



装备科技译著出版基金

 Springer

[新加坡] Danwei Wang
Ming Yu

Chang Boon Low

[以色列] Shai Arogeti 著

冯辅周 张丽霞 杨永利 江鹏程 译

基于模型的 混合系统健康监测

Model-based Health Monitoring of Hybrid Systems



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

基于模型的混合系统健康监测

Model-based Health Monitoring of Hybrid Systems

[新加坡] Danwei Wang Ming Yu Chang Boon Low

[以色列] Shai Arogeti 著

冯辅周 张丽霞 杨永利 江鹏程 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2015-089号

图书在版编目(CIP)数据

基于模型的混合系统健康监测 / (新加坡) 王丹伟
(Danwei Wang) 等著; 冯辅周等译. —北京: 国防工
业出版社, 2017. 1

书名原文: Model-based Health Monitoring of Hybrid
Systems

ISBN 978-7-118-10888-0

I. ①基… II. ①王… ②冯… III. ①混合系统-检
测-研究 IV. ①N945.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 002735 号

Translation from English language edition:

Model-based Health Monitoring of Hybrid Systems

by Danwei Wang, Ming Yu, Chang Boon Low and Shai Arogeti

Copyright © 2013 Springer New York

Springer New York is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer Science + Business Media 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 16 字数 306 千字

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 89.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

译者序

混合动态系统是指同时包含离散动态子系统和连续动态子系统,且两者之间存在相互作用的系统,简称混合系统(Hybrid System)。混合系统的动态行为由相互影响的连续动态和离散动态来决定,涉及系统各种运行模式的转换。现实世界的大多数复杂系统都是混合系统,如车辆、电力系统、化工过程等。自20世纪90年代,混合系统逐渐成为众多学科如控制、计算机等关注的重点。混合系统的高度复杂化和集成化在最大化地满足人类生产生活需求的同时,对安全性和可靠性也提出了更苛刻的要求,由于其运行状态的多变性和复杂性,如何有效监测其运行和健康状态成为一个难题。

键合图(Bond Graph, BG),全称为功率键合图,具有规范严密的推理及变换规则,保持了与各类物理过程和普遍定律之间高度的协调一致。利用键合图可建立系统的元件级模型,直观地阐明系统内各元件的相互作用关系,模型结构简明,包含信息量大,便于建立系统状态方程和计算机仿真计算。键合图自1959年提出至今已发展50余年,其理论已近完善,在机械、热力学、化学、流体等工程技术领域的动态分析与故障诊断研究中得到广泛应用。作为一种多学科建模语言,键合图采用简洁一致的方式对系统中不同能域的守恒变换过程进行统一建模。基于键合图的故障诊断具有建模容易、推理算法严谨且可扩展性好、诊断效率高、故障隔离实时性强等优点。此外,结合键合图在系统控制方面的优势研究故障自适应诊断技术,可实现系统在线自动诊断与故障处置,来提高诊断自动化水平。因此,本书的理论和方法将在工程系统动态特性分析、状态监测与故障诊断等领域得到广泛应用。

本书内容翔实、论证严谨、系统性强。全书内容共分为7章,包括工程系统的健康监测、混合系统与混合键合图模型、基于定量混合键合图的故障诊断和隔离、故障识别技术、模式跟踪技术、实时FDI(故障诊断与隔离)和故障评估在车辆转向系统的应用以及混合系统的多故障预测。

翻译工作的安排如下:冯辅周教授负责前言、目录、第1章和第2章部分章节;张丽霞讲师负责第4章和第7章;杨永利博士负责第5章部分章节和第6章;江鹏程讲师负责第2章部分和第3章。另外,冯辅周教授的博士生朱俊臻,硕士生刘晓阳、王若天参加了部分章节编辑、翻译及校稿等工作,本科生秦钰洋、王杰、邢文安和杨柱参与了部分章节的图表和公式的编辑工作。全书由冯辅周教授和张丽霞讲

师统稿。冯辅周教授负责全书翻译工作的统一和协调,并对全书作了最后的校核。

本书的翻译工作得到了国家自然科学基金项目(50105396、51205407)和总装备部院校科技创新工程(ZYX1206006)项目的资助。本书的出版还获得了装备科技译著出版基金的资助,在此一并表示谢意。

