

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号: 200429027

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

隔热油管真空测试系统研究

Research of Insulated Tubing Vacuum Test

汤达斌

指导教师姓名: 冯 勇 建 副教授

专 业 名 称: 机械制造及其自动化

论文提交日期: 2007 年 5 月

论文答辩时间: 2007 年 5 月

学位授予日期: 2007 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2007 年 5 月

# 厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，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的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式表明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）

年 月 日



## 摘 要

注蒸汽采油是开采稠油的重要手段。隔热油管的真空度影响其隔热性能，从而影响注蒸汽采油的开采效果，因此，如何测试油管真空度是注蒸汽采油的重要研究方向。本项目以电容式微型真空传感器为测试单元，借助 PZT 压电晶体模块在其共振频率下的逆压电效应，结合 PIC16F876A 单片机及相关外围信号处理电路，从而测试隔热油管的真空度。就此，本文主要开展了以下研究工作：

1. 对影响油管隔热性能的导热、对流、辐射等因素进行分析，确定对流是影响散热的主要因素、真空度是油管隔热性能高低的主要指标。根据油管结构的封闭特性，设计整体测试方案。
2. 针对电容式微型真空传感器测得的电容值比寄生旁路电容小几个数量级的情况，采用由前置电容放大器、相关双采样技术和增量调制器等组成的电容/电压转换器作为电容测试电路，增加补偿电容以消除寄生电容的影响，采用相关双采样电路和增量调制器抑制低频噪声与高频噪声，实现从电容到电压的转换。
3. 在隔热油管内部，利用 PIC16F876A 对由电容测试电路测试的信号进行采集分析，通过 PZT 压电薄膜晶体在其共振频率下的逆压电效应，实现与外界的 USART 通信。
4. PZT 压电薄膜晶体本身的原理及结构具有缺陷，经由其产生的脉冲信号会产生失真及干扰，设计出对 PZT 压电薄膜晶体输出信号进行处理的信号处理电路，解决了信号的失真与干扰问题。
5. 测试系统要求体积小，功耗低。在软件上对系统 MCU 工作模式、I/O 端口进行分析设置，在硬件上对系统工作电源、时钟频率进行分析设置，结合 Dickson 电荷泵，设计测试系统的单电池电源供电系统，实现了小体积与低功耗。
6. 根据滑动平均及最小二乘法理论，用 MATLAB 对由后期信号处理模块得到的信号进行采集与分析，解决了在高速率测试下保持信号完整性与去除信号干扰的矛盾。

根据现有的文献检索，国外在隔热油管真空测试领域的研究有了一定的进展，但这些方法有的成本高，有的难实现，有的只能定性测量，不能定量测量。在国内，相关研究报道较少。因此，本课题的研究具有一定的现实及理论意义。

**关键词：** 隔热油管；真空度；低功耗

厦门大学博硕士论文摘要库

## Abstract

Steam process oil extraction was the vital method of thick oil exploitation. The vacuum level of insulated tubing affected heat insulation capability, and then affected the exploit effect of steam process oil extraction. Therefore, how to test the vacuum level of oil pipeline is the important research direction of steam process oil extraction. In the project, we used capacity vacuum micro sensor as test cell, adopted PZT piezoelectric crystal converse piezoelectric effect on its resonant frequency, and combined PIC16F876A with some related signal processing circuit. Thus measured the vacuum level of insulated tubing successfully. This dissertation launches the following research:

- 1、 Analyzed factors that affect the oil pipeline's heat insulation capability, such as heat conduction、 convection current and radiation. Confirmed that convection current was the main cause of heat elimination, and that vacuum level was the main performance index of oil pipeline's heat insulation capability. According to enclosed property of the oil pipeline, the test project. was designed.
- 2、 The capacitance that tested by capacitive vacuum micro sensor was smaller than the parasitic capacitance, so a capacitance voltage converter that was composed of preamplifier、 correlated double sampling technology and delta modulator was adopted as capacitance test circuit. Another compensatory capacitance was added in this circuit to eliminate the influence of the parasitic capacitance. Correlated double sampling technology and delta modulator were applied to attenuate low-frequency and high-frequency noise, and realized the capacitance-voltage conversion
- 3、 Within the insulated tubing, signal that generated from CVC capacitance test circuit was collected and analyzed by PIC16F876A. Through PZT piezoelectric crystal converse piezoelectric effect on its resonant frequency, the system can communicate with outside by USART.

