



微弱信号检测 及无损探测技术研究

许雪梅◎著

 湖南科学技术出版社



微弱信号检测 及无损探测技术研究

责任编辑：缪峥嵘
装帧设计：殷健

ISBN 978-7-5710-0388-3



9 787571 003883 >

定价：98.00元



官方微信



官方天猫



微弱信号检测 及无损探测技术研究

许雪梅◎著

CSK 湖南科学技术出版社

此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

图书在版编目 (CIP) 数据

微弱信号检测及无损探测技术研究/许雪梅著.
—长沙: 湖南科学技术出版社, 2021. 7
ISBN 978-7-5710-0388-3

I. ①微… II. ①许… III. ①信号检测—研究
②无损检验—研究 IV. ①TN911.23 ②TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 039046 号

WEIRUO XINHAO JIANCE JI WUSUN TANCE JISHU YANJIU

微弱信号检测及无损探测技术研究

著 者: 许雪梅

责任编辑: 缪峥嵘

出版发行: 湖南科学技术出版社

社 址: 长沙市芙蓉中路一段 416 号泊富国际金融中心

网 址: <http://www.hnstp.com>

湖南科学技术出版社天猫旗舰店网址:

<http://hnkjcs.tmall.com>

邮购联系: 本社直销科 0731-84375808

印 刷: 长沙超峰印刷有限公司

(印装质量问题请直接与本厂联系)

厂 址: 宁乡市金洲新区泉州北路100号

邮 编: 410600

版 次: 2021 年 7 月第 1 版

印 次: 2021 年 7 月第 1 次印刷

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 28.5

字 数: 438 千字

书 号: ISBN 978-7-5710-0388-3

定 价: 98.00 元

(版权所有·翻印必究)

序 言

由于现代工业化和信息技术、计算机技术等科学技术的迅猛发展，无损探测技术的新方法、新理论和新技术层出不穷，这些技术在设备和装备运行、质量监控、生产力提高、降低成本等方面发挥了重要作用，无损探测技术牵涉的行业多、学科多，现在已经发展成为一门独立的综合性交叉学科。

作者20多年来，一直从事无损探测技术的研究，特别是对光纤光栅传感器、机器视觉和图像处理、混沌电路及忆阻器在无损探测技术及其微弱信号检测领域的应用做了比较系统的研究，完成了与电力部门和医学界的多项合作课题。本书中微弱信号检测及无损探测技术都是我带领研究生完成的课题，基于机器视觉的液体药剂无损探测技术已经得到了广泛应用、光纤光栅技术的电站变压器项目获得湖南省科学技术发明奖，我撰写本书的目的，旨在抛砖引玉，吸引更多的同行以及相关领域专家扎根在无损探测领域，做出更大的成就。

本书共分8章，第1章为绪论，第2章和第3章为微弱信号检测领域，这两章主要是针对噪声强大、信号弱小的无损探测系统，混沌电路与忆阻器的特点以及对信号的敏感特性，适用于极其微弱信号的无损探测场所的探测。第4章主要介绍在变压器上布局海量光纤光栅加速度传感器，先测量变压器箱体振动信号，以振动信号异常变化反推变压器的运行状态。第5章至第8章都是采用机器视觉技术、聚类算法和分水岭算法实现无损探测的。

这些章节中的研究成果都是我的团队和我的研究生合作开发的，特别感谢李丽娟、徐薇钦、罗晶晶、郭巧云、李禹阳、周立超、黄帅、李梦平、欧阳鹏、李晨静、李运龙、郭媛、汪金辉、李俊杰、肖亮、桑延奇、戴鹏、李奔荣、谢伟涛、周文、程伟、董丽荣、石婷婷、邱豪杰、文珺、邱海涛、李维、刘茜倩、叶俊华、郭远威、张健洋、彭航航、倪兰、蒋静、李岸、黄振宇、聂雅琴、陈敏敏和墨芹等研究生，在这里不再一一列举，我们在研究工

