

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: 基于电磁超声的管道厚度机器人检测系统

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）：

管道运输是最普遍的一种长距离输送液体和气体物资的方式，在工业生产中应用十分广泛。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，而在各项检查中，厚度测量又是必不可少的一环。目前市面上存在的厚度测量设备普遍能够实现厚度的点测量，但受限于需涂抹耦合剂的测量方式和对人工较强的依赖性，因此检测的效率往往较低，且存在漏检误检的风险。

为了解决上述问题，小组准备基于电磁超声理论，研制一款管道测厚机器人检测系统。系统主要由金属测厚装置和管道爬行机器人两部分组成。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；管道爬行机器人是系统前进的动力，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；二者相互联系，亦可独立工作。

系统工作过程中，用户通过遥控手柄控制管道爬行机器人的运动，金属测厚装置根据预先设置好的工作参数自动完成对当前位置的厚度测量，并将测量结果显示在液晶屏上。若有上位机通过 Wi-Fi 与装置连接，可将数据通过 Wi-Fi 发送至上位机。

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结构框图。

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，检测结果具有一定的不可靠性。

因此，采用机器人检测系统，能提高检测准确度和工作效率，可有效避免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，间接提高企业生产效率。故而研制机器人检测系统具有巨大的应用价值。

综上所述，基于电磁超声的管道厚度机器人检测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，研制一款管道厚度机器人检测系统，实现对工业金属管道的精确测量。系统由金属测厚装置和管道爬行机器人组成，可与上位机通过 Wi-Fi 通讯，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两个部分：

（1）高精度电磁超声金属测厚装置的设计

基于电磁超声换能原理，小组成员将从高频大功率发射电路设计、低噪声高增益接收电路设计、测厚算法设计和软件设计四方面着手，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的厚度测量。

（2）高稳定性的管道爬行机器人的设计

小组成员将以稳定性高、负载能力强作为管道爬行机器人的设计要求，针对测量管道形状和走向的多样性，提出管道爬行机器人的机械结构方案，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机器人最优尺寸，为运动控制打下基础。最终结合 Wi-Fi 通讯和遥控手柄对机器人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，对管道厚度机器人检测系统提出以下指标：

- (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) 测量厚度范围覆盖 1.5mm~80mm；
- (4) 爬坡角度无限制；
- (5) 机器人最大行进距离 50m；

中期预期目标：完成管道厚度机器人检测系统设计雏形。完成对金属测厚装置电路板的绘制与调试；初步完成管道爬行机器人的设计。

结题预期目标：优化与完善管道厚度机器人检测系统。完成金属测厚装置与管道爬行机器人的联调；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，通过爬行机器人搭载测厚装置进行测量的方法，能够有效保证工作人员的人身安全。

(4) 管道厚度机器人检测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) 管道厚度机器人检测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

管道厚度机器人检测系统由金属测厚装置和管道爬行机器人两部分组成。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；管道爬行机器人是系统前进的动力，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；二者相互联系，亦可独立工作。

