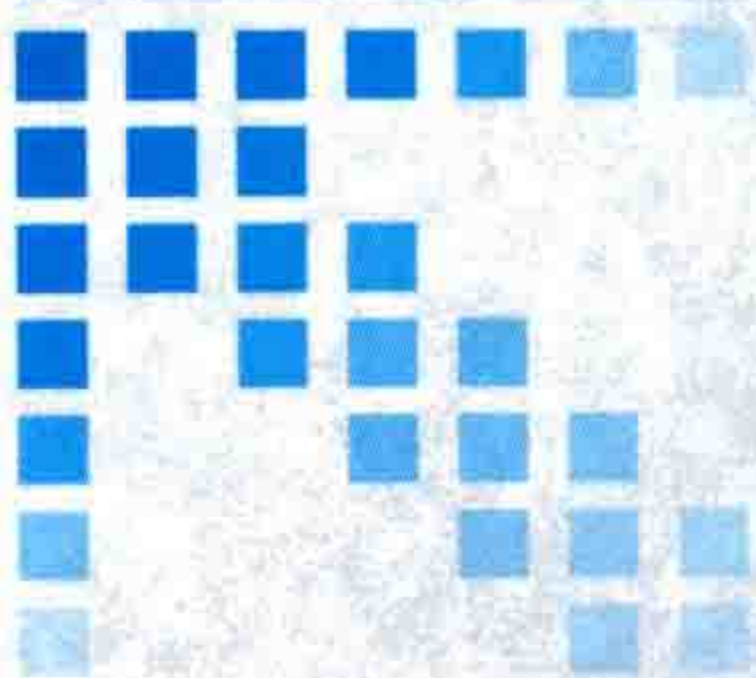


设备故障诊断中的证据融合与决策方法



徐晓滨 文成林 孙新亚 吉吟东 © 著



科学出版社

设备故障诊断中的证据融合 与决策方法

徐晓滨 文成林 孙新亚 吉吟东 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书内容涉及基于 Dempster-Shafer 证据理论的信息融合与决策方法研究,以及在设备故障诊断中的应用,属于智能信息处理的范畴。第 1 章综述各种工业系统故障诊断技术的发展现状及未来发展趋势,第 2 章介绍 Dempster-Shafer 证据理论的基本概念、准则、基本原理,并对其近年来最新的发展方向:区间值信度结构、证据动态更新和证据推理的相关理论与方法等进行介绍。以典型旋转机械、电子电路等设备的故障诊断与可靠性评估为背景,基于证据理论中的最新研究成果,在第 3~14 章中提出一系列诊断证据融合、更新与故障决策的新方法,解决多源不确定性故障信息环境下的故障检测、故障定位及故障识别等故障诊断中的分类决策问题。书中对主要的方法均给出故障诊断的应用实例,便于读者掌握证据融合与决策的应用背景、适用环境、实施步骤及诊断效果的分析与评估。

本书可供自动化、电子信息、测控、机电一体化等学科的研究生选用或参考,同时对从事自动控制与智能监控系统研究、设计、开发和应用的广大工程技术人员也具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

设备故障诊断中的证据融合与决策方法/徐晓滨等著. —北京:科学出版社, 2017.5

ISBN 978-7-03-052020-3

I. ①设… II. ①徐… III. ①机械设备—故障诊断—研究
IV. ①TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 047615 号

责任编辑:陈 静 邢宝钦 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

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>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 5 月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2017 年 5 月第一次印刷 印张:17 1/4 插页:1

字数:340 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着信息技术和自动化技术的快速发展，现代工业中系统的集成度和复杂度越来越高，如航空航天、制造、运输、化工等行业。这类系统往往构造十分复杂，各模块之间的联系非常紧密。长时间高负荷的持续运转及随着时间变化的内外部条件等因素的影响，时常会导致各种类型故障的发生，而关键部件一旦出现故障则可能引起连锁反应，轻者造成整个系统不能正常运行，重者造成重大的人员伤亡和巨大的经济损失。例如，近年来国内外发生的多起大型石油化工装置及危险品的爆炸、电力系统的大规模停电、列车脱轨及碰撞等恶性事故，产生了严重的社会影响，造成了诸多不安定因素。面向复杂工业系统的故障诊断技术可以提升系统的运行安全性，有效降低或避免重大或一般性安全事故发生的概率，为视情维修、维护策略的制定提供必要的信息与依据，它是实现从“诊断维护中要效益”的重要途径。故障监测与诊断技术已经发展了 40 余年，在诸多领域得到了广泛研究和成功应用，如航空航天，陆路、水路交通，石油化工，机械设备，供电系统，半导体制造等。