作中并肩作战、共同成长。限于篇幅，还有一些研究成果没有附上，如今后研究更为深入，再撰写续集。

感谢中南大学自动化学院蒋朝辉教授的国家自然科学基金重大科研仪器研制项目（No. 61927803）的大力支持和帮助；著者在撰写过程中，得到家人的关心和呵护，在此向我最尊敬的家人表示感谢。同时感谢湖南科学技术出版社对本书的出版所给予的支持和辛勤付出。

由于时间仓促，缺点、错误在所难免，敬请各位读者批评指正。

许雪梅

2021年1月于中南大学



第 1 章 绪论

- 1.1 微弱信号及无损探测技术概述 / 001
- 1.2 新型无损检测技术的目的和意义 / 001
- 1.3 本书的内容和章节安排 / 002
- 参考文献 / 003

第 2 章 基于混沌振子的微弱信号检测方法

- 2.1 概述 / 005
 - 2.1.1 混沌振子方法在微弱信号检测中的重要性 / 005
 - 2.1.2 混沌振子检测法在国内外发展的现状及动态分析 / 006
 - 2.1.3 亟待解决的问题 / 010
- 2.2 基于 VPD 混沌系统检测方法 / 011
 - 2.2.1 基于 VPD 混沌系统的微弱信号检测原理及频率检测方法 / 012
 - 2.2.2 VPD 混沌系统状态阈值及运动状态研究 / 014
 - 2.2.3 系统噪声特性研究 / 015
- 2.3 本章小结 / 017
- 参考文献 / 020

第 3 章 基于忆阻器的混沌电子学及其微弱信号检测方法

- 3.1 忆阻器的物理模型介绍 / 026

- 3.2 混沌电路设计方法 / 029
 - 3.2.1 经典混沌电路 / 029
 - 3.2.2 混沌电路设计方法 / 033
- 3.3 基于忆阻器的混沌电路设计方法 / 035
- 3.4 蔡氏电路及其混沌动力学特性 / 036
- 3.5 基于混沌系统的微弱信号检测原理 / 039
- 3.6 混沌系统运动状态判别方法 / 041
 - 3.6.1 直观法 / 041
 - 3.6.2 定量法 / 046
- 3.7 基于忆阻器 Chua 振子的微弱信号检测模型研究 / 048
 - 3.7.1 忆阻器 Chua 振子微弱信号检测模型 / 048
 - 3.7.2 基于忆阻器的蔡氏电路振子动力学特性分析 / 051
 - 3.7.3 基于忆阻器的蔡氏电路振子的微弱信号检测 / 052
- 3.8 正弦微弱信号参数估计 / 053
 - 3.8.1 幅值检测方法研究和仿真分析 / 053
 - 3.8.2 频率检测方法研究和仿真分析 / 055
- 3.9 其他周期微弱信号参数估计 / 056
- 3.10 基于忆阻器的蔡氏电路检测模型性能分析 / 057
 - 3.10.1 检测系统的最大信噪比和精度 / 057
 - 3.10.2 与传统混沌检测方法比较 / 059
- 3.11 三次磁控忆阻器等效电路设计 / 060
- 3.12 基于忆阻器的蔡氏混沌微弱信号检测电路 DSP 实现 / 066
- 参考文献 / 071

