



哈爾濱工業大學

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

# 控制系统故障诊断技术

控制科学与工程

Control Science and Engineering

2012.3.25





# 一、概述

1986年1月28日，美国“挑战者”号航天飞机从肯尼迪航天中心发射场起飞后约一分钟在空中爆炸，7位机组人员全部遇难。

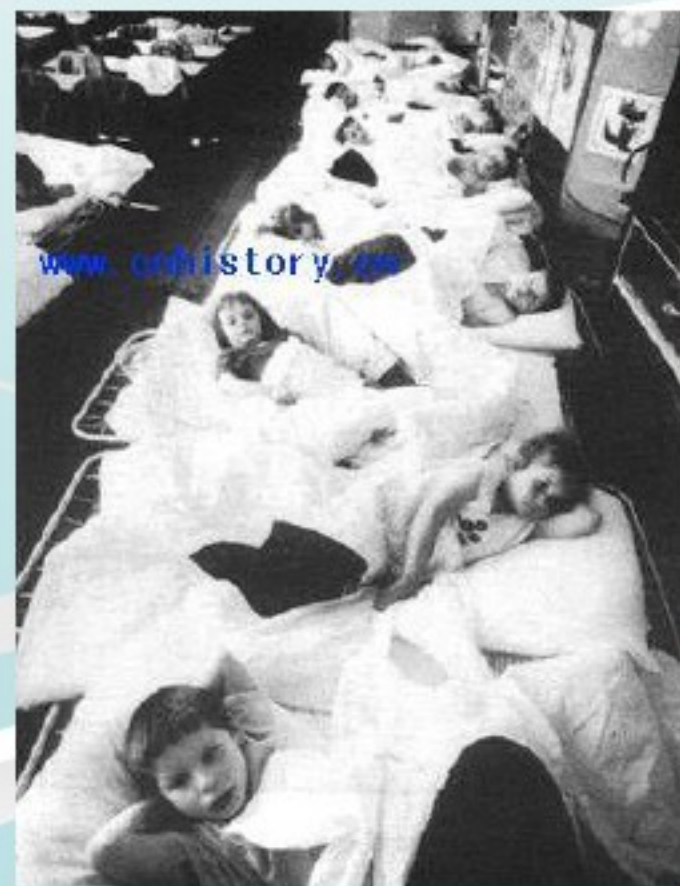
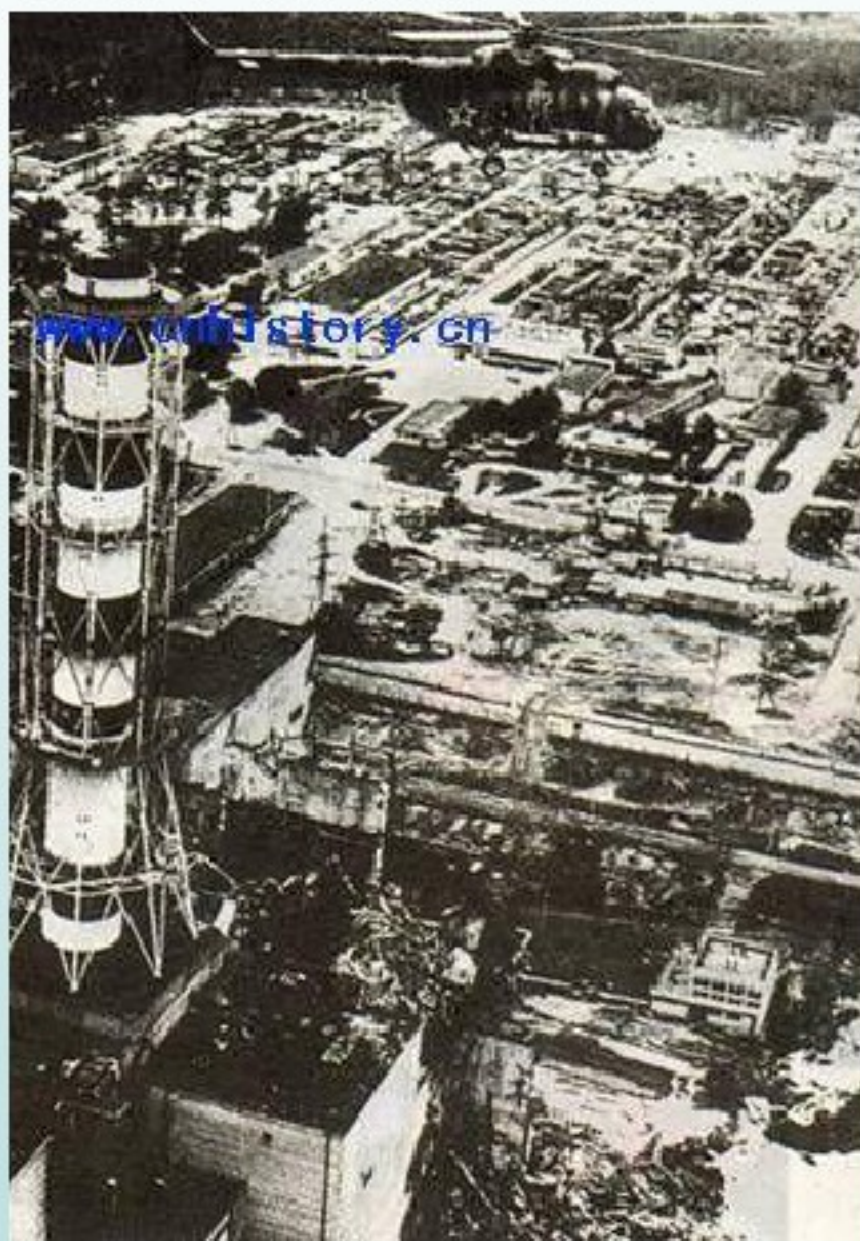