从单传感器获得的故障信息是有限的，因此在对复杂工业系统进行故障诊断时，往往需要设置大量不同种类的传感器收集设备的运行状态信息，并对信息进行融合，然后根据融合结果做出故障决策。实际中，由于存在一些不可避免的因素，如环境噪声对测量的干扰、传感器观测误差及性能下降，对系统机理模型的了解程度不足等，获取的监测信息或知识具有不完整、不确定和非精确等特性。因此，迫切需要一种有效的融合机制来减少，甚至消除这种非精确与不确定性对故障决策的影响。Dempster-Shafer 证据理论（简称证据理论）在处理不确定信息方面具有很好的鲁棒性，其利用基本信度赋值（BBA）表示和度量信息的非精确性和不确定性，并提供 Dempster 组合规则来融合以 BBA 形式表示的证据，有效降低信息的不确定性，提供比任何单源信息更为精准的融合结果。因此，证据理论已经被广泛用于不确定环境下，典型工业设备的故障诊断，如旋转机械、电力电子、控制系统以及传感器网络等。近年来在证据理论中出现了诸多新的发展方向，如区间值信度结构、证据动态更新和证据推理的新理论与新方法等，对于提升原有诊断证据融合与故障决策方法，在不确定性故障信息的合理化描述、多诊断证据的静态和动态融合，以及诊断证据的可靠性和重要性评估等方面的能力，具有积极的推动作用。新理论与新方法的出现，势必会促进信息融合故障诊断与决策技术的迅速发展，并有望将新技术和方法应用于实际，提升工业系统的智能化水平。

本书第 1 章综述各种工业系统故障诊断技术的发展现状及未来发展趋势，

第 2 章介绍 Dempster-Shafer 证据理论的基本概念、准则、基本原理，并对其近年来最新的发展方向进行介绍。第 3~14 章中，以旋转机械、电子电路等系统的故障诊断与可靠性评估为背景，分别基于这些出现的新理论与新方法，提出一系列诊断证据融合、更新与故障决策的最新方法，解决多源不确定性环境下的故障检测、故障定位及故障识别等故障诊断中的分类决策问题。

本书所涉及研究成果得到众多科研机构的支持，其中特别感谢国家自然科学基金重点项目“面向工业大系统安全高效运行的报警设计与消除方法及应用（61433001）”、“大型船舶动力系统运营寿命周期故障预测与智能健康管理（U1509203）”、“机主人辅模式下智能汽车故障诊断、预测与容错控制研究（U1664264）”和面上项目“铁路自动闭塞系统信度级故障预测的信息融合方法（61374123）”，以及浙江省科学技术厅公益技术应用研究项目（2012C21025、2016C31071）。徐晓滨同志在清华大学博士后及英国曼彻斯特大学认知与决策研究中心访学期间，分别在周东华教授、吉吟东教授、Yang Jianbo 教授和 Xu Dongling 教授等指导下进行了许多研究工作，受益匪浅。研究生张镇、冯海山、周哲、宋晓静、史健、刘征、李世宝和郑进等参加了本书的部分章节的写作、文字录入和修改工作，谨向他们表示衷心的感谢！

由于作者理论水平有限以及研究工作的局限性，特别是信息融合理论本身正处在不断地发展之中，书中难免存在一些不足。恳请广大读者批评指正。

作 者

2016 年 10 月

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	引言	1
1.1.1	提高工业系统运行安全性是社会的迫切需求	1
1.1.2	工业系统的运行安全性受到国家高度重视与支持	4
1.1.3	故障诊断技术为系统安全可靠运行提供有力保障	5
1.1.4	信息融合是建立故障诊断与决策方法的必然选择	5
1.2	故障诊断技术发展概况	6
1.2.1	定性分析的方法	7
1.2.2	基于解析模型的方法	9
1.2.3	数据驱动的方法	11
1.3	基于信息融合的故障诊断与决策方法	14
1.4	证据理论的最新进展为融合诊断技术提供推动力	17
	参考文献	19
第 2 章	Dempster-Shafer 证据理论	28
2.1	引言	28
2.2	Dempster-Shafer 证据理论的基本原理	28
2.2.1	证据理论的基本概念	28
2.2.2	证据折扣因子	30
2.2.3	可传递信度模型	30
2.2.4	证据的随机集表示与随机集扩展准则	31
2.3	证据理论中的融合决策准则	33
2.4	证据理论中的新进展	34
2.4.1	区间值信度结构	34
2.4.2	证据更新规则	36
2.4.3	证据推理与置信规则库推理	38
2.5	本章小结	42
	参考文献	43

