

编号:

哈尔滨工业大学
“大学生创新创业训练计划”
创新训练项目申请书

项目名称: 基于电磁超声的自动化管道测厚系统

申请级别: 国家级 拟申请经费 10000 元

执行时间: 2018 年 10 月至 2019 年 10 月

负责人: 钱孜洋 学号: 1163200618

联系电话: 15757358122 电子邮箱: qianziyang@hit.edu.cn

院系及专业: 电气工程及其自动化学院

指导教师: 王淑娟 职 称: 教授

联系电话: 18686825711 电子邮箱: wsjhit@163.com

院系及专业: 电气工程及其自动化学院

哈尔滨工业大学本科生院制

填表日期: 2018 年 10 月 8 日

一、课题组成员：（包括项目负责人、按顺序）

姓名	性别	所在院	年级	学号	身份证号	本人签字
钱孜洋	男	电气学院	2016 级	1163200618	33042419980710221X	
张月	男	电气学院	2016 级	1160611021	21132219980609003X	
高婧璇	女	电气学院	2016 级	1160611022	230103199712104624	
张乃鑫	男	电气学院	2016 级	1160611027	230206199810171614	
刘玥怡	女	电气学院	2016 级	1163200123	142401199806021428	

二、项目简介（限 500 字以内）：

随着世界和中国的经济不断发展，金属管道在工业领域应用也越来越广泛。按照特种设备安全技术规范，工业管道每年至少进行一次大规模检查，而各项检查中，厚度测量又是必不可少的一环，因此，准确且便捷的测厚装置具有广阔的市场。

对比现有的通过压电超声激发超声波的测厚方法，电磁超声具有无需耦合剂的显著优点，因而可以在更加恶劣的环境下进行测量，有效避免耦合剂因高温、低温、高压的特殊环境而失效的状况发生。因此，基于电磁超声的测厚装置具有更广阔的使用范围。

对于较为危险的环境，如易燃易爆的场合，存在有毒气体的场合，人工操作测厚设备进行厚度测量十分危险，且人工操作存在较高的误检率和漏检率。因此，通过爬行装置搭载测厚装置进行自动化测量的方法，能够增加测量的可靠性，更有效得保证工作人员的人身安全，降低厚度测量的人工成本。

综上所述，本项目准备基于电磁超声理论，研制一套自动化管道测厚系统，在较小的体积和重量下实现大功率激励和低噪声的接收功能，同时配置高性能处理器，通过信号处理算法对 EMAT 的微弱信号进行处理，并把数据通过 Wi-Fi 传输给上位机，以曲线、3D 图的方式呈现出厚度测量的结果，实现对工业金属管道自动、高精度的厚度测量。

三、申请基础（限 300 字以内）：

项目组成员均为电气工程系大三学生，学习成绩优异，具有良好的知识基础，开题前，小组通过查阅相关论文资料和积极讨论已基本掌握了电磁超声理论基本原理，并准备据此设计初步电路原理图。项目组成员对电子设计均有浓厚的兴趣，且彼此之间有过许多合作经验，在大一年度项目学习中获得了一等奖，大二学年参加全国大学生电子设计竞赛黑龙江赛区省赛并获奖。

此外，小组成员均能熟练操作 Altium Designer、Multisim 等软件，并认真学习过 FPGA 及 STM32，对于电路调试有一定基础和经验。相信在大家的共同努力下，定会顺利完成项目目标。

立项报告正文

1、立项背景

管道运输是一种长距离输送液体和气体物资的最普遍方式，在工业生产中应用十分广泛。金属管道在使用过程中受到内外力作用而被腐蚀。其中内腐蚀是指压力管道内壁受到液体或气体的冲刷摩擦而变薄；外腐蚀是指管道所处外部环境中的某些成分（如空气中的水分、二氧化碳等）与金属管道发生反应，导致生锈。

由此可见，腐蚀是金属管道面临的常见问题，所以能够实时检测管道的厚度极为重要。在使用过程中需要定期检测管道的厚度是否符合要求，一旦检测厚度值与标准值发生偏离，要及时进行管道维护以保证生产安全并延长设备使用寿命。例如地下输油气金属管壁腐蚀情况较为严重，如果不及时更换该段管道，一旦发生泄露将造成大量的人身财产损失及环境恶劣破坏，甚至会造成大量人员伤亡。因此，针对金属管道进行厚度检测技术研究具有很好的应用价值，对促进工业时代的发展意义深远。

目前国内外管道测厚方法主要有涡流检测法和超声检测法。这两种不同原理的测厚方法以自身的特点和优势应用在不同测厚领域。

涡流检测法是在试件表面放置线圈，线圈通电后在试件内产生涡流，通过移动线圈观察涡流变化进行检测，所以检测时需要标准件。同时，该方法需要依靠算法得到检测结果，精度较低，所以其测量范围局限于薄板和涂层这类场合，不适用于金属管道测厚。

超声检测法（包括压电超声检测和电磁超声检测）通过发射探头向试件表面发射超声波，超声波在试件下表面发生反射。利用反射信号传递到探头的时间差衡量试件的厚度。其优点是：穿透能力较大，探伤灵敏度较高；设备轻便，操作安全。

经过对比，超声检测法较为适合金属管道测厚。

超声波应用于金属测厚已是较为成熟的技术，现在国内外普遍采用压电超声技术对待测金属进行检测。基于压电效应的超声波探头是压电超声检测技术的核心，它具有制造工艺简单、成本低、体积小、重量轻等优点，在超声无损检测方面发挥了重要作用。但是，压电探头也有不足之处：压电探头必须使用耦合剂，耦合剂的使用对压电超声的精度和适用范围产生影响。按照 GB11344-1989 的规定，在使用压电探头进行检测的过程中，应在探头上施加一定的压力，以保证探头与试件间良好的声耦合，并且排除多余的耦合剂，使检测面上仅剩一层极薄的耦合剂，减少声波通过耦合层的时间，从而提高检测精度。实际检测中耦合剂很难保持在一个恒定的厚度上，耦合剂厚度的波动会对检测精度造成影响。在使用压电超声技术进行检测之前需要涂抹耦合剂，检测之后还要对耦合剂进行清理，这就大大的影响了检测效率。耦合剂通常为水和油等，因此压电超声通常不适用于高温、低温环境下的检测。

