



FPTC 先进液压气动技术丛书

液压气动系统状态监测 与故障诊断技术

姜万录 刘思远 编著

**Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technology
of Hydraulic and Pneumatic Systems**



化学工业出版社

FPTC 先进液压气动技术丛书

液压气动系统状态监测 与故障诊断技术

姜万录 刘思远 编著

Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technology
of Hydraulic and Pneumatic Systems

CNFD



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统地阐述了近年来液压气动系统故障诊断领域新发展的各种理论方法,并通过液压系统的故障诊断实验进行了有效的验证。分析了液压气动系统常见故障产生的机理,介绍了相关的工程应用实例,并总结了行之有效的故障排除方法,为机械设备健康状态评估提供了新的思路。

全书理论联系工程实际,各章内容均为作者长期从事液压设备状态监测与故障诊断研究工作的成果。适用于从事设备状态监测和故障诊断工作的工程技术人员阅读,也可供高等学校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压气动系统状态监测与故障诊断技术/姜万录,刘思远编著. —北京:化学工业出版社,2016.10

(先进液压气动技术丛书)

ISBN 978-7-122-27573-8

I. ①液… II. ①姜…②刘… III. ①液压系统-设备状态监测②液压系统-故障诊断③气压系统-设备状态监测④气压系统-故障诊断 IV. ①TH137②TH138

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第155076号

责任编辑:黄 滢

文字编辑:张绪瑞

责任校对:边 涛

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张20 字数526千字 2017年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:98.00 元

版权所有 违者必究

“先进液压气动技术丛书”编委会

主 任：孔祥东

副主任：赵静一 姜万录

委 员：（按姓氏汉语拼音排序）

陈东宁	高殿荣	高英杰	郭 锐	姜万录	孔祥东
刘思远	刘 涛	吕世君	王益群	吴晓明	姚 静
张立杰	张齐生	张 伟	赵静一		

前言 FOREWORD

设备状态监测与故障信息诊断预报技术就是采集设备（或系统）的运行状态信息，利用各种信息处理或信号处理方法判定故障源以及故障程度，预测故障未来的发展趋势，并确定相应维修策略的一门综合性交叉学科。对生产设备进行及时有效的故障诊断与预报，不仅能够提高设备运行的安全性和可靠性，预防灾难性事故的发生，而且还能够有效地提高设备的产能和产品质量，降低维修成本，创造出巨大的经济效益和社会效益。设备状态监测与故障诊断技术在航空航天、武器装备、舰船、冶金、化工、能源、工程机械等领域中已经得到了广泛应用，并取得了显著成效。

随着现代工业的迅猛发展，生产设备逐步向大型化、高速化、多功能化、数字化和智能化方向迈进，对生产设备的重要组成部分——液压或气动系统来说，其功能和结构也变得日趋复杂，品质指标越来越高，系统的非线性和动态时变性越来越强，故障形式也变得复杂多样，强干扰影响下的故障很难通过现有的诊断方法得到及时有效的诊断与预报。由于液压及气动系统本身所具有的高压及管路的封闭性和参数可测性差的特点，限制了许多故障诊断方法的应用，所以对液压和气动系统的故障诊断理论和技术水平还有待进一步完善和提高，因而研究和开发新的快速及时且准确有效的液压系统故障诊断方法、制定有效的气动系统故障排除及维修策略，在现代工业生产中具有十分重要的意义。

我们近年来一直致力于该领域的研究工作，对工业装备的可靠运行对液压系统故障的准确诊断所提出的迫切需求深有体会，深感有必要将多年来的研究成果进行归纳总结，对液压系统故障诊断领域的新理论与新方法及其应用作系统的阐述。旨在为丰富和完善故障诊断的理论方法，促进诊断理论方法满足工程实用化的需求，为建立及时准确的液压系统智能故障诊断系统尽绵薄之力。

本书系统地阐述了近年来液压系统故障诊断领域新发展的各种理论方法，并通过液压系统的故障诊断实验进行了有效的验证。全书共分为15章，深入浅出地介绍了各种新方法及应用。第1章系统地阐述了液压系统故障诊断技术的发展历程及发展趋势，以及近年来在液压系统故障