第 4 章 基于光纤光栅传感器电力变压器振动无损在线监测系统设计

- 4.1 光纤光栅传感器解调原理 / 075
 - 4.1.1 光纤光栅传感器的基本原理 / 075
 - 4.1.2 光纤光栅传感器的解调原理 / 075

- 4.1.3 光纤传感器常见解调方案 / 077
- 4.2 电力变压器振动监测系统方案设计 / 078
 - 4.2.1 功能需求分析及方案选择 / 078
 - 4.2.2 解调系统整体架构 / 080
- 4.3 解调系统思路与规划 / 080
 - 4.3.1 解调系统资源需求分析 / 080
 - 4.3.2 解调系统整体方案 / 081
- 4.4 变压器振动检测系统硬件实现 / 083
 - 4.4.1 振动检测系统硬件具体实现 / 084
 - 4.4.2 系统平台器件选择 / 084
 - 4.4.3 电源模块电路设计 / 090
- 4.5 信号调理电路的设计 / 095
 - 4.5.1 A/D & D/A 转换电路 / 096
 - 4.5.2 放大电路 / 098
 - 4.5.3 滤波电路 / 098
 - 4.5.4 通信电路模块 / 099
 - 4.5.5 FIFO 储存器电路设计 / 101
 - 4.5.6 总体硬件结构图和实物图 / 101
- 4.6 变压器振动测量原理及其监测系统软件实现 / 104
 - 4.6.1 原理描述 / 104
 - 4.6.2 解调系统框架图 / 105
 - 4.6.3 解调原理描述 / 106
 - 4.6.4 变压器故障检测算法的研究 / 116
 - 4.6.5 软件功能需求分析 / 120
- 4.7 软件整体设计 / 121
 - 4.7.1 信号调理 / 123
 - 4.7.2 通信流程 / 127
 - 4.7.3 PC 处理部分 / 127
- 4.8 上位机系统 / 132
 - 4.8.1 登录界面 / 132
 - 4.8.2 数据接收与显示 / 133

- 4.8.3 快速傅里叶变换及故障诊断 / 133
- 4.9 系统调试与测试 / 133
 - 4.9.1 电源模块测试 / 133
 - 4.9.2 A/D采样以及 A/D 转换模块的调试 / 135
 - 4.9.3 放大电路测试 / 136
 - 4.9.4 数据保存测试 / 138
 - 4.9.5 软件稳定性分析 / 138
- 参考文献 / 140

第5章 基于机器视觉技术医用药剂中可见异物检测系统

- 5.1 自动化医用药剂无损检测的重要性 / 145
 - 5.1.1 自动化液体药剂无损检测的意义 / 145
 - 5.1.2 可见异物药液检测的现状 / 146
 - 5.1.3 基于智能视觉药液检测的优势 / 147
- 5.2 液体药剂自动化无损检测系统 / 148
- 5.3 无损检测与实验分析 / 152
 - 5.3.1 检测对象分析 / 152
 - 5.3.2 视觉成像系统分析 / 153
 - 5.3.3 机械传动部分设计分析 / 154
 - 5.3.4 无损剔除部分设计 / 157
 - 5.3.5 功能与指标 / 158
 - 5.3.6 系统实物图 / 159
 - 5.3.7 系统特点与优势 / 159
- 5.4 系统硬件构成及工作原理 / 161
 - 5.4.1 自动化液体药剂无损检测系统介绍 / 161
 - 5.4.2 照明成像系统 / 164
 - 5.4.3 电气控制系统 / 165
- 5.5 基于三帧差分法和 Mean shift 算法的液体药剂异物检测 / 169
 - 5.5.1 算法概述 / 169
 - 5.5.2 图像预处理 / 170

- 5.5.3 运动目标检测 / 171
- 5.5.4 运动目标分割 / 180
- 5.6 运动目标跟踪 / 182
 - 5.6.1 基于 Tsallis 的近邻聚类算法 / 186
 - 5.6.2 运动检测和特征提取 / 191
 - 5.6.3 用于粒子检测的运动连续性亲和力传播因子 / 193
 - 5.6.4 基于差分进化算法的三维 Tsallis 熵阈值优化 / 195
 - 5.6.5 实验与分析 / 196
- 5.7 连通域标记及特征提取 / 200
 - 5.7.1 数学形态学处理 / 200
 - 5.7.2 连通域标记 / 202
 - 5.7.3 异物目标特征提取 / 204
- 5.8 基于运动连续性 AP 算法的可见异物识别 / 206
 - 5.8.1 近邻传播聚类算法 / 206
 - 5.8.2 改进的近邻传播聚类算法 / 210
 - 5.8.3 基于测地距离的相似性度量 / 211
 - 5.8.4 运动连续性近邻传播模型 / 216
 - 5.8.5 运动连续性近邻传播算法信息传递 / 218
 - 5.8.6 异物目标判断 / 227
- 5.9 实验与结果分析 / 229
 - 5.9.1 运动连续性 AP 与标准 AP 性能比较 / 229
 - 5.9.2 运动连续性 AP 异物检测性能 / 233
- 5.10 系统软件架构 / 237
 - 5.10.1 开发环境搭建 / 237
 - 5.10.2 软件整体结构设计 / 237
 - 5.10.3 软件所用函数库介绍 / 238
- 5.11 软件模块分析 / 239
 - 5.11.1 MVC360MF 摄像头获取 / 239
 - 5.11.2 串口通信模块 / 240
 - 5.11.3 Qt 数据存储与文件读写模块 / 241
 - 5.11.4 多线程算法处理模块 / 243

