

## 摘 要

本文结合杭州市科技创新项目“基于 MEMS 技术的嵌入式智能质量流量计”和国家自然科学基金资助项目“基于温度场模型及特征提取的大型变压器远程诊断方法与技术的研究”(编号: 50575095), 开展基于 MEMS 的热式流量检测方法和系统的研究工作, 建立了热分布式微流量计在恒功率模式和恒温模式下的数学模型, 分析了流量计的响应特性、灵敏度和测量误差, 设计了基于虚拟仪器和多 Agent 系统技术的流量监测系统总体框架, 对于研究和开发频响快、精度高、量程大的新型热式流量计以及开展远程流量监测, 具有重要的意义和良好的前景。

论文的主要研究内容及章节安排如下:

第一章阐述了流量检测及其研究的意义, 介绍了流量检测技术的主要分类方法和发展趋势, 论述了热损失式、热分布式和热脉冲式等三种热式流量检测技术的研究现状及 MEMS 技术在热式流量计中的应用, 分析了远程流量监测系统的应用现状和发展趋势, 最后结合课题提出了本论文的研究内容, 给出了论文的总体结构。

第二章引入传热学基本理论, 分析了热分布式微流量计的热传递规律, 建立了流量计的传热微分方程。根据流量计在恒功率模式和恒温模式下不同的边界条件分别对微分方程进行求解, 从而得出这两种模式下的热分布式微流量计数学模型。最后利用有限元分析方法对模型进行验证, 分析了模型的误差来源。

第三章根据建立的热分布式微流量计数学模型, 分析了流量计的响应特性和灵敏度, 论述了流量计结构尺寸参数的取值和加工误差对响应特性和测量误差的影响, 最后对微流量传感器进行了总体设计。

第四章阐述了流量监测系统的基本构成; 分析了其目前发展中存在的重要问题; 采用 GPRS 无线通讯技术、虚拟仪器技术和多 Agent 技术, 设计并分析了基于 Agent 和空间概念的流量监测系统总体框架。

第五章针对流量监测系统总体框架中软件空间实现时需要解决的两个关键问题, 即通讯系统设计和运行机制实现, 分析了 LabVIEW 开发平台和 Agent 概念的相关特性, 并进行了流量监测原型系统的设计, 最后提出了基于配置表的系统组态设计方式。

第六章对全文研究工作进行了总结, 并结合课题对其发展进行了展望。

**关键词:** 热式流量计, 微机电系统, 监测系统, 多 Agent 系统, LabVIEW, 空间模型

## ABSTRACT

On the base of analyzing the development and trend of the thermal flowmeter technology, this paper researched on thermal flowmeter detection methods and system based on Micro-Electro-Mechanical System (MEMS). The mathematical model of the thermal flowmeter under constant power and constant temperature are used to analyze its response characteristic, sensitivity and measuring error. Then, a frame-model of flow monitoring system based on LabVIEW and multi-agent technology is introduced and its prototypes of the communication system and operational mechanism of software space are designed.

Chapter one outlines the research significance of flow monitoring, and introduces the main classification methods and development trend of flow inspection technology, presents the three types of thermal mass flow detection and their general situations, and analyzes the present application situation and development trend of flow remote monitoring system. At last, the main content and general structure are presented.

Chapter two uses heat transfer theory to analyze the principle of thermotransfer micro flowmeter and the heat transfer differential equation is established and solved with the different boundary conditions under constant power and constant temperature. The resulting models are validated by the ANSYS large finite element software and its error sources are analyzed.

Chapter three uses the mathematical model to analyze the response characteristic, sensitivity of the flowmeter, the effect of structure dimension and its mismachining tolerance are also presented. Lastly, the micro flow sensor is briefly designed.

Chapter four introductions the general structure of flow monitoring system, shows the main issues in recent development. With the use of GPRS, virtual instrument and multi-agent technology, a frame-model of flow monitoring system is brought forward based on the concept of agent and space.

Chapter five designs the communication system and operational mechanism of the system as the key tasks in the realization of the software space of the frame-model. At last, a method of system configuration based on the concept of configuration is propounded.

In the end, in the chapter six, all of the work in this dissertation is summarized, and the future researches are prospected.

**Keywords:** Thermal Flowmeter, Micro-Electro-Mechanical System (MEMS), Monitoring System, Multi-Agent System (MAS), LabVIEW, Space Model

学号 20508181

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。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: 谢之程 签字日期: 2007 年 6 月 9 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有关保留、使用学位论文的规定，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。本人授权 浙江大学 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，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名: 谢之程

导师签名: 杨世锡

签字日期: 2007 年 6 月 9 日

签字日期: 2007 年 6 月 10 日

学位论文作者毕业后去向:

工作单位:

电话:

通讯地址:

邮编:

# 第一章 绪论

## 内容提要

流体流量计量与监控是工业测控领域中的一项重要内容。本章阐述了流量检测技术的研究意义、主要分类方法和发展趋势,介绍了热式流量检测技术的三种类型及其研究现状,分析了远程监测系统的应用现状、发展趋势及其在流量监测中的应用,结合课题提出了本文的研究内容,给出了论文的总体结构。

## 1.1 流量检测及其研究的意义

物质通常具有三种存在状态,即固态、液态和气态,处于液态和气态的物质统称为流体。流体遍布于世界的每个角落,和人类的日常生活、工业生产有十分密切的关系。

在涉及流体的各个领域中,往往都需要对流体的流量进行计量和控制,通过流体流量的检测,人们可以了解流体流动过程、进行生产工艺的自动控制和参数优化、实行能耗控制和成本管理。因此,流量检测的性能直接关系到能耗效率、产品质量和生产生活成本等。

以电力工业部门为例,流量的检测与调节不仅可以优化电厂运行参数,提高经济效益,而且是电厂安全管理的重要环节。有数据表明,对于火电厂,若主蒸汽流量累积误差达到2%~3%,将引起煤耗计算误差约10g/(kw·h),造成不可忽视的能源浪费;又如大容量锅炉给水流量短时间的中断和减少,都可能造成严重的干锅或爆管事故<sup>[1]</sup>。相类似的,石油工业、化学工业、冶金工业、轻工业乃至人们日常生活,都离不开对流体流量的检测与控制,可以说,在解决全球能源危机、实现工业现代化的过程中,流量的检测与控制是不可忽视的一个重要环节。

在上述背景下,流量检测技术一直是工业测控领域中的一个研究热点,并在MEMS技术等多个学科技术的推动下呈现出良好的发展势头和潜力。据专业网评估报告显示,流量仪表的销售额从2002年的31亿美元增长到2007年的35亿美元,年增长率仍达2.6%,其中传统流量仪表为负增长-2.2%,2002年16.43亿,占总流量仪表的53%,2007年15.05亿,占43%;而新型流量仪表年增长率约6.2%,2002年14.57亿,占47%,2007年增为20.19亿,占57%<sup>[2]</sup>。

但是目前有相当一部分流量检测新技术仍未达到实用水平,仍需要进一步的深化研究,并且随着流量监测规模的不断扩大,监测系统框架结构的优化与设计方法也日益成为一个重要的研究课题。

## 1.2 流量检测技术概述

随着工业的飞速发展和科技的不断进步,流量检测的任务越来越重<sup>[1]</sup>:被测的目标流

体种类越来越多,涉及液体、气体,也包括各种特殊介质、非牛顿流体以及多相流体;测量条件越来越苛刻,从高温到极低温,从低压、中压、高压到超高压,从低粘度流体到高粘度流体,从粘污介质、矿浆到强腐蚀性介质;被测流量范围越来越大,从微小流量到大流量;流体流动状态也包括了层流、紊流和脉动流等等。所以,流体流量检测工作极其复杂多样,与之相应的,也出现了各式各样的基于不同原理的检测方法。

### 1.2.1 流量检测方法的分类

迄今为止,流量检测方法并没有统一的划分方法,对于种类繁多的流量检测仪表,大致可以按测量场合、流体被测物理量以及流量计的测量原理等几种依据来进行分类<sup>[1; 3-5]</sup>:

#### (一) 按测量场合分类

按照测量场合的不同,流量检测仪表可分为封闭管道流量计和明渠流量计两种。

其中,明渠流量计是用来测量明渠、暗渠等开放渠道中流量的仪表。由于测量场合的特殊性,明渠流量计的形状可以是圆形、U字形、梯形、矩形等多种。其应用场所包括城市供水引水渠;火电厂引水和排水渠、污水治理流入和排放渠;工矿企业水排放以及水利工程和农业灌溉用渠道等。

#### (二) 按流体被测物理量分类

按照流体被测的物理量不同,流量检测仪表可分为差压式流量计、速度式流量计、容积式流量计和质量流量计四种。

差压式流量传感器生产历史较长,应用范围也十分广泛。其生产已标准化,种类繁多,如:孔板、音速喷嘴、均速管、文丘里管等流量计。差压式流量计是根据伯努利方程原理,测量流体流过内置于管道中的节流件时前后出现的与流量有关的压力差值来感知流体流量。其中应用最多的孔板式流量计还具有结构牢固、性能稳定可靠,使用寿命长。其缺点:节流件的机加工精度高,安装要求严格;传感器前后必须有足够长的直管道以保证流体流态稳定;流体压损大;对于低流速流体,产生的差压小,误差增大;不适于脉动的流体测量。除此之外,还有一些流量计是间接地测量其它某些由差压而引起变化的物理量来获取流量值的,这类型的流量计有靶式流量计、转子流量计等。

速度式流量计是利用测量管道内介质流动速度来得到流量,这种测量方法是目前流量测量的主要方法之一,并且还在不断发展中。较典型和常用的速度式流量计有涡轮流量计、涡街流量计、超声波流量计和热式流量计等。由于这种测量方法是利用平均流速计算流量,所以管路条件的影响很大,如雷诺数、涡流及截面上流速分布不对称等都会给测量带来误差。但是这种测量方法有较宽的使用条件,可用于高温、高压流体的测量。有的仪器还可适用于对脏污介质流体的测量,其测量精度能满足要求,能量损失较小,因此目前在工业上获得了广泛使用。

容积式流量计也有很长的应用历史，它的原理与日常生活中用容器来计量液体体积的方法有点类似。其工作过程是：流体不断地充满具有一定容积的某“计量空间”，然后再从出口流出，在一次测量中，将“计量空间”被流体充满的次数不断累加，乘上其体积，就可得到通过流量计的流体总量。由于容积式流量计是采用容积累加的方法测量流量的，所以对上游流动状态变化不敏感，测量准确度较高，结构比较简单，可用于高粘度、低雷诺数的流体，在石油化工、轻工贸易、食品等部门得到了广泛的应用。但当被测管道直径较大时，仪表本体往往显得过于笨重。

在实际工业生产过程的参数检测和控制中，如产品质量控制、成本核算以及生产过程的自动调节等，往往都需要直接测量目标介质的质量流量值，而不受其它参数影响。质量流量计就是针对这个测量目的的一类流量计。它可分为直接式和间接式两种类型。直接式测量方法能够直接反映流体介质的质量流量值，理论上与介质所处的状态参数（温度、压力）和物性参数（粘度、密度）等无关。其中具有代表性的科里奥利流量计是利用流体在振动管中流动时能产生与流体质量流量成正比的科里奥利力这个原理来测量质量流量值，由于具有高准确度、高重复性和高稳定性的特点，在工业上得到了广泛应用。间接式质量流量计实际上是由多种仪表组成的质量流量测量系统，通过测量多个物理量再经运算器计算得到流体的质量流量值。间接式测量方法对于温度、压力较为稳定或气体性质较接近理想气体范围的场合可以得到比较满意的测量结果。

### （三）按测量原理分类

根据测量流量所依据的不同物理原理，可分为以下几种：

（1）力学原理：具体涉及的原理有伯努利定理（如差压式流量计、浮子流量计）、牛顿第二定律（如直接质量流量计）、动量定理（如冲量流量计、可动管式流量计）、角动量定理（如涡轮流量计）、流体流动阻力原理（如靶式流量计）、流体振荡原理（如涡街流量计、旋进旋涡流量计）、动压原理（如毕托管流量计）、分割流体体积原理（如容积式流量计）等等。

（2）电学原理：基于此类原理的流量计有电磁流量计、差动电容式流量计、电感式流量计、应变电阻式流量计等。

（3）声学原理：利用声学原理测量流体流量的有超声波流量计、声学式流量计等。

（4）热学原理：利用传热学原理测量流量的有热损失式流量计、热分布式流量计等。

（5）光学原理：此类流量计有激光（多普勒）流量计、光电式流量计等。

（6）原子物理原理：核磁共振流量计、核辐射流量计等就属于此类原理。

（7）其它原理：如标记法流量计等。

除了以上所列几种分类依据外，还有其它一些分类方法：

按照流量计输出信号不同，流量计可以分为脉冲频率型流量计（如涡轮流量计）和模

拟输出型流量计（如差压式流量计）。

根据流量计安装方法的不同，可以分为接触式和非接触式流量计。接触式流量计如涡轮式流量计、电磁流量计等，应用历史长、市场占有率高，但会在一定程度上对被测流体产生干扰和污染，并且安装难度高。非接触式流量计是借助超声波、射线、激光等发展起来的较为先进的测量仪表，可以克服接触式流量计存在的诸多问题，并能延长仪器使用寿命，但也存在测量成本高、技术尚未成熟等一些问题。

## 1.2.2 流量检测原理及系统的最新发展

近年来，随着多学科技术水平的不断进步，流量检测技术也有了长足的发展，一方面表现在各种新颖、先进的流量测量原理的不断涌现，另一方面还表现在流量监测系统规模的不断扩大和功能的日益强大。

### 1.2.2.1 新型流量检测方法

工业自动化程度的不断提高，对各类流体流量精确检测和有效控制的需求有增无减，而另一方面，微电子技术的飞速发展和各基础学科研究的不断深入也为流量检测技术的发展提供了良好的契机，涌现了一批先进的流量检测方法，甚至有一些已接近实用阶段。

#### 一、超声波流量计

超声波是频率高于  $2 \times 10^4 \text{ Hz}$  的机械波，当其在流体介质中传播时，会加载上流体本身诸如流速等一些信息。超声波流量计就是依据超声波这一特性，实现对流体流速的测量。

按信号检测方法的不同，超声波流量计可分为传播速度差法、多普勒法、相关法、波束偏移法、旋涡法等，其中前三种较为常用<sup>[6]</sup>。传播速度差法又包括直接时差法、相差法和频差法，它们都是测量超声波脉冲顺水流和逆水流时速度之差来反映流体的流速，从而测出流量；多普勒法的基本原理是应用声波中的多普勒效应测得顺水流和逆水流的频差来反映流体的流速从而得出流量<sup>[7]</sup>；以上两种方法都涉及超声波在流体中的传播速度，而相关法流量测量的实质则是利用上、下游流体流动噪声的相关性，通过测出相关时间长度从而计算出流体的流速和流量<sup>[8]</sup>。

作为一种非接触式仪表，超声波流量计安装简便，可以避免对流体流动状态的破坏，不引入误差，无压损，测量精度高。同时，超声波流量计适用范围广，能够解决大管径、大流量、明渠、暗渠等测量困难的问题，也可测量食品、医学领域中腐蚀性、放射性介质等高要求流体的测量场合，并且测量过程测量进度和稳定性较高，不易受流体其它参数干扰，测量范围较宽<sup>[7,9]</sup>。

#### 二、科氏质量流量计

流体在振动管中流动时能产生与流体质量流量成正比的科里奥利力，科氏质量流量计

(Coriolis Mass Flowmeter, 简称 CMF) 正是利用这一原理制成的一种直接式质量流量计。

科氏质量流量计利用一个磁铁和线圈作为驱动装置保持测量管道幅度很小的持续振动, 流体流经振动管时, 振动系统的总质量发生变化, 从而改变了系统的固有振动频率, 因此, 流体的质量流量参数和密度参数被转换成时间变量和频率变量, 由转换器检测并处理。为了更好地提取流体质量流量信息, 振动管通常被设计成各种形状, 以放大科里奥利力的作用, 目前常见的管形有双 U 型、双 S 型、双  $\Omega$  型、双环型、单直管型、双直管型、单管多环型、单管双 Q 型和双 B 型等等<sup>[3, 10, 11]</sup>。

该流量计自 20 世纪 80 年代问世以来, 引起了世界各国的关注, 由于它实现了对流体质量流量的直接测量, 所以可以在石油、化工、食品、造纸、制药等行业中得到很好的应用, 但由于其技术及工艺条件的限制, 国际上只有少数国家能进行生产, 导致其商业化程度较低, 应用尚未普及。近年来, 基于有限元分析方法的数值模拟技术对科氏质量流量测量技术起到了很好的推动作用, 使科氏质量流量计的性能有了明显的提高<sup>[11-13]</sup>。

### 三、电磁流量计

根据法拉第电磁感应定律, 当运动导体在磁场中切割磁力线时, 其两端将产生感应电动势, 此感应电动势与通过闭合回路面积的磁通量变化率成正比。电磁流量计就是利用这一定律测量具有一定导电率的流体的体积流量<sup>[14]</sup>。

电磁流量计在结构上一般由电磁流量传感器和转换器两部分组成, 传感器安装在管道上检测流量信息, 而转换器将传感器的输出信号放大并转换成标准电信号。电磁流量传感器包含励磁系统, 其励磁方式对电磁流量计的工作性能有很大影响, 是其研究热点。励磁磁场的种类包括直流磁场、工频正弦波交流磁场和低频矩形磁场等, 随着励磁技术的发展, 又出现了三值低频矩形波励磁技术和双频矩形波励磁技术等, 使电磁传感器取得更好的应用效果<sup>[3]</sup>。

电磁流量计是 60 年代随着电子技术的发展而迅速发展起来并逐渐普及的, 其优点在于结构简单可靠、没有可动部分、几乎没有压力损失、量程范围极宽、响应速度快、线性好、耐腐蚀, 但其要求被测流体具有一定的导电率, 因此应用范围受到一定的限制, 并且电磁流量计运行过程容易受外界强磁场的干扰<sup>[15, 16]</sup>。

### 四、MEMS 流量计

自集成电路的持续高速发展之后, 在上世纪末, 另一场技术革命悄然兴起, 这就是微系统技术。功能结构的微纳米化带来的不仅仅是能源与原材料的节省, 而且导致多功能的高度集成和生产成本的大大降低, 它为诸多领域和技术提供了新的发展契机和研究思路, 传感检测技术就是其中之一<sup>[17]</sup>。

在传统的流量测量中, 大多使用接触式测量技术, 由于传感器介入流体部分较多, 不可避免地会改变流体流动状态, 并导致流体和固体之间的耦合效应, 降低流量测量精度。

将微纳米技术应用于流量传感器，可以减少其对流场的干扰，并使传感器具有质量惯性和热惯性小、响应速度高、易集成、低功耗和潜在的低成本等优点<sup>[18]</sup>。

MEMS 流量计根据其测量原理分为：热式(thermal)微流量计，差压式(differential pressure)微流量计，升力式(lift force)微流量计、流体振动式(fluid oscillatory)微流量计、科里奥利(Coriolis)微流量计及仿生(bionic)微流量计等<sup>[18]</sup>。热式微流量计是最早出现的微流量计，它包括热线式(hotwire)或传热式(heat transfer)两种，分别根据热量损失和分布状况与介质流体流量的关系来实现对流量的测量。而其它现有的非热式微流量计都是基于机械原理制成的，根据介质流体对微机械系统所产生的作用力大小与流量的关系进行测量<sup>[19-22]</sup>。由于热式微流量计不需要机械运动结构，可靠性更高，具有较大的研究意义，目前已有部分产品得到了应用。