为了克服压电超声技术依赖耦合剂的不足，人们继而开始研究采用电磁方式耦合的电磁超声换能器（Electromagnetic Acoustic Transducer，简称 EMAT）。由于待测试件本身就是换能器的一部分，因此 EMAT 无需声耦合剂，这大大拓宽了电磁超声检测的应用范围。EMAT 可以通过改变线圈的绕制方式以及外加磁场的方向来产生横波、纵波、导波等多种类型的超声

波，有利于提高检测的精度。以 EMAT 为核心的电磁超声检测技术，已经逐步成为国内外较为主流的超声检测技术之一。与传统的压电超声检测技术相比，电磁超声检测技术的优点主要有：

（1）无需与待测试件直接接触，因此在各种高温、高速、高洁净度的特殊场合也可以应用电磁超声技术进行检测；

（2）省去了对待测试件进行清洁和涂抹耦合剂的环节，有利于降低检成本，提高检测效率；

（3）符合当今低碳环保的科技发展趋势。

电磁超声检测的上述优点恰好能够解决传统的压电超声检测法面临的一些困难，很好的符合了现代工业对无损检测技术的迫切需求，有着巨大的发展潜力，所以近年来电磁超声波检测技术越来越受到人们的重视。

按照特种设备安全技术规范，工业管道每年至少进行一次大规模检查，传统的人工检查方式需要投入大量人力、物力。目前已投入应用的电磁超声测厚仪均需要人工手动操作，对线程长、线路复杂、工作环境高压、人工操作不便的工业管道，需要投入极大人力资源。在一些特殊环境，如运输有毒气体、液体的管道以及高空管道，基本无法进行人工检测。更重要的是，人工检测存在漏检和误检的问题，对检测结果产生一定影响，可能造成一定损失。而自动化作业把人从繁重的体力劳动、部分脑力劳动以及恶劣、危险的工作环境中解放出来，节省人力物力，且能应用于危险场合。同时，采用自动检测设备，能提高检测准确度和工作效率，大大降低因误检和漏检产生的损失并缩短因检测而停工的时间，提高企业检测效率，间接性地提高企业生产效率。因此研制自动化的检测装置具有巨大的应用价值。

因此基于电磁超声的自动化管道测厚系统具有受环境限制小、人力成本低、漏检误检率低、检测效率高且连续性强等众多优势，在工业领域具有极大的发展前景。

2、研究内容

本项目拟基于电磁超声理论，研制一款自动化的管道测厚系统，实现对工业金属管道的自动、精确的测量。系统由金属测厚装置和管道爬行装置组成，可由上位机和遥控手柄操控，检测结果显示在上位机或装置液晶屏幕上。项目的主要研究内容分为以下三个部分：

（1）面向工业金属管道的电磁超声换能器的设计

小组成员拟通过有限元仿真软件建立起精确的 EMAT 多物理场模型，然后采用稳态求解计算得到永磁铁产生的静磁场分布，进而采用瞬态求解计算金属中涡流、洛伦兹力、超声波位移分布和 EMAT 线圈中感应电压信号。通过对比仿真结果，总结不同结构 EMAT、不同脱离距离对超声波的声场强度、集中程度和声波纯度的影响规律，最后实验验证，找出其中更适合金属管道测厚的换能器结构形式。

（2）高精度、便携式电磁超声金属测厚装置的设计

基于电磁超声换能原理，小组成员将以高频大功率发射电路设计、低噪声高增益接收电

路设计和测厚算法设计为主体，研制一款高精度、便携式的金属测厚装置，实现对超声信号的有效激发、可控放大和高速采集，从而完成对工业金属管道的高精度厚度测量。

(3) 高稳定性、高负载能力的管道爬行装置的设计

小组成员将以稳定性高、负载能力强作为管道爬行机械装置的设计要求，针对测量管道形状和走向的多样性，提出管道爬行机械装置的机械结构方案，满足不同场合的需求。设计后期对机构方案进行实验验证，分析所设计机构尺度结合的约束条件，对机构整体进行优化，以得到精准实现管道厚度测量的管道爬行装置最优尺寸，为运动控制打下基础。最终结合手柄或 Wi-Fi 通讯对装置的运行状态进行控制，实现预期设计目标。

3、预期目标

通过阅览相关技术文章，对自动化的管道测厚系统提出以下指标：

- (1) 系统采用电磁超声原理，检测过程中不需要打磨被测金属表面，不需要耦合剂；
- (2) 测量精度不低于 0.01mm；
- (3) 测量范围覆盖 1.5mm~80mm；
- (4) 管道爬行装置最大载重不低于 2kg；
- (5) 爬行角度覆盖 0~90° ；

中期预期目标：完成管道测厚系统设计雏形。完成电磁超声换能器的设计；完成对金属测厚装置电路板的绘制与调试；初步完成爬行装置的设计。

结题预期目标：优化与完善管道测厚系统。完成金属测厚装置与管道爬行装置的联调；优化装置结构已达到上述指标；优化人机交互环节。

4、特色与创新

(1) 金属管道广泛应用于当今工业领域，在气体、液体的长距离运输中起着至关重要的作用，研制一款能够精确测量管道厚度且不损伤管道的测厚装置具有宽阔的应用前景。

(2) 相比于较为成熟的压电超声技术，电磁超声技术最显著的优势是无需耦合剂，可以在更加恶劣的环境下进行测量，有效避免耦合剂应高温、低温、高压失效的状况发生。

(3) 对于较为危险的环境，如易燃易爆的场合，存在有毒气体的场合，通过爬行装置搭载测厚装置进行自动化测量的方法，能够有效保证工作人员的人身安全。

(4) 自动化管道测厚系统能大大降低误检和漏检的概率，并缩短因检测而停工的时间，提高可靠性和运输效率。

(5) 自动化管道测量系统可将传统的点测量转化为线测量；增加 EMAT 探头的数量可将线测量转化为面测量；从而可以将管道平面的厚度以 3D 效果图的形式展现在用户面前，更具直观性。

