

电磁流量计信号转换器硬件系统的研究与开发

摘 要

流量是生产过程中需要检测和控制的重要物理量之一,电磁流量计是检测流量特别是固液双相流体流量的重要仪表。近年来,由于经济高速发展,国内的电磁流量计的市场需求增加很快,但国内市场基本被国外著名品牌的仪表厂商所垄断,而且采用专用芯片加密等手段进行技术封锁。针对上述问题,本文开展了具有自主知识产权的电磁流量计产品的研发工作,以实现固液两相如矿浆、纸浆等难测量流体的高精度、低成本的在线测量。主要工作如下:

1. 对电磁流量计领域的国内外发展状况进行了全面系统的综述,分析了目前励磁技术的原理,确立了以交流励磁作为电磁流量计的励磁方式,并结合目前先进的芯片技术,进行了电磁流量计信号转换器系统的整体设计,提出了以专用芯片、微处理器、模拟信号处理器为架构的电磁流量计信号转换器的低成本方案;
2. 分析电磁流量计信号转换器硬件实现所需功能,提出了硬件系统设计架构,设计了模拟信号处理器、模数转换接口、微处理器控制模块、专用芯片、输入输出模块、显示模块接口、电源模块以及系统结构设计等七部分功能模块。
3. 提出了以专用芯片为核心,实现高实时性复杂逻辑处理的同时,起到加密的作用。并与模拟信号处理器、微处理器相结合,实现了抑制交流励磁传感器在复杂电磁环境下的正交干扰。芯片设计采用基于 VHDL 语言的二进程结构描述复杂逻辑事件方法,继承性扩展性强,更着眼于功能完善之后的批量低成本 ASIC。
4. 采用传统差动运算放大器和可编程放大结合方法实现毫伏级信号的转换以及同相干扰的克服,扩大了对流电阻率的限制。
5. 基于上述设计,完成了电磁流量计信号转换器硬件系统的开发、调试,科研样机,并进行实验测试。硬件系统的运行取得了预期的效果,通过在实验装置上的比对实验,证明其对于含固体颗粒流体的测量具有良好的应用效果,相对误差小于 2%,同时还具备较快的系统响应速度,部分性能指标优于目前市场上的同类产品。

关键词: 电磁流量计, 交流励磁, 微处理器, 专用芯片, 90° 干扰

Research and Development Hardware System for EMF Signal Converter

Abstract

The electromagnetic flow meter (EMF) is an effective instrument in measuring flows, which is one of the most important process variables for measurement and control in industries. With rapid development of the state economy, the demand for EMF has been growing rapidly in recent years. But foreign manufacturers in the measurement field have occupied domestic market; what is more, the technology of their products is strictly confidential. With the background of all the above, an EMF with technique intellectual property right of China was developed, and it could handle the very important problem of measuring the solid-liquid flows on line, such as pulp and paper, at the same time with low cost and high precision. The main works in the thesis are as follows:

1. The development of EMF in the world was summarized. After studying the excitation technique at present. Using the latest chip technique the thesis provided a whole low cost system of EMF signal converter with AC excitation, which was composed of special purpose chip, microprocessor, analog and digital circuit.
2. A hardware structure was provided after analyzing the performance of the hardware system. And seven function modules were designed, including analog signal processor, the interface between analog and digital, microprocessor control module, special purpose chip, input and output module, the interface of display module, power module and system structure design etc.
3. The system was designed with a special kernel handling complex logic with real time performance, and was encrypted. At the same time, combined with the analog signal process circuit and microprocessor, the system succeeds in filtering the AC noise under complex electromagnetism conditions. The system was designed based on Two Process structure of VHDL language. It has good inheriting, high expansibility, and it would make ASIC with low cost after more functions perfected.
4. The thesis implemented the conversion of signal in milli-voltage and elimination of in-phase noise combining traditional amplifier with programmable amplifier. At the same time, the limitation in conductance of

liquid is released.

5. An EMF signal converter is successfully developed for the sample, and passed not only the simulation test but also the real flow calibration. Compared with other EMF, it did well in measuring the impurity liquid with below 2% relative error and rapid response. It is much better than other EMF on the market with some performance specifications.

Key words: electromagnetic flow meter, AC excitation, ASIC, MCU, cross-interference, 90° disturbance

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：王军延

日期：2005.2.28

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

（如作者和导师同意网上交流，请在下方签名；否则视为不同意。）

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：

签字日期：

第1章 引言

1.1 研究背景

从信息科学看,检测技术是寻找与自然信息具有对应关系的各种表现形式的信号以及确定二者间的定性定量关系,并在一定条件下找出最合适表现形式以及最佳的采集、变换、处理、存贮等的方法、手段和相应设备。也就是要根据检测对象的特性和检测的具体问题,合理设计、科学组建控制系统,以正确使用各种检测工具、设备和检测方法,正确地进行测量。随着社会信息化的发展,作为检测对象信息特征的自动化检测仪表,其重要作用日益显著,它是流程工业乃至社会生活中的许多方面实现自动化的必要环节和技术工具,各种算法和控制方案的实现都必须依靠过程变量的准确获取。自动化检测仪表与控制理论一样,不仅会推动工业企业的自动化水平,也会影响控制理论的研究方向和内容。半个多世纪以来,依托于微电子技术、计算机技术和网络技术的迅猛发展,检测仪表从模拟式、电子式逐步向高精度、高可靠性、小型轻量化、数字化、智能化方向发展。

随着生产力水平的发展,生产过程对检测技术、检测工具、检测方法、检测理论等提出的要求会越来越高。迄今为止,检测技术在经历了几个重要历史时期的发展之后,作为自动化科学的一个重要分支,已经形成一门实用型、综合型的新兴边缘学科^[9]。信息化促进了自动化检测仪表的发展,特别是近些年来,流程工业现代集成制造系统(CIMS)的出现^[1],无论是从质量上,还是从数量上,都更加重视以过程状态量为中心的现场信息,更好的测量仪表,对流程工业生产过程的底层自动化产品质量和生产率的提高具有至关重要的作用。而对能量转换的研究是一切生产过程和科学实验的基础,在能量转换的过程中必须检测的三个参数就是流量、温度、压力。因此流量和压力、温度仪表一样得到广泛的应用。

流量测量中,各种物理原理是其理论基础,流量测量的原理按物理学科可分为:力学原理、电学原理、声学原理、原子物理原理以及其他原理。其中应用伯努利定理的差压式、浮子式;应用流体振动原理的涡街式、旋进式;应用流体阻

第1章 引言

1.1 研究背景

从信息科学看,检测技术是寻找与自然信息具有对应关系的各种表现形式的信号以及确定二者间的定性定量关系,并在一定条件下找出最合适表现形式以及最佳的采集、变换、处理、存贮等的方法、手段和相应设备。也就是要根据检测对象的特性和检测的具体问题,合理设计、科学组建控制系统,以正确使用各种检测工具、设备和检测方法,正确地进行测量。随着社会信息化的发展,作为检测对象信息特征的自动化检测仪表,其重要作用日益显著,它是流程工业乃至社会生活中的许多方面实现自动化的必要环节和技术工具,各种算法和控制方案的实现也都必须依靠过程变量的准确获取。自动化检测仪表与控制理论一样,不仅会推动工业企业的自动化水平,也会影响控制理论的研究方向和内容。半个多世纪以来,依托于微电子技术、计算机技术和网络技术的迅猛发展,检测仪表从模拟式、电子式逐步向高精度、高可靠性、小型轻量化、数字化、智能化方向发展。

随着生产力水平的发展,生产过程对检测技术、检测工具、检测方法、检测理论等提出的要求会越来越高。迄今为止,检测技术在经历了几个重要历史时期的发展之后,作为自动化科学的一个重要分支,已经形成一门实用型、综合型的新兴边缘学科^[9]。信息化促进了自动化检测仪表的发展,特别是近些年来,流程工业现代集成制造系统(CIMS)的出现^[1],无论是从质量上,还是从数量上,都更加重视以过程状态量为中心的现场信息,更好的测量仪表,对流程工业生产过程的底层自动化产品质量和生产率的提高具有至关重要的作用。而对能量转换的研究是一切生产过程和科学实验的基础,在能量转换的过程中必须检测的三个参数就是流量、温度、压力。因此流量和压力、温度仪表一样得到广泛的应用。

流量测量中,各种物理原理是其理论基础,流量测量的原理按物理学科可分为:力学原理、电学原理、声学原理、原子物理原理以及其他原理。其中应用伯努利定理的差压式、浮子式;应用流体振动原理的涡街式、旋进式;应用流体阻

力原理的靶式等等，都属于力学原理。应用电学原理测量流量的有电磁式、电容式、电感式、电阻式等。应用声学原理测量流量的有超声式、声学式。应用原子物理原理测量流量的有核磁共振式、核辐射式等。其他原理热学原理、光学原理等。各种测量原理的流量计中，市场占有比率最大的是差压变送流量计，然后是电磁流量计，容积式流量计，涡街流量计。近些年，以电磁流量计、涡街流量计的发展较快。差压变送流量计的比率在不断下降。

电磁流量计 (EMF) 是根据法拉第电磁感应定律制成的一种测量导电性液体的仪表。当导电流体在磁场中作切割磁力线方向运动时，会感应产生一个其方向与磁场方向及流体流动方向相垂直的感应电动势，其值与磁感应强度及流体运动速度成正比。电磁流量计由传感器和转换器两部分组成，也可以做成一体式。电磁流量计有许多优良特性，可以解决其它流量计不易应用的问题，如脏污流、腐蚀流的测量，70、80 年代电磁流量在技术上有重大突破，使它成为应用广泛的一类流量计，在流量仪表中其使用量不断上升。其主要的优点：

1. EMF 的测量是通过一段无阻流检测件的光滑直管，因不易阻塞适用于测量含有固体颗粒或纤维的液固二相流体，如纸浆、煤水浆、矿浆、泥浆和污水等。
2. EMF 不产生因检测流量所形成的压力损失，仪表的阻力仅是同一长度管道的延程阻力，节能效果显著，对于要求低阻力损失的大管径供水管道最为合适。
3. EMF 所测得的体积流量，实际上不受流体密度、粘度、温度、压力和电导率（只要在某阈值上）明显变化的影响。
4. EMF 测量范围度大，通常为 20: 1~50: 1，可选流量范围宽。满度值液体流速可在 0.5~10m/s 内选定。有些型号仪表可在现场根据需要扩大和缩小流量，不必取下作离线实流标定。
5. EMF 的口径范围比其他品种流量仪表宽，从几毫米到 3m。与其它大部分流量仪表相比，前置直管段要求较低。
6. 可测正反双向流量，也可测脉动流量，只要脉动频率低于激磁频率很多。仪表输出本质上是线性的。
7. 易于选择与流体接触件材料品、，可应用于腐蚀性流体。

电磁流量计 (EMF) 也有它的局限性，如 EMF 不能测量电导率很低的液体（石油制品和有机溶剂等）；不能测量气体、蒸汽和含有较大气泡的液体；通用 EMF 由

于衬里材料和电气绝缘材料限制，不能用于较高温度的液体。

1.2 电磁流量计的发展

1831 年，法拉第发现了电磁感应定律，次年，法拉第在英国泰晤士河滑铁卢的两头放下两根电极，想利用地球的地磁场，以河水作为导体测量河水的流量。这就是世界上最早的一次电磁流量计试验。若干年后，1917 年，史密斯和斯皮雷安曾将电磁感应原理用于制造船舶测速仪，并推荐应用交流磁场来消除极化作用。这就开辟了电磁测速仪在海洋学上的应用。1922 年，威廉斯 Williams E. J. 等对电磁流量计的工作原理进行了数学解析，分析了被测液体的流速在测量管横断面上各个点分布的不均匀性，以及液体的电导率对感应电势的影响，同时也揭示了在电磁流量计中可能产生干扰的一些原因。自此以后，才有了比较系统的电磁流量计的基础理论。但当时的研究大多是理论上的分析，还不能做出有实用价值的仪器。

1937 年 Kolin A. 成功地测量血管流量。1941 年 Thuelemann 和 1954 年 Shercliff 研究了电磁流量计的性能，建立了均匀磁场和点电极理论的标准模型^[21]，发现只要流速分布为径向对称，那么测量电压与管道中的流速分布就无关。50 年代初电磁流量计实现了工业化应用，荷兰 Tobi (Altometer 公司前身) 道德推出流程工业用商品，成为较早进入成熟应用的新一代流量仪表。1961 年德国 Krohne 公司把电磁流量计应用于工业。1963 年研制出电磁流量计所使用的变送器。1972 年开发出第一台采用方波磁场的电磁流量计。1996 年制作了测量未充满管流体的电磁流量计。据统计，近年世界范围电磁流量计约占工业流量仪表台数的 5% 到 6.5%，1994 年全球产量估计为 95000 到 125000 台。到 1998 年，已有 200 万台电磁流量计投入使用。国内首台由上海光华仪表厂于 1960 年向社会提供产品，1994 年产量估计在 8500 到 10000 台之间。

1.3 电磁流量计的励磁技术

人们开始研究电磁流量计时，最先想到使用的励磁磁场自然是直流磁场，后来又研究发展了正弦交流磁场、低频矩形波磁场、三值低频矩形波磁场以及双频

于衬里材料和电气绝缘材料限制，不能用于较高温度的液体。

1.2 电磁流量计的发展

1831 年，法拉第发现了电磁感应定律，次年，法拉第在英国泰晤士河滑铁卢的两头放下两根电极，想利用地球的地磁场，以河水作为导体测量河水的流量。这就是世界上最早的一次电磁流量计试验。若干年后，1917 年，史密斯和斯皮雷安曾将电磁感应原理用于制造船舶测速仪，并推荐应用交流磁场来消除极化作用。这就开辟了电磁测速仪在海洋学上的应用。1922 年，威廉斯 Williams E. J. 等对电磁流量计的工作原理进行了数学解析，分析了被测液体的流速在测量管横断面上各个点分布的不均匀性，以及液体的电导率对感应电势的影响，同时也揭示了在电磁流量计中可能产生干扰的一些原因。自此以后，才有了比较系统的电磁流量计的基础理论。但当时的研究大多是理论上的分析，还不能做出有实用价值的仪器。

1937 年 Kolin A. 成功地测量血管流量。1941 年 Thuelemann 和 1954 年 Shercliff 研究了电磁流量计的性能，建立了均匀磁场和点电极理论的标准模型^[21]，发现只要流速分布为径向对称，那么测量电压与管道中的流速分布就无关。50 年代初电磁流量计实现了工业化应用，荷兰 Tobi (Altometer 公司前身) 道德推出流程工业用商品，成为较早进入成熟应用的新一代流量仪表。1961 年德国 Krohne 公司把电磁流量计应用于工业。1963 年研制出电磁流量计所使用的变送器。1972 年开发出第一台采用方波磁场的电磁流量计。1996 年制作了测量未充满管流体的电磁流量计。据统计，近年世界范围电磁流量计约占工业流量仪表台数的 5% 到 6.5%，1994 年全球产量估计为 95000 到 125000 台。到 1998 年，已有 200 万台电磁流量计投入使用。国内首台由上海光华仪表厂于 1960 年向社会提供产品，1994 年产量估计在 8500 到 10000 台之间。

1.3 电磁流量计的励磁技术

人们开始研究电磁流量计时，最先想到使用的励磁磁场自然是直流磁场，后来又研究发展了正弦交流磁场、低频矩形波磁场、三值低频矩形波磁场以及双频

于衬里材料和电气绝缘材料限制,不能用于较高温度的液体。

1.2 电磁流量计的发展

1831 年,法拉第发现了电磁感应定律,次年,法拉第在英国泰晤士河滑铁卢的两头放下两根电极,想利用地球的地磁场,以河水作为导体测量河水的流量。这就是世界上最早的一次电磁流量计试验。若干年后,1917 年,史密斯和斯皮雷安曾将电磁感应原理用于制造船舶测速仪,并推荐应用交流磁场来消除极化作用。这就开辟了电磁测速仪在海洋学上的应用。1922 年,威廉斯 Williams E. J. 等对电磁流量计的工作原理进行了数学解析,分析了被测液体的流速在测量管横断面上各个点分布的不均匀性,以及液体的电导率对感应电势的影响,同时也揭示了在电磁流量计中可能产生干扰的一些原因。自此以后,才有了比较系统的电磁流量计的基础理论。但当时的研究大多是理论上的分析,还不能做出有实用价值的仪器。

1937 年 Kolin A. 成功地测量血管流量。1941 年 Thuelemann 和 1954 年 Shercliff 研究了电磁流量计的性能,建立了均匀磁场和点电极理论的标准模型^[2],发现只要流速分布为径向对称,那么测量电压与管道中的流速分布就无关。50 年代初电磁流量计实现了工业化应用,荷兰 Tobi (Altometer 公司前身)道德推出流程工业用商品,成为较早进入成熟应用的新一代流量仪表。1961 年德国 Krohne 公司把电磁流量计应用于工业。1963 年研制出电磁流量计所使用的变送器。1972 年开发出第一台采用方波磁场的电磁流量计。1996 年制作了测量未满管流体的电磁流量计。据统计,近年世界范围电磁流量计约占工业流量仪表台数的 5%到 6.5%,1994 年全球产量估计为 95000 到 125000 台。到 1998 年,已有 200 万台电磁流量计投入使用。国内首台由上海光华仪表厂于 1960 年向社会提供产品,1994 年产量估计在 8500 到 10000 台之间。

1.3 电磁流量计的励磁技术

人们开始研究电磁流量计时,最先想到使用的励磁磁场自然是直流磁场,后来又研究发展了正弦交流磁场、低频矩形波磁场、三值低频矩形波磁场以及双频来又研究发展了正弦交流磁场、低频矩形波磁场、三值低频矩形波磁场以及双频

矩形波磁场等技术。

1.3.1 直流励磁技术

电磁流量计最初采用的是直流励磁技术，它是利用永磁体或者直流电源给电磁流量传感器励磁绕组供电，以形成恒定的直流磁场。直流励磁技术具有方法简单可靠、受工频干扰影响很小、流体中的自感现象可以忽略不计等特点。

但也存在如下问题：

1. 最大的问题是直流感应电势在两电极表面上形成固定的正负极性，引起被测流体介质电解而产生正负离子，导致电极表面极化现象，使感生的流量信号电势减弱，电极间等效电阻增大，同时出现电极极化电势漂移，严重影响信号处理部分的工作。即使电极采用极化电势很小的铂、金等贵金属或其合金材料，常常也存在微弱的极化电势，同时仪表的制造成本也较高。
2. 直流励磁在电磁间产生不均衡的电化学干扰电势叠加在直流流量信号中，无法消除，并随着时间的变化、流体体质特性以及流动状态而变化。
3. 直流放大器的零点漂移、噪声和稳定性问题难以获得很好解决，特别是在小流量测量时，信号放大器的直流稳定度必须在几分之一微伏之内，这样就限制了直流励磁技术的应用范围。

目前直流励磁技术仅在原子能工业中用于电导率极高，而又不产生极化效应的液态金属流量测量中。

1.3.2 工频正弦波励磁技术

工频正弦波励磁技术是利用工频（50Hz）电源给电磁流量传感器励磁绕组供电，其主要特点如下：

1. 所产生的磁场为一正弦波交变磁场，能够基本上消除电极表面的极化现象，降低电极电化学电势的影响和传感器内阻。
2. 流量信号仍然是工频正弦波信号，易于放大处理，能避免直流放大所

矩形波磁场等技术。

1.3.1 直流励磁技术

电磁流量计最初采用的是直流励磁技术，它是利用永磁体或者直流电源给电磁流量传感器励磁绕组供电，以形成恒定的直流磁场。直流励磁技术具有方法简单可靠、受工频干扰影响很小、流体中的自感现象可以忽略不计等特点。

但也存在如下问题：

1. 最大的问题是直流感应电势在两电极表面上形成固定的正负极性，引起被测流体介质电解而产生正负离子，导致电极表面极化现象，使感生的流量信号电势减弱，电极间等效电阻增大，同时出现电极极化电势漂移，严重影响信号处理部分的工作。即使电极采用极化电势很小的铂、金等贵金属或其合金材料，常常也存在微弱的极化电势，同时仪表的制造成本也较高。
2. 直流励磁在电磁间产生不均衡的电化学干扰电势叠加在直流流量信号中，无法消除，并随着时间的变化、流体体质特性以及流动状态而变化。
3. 直流放大器的零点漂移、噪声和稳定性问题难以获得很好解决，特别是在小流量测量时，信号放大器的直流稳定度必须在几分之一微伏之内，这样就限制了直流励磁技术的应用范围。

目前直流励磁技术仅在原子能工业中用于电导率极高，而又不产生极化效应的液态金属流量测量中。

1.3.2 工频正弦波励磁技术

工频正弦波励磁技术是利用工频（50Hz）电源给电磁流量传感器励磁绕组供电，其主要特点如下：

1. 所产生的磁场为一正弦波交变磁场，能够基本上消除电极表面的极化现象，降低电极电化学电势的影响和传感器内阻。
2. 流量信号仍然是工频正弦波信号，易于放大处理，能避免直流放大所

存在的实际困难。

励磁电源简单方便值得注意的是，工频正弦波励磁技术的采用会带来一系列电磁干扰和噪声：

首先是电磁感应产生正交干扰（又称 90° 干扰），一般认为正交干扰是由“变压器效应”造成的。在电磁流量传感器中，由于电极、引线、被测介质和电磁流量转换器的输入电路构成的闭合回路处在—交变的磁场中，所以，即使被介质不流动，处于该交变磁场中的闭合回路也会产生感生电势 e_i 和感生电流，显然，这是一干扰电势。根据电磁感应原理，由式（2-25）可知该干扰电动势与磁场对时间的变率的负值成正比。

这就是正交干扰信号电势，它具有以下几特点：

1. 与流量无关，即使流体静止不动，这样的信号依然存在；
2. 在相位上比流量信号滞后 90° ，故也称 90° 干扰；
3. 励磁电流频率越高，正交干扰也越严重实际应用中，正交干扰信号可以远大于流量信号。

所以如何克服正交干扰电势的影响是工频正弦波励磁技术的主要课题。

其次是同相干扰，即同时出现在传感器两个电极上，频率和相位都与流量信号一致的干扰信号。一般认为是静电感应、绝缘电阻分压以及传感器管道上的杂散电流所引起。

另外，磁回路中铁损偏移了激磁电流与磁场间相位，使原来在信号回路中变压器效应所形成的正交噪声相移，产生同相噪声；励磁线圈与信号线之间以及励磁线圈与流体间还会产生静电感应噪声。电源波动工频正弦波供电电源存在电源电压和频率的波动，造成对测量的影响。