诊断领域出现的新理论、新方法。第 2 章归纳了气动元件及系统的常见故障,并对故障机理进行了分析,最后给出了一些故障排除的方法。第 3 章介绍了气动系统故障的基本特征及常用的故障诊断技术,以及气动系统常见故障的产生原因及故障的排除方法,并给出几个工程应用实例。第 4 章介绍了液压泵运行状态 5 通道多传感器状态监测试验系统,研究了振动传感器和声级计最佳测点的合理确定问题,分析了轴向柱塞泵各故障状态的特征频率范围,通过人为模拟泵的多种故障模式对各故障下的监测信号进行了数据采集,为后续故障诊断理论方法的研究提供了试验数据支持。第 5 章阐述了时域分析、频域分析和小波包时频域分析的信号特征向量提取方法,用于对故障振动和声音信号的特征提取。第 6 章利用灰靶理论方法,对液压泵故障等级评估问题进行研究。通过对采集的液压泵端盖振动信号进行分析,首先利用基于主分量分析的最大熵谱分析方法进行液压泵的故障类型识别,然后运用灰靶理论方法来确定液压泵的故障等级。第 7 章提出了一种将灰色理论和神经网络理论相结合的智能故障诊断方法,基于该方法设计了灰色神经网络模型,通过对液压泵典型故障进行的诊断试验,验证了灰色神经网络故障诊断方法的有效性。第 8 章将前向混沌神经网络应用于液压泵的故障诊断中,通过对液压泵典型故障进行的诊断试验表明,与目前应用广泛的 BP 神经网络相比其收敛速度更快、诊断正确率更高,体现了混沌神经网络应用于故障诊断方面的优越性。第 9 章提出了一种加入粒子群优化算法的联想记忆神经网络,利用粒子群优化算法对改进网络的 Hopfield 结构部分的权值进行优化,用于液压泵各种典型故障的诊断识别。通过对比分析,发现加入粒子群优化算法的联想记忆神经网络具有更高的故障识别正确率。最后,利用艾宾浩斯(H. Ebbinghaus)记忆遗忘曲线,通过合理地安排训练样本的交叉循环顺序,可有效地纠正记混(样本错分)现象。第 10 章研究了一种基于免疫危险理论的特征选择算法,实现了对具有众多信息的原始高维特征向量的降维。应用免疫危险理论原理开发了具有学习、聚类、记忆特性的故障诊断算法,并将这一算法应用于液压泵的故障诊断中。通过液压泵的高维特征信息的降维与故障诊断试验,验证了基于免疫危险理论故障诊断算法的有效性。第 11 章提出了一种基于局部 Hilbert 边际谱特征能量的特征向量提取方法,并采用模糊 C 均值聚类算法对样本进行故障模式识别。识别结果表明,所提取的特征向量能够准确反映轴向柱塞泵的故障特征,用 EEMD 处理数据时故障确诊率高于用 EMD 处理数据,采用压力信号提取的特征向量优于采用振动信号提取的特征向量。第 12 章将信息熵理论应用到液压泵健康状态评估之中,并通过对斜盘式轴向柱塞泵的滑靴偏磨故障的健康状态进行评估,验证了此方法的有效性,为机械设备健康状态评估提供了一种新的思路。第 13 章利用声音信号采用核主元分析(KPCA)方法对轴向柱塞泵单柱塞松靴故

障进行诊断,并把该方法的诊断结果与主元分析(PCA)法以及基于振动信号的核主元分析法的诊断结果作了比较,验证了基于声音信号的核主元分析法对液压泵的故障进行诊断的有效性。第14章提出了一种指数加权动态核主元分析(EWDKPCA)方法。基于时间滑动窗口进行数据更新,并引入加权因子,提出了指数加权动态自回归统计模型。并将其应用到故障诊断中,诊断结果证明了具有动态自适应性的EWDKPCA方法对动态非线性故障诊断是非常有效的。第15章提出了支持向量机(SVM)与证据理论集成的多源信息融合故障诊断方法,通过试验验证了该理论方法对液压泵故障诊断的有效性,并将其与BP神经网络与证据理论融合方法、SVM与证据理论融合方法的诊断效果进行了比较,验证了该方法的优势。