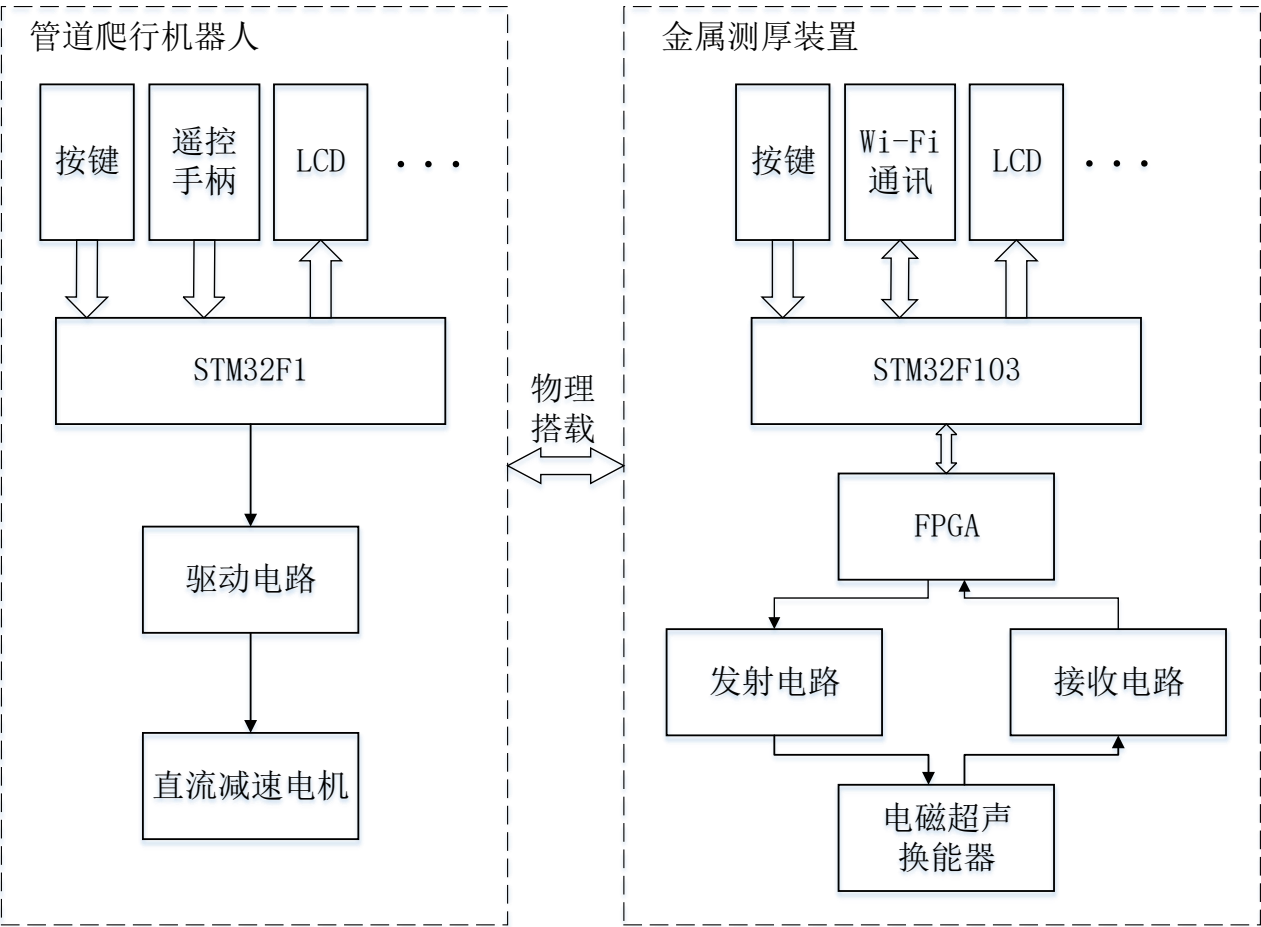


图 5-1 管道厚度机器人检测系统整体框图

工作过程中：用户预先设置好测厚装置的周波数、工作重复频率等工作参数，然后通过遥控手柄控制管道爬行机器人的运动。运动过程中，金属测厚装置根据工作参数自动完成对当前位置的厚度测量，并将测量结果显示在液晶屏上。若有上位机通过 Wi-Fi 与装置连接，可将数据通过 Wi-Fi 发送至上位机。由于管道爬行机器人沿管道轴线运行，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 电磁超声金属测厚装置的设计