实际应用中，虽然已采取相敏整流、严格的电磁屏蔽和线路补偿、电源补偿、自动正交抑制系统技术措施以消除与流量信号频率一致的工频干扰电压，但由于正交干扰信号电势往往有较大幅值，自动正交抑制系统等抗干扰措施不可能完全消除干扰信号，从而导致电磁流量计零点的不稳定，测量精度难以提高。这就是工频正弦波励磁方式对电磁流量计的限制，使得电磁流量计的性能很难进一步提高。

1.3.3 低频矩形波励磁技术

低频矩形波励磁技术是结合了直流励磁和交流励磁技术的优点，同时避免了它们的缺点的一种励磁技术。20 世纪 70 年代以来，随着集成电路技术和同步采样技术的发展和实用化，低频矩形波励磁技术应运而生，在电磁流量计中得到广泛使用。它的励磁磁场频率通常为工频的偶数分之一（一般为 $1/2$ 到 $1/32$ ）。70 年代前期以单极性低频矩形波励磁技术为主，后期以双极性低频矩形波励磁技术为主而开始其工业应用^[14]。

在半个同期内，磁场是一恒稳的直流磁场，它具有直流励磁技术受电磁干扰影响小，不产生涡流效应、正交干扰和同相干扰小等特点；从整个时间过程看，矩形波信号又是一个交变信号，具有正弦波励磁技术基本不产生极化现象，便于放大和处理信号，避免直流放大器零漂移、噪声、稳定性等问题的优点。所以低频矩形波励磁技术具有良好的抗干扰性能，在电磁流量计中已得到广泛应用。

在低频矩形波励磁中，由于励磁电流矩形波存在上升沿和下降沿，在上升沿和下降沿处，必然也存在正交干扰（微分干扰）。其沿越陡，微分干扰电势越大，但很快就会消失，形成一个很窄的尖峰脉冲；上升沿和下降沿变化越缓慢，则微分干扰越小，但经历时间越长。

如何消除上升沿和下降沿处的微分干扰，是低频矩形波励磁技术要解决的主要问题之一。由于一般电磁流量传感器励磁绕组中电感和电阻的比值 L/R 往往较小。随着励磁电流进入稳态，微分干扰也很快能自动消失。所以，为了排除微分干扰对流量信号的影响，通常在励磁电流进入稳态的恒定阶段（即矩形波的平顶部分）后，再对流量信号电压进行同步采样。这样，微分干扰信号不能进入同步采样，因此也不影响流量信号输出。此外，同步采样脉冲相对工频来说是一宽脉冲，并选择为工频周期或工频周期的整数倍，这样，即使流量信号中混有工频干扰信号，因其采样时间为完整的工频周期，其平均值为零，工频干扰电压不起作用。另一方面由于励磁频率低，涡电流很小，静电耦合分布电容的影响很小，所以，由于静电感应而产生的同相干扰也大减小。综上所述，低频矩形波励磁方式有以下几个优点：

1. 能避免正弦波交流磁场的正交干扰；

2. 基本消除由分布电容引起的工频干扰;
3. 能抑制交流磁场在管壁和流体内引起的涡电流;
4. 能消除直流磁场的极化现象。

低频矩形波励磁技术的采用,解决了长期困扰电磁流量计的电磁干扰总是大提高了电磁流量计的零点稳定性和测量精度,缩小传感器的体积,降低励磁功率,使转换器和传感器一体化,提高电磁流量计的整体性能,拓宽了电磁流量计的工业应用领域。

1.3.4 三值低频矩形波励磁技术

三值低频矩形波励磁技术是人们在总结低频矩形波励磁技术的基础上,为了使仪表零点稳定而提出的一种励磁技术,其最大的特点是实现在过零时动态校正零点,因而具有更优良的零点稳定性^[10]。

三值低频矩形波励磁方式的励磁电流一般采用工频的 1/8 频率,通过正—零—负—零—正变化规律的三种状态进行采样和处理。

其首要的特点是能在过零时动态校正零点,有效地消除了流量信号的零位噪声,从而大大提高了仪表零位的稳定性;

其次它与低频矩形波励磁技术相同,可以采用同步采样技术消除混在流量信号中的工频干扰信号;

第三,它可以通过一个周期内的四次采样值,近似认为极化电势恒定,利用微处理器的数值运算功能得以消除极化电势的影响。

所以采用三值低频矩形波励磁技术的电磁流量计零点稳定,抗工频能力强,测量精度进一步提高,传感器单位流速的流量信号电压可降低到工频励磁方式时的 1/4,可进一步降低励磁功耗,实现电磁流量计的小型轻量一体化,在电磁流量计中已得到广泛应用^[7]。

1.3.5 双频矩形波励磁技术

三值低频矩形波励磁方式具有优良的零点稳定性,但在测量泥浆、纸浆等含纤维和固体颗粒的流体介质和低电导率流体流量时,出现固体颗粒擦过电极表面

2. 基本消除由分布电容引起的工频干扰;
3. 能抑制交流磁场在管壁和流体内引起的涡电流;
4. 能消除直流磁场的极化现象。

低频矩形波励磁技术的采用, 解决了长期困扰电磁流量计的电磁干扰总是大提高了电磁流量计的零点稳定性和测量精度, 缩小传感器的体积, 降低励磁功率, 使转换器和传感器一体化, 提高电磁流量计的整体性能, 拓宽了电磁流量计的工业应用领域。

1.3.4 三值低频矩形波励磁技术

三值低频矩形波励磁技术是人们在总结低频矩形波励磁技术的基础上, 为了使仪表零点稳定而提出的一种励磁技术, 其最大的特点是实现在过零时动态校正零点, 因而具有更优良的零点稳定性^[10]。

三值低频矩形波励磁方式的励磁电流一般采用工频的 1/8 频率, 通过正—零—负—零—正变化规律的三种状态进行采样和处理。

其首要的特点是能在过零时动态校正零点, 有效地消除了流量信号的零位噪声, 从而大大提高了仪表零位的稳定性;

其次它与低频矩形波励磁技术相同, 可以采用同步采样技术消除混在流量信号中的工频干扰信号;

第三, 它可以通过一个周期内的四次采样值, 近似认为极化电势恒定, 利用微处理器的数值运算功能得以消除极化电势的影响。

所以采用三值低频矩形波励磁技术的电磁流量计零点稳定, 抗工频能力强, 测量精度进一步提高, 传感器单位流速的流量信号电压可降低到工频励磁方式时的 1/4, 可进一步降低励磁功耗, 实现电磁流量计的小型轻量一体化, 在电磁流量计中已得到广泛应用^[7]。

1.3.5 双频矩形波励磁技术

三值低频矩形波励磁方式具有优良的零点稳定性, 但在测量泥浆、纸浆等含纤维和固体颗粒的流体介质和低电导率流体流量时, 出现固体颗粒擦过电极表面

2. 基本消除由分布电容引起的工频干扰;
3. 能抑制交流磁场在管壁和流体内引起的涡电流;
4. 能消除直流磁场的极化现象。

低频矩形波励磁技术的采用, 解决了长期困扰电磁流量计的电磁干扰总是大提高了电磁流量计的零点稳定性和测量精度, 缩小传感器的体积, 降低励磁功率, 使转换器和传感器一体化, 提高电磁流量计的整体性能, 拓宽了电磁流量计的工业应用领域。

1.3.4 三值低频矩形波励磁技术

三值低频矩形波励磁技术是人们在总结低频矩形波励磁技术的基础上, 为了使仪表零点稳定而提出的一种励磁技术, 其最大的特点是实现在过零时动态校正零点, 因而具有更优良的零点稳定性^[10]。

三值低频矩形波励磁方式的励磁电流一般采用工频的 1/8 频率, 通过正—零—负—零—正变化规律的三种状态进行采样和处理。

其首要的特点是能在过零时动态校正零点, 有效地消除了流量信号的零位噪声, 从而大大提高了仪表零位的稳定性;

其次它与低频矩形波励磁技术相同, 可以采用同步采样技术消除混在流量信号中的工频干扰信号;

第三, 它可以通过一个周期内的四次采样值, 近似认为极化电势恒定, 利用微处理器的数值运算功能得以消除极化电势的影响。

所以采用三值低频矩形波励磁技术的电磁流量计零点稳定, 抗工频能力强, 测量精度进一步提高, 传感器单位流速的流量信号电压可降低到工频励磁方式时的 1/4, 可进一步降低励磁功耗, 实现电磁流量计的小型轻量一体化, 在电磁流量计中已得到广泛应用^[7]。

1.3.5 双频矩形波励磁技术

三值低频矩形波励磁方式具有优良的零点稳定性, 但在测量泥浆、纸浆等含纤维和固体颗粒的流体介质和低电导率流体流量时, 出现固体颗粒擦过电极表面

而产生低频尖峰噪声和流体流动噪声，这样往往导致励磁频率较低的三值励磁电磁流量计输出摆动不稳。

三值低频矩形波励磁零点稳定，但无法抑制低频噪声；较高频率的矩形波磁场能消除低频噪声，但一般其零点稳定性欠佳。人们在分析各种励磁技术的基础上，提出了双频矩形波励磁技术^{[19][20]}。高频部分是 75Hz 的矩形波，外包络线是 1/8 工频的低频矩波。采用这种励磁方式，可用高频波采样来消除含纤维和固体颗粒流体介质的低频噪声，同时又保持了低频矩形波励磁零点稳定的优点，取得了很好的应用效果。

1.4 电磁流量计的发展趋势与进展

电磁流量计自五十年代进入工业应用以来，经历了直流励磁、工频交流励磁、低频矩形波励磁、三值低频矩形波励磁、双频矩形波励磁等几个阶段。由于受早期电子技术的局限性，有些励磁技术的优越性并没有得到充分的应用，近年来，随着电子技术、特别是微处理器相关产品的迅速应用，也使得电磁流量计的性能得到很快的提高，改进的双频励磁技术，非满管电磁流量计的问世，以及两线制低功耗电磁流量计的出现都证实了相关数字产品，如高性能微处理器、D S P、F P G A 等对电磁流量计产品设计影响。也使电磁流量计的应用范围不断拓宽：

非满管电磁流量计应用于具有自由表面自然流的下水排放领域，提高了该领域的测量精确度，将传统非满管自然流或明渠流流量误差从 $\pm 3\% \sim 5\%$ 降低到 $\pm 1\% \sim 2\%$ ，自 1992 年 Fischer & Porter 公司首家向市场推出非满管自然流电磁流量计以来，到 1996 年还有爱知时计(1994)、东芝(1995)、Krohne(1996)共四家向社会提供该类仪表^{[4][19]}。

测量更低电导率的液体：可测量比传统电磁流量计电导率阈值低 2-3 个数量级的液体，以前不能测量的甘油、乙二醇等现在都能测量^[6]。日立制作所于 1992 年首先提供可测量电导率不小于 10^{-8} s/cm 的电容电极信号检出的电磁流量计。该类仪表的大面积电极不与被测液体接触，紧贴在衬里外表面，以电容耦合方式检出流量信号，因此亦有称之无电极电磁流量计。除可测低电导率液体的特点外，还因不会产生电极钝化等表面效应所形成的浆液噪声和流动噪声，适用于测量浆

而产生低频尖峰噪声和流体流动噪声, 这样往往导致励磁频率较低的三值励磁电磁流量计输出摆动不稳。

三值低频矩形波励磁零点稳定, 但无法抑制低频噪声; 较高频率的矩形波磁场能消除低频噪声, 但一般其零点稳定性欠佳。人们在分析各种励磁技术的基础上, 提出了双频矩形波励磁技术^{[19][20]}。高频部分是 75Hz 的矩形波, 外包络线是 1/8 工频的低频矩波。采用这种励磁方式, 可用高频波采样来消除含纤维和固体颗粒流体介质的低频噪声, 同时又保持了低频矩形波励磁零点稳定的优点, 取得了很好的应用效果。

1.4 电磁流量计的发展趋势与进展

电磁流量计自五十年代进入工业应用以来, 经历了直流励磁、工频交流励磁、低频矩形波励磁、三值低频矩形波励磁、双频矩形波励磁等几个阶段。由于受早期电子技术的局限性, 有些励磁技术的优越性并没有得到充分的应用, 近年来, 随着电子技术、特别是微处理器相关产品的迅速应用, 也使得电磁流量计的性能得到很快的提高, 改进的双频励磁技术, 非满管电磁流量计的问世, 以及两线制低功耗电磁流量计的出现都证实了相关数字产品, 如高性能微处理器、D S P、F P G A 等对电磁流量计产品设计影响。也使电磁流量计的应用范围不断拓宽:

非满管电磁流量计应用于具有自由表面自然流的下水排放领域, 提高了该领域的测量精确度, 将传统非满管自然流或明渠流流量误差从 $\pm 3\% \sim 5\%$ 降低到 $\pm 1\% \sim 2\%$, 自 1992 年 Fischer & Porter 公司首家向市场推出非满管自然流电磁流量计以来, 到 1996 年还有爱知时计(1994)、东芝(1995)、Krohne(1996)共四家向社会提供该类仪表^{[4][19]}。

测量更低电导率的液体: 可测量比传统电磁流量计电导率阈值低 2-3 个数量级的液体, 以前不能测量的甘油、乙二醇等现在都能测量^[6]。日立制作所于 1992 年首先提供可测量电导率不小于 10^{-8} s/cm 的电容电极信号检出的电磁流量计。该类仪表的大面积电极不与被测液体接触, 紧贴在衬里外表面, 以电容耦合方式检出流量信号, 因此亦有称之无电极电磁流量计。除可测低电导率液体的特点外, 还因不会产生电极钝化等表面效应所形成的浆液噪声和流动噪声, 适用于测量浆

液。到 1997 年, 有 Fischer & Porter(1994)、横河电机(1995)、Krohne(1997) 共 4 家提供该类产品。

低功耗和两线制电磁流量计发展较快^[5]: 低功耗电磁流量计使采用干电池或太阳能电池成为可能, 更方便地将电磁流量计用于无市电供电的场所。传统分体型电磁流量计中流量传感器和转换器间, 分别有两根励磁电流线和流量信号线分开传送, 称作四线制。二线制电磁流量计在流量传感器和转换器间只有两根信号线, 励磁电流则由 4 ~ 20mA 直流输出流量信号中零信号输出 (即 4mA) 供给。二线制电磁流量计早在 1983 年就由 (日) 爱知時計公司开发, 但应用并不普遍。这是由于励磁电流减小 (减小 20 ~ 50 倍), 降低了流量信号, 信噪比劣化, 影响测量精度和稳定性等, 性能尚待提高。近 7-8 年世界著名电磁流量计制造厂 (如 Baily Fischer & Porter、Endress and Hauser、Krohne、山武、东芝、日立) 相继开发二线制电磁流量计投放市场, 其应用日益增长。2002 年, 原 Baily Fischer and Porter (现并入 ABB) 已销售 1300 台, 约占其电磁流量计销售总台数的 3% ~ 4%。山武公司 2003 年 8 月著文透露 2003 年预计可销售二线制电磁流量计 2000 台, 约占电磁流量计销售台数的 1/6, 声称将成为世界第一位二线制电磁流量计供应商。Krohne 公司 2001 生产出第一台二线制电磁流量计, 适应于各种应用, 最优化智能供电, 极佳的信噪比。

二维电磁流速计和多测量点插入式电磁流量计: 置于船体外部的船舶电磁航速仪是插入式电磁流量计的雏形。后来插入式电磁流量计在大中型管道中有较大发展, 也有用于明渠, 称作电磁流速计 (electromagnetic current meter)。但在河道流或水利试验模型不仅要测量流速还要知道流速方向。二维电磁流速计又称向量流速计, 使电磁流量仪表族可以进入水文试验应用领域。此外插入式电磁流量计还参照均速管的设计思路, 在插入杆上置多套电磁流速测量单元, 提高测量精度, 使插入式电磁流速计在大管径应用领域处于有利地位。

从电磁流量计的发展趋势, 我们看到电磁流量计原理性的理论以及本完善, 目前电磁流量计的研制也是以改进励磁方式、提高部分功能环节的性能以及数字化设计着手。而对交流励磁技术的分析, 我们了解到其在含固态悬浮液的二相流测量中的良好表现, 确定电磁流量计以交流励磁方式。

1.5 本文主要研究内容

1. 对电磁流量计领域的国内外发展状况进行了全面系统的综述, 分析了目前励磁技术的原理, 确立了以交流励磁作为电磁流量计的励磁方式, 并结合目前先进的芯片技术, 进行了电磁流量计信号转换器系统的整体设计, 提出了以专用芯片、微处理器、模拟信号处理器为架构的电磁流量计信号转换器的低成本方案;
2. 分析电磁流量计信号转换器硬件实现所需功能, 提出了硬件系统设计架构, 设计了模拟信号处理器、模数转换接口、微处理器控制模块、专用芯片、输入输出模块、显示模块接口、电源模块以及系统结构设计等七部分功能模块。
3. 提出了以专用芯片为核心, 实现高实时性复杂逻辑处理的同时, 起到加密的作用。并与模拟信号处理器、微处理器相结合, 实现了抑制交流励磁传感器在复杂电磁环境下的正交干扰。芯片设计采用基于 VHDL 语言的二进程结构描述复杂逻辑事件方法, 继承性扩展性强, 更着眼于功能完善之后的批量低成本 ASIC。
4. 采用传统差动运算放大器和可编程放大结合方法实现毫伏级信号的转换以及同相干扰的克服, 扩大了对流体电阻率的限制。
5. 基于上述设计, 完成了电磁流量计信号转换器硬件系统的开发、调试, 科研样机, 并进行实验测试。硬件系统的运行取得了预期的效果, 通过在实验装置上的比对实验, 证明其对于含固体颗粒流体的测量具有良好的应用效果, 相对误差小于 2%, 同时还具备较快的系统响应速度, 部分性能指标优于目前市场上的同类产品。

第2章 电磁流量计信号转换器整体设计

2.1 电磁流量计工作原理

据法拉第电磁感应定律,当导体横切磁场移动时,在导体中感应出与速度成正比的电压,电磁流量计就是按这条电磁感应定律求得流体的流速和流量的。在电磁流量计实际应用中,导体就是导电液体,当导电液体流过电磁流量计时,导体中会产生感应电动势,其感应电动势与导电液体的流速、磁感应强度、导体宽度(流量计内径)成正比^[22]。以 $V(m/s)$ 表示导电液体的流速, $d(m)$ 表示导电液体流过的管子直径, $B(T)$ 表示导电液体所处的磁场, e_s 表示感应电动势,那么电磁流量计的应用原理图如图 2.1 所示。

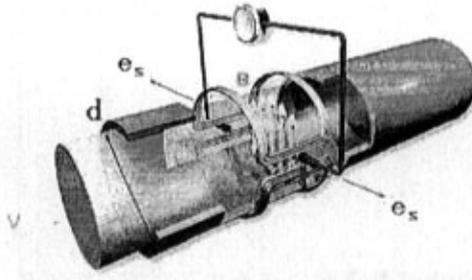


图 2.1 基本原理

Fig. 2.1 Basic principle

在推导表述电磁流量计的原理和特征的基本方程式时,先作以下几个基本假设:

1. 均流体的磁导率 μ 均匀,且同真空中是一样的。
2. 流体的电导率是均匀的,各向同性的,符合欧姆定律。根据该假设有:

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B})$$

(2-1)

式中, j 为电流密度; σ 为电导率, E 为电场强度; B 为磁场强度; V 为流体

第2章 电磁流量计信号转换器整体设计

2.1 电磁流量计工作原理

据法拉第电磁感应定律，当导体横切磁场移动时，在导体中感应出与速度成正比的电压，电磁流量计就是按这条电磁感应定律求得流体的流速和流量的。在电磁流量计实际应用中，导体就是导电液体，当导电液体流过电磁流量计时，导体中会产生感应电动势，其感应电动势与导电液体的流速、磁感应强度、导体宽度（流量计内径）成正比^[22]。以 $V(m/s)$ 表示导电液体的流速， $d(m)$ 表示导电液体流过的管子直径， $B(T)$ 表示导电液体所处的磁场， e_s 表示感应电动势，那么电磁流量计的应用原理图如图 2.1 所示。

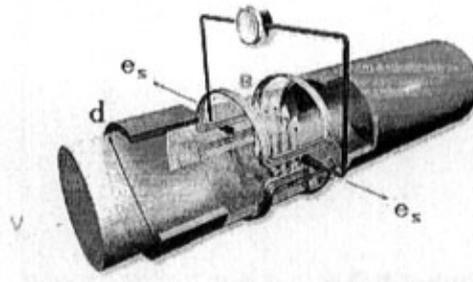


图 2.1 基本原理

Fig. 2.1 Basic principle

在推导表述电磁流量计的原理和特征的基本方程式时，先作以下几个基本假设：

1. 均流体的磁导率 μ 均匀，且同真空中是一样的。
2. 流体的电导率是均匀的，各向同性的，符合欧姆定律。根据该假设有：

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B})$$

(2-1)

式中， j 为电流密度； σ 为电导率， E 为电场强度； B 为磁场强度； V 为流体

速度（以上均为矢量）。

电场 E 是基于流体内外存在着电荷而存在的量，第二项 $V \times B$ 是因磁易中流体运动引起的电磁感应。

流体中的位移电流可以忽略。

当角频率为 ω 、流体的介电常数为 ϵ 时，若 $\omega \epsilon / \sigma \ll 1$ ，位移电流可以忽略。水或水溶液可满足这一条件。反之，对于 $\sigma \approx 0$ 的油类， ω 较高，所以位移电流占主要地位。

除了欧姆定律以外，我们还从麦克斯韦尔方程式为出发点，即：

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2-2)$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2-3)$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad \text{div} \vec{B} = 0 \quad (2-4)$$

式中， $D = \epsilon E$ 为电通量密度； ρ 为电荷密度； $B = \mu H$ 。

式（2-2）右边的 $\partial B / \partial t$ ，如果是交流磁场，可用相位差来判别，如果是恒定磁场，则可忽略。同时，根据假设 3），忽略其位移电流 $\partial D / \partial t$ ，就得到：

$$\text{rot} \vec{E} = 0 \quad (2-5)$$

$$\text{rot} \vec{B} = \mu \vec{j} \quad (2-6)$$

从式（2-5）可以判定存在着由式（2-7）定义的电位 U ：

$$\vec{E} = -gradU \tag{2-7}$$

当没有产生电流 j 的源点（电流源）时，

$$div\vec{j} = 0 \tag{2-8}$$

由式（2-1）和式（2-8）得：

$$div\vec{E} + div(\vec{V} \times \vec{B}) = 0 \tag{2-9}$$

由式（2-7）和式（2-9）得：

$$\nabla^2 U = div(\vec{V} \times \vec{B}) = \vec{B}rot\vec{V} - \vec{V}rot\vec{B} \tag{2-10}$$