第 3 章	基于区间值信度结构的信息融合故障诊断方法	45
3.1	引言	45
3.2	基于随机集似然测度的故障模式匹配方法	46
3.2.1	故障样板模式及待检模式隶属度函数的确定	47
3.2.2	基于随机集似然测度的故障模式匹配方法	48
3.3	基于 MLHS 从匹配区间中生成区间证据的方法	50
3.4	基于区间型诊断证据融合的故障决策	54
3.5	故障诊断实例	54
3.6	本章小结	59
	参考文献	59
第 4 章	基于证据相似性度量的冲突性区间证据融合方法	61
4.1	引言	61
4.2	区间证据的冲突及其对融合结果的影响	62
4.3	基于区间证据相似性的冲突证据度量及融合	63
4.3.1	扩展型 Pignistic 概率转换	63
4.3.2	基于区间欧氏距离的区间证据相似性度量	64
4.3.3	修正后区间证据的融合	65
4.4	典型算例分析	65
4.5	本章小结	68
	参考文献	68
第 5 章	基于条件化证据线性更新的单变量报警器优化设计方法	70
5.1	引言	70
5.2	工业系统异常检测与报警器设计中的性能指标	73
5.2.1	FAR、MAR 和 AAD 的一般性定义	73
5.2.2	常用报警器设计方法中的 FAR、MAR 和 AAD 概率定义	77
5.3	基于条件化证据线性更新的报警器优化设计	78
5.3.1	基于模糊阈值获取报警证据	79
5.3.2	基于证据距离的线性更新组合权重优化	81
5.4	基于全局报警证据的报警决策	85
5.5	实验验证与对比分析	88
5.6	本章小结	97
	参考文献	98
第 6 章	基于证据可靠性评估的多变量报警证据融合方法	101
6.1	引言	101

6.2	基于 Pignistic 概率距离的证据可靠性折扣因子优化方法	102
6.3	多变量报警证据融合与报警决策	104
6.3.1	单变量报警证据可靠性折扣因子的优化	105
6.3.2	基于 Dempster 证据组合规则的多变量报警证据在线融合	107
6.4	仿真实验与对比分析	107
6.5	本章小结	119
	参考文献	120
第 7 章	基于扩展型类 Jeffery 证据更新的故障诊断方法	121
7.1	引言	121
7.2	扩展型类 Jeffery 证据更新规则	122
7.3	基于扩展型类 Jeffery 证据更新规则的动态诊断方法	123
7.3.1	生成诊断证据的模糊规则推理方法	124
7.3.2	基于扩展型类 Jeffery 证据更新规则的动态诊断	131
7.3.3	基于 Pignistic 概率的故障决策	131
7.4	高速铁路典型轨道电路系统功能及其故障特点	132
7.5	轨道电路的仿真模型与故障模拟	134
7.5.1	轨道电路 Simulink 仿真模型	134
7.5.2	故障模拟与故障特征设置	135
7.6	轨道电路软故障诊断实验	137
7.6.1	通过故障模拟生成故障特征样本集合	137
7.6.2	构建模糊规则库	140
7.6.3	利用待检样本进行模糊推理获得诊断证据	141
7.6.4	基于证据更新的动态诊断与故障决策	142
7.6.5	诊断结果的对比分析	143
7.7	本章小结	144
	参考文献	144
第 8 章	静态融合与动态更新相结合的故障诊断方法	146
8.1	引言	146
8.2	证据的精细化折扣	148
8.3	基于静态融合与动态更新的故障诊断	150
8.3.1	局部诊断证据的静态融合及基于信度静态收敛指标的折扣因子系数优化	151
8.3.2	基于条件化证据线性更新规则的更新后诊断证据获取	152
8.3.3	基于故障信度动态收敛指标的更新权重系数优化	155
8.4	基于全局诊断证据的故障决策	157