### 1.2.2.2 流量检测技术的发展方向

随着多学科理论技术的发展和融入，流量计量应用领域不断拓宽，流量检测技术的发展趋势也将由此而发生系列变化<sup>[2; 5; 23]</sup>。

一、测量自动化、智能化、远程化。随着数字电子技术和计算机技术的发展，流量测量逐渐智能化，并通过网络技术实现远程检测。传感器的输出数字信号并通过现场总线传输，同时将微处理器和信号处理电路集成到传感芯片上，使传感器减少随机和系统误差、实现自动校准、自检报警和量程自动调节等功能。

二、多参数测量。将流量测量与温度测量、液位测量、压力测量等功能中的一种或多种合成一体，对流体各状态参数进行动态量值溯源，提高测量的准确性和可信度。

三、结构日趋微型化，安装日益简便。随着 MEMS 技术和多种新型测量原理的应用，流量计的结构日趋简单、微型，安装维护方式日益简便，以适应工业自动化程度的不断提高。

四、专用化、多元化。根据各类检测原理的特点和应用范围，开发各种特殊流量传感器，与测量经济性紧密相连，实现对超大流量、微小流量、高黏度、高温流体、多相流体、高低压气流的测量。

五、从单一数据采集向计量系统管理方向发展。计算机技术的发展和虚拟仪器思想的推广给流量计量系统管理创造了良好的条件，有利于实现对流量全过程、动态的中央调控和科学管理。

## 1.3 热式质量流量检测技术发展现状

热式质量流量检测技术是基于热力学原理的一类流量检测技术。利用该技术所设计的热式质量流量计 (Thermal Mass Flowmeter, 简称 TMF) 和科氏流量计一样，可以完成对流

体质量流量的直接测量。目前，它在工业生产控制，特别是气体流量测量中得到了非常广泛的应用<sup>[24]</sup>。

- 1、锅炉、裂解炉用燃料气质量流量测量控制；
- 2、石油化工、采油、火炬气质量流量测量；
- 3、燃烧炉用空气质量流量测量控制，燃汽轮机氢气质量流量和控制；
- 4、食品加工及饮料气体质量流量和控制；
- 5、水厂氯气质量流量控制；
- 6、生产半导体时高纯度气体质量流量测量；
- 7、催化剂、化学添加剂质量流量测量；
- 8、泵的保护控制、泵密封、润滑油池泄漏检测；
- 9、空调系统控制；
- 10、仪表用空气、工艺空气、氮气等质量流量测量。

目前，常见的热式质量流量计根据其利用的热力学原理的不同，大致可以分为热损失式 (anemometer/heat loss) 和热分布式 (calorimetric/thermotransfer) 两种。近年来逐渐兴起的微电子加工技术和 MEMS 技术对热式质量流量计起到了强有力的推动作用，一方面使上述两种热式流量计性能得以提高，拓宽了其应用范围，另一方面也产生了一种新的热式流量测量方法——热脉冲式流量计 (time of flight flowmeter)。

### 1.3.1 热损失式流量检测技术

最早应用热损失式流量检测技术的流量计是热线风速计，其诞生至今已有近百年的历史。1914年，克英 (King) 推导出无限长线在无限大流场中的热对流偏微分方程，并求解得到著名的 King 公式  $H = A + B\sqrt{U}$ ，即在无限大流场中发生强迫对流的无限长圆柱体的热耗散  $H$  与介质流速  $U$  的平方根成正比。这一公式奠定了热线风速计的理论基础。虽然 King 公式的成立条件在现实中是无法实现的，但对于热线风速计，其热线横截面直径远小于线长，因此可以近似地认为 King 公式是适用的<sup>[25, 26]</sup>。



图 1-1 热线探针的结构

热线风速计的探针结构如图 1-1 所示<sup>[25]</sup>。纤细的金属丝 (即热线) 焊在两根叉杆上，

叉杆另一端通过连接线与插接杆相连，连接线外加上保护罩，支杆与保护罩之间为绝缘填料。测量时，将热线垂直于流动方向放置在流场中并通以电流加热，在强迫对流的作用下，热线与流体产生热交换，因此，根据 King 公式，流速的变化可以被转换成电信号输出。考虑到敏感度、空间分辨率和强度的因素，热线材料一般选用钨丝、铂丝或镀铂钨丝。钨丝的电阻温度系数高、机械强度高，但容易氧化，而铂丝机械强度较差，镀铂钨丝则综合了前面两者的优点，具有较好的应用效果<sup>[27]</sup>。

热膜探头是六十年代后发展起来的另一种热损失式流量计传感元件。所谓热膜，就是有一定形状的热绝缘衬底上喷溅一层很薄的铂金膜或镍膜。热膜式流量计与热线式流量计的测量原理基本相同，但从热线到热膜的发展实际上是一个技术上的进步，热线探针本身存在难以克服的技术矛盾，为了更精确地测量某点流量，需要热线具有较高的空间分辨率，因此热线不能太长，而为了尽可能地满足 King 公式的适用条件，就必须缩小热线直径，这就增加了热线的易碎性，使之寿命缩短并难以应用到流速较高的测量场合，而热膜由于其衬底热传导率很低，同时又可以保持较小的长度直径比，因此解决了热线技术在空间分辨率和机械强度之间的矛盾，甚至可以将热膜流量计应用到液体流量测量中。

近二、三十年来，在热线流量测量技术基础上，出现了另一种电阻探头流量计，并得到广泛应用。其结构如图 1-2、1-3 所示<sup>[28]</sup>。这种流量计采用两支并排的铂电阻作为探头，其中一支不加热，用以测量流体环境温度，另一支铂电阻由独立加热器加热<sup>[29-31]</sup>或靠自身电阻发热<sup>[32-34]</sup>。当流场中流体流速为零时，近似地认为探头没有热耗损，此时两支铂电阻温差最大，当流体流速增大时，加热的铂电阻上部分热量被流体带走，两支铂电阻温差缩小，因此可以通过外接桥路检测得到流量信息。

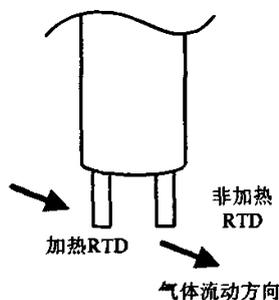


图 1-2 电阻探头的结构模型

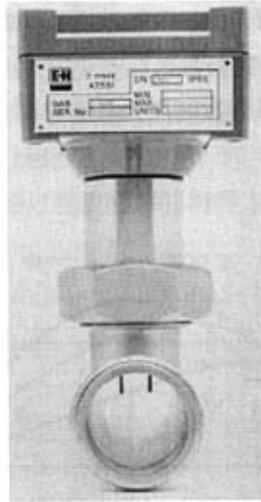


图 1-3 一种电阻式热流量计产品

在 MEMS 技术的推动下,近年来出现了一类热损失式微流量计,通过在微系统中搭建类似热线或热膜的结构来完成流量测量,提高流量计的灵敏度和分辨率。但由于其仍存在机械强度较差的问题,因此目前应用尚不多见,针对其机械强度的问题,有部分设计方案设计了微型的管道或屏蔽壳,作为一个旁路来测量流体流量并对感应部件起到保护的作用<sup>[20]</sup>。

在热损失式流量计中,对发热体的加热存在恒功率和恒温两种方式。恒功率加热方式是采用恒定的功率对铂电阻进行加热。当流体流速为零时,两支铂电阻之间的温度差最大,随着流体流速的上升,被加热的铂电阻热耗损增加,电阻间温差减小,通过测量温差的变化就可以得到流体的质量流量。恒温加热方式则是将热电阻加热到比环境温度高出一个恒定的数值,并保持这一温差不变。随着流体流速的上升,被加热的铂电阻温度降低,此时通过反馈电路调节加热电流(或电压)以保持其温差恒定,再通过检测变化的电流(或电压)来测得流体流量。由于恒温方式的实现难度低于恒功率方式,并具有热滞后效应小、动态响应宽的优点,所以其应用更早、更广。恒功率式气体质量流量计的优点是量程范围大、电阻较粗而不易受脏湿介质影响、可对环境温度进行补偿以及具有较强的耐高温性<sup>[35, 36]</sup>。哈尔滨工业大学的罗晶等人还提出了一种分段恒流的加热方式,即针对不同的流量区间采用不同的加热电流(功率),这样既可以使流量计具有较宽的量程,又保持其较高的灵敏度<sup>[37]</sup>。

### 1.3.2 热分布式流量检测技术

热分布式流量检测技术是另一种应用广泛的热式流量检测技术。与热损失式流量检测技术不同,它是根据流体流量对热源温度场分布的影响来测量流量的。利用该技术进行流

量测量时，将一热源置于流体管路中，在热源两侧沿管路轴向对称放置两个温度传感器，用于测量热源上下游的温度  $T_1$ 、 $T_2$ 。热分布式流量计的表面温度分布如图 1-4 所示，当流量为零时，两侧沿管路轴向的温度场分布是以热源对称的，即  $T_1 = T_2$ 。当流体流动时，部分热量被流体带向下游，致使温度场分布不再对称，即  $T_1 < T_2$ ，并且流体质量流量  $Q$  与  $\Delta T = T_2 - T_1$  具有一定的函数关系，通过温度传感器测得  $\Delta T$ ，即可求出  $Q$ 。

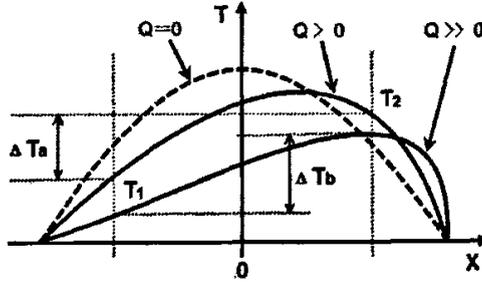


图 1-4 温度分布示意图

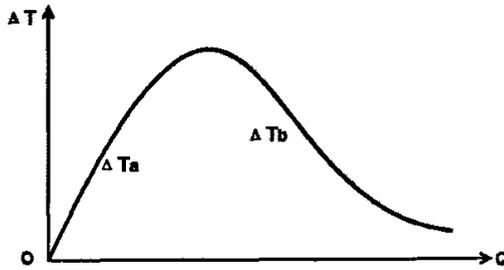


图 1-5 温差与流量的关系示意图

温差与流量的关系如图 1-5 所示。在加热功率稳定的情况下，当流量小于某一极限值时，热源中只有较小部分热量被流体介质带至下游，温差 ( $\Delta T_a$ ) 随流量的增大而增大；而当流量逐渐增大至超过极限值后，热源的较大部分热量通过流体传递到下游，温差 ( $\Delta T_b$ ) 随流量的增大而减小，此时， $T_1$  近似于环境温度，当流量继续增大后，热源的绝大部分热量均被流体带走，流量计中的温度传感器测得的  $T_1$ 、 $T_2$  值都近似于环境温度<sup>[3]</sup>。

托马斯流量计<sup>[3; 38; 39]</sup>是最早出现的热分布式质量流量计，由美国的托马斯于上世纪初提出。托马斯流量计是一种接触式流量计，它由一个加热单元和一个测温单元组成，加热单元通过放置在气体管路中的电热丝对流体进行加热，在电热丝上下游分别放置一个热敏电阻，电阻通过测温单元的桥路将上下游的温差转换为电压信号输出，达到测量流体流量的目的。托马斯流量计通常用于测量较大的流体流量，即其工作区间位于图 1-5 中所示的后半段 ( $\Delta T_b$ )。与上述的热损失式流量计类似，托马斯流量计也有恒温 and 恒功率两种加热

方式,其中,以恒温方式应用更多。

上世纪五十年代,人们在托马斯流量计的基础上,提出了一种非接触性的质量流量计——边界层流量计<sup>[3, 38]</sup>。这种流量计在测量管外侧通过一个电加热线圈对管内流体进行加热。此时,被测流体不管处于层流状态还是湍流状态,都会在管壁内部形成一层流动边界层。边界层中的热传递可以近似地认为只有导热方式,而在管道中间部分温度几乎相同,即管壁外侧和管内的温度梯度基本产生于边界层中。因此,可以根据导热原理,通过测量温差 $\Delta T$ 来获得管中的流体流量。为了在管外测量 $\Delta T$ ,需要在管外放置两个测温电阻,其中一个安装在远离加热线圈的上游位置,其测量温度值近似于管内中心温度,而另一个电阻安装在加热线圈附近下游位置,以测量管壁温度(即流体边界层外侧温度)。将这两个测温电阻连接到惠斯登电桥中就可以测量温差 $\Delta T$ 从而求得流体流量。

以上托马斯流量计和边界层流量计都是工作在图 1-5 所示的流量-温差关系曲线的后半段,用于大流量的测量。近二、三十年来,出现了另一种用于测量微小流量的管热式流量计。这种流量计工作在流量-温差关系曲线的前半段,即温差随流量的增大而增大。由于这种流量计要求被测流量不能超过极限值,因此对于大流量场合,可将流量计放置在管道的旁路上,必要时可通过在主管道中设置气阻件调节主管道和旁路管道的流量比,使其在一定的测量量程内保持恒定。这种流量计有两种设计结构:其中一种是采用独立的加热器透过管壁对被测管道内的流体进行加热,同时在加热器上下游对称位置安装测温电阻,通过这两个电阻测量上下游的温差从而获取流体流量<sup>[38]</sup>;另一种方式是将两个具有较高温度系数的电阻线圈缠绕在测量管道上,并通过另外两个电阻组成电桥,测量时,电阻线圈既作为加热器对流体进行加热,又是温度传感器测量流体温度,当流体流量为零时,测量管内温度场沿轴向对称分布,温差为零,当流体流动时,上游温度下降,下游温度上升,形成与流量相关的温差信号,实现测量<sup>[3]</sup>。

近年来,快速发展的 MEMS 技术为热分布式流量测量技术提供了很好的发展契机和研究思路,目前,在基于 MEMS 技术的热式微流量计中,采用热分布式测量原理的产品占据了绝大多数的比例。这些热分布式微流量计中,不同的产品其结构设计有所不同,大致的方案是通过各一定的材料和工艺在硅衬底基座上加工出一个微型发热器和两个感温热堆,通过热堆测量流体经过时发热器上下游的温度差来测量流体流量。目前,有部分微流量计除了能测量流体流量外,还通过在发热单元四周分布多个热堆从而在二维平面上实现对流体流动方向的测量<sup>[20, 40]</sup>。

### 1.3.3 基于 MEMS 技术的热脉冲式流量检测技术

热脉冲式流量检测技术是随着 MEMS 技术在热式流量测量中的应用而发展起来的一种有别于上述两种原理的检测技术。基于这种原理的流量计包括一个微型热源和两个温度传

感器, 测量时, 热源持续地产生一个热脉冲, 热脉冲从热源处传递到下游传感器的时间是与流体流量相关的, 通过测量这一脉冲延迟时间就可以得到流体的流量<sup>[20]</sup>。

热脉冲式微流量计在结构上与热分布式微流量计在结构上很大的相似之处, 目前也有研究人员提出将两者合二为一的混合式流量测量方法, 在扩大流量计的量程范围的同时又保证了较高的测量分辨率<sup>[41-43]</sup>。

目前, 上述三种热式流量检测技术都在不断地完善和发展, 其中, 基于 MEMS 技术和热分布式流量检测技术的流量计因为具有较高的灵敏度和对流体流向的判断能力, 尤其受到了广泛的关注。

## 1.4 远程监测系统的发展与应用

监测系统的作用是通过一系列的传感手段对环境或各类设备的相关物理量进行检测, 并加以汇总融合, 从而形成可以表征检测对象某些状态的信息, 以达到工程人员对环境 and 设备进行监控管理的目的。

早期的监测系统是由大量的分立仪表构成的, 各仪表之间相互独立, 单个仪表负责对监测对象的某一局部的某个状态物理量进行检测, 并通过仪表中简单的指针或指示器将测得的数据输出。这样的系统中, 仪表实现的是各类常规物理量到可视化数据的转换过程, 而采集数据的汇总融合工作必须依靠人工完成, 其实时性、准确性都很难得到保证, 效率低下, 只适合针对中小型的集中设备。更严格的讲, 这样由分立仪表构成的监测装置并未构成真正具有整体性的监测系统。

自上世纪中后期以来, 计算机技术得到快速的发展, 并逐渐渗透到各个应用领域当中, 基于计算机技术的监测技术以及“虚拟仪器”的概念也在这种背景下应运而生。在监测现场, 计算机取代现场人员完成了大部分的数据采集汇总工作, 并且使采集数据的还原重现具有了更友好、更丰富的人机界面, 并且结合计算机强大的运算分析能力, 可以在监测数据的基础上做一定的诊断和分析功能, 真正达到监测的目的。但是, 这样的监测设备往往在系统的层次上仍然是分立的, 也即是说, 监测系统仍然独立地完成其视野内局部区域的监测工作, 而各台监测系统之间并没有真正的通讯, 或者仍然需要依靠人为的手段进行更高层次的集中。

现场总线是 20 世纪 80 年代中期逐渐发展起来的工业自动化通讯技术, 它为工业生产过程现场控制设备之间及其与控制管理层之间建立了开放通讯网络, 为打破自动化监测系统的“信息孤岛”创造了条件, 适应了工业测控系统向分散化、网络化和智能化发展的方向, 使包括流量监测在内的各种监测任务向远程化发展成为可能, 因此也在很大程度上拓展了监测系统的应用范围和应用规模<sup>[44]</sup>。但是, 随着远程监测系统网络覆盖面的不断扩大,

基于物理连线的现场总线技术仍然存在系统建设成本高、难度大的缺点，并且难以用于对移动目标的状态监测。在此背景下，新一代基于 GPRS 的无线通讯技术逐渐兴起并在远程监测系统中得到越来越广泛的应用，它充分利用了现有的电信资源，在控制成本的同时满足了流量等监测任务向城际乃至更大范围发展的需求，并将分布于各个地方的移动目标纳入监测对象当中。智能变送器正是在传统变送器的基础上，融合了现场总线技术、GPRS 技术、传感技术和微电子数字处理技术等高新技术而产生的新一代变送器，具有数字通讯、自校准、功能自设定和自诊断的功能，更好地满足了远程监测的要求，其代表性的产品是罗斯蒙特的 3051S 变送器、ABB 的 2600T265 系列变送器、横河的 EJX 变送器等。

但是，目前远程监测系统的研究和发展仍主要集中在通讯方式的改进上，随着监测规模的不断扩大，监测数据和节点资源也迅速膨胀，如何有效地对这些信息资源进行管理成为另一个急需解决的问题。作为分布式人工智能研究的一个重要分支，多 Agent 系统理论为解决这一问题提供了行之有效的解决方案和理论依据，它将复杂的软硬件系统建造成小的、彼此相互通信及协调的、易于管理的系统，使监测系统在保持可扩展性的同时增加了系统的有序化和稳定性<sup>[45]</sup>。

流量监测是监测应用中的一个重要内容，随着工农业现代化与能源科技的发展，各行业流体管路系统的规模不断扩大，监测任务难度不断提高，水资源和油气资源的跨省市运输更向流量远程监测技术提出了新的要求。与之相适应的，流量监测技术也有了长足的进步，目前，各类远程无线抄表系统得到了越来越广泛的应用，针对移动目标的流量监测也成为可能，但同时也可以看到，流量监测技术的发展在一定程度上仍滞后于相关的计算机与网络技术，后者的很多优秀思想和技术尚未在流量监测系统设计中得到推广和应用，仍有待研究人员的进一步研究<sup>[46]</sup>。