磁场不会因流体中感应电流而受到影响，所以式（2-10）的第二项为 0，得到：

$$\nabla^2 U = \vec{B}rot\vec{V} \tag{2-11}$$

式（2-10）或式（2-11）为电磁流量计的基本方程式。在适当的边界条件下，根据给定的 V 和 B 间的空间分布，就可求得流速矢量 V 和电位 U 的相对应关系。

假设，就可由式（2-11）的基本方程式推导出求电动势的公式。

管路的坐标是：在半径为 a 的圆管截面上象图 2.2 所示的那样取 $x-y$ 坐标轴。

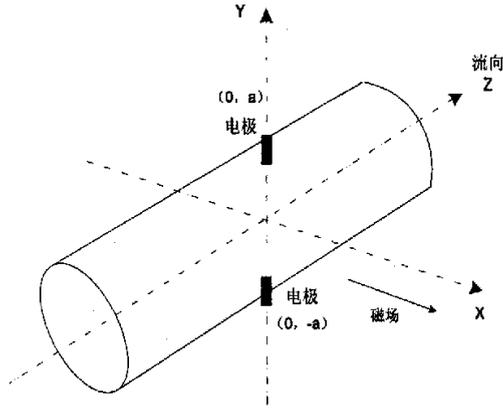


图 2.2 坐标轴取法

Fig. 2.2 Coordinates demonstration

电极设在 y 轴上的 $A(0, a, 0)$ 、 $B(0, -a, 0)$ 点上。电极面积小到可以忽略。
 仅考虑 z 轴方向的流动；
 在 x 方向上加磁场，假设 z 方向上是一样的；
 管壁为绝缘体，流体均匀；
 根据上述条件，由于 $v_x=v_y=0$ ， $B_z=0$ 。故可归结为二维问题

$$\nabla^2 U = B_x \frac{\partial v_z}{\partial y} - B_y \frac{\partial v_z}{\partial x}$$

(2-12)

讨论的问题为线性问题，电位可以重合，所以若将式 (2-12) 的格林函数取为 $G(x, y, \xi, \eta)$ ，则电位 U 为：

$$U = \iint_D G(x, y, \xi, \eta) \left\{ B_x \frac{\partial v_z}{\partial \eta} - B_y \frac{\partial v_z}{\partial \xi} \right\} d\xi d\eta$$

(2-13)

按照边界条件，在管壁 $r=a$ 时， $\partial U/\partial r=0$ 或流速 $=v_z=0$ 时，

式中， $r=(x^2+y^2)^{1/2}$

若取电极 A 、 B 的电位差为 e ，则对式 (2-13) 部分积分得

$$\begin{aligned}
 e &= U_A - U_B = U(0, a) - U(0, -a) \\
 &= \frac{2}{\pi a} \iint_D W_\eta B_x v_z d\xi d\eta + \frac{2}{\pi a} \iint_D W_\xi B_y v_z d\xi d\eta
 \end{aligned}
 \tag{2-14}$$

式中:

$$\begin{cases}
 W_\eta = \frac{a^2(a^2 + \xi^2 - \eta^2)}{a^4 + 2a^2(\xi^2 - \eta^2) + (\xi^2 + \eta^2)^2} \\
 W_\xi = \frac{2a^2\xi\eta}{a^4 + 2a^2(\xi^2 - \eta^2) + (\xi^2 + \eta^2)^2}
 \end{cases}
 \tag{2-15}$$

$\int \int_D d\xi d\eta$ 为在区域 D 的积分, 是在管路截面积上的面积分。

式 (2-14) 表示在磁场为任意分布 (在 z 方向上是均匀分布), 而流速分布对于 z 方向亦是任意分布时所给予的电动势。

W_ξ 、 W_η 是加权函数, 它表示对电极电动势的贡献大小。

在均匀磁场中, 流速轴对称分布的理想的情况下, 磁场强度仅有 x 分量, $B_x=B$, $B_y=0$, 式 (2-15) 的第 2 项为 0, 为简单起见, 以极坐标表示。

因为 $\xi = r \cos \theta$, $\eta = r \sin \theta$

故

$$\begin{cases}
 e = \frac{2}{\pi a} \int_0^a \int_0^{2\pi} W_\eta(r, \theta) \cdot B \cdot v(r) \cdot r d\theta dr \\
 W_\eta(r, \theta) = \frac{1 + (\frac{r}{a})^2 \cos 2\theta}{1 + 2(\frac{r}{a})^2 \cos 2\theta + (\frac{r}{a})^4}
 \end{cases}
 \tag{2-16}$$

令 $(r/a)^2 = R$, 利用 $1 + 2R \cos 2\theta + R^2 = (1 + R^{2i\theta})(1 + R^{-2i\theta})$ 的关系对 W_η 展开成分数, 再展开成无穷级数。

$$\begin{aligned}
 W_n(r, \theta) &= \frac{1 + R \cos 2\theta}{1 + 2R \cos 2\theta + R^2} \\
 &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1 + \operatorname{Re} e^{2i\theta}} + \frac{1}{1 + \operatorname{Re} e^{-2i\theta}} \right) \\
 &= \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{Re} e^{2i\theta} + (-R)^2 e^{4i\theta} + \dots + (-R)^n e^{2ni\theta} + \dots + 1 - \operatorname{Re} e^{-2i\theta} + \dots + (-R)^n e^{-2ni\theta} + \dots \right] \\
 &= 1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-R)^n \left(\frac{e^{2ni\theta} + e^{-2ni\theta}}{2} \right) \\
 &= 1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left(\frac{r}{a} \right)^{2n} \cos 2n\theta
 \end{aligned}$$

(2-17)

按式 (2-7) 展开式, 对 $W_n(r, \theta)$ 中的 θ 从 0 到 2π 进行积分, 则该式第二项以下都为 0, 因为

$$\int_0^{2\pi} W_n(r, \theta) d\theta = 2\pi$$

(2-18)

所以, 由式 (2-16) 可得:

$$e = \frac{4B}{a} \int_0^a v(r) dr$$

(2-19)

平均流速为:

$$\bar{v} = \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a v(r) 2\pi r dr = \frac{2}{a^2} \int_0^a v(r) r dr$$

(2-20)

由上两式可得:

$$e = 2B\bar{v}a = B\bar{v}d$$

(2-21)

就是说, 如果是轴对称流动, 则电动势与流速分布无关, 而正比于平均流速^[9]。

并可得通过管道的体积流量:

$$q_v = \frac{\pi d^2}{4} \bar{v} = \frac{\pi d}{4} \cdot \frac{e}{B} \quad (2-22)$$

公式(2-21)是对直流磁场的描述,对于交流磁场而言,如果 $B = B_m \cdot \sin \omega t$, 可得:

$$e = 2B_m \sin \omega t \cdot \bar{v} \cdot a = B_m \sin \omega t \cdot \bar{v} \cdot d \quad (2-23)$$

2.2 电磁流量计整体设计

2.2.1 一般电磁流量计的构成

实际的 EMF 由流量传感器和信号转换器两大部分组成。如图 2.3 为分体电磁流量计,一般情况下,传感器和转换器是分体的,传感器安装在生产过程工艺管道上感受流量信号;转换器将传感器送来的流量信号进行放大,并转换成标准电信号,以便进行显示、记录、积算和调节控制。也有的电磁流量计将转换器和传感器装在一起,组成一体型电磁流量计,可就地显示和远传显示和控制。电磁流量计传感器主要由测量管组件、磁路系统、电极及干扰调整机构部分组成。为了使传感器稳定可靠地工作,准确地感受流量信号,传感器应满足如下要求。

1. 能提供一个足够大的且与流量成正比的电势信号;
2. 能把干扰信号抑制到最小程度,使信噪比足够大;
3. 能适应恶劣环境条件,工作可靠。

测量管组件测量管位于传感器中心,两端带有连接法兰或其它形式的联结装置,被测流体通过测量管。为了让磁力线能顺利地穿过测量管进入被测介质,

首先,测量管必须由非导磁材料制;

其次,为了减少电涡流,测量管一般应选用高阻抗材料,在满足强苛求的前提下,管壁应尽量薄;

第三,为了防止电极上的流量信号被金属管壁所短路,所以在测量管内侧应

并可得通过管道的体积流量：

$$q_v = \frac{\pi d^2}{4} \bar{v} = \frac{\pi d}{4} \cdot \frac{e}{B} \quad (2-22)$$

公式 (2-21) 是对直流磁场的描述, 对于交流磁场而言, 如果 $B = B_m \cdot \sin \omega t$, 可得:

$$e = 2 B_m \sin \omega t \cdot \bar{v} \cdot a = B_m \sin \omega t \cdot \bar{v} \cdot d \quad (2-23)$$

2.2 电磁流量计整体设计

2.2.1 一般电磁流量计的构成

实际的 EMF 由流量传感器和信号转换器两大部分组成。如图 2.3 为分体电磁流量计, 一般情况下, 传感器和转换器是分体的, 传感器安装在生产过程工艺管道上感受流量信号; 转换器将传感器送来的流量信号进行放大, 并转换成标准电信号, 以便进行显示、记录、积算和调节控制。也有的电磁流量计将转换器和传感器装在一起, 组成一体型电磁流量计, 可就地显示和远传显示和控制。电磁流量计传感器主要由测量管组件、磁路系统、电极及干扰调整机构部分组成。为了使传感器稳定可靠地工作, 准确地感受流量信号, 传感器应满足如下要求。

1. 能提供一个足够大的且与流量成正比的电势信号;
2. 能把干扰信号抑制到最小程度, 使信噪比足够大;
3. 能适应恶劣环境条件, 工作可靠。

测量管组件测量管位于传感器中心, 两端带有连接法兰或其它形式的联结装置, 被测流体通过测量管。为了让磁力线能顺利地穿过测量管进入被测介质,

首先, 测量管必须由非导磁材料制;

其次, 为了减少电涡流, 测量管一般应选用高阻抗材料, 在满足强苛求的前提下, 管壁应尽量薄;

第三, 为了防止电极上的流量信号被金属管壁所短路, 所以在测量管内侧应

并可得通过管道的体积流量：

$$q_v = \frac{\pi d^2}{4} \bar{v} = \frac{\pi d}{4} \cdot \frac{e}{B} \quad (2-22)$$

公式 (2-21) 是对直流磁场的描述, 对于交流磁场而言, 如果 $B = B_m \cdot \sin \omega t$, 可得:

$$e = 2 B_m \sin \omega t \cdot \bar{v} \cdot a = B_m \sin \omega t \cdot \bar{v} \cdot d \quad (2-23)$$

2.2 电磁流量计整体设计

2.2.1 一般电磁流量计的构成

实际的 EMF 由流量传感器和信号转换器两大部分组成。如图 2.3 为分体电磁流量计, 一般情况下, 传感器和转换器是分体的, 传感器安装在生产过程工艺管道上感受流量信号; 转换器将传感器送来的流量信号进行放大, 并转换成标准电信号, 以便进行显示、记录、积算和调节控制。也有的电磁流量计将转换器和传感器装在一起, 组成一体型电磁流量计, 可就地显示和远传显示和控制。电磁流量计传感器主要由测量管组件、磁路系统、电极及干扰调整机构部分组成。为了使传感器稳定可靠地工作, 准确地感受流量信号, 传感器应满足如下要求。

1. 能提供一个足够大的且与流量成正比电势信号;
2. 能把干扰信号抑制到最小程度, 使信噪比足够大;
3. 能适应恶劣环境条件, 工作可靠。

测量管组件测量管位于传感器中心, 两端带有连接法兰或其它形式的联结装置, 被测流体通过测量管。为了让磁力线能顺利地穿过测量管进入被测介质,

首先, 测量管必须由非导磁材料制;

其次, 为了减少电涡流, 测量管一般应选用高阻抗材料, 在满足强苛求的前提下, 管壁应尽量薄;

第三, 为了防止电极上的流量信号被金属管壁所短路, 所以在测量管内侧应

有一完整的绝缘衬里。

衬里材料应根据被测介质，选择有耐腐蚀，耐磨损，耐高温等性能的材料，如聚四氟乙烯、耐酸橡胶等。

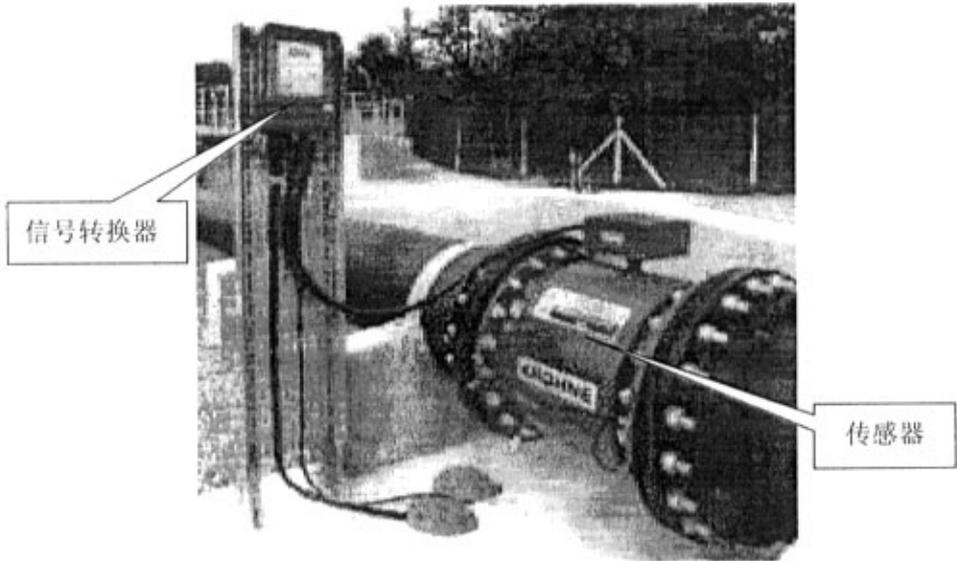


图 2.3 一般电磁流量计构成
Fig. 2.3 Normal EMF constitution

2.2.2 影响电磁流量计性能的因素

1. 被测介质物理性能

1. 被测介质电导率^[26]

应用电磁流量计的前提是被测液体必须是导电的，不能低于一定阈值。电导率低于阈值会产生测量误差甚至不能使用，超过阈值即使变化也可以测量，示值误差变化不大，通用型 EMF 的阈值在 $(10^{-4} \sim 5 \times 10^{-6})$ s/cm 之间，视型号不同。电磁流量计不能用于电导率更低的液体是因为传感器与变送器阻抗的匹配问题。变送器内阻与液体电导率的关系是一个反比例的关系，例如，对于圆盘形的电极来说，如果电极的直径 d 相对于两电极间的距离 D 很小时，则可以近似地认为变送器的内阻为：

$$r_i = \frac{1}{\sigma \cdot d}$$

(2-24)

式中, σ 为液体的电导率 (s/cm), d 为电极的直径 (cm)。

对于电磁流量计来说, 变送器产生的感应电动势只有几 mV , 能否进行准确的测量, 还要取决于转换器的输入阻抗, 通常要求转换器的输入阻抗应远远大于变送器内阻, 才可以保证仪表的测量精度。目前, 转换器的输入阻抗一般达到 $100 \sim 200M\Omega$, 即要保证 0.1% 传输精度的传感器内阻必须小于 $100 \sim 200K\Omega$ 。假设电极直径为 $1cm$, 那么根据上式可得被测介质最低电导率为 $(0.5 \sim 1) \times 10^{-5} s/m$ 。故使用时还取决于传感器和转换器间流量信号线长度及其分布电容。非接触电容耦合大面积电极的仪表则可测电导率低至 $5 \times 10^{-8} s/cm$ 的液体。

工业用水及其水溶液的电导率大于 $10^{-4} s/cm$, 酸、碱、盐液的电导率在 $10^{-4} \sim 10^{-1} s/cm$ 之间, 使用不存在问题, 低度蒸馏水为 $10^{-5} s/cm$ 也不存在问题。石油制品和有机溶剂电导率过低就不能使用。实际测量的液体电导率最好要比仪表制造厂规定的阈值至少大一个数量级。因为制造厂仪表规范规定的下限值是在各种使用条件较好状态下测量的最低值。受到一些使用条件限制, 如电导率均匀性、连接信号线、外界噪声等, 否则会出现输出晃动现象等。

2. 被测介质粘度影响

通常认为电磁流量计流量测量值不受液体粘度影响。但从现场实践经验来看, 结果正好是相反的。根据荷兰应用科学研究组织(TNO)和 DSM Research 对 8 家制造厂 20 台 EMF 历时 2.5 年作的关于液体电导率、粘度、温度和环境温度影响的试验, 与常温水粘度流量相比较, 平均变化在 $0.7\% \sim 1.6\%$ 之间。

3. 被测介质温度影响

当介质温度升高时, 离子的水化作用减弱, 溶液粘度也会减小。这样介质的电导率就会随介质温度的变化而变化。一般来说, 随着介质温度的上升, 电导率也上升, 其大致的情況是介质温度升高一度, 电导率约增大 $2 \sim 2.5\%$ 。按照这种关系, 如果介质温度上升 $200C$ 时, 电导率就要提高一倍左右。同时, 由于变送器的内阻与被测介质电导率成反比关系。被测介质电导率愈低, 变送器的内阻就越大。因此, 介质温度上升, 变送器的内阻就变小, 它总是随被测介质电导率的变化而

变化。而为了保证测量精度,在这种情况下,就要求电磁流量转换器的输入阻抗必须大于变送器内阻许多倍,才能保证在介质电导率在一定范围内变动时,对测量精度不至于造成很大的影响。所以,介质的温度的变化也是值得注意的。

2. 被测介质的流动状态

由流体力学可知,液体在管道内流动时,在管道横截面上各点的流速是不等的。通常,管内流动呈层流或者紊流状态,两者的速度分布虽不相同,但只要经过一定距离的直管段,轴不对称流速分布即变成轴对称分布。且只要流速分布相对测量管中心轴为对称时,则在电极上产生的感应电动势大小与各点的流速分布状态(层流或者紊流状态)无关,而只与被测液体的平均流速成正比,见式(2-23)。

3. 磁场边缘效应

在推导电磁流量计相关计算公式时,经常假设磁场分布为无限长($L \rightarrow \infty$),也就是说磁场的边缘效应可以忽略的。可是,这种假定条件对所有实际的流量计都是难于做得到的,因而也是不现实的。在实际应用中,总是希望激磁线圈和测量管的长度越短越好。这样就会出现所谓的磁场边缘效应,即磁场轴向长度对感应电动势幅值的影响和激磁线圈两端的磁感应强度不均匀测量的影响。

假设绝缘的电磁流量计测量管内壁磁场线圈的长度为 $2L$,测量管半径为 a ,根据理论计算的结果, L/a 的比值范围大致为 $L/a=2.8-3.04$ 时,在电极上所测得的感应电动势与无限长磁场下的感应电动势大小比较接近。也就是说,为了减小磁场边缘效应的影响,激磁线圈的长度应为测量管内径的 $2.8-3.04$ 倍。这样,才可以使电极上产生的感应电动势接近于无限长磁场时的理论计算值

4. 附着和沉淀

测量易在管壁附着和沉淀物质的流体时,若附着的是比液体电导率高的导电物质,信号电势将被短路而不能工作,若是非导电层则首先应注意电极的污染,譬如选用不易附着的尖形或半球形突出电极以及可更换式电极、刮刀式清垢电极等。刮刀式电极可在传感器外定期手动刮出沉垢。国外产品曾有电极上装超声波换能器,以清除表面垢层,但现已少见。也有暂时断开测量电路,在电极短时间内流过低压大电流,焚烧清除附着油脂类附着层。容易产生附着的环境可通过提高流速以达到清扫的目的,还可以采取较方便的易清洗管道连接,可不拆卸清

洗传感器。

采用非接触型电磁流量计附着非导电膜层,仪表仍能工作,但若为高导电层则同样不能工作。

2.2.3 电磁流量信号转换器的整体设计分析

除了上一节所考虑的影响电磁流量计性能的因素,才用交流励磁的电磁流量计信号转换器电磁干扰的处理,就成了很麻烦的问题,而且电磁干扰信号与有用的流量信号混杂在一起,成份复杂且有时还会比流量信号大得多。通常,在液体的平均流速为 1m/s 时,变送器产生的流量信号为 1mV 左右,作大流量也只有几 mV ,而干扰信号的幅值严重时,能达到即使 mV ,在这种情况下电磁流量计如果不具备相应的抑制干扰能力^[16],就无法精确的完成测量,因此,怎样抑制和排除这些干扰信号,提高信噪比就成了研制和使用电磁流量计的一个重要的技术关键,通过多年的实践和科学实验证明^[22],尽管这些干扰信号的成分复杂,产生的原因和来源也很多,但是干扰信号基本上可以归纳为两大类:一类是 90° 干扰信号;一类是同相干扰信号。

1. EMF 信号转换器正交干扰分析

90° 干扰,也称为正交干扰,这是指在相位上与流量信号相差 90° 的干扰信号,其幅值与被测介质的流量大小无关,而只与磁场的变化速度有关。一般来说,产生 90° 干扰信号主要来源以下两种。

1. 由变压器效应产生的 90° 干扰

在电磁流量变送器中,由于两电极的引线处于交变磁场中,如图 3-1 所示,从电极 A→引出线→输入电路(r_{ar})→另一引出线→电极 B→被测介质→电极 A,形成一个闭合回路。变送器的励磁线圈相当于变压器的初级绕组,这个闭合回路相当于变压器的一个匝数为 1 的次级绕组。这个次级绕组不可能与变送器的磁场产生的磁力线完全平行,总会有一部分交变的磁力线穿过这个闭合回路所组成的平面,这就形成了“变压器效应”。

洗传感器。

采用非接触型电磁流量计附着非导电膜层,仪表仍能工作,但若为高导电层则同样不能工作。

2.2.3 电磁流量信号转换器的整体设计分析

除了上一节所考虑的影响电磁流量计性能的因素,才用交流励磁的电磁流量计信号转换器电磁干扰的处理,就成了很麻烦的问题,而且电磁干扰信号与有用的流量信号混杂在一起,成份复杂且有时还会比流量信号大得多。通常,在液体的平均流速为 1m/s 时,变送器产生的流量信号为 1mV 左右,作大流量也只有几 mV ,而干扰信号的幅值严重时,能达到即使 mV ,在这种情况下电磁流量计如果不具备相应的抑制干扰能力^[16],就无法精确的完成测量,因此,怎样抑制和排除这些干扰信号,提高信噪比就成了研制和使用电磁流量计的一个重要的技术关键,通过多年的实践和科学实验证明^[22],尽管这些干扰信号的成分复杂,产生的原因和来源也很多,但是干扰信号基本上可以归纳为两大类:一类是 90° 干扰信号;一类是同相干扰信号。

1. EMF 信号转换器正交干扰分析

90° 干扰,也称为正交干扰,这是指在相位上与流量信号相差 90° 的干扰信号,其幅值与被测介质的流量大小无关,而只与磁场的变化速度有关。一般来说,产生 90° 干扰信号主要来源以下两种。

1. 由变压器效应产生的 90° 干扰

在电磁流量变送器中,由于两电极的引线处于交变磁场中,如图 3-1 所示,从电极 A→引出线→输入电路(r_{ar})→另一引出线→电极 B→被测介质→电极 A,形成一个闭合回路。变送器的励磁线圈相当于变压器的初级绕组,这个闭合回路相当于变压器的一个匝数为 1 的次级绕组。这个次级绕组不可能与变送器的磁场产生的磁力线完全平行,总会有一部分交变的磁力线穿过这个闭合回路所组成的平面,这就形成了“变压器效应”。

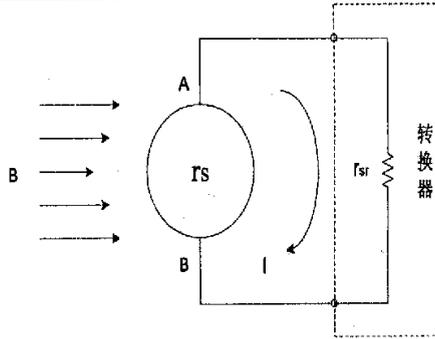


图 2.4 变压器效应次级回路示意图

Fig. 2.4 Demonstration of secondary-coil circuit effect of transformer.