书中难免存在不当和疏漏之处,欢迎读者提出宝贵意见。

译者

于北京卢沟桥畔

2016年9月

前 言

随着工业系统复杂程度的提高,故障诊断和失效预测作为维护系统安全性和可靠性的重要手段,变得越来越重要。很多人工系统,如打印机、转换器和汽车,由相互作用的连续和离散部分组成,可看作混合系统进行建模。混合系统的监测需要对连续状态变量进行评估,并跟踪离散状态,混合系统随模式改变的特性给故障监测带来更大困难。在过去的 20 年间,人类为混合系统的故障诊断做了若干努力;然而,据我们所知,没有关于混合系统失效预测成果的报道。因此,需要开发一个框架和有效技术来完成复杂分析、可靠设计以及混合系统诊断和预测算法的高效执行。

键合图作为一种多学科建模语言,是由麻省理工学院 Henry Paynter 教授于 1959 年提出的。近年来,它在不同的工程应用中显露出强大的生命力,如控制工程、过程监测、系统识别等。为了实现混合系统的建模,1995 年 Vanderbilt 大学的 Gautam Biswas 教授和他的学生 Pieter J. Mosterman 提出了混合键合图。此后,人们深入开展混合键合图在不同混合系统的应用研究。

本书解释了应用混合键合图建模实现混合系统的诊断和预测相关的理论和实验工作,提供了诊断、预测以及混合键合图建模等基础知识的概述,描述了基于混合键合图的定量故障诊断、隔离和评估的框架。此外,还介绍了多故障条件下跟踪系统模式和预测系统剩余寿命的策略。开发的故障诊断方法已应用到现实中的复杂混合系统——移动式机器人转向控制系统,显示出其实用价值。本书的素材均来源于自主研究项目,撰写本书的想法源于与本领域部分有重要地位的人士的交流。

本书还介绍了采用混合键合图方法进行基于模型的故障诊断和预测领域的最新进展,以便更好地了解健康监测的进展,并在未来的研究工作中为研究人员提供帮助。本书适用于电机工程、机械工程或者计算机科学背景的大学生和研究生。同时,本书可作为实践工程师和理论研究者的导论性读物。本着这些目的,本书范围覆盖了以下主题:混合系统建模、基于定量混合键合图的故障检测和隔离、故障

参数识别、模式跟踪技术、实时故障诊断技术在车辆转向系统中的应用以及多故障预测。

Danwei Wang

Ming Yu

Chang Boon Low

Shai Arogeti

于新加坡

2013年2月

目 录

缩略语	1
第 1 章 工程系统的健康监测	3
1.1 基于状态的维护	3
1.2 故障诊断的任务和方法	4
1.2.1 故障诊断任务	4
1.2.2 故障诊断方法	6
1.3 失效预测的任务和方法	15
1.3.1 失效预测的任务	15
1.3.2 失效预测的方法	15
1.4 本书结构	20
参考文献	21
第 2 章 混合系统与混合键合图模型	27
2.1 混合系统	27
2.2 混合系统的建模方法	29
2.3 键合图基础	31
2.3.1 键、功率与因果关系	32
2.3.2 键合图元件	34
2.3.3 基本键合图元件的因果关系	40
2.3.4 顺序因果关系分配程序	43
2.3.5 示例:四分之一汽车悬架系统建模	45
2.4 混合键合图	54
2.4.1 混合键合图的因果特性和因果关系分配	56
2.4.2 示例	59
参考文献	63
第 3 章 基于定量混合键合图的故障诊断和隔离	65
3.1 介绍	65

3.2	基于键合图的故障诊断	65
3.2.1	解析冗余关系	66
3.2.2	残差估计和故障特征矩阵	66
3.2.3	ARR 的生成	67
3.3	基于混合键合图的故障诊断	88
3.3.1	面向 FDI 的因果关系分配	88
3.3.2	全局解析冗余关系	100
3.3.3	故障可检测性和可隔离性分析	101
3.3.4	示例研究	103
	参考文献	116
第 4 章	故障识别技术	119
4.1	故障识别的非线性最小二乘优化法	119
4.1.1	非线性最小二乘法	119
4.1.2	示例:非线性混合电气系统	122
4.2	同步故障参数和模式变化识别	126
4.2.1	模式变化的参数化	126
4.2.2	同步故障参数和模式开关识别	127
4.2.3	示例一:电动液压悬挂	133
4.2.4	实例二:混合电气系统	148
	参考文献	152
第 5 章	模式跟踪技术	154
5.1	FDI 框架下的混合系统模式跟踪	154
5.1.1	混合系统的模式转换特征值	154
5.1.2	基于 ARR 的模式转换识别	157
5.1.3	示例说明	165
5.2	故障状态下的混合系统模式识别	168
5.2.1	基于规则的 ARR 分析	172
5.2.2	实施方案和算法	179
5.2.3	从理论到应用	182
5.2.4	实验研究	185
	参考文献	190
第 6 章	实时 FDI 和故障估计在车辆转向系统中的应用	192
6.1	简介	192

