

# 光纤流量计的研制

王 波 莫德举

(北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029)

**摘 要:** 将传统的涡街流量计和光纤传感技术相结合, 设计了一种光纤流量计。阐述了光纤流量计的测量原理, 给出了涡街原理和在微弯损耗作用下的光纤损耗系数公式。介绍了经过改进的传感器结构和光纤流量计的硬、软件部分, 给出了相应的放大、滤波、整形电路原理图和软件流程图。给出了实验数据并对结果进行了讨论和总结。

**关键词:** 流量计; 光纤传感; 涡街; 雷诺数

**中图分类号:** TH814

随着人们的生活质量的改善, 生产工艺的改进和管理水平的提高, 对物流和能流的计量的重要作用日益显现。流量计的需求迅速增长。至今为止, 流量计种类达 100 多种<sup>[1]</sup>。这 100 多种流量仪表, 每种产品都有它特定的适用性, 也都有它的局限性。其中, 涡街流量计是属于最年轻的一类流量计, 但因其具有结构简单牢固、适用流体种类多、精度较高、范围度宽、压损小等优点而发展迅速, 目前已成为通用的一类流量计。

涡街流量计是利用流体在特定条件下流动时产生震荡, 且震荡频率与流速成正比规律来测定流量的。从 20 世纪 70 年代以来得到迅速发展, 被公认是很有发展前途的流量计之一。随着人们对光纤性能的深入研究和应用的不断探索, 光纤传感技术逐渐显示出强大优势, 代表了新一代传感器的发展趋势。光纤传感器产业已被国内外公认为最具有发展前途的高新技术产业之一<sup>[2]</sup>。本设计将光纤传感器与传统的涡街流量测量原理相结合, 使流量计采用光纤检测涡街频率。由于光纤传感器具有抗电磁干扰、抗环境噪声, 电气绝缘性及自身安全性等特点, 其独特的性能和灵活性能克服了传统涡街传感器的诸多不利影响, 将推动光纤流量计的应用。

## 1 测量原理

光纤流量计由两部分组成: 转换显示电路和流量传感器。流量传感器如图 1 所示, 主要是由壳体、

旋涡发生体、传感光纤、激光管和光电管等组成。

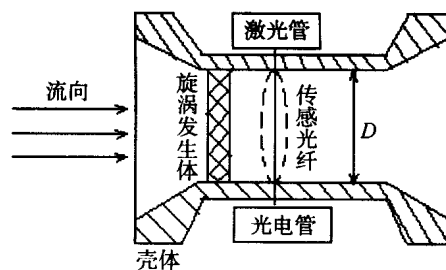


图 1 光纤流量传感器结构

Fig. 1 Structure of optic fiber flowmeter

### 1.1 涡街流量计测量原理

被测流体经过旋涡发生体时, 当流速增加到一定程度时, 旋涡发生体的下游会产生两列旋转方向相反的并排旋涡。旋涡的释放频率与流速成正比

$$f = S_t \frac{v}{b} \quad (1)$$

其中,  $f$  为旋涡频率, Hz;  $v$  为流体平均速度, m/s;  $b$  为旋涡发生体迎流面特征宽度, m;  $S_t$  为斯特罗哈数。

根据雷诺数和旋涡发生体形状的不同,  $S_t$  数值范围 0.14 ~ 0.27。当雷诺数  $Re$  在  $2 \times 10^4 \sim 7 \times 10^6$  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(1)整理得到

$$v = \frac{b}{S_t} f \quad (2)$$

设旋涡发生体与管道之间的流通面积是  $S$ , 则流经管道的流体的体积流量是

$$q_v = S v \quad (3)$$

将(2)式代入(3)式并整理得

$$q_v = \frac{S b}{S_t} f = k f \quad (4)$$

收稿日期: 2003-06-11

第一作者: 女, 1978 年生, 硕士生

E-mail: spice\_lily@163.com

式中  $k = \frac{Sb}{S_t}$

由式(4)可知,对于口径已经确定的流量计,  $S$ ,  $b$  均为确定值,当流体的雷诺数  $Re$  在  $2 \times 10^4 \sim 7 \times 10^6$  的范围内,  $S_t$  也是一常数,所以  $k$  是一个常数。旋涡的频率  $f$  和流量  $q_v$  成正比,只要检测出旋涡的频率数就可以知道被测流体的体积流量的大小<sup>[3]</sup>。