根据楞次定律可知，当变送器通电后，在闭合回路内就产生出感应电动势 e_i ，这就是 90° 干扰电动势，可用楞次定律表示如下：

$$e_i = -\frac{dB}{dt} = -B_m \omega \cos \omega t = -B_m \omega \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right) \quad (2-25)$$

式中负号表示楞次定律感应电动势的方向与磁场变化的方向相反，即抵制 dB/dt 变化的方向而加。如果将 (2-23) 式与 (2-25) 式比较可以看出： 90° 干扰 e_i 与流量信号 e 的相位相差 90° 。由于闭合回路与磁通交链的方向不同， 90° 干扰 e_i 与励磁电压 U 可以近似地看作同相位或相位相反，如图 2.4 所示。同时由 (2-25) 式可以看到， e_i 与电源的频率有关，而与流量大小和变送器的口径无关。所以电源频率越高，这种“变压器效应”所产生的 90° 干扰 e_i 也越强；降低励磁电流的频率，可以减少这种 90° 干扰。

2. 涡电流造成的 90° 干扰^[15]

由于变送器工作在交变磁场中，变送器内会产生涡电流造成 90° 干扰。这种干扰大致有以下两种可能的情况：

流量计测量管管壁中的涡电流：

电磁流量计的测量管一般采用不锈钢管，内衬以绝缘衬里，如图 2.5。由于测量管处于交变磁场中，因此，管壁的金属材料中也会感应产生涡电流。这种涡电流的相位与流量信号 e 相差 90° ，因此产生 90° 干扰。

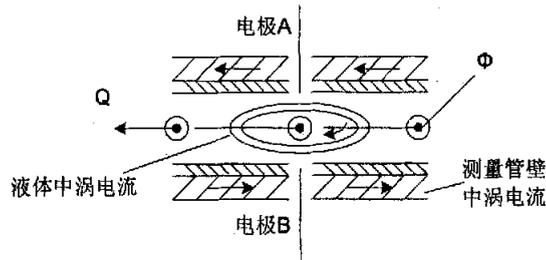


图 2.5 传感器中的涡电流

Fig. 2.5 Eddy current of sensor

液体中的涡电流影响：

被测液体在交变磁场中流动是会产生交变的感应信号，而在此交变的感应信号周围又有二次交变磁通，从而产生了涡电流，相位上与流量信号相差 90° ，属 90° 干扰。

2. EMF 信号转换器整体设计

上述两种原因产生的正交干扰，主要是由于信号转换器结构上和原理上的原因造成的，国内的文献基本停留在 80 年代初期模拟式的解决方法，主要通过鉴相电路与调整机构构成反馈回路，克服正交干扰。所谓调整只能是针对特定对象，并不具备普遍意义，变更了对象就要重新调整，使用起来比较繁琐，虽然有过自动抑制正交方法^[26]，但也仅停留在模拟解决方案上，其使用范围有限。国外产品限于知识产权，有关电磁流量计正交干扰抑制方法基本很难检索，因为一些新的产品，其核心技术不仅仅通过专利来保护，利用专用芯片加密以及器件加密，已被广为采用只是在对产品进行调查时，发现 ABB 的 SM1000 型采用的是交流励磁，具体实现方法不祥，通过以上分析，我们确立了采用模拟数字相结合的解决办法，由于正交干扰相位与励磁电压同相，在励磁线圈上在绕上几圈线圈，使系统能够获得励磁电压的相位即正交干扰的相位，辅以过零检测，再通过微处理器的中断技术合理的控制采样时间，就能够达到抑制正交干扰。电磁流量计的设计要实现好的抗干扰特性，必然涉及复杂逻辑：如通过脉冲输出提高系统的输出精度，方便实现与外部控制单元的隔离，提高电磁兼容性；为兼顾目前主流的 4-20mA 的输出形式，确立以脉冲到电压，再到电流的转换形式，也在脉冲到电压的转换过程中，实现了电磁流量计与上一级控制单元的完全隔离，进一步提高了系统的性能。

对于种种脉冲的输出,必然对微处理器的中断资源提出了更多的要求,由于 MCS-51 只有两个中断接口,为了确保系统的实时性,我们引入了复杂逻辑门阵列(CPLD)设计的专用芯片,利用 CPLD 处理电磁流量计所需求的复杂逻辑时序,减轻微处理器的开销,使微处理器的主要任务能够放在数据的采集、处理、显示、输出等功能上来。

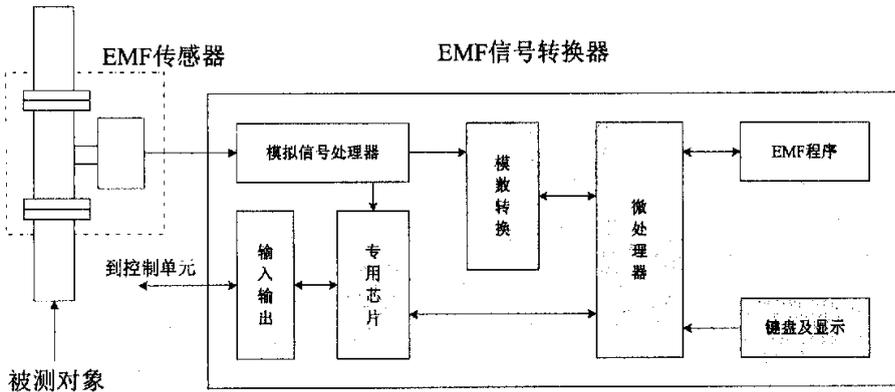


图 2.6 整体框图

Fig 2.6 Overall diagram

对于另一类型的同相干扰,属共模干扰,采用差动放大器消除,在技术上很成熟,具体解决方案及详细分析见设计 3.2.1。如图 2.6 所示,电磁流量计信号转换器由模拟信号处理器、模数转换、专用芯片、微处理器、EMF 程序、输入输出、键盘显示等功能模块构成。其中模拟信号处理器完成对电极信号、参考信号的放大滤波、以及系统所要求的特定形式的转换,为系统提供精确的采样同步时钟;模数转换实现对模拟信号处理器转换后的信号进行基于多路复用器的数字转换,同微处理器共同完成数据的采集。微处理器模块负责对周围所有接口电路的控制,包括专用芯片、模数转换、键盘显示、扩展 I/O 等模块。输入输出主要实现开关状态量的输入(如累积流量复位等),开关状态量的输出(如报警、流向等),4-20mA 的信号转换也是输入数出的一个功能。

基于上述的设计分析,构成了一个功能完备的电磁流量计信号转换器的原型。

第3章 电磁流量计信号转换器硬件系统设计

3.1 电磁流量计信号转换器硬件架构

如图 3.1 所示 EMF 信号转换器硬件系统主要由：模拟信号处理器、模数转换单元、专用芯片 (ASIC)、微处理器单元、存储单元、键盘显示、输入输出单元、电源模块等几部分组成，EMF 信号转换器由此完成信号的处理变换、采集、滤波、计算、存储以及输出。硬件设计采用基于电磁兼容性的模块化设计思想，以电源电压，模拟信号处理，数字电路为作为模块分组依据，提高电磁流量计信号转换器的性能。。

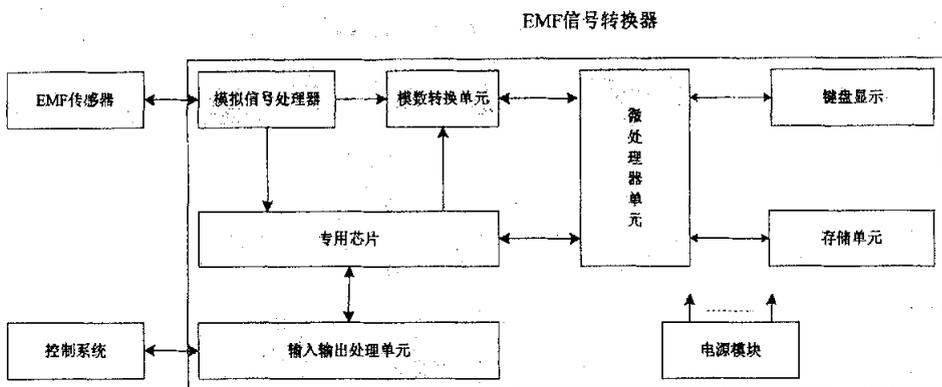


图 3.1 EMF 信号转换器硬件结构图

Fig. 3.1 Hardware diagram of signal converter for EMF

3.2 模拟信号处理器的设计

3.2.1 模拟信号处理器的设计分析

由于传感器的物理结构及交流励磁方式给系统的信号输入带来同相干扰（也

称共模干扰或共变干扰)^{[22][26]}，是指在某一瞬间同时出现在变送器的两电极上、并且幅值和相位都一致的干扰信号。当流量为零，即被测液体静止不动时所测出来的同相信号就是同相干扰信号^[17]。

同相干扰的来源很复杂，但主要原因可归纳为下列几方面。

1. 静电感应和绝缘电阻

如图 3.2 所示，变送器的励磁线圈对两个电极 A 和 B 不仅存在着绝缘电阻 r_m ，同是还存在着分布电容 C 。励磁电压 U 通过绝缘电阻 r_m 、分布电容 C 与转换器内阻 r_i 分压，在电极上将产生电压降。由于电极 A 和 B 是对称的，其分压的数值相等、相位相同，这个电压降就是同相干扰，大小取决于电极的绝缘电阻和励磁系统对电极的静电感应。对于此类干扰比较有效的办法是将电极与励磁线圈在几何参数上作的均衡对称，严格屏蔽以减少分布电容，提高电极绝缘电阻。

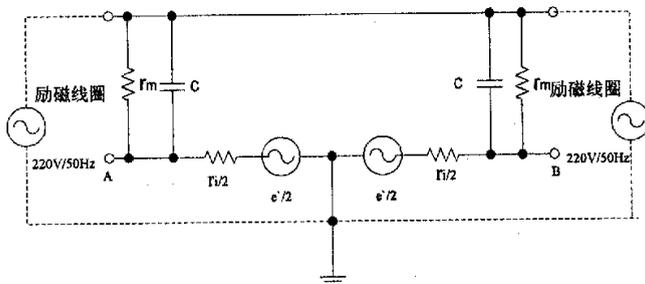


图 3.2 有分布电容和绝缘电阻时转换器的等效电路

Fig. 3.2 Equivalent circuit of distributing capacitance and insulation resistance

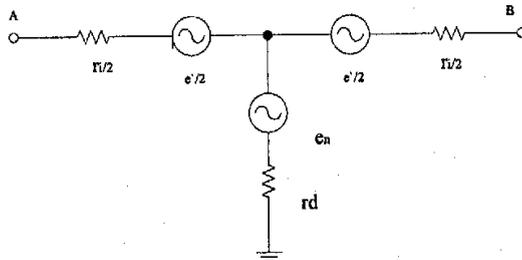


图 3.3 杂散电流在接地电阻上产生压降等效电路

Fig. 3.3 Equivalent circuit of eddy current

2. 转换器管道上的杂散电流

如果转换器安装地点周围有强电力设备，或者把转换器的接地线接到动力设备的公共接地线上，就会产生较强的杂散电流。由图 3.3 可以看出，在接地电阻

r_d 上产生的电压将通过转换器内阻 r_i 分别加到电极 A 和 B 上，其相位相同，幅值相等，也形成了同相干扰。应对此类干扰的措施是降低系统接地电阻。

3. 其他方面的来源

随着被测介质电导率的下降，分布电容的作用加强，同相干扰也会增大。因此，在测量低电导率的介质时，更应注意同相干扰。经验证明，采取上述几种办法是可以减少同相干扰，但不能完全消除。因此还需要在转换器内采取抑制同相干扰的措施，以提高仪表抗干扰的能力。通常是在转换器的前端采用差动放大电路，使进入转换器的同相干扰信号互相抵消。

3.2.2 模拟信号处理器的结构

如图 3.4 信号处理器由差动放大器、MFB 低通滤波器、增益可编程运算放大器、积分器、比例运算放大器、过零检测等单元组成，完成对电极信号、参考信号滤波、放大、过零检测。

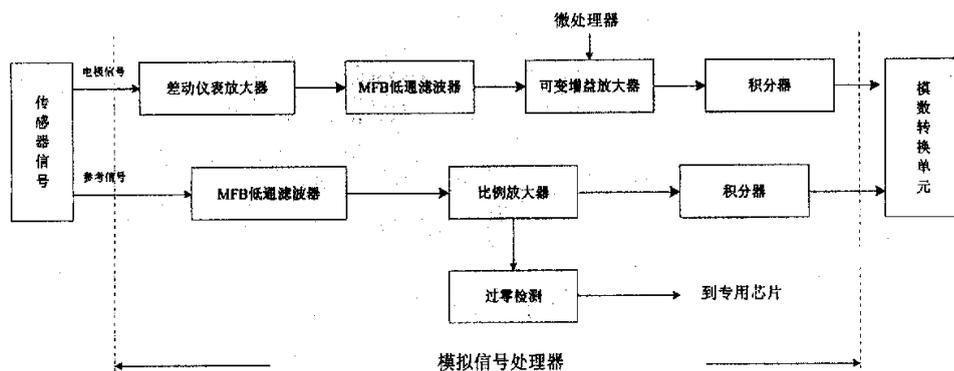


图 3.4 信号处理器结构图

Fig. 3.4 Diagram of signal processor

3.2.3 电极流量信号放大电路的设计

由 3.2.2 信号处理器的设计分析中，我们知道，在抑制电极流量信号的同相干扰中，采用差动运放是抑制系统同相干扰的一种非常有效的方法，因此我们采

用了高共模抑制比的三运放结构形式的运算放大器^[27]。由于系统中除了同相干扰外，自身存在较高频率的数字时钟以及外界的高频干扰，在信号处理中增加了MFB低通滤波器，为了确保不同通道信号的相位一致有引入了相应积分单元。差分放大器具有高输入阻抗，增益高的特点，可以利用普通运放(如OP07)做成一个差分放大器。

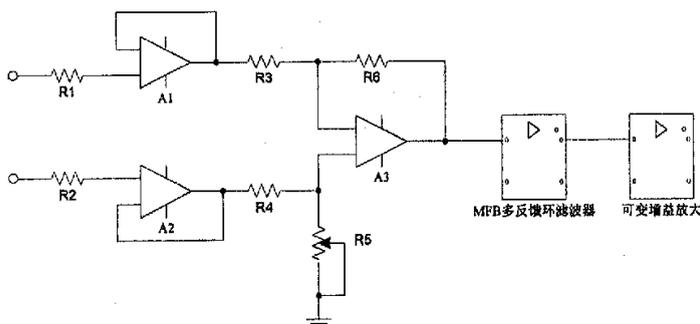


图 3.5 差动放大电路图

Fig. 3.5 Diagram of differential amplifier circuit

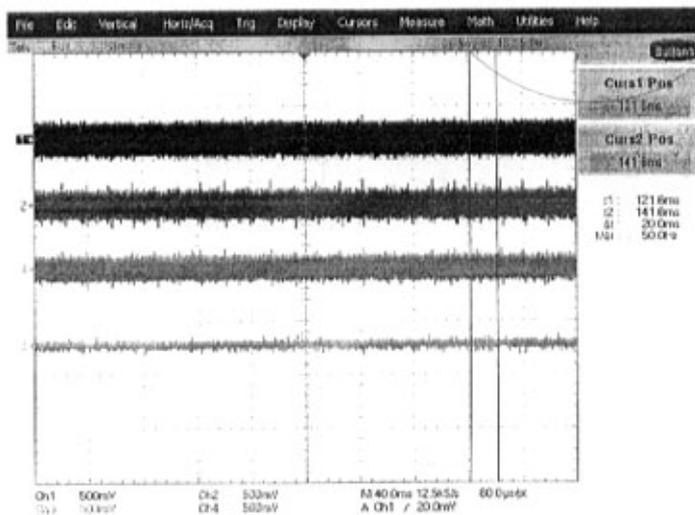


图 3.6 差动放大电路信号波形图

Fig. 3.6 Signal wave chart of differential amplifier circuit

如图 3.5 所示输入级加入射随放大器，增大了输入阻抗，A1、A2、A3为差动

放大电路，滑动变阻器 $R5$ 可以调节使 $R5=R6$ ，为增加系统对高频干扰的滤除，差动放大的输出至 MFB 多反馈环滤波器及可变增益放大器，以使输出满足满量程要求。电路中要求 $R3=R4$ ， $R5=R6$ 。其具体输入输出波形如图 3.6 所示，其中 1 为 $A1$ 的输出，2 为 $A2$ 的输出，4 为 $A3$ 的输出，3 为 MFB 低通滤波器的输出，由测量的波形我们可以看到，差动运放的输出，无论从幅值还是信号的品质上来说都无法满足模数转换的要求，这也就提出了新的问题，信号处理仅有差动放大是不够的，因此我们引入了 MFB 低通滤波器的设计。

3.2.4 低通 MFB 滤波器的设计

和无源滤波器相比，有源滤波器有许多值得注意的特点^[26]。比如，有源滤波器有正、负电源，它的输入端和输出端与电源和地都有联系，因此不能像无源滤波器那样完全浮地使用。有源滤波器的输入和输出电压有一定的范围，输出电流也有一定的限制。有源滤波器有输出失调，而且随温度变化而漂移。这些都是它的缺点。但是，有源滤波器也有明显的优点，例如，它的输入阻抗高，可从几千欧到几十兆欧，而输出阻抗极低，因此输入与输出之间有良好的隔离性能，且便于进行级联。有源滤波器的频率范围很宽，尤其是在低频方面，它能用一般的元件做到十分之几赫兹甚至百分之几赫兹的滤波器。有源滤波器对讯号可以不衰减，甚至还能放大。当然在体积和重量方面有源滤波器更有突出优点。

像无源滤波器一样，RC 有源滤波器也可分为低通、高通、带通和带阻四种。在物理上幅度突变的理想滤波器是不能实现的，只能用零点和极点数目有限的传输函数来逼近它：

$$\begin{aligned}
 H(s) &= \frac{a_n(s + \lambda_1)(s + \lambda_2) \cdots (s + \lambda_n)}{(s - \beta_1)(s - \beta_2) \cdots (s - \beta_n)} \\
 &= \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \cdots + b_0}
 \end{aligned}
 \tag{3-1}$$

二阶低通滤波器的传递函数：

放大电路，滑动变阻器 $R5$ 可以调节使 $R5=R6$ ，为增加系统对高频干扰的滤除，差动放大的输出至 MFB 多反馈环滤波器及可变增益放大器，以使输出满足满量程要求。电路中要求 $R3=R4$ ， $R5=R6$ 。其具体输入输出波形如图 3.6 所示，其中 1 为 $A1$ 的输出，2 为 $A2$ 的输出，4 为 $A3$ 的输出，3 为 MFB 低通滤波器的输出，由测量的波形我们可以看到，差动运放的输出，无论从幅值还是信号的品质上来说都无法满足模数转换的要求，这也就提出了新的问题，信号处理仅有差动放大是不够的，因此我们引入了 MFB 低通滤波器的设计。

3.2.4 低通 MFB 滤波器的设计

和无源滤波器相比，有源滤波器有许多值得注意的特点^[26]。比如，有源滤波器有正、负电源，它的输入端和输出端与电源和地都有联系，因此不能像无源滤波器那样完全浮地使用。有源滤波器的输入和输出电压有一定的范围，输出电流也有一定的限制。有源滤波器有输出失调，而且随温度变化而漂移。这些都是它的缺点。但是，有源滤波器也有明显的优点，例如，它的输入阻抗高，可从几千欧到几十兆欧，而输出阻抗极低，因此输入与输出之间有良好的隔离性能，且便于进行级联。有源滤波器的频率范围很宽，尤其是在低频方面，它能用一般的元件做到十分之几赫兹甚至百分之几赫兹的滤波器。有源滤波器对讯号可以不衰减，甚至还能放大。当然在体积和重量方面有源滤波器更有突出优点。

像无源滤波器一样，RC 有源滤波器也可分为低通、高通、带通和带阻四种。在物理上幅度突变的理想滤波器是不能实现的，只能用零点和极点数目有限的传输函数来逼近它：

$$\begin{aligned}
 H(s) &= \frac{a_n(s + \lambda_1)(s + \lambda_2) \cdots (s + \lambda_n)}{(s - \beta_1)(s - \beta_2) \cdots (s - \beta_n)} \\
 &= \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \cdots + b_0}
 \end{aligned}
 \tag{3-1}$$