6.2	车辆转向系统的描述	193
6.2.1	电液转向系统	193
6.2.2	考虑的故障	194
6.3	前转向系统的 FDI 方法	195
6.3.1	电液转向系统的 DHBG 模型	195
6.3.2	全局解析冗余关系的建立	201
6.3.3	FDI 方法	203
6.4	实验研究	205
6.4.1	实验的软硬件	206
6.4.2	结果与分析	209
	参考文献	213
第 7 章	混合系统的多故障预测	215
7.1	早期多故障预测	215
7.1.1	增强的全局解析冗余关系	216
7.1.2	退化模型	217
7.1.3	基于 PSO 的预测	218
7.1.4	实例说明	222
7.2	依赖于模式的退化行为预测	231
7.2.1	动态故障隔离	231
7.2.2	依赖于模式的退化行为	233
7.2.3	顺序预测	234
7.2.4	实验结果	237
	参考文献	244

缩 略 语

- AGA 自适应遗传算法
AGARR 增强全局解析冗余关系
AHPSO 自适应混合粒子群优化
AI 人工智能
ARR 解析冗余关系
BDE 二进制差分进化
BG 键合图
BPSO 二进制值粒子群优化
CBM 基于状态的维护
DE 差分进化
DHBG 诊断混合键合图
EA 进化算法
FDI 故障诊断和隔离
FSM 故障特征矩阵
GA 遗传算法
GARR 全局解析冗余关系
HBG 混合键合图
HDE 混合差分进化
HMM 隐马尔可夫模型
HPSO 混合粒子群优化
IMC 初始模式系数
IMM 交互式多模型
MAHPSO 多模自适应混合粒子群优化
MAT 模式 AGARRs 表
MCSM 模式转换特征矩阵
MD - FSM 依赖于模式的故障特征矩阵
MGY 调制回转器
MHDE 多模混合差分进化
MTF 调制转换器

ODE 常微分方程
PCA 主成分分析
PHM 预测和健康管理
PSO 粒子群优化
QBG 定性键合图
QHBG 定量混合键合图
QSIM 定性仿真
RDE 实差分进化
RPSO 实值粒子群优化
RUL 剩余使用寿命
SCAP 顺序的因果关系分配程序
SCAPH 混合系统的顺序因果分配程序
SOC 充电状态
SVC 支持向量分类器
SVM 支持向量机
TCG 时序因果图

第 1 章 工程系统的健康监测

1.1 基于状态的维护

一般情况下,故障是指一种非正常的状态,可能会引起系统或其元件执行要求功能的能力降低或丧失;另一方面,失效是指系统或其元件功能的丧失,无法按照规定的性能要求完成规定的功能。松弛的传送带是机械系统的一个故障实例,传送带仍然可以工作但是传输效率却降低了。损坏的传送带却是一个失效实例,因为它不能再工作,必须更换。

系统的健康监测是失效预防和基于状态维修(CBM)的关键特征。一个健康监测系统需要及时发生故障或失效,以便可以有效地更换故障元件,确保系统正常运行。在过去的几十年,维修策略从早期的反应性维修不断发展到基于寿命的预防性维修,再到基于状态的维修。反应性维修通常在系统出现故障后才执行。为了避免灾难性故障,导致系统紧急停机,引入了基于寿命的预防性维修。该策略的执行依据是系统的运行时间,而不考虑健康状态。基于寿命的预防性维修有时可减少意外故障,但是它不能有效地降低成本和消除主要故障。这些常规维修策略不能满足现代工程系统的高可靠性要求。幸运的是,基于状态的维修是一种有效的选择,当监测系统发现运行系统出现异常时,试图采取一些维修措施以避免不必要的维修^[1]。该监测过程通过传感器测试完成而不中断系统的正常运行,从而避免过度或不足的维修,得到更高的系统可用性。

