



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

电机建模、状态监测 与故障诊断

**Electric Machines: Modeling, Condition
Monitoring, and Fault Diagnosis**

(美)

Hamid A. Toliyat
Subhasis Nandi
Seungdeog Choi
Homayoun Meshgin-Kelk

编著

周卫平 于飞 张超 等译
吴正国 审校



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

电机建模、状态监测与 故障诊断

**Electric Machines: Modeling, Condition
Monitoring, and Fault Diagnosis**

Hamid A. Toliyat

Subhasis Nandi

(美)

Seungdeog Choi

编著

Homayoun Meshgin-Kelk

周卫平 于飞 张超 等译

吴正国 审校



机械工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电机建模、状态监测与故障诊断/ (美) 托利冶特 (Toliyat, H. A.) 等编著; 周卫平等译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 10

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Electric machines: modeling, condition monitoring, and fault diagnosis

ISBN 978-7-111-47612-2

I. ①电… II. ①托… ②周… III. ①电机-建立模型②电机-设备状态监测③电机-故障诊断 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 183563 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张俊红 责任编辑: 吕 潇

版式设计: 霍永明 责任校对: 刘志文

封面设计: 马精明 责任印制: 李 洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 13.25 印张 · 260 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-47612-2

定价: 59.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版



译 者 序

电机是电能和机械能相互转换的工具，在生产、生活和科学研究中有着十分重要的地位。随着科技的发展，电机在高铁、磁悬浮列车、飞机电磁弹射装置等新设施上的应用也越来越广泛了，这些应用在提供舒适、快捷服务和有力保障的同时，如何确保电机安全可靠地运行，成为人们关注的重要问题。

由于电机的工作环境相对恶劣，电机出现故障难以完全避免，一旦发生不可预知的故障将可能造成巨大的经济损失，甚至危及人身安全和造成不良社会影响。而电机的初期故障，往往会通过如机械振动和电流信号变化等不同形式反映出一定的特征变化，那么利用这些特征来对电机的故障进行监测和诊断就具有十分重要的意义。

电机故障主要分为电气类故障、机械类故障、绝缘系统故障等几种类型，按故障部位又可分定子故障、转子故障、气隙偏心故障和轴承故障等。故障诊断技术涉及系统论、控制论、信息论、检测与估计理论、计算机科学等方面的知识，它主要研究故障机理、故障信息处理、故障源分离与定位等内容。用以提取故障特征信号的故障信息处理技术是故障诊断的前提，而故障源分离与定位也称为故障模式识别，是故障诊断的关键技术。

由 Toliyat 和 Nandi 等著的《电机建模、状态监测与故障诊断》一书，紧紧围绕这些关键技术而展开。全书共有 11 章，首先利用绕组函数法、磁路等效法对电机进行了建模；然后利用有限元方法分析了电机故障的原理，并详细讲解了基于频域分析技术、基于模型技术、应用模式识别技术和电机电流特征分析（MCSA）等的电机故障诊断方法；最后给出了基于 DSP 的电机故障诊断的实现方案，以及基于参考系理论的混合动力汽车故障诊断应用和诊断中的鲁棒信号处理技术。

本书主要以电动机为研究对象，作者基于在美国德克萨斯 A&M 大学电机和电力电子实验室的多年研究与开发的结论，对故障起因和后果的基本原理提供了坚实的解释，对于多种故障诊断技术进行了研究，为电机故障诊断和状态监测提供了应用指导，是一部理论分析和实践应用完美结合的，集故障建模、诊断和应用于一体的好书。

于飞副教授负责本书第 4、5、7 章的翻译工作；张超博士负责本书第 6 章的前半部分的翻译工作；周卫平副教授负责本书绪论、第 1~3 章、第 8~11 章和第 6 章的后半部分等的翻译工作，同时负责本书的统稿和初校工作；吴正国教授审校了全书的翻译稿。此外，周烽参与了第 2 章的翻译工作，乔鸣忠参与了第 5 章的翻译工作，王素华参与了第 7 章的翻译工作，杨宣访参与了第 8 章的翻译工作，师维参