## 1.5 本论文课题背景与研究内容

流体流量监测是工业测控领域中的一项重要内容和研究热点。飞速发展的现代工业对流量计的测量范围、响应速度和检测精度等方面都提出了越来越高的要求；不断进步的 MEMS 技术和计算机技术又促进了流体流量监测技术的进一步发展和提升，使其更好地满足了流量监测需求，具有重要的发展前景和研究意义。

本文是在杭州市科技创新项目“基于 MEMS 技术的嵌入式智能质量流量计”和国家自然科学基金资助项目“基于温度场模型及特征提取的大型变压器远程诊断方法与技术的研究”（编号：50575095）的基础上，就基于 MEMS 的热式流量检测方法和系统展开研究，建立了热分布式微流量计在恒功率模式和恒温模式下的数学模型，并将其应用于流量计响应特性和误差原因等方面的分析。在此基础上，本文提出了基于虚拟仪器技术和多 Agent 系统技术的流量监测系统框架模型，并对其中软件空间的通讯系统和运行控制等关键问题

进行了分析和设计，为提高流量计检测性能、构建大规模流量监测系统提供了理论基础和实现方法。论文的主要研究内容如下：

第一章阐述了流量检测技术的研究的意义、主要分类方法和发展趋势，论述了热损失式、热分布式和热脉冲式等三种热式流量检测技术的研究现状及 MEMS 技术在热式流量计中的应用，分析了远程流量监测系统的应用现状和发展趋势，最后结合课题提出了本论文的研究内容，给出了论文的总体结构。

第二章引入传热学理论，分析了基于 MEMS 的热分布式流量检测原理，建立了流量计的传热微分方程，并根据其在恒功率模式和恒温模式下不同的边界条件对微分方程进行求解，得出两种模式下的数学模型，为热分布式微流量计的研究与设计提供了理论基础。最后通过有限元仿真分析软件 ANSYS 对模型进行了验证，并分析模型的误差来源。

第三章在数学模型基础上分析了基于 MEMS 技术的热分布式流量计的响应特性和灵敏度，探讨了 MEMS 流量计结构尺寸参数和加工误差对其响应特性和测量精度的影响，最后对微流量传感器进行了总体设计。

第四章分析了流量监测系统的基本构成和应用需求，分析了基于 GPRS 的无线通讯实现方法、基于虚拟仪器技术和多 Agent 系统的分布式流量监测系统开发技术，设计了基于 Agent 和空间概念的流量监测系统总体框架。

第五章对流量监测系统总体框架中的软件空间进行了总体设计，根据多 Agent 系统理论和 LabVIEW 开发平台的特点分析和研究了其中较为关键的通讯子系统和运行机制问题，设计实现了流量监测系统软件空间中的通讯基础功能和运行控制功能，最后提出了基于配置表的系统组态方式。

第六章对全文研究工作进行了总结，并结合课题对以后工作进行了展望。

本文总体框架如图 1-6 所示。

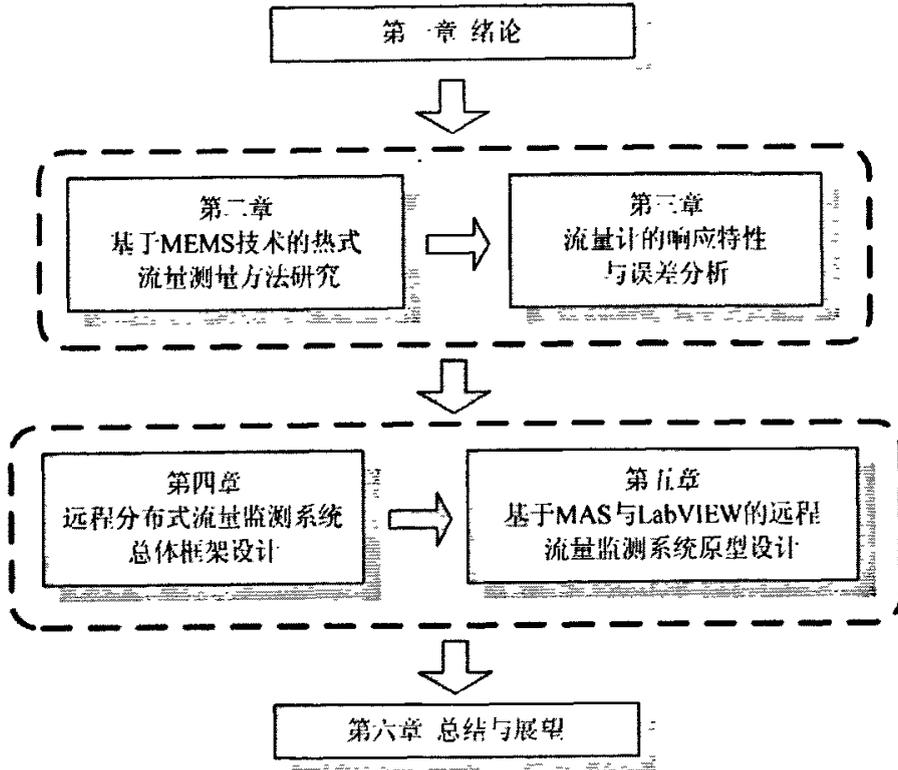


图 1-6 论文总体结构

## 1.6 本章小结

本章主要阐述了流量检测的研究意义，介绍了流量检测技术的主要分类方法和发展趋势；介绍了热式流量检测技术的三种类型及其研究现状；分析了远程监测系统的应用现状和发展趋势及其在流量监测中的应用；最后结合课题提出了本论文的研究内容，给出了论文的总体结构安排。

## 第二章 基于 MEMS 技术的热式流量测量方法研究

### 内容提要

本章以传热学基本理论为基础,通过对热分布式微流量计的热传递规律进行分析,建立了传热微分方程;根据流量计在恒功率模式和恒温模式下不同的边界条件对微分方程进行求解,得出了这两种模式下的数学模型;最后通过热分布式微流量计的仿真研究,对模型进行了验证和误差分析。

### 2.1 引言

热量的传递是自然界和生活生产过程中极为普遍的一种能量转移过程,而传热学是一门研究热量传递规律的科学。根据热力学第二定律,凡是有温差的地方,就有热量自发地从高温物体传向低温物体,或从物体的高温部分传向低温部分<sup>[47]</sup>。

热式流量计正是基于热力学原理实现对流体流速或流量的测量,其实质是利用被测流体在流动时与热源之间发生的热交换与流体本身流速或流量之间的关系,通过测量热量的传递、转移和平衡来求得流体的流速或流量。

在热分布式微流量计工作过程中,传感器附近的流体微小空间内将产生一定的温差。在流体静止时,这个空间内的温度场以加热单位为中心正态分布,当流体流动时,温度场的分布将相应发生偏移,并且流量越大,偏移量也越大,根据这个关系,通过检测温度场的分布情况,即可实现流体流量的测量。

### 2.2 传热学基本理论

#### 2.2.1 热量传递的基本方式

热量传递是一类复杂的现象,通常分为三种基本方式,即导热、热对流和热辐射<sup>[47]</sup>。日常生活生产中所发生的各种热量传递现象,往往不是由某种方式单独作用的,而是由这三种基本方式按照不同的主次关系组合而成<sup>[48]</sup>。

导热又称为热传导(Heat conduction),是指相互接触的物体之间或同一物体内部不同部分之间不发生相对位移时,由于温度不同而引起的依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递现象<sup>[47]</sup>。从微观角度来讲,气体、液体、导电固体和非导电固体的导热机理是有所区别的:气体中,导热是气体分子不规则热运动时相互碰撞的结果;导电固体中,导热是由晶格间运动的自由电子起主要作用的;在非导电固体中,导热是通过晶格结构的振动来实现的;至于液体中的导热机理目前尚无定论<sup>[48]</sup>。

热对流(Convection)是流体中温度不同的各部分,或温度不同的各流体之间,由于宏观运动而发生相对位移、相互掺混,从而把热量由一处传递到另一处的现象<sup>[47]</sup>。对流仅能

发生在流体中，而且在对流过程中，由于流体分子同时也在进行着不规则的热运动，因此不可避免地伴随着导热的现象。在工程上，通常将流体流过一个固体壁面时由于温度不同而引起的热量传递过程称为对流换热（Convection heat transfer），它可以认为是导热和热对流综合作用的结果。虽然对流换热并不是基本传热方式，但其工程意义比热对流更大。对流换热有多种类型：根据流体是否存在相变，通常把对流换热分为无相变和有相变两类。在无相变对流换热中，又根据引起流体的原因，将其分为自然对流和强制对流两个子类。自然对流是由于流体各部分的温度不同造成密度差，产生浮升力或沉降力而引起的；而强制对流则是由水泵、风机等外部动力源或其它压差作用而引起的<sup>[48]</sup>。

热辐射（Thermal radiation）是指由于温度的原因而发出的电磁波辐射，或者说是物体由于温度的原因转化其本身热力学能而向外传递辐射能的过程<sup>[47]</sup>。在自然界中，各个物体都不停地在向外界环境物体发出辐射，同时又不断地吸收和反射外界环境物体发出的辐射。物体的辐射和吸收的能力取决于多种因素，物体的温度越高、辐射能力越强，而若物体的种类不同、表面状况不同，其辐射能力也各不相同。辐射与吸收、反射过程的综合结果就造成了以辐射方式进行的物体间的热量传递，称为辐射换热。与前面的导热换热和对流换热不同，进行辐射换热的物体间不需要直接接触，并且可以没有中间介质，即可以在真空中进行，这是它区别于导热和对流换热的基本特点。除此之外，辐射换热过程中，不仅产生了能量的转移，而且还伴有能量形式的转换过程，即从热能转换为辐射能，在从辐射能转换为热能的过程，另外，辐射换热发生时，不仅高温物体向低温物体辐射能量，低温物体也同时向高温物体辐射能量<sup>[48]</sup>。

## 2.2.2 导热

### 2.2.2.1 基本概念

#### （1）温度场与热流密度

根据连续体的假设，在物体内部，其温度分布是连续的，像重力场、速度场一样，存在一个温度场，它是各时刻物体中各点温度分布的总称。根据温度与时间的相关与否，温度场可以分为稳态温度场和非稳态温度场，前者温度不随时间变化，而后者则相反。根据温度与空间各维的相关与否，温度场又有零维、一维、二维、三维之分，零维温度场与空间无关，一维温度场只在一个空间方向上变化，依此类推。温度场通常以等温面或等温线表示，等温面是指某一瞬间温度相同的点连接起来所构成的面，在二维空间中则表现为等温线<sup>[47]</sup>。

热流密度是指单位时间内通过单位截面面积的热量，单位为  $W/m^2$ 。由于导热过程发生的首要条件是导热双方物体必须存在温差，因此，通过温度场某点的最大热流密度的方向与温度场的等温线和等温面相垂直。

### (2) 稳态导热与非稳态导热

物体中各点温度不随时间变化的导热过程称为稳态导热, 相反, 若温度随时间变化, 则称为非稳态导热<sup>[47]</sup>。

在生产过程中, 当热力设备处于正常稳定的运行状态时, 其温度场可认为是稳态的, 物体各点的导热系数也不随时间变化, 这是稳态导热的基本特点<sup>[48]</sup>。而非稳态导热常发生在设备启停和变工况运行或受非稳态加热冷却的过程中。

### (3) 温度梯度

在物体温度场等温面或等温线法线方向上, 温度的变化率称为温度梯度。它是温度在垂直于等温面或等温线并与热流密度矢量相反方向上的方向导数, 也就是在这一方向上温度增量  $\Delta t$  与法向距离  $\Delta n$  比值的极限, 记为  $\text{grad } t$ , 即

$$\text{grad } t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n} \quad [\text{K/m}] \quad (2-1)$$

由式 (2-1) 可以看出, 温度场中某处的等温面或等温线的疏密程度反映了温度梯度的大小。

### (4) 导热系数与热扩散率

导热系数反映物体导热能力的大小, 是物体的一个重要的热物性参数。数值上, 它等于在单位温度梯度作用下物体内所产生的热流密度矢量的模, 即

$$\lambda = - \frac{q}{\frac{\partial t}{\partial n}} \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \quad (2-2)$$

由于温度梯度的方向与热流密度  $q$  方向相反, 式 (2-2) 中负号用于保证导热系数  $\lambda$  取正值。

导热系数的数值与物体的材料、种类、温度、压力、湿度和密度等多个因素有关。对于各向同性材料的物体, 热导率在各个方向是相同的, 而各向异性材料, 如石英、木材、叠层塑料板、叠层金属板等, 其导热系数随方向而变化。在物体的三态中, 一般来说, 金属的导热系数最高, 液体次之, 气体最低, 而非金属固体的导热系数变化范围很大<sup>[48]</sup>。在物体种类确定的情况下, 其导热系数主要取决于温度和压力, 而且在一般工程应用当中, 通常忽略压力的影响, 只关注温度因素。实验表明, 大多数物体的导热系数与温度近似成线性关系, 但由于不同物态的物体导热机理也不同, 所以其对温度的反应也有所不同。金属固体和液体的导热系数一般随温度的升高而减小, 而合金材料和非金属固体的导热系数一般随温度的升高而增大<sup>[47]</sup>。

热扩散率又称导温系数, 它反映物体内部各部分温度趋向于均匀一致的能力强弱, 也即

是材料传播温度变化能力的强弱，它是研究导热过程动态特性的重要物理量<sup>[48]</sup>。

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (2-3)$$

式(2-3)中， $\lambda$ 为材料导热系数， $\rho$ 为材料密度，而 $c$ 为比热容。如前所述， $\lambda$ 反映材料的导热能力， $\lambda$ 越大，在相同温度梯度下物体可以传导更多的热量。而 $\rho c$ 是单位体积的物体在温度升高 $1^\circ\text{C}$ 时所需的热量，换言之，它反映了导热过程沿途物质的储热能力， $\rho c$ 越小，温度升高时被吸收的热量越少，因此有更多的剩余热量可以继续向物体内部传递，使物体各点更快趋于环境温度<sup>[48]</sup>。

### 2.2.2.2 傅里叶定律

1822年，法国数学家傅里叶(Fourier)在实验研究基础上，发现导热基本规律——傅里叶定律。他通过实验和分析指出，在导热过程中，单位时间内通过(各向同性材料的)物体截面所传递的热量，正比于垂直截面方向上的温度变化率，换言之，垂直导过等温面的热流密度与该处的温度梯度成正比且方向相反，并且比例系数就是导热系数 $\lambda$ ，即

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}t = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \vec{n} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (2-4)$$

根据傅里叶定律，一旦物体中的温度分布已知，就能求得该物体各点的热流密度和热流量分布，因此求解导热问题的关键在于获得导热物体中的温度场，这也是导热理论的首要任务<sup>[48]</sup>。

## 2.2.3 对流换热

### 2.2.3.1 对流换热的影响因素

由于对流换热是由流体流动而与固体壁面产生相对位移而引起的热量传递过程，所以其影响因素可以归结为影响流体流动的因素和影响流体内部热量传递的因素两类<sup>[47; 48]</sup>。

#### (一) 流体换热过程有无相变

流体在由液态变为气态或从气体变为液态的相变过程中，会吸收或放出相变热(潜热)，在发生相变的对流换热过程中，潜热的释放和吸收常常其主要作用，同时，相变过程还伴有强烈的流体扰动，因此其对流换热强度一般大于无相变过程。

#### (二) 流体流动的动力

如前所述，在无相变过程中，对流换热按其流动起因不同可分为自然对流换热和强制对流换热两类。流动起因不同，其速度场也有所不同，在强制对流过程中，流体发生较强的扰动，因此其换热强度一般大于自然对流。

### (三) 流体流动状态

流体流动状态有层流和紊流之分，层流时质点层间互不掺混，而紊流时质点互相碰撞混合，因此紊流过程的对流换热强度一般大于层流过程。

### (四) 换热面几何因素

换热面的几何因素包括换热面的形状、面积、与流体的相对位置和表面状况等。这些几何因素主要影响流体的流态和换热条件。

### (五) 流体物性

流体的热物理性质包括导热系数、密度、比热容、动力粘度等，这些物理参数不仅与流体类型有关，还受温度和压力影响。流体物性主要影响流体的流态和传热能力，并且其影响取决于不同物性之间的相对大小<sup>[48]</sup>。

#### 2.2.3.2 牛顿冷却公式

对流换热是一个复杂的物理过程，受上述多种因素综合影响，后人在总结牛顿关于对流换热观点的基础上，进一步研究得出计算对流换热量的基本公式，并命名为牛顿冷却公式，即

$$q = h\Delta t \quad (2-5)$$

式(2-5)中， $\Delta t$ 是固体壁面与流体之间的温差， $h$ 称为表面传热系数或对流换热系数，单位是  $W/(m^2 \cdot K)$ 。 $h$ 不仅取决于流体的宏观物理性质和固体壁面的几何因素，而且还和流体与固体壁面间的相对运动密度有关。实际上，从式(2-5)中可以看出，牛顿冷却公式并没有揭示各影响因素之间的具体关系，没有简化复制的对流换热计算过程，而是把其复杂性和计算难度集中到表面系数  $h$  上，若  $h$  能够确定，则可通过牛顿冷却公式算得对流换热量。因此， $h$  的确定是研究对流换热的基本任务之一<sup>[47; 48]</sup>。

当流体流过固体壁面时，在壁面处，黏性作用使流体和壁面间没有宏观相对位移，因此热量以导热的形式进行传递，故根据傅里叶公式有

$$q_x = -\lambda \cdot \text{grad}t \Big|_{y=0} \quad (2-6)$$

联立牛顿冷却公式(2-5)可得

$$h_x = -\frac{\lambda}{\Delta t} \text{grad}t \Big|_{y=0} \quad (2-7)$$

式(2-7)一般被称为对流换热的基本微分方程式，它将队列换热表面传热系数与流体的温度场联系起来，在导热系数和温差不变的情况下，贴壁处的温度梯度  $\text{grad}t$  决定了局部表面传热系数的大小和局部对流换热的强弱。

与流体力学中的速度边界层类似，固体壁面附近也存在一个温度边界层，或称为热边

界层。它与速度边界层密切相关，在紊流边界层底部或层流边界层中，流体保持层流状态，热量传递主要靠导热实现，温度梯度很大，而在主流区，流体中的温度变化率可视为零，因此对流换热主要发生在热边界层内，换热强度取决于其内温度梯度的强弱。

2.2.3.3 相似理论

如前所述，确定表面导热系数  $h$  是研究对流换热的一个基本任务。目前，获得  $h$  的方法大致有以下四种：分析法、实验法、比拟法和数值法，其中，通过实验来获得表面传热系数的计算式仍然是传热研究中的一个重要而可靠的手段，是主要的计算依据。但是，表面导热系数受众多影响因素综合作用，若要求通过改变一个参数值而固定其它参数来逐一确定各个参数的影响程度，最后综合得出表面导热系数的变化规律，那么其实验次数将十分庞大，在实际操作中是难以实现的。因此必须在相似原理的指导下进行实验，从而大大减少实验次数并得出具有一定通用性的结果<sup>[48]</sup>。

