

摘要

卡门涡街独有的流体振荡特性，使涡街流量计成为流量测量仪表家族中不可缺少的一员。而光纤涡街流量计集光纤传感器与涡街流量计的优点于一身，充分发挥光纤传感器质轻、耐用、抗干扰、适用于易燃易爆的环境中等优点，具有广阔的开发和应用前景。

本研究旨在研制一种新型的光纤涡街流量计，能适用于某些恶劣的环境，并能达到一定的测量精度要求。文章首先对光纤涡街流量计的特点、国内外的研究现状等问题进行了阐述，详细叙述了光纤传光的基本理论，并利用光纤作为敏感元件，从晶体物理学、流体力学以及波动光学等角度分别分析了流体对光纤的作用以及光波导光强损耗的机理；文章估算了待测的频率范围以及光电转换后电信号交流成分幅值的大小，分析了光纤受力的安全性；作者不仅介绍了频率测量的基本原理，还对如何采用单片机系统进行频率测量和流量计算进行了详细的阐述。在研究工作中，建立了振动信号产生和频率测量的系统模型，设计了流量计的机械结构、信号处理电路和流量积算仪，通过采用放大板、单片机系统和 VB 程序界面，实现了对电路频率信号的微机实时测量，同时对系统进行了低功耗设计。采用 AFG320 信号发生器输入标准微待测信号，测试了电路的频率测量精度及抗干扰特性。最后，分析了测量误差产生的原因，并提出了一些能有效减小误差的措施。

目前，关于光纤涡街流量计的研究，大多处于实验室试验阶段，但是，光纤涡街流量计各方面的性能特点决定了其极其广阔的开发和应用前景。本课题中从涡动力学、波动光学等角度来分析光纤传感器中光强损耗的原因，并采用 W78E58B 单片机系统来进行待测频率，具有一定的创新性，并能为以后研究开发实用化的新型光纤涡街流量计打下基础。

关键词 光纤传感器；涡街流量计；低功耗设计；微弯损耗；数字信号处理；流量积算仪

Abstract

Vortex-shedding flowmeter has become one of the most indispensable members in the kaleidoscopic family of flowmeter because of the unique measuring features. Its posterity, optical-fiber vortex-shedding flowmeter is so prospective in its application in the measurement field not only for the merits up from vortex-shedding flowmeter but also those in optical fiber sensor such as flexibility, strong endurance, anti electromagnetic interference capacity and adaptation in the flammable explosive environment.

The thesis aims at the contrivance of a brand new optical-fiber vortex-shedding flowmeter, which can be applied in some formidable conditions, meantime reaches certain demand of precision. First, this thesis illuminates not only the features of the optical-fiber vortex-shedding flowmeter, but also the research status in the field both nationally and internationally. Second, it dwells upon the wave-guide discipline of the optical fiber and uses the optical-fiber as the sensor. Meanwhile the researcher carries out the research on the liquid field around a column, liquid force on the optical fiber sensor and the transmission loss along the optical fiber sensor respectively from such aspects as hydrodynamics, crystal physics and wave optics theory. Then, the author evaluates the round range of frequency to be measured and the amplitude of the AC signal which was transformed from light signal to electrical signal, analyses the security of the deformation on optical-fiber, then demonstrates the feasibility of the project, explains the discipline of frequency measurement. Moreover, the thesis illuminates much on how to use the SCM system, which can be used for frequency and volume flow measurement, the design of flowmeter's mechanical structure, the signal processing circuit and the flow accumulator. After all these efforts, the researcher designs programmed windows with VB Language to test the performance the signal

processing circuit which includes its measurement precision and the capability of anti electromagnetic interference with the weak signal source from AFG320 and then describes the low-power consumption. In order to minimize the measurement error, the thesis puts forward some advice on improving measurement precision.

Today, most of the researches on the optical-fiber vortex-shedding flowmeter are carried out on the primary stage in the lab, yet the flowmeter is foreseeable to deserve its future reputation of application because of these unique merits. Some of the efforts in the essay, such as the analysis on the transmission loss from several different angles and the application of W78E58B SCM system to frequency measurement are so creative that they will be helpful for the further research.

Key Words Optical fiber sensor; Vortex-shedding flowmeter; Low power consumption; Microbending losses; Digital signal processing; Flow accumulator

燕山大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《基于光频率调制原理的光纤涡街流量计的研究》，是本人在导师指导下，在燕山大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签字 林晓球

日期：2006年1月4日

燕山大学硕士学位论文使用授权书

《基于光频率调制原理的光纤涡街流量计的研究》系本人在燕山大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归燕山大学所有，本人如需发表将署名燕山大学为第一完成单位及相关人员。本人完全了解燕山大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权燕山大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

保密口，在 年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密 。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：林晓球

日期：2006年11月4日

导师签名：王立同

日期：2006年11月4日

第1章 绪论

1.1 涡街流量计的发展状况

在自然界中，存在许多流体振动现象。在流体振动现象中，流体振动频率与流速之间存在着对应的关系。应用这种原理测量的仪表主要包括旋涡分离流量计常称涡街流量计、旋涡进动流量计常称旋进旋涡流量计、射流流量计。

自20世纪60年代中期开始，欧美各国和日本的科学家先后以不同的方式投入流体振动流量计的研究。到20世纪60年代末70年代初，先后出现了以上三种流量计。因制造、应用和推广方面的原因，三种流量计的发展情况有所不同。涡街流量计的特点发挥的比较充分，被用户接受较早，发展最迅速。其他两种流量计发展相对缓慢一些，但是近年也在逐步推广。

流体绕曲面运动时，很容易产生边界层分离，尤其是绕流体为不良的流线型柱体时，旋涡分离会更加强烈。

根据试验观察，当流体绕过非流线型柱体时，由于边界层的不稳定性，使流体分离产生的旋涡有一定的规律。当雷诺数较高时，旋涡在柱体的某一侧形成并分离时，则另一侧就不可能形成旋涡，而只为旋涡的形成与分离做准备。只有当某一侧旋涡离开柱体一定距离后，另一侧才可能出现旋涡，于是柱体两侧形成交替的、有规律的旋涡列。这就是涡街。

世界上最早研究涡街现象的人式匈牙利物理学家斯特劳哈尔。1978年在他的指导实验中发现：在风的作用下，一根细弦丝发声的音调与风速成正比，而与弦丝的直径成反比；1908年贝纳德指出了圆柱体后方尾流的周期性与旋涡的形成和排列有关；1912年德国物理学家冯卡曼在进行了大量实验的基础上，研究了涡街的稳定性，并发表了关于无限大均匀流场中涡街稳定条件的著名论文。从数学上证明了圆柱体下游形成涡街的稳定条件。卡曼的这一结论为涡街流量计的发展与应用奠定了理论基础^[1]。

在三维的管流流场中，进行涡街测量流量的研究工作则开始于20世纪

60年代中期。在这期间，日本、美国和前苏联等国的科学家相继开展了涡街流量计的研究和开发工作。

1967年日本学者土屋喜一和山崎弘郎研究应用涡街原理测量圆管流量时，就在圆管中垂直的放置一圆柱体，在圆柱体下游设置了可绕固定轴转动的金属小旗。流体流动时，涡街的作用使小旗左右摆动，以此检测旋涡信号，进行流量测量试验。

1969年山崎弘郎等人研究成功热丝检测法涡街流量计。采用的旋涡发生体为圆柱体。这一成果最终由横河电机制作所推出商品化涡街流量计。近乎同时，美国的Eastech公司研制成功热敏电阻检测法涡街流量计，这种流量计采用三角柱发生体，后来被日本OVAL公司引进。

这两种仪表成为涡街流量计的先导，在钢铁、石油、化工等行业获得应用，也向世人预示了涡街流量计的光明未来。

20世纪70年代是涡街流量计进入快速发展的时期，各种新型的检测方法和新产品纷纷问世，让人目不暇接。

进入20世纪80年代，涡街流量计的发展强势如初，新产品继续推出，老产品不断改进提高。到80年代后期，欧美、日本等国已经有10家左右企业在生产涡街流量计。

涡街流量计发展的一个里程碑就是产品标准化工作受到各国的重视。随着各主要国家颁布标准，国际标准化组织(ISO)着手制定涡街流量计的国际标准，并于1993年以标准草案的形式发布(ISO/CD12764)。

20世纪90年代以来，涡街流量计在多个方面也取得了显著的进步，如技术基础性工作、信号处理技术、一体化智能化等。

在我国，涡街流量计的发展也令人注目。我国在自主研发的同时，广泛引进国外的先进技术其中重庆工业自动化仪表研究所、天津工业自动化仪表研究所、上海计量测试研究所等单位取得了高水平的成果。1989年，涡街流量传感器的行业标准和国家计量检定规程颁布，对规范我国涡街流量计的开发、生产、应用发挥了作用。

20世纪90年代中期以后，我国涡街流量计的发展向一体化、多参数检测、智能化方向发展，并取得了不俗的成绩，不少企业推出了智能化产品。

1.2 光纤涡街流量计的国内外研究现状

目前,我国流量计的整体发展水平还比较低,跟国际的先进水平还有很大的差距,主要表现在工艺、结构、光纤信号处理方面等。但是无论是国内还是国外,对于光纤涡街流量计都还是处于实验室研究状态,关于此类流量计系统行的文献资料还是相当缺乏的。

光纤涡街流量计是将涡街原理与光纤传感技术相结合的产物。一方面,作为涡街流量计家族中全新的一员,是伴随着它的发展而发展起来的,尽管在1513年就观察到了旋涡的分离现象,但是直到20世纪初,涡街公式才被认识,而涡街流量计的问世,只是最近几十年的事情。采用光纤作为信号转换方面的敏感元件,涡街流量计的测量范围拓宽^[2]。光纤材料从20世纪60年代因为英籍华人高锟博士关于光纤通讯的论文以后才倍受关注,其应用领域主要在光纤通信领域^[3]。尽管光纤传感器的研究取得了迅速的进展,但在专门针对流量测量领域的光纤传感器却凤毛麟角^[4]。所有这些都制约着光纤涡街流量计的研究水平。

西欧、北美诸国尽管对涡街流量理论的应用、光纤传感技术研究较多,但是对二者结合起来进行的研究却不多^[5]。国外自20世纪80年代初开始有所报道,如英国P.J.D.C.Jones和A.D.Kersey等研制单模光纤涡街流量计^[6]。20世纪90年代以后,相继出现了一些研究成果,如意大利学者Herzog,J.P研究的光纤涡街传感器,通过对光纤传输光前变化频率的检测,从而得出流速和流量。该流量计适合对易爆及强电磁干扰场合流体的测量^[7]。次年,英国Webster,S等研制出测量风速的单/多模光纤涡街流量计。1994年,加拿大Hisham Morshed等研制成功单模光纤强度调制型光纤涡街流量计。1998年,美国德克撒斯A&M大学Fang,J.x等研制德法碧-裴诺光线流量计实现了对低流速流体的测量(0.41-3.0 m/s)。

与此同时,国内的研究也在进行。天津自动化仪表公司1990年研制成功了灵巧型光纤涡街流量计,他们通过改变光纤耦合面积的大小,实现对信号的调节,同时使用小数字波导孔径的粗芯光纤来提高灵敏度,此外该涡街流量计还具有耐高温、抗电磁干扰等优点^[8]。1993年前后成都电子科

技大学周晓军研制出一种封闭式的、光调制型光纤流量计^[9]，光纤在涡街作用下做受迫振动，使进入光纤的光强受到调制，从而进行测量。1995年华中理工大学研制出新型插入式光纤涡街流量计，采用薄膜片作为涡街的感应元件，通过对光纤接受膜片反射调制的光信号进行接收，最后得到流速值。试验及现场实测证明该流量计完全适用于气体、液体的流量测量。此外哈尔滨工业大学提出三光纤干涉流量测量技术的理论与相关模型^[10]，但都只是构想或者模拟试验，并未充分的应用于实际中去。

国内外对该项技术的研究总体水平表明，对光纤涡街流量计的研究还处于研究性试验阶段，与真正广泛应用于生产过程还有一段差距。如今，数字计算机技术已运用代该项研究中来，这必将大大提高该类流量计测量精度、稳定性、仪表智能化的水平。

1.3 光纤涡街流量计的优点和局限性

1.3.1 光纤涡街流量计的优点

(1)量程范围较宽 大多数涡街流量计，在雷诺数为 $2 \times 10^4 \sim 7 \times 10^6$ 范围内，都有良好的线性度，按这个雷诺数范围计算，涡街流量计的最大量程比可达300:1。由于检测元件的灵敏度、仪表的压损和其他的方面的限制，要达到这么高的量程比是非常困难的。但是大多数的涡街流量计的量程比都能达到10:1以上，有的可以达到20:1甚至30:1。而其他的流量计，比如压差流量计却没有这么宽的量程范围。

(2)抗电磁干扰能力强 一般的电磁干扰对光传输的干扰作用较小，再加上在结构设计方面保证光电检测元件的密封和屏蔽也大大提高了检测元件的抗干扰能力。

(3)测量工作状态体积流量，对流体的物性变化不敏感 在一定的雷诺数范围内，旋涡分离的频率仅与流体工作状态下的体积流量成正比。而对被测流体压力、温度、粘度和组分变化不敏感。

(4)无可动部件，可靠性高 在流量计中，运动部件的损耗，使得仪表系数改变，不仅降低了测量的精确度，也缩短了仪表的寿命。而光纤涡街

流量计没有可动部件，大大提高了它的可靠性。

(5)适用于多种介质 涡街流量计可以测量液体、气体和蒸汽流量。

(6)输出与流体流速成正比的脉冲信号，不存在零漂问题。

(7)光电信号检测不受机械惯性和热迟滞影响，响应速度快。

(8)压力损失小，结构轻便、体积小。

1.3.2 光纤涡街流量计的局限性

(1)对于上游直管段的要求 涡街流量计是一种典型的速度式流量计，旋涡分离的稳定性受发生体上游流场畸变、旋涡流等影响，所以安装仪表应根据上游阻流件的不同形式，配置不同长度的上下游直管段。

(2)管道与环境的振动对检测元件和测量效果有影响 涡街流量计是流体振动流量计，当工作管道振动较强，且振动方向与发生体相垂直，振动频率与旋涡频率相同或相近时，对旋涡稳定分离就会产生影响。

(3)下限流量不能太低 涡街流量计的下限流量受到雷诺数和检测元件灵敏度两个条件的制约。大多数的涡街流量计的下限雷诺数为 $(1-2) \times 10^4$ ，只有当仪表工作在下限雷诺数以上的区域时，才能保证 S_v 进入平直段，仪表才能进入线性工作区域。在粘度高、口径小的工作条件下的涡街流量计的下限流量不能太低。同时由于旋涡的强度与流速平方成正比，所以在量程下限的低速区，旋涡信号非常微弱，能否有效的检测到旋涡信号就取决于检测元件的灵敏度。受到以上两个因素的制约，涡街流量计的下限流速不能太低。一般情况下，液体的流速下限为0.3-0.5 m/s，气体的下限流速为3-5 m/s。

(4)不宜测量混相流和脉动流 混相流和脉动流对涡街流量计的影响还缺少理论和实践经验，仍处于探索阶段，尚未进入实用。

(5)抗脏污能力较差 流体中的固体、杂物的冲击会损害光纤等元件^[1]。

1.3.3 光纤涡街流量计的应用场合

由于以上的优缺点，光纤涡街流量计主要应用于一些特殊的场合：

(1)小管道清洁流体的流量测量。

(2)由于灵敏度较高,可用于常压、低流速的气体流量测量,如发动机试验装置进气流量的测量。

(3)部分大管道流速分布的测量。

(4)光纤位移测量方式已做成插入式涡街流量计,用于大管道液体、气体流量测量。

1.4 课题的目的及意义

1.4.1 课题的意义

目前,人们对涡街流量计的使用还仅局限于一些非重要介质的测量,如压缩空气、循环水等,没把涡街流量计作为一种主要的流量测量手段。探索新型的光纤涡街流量计,对丰富流量测量工具,推广光纤涡街流量计的使用领域,具有重要的意义。经验表明,该类流量计不仅可以应用于油井井下测量,由于其尺寸小、重量轻、造价低廉、安装容易、测量精度较高,还可以用于对水、气体的测量,并且易开发生产性商品,进行系列化,随着研究的不断深入,光纤涡街流量计必将有广阔的应用前景。

1.4.2 课题研究的主要内容

本课题研究的是光纤涡街流量计。将涡街流量计与光纤传感器的特点相结合,利用光纤传感器独特的优点,弥补涡街流量计在一些方面的不足,提出设计涡街流量计的一些新思维。

本课题的主要研究内容为:

(1)根据已收集的资料,对光纤用于涡街流量计的可行性进行理论分析和仿真试验,结合工程的实际应用情况,完成光纤涡街流量计机械结构的设计。

(2)完成硬件电路的设计,其中包括信号的光电转换部分、接收预处理部分、二次仪表的设计部分等。

(3)编制功能软件实现对脉冲计数以对流量的实测,绘制程序流程图。

(4)开展仿真试验,对测量系统进行误差分析,并初步提出解决措施。

第 2 章 光纤涡街流量计的特性分析

2.1 光纤波导理论

2.1.1 光纤及光纤传感器

2.1.1.1 光纤简介 光纤即光导纤维，是一种能够传输光的玻璃状电介质丝。它具有损耗低、频带宽、可挠性好、线径细、重量轻、无感应等特点。其通常是由高纯度的石英玻璃为主，掺少量杂质锗(Ge)、硼(B)、磷(P)等的材料制成的细长的圆柱体，细如发丝，通常直径为几微米到几百微米。使用的结构有两个同轴区，内区称为纤芯，外区称为包层。通常，在包层外面还有一层起支承保护作用的套层。通常光纤的外径约为 100-300 μm ，芯子直径约为 5-100 μm ，考虑到光强传输效率及力学因素，采用多模粗芯光纤，其外径可达 800 μm 。

在各种传光的介质中，由于玻璃传光的损耗大，所以使大部分光能在玻璃介质中难以实现无损耗的传输。但是，把玻璃中的杂质除去以后，可以使光的吸收减到非常小，按这一设想提出的低损耗光纤，目前的最低损耗可达 0.4 dB/km。这是一个非常小的损耗，比雨后澄清的大气的透光度还要好。

2.1.1.2 光纤的分类 光纤是一种光波导，因而光波在其中传播也存在模式的问题。模式是指传输线横截面的纵截面的电磁场结构图形，即电磁波的分布情况。一般来说不同的模式有不同的场结构，而且每一种传输线都有一个与其对应的基模或主模。基模是介质波长最长的模式。除了基模之外，截至波长较短的其他模式称为高次模。根据光纤能传输的模式数目，可将其分为单模光纤和多模光纤。

根据纤心径向的折射率分布情况，又可将其分为阶跃光纤和渐变折射率光纤。通常单模光纤多为阶跃折射率分布，而多模光纤则既有阶跃折射率分布也有渐变折射率分布。根据仪器设计的需要和各种光纤的不同特点，本课题在设计光纤传感器时，考虑到多模光纤成本低、传输功率比单模光

纤大(数值孔径大)等优点, 将选择阶跃折射率分布的多模光纤。

2.1.1.3 光纤传感器 光纤传感器从本质上看是这样一种器件, 它在外界物理量、化学量、生物量、生物医学量或其它类似因素的影响下, 光纤中光波导的特性会发生变化。具体讲, 就是将一光源发出的光学性质保持不变的光通过某种固定的耦合方法入射到光纤, 然后进入调制区, 最后又从同一光纤或不同的光纤返回。调制区可以由光纤本身组成, 也可以由其他介质组成。前者称为传感型传感器, 又称为功能型光纤传感器^[8]。后者称为传光型传感器, 也称为非功能型光纤传感器。也有部分光纤传感器两种功能兼而有之, 因而称为混合型光纤传感器。本设计所用的光纤用来感知流体的流速, 流速变化导致涡街的频率发生变化, 使得光纤的传光性能直接受到影响, 光纤本身就是敏感元件, 因此属于传感型传感器。

2.1.2 光纤特性

2.1.2.1 光纤的机械性能 表面性能完整的光纤具有良好的机械性能, 主要体现在以下两个方面。

(1)弯曲性 光纤遵循虎克定律, 在弹性范围内, 光纤受到外力发生弯曲时, 芯轴内部分受到压缩作用, 芯轴外部分受到拉伸作用, 外力消失以后, 由于弹性作用, 光纤能自动恢复原状。但是, 当弯曲半径小于所容许的曲率半径时, 光纤将会被折断。光纤的弯曲性与光纤的机械强度有关, 严格的制作工艺是提高机械强度的主要保证。

光纤弯曲时所受的应力可用下式表示

$$\sigma = aE/R \quad (2-1)$$

式中 σ 为应力; E 为杨氏模量; R 为弯曲的曲率半径; a 为纤芯半径。

(2)光纤的抗拉强度 由如下经验公式计算

$$F = \frac{1572 \times (111.8 + 2a)}{1525 + 2a} \quad (2-2)$$

式中 a 为纤芯半径。

除此以外光纤还有耐热性、电绝缘性、耐水性、耐酸性等物理和化学特性。

2.1.2.2 光纤的传输性能 光纤的衰减和色散是描述光纤传输特性的两个重要参量。衰减是描述光纤使光能在传输过程中沿着波导逐渐减小或消失的特性。在给定信号和工作条件，即给定发射机输出功率和检测器灵敏度时，光纤的衰减决定信号无失真传输通路的最大距离。色散限制了光纤传输频响的上限。色散引起的脉冲扩展限制了脉冲调制或数据传输系统中给定长度光纤的最高脉冲或数据传输速度。

2.1.3 光波导传光原理

2.1.3.1 光波在光纤中的传播模式 根据麦克斯韦电磁场理论，光是一种电磁波，光纤是一种具有特定边界条件的光波导。在光纤中传播的光波遵守麦克斯韦方程组，由此可以导出描述光波传输特性的波导场方程。理论推导结果说明，光波场方程有许多分立的解，每一个特解就代表一个能在光纤波导中独立传播的电磁场分布，即所谓波场或模式，简称模。光波在光纤中的传播是所有模式线性叠加的结果。

光波在光纤中传播存在有三类模式，即传输模，泄漏模和辐射模。

传输模是光功率限制在纤芯内传播的光波场，又称芯模。在纤芯内电磁场按振荡形式分布，为驻波场或传播场；在包层内场的分布按指数函数衰减，为衰减场或消逝场。模场的能量被闭锁在纤芯内沿轴线方向播。

泄漏模是在纤芯内及距纤壁一定距离的包层中传播的光波场，又称包层模。在纤芯中的模场能量可通过一定厚度的“隧道”泄漏到包层中形成振荡模式，但其振幅很小，传输损耗也很小。泄漏模的特征类似于损耗极大的传输模，其特征对于光纤传感的应用十分重要。因为这种模式处于临界状态，对光线折射率的起伏很敏感，容易提供有关物理量变化的信息。