- 4、 The principle and structure of PZT piezoelectric crystal had some defects. The impulse signal that pass through it were distorted and interfered. So a signal process circuit that can process the output signal generated by PZT piezoelectric crystal was designed, and it solved the signal distortion and interference.
- 5、 The test system required small bulk and low power consumption. In software, MCU system work mode and I/O port were analyzed and set. In hardware, system power and clock frequency were analyzed and set. A power system based on monocell and Dickson charge pump was designed, and it reduced system bulk and system power consumption.
- 6、 The signal from the after-signal processing circuit by MATLAB was collected and analyzed according to moving average and least squares theory, the contradiction between the maintenance of signal integrity and the removal of signal interference under high-speed test was solved.

According to the existing literature, there were some progresses about the study of insulated tubing vacuum test on abroad. some of those methods cost, and some difficult to achieve, some only qualitative measurement, not quantitative measurement. There were few related research reports at home. Therefore, there is certain practical and theoretical significance about the issue.

**Key words:** insulated tubing; vacuum level; low power consumption

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
1.1 本课题的研究背景 .....	1
1.2 国内外隔热油管真空测试研究发展情况 .....	2
1.3 本课题的研究意义和内容 .....	4
第二章 隔热油管真空测试系统基本组成 .....	6
2.1 隔热性能影响因素分析 .....	6
2.2 真空测试系统基本组成 .....	9
2.3 PZT 压电薄膜晶体原理 .....	10
2.4 通用同步/异步收发器 (USART) 模块 .....	10
2.5 系统测试及调试工具 .....	12
第三章 隔热油管真空测试系统模块设计 .....	20
3.1 电容式微型真空传感器 .....	20
3.1.1 电容式微型真空传感器的结构原理 .....	20
3.1.2 电容式微型真空传感器的工作原理 .....	21
3.2 电容/电压转换器 (CVC) 电容测试电路 .....	22
3.2.1 电容测试电路简介 .....	22
3.2.2 前置放大器 .....	22
3.2.3 相关双采样电路 .....	23
3.2.4 增量调制器 .....	24
3.2.5 CVC 电容测试系统电路 .....	25
3.3 PIC16F876A 信号采集系统 .....	27
3.3.1 系统时钟频率 .....	27
3.3.2 系统复位电路 .....	30
3.3.3 PIC16F87X 系统工作电路 .....	31
3.4 通用同步 / 异步收发器设置 .....	32
3.4.1 USART 异步发送器 .....	34



3.4.2	USART 异步接收器	35
3.4.3	USART 模块初始化	37
3.5	后期信号处理电路	38
3.5.1	后期信号处理电路介绍	38
3.5.2	电压跟随器	39
3.5.3	减法器与放大器	40
3.5.4	比较器	41
3.5.5	信号处理模块电路及其仿真结果	42
3.6	滑动平均及最小二乘法	43
3.7	系统节能设计分析	46
3.7.1	系统单电池电源	46
3.7.2	带 DICKSON 电荷泵的单电池电源	48
3.7.3	不同系统电源电压下的功耗	51
3.7.4	系统运行模式	53
3.7.5	系统工作时钟频率的选择	55
3.7.6	设置系统 I/O 端口	57
3.8	本章小结	57
第四章	实验测试结果分析	59
4.1	微型真空传感器真空度测试结果	59
4.2	PZT 压电薄膜晶体模块共振频率测试	62
4.3	USART 模块通讯编码	63
4.4	信号处理模块测试	69
4.5	系统功耗测试	75
第五章	课题总结与展望	80
	参考文献	82
	致谢	86

# Contents

<b>Chapter 1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1	The Research Background .....	1
1.2	The Research of Insulated Tubing Vacuum Test System.....	2
1.3	The Study of the Subject Content and Significance.....	4
<b>Chapter 2</b>	<b>Elements of Insulated Tubing Vacuum Test System.....</b>	<b>6</b>
2.1	Analyse of Insulated Tubing Heat Insulation Capability .....	6
2.2	Elements of Vacuum Test System .....	9
2.3	Principle of PZT Piezoelectric Crystal.....	10
2.4	USART Modular .....	10
2.5	System Test and Debug Tool .....	12
<b>Chapter 3</b>	<b>Modular Design of Test System.....</b>	<b>20</b>
3.1	capacitive vacuum micro sensor .....	20
3.1.1	Structure Principle of Capacitive Vacuum Micro Sensor.....	20
3.1.2	Operating Orinciple of Capacitive Vacuum Micro Sensor .....	21
3.2	CVC Capacitance Test Circuit.....	22
3.2.1	Introduction of Capacitance Test Circuit .....	22
3.2.2	Preamplifier.....	22
3.2.3	Correlated Double Sampling Circuit .....	23
3.2.4	Delta Modulator .....	24
3.2.5	CVC Capacitance Test System Circuit .....	25
3.3	PIC16F876A Signal Acquisition System .....	27
3.3.1	System Clock Frequency .....	27
3.3.2	System Reset Circuit.....	30
3.3.3	PIC16F87X System Circuit .....	31
3.4	Set of USART Communications Modular .....	32
3.4.1	USART Transmit .....	34