IV 电机建模、状态监测与故障诊断

与了第9章的翻译工作，周甜甜参与了第10章的翻译工作，周晓英参与了第11章的翻译工作，王家林、欧阳华、李辉、孙东亮参与了部分翻译和文字录入工作。本书在翻译过程中，还得到了海军工程大学电气工程学院夏立院长、卜乐平教授和邵英教授的指导和帮助，在此顺致谢忱。

本书可以作为高等院校有关专业的高年级本科生、研究生的参考书，也适合于从事电气工程、电气传动、自动控制、电气维修等相关领域工作的科研工作者和工程技术人员阅读或作为参考书使用。

本书内容专业性强，译者在翻译过程中力求准确、严谨，并做到忠于原著，需要提到的一点是，由于书中的一些内容和结论适用于电动机也适用于发电机，因而原书中对于“电机 (Electric Machine)”和“电动机 (motor)”的叫法使用得比较随意，为了兼顾中文习惯与理解，译者在翻译时作了适当的调整。但毕竟因能力和水平有限，错误和欠妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

译 者

2014年国庆于武汉

原 书 前 言

电机的研制是现代能源转换行业最重要的成就之一。电机在我们日常生活中许多至关紧要的服务上有着数不清的应用，比如在交通运输、医疗卫生、信息通信等方面。但是电机由于材料寿命限制、性能恶化、污染、制造缺陷，或在运行中受到损坏等原因，最终将会失效。意想不到的电机失效可能危及人员生命，或者导致工业上损失不菲的生产停顿，而这需要通过精确地检测或连续地监控电机的工作状态来预防。

本书对电机故障诊断技术进行了完整回顾，对于希望进一步研究、开发和实现那些为了提高电机运行的安全性和可靠性的故障诊断和状态监测的电力电子学科的研究生和高年级的本科生而言，本书可作为应用指导书。此外，工业领域的电气和机械工程师也可以利用本书的部分内容来作为理解电机故障因果关系的基本原理的参考资料，达到成功应用于电机故障诊断的目的。

本书是通过先理论分析后实际应用的步骤来讲解电机故障诊断的。首先，本书通过绕组函数法、等效磁路法和有限元分析法分析了电机失效的基本原理；然后按照故障诊断的实现技术进行讲解，比如电机电流特征分析（MCSA）方法、频域方法、基于模型的技术和模式识别方案；在最后一章本书专门详细讨论了 MCSA 的实现方法，以混合动力汽车为例讨论了鲁棒信号处理技术和基于参考系理论的故障诊断的应用。这些理论分析和实际应用策略，均是基于在德克萨斯 A&M 大学的电机与电力电子学（EMPE）实验室多年的研究开发而得出的。

Hamid Toliyat
德克萨斯 A&M 大学

本书主要以电动机为研究对象，基于在美国德克萨斯 A&M 大学电机和电力电子实验室的多年研究与开发，作者给出了故障起因和后果的基本原理，对于多种故障诊断技术进行了研究，为电机故障诊断和状态监测提供了应用指导。全书共有 11 章，首先利用绕组函数法、等效磁路法建立了电机故障模型；然后利用有限元方法分析了电机故障机理，并详细讲解了基于频域分析技术、基于模型技术、应用模式识别技术和电机电流特征分析（MCSA）等的电机故障诊断方法；最后给出了基于 DSP 的电机故障诊断的实现方案，以及基于参考系理论的混合电动汽车故障诊断应用和诊断中的鲁棒信号处理技术。

本书集故障建模、诊断和应用于一体，是一本理论分析和实践应用完美结合的于一卷的好书，可作为电机领域工程技术人员的参考书，也可作为高等院校有关专业高年级师生的参考书。

Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis/
by Hamid A. Toliyat... [et al.] /ISBN: 978 -0 -8493 -7027 -4.

Copyright©2002 by CRC Press LLC.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC. All rights reserved.