5.2.1 电磁超声换能原理

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。

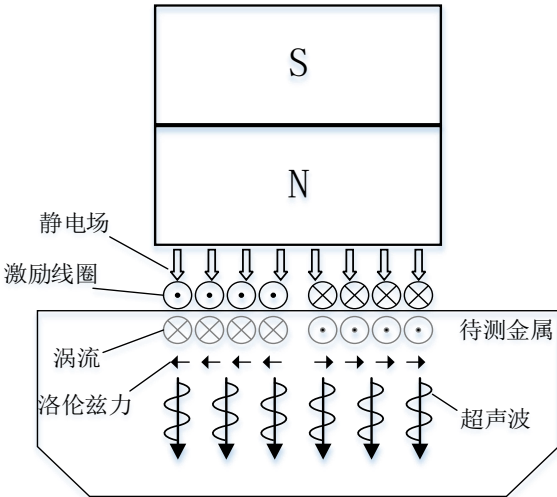


图 5-2 EMAT 换能原理框图

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。

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

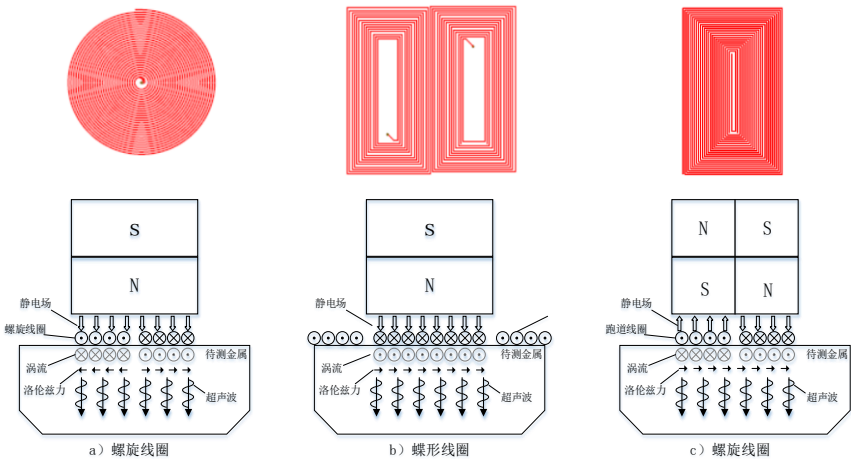


图 5-3 三种常用 EMAT 探头示意图

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。

5.2.2 电磁超声金属测厚装置的总体设计

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。

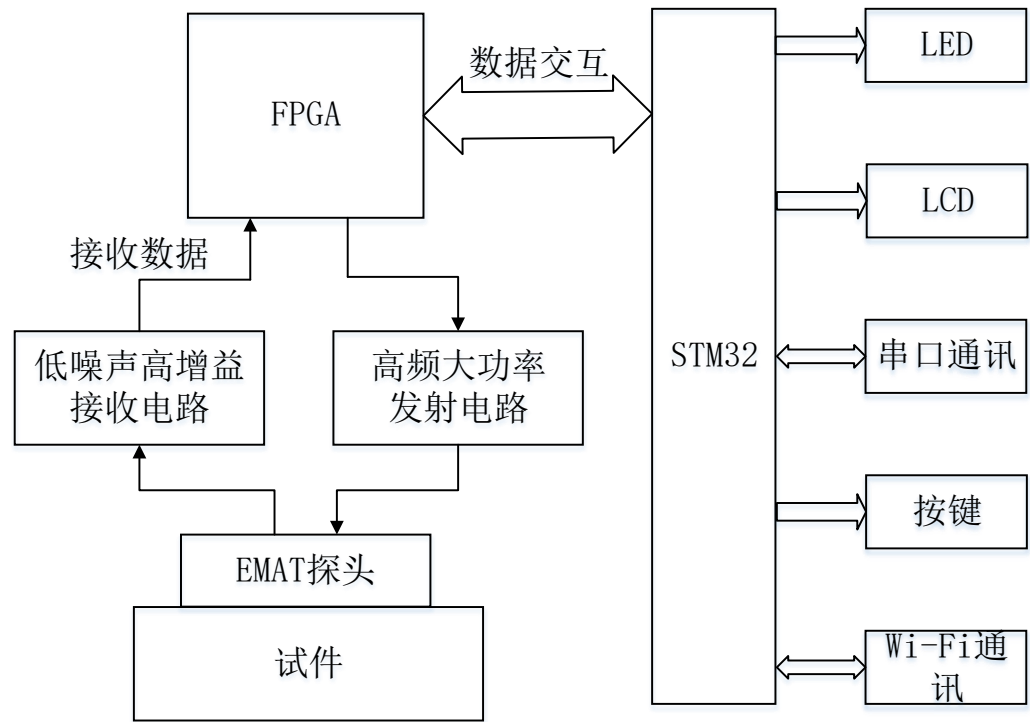


图 5-4 电磁超声金属测厚装置总体框图

工作过程中：用户通过按键或触屏的方式向装置输入超声波的发射频率、周波数、工作重复频率等工作参数；STM32 作为信息的中转站将信息传输给 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，并将数据传输给 STM32；STM32 将接收到的厚度值显示在 LCD 上，同时若有上位机通过 Wi-Fi 与装置相连，则可将数据传输给上位机，在上位机上对数据进一步处理。

电磁超声金属测厚装置可搭载在管道爬行机器人上，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机器人独立完成测量工作。