- 5.12 系统软件设计 / 244
 - 5.12.1 图形用户界面 / 244
 - 5.12.2 软件流程图 / 245
 - 5.12.3 软件功能介绍 / 246
 - 5.12.4 软件操作介绍 / 247
- 5.13 系统测试方案及测试结果 / 250
 - 5.13.1 基于 Intel Vtune 软件性能分析与优化 / 250
 - 5.13.2 系统测试 / 254
 - 5.13.3 实验结果分析 / 255
- 附录 5.1 软件代码 / 257
- 参考文献 / 313

第 6 章 基于 AI-BoxX Gen.1 平台的云端中医取药系统

- 6.1 概述 / 319
 - 6.1.1 中医院取药服务现状 / 319
 - 6.1.2 国内外发展趋势动态分析 / 320
 - 6.1.3 智能中医抓药系统的优势 / 320
- 6.2 系统架构 / 321
 - 6.2.1 系统总设计方案 / 321
 - 6.2.2 机械臂控制方案 / 323
 - 6.2.3 软件架构 / 323
- 6.3 硬件系统设计 / 324
 - 6.3.1 硬件系统整体介绍 / 324
 - 6.3.2 主控 MCU 模块 / 326
 - 6.3.3 药库 MCU 模块 / 326
 - 6.3.4 机械臂硬件模块 / 328
 - 6.3.5 药库机械结构设计 / 333
- 6.4 机械臂自动取药算法 / 334
 - 6.4.1 基于双目视觉的目标获取 / 334
 - 6.4.2 机械臂运动学建模 / 345