本书中文简体翻译版由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis Sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记图字：01-2013-5749 号。

目 录

译者序

原书前言

第1章 绪论	1
参考文献	7
第2章 感应电动机和同步电动机故障	8
2.1 感应电动机故障介绍	8
2.1.1 轴承故障	8
2.1.2 定子故障	9
2.1.3 转子断条故障	12
2.1.4 偏心故障	13
2.2 同步电动机故障诊断介绍	14
2.2.1 阻尼绕组故障	14
2.2.2 永磁同步电动机的退磁故障	15
2.2.3 偏心故障	16
2.2.4 定子匝间故障	17
2.2.5 转子匝间故障	18
2.2.6 轴承故障	19
参考文献	19
第3章 应用绕组函数法和改进绕组函数法的电机建模	24
3.1 概述	24
3.2 绕组函数法和改进绕组函数法	25
3.3 应用绕组函数法和改进绕组函数法的电机电感计算	28
3.4 应用绕组函数法和改进绕组函数法的电机电感计算的验证	33
参考文献	38
第4章 基于等效磁路法的电机建模	39
4.1 概述	39
4.2 等效磁路法在凸极同步电机分析中的间接应用	43

4.2.1	凸极同步电机的等效磁路	44
4.2.2	凸极同步电机的电感关系	45
4.2.3	凸极同步电机电感计算	48
4.2.4	凸极同步电动机电感的实验测量	52
4.3	等效磁路法在感应电机分析中的间接应用	54
4.3.1	感应电机的简化等效磁路	54
4.3.2	感应电机的电感关系	56
4.3.3	感应电机电感计算	57
4.4	等效磁路法在考虑非线性磁特性的电机分析中的直接应用	60
附录		62
附录 A: 感应电机参数		62
附录 B: 节点磁导矩阵		63
参考文献		64
第 5 章 基于有限元法的感应电动机故障分析		65
5.1	概述	65
5.2	基于时步有限元法 (TSFEM) 的故障感应电机几何建模	66
5.3	电路和有限元区域的耦合	66
5.4	基于有限元法的电机内部故障建模	68
5.4.1	断条故障建模	68
5.4.2	偏心故障建模	70
5.5	磁饱和对感应电动机故障准确检测的影响	73
5.5.1	正常和故障感应电动机的气隙磁通密度分析	75
参考文献		77
第 6 章 基于频域技术的电机故障诊断		78
6.1	概述	78
6.2	关于信号处理的一些定义和例子	78
6.2.1	连续信号与离散或数字或采样信号	78
6.2.2	连续、离散傅里叶变换和非参数能量谱估计	79
6.2.3	参数功率谱估计	83
6.2.4	应用高阶谱 (HOS) 进行功率谱估计	84
6.2.5	应用正弦扫描频测量或者数字锁频环 (DFLL) 技术进行 功率谱估计	86
6.3	基于频域技术的电机故障诊断	87

VIII 电机建模、状态监测与故障诊断

6.3.1 电动机轴承故障检测	87
6.3.2 定子故障检测	91
6.3.3 转子故障检测	101
6.3.4 偏心故障检测	108
6.3.5 逆变器供电的感应电动机故障检测	119
参考文献	120
第7章 应用基于模型技术的电机故障诊断	124
7.1 概述	124
7.2 正常的三相笼型异步电动机模型	127
7.3 定子匝间故障的三相笼型异步电动机模型	132
7.3.1 不考虑饱和的模型	132
7.3.2 饱和模型	135
7.4 转子断条和端环故障初期的笼型异步电动机模型	139
7.5 有偏心故障的笼型异步电动机模型	141
7.6 有定子故障的同步磁阻电动机模型	142
7.7 有动态偏心故障的凸极同步电动机模型	144
参考文献	145
第8章 应用模式识别的故障诊断	147
8.1 概述	147
8.2 贝叶斯理论和分类器设计	148
8.3 正态分布的简化形式	150
8.4 故障诊断系统中的特征提取	151
8.5 分类器训练	153
8.6 应用	154
参考文献	158
第9章 基于数字信号处理器的电机电流特征分析故障诊断的实现	159
9.1 概述	159
9.1.1 来自于最佳检测器的加性白高斯噪声信道的互相关方案	160
9.2 参考系理论	161
9.2.1 应用参考系理论的状态监测	161
9.2.2 多相系统的(故障)谐波分析	161
9.2.3 在线故障检测结果	163
9.3 基于相敏检测的故障诊断	168