5、实施方案

5.1 总体实施方案

自动化管道测厚系统由金属测厚装置和管道爬行装置两部分组成。系统的整体框图如图 5-1 所示。金属测厚装置是系统电路的主体部分，通过对发射电路和接收电路的控制，激发和接收超声波，完成对管道的测厚工作；管道爬行装置是装置前进的动力，主要负责搭载测厚装置，通过调整驱动信号控制直流减速电机，实现整个系统沿管道的轴向运动，进而完成管道测厚的自动化；二者相对独立，可独立工作。

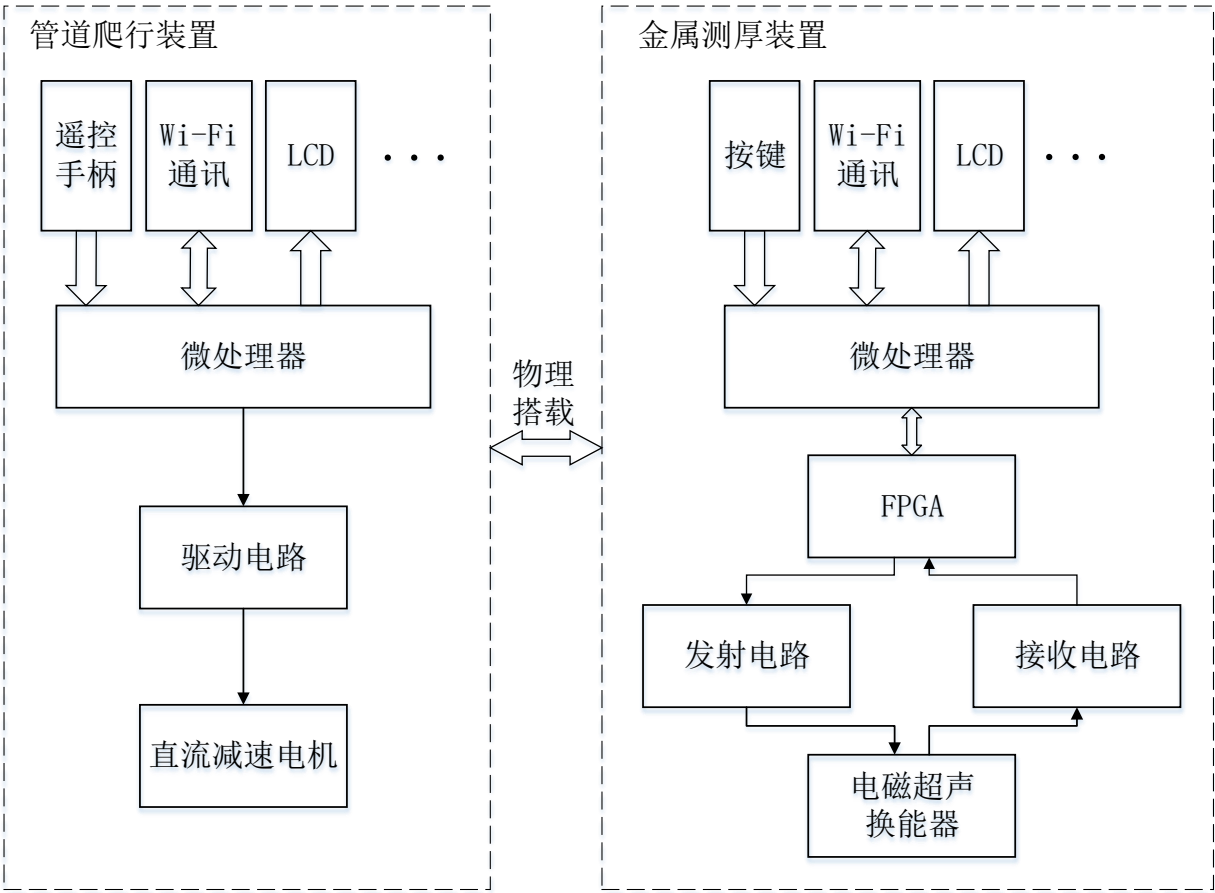


图 5-1 自动化管道测厚系统整体框图

工作工程中：用户预先设置好管道测厚装置的工作模式，然后通过上位机与装置的 Wi-Fi 连接或遥控手柄控制管道爬行装置的运动。运动过程中，金属测厚装置通过对发射电路和接收电路的控制，自动完成对当前位置的管道厚度测量，并将数据通过 Wi-Fi 传输给上位机。由于管道爬行装置沿管道轴线运行，因此运动期间测得的数据可以曲线的形式呈现；若有多台管道测厚系统同时运行，可以 3D 曲面图的形式呈现。

5.2 电磁超声换能器的设计

5.2.1 电磁超声换能器的换能原理

电磁超声换能器通常由线圈、永磁铁和待测金属三部分组成，其中线圈和永磁铁部分称

为 EMAT 探头。线圈中通以高频电流；磁铁主要提供静磁场。EMAT 换能原理示意图如图 5-2 所示。

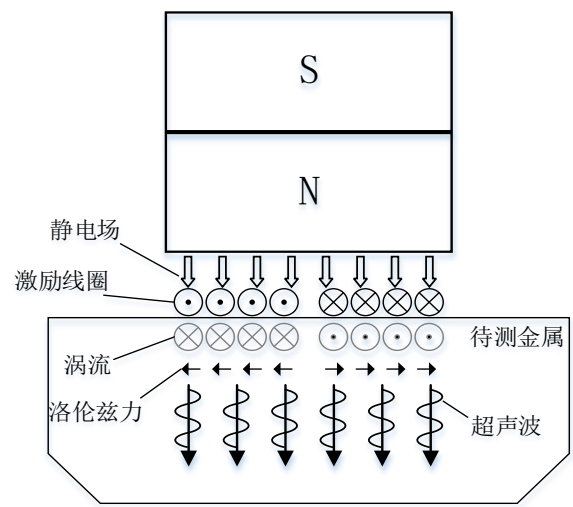


图 5-2 EMAT 换能原理框图

发射过程中：EMAT 线圈中通有几百千赫兹到数兆赫兹的高频大功率电流。根据电磁场理论，高频电流会在待测金属中产生频率一致的交变磁场，进而在金属表面集肤深度内感生出与线圈电流方向相反、频率相同的涡流。在永磁铁施加静电场的作用下，交变的涡流会受到洛伦兹力作用，力的方向可由左手定则判断。在洛伦兹力的作用下，金属表面就会产生周期性的振动和弹性形变。当这种振动以波的形式在金属中传播时，就形成了超声波。