通常,基于状态的维修包括三个关键步骤:数据采集、数据分析和决策制定,如图 1.1 所示。数据采集是为了获得与系统状态相关的数据。数据分析是为了更好地理解 and 诠释采集到的数据或信号而进行的处理和分析。决策制定的目的是为了给出有效的维护策略。诊断和预测是基于状态维修的两项互补的任务,因为诊断是一个“静态”指标,而预测是一个“动态”指标。诊断的目的是确定是否有故障发生,同时提供一些有关故障严重程度的信息^[2]。预测是为了跟踪故障退化和预测故障元件或子系统的剩余使用寿命(RUL)。近些年,基于状态的维修的预测研究得到了更多关注和不同的应用。预测往往比诊断能更有效地实现零

D. Wang et al., *Model-based Health Monitoring of Hybrid Systems*,

DOI: 10.1007/978-1-4614-7369-5_1, © Springer Science + Business Media New York 2013

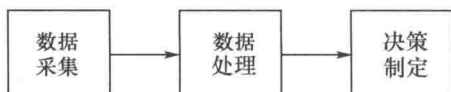


图 1.1 基于状态维修的三个步骤

停机运行,其重要性更体现在一些存在灾难性失效的工程应用中(如直升机齿轮箱和核电站)。

1.2 故障诊断的任务和方法

1.2.1 故障诊断任务

通常,故障诊断有三个任务,即故障检测、故障隔离和故障识别^[3]。

(1) 故障检测。它是故障诊断的第一步,用来检测被监测系统中出现的故障。在故障可能引起系统的灾难性失效之前,故障的早期检测非常重要。

(2) 故障隔离。假设故障已经发生且被检测到,故障隔离的目的是建立可能的候选故障,用来解释观测到的非正常行为。对于单故障诊断,其目的是确定能够引起这种观察信号的唯一单故障。但即使传感器可应用于监测系统,也并不是总可以确定一个唯一的候选故障。对于多故障诊断,目的是获得一组同时发生的故障来解释观测结果。

(3) 故障识别。该步骤用来确定故障的等级和类型。对于突发性故障,如果在故障隔离后仍然存在有多个故障集,那对于每一个故障集需要进行识别,它们之中与观察结果最匹配的则认为是真正的故障集。对于早期故障,故障识别任务非常困难,这是由于确定此故障动态退化行为必须提前假设,有时假设条件是不容易获得的。如果识别的故障严重程度是可接受的,这一严重度将用于系统控制规律的重构设计来实现故障容错。另一方面,如果故障识别结果表明故障太严重而无法接受,则需要替换相应的故障元件。

对于可能的故障情况,根据其性质可分为如下三种类型。

(1) 突发性故障。典型的模型为阶梯偏差信号且具有持续性,如图 1.2 所示,其中 t_0 表示故障出现的时刻。对于突发性故障,能够及时检测到突发变化来避免灾难性结果的故障诊断方案是至关重要的。在这种情况下,早期检测和调整是故障诊断的关键目标。

(2) 早期故障。具有缓慢形成的特点,通常与系统元件的磨损和脱落有关,如图 1.3 所示。由于故障形成的缓慢性和系统反馈控制补偿效果的影响,检测早期故障相对困难。