9.3.1 介绍	168
9.3.2 相敏检测	168
9.3.3 在线实验结果	169
参考文献	175
第 10 章 基于参考系理论的混合动力汽车故障诊断应用	177
10.1 概述	177
10.2 混合动力汽车的车载诊断系统	177
10.3 车载诊断系统的行驶循环周期分析	180
10.4 零速度时转子不对称故障检测	181
参考文献	187
第 11 章 基于数字信号处理器的电动机电流特征分析诊断应用中的鲁棒信号 处理技术	188
11.1 概述	188
11.1.1 相干检测	189
11.1.2 非相干检测（相位不确定性补偿）	190
11.1.3 故障频率偏移补偿	190
11.2 决策方案	191
11.2.1 自适应阈值设计（噪声不定性的补偿）	192
11.2.2 Q -函数	193
11.2.3 噪声估计	194
11.3 仿真和实验结果	195
11.3.1 MATLAB 建模仿真结果	195
11.3.2 离线实验	196
11.3.3 在线实验结果	199
参考文献	201

第 1 章 绪 论

日本东芝国际公司 Seungdeog Choi 博士

如表 1.1 和表 1.2 所示,不管是在美国还是在全球市场中,电动机的数量近年来大幅增加,当时预计 2011 年全球电动机市场大约是 161 亿美元,并且估计在后续 5 年内其增长将超过 50%^[1]。电动机已经几乎应用于我们日常生活的每个地方,比如制造业系统、航空运输、地面运输、建筑物空调系统、家用能源转换系统、各种不同的电气设备冷却系统、甚至是手机振动系统等。

表 1.1 不同用途电动机的数量

用途	数量
电扇和泵	3847161
空气压缩机	632731
其他	7954438
总计	12434330

资料来源:美国能源部(2002)。http://www.eere.energy.gov/manufacturing/tech_deployment/pdfs/mtrmkt.pdf

表 1.2 不同用途电动机的能量消耗

用途	能量消耗/(GW·h/年)
电扇和泵	221417
空气压缩机	91050
其他	262961
总计	575428

资料来源:美国能源部(2002)。http://www.eere.energy.gov/manufacturing/tech_deployment/pdfs/mtrmkt.pdf

一个众所周知的事实是,在美国电动机消耗的电能超过了整个国家电能需求的 50%。美国 2008 年的年度电能需求量是 3.873 万亿 kW·h,而这每年还会随人口和经济的增长而进一步增加^[1]。这一数据说明在美国电动机每年消耗了 1.9 万亿 kW·h 以上的电能,这是现代社会中单种用电装置的最大能源消耗量。

随着人口的快速增加和巨大的电能消费,在恶劣的工业环境下实现电动机的高级控制和运行的可靠性,现已经成为在许多工业应用中对电动机的主要要求。尤其重要的是,一个意想不到的停机可能导致至关重要的服务的中断,比如在医学上、

2 电机建模、状态监测与故障诊断

交通运输上或军事行动中。在这些应用场合要保障运行的连续性，故障停机是不能容忍的，电动机的意外故障将导致巨额的维修费用，甚至引起人员伤亡。

如图 1.1 所示，电动机由许多机械和电气部分组成，比如转子导条、转子磁铁、定子绕组、端环、轴承、齿轮箱。由于普遍存在的恶劣工业环境条件，电动机的每一部分都处在潜在的不能预料的机械的、化学的和电气系统上发生故障的高风险之下。工业领域电动机失效通常是以下原因引起的：