8.5	故障诊断实例	158
8.5.1	静态融合中局部诊断证据折扣因子的优化	158
8.5.2	动态更新中相似性参数 α 及更新权重系数的优化	159
8.5.3	针对测试样本的诊断实验及其对比分析	161
8.6	本章小结	164
	参考文献	165
第 9 章	基于相关证据融合的动态系统状态估计方法	167
9.1	引言	167
9.2	证据相关性因子及相关证据融合	168
9.3	基于相关证据融合的动态系统状态估计	170
9.3.1	噪声有界下的动态系统模型	170
9.3.2	基于相关证据融合的动态系统状态估计算法	171
9.4	液位状态估计中的应用	175
9.4.1	液位仪结构及液位测量原理	176
9.4.2	动态系统建模	178
9.4.3	液位状态估计实验	178
9.5	本章小结	184
	参考文献	184
第 10 章	基于可传递信度模型的电路性能可靠性评估方法	186
10.1	引言	186
10.2	电路性能可靠性评估模型及蒙特卡罗方法	187
10.2.1	性能可靠性评估的概率模型	187
10.2.2	系统可靠度的蒙特卡罗估计方法	188
10.3	基于可传递信度模型的电路系统可靠度近似估计	189
10.3.1	构造电路参数随机集形式的证据	190
10.3.2	构造性能函数输出的 Pignistic 近似累积概率分布	192
10.4	Pignistic 近似估计的误差分析	194
10.5	高速铁路轨道电路调谐单元性能可靠性评估实例	196
10.5.1	轨道电路调谐单元的工作原理	196
10.5.2	轨道电路调谐单元性能可靠性评估	198
10.6	本章小结	206
	参考文献	206
第 11 章	基于置信规则库推理的电路性能可靠度估计方法	208
11.1	引言	208

11.2	电路性能可靠度估计的置信规则库模型	209
11.2.1	BRB 系统输入和输出参考值的构建	210
11.2.2	基于 ER 算法的 BRB 推理方法	211
11.2.3	BRB 的优化模型	212
11.3	高速铁路轨道电路性能可靠度估计实例	213
11.3.1	轨道电路 L_2C_2 串联共振电路工作原理	213
11.3.2	L_2C_2 串联共振电路性能可靠度估计	214
11.4	本章小结	217
	参考文献	217
第 12 章	基于置信规则库推理的轨道高低不平顺故障检测方法	219
12.1	引言	219
12.2	轨道高低不平顺故障及其影响分析	220
12.2.1	轨道几何不平顺的分类	220
12.2.2	轨道高低不平顺及其对机车的影响	221
12.3	基于置信规则库推理的轨道高低不平顺故障检测	222
12.3.1	BRB 系统的输入与输出量分析	222
12.3.2	BRB 系统输入与输出参考值的确定	224
12.3.3	初始 BRB 系统的建立	225
12.3.4	初始 BRB 系统的优化	226
12.3.5	优化后 BRB 系统高低不平顺安全等级检测结果测试	229
12.4	本章小结	230
	参考文献	231
第 13 章	基于可分性测度的置信规则库构建及轨道高低不平顺幅值估计方法 ..	233
13.1	引言	233
13.2	基于可分性测度的 BRB 系统输入参考值区间划分	234
13.2.1	带权邻接矩阵的计算	234
13.2.2	输入参考值区间的划分	235
13.3	基于 BRB 系统输入输出参考值可分关系的 BRB 构建	238
13.4	初始 BRB 系统的优化	241
13.5	优化后 BRB 系统高低不平顺幅值估计结果的测试与比较	244
13.6	本章小结	246
	参考文献	246
第 14 章	基于证据推理规则的信息融合故障诊断方法	247
14.1	引言	247

