</b>	<b>线性不确定系统的故障估计</b>	<b>73</b>
7.1	问题描述	73
7.2	故障估计滤波器设计	75
7.2.1	系统无不确定性的情况	75
7.2.2	系统有不确定性的情况	79
7.2.3	稳定性条件	81
7.3	阈值设计	82
7.4	仿真算例	83

---

7.5	结论	88
<b>第 8 章</b>	<b>基于稳态的不确定状态反馈控制系统故障检测</b>	<b>89</b>
8.1	问题描述	89
8.1.1	故障模型	90
8.1.2	控制目标	90
8.1.3	故障检测方案	92
8.2	卡死故障检测	94
8.2.1	确定加权函数 $V$	94
8.2.2	算法	105
8.2.3	阈值设计	106
8.3	仿真算例	106
8.4	结论	111
<b>第 9 章</b>	<b>基于稳态的动态输出反馈控制系统故障检测</b>	<b>112</b>
9.1	问题描述	112
9.1.1	系统模型	112
9.1.2	故障模型	113
9.1.3	综合设计	113
9.1.4	与已有技术比较	116
9.2	综合故障检测与控制	117
9.2.1	有用的引理	117
9.2.2	控制目标的线性矩阵不等式条件	118
9.2.3	检测目标的不等式条件	121
9.2.4	控制器参数和加权矩阵 $V$ 的解	125
9.2.5	阈值设计	128
9.3	仿真算例	128
9.4	结论	132
<b>第 10 章</b>	<b>基于稳态的传感器故障检测</b>	<b>133</b>
10.1	问题描述	133
10.1.1	系统模型	133
10.1.2	故障模型	134
10.1.3	预备知识	135
10.1.4	同时滤波与故障检测方案	137
10.2	同时滤波与故障检测	138
10.2.1	无故障时的不等式条件	138
10.2.2	有故障时的不等式条件	142



---

10.2.3 综合求解	145
10.3 仿真算例	149
10.4 结论	151
<b>第 11 章 带有有限频伺服信号的反馈控制系统故障检测</b>	<b>152</b>
11.1 问题描述	152
11.1.1 系统模型	152
11.1.2 故障模型	152
11.1.3 预备知识	153
11.1.4 故障检测方案	154
11.2 全阶故障检测滤波器设计条件	155
11.2.1 有故障时的不等式条件	155
11.2.2 无故障时的不等式条件	158
11.2.3 稳定性条件	161
11.2.4 综合求解	161
11.3 降阶故障检测滤波器设计条件	163
11.4 仿真算例	165
11.5 结论	168
<b>参考文献</b>	<b>169</b>

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

控制系统在现代文明和技术发展与进步上扮演着重要的角色。我们日常活动的每一个方面几乎都受到了某种控制系统的影响。控制系统已经大量地应用到工业的所有部门,如产品质量、自动装配线、机床控制、空间技术与武器系统、计算机控制、交通运输、动力系统、机器人、微机系统、纳米技术以及航空航天核工业等领域。自从有了控制系统,人们就一直关注着系统的运行状况,因为系统运行的正常与否直接影响到经济损失甚至人们的生命安全。如果系统出现故障而不能及时检测和排除,就可能造成整个系统失效、瘫痪及人员、生产的巨大损失,甚至导致灾难性后果<sup>[1~10]</sup>。因此,在提高控制系统自身性能的同时,确保其安全性、可靠性和有效性至关重要。

故障检测与诊断技术的出现和发展,为实现这一目的开辟了一条新的途径。实际上,对于生产过程来说,为避免某些生产过程发生故障而引起整个生产过程瘫痪,必须在发生故障伊始迅速予以报警,为进一步决策提供依据,从而保证整个生产过程安全可靠地进行<sup>[11, 12]</sup>。对于武器系统来说,在系统中引入故障检测与诊断技术,是提高武器系统有效性,更好发挥现有装备性能的重要途径<sup>[13, 14]</sup>。因此,故障检测与诊断技术无论是对工业还是对军事、航空、航天等领域都具有重要的作用。

故障检测与诊断技术的研究得到了国际自动控制界的高度重视,现已成为自动控制研究领域的一个重要分支,国际自动控制联合大会 IFAC 于 1993 年专门成立了技术过程故障诊断与安全性技术委员会。美国控制会议、IEEE 控制与决策国际会议都将故障检测与诊断列为重要讨论专题。在国内,故障检测技术已经引起控制领域的一些专家学者的重视,1997 年,中国自动化学会成立了技术过程故障诊断与安全性业务委员会,2002 年,国家自然科学基金委员会设定了相关重点研究项目,将故障诊断与检测技术研究作为控制学科优先发展的课题之一。

