

第一章 概论

智能容错技术 IFTT(Intelligent Fault-Tolerant Technology) 是设计高可靠性系统必不可少的技术。它是一门涉及系统论、信息论、控制论、故障诊断、人工智能、专家系统和计算机等多学科知识和技术的新兴综合性学科。本章对智能容错技术的有关概念、研究的目的是意义、研究内容、研究方法等进行简要介绍。

1.1 智能容错技术概述

1.1.1 智能容错技术的有关概念

1. 故障

故障 (Fault) 通常指设备在规定条件下不能完成其规定功能的一种状态^[1]。这种状态往往是由不正确的技术条件、运算逻辑错误、零部件损坏、环境变化、操作错误等引起。这种不正常状态可分以下几种情况：

- (1) 设备在规定的条件下丧失其功能；
- (2) 设备的某些性能参数达不到设计要求，超出了允许范围；
- (3) 设备的某些零部件发生磨损、断裂、损坏等，以致使设备不能正常工作；
- (4) 设备工作失灵或发生结构性破坏，导致严重或灾难性事故。

设备故障通常包括对象故障、仪表故障和系统故障三种。根据故障发生的性质，可将其概括为硬故障和软故障两类。硬故障指设备硬件损坏引起的故障，如结构件或元器件的损伤、变形、断

裂等；软故障如系统性能或功能方面的故障。设备故障一般具有以下特性^[2]。

(1) 层次性。故障一般可分为系统级、子系统级、部件级、元件级等多个层次。诊断时可以采用层次诊断模型和层次诊断策略。

(2) 相关性。故障一般不会孤立存在，它们之间通常相互依存、相互影响。一种故障可能对应多种征兆，一种征兆也可能对应多种故障。这种故障与征兆之间的复杂关系，给故障诊断带来了一定困难。

(3) 随机性。突发性故障的出现通常都没有规律性，再加上某些信息的模糊性和不确定性，就构成了故障的随机性。

(4) 可预测性。设备大部分故障在出现之前通常有一定先兆，只要及时捕捉这些征兆信息，就可以对故障进行预测和防范。

2. 状态监测与故障诊断

状态监测 CM(Condition Monitoring) 就是监测设备的运行状态，即确定设备是否发生了故障。设备没有发生故障称正常，设备发生了故障称异常。

故障诊断 FD(Fault Diagnosis) 就是当设备发生故障后，不但要确定出故障原因、部位、类型及严重程度，还要对其状态及发展趋势进行预测和维修决策。

状态监测可以及时发现故障，故障诊断可以确定出故障原因、部位、类型及程度，并为容错控制提供必要的信息。状态监测与故障诊断 CMFD(Condition Monitoring and Fault Diagnosis) 的准确性和适时性，直接影响对设备故障的容错能力^[3]。

3. 征兆和特征信号

征兆 (Symptom) 是指故障的表现特征。它是故障发生之前或发生和发展过程中的客观反映。狭义上讲，征兆是设备出现的异常现象；广义上讲，征兆是有助于判断故障的各种现象或事实和证据。在某些情况下，特征信号可以作为征兆，但一般来讲，特征信号难以直接判断设备的正常与异常，即有故障或无故障。因此，也

可以说征兆是用不同的方法和手段，通过对特征信号去粗取精后得到的、可直接用于进行诊断的信息。

特征信号 CS(Characteristic Signal)是指与设备状态紧密相关的、最有用的、能表征设备状态特征的信息。CS不是设备的全部信息。CS一方面能反映设备的性能和状态，另一方面利用特征信号能够容易地对设备状态进行监视。

特征提取 CE(Characteristic Extraction)是联系状态监测与故障诊断的桥梁。CE一般分两步进行：

(1) 对数据采集和状态监测得到的基本数据进行必要的分析处理使其转换成特征数据(如各种频率成分的大小、振幅等)；

(2) 特征数据再经过征兆获取程序，使其成为具有可信用度大小的征兆事实，以供诊断推理使用。

4. 智能

智能(Intelligence)泛指人们认识客观事物并运用知识解决实际问题的能力^[4]，或者说智能就是用计算机执行某些与人的思维有关的复杂行为的能力。智能有低级智能和高级智能两种。低级智能表现为感知环境、作出决策和控制行为；高级智能不仅具有感知、学习、分析、比较和推理能力而且还具有根据复杂环境变化作出正确决策和适应环境变化的能力。智能通常应具备三个条件：