相似原理研究的是相似物理现象之间的关系，并且只适用于同类的物理现象之间，即这些现象是由相同形式并具有相同内容的微分方程式所描写。若两个物理现象彼此相似，则在相应的时刻和位置上与现象有关的物理量——对应成比例，这些比例系数称为相似倍数，它们之间存在一定的制约关系，这种制约关系进一步体现为无量纲的相似准则数，简称相似准则。通过相关分析，可得常见的与对流换热现象相关的相似准则数及其物理意义如表 2-1 所示<sup>[47; 48]</sup>。

表 2-1 常见相似准则数及其物理意义

相似准则	名称	表达式	物理意义
Nu	努塞尔数	$\frac{hx}{\lambda}$	壁面上流体的无量纲温度梯度，反映对流换热强弱。
Re	雷诺数	$\frac{v_f x}{\nu}$	惯性力与粘性力之比的一种度量，Re 越大，流体越容易呈现紊流状态，相反则越容易呈现层流状态。
Pr	普朗特数	$\frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$	动量与热量扩散能力的相对大小，表示流体物性对对流换热的影响程度。Pr 越小，意味着热扩散率越大，流体传播热扰动的能力越强，对流换热增强。
Gr	格拉晓夫数	$\frac{g \alpha_v \Delta t x^3}{\nu^2}$	浮升力与黏性力之比的一种度量，作用与 Re 相仿。Gr 越大，意味着浮升力越大，自然流动加强，越易呈现紊流状态；相反则越易呈现层流状态。

表 2-1 中， $x$  为特征尺寸，m； $v_f$  为流体的流动速度，m/s； $\mu$  是动力黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； $g$  为重力加速度， $\text{m/s}^2$ ； $\alpha_v$  是流体的体积膨胀系数， $1/\text{K}$ ；其它同前。

相似理论在传热学实验研究中起到了很好的指导作用：一方面，它是安排实验和整理实验数据的依据，可以使个别实验能够整个相似组；另一方面，它可以指导模化实验，通过模化实验来近似地研究实际装备中所进行的物理过程。

### 2.3 热分布式微流量计数学模型

依据 2.2 节所述的传热学基本理论，本节结合边界条件求解传热微分方程，得出传感器输出的温差信号与各影响因素的关系，建立热分布式微流量计的数学模型。

#### 2.3.1 传感器结构模型

图 2-1 给出了一维热分布式流量传感器的结构形式，它包括一个加热单元 H 和两个热电堆 TP-U 和 TP-D，热电堆沿流向 (X 方向) 分别分布于加热单元附近的上下游位置，并关于加热单元对称。加热单元在流量计微小空间内建立一个温度场，而上下游热电堆用于检测在流体流动影响下产生的温度场分布的非对称性。加热单元长度为  $2L$ ，热电堆与加热单元中心距为  $R$ 。

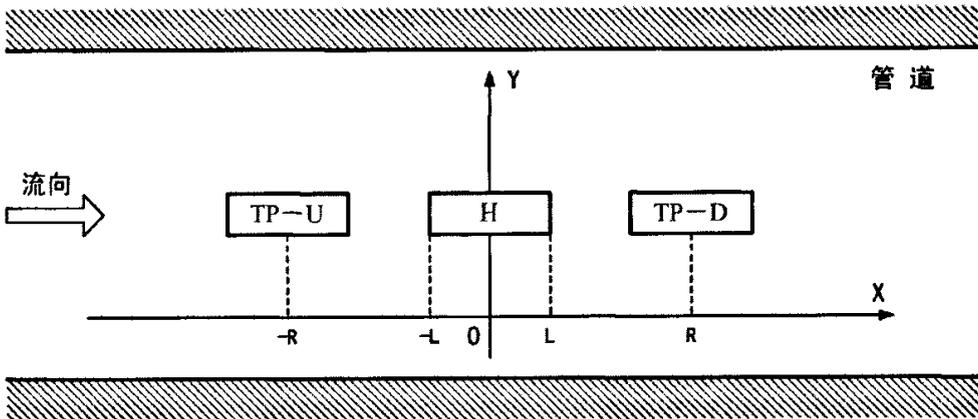


图 2-1 一维热分布式流量传感器结构模型示意图

#### 2.3.2 传热微分方程的建立

在如图 2-1 所示的一维热分布式流量传感器系统中，假设热传递现象只发生在 X、Y 坐标轴方向上，即温度场与垂直于 X-Y 平面的 Z 轴无关，故取热边界层中  $x$  到  $x+dx$  处微元体进行研究，如图 2-2 所示 ( $w$  为传感器宽度， $\delta$  为热边界层厚度)。

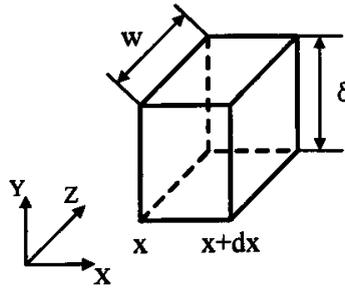


图 2-2 微元体示意图

对于该微元体，根据热力学第一定律，有：

$$Q = \Delta U + W \tag{2-8}$$

式 (2-8) 中， $Q$  为微元体传递的净热量， $\Delta U$  为微元体能量增量， $W$  为微元体向外膨胀所做的功。

微元体能量主要包括热力学能和动能两部分，在对流体流量的测量过程中，通常将温度近似地认为与时间无关，即温度场是稳态的，故其热力学能增量为零；而在一般工程问题中流体流速较低，故不考虑动能的变化，因此  $\Delta U=0$ ；同时，假设流体为不可压缩的牛顿流体，并考虑到流体流过微元体时位能及动能的变化均可忽略不计，故流体不做功， $W=0$ <sup>[49-51]</sup>。综上可得， $Q=0$ ，即微元体中输入的总热量与其向外传递的总热量相等。根据前面所述的传热学理论，热量的传递共包括导热、对流和辐射三种方式，通常情况下忽略热辐射的影响，故有：

$$Q = Q_h - Q_c - Q_f = 0 \tag{2-9}$$

式 (2-9) 中， $Q_h$  为流量传感器输入给微元体的热量， $Q_c$  为微元体因导热而损失的净热量， $Q_f$  为微元体因对流而损失的净热量<sup>[50-52]</sup>。

为了下文推导和表述的方便，取流体介质温度为基准，即所谓的流场中某点温度  $T$  实际上是指该点与流体主流区的温差。

### 2.3.2.1 微元体导热损失的净热量

在不考虑  $Z$  坐标轴方向上温差的情况下，微元体导热  $Q_c$  包括沿  $X$  轴方向的  $Q_{c-x}$  和沿  $Y$  轴方向的  $Q_{c-y}$  两部分<sup>[53; 54]</sup>。

#### (一) 沿 $Y$ 轴方向的导热 $Q_{c-y}$

传感器表面与流场主流区之间存在较大的温差，产生导热  $Q_{c-y}$ 。在实际中，在热边界层  $Y$  方向上，对于层流，其温度呈抛物线分布，而紊流温度呈幂函数分布，但本文为了简化计算，近似地认为温度是呈线性变化的<sup>[49]</sup>，如图 2-3 所示。

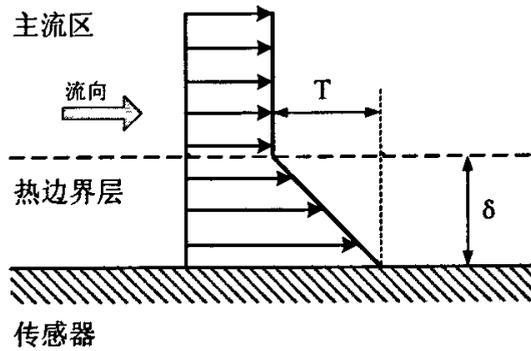


图 2-3 近似处理的热边界层温度分布示意图

因此，热边界层中温度梯度值

$$gradt = -\frac{T}{\delta} \tag{2-10}$$

所以，根据傅里叶定律，得

$$Q_{c-y} = q_y \cdot (w \cdot dx) \cdot d\tau = \left[ -\lambda \cdot \left( -\frac{T}{\delta} \right) \right] \cdot (w \cdot dx) \cdot d\tau = \frac{\lambda \cdot w}{\delta} \cdot T \cdot dx \cdot d\tau \tag{2-11}$$

(二) 沿 X 轴方向的导热  $Q_{c-x}$

设通过 x 处 Y-Z 截面的热流密度为  $q_x$ ，则在  $d\tau$  时间内，沿 X 轴方向从上游导入微元体的热量为

$$dQ_x = \int_0^\delta (q_x \cdot w \cdot d\tau) dy = \left( \int_0^\delta q_x dy \right) \cdot w \cdot d\tau \tag{2-12}$$

而微元体向下游导出的热量为

$$dQ_{x+\Delta x} = \left( \int_0^\delta q_{x+\Delta x} dy \right) \cdot w \cdot d\tau = \left[ \int_0^\delta \left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dy \right] \cdot w \cdot d\tau \tag{2-13}$$

所以，

$$Q_{c-x} = dQ_{x+\Delta x} - dQ_x = \left[ \int_0^\delta \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dy \right] \cdot w \cdot d\tau \tag{2-14}$$

根据前面所述的傅里叶定律，即式 (2-4)，有

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \tag{2-15}$$

将式 (2-15) 代入式 (2-14) 可得：

$$Q_{c-x} = \left[ \int_0^\delta (-\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cdot dx) dy \right] \cdot w \cdot d\tau = -\frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cdot dx \cdot w \cdot \delta \cdot d\tau \quad (2-16)$$

综上可得微元体导热损失的净热量

$$Q_c = Q_{c-x} + Q_{c-y} = -\left( \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cdot \delta - \frac{\lambda}{\delta} \cdot T \right) \cdot w \cdot dx \cdot d\tau \quad (2-17)$$

### 2.3.2.2 微元体热对流损失的净热量

设  $d\tau$  时间内, 有质量为  $m$  的流体流过微元体, 流体温度变化为  $\Delta T$ , 且该流体比热容为  $c$ , 则流动过程中, 流体带着的热量

$$Q_f = m \cdot c \cdot \Delta T \cdot d\tau \quad (2-18)$$

式 (2-18) 中:  $m = \rho \cdot v \cdot w \cdot \delta \quad (2-19)$

$$\Delta T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dx \quad (2-20)$$

式 (2-20) 中,  $\rho$  为流体密度,  $v$  为流速, 将式 (2-19) 和 (2-20) 代入式 (2-18) 可得

$$Q_f = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot \delta \cdot v \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot w \cdot dx \cdot d\tau \quad (2-21)$$

### 2.3.2.3 流量传感器输入的热量

流量传感器输入的热量包括两部分, 一部分是加热单元所产生的热量  $Q_{h-p}$ , 一部分是通过基座横隔膜传导的热量  $Q_{h-c}$  [53; 54]。

设流量传感器加热功率  $p(x, \tau)$ , 并且有

$$p(x, \tau) = \begin{cases} 0 & (x < -L) \\ P(\tau) & (-L \leq x \leq L) \\ 0 & (x > L) \end{cases} \quad (2-22)$$

在  $d\tau$  时间内,  $-L < x < L$  区段内  $dx$  长度的传感器微元体产生的热量

$$Q_{h-p} = \frac{P}{2L} \cdot dx \cdot d\tau \quad (2-23)$$

设传感器横隔膜的热导率为  $\lambda_s$ , 厚度为  $t_d$  (由于传感器加热单元和热电堆被平行地置于两片横隔膜之中, 故横隔膜总厚度为  $2 \cdot t_d$ ), 与式 (2-14) 类似, 可推导出

$$Q_{h-c} = -\lambda_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cdot dx \cdot w \cdot (2 \cdot t_d) \cdot d\tau \quad (2-24)$$

所以，综上所述可得

$$Q_h = Q_{h-p} + Q_{h-c} = \left( \frac{p}{2 \cdot L \cdot w} - 2 \cdot t_d \cdot \lambda_s \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \cdot w \cdot dx \cdot d\tau \quad (2-25)$$

### 2.3.2.4 传热微分方程

综上所述，将式(2-17)、(2-21)和(2-25)代入式(2-9)中，可得流量测量过程传热微分方程

$$\left( \frac{p}{2 \cdot L \cdot w} - 2 \cdot t_d \cdot \lambda_s \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \cdot w \cdot dx \cdot d\tau + \left( \frac{1}{2} \cdot \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cdot \delta - \frac{\lambda}{\delta} \cdot T \right) \cdot w \cdot dx \cdot d\tau - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot \delta \cdot v \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot w \cdot dx \cdot d\tau = 0 \quad (2-26)$$

整理可得

$$2 \cdot a \cdot \left( \frac{1}{4} - \frac{\lambda_s \cdot t_d}{\lambda \cdot \delta} \right) \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{2} \cdot v \cdot \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{a}{\delta^2} \cdot T = -\frac{p}{2 \cdot L \cdot w \cdot \delta \cdot \rho \cdot c} \quad (2-27)$$

为了表达的方便，令

$$K = \frac{1}{4} - \frac{\lambda_s \cdot t_d}{\lambda \cdot \delta} \quad (2-28)$$

显然，K为一无量纲数，令

$$T_H = \frac{p}{2 \cdot L \cdot w \cdot \delta \cdot \rho \cdot c} \quad (2-29)$$

从式(2-29)中可以看出， $T_H$ 的物理意义是在不存在其它任何热传递现象的情况下，单位时间内传感器加热单元使位于其上方热边界层内的流体介质升高的温度。将式(2-28)和(2-29)代入式(2-27)中，可使其简化为

$$2 \cdot a \cdot K \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{2} \cdot v \cdot \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{a}{\delta^2} \cdot T = -T_H \quad (2-30)$$

## 2.3.3 方程求解与边界条件

### 2.3.3.1 恒功率模式下的方程求解

在  $x > L$  和  $x < -L$  区段内， $p(x) = 0$ ，故  $T_H = 0$ ，方程式(2-30)为二阶常系数齐次线性

微分方程，可设解为

$$T = e^{n \cdot x} \quad (2-31)$$

并且有

$$\frac{\partial T}{\partial x} = n \cdot e^{n \cdot x} \quad (2-32)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = n^2 \cdot e^{n \cdot x} \quad (2-33)$$

将式 (2-31)、(2-32) 和 (2-33) 代入式 (2-30) 中，可得该二阶常系数齐次线性微分方程的辅助方程

$$2 \cdot a \cdot K \cdot n^2 - \frac{1}{2} \cdot v \cdot n - \frac{a}{\delta^2} = 0 \quad (2-34)$$

求解该方程可得两个特征根

$$n_1 = \frac{v + \sqrt{v^2 + \frac{32a^2K}{\delta^2}}}{8 \cdot a \cdot K} \quad (2-35)$$

$$n_2 = \frac{v - \sqrt{v^2 + \frac{32a^2K}{\delta^2}}}{8 \cdot a \cdot K} \quad (2-36)$$

由于  $n_1 \neq n_2$ ，故可得在  $x < -L$  和  $x > L$  区间内方程式 (2-30) 的通解为

$$T = A \cdot e^{n_1 \cdot x} + B \cdot e^{n_2 \cdot x} \quad (2-37)$$

式 (2-37) 中，常数项 A 和 B 在  $x < -L$  和  $x > L$  两个区间是各不相同的，取决于流体和微分方程的边界条件。

在  $-L \leq x \leq L$  区间内，在恒功率模式下， $p(x) = P$ ，故  $T_H$  也为常数项，方程式 (2-30) 为二阶常系数非齐次线性微分方程，可采用待定系数叠加法<sup>[55]</sup>进行求解。式 (2-37) 称为该非齐次微分方程的余函数  $T_C$ ，并且由于  $T_H$  为常数项，故可假设该非齐次微分方程特解  $T_P$  的形式也是一个常数，将  $T_P$  代入方程式 (2-30) 中，可得

$$-\frac{a}{\delta^2} \cdot T_P = -T_H \quad (2-38)$$

故可解得

$$T_p = \frac{\delta^2}{a} T_H = \frac{P \cdot \delta}{2 \cdot L \cdot w \cdot \lambda} \quad (2-39)$$

该特解  $T_p$  的物理意义是，在假设不存在其它任何热传递现象的情况下，单位时间内传感器加热单元发热量与其沿表面法线方向向管道流体传导的热量相平衡时传感器与流体间的温差。

所以，在  $-L \leq x \leq L$  区间内，方程式 (2-30) 的通解是

$$T = A \cdot e^{n_1 x} + B \cdot e^{n_2 x} + T_p \quad (2-40)$$

综上式 (2-37) 和 (2-40)，可得

$$T = \begin{cases} C_1 \cdot e^{n_1 x} + C_2 \cdot e^{n_2 x} & x < -L \\ C_3 \cdot e^{n_1 x} + C_4 \cdot e^{n_2 x} + T_p & -L \leq x \leq L \\ C_5 \cdot e^{n_1 x} + C_6 \cdot e^{n_2 x} & x > L \end{cases} \quad (2-41)$$

式 (2-41) 中， $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$  和  $C_6$  是待定常数项。

要使方程式 (2-30) 具有唯一解，必须结合边界条件进行约束，在恒功率模式下，边界条件包括两组，一组是当  $x$  趋于无穷大时，该点的温度等于环境温度；另一组是在加热单元边缘，即  $x = \pm L$  处，温度值及其导数是连续的<sup>[54]</sup>。

由于  $\lim_{x \rightarrow +\infty} e^x = +\infty$  ,  $\lim_{x \rightarrow +\infty} e^{-x} = 0$  (2-42)

并且  $n_1 > 0$ ,  $n_2 < 0$ ，所以，根据第一组边界条件

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} (C_1 \cdot e^{n_1 x} + C_2 \cdot e^{n_2 x}) = 0 \quad (2-43)$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} (C_5 \cdot e^{n_1 x} + C_6 \cdot e^{n_2 x}) = 0 \quad (2-44)$$

可得  $C_2 = C_5 = 0$  (2-45)

即  $x < -L$ :  $T = C_1 \cdot e^{n_1 x}$  (2-46)

$x > L$ :  $T = C_6 \cdot e^{n_2 x}$  (2-47)

所以，分别对式 (2-41)、(2-46) 和 (2-47) 进行求导，可得

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \begin{cases} C_1 \cdot n_1 \cdot e^{n_1 x} & x < -L \\ C_3 \cdot n_1 \cdot e^{n_1 x} + C_4 \cdot n_2 \cdot e^{n_2 x} & -L \leq x \leq L \\ C_6 \cdot n_2 \cdot e^{n_2 x} & x > L \end{cases} \quad (2-48)$$

在  $x = -L$  处，根据第二组边界条件，有

$$C_1 \cdot e^{n_1(-L)} = C_3 \cdot e^{n_1(-L)} + C_4 \cdot e^{n_2(-L)} + T_p \quad (2-49)$$

$$C_1 \cdot n_1 \cdot e^{n_1(-L)} = C_3 \cdot n_1 \cdot e^{n_1(-L)} + C_4 \cdot n_2 \cdot e^{n_2(-L)} \quad (2-50)$$

联立方程 (2-49) 和 (2-50) 可解得

$$C_4 = \frac{n_1}{n_2 - n_1} \cdot T_p \cdot e^{n_2 \cdot L} \quad (2-51)$$

同理, 在  $x=L$  处, 有

$$C_3 \cdot e^{n_1 \cdot L} + C_4 \cdot e^{n_2 \cdot L} + T_p = C_6 \cdot e^{n_2 \cdot L} \quad (2-52)$$

$$C_3 \cdot n_1 \cdot e^{n_1 \cdot L} + C_4 \cdot n_2 \cdot e^{n_2 \cdot L} = C_6 \cdot n_2 \cdot e^{n_2 \cdot L} \quad (2-53)$$