14.2 基于故障样本似然函数归一化的诊断证据获取方法 248

14.3 诊断证据可靠性因子的获取方法 250

14.4 基于双目标优化模型的证据重要性权重训练方法 250

14.5 故障诊断实例 253

 14.5.1 实验设置 253

 14.5.2 求取诊断证据及其可靠性因子 253

 14.5.3 求取诊断证据的权重 256

 14.5.4 测试与分析 264

14.6 本章小结 264

参考文献 265

彩图

第1章 绪 论

1.1 引 言

随着信息技术和自动化技术的快速发展,现代工业中系统的集成度和复杂度越来越高,如航空航天、制造、运输、化工等行业。这类系统往往构造十分复杂,各模块之间的联系非常紧密,但长时间高负荷的持续运转及随着时间变化的内外部条件等因素的影响,时常会导致各种类型故障的发生,而关键部件一旦出现故障则可能引起连锁反应,轻者造成整个系统不能正常运行,重者造成重大的人员伤亡和巨大的经济损失。例如,近年来国内外发生的多起大型石油化工装置及危险品的爆炸、电力系统的大规模停电、列车脱轨及碰撞等恶性事故,产生了严重的社会影响,造成了诸多不安定因素。为此,本书将以特定的工程系统(旋转机械系统/高速铁路信号系统等)为背景,以信息融理论与技术为手段,针对典型工程系统的故障诊断及安全性,利用被诊断对象获得的多源不确定性信息,为减少或及时预报灾难性事故的发生,建立一系列相应的故障诊断及安全评估的信息融合方法。同时,将以 Dempster-Shafer (D-S) 证据理论为主,结合模糊集理论和专家系统等其他不确定性理论和方法,重点建立在解决面向现代故障诊断及安全评估的方法的过程中,所遇到的若干信息融合领域内前沿科学问题的解决方法,如多源不确定性信息的合理化描述、静态证据融合与动态证据更新的结合、诊断证据重要性和可靠性评估及融合系统的多目标优化方法等。因此,开展这个具有创新性的研究领域,不仅具有广泛应用前景,而且有重要的科学意义^[1-6]。

1.1.1 提高工业系统运行安全性是社会的迫切需求

近年来,在众多领域时常发生多种多样的灾难性事故,因此,对能有效提高大型工程系统运行安全性和可靠性的先进技术和方法产生了巨大的社会需求。

1. 高速铁路高端装备

随着高速铁路(简称高铁)营运里程的增加,高速铁路日益在我国的交通运输和国民经济中发挥出举足轻重的作用,也给我们的日常出行带来了巨大的便利。资料显示,目前我国高速铁路每月客运量已接近国内航空业的两倍。在高速铁路迅速发展并发挥重要作用的同时,其安全问题也备受关注。高速铁路及高速列车

作为一个由复杂技术装备组成、在复杂环境中运行、完成具有复杂时空分布特征的位移服务的整体,影响其安全行为的决定要素众多,同时由于列车运行速度快、发车密度大,一旦发生事故,后果往往不堪设想。尤其是“7·23”甬温线特别重大铁路交通事故的发生,更是催生了人们对于高铁安全问题的广泛关注。如何从根本上确保高速铁路及高速列车的运行安全,保障人们的安全出行,已经成为“后高铁”时代亟须解决的关键问题,也成为国家的重大战略需求。仅以铁路运行控制系统中的轨道电路系统为例进行分析。

在我国列车运行控制中普遍采用的 ZPW-2000A 型无绝缘轨道电路系统,是进行轨道区间列车占用检查、断轨检查以及实现地车通信的重要地面设备,它的工作可靠与否将直接关系到列车运行的安全与效率^[7,8]。ZPW-2000A 轨道电路利用钢轨作为导线传输列车控制信号,且多数部件分布在铁路线周围,由于易受中国南方雷雨及北方冰雪天气等气候环境因素影响或人为破坏,其故障频发。由此引起的列车运行及控制信号的错误与失效,轻则使列车延误,重则造成整个运输系统陷于瘫痪,乃至发生人员伤亡和财产损失等重大事故。例如,2011 年 7 月 23 日,温州杭深线永嘉至温州南行车区间,因雷击使列控中心的数据采集板软件设计缺陷暴露,直接造成本应显示列车占用状态的轨道电路错误显示为未占用,导致 D301 次列车与 D3115 次列车追尾,D301 次列车第 1 至 4 节车厢脱线,D3115 次列车第 15 和 16 节车厢脱线。事故造成 40 人死亡、172 人受伤,中断行车 32 小时 35 分钟,直接经济损失 19371.65 万元;2006 年 4 月 11 日京九线下行林寨站至东水站间,因雨季钢轨道砟电阻降低引起轨道电路出现“红光带”,加之列车司机违规操作引起 T159 次列车与 1017 次列车追尾,造成 4 节车厢脱轨、2 名铁路职工当场死亡、10 余名乘客受伤的重大事故。2009 年 2 月 17 日,国内某高铁线上铺设的补偿电容受列车底盘凝冰击打而大范围出现断路故障,从而引起轨道电路出现“红光带”,在无有效故障诊断方法的情况下,全线补偿电容被迫全部更换,以确保线路正常营运,这造成了人力物力的巨大浪费;据我国铁路部门统计的数据显示,2005 年 1~11 月,全国铁路共发生信号故障 8088 起,其中多数是由轨道电路直接或间接引起的,共导致 47 万分钟的行车延误,平均每次故障造成 59 分钟的延误。