## 1.2 光纤涡街流量计测量原理

本设计是将传感光纤置于旋涡发生体后,用之测量旋涡频率。旋涡的发生会在旋涡发生体上产生一个垂直于管道轴线方向的升力,由于旋涡在旋涡发生体两侧交替发生,而且旋转方向相反,故作用于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,产生垂直于轴线方向上的振动。可见,交替作用在旋涡发生体上的升力的变化频率等于旋涡的频率,而升力变化频率又与流体的振动频率相同,所以流体的振动频率就是旋涡的频率。振动的旋涡序列在向下游移动的过程中作用于被放置在旋涡发生体后的光纤之上,使之产生频率相同的振动。

假设光纤的微弯变形函数为

$$f(z) = u(t) \sin qz \quad (5)$$

其中,  $u(t)$  为随时间  $t$  变化的动态振幅,  $m$ , 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,  $m^{-1}$ , 设光纤微弯变形函数的微弯周期(即空间波长)为  $\lambda$ ,  $m$ , 则  $\lambda = 2/q$ ;  $z$  为变形点到光纤入射端的距离,  $m$ ;

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

$$= \frac{1}{4} K u^2(t) L \left| \frac{\sin(q - \frac{2\pi}{\lambda}) L/2}{(q - \frac{2\pi}{\lambda}) L/2} \right|^2 \quad (6)$$

式中  $K$  为比例系数,  $m^{-3}$ ;  $L$  为光纤产生微弯变形部位的长度,  $m$ ;  $\frac{2\pi}{\lambda}$  为光纤中光波传播常数差,  $m^{-1}$ 。

阶跃光纤的  $\frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\sqrt{2}}{r}$ , 为相对折射率差,

$$= \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \frac{n_1 - n_2}{n_1}, n_1, n_2 \text{ 分别为光纤的芯层和包层的折射率。}$$

则

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

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  $f_o$  也就是旋涡的频率  $f$ 。由式(4)

$$q_v = k f_o \quad (8)$$

光纤末端用光电管接收受调制的光信号, 将光信号转换为电信号, 以便后续的处理显示电路进行进一步的处理。

## 2 传感器的设计

### 2.1 结构设计

旋涡发生体是涡街流量计的核心部件, 与仪表特性密切相关。圆柱、矩形柱和三角柱是比较常用的三种旋涡发生体。而其中的三角柱旋涡发生体是目前应用最为广泛, 性能最好的一种。光纤流量计的旋涡发生体在三角柱的基础上做了改进。采用具有棱边的梯形柱型, 利用棱边陡断迫使旋涡分离在棱边上同步, 从而保证旋涡的稳定性。由于在圆柱、矩形柱和三角柱三种旋涡发生体中, 圆柱形的斯特哈尔数  $S_t$  最大, 且当柱的外接圆相同时, 梯形柱比三角柱具有更大的刚度, 从而可以削弱振动影响, 此外圆柱面能够减少迎流面上的异物堆积, 降低磨损, 所以将旋涡发生体的迎流面, 背流面设计成和梯形柱具有相同外接圆的圆柱面。

光纤涡街流量计的敏感光纤采用多模光纤, 考虑到第一列旋涡发生的位置, 将光纤置于旋涡发生体后  $10 \sim 15 \text{ cm}$  处。

光纤传感器的光源采用激光管。激光的产生和一般光不同, 它的发光原子彼此间都密切联系着, 各发光原子所发出的光, 振动方向、频率、相位等都相同, 因此具有良好的相干条件。激光的能量十分集中, 和钨丝灯等常见光源相比, 它有许多突出的特点, 例如, 方向性强、单色性好、相干性好、亮度高等。考虑到需要光源的能量比较大, 以及光源与光纤的耦合高效性能, 采用激光管作为光源发生装置。

为了尽量解决涡街流量计所受到的关于测量下限不能太低的局限, 设计流量计壳体时, 在流入口和流出口分别采用了渐缩管和渐扩管。在流量不变的情况下, 管道直径缩小为原来的  $1/n$ , 流速提高  $n^2$  倍, 而雷诺数  $Re$  增加为原来的  $n$  倍, 可见, 采用该设计, 能够降低雷诺数下限。另外, 采用合适的内径变化尺寸, 渐缩管就能够起到整流器和加快流速的