接收过程中：当反射回波行波进行到换能器下方时，金属质点会切割永磁铁产生的静电场，在金属内引发感应电动势和涡流，进而导致换能器附近的磁场变化。接收线圈处在此变化的磁场中，会感生出电压，通过检测该电压即可得到回波信息，进而得到管道实际厚度。

5.2.2 电磁超声换能器的设计

EMAT 在金属中激发的超声波不仅与线圈尺寸、被测金属厚度、激励电流频率有关，还与线圈与永磁铁的组合有关。EMAT 换能器有三种常用的组合结构：1）螺旋线圈与圆柱形永磁铁组合；2）蝶形线圈与长方体形永磁铁组合；3）跑道线圈与两个磁极相反的长方体形永磁铁组合。三种常用 EMAT 探头示意图如图 5-3 所示。

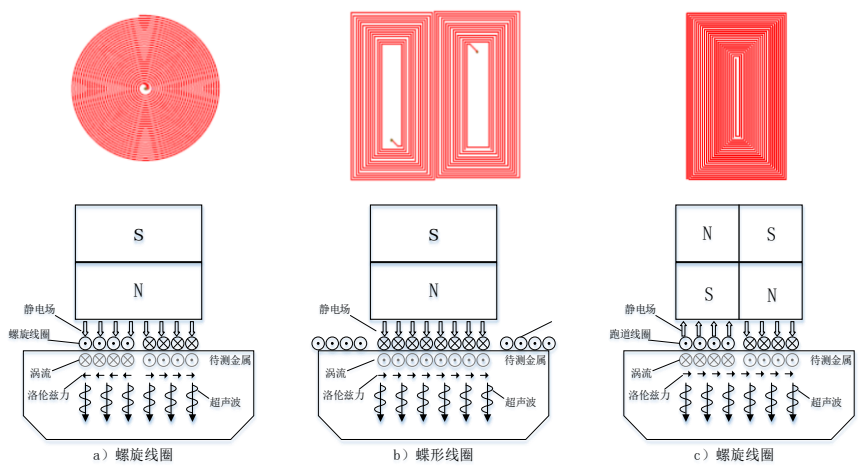


图 5-3 三种常用 EMAT 探头示意图

EMAT 发射和接收超声波的物理过程是一个电磁-机械-电磁能量转换的过程。研究学者们通过建立数学模型对 EMAT 进行了大量的研究,其中,解析法和数值法是 EMAT 建模中常用的两种方法。解析法可以直接反应系统输入输出之间的关系,物理意义清晰,但是解析法模型通常需要一定的假设和简化,如静电场等效为均匀磁场,忽略声波在传播过程中的衰减等,影响了模型的精确性。数值法通过基本物理方程,通过有限元、边界元等方法实现 EMAT 的建模,对复杂 EMAT 模型也能进行有效计算。小组成员拟通过有限元仿真配合实验验证的方法实现对 EMAT 的设计。

对 EMAT 进行有限元建模分析时,对于直线型导体组成的线圈结构,如蝶形线圈 EMAT 和跑道线圈 EMAT,在导体长度方向上,永磁铁、线圈的差异性可忽略,因此可以将此类 EMAT 简化为线圈导体截面上单二维模型进行分析;对于螺旋线圈 EMAT,永磁铁、线圈满足轴对称条件,可将三维问题简化为轴对称坐标系下的二维问题。因此,对用于管道测厚的 EMAT 建立有限元仿真的流程为:

(1) 选择求解坐标系。三种线圈结构均可简化为二维分析,因此可选择二维直角坐标系或轴对称坐标系。

(2) 选择求解问题的物理场。EMAT 换能过程涉及电场、磁场、力场和声场多个物理场,首先需要建立多物理场模型。

(3) 建立几何模型。除了建立 EMAT 线圈、永磁体和待测金属的几何模型,还需要设定一个空气场,用于电磁场计算。

(4) 分配几何模型材料属性,设定各物理场的求解区域和边界条件。

(5) 对求解区域进行网格划分。为保证数值计算的准确度,需要控制网格尺寸,对不同位置根据需求设定不同的网格尺寸。

(6) 有限元求解模型。设定合适的求解步长和相对误差,以保证计算结果的正确性、稳定性和平滑性。

(7) 对计算结果进行后处理,将计算结果通过曲线显示等。

在有限元模型的基础上,采用稳态求解计算得到永磁铁产生的静磁场分布,进而采用瞬态求解计算金属中涡流、洛伦兹力、超声波位移分布和 EMAT 线圈中感应电压信号。通过对比仿真结果,总结不同结构 EMAT、不同提离距离对超声波的声场强度、集中程度和声波纯度的影响规律,最后实验验证,找出其中更适合金属管道测厚的换能器结构形式。

5.3 电磁超声金属测厚装置的设计与制作

电磁超声金属测厚装置总体框图如图 5-4 所示。电磁超声探头由永磁铁和线圈组成;高频大功率发射电路包括高压发生电路、脉冲驱动电路、功率放大电路和阻抗匹配电路;低噪声高增益接收电路包括多级滤波放大电路、可控增益放大电路、高速数据采集电路;检测装置由高频大功率发射电路、低噪声高增益接收电路、FPGA、微处理器及其外围电路组成。