5.2.3 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。

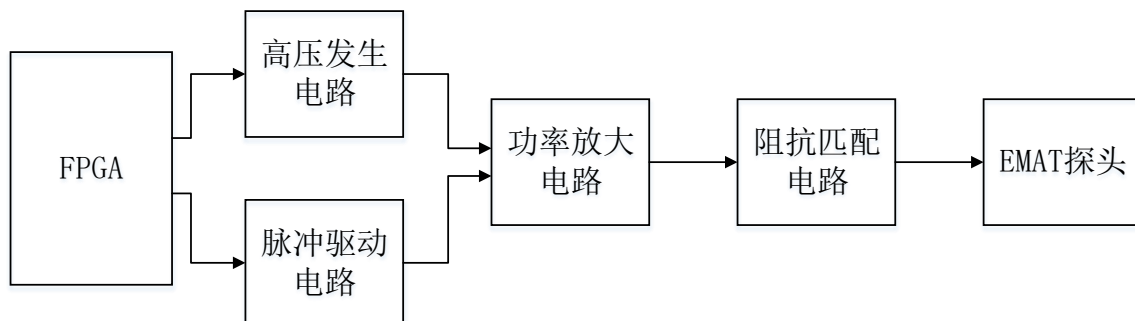


图 5-5 高频大功率发射电路原理框图

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。

5.2.4 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。

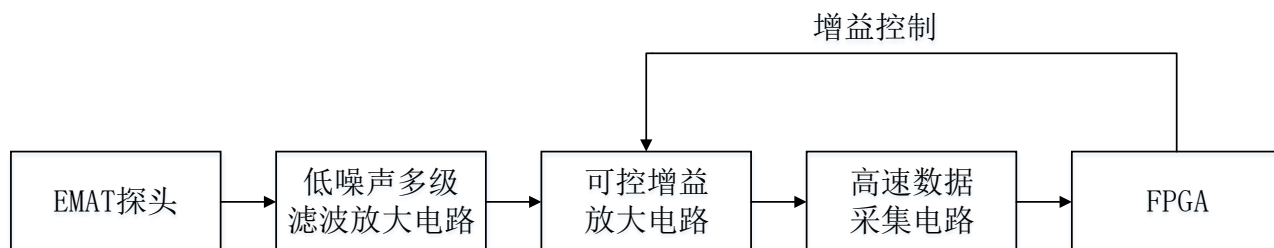


图 5-6 低噪声高增益接收电路原理框图

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。

5.2.5 厚度测量算法的设计

管道厚度机器人检测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。

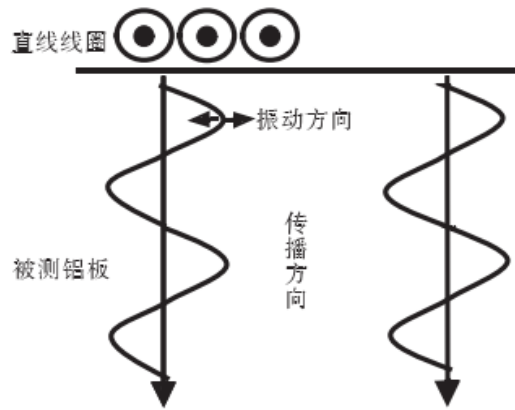


图 5-7 超声波传播示意图

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。

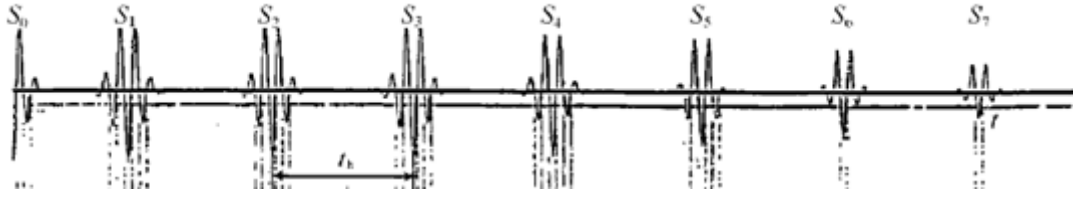


图 5-8 超声波回波信号示意图

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 $u_i(t)$ ，则累积平均算法原理可以表示为式 5-6 形式，式中 n 为累积平均次数。

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

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，未作累积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，则累积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积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。

5.2.6 金属测厚装置的软件设计

