

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学号: 19920111152733

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于稳态电流信号频谱分析的微型直流  
电机检测系统设计

The Micro DC Motor Testing System Based on the  
Spectral Analysis of Steady-state Current

陈忠祥

指导教师姓名: 陈文芾 教授

专 业 名 称: 精密仪器及机械

论文提交日期: 2014 年 04 月

论文答辩时间: 2014 年 05 月

学位授予日期: 2014 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2014 年 04 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

微型直流电机具有结构简单、控制方便、工作稳定、制造成本低廉的特点，因而成为各种机械电子系统的关键执行部件和主要驱动部件，广泛应用工业生产和社会生活的各个领域，随着社会自动化程度的提高和现代微型直流电机制造水平的提高，微型直流电机的应用范围和产量将会不断扩大。微型直流电机是系统设备的核心部件，一旦发生故障，影响面甚广，因此必须严格保证电机的出厂质量。针对目前微型直流电机的出厂质量主要依靠人工检测的问题，本文将设计一种可以对微型直流电机进行在线检测的自动化设备。

经研究发现，微型直流电机如果在制造的过程中出现故障，其电枢的起动电流信号和稳态电流信号会出现异常。本文在详细分析永磁直流电机数学模型的基础上，以电机电枢的稳态电流为主要研究对象，采集电机大量的时域波形信号和频域数据，对稳态电流信号的时域波形和频谱进行了深入的分析，重点分析对比良品电机和各类故障电机电枢的稳态电流信号在时域和频域上的差异，最后提出一种基于 5 个频谱特征参数组成的多特征量检测模板的检测模型，并利用数理统计规律，验证了检测模型的正确性。

在确定了检测模型和系统总体设计的基础上，本文设计了以 STM32F107VCT 为核心处理器的微型直流电机检测系统，完成了系统的硬件设计和软件调试，最后对制成的样机进行了整体调试和自学习。系统可以对微型直流电机电枢的稳态电流信号进行采集、滤波、频谱特征参数提取和综合判断，并将检测结果通过串口发送给 PLC，配合机械控制部件完成故障电机的剔除。实验证明微型直流电机检测系统检测精度高，基本可以取代传统的人工检测，检测结果令电机厂商满意。

**关键词：**微型直流电机；稳态电流；频域分析

## Abstract

Misco DC motor has characteristics of simple structure, easy to control, working stably, low manufacturing cost, So it's widely used as critical execution unit and principal drive element in Electro-Mechanical systems, Misco DC motor covers many fields of industrial manufacture and social life. With the improvement of the degree of automation and the quality of Misco DC motor, it can expand considerably the range of application of Misco DC motor, this means a huge increase in production of Misco DC motor. Misco DC motor is a key element in system device, it will cause a series of problems once Misco DC motor breaks down, therefore it is a very important step to test Misco DC motor quality before the factory prepares sale their product to the dealer. At present, in order to ensure the high quality, the manufactures totally rely on the manual detecting, to address this issue, this paper designed a automatic test equipment to detect Misco DC motor online.

We found that DC motor armature's Starting current and Stead-state current will be abnormal if there is a manufacturing defect during manufacture. Based on detailed analysis of permanent magnet DC motor's mathematical model in this paper, we take the steady-state current as the main object of study and collect a large amount of signal waveform in time domain and frequency spectrum in frequency domain. Our analysis focused on the difference of the steady-state current in the time domain and frequency domain between the defective motor and the non-defective motor. Eventually this paper proposed a detection model based on detection template which is composed by 5 characteristic parameters in frequency domain. Furthermore, we proved this detection model correctness.

With the foundation of detection and overall design of system, in this paper ,a DC motor testing system which took STM32F107VCT as core processor is designed, we completed the design of system hardware and system software debugging, the overall debugging and self-learning of the prototype are made. This system can

provides the steady-state current signal acquisition、filtering、extraction of characteristic parameters in frequency domain and comprehensive judgment, finally sends the testing result to the PLC via the serial port and removes non-defective motor with the completion of the mechanical control unit. The experiment proved this system high testing precision, so this system can basically take the place of the manual detecting, the manufactures are satisfied with the testing precision.