二阶低通滤波器的传递函数：

$$H(s) = \frac{H_0 \omega_0^2}{s^2 + a \omega_0 s + \omega_0^2} \quad (3-2)$$

无限增益多路反馈电路 (Infinite gain multiple feedback circuits) 的二阶原型如图 3.7, 它由五个二端导纳 $y_1 \sim y_5$ 和开环增益接近无限大的运算放大器组成, 从放大器的输出端到输入端的反馈点多余一个。假设运算放大器的开环增益 $A_0 \rightarrow \infty$, 且 $I_r \rightarrow 0$, 则由图 3.7 可列出方程 (3-3):

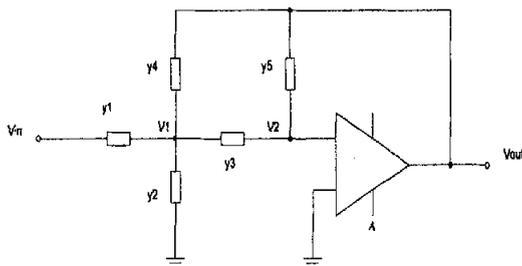


图 3.7 多路反馈滤波器二阶原型

Fig. 3.7 Second-order prototype of multiple-feedback filter

$$\begin{cases} (V_{in} - V_1)y_1 = (V_1 - V_0)y_4 + V_1y_2 + (V_1 - V_2)y_3 \\ (V_1 - V_2)y_3 = (V_2 - V_0)y_5 \\ V_2 = -\frac{V_0}{A_0} = 0 \end{cases} \quad (3-3)$$

由此解得:

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{-y_1y_3}{y_5(y_1 + y_2 + y_3 + y_4) + y_3y_4} \quad (3-4)$$

将 $y_1 \sim y_5$ 用电阻、电容代替, 同过一定的组合即可构成低通、高通、带通和带阻滤波器。低通: 是多路反馈二阶低通滤波器。 y_1, y_3, y_4 用电阻代替, y_2, y_5 用电容代替。在高频下, C_2, C_5 相当于短路, 传递函数为零; 在低频下, C_2, C_5 相当于开路, 传输函数等于 $-R_4/R_1$, 确有低通性能。

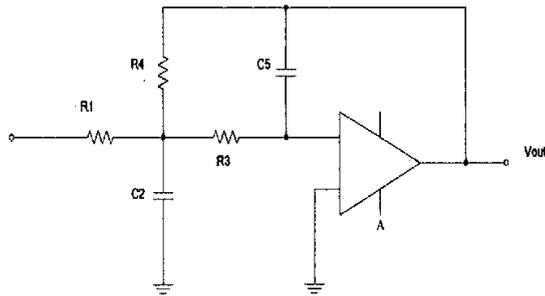


图 3.8 二阶低通滤波器

Fig. 3.8 Second-order low-pass filter

将 $y_1=1/R_1$, $y_2=C_2s$, $y_3=1/R_3$, $y_4=1/R_4$, $y_5=C_5s$ 代入二阶滤波器的传递函数中, 得到它的传递函数为:

$$H(s) = \frac{-1/R_1R_3C_2C_5}{s^2 + \frac{s}{C_2}(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}) + \frac{1}{R_2R_4C_2C_5}} \quad (3-5)$$

比较 (3-2) 和 (3-5) 得:

通带增益:

$$H_0 = \frac{R_4}{R_1} \quad (3-6)$$

截止频率:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_3R_4C_2C_5}} \quad (3-7)$$

衰减系数:

$$a = \frac{1}{Q} = \sqrt{\frac{C_5}{C_2}} \left(\sqrt{\frac{R_3}{R_4}} + \sqrt{\frac{R_4}{R_3}} + \sqrt{\frac{R_3 R_4}{R_1}} \right)$$

(3-8)

MFB 型有源低通滤波器的设计步骤如下:

1. 设计条件: $H_0, a=1/Q, \omega_0=2\pi f_0$;
选择参数: $C_2=C$ (选一适当的值), $C_5=kC$;
2. 设计计算:
由 (3-6)、(3-7)、(3-8) 可求得:

$$R_4 = \frac{\alpha}{2k\omega_0 C} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4(H_0 + 1)k}{\alpha^2}} \right]$$

$$R_1 = \frac{R_4}{H_0}$$

$$R_3 = \frac{1}{\omega_0^2 R_4 C^2 \cdot k}$$

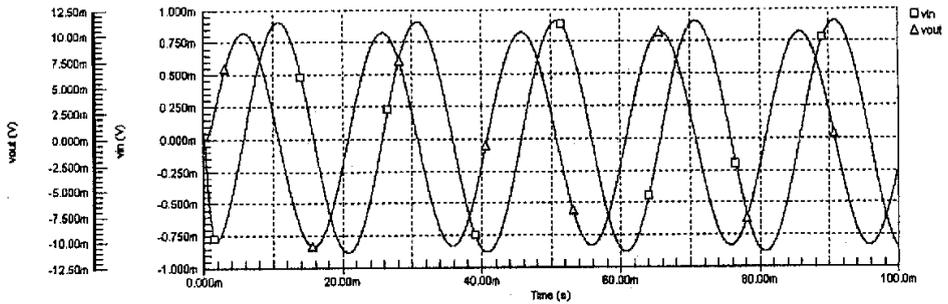


图 3.9 MFB 低通滤波器仿真结果

Fig. 3.9 Simulation of MFB low-pass filter

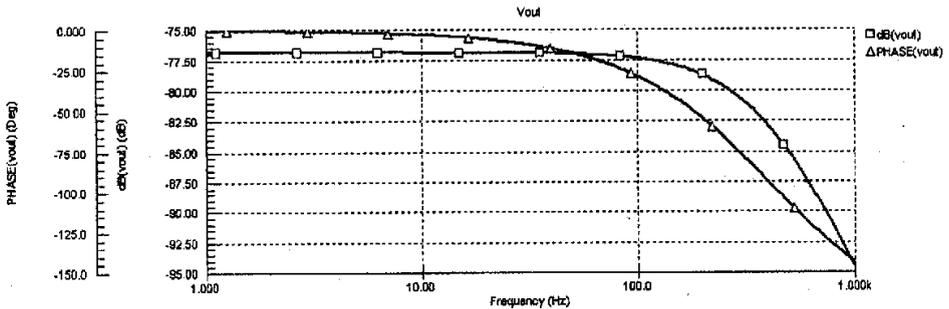


图 3.10 MFB 低通滤波器幅频相频特性

Fig. 3.10 Amplitude-frequency and phase-frequency features of MFB low-pass filter

为了能够获得较好的效果，设计时应注意，

当 $\alpha=0.1$ 时， H_0 应小于 10 (20dB)；

当 $\alpha=1$ 时， H_0 小于 100 (40dB)；

通常 H_0 选在 1~10 的范围内。

MFB 低通滤波器的实际输出波形图如图 3.6 中的波形 3，由于电极信号的过弱，以及滤波器的通带增益不易选取过大，为了观察参数选取合适与否，以及系统的幅频特性采用 Spice 仿真对 MFB 低通滤波器进行了仿真^[29]。结果如图 3.9。实际选择的电路参数的通带增益接近 1，如图 3.10 可以看出 MFB 低通滤波器对超过 100Hz 的信号明显具有衰减作用。实现了低通特性。

3.2.5 可变增益运算放大电路的设计

经过 MFB 低通滤波后的信号，仍没有满足模数转换的幅值要求，考虑到充分利用 A/D 转换器的量程，以提高系统精度，引入了可编程运算放大器的方法^[28]。专用可编程运放得价格要从几百甚至到几千，考虑到性价比的问题，我们选择了高精度运放+多路器的模式，在保证精度的前提下，具有良好的性价比。为提高系统精度及良好的温度特性，多路器的选择应具有较低的导通电阻及动态电阻，原方的选择应具有低输出失调电压，好的温度系数。基于上述原则选用了 MAX4051 和 LM101A 同构建的可变增益运算放大电路。具体电路形式如图 3.11。

图 3.10 MFB 低通滤波器幅频相频特性

Fig. 3.10 Amplitude-frequency and phase-frequency features of MFB low-pass filter

为了能够获得较好的效果，设计时应注意，

当 $\alpha=0.1$ 时， H_0 应小于 10 (20dB)；

当 $\alpha=1$ 时， H_0 小于 100 (40dB)；

通常 H_0 选在 1~10 的范围内。

MFB 低通滤波器的实际输出波形图如图 3.6 中的波形 3，由于电极信号的过弱，以及滤波器的通带增益不易选取过大，为了观察参数选取合适与否，以及系统的幅频特性采用 Spice 仿真对 MFB 低通滤波器进行了仿真^[29]。结果如图 3.9。实际选择的电路参数的通带增益接近 1，如图 3.10 可以看出 MFB 低通滤波器对超过 100Hz 的信号明显具有衰减作用。实现了低通特性。

3.2.5 可变增益运算放大电路的设计

经过 MFB 低通滤波后的信号，仍没有满足模数转换的幅值要求，考虑到充分利用 A/D 转换器的量程，以提高系统精度，引入了可编程运算放大器的方法^[28]。专用可编程运放得价格要从几百甚至到几千，考虑到性价比的问题，我们选择了高精度运放+多路器的模式，在保证精度的前提下，具有良好的性价比。为提高系统精度及良好的温度特性，多路器的选择应具有较低的导通电阻及动态电阻，原方的选择应具有低输出失调电压，好的温度系数。基于上述原则选用了 MAX4051 和 LM101A 同构建的可变增益运算放大电路。具体电路形式如图 3.11。

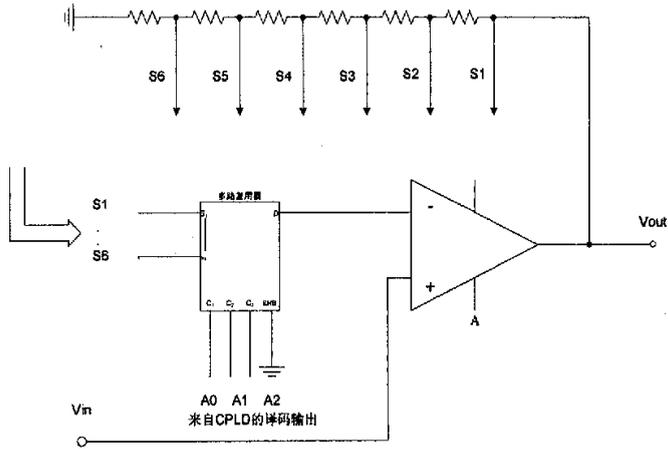


图 3.11 可变增益运算放大电路图

Fig. 3.11 Diagram of programmable gain amplifier circuit

多路复用器的真值表如表格 3.1

表格 3.1 多路复用器真值表
Table 3.1 Multiplexers truth table

使能端	地址位			有效开关
	A2	A1	A0	
1	X	X	X	所有通路开路
0	0	0	0	S1-D
0	0	0	1	S2-D
0	0	1	0	S3-D
0	0	1	1	S4-D
0	1	0	0	S5-D
0	1	0	1	S6-D
0	1	1	0	S7-D
0	1	1	1	S8-D

运放的增益:

当选择 S1-D 通道时: $k = 1$;

当选择 S2-D 通道时: $k = 1 + \frac{R1}{R2 + R3 + R4 + R5 + R6}$;

当选择 S3-D 通道时: $k = 1 + \frac{R1 + R2}{R3 + R4 + R5 + R6}$;

当选择 S4-D 通道时: $k = 1 + \frac{R1 + R2 + R3}{R4 + R5 + R6}$;

当选择 S5-D 通道时: $k = 1 + \frac{R1 + R2 + R3 + R4}{R5 + R6}$;

当选择 S6-D 通道时: $k = 1 + \frac{R1 + R2 + R3 + R4 + R5}{R6}$;

当选择 S7-D 通道时: $k = 1$;

当选择 S8-D 通道时: $k = 1$ 。

电极信号经过差动放大、MFB 低通滤波、可变增益放大等环节, 已经转变成可 A/D 转换器所能采样的电平幅度, 也就是说使系统已经能够获得与流量呈正比的感生电动势信号, 其波形如图 3.12

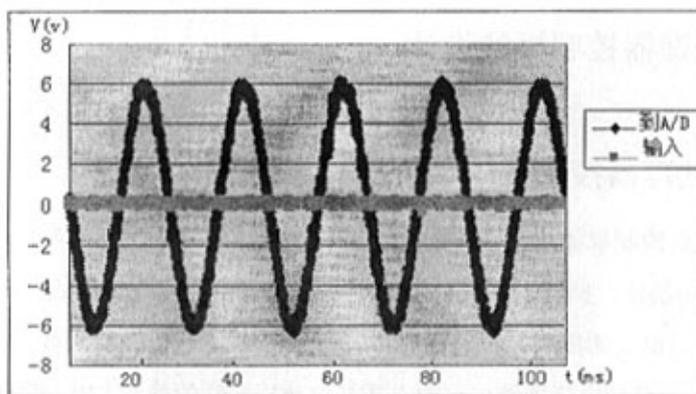


图 3.12 电极输入信号及变换后信号

Fig. 3.12 Input signal of electrode and signal after conversion

3.2.6 参考信号的转换电路设计

计算瞬时流量的过程中, 在公式 (2-21) 中, 除了系统管径 d 已知, 感生电压已经测得, 还有磁感应强度 B 尚未测得, 这里采用在励磁线圈上增加互感线

当选择 S1-D 通道时: $k = 1$;

当选择 S2-D 通道时: $k = 1 + \frac{R1}{R2 + R3 + R4 + R5 + R6}$;

当选择 S3-D 通道时: $k = 1 + \frac{R1 + R2}{R3 + R4 + R5 + R6}$;

当选择 S4-D 通道时: $k = 1 + \frac{R1 + R2 + R3}{R4 + R5 + R6}$;

当选择 S5-D 通道时: $k = 1 + \frac{R1 + R2 + R3 + R4}{R5 + R6}$;

当选择 S6-D 通道时: $k = 1 + \frac{R1 + R2 + R3 + R4 + R5}{R6}$;

当选择 S7-D 通道时: $k = 1$;

当选择 S8-D 通道时: $k = 1$ 。

电极信号经过差动放大、MFB 低通滤波、可变增益放大等环节, 已经转变成可 A/D 转换器所能采样的电平幅度, 也就是说使系统已经能够获得与流量呈正比的感生电动势信号, 其波形如图 3.12

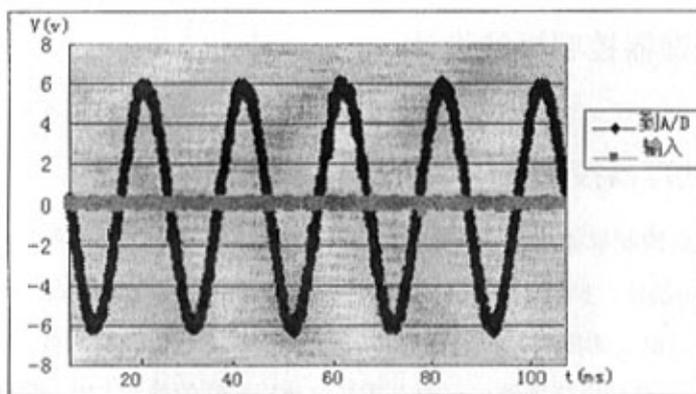


图 3.12 电极输入信号及变换后信号

Fig. 3.12 Input signal of electrode and signal after conversion

3.2.6 参考信号的转换电路设计

计算瞬时流量的过程中, 在公式 (2-21) 中, 除了系统管径 d 已知, 感生电压已经测得, 还有磁感应强度 B 尚未测得, 这里采用在励磁线圈上增加互感线

圈, 从而通过互感线圈获得的参考电压信号, 由于 B 与励磁电压成线性关系, 参考电压与励磁电压也呈线性关系, 因此通过测得参考电压信号也就得到磁感应强度。另外由于参考信号与正交干扰信号同相, 对参考信号做过零检测, 生成相关逻辑脉冲, 控制采样时刻, 也达到了克服正交干扰的目的。

其电路如图 3.13 由 MFB 低通滤波器、比例放大、过零检测、逻辑变换等部分组成。经过滤波及放大的信号输出到多路复用器提供给 A/D 转换, 经过零检测及逻辑变换的逻辑信号为系统提供中断信号 INT1 和过零脉冲。

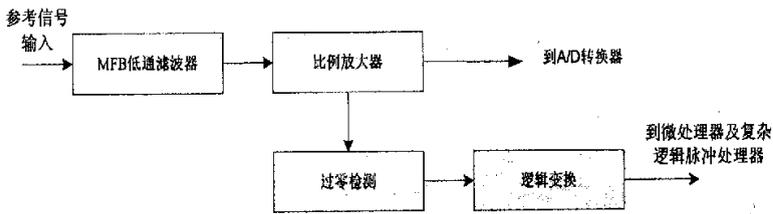


图 3.13 参考信号的转换电路结构图

Fig. 3.13 Diagram of transition circuit of reference signal

3.3 微处理器控制板的设计

3.3.1 微处理器控制板的结构功能

微处理器控制板如图 3.14 由微处理器 (MCU)、非易失 RAM (NVRAM)、程序存储器、A/D 转换器、扩展 I/O、LCM 显示、EEPROM、键盘输入等组成。微处理器完成对外部接口单元的控制、采集输据、计算存储、送显示以及输出等。非易失 RAM (NVRAM) 是一种掉电后能够保存静态 RAM 内数据特殊的静态 RAM, 采用这种非易失性的 RAM, 它存储系统的配置信息和扩展系统 RAM。EEPROM 存储系统的配置信息。LCD 液晶显示模块, 为系统提供带有背光的点阵字符液晶显示。扩展 I/O, 完成对开关量的采集与输出以及与输出单元实现频率到电压再到电流的转换。键盘输入完成人机交互。A/D 转换器实现系统的模数转换完成对流量信号的采集 (采样对象由电极信号处理得到)。

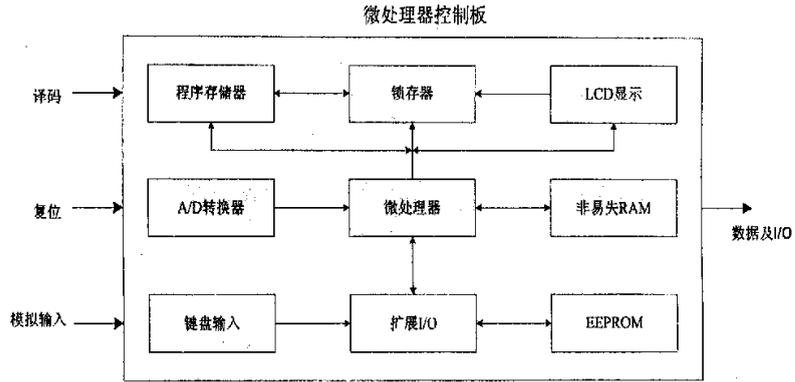


图 3.14 微处理器控制板结构图

Fig. 3.14 Diagram of MCU control board

3.3.2 MCS-51 微处理器的概述

MCS-51 图 3.16 主要包括算术 / 逻辑部件 ALU、累加器 A(有时也称 ACC)、只读存储器 ROM、随机存储器 RAM、指令寄存器 IR、程序计数器 PC、定时器 / 计数器、I / O 接口电路、程序状态寄存器 PSW、寄存器组, 此外, 还有堆栈寄存器 SP、数据指针寄存器 DPTR 等部件。这些部件集成在一块芯片上, 通过内部总线连接, 构成完整的微型计算机。

MCS-51 单片机有 4 个口, 共 32 根 I/O 线。所有 4 个端口都是双向口, 每个端口都包含一个锁存器, 即专用寄存器 P0—P3, 一个输出驱动器和输入缓冲器。为了方便起见, 我们把 4 个端口和其中的锁存器(即专用寄存器)都笼统地表示为 P0-P3。MCS-51 在访问外部存储器时, 地址由 P0、P2 口送出, 数据则通过 P0 口传送, 这时 P0 口是分时多路转换的双向总线。无外部存储器的系统中, 所有 4 个端口都可以作为准双向口使用。访问程序存储器时, 如果程序存储器是外部的, 则程序存储器读选择 PSEN 一般是每个机器周期两次有效^{[32][32]}, 如果是访问外部数据存储器, 如图 3.15 所示, 则要跳过两个 PSEN, 因为地址和数据总线正在用于访问数据存储器。应该注意的是, 数据存储器总线周期为程序存储器总线周期的 2 倍。和端口 2 所发送的地址 ALE 和 PSEN 的相对时序。ALE 用于将 P0 的低位地址字锁存。

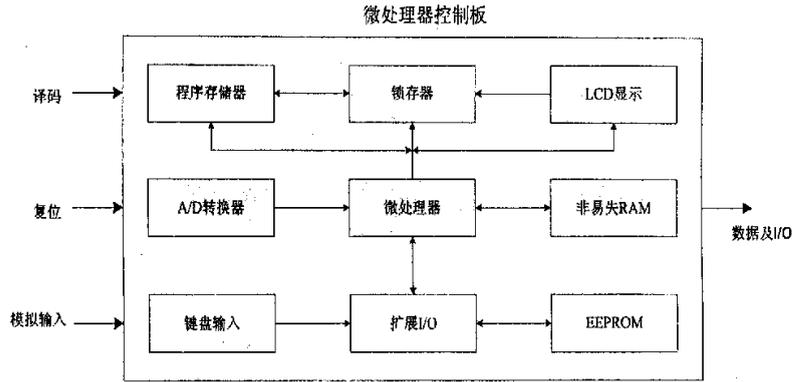


图 3.14 微处理器控制板结构图

Fig. 3.14 Diagram of MCU control board

3.3.2 MCS-51 微处理器的概述

MCS-51 图 3.16 主要包括算术 / 逻辑部件 ALU、累加器 A(有时也称 ACC)、只读存储器 ROM、随机存储器 RAM、指令寄存器 IR、程序计数器 PC、定时器 / 计数器、I / O 接口电路、程序状态寄存器 PSW、寄存器组，此外，还有堆栈寄存器 SP、数据指针寄存器 DPTR 等部件。这些部件集成在一块芯片上，通过内部总线连接，构成完整的微型计算机。

MCS-51 单片机有 4 个口，共 32 根 I/O 线。所有 4 个端口都是双向口，每个端口都包含一个锁存器，即专用寄存器 P0—P3，一个输出驱动器和输入缓冲器。为了方便起见，我们把 4 个端口和其中的锁存器(即专用寄存器)都笼统地表示为 P0-P3。MCS-51 在访问外部存储器时，地址由 P0、P2 口送出，数据则通过 P0 口传送，这时 P0 口是分时多路转换的双向总线。无外部存储器的系统中，所有 4 个端口都可以作为准双向口使用。访问程序存储器时，如果程序存储器是外部的，则程序存储器读选择 PSEN 一般是每个机器周期两次有效^{[32][32]}，如果是访问外部数据存储器，如图 3.15 所示，则要跳过两个 PSEN，因为地址和数据总线正在用于访问数据存储器。应该注意的是，数据存储器总线周期为程序存储器总线周期的 2 倍。和端口 2 所发送的地址 ALE 和 PSEN 的相对时序。ALE 用于将 P0 的低位地址字锁存。