(1) 感知能力。就是感知外界变化和获取感性知识的能力。如人能通过眼、耳等感官接受文字、声音、图像等信息，并通过中枢神经进行信息处理、模式识别、语音理解等。

(2) 思维能力。就是记忆、联想、推理、分析、比较、判断、决策、学习等能力。

(3) 行为能力。就是对外界刺激(输入信号)作出反应(输出信息)并采取相应动作的能力。行为的智能特性通常表现在对于环境变化的灵敏性和适应性。

智能具有以下共性：

(1) 智能的基本要素是“信息”。

(2) 智能是普遍存在的, 即人、动物、机器等都可能具有智能。

(3) 智能是多层的 (如高层智能(思维)、中层智能(感知)、基层智能(行为)等)。

(4) 智能是进化的 (如先天进化(遗传、变异)、后天进化(学习、训练)等)。

(5) 智能是相对的, 它随不同的主体、客体、时间、空间、环境、条件等, 会有不同的智能水平。

5. 容错

容错 (Tolerance) 就是容许错误^[5] 是指设备的一个或多个关键部分发生故障时, 能够自动地进行检测与诊断, 并采取相应措施, 保证设备维持其规定功能, 或用牺牲性能来保证设备在可接受范围内继续工作。

错一般可分为两类: 第一类是先天性的固有错, 如元器件生产过程中造成的错、线路与程序在设计过程中产生的错。这一类错需对其拆除、更换或改正, 它是不能容忍的。第二类是后天性的错, 它是由于设备在运行中产生了缺陷所导致的故障。这种故障有瞬时性、间歇性和永久性区别。对瞬时性及间歇性故障不能采取检测定位等措施 (因检测时也许不见了, 过一段时间可能又会出现), 但可以考虑随机地消除其作用, 使其不影响设备的正常工作。对于运行中产生的永久性故障, 可先诊断出它存在的范围和部件, 然后将有关零部件或分系统切换或修理。如果任其存在, 就会使它与另一故障 (永久性或瞬时性故障) 相遇而构成双重故障, 甚至造成灾难性后果。容错技术是提高系统可靠性的重要途径。常用的容错方法有硬件容错、软件容错、信息容错和时间容错。

6. 智能容错控制

智能容错控制^[6] IFTC (Intelligent Fault-Tolerant Control) 就是设备在运行过程中一个或多个关键部件发生故障或即将发生故障之前, 利用人工智能理论和方法, 通过采取有效措施, 对故障自动进行补偿、抑制、消除、修复, 以保证设备继续安全、高效、可靠运行, 或以牺牲性能损失为代价, 保证设备在规定时间内完成其预定

功能。

1.1.2 智能容错技术研究的目的和意义

随着现代化大生产的发展和科学技术的进步，设备结构日趋复杂，功能越来越完善，自动化程度也越来越高。由于结构的复杂性和大功率、高负荷地连续工作，设备在运行过程中，随着时间的增长和内外部各种条件的变化，迟早会发生故障，轻则降低性能、影响生产，重则造成停机、停产、毁坏设备，甚至机毁人亡。国内外曾经发生的各种空难、海难、爆炸、断裂、倒塌、泄漏等恶性事故，都造成人员的巨大伤亡和严重经济损失与社会影响。表 1-1 和表 1-2 列出了国外与国内部分重大事故发生的原因及后果。