由以上分析可见,由轨道电路故障所引起的各类运输系统重大事故,对乘客、铁路运营企业乃至整个铁路交通行业都会带来巨大的损失和影响。我国已将铁路运输基础设施的维护及安全保障技术,列为《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》^[9](以下简称《纲要》)和《国家铁路“十二五”发展规划》中的优先研究主题与重点建设任务。但是,目前各国铁路系统大都仍采用定期维修与驻点寻迹排查故障等传统技术来维持轨道电路的正常工作。定期维修方式具有一定的盲目性和机械性,通常会因为检修次数过多而降低设备的可靠性,或因为维护不足而未能根本排除故障,这都给行车带来了安全隐患。总之,该维护方式一直存在人力、物力浪费或资源调配欠合理等弊端。所以,目前急需能够适应轨道电路铺设

范围广、受环境因素影响大、运行周期长等特点的智能故障检测与诊断方法，从而提升其智能故障诊断与维护水平。

2. 大型石化系统生产装置

现代工业领域中的大型系统装置的持续有效运转虽然是确保国民经济快速高效发展的重要保证，但长时间高负荷的持续运转及随着时间变化的内外部条件等因素的影响，时常会导致各种类型故障的发生，仅以石油化工（简称石化）系统装置为例进行分析。

石油是国家经济建设的“血液”，在保障人民正常日常生活中起着极为重要的作用，而在进行“造血”过程中，经常发生各种各样的事故。2005年13日吉林市的中国石油吉林石化分公司双苯厂的生产装置连续发生爆炸，形成特大环境污染事故，数万人被警方疏散，造成哈尔滨400万人断水114小时，不仅社会影响巨大，而且经济损失无法估量。2008年6月3日，中国石化集团茂名石化公司乙烯厂裂解装置遭雷击引起短路起火，装置停产，该装置产能占全国十分之一。2013年11月22日，青岛中石化东黄输油管道泄漏特别重大事故，造成62人死亡、136人受伤，直接经济损失7.5亿元。而在此领域的投资规模还在进一步扩大，如总投资90亿元的上海赛科90万吨乙烯工程；总投资102亿元的嘉兴电厂二期工程，建设规模为4台60万千瓦燃煤发电机组及相应的配套设施。规划建设投资1000多亿元的宁东能源化工基地，是以煤、电、化、油为一体的大型区域工业园区。到2020年全部建成后，每年可新增工业产值近300亿元，拉动相关产业产值近900亿元，相当于“再造一个新宁夏”。此外，我国的广西钦州港、海南洋浦港、天津大港、新疆地区、广东茂名、山东青岛等多个地区已建或在建或计划建大型石油化工基地。

3. 电力系统

电力系统是由发电、送电、调度、用电等部分组成的，正是这样一个巨复杂系统，各类故障或事故频发。2003年8月14日，美国东北部、中西部8个州和加拿大安大略省发生了历史上最大规模的停电事故，就是有力的说明；据统计，近5000万人口受到影响，整个经济损失可能高达300亿美元。美国大停电的调查证明，是电厂发生故障所致；美国此次的大停电，已给世界各国提供一个极深刻的启示和教训，已暴露出的最大弱点首先是系统安全保障措施不到位，其次是应急机制有待改善。20世纪后半叶发生在美国的五次灾难性大停电给以科技为主导的现代社会敲响了警钟。我国也发生过多起大停电事故，而一般的停电事件更是数不胜数。

电力系统的发电设施主要有基于煤炭的火力发电、基于核能的核发电、基于水资源的水力发电，还有国内外首推可再生的替代能源风能发电等。众所周知，各类电站的正常运行是整个电力系统正常运行的基础，而各类电站中用于发电的电机、涡轮机等的持续有效地正常运转，是确保各类电站正常运行的必要前提。全国有各