联立方程 (2-49) 和 (2-50) 可解得

$$C_3 = -\frac{n_2}{n_2 - n_1} \cdot T_p \cdot e^{-n_1 \cdot L} \quad (2-54)$$

将式 (2-51) 和 (2-54) 代入式 (2-50) 和 (2-53) 中可得

$$C_1 = \frac{n_2}{n_2 - n_1} \cdot T_p \cdot (e^{n_1 \cdot L} - e^{-n_1 \cdot L}) \quad (2-55)$$

$$C_6 = \frac{n_1}{n_2 - n_1} \cdot T_p \cdot (e^{n_2 \cdot L} - e^{-n_2 \cdot L}) \quad (2-56)$$

所以, 综上推导整理可得, 在恒功率模式下,

$$T = \begin{cases} \frac{T_p}{n_2 - n_1} \cdot n_2 \cdot (e^{n_1(x+L)} - e^{n_1(x-L)}) & x < -L \\ \frac{T_p}{n_2 - n_1} \cdot [n_1 \cdot (e^{n_2(x+L)} - 1) - n_2 \cdot (e^{n_1(x-L)} - 1)] & -L \leq x \leq L \\ \frac{T_p}{n_2 - n_1} \cdot n_1 \cdot (e^{n_2(x+L)} - e^{n_2(x-L)}) & x > L \end{cases} \quad (2-57)$$

式 (2-57) 中,

$$T_p = \frac{P \cdot \delta}{2 \cdot L \cdot w \cdot \lambda}, \quad n_1 = \frac{v + \sqrt{v^2 + \frac{32a^2 K}{\delta^2}}}{8 \cdot a \cdot K}, \quad n_2 = \frac{v - \sqrt{v^2 + \frac{32a^2 K}{\delta^2}}}{8 \cdot a \cdot K}, \quad K = \frac{1}{4} - \frac{\lambda_s \cdot t_d}{\lambda \cdot \delta}$$

特别的, 位于  $x = \pm R$  的热电堆处两点温度差

$$\Delta T = \frac{T_P}{n_2 - n_1} \cdot \left[ n_1 \cdot \left( e^{n_2(R+L)} - e^{n_2(R-L)} \right) + n_2 \cdot \left( e^{-n_1(R+L)} - e^{-n_1(R-L)} \right) \right] \quad (2-58)$$

### 2.3.3.2 恒温模式下的方程求解

所谓恒温模式，即通过实时地调节加热功率，使加热单元的温度与流体温度始终保持一个恒定的差值，换言之，当  $-L < x < L$  时， $T(x) \equiv T_{const}$ 。在这种模式下，其方程的求解过程和边界条件与恒功率模式有所不同。

由于在  $x > L$  和  $x < -L$  区段内， $p(x, \tau) = 0$ ，故等式  $T_H = 0$  仍然成立，所以与恒功率模式一样，方程式 (2-30) 为二阶常系数齐次线性微分方程，因此，式 (2-35)、(2-36) 和 (2-37) 在恒温模式下仍然成立，又由于在  $-L \leq x \leq L$  区段内， $T(x) \equiv T_{const}$ ，所以，该模式下载热微分方程的通解为

$$T = \begin{cases} C_7 \cdot e^{n_1 \cdot x} + C_8 \cdot e^{n_2 \cdot x} & x < -L \\ T_{const} & -L \leq x \leq L \\ C_9 \cdot e^{n_1 \cdot x} + C_{10} \cdot e^{n_2 \cdot x} & x > L \end{cases} \quad (2-59)$$

恒功率模式下有边界条件

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} T(x) = 0 \quad (2-60)$$

该边界条件，即式 (2-60) 在恒温模式下仍然成立，因此同理可得

$$C_8 = C_9 = 0 \quad (2-61)$$

即  $x < -L$ :  $T = C_7 \cdot e^{n_1 \cdot x} \quad (2-62)$

$x > L$ :  $T = C_{10} \cdot e^{n_2 \cdot x} \quad (2-63)$

除此之外，在  $x = \pm L$  处，温度值同样是连续的，故有

$$C_7 \cdot e^{n_1 \cdot x} = C_{10} \cdot e^{n_2 \cdot x} = T_{const} \quad (2-64)$$

解得

$$C_7 = T_{const} \cdot e^{n_1 \cdot L} \quad (2-65)$$

$$C_{10} = T_{const} \cdot e^{-n_2 \cdot L} \quad (2-66)$$

所以综上所述，在恒温模式下

$$T = \begin{cases} T_{const} \cdot e^{n_1(x+L)} & x < -L \\ T_{const} & -L \leq x \leq L \\ T_{const} \cdot e^{n_2(x-L)} & x > L \end{cases} \quad (2-67)$$

特别的，位于  $x = \pm R$  的热电堆处两点温度差

$$\Delta T = T_{const} \cdot [e^{n_2(R-L)} - e^{-n_1(R-L)}] \quad (2-68)$$

## 2.4 仿真验证与分析

### 2.4.1 仿真工具 ANSYS 简介

ANSYS 是一款功能强大、应用灵活的大型通用有限元分析软件，融结构、热、流体、电磁、声学于一体，可广泛应用于铁道、能源、电子、造船、轻工、地矿、水利、核工业、石油化工、航空航天、机械制造、汽车交通、国防军工、土木工程、生物医药、日用家电等一般工业及科学研究，其功能包括结构高度非线性分析、电磁分析、计算流体动力分析、设计优化、接触分析、自适应网格划分、大应变/有限转动功能以及利用 ANSYS 参数设计语言 (APDL) 的扩展宏命令功能<sup>[56]</sup>。

通过 ANSYS 软件，用户可以完成研究对象的结构静分析、结构动力分析、结构非线性分析、运动学分析、热分析、电磁场分析、流体动力学分析、声场分析、压电分析，除此以外，还可以完成多物理场耦合分析、优化设计、拓扑优化、单元生死控制、用户扩展等高级功能<sup>[57]</sup>。

ANSYS 软件中 FLOTRAN CFD 分析功能是一个用于分析二维及三维流体流动场的先进工具，其可执行的分析种类包括层流或紊流、传热或绝热、可压缩或不可压缩、牛顿流或非牛顿流以及多组份传输分析，并且这些分析类型互不排斥。FLOTRAN 主要包括 FLUID141 单元和 FLUID142 单元，前者用于计算单相粘性流体的二维流动、压力和温度分布问题，而后者则针对三维流动场合。对这两种单元，ANSYS 通过质量、动量和能量三个守恒性质来计算流体的速度分量、压力和温度<sup>[56]</sup>。

### 2.4.2 仿真结果

本文利用 ANSYS 软件的 FLOTRAN CFD 分析功能中的 FLUID141 二维热一流体耦合单元建立热分布式微流量仿真模型，对根据理论推导得出的数学模型进行验证并分析模型的误差源。在仿真分析中，假设流体流动满足层流条件，即不需激发紊流模型；假设流体为空气，且环境温度为 273K，而中心加热单元温度为 373K（恒温模式），仿真结果的温度云图如图 2-4 所示。

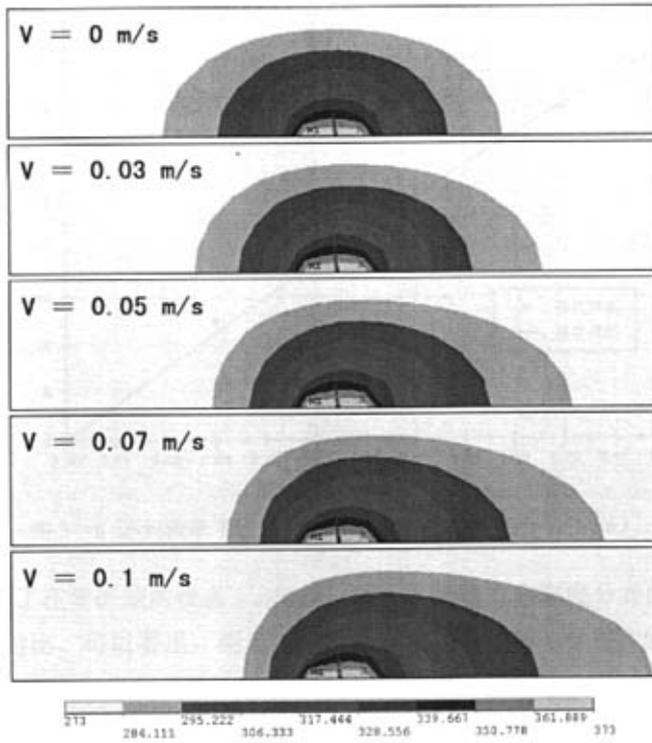


图 2-4 不同流速下的仿真温度云图

从图 2-4 中可以看出，随着流速的不断增大，流场（热边界层）中的热分布呈现越来越明显的非对称性。具体仿真分析与数学模型的对比如图 2-5、图 2-6 所示。

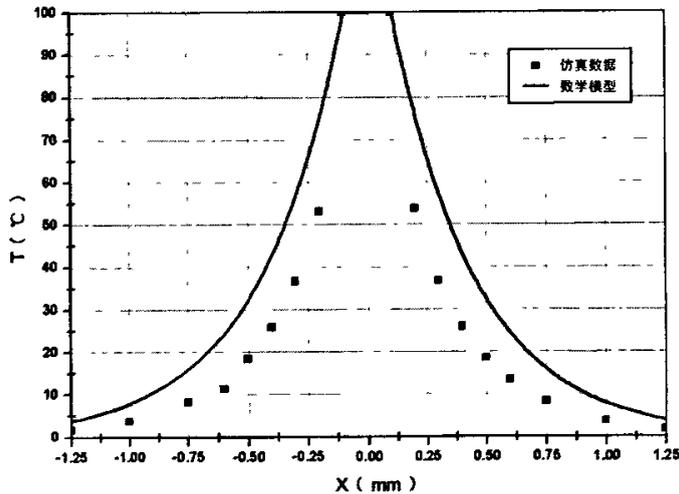


图 2-5 流量计表面在流速为零情况下的温度分布

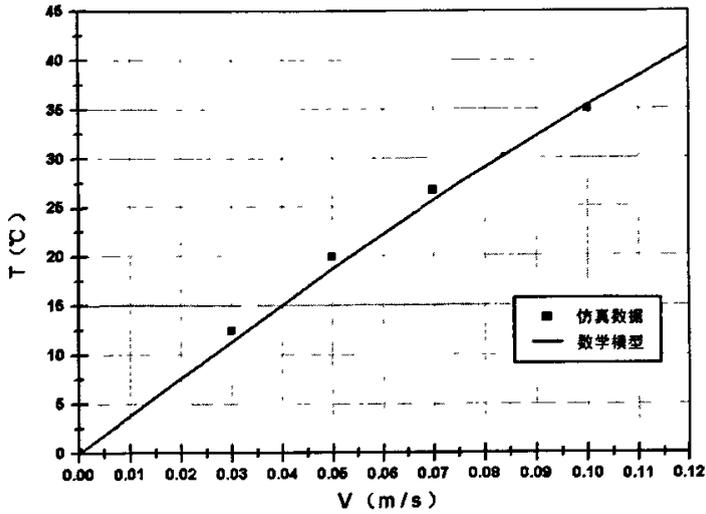


图 2-6 不同流速下流量计热电堆的输出温差 (R=0.3mm)

图 2-5 给出了在零流速的状态下, 流量计表面沿流速方向温度分布的仿真结果与数学模型推导结果的对比, 可以看出, 两者在定性的变化规律分析上是基本吻合的, 但从定量的角度来看, 仍然存在一定的误差。图 2-6 给出了流量计温差输出的响应特性的仿真结果和数学模型的对比, 其中, 取热电堆位置 R 为 0.3mm, 可以看出, 两者具有很好的吻合度。

### 2.4.3 模型误差因素分析

从图 2-5 中看出, 与仿真结果对比, 数学模型仍存在一定的误差, 这个误差的产生与之前数学模型的推导过程中所作的假设和简化有关。

在第 2.3.2.1 节中, 为了简化计算, 本文近似地认为温度在垂直于流量计表面的 y 方向上是呈线性变化的 (如图 2-3 所示), 但通过仿真分析发现, 这个假设存在较大的误差。从图 2-7 可以看出, 垂直方向的温度分布曲线具有一定的弧度, 并且随着流速的逐渐增大, 弧度逐渐加大。另外, 当热边界层厚度增加时, 弧度也将有较大的增加。

当测试目标处于较为稳定的流速状态下时, 可以通过对热边界层厚度做一定的修正, 从而使模型更接近于现实情况, 如图 2-8 所示。

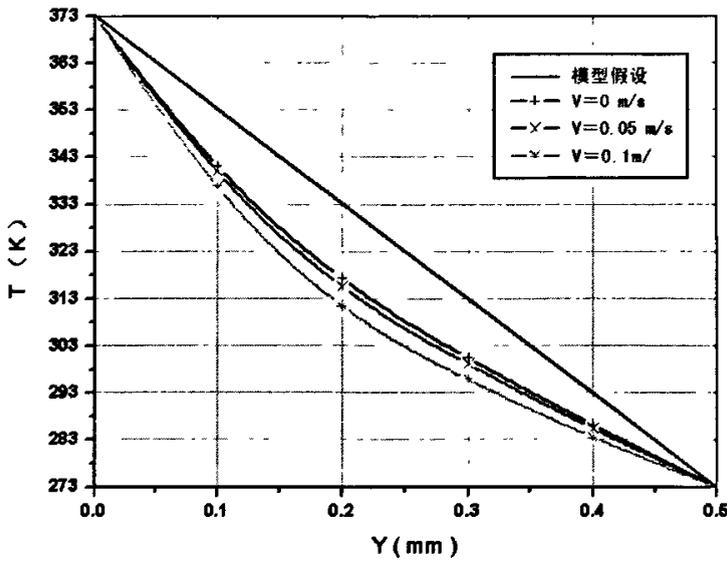


图 2-7 流量计加热单元中心垂直方向上的温度分布

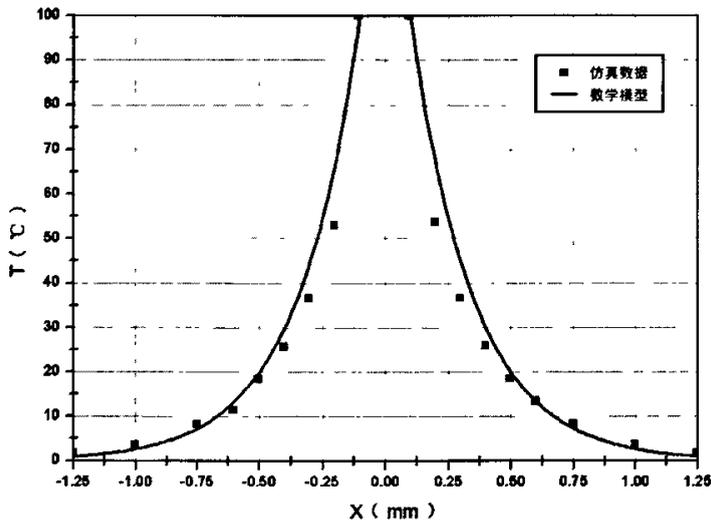


图 2-8 修正后的温度分布模型 (V=0)

本节通过仿真对推导的热分布式微流量计数学模型进行了验证分析，综上所述，该数学模型是基本正确的，能够在一定的允许误差范围内反映热量计表面的热分布规律。但不可否认，仿真分析本身仍存在一些有别于现实情况的假设，比如，和数学模型推导一样，仿真分析过程中也假设流体始终处于层流状态，而不存在紊流的情况，并且假设了热边界层厚度是固定的，这些假设对输出结果造成了一定的误差，有待于进一步的研究分析。

## 2.5 本章小结

本章引入传热学理论，通过对热分布式微流量计的热传递规律进行分析，建立了传热微分方程，并根据流量计在恒功率模式和恒温模式下不同的边界条件对微分方程进行求解，得出了这两种模式下的数学模型，为流量计响应特性与测量误差的分析提供了理论基础。最后对模型进行了仿真验证，分析了模型的误差因素，指出了流量计边界层厚度取值以及流量计表面法向热传递简化假设对模型精度具有的较大影响。

## 第三章 热分布式微流量计的响应特性与误差分析

### 内容提要

本章在热分布式微流量计数学模型(式 2-58 和式 2-68)的基础上,比较和分析了该类流量计在恒温 and 恒功率两种工作模式下响应特性和灵敏度的差异及其对流量计测量范围和应用场合的影响;分析了流量计的最优化尺寸及其影响因素;研究了尺寸加工误差对流量计测量精度的影响;最后对流量计进行了总体设计。

### 3.1 引言

本章以热分布式微流量计数学模型(式 2-58 和式 2-68)为基础,分析了模型中流速、加热单元长度和热电堆位置等重要参数对流量计温差输出和灵敏度的影响方式和作用程度,从而为热分布式微流量计的设计和结构优化提供了一定的依据,有利于提高流量计的测量精度、平衡流量计测量灵敏度和量程范围的关系。在模型分析当中,取大气压力下的干空气作为目标被测流体。

### 3.2 流量计温差输出与流速的关系分析

取流量计加热单元单边长度  $L$  为 0.1mm,热电堆与加热单元中心距离  $R$  为 0.3mm,得恒功率模式和恒温模式下流量计上下游热电堆的温差输出随流速的变化曲线如图 3-1 所示。

从图 3-1 中可以看出,在恒温模式下,温差输出随流速的增加而单调递增,并最终趋于加热单元的温度,而恒功率模式则存在一个峰值点,在该点左边,温差单调递增,并且呈现较好的线性,而在该点右边,由于加热功率的耗散,温差逐渐降低。

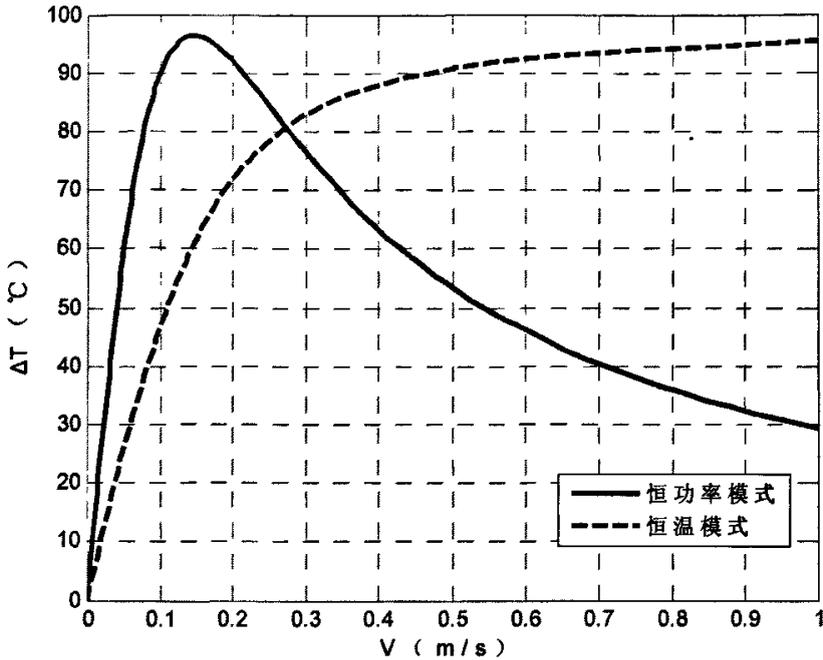


图 3-1 流量计的温差输出特性曲线

### 3.3 流量计的灵敏度分析

灵敏度是指传感器在稳态下的输出变化量与引起此变化的输入变化量之比，即

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{dy}{dx} \tag{3-1}$$

因此，某一测点处的静态灵敏度就是其静态特性曲线的斜率。灵敏度是检测系统的一个重要指标，与其测量范围和抗干扰能力等密切相关。

通过将式 (2-58) 和式 (2-68) 对流速  $V$  进行求导，可得热分布式流量计在两种模式下的测量灵敏度与流速的关系，如图 3-2 所示。

从图 3-2 中可以看出，在小流量区间内，恒温模式下灵敏度较为平稳，即其具有较大的线性范围；而在恒功率模式下，灵敏度衰减较大，线性范围窄，但与恒温模式相比，其在微小流量区间内具有很高的灵敏度。