表 1-1 国外部分重大事故发生的原因及后果

国名	时间	原因	后果
西班牙	1977	KLM 和 PANAM 飞机在跑道上相撞	582 人死亡
美国	1979	三里岛核电站发生泄漏	损失几十亿美元
印度	1982	农业毒剂泄漏	2700 余人死亡，数万人中毒
日本	1985	JAL-747 飞机局部结构断裂而坠毁	520 人全部丧生
美国	1986	“挑战者”号航天飞机一个密封圈失效	价值 12 亿美元的飞行器爆炸，7 名宇航员全部遇难
苏联	1986	切尔诺贝利核反应堆发生泄露	32 人死亡，13.5 万人受害
英国	1988	放射性管道爆炸	167 人死亡
美国	1996	“阿丽亚娜”运载火箭数据转换出错(把一个 64 位浮点数据转换为带符号的 16 位整数时，超过了后者表达范围)	火箭发生飞行路线改变并解体爆炸
土耳其	1996	“波音”757-200 飞机因空速表故障而坠毁	13 名机组人员和 176 名旅客全部遇难

(续)

国名	时间	原因	后果
美国	1996	“波音”747 飞机在飞行中因燃油箱内部零件变形引起油箱爆炸	18 名机组人员和 212 名旅客全部遇难
美国	1998—1999	“大力神”等火箭 5 次发射失败	直接经济损失 30 多亿美元
新加坡	2000	“波音”747 飞机起飞后突然坠毁	69 人死亡,79 人受伤
法国	2000	“协和”客机起飞中机翼起火爆炸	机上 109 人全部死亡,地面死亡 5 人

表 1-2 国内部分重大事故发生的原因及后果

时间	原因	后果
1982	江苏某化肥厂合成氨压缩机强烈振动三次停机	损失 1000 多万元
1985	山西大同电厂 20 万 kW 汽轮发电机组毁坏	直接损失 1000 多万元
1988	秦岭电厂 200MW 汽轮发电机组转子飞车	损失高达 1 亿元
1990	荆门炼油厂转子开裂报废	损失达 1000 万元
1999	西南航空公司图 154M 飞机发生撞地	11 名机组人员和 50 名乘客全部遇难
2000	贵州木冲沟煤矿瓦斯爆炸	161 名井下矿工遇难
2001	两架某型飞机训练时因尾翼积冰相继坠毁	16 名机组人员全部遇难

国内外这些惨痛教训提醒人们,为了杜绝灾难性事故,避免严重性事故,减少一般性事故,防止和消除故障的发生,必须寻找新的技术途径。智能容错技术为保证设备安全、可靠运行提供了一种有效方法。智能容错控制的目的在于^[7]。

(1) 保证设备安全和高效运行。安全性一方面指设备本身不遭受破坏,更重要的是人身安全;高效性是指不管内、外部条件如何变化,设备都能发挥其最大效能进行工作。

(2) 预测设备的运行状态、使用寿命、故障的发生和发展。

(3) 设备发生故障时或发生故障前,能及时对故障进行补偿、抑制、削弱、消除和自动修复。

(4) 减少维修费用,提高设备利用率。

1.1.3 智能容错技术对监测诊断系统的要求

为了对故障进行容错控制，必须适时、准确地检测设备的故障信息。因此，监测诊断结果的准确性和可信度直接影响智能容错控制效果。为此，对监测诊断系统提出以下要求：

(1) 能自动跟踪设备（系统）的工作状态，并对故障进行实时监测、诊断和预报；

(2) 故障识别率应不低于 95% 并能把 90% 的故障定位到单元或组件；

(3) 监测诊断系统必须具有高度可靠性，还应具有足够的精度、实时性和鲁棒性；

(4) 误诊率应不大于 1%。

1.1.4 智能容错技术的研究概况

容错的基本思想是由冯·诺伊曼 (J. V. Neumann) 在 1962 年提出。他指出，人的大脑细胞在人的一生中不断地衰退死亡，但令人惊奇的是这并不影响任何生理系统的正常工作。据统计，在人的大脑内总数为 10^{10} 个的脑细胞中，平均每小时约有 10^3 个失效或死亡，一年内约为 10^7 个。一个人一生中失效或死亡的脑细胞达 10^9 个，相当于脑细胞总数的 $1/10$ 。然而，一个正常人的神经系统却能够毫无故障地工作一生，不但不为这些损坏了的‘零件’所破坏而且思维能力逐年提高，可靠性也日益增大。另一方面，动物体内的自修复能力和克服故障的能力也引起了人们的深思。蟑螂的腿被损坏（甚至被切掉）后，很快就能再生出一条完全一样的新腿；某些动物的脑血管如果发生流通障碍，旁边的支血管就会自动地涨大变粗，用以代替发生了故障的动脉，使肢体不致因缺血而衰亡。他的这些论断为容错技术的研究奠定了基础。