类发电站数万座，而相应的发电机有数十万台，因此，通过开展针对各类发电机的故障诊断，实时地对其安全性进行有效预测，是保障电力系统稳定运行的基础。

我国每年都在增建或扩建各类电站，如工程总投资 792.34 亿元的溪洛渡水电站总装机容量为 1260 万千瓦，年发电量 571.2 亿千瓦时、位居世界第三，相当于三个半葛洲坝水电站，是中国第二大水电站，其坝高 278 米，正常蓄水位 600 米，总库容 115.7 亿立方米。又如工程计划总投资 479.66 亿元白鹤滩水电站，是继长江三峡和溪洛渡之后又一巨型水电工程，电站装机容量为 1200 万千瓦；拦河坝型为混凝土双曲拱坝，坝顶高程 827 米，最大坝高 277 米，控制流域面积 43.03 万平方千米（占金沙江流域的 91%），水库正常蓄水位 820 米时，水库平水面积 209.24 平方千米，干流回水长度 183 千米，总库容 179.24 亿立方米。而像这类超大型工程在拥有强大功能的同时，无论电机、系统，还是大坝边坡，对安全性的要求也极高。

核电作为安全、清洁、经济、可持续发展的能源，已达到了一定的发展规模。核电投资大、见效快，工程的复杂程度高，因此对安全性也有极高的要求，一旦出现故障，后果不堪设想。例如，1986 年 4 月 26 日苏联发生的切尔诺贝利核电事故，全球共有 20 亿人口受到影响，27 万人患上癌症，其中致死 9.3 万人，而受损人数难以确切估量。目前全世界在用和在建的核电站越来越多。例如，2008 年中国已开工建设的福建宁德、福清和广东阳江三个核电项目，各方为这三个工程投资上千亿元；在未来十多年中，我国将投资至少 5000 亿元用于核电建设。对于这类功能强大的大型工程系统，对其安全性要求也非常高。

风能是一种取之不尽、用之不竭的可再生新兴能源。进入 20 世纪以来，风能发电是国内外首推可再生的替代能源。作为最为清洁的能源之一，被广泛认为是最有发展前途的能源，因而风力发电将是一种最具有潜力可持续发展项目。这类投资大、可持续性强、具有发展前途电力装置，目前却因技术限制，使得各类发电机出现故障率较高，已严重影响它在实际中的有效应用和大力发展。

1.1.2 工业系统的运行安全性受到国家高度重视与支持

对大型工程系统或设备安全预测与评估已受到了政府的高度重视，这在《纲要》中已得到了充分体现。

（1）在《纲要》中指出：前沿技术是指具有前瞻性、先导性和探索性的重大技术，是国家高技术创新能力的综合体现。已将“重大产品和重大设施寿命预测技术”列入其中，并要求重点开展重大产品和重大设施寿命预测技术是提高运行可靠性、安全性和可维护性的关键技术。而这一前沿技术的核心正是故障诊断与预测。

（2）在《纲要》中的重点领域及其优先主题中明确指出：“公共安全是国家安全和社会稳定的基石。我国公共安全面临严峻挑战，对科技提出重大战略需求”。已将“重大生产事故预警与救援”列入其中，并要求重点研究开发矿井瓦斯、突水、动力

性灾害预警与防控技术,开发燃烧、爆炸、毒物泄漏等重大工业事故防控与救援技术及相关设备等。

1.1.3 故障诊断技术为系统安全可靠运行提供有力保障

工程系统故障诊断与预报技术为实现对大型工程系统安全性预测与评估开辟了一条重要的途径。故障诊断主要研究如何对对象中出现的各类故障进行检测、定位和辨识,从而判断故障是否发生,定位故障发生的部位和种类,以及确定故障的大小和发生的时间等。目前,此领域仍然是国际上研究的热点之一。

故障预测作为故障诊断的扩展领域也越来越受到人们的极大关注。这是因为,随着对大型工程系统安全性要求的进一步提高,人们不仅希望在对象发生故障后能够对其进行及时诊断,而且更加希望在只有微小异常征兆出现时,就能够对它的发展趋势进行预测,即根据对象过去和现在的运行状态预测故障发生的时间或者判断未来的某个时刻对象是否会发生故障。与故障诊断研究已经发生的确定性事件不同,故障预测的研究对象是未来的不确定性事件,因此,相对于故障诊断,故障预测更加具有挑战性。然而处于起步阶段的故障预测技术也取得了不少的研究成果^[10-16]。