辐射模在纤芯和包层中均为传输场，在它存在的条件下，波导完全处于截止状态，光波在纤芯与包层的界面上因不满足全反射条件而产生折射，模场能量向包层外逸出，光纤失去对光波场功率的限制作用。

2.1.3.2 光波导传光原理 光纤传光的基本原理是利用光的全反射原理。所谓全反射原理就是光在两种折射率不同的介质中传播，当由光密介质向光疏介质传播时，如果入射角大于一定角度，则只发生反射现象，而不发

生折射现象。光的这种完全反射回去的现象叫做全反射，临界角叫做全反射角。光纤芯层的折射率比包层的折射率要高，光以一定角度入射进入光纤时，在芯层与包层的接触面上发生全反射，光强没有损失。在光纤内，光就这样不断地在接触面上发生全反射而传播下去^[10]。

光传播的光路图如图2-1所示。

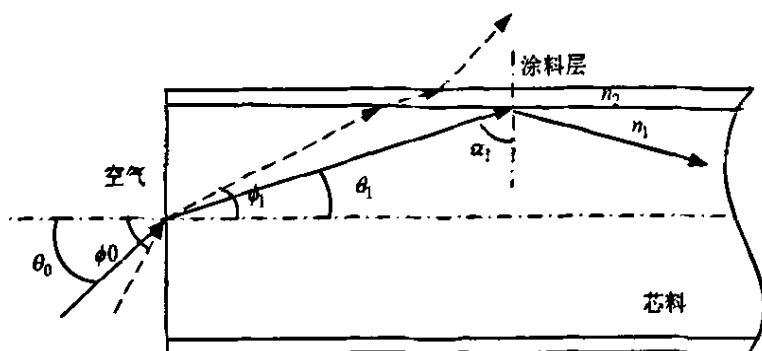


图2-1 光波导传光原理

Fig.2-1 The principle of optical wave-guide

光纤是一根直的圆柱形涂层纤维，两端面均为平面。当光纤以入射角 θ_0 从纤维的一个端面入射时，可以用折射定律确定其折射光纤的方向，即折射角满足关系式

$$\frac{\sin \theta_0}{n_0} = \frac{\sin \theta_1}{n_1} \quad (2-3)$$

式中 n_0 为空气的折射率，一般取值为1。

光线在光纤内又以 α_1 角入射至芯料和包层的分界面上，这时的入射角 $\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \theta_1$ 。若包层的折射率为 n_2 ，且 α_1 大于芯料和包层之间截面的临界角 α_c ，即满足关系式

$$\alpha_1 \geq \alpha_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (2-4)$$

这时光线在截面上发生全反射，并在纤维内部以同样角度反复逐次反射，向前传播至另一端面，并以等于入射角的角度发射出去。由于光线在

芯料和包层之间的截面上发生全反射，因此光线可以在损耗极小的情况下进行传播。通常，这一损耗可以忽略不计。

如果芯料和包层之间截面的入射角 α_1 小于临界角 α_c ，光线就会穿过圆柱的侧壁逸出，如图2-1中虚线所示。这时虽然有少量反射光可以返回到纤维内部，但经过多次反射后，能量就会很快损耗为零，不会有光线从另一端面射出。

因此，在入射端必然存在一临界角 θ_c ，只有当入射角小于临界角 θ_c 时，光线才可以传播至另一端。在图2-1中有 $\theta_0 \leq \theta_c$ 。

其中临界角 θ_c 称为光纤的受光角，将式(2-3)和式(2-4)联立可得

$$n_0 \sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2-5)$$

式中 $n_0 \sin \theta_c$ 又称为光纤的数值孔径，记为 NA ，即 $NA = n_0 \sin \theta_c$ 。光纤的数值孔径取决于芯料和包料的折射率之差，这个差值越大，纤维的 NA 值越大，当 $NA > 1$ 时，受光角 $\theta > 90^\circ$ ，所有射到光纤端面的光线都有可能经由纤维内部传播到另一端面。一般的纤维，两侧的受光角大都在 $50^\circ - 70^\circ$ 之间，从上面阐述可以看出，数值孔径是选择芯料和包层时一个重要的参考依据。

2.1.4 光纤损耗

对光强损耗机理的研究，是理解光纤涡街流量计中信号产生的关键。只有在流体周期冲击作用下，光波导中产生稳定有效的光强损耗^[11]，才能为后续电路提供载有物理量的光信号，并且由后续环节处理。当光纤受到弯曲振动的时候，就会发生微弯损耗。微弯损耗是指光纤在微弯时，光强发生的损耗，即光纤轴心发生偏移，其量小于光纤本身的直径，偏移量约为几个微米，此时光功率就沿光纤长度间断地从光纤内部向外辐射，引起微弯损耗。微弯损耗实质上就是光纤弯曲引起的模式横向泄漏。流量计中光纤固定方式略似两端固定的简支梁，当光纤受力时，中间部分受力变形，从而产生弦振动，而两端则由于环氧树脂的粘结而固定不动。光纤受力如图2-2所示。

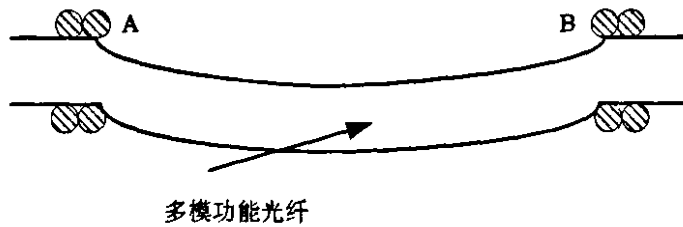


图2-2 光纤受力图

Fig.2-2 The deformation of optical fiber

A, B为环氧树脂固定点,当光纤受力振动由于在固定点变形受到抑制,从而产生微弯。

从光波场以及模式耦合转换的角度来说,微弯损耗主要表现为两种形式:纯弯损耗和传输损耗^[12]。

(1)纯弯损耗 纯弯损耗是由于光纤弯曲导致纤芯中的部分模式失速而耦合至包层引起的。在多模光纤中,传播常数 β 取不同值时,对应着不同的传播模式。对于辐射模,由于其光能量不是在纤芯中传播,而是直接地、不受阻挡地向包层中辐射并被损耗掉。泄漏模相当于光纤理论中不满足全反射条件又接近于全反射的情形。外界的影响会使泄漏模转换成其它的模式,从而引起多模光纤内模式的不稳定。光纤微弯会引起光纤微弯处光波导传播常数 β 值产生变化,因而激起光纤中允许存在的模式也产生改变,出现模式耦合现象。模式耦合是可逆的,但是总体上从低次模向高次模转换,进而再转换成辐射模,引起损耗^[11,12]。微弯损耗的机理如图2-3所示。

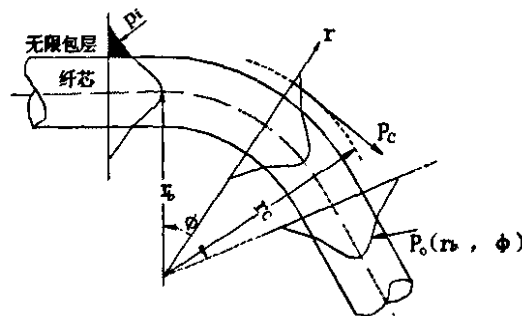


图2-3 纯弯损耗机理

Fig.2-3 The principle of the microbending losses

(2)传输损耗 此处的传输损耗特指由于光纤内部受力导致折射率重新分布,即由光弹效应而导致部分导模变成辐射模而引起的损耗^[13]。尽管现在无法定性导出其在整个光强损耗中所占的比重,由于该类损耗发生在整段光纤上,据资料显示,对于多模光纤,它在整个光强损耗中占有较大的比重。

当光线进入到光学各向异性的晶体物质时,将发生双折射现象,即会分成两相互垂直振动的线偏振光^[14,15]。玻璃光纤成分中含有丰富的石英晶体。石英晶体为典型的单轴正向晶体,具有光学各向异性,故沿不同方向上,光线传播速度不同^[16]。光线在非光轴方向上传播时,将发生双折射。此时光线中的光传播方向不变,而 e 光传播方向则发生偏移,当光线在光纤中传输时,双折射现象将使光强发生损耗,且在敏感光纤中,损耗将更为显著。

由振动稳定性分析可知,光纤由环氧树脂胶固定在涡街发生体后侧(近尾迹区),而且必须保证光纤处于一定的受力状态,此时光纤承受较均匀的轴向力。若假设光纤无表面及内部结构的裂纹及其他缺陷,则此时弯曲段光纤各处主应力分布也相对较为均匀。内部石英晶体受力处于轴向变形状态,光线经过其中时,发生光弹效应,出现双折射现象,从而伴随能量的初步耦合损失。而玻璃材料整体具有明显的非晶体特性,以及呈现出光学各向异性,更使双折射现象明显化。随着涡街的交替产生,尾迹区流体将受到流体边界层剪切力的交替作用,产生扰动,从而对处于其中的光纤受力,产生交替振动。作用合力为流体升力及阻力矢量之和。整个弯曲段内光纤的石英晶体受力将产生应变,而且应力应变沿受力光纤段的内外侧分布不均。这不仅加剧了晶体晶格的变形,也加剧了物质结构的各向异性。光纤折射率分布受外力或本征内应力作用而变化,光纤轴向受力的集中,径向应力性质状态的变化,都会增强石英晶体乃至整段光纤材料的光学各向异性^[16,17],这必将改变原来的相对稳定均匀的折射率分布状态。最终,激发了更加强烈的光学各向异性即光弹性效应,使更多导模变成辐射模而引起光强损耗。因此,光纤中石英晶体轴向、径向应变的是产生光弹性效应,引起光强传输损耗的直接原因^[18]。图2-4显示了传输损耗的机理。

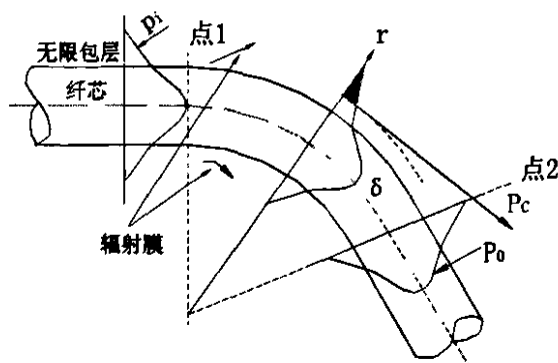


图2-4 传输损耗机理

Fig.2-4 The principle of the transmission losses

当纯弯损耗最为显著时，光纤的传输损耗也为最大，光纤传感器光强调制时，光强调制损耗应是纯弯损耗和传输损耗二者的总和。

假设光纤的微弯变形函数为

$$f(z) = u(t) \sin qz \quad (2-6)$$

其中 $u(t)$ 为随时间 t 变化的动态振幅，即光纤的波状弯曲幅度，受外界信号(被测量)控制， q 为空间频率，设光纤微弯变形函数的微弯周期(即空间波长)为 T ，则 $T = 2\pi/q$ ， z 为变形点到光纤入射端的距离。根据光的波动理论可导出微弯损耗系数的一阶近似表达式

$$\alpha = \frac{1}{4} K u^2(t) L \left| \frac{\sin(q - \Delta\beta)L/2}{(q - \Delta\beta)L/2} \right|^2 \quad (2-7)$$

式中 K 为比例系数； L 为光纤产生微弯变形部位的长度； $\Delta\beta$ 为光纤中光波传播常数差。

对于管道中的光纤发生微弯变形来说，阶跃光纤的 $\Delta\beta = \frac{2\sqrt{\delta}}{r}$ ， δ 为相

对折射率差，表达式为

$$\delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2-8)$$

式中 n_1, n_2 分别为光纤的芯层和包层的折射率。

则

$$\alpha = \frac{1}{4} Ku^2(t) L \left| \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{L} - 2\sqrt{\delta}/r\right) L/2}{\left(\frac{2\pi}{L} - 2\sqrt{\delta}/r\right) L/2} \right|^2 \quad (2-9)$$

由于光纤微弯损耗的存在, 光纤的输出光强受到调制, 光强的变化与变形函数有关。在光纤涡街流量计中, 光纤的变形函数是与旋涡频率相对应的周期函数。因此, 光强的变化频率 f_0 也就是旋涡的频率 f ^[19]。

2.2 光纤涡街流量计工作原理

光纤涡街流量计主要是通过测量作为敏感元件的光纤的振动频率来确定通过管道中的流体的流速以测得流量。

流体力学中阐述, 当一个流体质点流近一个非流线型旋涡发生体的前缘时, 流体质点的压力就从自由流动压力升高到停滞压力^[20]。靠近前缘的高压促使正在形成中的附面层在发生体的两侧逐渐发展。不过, 在高雷诺数的情况下, 由压力产生的力是不足以把附面层推到包围住非流线型旋涡发生体的背面的。在旋涡发生体最宽截面的附近, 附面层从旋涡发生体表面的两侧脱开, 并形成两个在流动中向尾部拖曳的剪切层。这两个自由的剪切层形成了尾流的边界^[21,22]。因为自由剪切层的最内层比和自由流相接触的最外层移动得慢得多, 于是这些自由剪切层就倾向于卷成不连续的打旋的旋涡。在尾流中就形成一个规则的旋涡流型, 这种形成图型的旋涡流动和旋涡发生体的运动相互作用, 并且成为旋涡诱发振动效应的根源。流体在旋涡发生体两侧交替的分离释放出两列规则的交错排列的旋涡, 在一定的流量范围内, 旋涡分离频率正比于管道内的平均流速(流量), 通过采用各种形式的检测元件检测出旋涡分离频率就可以测出流体的流量^[23]。

如图2-5所示, 设有平行的两列稳定旋涡, 每个旋涡都具有相同的环量 Γ , 由于上下两列涡的旋转方向相反, 所以下侧涡列的环量为 $+\Gamma$, 而上侧涡列的环量为 $-\Gamma$, 涡与涡之间由于诱导速度产生的相互影响, 使得每个旋涡都得到一个向上游推进的速度 u 。另一方面旋涡又随着流体以速度 v 向下游运动, 因此涡街实际向下游的移动速度为 $v-u$, 假定同列单个旋涡之间的距离为 l , 旋涡从旋涡发生体后发出的频率为 f , 则有 $v-u = fl$ 。

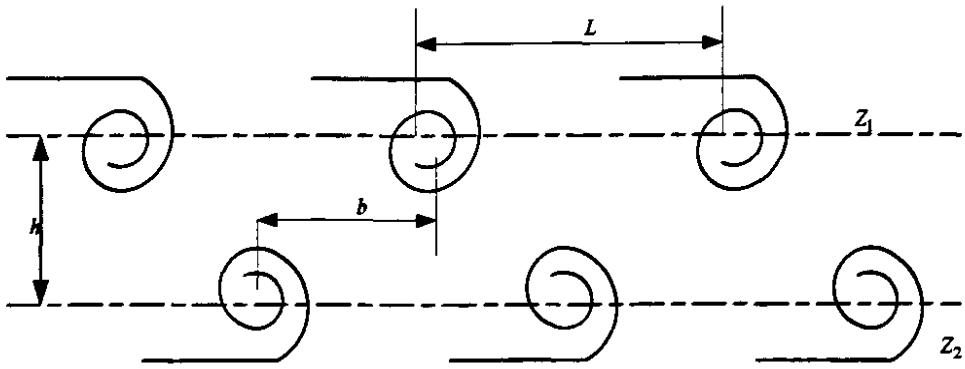


图 2-5 涡街形成原理图

Fig.2-5 The shedding of the vortex

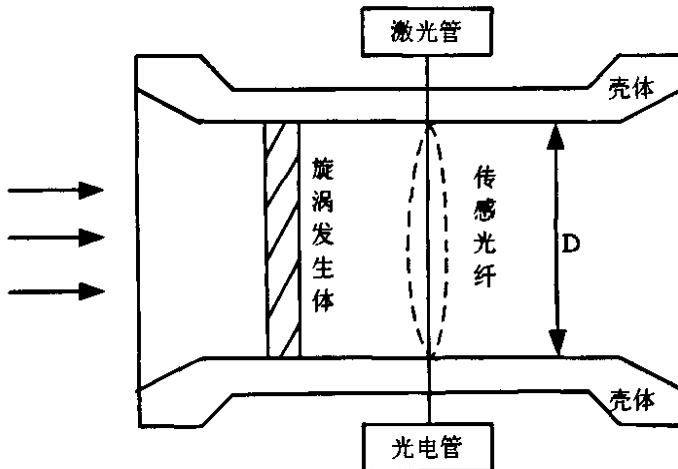


图 2-6 光纤涡街流量计原理图

Fig.2-6 The principle of the optical-fiber vortex-shedding flowmeter

当涡街在旋涡发生体两侧形成以后，其运动由两部分组成。一方面，它以速度 $v-u$ 作平行于主流的运动；另一方面，它还在与主流垂直的方向上振动。造成这种振动的原因是产生旋涡的旋涡发生体在旋涡发出的同时受到一个流体的作用力，此作用力成为升力。而流体则受到一个旋涡发生体所施加的反作用力。由于旋涡是在旋涡发生体的两侧交替发出，且旋转方向相反，因此作用在旋涡发生体上的力是交替上下变化的。同样，作用在流体上的反作用力也是交替上下变化的，这样就使得流体作垂直于主流方向上的振动。

产生这样一个垂直方向上力的原因是：假定来流是无旋的，根据汤姆

生定律，沿封闭流动流线的环量不随时间而改变。所以在旋涡发生体右(或左)下方产生一个旋涡以后，必须在左(或右)下方产生一个相反的环量以使合环量为零。这个环量的存在，会在旋涡发生体上产生一个升力，该升力垂直于轴线方向。由于旋涡在旋涡发生体两侧交替发生，且旋转方向相反，故作用在旋涡发生体上的升力也是交替变化的。流体受到旋涡发生体的反作用力，于是产生垂直于轴线方向的振动。因此，交替作用在旋涡发生体上的升力的变化频率等于旋涡的分离频率，而升力变化频率又与流体振动频率相等。从而可以得出，旋涡的分离频率就等于流体的振动频率^[24]。

在光纤涡街流量计的旋涡发生体的下游，有一根垂直于管道方向放置的敏感光纤。由上面的分析可知，旋涡发生体后面的流体由于受到发生体反作用力而产生垂直于轴线方向上的振动，振动频率与旋涡分离频率相同。振动的旋涡序列在以速度 $v-u$ 向下游移动的过程中，作用于处在其后的光纤上，使得光纤产生相同频率的振动。通过测量光纤的振动频率就可以知道涡街的频率，进而知道流体的流速以及管道中流体的流量。

涡街流量计的计算方程如下。假设在旋涡发生体处，发生体两侧的平均流速为 v_1 ，流通截面积为 S ，管道内径为 D ，旋涡发生体迎流面宽度为 d ，在 $d/D < 0.3$ (光纤涡街流量计的柱宽比) 时，发生体两侧弓形流通面积之和与流量管的横截面积之比为，则

$$m = 1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{d}{D} \sqrt{1 - (d/D)^2} + \sin^{-1}(d/D) \right) \quad (2-10)$$

根据流体连续性定理

$$v_1 = v/m \quad (2-11)$$

式中 v 为测量管道内的平均流速。

根据卡门涡街原理，旋涡分离频率 f 与管内旋涡发生体两侧平均流速，有下面的关系式

$$f = S_t \frac{v_1}{d} \quad (2-12)$$

式中 S_t 为斯特劳哈尔数，在雷诺数 R_e 在 $2 \times 10^4 - 7 \times 10^6$ 的范围内，旋涡发生体和管径尺寸确定以后， S_t 值是一常数。

将式(2-11)代入式(2-12)得

$$f = \frac{S_i v}{md} \quad (2-13)$$

设测量管内瞬时体积流量为 q_v ，则

$$q_v = \frac{\pi D^2 v}{4} = \frac{\pi D^2}{4 S_i} f m d \quad (2-14)$$

从式(2-14)可以看出，对于确定的管道直径 D 和发生体迎流面宽度 d ，流体的瞬时体积流量 q_v 与旋涡频率 f 成正比。也就是说只要测量出旋涡的频率 f 就可以测量出体积流量。两者之间呈现线性关系，且不受流体的温度、压力、密度、粘度以及组成成分的影响。

如果对式(2-14)进行一下改变，则

$$K = \frac{f}{q_v} = \left(\frac{\pi D^2}{4 S_i} m d \right)^{-1} \quad (2-15)$$

式中 K 为涡街流量计的仪表系数。

在工程中应用涡街流量计测量流量时，常用公式为

$$q_v = 3600 f / K \quad (2-16)$$

这时的体积流量的单位为 m^3/h 。

2.3 流场中光纤的受力分析

2.3.1 圆柱绕流的流场

圆柱绕流是流体力学中常见的问题，故对其流场分析也较透彻，大致如图 2-7 所示。对于石油等粘性流体圆柱绕流与假想的无粘性流体的流动形态并不相同。如图所示，A、B 分别为前后滞流点，流速 $v=0$ 。在粘性流体中，由于流体的粘性作用，流体沿圆柱表面流速为零，从而形成边界层。圆柱体前半部，流动由于受负压力梯度的作用，会加速，边界层会“附在”表面上；到达圆柱体后半部时，流动进入减速低压区，同时出现回流现象。无论边界层是层流还是紊流，都相应地存在着离流点，在此处，流体开始分离，形成涡流，后者的离流点较趋近于圆柱体的后面。边界层分

离实际上就是将邻近物面处产生的旋涡不断地发展、并向主流场输送的过程。离流点下游，将产生扰动涡流与旋流，并且这种状态会存在一段距离，而后因为流体粘性的作用而消减，这一区域称为扰乱涡区。扰乱涡区的典型现象便是卡门涡街。研究表明，涡街的形成实际上是在大的压力梯度和速度梯度条件下，由圆柱后两个分离剪切层相互作用的结果，一侧的剪切失稳后卷起漩涡，另一侧流体同时受剪切作用产生振动，周而复始，形成中心地带的尾迹区。旋涡交替脱落即形成涡街^[25]。实验显示，实际流体中，由于粘性的作用，流体绕过圆柱时将产生粘性摩擦，并且在圆柱绕流的后半部分形成脱流和尾迹。本研究中，光纤位于近尾迹区，10-15 cm 左右。