容错技术近 20 年发展很快。首先在先进的计算机中实现^[8]。例如航天飞行控制、人造卫星、潜艇导航、空中交通管制、银行业务管理等领域，都要求计算机成年累月连续无故障地工作，从而促进

了容错计算机的迅速发展。目前世界上已有上百家计算机公司推出了容错计算机。容错计算机的平均故障间隔时间 MTBF (Mean Time Between Failures) 可达 15 年~20 年。1986 年 9 月, 美国国家科学基金委员会和 IEEE 控制系统学会联合举办的一次专题讨论会上 国际控制界 52 位著名专家汇聚于美国 Santa Clara 大学, 讨论控制科学的发展及当前面临的挑战, 容错控制 FTC (Failure Tolerant Control) 被列为当今和未来的七个挑战性课题之一^[9]。Koren^[10]和 Moore^[11]等首先将其应用于 VLSI 与 WSI 的容错控制。同年, 张翰英教授发表论文, 提出在我国“必须加速发展实用性容错系统”的研究^[12]。此后, 周东华、程一、葛建华、胡寿松等又将容错技术用于动态系统及传感器失效的研究^[13~16]。1997 年, IFAC 故障诊断与安全性委员会主席 Patton 教授撰写了容错控制的综述文章^[17]。目前, 容错技术的研究已经有了很大的发展, 并取得了许多重要研究成果。随着计算机的广泛应用和智能结构、智能材料与人工智能的发展, 容错技术必将得到更快的发展和更广泛的应用。

1.2 智能容错技术的研究内容

智能容错技术是一种将故障检测、智能诊断与容错控制融为一体新兴综合性学科, 它涉及到系统论、信息论、控制论、信号处理、模式识别、故障诊断、人工智能、工业自动化、工程可靠性、微型计算机等多学科知识和技术。本书的主要研究内容有:

(1) 智能容错控制结构研究。主要包括智能容错控制的基本结构、智能容错控制的构成原理、智能容错控制的处理方式、智能容错控制的构成方法等。

(2) 智能容错控制方式研究。主要包括硬件智能容错控制、软件智能容错控制、时间智能容错控制、信息智能容错控制和冗余附加技术等。

(3) 智能容错控制方案研究。主要包括基于状态反馈的智能

容错控制、基于故障补偿的智能容错控制、基于多模冗余的智能容错控制、基于功能模块的智能容错控制、基于神经网络的智能容错控制、基于专家系统的智能容错控制等。

(4) 智能容错控制策略研究。主要包括瞬时故障的消除策略、多模块并行诊断决策策略、故障自适应学习控制策略、故障自适应补偿控制策略、故障自适应重构控制策略等。

(5) 智能容错控制器设计研究。主要包括系统重构智能容错控制器设计、结构冗余智能容错控制器设计、模型参考智能容错控制器设计、故障自适应智能容错控制器设计、神经网络智能容错控制器设计、专家系统智能容错控制器设计等。

(6) 智能容错控制实现方法研究。主要包括故障信号检测、故障特征识别、故障状态预测、故障维修决策、故障容错控制等技术和方法。

(7) 智能容错控制评价技术研究。主要包括智能容错控制的评价内容、评价准则和评价方法等。

(8) 智能容错技术的工程应用。主要介绍智能容错技术在翼型风洞、大型发电机组、空气压缩机、转子碰摩、飞机结构损伤等方面的应用和工程实现。

1.3 智能容错技术的研究方法

智能容错控制的目的在于运用系统论、信息论、控制论、神经网络、专家系统、人工智能等多学科知识和技术,研究对故障进行补偿、抑制、削弱、消除和自动修复的有效途径,以保证设备在任何情况下都能安全、高效、可靠地运行。智能容错技术的研究方法主要有基于硬件结构的研究方法和基于解析余度的研究方法两种。