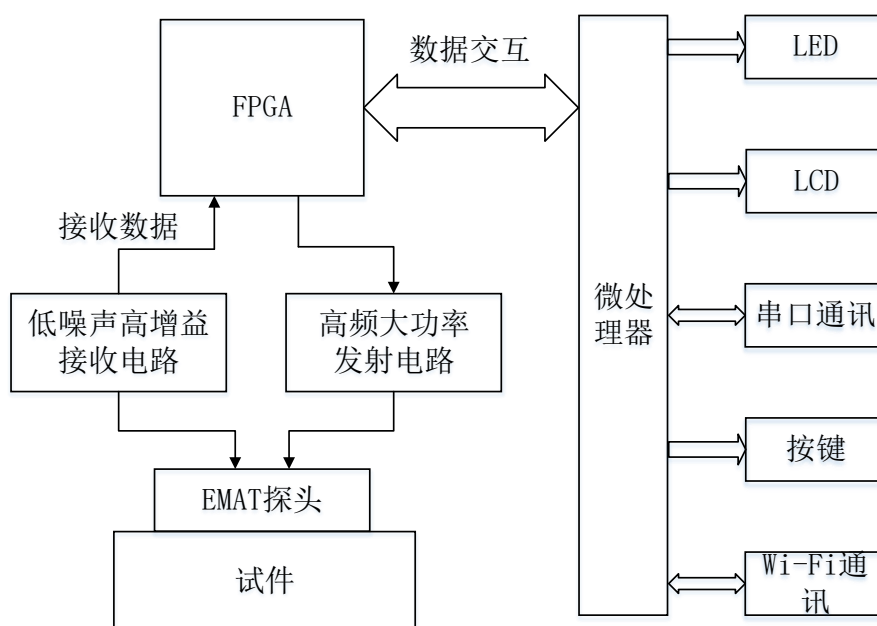


图 5-4 便携式电磁超声测厚装置总体框图

工作过程中：上位机通过 USB 接口或者 Wi-Fi 向微处理器输送功率放大电路所需的发射频率、周波数、工作重复频率、高压发生电路所需的充电时间等工作参数；微处理器再将信息传输到 FPGA；FPGA 根据接收到的参数，调整高频大功率发射电路和低噪声高增益接收电路的时序，使二者互不干扰，工作在正常状态下，并对接收电路采集到的回波信号进行数字处理，通过算法将直接测量量转化为实际厚度，并将数据通过通信协议传输给微处理器；微处理器将接收到的数据进行进一步处理，显示在 LCD 上，同时通过 Wi-Fi，将数据无线传输给上位机。

电磁超声金属测厚装置可搭载在管道爬行装置上，负责对当前位置的工业管道进行厚度测量，同时具有数据的无线传输功能和人机交互页面，可在人工操作的情况下脱离爬行装置独立完成测量工作。

5.2.1 高频大功率发射电路的设计

由于电磁超声换能器换能效率较低，需要发射电路在数兆赫兹频率下输出数十安培的电流、数千伏特的电压，所以需要高频大功率的发射电路。发射电路的设计在检测系统中至关重要，通常 EMAT 工作频率越高，检测的盲区越小；激发电流越大，信号回波强度越高，可检测的范围也越大。本系统采用的高频大功率发射电路原理框图如图 5-5 所示。

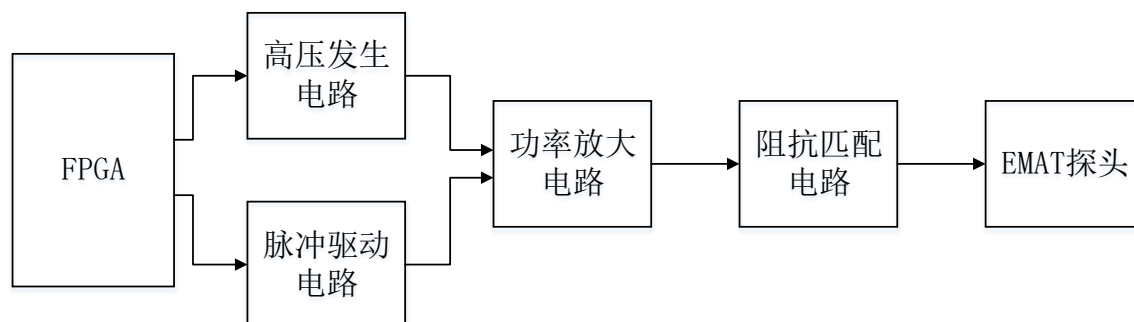


图 5-5 高频大功率发射电路原理框图

高频大功率发射电路包括 FPGA、高压发生电路、脉冲驱动电路、功率放大电路、阻抗匹配电路和 EMAT 探头。

FPGA 在发射电路中主要起到三个作用：1) 向脉冲驱动电路提供原始的脉冲驱动信号；2) 向高压发生电路提供充电使能信号；3) 控制升压电路、功率放大电路和接收电路的工作时序，保证三者分时工作，互不干扰。

高压发生电路包括充电电路和储能电容，向功率放大电路提供工作所需的高压稳定直流电源。高压发生电路会对数字信号产生很强的电磁干扰，因此必须严格控制接收电路和脉冲驱动电路的工作时序，保证装置正常工作。

脉冲驱动电路在原始信号的作用下产生脉冲驱动信号。通过改变原始信号，脉冲驱动电路可产生频率、周波数、工作重复频率可调的驱动脉冲。

功率放大电路采用 D 类功率放大器结构，其工作原理基于开关晶体管，可在极短的时间内完全导通或完全截止，同一时刻只有一只晶体管导通，因此产生的热量很少，功率放大电路效率较高。功率放大电路在脉冲驱动电路的作用下，将高压发生电路提供的高压直流信号转变为高频大功率的猝发音信号。

阻抗匹配电路是为了防止 EMAT 探头阻抗与功率放大电路输出阻抗相差较大的情况出现，从而导致发射电路整体效率因为阻抗失配而严重降低。

工作过程中：FPGA 根据接收到工作参数，控制脉冲驱动电路产生脉冲驱动信号，同时控制高压发生电路产生高压直流信号；在脉冲驱动电路的作用下，功率放大电路将高压发生电路的高压直流信号转换为猝发音信号，最后通过阻抗匹配电路，在 EMAT 中产生高频大功率发射电流。