有效的故障预测使人们能够在适当的时候采取措施阻止故障的进一步发展,从而预防或避免事故的发生。同时,以故障预测技术为基础的预测维修体制能够克服传统计划维修过剩或维修不足的缺点,提高工程大型系统/设备的利用率,减少维修费用,从而降低生产成本,提高企业的综合竞争力,即“预测维护也可以出效益”,因此有很好的应用前景。

因此,有效的途径是,基于现代故障诊断技术及时诊断出大型工程系统所发生的各类故障,进而利用故障预测技术对其发展趋势及安全性进行有效预测与评估,据此及时地采取预测维护或维修,防止过度维修等手段,以期在能大大减少或及时预报灾难性事故发生的前提下,实现预测维护出效益的目的。

1.1.4 信息融合是建立故障诊断与决策方法的必然选择

1. 对现代工程系统的测量需要使用多种传感器

“在被测量或被识别的目标具有多种属性或受多种不确定因素干扰的情况下,使用多种传感器协同完成共同的检测任务便是必然的选择”^[17]。通常情况下,与单源数据相比,多源信息主要有提高系统的安全性和鲁棒性、扩展时间上和空间上的观测范围、增强数据的可信任度、增强系统的分辨能力等优势。

(1) 被测量或被识别的目标具有多种属性,需要使用不同类型的传感器,才能共同完成检测的任务。

(2) 针对目标的同类属性在时间上和空间上有较大的分布范围,需要使用多个

传感器在不同时间区域内和空间区域上进行分别检测,以提高采集信息的覆盖率和增强系统的分辨能力等。

(3) 复杂的环境常会产生多种不确定性,因而需要利用多个或多种传感器协同来共同增强数据的可信任度,从而提高系统的安全性和鲁棒性等。

2. 信息融合技术的研究受到政府的高度重视

信息融合技术取得的成果不仅已被广泛应用于目标跟踪和识别、惯性导航、医学诊断、工业过程监控、设备故障诊断等众多军事和民用领域中,而且相应的研究工作也受到了高度的重视。在《纲要》中^[9],多传感器信息融合也被列为信息科学、军民两用的前沿技术与重大专项中的研究内容,成为进一步推动信息科学发展和应用必须面对的重点研究课题。而作为重点领域或优先研究主题的“重大自然灾害的监测与防御”和“重大产品和重大设施寿命预测技术”的解决,与如何有效地利用从对象中获得的多源信息密切相关。

3. 对现代工程系统安全性预测与评估经常遇到多种不确定性

在对大型工程系统观测时常遇到诸多的不确定性,大都由以下几方面因素所致^[4]: ①传感器或观测者自身设计所固有的局限性; ②被观测对象本身的不确定性; ③观测过程中存在诸多非可预测因素; ④在多源信息分析处理中,系统或方法的不完备性。另外,故障特征与故障类型之间常存在复杂不定的对应关系,这是由于大型工程系统的复杂性,以及被识别故障自身的随机性、模糊性、不确定性等因素,每种故障的发生都有多方面的成因;虽然多种类型的故障特征信号的表现很可能是分布式的,但是有可能会共同表征一种故障模式;相对应地,一种特征又可能会同时反映多种故障的发生。此外,在实际复杂系统/大型工程中,各类故障的发生通常都不是绝对互斥的事件,两种或多种故障之间常存在着大小难以确定的耦合关系。

1.2 故障诊断技术发展概况

故障诊断(fault diagnosis)技术是提高系统可靠性、降低事故风险的重要方法。故障诊断主要研究如何对系统中出现的故障进行检测、分离和辨识,即判断故障是否发生,定位故障发生的部位和种类,以及确定故障的大小和发生的时间等。动态系统的故障诊断一般公认为起源于1971年Beard发表的博士论文^[18]以及Mehra等发表在*Automatica*上的论文^[19]。1976年Willsky在*Automatica*上发表了第一篇关于故障诊断的综述性文章^[20],1978年Himmelblau在他出版的第一部故障诊断方面的学术专著里最早给出了故障的定义,即系统至少一个可观测或可计算的重要变量或特性偏离了正常范围^[21]。随后,该领域的研究得到了国内外学者的广泛关注,取得了丰硕的研究成果^[22-28]。目前,故障诊断仍然是国际自动控制领域的研究热点之一。