金属测厚装置具有 STM32 和 FPGA 两枚控制芯片，二者通过 FSMC 总线通讯，完成各自的工作。

STM32 主要完成测厚的参数设置、与 FPGA 的数据交互、管道厚度的实时显示、文件保

存和 Wi-Fi 通讯等工作，各项工作的具体要求如下：

（1）参数设置：通过按键或触屏设置发射频率、周波数、工作重复频率等测厚装置需要的工作参数。

（2）与 FPGA 的数据交互：拟采用 FSMC 总线，实现与 FPGA 的数据交互，发送 FPGA 所需的控制参数，接受 FPGA 的数据信息。

（3）管道厚度的实时显示：通过反射法计算得管道厚度，以数字量的形式显示在液晶屏幕上，每次测量之后更新数据。金属测厚装置和管道爬行机器人协同工作时，可将同一直线不同位置的管道厚度以曲线的形式显示。

（4）文件保存：能将数据信息保存在存储器中，需要时可以读取。

（5）Wi-Fi 通讯：可将数据通过 Wi-Fi 传输给上位机，在上位机上对数据进行进一步处理。

FPGA 主要完成厚度测量算法、发射接收电路时序控制和与 STM32 的数据交互等工作，各项工作的具体要求如下：

（1）厚度计算：通过反射法计算管道厚度；通过累计平均法提高信噪比。

（2）发射接收电路时序控制：发射电路与接收电路共用一个 EMAT 线圈，需要严格控制二者时序，保证二者不同时工作；高压发生电路会对脉冲驱动电路产生电磁干扰，同样需要控制其时序。

（3）与 STM32 的数据交互：通过模拟 FSMC 总线协议，接收 FPGA 传送的工作参数信息，发送测得的管道厚度数据。

5.3 高稳定性的管道爬行机器人设计

5.3.1 机器人类型的选择

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，如气动的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，小组准备设计一种电动、轮式、管道爬行机器人。为保证系统的控制与数据的有效通讯，爬行机器人需满足便携性、集成性及可靠性等要求。

管道爬行机器人原理框图如图 5-9 所示。工作过程中：用户通过遥控手柄向装置发送装置的前进距离、前进速度等工作参数；STM32 根据接收到的参数调整驱动电路输出；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。