作用,不仅消除了采用整流装置使流体压损增大的缺点,还能增强旋涡的强度,减少堆积,减少了影响仪表系数的因素,提高了流量计的整体性能。

涡街流量计是速度式流量计,以测量流体流经管道的平均流速为测量依据。涡街流量计安装后必须保证流速分布均匀稳定,这是仪表正常工作必需的条件之一。因此在仪表安装时,必须保证入口与出口直管段有足够的长度,才能保证流经表体的流体分布均匀稳定。一般而言,涡街流量计的上游侧至少要有  $10D$  的直管段(通常为  $20D$  直管段长度),下游侧要有  $5D$  的直管段。而本设计使得上游侧的直管段长度可以缩减到  $6D$ ,下游侧到  $3D$ <sup>[4]</sup>。

## 2.2 硬件电路设计

光纤流量计硬件电路包括:光电检测电路;信号放大-滤波-整形电路;信号处理电路;信号显示电路。为修改保存参数和数据,还有键盘接口和 EEPROM 存储电路。整体硬件电路组成如图 2 所示。

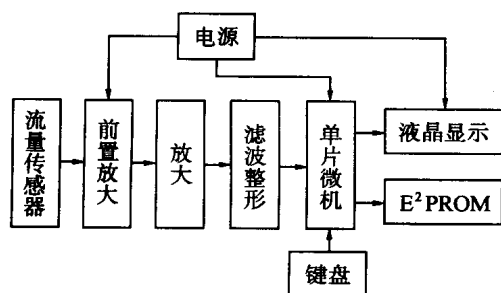


图 2 硬件电路整体框图

Fig. 2 Diagram of hardware circuit

**2.2.1 前置放大电路** 前置放大电路如图 3,其作用主要是将取自流量传感器的微弱光信号转换成电信号以供后续处理电路使用<sup>[5]</sup>。光电二极管采用北京瑞普电子公司的 2CU101-B 硅 PIN 型光电二极管,其响应时间不超过  $5\text{ ns}$ ,灵敏度较高,暗电流低,

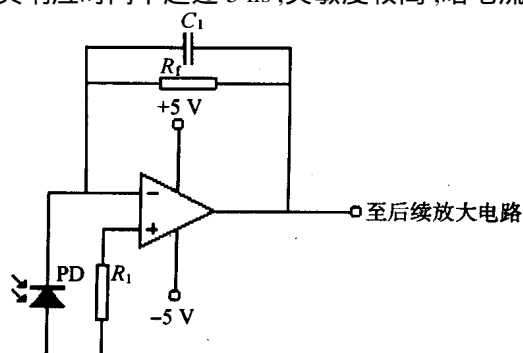


图 3 前置放大电路

Fig. 3 Circuit of preamplifier

适合检测微弱交变电信号。

**2.2.2 放大电路** 因为光纤传光光强很弱,由光电转换得到的电信号相应很微弱。由于放大器的放大倍数有限,因此设计两级放大电路,如图 4 所示。

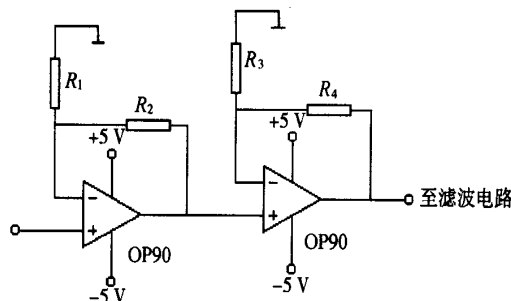


图 4 放大电路

Fig. 4 Amplification circuit

**2.2.3 滤波、整形电路** 因为受到流体性质的限制,流量计的频率信号是不高于  $200\text{ Hz}$  的低频信号,因此要滤除高频噪声的干扰,设计低通滤波电路。为将信号调整成标准方波频率信号输出给单片机,本设计采用美信公司的比较器 max921 组成整形电路。滤波整形电路如图 5。