本书各章均为我们长期从事液压设备状态监测与故障诊断研究工作的成果。本书内容取材于国家自然科学基金资助项目“液压AGC系统机电液耦合非线性动力学行为的理论及关键技术基础”(51475405)和“基于数据驱动知识发现的智能故障诊断方法与专家系统关键技术”(51075349),河北省自然科学基金资助项目“少故障样本条件下基于数据挖掘的液压AGC系统智能故障诊断理论方法及系统”(E2013203161)等的部分相关研究成果。

姜万录编著了本书的第1章、第4~15章,刘思远编著了第2章、第3章。全书由姜万录统稿。在本书成稿期间,博士研究生朱勇参与了部分文稿的编辑和整理工作,在此表示衷心感谢。

本书参考了大量文献,由于篇幅所限未能逐一一列出,各章仅列出了主要参考文献,在此对原文作者表示衷心感谢。

考虑本书主要面向从事设备故障诊断与维修工作的广大读者,因此力求用通俗易懂的语言进行阐述,尽量避免难涩的基础理论推导内容。由于我们的学术水平有限,书中缺点在所难免,恳请广大读者给予批评指正。

本书适用于从事设备状态监测和故障诊断工作的工程技术人员阅读,也可作为高等学校相关专业研究生的参考书。

姜万录

2016年9月于燕山大学

目 录

CONTENTS

Chapter 1	第 1 章 绪论	1
	1.1 液压系统故障诊断技术的发展简史	1
	1.2 液压系统故障诊断技术的发展趋势	3
	1.3 液压系统故障检测与诊断新方法	4
	1.3.1 小波理论方法	5
	1.3.2 频谱细化方法	5
	1.3.3 混沌分形理论方法	6
	1.3.4 Lyapunov 指数及关联维数方法	6
	1.3.5 信息熵方法	7
	1.3.6 贝叶斯网络方法	7
	1.3.7 Hilbert-Huang 变换方法	8
	1.3.8 神经网络方法	8
	1.3.9 多源信息融合方法	10
	1.3.10 人工免疫方法	11
	1.3.11 灰色系统方法	12
	1.3.12 核主元分析方法	13
	1.3.13 支持向量机方法	14
	1.3.14 证据理论方法	15
	1.4 本书的主要内容	16
	本章参考文献	17
Chapter 2	第 2 章 气动系统的常见故障与排除方法	19
	2.1 气动系统使用中的常见故障	19
	2.1.1 气源质量不良	19
	2.1.2 气动元件故障	20
	2.2 气动系统常见故障的排除	21
	2.2.1 气源质量不良故障的排除方法	21
	2.2.2 气缸故障的排除方法	23
	2.2.3 气动控制阀故障的排除方法	25
	2.2.4 气动辅助元件故障的排除方法	26
	本章参考文献	27

Chapter 3	第 3 章 气动系统的故障诊断技术与工程应用实例	28
3.1	气动系统故障的基本特征及常用的诊断方法	28
3.1.1	气动系统故障的基本特征	28
3.1.2	气动系统常用的诊断方法	28
3.2	气动系统故障诊断的基本原理及后处理	29
3.2.1	故障诊断的基本原理	29
3.2.2	故障诊断的后处理	31
3.3	气动系统的故障诊断技术方法	31
3.3.1	基于 CBM 的气动系统故障诊断技术	31
3.3.2	基于故障树的气动系统故障诊断技术	35
3.4	气动系统故障诊断技术的工程应用实例	36
3.4.1	混凝土搅拌站气动系统故障的排除	36
3.4.2	热风整平机气动系统常见故障的排除	38
	本章参考文献	41

Chapter 4	第 4 章 液压泵多传感器状态监测系统	42
4.1	状态监测试验系统组成	42
4.2	轴向柱塞泵典型故障及故障特征频率	43
4.2.1	轴向柱塞泵典型故障机理分析	43
4.2.2	轴向柱塞泵典型故障的特征频率	44
4.3	振动传感器及其测点位置的选择	45
4.3.1	振动传感器的选型	45
4.3.2	振动传感器的安装方式	46
4.3.3	x 和 y 方向测点位置的选取	47
4.4	声级计及其测点的选择	53
4.4.1	声级计的选型	53
4.4.2	声级计测点的确定	53
4.5	轴向柱塞泵状态监测系统	54
4.6	轴向柱塞泵的故障模拟	55
4.7	试验数据采集	56
4.7.1	信号采集的参数设置	56
4.7.2	故障模式下的试验数据采集	56
	本章参考文献	56

