

# 2024 故障诊断博士论文解读

October 11, 2025

# 目录

## 第1章 一些全文相关的事情，不适合放在具体某个章节

原来在他博士论文的每一章的 introduction 里，都会写上想法方法来自于哪篇文章，这样很方便我去溯源并看懂。

1. 原来在他博士论文的每一章的 introduction 里，都会写上想法方法来自于哪篇文章，这样很方便我去溯源并看懂。

# 第2章 不确定系统的闭环最优故障检测

注意只是检测不是诊断，因此只是包含故障检测，并不包含分离和隔离，更不包括检测出故障之后怎么对故障进行处理。《2024 博士论文》Both data-driven methods [61, 94, 137] and model-based methods [35, 63, 94, 137, 262] have shown considerable progress. 本章是基于观测器的方法 [35, 79]，属于基于模型的方法。在这些方法的基础上，已经开发出用于故障检测与隔离（FDI）的综合策略 [35, 63, 262]。

## 2.1 研究对象

\usepackage{amsmath}

### 2.1.1 问题

开环/闭环配置下 || 连续时间 || 线性时不变 || 不确定系统的鲁棒故障检测滤波器设计问题

#### 2.1.1.1 为什么要研究这个问题

为什么要单独研究不确定性系统？因为传统方法都是针对标称系统进行故障诊断的（如 Steven x Ding）而对包含不确定性的系统，是否故障诊断会没有区别？在不考虑不确定性时，开环和闭环的残差生成结果是一直的（见 Ding 的书，7.9）那么在含不确定性情况下，开环和闭环是否会有区别？在这里并没有提到光刻机等应用场景，因此这应该是普适的问题，对应普适的解决方法。

#### 2.1.1.2 为什么研究光刻机的故障诊断问题需要研究这样一个问题？

现实世界系统中固有的可变性和不确定性，导致系统一定会发生故障，那问题就在于何时会发生故障。

#### 2.1.1.3 研究这样一个问题有什么意义

及时检测和识别故障对于降低性能下降、损坏和对人员安全威胁的风险至关重要。从诊断系统中获得的知识可用于优化维护计划，从而减少风险和停机时间。在此背景下，有效的故障检测方法在确保复杂工程系统的可靠性和安全性方面起着至关重要的作用。

### 2.1.2 故障检测的关键挑战

故障检测（FD）的关键挑战在于区分故障与未知扰动。

### 2.1.3 基于模型的故障诊断方法总结与存在的问题

基于模型的故障诊断系统要取得令人满意的性能，需要在故障敏感性和扰动抑制之间取得微妙的平衡 [62]。

#### 2.1.3.1 针对 LTI 系统的故障诊断方法

基于因式分解的技术 [62, 142]，这些技术通常通过求解黎卡提方程来实现 [157]。此外，还采用了 H<sub>-</sub>/H<sub>∞</sub> 技术，并运用线性矩阵不等式（LMI）综合法 [134, 156, 248, 270]。如果扰动和系统模型完全已知，这些方法在使残差对故障尽可能敏感的意义上是最优的。

### 2.1.3.2 用于解决建模不确定性问题的鲁棒方法

许多方法利用

$$H/\text{init}$$

准则，并通过

$$\mu_{\text{iu}}$$

综合对其进行优化 [216,242]。其他方法涉及 H 模型匹配技术，通过线性矩阵不等式（LMI）优化来解决 [285]。此外，还采用 H-/H 无穷准则，并通过 LMI 解决方案来处理 [125,269]，有时会与  $\mu_{\text{g}}$  分析相结合 [178]。

### 2.1.3.3 方法的缺陷（待理解）

与针对无不确定性的线性时不变系统的方法 [62,157,248] 不同，现有文献中的鲁棒方法往往要么过于保守，要么应用复杂。例如，仅依赖 H 准则的方法不能直接考虑 H 故障灵敏度，而必须进行后验分析。模型匹配技术通常无法保证 H 故障灵敏度方面的最优性，因为其有效性在很大程度上取决于参考模型。此外，这些方法通常难以扩展用于故障隔离目的。一般而言，许多故障诊断方法是针对开环系统开发的，因此并不适用于闭环系统。通过一个激励示例表明，考虑闭环对于获得可靠结果至关重要。