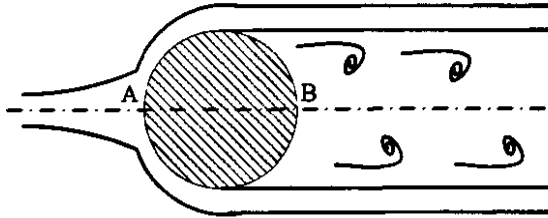


图2-7 圆柱绕流流场示意图

Fig.2-7 Fluid field shedded by the column

2.3.2 流体对光纤的作用

涡动力学作为现代流体力学的分支，认为旋涡是流体运动的基本形态，“是流体运动的肌腱”，其中流体能量高度聚集。流体与置于其中的物体之间的相互作用是通过粘附条件实现的。由于粘附条件的要求，物体边界上将“搓出”涡量，同时也将“挤出岔胀量”，分别称为边界涡量与边界胀量，这反映了物体对流体的作用，即是圆柱体对流体的作用^[26]。反过来，流体对圆柱体则产生了周期性的曳力和升力，这在经典流体力学的库·茹科夫斯基定律中是有所阐述。

实际上，流体与流体的相互作用，同样也是通过粘性作用，即流层之间的剪切作用来实现的，而对于石油等粘性流体来说，剪切作用更为明显。圆柱环流过程中，由于粘性摩擦的作用，流体在圆柱表面形成边界层。前半部分，导致压力呈负梯度变化，后半部分则反之，且有针对低压区的回

流现象的产生。离流点以后，不同分离剪切层相互作用，一侧剪切失衡后卷成旋涡，并交替分离形成涡街时，伴随着能量聚集将吸引另一侧剪切层向其靠近，最终引起尾迹区流体周期脉动，如图2-7所示。

周期脉动的流体绕过光纤运动，又形成圆柱环流问题，且在光纤表面形成边界层及光纤前后之压力差。使光纤横向同样受到曳力和升力的作用(库·茹科夫斯基定律)，产生周期振动。粘性摩擦力的大小，只能由实验获得，而升力则可根据库·茹科夫斯基的升力定理来粗略计算。由于这个环量的存在，会在旋涡发生体上产生一个升力，该升力垂直于来流方向。设作用在旋涡发生体每单位长度上的升力为 L ，则

$$L = \rho V \Gamma \quad (2-17)$$

式中 ρ 为流体密度； V 为来流速度； Γ 为旋涡发生体的速度环量。

Γ 定义为

$$\Gamma = \oint_C V dt = \iint_S (r_0 \cdot \vec{V})_n ds \quad (2-18)$$

对于圆柱体可以得到

$$L = k \rho_0 D V^2 \quad (2-19)$$

式中 k 是比例系数； D 是管道直径。由推算得

$$L = k \rho D V^2 \quad (2-20)$$

这就是作用在旋涡发生体上的升力。由于旋涡在旋涡发生体两侧交体发生，且旋转方向相反，故作用在发生体上的力亦是交替变化的。而流体则受到发生体的反作用力，产生垂直于轴线方向的振动，这就是流体振动的原理。

从上述分析可以知道：交替的作用在旋涡发生体上升力的频率就是旋涡的脱落频率。通过检测该升力的变化频率，就可以得到旋涡频率，从而可得到流体的流速值。

2.4 光纤振动稳定性分析

如何保证光纤振动的频率与所受外力变化频率是一致的呢，这就要进行光纤振动的稳定性分析。

2.4.1 管道内的流速分析

半径为 R 的管道内部流体的流动在雷诺数小的情况下为层流，流速在空间的径向分布为^[27]

$$v_x = v_{\max} \left(1 - \frac{x^2}{R^2}\right) \quad (2-21)$$

式中 v_{\max} 是管道中心轴的流速； R 是管道半径； x 是流体质点距中心的距离^[9]。

当雷诺数较大时，管道内的流动为紊流，流速在径向的分布为

$$v_x = v_{\max} \left(1 - x/R\right)^{1/n} \quad (2-22)$$

式中 n 是一个与雷诺数有关的数值，在紊流状态中的流速分布随雷诺数的变化而变化；在层流中，即使雷诺数变化，流速分布形状也不变。层流时的流速分布和雷诺数为 4×10^4 和 3×10^6 时的流速分布如图 2-8 所示。图中流速比为 v_x/v_{\max} 。

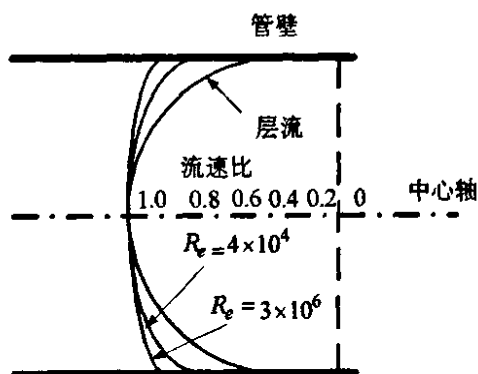


图 2-8 管道内的流速分布

Fig.2-8 The speed of flow distributed in the pipeline

2.4.2 光纤受力弦振动分析

在流量计中，对阶跃多模功能型光纤首先施以预应力并粘合固定，在工作过程中，由于受流体周期性合力作用，必将产生周期性的弦振动，而且弦振动频率与外力变化频率相同^[9]。设涡街作用在光纤上的力随时间按正弦变化，弦振动方程为

$$u_{tt} - a^2 u_{xx} = F(x) \sin \omega t \quad (2-23)$$

式中 a 为振动在弦上的传播速度, $a = \sqrt{T/\rho}$, 其中 T 为弦所受到的张力; ρ 为单位长度光纤的质量; $F(x)$ 为弦振动幅值沿光纤轴向分布; u_{tt} 为弦的横向位移对时间 t 的二阶偏导数; u_{xx} 为弦的横向位移对坐标 x 的二阶偏导数; x 为距管道中心轴的距离。由运动定律知

$$\omega = 2\pi f \quad (2-24)$$

式中 f 是涡街频率; ω 是运动角频率。取 $S_i = 0.2$, 则由式(2-12)可得

$$\omega = 0.4\pi v_1/d \quad (2-25)$$

式中 v_1 是发生体两侧流体的平均流速。

2.4.3 层流状态下的稳定性分析

当管道内的流体为层流时, 径向流速分布见式(2-21)为简化分析, 我们将径向振幅分布近似为正弦分布即

$$F(x) = A \sin(\pi x/D) \quad 0 < x < D \quad (2-26)$$

式中 D 为管道直径。

弦振动方程(2-23)变为

$$u_{tt} - a^2 u_{xx} = A \sin \frac{\pi x}{D} \sin \omega t \quad (2-27)$$

$$\text{初始条件为} \begin{cases} u(0,t) = u(D,t) = 0 \\ u(x,0) = 0 \\ u_t(x,0) = 0 \end{cases}$$

满足上述条件的定解的解为

$$u(x,t) = \frac{A}{\omega^2 - \frac{\pi^2 a^2}{D^2}} \left[\frac{\omega D}{\pi a} \sin \frac{\pi a}{D} t - \sin \omega t \right] \sin \frac{\pi x}{D} \quad (2-28)$$

由上式可知, 要使弦的位移随外力角频率变化, 应满足条件

$$\omega D/\pi a \ll 1 \quad (2-29)$$

将式 $a = \sqrt{T/\rho}$ 以及 $\omega = 0.4\pi V/d$ 代入上式得

$$T/\rho \gg (0.4\pi V/d)^2 \quad (2-30)$$

满足上式条件时，光纤在中心轴处的位移是

$$u(D/2, t) = AD^2 \sin \omega t / \pi^2 a^2 \quad (2-31)$$

光纤端面的位移应与中心点的位移相类似，因此在满足式(2-30)条件时，光纤端面的位移与外力的频率完全同步。

2.4.4 紊流状态下的稳定性分析

当流速较大时是紊流，流速在径向上的分布如式(2-21)所示。当雷诺数很大时，可以把流速看作在管道内均匀分布在管壁为零的阶跃形分布，受涡街作用的光纤满足方程

$$u_n - au_{xx} = B \sin \omega t \quad (2-32)$$

式中 B 为振幅。

满足式(2-29)给出的初始条件和边界条件的解为

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4B\omega}{(2n-1)\pi} \frac{1}{\frac{a^2\pi^2(2n-1)^2}{D^2} - \omega^2} \left[\frac{1}{\omega} \sin \omega t - \frac{D}{(2n-1)a\pi} \sin \frac{(2n-1)\pi x}{D} \right] \sin \left[\frac{(2n-1)\pi x}{D} \right]$$

当满足

$$1/\omega \gg D/a(2n-1)\pi \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (2-33)$$

由 $u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4BD^2}{(2n-1)^3 \pi^3 a^2} \sin \omega t \sin \left[\frac{(2n-1)\pi x}{D} \right]$ 当 $n=2$ 时，谐波为基波的 $1/27$ 。

当 $n=3$ 时，谐波为基波的 $1/125 \dots$ ，因此可不考虑谐波的影响。

当 $n=1$ 时， $1/\omega \gg D/\pi a$ ，与式(2-30)完全相同。所以紊流状态下只要满足式(2-30)，光纤端面的位移也只是外力的频率函数^[9]。

分析结果表明，当光纤所受张力与单位长度光纤的质量满足式(2-30)时，流体流动为层流或紊流时，光纤的振动频率与所受外力变化频率相同。如果不满足式(2-30)时，光纤的振动是本征振动和与外力频率相同的振动的叠加^[29,30]。这将使涡街频率信息淹没在各种不同频率的本征振动信息中，使光纤流量计不能稳定工作，限制光纤流量计的精度。

根据以上分析，在固定传感器时，使功能光纤受到较大张力，轴向受力满足式(2-30)。结果表明，探测的频率信号中的噪声大大减小。

2.5 本章小结

本章对光纤涡街流量计中涉及的基本理论进行阐述，其中包括光纤及光波导理论，流场中涡街发生体及光纤受力，光波导中光强损耗因素以及光纤振动稳定性的理论问题的分析。从而为设计传感器、仿真实验、测量精度以及误差分析奠定了基础。

第3章 光纤涡街流量计的综合参数计算

3.1 待测频率范围的估算

前文理论分析得知, 涡街的振动频率与光纤中光强变化的频率相同。由流体力学知, 当雷诺数在 $2 \times 10^4 - 7 \times 10^6$ 范围内, $S_f \approx 0.20$ 。我们可以估算涡街信号的产生频率范围, 这也是光纤振动的频率范围^[30]。需要扩展下限流量时, 按试验曲线可下延至 $R_e = 5 \times 10^3$ 。在 $R_e = 5 \times 10^3 - 2 \times 10^4$ 范围内 S_f 虽然不是常数, 但 R_e 与 S_f 有对应数据, 从而可以根据式(2-17)求出 q_v 与 f 之间的关系, 因此可以进行测量。故 $R_e \geq 5 \times 10^3$ 为流量计的可能测量范围。在此范围内, 若非线性误差允许时, 也可以将 S_f 视为常数进行测量。

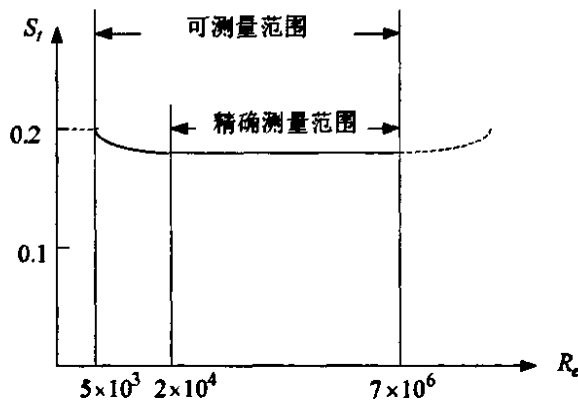


图 3-1 S_f 与 R_e 关系

Fig.3-1 Relation of S_f and R_e

由流体力学公式有

$$R_e = \frac{v_0 D}{\nu} \quad (3-1)$$

式中 v_0 为管道内液体的平均流速; D 为管道直径; ν 为液体的运动粘度。

根据流动的连续性原理, 即伯努力方程

$$Fv = F_0 v_0 \quad (3-2)$$

式中 v_0 为管道内液体的平均流速; F_0 为旋涡发生体两侧的流通面积; v 为

旋涡发生体两侧的流速； F 为管道流通面积。

将式(3-1)与(3-2)联立可得

$$v = \frac{F_0}{F} \frac{Re \cdot v}{D} \quad (3-3)$$

根据需求方工程生产中的实际情况和具体要求,本设计中取 $D=40$ mm, $d=11.2$ mm, d 为涡街发生体迎流面宽度, $F = \pi D^2/4 = 1256.64$ mm², $F_0 = F - D \times d = 808.64$ mm²。已知工业中常见流体在 20 °C 时的运动粘度分别为^[25]: 石油为 8.4×10^{-6} m²/s, 水为 1.007×10^{-6} m²/s。以水为例由式(3-2)、(3-3)可以求得不同雷诺数所对应的流速。当 $Re = 5 \times 10^3$ 时, $v_{\min} = 0.816$ m/s, $f_{\min} = 1.446$ Hz。 $Re = 7 \times 10^6$ 时, $v_{\max} = 113.40$ m/s, 但是考虑到实际液体的平均流速 v_0 一般不超过 20 m/s, 则待测的频率极限为 357.14 Hz。对于待测流体为气体, 以空气为例, 空气的粘度为 15 m²/s, 参比条件是常温常压, 空气密度为 1.205 kg/m³。气体的 v_{\max} 一般不超过 80 m/s, 所以测量的频率极限为 1428.57 Hz。

3.2 光纤受力强度计算及安全校验

光纤置于粘性流体流场中的受力计算, 尽管仅仅依靠经典流体力学的库·茹科夫斯基升力定律来推导, 显得有些粗糙, 但从光纤振动安全的角度来考虑, 是可行的, 毕竟这是假设将由于阻流体引起的环流, 全部作用于光纤上, 即用最危险的情况来考察其安全性^[31]。

光纤在涡街的作用下做受迫运动^[32], 由流体力学中库·茹科夫斯基升力定律, 设圆柱体单位长度上的升力为 L 。 $L = K\rho d v^2$, 其中 ρ 为流体密度, v 为来流速度。

现在以水为例, 对光纤受力强度进行安全校验。根据受力分析, 假设作用于旋涡发生体每个单位长度上的升力为 L , 同时令比例系数 $K = 1.832$, $\rho = 1000$ kg/m³, $d = 11.2$ mm, 取 $v_{\min} = 0.0816$ m/s, $v_{\max} = 20$ m/s。将以上数据代入式 $L = K\rho d v^2$ 得 $L_{\min} = 0.1367$ N/m, $L_{\max} = 8207.36$ N/m。

作为敏感元件的光纤丝可以看作两端有固定支撑的振弦, 弦长为 e , 振幅为 p , 其变形情况如图 3-2 所示。

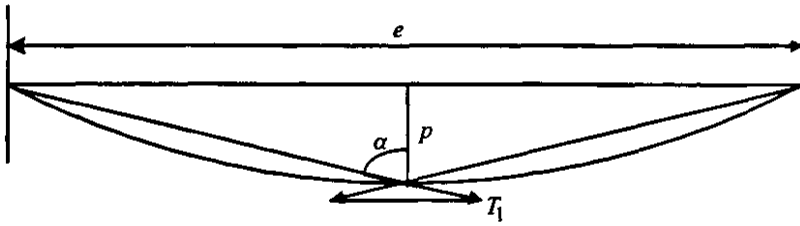


图3-2 光纤受力示意

Fig.3-2 Illustration of Force on the optical fiber

只分析层流的情况，对于紊流所得到的结果与层流下的情况相近，故不赘述。在层流条件下，即 $R_e = 2320$ ，由旋涡的升力所引起的振幅为

$$p = \frac{AD^2}{\pi^2 a^2} \quad (3-4)$$

式中 A 为正弦振动的加速度的幅值； D 为管道内径； a 为光纤振动的传播速度；且

$$a = (T/\rho_1)^{-1} = (eT_1/\rho_1)^{-1} \quad (3-5)$$

式中 T_1 为单位长度光纤所受的张力； ρ_1 为单位长度光纤的质量。

选用的光纤为芯径 $2a = 0.6 \text{ mm}$ 多模石英光纤，其外径 $\phi = 1.6 \text{ mm}$ ，光纤材料的密度为 $\rho_0 = 3.73 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，则可求得 $\rho_1 = 0.075 \text{ g/cm}$ ，由图3-2 可求得单位长度的光纤张力

$$T_1 = L/2 \cos \alpha \quad (3-6)$$

且式中

$$\alpha = \text{tg}^{-1}(e/2p) \quad (3-7)$$

联立式(3-4)、(3-6)、(3-7)可得

$$p^2 = K_p^2 - (e/2)^2 \quad (3-8)$$

式中 $K_p = 2AD^2 \rho_1 / \pi^2 L e$ 。

考虑到 $L = \rho_1 A$ ，故得 $K_p = 2D^2 / \pi^2 e$ ，代入式(3-8)得

$$e^4 + 4p^2 e^2 = 16D^4 / \pi^4 \quad (3-9)$$

若取振幅 $p = 0.5 \text{ mm}$ ，得 $e = 31.85 \text{ mm}$ 。

下面校验对应于最大雷诺数 $R_e = 7 \times 10^6$ 的应力时，是否会造成光纤的断裂。由式(3-6)、(3-7)得

$$T_{1\max} = \frac{L_{\max}}{2\cos(\operatorname{tg}^{-1} \frac{e}{2p})} \quad (3-10)$$

将以上所有的数据代入，得到 $T_{1\max} = 1.308 \times 10^5$ N/m，总张力 $T_{\max} = T_{1\max} \cdot e = 4.170 \times 10^3$ N/m。若取光纤的包层外径 $2R = 1.6$ mm，那么承受张力的截面积为 $S = \pi R^2 = 2.01$ mm²。此时承受的轴向拉应力 $\sigma = 2072.63 < [\sigma] \approx 3 \times 10^3$ N/m²。光纤丝在振幅 p 时，圆弧形弧 $f = \frac{4}{3} \sqrt{e^2 + 4p^2} - \frac{1}{3}e \approx 31.9$ mm， $\varepsilon = f - e/e < 3\%$ ，即小于光纤断裂时的应变。可见，振动光纤不会断裂。

3.3 估算光电转换后的待测信号幅值变化

光纤的纯弯损耗和过渡损耗的同相变化，致使了光纤中传输的光强发生调制，而光弹效应则是光强调制的本质。光电转换元件所接收到的光强变化由下式表示

$$I = I_0 \left(1 + \sin \pi \frac{\sigma}{\sigma_\pi} \right) \quad (3-11)$$

式中 σ 为应力； σ_π 为半波应力。

对于非晶体材料

$$\sigma_\pi = \lambda_0 / p_0 l_0 \quad (3-12)$$

式中 p_0 为有效光弹系数； l_0 为光弹材料的光路长度； λ_0 为光波长。

对于流速 v_{\min} ，光纤丝上的张力

$$T_{\min} = T_{1\min} \cdot e = \frac{L_{\min}}{2\cos\alpha} \cdot e = \frac{L_{\min} \cdot e}{2\cos\alpha(\operatorname{tg}^{-1} \frac{e}{2p})} \quad (3-13)$$

$$\sigma = T_{\min} / S = T_{\min} / \pi R^2 \quad (3-14)$$

$$\frac{\Delta I}{I} = \sin \pi \frac{\sigma}{\sigma_\pi} = \sin \frac{L_{\min} \cdot e \cdot p_0 \cdot l_0}{2\lambda_0 R^2 \cos(\operatorname{tg}^{-1} \frac{e}{2p})} \quad (3-15)$$

取 $l_0 = e$ 得

$$\frac{\Delta I}{I} = \sin \pi \frac{\sigma}{\sigma_{\pi}} = \sin \frac{L_{\min} \cdot e^2 \cdot p_0}{2\lambda_0 R^2 \cos(\operatorname{tg}^{-1} \frac{e}{2p})} \quad (3-16)$$

选用 HFE4381-521 型 LED 光源, 取 $\lambda_0 = 850 \mu\text{m}$, 有效光弹系数 p_0 为 0.65×10^{-11} , 同时将其其他已知数据代入式得 $\Delta I/I_0 = 4.61 \times 10^{-4}$, LED 的额定发光功率为 $P_0 = 11 \text{ mW}$, 经过各级耦合到达光电接收器的功率 η 取 1%, 则对于流速 v_{\min} , 光强变化为 $\Delta P = \eta \cdot P_0 \cdot (\Delta I/I_0) = 0.051 \mu\text{W}$, 选用 S10E 型 PIN 管作为光电接收器, 其响应速度为 $a_0 = 1.5\text{V}/0.1 \mu\text{W}$, 则获得的信号电压 $\Delta V = a_0 \cdot \Delta P = 0.765 \text{ V}$, 能够满足后面电路的处理要求。

3.4 流体工作状态物性参数的补偿

对于气体和蒸汽流量测量, 因为工艺条件经常变动, 流体的工作状态(压力、温度)变化, 会引起其密度的变化, 测量体积流量就会出现很大的误差。以常温常压气体为例, 当气体温度变化 1°C , 会引起密度变化 0.3%; 压力变化 1 kPa, 会引起密度变化 1%。因此, 简单的测量体积流量机会没有什么意义。为此必须采用温度、压力补偿的方法, 把工作状态的体积流量转换成标准状态的体积流量, 就可以减少测量误差^[1]。

3.4.1 液体密度的温度补偿

大多数液体可视为不可压缩流体, 因此压力变化对其密度的影响较小, 而温度对密度的影响比压力影响明显的多。对要求精度较高的测量, 应对液体密度进行温度补偿, 补偿方法可以查表或者依据经验公式计算。

(1)水的密度 水的密度补偿公式如下所示

$$\rho = 1005.1 - 0.13437t - 0.002709t^2 \quad (3-17)$$

式中 ρ 为工作状态下水的密度; t 为水的温度。

(2)液体的密度 一般液体的密度补偿公式如下所示

$$\rho = \rho_0 [1 - \lambda(t_0 - t)] \quad (3-18)$$

式中 ρ 为温度为 t 时液体的密度; ρ_0 是温度为 t_0 时液体的密度; λ 为液体

的体积膨胀系数。从上式可以看出，把 ρ_0 和 λ 写入仪表中就可以进行在线密度计算。

3.4.2 气体的密度补偿

气体的密度受工作压力和温度的影响比较明显，因此其密度补偿应进行压力和温度补偿。另外气体的密度还与湿度有关，计算湿气体时还应考虑气体的相对湿度。由于湿气体、混合气体和饱和气体的情况比较复杂，本文只对于气体的密度补偿进行说明。

工作状态干气体的密度补偿公式为

$$\rho = \rho_n \frac{p}{p_n} \cdot \frac{T_n}{T} \cdot \frac{Z_n}{Z} \quad (3-19)$$

式中 ρ_n 为气体在标准状态下的密度； p 为气体在工作状态下的绝对压力， p_n 为标准状态压力，0.101325 MPa； T 为气体在工作状态下的温度热力学温度； T_n 为标准状态热力学温度，293.15 K 或者 273.15 K； Z 为气体工作状态下的压缩系数； Z_n 为标准状态下气体的压缩系数。