**Keywords:** Misco DC motor; steady-state current ; Spectrum Analysis

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 目录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 研究意义与背景.....	1
1.2 微型永磁直流电机的结构与工作原理.....	3
1.3 微型永磁直流电机的常见故障.....	4
1.3.1 绕组故障.....	4
1.3.2 换向故障.....	5
1.4 电机检测所面临的问题.....	5
1.5 国内外电机故障检测的研究现状.....	6
1.6 论文研究的主要内容.....	7
<b>第二章 基于信号分析的检测模型研究</b> .....	9
2.1 实验总体设计.....	9
2.2 直流电机电枢电流信号的时域分析.....	10
2.2.1 直流电机电枢电流理论分析.....	10
2.2.2 时域实验组成和分析.....	13
2.3 直流电机电枢电流信号的频域分析.....	16
2.3.1 FFT 算法简介.....	16
2.3.2 窗函数的介绍和选择.....	17
2.3.3 频域实验组成和步骤.....	19
2.3.4 频谱分析和特征参数的提取.....	20
2.3.5 判别模型的建立.....	23
<b>第三章 系统总体设计</b> .....	29
3.1 微型直流电机检测系统性能需求分析.....	29
3.2 微型直流电机检测系统构成.....	29
3.3 系统的软硬件开发和调试工具.....	30
<b>第四章 系统硬件设计</b> .....	32
4.1 系统硬件总体构成.....	32
4.2 STM32 微控制器模块.....	33

4.2.1 微处理器的选择 .....	33
4.2.2 STM32 处理器介绍.....	34
4.2.3 STM32F107VC 处理器应用电路.....	35
4.2.4 JATG 下载调试模块 .....	37
<b>4.3 电源设计 .....</b>	<b>38</b>
4.3.1 第一级稳压设计 .....	38
4.3.2 第二级稳压设计 .....	39
<b>4.4 信号发生和调理电路设计 .....</b>	<b>40</b>
4.4.1 信号发生与放大电路 .....	40
4.4.2 低通滤波器设计 .....	41
<b>4.5 通信设计 .....</b>	<b>43</b>
4.5.1 通信电平转换.....	44
4.5.2 隔离串口通信设计.....	44
<b>4.6 采样同步信号发生电路.....</b>	<b>46</b>
<b>4.7 EEPROM 模块 .....</b>	<b>47</b>
<b>4.8 电机的绝缘性检测设计.....</b>	<b>49</b>
<b>4.9 LCD 显示设计.....</b>	<b>49</b>
<b>4.10 其他硬件说明.....</b>	<b>51</b>
4.10.1 A/D 转换 .....	51
4.10.2 按键电路.....	52
<b>第五章 系统软件设计 .....</b>	<b>53</b>
5.1 集成开发环境简介 .....	53
5.2 仿真器简介.....	54
5.3.软件总体设计 .....	55
5.4 定时器相关程序设计 .....	57
5.4.1 STM32F107VC 定时器介绍.....	57
5.4.2 本系统中定时器的应用.....	57
5.5 数据采集程序模块设计 .....	59
5.5.1 时域数据采集.....	59



5.5.2 频域数据采集.....	60
<b>5.6 串口通讯模块设计</b> .....	62
5.6.1 通信协议介绍.....	62
5.6.2 与 PLC 通信程序设计.....	63
<b>5.7 自学习模块设计</b> .....	65
5.7.1 自学习系统介绍.....	65
5.7.2 自学习模式程序设计.....	66
<b>第六章 系统调试与总结</b> .....	68
6.1 硬件调试.....	68
6.2 软件调试.....	69
6.3 系统检测精度实验.....	70
6.3.1 良品电机测试结果统计分析.....	71
6.3.2 生产现场检测系统的整体检测精度测试.....	72
<b>第七章 总结与展望</b> .....	74
7.1 总结.....	74
7.2 展望.....	75
<b>参考文献</b> .....	76
<b>致谢</b> .....	79
<b>攻读硕士研究生期间科研成果</b> .....	80