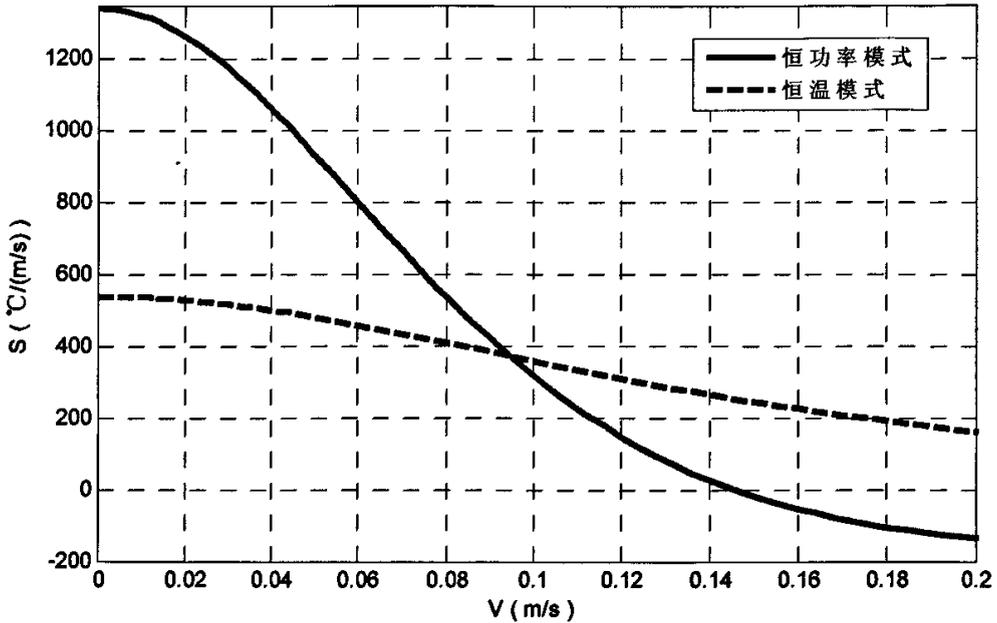


图 3-2 流量计在两种工作模式下的灵敏度对比

### 3.4 流量计结构参数对温差输出和灵敏度的影响分析

在传感器设计参数当中，结构尺寸对测量输出及其灵敏度有较大的影响，通过对其影响的分析研究，可以帮助确定传感器结构的最优化尺寸，提高测量效果。在本节中，取流速  $V$  为  $0.05\text{m/s}$ 。

#### 3.4.1 温差输出与结构参数的关系

##### 3.4.1.1 恒温工作模式

在流量计恒温工作模式下，上下游的热电堆温差输出受加热单元的长度  $L$ 、热电堆的距离  $R$  的影响如图 3-3 所示，由于  $R$  的取值下限是受  $L$  影响的，并且其大小通常相对与  $L$  而言，因此在分析中，取  $R$  和  $L$  的比值作为自变量。

从图 3-3 中可以看到，对于某一个确定的  $L$  值，存在一个相应的  $R_{\text{MAX}}$  值，在该  $R_{\text{MAX}}$  值位置上，温差的输出达到最大值，并且该  $R_{\text{MAX}}$  值与  $L$  之比随着  $L$  的增加而逐渐减小。但是， $R_{\text{MAX}}$  值所对应的温差最大值与结构参数无关。

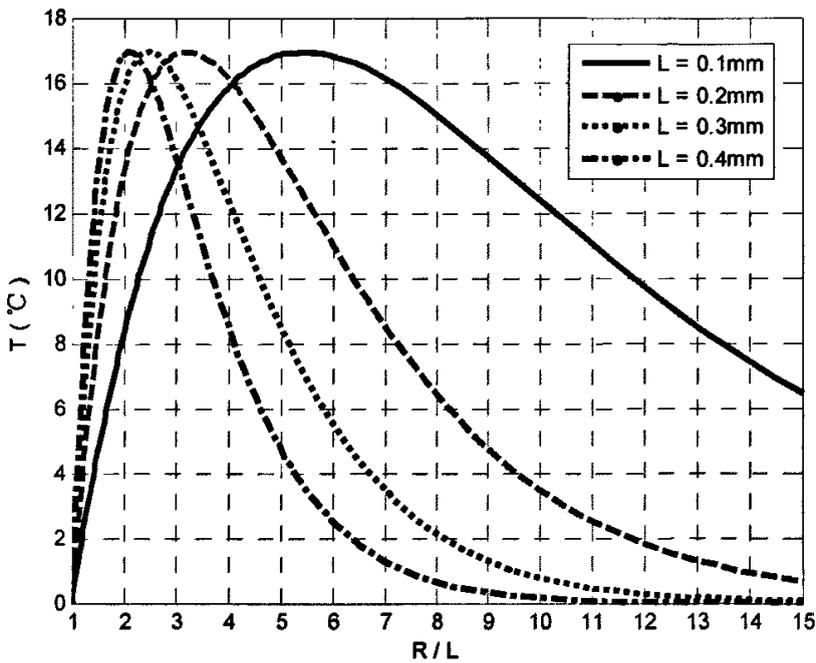


图 3-3 恒温模式下不同结构参数下的温差输出 ( $V=0.05\text{m/s}$ )

### 3.4.1.2 恒功率工作模式

流量计恒功率工作模式下，结构参数对热电堆温差输出的影响和恒温模式有所不同，如图 3-4 所示。虽然和恒温模式一样，在恒功率模式下，对于确定的  $L$  值，也存在一个  $R_{MAX}$  值使温差输出达到最大，但是该点温差的最大值受  $L$  影响，即在加热功率恒定的情况下，由于  $L$  的增大而使温差输出降低。此外，相比于恒温模式，在同一个  $L$  取值下，恒功率模式的  $R_{MAX}$  值较小，并且由于恒功率模式下，加热单元表面的温度并不一致，因此在加热单元边缘（即  $R/L=1$  处），温差输出为非零值。

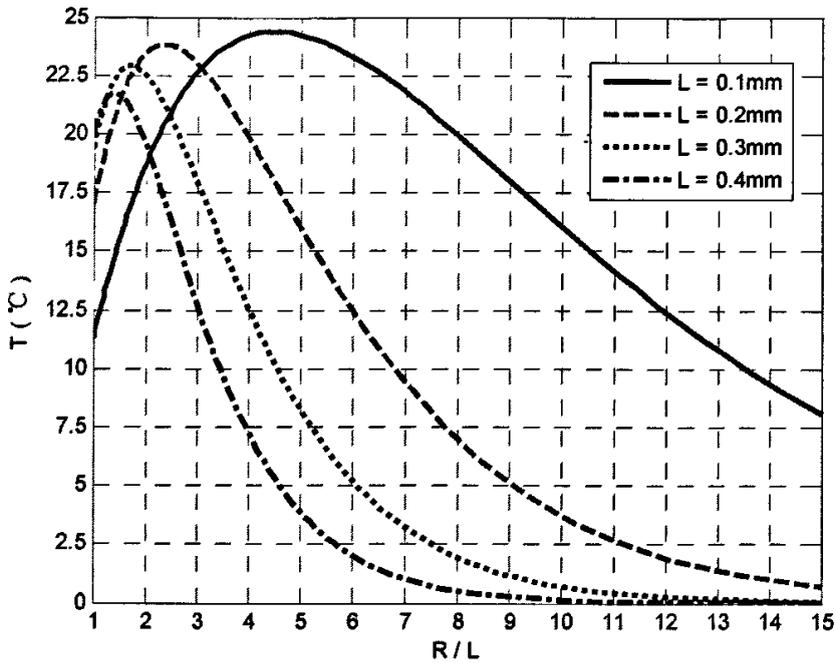


图 3-4 恒功率模式下不同结构参数下的温差输出 ( $V=0.05\text{m/s}$ )

### 3.4.2 灵敏度与结构参数的关系

在恒温工作模式和恒功率工作模式下，灵敏度与结构参数的关系曲线形状与图 3-3、图 3-4 基本相同，即在两种模式下，对于确定的加热单元尺寸，都存在一个最优化的热电堆位置（即各曲线的峰值点），在该位置上，流量计具有最高的灵敏度。

### 3.4.3 热电堆位置对温差响应曲线的影响

假设加热单元单边尺寸  $L$  为  $0.1\text{mm}$ ，不同的  $R$  取值 ( $0.5\text{mm}$ 、 $1.0\text{mm}$ 、 $1.5\text{mm}$ ) 对温差响应曲线量程、线性度的影响如图 3-5、图 3-6 所示。

在两种模式下，热电堆位置  $R$  的增大都能在一定程度上扩大流量计的线性量程范围，并且，在灵敏度最优化尺寸  $R_{\text{MAX}}$  附近，即  $R$  较小时，其对流量计量程的影响能力相对有限，在  $R$  远离  $R_{\text{MAX}}$  值处，即较大程度地牺牲灵敏度的情况下，量程范围能够得到较为明显的扩大，在恒温模式下，这一点尤为明显。

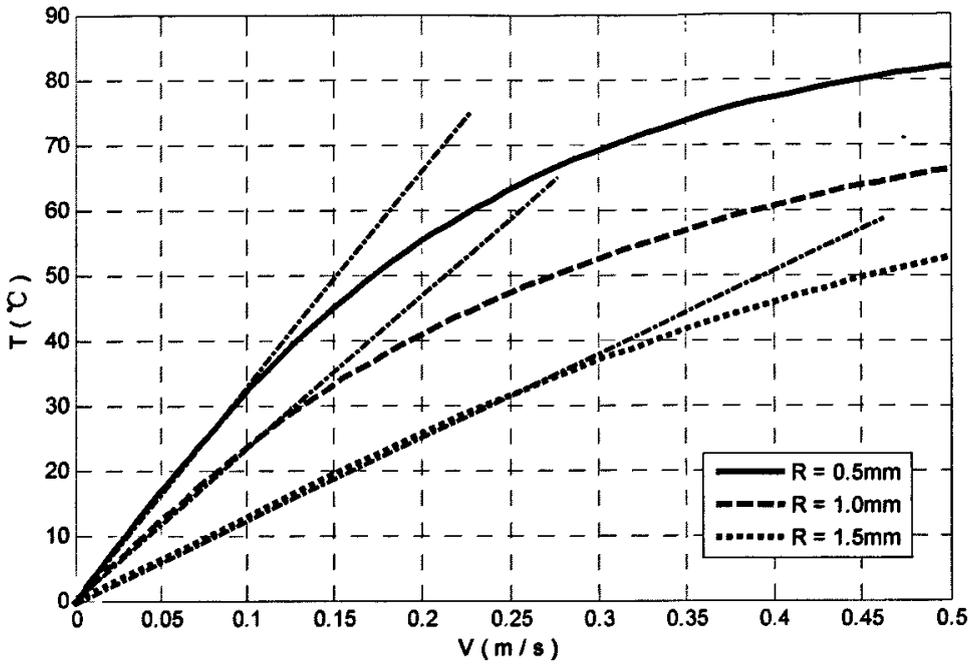


图 3-5 恒温模式下不同测温位置下的温差响应

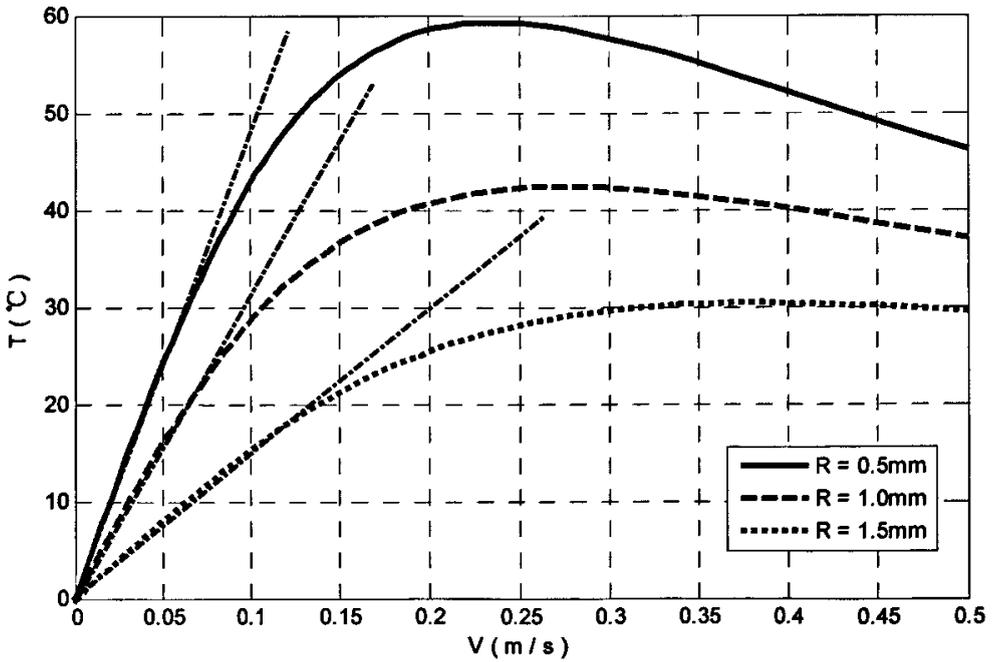


图 3-5 恒功率模式下不同测温位置下的温差响应

### 3.5 流量计尺寸精度对测量误差的影响分析

根据热分布式流量计的测量原理，要求上下游热电堆关于加热单元中心对称，但在制造加工过程中，难免存在误差，对流量测量造成一定的影响。在本节中，保持上游热电堆位置  $R_{UP}$  固定为 0.3mm，而在下游热电堆位置  $R_{DOWN}$  加上一个+5%的误差，即  $R_{DOWN} = R_{UP} \times (1+5\%) = 0.315\text{mm}$ ，分析由此误差而引起的测量偏差大小。

#### 3.5.1 恒功率模式

在恒功率模式下，带尺寸误差情况下的测量结果与理论值的对比如图 3-6、3-7 所示。

从图 3-7 可以看出，在线性段  $V=0.04\sim 0.05\text{m/s}$  区间内，5%的尺寸误差导致测量温差约-2.2℃的偏差。例如，当  $V$  约为 0.0468m/s 时，测量输出的温差值为 19℃，因此测量得到的流速值约为 0.0415m/s，则实际相对误差

$$\xi_a = \frac{\Delta y}{y_a} \times 100\% = \frac{0.0415 - 0.0468}{0.0415} \times 100\% \approx -12.8\% \quad (3-2)$$

即下游热电堆位置+5%的误差将引起系统流速输出-12.8%的实际相对误差。

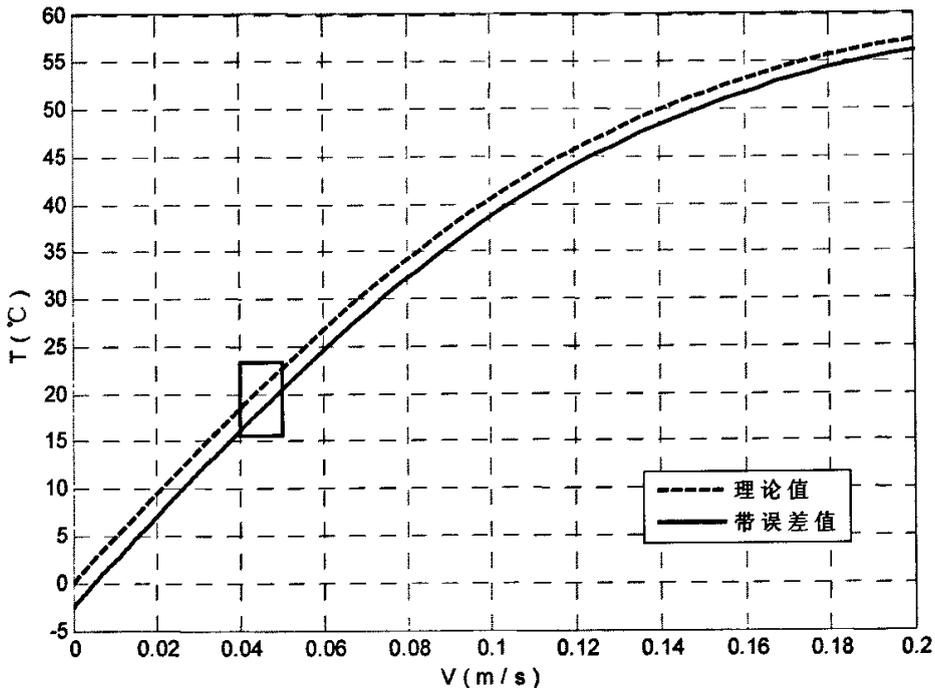


图 3-6 恒功率模式下带误差测量结果与理论值的对比

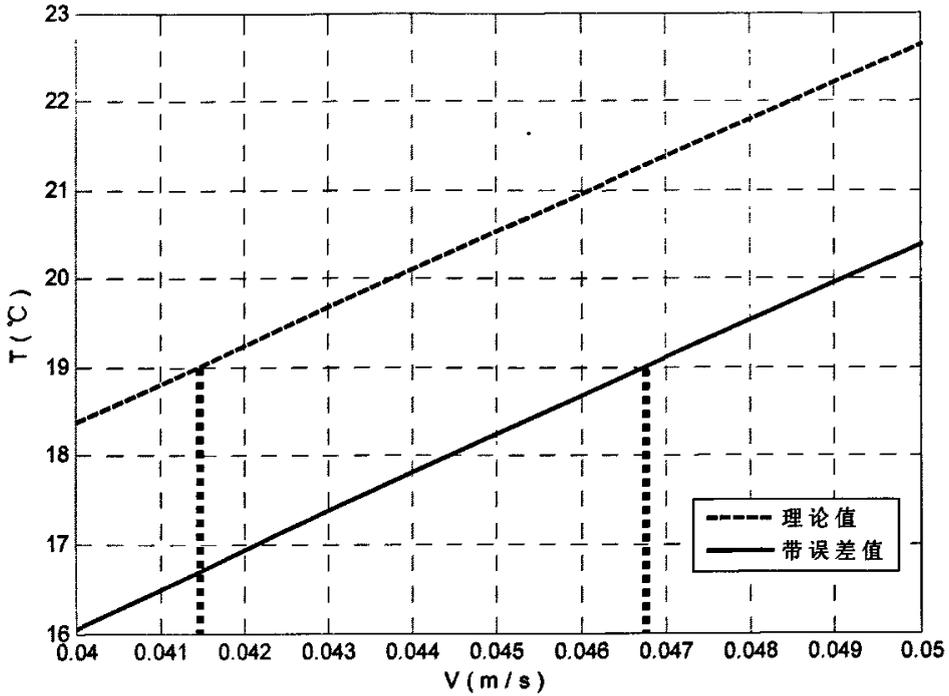


图 3-7 恒功率模式下带误差测量结果与理论值的对比（放大图）

### 3.5.2 恒温模式

在恒温模式下，带尺寸误差情况下的测量结果与理论值的对比如图 3-8、3-9 所示。

从图 3-9 可以看出，在线性段  $V=0.04\sim 0.05\text{m/s}$  区间内，5% 的尺寸误差导致测量温差约  $-1.8^\circ\text{C}$  的偏差。例如，当  $V$  约为  $0.0483\text{m/s}$  时，测量输出的温差值为  $11^\circ\text{C}$ ，因此测量得到的流速值约为  $0.0412\text{m/s}$ ，则实际相对误差

$$\xi_a = \frac{\Delta y}{y_a} \times 100\% = \frac{0.0412 - 0.0483}{0.0412} \times 100\% \approx -17.2\% \quad (3-2)$$