5.2.2 低噪声高增益接收电路的设计

EMAT 效率较低导致的另一问题是电磁超声回波信号十分微弱，通常匹配良好的线圈上产生的回波信号也仅为数十微伏，且 EMAT 线圈对环境噪声极为敏感，回波信号常被噪声淹没。因此，电磁超声接收电路设计的重要问题是借助各种滤波方法将淹没在强噪声背景下的微弱回波信号提取出来。本系统采用的低噪声高增益接收电路原理框图如图 5-6 所示。

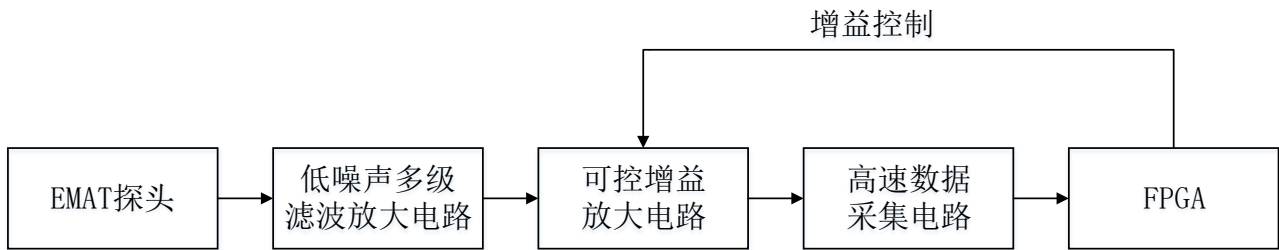


图 5-6 低噪声高增益接收电路原理框图

低噪声高增益接收电路包括低噪声多级滤波放大电路、可控增益放大电路、高速采集电路和 FPGA。

在级联放大电路中，前级的噪声系数对整体噪声系数影响最大，因此要保证前置放大电路的噪声系数足够小，才能保证回波信号具有较高的信噪比。此外，在放大电路中加入滤波电路可以滤除噪声，提取出有效的电磁超声回波信号。

可控增益放大电路的增益倍数受 FPGA 控制，具有对信号幅值的补偿作用。通过可控增益放大电路，可以补偿回波信号因材料不同而出现的幅值不同的情况，提高装置的适用性。

高速数据采集电路是将回波信号传输至 FPGA 的核心模块，包括模数转换器（Analog-to-digital converter，简称 ADC）和 ADC 前置电路两部分。ADC 前置电路保证后级采集电路与前级接收电路彼此隔离并降低数据采集电路噪声。EMAT 工作的频率通常可达兆赫兹级别，根据奈奎斯特采样定理，采样频率至少要大于信号中最高频率的两倍，才能完整的保留原始信号中的信息。因此，模数转换芯片需要有较高的采样率与量化精度。

FPGA 在接收电路中主要起到两个作用：1) 控制可控增益放大电路的增益倍数；2) 对采集电路输出信号进行数字处理。采集电路输出信号是电压量，需要根据物理模型转换为金属管道的厚度值。

工作过程中，回波信号率先经过前置滤波放大电路，保证良好的信噪比；再经过可控增益放大电路达到采集电路的电平要求，最后通过高速采集电路进入 FPGA，进行数字信号处理，求出金属层厚度。

5.2.3 测厚算法的设计

自动化管道测厚系统拟采用反射法测量金属管道厚度。

通过 EMAT 激励超声波的示意图如图 5-6 所示。

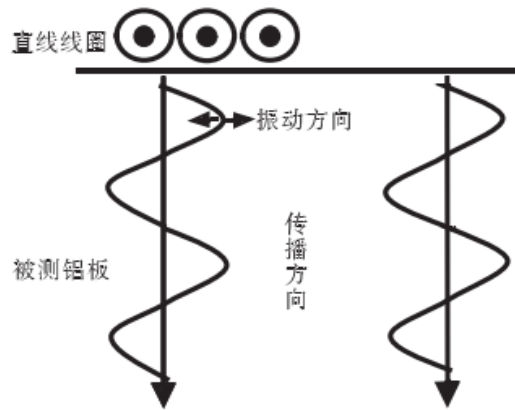


图 5-7 超声波传播示意图

设换能器的激励电流频率为 f ，电能向声能转换后，形成的超声波沿被测金属表面法线方向传播，设入射角为 θ ，则满足关系式

$$f = \frac{nv}{2L \sin \theta} \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (5-1)$$

式中 f ——激励电流频率；

v ——超声波在金属中传播速度；

L ——EMAT 线圈线间距；

n ——回波的次数。

在测厚实验中，EMAT 激发的超声波在金属中传播，由于其内部带电粒子振动方向与波

形传播方向垂直，入射角 θ 理论值为 90° 。

被测金属中超声波传播速度 v 与波长 λ 及激励频率 f 的关系为：

$$f * \lambda = v \quad (5-2)$$

由于超声波在被测金属中的波速 v 主要由金属材料属性的决定，故声波波长 λ 主要受激励线圈的结构尺寸及激励频率影响。此外，激励线圈制造工艺等因素也能影响声波的波长。

当超声波以某一速度向被测金属下端面传播，由于声波在金属表面的透射比较低，使得超声波可以在金属内多次反射，在传播过程中能量不断衰减，宏观上表现为回波信号幅值减小，线圈上接收到的为一系列脉冲信号，通过低噪声高增益接收电路进行放大。利用声程公式计算得被测金属厚度：

$$d = \frac{1}{2} v * \Delta t \quad (5-3)$$

金属内超声波回波信号如图 5-7 所示。其中 S_1 为一次回波， S_2 为二次回波， S_n 为 n 次回波。由式（5-1）发现 Δt 的精确性将直接影响测厚的准确性。

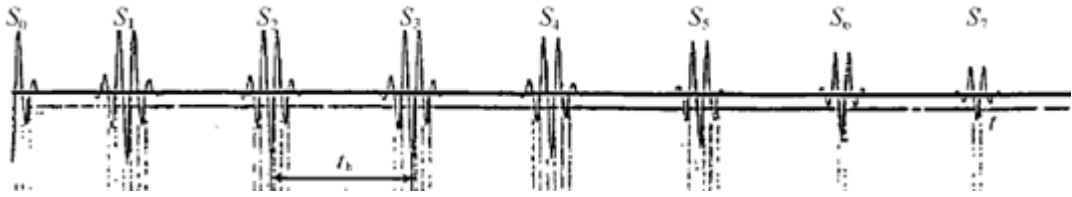


图 5-8 超声波回波信号示意图

在超声波传播的过程中，选取时间间隔为 T ，测量出在 T 时间内峰值个数 n ，则：

$$\Delta t = \frac{T}{n} \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (5-4)$$