## Content

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
<b>1.1 Research Background and Value</b> .....	1
<b>1.2 Structure of Micro DC Motor</b> .....	3
<b>1.3 Common Faults of Micro Motor</b> .....	4
1.3.1 Faults of Motor Winding.....	4
1.3.2 Faults of Motor Commutator.....	5
<b>1.4 Problems that We Face in Motor Testing</b> .....	5
<b>1.5 Current Situation of Research in Fault Diagnosis of Motor</b> .....	6
<b>1.6 Main Contents and Arrangement of This Paper</b> .....	7
<b>Chapter 2 Research on Detection Model</b> .....	9
<b>2.1 The Overall Design of Experiment</b> .....	9
<b>2.2 Analysis in Time Domain of Armature Current of DC Motor</b> .....	10
2.2.1 Theoretical analysis of Armature of DC Motor.....	10
2.2.2 Constitution and Analysis of Experiment in Time Domain .....	13
<b>2.3 Analysis in Time Domain of Armature Current of DC Motor</b> .....	16
2.3.1 Introduction of FFT.....	16
2.3.2 Introduction and Selection of Window Function .....	17
2.3.3 Constitution and Step of Experiment in Frequency Domain.....	19
2.3.4 Spectral Analysis and Characteristic Parameters Acquisition .....	20
2.3.5 Discriminative Model .....	23
<b>Chapter 3 The Overall Design of System</b> .....	29
<b>3.1 General Requirements Analysis of Micro DC Testing System</b> .....	29
<b>3.2 Structure of Micro DC Testing System</b> .....	29
<b>3.3 Development Tools and debugging</b> .....	30
<b>Chapter 4 Hardware Design of System</b> .....	32
<b>4.1 Overall Hardware Design of System</b> .....	32
<b>4.2 STM32 Microprocessor Module</b> .....	33

---

4.2.1 Selection of Microprocessor.....	33
4.2.2 Introduction of STM32.....	34
4.2.3 Application Circuit of STM32F107VC Microprocessor.....	35
4.2.4 JATG Download Debugger module.....	37
<b>4.3 Power Supply Design .....</b>	<b>38</b>
4.3.1 First Voltage-Stabilized Source Design.....	38
4.3.2 Second Voltage-Stabilized Source Design.....	39
<b>4.4 Voltage Signal Generating and Processing Circuit Design.....</b>	<b>40</b>
4.4.1 Voltage Signal Generating and amplifying Circuit.....	40
4.4.2 Low-Pass Filter Design.....	41
<b>4.5 Communication Design.....</b>	<b>43</b>
4.5.1 Communication Voltage Conversion.....	44
4.5.2 Isolation Serial Communication Design.....	44
<b>4.6 Synchronization signal for Sampling Generating Circuit.....</b>	<b>46</b>
<b>4.7 EEPROM Modul .....</b>	<b>47</b>
<b>4.8 Insulativity Testing Design.....</b>	<b>49</b>
<b>4.9 LCD Display Design.....</b>	<b>49</b>
<b>4.10 Description of Other Hardware.....</b>	<b>51</b>
4.10.1 A/D Sampling Circuit.....	51
4.10.2 Key Design.....	52
<b>Chapter 5 Software Design of System.....</b>	<b>53</b>
<b>5.1 Integrated Development Environment Introduction.....</b>	<b>53</b>
<b>5.2 Simulator Introduction.....</b>	<b>54</b>
<b>5.3. Overall Software Design of System.....</b>	<b>55</b>
<b>5.4 Software Design about Timer.....</b>	<b>57</b>
5.4.1 Timer of STM32F107VC Introduction.....	57
5.4.2 Application of Timer in This System.....	57
<b>5.5 Software Design about Data Acquisition.....</b>	<b>59</b>
5.5.1 Time-Domain Acquisition.....	59

---

5.5.2 Frequency-Field Acquisition.....	60
<b>5.6 Software Design about Serial Port Communication.....</b>	<b>62</b>
5.6.1 Communication Protocol Introduction.....	62
5.6.2 Software Design about Communication with PLC.....	63
<b>5.7 Self-laerning Design.....</b>	<b>65</b>
5.7.1 Self-laerning System Introduction.....	65
5.7.2 Software Design about Self-laerning.....	66
<b>Chapter 6 System debugging and Results.....</b>	<b>68</b>
<b>6.1 Hardware Debugging.....</b>	<b>68</b>
<b>6.2 Software Debugging.....</b>	<b>69</b>
<b>6.3 System Accuracy Testing.....</b>	<b>70</b>
6.3.1 Statistic Analysis of Defective Motor.....	71
6.3.2 Overall Accuracyof the Systemin Production Floor.....	72
<b>Chapter 7 Summary and Outlook.....</b>	<b>74</b>
<b>7.1 Summary.....</b>	<b>74</b>
<b>7.2 Outlook.....</b>	<b>75</b>
<b>References.....</b>	<b>76</b>
<b>Acknowledgements.....</b>	<b>79</b>
<b>Introduction of Achievement in Scientific Research.....</b>	<b>80</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 研究意义与背景