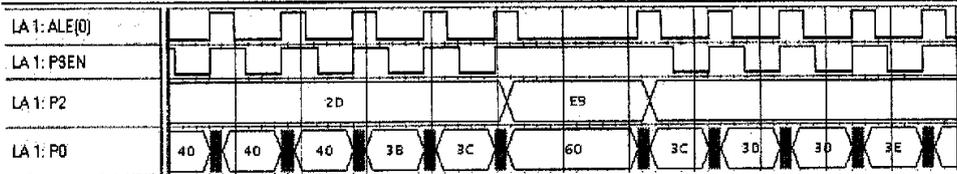


图 3.15 MCS-51 外部 RAM 写时序
Fig. 3.15 External Program RAM Write Cycle

对于程序设计在 8k 以内的系统，不必再进行专门扩展程序存储器，基于产品的后续升级，对程序存储器进行了扩展设计，采用 64K 的 EPROM，EPROM 与微处理器的接口比较简单，只需 EPROM 的高位地址总线与微处理器直接相连，低位地址与微处理器的地址/数据总线通过锁存后连接，片选信号接地，EPROM 输出使能再与微处理器的 PSEN 连接，即完成 EPROM 与微处理器的接口。由于程序代码量较大，所需要的内存资源也比较多，采用的微处理器只有 256 字节内部 RAM，因此对系统的数据存储器也进行了扩展，考虑到可靠性因素，采用非易失性 RAM(NVRAM)，与微处理器接口数据地址总线同程序存储器，所不同的是数据存储器需要接微处理器的读写信号以及地址锁存（ALE），使能由专用芯片提供。

3.3.3 显示模块的设计

随着仪器、仪表的智能化，并且普遍地采用人机交互方式，需要能够显示更为丰富的信息和通用性较强的显示器，而点阵式 LCM 显示器显然能够满足这些要求，同时使用大规模专用集成电路作为点阵 LCM 控制驱动，使用者仅仅直接送入数据和指令可实现所需的显示。这种由 LCD 板、PCB 板、控制驱动电路组成的单元被称为点阵液晶显示模块（DOT MATRIC LCD MODULE）。

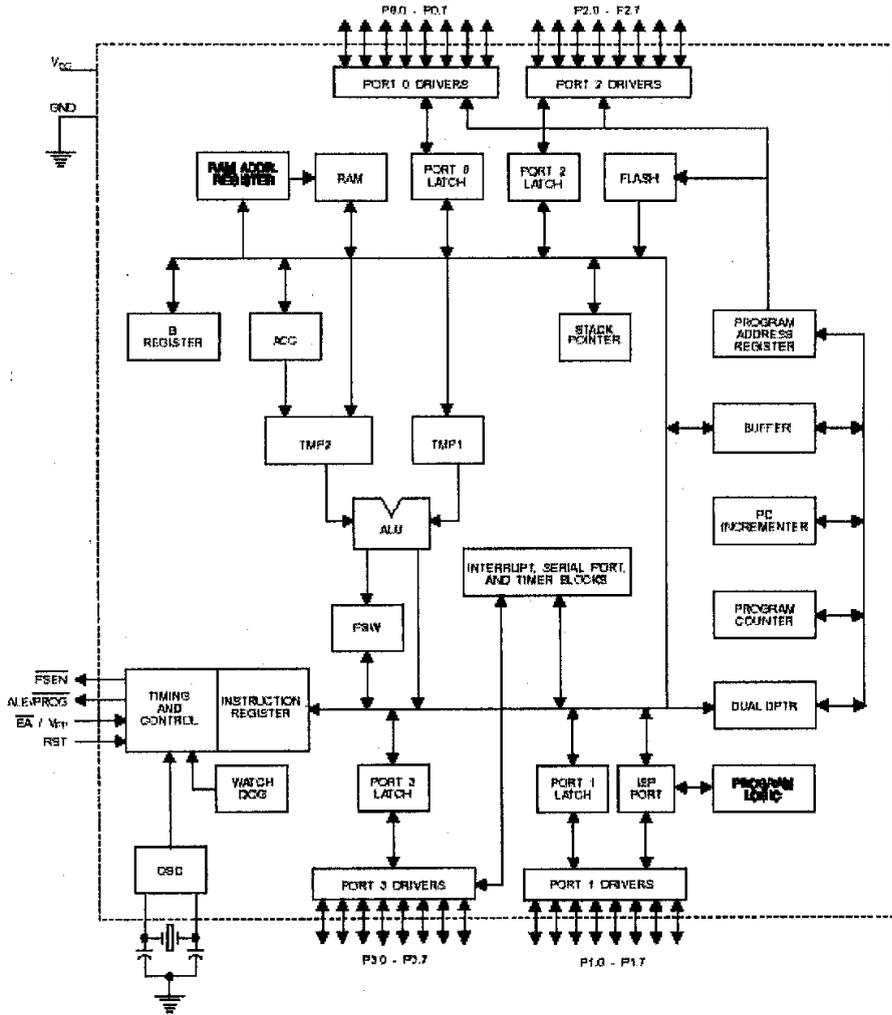


图 3.16 MCS-51 结构图

Fig. 3.16 Block diagram of MCS-51

接口方面,有8条数据线,三条控制线。可与微处理器或微控制器相连,通过送入数据和指令,就可使模块正常工作。图 3.17 是字符型模块的电路框图^[37],它由 HD44780, HD44100 及几个电阻电容组成。HD4410 是扩展显示字符位用的(例如:16 字符×1 行模块就不用 HD44100, 16 字符×2 行模块就要用 1 片 HD44100)。

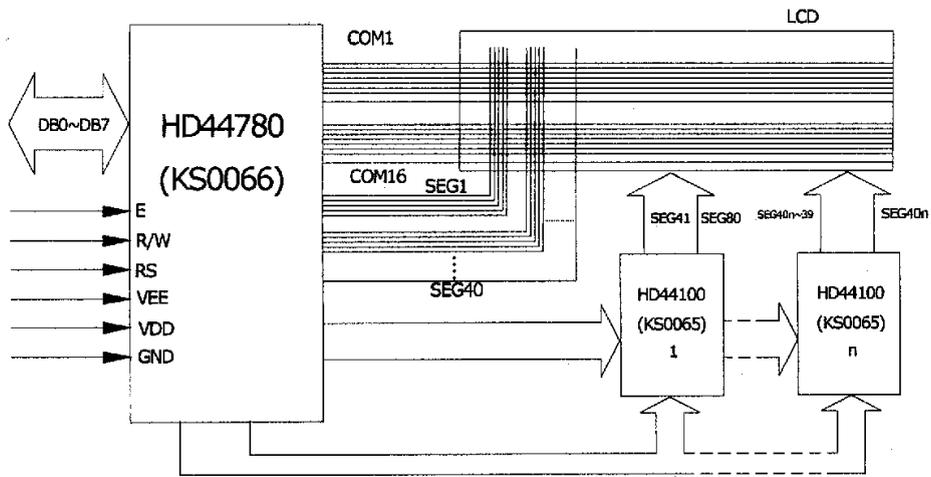


图 3.17 字符模块的电路框图

Fig. 3.17 Block diagram of char module

表格 3.2 寄存器选择功能

Table 3.2 Selection of registers function

RS	R/W	操 作
0	0	指令寄存器(IR)写入
0	1	忙标志和地址计数器读出
1	0	数据寄存器(DR)写入
1	1	数据寄存器读出

备注:忙标志为“1”时,表明正在进行内部操作,此时不能输入指令或数据,要等内部操作结束,忙标志为“0”时。

表格 3.3 指令表

Table 3.3 Instructions

指令名称	指 令 码										说 明	执行周期 FCP=250K HZ
	RS	R/W	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0		
清 屏	L	L	L	L	L	L	L	L	L	H	清除屏幕,置AC为零	1.64ms
返 回	L	L	L	L	L	L	L	L	H	X	设 DDRAM 地址为零,显示回	1.64ms

输入方式设置	L L L L L L L H I/D S	设光标移动方向并指定整体显示是否移动	40us
显示开关控制	L L L L L L H D C B	设整体显示开关(D), 光标开关(C), 及光标位的字符闪耀(B)	40us
移位	L L L L L H S/C R/L X X	移动光标或整体显示, 同时不改变 DDRAM 内容	40us
功能设置	L L L L H DL N F X X	设接口数据位数(DL), 显示行数(L), 及字型(F)	40us
CGRAM 地址设置	L L L H AC	设 CGRAM 地址, 设置后 CGRAM 数据被发送和接收	40us
DDRAM 地址设置	L L H ADD	设 DDRAM 地址, 设置后 DDRAM 数据被发送和接收	40us
读忙信号(BF)及地址计数器	L H BF AC	读忙信号位(BF)判断内部操作正在执行并读地址计数器内容	0us
写数据 CG/DD RAM	H L 写数据	写数据到 CG 或 DDRAM	40us Tadd=6ns
读数据由 CG/DD RAM	H H 读数据	读数据由 CG 或 DDRAM	40us Tadd=6ns
	I/D 1:增量方式, 0:减量方式 S 1:移位 S/C 1:显示移位, 0:光标移位 R/L 1:右移, 0:左移 DL 1:8位, 0:4位 N 1:2行, 0:1行 F 1:5×10, 0:5×7 BF 1:内部操作, 0:接收指令 RS :寄存器选择 R/W :读/写	DDRAM : 显示数据 RAM CGRAM: 字符生成 RAM AC: 用于 DD 和 CGRAM 地址 的地址计数器	执行周期随主频率改变而改变 例如: 当 Fosc 或 fcp 为 270KHZ 40 us × 250/270 = 37 us

LCM 与微处理器的接口如图 3.18, 采用 AT89S52 的 P2.7 控制 LCM 的寄存器选择信号 (RS), 利用复杂逻辑处理芯片生成的地址译码控制读写信号 (R/W), 数据总线则直接与微处理器的数据总线直接相连。电位器 R 为调节 LCM 背光。

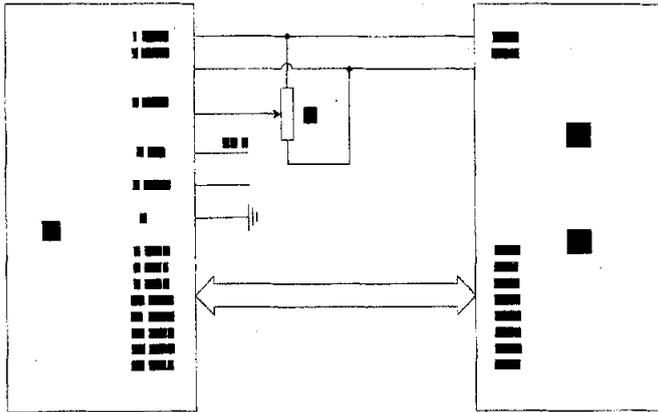


图 3.18 LCM 与微处理器的接口

Fig. 3.18 Interface between LCM and MCU

3.3.4 键盘输入模块的设计

键盘可以分为二种，即编码键盘和非编码键盘^[36]。编码键盘是通过一个编码电路来识别闭合键的编码，非编码键盘是通过软件来识别键码。由于非编码键盘的硬件电路简单，用户可以方便地增减键的数量，因此在单片机系统中应用广泛。非编码键盘又分为独立式按键和行列式键盘，本文采用后者。行列式键盘将 I/O 口线的一部分作为行线，另一部分作为列线，按键设置在行线和列线的交叉点上，这就构成了行列式键盘。行列式键盘中按键的数量可达行线数 n 乘以列线数 m ，如 4 行、4 列行列式键盘的按键数可以达到 $4 \times 4 = 16$ 个。由此可以看到行列式键盘在按键较多时，可以节省 I/O 口线。图 3.19 为 4×4 行列式键盘的电路原理图。8 条 I/O 口线分为 4 条行线和 4 条列线，按键设置在行线和列线交点上，即按键开关的两端分别接在行线和列线上。行线通过一个电阻接到 +5V 电源上，在没有键按下时，行线处于高电平状态。判断是否有键按下的方法是：向所有的列线 I/O 口输出低电平，然后将行线的电平状态读入累加器 A 中。若无键按下，行线仍保持高电平状态，若有键按下，行线至少应有一条为低电平。当确定有键按下后，即可进行求键码的过程。其方法是：依次从一条列线上输出低电平，然后检查各行线的状态，若全为高电平，说明闭合键不在该列(输出低电平)，若不全为 1，则说明闭合键在该列，且在变为低电平的行的交点上在键盘处理程序中，每个

键都被赋予了一个键号，由从列线 I/O 口输出的数据和从行线 I/O 口读入的数据可以求出闭合键的键号。其具体实现如图 3.19。ALE 来自微处理器，用于锁存数据，E 扩展 I/O 的使能，控制信号来自复杂逻辑处理芯片，扩展 I/O 的数据总线与微处理器数据总线直接相连。系统其他部分的 I/O 扩展原理同键盘电路。

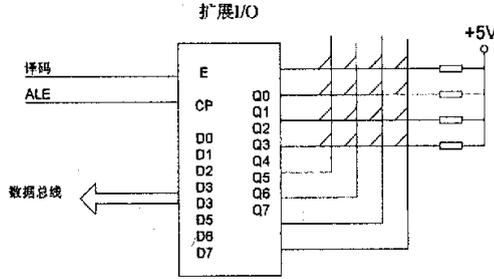


图 3.19 键盘输入设计

Fig. 3.19 Keyboard circuit

3.3.5 A/D 转换器接口设计

在模拟量经过差动放大，滤波，比例放大后，需要经过 A/D 转换才能送进微处理器。目前 A/D 转换器集成芯片种类很多，以满足不同的需要。常用的有：ADC0808/0809 (8 位)、AD574A (12 位) 等。考虑到系统设计的目标精度，所以应选择 12 位的 A/D 转换器。AD574A 是 12 位逐次逼近型 A/D 转换器。它的主要特点：转换速度为 25us (12 位转换)，转换精度 0.05%，由于芯片内有三态输出缓冲电路，因而可直接与各种典型的 8 位或 16 位微处理器相连，而无须附加逻辑接口电路，且能与 CMOS 及 TTL 兼容，温度适应范围大，在 -55~125℃ 范围内满足线性要求，内含时钟和基准电源^{[34][38]}。其主要功能引脚如下：

AC：模拟地

DC：数字地

\overline{CS} ：片选信号，低电平有效

CE：片使能，高电平有效

R/\overline{C} ：读启动信号，高电平读数据，低电平转换

12/8：数据格式选择，高电平 12 位数据同时有效，低电平时第一次输出高 8 位，第二次输出低 4，中 4 位为零。

A0: 内部寄存器控制输入端, 在 $12/\bar{8}$ 接地的情况下, 高电平时高8位数据有效, 低电平是低4位有效, 中间4位为零, 高4位为高阻态, 在 R/\bar{C} 为低的情况下, 高电平启动12位转换, 低电平启动8位转换。

STS: 工作状态输出端, 高电平表示正在转换, 低电平表示转换完毕。

本文采用其双极性设计, 可实现输入信号 $-10V \sim +10V$ 的转换。具体实现如图

3.20

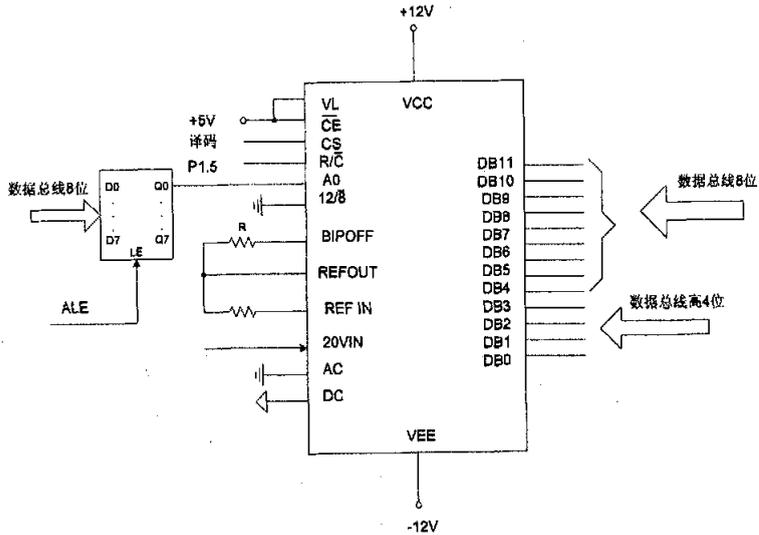


图 3.20 AD574A 接口电路

Fig. 3.20 AD574A interface circuit

3.4 专用芯片设计

3.4.1 复杂逻辑门阵列 (CPLD) 简述

CPLD (复杂可编程逻辑电路) 是一种具有丰富的可编程 I/O 引脚的可编程逻辑器件, 具有在系统可编程、使用方便灵活的特点; 不但可实现常规的逻辑器件功能, 还可实现复杂的时序逻辑功能。把 CPLD 应用于嵌入式应用系统, 同单片机结合起来, 更能体现其在系统可编程、使用方便灵活的特点。CPLD 同单片机接口, 可以作为单片机的一个外设, 实现单片机所要求的功能。例如, 实现常用的地址译码、锁存器、8255 等功能; 也可实现加密、解密及扩展串行口等单片机所要求

的特殊功能。实现嵌入式应用系统的灵活性，也提高了嵌入式应用系统的性能。

Xilinx 公司的 XC9500 系列可编程逻辑器件是一款高性能、有特点的可编程逻辑器件。从结构上看，它包含三种单元：宏单元、可编程 I/O 单元和可编程的内部连线。它的主要特点是：

1. 高性能：在所有可编程引脚之间 pin-pin 延时 5ns；系统的时钟速度可达到 100MHz。
2. 容量范围大：Xilinx 公司的 XC9500 系列可编程逻辑器件的容量范围为 36~288 个宏单元；可用系统门为 800~6400 个。
3. 5V 在线系统可编程：可以编程 10000 次。
4. 具有强大的引脚锁定能力：
5. 每个宏单元都有可编程低功耗模式：
6. 没有用的引脚有编程接地能力：

Xilinx 的 XC9500 系列可编程逻辑器件的主要性能如表格 3.4 所列。

表格 3.4 Xilinx XC9500t 系列器件
Table 3.4 Components of Xilinx XC9500t

项 目	XC9536	XC9572	XC95108	XC95144	XC95216	XC95288
寄存器/个	36	72	108	144	216	288
可用门数/个	800	1600	2400	3200	4800	6400
宏单元数/个	36	72	108	144	216	288
fPD/ns	5	7.5	7.5	7.5	10	10
tSU/ns	3.5	4.5	4.5	4.5	6.0	6.0
tCO/ns	4.0	4.5	4.5	4.5	6.0	6.0
fCNT/MHz	100	125	125	125	111.1	111.1
fSYSTEM/MHz	100	83.3	83.3	83.3	66.7	66.7

注：f_{CNT}=16 位计数器最高工作频率；f_{SYSTEM}=整个系统的最高工作效率。

3.4.2 专用芯片功能结构及接口设计

专用芯片功能结构如图 3.21 包括扩展 I/O、地址译码、系统复位、复杂脉冲生成。扩展 I/O 资源完成对开关量的采集传送到微处理器；系统复位实现对电源

监控芯片的处理并产生对系统的上点复位信号；地址译码通过对地址总线上数据的获取生成地址片选信号，包括对 A/D 转换器、LCM、键盘扩展 I/O。复杂逻辑脉冲包括对基本脉冲的生成、电流输出脉冲、流量脉冲的生成，流量脉冲用于系统精确输出且与目标系统隔离，电流脉冲隔离输出到电流转换板实现 0~20mA 的数出。基本脉冲输出到 8253 最终形成流量脉冲输出。

转用芯片的接口设计很简单，如图 3.22，只要将地址总线、数据总线、地址锁存（ALE）与芯片相连即可。

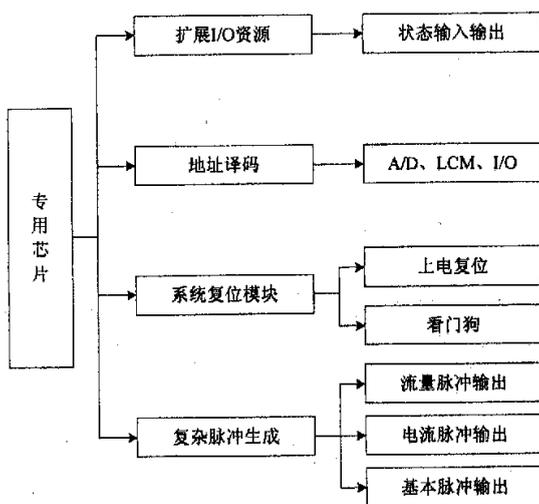


图 3.21 专用芯片结构功能

Fig. 3.21 Function diagram of ASIC

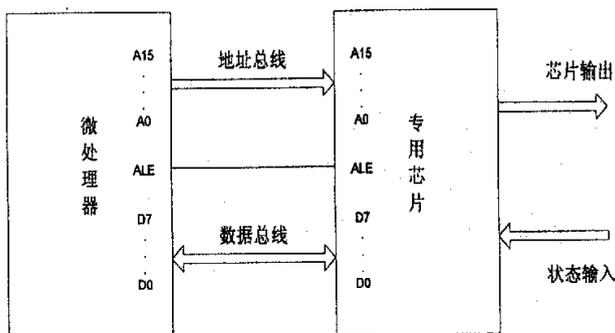


图 3.22 专用芯片接口设计

Fig. 3.22 Design of ASIC interface

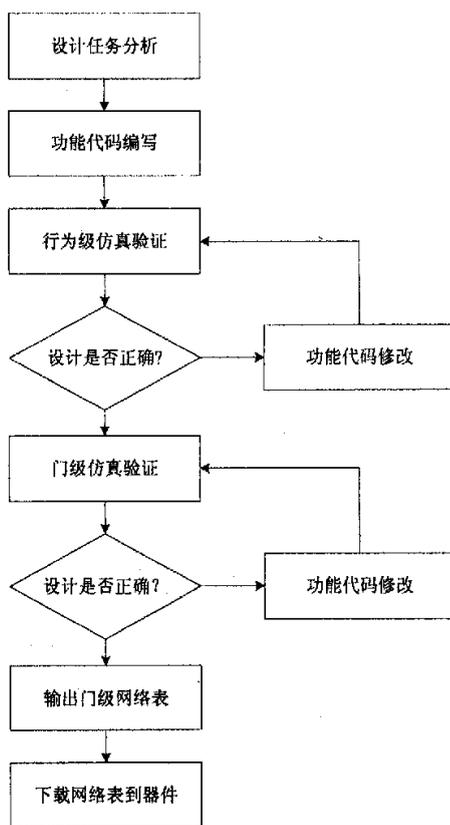


图 3.23 专用芯片设计流程

Fig. 3.23 Design flow of ASIC

3.4.3 专用芯片设计流程

应用 VHDL 语言设计硬件电路时，多采用自顶向下的设计方法。所谓自顶向下就是从系统总体要求出发，自上向下地逐步将设计内容细化，最后完成系统硬件的整体。设计这种方法的优点在于能够处理复杂设计，节省设计时间，提高设计质量，而且能够应用 CPLD 迅速得到设计的样机，同时增加了设计的再利用性。应用 VHDL 语言设计硬件电路的流程如图 3.23 所示，首先进行设计任务分析，建立代码，进行行为级仿真验证，代码修改，接下进行寄存器传输(RTL)级仿真，代码修改，最后用综合工具输出门级网络表，下载到器件。