1.3.1 基于硬件结构的研究方法

硬件结构分硬件冗余和智能结构两种。它可通过对设备中

的主要部件或易发生故障的部件提供备份，或采用对故障具有自诊断、自适应和自修复功能的智能结构，以提高设备的容错性能。

1. 硬件冗余法

硬件冗余又分静态硬件冗余和动态硬件冗余两种^[18]。静态硬件冗余如设置三个模块执行同一项任务，把它们的处理结果按多数原则（三中取二）作出判决；动态硬件冗余如某台在干预范围内的装置发生故障，就将候备装置切换上去，用完好部件代替故障部件，以保证设备继续安全正常工作^[19]。使用时可以采用双重或多重备份的办法来提高设备的可靠性。只要能建立起冗余的信号通道或工作条件允许，这种方式就可用于对任何硬件环节失效的容错控制。

2. 智能结构法

智能结构^[20]犹如生物器官，具有感知周围环境变化，并针对这种变化作出相应反应的能力。环境变化如周围温度、外加载荷的变化，材料内部的损伤和破坏等。例如，当环境温度发生变化使结构发生变形时，智能结构能够感知这种变化，并可通过调节机制使温度变化所产生的变形消失，以补偿温度变化对故障的影响。再如，当外加载荷过大或构件发生损伤时，可以通过结构自身调节使外加载荷减少，从而达到结构不发生损伤或在损伤条件下设备仍能继续工作的目的。这对于提高设备的运行能力，特别是自生存能力非常重要。目前可用于智能结构的材料有电流变体、形状记忆合金、压电陶瓷、压电薄膜、光导纤维、磁致伸缩材料、电致伸缩材料、磁流变材料等。

1.3.2 基于解析余度的研究方法

解析余度是利用系统中不同部件在功能上的冗余性，通过估计或其他软件算法，使某些故障部件的功能由系统中别的不同部件来替代，以达到提高系统可靠性的目的。可利用的冗余资源有软件、时间和信息等。重构容错控制和鲁棒容错控制是解析余度

研究的两种主要方法^[21]。

1. 重构容错控制方法

重构容错控制是在常规控制系统的基础上设置故障诊断机构，根据故障诊断机构提供的故障信息，对故障部件进行迅速隔离，并充分利用系统的功能冗余，使系统能用剩下的部件继续工作。例如，当飞机的某个舵面或作动器发生故障后，通过重构控制策略，把失效舵面的控制效果分配给健全舵面，就可以补偿失效舵面的影响，以保证飞机继续安全飞行或着陆。重构容错控制要求系统应具有一定的冗余性，并使重构后的系统性能尽可能地接近原系统。

重构容错控制包括动态故障诊断和控制器重构两个方面。首先利用故障诊断机构定时地检测并定位故障；然后根据系统所处的工作状态，重新配置工作点；再利用某种控制器设计策略（如极点配置、最优控制、模糊控制等）动态地重新构造一个控制器，使系统性能在发生故障时能得以恢复或维持。

重构容错控制方法充分利用了系统的功能冗余，减少了传统冗余度控制中的多重冗余硬件和冗余软件。但重构容错控制方法要求必须能正确地检测和隔离出故障，然后才可以用小波分析、神经网络等方法重构控制器。重构容错控制方法的不足在于过分地依赖于故障检测和分离机构，而一般的故障检测机构都存在误检，即存在两种可能：