随着现代科技的飞速发展和工业自动化程度的提高,电机已经取代人力成为工业生产的主要动力来源。绝大多数的工业生产设备 and 家用电器都是由电机来驱动,电机已经深入现代生产和生活的各个领域,推动了工业的发展和技术的革命,持续的改变着人类的生活方式。

电机是系统设备主要的动力传动部件和执行部件,通常是系统设备的核心组成部分之一。电机的故障不仅会导致系统设备不能正常运行,破坏工业生产秩序,造成重大经济损失,甚至可能会造成严重的安全事故。因此,由于电机的基础工业地位,电机的故障检测一直是众多学者、工程技术人员、电机制造厂商和普通用户所关注的热点问题。目前电机检测技术的研究主要集中在大功率电机和鼠笼式异步电机<sup>[1-4]</sup>,在这一方面已经取得了一系列的研究成果。相对于大功率电机,小功率直流电机的检测技术研究相对滞后,具有突破性的研究成果鲜有报道。

直流电机具有良好的机械性能,能够承受负载的频繁冲击和变动;同时直流电机具有良好的调速特性,控制方式简,能够在很大范围内实现平滑调速<sup>[5]</sup>;微型直流电机具有结构简单、控制方便、工作稳定、制造成本低廉的特点,因而成为各种机械电子系统的关键执行部件和主要驱动部件,广泛应用于工业生产和社会生活的各个领域。随着社会自动化程度的提高和现代微型直流电机制造水平的提高,微型直流电机的应用范围和产量将会不断扩大,并且呈现稳态发展的态势。我国的小功率直流电机制造企业通过自主研发、引进先进技术、合作生产、购买设备和培训工程技术人员等方法,已经逐步掌握电机的先进制造技术。但是由于没有高效的自动化检测设备,电机出厂质量检测全部依靠人工检测。



图 1-1 某电机生产厂商人工检测线

图 1-1 为某微型直流电机厂商的人工检测线,传统的人工检测即观察法和测量法<sup>[6,7]</sup>,就是通过示波器观察电机运行时的电流信号和听取电机工作时各部件发出的声音,依靠操作者的检测经验进行判断,其检测流程如图 1-2 所示。这种检测方法完全依赖于操作者的知识经验,检测结果分散,检测标准不统一,检测结果受操作者的情绪影响严重,而且效率低,无法满足现代微型直流电机厂商大批量出货高合格率验收的要求。因而从保证微型直流电机出厂质量和减小人工成本的角度出发,开发一种检测精度高,可对微型直流电机进行在线检测的自动化设备具有现实意义。

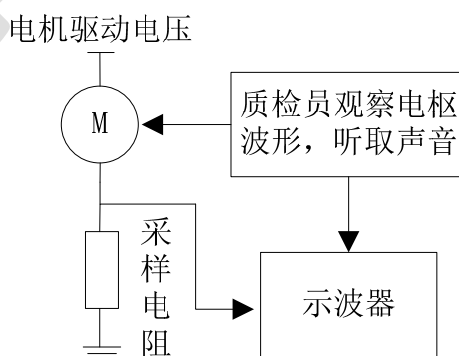


图 1-2 电机人工检测方法流程

本课题来自校企合作项目,旨在开发一款微型直流电机检测系统,可以对出厂前的微型直流电机进行自动在线检测,甄别电机在制造过程中出现的各种故障如短路、断路、绝缘不良、卡死、电刷不良等,代替传统的人工检测,以保证微型直流电机电机的出厂合格率。

## 1.2 微型永磁直流电机的结构与工作原理

直流电机根据励磁方式可以分为他励直流电机、并励直流电机和串励直流电机和复励直流电机四种。本文研究的是小功率的永磁直流有刷电机，永磁直流有刷电机的典型结构图如图 1-3 所示。

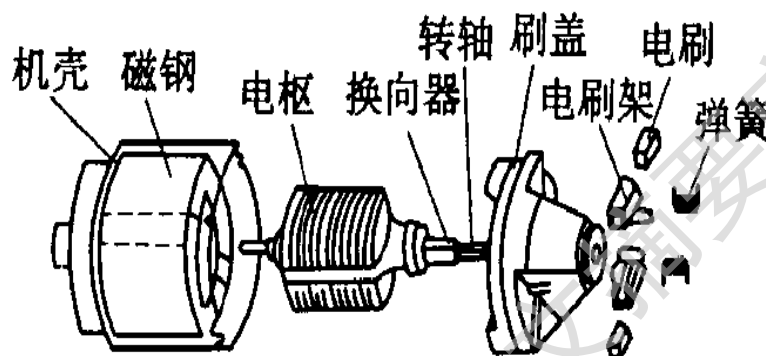


图 1-3 永磁直流有刷电机的结构图

永磁直流电机由定子组件、转子组件、电刷组件和端盖组件组成。定子组件包括用于励磁的磁极和电机壳体，磁极一般由廉价的各向同性的铁氧磁钢制造，磁极的作用是用来产生静止的磁场，电机壳体用于对磁极的固定，同时也是电机重要的机械支撑和隔离保护部件。