6.4.3 机械臂封装动作设计方案 / 349

附录 6.1 部分软件代码 / 349

附录 6.2 硬件系统电路图 / 359

参考文献 / 361

第 7 章 健康数据无损监测系统研制

7.1 项目背景和建设意义 / 362

7.1.1 项目背景 / 362

7.1.2 项目建设的重要意义 / 364

7.2 智能椅子电路设计 / 365

7.2.1 DHT11 介绍 / 365

7.2.2 MLX90614 介绍 / 365

7.2.3 MAX30102 介绍 / 366

7.2.4 主控板与传感器 / 366

7.2.5 马达驱动板的选取 / 369

7.3 软件设计 / 369

7.3.1 软件流程介绍 / 371

7.3.2 网页端/APP 处理流程 / 374

7.3.3 端口控制流程 / 374

7.3.4 软件部署 / 377

7.3.5 APP 简述 / 379

7.4 心率传感器的设计 / 379

7.4.1 背景介绍 / 379

7.4.2 电路设计 / 380

7.5 系统总体调试 / 383

参考文献 / 386

第 8 章 基于分水岭分割的粘连颗粒图像分析技术研究

8.1 颗粒图像分析基础与预处理 / 390

- 8.1.1 图像处理的基本概念 / 390
- 8.1.2 数字图像与像素的表示 / 390
- 8.1.3 图像类型 / 390
- 8.1.4 图像分割的定义 / 394
- 8.1.5 图像平滑处理 / 395
- 8.1.6 图像二值化 / 398
- 8.1.7 粘连颗粒图像二值化的结果与分析 / 401
- 8.2 图像数学形态学处理与距离变换 / 403
 - 8.2.1 图像数学形态学处理 / 403
 - 8.2.2 二值图像的腐蚀运算 / 405
 - 8.2.3 二值图像的膨胀运算 / 406
 - 8.2.4 开运算与闭运算 / 407
- 8.3 粘连颗粒图像的数学形态学处理 / 407
 - 8.3.1 粘连图像数学形态学处理的结果与分析 / 407
 - 8.3.2 数学形态学滤波器的设计 / 412
 - 8.3.3 图像距离变换 / 413
 - 8.3.4 粘连颗粒图像的距离变换结果与分析 / 416
- 8.4 颗粒图像分水岭分割方法 / 418
 - 8.4.1 分水岭变换原理及算法研究 / 419
 - 8.4.2 分水岭算法的数学描述 / 420
 - 8.4.3 分水岭算法及其代码实现 / 423
 - 8.4.4 分水岭分割的常用方法 / 424
 - 8.4.5 一种改进的分水岭分割方法 / 426
- 8.5 图像颗粒的自动计数与特征参数提取 / 431
 - 8.5.1 颗粒自动计数 / 431
 - 8.5.2 颗粒参数提取 / 434
- 参考文献 / 444



第 1 章 绪论

1.1 微弱信号及无损探测技术概述

微弱信号检测和无损探测技术是一门新兴的综合性应用技术。随着科学技术和生产力的提升,工业技术得到了迅猛的发展,而设备或材料等在高温、高压、高速、高噪声和高负荷下工作已经是现代工业化生产的特点^{[1]~[4]},但这些目标的实现必须建立在高质量的生产之上,为确保优质生产,必须采取必要的措施,对强噪声环境下的微弱信号的探测,对不破坏原有生产线、不破坏产品原有的形貌、结构和物理特性,不改变其使用性能的检测方法,能对所有产品实现检测,并确保生产的可靠性、安全性和便捷性,这种技术称之为无损探测技术^{[5]~[10]}。

无损探测技术指的是不破坏待测对象的前提下,利用设备内部的变化或者异常、缺陷等引起的对力、热、光、声、电、磁等反应的变化,探测各种工程内部材料、零部件引起的设备异常运行,能够根据设备的运动状态和历史数据判断和评价设备所处的状态,进一步分析设备内部、材料或者产品的质量^{[1]、[11~15]}。

无损探测(以下也称无损检测)技术已经广泛应用在电力电子、机械制造、石油化工、造船、汽车、陶瓷、航空航天、核电站、智慧城市等工业化生产中,无损探测技术已经纳入生产管理的重要环节^{[16]~[20]}。设备厂家根据验收标准,运用无损探测技术把产品质量控制在允许的范围内,提高标准化生产和使用效率;该项技术得到国家和工业生产部门的高度重视,它是保障设备安全和高效可靠运行的“战士”,通过及时预测故障,改造设备工艺,提高产品质量^{[21]~[23]}。

1.2 新型无损检测技术的目的和意义

刘贵明和马丽丽^[1]、付亚波^[2]、沈玉娣和曹军义^[3]、刘燕德^[4]等科技工

作者相继编写了无损检测技术著作或教程，并且都很好地诠释了无损检测的定义、目的和主要研究方法。刘贵明和马丽丽的著作是把常规无损检测技术，比如射线、渗透、超声波、涡流和磁粉技术放在第一篇介绍；第二篇再介绍其他常用的技术，比如种子工业照相技术、声发射技术、噪声检测诊断技术、工业内窥镜技术、激光全息检测技术、微波检测技术和磁记忆技术，本书则侧重于加强工业 CT 检测技术环节，如果想全面了解无损检测技术的方法，可以参阅刘贵明和马丽丽的著作。付亚波的教材由浅入深、图文并茂地阐述各种无损检测技术的要点和特点。沈玉娣和曹军义的著作除了常规检测方法以外，还介绍了振动信号的测量，以及光纤技术做无损检测的手段。刘燕德的著作除了介绍常规检测手段以外，重点在机器视觉、智能算法和虚拟仪器等方面加强描述。因篇幅有限，作者在此不再赘述这些著作、教材或者手册所介绍的方法。