3.4.2	USART Receive .....	35
3.4.3	Initialization of USART .....	37
<b>3.5</b>	<b>After Signal Process Circuit .....</b>	<b>38</b>
3.5.1	Introduction of After Signal Process Circuit .....	38
3.5.2	Voltage Follower .....	39
3.5.3	Subtractor and Amplifier .....	40
3.5.4	Comparator .....	41
3.5.5	Signal Process Circuit and Simulation Result .....	42
<b>3.6</b>	<b>Moving Average and Least Squares .....</b>	<b>43</b>
<b>3.7</b>	<b>Design and Analyse of System Energy-Saving .....</b>	<b>46</b>
3.7.1	system monocell.....	46
3.7.2	Monocell Power with Dickson Charge Pump.....	48
3.7.3	Power Consumption at Different Power Supply .....	51
3.7.4	System Run Model.....	53
3.7.5	Choice of System Clock Frequency.....	55
3.7.6	Set of System I/O Port .....	57
<b>3.8</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>57</b>
<b>Chapter 4</b>	<b>Analyse of Test Result .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1</b>	<b>Test Result of Capacitive Vacuum Micro Sensor .....</b>	<b>59</b>
<b>4.2</b>	<b>Test of PZT Resonant Frequency .....</b>	<b>62</b>
<b>4.3</b>	<b>USART Communicate and Encode .....</b>	<b>63</b>
<b>4.4</b>	<b>Signal Process Circuit Test .....</b>	<b>69</b>
<b>4.5</b>	<b>System Power Consumption Test .....</b>	<b>75</b>
<b>Chapter 5</b>	<b>The Conclusion and Next Work .....</b>	<b>80</b>
<b>References</b>	<b>.....</b>	<b>82</b>
<b>Acknowledgements</b>	<b>.....</b>	<b>86</b>

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 第一章 绪论

本章简述了本课题的研究背景,对国内外隔热油管真空测试的研究发展情况进行了详细的阐述,并在此基础上提出了本课题的研究意义和内容。

### 1.1 本课题的研究背景

石油在全球各种能源总产量中占首位,是国民经济发展的主要能源,是重要的战略物资,对国家的经济和国防有重大影响<sup>[1]</sup>。

稠油在石油资源中所占比例较大<sup>[2,3]</sup>,如何开采稠油并使之成为可动用储量,是石油界一直探究的问题<sup>[4,5,6,7]</sup>。由于稠油黏度高、密度大,向油层注水难以将油采出。常规的方法很难开采出稠油油藏,必须采用一些工艺措施才能比较有效的开采稠油<sup>[8]</sup>。若按常规方法开采稠油油藏,只能采出储量的 1/3,则我国石油现有储量仅能开采 20 年左右。而强化采油则可开采储量的 65%,国内外有关专家预计,采用和发展强化采油技术,再加上应用高新技术不断勘探出新的储量,我国的石油在 21 世纪是开采不尽的<sup>[9,10,11]</sup>。总的来说,稠油开采可分为热采和冷采两大类<sup>[12]</sup>。热力采油主要是通过一些工艺措施使油层温度升高,降低稠油粘度,使稠油易于流动,从而将稠油采出。常用的方法有蒸汽吞吐、蒸汽驱、火烧油层、热水驱等<sup>[13,14]</sup>。冷采是指无供热条件下,利用某种施工技术和特殊的抽油设备积极开采稠油的方法,包括:出沙冷采,非混相二氧化碳开采,交替注水和高粘油,碱驱,聚合物驱,水驱,碱法造纸黑液,振动采油法等<sup>[15,16,17,18,19,20]</sup>。

目前,注蒸汽采油是开采稠油的重要手段。注汽过程的井筒隔热技术,广泛采用真空隔热油管,真空隔热油管是一种高效注汽管柱,其夹层经过真空处理后,最大限度地降低了对流传热,大幅度提高了隔热油管的隔热性能。隔热油管的真空度影响着隔热油管的隔热性能,而隔热有关的隔热性能直接影响着注汽热采的开发效果,从而影响着开采稠油的效果,因此,隔热油管的真空度测量研究有着重大的意义<sup>[21,22,23,24,25,26,27]</sup>。