## 1.2 故障检测技术

### 1.2.1 故障检测技术分类

已有的故障检测技术大致可以分为基于数据的故障检测方法和基于模型的故障检测方法。其中,基于数据的方法主要依赖于历史过程数据,如主元分析方法

(principal component analysis)、部分最小二乘方法 (partial least squares) 以及统计模式分类 (statistical pattern classifiers) 等, 这些方法都是基于历史过程数据提取统计特征, 以达到故障检测的目的 [15~18], 基于数据的故障检测方法主要应用于一些生产过程的故障监测。

基于模型的故障检测方法是在硬件冗余方法基础上发展起来的, 冗余方法是利用冗余部件提供的信息, 按照少数服从多数的原则确定故障部件, 但硬件冗余方法在提高系统可靠性的同时, 也增加了系统的成本、重量和空间, 对大型复杂系统, 用硬件冗余的方法是不现实的。因此, 基于解析冗余即基于模型的故障检测技术应运而生, 1971 年, 美国麻省理工学院的 Beard 教授在他的博士论文中, 提出了通过比较观测器的输出得到系统故障信息的思想, 标志着基于模型故障检测技术的开端, 由于基于模型故障检测技术不需要增加额外硬件设备, 具有成本低、易实现的特点, 一直都是故障检测技术研究的主要方法。国际上最初的关于故障检测的综述文章在 1976 年发表在 *Automatica*<sup>[19]</sup> 上, 国际上第一本故障检测方面的学术著作<sup>[20]</sup> 于 1978 年出版, 随后基于模型的故障检测与诊断技术在国际上得到了迅速的发展。其中, 文献 [21] 对基于参数估计的故障检测方法作了完整的描述; 针对基于观测器的故障检测方法中未建模动态和外界干扰等未知输入因素对故障检测系统性能的影响, 文献 [8] 将未知输入观测器的概念引入到故障检测观测器的设计中, 提出了基于未知输入观测器的鲁棒故障检测方法。在这些工作的基础上, 随后又出现了大量的关于基于模型的故障检测方法, 下面具体介绍一些常见的基于模型的故障检测方法。

### 1.2.2 基于模型的故障检测方法

基于模型的故障检测方法主要利用系统的输入输出和系统状态空间模型来产生残差, 这些方法可以分为基于观测器、奇异空间以及频域方法等, 下面具体介绍几种常见的基于模型的故障检测方法。

#### 1. 基于状态估计的方法

基于状态估计的方法也称为基于状态观测器方法, 这类方法实现系统故障检测一般分两步: 首先设计被检测系统的状态观测器, 由系统的实际输出和观测器的估计输出形成残差; 然后从残差中提取故障特征参数并根据特征参数实现故障检测。1971 年, Beard 教授在他的博士论文中, 具体研究了线性系统故障检测观测器的设计和解析冗余故障检测的实现, 标志着基于状态观测器故障检测方法的起步。文献 [22]~[24] 首先应用 Luenberger 观测器来检测故障并给出各种传感器故障分离技术, 文献 [25] 对基于状态估计的方法给出了详细的介绍和很多不同解决方案。

## 2. 等价空间的方法

等价空间方法是利用系统输入输出的实际测量值检验系统数学模型的等价性来检测故障。等价空间方法包括许多具体的方法,主要有基于奇偶方程的方法、基于约束优化的等价方程方法、基于具有方向的残差序列方法等,但其中研究最多的是基于奇偶方程的故障检测方法。采用奇偶关系的方法产生残差首先在文献 [26]、[27] 中提出但是并没有引起人们重视。随后,文献 [28] 又独立提出这一方法,这之后人们又从不同的角度改进了该方法。例如,文献 [29] 给出了在  $Z$  域内的奇异关系设计方法,文献 [30] 给出了基于奇异向量的随机系统故障检测与分离方法。文献 [31]~[33] 也有该方法的相关研究。

## 3. 基于参数估计的方法

参数估计方法是故障检测技术中比较重要的一种方法,这种方法直接基于系统辨识技术,首先在文献 [34]、[35] 中提出。文献 [36] 提出可以通过估计不可测过程参数和状态变量来检测过程故障。而文献 [37] 通过结合参数估计和探索过程知识研究了在线故障检测与分离问题。另外,文献 [38]~[41] 把该方法应用到了一些实际问题中。