# 一、概述

1986年4月26日，世界上最严重的核事故在苏联切尔诺贝利核电站发生。乌克兰基辅市以北130公里的切尔诺贝利核电站的灾难性大火造成的放射性物质泄漏，污染了欧洲的大部分地区。 2011.3.11日本9.1级地震/海啸/福岛核事故

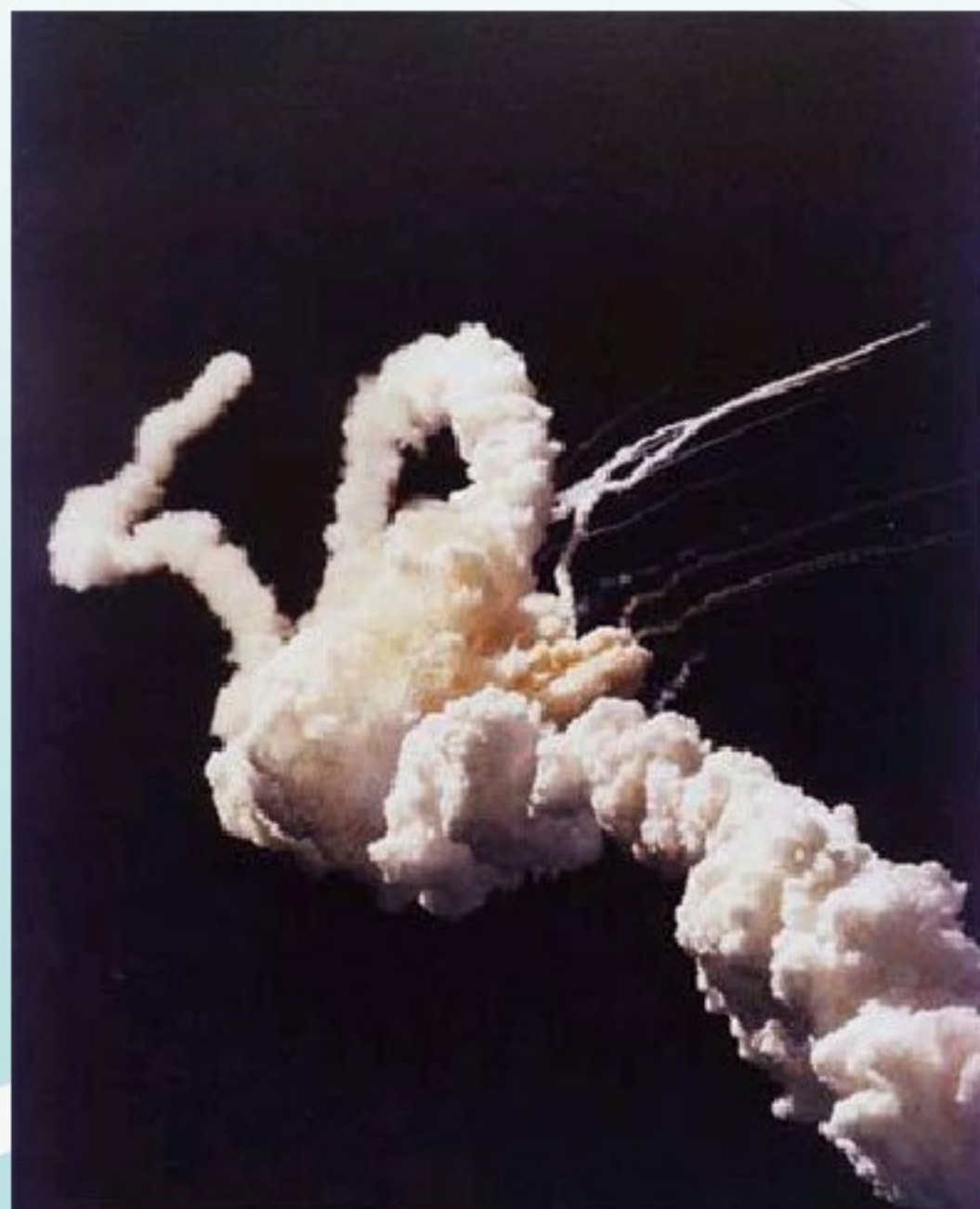






## 一、概述

“哥伦比亚”号原定于美国东部时间2003年2月1日上午9时16分返回肯尼迪航天中心。但在美国东部时间9时左右，当时“哥伦比亚”号航天飞机的飞行高度约63000米，飞行速度约20000千米/小时，之后航天飞机在得克萨斯州上空解体。







## 一、概述

现代系统正朝着大规模、复杂化的方向发展，这类系统一旦发生事故就有可能造成人员和财产的巨大损失。人们迫切需要提高现代系统的可靠性与安全性。系统的故障诊断(Failure Diagnosis)与容错控制(Fault Tolerant Control)则为提高复杂系统的可靠性开辟了一条新的途径。

如果当执行器、传感器或元部件发生故障时，闭环控制系统仍然是稳定的，并具有较理想的特性，就称此闭环控制系统为容错控制系统。1991年，瑞典的Astrom教授明确指出容错控制具有使系统的反馈对故障不敏感的作用。容错控制方法一般可以分成两大类，即被动容错控制(passive FTC)和主动容错控制(active FTC)。