### 2.1.4 设计目标（同时也是故障检测的关键挑战）

设计目标：将故障与扰动、固有建模不确定性区分开

### 2.1.5 方法

本章是基于观测器的方法

#### 2.1.5.1 老实说，没有很理解，需要对每个名词、动作进行释义以及解释作用

该解决方案基于不确定性和扰动模型的上界，通过单个黎卡提方程求解，实现了扰动抑制、建模不确定性与故障灵敏度之间的最优折衷。基于最坏情况扰动和不确定性模型，通过求解单个 Riccati 方程，提供了一种统一的方法来处理参数和动态不确定性。这种最坏情况模型是通过非线性优化和边界 Nevanlinna-Pick 方法的应用获得的。

#### 2.1.5.2 上界模型-相关参考文献

、上界模型源于具有混合不确定性的最坏情况增益分析，其中混合不确定性既包含动态不确定性，也包含参数不确定性。已知该问题是 NP 难问题 [26]。为解决此问题，可采用倾斜  $\mu$  幂迭代 [12,129,212] 和基于 D-G 标度的凸优化 [12,130,188,212] 等技术计算下界和上界。倾斜  $\mu$  幂迭代使用启发式方法确定特定频率下对应最坏情况下界的参数或复矩阵值。通过插值法可构建稳定的线性时不变（LTI）样本 [286]。基于这一概念，[195,196] 中提出的方法构建了在多个频率上最大化增益的最坏情况混合不确定性样本，该方法利用非线性优化和边界 Nevanlinna-Pick（BNP）插值 [14]。这种方法生成一个稳定、范数有界的 LTI 不确定性样本，该样本对一组矩阵样本进行插值，为不确定性和扰动模型提供最坏情况下的上界。

### 2.1.6 如何验证：实验

下一代光刻用掩膜板工作台原型（最终不能脱离实际，还是要回到光刻机上来，不然就是纯为了做研究而做研究了）

## 2.1.7 结论/效果

结果表明，该方法在故障敏感性与对建模不确定性和扰动的抑制之间取得了最优折衷。这种能力能够在残差中清晰地区分故障和不良影响，从而提高故障检测的可靠性，最终有助于提升安全性和性能。

行间公式常用的有两种，一是 align 环境，另外一种是 equation 环境。当两种环境都不带标号的时候，显示效果是一样的：

- align\*:

$$\hat{H}\Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi.$$

- equation\*:

$$\hat{H}\Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi.$$

区别在于 align 可以分行，而单用 equation 则不能分行：

- align\*:

$$\hat{H}\Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi$$

$$\hat{H}\Psi = E\Psi.$$

但如果想要进行公式编号，单用 align 环境会使得每一行都添加编号，显得很搞笑：

- align:

$$\hat{H}\Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi \tag{2.1}$$

$$\hat{H}\Psi = E\Psi \tag{2.2}$$

$$(\hat{T} + \hat{V}) \Psi = E\Psi \tag{2.3}$$

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \hat{V} \right) \Psi = E\Psi \tag{2.4}$$

这个时候建议使用 equation + aligned 环境：

- equation + aligned:

$$\hat{H}\Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi$$

$$\hat{H}\Psi = E\Psi \tag{2.5}$$

$$(\hat{T} + \hat{V}) \Psi = E\Psi$$

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \hat{V} \right) \Psi = E\Psi$$

或者使用 subequations + equation 环境

$$\hat{H}\Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi \tag{2.6a}$$

$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$

$$(\hat{T} + \hat{V}) \Psi = E\Psi \tag{2.6b}$$

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \hat{V} \right) \Psi = E\Psi$$

subequations + align

$$\hat{H}\Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi \quad (2.7a)$$

$$\hat{H}\Psi = E\Psi \quad (2.7b)$$

$$(\hat{T} + \hat{V}) \Psi = E\Psi \quad (2.7c)$$

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \hat{V} \right) \Psi = E\Psi \quad (2.7d)$$