3.5 本章小结

本章主要完成了以下工作：初步估算待测频率范围即涡街信号的频率，简化光纤受力并计算振动振幅以及进行安全校核，最后简要讨论了光电转换后信号的特性并分别针对液体和干气体给出了进行压力和温度补偿的经验公式。

第4章 光纤涡街流量计的设计

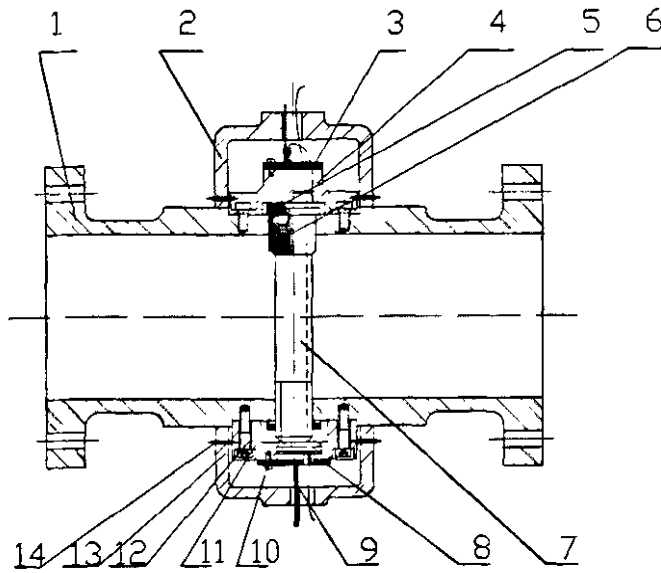
涡街流量计由传感器和转换器两部分组成^[33]。传感器包括:旋涡发生体、检测元件、安装架和法兰等。转换器包括:前置放大器、滤波整形电路、接线端子、支架和防护罩等。近年来,随着科技的发展以及人们对工业仪表要求的进一步提高,问世了许多的智能仪表。问世的智能式涡街流量计还将CPU、存储单元、显示单元、通信单元及其它功能模块也装在转换器内,形成智能和组合型涡街流量计^[34]。

4.1 光纤涡街流量计的机械结构设计

4.1.1 总体结构设计

整个流量计零件材料大多采用工业中常用的45号钢^[35]。机械结构一般是根据使用方的具体要求进行设计的。该设计的装配简图如图4-1所示,具体的机结构功能为:光源置于上支架4的孔内,并通过上挡板3固定后,受功率稳定电路控制,发出恒定功率的光强,光纤固定于涡街发生体之后10-15 cm处,与激光器直接耦合,传输光信号。由于涡街发生体7使得流经的流体产生周期场扰动,作用于传感光纤,使其对光纤进行调制,而产生原始的光强信号。光电接收器9,置于下支架13,并由下挡板8固定后。原始的光强信号经过光电接收器后,产生携带流体振动频率信号的微小电信号源,传入后续信号处理电路。3D装配图如图4-2所示。其中装置壳体采用法兰型对称式设计,如图4-3所示,内径为40 mm,与试验用管道相匹配。涡街发生体垂直置于壳体内,柱体上部半圆槽内用于放置并固定光纤。涡街发生体通过定位键6定位,并与对拧螺母14紧固。

由于设计的光纤涡街流量计要直接连接到工程现场的流体传输路径中,所以必须考虑密封问题。在密封设计中,在光纤涡街流量计的壳体法兰与管道以及壳体与涡街发生体上下连接配合使用橡胶垫圈,以防止流体的泄漏。



1 壳体 2 上端盖 3 上挡板 4 上支架 5 挡板 6 定位键 7 涡街发生体
8 下挡板 9 光电接收器 10 螺钉 11 上端盖 12 大螺钉 13 下支架 14 对拧螺母

图 4-1 流量计装配结构图

Fig. 4- 1 The simplified sketch of the designed flowmeter

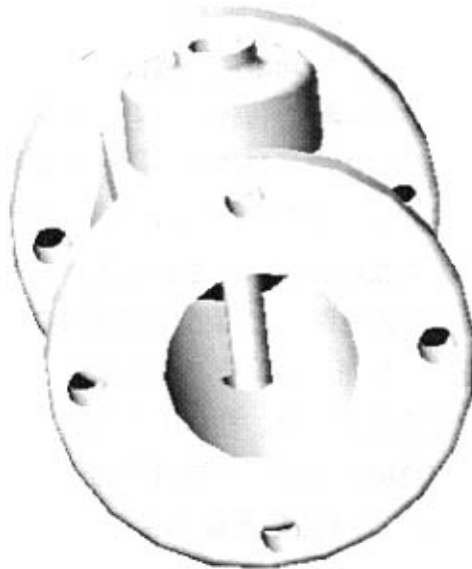


图 4-2 装配 3D 图

Fig.4-2 The 3D assembly drawing

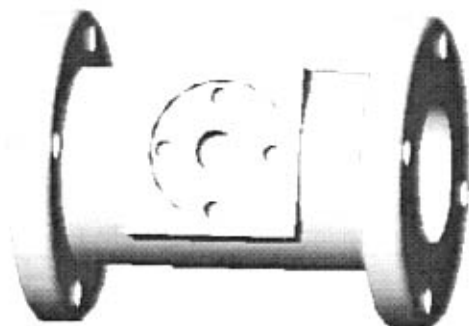


图 4-3 流量计壳体

Fig.4-3 Shell of the flowmeter

4.1.2 旋涡发生体的设计

旋涡发生体是涡街流量计的关键部件，其选型的优劣对仪表特性至关重要。为产生强烈和稳定的涡街，并在较宽的雷诺数范围内具有恒定的斯特劳哈尔数，以保证仪表正常线性输出，旋涡发生体应有一定要求的形状、构造和尺寸比例；另外，旋涡发生体的形状应力求简单，便于制造和标准化，并能为旋涡检测敏感元件的安装提供合理的位置，以便于与旋涡频率的检测相配合。为了保证仪表运行的稳定性和寿命，旋涡发生体的自振应远离涡街频率，以避免共振，其材质要能满足被测介质长期冲刷而两者不发生化学反应的要求^[29]。

应强调指出，在旋涡发生体选型及设计时，重要但容易被忽略的一点是：必须考虑旋涡发生体主体长度方向上的旋涡同步分离的特性，才能保证旋涡的稳定性。因为，实际上在流道的三维空间里，旋涡发生体所弹泻出的是两列平行的柱状旋涡，又称直线涡丝，如图4-4所示。众所周知，在有限流场中，由于流道壁面及端部效应，流速分布不均匀，例如在圆形管道中，流速分布是一个旋转抛物面。若在圆管流中插入一根与流向垂直的柱体，则沿该柱体不同高度上的流速是不同的，柱体中间(圆管中心)处流速最大，越靠近两端(管壁)流速越低。根据旋涡分离频率与流速及柱宽的关系可知，在柱体不同高度上，旋涡分离频率不相同，柱体中间部分分离频

率高而两端分离频率低，也就是说旋涡分离沿着柱长分层进行，层与层之间的旋涡相互制约，相互干扰，使得旋涡削弱从而难以建立稳定规则的涡街^[34]。因此，一般的柱体插在管道中几乎形成不了稳定规则的涡街。要使管内形成稳定规则的涡街，必须削弱管壁对旋涡形成和涡街阵列的影响，改善非均匀流场和端部效应(有限柱长)的影响，以创造旋涡在柱轴方向上同步分离的条件。

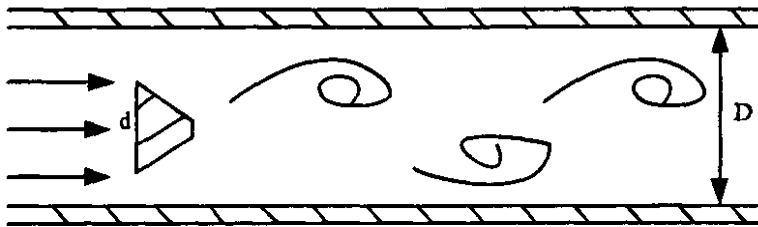


图4-4 柱体弹泻的直线涡丝

Fig.4-4 The barrel ball flows swiftly straight line vortex line

对旋涡发生体广泛试验研究表明，促进旋涡轴向同步分离的主要措施有以下几点^[36]：

(1)选择适当的柱宽比(特征尺寸 d 与管道直径 D 之比)，改变流场，重新形成较均匀的流速分布。

(2)采用尽可能小的柱体尺寸，使流动状态接近于无限大的均匀流场，以减小端部效应。

(3)采用具有棱边的柱体形，利用棱边陡断迫使旋涡分离在棱边上同步。

(4)采用边界层分离控制技术，促使旋涡沿柱体轴向同步分离(例如在圆柱体两侧开孔,利用孔口处的吸入、吹出作用来控制边界层分离)。

(5)在旋涡发生体下游加尾摆，尾摆与柱体呈弹性连接，借助尾摆机械振动反射的能量来迫使柱体两端部旋涡分离与中间同步。

为了进一步提高旋涡的稳定性和强度，并使旋涡分离点在不同的雷诺数下固定不动，以保持 S_r 数在较大的流量范围内恒定，以及考虑旋涡分离频率检测的适应性，在基型旋涡发生体的基础上实验研究出了具有迎流锐角的多种旋涡发生体。这些旋涡发生体各有特点，例如，梯形柱及T形柱

实际都是三角形柱的变形，这种变形主要考虑到对某些检测方法，如大流量测量应力式检测法的适应性。

圆柱、三角柱及矩形柱，称为基型旋涡发生体，对它们研究的历史最长，实验数据最多，故通用性强。其主要特点如下表所示。

表4-1 各种发生体的主要特点

Table4-1 Main characters of the variety vortex bluff

涡街发生体形状	斯特劳哈尔数	雷诺数	特点
圆柱发生体	0.2	$10^4 \sim 10^5$	形状简单，易加工， S_t 较高，旋涡强度较弱，需采取措施才能形成稳定的旋涡。
矩形柱发生体	0.17	—	S_t 小于圆柱体，旋涡强烈稳定，但是压损大。长度比对旋涡强度有明显影响，当长度比 $b/d = 0.67$ 时，旋涡强度最大，此时 $S_t = 0.17$ 。可在发生体内或发生后进行检测。
三角柱发生体	0.14~0.17	—	S_t 较小，旋涡强烈稳定，压损小， R_e 在较宽范围内 S_t 为常数。 S_t 值取决于三角形横截面顶角 α 及三角形高 b 与底边 d 之比。一般 $\alpha = 30^\circ - 50^\circ$ ， $b/d = 1.2 - 1.5$ 时， $S_t = 0.14 - 0.17$ 。当 $\alpha = 38^\circ$ ， $b/d = 1.32$ ， $d/D = 0.28$ 时， $S_t = 0.17$ 。在发生体前后方及发生体内均可检测。

光纤涡街流量传感器采用的旋涡发生体就是在基型旋涡发生体的基础上进行改进得到的。它基于三角形旋涡发生体，采用具有棱边的梯形柱型，并且将旋涡发生体迎流面、背流面设计成和梯形柱具有相同外接圆的圆柱面。采用这样的设计是基于如下考虑^[37]：

首先，棱边陡断可以迫使旋涡分离在棱边上同步，从而保证旋涡的稳定性；其次，由上面的表中可以看出，在圆柱体、矩形柱体、三角形柱体这三种旋涡发生体当中，圆柱形旋涡发生体的斯特劳哈尔数 S_t 最大 (S_t 值越大，意味着以特征速度 v 走过特征尺寸 d 的一段时间内，由旋涡发生体分离出来的旋涡越多，频率越高)。因而当流过相同体积的流体时，圆柱形旋涡发生体的涡街分离频率 f 最大。所以，采用上述措施能够保持圆柱体旋涡发生体 S_t 较大的优点，降低测量的下限。而且，当柱体的外接圆相同时，梯形柱具有更大的刚度，可以削弱管道振动所带来的影响。最后，该设计

可以削弱堆积和磨损对仪表系数 K 的影响。从理论上讲，涡街流量计的仪表系数 K 是一个常数。但是如果被测流体中存在粘性颗粒物质或夹杂较多纤维物质，则可能会逐渐堆积在旋涡发生体迎流面上，使其几何形状尺寸发生变化，因而仪表系数 K 也跟着变化，旋涡的形成受到影响，产生附加测量误差。为了减小这个误差，把旋涡发生体迎流面设计成圆柱面，并且选择合适的旋涡发生体材料，能够减少堆积，降低磨损，有效的减少影响仪表系数 K 的因素。

在直径为 40 mm 的管道中，本设计的涡街发生体的形状如图 4-5 所示。此涡街发生体的尺寸如下：三角形横截面的顶角 $\theta \approx 19^\circ$ ， $b = 14.78$ mm， $d = 11.2$ mm， $c = 1.45$ mm， $m = 2.02$ mm，此数据基本与经验值相符。

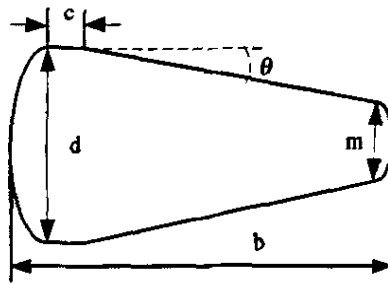


图4-5 涡街发生体

Fig.4-5 The vortex bluff

4.1.3 壳体的设计

涡街流量计在使用的时候的一个局限性就是它不适用于低雷诺数测量，在 $Re < 2 \times 10^4$ 时，涡街流量计工作的基本条件被破坏，旋涡分离的稳定性得不到保证^[30]。另外，涡街流量计的正常使用对旋涡能量有一定的要求。当旋涡不够强烈时，旋涡旋转速度也低，难以引起敏感元件振动，过低的旋涡频率信号还使放大滤波、整形等信号处理电路发生困难。这些都决定了涡街流量计的测量下限不能太低，在高粘度、低流速、小口径情况下应用受到制约。

本设计采用了缩小管径的办法，使光纤涡街流量传感器能够在较低的雷诺数下使用，同时又可以较好的消除流场变化带来的干扰，保证仪表准

确测量。除此之外，仪表的内径变化尺寸得当，渐缩管还能起到加快流速和整流器的作用，不仅消除采用整流器使得流体压损增大的缺点，还能增强旋涡的强度，减少异物堆积，从而削弱了影响仪表常数的因素，提高了流量计的整体性能。

保证涡街流量计正常工作就要使得仪表工作在其系数 K 的线性范围之内。影响 K 的因素较多，不过直接产生影响效果的是这些参数的组合 R_e 。 $R_e > 2 \times 10^4$ 时，涡街流量计对于各种液体、气体、蒸汽具有通用性，仪表系数 K 不受介质粘度、密度、压力、温度、成分等因素的影响。在工业生产中，大多数流体的 R_e 满足涡街流量计工作条件，但是也有一些情况因为流体的流速偏低或是粘度偏大，使得仪表在凡 $R_e < 2 \times 10^4$ 的环境下使用，仪表的精度便得不到保证。采用缩小管径的方法来削弱这一方面的影响是基于这样的原理。在流量不变的情况下，管道缩小为原来的 $1/n$ ，流速则提高为原来的 n^2 倍，而 R_e 增加为原来的 n 倍，从而保证仪表运行在量程下限之上。由此，本设计中，传感器的流入、流出口分别采用了渐缩和渐扩管的设计。流入口的管径从 40 mm 逐渐缩小到 32 mm，同时流出口的管径由 32 mm 逐渐扩大到 40 mm。当旋涡发生体处的 R_e 要求至少是 2×10^4 时，入口处的 R_e 仅需大于 1.6×10^4 即可。

4.2 实验电路硬件部分设计

4.2.1 振动信号发生和频率测量系统模型

考虑到本设计的部分设备价格较贵且对空间占用较大，在设计过程中设计者采用试验模型进行试验，产生振动信号。试验模型如图 4-6 所示。

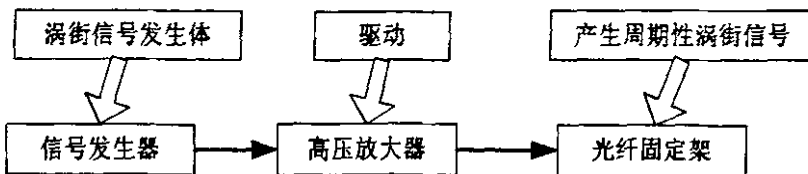


图 4-6 振动信号产生过程模型示意图

Fig.4-6 Simulation on the generation of modulated optical signal

模拟振动信号产生部分是整个频率测量系统的一部分，将光纤固定于振动架上，使用压电陶瓷作为振动源，通过高压放大器驱动压电陶瓷，使固定架作周期振动，从而模拟光纤的振动过程，实现光强的调制，再由光电转换输出。此时，通过观察光电输出示值，定性分析光强的衰减情况。压电陶瓷的振幅与高压放大器的倍数呈线性关系，倍数越高，振幅越大，从而通过光纤固定架，使得光纤横向振动的幅值也就越大。结果表明，放大倍数越高，光电接收器转换的电信号中交流幅值就越高。为了能够得到可以测量的清晰的电信号，必须使得光纤的振动达到一定的幅度。本设计在试验平台的搭建中采用了由Tekrtonix公司生产的AFG320型双通道可编程任意函数发生器。它的输出正弦波频率最高可达16 MHz, 采样速度可达16 Ms/s, 输出幅度为 $50\text{mV}_{\text{FF}}-10\text{V}_{\text{FF}}$ 。图4-7为频率测量系统模型示意图，包括振动信号产生模拟部分以及光电转换后电信号处理部分。

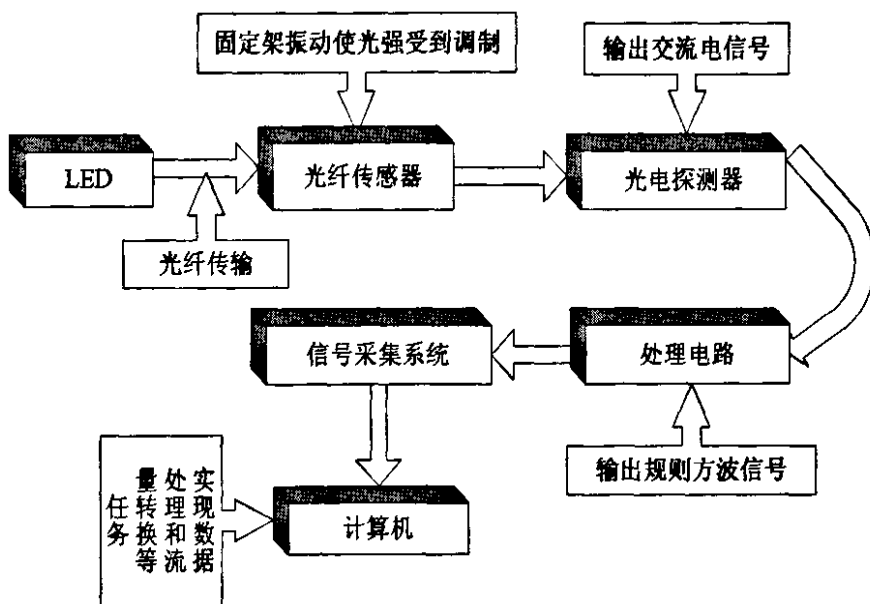


图 4-7 频率测量系统模型示意图

Fig.4-7 Block diagram of the frequency measurement system

4.2.2 电路设计

信号处理电路设计是仪表设计的关键，它的性能优劣直接决定了整个

仪器的性能好坏。电路设计包括 LED 光源和驱动电路、光电转换及放大整形滤波电路、信号处理电路、信号显示电路等几部分^[31]。包括温度和压力补偿的流量计的整体硬件电路组成如图 4-8 所示。

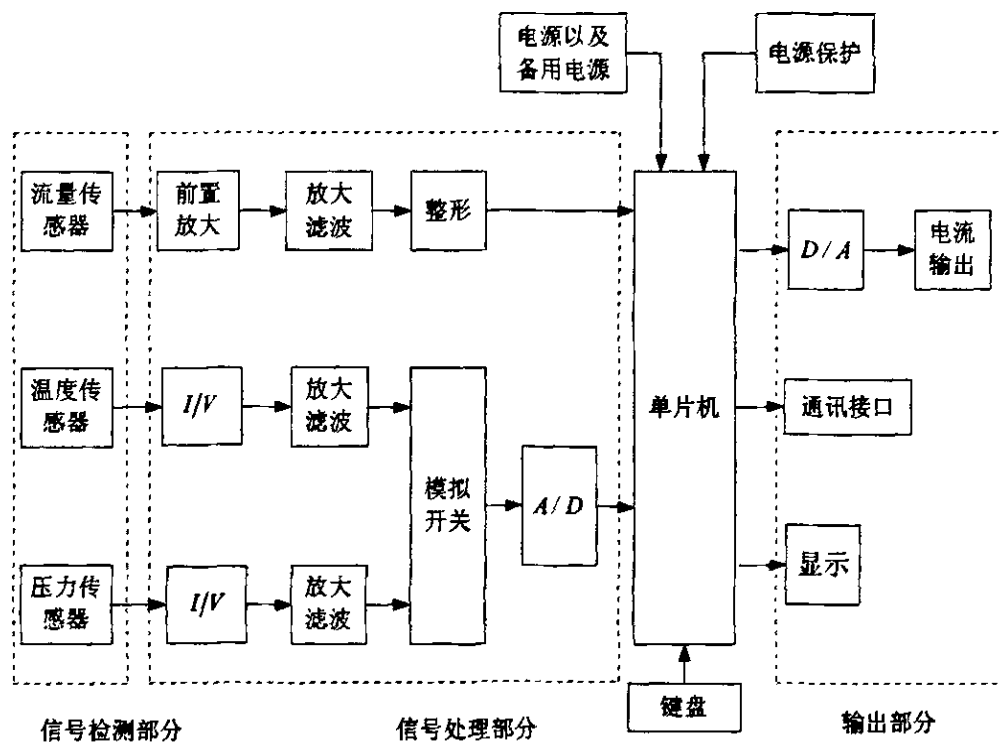


图 4-8 涡街流量计硬件图

Fig.4-8 Hardware chart of the optical-fiber vortex-shedding flowmeter

4.2.2.1 光电耦合电路 (1)光源与光接收器 LED 光源具有体积小, 稳定性好, 相应时间短等特点。它输出的光是非干涉光, 因而输出的功率更加稳定。光电二极管是将光信号转换成电信号, 它是光电探测系统的核心。本设计选用了 S10E 型 PIN-FET 混合集成光电接收器。它是一种小面积、低电容型 PIN 管和一个以 FET 为前端的宽带的噪声放大器混合集成的光电接收器件。所有的引线长度和散杂电容降至最小, 热噪声效应也降至最小, 高灵敏度和信噪比大是它最大的优点。它在 850 nm 的波长的光谱响应度最大, 此时响应度不低于 $15 \text{ V}/\mu\text{W}$, 光敏面直径 $2.2 \times 2.7 \text{ mm}$, 脉冲相应时间低于 20 ns, 工作带宽 DC-50 kHz, 适合检测微弱交变电信号。光纤与光源和光电接收器连接时, 均采用直接耦合方式, 耦合效率受光纤直径及受光