动态系统的故障检测与诊断(Fault Detection and Diagnosis, FDD)是容错控制的重要支撑技术之一。FDD技术的发展已大大超前于容错控制，其理论与应用成果也远远多于容错控制。目前国际上每年发表的有关FDD方面的论文与报告在数千篇以上。基于解析冗余的故障诊断技术被公认为起源于Beard于1971年发表的博士论文。1976年，Willsky在《Automatica》上发表了第一篇FDD方面的综述文章。Himmelblau于1978年出版了国际上第一本FDD方面的学术著作。





## 一、概述

国际自动控制界对故障诊断和容错控制的发展给予了高度重视。1986年9月，在美国Santa Clara大学举行的自动控制高峰会议上，把多变量鲁棒、自适应和容错控制列为控制科学面临的富有挑战性的研究课题。在国际上，领导着故障诊断和容错控制学科发展的是1993年成立的IFAC技术过程的故障诊断与安全性技术委员会。从1991年起，IFAC每3年定期召开FDD与FTC方面的国际专题学术会议。在近几届的IFAC世界大会上，FDD与FTC方面的论文在不断增加。

作为一门交叉性学科，故障诊断、容错控制与鲁棒控制、自适应控制、智能控制等有着密切的联系。现代控制理论、信号处理、模式识别、最优化方法、决策论、统计学等构成了故障诊断和容错控制的理论基础。





# 一、概述

提高控制系统可靠性的主要途径——

从提高控制系统可靠性角度看，提高可靠性的途径归纳起来主要有三个方面：

1. 提高组成控制系统的各元部件的可靠性——这是本质措施，但往往收到当前科技水平的限制；
2. 进行系统的高可靠性设计，如简化系统结构、引入冗余和容错技术等——这是提高控制系统可靠性的最有效途径；
3. 采取维修维护措施——这是延长使用寿命的最后办法，但对有些系统不很适用，如卫星、导弹等。





## 一、概述

几个概念:

- 容错——容错 (Fault-Tolerant) 技术, 是指当系统的某些部件失效时, 这些部件在系统中的功能用其它部件完全代替或部分代替, 使系统能保持规定的性能或不丧失最基本的性能 (如保持稳定等)。系统的容错能力与系统的冗余 (包括硬件冗余和解析冗余) 是密切相关的。容错控制按其所采用的方式不同分为:
  - (1) 硬件冗余: 并行双重、三重冗余备份——并行冗余多采用热储备的多重方式, 然后通过表决器进行冗余管理或采用中值 (或均值) 滤波公式减弱故障的影响。
  - (2) 解析冗余: 鲁棒容错控制、重构容错控制、人工智能等。——利用控制系统不同部件之间的内在联系和功能上的冗余性, 当系统的某些部件失效时, 用其余完好部件部分甚至全部地承担其故障部件所丧失的作用, 以维持系统性能在允许范围之内。
- 故障诊断——控制系统故障 (Failure) 可理解为导致系统出现不希望行为的任何异常现象, 或系统中部分元器件功能失效而导致整个系统性能恶化的情况或事件。当系统发生故障时, 系统中的各种量 (可测的或不可测的) 或它们中的一部分表现出与正常状态不同的特性, 这种差异包含丰富的故障信息, 如何找到这种故障的特征描述, 并利用它来进行故障检测 (detection)、分离 (Isolation) 就是故障诊断 (Failure Diagnosis) 的任务。





## 一、概述

### 故障的种类:

- 从系统的结构分: 传感器故障、执行器故障、控制器故障、被控对象故障;
- 从故障性质或程度分: 缓变故障、突变故障、间歇故障、完全失效故障;
- 从故障间的相互关系分: 单故障、多故障, 独立故障、关联故障, 整体故障、局部故障等。

### 故障诊断的研究内容:

- 故障的特征描述与提取——通过测量和一定的信息处理技术获取反应系统故障的特征描述的过程和方法;
- 故障的分离与估计——根据检测的故障特征确定系统是否出现故障 (Detection) 以及故障的部位 (Isolation) 和故障的程度的过程和技术;
- 故障的评价与决策——根据故障分离与估计的结论, 对故障的危害及严重程度做出评价, 进而做出是否停止任务进程及是否需要维修更换的决策。





# 一、概述

控制系统故障的特征描述及获取方法——  
表征系统故障的特征量可以是：

- ①可测的系统输入输出信息；
- ②不可测（可估计）的状态变量；
- ③不可测（可估计）的模型参数向量；
- ④不可测（可估计）的特征向量；
- ⑤人的经验知识。

获取这些特征量的方法主要有：

- ①直接测量和观察；
- ②参数估计、状态估计或滤波与重构；
- ③对测量值进行某种信息处理。





# 一、概述

## 故障探测与分离方法——

- ① 阈值逻辑法;
- ② 多重模型假设检测法;
- ③ 贝叶斯决策函数法;
- ④ 特征量统计检验法;
- ⑤ 人工神经网络法
- ⑥ 专家系统法;
- ⑦ 模式识别法;
- ⑧ 模糊数学法;
- ⑨ 逻辑代数法。