即下游热电堆位置+5%的误差将引起系统流速输出-17.2%的实际相对误差。

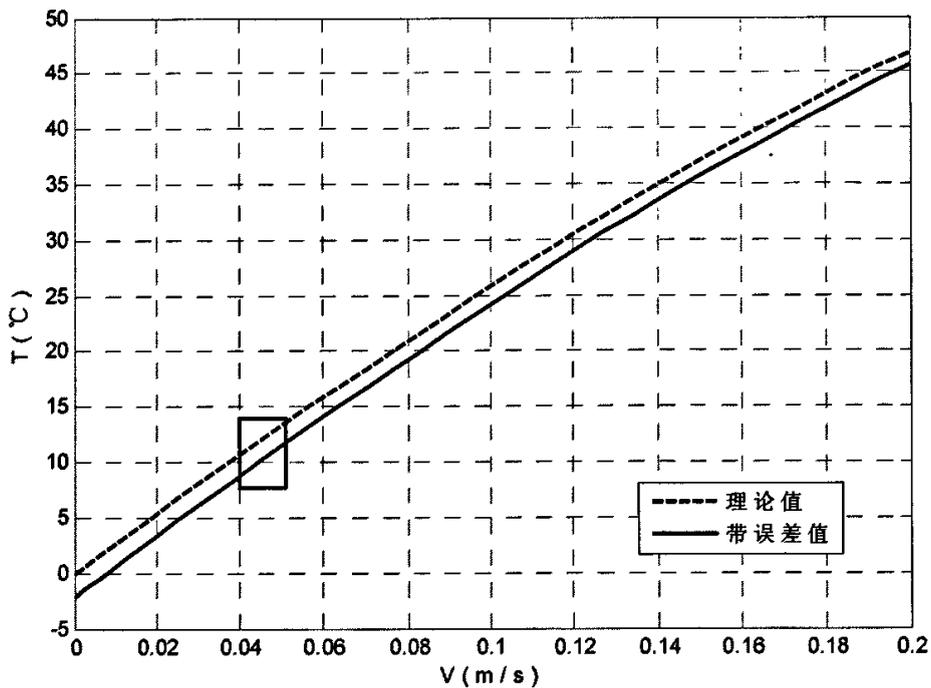


图 3-8 恒温模式下带误差测量结果与理论值的对比

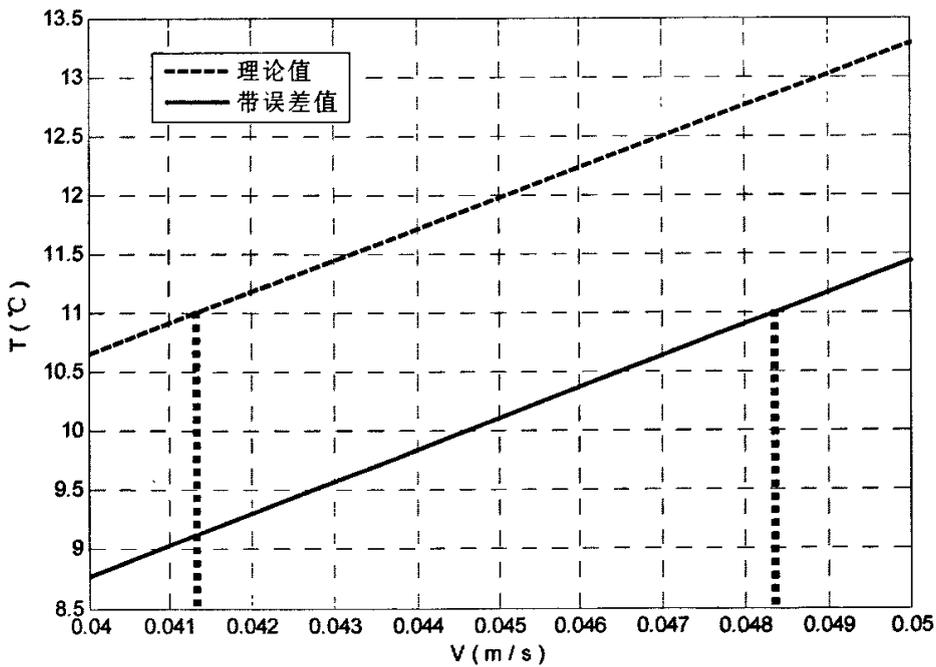


图 3-9 恒温模式下带误差测量结果与理论值的对比 (放大图)

### 3.5.3 尺寸精度引起的测量误差与流速变化关系

从以上的分析可知，流量测量的精度对热电堆的位置精度（即其对中性）比较敏感。在尺寸误差为+5%时，测量误差的大小与输入的流速的关系如图 3-10 所示。从图 3-10 中可以看出，恒功率模式对尺寸误差的敏感度更高，并且其输出误差的波动较大。但总的来说，两种模式的测量误差基本保持在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的波动幅度内，因此，可以通过引入修正值法来尽可能地消除误差。

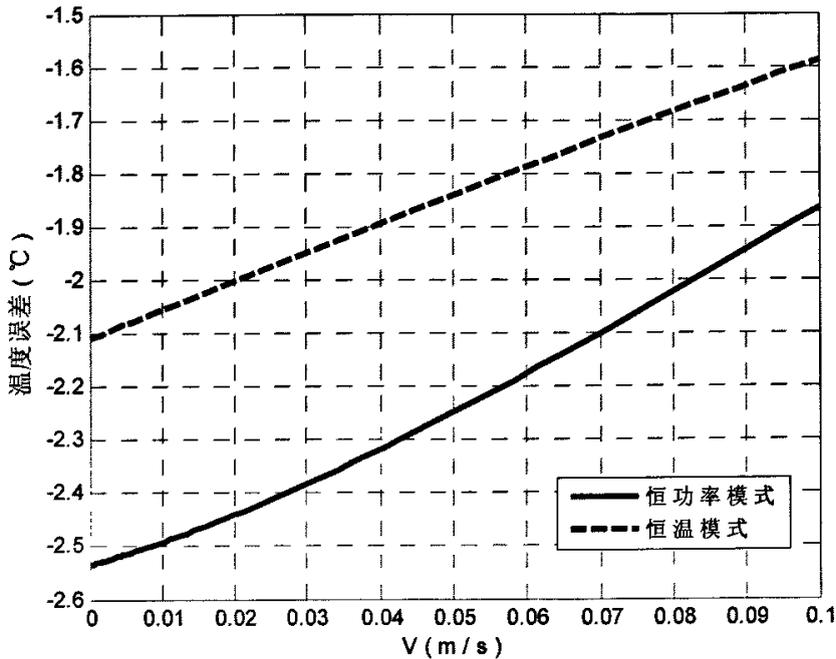


图 3-10 两种模式下温差误差与流速输入的关系

## 3.6 热分布式微流量传感器的总体设计

基于上述的热分布式流量测量原理和 MEMS 加工技术，流量传感器芯片的结构如图 3-11 所示。该传感器包括起机械支撑作用的玻璃基片、起粘接和钝化作用的聚酰亚胺膜、器件材料岛形单晶硅膜。传感器中心是加热器，其两侧各排列一锯齿形热电堆。金属线从硅膜伸出，在基片边缘与压焊金属片连着。硅膜的暴露面覆盖有横隔膜，起防腐的作用，压焊块在焊上金属引条后由树脂保护<sup>[40; 51]</sup>。

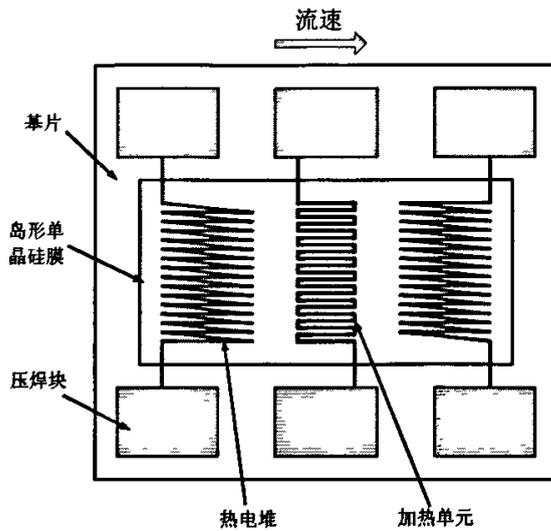


图 3-11 热分布式微流量计结构示意图

### 3.6.1 衬底材料

硅材料是构成传感器的一种颇为合适的材料，它对包括温度在内的多种非电量具有良好的敏感特性。硅温度传感器具有灵敏度高、响应速度快、体积小、成本低和容易实现多功能化等优点，并且从传感器集成化的角度考虑，硅传感器还具有易于实现信号处理电路的片上集成的特点，因此，硅材料是作为传感器衬底的理想材料<sup>[58;59]</sup>。

但是与此同时，由于硅材料是热的良导体，具有很大的热传导率，因此，当其被用于热敏感材料的制造时，往往会导致传感器的灵敏度降低、功耗变大、响应变慢等<sup>[60]</sup>。目前，在一些研究中，设计者力图通过添加隔热槽或硅的 MEMS 加工技术来弥补这一缺陷，但效果往往不是非常理想，更成功的方法是采样薄膜结构所组成的热电材料作为热敏感材料，而将硅作为传感器的衬底材料<sup>[40]</sup>。

### 3.6.2 热敏感元件

适用于在硅衬底材料上实现的热敏感元件有很多种，如二极管、多晶硅电阻和热电偶等，其中，以热电偶的性能最为优秀，并得到较为广泛的应用。热电偶是将两种不同金属的两端连在一起而构成的一种器件，由于各种金属的有效电子密度随温度变化的幅度各不相同，若有一热电偶其两端存在温差，则因 Thomson 效应而产生的电位差与 Peltier 效应产生的电位差的代数和不为零，此净电位差称为热电偶的热电动势或 Seebeck 电动势，热电偶就是利用这种 Seebeck 效应来实现对温度的测量<sup>[59]</sup>。由多个热电偶串联在一起而构成的器件称为热电堆，相比于热电偶，热电堆在提高了测量精度的同时又降低了测量的误差<sup>[60]</sup>。

利用 CMOS 工艺所制造的热电偶大致可分为体热电偶和薄膜热电偶两种。体热电偶具

有很大的 Seebeck 系数,但同时,其加工材料硅也具有很大的热传导系数,因此这种温差型热流量传感器在工作时输出的信号较小,不利于测量<sup>[60]</sup>。而薄膜热电偶是利用 CMOS 工艺中的薄膜加工技术制作而成的,由于其热传导率很低,因此可以提高传感灵敏度和响应速度,近年来所兴起的 CMOS MEMS 技术为其应用提供了很好的实现方法。

### 3.6.3 加热元件

微加热器常用的制作方法主要有金属薄膜电阻法和多晶硅掺杂法<sup>[59]</sup>。相同尺寸的多晶硅扩散电阻加热器与金属薄膜电阻加热器相比,前者功耗较大,但温度梯度较平缓;后者可以精确控制温度,但不能用于高温过程,因为高温会影响到它的热隔离<sup>[40]</sup>。本文采用热电阻作为流量计的加热单元。

## 3.7 本章小结

本章在热分布式微流量计数学模型的基础上,对该类流量计在恒温 and 恒功率两种工作模式下的响应特性与误差影响进行了分析,得出以下结论:

1、在恒功率模式下,流量计的温差输出随流速增加而单调递增,并最终趋于加热单元的温度,而恒功率模式中则存在一个峰值点,温差随流速先增后减。

2、针对微小流量,流量计在恒温模式下具有较大的线性范围;而在恒功率模式下,灵敏度衰减较大,线性范围窄,但具有较高的灵敏度。

3、在流量计两种工作模式下,对于某一个确定的加热单元长度,都存在一个相应的热电堆位置,在该位置上,温差输出和灵敏度达到最大值,但是在恒温模式下最大值与结构参数无关,而在恒功率模式下该最大值随加热单元的增长而减小。

4、两种模式下,在一定的范围内增大热电堆与加热单元的距离都能在一定程度上扩大流量计的线性量程范围,并且,在较大程度地牺牲灵敏度的情况下,量程范围能够得到较为明显的扩大,在恒温模式下,这一点尤为明显。

5、在流量计两种模式下,流量测量精度对热电堆的对中性都比较敏感,但由热电堆不对中而引起的温度输出偏差随流速的变化不大,故可通过修正来减小该误差。

在以上分析基础上,本章最后对流量计进行了总体设计。

## 第四章 远程分布式流量监测系统总体框架设计

### 内容提要

本章阐述了流量监测系统的基本构成,分析了目前流量监测系统发展中存在的通讯交互和资源管理等问题;并针对这些问题,结合 GPRS 无线通讯技术、虚拟仪器技术和多 Agent 技术,提出并分析了基于 Agent 和空间概念的流量监测系统总体框架。

### 4.1 引言

前面章节对热式流量计的流量测量原理、数学模型及传感器响应特性等方面做了较为详细的论述,但是,随着流量测量应用规模的不断扩大,很多领域已不满足于个体分立仪表式的流量测量方案,取而代之的是远程分布式的大规模监测系统,以完成大型复杂管路和各类移动目标的流量监测,特别是近年来,日益普遍的远程抄表、无线数据采集的应用需求,大大增加了流量监测系统的设计难度。在这种背景之下,建构兼顾灵活性、稳定性和重用性的分布式流量监测系统就显得尤为重要。

### 4.2 流量监测系统的基本构成

流量监测系统的基本构成如图 4-1 所示,流体管路作为流量测量的目标对象,是监测系统的数据源;传感器节点将管路的各个监测点的流量转换为数字信号并作前端处理;监测终端对传感节点传递的数据进行融合、显示、分析和记录。

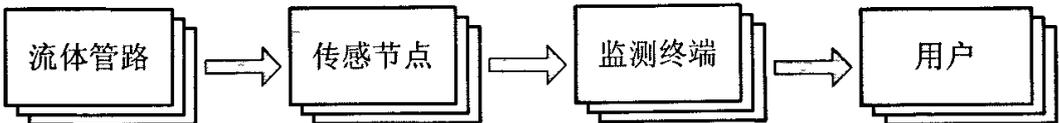


图 4-1 流量监测系统的基本构成

对于一个小型、孤立的监测系统,其中各个环节的个体数量都很有有限,因此数据传输和资源管理的难度较低。但当监测系统需要对大量的、分布式的流体管路进行监测时,就相应地需要有很多传感节点,这些传感节点同样也是远程分布的,而另一方面,监测用户也存在多终端远程分布、移动性强的特点,他们需要通过多个终端连接到系统当中,并以不同的角色参与到系统功能当中。

在这样的应用规模之下,流量监测系统至少需要解决通讯交互和资源管理两个问题,即必须实现具有远程分布性的传感节点和监测终端之间的信息传输,并以合理有效的机制和实现手段来管理如此众多的分布资源。如果无法合理有效地解决这两个问题,那么系统

的稳定性、灵活性、可扩展性和可维护性等方面都将受到严重的影响。

目前,在计算机与通讯领域所取得的很多研究成果,如 GPRS 无线通讯技术、多 Agent 系统理论和虚拟仪器技术等,都为流量监测系统解决上述的通讯和管理等关键问题提供了良好的理论基础和技术手段,其中,GPRS 无线通讯技术为监测系统的信息传输问题提供了低成本、高性能的解决方案,多 Agent 系统理论为流量监测系统的框架设计和建模提供了先进的指导理论,而虚拟仪器技术则为流量监测系统提供了强大的开发平台。

### 4.3 GPRS 无线通讯技术

GPRS 是通用无线分组业务 (General Packet Radio Service) 的简称,是第二代移动通信技术 (GSM) 向第三代移动通信 (3G) 演变的过渡技术 (2.5G),提供点到点的、广域的无线 IP 连接。GPRS 充分利用共享无线信道,采用 IP Over PPP 实现数据终端的高速、远程接入。通过 GPRS 无线通讯技术,流量监测系统可以将分布于各地的大规模管道和移动目标的流量检测数据信息实时快速而方便地收集到一起,并对数据进行分析 and 存储等,实现对流量的监测。

目前,已有多个流量监测系统采用了 GPRS 技术并取得了较好的应用效果,例如:中科院陈爱平等应用 GPRS 技术,设计开发了大型供水工程中分水点的流量计量系统<sup>[61]</sup>;上海交通大学刘泉等设计开发了以 GPRS 为主要通信方式的天然气输配管网控制一体化系统<sup>[62]</sup>。

#### 4.3.1 基于 GPRS 的流量监测网络结构

GPRS 网络系统是在 GSM 系统的基础上发展起来的,GSM 系统主要由三个相互独立的子系统组成:移动台 (Mobile Station, MS)、基站子系统 (Base Station Subservice, BSS) 和网络子系统 (Network Switching Subsystem, NSS),GPRS 在 GSM 网络中引入了两个新的节点:业务支持节点 (Serving GPRS Support Node, SGSN) 和网关支持节点 (Gateway GPRS Support Node, GGSN),使用户能够在端到端分组方式下发送和接收数据<sup>[63]</sup>。无线分组交换技术使系统只有在传送数据时,才需要建立一条物理链路,当数据传送完之后,这些资源 (如无线接口的时隙) 又将分配给新的用户。

基于 GPRS 的流量监测网络结构如图 4-2 所示<sup>[63, 64]</sup>。经各流量计检测得到的流量数据通过 GPRS 模块包装成 GPRS 分组包,由基站子系统 BSS 发送到业务支持节点 SGSN,SGSN 通过 GPRS 主干网与网关支持节点 GGSN 通信,GGSN 对数据包进行相应的处理就发送到指定的网络中去,反之,来自 Internet 的一个数据包亦能通过相反的路径传送给一个指定地址的流量监测节点。流量监测中心是一台拥有固定 IP 地址的 PC 主机,它直接与 Internet 相连,这样就实现了流量检测节点与监测中心之间的数据通信<sup>[65, 66]</sup>。