Chapter 5	第 5 章 基于信号多信息域分析的故障特征提取	58
5.1	基于小波包滤波消噪及 Hilbert 包络解调的信号处理	58
5.1.1	小波包滤波消噪	58
5.1.2	Hilbert 变换包络解调方法	60
5.1.3	基于小波包滤波消噪及包络解调的信号处理	62
5.2	信号的时域特征提取	62
5.2.1	有量纲参量	62

5.2.2	无量纲参量	64
5.2.3	振动和声音信号的时域特征提取	64
5.2.4	压力信号的时域特征提取	67
5.3	信号的频域特征提取	69
5.3.1	频域特征参量	69
5.3.2	声音信号的频域特征提取	70
5.3.3	压力信号的频域特征提取	71
5.4	信号的时频域特征提取	72
5.4.1	时频域特征参量	72
5.4.2	信号的时频域特征提取	73
5.5	信号的多信息域故障特征向量构建	75
	本章参考文献	75

Chapter 6 第6章 灰靶理论在液压泵故障等级评估中的应用 77

6.1	灰色理论及灰靶理论分析方法	77
6.1.1	灰色理论概述	77
6.1.2	灰色理论诊断方法	78
6.1.3	灰靶理论及灰靶贡献度	81
6.2	主分量分析及最大熵谱估计	83
6.2.1	信号的谱估计	83
6.2.2	主分量分析与故障信息分离	86
6.2.3	液压泵故障信号的最大熵谱估计	87
6.3	基于灰靶理论的液压泵故障模式识别	88
6.3.1	液压泵故障诊断试验系统	88
6.3.2	基于灰靶理论的液压泵故障模式识别步骤	88
6.3.3	振动信号的预处理	90
6.3.4	故障振动信号功率谱分析及特征提取	91
6.3.5	基于灰靶理论的故障等级评估	94
	本章参考文献	96

Chapter 7 第7章 基于灰色神经网络的故障诊断方法 97

7.1	灰色神经网络	97
7.1.1	基于知识的故障诊断方法	97
7.1.2	灰色理论	98
7.1.3	神经网络	100
7.1.4	灰色理论与神经网络的结合	102
7.2	液压泵状态监测试验	104
7.2.1	液压泵的状态监测	104
7.2.2	监测数据的采集	105
7.3	基于灰色神经网络方法的故障诊断	107
7.3.1	信号处理	108

	7.3.2 特征向量提取	112
	7.3.3 灰色神经网络故障诊断	115
	本章参考文献	118
Chapter 8	第 8 章 基于混沌神经网络的故障诊断方法	119
	8.1 混沌神经网络的理论基础	119
	8.1.1 混沌及其特征	119
	8.1.2 混沌的判据	121
	8.1.3 Logistic 映射分析	122
	8.1.4 神经网络概述	124
	8.1.5 误差反向传播神经网络	125
	8.1.6 前向混沌神经网络及其学习算法	127
	8.2 液压泵振动信号的分析与处理	131
	8.2.1 短时最大熵谱分析	131
	8.2.2 小波包带通滤波和消噪	132
	8.2.3 Hilbert 包络解调	133
	8.3 混沌神经网络在液压泵故障诊断中的应用	135
	8.3.1 基于前向混沌神经网络的故障诊断过程	135
	8.3.2 液压泵各状态振动信号的采集	136
	8.3.3 前向混沌神经网络的设计	136
	8.3.4 液压泵故障诊断及结果分析	139
	本章参考文献	144
Chapter 9	第 9 章 基于联想记忆神经网络的故障诊断方法	145
	9.1 联想记忆神经网络	145
	9.1.1 离散 Hopfield 神经网络	145
	9.1.2 联想记忆	149
	9.1.3 联想记忆网络应用举例	152
	9.2 Hopfield 网络的结构改进和学习算法	154
	9.2.1 反向传播网络	154
	9.2.2 联想记忆神经网络的结构改进	157
	9.2.3 粒子群优化算法	158
	9.2.4 PSO 算法对 Hopfield 网络权值的优化	160
	9.3 基于联想记忆神经网络的液压泵故障诊断	161
	9.3.1 振动信号的采集	161
	9.3.2 信号预处理及故障特征提取	162
	9.3.3 联想记忆神经网络的参数设置	164
	9.3.4 基于联想记忆神经网络的液压泵故障识别	168
	9.3.5 基于联想记忆神经网络的样本交叉循环训练的故障识别	172
	本章参考文献	174