# 一、概述

控制系统故障诊断方法——

1. 依赖于模型的方法：

- ①基于状态估计的方法；
- ②基于参数估计的方法；
- ③基于特殊模型的诊断法。

2. 不依赖于数学模型的方法：

- ①基于直接可测信号的故障诊断方法（可测值或其变化趋势检查法、可测信号分析处理诊断法）；
- ②基于经验知识的故障诊断方法（专家系统、故障树、模式识别等）。



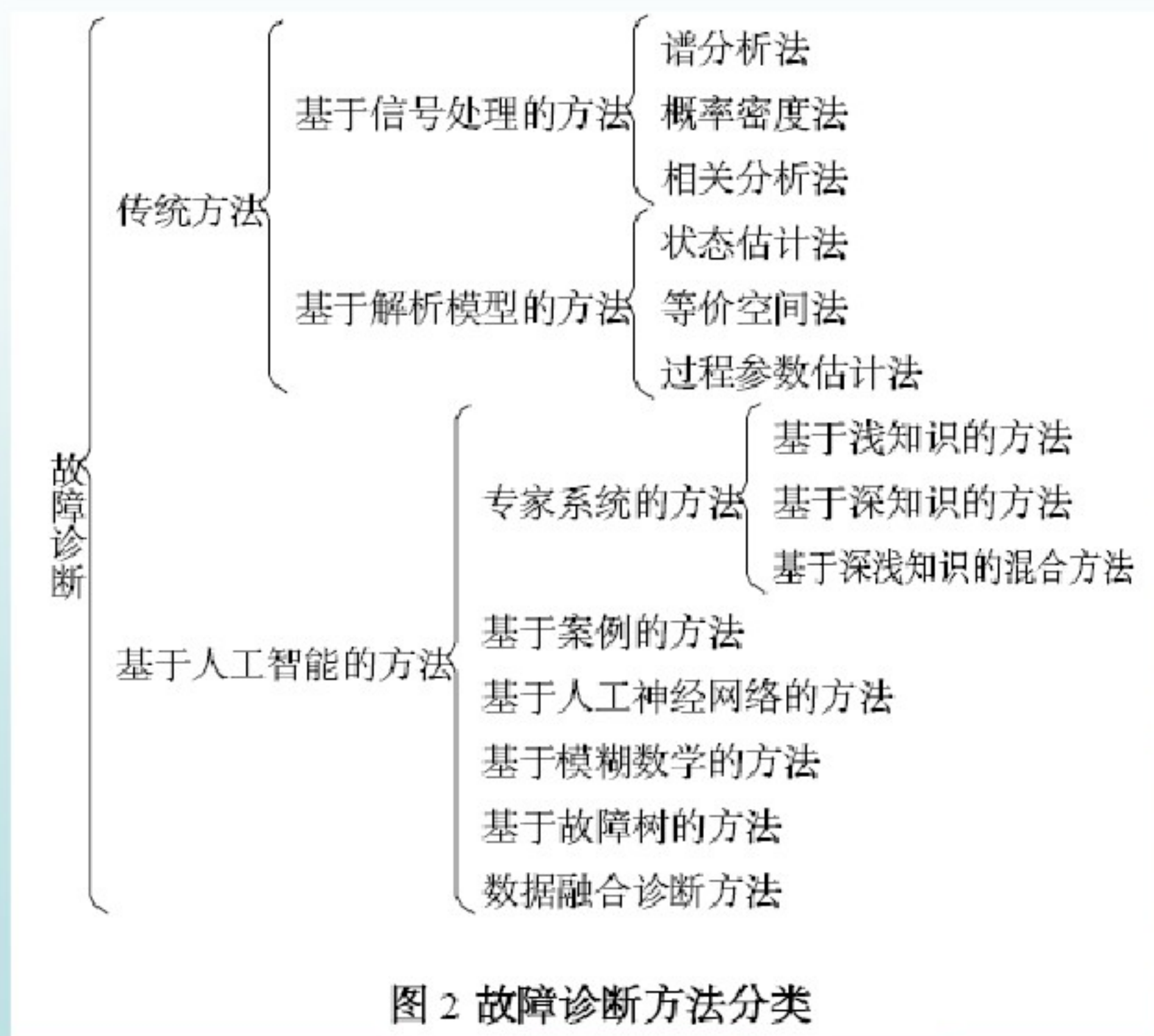


图 2 故障诊断方法分类



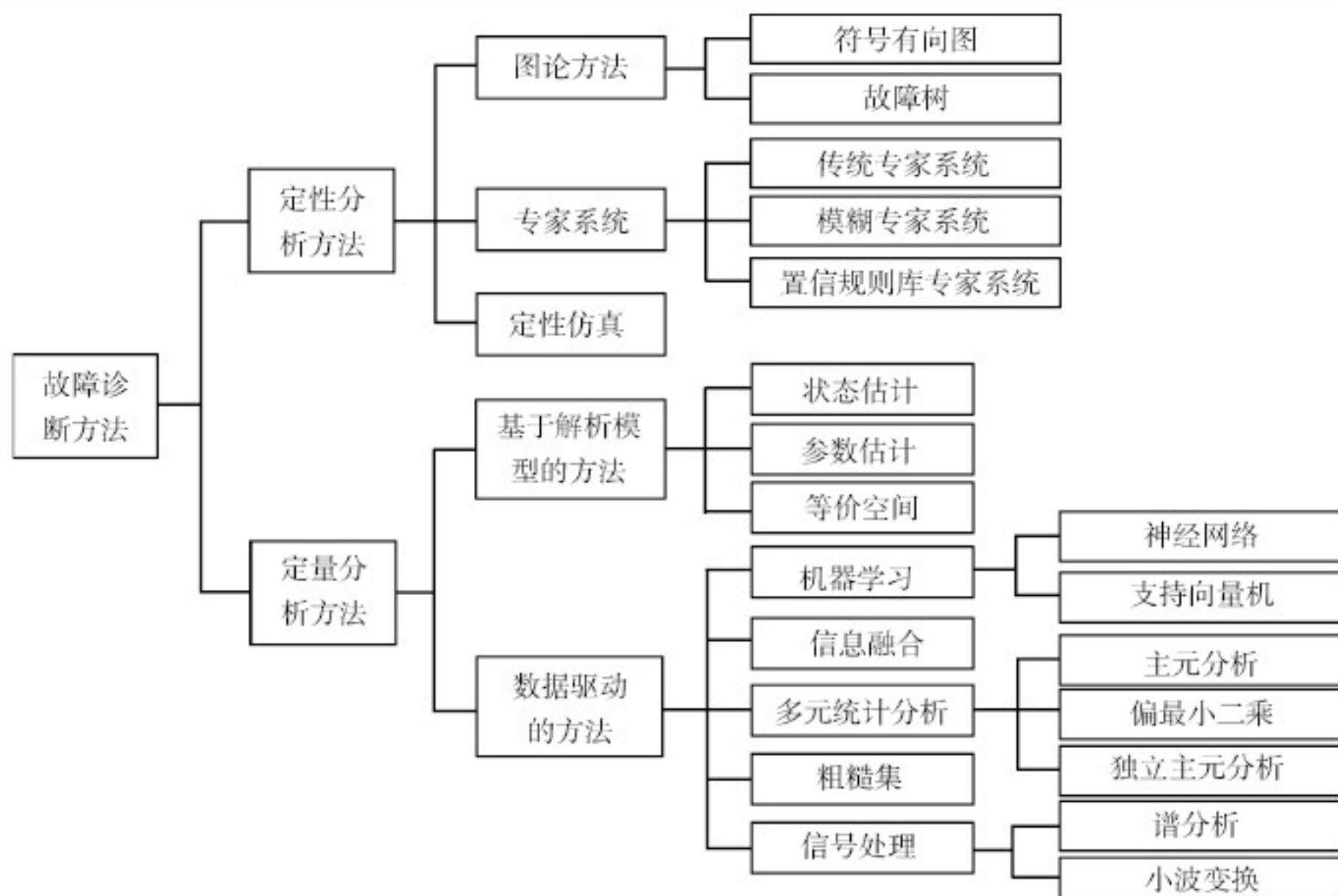


图 1 故障诊断方法分类示意图

Fig.1 A classification diagram for fault diagnosis approaches





# 一、概述

## 典型故障诊断方法——

- 基于未知输入观测器（Unknown Input Observer – UIO）的故障诊断技术；
- 基于奉献观测器（Dedicated Observer Scheme – DOS）及自适应观测器的故障诊断技术；
- 基于参数估计（Parameter Identification Approach – PIA）的故障诊断技术；
- 基于直接可测信号、神经网络、模糊逻辑、专家系统的故障诊断技术；
- 机内测试（Built in Test – BIT）与故障预测和状态管理（Prognostics and Health Management -PHM）技术。





# 一、概述

## 主要参考文献

1. 周东华、孙优贤，控制系统故障检测与诊断技术，清华大学出版社，1994
2. 胡昌华、许化龙，控制系统故障诊断与容错控制的分析和设计，国防工业出版社，2000