**注** 注意使用公式环境的时候，里面begin和end之间一定要有内容，也不能有空行，不然会报错。

**注** 更多公式环境请查看[Latex 数学 wiki](#)

## 2.2 表格环境

`tabular`才是主体！但是只用`tabular`环境的话，整个表格是左对齐的：

$x$	1	2	3	4	5
$f(x) = x^2$	1	4	9	16	25

此时需要配合`center`环境，且此时的表格标题需要使用`captionof{table}{ }` (`\usepackage{caption}`)：

表 2.1: 用表格法描述函数.

$x$	1	2	3	4	5
$f(x) = x^2$	1	4	9	16	25

或者配合可以自动排位的`table`环境，类似于 word 里面的“文字环绕模式”，此时的表格标题用`\caption{ }`即可：

有时候`tabular`环境中的字没有在一行内居中，此时控制符可以选择使用`m{xcm}<\centering`，而过窄的行距可

$x$	1	2	3	4	5
$f(x) = x^2$	1	4	9	16	25

使用

`\renewcommand{\arraystretch}{ }`来调整，例如：

表 2.2: 用表格法描述函数.

$x$	1	2	3	4	5
$f(x) = x^2$	1	4	9	16	25

上色：

缓冲溶剂	共轭酸碱对形式	$pK_a$	缓冲范围
HCOOH — NaOH	HCOOH — HCOO <sup>-</sup>	3.75	2.75 ~ 4.75
CH <sub>3</sub> COOH — CH <sub>3</sub> COONa	HAc — Ac <sup>-</sup>	4.75	3.75 ~ 5.75
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> — Na <sub>2</sub> HPO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> — HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7.21	6.21 ~ 8.21
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> — HCl	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> — H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	9.14	8.14 ~ 10.14
NH <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O — NH <sub>4</sub> Cl	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> — NH <sub>3</sub>	9.25	8.25 ~ 10.25
NaHCO <sub>3</sub> — Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> — CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	10.25	9.25 ~ 11.25
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> — NaOH	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> — PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	12.66	11.66 ~ 13.66

合并列与合并行如`\multicolumn` 和`\multirow`(`\usepackage{multirow}`)：

起始浓度 (mol·dm <sup>-3</sup> )		转化率 (%)		平衡常数 K
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	CH <sub>3</sub> COOH	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	CH <sub>3</sub> COOH	
3.0	3.0	67	67	4.0
3.0	6.0	83	42	4.0
6.0	3.0	42	83	4.0

注 tabular 是“文字环境”，即里面的字体都是直体，上标下标需要用行间公式\$\$来启用

注 更高级的表格用法请查看Latex 表格 wiki

注 更好优雅的画矩阵和表格的方法可参考NiceMatrix包:NiceMatrix

注 和table环境类似, array环境也有对齐的功能。但array只能在数学环境中如 align 和 equation 中使用。

## 2.3 图片环境

LATEX 中图片主要有四类, 分别为:

- tikz 图: 作图方法:

```
\begin{center}
\begin{tikzpicture}
% /
\draw[->] (-0.8,0) --(6.8,0) node[right] {$n$};
\draw[->] (0,-0.5) --(0,5.0) node[above] {$a(n)$};

\draw[dashed] (0, 4.0) -- (6.8,4.0) node at (-0.3, 4.0) {$b$};
\draw[dashed] (0,3.0) -- (6.8, 3.0) node at (-0.3, 3.0){$a$};

%
\draw[domain =0.22:6.2, variable=\x, dashed, very thin, smooth , black]
plot (\x ,{ exp(- \x / 3) * sin( 150 * \x) + 3 })
plot[only marks, mark=*, fill=black] coordinates
{(1,3.3582657) (2,2.5553677) (3,3.3678794) (4,2.7717182) (5, 3.0944378) (6, 3)};

%
\begin{scope}[fill opacity=0.3]
\fill[green] (0.0, 2.6) rectangle (6.8, 3.4) ;
\fill[red] (0.0, 3.6) rectangle (6.8, 4.4) ;
\end{scope}

\node at (8, 3.5) {$r <\frac{1}{2} |a - b|$};

\end{tikzpicture}
\end{center}
```