Chapter 10	第 10 章 基于免疫危险理论的故障诊断方法	175
10.1	人工免疫系统与免疫危险理论	175
10.1.1	生物免疫系统	175
10.1.2	人工免疫系统	177
10.1.3	人工免疫系统的求解算法	178
10.1.4	免疫危险理论	180
10.2	液压泵各状态振动信号的采集与预处理	182
10.2.1	振动信号的采集	182
10.2.2	共振信号的解调	183
10.2.3	液压泵故障状态特征信息的提取	188
10.3	免疫危险理论在特征降维与故障诊断中的应用	191
10.3.1	基于免疫危险理论的液压泵振动信号特征选择算法	191
10.3.2	基于免疫危险理论的故障诊断算法	197
	本章参考文献	205

Chapter 11	第 11 章 基于 HHT 和模糊 C 均值聚类的故障诊断方法	207
11.1	基于 Hilbert-Huang 变换的轴向柱塞泵振动信号分析	207
11.1.1	Hilbert-Huang 变换	207
11.1.2	轴向柱塞泵状态信号的采集	210
11.1.3	滑靴磨损故障振动信号分析	211
11.1.4	松靴故障振动信号分析	214
11.1.5	中心弹簧失效故障振动信号分析	216
11.2	基于 Hilbert-Huang 变换的轴向柱塞泵压力信号分析	219
11.2.1	正常状态压力信号分析	219
11.2.2	滑靴磨损故障压力信号分析	221
11.2.3	松靴故障压力信号分析	224
11.2.4	中心弹簧失效故障压力信号分析	226
11.3	基于 HHT 的故障特征向量提取	229
11.3.1	局部边际能量谱及特征能量	229
11.3.2	振动信号的特征提取	229
11.3.3	压力信号的特征提取	233
11.4	基于模糊 C 均值聚类的模式识别	236
11.4.1	模式识别和模糊聚类	236
11.4.2	模糊 C 均值聚类算法	237
11.4.3	基于 FCMC 算法和振动信号的轴向柱塞泵故障识别	238
11.4.4	基于 FCMC 算法和压力信号的轴向柱塞泵故障识别	239
	本章参考文献	242

Chapter 12	第 12 章 信息熵理论在健康状态评估中的应用	243
12.1	信号在不同分析域中的信息熵特征	243
12.1.1	信息系统的分析模型	243

12.1.2	信息熵的概念	243
12.1.3	信息熵的性质	244
12.1.4	振动信号时域信息熵特征提取	245
12.1.5	振动信号的频域信息熵特征提取	246
12.1.6	振动信号时频域信息熵特征提取	247
12.2	滑靴油膜理论	248
12.2.1	滑靴的磨损形式	249
12.2.2	油膜的热楔效应	249
12.2.3	圆盘的油膜挤压效应	250
12.2.4	静压支承油膜理论	250
12.2.5	滑靴斜盘摩擦副受力分析	253
12.2.6	滑靴偏磨	255
12.3	液压泵健康状态评估的试验研究	256
12.3.1	液压泵健康评估试验系统	256
12.3.2	试验步骤	257
12.3.3	试验结果分析	257
	本章参考文献	266

Chapter 13 第 13 章 基于声音信号的核主元分析故障诊断方法

13.1	PCA 的基本原理	268
13.1.1	PCA 模型	268
13.1.2	统计量的确定	269
13.2	KPCA 的基本原理	270
13.2.1	KPCA 模型	270
13.2.2	核函数的选取	271
13.2.3	统计量的确定	272
13.3	基于声音信号的 KPCA 故障诊断方法	272
13.3.1	核主元模型的构建步骤	272
13.3.2	在线检测的步骤	272
13.4	试验研究	273
13.4.1	声音信号分析	273
13.4.2	声音信号的特征向量提取	274
13.4.3	基于声音信号的 KPCA 故障诊断方法的诊断结果	277
13.4.4	基于声音信号的 PCA 故障诊断方法的诊断结果	278
13.4.5	基于振动信号的 KPCA 故障诊断方法的诊断结果	279
13.4.6	诊断结果比较	279
	本章参考文献	280