## 4. 鲁棒故障诊断的主要方法

如何使故障检测系统对于模型误差、噪声、干扰等不确定因素具有好的鲁棒性,确保故障检测系统在上述因素影响下仍能准确检测故障,是基于模型的故障检测中的一个关键问题。鲁棒故障检测是目前故障检测领域中的一个研究热点,国内外学者已经开展了许多的研究工作。鲁棒残差生成方法所研究的主要问题和致力于实现的目标,是使得残差对各种不确定因素不敏感,而对故障敏感。对于线性系统,主要方法有:基于未知输入观测器的方法、基于特征结构配置的方法以及近年来比较热门的优化性能方法,下面将逐一给予介绍。

### 1) 基于未知输入观测器的方法

未知输入观测器 (unknown input observer, UIO) 方法是求解鲁棒故障检测问题在文献 [42] 中提出的。随后,人们在这个方向做了大量的工作 [8, 25, 43, 44]。该方法将各种不确定性因素视为系统的未知输入 (扰动),虽然这种输入 (扰动) 是未知的,但其分布矩阵认为已知。可利用未知输入观测器得到对未知输入 (扰动) 解耦的状态估计,之后基于该状态估计 (或者其加权形式) 形成的残差也相应实现了对未知输入的解耦 [45~47]。

### 2) 基于特征结构配置的方法

这是一种很重要的直接设计鲁棒残差产生器的方法,配置观测器的左特征向量使之与干扰方向矩阵正交,这样残差对干扰具有了鲁棒性。该方法首先在文献 [48]

中提出, 随后, 人们进一步在这一方向做了大量研究工作。另外, 文献 [49]、[50] 通过配置观测器的左特征向量提出了不同的产生鲁棒残差的方法。文献 [51] 通过配置一维观测器的特征向量提出了另一种鲁棒残差产生方法, 文献 [52] 发展了该方法。

### 3) 优化性能方法

由上面介绍可以看出, 很多方法如未知输入观测器法、特征结构配置法、最优鲁棒奇异关系法都可以消去或者减弱干扰和模型误差对残差的影响而增加故障检测系统的鲁棒性。尽管这些方法采用的技术不同, 但是有一点相同的就是, 这些方法都要求系统是没有不确定性的理想系统或者系统的不确定性具有特殊的结构。因此, 人们一直都在寻求一种可以处理非理想的或者更一般不确定性的鲁棒故障检测方法。 $H_\infty$  性能优化方法已经成为当今比较热门的处理各种不确定性的鲁棒设计方法,  $H_\infty$  性能优化方法在控制领域已经发展了近 20 多年, 它在处理控制系统中的鲁棒问题上起到关键性作用, 很明显, 可以应用到故障检测系统中来, 近年来已有很多国内外专家学者在这方面做了大量工作 [53~85]。文献 [86] 通过频率域最优优化过程给出了频率域最优观测器设计方法。文献 [87] 提出分解的方法设计残差后, 人们给出了通过分解系统传递函数矩阵方法的频率域残差产生方法, 之后人们又沿着这个方向做了大量工作 [88~91]。

目前有很多人把  $H_\infty$  滤波器的设计方法应用到残差的设计中来, 通过极小化干扰和模型误差对估计误差的影响, 极小化了干扰和模型误差对残差的影响 [92~96]。然而, 鲁棒残差设计问题又不同于鲁棒估计问题, 因为鲁棒残差设计除了要满足干扰抑制条件外还要极大化故障对残差的敏感度。文献 [97]、[98] 通过在原残差后面加一个最优滤波器, 从而加强了故障对残差的敏感度。类似的文献 [99] 也有很多关于该方法的相关研究。

在文献 [100]~[103] 中, 标准  $H_\infty$  技术用到了鲁棒故障检测上, 同时设计了鲁棒控制器和鲁棒故障检测系统, 与分别设计控制器和故障检测系统相比, 同时设计由一个单元产生两个信号: 控制信号和残差信号, 这样可以大大减小系统的复杂度并且可以很容易转化成标准的  $H_\infty$  优化问题。考虑了故障估计问题, 并且估计出来的故障不仅可以用来进行故障诊断还可以用来作控制器重构。相关的同时设计控制器和故障检测系统的见文献 [104]~[118]。

## 1.3 本书的主要工作

1.2 节对现有的一些故障检测方法作了介绍, 可以看出, 运用  $H_\infty$  技术来解决故障检测中的鲁棒性问题已经成为当前故障检测领域的热点问题。尽管国内外专家学者在这一方面已经取得了很多成果, 并成功应用到实际中, 但是已有技术