角的影响较大，但总体能满足使用要求。

(2)光电耦合和恒流放大电路 光发射电路主要由发光二极管、晶体管、稳压二极管组成。电源的直流电压经 R_1 和 D_1 组成的稳压电路给晶体管 BG_1 提供一个稳定的基极电压，以保证晶体管工作电流 I_1 的稳定，从而保证发光二极管 D 发出强度恒定的光。前置放大电路由光电二极管 T_1 、恒流源 I_2 和集成电路组成，如图 4-9 所示。

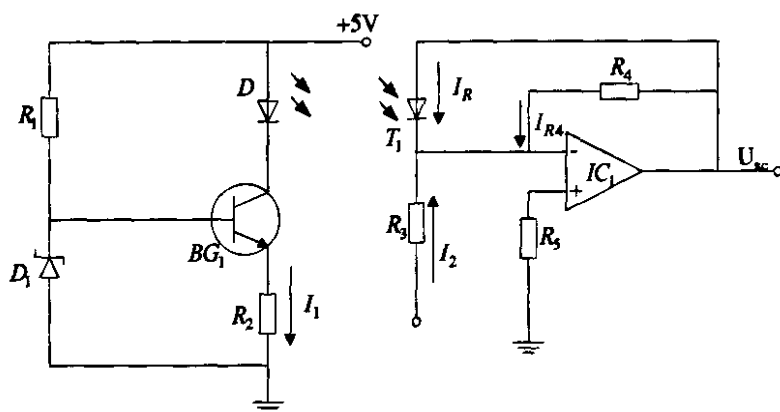


图 4-9 光电耦合及放大器电路

Fig.4-9 Light electricity coupler and amplification circuit

图中恒流源 I_2 为光电二极管和集成电路的反馈电阻 R_4 提供恒定的电流。因为发送给 PIN 管的信号强度随旋涡频率 f 而变化，所以被它转换成随旋涡频率 f 而变化的电流信号 I_R 。从图中可以看出，流经反馈电阻 R_4 的电流 $I_{R4} = I_2 - I_R$ ，同样随着旋涡频率 f 而变化，这样集成运放的输出电压也随着旋涡频率而变化，所以输出的电压 $U_{sc} = I_{R4}R_4 = (I_2 - I_R)R_4$ ，于是通过光电耦合和电流放大就完成了旋涡频率到电压信号的转换。

4.2.2.2 信号处理电路 该部分电路主要实现以下功能：对光电转换后的信号进行隔直和放大；滤去高频分量并进行二级放大；通过精密的电压比较器进行方波转换，得到 TTL 接口，实现与二次仪表的连接^[32]。

如图 4-10 所示，采用 ICL7650 斩波稳零精密放大器。它是 Intersil 公司利用动态校零技术和 CMOS 工艺制作的斩波稳零式高精度运放，具有偏置电流小、失调小、增益高、共模抑制能力强、响应快、漂移低、性能稳定的特点。

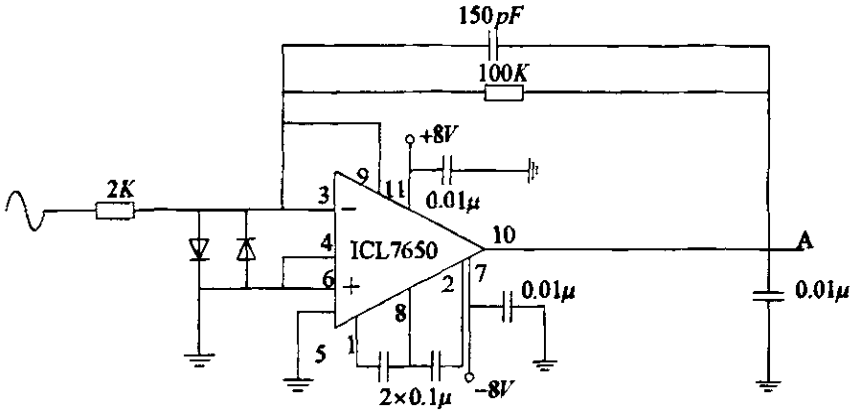


图 4-10 隔直放大电路

Fig.4-10 DC-resisting and primary amplification circuit

由于使用的是 PIN-FET 管具有负极性,所以对原始信号进行反相放大,使之达到正常的电压水平,放大系数为 50 倍。通过如图 4-11 所示的低通环节后^[33,34],由 741 通用放大器进行二级放大,补偿电路中的损耗。

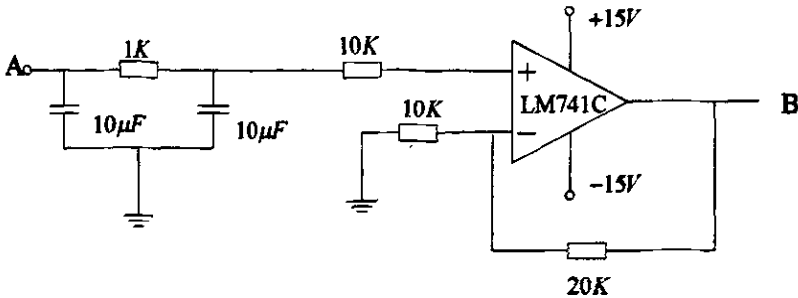


图 4-11 低通放大电路

Fig.4-11 Low-pass and secondary amplification circuit

波形转换环节如图 4-12 所示,通过 CJ0311 单电压比较器,将上述的正弦输入信号经过比较得到方波信号,实现 TTL 电平的输出。射极跟随输出重要能使输出信号具有更强的驱动能力,它是一个电压串联负反馈放大电路,它具有输入电阻高,输出电阻低,电压放大倍数接近于 1,输出电压能够在较大范围内跟随输入电压作线性变化以及输入、输出信号同相等特点。射极跟随器的使用使输出信号在保持与 TTL 电平输出、频率、幅值相对稳定的情况下,为定时/计数器有效接收并计数,如图 4-13 所示。

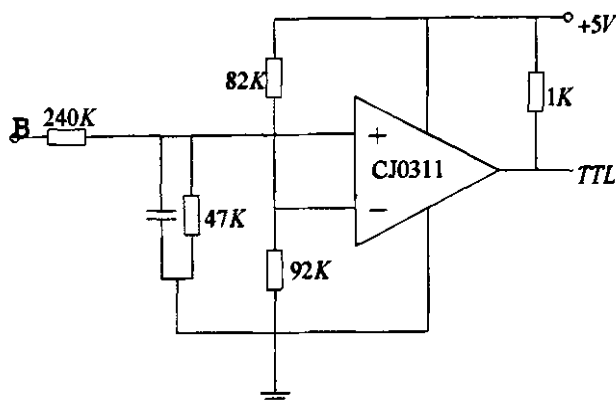


图 4-12 波形转换电路

Fig.4-12 Waveform-transforming circuit

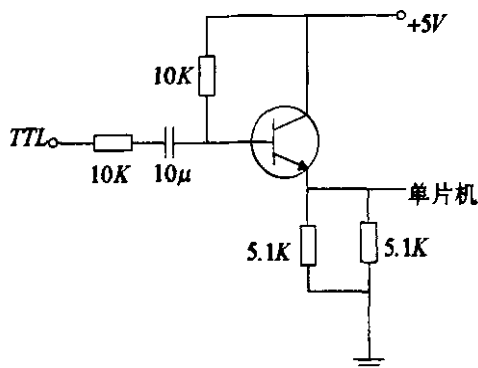


图 4-13 射极跟随输出电路

Fig.4-13 Emission-following output circuit

4.3 积算仪部分的设计

在实际工程中，有时将流量积算仪简称为二次仪表。它主要包括微型计算机单元、键盘控制单元、LCD 显示单元、A/D、D/A 转换器、掉电保护单元、抗干扰自恢复电路、串行口等几个部分^[35]。各个部分的主要功能如下：

(1)微型计算机单元 由 W78E58B 单片机及外围接口芯片组成。它是本积算仪的核心。用以完成输入信号的采样处理、流量的补偿运算及累积工作。

(2)液晶显示器 显示设定参数、累积量、瞬时流量、瞬时压力、瞬时

温度等。

(3)键盘 用于完成常数的输入及修改,控制仪表的运行及选择显示所需的测量参数。

(4)A/D、D/A 转换器 将输入模拟信号转换成数字信号以供计算机处理,或将运算后的数字量转换成模拟信号输出。

(5)掉电保护电路 计算机数据区的备用电源部分,掉电时自动切换为数据区供电,以防数据丢失。掉电后,数据可以保持半年之久。

(6)抗干扰自恢复电路 当单片机受到外来干扰程序执行失常时,输出一复位信号,使仪表回到正常工作状态。

(7)串行口 联机使用,可以接收外部计算机数据及命令,也可把工作数据传送出去。

积算仪设置成4秒为一运算周期,其时间基准由W78E58B内部定时器提供。在每个运算周期内,单片机通过A/D转换器采集压力和温度信号,并测取一次仪表输出的脉冲数,然后按照数学模型计算出该周期内的瞬时流量和进行总量累计。计算结果送液晶显示器显示。

该二次仪表具有如下的特点^[41]:

(1)可以显示被测介质的累计流量、瞬时流量、瞬时压力及瞬时温度等多个参数。

(2)可进行多个预置参数的设定和在线修改。

(3)可对瞬时流量、瞬时压力、瞬时温度进行越限报警。

(4)具有断电数据保护功能,断电后数据可保存半年。

(5)具有断电恢复功能,断电后重新上电自动进入断电前工作状态。

4.3.1 单片机的选择

根据工程生产现场提出的技术要求,必须保证整个仪表在4 mA以下能够正常工作。因此功耗的大小是电路研制能否成功的关键^[41]。在对众多常见的低功耗单片机进行筛选后,我们选择了台湾Winbond(华邦)公司的W78系列8位CISC单片机^[42]。W78E58B有多种管脚,40管脚的排列如图4-14所示。

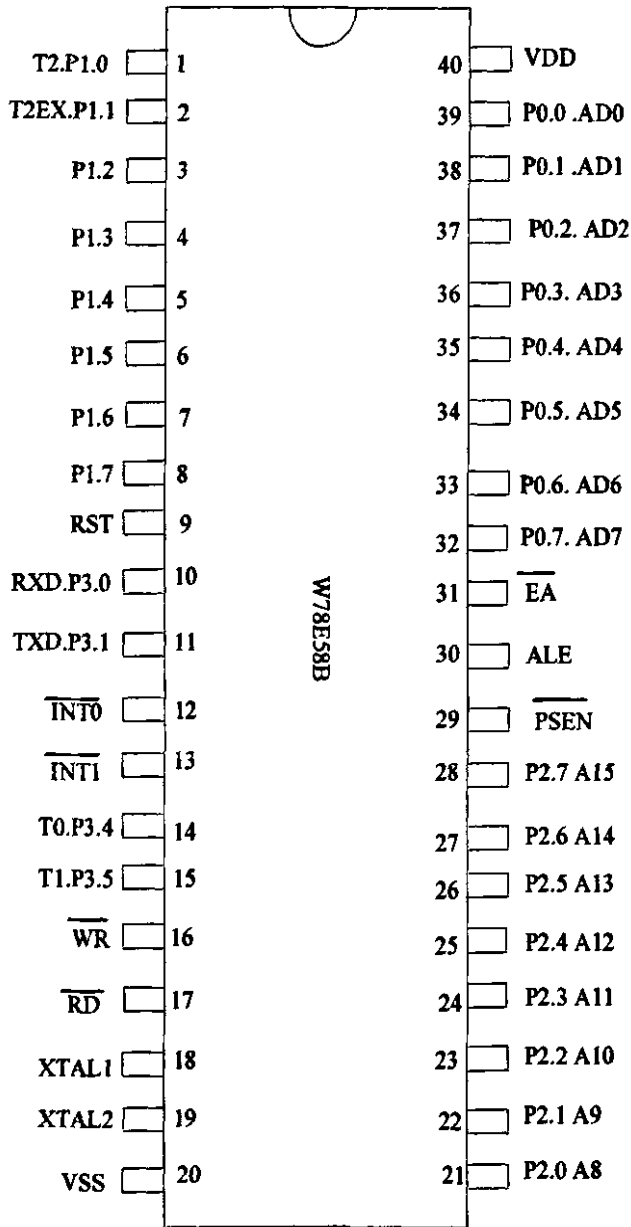


图 4-14 W78E58B 引脚图

Fig.4-14 Pin configurations of the W78E58B

它具有超低功耗的特性。W78E58B 内部有一个可编程闪存用于固件的更新。它的指令与 8052 系列单片机完全兼容。它包括一个 32 字节的主 ROM 和一个 4 k 字节的辅程序存储器，允许 32 k 字节主程序存储器的内容通过位于 4 k 字节辅程序存储器的写入程序进行改变。它有一个片内 512 字节的数据存储器、4 个 8 位双态双向的 I/O 接口、一个扩展的 4 位接口 P4、

三个 16 位的定时/计数器、一个串行接口。

为了方便编程, W78E58B 内部的程序存储器允许程序被改编和电子读取。一旦编码确定, 使用者就可以保护这个编码。

W78E58B 具有两种节电模式, 即等待模式和掉电模式, 这两种模式都是通过软件进行控制的。等待模式关闭处理器的时钟但是允许外围操作继续。掉电模式使晶振处于最小的能量消耗, 内部始终可以随时停止, 任何情况都不会影响到处理器。

W78E58B 具有如下特点:

(1)开发容易周期短 由于该单片机采用指令集, 指令数目少, 易学易用。相对于其他结构的单片机可节省大量的开发时间。

(2)高速 系列单片机所具有的宽字节周期指令、哈佛双总线结构, 它的数据吞吐率可达 6 MIPS, 即每秒执行 600 万条指令。

(3)低功耗 它采用 CMOS 电路设计, 结合了诸多的节电特性, 使其功耗很低。100%的静态设计可进入休眠省电状态, 而不会影响激活后的正常运行。

(4)具有高达 32 k 的 FLASH/EEPROM 可方便的在线多次编程和调试, 特别适用于产品开发阶段使用, 也可以作为产品开发的终极产品。同时对于数据不是太大的系统来说, 可以避免外挂 EEPROM, 使得系统变得简单。

(5)可选振荡器 它允许用户选择振荡器工作方式。具有四种工作方式: 低成本 PC、标准晶体/谐振、高速晶体/谐振和低功耗省点低频振荡方式。

(5)强大的中断功能 根据要求可以选用多个不同数据的内部和外部中断源。中断可以全局和分别控制, 外围接口的中断优先级可以通过软件设置。本仪表采用 T0 的定时中断和 P0 口的电平变换产生中断, 完成涡街流量信号的测量和通过键盘修改参数。

4.3.2 显示模块的选择

基于单片机的智能测试仪表是目前大多数工业领域的主要应用产品。作为仪表的信息显示以及人机交互的界面, 液晶显示器件具有低压、低功耗、信息显示量大以及寿命长等特点。它的各向异性以及低弹性常数等

特性能使其具有丰富多彩的电光效应，带来美观的视觉效果，在一定范围内取代了传统的数码显示模式^[43]。

液晶显示器件工作电压低，仅 3-6 V；功耗极小，一般为 $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，同样的显示面积，其功耗比 LED 显示器件小几百倍。所以它特别适合与 CMOS 器件电路直接相配，广泛的应用于以电池供电为主体的便携式、手持式的低功耗型智能仪表中。并且液晶显示器件在工作时没有电磁发射，对环境的干扰小。液晶显示器已经成为当代高新技术产业、信息技术产业中最重要的信息处理手段之一。两者比较见表 4-2。

表 4-2 液晶显示与 LED 显示参数对比

Table.4-2 The comparison between LED and LCD

	LED	液晶显示
参数	1.5-2V 直流驱动，功耗为 1-10 mW/段，工作温度为-30-80 °c，响应速度大约为 10 μs ，亮度为 40-140 fL/mA段	1.5-3 V 交流驱动，功耗为 $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，工作温度为 0-50 °c 之间，响应速度为 200-300 mA。
特点	驱动电压低，功耗较小，响应快，寿命长，但是工作电流较大，显示单位图形小。	平板型结构，低压低功耗，不怕光冲刷，有存储功能及光输入、热输入功能，但是大面积显示难度大，夜间显示需光源，工作温度窄。
容量	大	很大
功耗	小	极小
厚度	不厚	薄

本测量系统的显示模块选用了香港精电公司的 MDL-6500 静态液晶显示器。它的基本特点是：

(1)字符发生器 ROM 可以显示 192 种字符(160 个 5×7 点阵字符和 32 个 5×10 点阵字符)，能够满足本测量系统的显示需要。

(2)具有 64 字节的自定义字符 RAM，可自定义 8 个 5×8 点阵字符和 32 个 5×11 点阵字符，具有 80 个字节 RAM。

(3)模块结构紧凑、轻巧、装配容易。

(4)低功耗、寿命长、可靠性高。

液晶显示是由于在显示像素上施加了电场的缘故，而这个电场则由显示像素前后两电极上的电位信号合成产生，在显示像素上建立直流电场是

非常容易的事，但是直流电场将导致液晶材料的化学反应和电极老化，从而迅速降低液晶的显示寿命，因此必须建立交流驱动电场，并且要求这个交流电场中的直流成分越小越好，通常小于 50 mV。在实际应用中，由于采用了数字电路驱动，所以这种交流电场是通过脉冲电压信号来建立的。

液晶显示的驱动就是用来调整施加在液晶显示器件电极上的电位信号的相位、峰值、频率等，建立驱动电场，以实现液晶显示器件的显示效果。液晶显示的驱动方式有许多种，常见的有静态驱动和动态驱动。

静态驱动是获得最佳显示质量的最基本的方法，它适用于笔段型液晶显示器件的驱动。静态驱动电极的每个显示段都是单独引出。所有各位显示的段全都公用一个背电极。振荡器的脉冲信号经分频后直接施加在液晶显示器件的背电极 BP 上，而段电极的脉冲信号是由显示选择信号 A 与时序脉冲通过逻辑异或合成产生。而段型动态驱动电极连接排布有多种形式。它的每位七段将组合成几部分引出，而背电极则由与段的组合完全不同的组合引出。

CD4054 是专用的四段 LCD 显示驱动电路。所有的输入控制端 ST 接到一起，对 CD4056 写入不同的数据，同时给 ST 端一个由高到低的脉冲信号，就把数据锁存在 CD4054 中，可以驱动 LCD 字符的任意一段笔划。CD4054 由数据输入端 A、B、C、D 输入 BCD 码，通过译码电路转换成七段字型数据进入显示驱动电路。在驱动信号输入端 DF 的脉冲驱动下输出各段的显示驱动波形和背电极 BP 的驱动波形，为液晶显示器件提供了交流驱动波形。

图 4-15 给出了 4 位液晶静态显示的电路图。背极 BP 由 4047 构成的振荡电路提供方波信号。4056 是 BCD 码七段译码/驱动器，4514 是 4-16 译码器，高电平输出有效，D 端接地。4 个 4056 由 4514 构成的 3-8 译码器轮流选通。单片机 P1.4~1.6 引脚分别与 A、B、C 相连，形成 3-8 译码，P1.7 与 IBT 输出允许端相连，以控制有效输出。CD4054 四进四出，作为小数点的驱动。4514 输出的高电平选通信号控制 4056，4054 进行数据存储，它们所需要的方波信号由 4047 振荡产生。为了与液晶的低功耗相适应，电路中全部采用 CMOS 件。

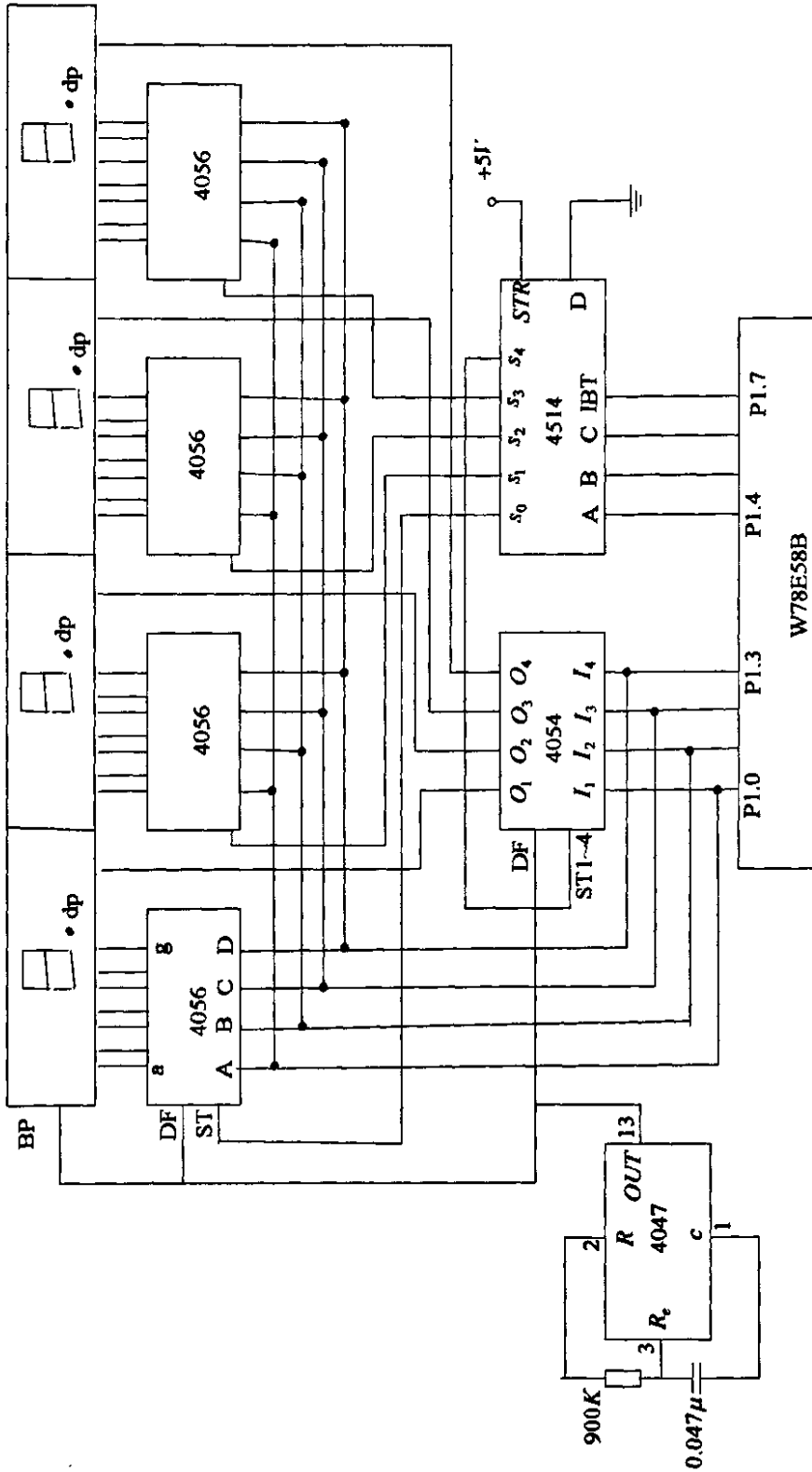


图4-15 4位液晶显示电路

Fig.4-15 4 LCD circuit

4.3.3 系统的掉电保护

系统掉电保护电路包括电源监测及 RAM 掉电数据保护。当电源监测电路到最小操作电压的一个超前电压值，立即向单片机发出中断请求 INT0。在这个电压下降到最小操作电压前，依靠大电容放电的供电延时，单片机产生中断响应，将必须保护的数据及系统运行状态的重要信息保护到带有后备电池的 CMOS-RAM 中，然后由单片机发出允许停机信号^[43]。