3.4.4 专用芯片设计及实现结果

完整的 VHDL 程序包括三部分：文件定义数据类型和组件定义部分（以后称 pack），接口参数的传递部分（以后称 unpack），主程序（具体功能模块的实现），pack 是 unpack 与 mcore 进行参数传递的依据；主要包括定义使用的标准库、输入数据类型的定义、输出数据类型的定义、组件的定义。主程序完成对主要共能模块的实现。其具体实现结构如下：

```
-----定义使用的标准库文件-----  
library ieee;  
    use ieee.std_logic_1164.all;  
    use ieee.std_logic_arith.all;  
    use ieee.std_logic_unsigned.all;  
  
package pack is  
-----输入数据类型的定义-----  
    type in_type is record  
-----具体的输入数据列表-----  
    end record ;  
-----输出数据类型的定义-----  
    type out_type is record  
-----具体输出数据列表-----  
    end record ;  
-----组件-----  
    component mcore is  
    port(  
        clk : in std_logic ;  
        data : inout std_logic_vector(7 downto 0) ;  
        inputs : in in_type ;  
        outputs : out out_type
```

```
) ;  
end component ;  
end package ;
```

unpack 文件实现于参数与引脚的接口:

```
library ieee;  
use ieee.std_logic_1164.all;  
use ieee.std_logic_arith.all;  
use ieee.std_logic_unsigned.all;  
use work.pack.all ;
```

```
entity unpack is
```

```
port(  
----- 实体端口定义-----  
);
```

```
end unpack ;
```

```
architecture struct of unpack is
```

```
signal inputs : in_type ;  
signal outputs : out_type ;
```

```
begin
```

```
-----接口实现-----  
u : mcore port map(clk=> clk, data=>data, inputs=>inputs,  
outputs=> outputs) ;
```

```
end struct ;
```

mcore 文件结构:

```
library ieee;

use ieee.std_logic_1164.all;
use ieee.std_logic_arith.all;
use ieee.std_logic_unsigned.all;
use work.pack.all ;

-----端口定义-----

entity mcore is
port(
    clk : in std_logic ;
    data : inout std_logic_vector(7 downto 0) ;
    inputs : in in_type ;
    outputs : out out_type
) ;
end mcore ;

architecture rtl of mcore is
-----寄存器类型定义-----
type regs_type is record
end record ;

signal r,rin : regs_type ;

begin
comb : process(r, inputs, data)
-----主要供能模块的实现-----
end process ;

regs : process(clk) -----同步时钟寄存进程
```

```

begin
    if (clk'event and clk='1') then
        r <= rin ;
    end if ;
end process ;
end rtl ;

```

按系统功能模块考核 VHDL 的设计实现如图 3.24，基本脉冲、电流脉冲及流量脉冲的实现，是通过与流量信号呈线性关系的频率信号实现的，验证方法可通过 Modelsim 仿真和实测输出频率，系统最高输出频率为 15kHz，其输出如 CP 为电流脉冲，FP 为流量脉冲，CLK0 为基本脉冲输出；地址译码的验证为途中 NV，EEPROM，WR，RD 共同完成，当读或写有效时，确保当前输出使能有效唯一；看门狗工作时序验证，当微处理器不在给看门狗复位信号，在芯片两个引脚连续输出一定频率的脉冲，一路使 CPU 状态灯闪烁，另一路给微处理器复位。

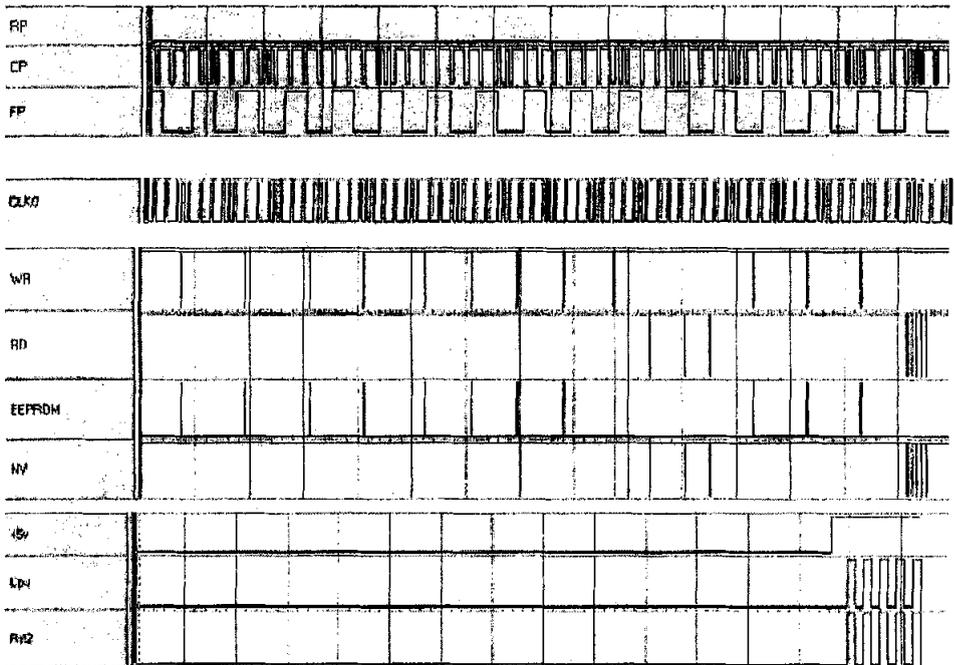


图 3.24 专用芯片功能实现波形

Fig. 3.24 Waveform of ASIC realized function

3.5 信号转换器其它输入输出模块的设计

信号转换器其它的输入输出包括开关量信号的输入与输出,以及 4-20ma 信号的输出,为增加系统的抗干扰特性,开关量的输出全部采用光电隔离,对于 4-20ma 信号才用频率到电压,在有电压到电流的转换形式,也实现了与输出的隔离,使系统的总体性能得到提升。

电流输出单元接收来自复杂逻辑处理芯片生成的与流量呈线性的频率信号,有 555 时基电路实现由频率到电压信号的转换,再由运放及 MOSFET 管构成的反馈控制回路,当系统电压升高,运放输出增大,反馈电压增加,运放输出降低,当反馈电压与输入点压相等,系统同进入稳态,即以一稳定的电流输出,这里主要决定电流大小的参数是电流脉冲频率。

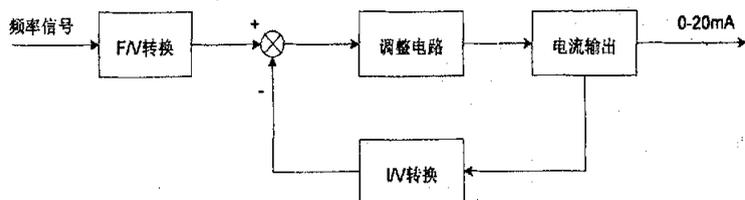


图 3.25 电流输出原理图

Fig. 3.25 Principle of current output

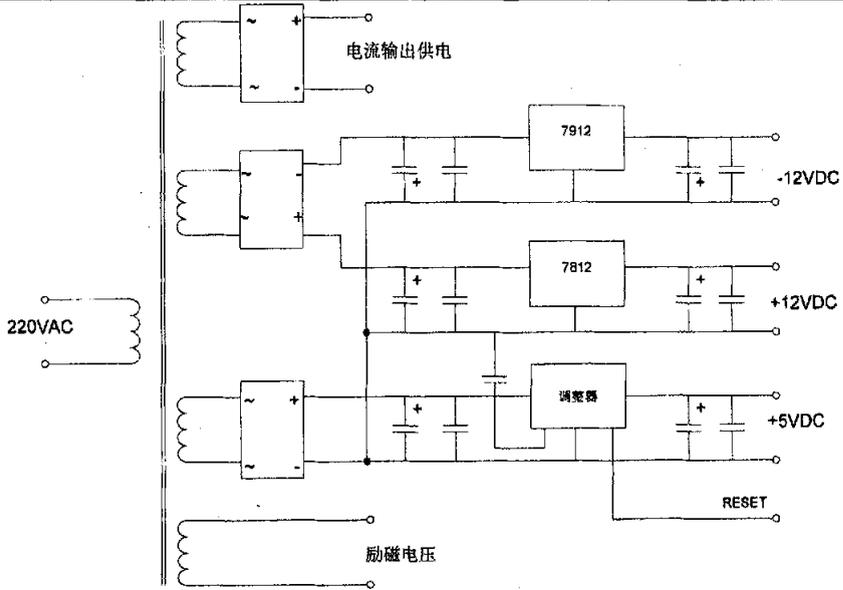


图 3.26 电源系统的电路图

Fig. 3.26 Circuit of power system

3.6 电源系统的设计

如图 3.26 电源系统提供 $\pm 12\text{VDC}$ ， $+5\text{VDC}$ ，励磁电压（AC），电流输出电压。其中 $\pm 12\text{VDC}$ 采用集成三端稳压器，目前集成稳压电源的规格种类繁多，具体电路结构也往往有不少差异，最简便的集成稳压组件只有三个引线端，即不稳定电压输入端（接桥的输出），稳定电压输出端（接负载）和公共接地端。这样的组件常称为“三端集成稳压器。例如集成稳压器 78xx 系列可提供 1.5A 额定输出电流和 5V、6V、9V、12V 的输出电压。三端集成稳压器的使用十分方便。应用时，只要从产品手册中查到其有关参数和指标及外形尺寸，再配上适当的散热片及电容就可以按需要接成稳压电路，例如，可选择正压输出组件或负压输出组件，也可同时选择正、负输出电压组件，以构成单路正压输出、单路负压输出或同时具有正、负电压输出的稳压电源。 $+5\text{VDC}$ 采用带复位端的电压调整器，以实现为处理器系统的可靠复位。交流励磁电压直接以一定的幅度输出励磁线圈。

3.7 电磁兼容及系统结构设计

电磁兼容的技术关键在于有效地控制电磁干扰，只有掌握电磁干扰的抑制技术，并在系统或设备的设计、生产技术过程中合理的应用，才能实现电磁兼容。因此，干扰的抑制技术是电磁兼容领域的重要课题，抑制电磁干扰的方法很多，其中主要有：

1. 接地

接地是电子设备工作所必需的技术措施。同时接地也引入接地阻抗及地回路干扰，事实证明接地设计对各种干扰的影响是很大的，因此，在电磁兼容领域中，接地技术至关重要，包括接地点选择，电路组合接地的设计和抑制接地干扰措施的合理应用等。在系统的设计中，遵循了数字地与模拟分离，在特定点进行单点接地的原则。

2. 隔离

隔离是抑制干扰耦合的技术措施，它包括电路的空间隔离和电位隔离。电路的空间隔离是减少电路间电磁耦合的最简单而有效的方法，电位隔离主要用于抑制电平相差较大的两回路间的耦合例如信号回路与功率回路间的电路性耦合。电位隔离的典型方法是将电信号转变为其他物理量，通常用磁场和光辐射作为中间变量，EMF 信号转换器的开关量的输入和全部输出均采用了光电隔离使系统的抑制干扰的性能得到相当的提高。

3. 滤波

滤波是压缩信号回路干扰频谱的一种方法，当干扰频谱成分不同于有用信号的频带时用滤波器将无用的干扰信号滤去。滤波器对与有用信号频率不同的那些频率成分有良好抑制作用、借助滤波器可明显地减小传导干扰电平，若滤波器把有用信号和干扰信号的频率分离的越完善，它对减少有用信号回路内的干扰信号的效果就越好，因此适当地设计、选择正确地使用滤波器对抑制干扰是非常重要的，信号转换器的设计中采用了多反馈环的低通滤波器，却得了很好的滤波效果。

4. 屏蔽

屏蔽是通过各种屏蔽材料吸收及反射外来电磁能量来防止外来干扰的侵入或将设备辐射的电磁能量限制在一定区域内，以防止干扰其他设备(主动屏蔽)。屏蔽不仅对辐射干扰有良好的抑制效果，而且对静电干扰和干扰的电容性耦合、电

感性耦合均有明显的抑制作用。因此屏蔽是抑制电磁干扰的重要技术，在实际工程设计中，必须在保证通风、散热要求的条件下，实现良好的电磁屏蔽。信号转换采用金属外壳屏蔽，电极信号的传送也采用屏蔽电缆。当环境电磁辐射频率在500kHz-30MHz 范围内，壳体屏蔽材料可选用铝，而当频率大于30MHz，则可选用铜、铜镀银等。

在电磁流量计信号转换器印刷版的过程中，应以充分考虑系统的电磁兼容性，以具有好的电磁兼容性为目标，来确定系统的结构设计，元件的位置应以电源电压，模拟信号处理，数字电路为蓝本分组。

由于系统在电路设计及结构设计中充分的考虑了电磁兼容性，从目前的测试来看系统据有较好的测量精度。

第4章 电磁流量计信号转换器的实验

4.1 实验装置

实验装置采用实流校验方法实验方法^[39]。详细结构如图 4.1 所示：校验设备是电子秤和标准容器，测量误差为 1/3000，可以称出流体的容量和质量。另外，还可以在实验装置的潜水泵内掺进氧化铝杂质，做掺杂实验。其中实验装置实验管道直径为 $\Phi 25\text{mm}$ ；测量温度为室温：

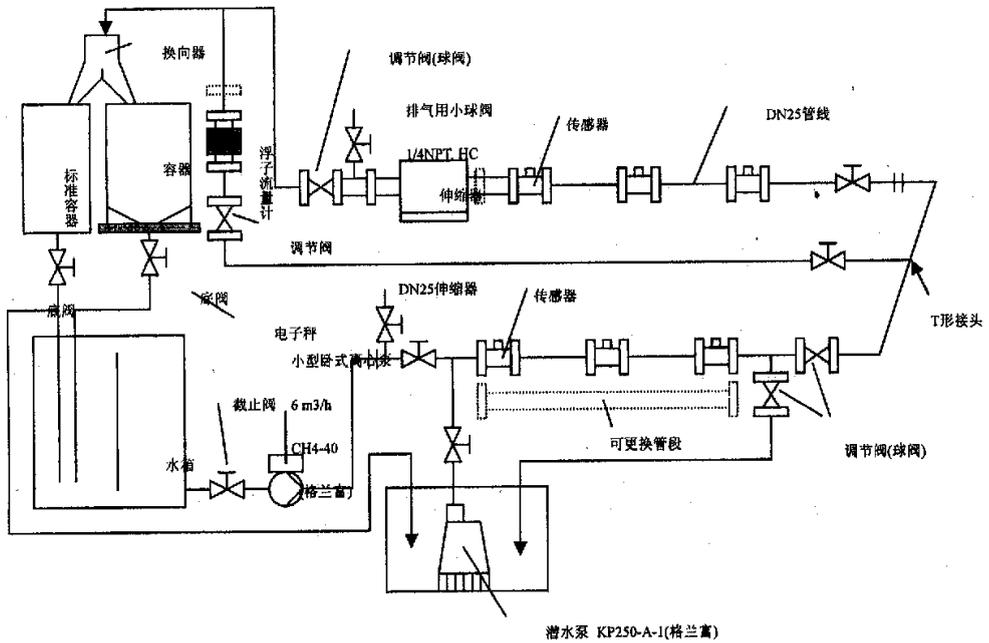


图 4.1 实验装置

Fig. 4.1 Device for calibration

4.2 变送装置的实验与结果

4.2.1 实验操作步骤

容积法和质量法实验操作步骤分别如下：

1. 容积法

- 1) . 电磁阀置 A 位，向容器 A 进水，同时开始计数和计时。
- 2) . 在计测试过程中，如果按“暂停”按钮，则终止计数和计时，电磁阀置 B 位，向容器 B 进水。如果再次按“启动”按钮，则继续计数和计时，电磁阀置 A 位，向容器 A 进水。
- 3) . 当脉冲数累计到预置总脉冲计数值 (PZ) 时，则终止计数和计时，电磁阀置 B 位，向容器 B 进水。

4) . 在计测试过程中，频率计显示脉冲频率值。

5) . 按“复位”按钮，则计数器和计时器清零。

2. 质量法

- 1) . 电磁阀置 B 位，向容器 B 进水，同时开始计数和计时。
- 2) . 在计测过程中，如果按“暂停”按钮，则终止计数和计时，电磁阀置 A 位，向容器 A 进水。如果再次按“启动”按钮，则继续计数和计时，电磁阀置 B 位，向容器 B 进水。
- 3) . 当脉冲数累计到预置总脉冲计数值 (PZ) 时，则终止计数和计时，电磁阀置 A 位，向容器 A 进水。

4) . 在计测过程中，频率计显示脉冲频率值。

5) . 按“复位”按钮，则计数器和计时器清零。

4.2.2 实验结果

1. 质量法不掺杂实验

变送装置没有进行调零和满量程调节的实验结果如表格 4.1 所示：

4.2 变送装置的实验与结果

4.2.1 实验操作步骤

容积法和质量法实验操作步骤分别如下：

1. 容积法

- 1) . 电磁阀置 A 位，向容器 A 进水，同时开始计数和计时。
- 2) . 在计测试过程中，如果按“暂停”按钮，则终止计数和计时，电磁阀置 B 位，向容器 B 进水。如果再次按“启动”按钮，则继续计数和计时，电磁阀置 A 位，向容器 A 进水。
- 3) . 当脉冲数累计到预置总脉冲计数值 (PZ) 时，则终止计数和计时，电磁阀置 B 位，向容器 B 进水。

4) . 在计测试过程中，频率计显示脉冲频率值。

5) . 按“复位”按钮，则计数器和计时器清零。

2. 质量法

- 1) . 电磁阀置 B 位，向容器 B 进水，同时开始计数和计时。
- 2) . 在计测过程中，如果按“暂停”按钮，则终止计数和计时，电磁阀置 A 位，向容器 A 进水。如果再次按“启动”按钮，则继续计数和计时，电磁阀置 B 位，向容器 B 进水。
- 3) . 当脉冲数累计到预置总脉冲计数值 (PZ) 时，则终止计数和计时，电磁阀置 A 位，向容器 A 进水。
- 4) . 在计测过程中，频率计显示脉冲频率值。
- 5) . 按“复位”按钮，则计数器和计时器清零。

4.2.2 实验结果

1. 质量法不掺杂实验

变送装置没有进行调零和满量程调节的实验结果如表格 4.1 所示：

表格 4.1 系统校正前实验

Table 4.1 Experiment before signal calibrated

工作点	流速	实际重量	表测重量	误差
98%	5.9m ³ /h	57.8kg	50kg	-13.49%
80%	4.8m ³ /h	56.15kg	50kg	-10.95%
72%	4.3m ³ /h	56.75kg	50kg	-11.89%
62%	3.7m ³ /h	56.9kg	50kg	-12.13%
55%	3.3m ³ /h	57.1kg	50kg	-12.43%
47%	2.8m ³ /h	56.85kg	50kg	-12.05%
28%	1.7m ³ /h	56.05kg	50kg	-10.79%
20%	1.2m ³ /h	56.6kg	50kg	-11.66%

系统平均误差为-12.11%，校正系统零点和满量程以后，测量结果如表格 4.2 所示：

表格 4.2 系统校正后实验

Table 4.2 Experiment after signal calibrated

工作	流速	实际重量	表测重量	误差
96%	6.7m ³ /h	51.5kg	50kg	-2.91%
79%	5.5 m ³ /h	49.45kg	50kg	1.11%
70%	4.9m ³ /h	48.85kg	50kg	2.35%
56%	3.9m ³ /h	49.7kg	50kg	0.60%
44%	3.1m ³ /h	49.25kg	50kg	1.52%
30%	2.1m ³ /h	48.45kg	50kg	3.2%
14%	1.0m ³ /h	49.95kg	50kg	0.10%

系统校正后平均误差为 1.6843%。

2. 容积法不掺杂实验

在上述系统校正结果下进行容积法不掺杂实验，实验结果如所示表格 4.3：

表格 4.3 容积法不掺杂实验

Table 4.3 Experiment of cubage method in pure water

工作点	流速	实际重量	表测重量	误差
89%	6.2m ³ /h	100.1515	98.012	-2.14%

43%	3.0m ³ /h	100.3205	99.88	-0.44%
29%	2.0m ³ /h	100.716	100.145	-0.57%

系统平均误差为-1.05%。

3. 容积法掺杂实验

在潜水泵内掺进氧化铝杂质实验结果如表格 4.4 所示：

表格 4.4 容积法掺杂实验

Table 4.4 Experiment of cubage method in water mix

工作点	流速	实际重量	表测重量	误差
51%	3.6m ³ /h	99.9805	101.968	1.99%
50%	3.5m ³ /h	99.9875	99.88	-0.11%
31%	2.2m ³ /h	100.6895	104.375	3.66%

由上述数据分析，系统平均误差为 1.8467%。

4. 对比实验

选用三台国际著名品牌的电磁流量计与我们所研发的电流流量计科研样机进行比对，下面分别用双频励磁电磁流量计（以下简称 EMF1）、改进的双频励磁电磁流量计（以下简称 EMF2）和基于 DSP 技术的交流励磁电磁流量计（以下简称 EMF3）。EMF1 在市场很畅销，EMF2 和 EMF3 是业界公认的当代最先进的电磁流量计。另外需要指出的是，我们的研发目标中并不包括传感器部分，但为了进行实流标定实验，又得不到有关图纸，是在时间很仓促的情况下，参照相近传感器图纸，估计出可能的磁路参数，交付制造了两台传感器。实验中发现，自制的传感器与信号转换器参数不匹配，而且磁场强度偏弱。这种情况下进行对比实验，对展示所研发的转换器性能是不利的。对比实验在上节介绍的实验装置上进行，在容器中掺入了大量的直径 1mm 的氧化铝颗粒，还有我们自己通过孔径为 2 mm 标准筛选出的黄沙，还有通过孔径为 3 mm 标准筛选出的木屑。这种含杂质的流体是通过潜水泵打入管道的。