由式(5-3)、(5-4) 可得：

$$d = \frac{v * T}{2n} \quad (5-5)$$

通过改变 T 的大小可获得多组数据，有效降低测量的随机误差，控制测量的精度。

小组成员拟采用累积平均算法提高回波信号的信噪比。

以每次采样开始时刻为 t ，信号在 t 时刻值为 $u(t)$ ，将第 i 次采样得到的数据记为 $u_i(t)$ ，则累计平均算法原理可以表示为式 5-6 形式，式中 n 为累计平均次数。

$$\bar{u}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i(t) \quad (5-6)$$

假设含有噪声的信号为 $u_i(t) = S(t) + n_i(t)$ ，式中 $n_i(t)$ 为第 i 次采样信号中有的随机信号。

将有效信号有效值记为 S ，随机信号有效值记为 N ，则根据定义，未作累计平均的信号信噪比为：

$$SNR_i = 20 \log \frac{S}{N} \quad (5-7)$$

随机噪声满足高斯分布，根据概率论知识，有：

$$\begin{cases} \bar{n}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_i(t) = 0 \\ \sigma(\bar{n}(t)) = \sigma\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_i(t)\right) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma(n_i(t)) \end{cases} \quad (5-8)$$

若保证每次采样得到的信号中的有效信号不发生改变，则累计平均后的信号可表示为：

$$SNR_i = 20 \log\left(\sqrt{n} \frac{S}{N}\right) = SNR_i + 10 \log n \quad (5-9)$$

累积平均算法可以降低信号中的随机噪声，若信号中仅含有随机噪声，则累积平均 n 次可以提高信噪比 $10 \log n$ 分贝。

综上所述，小组成员拟通过反射法和累计平均算法将表征回波信号的电压信号转换为实际的管道厚度值，实现对管道的测厚。

5.4 管道爬行装置设计

管道爬行机器人分为内管道和外管道机器人；内管道机器人研究较为成熟，而对外管道机器人的研究还相对较少，外管道机器人主要是针对缆索、电缆、电线杆、自来水管、输油管道、输气管道、输暖管道等圆形管道进行作业。其中，大多数管道中都含有高温、高压、有毒、有辐射的流体物质，如果发生管道裂纹或者断裂，管内有害物质泄漏将会给人们的生命和财产带来重大的损失，对管道进行定期的检测和保养必不可少。若仅仅靠人工方法对其进行作业，不仅耗费人力和物力，而且效率也比较低，况且许多场合根本无法容纳人工作业，此类情况下，管外爬行机器人就能充分发挥出它的优越性和实用性。

管道爬行机器人的种类有很多，按驱动方式来分可分为：气动、电动和液压驱动爬行机器人等；按行走方式可分为：轮式、履带式、蠕动式等。根据不同的驱动方式和功能等可以设计多种不同的结构和用途的爬行机器人，如气动管内检测爬行机器人，电磁吸附多足爬行机器人、电驱动焊弧爬行机器人等，每一种形式的管道爬行机器人都有各自的应用特点。

综上所述，为了实现管道测厚的功能，小组准备设计一套电动、轮式、管道爬行机械装置。为保证系统的控制与数据的有效通讯，爬行装置需满足便携性、集成性及可靠性等要求。

5.4.1 供电方式的选择

根据电源供给模式的不同，管道机器人大体上分有自带蓄电池供电与外部电池供电两类。

(1) 自带蓄电池供电

目前市面上常见的蓄电池有铅酸电池、镍氢电池、锂离子电子电池、超级电容、燃料电池等。采用自带蓄电池供电的方式可以提高装置的灵活性。但是蓄电池在湿度大的环境中会自放电，在高温环境下，内部的活性物质会发生物理和化学变化，严重影响了电池的寿命和装置的工作范围。且能够为装置提供足够续航能力的蓄电池通常体积较大且重量较沉，会增大装置整体重量，降低爬坡能力。

(2) 外部电源供电

通过外部电源供电的方法，无需考虑装置的续航问题，可有效减轻负重，从侧面增强装置的负重能力和爬坡能力。但采用外部电源供电方式，装置和电源需要通过线缆连接，降低

了装置的灵活性。此外，还需考虑对供电线缆的保护。

综合比较，小组成员拟采用外部电源供电方式。牺牲一定的灵活性提高爬行装置的负重能力和爬坡能力。

5.4.2 驱动电机的选择

项目装置将用于管道检测，考虑到管道的形状及走向、装置的负重、测厚定位的准确性等因素，驱动电机应具有以下几个特点：体积小、重量轻、启动扭矩大、调速能力强、效率高、功率密度大、环境适应能力强、能量回馈率高。

根据电机驱动原理，结合目前市面上常见的电机，可供项目选择的方案供 4 种：

（1） 伺服电机

伺服电机通常靠脉冲定位，伺服电机每接收到一个脉冲，就会旋转一个脉冲对应的角度，从而实现位移；因为伺服电机本身具有发出脉冲的功能，伺服电机每旋转一个角度，都会发出对应数量的脉冲，这样形成闭环，达到精确控制的目的。但伺服电机的控制较为复杂，控制器参数需要现场调整 PID 参数确定，且需要更多的连线。

（2） 交流异步电机

交流异步电机是目前工业中应用比较广泛的一类电机，其结构简单，运行可靠耐用，维修方便。交流异步电机与同功率的直流电机相比效率更高，质量约减轻了二分之一左右。如果采用矢量控制的控制方式，可获得与直流电机相媲美的可控性和更宽的调速范围。但工作时需要保证电机的冷却，且控制、驱动系统较为复杂，成本较高，运行时还需变频器提供额外的无功功率来建立磁场，故效率和功率密度都较低。