Chapter 14 第 14 章 指数加权动态核主元分析的故障诊断方法

14.1	指数加权动态自回归统计模型	281
14.1.1	指数加权主元分析模型	281

14.1.2	基于滑动时间窗口的数据更新	281
14.1.3	指数加权核主元分析模型	282
14.1.4	指数加权核主元分析模型的特点	282
14.2	指数加权动态核主元分析法的建模与故障诊断	283
14.2.1	第 1 个时间窗口的建模与故障诊断	283
14.2.2	第 1 个时间窗口以后各窗口的建模与故障诊断	283
14.3	试验研究	285
14.3.1	振动信号分析	285
14.3.2	振动信号的特征向量提取	286
14.3.3	指数加权动态核主元分析的故障诊断方法的诊断结果	287
	本章参考文献	289

Chapter 15	第 15 章 SVM 与证据理论集成的多源信息融合故障诊断方法	291
15.1	证据理论	291
15.1.1	证据理论中的几个重要概念	291
15.1.2	证据区间的描述	292
15.1.3	信度函数的融合规则	292
15.2	基于矩阵分析的融合算法	293
15.2.1	置信度分配矩阵	293
15.2.2	算法描述	293
15.3	基本概率分配的确定方法	294
15.3.1	基于 BP 神经网络确定基本概率分配	294
15.3.2	基于 SVM 确定基本概率分配	295
15.4	基于证据理论的多源信息融合故障诊断方法	297
15.4.1	故障特征参量的提取	297
15.4.2	故障诊断过程的实现	298
15.5	试验研究	298
15.5.1	信号处理	299
15.5.2	基本概率分配的确定	300
15.5.3	试验结果分析	303
	本章参考文献	305

第1章

绪 论

随着工业生产技术和科学技术的进步,工业生产设备的自动化水平日益提高,并不断地向着大型化、连续化、高速化、数字化和智能化方向发展,促进了设备生产效率的显著提高,有效地提高了产品产量,在降低了生产成本的同时也保证了产品的高质量,然而设备的结构和功能却变得日趋复杂。由于各种难以避免的因素影响,设备或系统故障时有发生,以至于降低或失去其预定的功能,设备因故障停工造成的损失成比例地增加,维修费用也大幅度上升。设备中一个部件发生故障,可能引起整个生产流程的中断,造成巨大的经济损失,甚至会发生灾难性事故,因此对设备的安全性和可靠性提出了越来越高的要求。为此,人们采取了一系列措施以防止设备故障的发生,包括提高元器件的可靠性、进行系统的高可靠性设计以及进行控制系统的容错设计等。即便如此,系统最终还是难免发生故障。因此,故障检测与诊断、故障预报技术就成了现代工业设备运行维护和管理的重要课题。

液压系统在各类工业设备中起着核心的传动和控制作用。现代液压系统具有功率大、体积小、重量轻、响应快、精度高及抗负载扰动刚性大等优点,随着液压系统向快速、大功率、高精度的方向发展,液压系统及工业设备的功能越来越强大,结构和信息越来越复杂,性能指标越来越高,工作强度越来越重,各部分的关联越来越密切。对液压系统进行有效的状态监测与故障诊断预报,可以提高设备的安全性和可靠性,不仅能够保证正常的生产工艺过程和产品质量,而且能够避免灾难性事故的发生。在设备维护方面,可以降低维修成本,延长设备的服役寿命,促进设备维修体制与方式的现代化。对生产企业来说,可以提高生产效率,增加产品合格率,减少材料浪费,节约人力和物力成本,在市场竞争中还能够提高企业的核心竞争力,给企业创造巨大的经济效益。