(1) 设备没有发生故障，而把正常部件当作故障部件——虚检；

(2) 设备发生了故障，而把故障部件当作正常部件——漏检。

一旦发生误检，不是造成不必要的停机，就是导致整个设备瘫痪。而且，从故障的发生到检测分离机构检测出故障存在一定的滞后，如果这段时间过长，也会使设备性能变坏。

故障诊断机构实现故障检测和分离的可靠性、检测延时时间、误检率等，决定或影响着重构容错控制的性能，是重构容错控制的关键技术。

2. 鲁棒容错控制方法

鲁棒控制概念是 Davison 于 1976 年首先提出^[22]。实际工程系统都是在变化的环境下运行，其中包括系统本身和周围环境的变化，这就要求控制系统对建模不确定性和外界不可测扰动具有鲁棒性。鲁棒控制的目的是寻求某种反馈控制律，使闭环系统的特征（如稳定性、性能等）不受模型和信号不确定性的明显影响。鲁棒控制的主要特征为考虑有界参数变化和扰动对系统稳定性和性能的影响。目前用于鲁棒容错控制的方法主要有：

(1) 多重系统同时稳定容错控制方法。多重系统同时稳定容错控制方法，可通过设计动态补偿器，使整个系统具有很好的可靠性。

(2) 多模型自适应容错控制方法。多模型自适应容错控制方法是采用自适应控制律实施控制，能使系统对多种故障同时发生时具有良好的稳定性。

(3) 特征结构配置容错控制方法。特征结构配置容错控制方法的基本依据是，当系统的特征向量相互正交时，系统的特征值具有最好的鲁棒性。

特征结构配置一般包括极点配置和特征向量配置两个方面。通过状态反馈进行特征结构配置，得到的控制律不但使得被配置的极点对参数摄动的灵敏度低，对系统暂态响应的范数上界以及反馈矩阵的幅值最小，而且使系统稳定裕度的下界最大。特征结构配置是通过输出反馈进行的，得到的控制律具有极小化稳态误差，因此具有性能鲁棒性。特征结构配置也可采用鲁棒自适应极点配置。

(4) Lyapunov 稳定性理论容错控制方法。Lyapunov 稳定性理论对于用状态空间模型描述的系统，进行稳定鲁棒性分析特别有效。它的主要特点是能处理时变不确定性系统。目前，利用 Lyapunov 稳定性理论设计鲁棒控制系统还存在两个主要问题：一是所得到的结果比较保守，二是选择合适的 Lyapunov 函数比较困难。

(5) H^∞ 最优理论容错控制方法。 H^∞ 鲁棒理论是 20 世纪 80 年代初发展起来的另一个有力的鲁棒控制系统设计工具。基于 H^∞ 理论求出的控制律，不但使系统对外加扰动具有鲁棒性，而且对系统的参数不确定性也具有鲁棒性。

(6) 回路传递再生容错控制方法。回路传递再生 LTR(Loop Transfer Recovery) 是 Doyle 和 Stein 于 1979 年首先提出的^[23]。LTR 作为一种重要的鲁棒输出反馈控制律的设计方法，异军突起，引起了人们的兴趣和关注。相对而言，我国学者有关这一方面的研究工作较少。

LTR 设计一般分两步 首先 根据给定的性能指标要求 设计状态反馈系统；然后，以状态反馈系统的某个回路传递矩阵作为目标回路传递矩阵，设计输出反馈控制律，使得输出反馈系统对应的回路传递矩阵精确等于或近似等于目标回路传递矩阵，从而具有与状态反馈系统同样或相近的性能。

回路传递再生通常分为开环 LTR 和闭环 LTR。开环 LTR 是以状态反馈系统的某个开环回路传递矩阵（例如，在对象控制输入处断开的开环回路传递矩阵等）作为目标回路传递矩阵，闭环 LTR 是直接取状态反馈系统从扰动输入到被控输出的闭环回路传递矩阵作为目标传递矩阵。

(7) 代数容错控制方法。代数容错控制方法与前面几种方法相比，其主要优点是保守性较少。减少保守性是代数方法的主要任务之一。代数方法中最引人注目的工作是由苏联学者 Kharitonov 于 1978 年得到的关于多项式 Hurwitz 稳定性的结果^[24]。Kharitonov 工作的巨大意义在于对一个参数在大范围内变化的系统，不再需要检验系统在每个点上是否稳定（事实上这几乎不可能，因为在一个区间内有无穷多个点），而只要检验四个特定点的稳定性即可，从而为不确定性系统的分析与设计提供了有力的工具。在 Kharitonov 工作的基础上，人们得到了包括棱边定理^[25]在内的一系列结论。