(3) 间歇性故障。通常以不可预测的方式间歇性地表现出来,如图 1.4 所示。例如,打印机中磨损的滚筒可能不再能够连续送纸,这就会导致间歇性的卡纸。滚

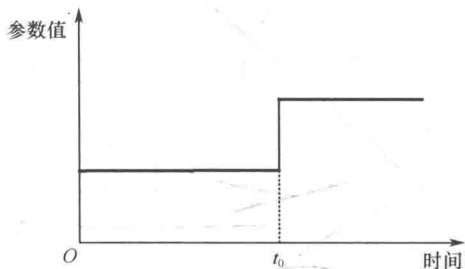


图 1.2 突发性故障图

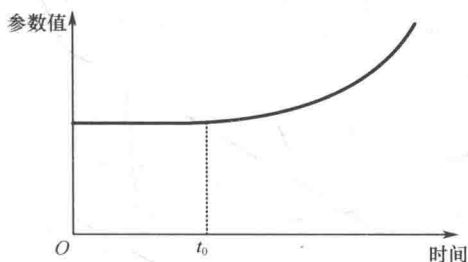


图 1.3 早期故障图

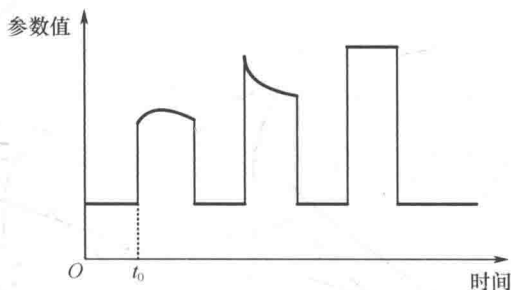


图 1.4 间歇性故障图

筒磨损的打印机通常能正常运转,但是会偶尔打滑而产生卡纸。间歇性故障很难处理的原因在于以下几个方面:首先,如果诊断过程没有连续执行,当诊断有效时,间歇性故障却有可能没有出现;其次,故障信号和检测都不是一直持续的。在这种情况下,很难将间歇性故障和其他类型的故障区分开,如突发性和早期故障。基本上,突发性和早期故障属于持续性故障,这意味着,它们一旦出现就不会消失,而间歇性故障却会消失。下面将讨论监控系统中的各种故障源。

(1) 元件故障。参数值与其标准值的偏差可引起系统中的状态改变。例如,车辆中漏气的轮胎会增加轮胎和地面之间的摩擦系数。

(2) 传感器故障。传感器提供被检测系统的信号测量值并将其表达为系统相关行为和内部状态的信息。当测量信号和实际值之间存在差异时,可能出现了传感器故障。

(3) 执行器故障。执行器是系统的控制执行单元。对于大多数机电系统,从控制器输出的控制信号无法直接作用到系统中。执行器将控制信号转换为合适的驱动信号,如驱动系统的扭矩和作用力。当作用于系统的执行器的期望输出和实际输出之间存在差异时,将会出现执行器故障。

这些不同的故障源如图 1.5 所示。

(1) 不确定性。建模的不确定性可能来源于系统动态特性的错误估计,参数数值的非精确识别或者因热度、时间或工况引起的数值变化。

(2) 干扰。干扰通常是指传感器测量信号中的高频成分。其他因素,如不可

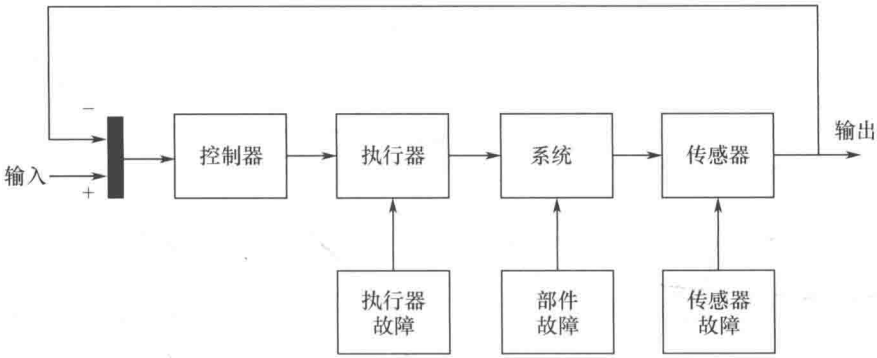


图 1.5 被监测系统不同故障

测量的摩擦、未知输入和回差都可认为是干扰。

一个好的诊断系统应该对于各类干扰和不确定性都有很好的鲁棒性,同时仍能保持其故障灵敏性。

1.2.2 故障诊断方法

故障诊断方法可大致分为两类(图 1.6):基于模型的方法和数据驱动方法。对于基于模型的方法,模型是对大量的结构、功能和行为信息及其相互关系的知识表示,利用它可创建复杂的因果推理关系,构成有效的、鲁棒性好的自动诊断与隔离系统^[4]。