相反,如果对液压系统缺乏有效的状态监测与故障诊断预报措施,将会造成严重的后果。由于液压系统在生产线中所处的地位异常重要,一旦发生故障,轻则造成停机或影响产品质量,重则将会使整个生产过程中断,生产线瘫痪,甚至发生人身伤亡和导致严重的环境污染,给企业造成巨大的经济损失和产生严重的社会影响。

总之,对液压系统及设备进行早期故障检测与诊断是整个生产流程中必不可少的环节,也是设备维修管理体制中“预知维修”阶段研究的核心问题。不断提高液压系统的故障诊断技术水平,研究和开发各类快速及时且准确有效的故障诊断方法,在现代工业生产中是非常必要而且非常紧迫的。

1.1 液压系统故障诊断技术的发展简史

液压系统的故障诊断是针对具体的液压系统,通过分析液压系统特有的失效形式和故障

机理,利用现代信息处理技术,对采集的状态监测信号进行模式识别或分类,对故障原因进行分析,并进行故障定位和故障预报等。与其他工业应用领域的故障诊断技术相比,液压系统的故障诊断技术相对落后,主要是以汲取其他领域的研究成果为基础发展起来的。

在液压系统的运行信息中,包含机械、液压、电气等方面的综合信息。机械设备中所有可能发生的故障在液压系统中都有可能发生,如形变或应力疲劳断裂、腐蚀、磨损、冲击断裂、热应力与热变形等。除此之外,液压传动与控制系统还具有其特有的失效形式,如油液污染、泄漏、汽蚀、液压卡死、油液温升、管路谐振、电气信号失真、噪声及系统振荡等。

液压系统工作是靠液压油来传递压力能的,油液的状态对液压系统工作的可靠性影响最大。据统计,液压系统的故障有70%以上是由于油液污染引起的,而油液中杂质引起的故障又占其中的90%。因此,对油液污染度的控制是提高液压系统可靠性的首要任务。另外,约有30%的故障是液压元件和辅件的磨损、液压卡死及液压冲击造成的。此外,由于系统参数调整和设定不当也会使液压系统发生故障。

由于油液的黏性和所含空气量变化的非线性、液压系统及元件的运动形式多样、系统回路间的相互干涉、动力的传递封闭、参数可测性差等诸多因素的影响,使得对液压系统的故障机理分析难以做到精准。同时,由于液压系统功能的多样性,每一液压系统和元件都有其特有的故障形式,使液压系统的状态监测和故障诊断存在很大困难。因此,针对具体系统进行故障机理分析,建立系统特有的故障样本仍将是今后的重要研究课题。

由于液压系统的失效形式及故障机理的复杂性和多样性,使得故障原因、故障部位、故障程度的诊断比较困难。基于数学模型的故障诊断方法往往需要多种前提条件,例如:需要过程的机理模型知识;模型必须线性化;假设干扰为白噪声等,这些前提条件往往不符合液压系统实际情况。液压系统存在伺服阀、执行器、管路和负载等高度非线性及时变环节,且数学模型比较复杂,现有模型都是在各种假设和近似下得到的。因而在液压系统中,基于数学模型的方法难以取得良好的诊断效果。根据目前已掌握的文献,国内外学者广泛研究基于数据驱动、基于信号处理和基于知识的方法,对液压系统进行故障诊断和预报。

液压系统故障诊断技术是在紧跟现代工业和现代科学技术发展的步伐而逐步发展起来的,可归纳为以下四个发展阶段:

(1) 主观经验诊断法阶段

这是一种主观判断法,是采用看、听、摸、问、闻、阅等方式进行诊断。主要是通过专家和工程技术人员利用简单的诊断仪器,多凭借个人的实践经验,分析故障产生的原因,判断故障的类型和发生部位以及故障的严重程度。

主观经验诊断法是液压故障诊断发展的初级阶段,该方法一般只能对故障进行简单的定性分析,难以做到定量分析。为了弄清复杂液压系统或液压元件故障的产生原因,有时就不得不停机拆卸下来,把它放到实验台上做定量的性能测试,或解体来进行进一步判断。