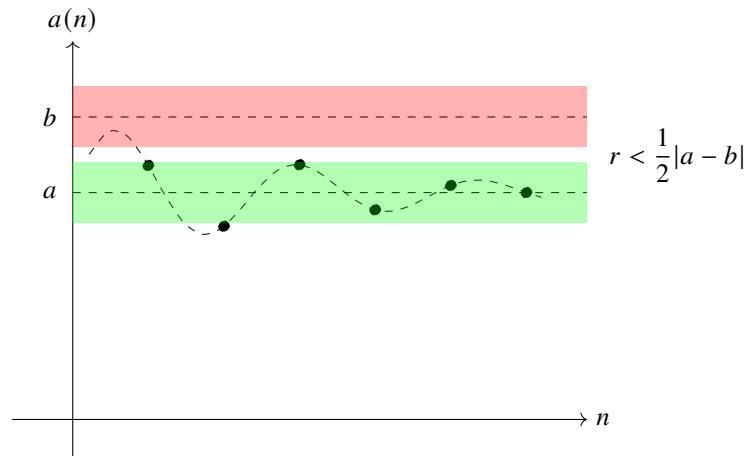


图 2.1: 例图 1

**注** 强烈推荐知乎里面 tikz 图的基础教程.

- png 图: 导入方法:

```
\begin{center}
\includegraphics[scale=0.6]{figure/Ragdoll.png}
\captionof{figure}{2}
\end{center}
```



图 2.2: 例图 2

- svg 图: 导入方法:

```
\begin{center}
\includesvg[scale=0.25]{figure/Ragdoll.svg}
\captionof{figure}{3}
\end{center}
```

图 2.3: 例图 3

- pdf 图 + tex 文字: 导入方法:

```
\begin{center}
\def\svgwidth{0.7\columnwidth}
\input{figure/Ragdoll.pdf_tex}
\end{center}
```

```
\captionof{figure}{ 4.}
\end{center}
```

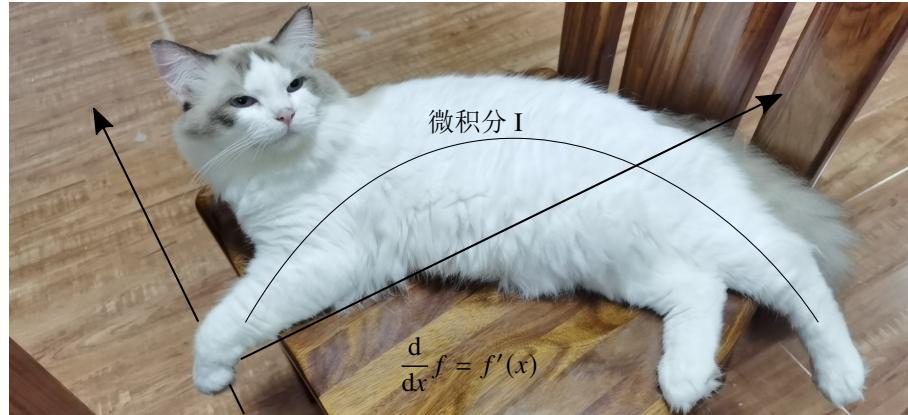


图 2.4: 例图 4.

**注** 强烈建议使用 overleaf 的用户在 main.tex 的同一个目录里面建立一个 figure 文件夹, 然后把所有外部导入的图都放在里面。具体原因会在以后说明。

**注** 正如在表格环境中一样, 上述例子中的 `center` 环境可以改为 `figure` 环境, 而图片的标题则需要由 `captionof{figure}{ }` 改为 `caption{ }`

## 2.4 分页环境

`minipage` 环境是文字环境, 在书本中的应用场景很少, 主要应用于 `beamer` 和海报中.

### 命题 2.1

$$[0, 1] \times [0, 1], \quad (0, y) \sim (1, y)$$