## 1.2 国内外隔热油管真空测试研究发展情况<sup>[28,29,30,31,32]</sup>

真空度是对气体稀薄程度的一种客观度量,可以由压力、分子密度、平均自由程和形成一个单分子层的时间常数等来描述。测量真空度的方法通常是在气体中造成一定的物理现象,然后测量这个过程中与气体压力有关的某些物理量,再设法间接确定出真实压力来。国内外真空计的种类繁多,工作原理各异,除极少数几种是直接测量压力外,其他几乎都是间接测量压力的。直接测量真空计包括静态液位真空计、弹性元件真空计。间接测量真空计包括压缩式真空计、热传导真空计、热辐射真空计、电离真空计、放电管指示器、粘滞真空计、场致显微镜和分压力真空计等。

1、压缩式真空计:其原理是在 U 型管的基础上再应用波义耳定律,即将一定量待测压力的气体,经过等温压缩使之压力增加,以使用 U 型管真空计测量,然后用体积和压力的关系计算被测压力。1874 年,英国物理学家研制的压缩式液柱真空计,到目前为止,仍是真空科学技术领域最成熟、最基本的基准绝对型真空计,其压强测量范围为  $10^5 \sim 10^{-3} \text{Pa}$ 。1957 年,我国也已经有了完全自制的压缩式真空计,到了 1964 年,我国研制的压缩式真空计的测量范围是  $1 \sim 10^{-3} \text{Pa}$ 。

2、热传导真空计:利用低压下气体热传导与压力有关这一原理制成。常用的有电阻真空计和热偶真空计。1906 年,英国研制的热导式热电阻真空计,可准确测量  $10^2 \sim 10^{-1} \text{Pa}$  的真空度,迄今,热电式真空计都是在此原理基础上派生出来的。同年, W. Voegelé 研制的热导式热电偶真空计,也可测量  $10^2 \sim 10^{-1} \text{Pa}$  的真空度。20 世纪 60 年代,我国改进的热传导真空计的测量范围可达到  $10^3 \sim 10^{-1} \text{Pa}$ 。到了 20 世纪 80 年代,对热传导真空计的研究取得了一些突破,1985 年研制的对流式电阻真空计测量范围为  $10^5 \sim 10^{-1} \text{Pa}$ ,研制的新型热偶真空计又将测量上限扩展到  $5 \times 10^3 \text{Pa}$ 。

3、热辐射真空计:利用低压下气体热辐射与压力有关的原理制成的。1910 年, M. Kundsen 研制的热辐射真空计,其压强测量范围为  $10^5 \sim 10 \text{Pa}$ 。

4、电离真空计:利用低压下气体分子被荷能粒子碰撞电离,产生的离子流随电力变化的原理制成的。如:热阴极电离真空计、冷阴极电离真空计和放射性电离真空计等。电离真空计是国内外研究较多的一种真空计。1916 年,美国研制的热阴极电离真空计,给人们测量高真空指出了一条光明大道,其压强测量范围为

$10^{-1} \sim 10^{-5} \text{Pa}$ , 它是目前实际应用非常普遍的高真空真空计。之后, 国外一些国家又先后研制了冷阴极磁控电离真空计、放射能电离真空计、热阴极超高真空电离真空计, 又称为 B-A 真空计, 它使得真空测量领域有了历史性的突破, 高压强电离真空计、调制 B-A 电离真空计、抑制型 B-A 电离真空计、离子偏转收集型电离真空计、埋藏收集型电离真空计和近来的激光电离真空计, 其中最大的测量下限可达  $10^{-11} \text{Pa}$ 。20 世纪 60 年代, 我国对电离真空计也作了大量的研究, 还提出了一些新结构的冷阴极电离真空计。1971 年, 北京研制出一种热阴极电离真空计, 实现了测量  $10 \sim 10^{-7} \text{Pa}$  的压力。此后, 在扩展热阴极电离真空计的上下限方面做了大量的研究工作。1973 年提出的一些热阴极极高真空电离真空计, 其最大测量下限可达到  $10^{-12} \text{Pa}$ , 可与国外先进的真空计相媲美。此后, 我国又研制出了双调制抗干扰快速电离真空计、轴向式热阴极电离真空计, 可测压力小于  $10^{-14} \text{Pa}$ 。