- 1) 超过标准寿命；
- 2) 额定功率、电压和电流值使用不正确；
- 3) 电源电压或电流不稳定；
- 4) 过载或不平衡负载；
- 5) 来自于高频变流器或不良接地的电气应力；
- 6) 来自于制造过程的残余应力；
- 7) 错误修理；
- 8) 恶劣的应用环境（灰尘、漏水、环境振动、化学污染、高温）。

图 1.2 给出了一个广为人知的轴承滚珠损坏的电动机故障的例子，轴承滚珠是从诊断为故障已经有 6 个月之久的轴承中取出的。电动机故障的主要类型通常按照电气故障、机械传动系统故障来分类，分别主要有^[2-5]：

- 1) 电气故障
 - ① 电动机绕组的开路或短路（主要由于绕组的绝缘失效）；
 - ② 绕组的连接错误；
 - ③ 导线连接阻抗太大；
 - ④ 接地错误或接地不良。

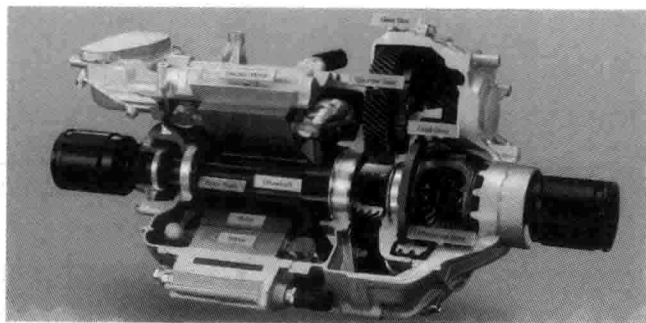


图 1.1 本田 2009 款 FCX Clarity 燃料电池汽车测试驾驶相片库

（来自 Christine 和 Scott Gable, <http://alternativefuels.about.com/od/fuelcellvehiclereviews/ig/09-Honda-FCX-Clarity-Fuel-Cell/>）

2) 机械故障

- ① 转子断条;
- ② 磁铁破损 (或部分退磁);
- ③ 端环破裂;
- ④ 转轴弯曲;
- ⑤ 螺栓松动;
- ⑥ 轴承故障;
- ⑦ 齿轮箱故障;
- ⑧ 气隙不规则。

3) 外围电动机驱动系统故障

- ① 逆变系统故障;
- ② 不稳定的电压源/电流源;
- ③ 电源线路的短路或开路。

在所有电动机故障中, 已知轴承故障大约占到40%, 与定子有关的故障大约占到38%, 与转子有关的故障大约占到10%, 其他总和占到12%^[2-6]。

电动机设计普遍要求定子和转子在电气和机械上的对称, 以便更好地匹配接合并且得到更高的效率。电动机故障状态的早期描述是认为破坏了电机运行故障相关的对称性, 并在电动机运行时将产生不正常的故障现象, 这些现象有^[2-5]:

- 1) 机械振动;
- 2) 温度上升;
- 3) 不规则的气隙转矩;
- 4) 瞬时输出功率变化;
- 5) 听觉上的噪声;
- 6) 线电压改变;
- 7) 线电流改变;
- 8) 速度变化。