RAM 掉电保护电路如图 4-16 所示。6264 是 CMOS 静态随机存储器，其维持电流小于等于 $10\ \mu\text{A}$ ，可用小容量钮扣电池长期维持 RAM 数据不丢失。正常运行时，6264 由 +5 V 主电源通过 D_2 供电。而在断电状态下，由备份电池通过 D_1 进行供电。6264 的片选端加了一个上拉电阻，使主电源断电时 6264 处于未选中状态。

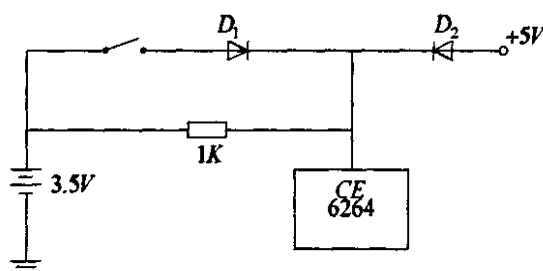


图 4-16 掉电保护电路图

Fig.4-16 Power-fail protection circuit

4.4 补偿电路

由于环境的温度和压力对流体的密度产生影响，而密度又与流体的流量有直接的联系，所以为了进行更精确地测量，需要进行温度和压力的补偿^[44]。带温度补偿电路的传感器物理构造图如图 4-17 所示。

4.4.1 温度补偿

电阻式温度检测器常用铜(Cu50)、铂(Pt100)和镍(Ni1000)。本设计采用工程中最常见的 PT100 对温度进行补偿。国际温标 ITS-90 还规定，将具有

特殊构造的铂电阻作为 13.5033 K—961.78 °C 标准温度计来使用。

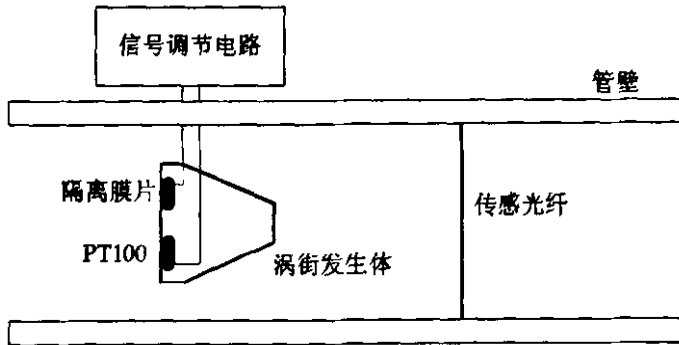


图 4-17 带温度和压力补偿的传感器物理构造图

Fig.4-17 Physics construction of the sensor with temperature and pressure compensation

在-200-0 °C 范围内，铂电阻与温度的关系为

$$R(t) = R_0 [1 + at + bt^2 + c(t-100)t^3] \quad (4-1)$$

在 0-850 °C 范围内，铂电阻与温度的关系为

$$R(t) = R_0 (1 + at + bt^2) \quad (4-2)$$

式(4-2)中的参数为： $a = 3.90802 \times 10^{-3}$, $b = -0.5802 \times 10^{-6}$, $c = -4.2735 \times 10^{12}$,

$$R_{(100^\circ\text{C})}/R_{(10^\circ\text{C})} = 1.38500。$$

式(4-1)和式(4-2)并不能立即求出温度值，需要解类似“逆函数”的性质，因此使用牛顿迭代法进行求解。

PT100 的 0.385 %/°C 的低温度系数要求良好的信号调理电路，这对两线制 RTD 特别严格^[44]，当引接线距离较长时，引线电阻可达到几欧甚至几十欧，带来明显的误差。

图 4-18 中给出了三线连接方式。这种方式能实现“完全补偿”。同样，为了获得高精度，所有的器件要求都是“低噪高精”的。

4.4.2 压力补偿

压力补偿中，采用压阻式压力传感器。压阻式压力传感器利用单晶硅的压阻效应制成，它采用集成电路工艺，结构简单，测压上限可达 60 MPa，具有工作可靠、耐腐蚀、抗干扰能力强等特点^[45]。在旋涡发生体的正面即

来流侧的上部装上压力变送器的不锈钢隔离膜片，以此用来测量静压力；不锈钢膜片压力通过硅油传递到压力传感芯片上，从而得到成比例的线性输出^[44]。

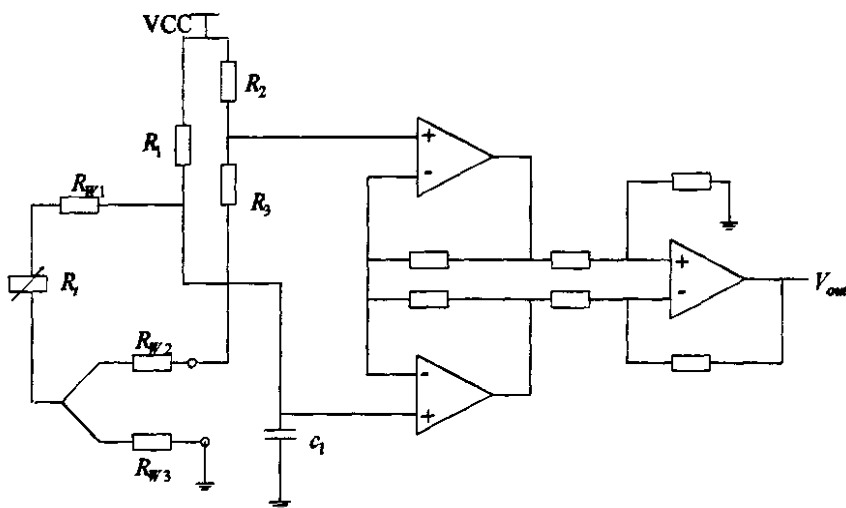


图 4-18 PT100 的三线连接方式

Fig.4-18 Three connection way of PT100

由于该压力变送器为压阻式，因此需要采用恒压源或者恒流源供电。但是恒压源与恒流源相比存在环境温度影响不能消除的问题，因此采用如图 4-19 的恒流源供电。

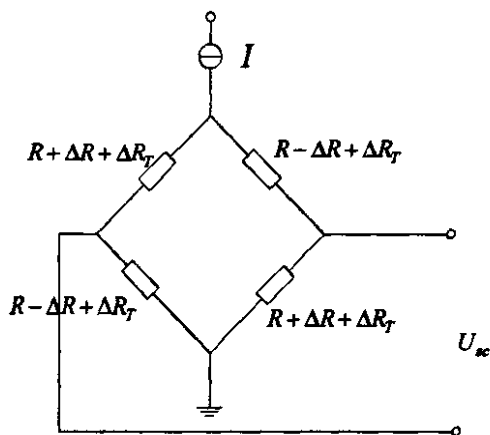


图 4-19 恒流源供电的压阻式压力传感器

Fig.4-17 Piezoresistive pressure sensor supplied by constant current power

为了满足系统低功耗的要求，使用了间歇供电的方案，即在要进行 A/D

采样时才给压力传感器和恒流源供电。压力传感器的输出信号通过减法电路得到压力，经放大后供 A/D 采样^[46]。

4.5 软件设计

本着降低流量计硬件的复杂性和电路功耗的原则，本仪表的软件设计并未追求多功能，而是完成了满足流量计必要的测量功能方面的设计，如瞬时流量和累积流量的测量、显示以及高低限报警，参数的输入和修改等。编程中采用从整体到局部，最后到细节的自上向下的设计方法。各个功能程序实现模块化、子程序化。整体结构上看，本测量系统的软件部分主要分为控制模块和计算模块两部分^[47]。控制模块包括中断服务子程序和与外围器件相关的子程序，计算模块包括流量计算和报警处理子程序。具体来说，本测量系统的软件由主程序、定时器中断服务子程序、键盘中断服务子程序和其它辅助程序组成。测量系统软件整体结构如图 4-20 所示。

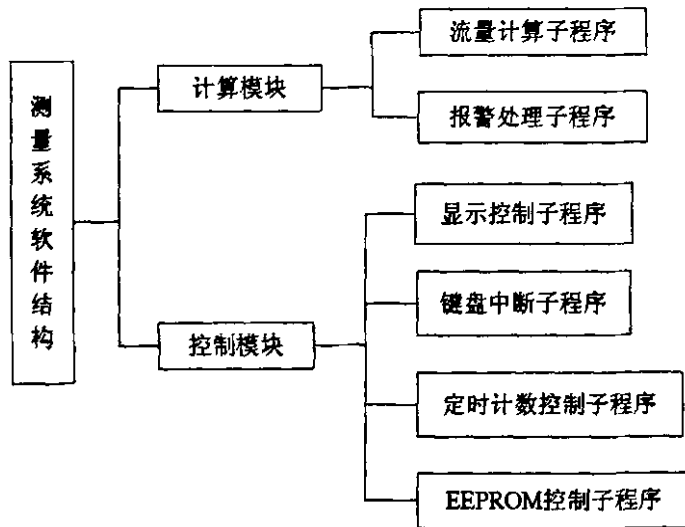


图 4-20 软件整体结构图

Fig.4-20 Overall structure of the software

4.5.1 控制模块

4.5.1.1 主程序 在主程序中，主要完成对中断寄存器、键盘接口、寄存器和自定义寄存器的初始化^[48]。在完成系统初始化之后，存储器接口、定时

器/计数器寄进入等待状态，等待定时中断的发生。框图如图 4-21 所示。

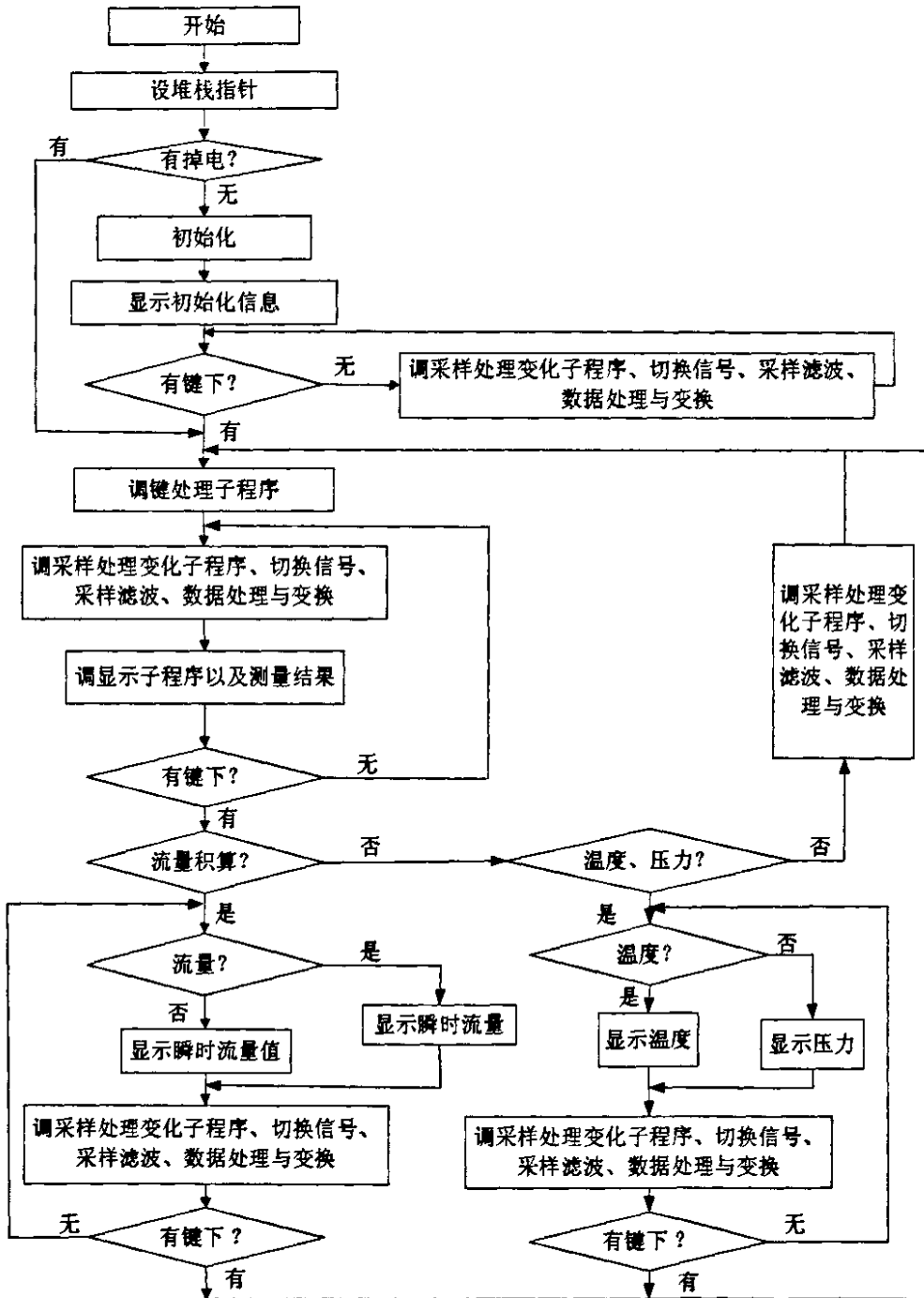


图 4-21 主程序流程图

Fig.4-21 The flowchart of the main programme

4.5.1.2 定时中断服务子程序 定时中断服务子程序是整个软件的核心程序。仪表的主要功能如瞬时流量、累积流量的计算和显示，流量越限与否的判断等都是通过它来实现的。定时中断服务子程序框图如图 4-22 所示。

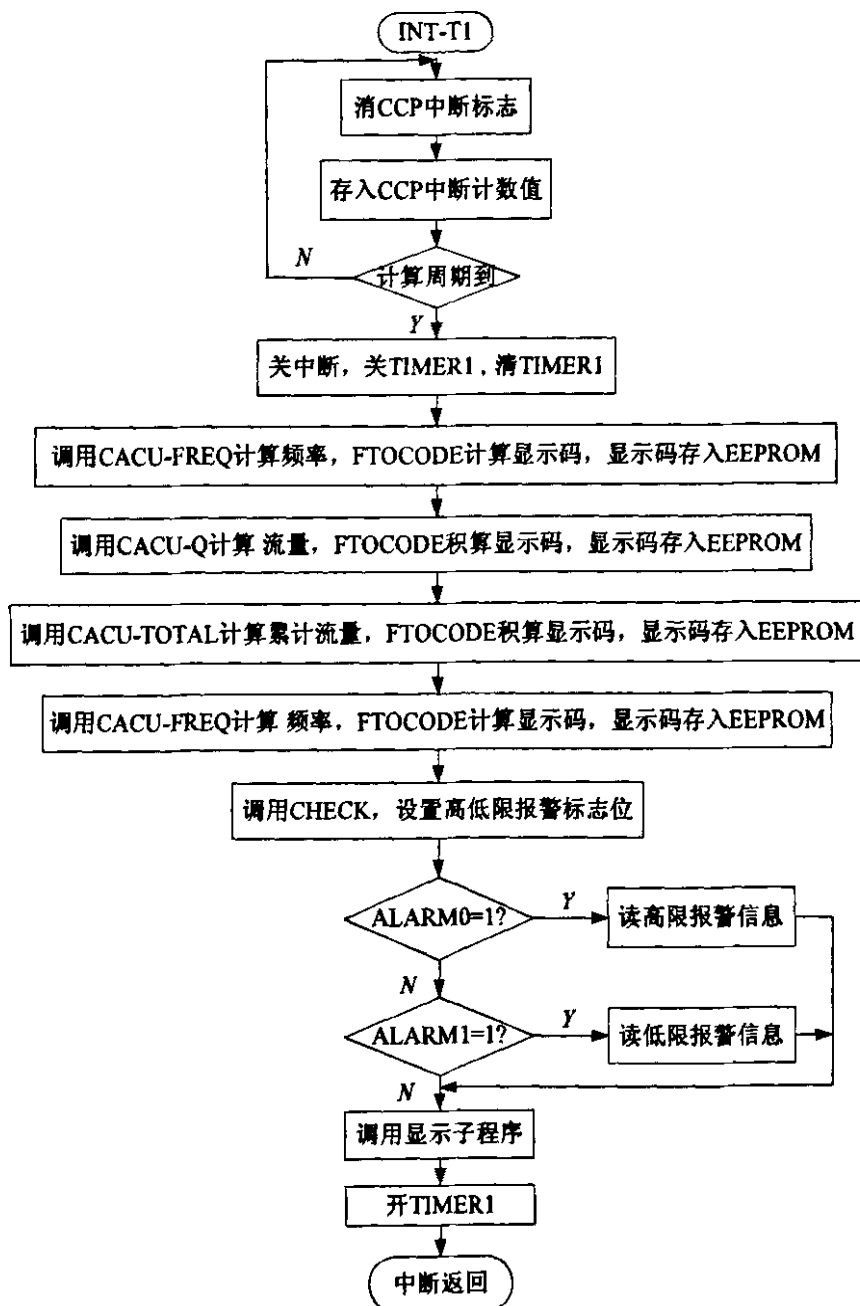


图 4-22 定时中断服务子程序框图

Fig.4-22 The flow chart of fixed time interrupts subroutine

4.5.1.3 键盘中断子程序 在单片机应用系统中为了控制系统的工作状态以及向系统中输入数据，应用系统应该设有键盘来实现人机对话。合理的键盘设计应该做到按键数目尽可能少，操作尽可能简便。而这两者是相互制约的。减少按键数目必然要使每个按键完成的任务增加，按键功能复杂会给操作者带来一定的不便。反之，增加按键数目的局限则使编程复杂、系统体积增大、故障率提高。本设计在综合考虑了这两种因素的基础上，本着减小板面美观仪表的原则，设计了四键键盘。四个操作键分别定义为 ENTER 键、TAB 键、CHANGE 键和 PAGE 键。以上四键所完成的操作是这样的。本仪表正常工作时处于测量状态，液晶显示器显示基本的测量信息。由于液晶显示屏的尺寸限制，测量信息一屏显示不下，故设计为“当前频率和瞬时流量”及“当前流速和累积流量”两页。PAGE 键用于这两页的切换。按下 ENTER 键进入高低限报等值参数修改状态。此状态下，TAB 键用于切换要更改的数值的位置，CHANGE 键更改当前位的值。其值的变化从当前值开始每次加 1，当数值加到 9 时，继续按 CHANGE 键，该位变为小数点“.”，再按则返回“0”。按 ENTER 键便将设定好的参数值存入 EEPROM。

整个键盘中断服务子程序全部采用中断方式，程序结构为嵌套方式，几层菜单处理子程序均采用同一入口和出口。寄存器 KEY 反映当前系统处于哪种状态，KEY0=1 表示仪表处于修改状态，设置报警值。KEY0=0 表示仪表处于测量状态，显示当前的流量、流速、频率等基本参数值。每次进入按键中断后，程序先检查 KEY 值的第 0 位，根据当前仪表的状态赋予不同的处理程序。键盘中断服务子程序入口程序框图如图 4-23 所示。

由于按键本身的机械特性，其在闭合及断开瞬间均有抖动过程，会出现一系列的负脉冲，影响其正常工作。因此，必须去除抖动影响。通常去抖的措施有硬、软件两种。本设计考虑到简化硬件电路采用软件方法，即在检测到有键按下时，执行一个延时程序后再确认该键电平是否仍保持闭合状态电平，若保持闭合状态电平则确认为真正键按下状态，从而消除了抖动影响。经过消抖延时后，检查 KEY0 的值，如果处于修改状态，则转向 SETALARM 对报警值进行修改，否则检查 ENTER 键是否按下，若按

下, 则从 EEPROM 中读取菜单修改的显示代码并显示, 同时置位 KEY0, 使系统进入修改状态, 打开中断, 进入延时等待状态。进入延时等待后, 首先打开中断, 便可再次响应键盘输入。若 ENTER 键没有按下, 则进行正常显示, 响应 PAGE 键进行翻页。

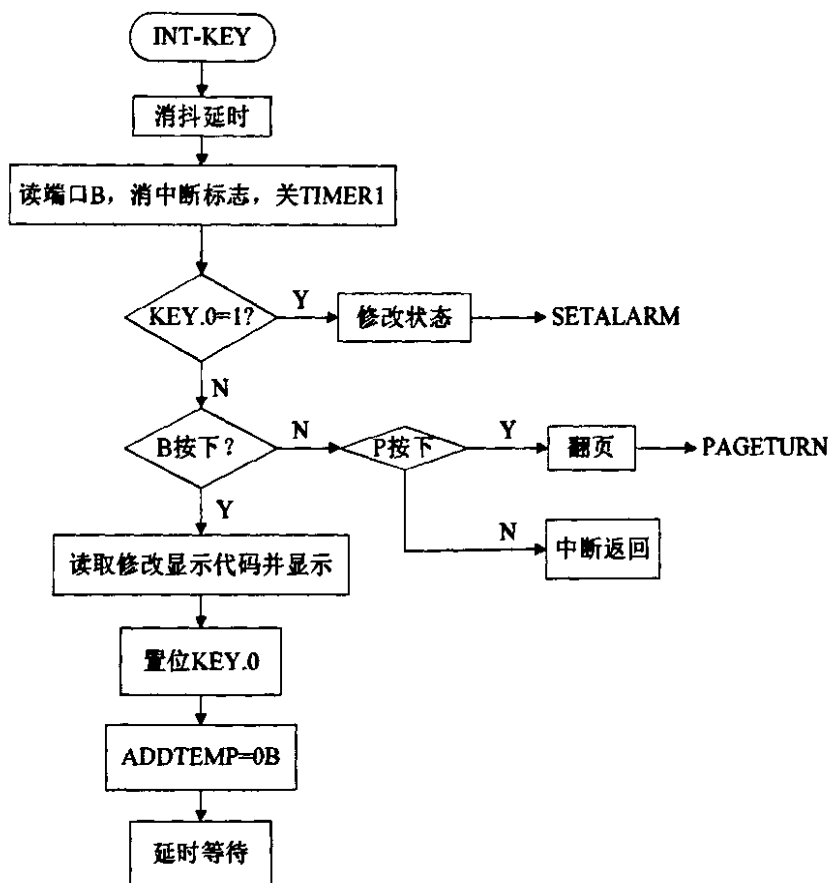


图4-23 键盘中断服务子程序入口程序框图

Fig.4-23 The flow chart of keyboard interrupt service subroutine

参数修改状态的入口地址是 SETALARM, 用于修改报警值并存入 EEPROM。寄存器 COUNT-BIT 存放当前光标闪烁的位置, 每次 TAB 键按下, 程序根据当前的显示端点值决定光标闪烁的下一个位置, CHANGE 键依次改变光标所在位数值的大小, 按 ENTER 键把修改好的参数数据写入 EEPROM。