基于硬件结构研究方法的主要特点是需要消耗硬件资源，而

基于解析余度研究方法的特点是：

- (1) 故障检测灵敏 假报故障率低；
- (2) 故障检测可靠性高，在硬件实现和软件设计方面灵活性大；
- (3) 性能好 功能强 成本低。

解析余度由于具有以上优点，近年来引起了研究者的广泛关注^[26,27]，并在容错控制中得到广泛应用。

1.4 小 结

容错技术作为提高系统可靠性的一种重要手段，目前已应用到工程设备的许多领域，特别是对航空、航天、石油、化工、核电站等大型关键重要设备，越来越显示出其优越性。随着人工智能、微机械、微电子等高新技术的发展，智能容错技术必将在提高设备的安全性和可靠性方面发挥更大的作用。

本章概要地介绍了智能容错技术的有关概念、研究内容和研究方法，提出了将智能结构用于设备的容错控制，重点对鲁棒容错控制和重构容错控制进行了较详细的介绍。

智能容错技术目前研究的热点是智能故障检测和鲁棒容错控制。

参 考 文 献

- 1 黄文虎等，设备故障诊断原理、技术及应用，北京：科学出版社，1997
- 2 Wang Zhongsheng, etc. Intelligent Fault - tolerant Management of Electromechanical Equipment, International Journal of Plant Engineering and Management, Vol.2, No.3, 1997
- 3 王仲生，微机监测设备故障容错控制研究，微电子学与计算机，1994.2
- 4 吴今培 肖健华，智能故障诊断与专家系统，北京：科学出版社，1997
- 5 姚一平 李沛琼，可靠性及余度技术北京：航空工业出版社，1991
- 6 Robert F S. Intelligent Failure-Tolerant Control. IEEE Control Systems, June 1991

- 7 王仲生 . 设备运行过程故障容错控制研究 . 航空学报 ,1993.11
- 8 Pierce W H. Failure-Tolerant Computer Design. Academic Press, Inc, New York, 1965
- 9 对于控制的挑战——集体的观点 . 控制与决策 ,1987.5
- 10 Koren I, Pradhan D K. Yield and Performance Enhancement Through Redundancy in VLSI and WSI Multiprocessor Systems. Proc. IEEE, Vol. 74, No. 5, May 1986: 699-711
- 11 Moore W R. A Review of Fault Tolerant Techniques for the Enhancement of Integration Yield. Proc. IEEE, Vol. 74, No. 5, May 1986: 684-698
- 12 张汉英 . 必须加速发展实用性的容错系统 . 控制工程 ,1986.4
- 13 周东华等 . 以故障检测为中心的非线性动态系统的容错控制 . 控制理论与应用第四届全国学术年会论文集 ,1990:189-194
- 14 程一 . 线性多变量系统控制器和传感器的动态冗余性分析 . 信息与控制 ,1990.1
- 15 葛建华等 . 传感器失效故障系统的容错控制研究 . 浙江大学学报 ,1990.3
- 16 胡寿松等 . 动态系统的鲁棒容错控制方法 . 自动化学报 ,1991.5
- 17 Patton R J. Fault Tolerant Control: the 1997 Situation. Proc. of IFAC/IMAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process, Hull, England, 1997:1033-1055
- 18 王珍熙 . 可靠性冗余及容错技术 . 北京: 航空工业出版社 ,1991
- 19 王仲生 . 直流调速系统故障检测与控制 . 计算机自动测量与控制 , 1995.4
- 20 陶宝祺 . 智能材料结构 . 北京: 国防工业出版社 ,1997
- 21 胡昌华等 . 控制系统故障诊断和容错控制的分析与设计 . 北京: 国防工业出版社 ,2000
- 22 Devison E J. The Robust of a Servomechanism Problem for Linear Time-invariant Multivariable Systems. IEEE Trans 1976, AC-12
- 23 Doyle J C, Stein G, Robustness with Observers. IEEE Trans, 1978, AC-24: 607-611
- 24 Kharitonov V L. Asymptotic Stability of on Equilibrium Position of a Family of Systems of Linear Differential Equations. Different Ialjnic Uravnenic, 1978: 2086-2088
- 25 Bartlett A C, Hollot C A, Lin H. Root Location of an Entire Polytope of Polynomial: It Suffices to Check the Edges. Proceedings of American Control Conference, 1987: 1611-1616
- 26 Patton R J, Chen J, Robust Fault detection and Isolation Systems. in Control and Dynamic Systems. Mita Press, 1996, 74: 171-224
- 27 周东华 叶银忠 . 现代故障诊断与容错控制 . 北京 清华大学出版社 ,2000