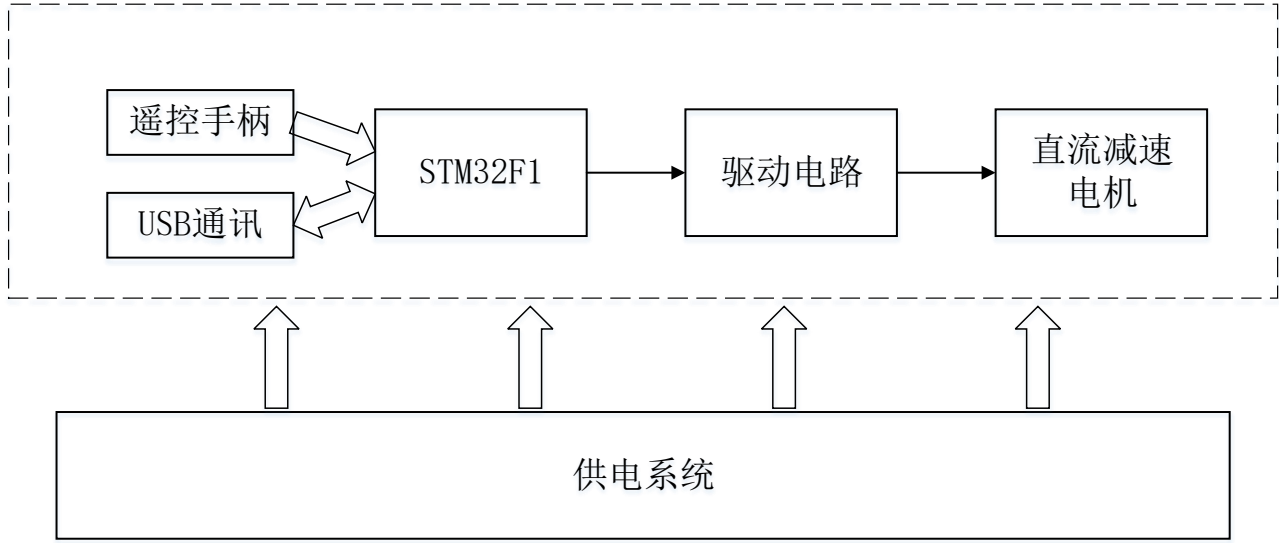


图 5-9 管道爬行机器人原理框图

5.3.2 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，无需考虑机器人的续航问题，可有效减轻负重，从侧面增强机器人的爬坡能力。但采用外部电源供电方式，机器人和电源需要通过线缆连接，降低了机器人的灵活性。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机器人的负重能力和爬坡能力。

5.3.3 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，小组成员考虑到驱动电机应具有的特点及备选方案的控制难易程度、效率和稳定性等因素，拟采用直流减速电机作为机器人的驱动电机。

5.2.4 装置整体结构

管道爬行机器人在整体上采用对称结构，增强稳定性；曲柄连杆可将机器人进行连接，形成多条测厚通道，提升测厚效率，避免漏检误检，减小检测偶然性，同时，曲柄连杆机构因其具有可调节张角的特点，使得连接形成的多通道检测系统能够适应不同规格的管道。管道爬行机器人结构示意图如图 5-10 所示。

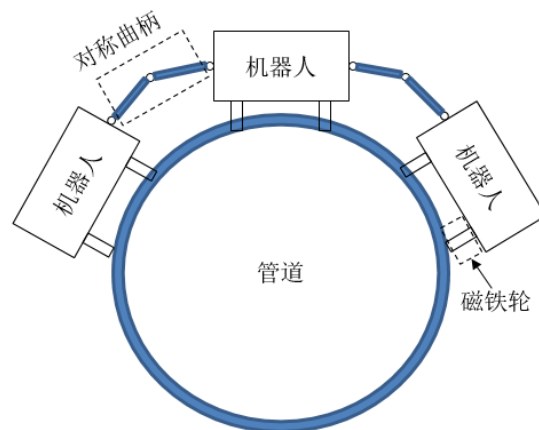


图 5-10 管道爬行机器人结构示意图

直流减速电机在机器人内部通过齿轮传动与行走轮连接，通过电线供电，驱动电机转动，带动整个装置的前进；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机器人的震动。

6、进度安排

时间	预期目标
2018.11 至 2019.01	初步完成金属测厚装置的设计。
2019.02 至 2019.04	完成管道爬行机器人设计，完成管道厚度机器人检测系统雏形。
2019.05 至 2019.07	整体调试管道厚度机器人检测系统，实现基本功能。
2019.07 至 2019.10	优化与完善管道厚度机器人检测系统，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	1500
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	1000
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	500
厚度标准件	通过标准件，测试系统精度	500
EMAT 探头	在被测件中激发超声波	1500
机械加工费	3D 打印	2000
机械加工费	板材购买及加工	2000