当系统的数值模型不可用时,可以选择基于定性模型的方法当模型结构有较

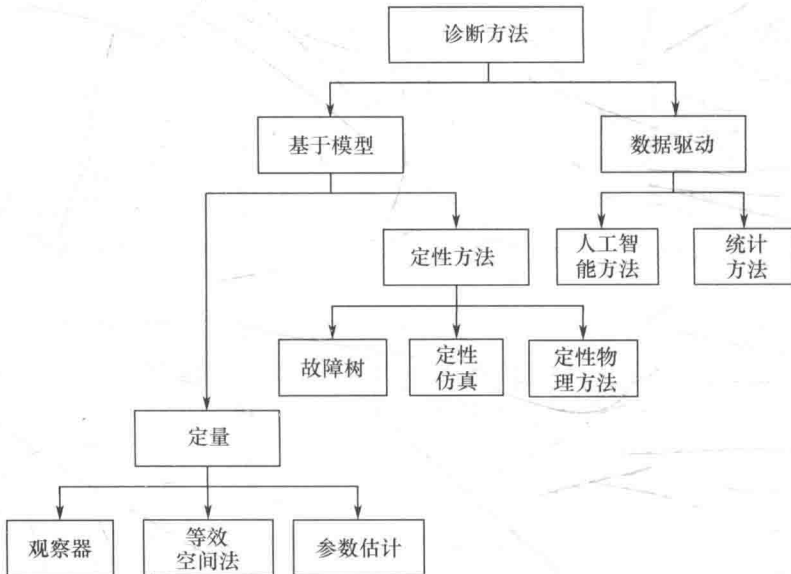


图 1.6 诊断方法的分类

好的定义时,它利用定性的抽象来建立复杂系统的模型。与数值模型相比,基于定性方法的模型比较简单,故障诊断系统对于建模误差和传感器噪声的敏感性将得到一定程度的缓解^[5]。定性仿真(QSIM)是应用广泛的建模工具,用来定性描述连续模型^[6]。该方法的目的是利用定性值来模拟物理系统的行为,而不是解释物理模型的行为。在文献[7]中的一些故障模型就是利用定性仿真方法建立的,将观察到的故障行为与故障模型的输出相比较来确定系统发生的故障集。然而,确定故障模型需要一定的先验知识。在文献[8,9]中,基于定性仿真的故障诊断常用来处理连续系统下的多故障情况。定性建模框架利用界标值来量化状态空间,同时明确了定性状态之间的定性关系,这就得到了一组定性微分方程。文献[10]提出了一种模糊定性仿真方法,相比于基于定性仿真的故障诊断,其优点是如果观察到的行为不与任何故障模型的预测行为匹配,候选发生器将检查优化模型,该模型的预测行为可以和观察到的行为相匹配。因此,从发生器中选择的优化模型将用于确定候选故障。模糊定性仿真方法可以提供比定性仿真方法更精确的信息,因为利用模糊集可以得到一个关于时间的更精确表示。在连续系统的诊断中,时间是在算法设计时需要考虑的一个重要因素。然而,选择合适的模糊集数和隶属函数比较困难,这是模糊逻辑系统设计中常见的问题。此外,也没有有效的方法来确定用于候选发生器搜索的优化模型数量。

故障树方法最初是由贝尔实验室的沃森教授于1961年提出的,当时用于美国空军弹道系统部的一个项目中,来评估“民兵”I型洲际导弹(ICBM)发射控制系统。随后,波音公司修改了该概念并用于计算机领域。目前,故障树方法在许多领域广泛使用^[11,12]。故障树是一个模型,它通过图形和逻辑的形式来表达发生在系统中的各种可能事件(故障的和正常的)的不同组合,最终引起系统内不希望的顶事件发生。它是确定不希望事件(称为顶事件)潜在原因的一个结构化的表示方法。顶事件通常代表一个造成安全隐患的主要事故。故障树是自顶向下构建的,顶事件通常是在故障树的顶端,为了得到更多信息,需要将系统一直分割到基本事件,直至顶事件变成已知的。故障树通常有数层节点,每一节点通过执行不同的“与”和“或”逻辑运算进行信息传递,如图1.7所示。通常,故障树分析包括以下四个步骤:系统定义、故障树构建、定性评估、定量评估^[13]。在构建故障树之前,必须对系统有比较详细的了解和认识。为了进行一致的诊断,故障树应完全代表系统的因果关系,即说明所有故障情况。然而,没有正规的方法可用来验证所建故障树的准确性。

定性物理方法通常通过微分方程推导定性方程。文献[14]提出了定性键合图(QBG)法,它结合了定性推理和键合图模型理论,兼具两者的优势。在定性键合图中,用于故障分析的定性方程可由键合图模型代替微分方程推导得到。这些方程代表元件的物理变量、位置以及可直接从模型中描述的功能关系。这特别适合于基于模型的故障诊断,因为可能的故障可以通过定性分析元件状态和被观察