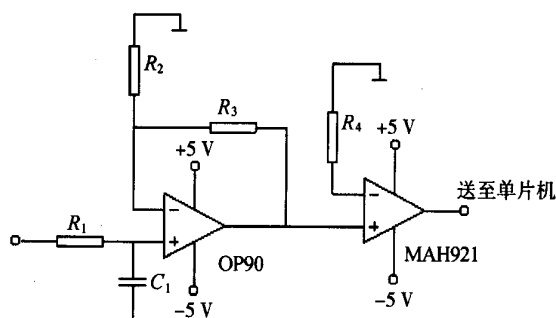


图 5 滤波、整形电路

Fig. 5 Filter and regulation circuit

光纤流量计系统的工作过程如下:被测流体流经旋涡发生体产生旋涡,位于旋涡发生体后的光纤内的传输光强受到调节,经过光电转换电路输出与旋涡频率相同的微弱电信号,此信号经导线进入前置放大器,经过放大、滤波以后进行整形,输出标准方波脉冲信号,送入单片微机进行计算、累积、存储和显示等等一系列的处理。

**2.2.4 单片机的选取** 本仪表 CPU 选取 MICROCHIP 公司的 PIC16F877, PIC 单片机与其他单片机相比,具有许多突出优点。例如采取哈佛总线结构以及精简指令,速度快,可选范围宽等。PIC16F877 内部集成有 EEPROM,可以省去外接的麻烦。

**2.2.5 信号显示电路** 显示模块采用北京精电蓬远显示技术有限公司的 MDLS16265。其模块结构紧凑、轻巧、装配容易,单 +5 V 电源供电,低功耗,长寿命,可靠性高。

### 2.3 软件电路设计

系统软件采用结构化、模块化设计方法,主要由主程序、中断服务程序、计算模块和控制模块组成。

主程序为本仪表的检测程序。它首先对系统进行初始化,清理各工作单元,置计数器和标志位初值,开中断,启动计数器,等待中断的发生。

仪表的测量、转换和设定等程序的执行都要通过中断方式与主程序相连。运行后首先进行中断判断,是按键中断还是定时计数中断。若是按键中断,则进行键值分析,用以实现仪表的手操功能。通过按键操作,可以使仪表分别进入到工况显示状态和参数设定状态。工况状态下,可以显示瞬间流量、累积流量、流速、频率等。在参数设定状态下,可对仪表的一些内部参数诸如上下限报警值等进行浏览和设置。待这些相关数据设置输入后,将其保存在 E<sup>2</sup>PROM 中。若是定时计数中断,则调用计算模块进行频率、流量等的计算,并计算流量增量以更新累积流量,随后回到休眠状态,等待下一次中断的来临。

计算模块包含浮点运算程序、瞬时流量计算子程序、报警子程序和显示代码转换子程序。

控制模块包含 EEPROM 控制子程序、液晶模块读写子程序、定时计数中断子程序和键值中断处理子程序。

图 6 是本设计的主程序流程图。

## 3 实验结果和结论

在实验管路上以水为介质,40 mm 口径的光纤涡街流量传感器的光电二极管接收到的受调制的光信号的频率  $f$  与流体体积流量  $q_v$  的测量结果如图 7 所示,其中横轴  $q_v$  是流体的体积流量,纵轴  $f$  是光信号的频率。本实验中,取流体体积流量  $q_v$  的变化范围为 1.51 ~ 15.64 m<sup>3</sup>/h,相应的光信号的频率变化范围是 14.71 ~ 148.95 Hz。

从实验结果曲线来看,光信号的频率  $f$  与流体体积流量  $q_v$  之间存在着较好的线性关系,因为光信号的频率  $f$  就是漩涡分离频率,因此漩涡分离频率  $f$  与流体体积流量  $q_v$  之间基本满足关系式  $q_v = kf$ ,理论公式和测量结果曲线之间很好吻合,证明了光