3. 周东华、叶银忠，现代故障诊断与容错控制，清华大学出版社，2000
4. 闻新、张洪钺，控制系统的故障诊断和容错控制，机械工业出版社，1998
5. Frank.P.M., Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-based Redundancy —— A Survey and Some New Results. Automatica, 1990, 26(3):459-474
6. Isermann R., Trends in the Application of Model Based Fault Detection and Diagnosis of Technical Process, Control Engineering Practice, 1997, 5(5):709-719
7. 疏松桂，控制系统可靠性分析与综合，科学出版社，1992
8. 葛建华、孙优贤，容错控制系统的分析与综合，浙江大学出版社，1994





# 一、概述

## 控制系统故障诊断分析设计实例：

- 基于未知输入观测器（Unknown Input Observer – UIO）的故障诊断技术及应用实例；
- 基于奉献观测器（Dedicated Observer Scheme – DOS）及自适应观测器的故障诊断技术及应用实例；
- 基于参数估计（Parameter Identification Approach – PIA）的故障诊断技术及应用实例；
- 基于直接可测信号、神经网络、模糊逻辑、专家系统的故障诊断技术及应用实例；
- 控制系统容错技术及应用实例；
- 机内测试（Built in Test – BIT）与故障预测和状态管理（Prognostics and Health Management -PHM）技术最新进展。