（3） 步进电机

步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制电机，步进电机每接收到一个脉冲信号，就按设定的方向转动一个固定的角度，它的旋转是以固定的角度一步一步运行的。因此，需要考虑步进电机的累积误差对装置行驶距离精度的影响。且步进电机低速转动时振动和噪声较大。

（4） 直流减速电机

直流减速电机，是在普通直流电机的基础上，加上配套齿轮减速箱，能够在低转速时提供较大的力矩。不同减速比的齿轮箱可以提供不同的转速和力矩。直流减速电机能耗较低，性能优越，减速器效率高达百分之九十六。且工作时振动小、控制简单、成本低。此外，直流减速电机采用新型密封装置，保护性能好，可在有腐蚀、潮湿等恶劣环境中工作，增强装置的环境适应能力。

综上所述，小组成员考虑到装置精度、控制难易程度、效率和稳定性等因素，拟采用直流减速电机作为装置的驱动电机。

5.3.3 装置整体结构

管道爬行装置在整体上采用对称结构，增强稳定性；两个侧臂及与其所连接的测厚滑块

降低了整个装置的重心，进一步增稳定性；曲柄连杆可使装置能够适应不同直径的管道，提高装置适用性。管道爬行装置结构示意图如图 5-9 所示。

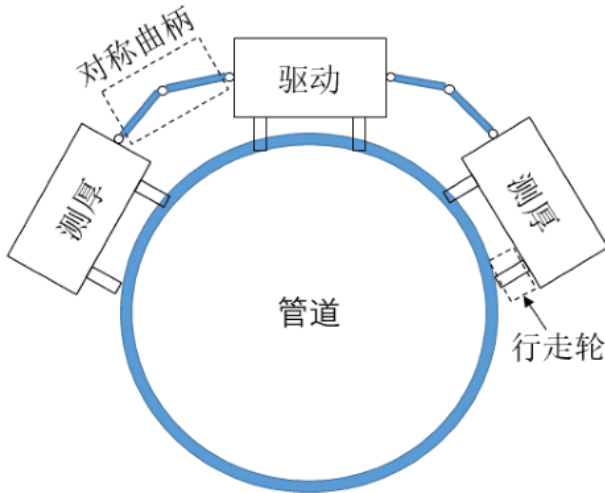


图 5-9 管道爬行装置结构示意图

直流减速电机在驱动滑块内部与行走轮连接，通过电线供电，驱动整个装置的前进；采用轮式前进的方式，降低工作时与管道之间的摩擦，延长装置使用寿命；考虑到管道测厚角度多变，在轮的种类选择上舍弃了倾角大时与管道贴合不足的压力轮，选用磁铁轮，从而保证无论何种角度，装置与管道紧密贴合，增加测厚精度；在轮的数量选择上，为尽可能保证装置运行平稳，采用最常见的四轮机构；对称曲柄采用双连杆搭建，增强其负重能力，有效减小沿管道行走时对测厚滑块的震动，增强装置对不同直径管道的适应性；测厚滑块中内置了永磁铁，一方面建立 EMAT 工作时所需磁场，令一方面利用磁铁磁性，增强装置对管道的吸附力，减小行走震动；两个对称测厚滑块同时测厚，提高了检测效率的同时，也减小了检测的偶然性。

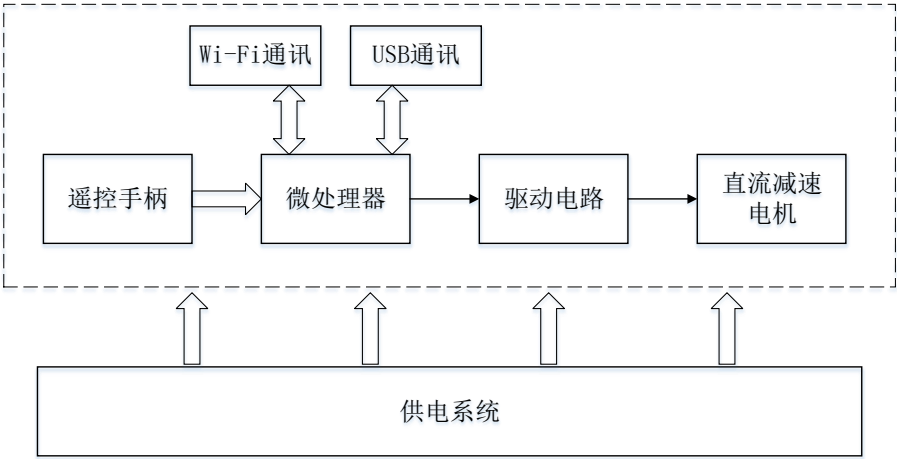


图 5-10 管道爬行装置原理框图

管道爬行装置原理框图如图 5-10 所示。工作过程中：操作人员通过遥控手柄或 Wi-Fi 向微处理器发送前进距离、前进速度等工作参数；微处理器接收到工作参数之后，调整输入给驱动电路的信号；电机根据不同的驱动信号调整转动状态，进而带动系统前进、停止、后退。

6、进度安排

时间	预期目标
2018.11 至 2019.01	完成换能器的设计，初步完成金属测厚装置的设计。
2019.02 至 2019.04	完成管道爬行装置设计，完成自动化管道测厚系统雏形。
2019.05 至 2019.07	整体调试自动化管道测厚系统，实现基本功能。
2019.07 至 2019.10	优化与完善自动化管道测厚系统，实现预定指标。

7、经费预算

预算类别	主要用途	预算金额 (元)
印制电路板	印制电路板及 SMT 贴片，预计 5 次	2000
控制芯片	FPGA、ARM 等装置的控制芯片	500
存储芯片	FLASH、EEPROM 等，用于存储数据及 FPGA 程序	500
常用外设	LCD、Wi-Fi 等外设	2000
模数转换器	需要高速、量化精度高的模数转换器，用于采集电路	1000
厚度标准件	通过标准件，测试系统精度	500
工具	烙铁、热风枪、万用表等常用的工具	1500
机械加工费	3D 打印或者板材加工	2000