转子组件是电机的旋转部分，一般由主轴、铁芯、绕组和换向器组成。主轴是整个电枢的支撑部件，也是电机的传动部件，铁芯是电枢的核心最核心的部件之一，铁芯一般几片由硅钢片冲压而成，它的作用是增加电感线圈的磁通量，实现最大程度的电磁功率转换。转子的绕组线圈嵌放在铁芯上，绕组的作用是在静止的磁场中产生感应电动势，电枢的绕组一般用高强度的漆包线绕制，漆包线的首末两端焊接在相互绝缘的弧形铜片上，这些弧形铜片称为换向片（又称整流子），换向片是直流电机区别于交流电机的主要特征。

与电机的换向片滑动接触的是电机的电刷，电刷固定在刷板组件上。电刷常用银石墨或者铜片制成，应同时具备导电性和耐磨性，电刷的作用是将外部的电源经过换向片引入到电枢的绕组中去。在电机的电枢转动过程中，电刷和换向片的配合可以保证电枢受到的转矩方向恒定不变，这也是直流电机的工作原理。

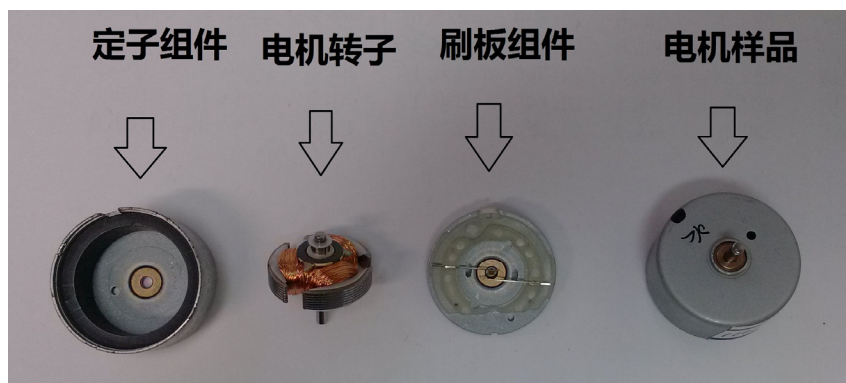


图 1-4 电机构成部件和电机整机图

本文所研究的微型直流电机的主要部件和电机样品如图 1-4 所示，定子部件中瓦形的永磁铁直接内嵌到电机的外壳体上；电子转子的铁芯为三槽（三槽即有三个绕组），漆包线均匀的绕制在转子的铁芯上，换向器（图中转子的最上方）由 3 个弧形的铜片构成；电机的刷板组件包括电机底壳、电刷架、一对电刷和电源接线柱，电刷架是塑料件，以锡焊的方式固定在电机底壳上，电刷架的作用是固定电刷，电刷连接电机底壳背面的电源接线柱。

### 1.3 微型永磁直流电机的常见故障

微型永磁直流有刷电机在生产过程和使用过程中会出现各种各样的故障，虽然故障的表现形式多种多样，甚至出现交叉重叠的现象，但是其主要的故障原理可分为两类：绕组故障、换向故障<sup>[8]</sup>。

#### 1.3.1 绕组故障

电枢绕组是电机进行能量转化的核心部件。电枢绕组常见的故障有绕组短路、绕组断路、绕组脱焊三种。其中绕组短路是主要是由于绕组漆包线的绝缘层损坏，导致绕组导线之间相互接触<sup>[9]</sup>，另外电机运行过程中产生的碳粉或者环境中的水蒸气等导电杂质都有可能引起电机绕组的短路。

电枢绕组的断路故障和电枢绕组脱焊多发生在中小型电机中，以微型直流电机最为常见。绕组断路多出现在绕组与换向片的焊接处，原因有三点：一是焊接处容易出现焊接不良现象，二是绕线机绕制绕组时容易因为压力过大而将漆包线拉断，三是电机在高温环境下工作时焊锡容易脱落导致漆包线被甩开拉断。绕组



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库