中还是存在一些不足之处。首先,在实际中,故障往往发生在某些已知的有限频率范围内,特别的,如卡死型故障<sup>[119~124]</sup>(故障频率为零),因此,需要在有限频域内设计故障检测滤波器或者估计器。已有的技术往往引入加权函数来限制频率范围<sup>[53~55,61,63,64,66~74]</sup>,一方面这会增加系统阶数从而增加系统的复杂度,另一方面加权函数只能给出频率范围的近似描述,因此是不准确的。其次,已有的故障检测方法常常假定故障是一个非零的时间函数加在输入或者输出通道上表示执行器或者传感器故障,在系统存在干扰的影响时,故障必须达到足够大的时候才能被检测出来,文献<sup>[53]</sup>、<sup>[60]</sup>具体研究了最小可检测故障的大小。对于故障幅值很小的情况,比如卡死型故障的卡死值很小,特别的,如中断情况(卡死值为零),已有的技术无法检测。

本书针对已有鲁棒故障检测方法中存在的一些问题,给出新的方法解决了频率加权的不准确性问题,可以准确地刻画故障和干扰的有限频特征;提出了基于稳态的故障检测方法,可以有效地检测幅值很小的卡死型故障,尤其是中断故障。另外,结合系统常常存在不确定性的特征,研究了系统中含有多胞不确定性时的故障检测问题,给出了新的故障检测滤波器、估计器设计方案。具体的,本书可以直接准确地处理有限频性能指标,避免了加权函数带来的设计复杂性和不准确性。此外,针对系统故障的幅值很小,比如执行器或者传感器卡死故障的卡死值很小(中断时为零),采用已有技术无法检测的问题,本书提出了基于稳态的故障检测方法,可以检测一类带有参考输入的线性系统执行器/传感器卡死故障(包括中断),检测效果不依赖于故障值的大小。书中的主要结果均给出了相应的仿真例子,其中部分结果应用到VTOL飞机模型、F-18飞机模型的设计仿真中,这也从直观的角度表明书中结论的可行性和优越性。

本书后续部分具体安排如下:

第2章为预备知识,给出了书中将要使用的几个引理以及一些常用的符号。

第3章给出了有限频范围内的 $\mathcal{H}_2$ 指标的准确描述,由于它是对有限频性能指标的直接处理,可以避免加权函数引入的保守性。通过同时满足 $\mathcal{H}_2$ 和 $\mathcal{H}_\infty$ 性能指标,故障敏感性和干扰的鲁棒性都得到了增强,最后故障检测问题转化成一个基于线性矩阵不等式的多目标优化问题,并可以通过MATLAB控制工具箱直接求解。仿真算例给出了本章提出方法与已有技术的比较,验证了本章提出方法的优越性。

第4章在第3章的基础上,主要针对线性系统含有不确定性时的情况,在频率域内考虑故障检测滤波器的设计问题,故障频率范围预先已知,这种情况在实际应用中很常见。同样避免了已有技术中采用加权函数限制频率范围所引入的保守性。这一章考虑了两种情况,首先是一种特殊情况,假定系统参数 $C$ 中没有参数不确定性,这时故障检测滤波器的参数可以通过解一组线性矩阵不等式来求解。然后考虑了一般情况,假定所有的系统参数都可能有不稳定性,这时考虑的问题变成一个非

凸的问题,不能直接求解,最后给出了一个基于线性矩阵不等式的迭代算法来解决这个问题。仿真算例验证了这一章提出方法的有效性。

第 5 章考虑了系统具有多胞不确定性的同时故障检测与控制问题,考虑的故障仍然假定在已知的频率范围内,设计了一个检测器/控制器,产生两个信号:检测信号和控制信号,分别用来检测故障和控制原开环系统,并满足一些控制性能指标。因为不确定系统的输出反馈控制问题是一个很难的非凸问题,为了求解这一章的问题,通过一个两步过程来设计这个检测器/控制器,同时兼顾了故障检测目标和控制目标。

第 6 章在第 5 章基础上继续研究了线性参数变化系统的同时故障检测与控制问题。通过线性化,这一章需要满足的一些有限频性能指标最后都转化成线性矩阵不等式,可以通过 MATLAB 控制工具箱直接求解。在这一章中,系统参数和要设计的检测器/控制器参数都假设存在于一个多面体内并可以在线测得。