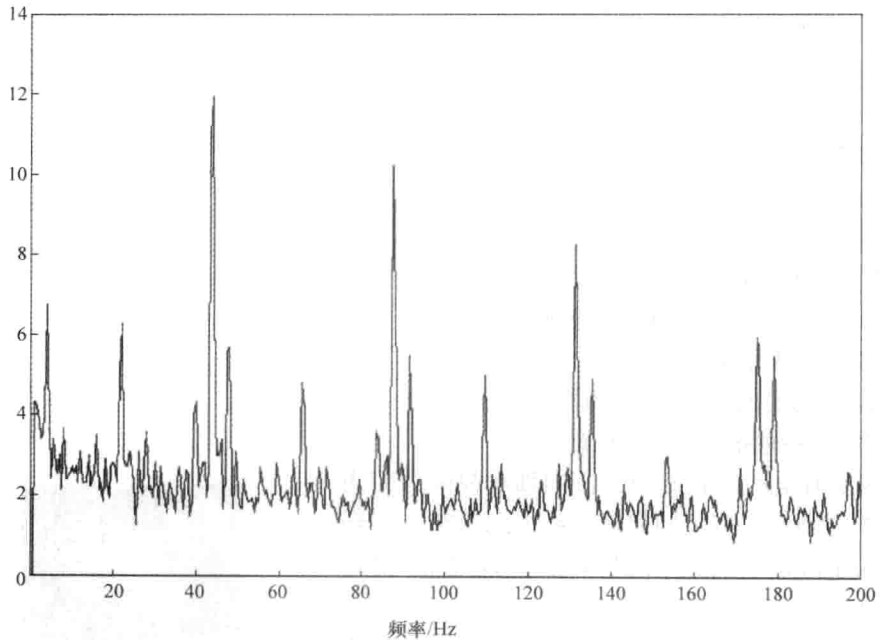
已经知道大多数的不正常故障现象有特定的与电动机故障状态和严重程度有关的样式, 比如特定的频率、持续时间、幅度、变化量、度数和相位。通过监测和分析预期的故障现象和它们的特殊样式, 得出许多电动机故障的诊断建议, 并且在工业市场中已经出现了一些如图1.3所示的商用解决途径。特别要说明的是图1.3a的振动频谱是, 来自于图1.2故障滚珠的轴承组件。基于频谱监测技术, 轴承组件可以被诊断出故障, 然后可以在系统进入灾难性故障模式之前将其安全地替换。

在工业中被采用的各种不同的诊断技术主要通过下列的策略来执行^[2-5]。

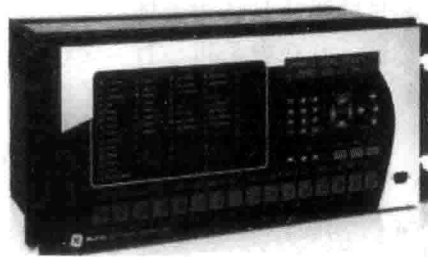


图1.2 轴承滚珠故障与后续的疲劳损坏

(<http://www.vibrationconsultants.co.nz/Fault%20Diagnosis.html>)



a)



b)

图 1.3

a) 图 1.2 中的轴承的振动频谱监测 (<http://www.vibrationconsultants.co.nz/Fault%20Diagnosis.html>)

b) GE 电动机电流分析设备 (<http://www.gedigitalenergy.com/multilin/catalog/m60.htm>)

1) 基于信号的故障诊断

- ① 机械振动分析;
- ② 冲击脉冲监测;
- ③ 温度测量;
- ④ 听觉噪声分析;
- ⑤ 通过内置线圈监测电磁场;

- ⑥ 瞬时输出功率变化分析;
- ⑦ 红外线分析;
- ⑧ 瓦斯分析;
- ⑨ 油分析;
- ⑩ 射频 (RF) 发射监测;
- ⑪ 局部放电测量;
- ⑫ 电动机电流特征分析 (Motor Current Signature Analysis, MCSA);
- ⑬ 相关信号的统计分析。

2) 基于模型的故障诊断

- ① 神经网络;
- ② 模糊逻辑分析;
- ③ 基因算法;
- ④ 人工智能;
- ⑤ 有限元 (Finite - element, FE) 等效磁路;
- ⑥ 基于线性电路理论的数学模型。

3) 基于机械理论的故障分析

- ① 绕组函数方法 (Winding Function Approach, WFA);
- ② 改进的绕组函数方法 (Modified Winding Function Approach, MWFA);
- ③ 等效磁路 (Magnetic Equivalent Circuit, MEC)。

4) 基于仿真的故障分析

- ① 有限元分析 (FEA);
- ② 时步匹配的有限元状态空间分析 (Time - step Coupled Finite Element State Space Analysis, TSCFE - SS)。