4.5.1.4 液晶显示模块子程序 液晶显示模块的显示主程序 DISPLAY 主要完成将显示 RAM 中的内容送到液晶显示模块中进行显示的功能^[50]。显示

RAM的首地址放在地址指针寄存器FSR中，要显示的位置置于DDRAM寄存器中。DISPLAY子程序调用写显示代码子程序，将DDRAM寄存器中的内容写入，这样就先确定了待显示内容在液晶显示屏上的位置，然后顺序送入以FSR为首地址的显示RAM中的数据，由COUNT-LCD控制每行显示的数据位数。程序流程图如图4-24所示。

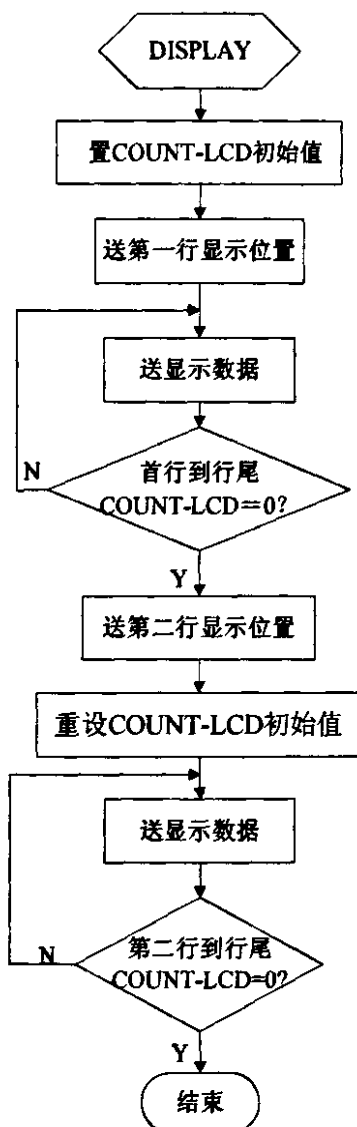


图 4-24 液晶显示主程序流程图

Fig.4-24 The floe chart of the LCD

液晶显示模块除显示主程序外还有不可少的初始化子程序，用于在程序上电时调为保证液晶模块正常使用送入相关命令字。另外，还包括读显

示数据子程序、读显示模块状态子程序、写显示数据子程序、写显示代码子程序等。

4.5.2 计算模块

由于整形数的范围太窄，所以本设计的运算采用浮点数。浮点运算程序是标准接口程序。浮点运算程序库包括整形数和浮点数的相互转换程序，加、减、乘、除程序以及 BCD 码和二进制数的相互转换程序。

4.5.2.1 流量计算子程序 本设计需要利用频率计算出瞬时流量、流速和累积流量等一系列的参数。

瞬时流量和流速的计算是用所得频率分别乘以一个系数。首先将频率值浮点化，用其乘以浮点化的系数，得到瞬时流量和流速的浮点值。

累积流量的计算是每次计算完瞬时流量后，调用累积流量计算子程序，将累积流量乘以时间系数，计算中断间隙流过的流量值，再与原来的累积流量相加。每隔一段时期就把结果以三字节浮点数的形式存入 EEPROM 中去。

4.5.2.2 报警检测处理子程序 报警处理子程序用于流量超过高限或低于低限时进行报警，液晶显示屏显示报警信息。流量高低限的值通过参数修改子程序以 BCD 码的形式存入 EEPROM 中。每次上电时程序读取高低限报警值，并通过调用标准浮点运算程序库中数据转换子程序将其转换成浮点数存入相应的数据存储器之中，然后运行报警检测处理程序。流程图如图 4-25 所示。

4.6 低功耗设计

设计一个系统，功率消耗是一个重要的元素。在本课题中，涡街流量计系统的低功耗设计是一个重点。低功耗设计具有重要的意义^[49]：

(1)便于电池供电 过去 220 V、380 V 的电源随使用，但是现在强调绿色环保手提式产品越来越多，目前一些工业仪表已经改用电池供电。这种仪表有如下优点：体积小、重量轻、便于携带、不怕停电；电池供电，避免了电源转换系统的功耗，也避免了电池转换器不稳定对系统造成的不良

影响。

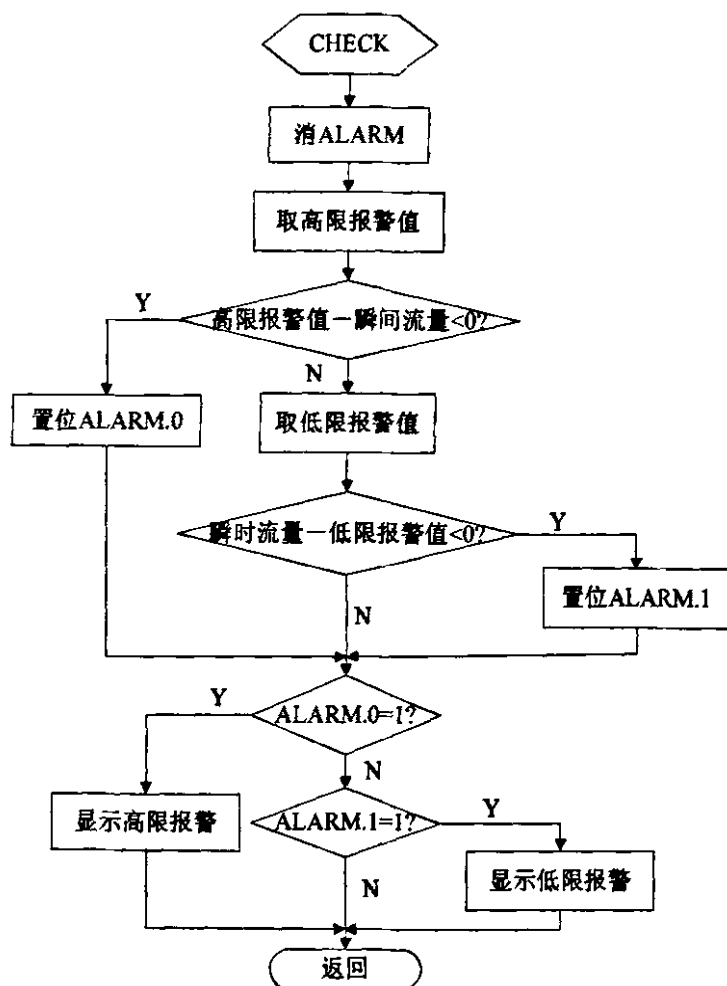


图4-25 报警检测处理子程序流程图

Fig.4-25 The flow chart of alarm subroutine

(2)简化设计,提高可靠性 低功耗省去了很多难度较大的工作,比如数据采集时对精度有较高的要求,但是并不是买一个高分辨率的A/D转换器就能解决的问题。这是电路设计问题,主要包括原理设计和印制电路板设计。如果采用低功耗设计,并改用电池供电,就不会出现这个问题。有时设计的仪表在实验室连续工作都没有问题,但是到了现场,由于电源间存在串扰而影响正常工作。如果采用低功耗设计,用电池供电,就可以巧妙的回避这个问题。

(3)节能环保的需要 低功耗设计可以延长电池的寿命,大大减少了废

旧电池对环境的污染。

可以看出采用低功耗设计无论在经济方面还是仪表自身性能方面都有着重要的意义。本设计在低功耗设计方面主要通过以下方面实现：

(1)单片机的选择 首先，涡街流量计的输出信号是频率信号，不需要 A/D 转换电路，与输出为电流或者电压信号的传感器相比，电路结构简单，功耗较小。其次，系统采用的单片机为 W78E58B，它的内部有上电复位电路等，不需要增加片外支持的功能元器件。

(2)降低单片机的时钟频率 单片机的工作频率和功耗的关系也很大，频率越高，功耗越大^[50]。在许多的低速晶振实现低功耗非常有效。

(3)选用低功耗器件 CMOS 集成器件的最大优点就是低功耗，在静态时功耗几乎为零。所以 CMOS 集成器件从一开始出现，就被低功耗仪表所青睐。设计低功耗电路，大量采用低功耗的 CMOS 集成器件是降低传感器功耗的主要设计原则，也是降低电路功耗的最主要和最根本的方法。在选用流量计测量系统各个组成部分的器件时，自始至终贯穿了这个主要的原则。同时在显示上，选用了低功耗的液晶显示，使得在显示上的功耗比同面积传统的 LED 显示降低了几百倍^[51]。

(4)I/O 引脚状态的正确设置 将所有没有使用的 I/O 引脚状态设置为输出引脚，且输出高电平或低电平^[52]。因而免除了由于浮动输入而产生的开关电流。

4.7 本章小结

在完成了课题所需的理论分析和相关计算之后，本章阐述了流量计机械结构、硬件电路以及采用 VB 语言编制的软件等内容。其中本章重点介绍了硬件电路的设计和各种器件的选取，并在流量积算仪的设计、温度和压力补偿以及低功耗上进行了详细的阐述。

第 5 章 实验以及误差分析

5.1 实验和测量结果

信号处理电路通过上章所示的放大、滤波、整形电路等环节后进入单片机系统。本系统在研究中采用模拟试验的方法，用信号发生器作为信号源，采用由 Tekrtonix 公司生产的 AFG320 型双通道可编程任意函数发生器来模拟光电接收器产生的正弦信号。分别设置信号不同的频率和幅值，通过单片机显示输出频率的测量结果^[53]。进行模拟试验的实验台如图 5-1 所示。

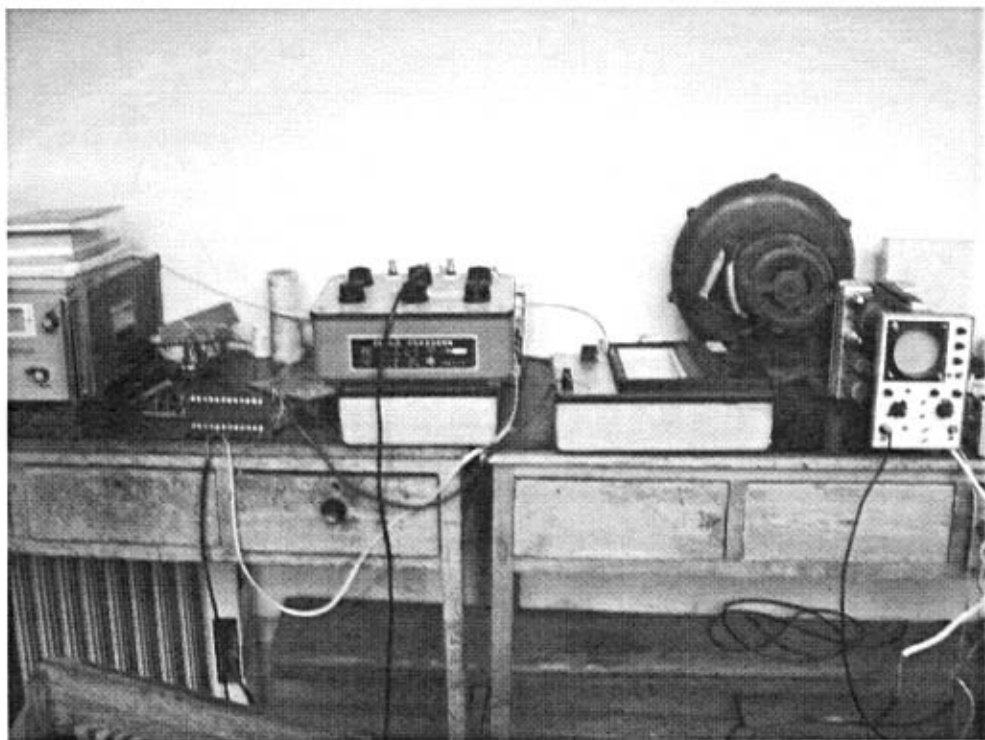


图 5-1 实验台

Fig.5-1 Picture of the laboratory bench

在试验之前，为了确保电路设计的合理，通过 PSPICE 软件对整个电

路进行了仿真，电路仿真结果如图 5-2 所示。

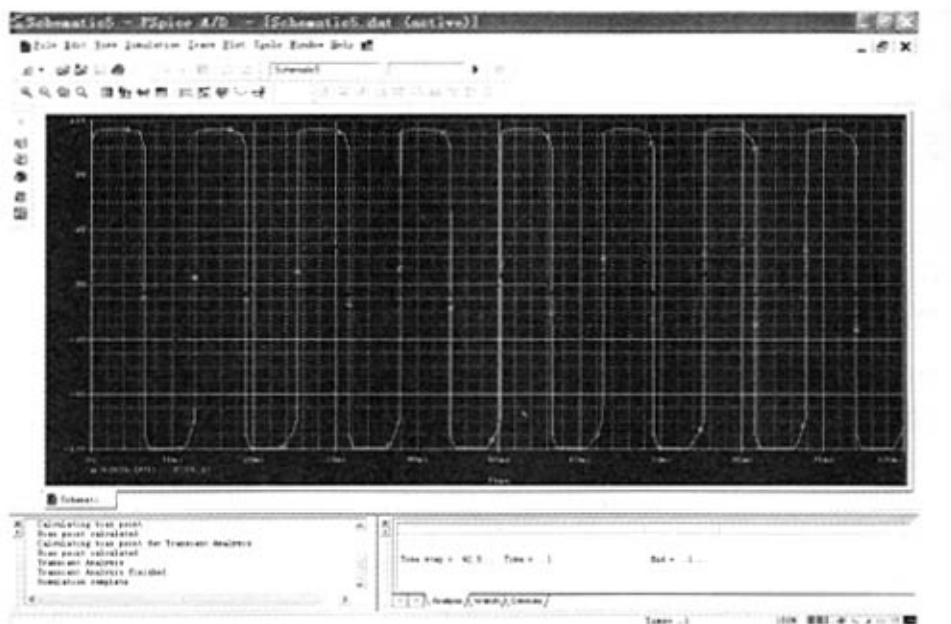


图 5-2 理想信号仿真图

Fig.5-2 Simulation of the ideal signal

试验分析表明，在大约 900 Hz-3000 Hz 的范围内，信号频率测量精度基本稳定，且对 AFG 信号源信号幅值变化测量误差基本恒定。此时通过软件设置，改变时间间隔 T 就能够使电路整体频率测量精度达到满意的结果。当 $T = 0.13$ s 时，针对每个频率测量 200 个点后取均值，如下式所示

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{200} \sum_{j=1}^{200} \varepsilon_j \quad (5-1)$$

式中 $\varepsilon_j = (f_c - f_j) / f_j$ ； f_c 为实测频率； f_j 为各个被测频率。绘制的总体偏差趋势如图 5-3 所示。随着频率的增加，间隔时间内通过的频率信号个数越多，测量误差越小。当 $T = 0.52$ s 时，频率误差如图 5-4 所示。可见时间间隔越大，被测频率越高，测量的误差越小。

正常流速的实验结束后，本文通过系统仿真的方法，对流量计难以达到测量精度的低频信号进行了仿真，并通过数字信号处理的方法对信号进行了处理。以 20 Hz 为例，中间夹杂有频率为 2 Hz 的低频摆动噪声^[55]，如

图 5-5 所示。

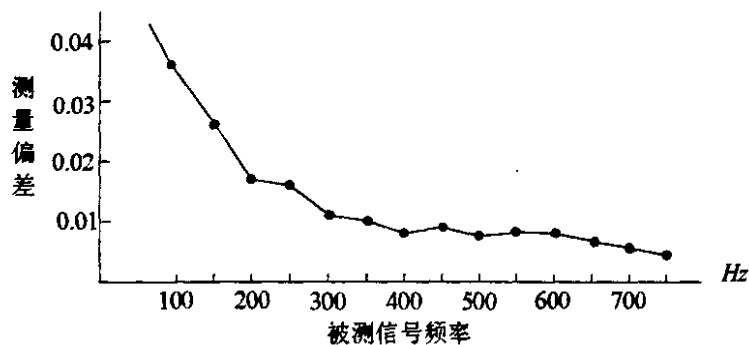


图 5-3 $T = 0.13$ s 时相对测量误差

Fig.5-3 Relative measuring errors with $T = 0.13$ s

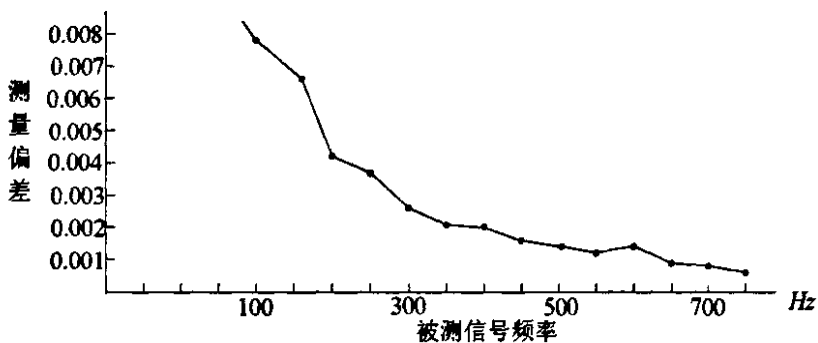


图 5-4 $T = 0.52$ s 时相对测量误差

Fig.5-4 Relative measuring errors with $T = 0.52$ s

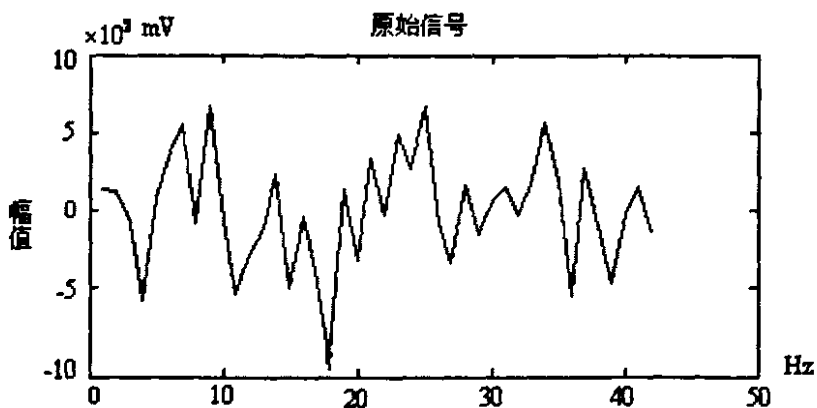


图 5-5 原始信号

Fig.5-5 Original signal

并通过快速傅立叶变化谱分析^[54]的方法的得到了信号和噪声的图谱, 如图 5-6 所示。

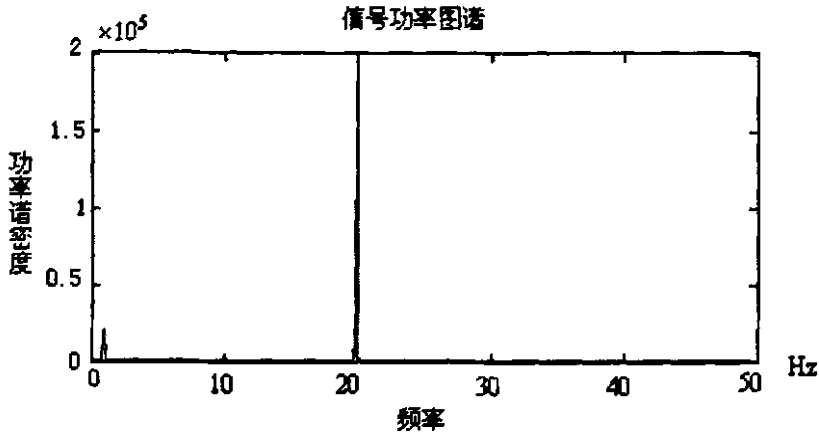


图 5-6 谱分析方法得到的信号和噪声的图谱

Fig.5-6 The signal and noise atlas obtained through the spectrum analysis method

同时通过 MATLAB 工具箱中的小波分析工具箱, 采用软阈值滤波的方法^[56]成功的提取出该原始信号的频谱, 如图 5-7 所示。为日后搭建试验平台提供了可行性理论依据。

5.2 误差分析

5.2.1 测量原理性误差

测量原理性误差是指由于测量原理本身引起的误差。主要有一下四种:

(1)量子化误差 量子化误差在整个的测量误差中, 表现最为明显直接。在进行频率测量时, 计数器所记下的是在一定时间 τ 内所输入的脉冲数 N_x 。即待测频率 $f_x = N_x/\tau$ 。由上式可知 f 的测量精确度主要取决于两个方面, 即标准时间和脉冲计数的精确度。

对于标准时间信号, 已知它是由晶振产生的晶振脉冲 f_0 经数级十进制分频后得到的。其精确度, 主要是由石英晶体振荡器频率的稳定度所决定。而晶振引起的误差是很微小的。测频时, 主要应考虑的是计数器记得的脉冲准不准的问题。单片机在计数时, 对高低电平状态尤其是电平转换时的