这类方法由于简单方便,在现代工业装备维修中仍被广泛采用。但是由于这种方法主要依靠专家的经验,所以此方法有着难以克服的局限性:它要求诊断人员必须掌握丰富的故障机理知识和诊断经验,熟知元件的结构、功能、性能等方面的知识,具备综合分析和解决问题的能力,这样才能正确地进行故障诊断并提出合理的维修方案。但是,由于人们的感受不同,判断能力和实践经验亦存在差别,所以诊断结果不可避免地存在差异,维修决策的合理性、正确性难以保证,因此主观诊断法已经越来越难以适应现代化工业生产的需求。

(2) 基于数学模型的诊断方法阶段

该类方法对于简单的系统较为适用,但对于现代工业生产过程中的复杂系统就显得无能

为力。大规模的复杂系统具有滞后、强耦合性及参数时变性等严重的非线性特性，而且还存在过程不确定性和外界干扰等多种不良因素的影响，噪声统计特性也不理想，因此难于建立精准的数学模型，甚至不存在确定的数学模型，这些原因导致诊断过程很难实现在线状态估计或参数估计。此外，就系统的故障诊断过程而言，基于模型的诊断方法具有针对性强的特点，一旦确定了诊断模型其诊断能力很大程度上就已经确定了，所以它的功能很难继续扩充及修改，通用性较差。

由于液压系统中的液压元件工作在封闭油路或油腔中，工作过程不像机械传动那样直观，也不像电气设备那样其运行参数易于测量，所以参数的可测性较差，从而导致所能测得的故障信息存在不完备性。而且影响液压系统特性的因素又多种多样，这些原因使得基于模型的诊断方法难以满足对复杂液压系统进行故障诊断的现实需要。

(3) 基于数据驱动和信号处理的诊断方法阶段

这类方法首先是用传感器采集获取系统的某些可测量运行参数，这些运行参数在幅值、相位、频率及相关性等方面与故障源之间存在着诸多联系，然后通过信号处理技术手段分析、处理这些运行信息来判断故障发生的原因和部位。从诊断过程来看，这类方法的实质是以传感器技术和动态测试技术为手段，以信号处理和建模处理为基础的诊断技术，衍生出了很多有效的故障诊断方法，例如：时间序列分析法、功率谱分析法、倒频谱分析法、小波分析法等，这些方法都表现出简单实用且鲁棒性强的特点，但是它同样存在许多局限性。

(4) 人工智能诊断技术阶段

智能诊断技术是随着信息科学技术和人工智能技术的迅速发展而产生的，它是人工智能技术、计算机技术与液压系统故障诊断技术相结合的产物，也是诊断技术发展进步的必然结果。特别是随着知识工程、专家系统和人工神经网络在各领域中的广泛应用，促使人们对液压系统智能诊断问题进行更加深入、系统的研究。液压系统故障的多样性、突发性、成因的复杂性，以及故障诊断过程对领域专家实践经验和诊断策略的高度依赖性，使研制智能化的液压故障诊断系统成为该领域当前的发展趋势。

诊断系统的智能性是指它能够有效地获取、传递、处理、再生和利用诊断信息，从而具有对给定环境下的被诊对象进行有效的状态识别和状态预测的能力。因此，智能诊断技术是液压系统故障诊断极具生命力的一个发展方向。目前，该方向的研究主要从两个方面展开：一个是基于专家系统的智能故障诊断技术；另一个是基于神经网络的智能故障诊断技术。然而，诊断系统的智能并不意味着完全代替人的智力活动，将人排斥于诊断系统之外。因此，智能诊断系统，是由人（尤其是领域专家）、现代模拟脑功能的计算机硬件以及支持这些硬件的平台软件、计算智能为核心的用户程序所组成的人机系统。该系统以对诊断对象进行状态识别和状态预测为目的，是基于知识处理的诊断系统。

1.2 液压系统故障诊断技术的发展趋势

液压系统故障诊断是目前的一个热点研究领域。随着相关学科的理论技术的飞速发展，新理论、新技术不断地被引入液压系统故障诊断领域中，使之不断丰富和完善。将人工智能领域出现的各种智能方法应用到液压系统故障诊断技术中是该领域总的发展趋势。

(1) 智能诊断方法

随着人工智能技术的迅速发展，遗传算法、神经网络、专家系统等人工智能或计算智能方法逐步应用到液压系统故障诊断领域。在众多的神经网络结构中，以基于 BP 算法的多层