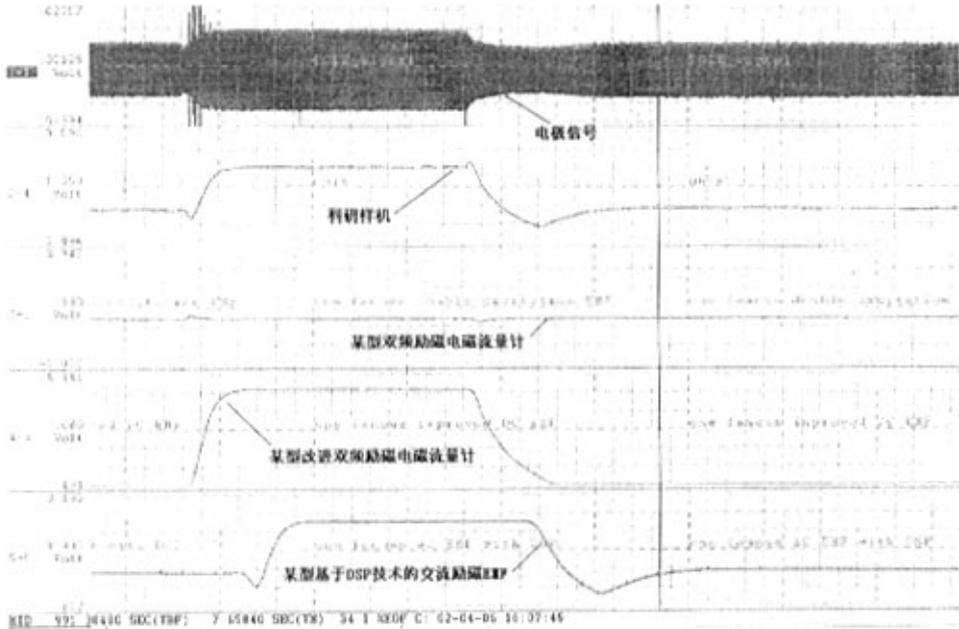


图 4.2 对比实验曲线 I

Fig. 4.2 The curve for contrast test I

图 4.2 中，从上往下依次是科研样机的电极信号曲线、科研样机瞬时流量的电流输出曲线、EMF1、EMF2、EMF3 的电流输出曲线。测量方法是，加入 250 欧姆的负载电阻，利用数据采集器 DI730P 同时采集上述信号。由图可知，EMF1 在有杂质的情况下有时完全失效，根本不能正常反映流速的变化，这是传统双频励磁电磁流量计共同的缺陷。EMF2 在 EMF1 的基础上进行了改进，可以适应掺杂流体，能够正确反映流量变化的趋势。EMF3 采用了当代先进的 DSP 技术，不但能反映流量变化的趋势，而且能够反映细节，对比电极信号中阀门开关的瞬间即可看出。将我们的科研样机测量输出与其 EMF1、EMF2、EMF3 进行对比，显然，它不仅能够象 EMF3 一样正确反映趋势及细节，而且没有 M3 的纯滞后，并具有 EMF2 响应快的优点。

图 4.3 是另一次实验的测量结果，能够反映相同的问题，但我们的科研样机在信号稳定性方面，稍逊色于 EMF3。

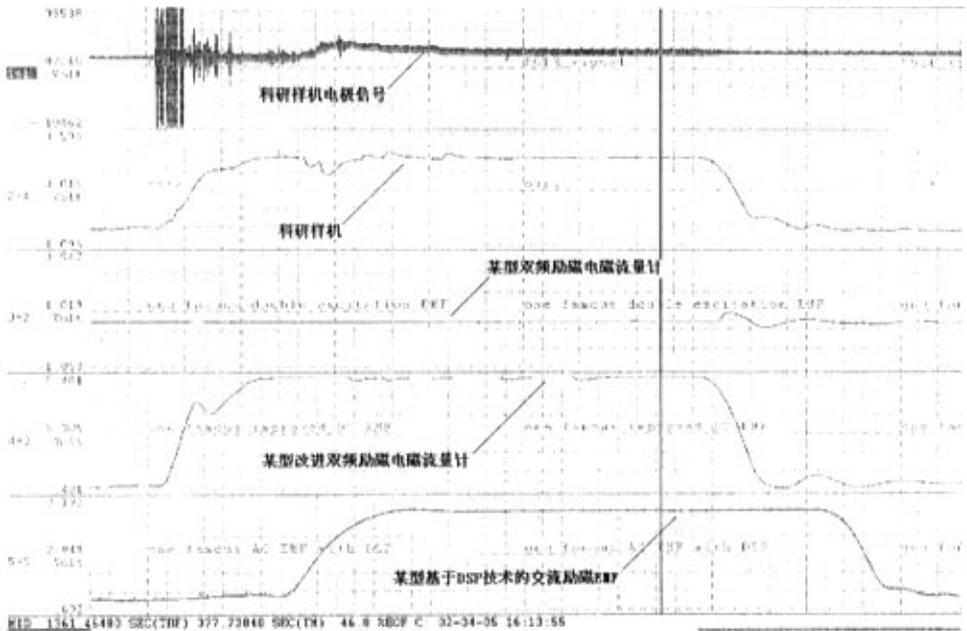


图 4.3 对比实验曲线 II

Fig. 4.3 The curve for contrast test II

图 4.4 是一次较长时间尺度的掺杂实验结果，在这个过程中，我们使用拖布在容器中进行了搅拌，从透明的软管中，可以清楚地看到氧化铝颗粒和沙子、木屑的比例和含量是发生变化的，而且时而有气泡混入。从电极信号中可以看到显著的低频干扰

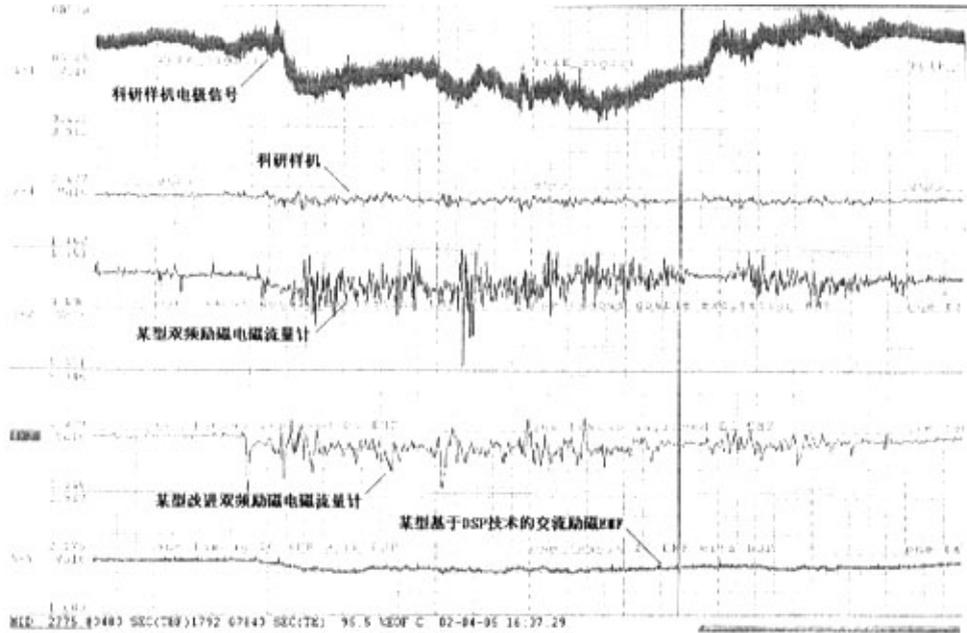


图 4.4 对比实验曲线 III

Fig. 4.4 The curve for contrast test III

从实验效果来看，性能最好的 EMF3 仪表基本上能去除系统干扰，输出稳定的流量信号，EMF1、EMF2 就不具备去除这种干扰的能力，系统工作不稳定，而科研样机测取效果仅次于性能最好的 EMF3 仪表，能正确反映管道内液体流速，系统输出波动不大，测量精度达到了 2%，而且并不比清水无杂质时标定的精度差。

4.3 实验结论

由此实验结果分析得知，软件系统运行良好。同时，由以上的实验数据分析得知，在没有校正系统零点和系统满量程工作点之前，系统测量误差比较大，测量平均误差达到了-12.11%。但在校正了系统零点和系统满量程工作点以后，系统测量平均误差变小，仅为 1.6843%，说明系统具有比较好的调整性能，在系统工作点迁移的情况下，可通过调整系统工作点的方法是系统进行正常的工作。

由容积法掺杂实验和容积法不掺杂实验得出的实验结果分析，容积法不掺杂实验系统测量的平均误差为-1.05%，容积法掺杂实验系统测量的平均误差为 1.8467%，掺杂与不掺杂的测量绝对误差仅为 0.7967%，也就是 0.008 的绝对误差，

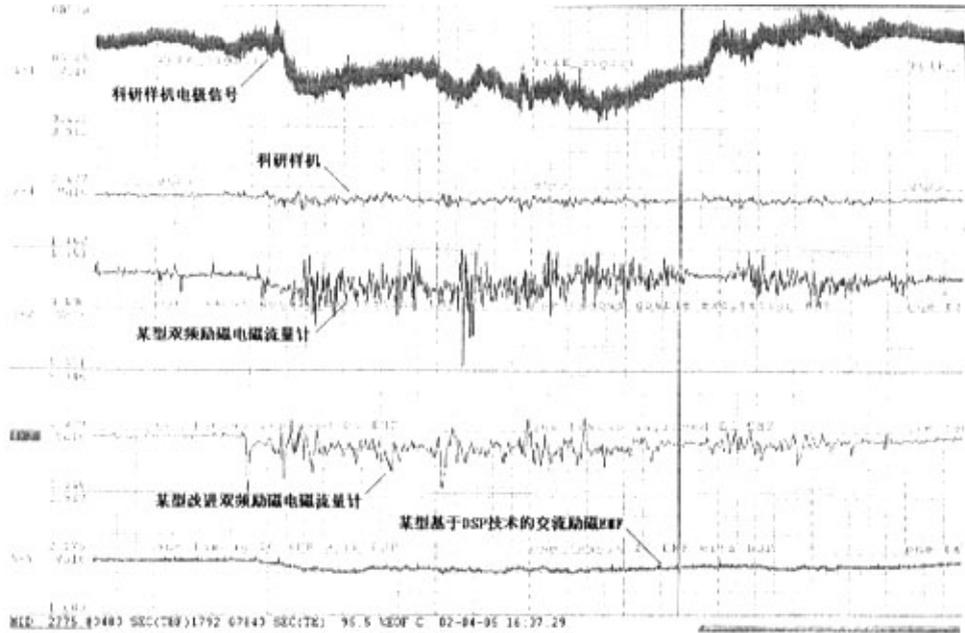


图 4.4 对比实验曲线 III

Fig. 4.4 The curve for contrast test III

从实验效果来看，性能最好的 EMF3 仪表基本上能去除系统干扰，输出稳定的流量信号，EMF1、EMF2 就不具备去除这种干扰的能力，系统工作不稳定，而科研样机测取效果仅次于性能最好的 EMF3 仪表，能正确反映管道内液体流速，系统输出波动不大，测量精度达到了 2%，而且并不比清水无杂质时标定的精度差。

4.3 实验结论

由此实验结果分析得知，软件系统运行良好。同时，由以上的实验数据分析得知，在没有校正系统零点和系统满量程工作点之前，系统测量误差比较大，测量平均误差达到了-12.11%。但在校正了系统零点和系统满量程工作点以后，系统测量平均误差变小，仅为 1.6843%，说明系统具有比较好的调整性能，在系统工作点迁移的情况下，可通过调整系统工作点的方法是系统进行正常的工作。

由容积法掺杂实验和容积法不掺杂实验得出的实验结果分析，容积法不掺杂实验系统测量的平均误差为-1.05%，容积法掺杂实验系统测量的平均误差为 1.8467%，掺杂与不掺杂的测量绝对误差仅为 0.7967%，也就是 0.008 的绝对误差，

系统误差在 2%左右，这表明系统具备良好的抗干扰能力以及具备良好的系统稳定性，对于掺杂的液体的流速测量具有比较好的效果。

综上所述，系统对于掺杂液体的测量具有比较好的工作效果，具备较好的系统稳定性，同时系统对输入具有比较快的响应速度。

第5章 结论

电磁流量计以其众多的优点在工业领域得到了广泛的应用。本文在研究国内外电磁流量计励磁技术的基础上,提出并实现了以交流励磁为励磁方式的一整套电磁流量计信号转换器的解决方案,采用微处理器与 CPLD 相结合,模拟与数字相结合的方法,较好的克服了交流励磁下的同相干扰、正交干扰,实现电磁流量计的设计方案,该电磁流量计信号转换器具如下特点:

1. 采用基于微处理器+CPLD 架构的交流励磁技术,对含有悬浮固相的流体具有较好的测量精度;
2. 在克服交流励磁技术的干扰上,才用模拟与数字相结合的方式,具有一定的新颖性;
3. 采用 CPLD 设计的专用芯片降低了系统对 CPU 速度的要求实现了较低成本的解决方案,同时专用芯片参与系统功能的实现,又给系统的安全性带来可靠的保障;
4. 累积流量的单位、一次流量管道、瞬时流量的范围、阻尼系数等参数的可设置的,表明了系统具有良好的适应性;
5. 具有测量正反向瞬时流量的能力;
6. 可自诊断异常事件并给出报警信号,如空管报警、瞬时过流量、电极信号过低等;

本文主要完成电磁流量信号转换器的整个硬件系统的研制工作。

通过实验我们也看到了本文所设计的电磁流量计信号转换器的不足,这也促使我们在今后的工作中,不断发现它在设计使用中的不足,改进提高性能。信息技术的发展,推动了工业生产的技术水平,这种行业的发展势必对检测仪表的测量也提出了更高的要求。多相流的测量对象日益增加,这就要求系统具有先进的测量方法^[40]。面对 FPGA/CPLD、DSP、SOP、SOPC、数字滤波等新技术、新概念的出现,我们更要去发现,去探索更好的设计方案。可以预测:传感器发展的总趋势是集成化、多功能化、智能化、网络化和系统化。

针对本文设计电磁流量计信号好转换器的不足结合目前主流技术产品提出自

己的几点设想:

1. 研制有效的改进交流励磁方法;
2. 引入片上系统概念 (SOP), 提高系统的集成度;
3. 研究在电磁流量计中引入现场总线技术, 更好地发挥电磁流量计在过程控制中的作用;
4. 采用更新的电源技术, 缩小体积;
5. 采用低功耗芯片, 降低转换器能耗。

参考文献

- [1] 柴天佑, 金以慧等. 基于三层结构的流程工业现代集成制造系统[J], 控制工程, 2002, 9(3): 1-6
- [2] 李素蓉, 电磁流量计的现状、发展及应用行业差异性与市场份额分配浅析[J], 中国仪器仪表, 2003.5: 4-5
- [3] 刘曙光, 王斌, 智能仪器仪表的进展与展望[J], 自动化与仪表, 2001, 16 (3): 1-5
- [4] 蔡武昌, 流量测量仪表现状和发展动向[J], 自动化仪表, 1996.17 (2) :1-5
- [5] 蔡武昌, 流量仪表若干发展趋势和应用进展[J], 中国仪器仪表, 2001.2: 46-48
- [6] T. Amare, Design of electromagnetic flowmeter for insulating liquids[J], Meas Sci Technol 10 (1999) 755-758.
- [7] R.N. Bernier, C.E. Brennen, Use of the electromagnetic flowmeter in a two-phase flow[J], Int. J. Multiphase Flow , 1983, 9 (3): 251-257.
- [8] Rose C, et al. Magmeter Measure Flow in Partially Filled Pipes[J], In Tech, April, 1995: 58—61
- [9] J.A. Shercliff, Relation between the velocity profile and the sensitivity of electromagnetic flowmeters[J], J. Appl. Phys. 25 (1954):817-818.
- [10] Zhang Xiaozhang, A method for solving Laplace's equation with mixed boundary condition in electromagnetic flowmeters, J.Phys.D: Appl.Phys[J], 1989, 22, 573-576
- [11] Zhang Xiaozhang , 2D analysis for the virtual current distribution in an electromagnetic flow meter with a bubble at various axis positions , Meas.Sci.Technol[J], 1998, 9,1501-1505
- [12] Zhang Xiaozhang, The effect of the phase distribution on the weight function of an electromagnetic flow meter in 2D and in the annual domain[J], Meas.Sci. Technol., 1997, 1285-1288

- [13] 梁国伟, 蔡武昌等, 流量测量技术及仪表[M], 北京: 机械工业出版社, 2002.6.
- [14] 李斌, 包海燕, 电磁流量计的信号处理方法探讨[J], 上海理工大学学报, 1998.2, 20(2):147-151
- [15] J. Hemp, Theory of eddy currents in electromagnetic flowmeters[J], J. Phys. D: Appl. Phys. 24 (1991) 244-251.
- [16] 王新堂, 激磁信号控制技术及其在电磁流量计中的应用[J], 电测与仪表, 1995.721: 23
- [17] 张修刚, 王 栋, 林宗虎, 近期多相流过程层析成像技术的发展[J], 2004, 19 (3): 221-225
- [18] 彭端, 彭璐丽, 智能电磁流量计抗干扰技术的研究[J], 广东机械学院学报, 1994.9: 12(3),33-37
- [19] K. Kuromori, K. Nishiyama, T. Okada, H. Ohta, New magnetic flowmeter with dual frequency excitation—ADMAG[S], YokogawaTech. Rep. (14) (1992) 34-42.
- [20] 张稚, 韩书芳, 电磁流量计的智能化[J], 中国仪器仪表, 1994.6: 16-17
- [21] Jae-Eun Cha, Yeh-Chan Ahn, Moo-Hwan Kim, Flow measurement with an electromagnetic flowmeter in two-phase bubbly and slug flow regimes[J], 2002.12: 329-339
- [22] J.A. Shercliff, The Theory of Electromagnetic Flow-Measurement, in: Cambridge University Press[M], 1962: 25-45
- [23] 黄宝森, 孔昭育等, 电磁流量计, 北京: 原子能出版社[M], 1981.10, P1-4
- [24] 蔡武昌, 孙淮清, 纪纲, 流量测量方法和仪表的选用[M], 北京: 化学工业出版社, 2001.3: 246-270
- [25] 蔡武昌, 液体粘度液体温度环境温度对电磁流量计的影响[J], 石油化工自动化[J], 1992, 2: 5-8
- [26] 刘英辉, 抑制电磁流量计正交干扰的一种新方法[J], 油气田地面工程, 1996.06
- [27] 李小京, 电磁流量计放大滤波电路的设计[J], 化工自动化及仪表, 2000 , 27 (2) :50~52

- [28] 朱玉田, 可变增益放大器中失调电压的消除[J], 系统工程与电子技术, 1997 第 6 期: 89-61
- [29] 熊光楞, 王 昕, 仿真技术在制造业中的应用与发展[J], 1999, 1 (3): 145-151
- [30] J. Hemp, M.L. Sanderson , A.V. Koptioug, B. Liang, D.J. Sweetland, R.H. Al Rabeh, Problems in the theory and design of electromagnetic flowmeters for dielectric liquids[J], Flow Measurement and Instrumentation 13 (2002) 143-153
- [31] 孔有林编著, 集成运算放大器及其应用[M], 北京: 人民邮电出版社, 1988.8, P509—520
- [32] 马家辰, 孙玉德, 张颖编, MCS-51 单片机原理及接口技术[M], 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.9, P76-90
- [33] 8-bit Microcontroller with 8K Bytes In-System Programmable Flash[S], Atmel Corporation 2003..
- [34] 马 俊,段新文, 高分辨率 A/ D 转换器与 8051 单片机接口电路设计及应用 [J], 青海师范大学学报 (自然科学版), 2004.4: 35-37
- [35] Xc95144 In-System Programmable CPLD[S], February 16, 2004.
- [36] 林曙光, 黄超音, 武凌, PIC 单片机与基于 HD44780 液晶显示模块接口的设计[J], 现代电子技术, 2003, 22: 65-70
- [37] HD44780U Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver[S], HITACHI Corporation.
- [38] 贾俊, 彭迎, AD574 在工频弱磁测量仪中的应用[J], 世界电子元器件, 2003.12
- [39] J. Hemp, A technique for low cost calibration of large electromagnetic flowmeters, Flow Meas. Instrum. 12 (2001) 123-134.
- [40] 蒙建波, 朱林章, 检测理论的现状与发展展望[J], 化工自动化仪表, 1993, 21 (3): 40-41

致 谢

本文是在我的导师柴天佑院士的悉心指导下完成的。在此，衷心感谢柴老师为我提供了将理论知识与实践相结合的机会，柴老师在控制领域高深的造诣和渊博的学识以及对项目的宏观把握、微观运筹都有着非凡独到的敏锐；对我学习和工作的悉心教诲和严格要求，不但使我在学业上取得了很大的进步，而且明确了我今后的努力和发展方向。柴老师对我的谆谆教诲将是我受益终生的宝贵财富。

感谢国内某自动化仪表公司的倾情合作与帮助，如果没有他们这么一个强大的团队的支持、信任与理解，就没有我们今天的成果。祝福该公司新产品开发不断取得成功，效益蒸蒸日上，并早日成为国际知名的自动化仪表提供商。

感谢课题组长张振山老师，张老师对问题的深刻见解和活跃的思维给了我莫大的启迪，他忘我的工作精神、一丝不苟的工作态度和对学生的热情关怀更是深深地感染了我。同时还要感谢岳恒老师，程春耕高级工程师对本人学业和项目上的悉心指导，感谢杨辉博士、谭明皓博士、赵立杰博士、王志刚博士的帮助指导，感谢课题组硕士研究生黄小燕、董晓勇、焦育成、张涤与他们愉快的合作使我在轻松的氛围完成了工作。

感谢我的妻子汤艳女士、儿子王启聿及我的家人，他们的支持，是我不断努力的动力。

作者从事科学研究和学习经历的简历

2002年9月—2003年12月完成了SOE顺序事件记录项目初步设计报告。

2003年12月—至今，参加了电磁流量计信号转换器的硬件系统的研究与开发，完成科研样机。