判断失误可能会导致定时计数误差。这种误差主要来自 ± 1 个数字误差，或叫做“量子化误差”的影响。

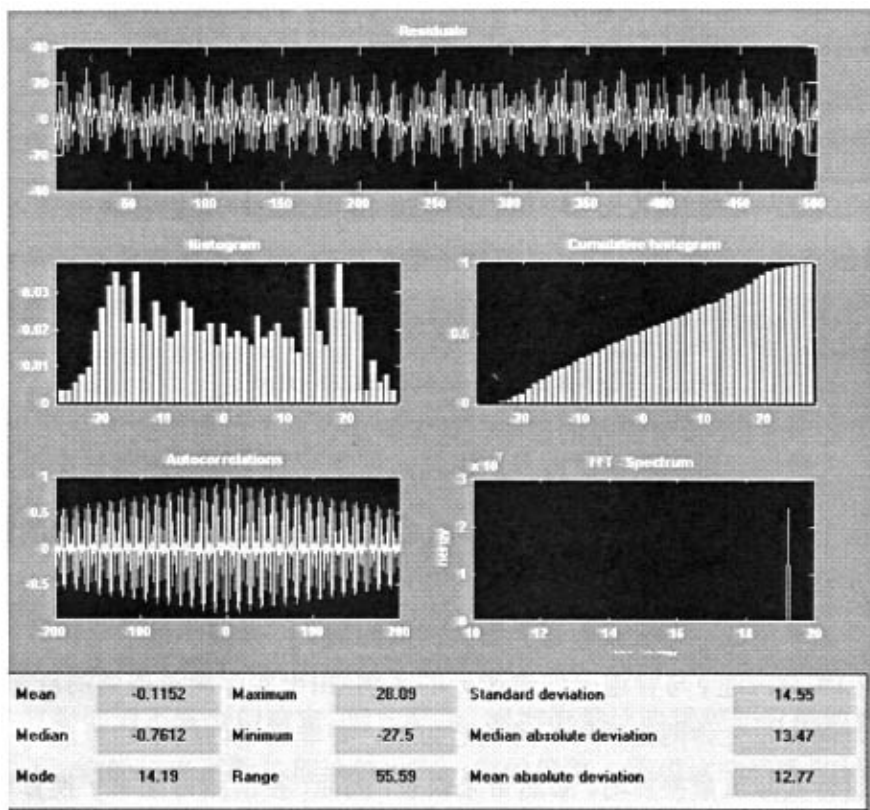


图 5-7 小波分析工具箱得到的图谱

Fig.5-7 The signal and noise atlas obtained by the wavelet stoolbox

“量子化误差”是由于加到计数器门控电路的门控输出信号 τ 的起始时刻 t_0 与频率为 f_x 的被测信号的相位是随机的、无法同步所引起的,如图 5-8 所示。

这样,在同样的时间 τ 内,由于第一个计数脉冲出现的时间不同,通过计数门的脉冲数将可能有一个计数脉冲之差(在所举例中,一种情况为 4 个,另一种情况为 5 个),使计数结果有 ± 1 个数字的不确定性误差。

易知,由 ΔN_x 引起的 $\Delta f_x = \Delta N_x / \tau$, 所以引起的频率测量误差等于

$$\frac{\Delta f_x}{f_x} = \frac{\Delta N_x / \tau}{N_x / \tau} = \frac{\Delta N_x}{N_x} = \frac{\Delta N_x}{f_x \tau} \quad (5-1)$$

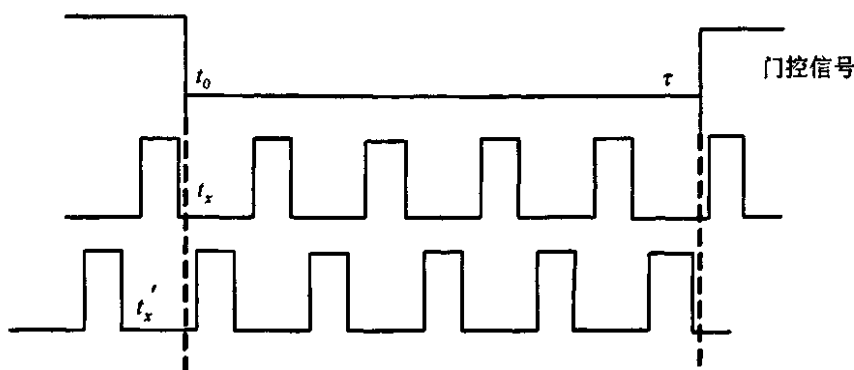


图5-8 量子化误差产生的原因

Fig.5-8 The cause of quantum error

考虑到 ± 1 个数字误差的影响，频率测量误差可以用下式表示

$$\Delta f_x / f_x = \pm 1 / f_x \tau \quad (5-2)$$

由上式可知， τ 越大，被测频率越高，则由 ± 1 个数字误差引起的频率测量误差越小。量子化误差，测量过程中不可避免，对于本研究，由于被测信号频率很低，可以采取适当增大时间间隔 τ ，来减小量子化误差。

(2)实测流速 v 与管道平均流速 v_0 的区别 由于实际测量得到的流速实际上是涡街发生体两侧瞬时流速的近似值，并非管道内的平均流速 v_0 ，因而在进行实际流量换算时，必然带来误差。因而，在由测得频率 f 换算得 v' 后，还需进行系数补偿，来减小误差。

(3) S_f 的弱线性 理论上在进行频率测量以及流量计算时，总假定 S_f 的恒定性。然而， S_f 随 R_f 在整个量程内并不是一个绝对常数，而是发生一定弱线性微变^[57]。

通过前面的分析可以看出，仪表系数 K 决定了流量 q_v 和频率 f 之间的关系。只有当 K 为常数时，两者的关系才是线性的。对于具体口径的仪表， K 只与 S_f 有关，即 $K \propto S_f$ 。实验表明，在较宽的流速范围内， S_f 基本上为常数。测量计算的简单化，必然带来误差。

表5-1给出了雷诺数和涡街之间的关系。可以通过初测，得到流速的粗值，然后换算得到 R_f 的粗值，从而调用更为逼近的 S_f 的值，从而得到更为精确的流速值。

表5-1 雷诺数与涡街的关系

Table5-1 The relationship between R_e and the vortex-shedding

R_e	流动状态	涡街	$S_i \cdot K$	q_v 与 S_i 的关系
$R_e \geq 2 \times 10^4$	紊流	稳定	常数	线性
$2300 < R_e < 2 \times 10^4$	过渡区	不稳定	非常数	非线性
$R_e \leq 2300$	层流	不产生	不存在	不成立

(4) 传感器的脉冲检测误差 在实际应用中，一次仪表传感器检测到的脉冲是掺杂着噪声的方波，在对其整形时噪声的存在可能会对脉冲的状态判断产生影响，引起误差。采取以下措施可以减少杂波干扰：屏蔽信号传输线路，使零电平点良好接地，在线路两端加隔直电阻；令传感器模拟地良好接地，以增大阶梯波的幅值来削弱杂波的影响；使二次仪表各器件与电路板良好接触以减小接触电阻，共用电压驱动端和地端，以避免产生回路而造成信号串扰。

5.2.2 其他误差来源

尽管从理论上讲，涡街流量计的量程比可达100:1，它的仪表系数可根据计算得到而不需专门检定。但实际上，涡街流量计的量程比只能做到10:1或20:1，它的仪表系数与理论值也有一定的偏差。造成这些现象的原因还有以下几点：

(1) 电磁干扰 尽管在绪论中将抗电磁干扰作为该流量计的优点来强调，但外界电磁场的干扰总是不能完全避免，特别当工作时工频干扰信号与被测信号频率接近，往往容易造成干扰误差。因为在现场安装使用时，为了走线规范，往往通过电缆桥架或保护管，这样，就可能使交流电源与信号线一起平行走线，干扰信号就会耦合到信号输出线上。所以应增大电源线与信号线之间距离，减少分布电容，以及合理选择信号线接地点，并在仪表内部采用电磁屏蔽以减小外部电磁干扰，就可避免干扰电压对涡街流量计的影响。此外，工作时，信号传输线应尽可能远离变压器、大功率用电设备等干扰源，而且应对信号传输线屏蔽。另外，信号传输线屏蔽层应正确接地，以保证将干扰衰减至最小。

(2)温度对测量偏差的影响 温度的变化会导致流量计零件尺寸的变化,比如壳体以及涡街发生体的热胀冷缩,从而给测量带来偏差。此外,还有可能引起光源输出功率变化,测量电路温漂,这些因素都有可能引起频率测量误差。可通过进行温度系数补偿来减小其影响。

(3)被测流体引起的误差 实际情况中,很难保证流体如理论中那么纯净,可能含有固体颗粒或者油污等杂质。被测流体成分多样,流动状态复杂,对频率测量的精确测量都是较大的考验。毕竟卡门涡街在两态三相流中,对于高粘度低雷诺数流体的应用并不成熟。试验时,为了保证其测量准确度,应考虑加装过滤整流器,对被测流体稳流,以获得充分的紊流场。

(4)管壁振动的影响 由于实际工程生产中,外界的意外情况会使管道产生偶尔的振动。由于振动引起的涡街信号将与待测的涡街信号叠加在一起,使得测量结果偏高^[58]。可以在流量计上下游 $2D$ 处分别设置防震座并加防震垫来减小振动。

5.3 本章小结

本章对前一章设计完成的测量系统性能进行了实验分析,对电路输入正弦信号,通过设计系统进行测量。同时讨论了系统的测量误差情况,最后通过原理和外在两方面的原因对系统进行了误差分析。

结 论

涡街流量计因为具有结构简单、安装方便、测量范围大、压损低、价格合理、维护量小等优点,使得它在工业中的应用范围广泛。不过使用过程中有电磁干扰等问题存在。光纤涡街流量计利用光纤本身的特性,不但可以很好的抗干扰,而且由于光纤与通信系统的紧密联系,为进一步的改进提供了良好的基础。

光纤涡街流量计是采用光纤作为敏感元件来测量旋涡分离频率的一种涡街流量计。它是依据卡门涡街理论和光纤损耗原理来进行工作的。为了使涡街流量计具有更好的抗振动干扰和抗流场干扰的能力,对旋涡检测方法、仪表结构与尺寸、硬件电路和软件设计等诸多因素进行了综合考虑。结果表明,光纤涡街流量计抵抗干扰的能力提高,仪表常数稳定,准确度较高,能够满足工业测量的要求。它的测量电路采用低功耗电路设计技术,可以采用比较简便的锂电池进行供电,使其能够适应易燃易爆、无人值守等更加广泛的应用场合。尽管目前对其研究水平还处于实验阶段,但是随着研究认识的不断深入,其事必将在气体以及流体流速和流量测量方面有所显现。

本文基于对光纤涡街流量计的诸多优点、卡门涡街以及流量测量原理分析研究之上,并根据国内外在该领域的最新研究现状,作了以下的研究:

(1)在理论上,将晶体物理学以及光波动的相关理论,运用到对光纤涡街流量计光频率调制原理的分析工作中去。估算了待测频率的范围,并对传感光纤的力学安全性进行了校验。

(2)在光纤和其他光纤元件的耦合设计中,为了提高耦合效率,在光源和光纤端面之间采用圆柱形蓝宝石透镜,这样可以提高光纤数值孔径,增加进入光束的数量。

(3)完成了光纤涡街流量计机械机构、硬件电路和流量积算仪的设计,通过VB软件界面对信号处理电路进行了频率测量精度的分析和测试。在对低流速流体流量的测量上,采用系统仿真的技术,分别用快速傅立叶变化

和小波分析工具箱两种方法成功的提取出信号的图谱。虽然由于时间和工作条件的限制，本人没有进行现场调试，但是设计了一套用于模拟现场工作环境的试验模型。建立了光纤涡街流量计的振动模型，并且进一步创建了光纤涡街流量计的频率测量系统模型。

(4)对于流量计的量程下限的扩展，本文在管道的结构上进行了改进，采用了具有整流功能的金属丝网，有效的扩展了光纤涡街流量计量程的下限。

(5)综合地分析了影响光纤涡街流量测量装置的误差因素，并相应地提出了解决的思路。

在进行总结的同时，作者也归纳了几点设计工作中需要改进的不足之处。

首先，在硬件调试的过程中发现，当对小于0.2 V电压进行的A/D转换时产生的误差比较大。造成这种现象应该有两个原因，一是由于对高频数字信号的屏蔽没有做好，因此高频数字信号对低频模拟信号的干扰较大；二是由于没有将A/D转换的模拟参考电压独立进行供电。

另外，作为电气类学生，作者对流体力学理论知识的掌握还很欠缺，因此在进行研究时，无法提供更多的理论支持和指引，使研究工作增大了难度。

由于采用新型的检测方法，个人的经验不足、能力水平有限以及实验条件等诸多因素影响，光纤涡街流量计的确还有些方面考虑的不够周全，一些问题解决得不够圆满。今后还可以在如下方面对其进行完善。首先，在机械结构的设计上可以更简洁、方便、合理，易于装配。其次，可以采用如表贴元器件及更好的电路设计方法进一步降低功耗。而且，随着技术的进步，可以采用更好的旋涡发生体及敏感光纤材料使得工作温度限制进一步放宽。还有，在软件设计方面，可以通过更为详尽的编程对流体的温度变化引起的测量误差加以补偿。此外，由于光纤传感器的多样性，可以将流量计设计成多参量测量流量计。结合光纤温度、压力传感器等实现多参量测量，进一步完善其功能。

同时关于光纤涡街流量计的设计在国内外尚有一些问题没有得到很好

的解决。首先，由于现时的流体中有很多都是两相或者多相流体，但是涡街流量计对两相流体的流量测量有很大的误差，这是在以后有待于更好解决的问题。其次，对于低流速流体的流量的测量，至今一直处于实验室的研究阶段，在传感器条件一定的情况下，如何通过各种技术扩大量程比，提高小流量测量的精度，使其尽早的投入市场，在实际的工程生产中发挥其价值，也是很多的研究人员一直在努力攻关的难题。第三，实现全数字化现场总线的智能涡街流量计，目前在技术上也是一个空缺。

有了以上的问题在实际的研究中进行指导，也为研究人员在今后的研究中指明了方向，相信光纤涡街流量计投入实际工程中的生产和使用必将会有美好的明天。

参考文献

- 1 姜仲霞,姜川涛,刘桂芳.涡街流量计.北京:中国石化出版社,2006:1-4,35-40
- 2 Bbyoungho Lee. Review of the Present Status of Optical Fiber Sensors. *Optical Fiber Technology*,2003,9:57-79
- 3 Paul Clark,Jason Boriniski, Mike Gunther. Morden Fiber Optical Bragg Grating. *Sensor and Actuators*,2001,7:8-10
- 4 W.Jin,Y.Zhou, P.K.C.Chan. A Fiber-optical Grating Sensor for the Study of Flow-induced Vibrations. *Sensors and Actuators*,2000,7(9):36-45
- 5 J.Lim,Q.P.Yang, B.E.Jones. DP Flow Sensor Using Optical Fiber Bragg Grating. *Sensor and Actuators*,2001,9(2):102-104
- 6 P.Akhavan Leilabady, J.D.C.Jones, A.D.Kersey,M. Monomode Fiber Optical Vortex Shedding Flowmeter. *Electron Letts*,1994,20:644-645
- 7 Hezog.J.P. Optical Fiber Vortex Sensor for Flow Rate Measurements. *Sensor and Actuators*,1992,32:696-700
- 8 Wen Done-xu. Smart Fiber Optical Flowmeter Proceeding of SPIE. *International Society for Optical Engineering*,1990,12(30):557-558
- 9 周晓军,刘文达.光纤流量计的稳定性分析. *电子科技大学学报*,1994,23(1):62-65
- 10 孙正鼐.三光纤干涉流量测量技术. *哈尔滨工业大学报*,2001,33(6):781-784
- 11 刘叶新,杨晓云.多模光纤弯曲损耗的分析. *中山大学学报*,2002,41(5):25-27
- 12 倪庆棋,康颖.光纤弯曲损耗的研究. *海军工程学院学报*,1996,4:53-55
- 13 Gauthier RC and Ross C. Theoretical and Experimental Considerations for a Signal Made Fiber-optical Bend-type Sensor. *Applied Optical*,1997,36(25):6264-6273
- 14 贺光裕,姜久兴.多模光纤弯曲损耗的理论分析. *哈尔滨理工大学学报*,1997,2:91
- 15 许世祥,李锡善.纯石英光纤的弯曲传输特性试验研究. *中国激光*,1994,21(7):571
- 16 史友进.光弹性效应的物理机制探讨. *盐城机械工业专科学校校报*,1994,7(3):15-17
- 17 郝素君,游善红.单模光纤弯曲损耗的测量与分析. *光纤与电缆及其应用技术*,2003,1:12-14
- 18 肖定金.晶体物理学.重庆:四川大学出版社,1999:222-225
- 19 王波,莫德举.光纤流量计初探. *计量测试*,2003,5:32-35
- 20 R.D.白菜文斯.流体诱发振动.吴恕三.北京:机械工业出版社,1983:9-11

- 21 孙准清,姜仲霞.涡街流量计(一).自动化仪表,1998,19(9):43-45
- 22 孙准清,姜仲霞.涡街流量计(二).自动化仪表,1998,19(10):42-45
- 23 J.Dakin, B.Culshaw. Optical Fiber Sensors, Application, Analysis and Future Trends Volume. Artech House MA,USA,1997:437-449
- 24 王波,莫德举.光纤流量计的研制.北京化工大学学报.2004,2(31):86-90
- 25 R.H.F.Paul.流体力学.黄丕陵.北京:机械工业出版社,1994:397-416
- 26 中科院力学研究所.现代流体力学进展.北京:科学出版社,1991:26-30
- 27 江宏俊.流体力学(上册).北京:高等教育出版社,1987,1:52-57
- 28 梁国伟,蔡武昌.流量测量技术及仪表.北京:机械工业出版社,2002:266
- 29 刘欣荣.流量计.第二版.北京:水利电力出版社,1989:43 135-139
- 30 蔡武昌,孙准清,纪纲.流量测量方法和仪表的选用.北京:化学工业出版社,2001:148
- 31 Lyle J H, Pitt C W. Vortex Shedding fluid Flowmeter Using Optical Fiber Sensor. Electronics Letters,1981,17(6):244-245
- 32 Jones J D C, Kerscy A D, Corke M. Monomode Fiber Optical Vortex Shedding Flowmeter. Electronics Letters,1984,20:664-665
- 33 T.Ghaoud, D.W.Clarke. Modeling and Tracking a Vortex Flowmeter Signal. Flow Measurement and Instrumentation,2002,13:103-117
- 34 D.W.Clarke, T.Ghaoud. A Dual Phase Locked Loop for Vortex Flow Metering. Flow Measurement and Instrumentation,2003,14:1-4
- 35 王新.多功能智能流量积算仪的设计.安徽科技,1998,2:41-42
- 36 川田裕郎,小宫勤一,山崎弘郎.流量测量手册.罗秦.北京:计量出版社,1982:25
- 37 姜仲霞.流体振动流量计.世界仪表自动化,1997,5(1):215-217
- 38 Gambiling W A, Matsumura H. Curvature and Microbending Losses in Single Mode Optical Fibers. Optical and Quantum Electronic,1979,3(1):43-59
- 39 张振东,宗凤英,文东旭.光纤卡门涡街智能流量计.工业控制计算机,1994,4:30-33
- 40 姚骏,付敬奇,张承燕.光纤流量传感器的进展.传感器技术,2002,21(3):1-4
- 41 李名兆,马俊杰.多功能流量积算仪.仪表技术与传感器,2004,11:29-32
- 42 胡大可.MSP430 系列单片机 C 语言程序设计与开发.北京:航空航天大学出版社,2003:147-149
- 43 闫芳,王良.带温压补偿的涡街流量计.工业计量,2001,4:41-49
- 44 吴志祥.实用温度测量技术.常州工学院学报,2003,16(4):52-57
- 45 才莹,毕鹏.压阻式压力传感器及其应用电路设计.航空计测技术,2002,22(5):12-15

- 46 刘海,朱桂华.用 8031 获取涡街流量计信号的精确测量方法.仪表技术,1997,5:25
- 47 谢立平,朴兴哲.基于 MSP430 型单片机的智能涡街流量计转换电路的设计.石油化工高等学校学报,2004.6(17):83-85
- 48 Li Qiang, Chen Yao. Application Embedded RTOS on the MSP430 Microcontroller. Microcontroller&Embedded Systems,2002,(7):52-56
- 49 徐国梁.高抗干扰智能型涡街流量计的研究.[浙江大学硕士学位论文].2003:50-53
- 50 郑建英,孙坚,朱云.智能涡街流量计的研制.现代计量测试,1999,4:35-38
- 51 Gauthier RC and Ross C. Theoretical and Experimental Considerations for a Single-made Fiber-optical Bend-Type Sensor.Applied Optics,1997,36(25):6264-6273
- 52 Barton J S, Reid A W Y. Air Flow Measurement Using a Stretched Optical Fiber. Iop Short Meetings Fiber Optical Sensors,1987:101-104
- 53 V.Hans, G.Poppen, Evon Labvante. Vortex Shedding Flowmeters and Ultrasound Detection Signal Processing and Influence of Bluff Body Geometry. Flow Measurement and Instrumentation,1998,9:79-82
- 54 Mssanori Hondoh, Masami Wada. A Vortex Flowmeter with Spectral Analysis Signal Processing.SIcon'01 Sensors Fir Industry Conference,USA,2001:35-40
- 55 徐科军.涡街流量计输出信号谱分析的比较.合肥工业大学学报(自然科学版),1994,17(2):6-11
- 56 Hongjun Sun, Tao Zhang. Digital Signal Processing Based on Wavelet and Statistics Method for Vortex Flowmeters.IEEE,2004:3160-3163
- 57 刘安重,刘安民.浅析流量计的合理选用.辽宁化工,2002,31(11):498
- 58 林晖.涡街流量计的选型与应用.测量与设备,2001,12:20-21

攻读硕士学位期间承担的科研任务与主要成果

1. Wang Yutian, Lin Xiaolin, Yang Ni. Vortex Flowmeter System Design Based on Optical Frequency Modulation Optical Fiber. Journal of Electronic Measurement and Instrument (MCMI), Bei Jing, 2006(20):315-319
2. 王玉田, 林晓琳, 杨妮. 基于光频率调制原理的光纤涡街流量计的研究. 传感技术学报. 论文编号: 2006294
3. 王玉田, 林晓琳. 光纤涡街流量计量程的扩展. 自动化技术与应用. 论文编号: C0940

致 谢

在课题的研究过程中得到了导师王玉田教授的悉心指导，导师渊博的学识和严谨的学风使学生受益匪浅。导师不仅在学术上给了我谆谆教诲，在生活上也给了我莫大的关怀与帮助。在此谨向几年来在学业内外给予我无私关怀的王玉田老师表示最真诚的谢意！

在课题进行过程中，得到了教研室和实验室各位老师们的指导和帮助，同时感谢烟台市仪表厂姜贵波高级工程师以及电子设计车间其他同事的帮助。有了他们的关心和支持，本课题才得以顺利进行，在此表示衷心的感谢！

在课题进行和论文撰写过程中参阅了许多文献资料，在此对文献资料的作者、译者和出版单位表示衷心的感谢！

最后，感谢我的父母和朋友们，感谢所有关心我的人。是他们在攻读学位期间给了我支持、理解和无私的关怀。

作者简介



林晓琳，女，汉族，1982年6月生于黑龙江省哈尔滨市，2004年7月毕业于燕山大学电气工程学院检测技术及仪器仪表专业，获工学学士学位。2004年9月至今于燕山大学电气工程学院测试计量技术及仪器专业攻读硕士学位，在此期间发表学术论文3篇，研究方向为光纤传感器及其应用。