5、放电管指示器: 利用气体放电情况和放电颜色与压力有关的性质判定真空度, 一般仅能作为定性测量。1858 年, 德国人研制的放电管真空计, 其工作压强范围为  $1 \sim 10^{-2} \text{Pa}$ 。1974 年报导的脉冲放电真空计, 可测至  $10^{-11} \text{Pa}$  真空度。

6、粘滞真空计: 利用低压下气体与容器壁的动量交换即外摩擦原理, 如振膜式真空计和磁悬浮转子真空计。1946 年, W. Beams 研制了磁悬浮自旋转子粘滞真空计, 它是一种绝对型高真空真空计, 压强测量范围为  $10^2 \sim 10^{-5} \text{Pa}$ , 由于其量程宽, 精度高, 稳定可靠等优点而越发受到人们的青睐。

7、场致显微镜: 以吸附和解吸时间与压力关系计算压力。1972 年提出的场致显微镜真空计, 可测至  $10^{-11} \text{Pa}$ 。

8、分压力真空计: 利用质谱技术进行混合气体分压力测量, 常用的有四极质谱计、回旋质谱计和射频质谱计等。1940 年, 外国人研制成功的磁偏转质谱计, 是典型的测量气体组分及分压强的真空计, 其最高工作压强范围为  $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{Pa}$ , 最小可检分压强为  $10^{-11} \text{Pa}$ 。1948 年研制成功的飞行时间质谱计和 1949 年提出的回旋质谱计是典型的一类气体组分与分压强测量的真空计, 其最小可检分压强分别为  $10^{-11} \text{Pa}$  和  $10^{-10} \text{Pa}$ 。1953 年提出四极滤质器质谱计, 最小可检测分压强达  $10^{-14} \text{Pa}$ , 最高工作压强为  $10^{-1} \text{Pa}$ 。1992 年报导的离子谱真空计可测至  $10^{-12} \text{Pa}$  真空度。

9、薄膜电容真空计: 通过测量压力差引起金属薄膜的偏移, 从而改变电容

器电容来测量压力。1951年, D. Alpert, C. G. Matland, A. O. McGoubrey 报道了他们的薄膜电容真空计, 它是一种与气体种类无关的绝对型真空计。由于其测量范围宽, 精度高, 耐高温, 耐腐蚀, 在高科技领域中应用十分广泛, 其测量范围为  $10^5 \sim 10^{-5}$  Pa。到如今薄膜电容真空计已经得到了很大的改进。从1982年, 国内对这种真空计也有了一定的研究, 这种真空计为中国在粗低真空测量中提供了一种新的测量仪器, 它的线性好、反应时间快。这种真空计的薄膜一般采用金属片。

10、其他真空计: 除了在原有真空计的基础上扩展新功能、拓宽测量范围外, 对新型真空计的研究也在不断的进行中。其中包括球形振荡真空计、分离真空计、压阻真空计、磁悬浮转子真空计、电子束偏转真空计和随着 MEMS 技术发展起来的微型真空传感器等等。

### 1.3 本课题的研究意义和内容

本课题是中油辽河油田的项目, 属于应用研究。石油资源是国民经济的重要资源, 稠油在石油资源中所占比例较大。如何开采稠油并使之成为可动用储量, 是石油界一直探究的问题。注蒸汽采油是开采稠油的重要手段, 而高真空隔热油管的真空度高低直接影响着注蒸汽采油的开发效果。

根据现有的文献检索, 国外在隔热油管真空测试领域的研究有了一定的进展, 但这些方法要么有的成本高, 要么实现难度高, 要么只能粗略判断真空度的好坏, 一般不能进行定量测量<sup>[33,34]</sup>。特别是在国内, 基于隔热油管的真空测试的相关研究报道较少。

本项目以电容式微型真空传感器为测试元件, 借助 PZT 压电晶体模块在其共振频率下的逆压电效应, 结合 PIC16F876A 单片机及相关外围信号处理电路, 从而测得封闭着的隔热油管的真空度。整个研究过程中, 理论分析与实验工作相结合, 采取的研究方法为: 收集资料, 系统方案理论设计, 系统模块参数分析设计, 实验装配与测试, 总结与撰写论文。本课题中具体的工作内容如下:

7. 对影响油管隔热性能的导热、对流、辐射等因素进行分析, 确定出对流是影响散热的主要因素、真空度是油管隔热性能高低的主要指标。根据油管结构的封闭特性, 设计出整体测试方案。
8. 针对电容式微型真空传感器测得的电容值比寄生旁路电容小几个数量



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