不同类型的故障诊断方法, 在工业上已经被同时应用于精细检测以达到更好的效果。电动机故障诊断的目的, 是期望能够对于即将来临的失效提出预警, 对于未来的预防性定期检修提供诊断计划。

故障诊断的应用是按照如下步骤来进行的:

1) 故障检测

- ① 基于时域的检测, 主要针对电气系统故障诊断;
- ② 基于频域的检测, 主要针对基于信号的机械故障诊断;
- ③ 基于累积数据的检测, 主要针对基于模型的故障诊断。

2) 故障决策

- ① 决定故障存在;
- ② 决定故障严重程度。

3) 反馈至电动机控制器或人机界面

- ① 依据故障严重程度限制电动机运行;

② 制定维修计划。

图 1.4 所示为在现代工业中能源系统和现代网络系统之间的大大增加的联系交集。在汽车、轮船、飞机、建筑物、道路或在电力系统中使用的电动机，可以认为大多数都连接到一个专门的传感器或是有线/无线的传感器网络。那些传感器得到的信号，比如振动、电流、电压和速度等信号，被送往或近或远的微控制器或数字信号处理器，其中控制器完成了独立的系统控制、整个系统的管理、或系统健康状况监控^[9]。

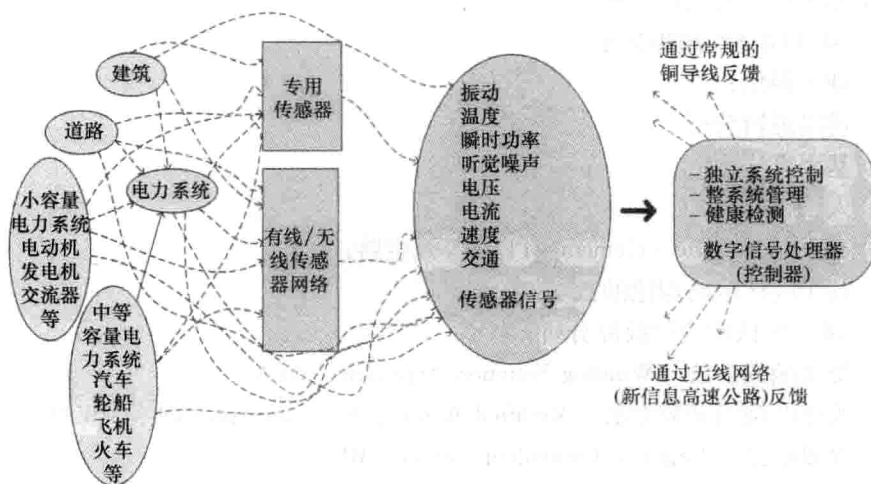


图 1.4 能源系统和现代网络系统的交集

(来自: S. Choi, “Robust Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Variable Speed Drive of Induction Motor (感应电动机变速驱动的鲁棒状态监测和故障诊断)”, 博士学位论文, 德克萨斯 A&M 大学, 2010, 得到授权许可)

通过利用现有可用的传感器和数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP), 在没有额外的硬件费用而只有简单的软件应用的有线/无线网络中, 故障诊断已经开始以相对低的成本得到有效应用, 这进一步为中/小型电动机驱动系统提供了保护。比如说, 通过应用电流传感器反馈, 应用 MCSA 故障诊断的低成本保护的新趋势, 看起来就是在电动机驱动控制 DSP 内集成了故障诊断系统, 这样就没有使用任何的外部硬件了^[8]。

本书将阐述不同电动机故障状态、先进的故障建模理论、不同的故障诊断技术和基于 DSP 的低成本故障诊断实现策略。

本书各个章节的组织如下:

- ◆ 第 2 章介绍了感应电动机和同步电动机故障;
- ◆ 第 3 章和第 4 章为基于不同理论的电动机故障模型;
- ◆ 第 5 ~ 7 章为各种电动机故障诊断技术;