近年来，随着信息技术和计算机技术的发展，无损检测新技术、新方法不断涌现，无损检测技术涉及的学科多、行业广，新的无损检测技术的开发和应用，极大地丰富了无损检测的方法、理论和技术。

本书主要介绍新颖的基于杜芬振子和混沌理论的微弱信号无损检测技术，以及基于振动信号测量及其视觉技术的无损检测技术。混沌理论与机器视觉在无损检测领域的应用是传统无损探测技术的延伸和增长点，为无损探测技术开辟了新的道路。因此，本书的重点主要是介绍基于混沌电路、机器视觉、忆阻器和杜芬振子等新兴技术在无损检测技术中的应用。

1.3 本书的内容和章节安排

第一章是绪论，主要讲述本书的目的和任务。第二章主要是运用杜芬振子，对变压器油中得到的色谱进行深入细致的分析，测量过程不需要损害原有的变压器结构和变压器油。第三章主要介绍采用忆阻混沌电路可以对需要后端处理的背景噪声强大的微弱信号，运用忆阻电路敏感性进行实时准确测量，这对后端数据处理起到至关重要的作用。第四章对变压器振动信号进行测量来判断变压器的运行情况，因为当变压器油出现裂变、变压器铁芯或绕组出现问题时，振动信号就会发生变化，因此振动和噪声反映了变压器设备内部的状态变化，通过检测分析振动与噪声信号，可以找出振动与噪声的部

位,判断设备内部的故障;这一章节运用先进的光纤光栅加速度传感器探测变电站信号的诊断情况,不破坏变电站任何结构,并且能够做到海量布局,生产现场没有嵌入电信号,这对高压高温工作的变电站来说,一是提高安全性,二是检测效果好,这是一项有重大意义的工作。第五章运用现在自动化机械手、智慧摄像头、图像处理中的聚类算法以及机器视觉领域 OpenCV 技术,可以做到实时在线大批量检测医用液体药剂的质量,提高生产效率,减少劳动力,提高检测质量和检测品位。第六章运用现代化机器视觉技术和先进的嵌入式技术和手段,可以提高医生看病效率、解决患者排队取药的大难题。第七章运用现代无线集成传感技术,利用先进的可视化智能椅子可以实时检测自己的身体状况,同时医生可以随时了解患者情况,为将来智慧诊断技术提供了新的思路,打开未来医患一体化进程的大门。第八章主要讲述农业生产中的玉米种子、大米、花生等颗粒分类与无损检测技术,这对于提高农业机械化生产起到重要的作用。

参考文献

- [1] 刘贵明,马丽丽.无损检测技术 [M].北京:国防工业出版社,2009.
- [2] 付亚波.无损检测实用教程 [M].北京:化学工业出版社,2018.
- [3] 李家伟.无损检测手册 [M].北京:机械工业出版社,2009.
- [4] 沈玉娣,曹军义.现代无损检测技术 [M].西安:西安交通大学出版社,2012.
- [5] 刘燕德.无损智能检测技术及应用 [M].武汉:华中科技大学出版社,2007.
- [6] 中国机械工程学会无损检测学会.无损检测概论 [M].北京:机械工业出版社,1993.
- [7] 《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编辑委员会.射线检测 [M].北京:机械工业出版社,2004.
- [8] 美国无损检测学会.美国无损检测手册·渗透卷 [M].上海:世界图书出版公司,1994.
- [9] 李国华,吴森.现代无损检测与评价 [M].北京:化学工业出版社,2009.
- [10] 胡学知.渗透检测 [M].北京:中国劳动社会保障出版社,2007.
- [11] 任吉林,林俊明.电磁无损检测 [M].北京:科学出版社,2008.
- [12] 王晓蕾.承压类无损检测相关知识 [M].北京:中国劳动社会保障出版社,2007.
- [13] 施克仁.无损检测新技术 [M].北京:化学工业出版社,2007.