第 7 章主要考虑的是对线性不确定系统的故障估计问题。不同于已有的方法,这一章借助于广义 KYP 引理来描述故障的有限频特征,进而求解传统的故障估计问题,可以避免加权函数带来的复杂度和不精确性。在仿真算例中,通过与已有方法的比较,可以看出这一章提出的故障估计方法得到了更好的故障估计和干扰抑制效果。

第 8 章研究了一类不确定状态反馈跟踪控制系统的故障检测问题。考虑了执行器的卡死故障,设计了一个加权矩阵来产生残差。通过满足一定的性能指标,可以使得系统在没有故障发生时,残差信号的幅值小于在有执行器发生卡死故障时残差信号的幅值。这样,任一执行器发生故障时都能得到报警信号,从而达到故障检测的目的。需要指出的是,这一章提出的方法可以有效地检测执行器卡死故障,尤其是中断的情况,这用已有的技术是无法实现的。在仿真算例中,通过与已有技术的比较,验证了这一章提出方法的优越性。

第 9 章在第 8 章的基础上,研究了动态输出反馈系统的故障检测与控制问题。同时设计了动态输出反馈控制器和一个加权矩阵,使得系统在无故障和有故障时都能稳定并具有一定的干扰鲁棒性,同时,产生的残差信号能够检测出执行器的卡死故障。类似于第 5 章,为了求解本章的非凸问题,这一章采用了一个两步过程,通过解一组线性矩阵不等式来求取控制器参数和加权矩阵。

第 10 章研究了同时滤波与故障检测问题,通过设计一个滤波器和两个额外的加权矩阵满足一定的性能指标,可以保证系统的传感器在发生卡死故障时仍能正常运行,同时能够检测出故障的发生。需要指出的是,这一章给出的同时设计可以大大减小分别设计带来的复杂性。由于同时考虑了两个目标,按照实际要求,可以通过牺牲滤波目标和故障检测目标中的一个来满足另一个。最后,这一章给出一个基于线性矩阵不等式的迭代算法来解这个同时设计问题。

第 11 章在第 8~10 章的基础上研究了带有有限频伺服信号的反馈控制系统故障检测问题。实际上, 第 8~10 章提出的基于稳态的检测方法主要针对伺服信号是零频的情形。借助于有限频伺服信号的作用, 本章提出了凸的故障检测滤波器设计方法, 而且这一方法使得任意小的执行器卡死故障特别是中断故障能够被及时地检测出来。在仿真算例中, 可以看出这一章方法的有效性。



## 第2章 预备知识

本章主要给出书中将要使用的几个引理和一些常用的符号。

### 2.1 一些引理

下面的一些引理将在后文中用到。

**引理 2.1** (Schur 补定理)<sup>[125, 126]</sup> 对给定的对称矩阵  $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^T & S_{22} \end{bmatrix}$ , 其中  $S_{11}$  是  $r \times r$  维的。以下三个条件是等价的:

- (1)  $S < 0$ 。
- (2)  $S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$ 。
- (3)  $S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0$ 。

**引理 2.2** (广义 KYP 引理 (连续系统))<sup>[127]</sup> 给定系统  $(A, B, C, D)$ , 对称矩阵  $\Pi$  具有合适维数, 下面的两个结论是等价的:

- (1) 有限频不等式

$$\begin{bmatrix} G(j\omega) \\ I \end{bmatrix}^T \Pi \begin{bmatrix} G(j\omega) \\ I \end{bmatrix} < 0, \quad \forall \omega \in \Omega \quad (2.1)$$

其中,  $\Omega$  定义见表 2.1; LF、MF 和 HF 分别代表低、中、高频率范围。

**表 2.1** 不同的有限频率范围(连续情况)

	LF	MF	HF
$\Omega$	$ \omega  \leq \omega_1$	$\omega_1 \leq \omega \leq \omega_2$	$ \omega  \geq \omega_h$

- (2) 存在  $n \times n$  Hermitian 矩阵  $P$  和  $Q$ , 满足  $Q > 0$  和

$$\begin{bmatrix} A & B \\ I & 0 \end{bmatrix}^T \Xi \begin{bmatrix} A & B \\ I & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & D \\ 0 & I \end{bmatrix}^T \Pi \begin{bmatrix} C & D \\ 0 & I \end{bmatrix} < 0 \quad (2.2)$$

其中

$$\Xi = \begin{bmatrix} -Q & P \\ P & \omega_1^2 Q \end{bmatrix}$$