第二章 智能容错控制的构成

智能容错控制 IFTC(Intelligent Fault - Tolerant Control) 是一种对设备故障具有高度自主性和自适应与自修复能力的控制, 已成为解决和提高设备安全性与可靠性等问题的关键性技术之一。本章主要介绍对智能容错控制的基本结构、构成原理和构成方法。

2.1 智能容错控制的基本结构

智能容错控制的基本结构如图 2-1 所示^[1]。

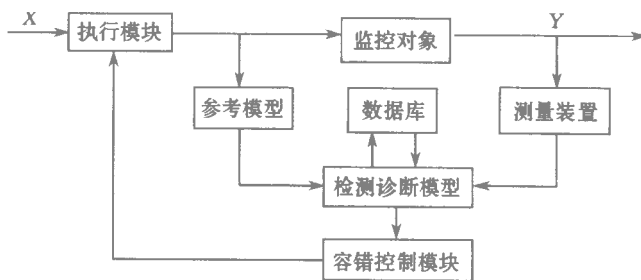


图 2-1 智能容错控制的基本结构

IFTC 主要由硬件和软件两部分组成。

2.1.1 硬件部分

硬件主要由信号检测传感器、二次仪表、接口板、微型机等组成。传感器检测的信号经放大和多路切换开关送入 A/D 转换器, 将模拟信号转换成数字信号。转换结束后, 12 位数码自动锁存到

数据寄存器中，经计算机采样和处理，分离出故障信息，并进行显示、记录和报警。对于可控故障，信号经 D/A 转换后送入容错控制器，再通过执行机构自动对故障实现容错控制。

2.1.2 软件部分

软件主要由监测诊断和容错控制两大模块组成。监测诊断模块主要用于设备的故障检测、故障诊断和故障预报，并为容错控制模块提供必要的信息。监测诊断结果以文件形式存于数据库，对中间结果可以不断进行刷新。容错控制模块具有一定的智能作用。它由若干不同功能的容错子块组成，可以根据检测的故障信息采取相应的容错控制策略对故障自动进行补偿、抑制和消除，以保证设备连续正常运行；或以牺牲性能损失为代价，保证设备在规定时间内完成其基本功能。

系统运行分两种模式。当没有故障发生时，监测诊断和容错控制模块只起监视和预测作用，并将设备的运行状态和监测参数以图形和数据形式实时显示在 CRT 上。当出现故障或即将出现故障时，容错控制器才正式投入工作，并调用相应的容错子模块，保证设备在规定时间内完成其规定功能。该系统的突出特点是能有效地提高设备的安全性和可靠性，尤其对于大型、关键、重要设备，此特点更为显著。

智能容错控制是对付故障、提高设备安全性和可靠性的有力措施。它主要有以下特点：

- (1) IFTC 是一种知识密集、高技术集成的控制，既具有高度可靠性和实时性，又具有对各类资源的分布性和软硬件的可塑性；
- (2) IFTC 对设备运行状态具有实时监测、识别和超前预测能力；
- (3) IFTC 对知识具有自动获取和自组织、自学习能力；
- (4) IFTC 对问题具有判断、决策和自协调能力；
- (5) IFTC 能适应环境的显著变化，在各部件正常工作时，设备具有指定的性能；若设备的一个或多个关键部件发生故障，仍能