纤流量计的测量原理是正确的。

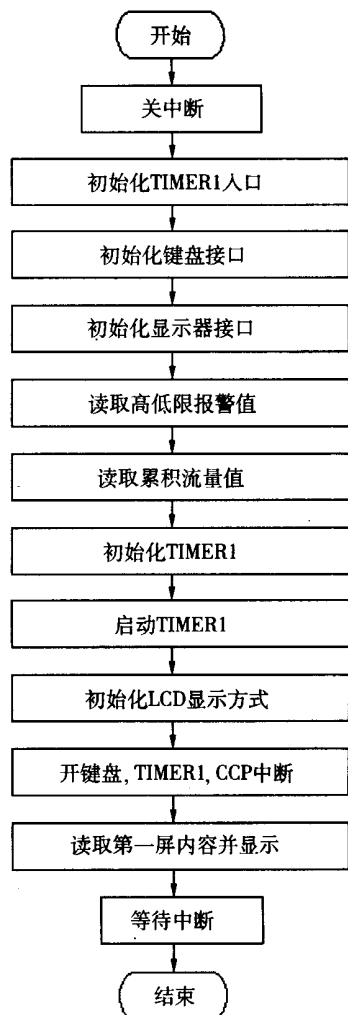


图 6 主程序流程图

Fig. 6 Main program block diagram

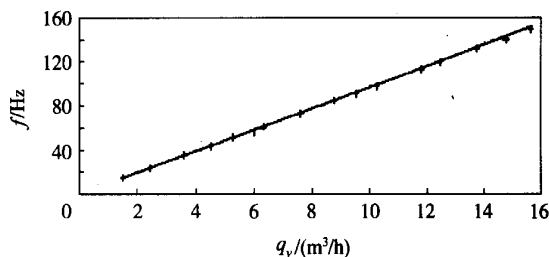


图 7 水的实验数据

Fig. 7 Experimental data of water

本文设计的光纤流量计是传统的涡街流量计和光纤传感器相结合的产物。光纤的引入使得涡街流量计的诸多局限得到克服。其结构合理,电路简单可靠。在流量计的需求不断扩大和光纤的应用日益广泛的今天,光纤流量计必将拥有广阔的发展前景。

## 参 考 文 献

- [1] 姚骏,付敬奇,张承燕,等. 光纤流量传感器的进展[J]. 传感器技术, 2002,21(3):1-4
- [2] 姜德生. 我国光纤传感器的发展与产业化[J]. 世界仪表与自动化,2002(1):12-15
- [3] 川田裕郎,小宫勤一,山崎弘郎. 流量测量手册[M]. 北京:计量出版社,1982,303-311
- [4] 莫德举,李立平,郭红晓. 电磁法检测旋涡频率的涡街流量计[J]. 北京化工大学学报,2001,28(1):70-72
- [5] 刘卫东,刘延兵,刘建国. 检测微弱光信号的 PIN 光电检测电路的设计[J]. 电测与仪表,1999(4):28-31

## Development of an optical fiber flowmeter

Wang Bo Mo De-ju

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Based on the advantage of the wide foreground of an optical sensor, a kind of new type flowmeter — an optical fiber flowmeter which combined optical fiber technology with the traditional vortex flow measurement was designed. The measuring principle of the flowmeter, the principle of the vortex and the formulae of the optical fiber loss coefficient were presented. The improved structure of the sensor and the designs of the software and hardware were introduced. The principle schematics of amplification, filter, regulation circuit and flow chart were given. At last, based on the experiments data, the experimental results and the conclusion were discussed.

**Key words:** flowmeter; optical fiber sensor; vortex; reynolds number

(责任编辑 刘同帅)

(上接第 85 页)

## Synthesis of alkyl siloxane

Lin Yin Yan Bao-zhen

(College of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Alkyl siloxane was prepared by hydrosilation of poly(methylhydrosiloxane) and  $\alpha$ -olefin, in the presence of platinum catalyst. The effects of various reaction conditions were investigated and the optimum reaction conditions were showed as follows: the proportion of the raw material was  $m(\text{methylhydrosiloxane}) : m(\alpha\text{-olefin}) = 35 : 52.5$ ; the reaction temperature was 135 °C; the reaction time was 13 hours; content of the catalyst used was based on the raw material weight of 0.0035% and poly(methylhydrosiloxane) was added dripwise over a period of 45 min. The structure of the product was determined by NMR and refractive index, and its reaction mechanism was studied preliminarily.

**Key words:** silicone oil; alkyl siloxane; poly(methylhydrosiloxane); hydrosilation; synthesis

(责任编辑 曾宪玉)