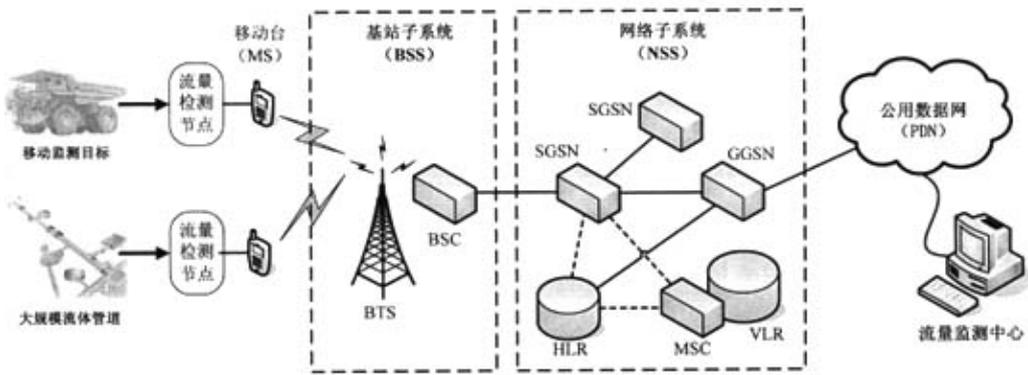


图 4-2 基于 GPRS 的流量监测网络结构

### 4.3.2 GPRS 的特点

#### 4.3.2.1 GPRS 的优点

作为一种从 GSM 网络升级而成的无线数据通信系统，GPRS 在许多方面都具有显著的优势<sup>[61; 62]</sup>：

- 1、传输速率高。GPRS 理论上的最高传输速率可达 171.2 kbit / s，实际传输速率约为 20— 60 kbit / s。
- 2、网络覆盖广。GPRS 可充分利用中国移动通信集团公司在全国范围内的电信网络 (GSM)，其网络覆盖程度高，应用不受地域限制，可以方便、快速、低成本地为用户数据终端提供远程接入网络的部署。
- 3、按流量计费。GPRS 用户只有在发送或接收数据期间才占用资源，并且按照用户收发数据包的数量收取费用，空闲时不占用资源，不会增加额外费用。
- 4、快捷登录，实时在线。网络接入时间短，用户可以始终处于连线或在线状态。
- 5、支持 TCP、UDP 等通信协议，直接与 IP 和 x. 25 网互联，网络接入方便。

#### 4.3.2.2 目前 GPRS 的局限

目前，GPRS 随着得到了日益普遍的应用，但仍存在一定的局限性<sup>[63; 64]</sup>：

- 1、小区总容量有限。GPRS 系统只能提高现有资源使用效率，而不能增加网络现存小区的总容量。
- 2、实际传输速率和理论值间存在较大差距。要使 GPRS 达到理论最大传输速率，必须使单个用户同时占用所有的八个时隙，且不采取任何纠错措施，这是不现实的。
- 3、终端无法对信息进行过滤拒收。这意味着 GPRS 用户必须无选择地接收全部到达数据并为其付费，包括垃圾信息甚至是恶意信息。

4、GPRS 的调整方式有待改进。

5、传输时延。GPRS 分组通过不同路径被送到同一目的地，期间有可能发生分组丢失或出错的情况。

### 4.3.3 GPRS 的安全性

由于在进行无线通信时，任何人都可以侦听和发射无线电波，因此安全性是包括 GPRS 在内的无线通信系统不容忽视的一个问题。GPRS 提供了与 GSM 系统相似的安全防御措施，包括<sup>[64, 66]</sup>：

1、移动终端鉴别：GPRS 通过一定的算法和密钥在鉴权中心和 SIM 卡中生成加密响应，来确认 SIM 卡的有效性，防止未注册用户接入。

2、接入控制。用户的通信行为按预定内容受到相应的限制，只享有一定级别的 QoS。

3、用户识别号的保密。为防止第三方获取用户的识别号，GSM 和 GPRS 通过使用 TMSI 来避免用户识别号在不安全的传输路径中传播，从而实现其保密性。

4、用户信息保密。用户在无线路径中传播的信息经过加密，防止第三方窃听。

## 4.4 多 Agent 系统及其在大型测控系统中的应用

Agent 概念广泛出现在人工智能和分布式人工智能、分布计算、人机交互、程序设计、计算机辅助协同工作、虚拟现实等研究子领域。自 20 世纪中后期以来，有关 Agent 理论和技术的研究逐渐引起了人们的关注和重视，这些理论试图采用一种新颖的观点和思想来理解、分析和构造各类软硬件系统，并取得了一系列的研究成果，为包括测控行业在内的各个领域提供了新的指导理论和发展思路。

### 4.4.1 Agent 基本概念

#### （一）Agent 的定义

Agent 的中文译名有“智能体”、“智体”、“代理”、“主体”等，不同的译名有不同的侧重点和局限性，因此下文将仍然沿用其英文本名“Agent”。

Agent 概念具有抽象性和高层性两个重要的特点：概念的抽象性意味着 Agent 概念不针对任何特定、具体的研究和应用领域；而概念的高层性则使其不针对具体的实现技术和开发平台，具有一定的通用性。Agent 概念的这两个特点使其在很多领域都可以得到很好的应用，但另一方面也大大增加了 Agent 定义的难度，因此目前针对 Agent 尚未形成一个被广泛接受的统一定义。1995 年，伦敦大学的 Nicholas R. Jennings 和 Michael J. Wooldridge 对 Agent 概念作了如下的两种定义<sup>[67]</sup>：

1、弱定义：Agent 一般用以说明一个具有自主能力、社交能力、反应能力和预动能力的软硬件系统；

2、强定义：Agent 不仅具有以上的特性，而且具有知识、信念、目的、义务等人类才具有的特性。Agent 还具有流动性（mobility）、诚实性（veracity）、仁慈性（benevolence）、理性（rationality）等。

### （二）Agent 的主要特性

按照 Agent 概念的定义，Agent 一般应具有以下四个主要特性<sup>[68]</sup>：

自治性：Agent 可以在没有人为干涉的情况下执行动作，而且对其自身行为和内部状态有某种控制能力；

社会性：Agent 可以和其它 Agent 通过某种 Agent 的沟通语言互相影响；

反应性：Agent 感觉它们的环境，而且及时进行回应；

主动性：Agent 不只是对它们环境改变而行动，它们能够主动展现信息，体现目标驱动的行为。

### （三）Agent 的粒度

系统就是由许多部分组成的整体，在复杂系统的设计和实现过程中，往往需要对系统进行分解，以控制当前目标视野内系统的复杂程度。粒度就是表征分解程度的量化单位。粒度越粗，分解而成的个体功能越集中，规模更大；粒度越细，则系统分解越彻底。粒度过粗或过细都会使分解行为失去意义。

Agent 实际上也是复杂系统按一定的划分原则分解的产物，但不同的领域和应用案例对 Agent 粒度的理解和控制也不尽相同，大致可以分成细粒度、粗粒度和混合粒度三种情况：细粒度 Agent 通常是软件系统中完成一定任务或动作的子程序，多个 Agent 同时存在于一个 PC 平台上，甚至于在有些案例中，Agent 的粒度和对象并没有太大的差异；粗粒度 Agent 通常是分布于网络中的 PC 终端，一个 PC 终端被视为是单个的 Agent；混合粒度 Agent 则是指在一个多 Agent 系统中同时存在细粒度和粗粒度两种 Agent，设计者有意无意地对 Agent 粒度不加区分。

另外还有一种情况，Agent 是通过对遗留系统进行封装而成的，通过封装，使遗留系统以更灵活的 Agent 形式参与到新的应用环境当中，从而降低了系统的集成难度，实现了资源的共享<sup>[69]</sup>。

### （四）Agent 与对象的区别

如前所述，Agent 概念具有很强的抽象性，这种抽象性以其随之带来的灵活性使我们在对 Agent 的特性等方面进行讨论的时候难免存在以偏概全的问题，但就目前而言，Agent 的概念主要活跃于计算机领域，特别是应用在各种软件系统的设计与建构当中，而在这方面，有另外一个概念“对象”与 Agent 之间存在着千丝万缕的联系，以至于很多时候这两个概念被混淆，甚至因此掩盖了 Agent 思想的新颖之处，所以对 Agent 和对象进行比较是有意义的。

从工程的角度来看,Agent 有时可以被认为是对象的一种特例,因为它们都具有封装性、继承性和多态性。但是,相对于对象而言,Agent 是一个粒度更大、智能程度更高的实体,特别是 Agent 具有对象通常不具备的自治性<sup>[70]</sup>,这种自治性也可以从两者在运行方式的差异上体现出来。从图 4-3 中可以看出,多 Agent 系统中的每个 Agent 均有各自的控制线程,都有各自的决策行为,同一时刻有多个 Agent 处于活动状态,从某个角度上看,多 Agent 系统可以被认为是多控制线程的并发系统;而大多数对象系统中只有一个控制线程,负责控制对象的调用等,其运行的所有进程基本上是串行、顺序的,在同一时刻只有一个对象的一个方法被激活,是一个单控制线程的顺序系统<sup>[71]</sup>。

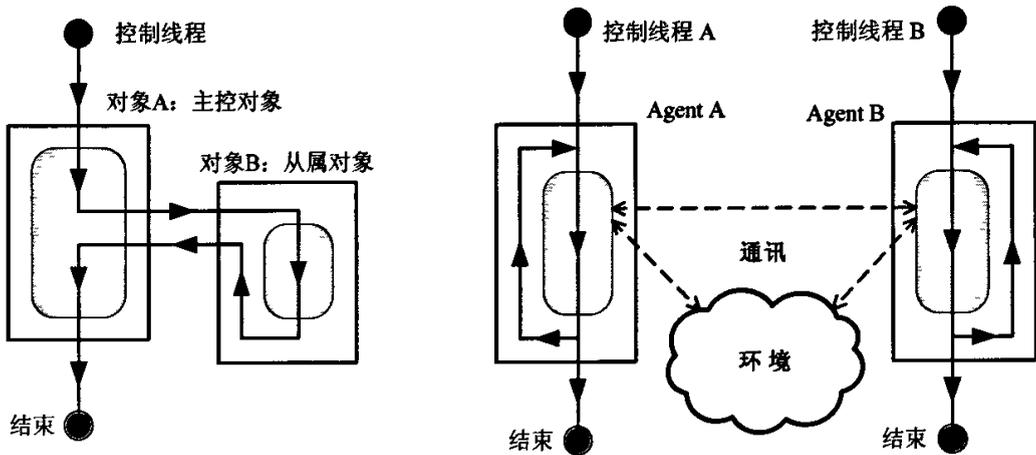


图 4-3 对象与 Agent 运行机制的对比

综合而言, Agent 和对象之间的差异性可以从表 4-1 中体现出来<sup>[72]</sup>。

表 4-1 Agent 和对象的区别

	Agent	对象
定义方式	外在行为特征	内部结构
抽象程度	较高, 贴近现实世界	较低, 贴近计算机世界
主动性	状态主动性、行为主动性	状态主动性, 行为被动性
运行	持续性运行 动态、多线程的实体	间断性运行 静态实体
交互本质	社会性交互 语义和知识层次 由主体自身在运行时刻决定	方法激活 语法层次 由开发者在设计阶段决定

## 4.4.2 多 Agent 系统 (MAS)

多 Agent 系统 (MAS) 是由多个具有一定自治性和智能程度的 Agent 有机结合、既相互独立又相互合作的社会型集合。其它的一些系统分解方法往往只是对复杂系统的物理结构和数据结构进行分解, 但系统的智能实现仍集中在主程序中, 而多 Agent 系统更强调了系统智能结构的分散化, 或者是对现有的各种分散智能实体囊括到一个大的系统群体当中, 并通过通讯、合作、互解、协商和仲裁等手段将分散的智能统一起来, 从而更进一步地提高了系统的稳定性、灵活性和可扩展性。

### 4.4.2.1 多 Agent 系统与常规系统的区别

从某种意义上讲, 传统的应用软件系统就是一个单 Agent 系统, 具有一定的自治性, 能够与用户等外界环境进行交互, 或者某些开辟了多线程的应用系统也可以被看成是一个简易的多 Agent 系统, 但这样的定义是不严密的, 并且由于它们没有形成真正的 Agent 社会群体, 不具备社会性, “Agent” 间仍停留在原始的方法调用和数据传递上, 因此 Agent 的优势并没有体现出来。但是, 应当指出, 多 Agent 系统的这种社会学并不等同于“分布性”。

根据定义, 多 Agent 系统是并发系统的一个子类, 更有一些研究人员认为没有必要将多 Agent 系统和“标准的”分布式/并发系统分开来独立研究。针对这一问题, Michael Wooldridge 指出了目前存在的两个重要的误解: 首先, 和标准的并发/分布式系统不同, 在设计多 Agent 系统时, 其同步和协调结构并非硬性绑定, 而是依靠一种机制在 Agent 运行时实现; 其次, 典型的并发/分布式系统隐含地假定所有组元具有相同的目标, 以使整个系统实现正确的功能, 而在多 Agent 系统中, 一般认为 Agent 主要关心其自身的利益, 因此 Agent 间有可能存在冲突, 需要通过协商就共同关心的问题达成一致<sup>[73]</sup>。

### 4.4.2.2 Agent 在多 Agent 系统中的不同角色

对于不同应用背景的多 Agent 系统和 Agent 在系统中所起的不同作用, Agent 扮演的角色也各不相同, 大致来讲可以分为以下几类:

#### 一、任务 Agent

这是最为普通的 Agent, 它在系统中负责完成一定的局部任务, 所有的任务 Agent 相互合作就实现了系统的总体功能, 并且, 一般而言, 不同 Agent 的功能是弱相关性的, 即一种 Agent 内聚了一类相似功能, 但有些 Agent 的不同实例或一种 Agent 的新老版本可以同时存在于一个多 Agent 系统中, 共同完成系统中的一类任务, 它们按一定的指标进行竞争或分配, 对于具体的一次任务往往仍然是由一个 Agent 独立完成。

#### 二、管理 Agent

虽然多 Agent 系统将系统智能分散到各个 Agent 中,但在各 Agent 运行过程中,通常仍需要一类 Agent 在系统中负责公共资源的管理,为其它 Agent 创建并维护一系列的公共设施来实现通讯、仲裁、调度等服务,这一类 Agent 就是管理 Agent。这类 Agent 通常在系统中具有最高的权限,并且往往与实际应用无关,具有较高的通用性,但同时,对其可靠性的要求往往也是最高的。

### 三、代理 Agent

代理 Agent 也是一类很重要的 Agent,甚至于某些领域或应用案例所指的 Agent 就是特指代理 Agent,因此,Agent 有时被直接翻译为“代理”。代理 Agent 通常没有明显的独立意志和利益,它是作为系统以外其它个体的代表在系统内进行活动,不同于任务 Agent,它的目标是尽可能准确地理解其委托者的意图和利益,同时更有效地向委托者表达系统内与之相关的信息。在目前的系统中,委托者通常是人或是物理存在的各种设备。

#### 4.4.3 多 Agent 系统实现的几个关键问题及其研究现状

目前,Agent 技术从总体上仍处于研究阶段,与广泛的实际应用还有一定的差距,并且由于 Agent 的抽象性,使其在很多问题上难以形成放之四海而皆用的统一标准。

在多 Agent 软件系统设计中,面临的问题通常可以分为两类,一类是 Agent 个体的微观设计,即如何建立有效的内部模型使 Agent 具有与其概念相适应的学习能力、协同能力等;另一类则是多 Agent 系统的宏观设计,即如何建立合理的体系框架使 Agent 能够在其中进行有效的运作和交互。

##### 4.4.3.1 Agent 的通讯语言

Agent 的通讯能力是其自主性的基础、社会性的体现,是其学习能力的工具和智能性的外在表现。Agent 通讯语言是一种用于表达 Agent 间交互消息的描述性语言,它定义了交互消息的格式和内涵,即语法和语义。目前,主流的通讯语言有 KQML 和 FIPA-ACL 两种<sup>[72]</sup>。

KQML 是美国国防部高级计划署于 1993 年主持研发的。它是由 41 个所谓的通讯原语所组成的可扩充的通讯原语集合,这些通讯原语由三层不同属性组成,分别是:内容层、通信层和消息层<sup>[74]</sup>。内容层用于描述 Agent 间交互的消息内容,典型的内容描述语言主要有 XML, KIF 等;通信层用于描述和通讯行为相关的一组底层参数,如消息发送者和接收者以及消息的标识等;消息层则用于描述消息的类型信息,如表明消息是一个服务请求或是一个通知等<sup>[75]</sup>。

FIPA-ACL 是欧洲智能物理主体基金于 1997 年提出的另一种 Agent 通讯语言,它是 FIPA 组织提出的一系列 Agent 技术规范中的重要内容之一<sup>[76]</sup>。FIPA-ACL 与 KQML 有很多相似之处,它们在基本概念和规则上有很多相似之处,两者的区别主要体现在语义框架

和注册机制上,相比之下,FIPA-ACL所定义和保留的通讯行为显得更为简练。

但是,就目前而言,上述两种 Agent 通讯语言都存在一些共同的局限性,例如它们都缺乏明确定义的公共设施、缺乏对通讯过程的监督管理机制、缺乏对通讯语义的符合验证,同时,对变种语言翻译、移动 Agent 以及 Agent 间的协调合作等方面的支持仍不充分。因此,要将它们作为一种 Agent 通讯语言的标准显得有些力不从心<sup>[72]</sup>。

#### 4.4.3.2 面向 Agent 的程序设计

目前,已有许多专家提出了许多面向 Agent 的程序设计语言,根据这些语言在实现技术上的差异,它们大致可以分为三类<sup>[77]</sup>:

1、基于 LISP 技术,采用 LISP 的语法形式来表示 Agent 的内部组成、行为动作和交互通信,这类语言有 AGENT-0、PLACA 和 AGENT-K 等;

2、基于逻辑技术,采用各种形式的逻辑系统来表示 Agent 的结构和行为,这方面具有代表性的成果有并发 METATEM、CONGOLOG 等;

3、基于对象技术,通过对现有的面向对象程序设计语言(如 C++或 JAVA)进行扩充而为面向 Agent 软件开发提供语言级的支持,将 Agent 视为一个特殊的对象来对待,这类语言有 JAL 和 April 等。

由于在学术界和工业界尚未形成一个系统的面向 Agent 程序设计的指导理论,现有的大部分面向 Agent 程序语言尚不成熟,仍处于原型阶段,往往旨在对某一种 Agent 设计理论进行验证,而语言本身的易用性、简洁性和可操作性等因素考虑不足,实用性较差,编写的软件系统之间的互操作和集成难度高。正是这样的一种状况使得目前面向 Agent 程序语言的用户非常有限,很难想 C++、JAVA 等语言那样工业化的大范围应用<sup>[72; 77; 78]</sup>。

## 4.5 虚拟仪器及其在测控系统中的应用

工业现代化的迅猛发展对自动化测控技术提出了越来越高的要求,许多行业都迫切需要功能更强、规模更大、成本更低而结构更灵活的测控系统。“虚拟仪器”的概念正是在这样的背景之下得以推广,它提出了“软件就是仪器”的口号,为测控系统设计提供了用户自定义的基于 PC 技术的解决方案,有效地提高了测控系统的性能、扩展性和开发效率。

目前,虚拟仪器的应用软件开发环境主要有两类:一类是基于传统的文本语言式的软件开发环境,主要有 NI 公司的 Labwindows / CVI, Microsoft 公司的 Visual C++ , Visual Basic, Borland 公司的 Delphi 等;另一种是基于图形化语言的软件开发环境,主要有 NI 公司的 LabVIEW, HP 公司的 HPVEE 等。其中,图形化的开发环境采用形象的图标节点和数据连线来取代传统的文本编程语句,使工程师可以用其更熟悉的思维方式去理解程序,可以更直观地把握程序的总体结构框架和组元关系,可以将其主要精力放在系统设计中,

而不被束缚于具体编程的细节推敲和语法纠错。在上述工具中, LabVIEW 以其高效易用的图形化数据流编程方式和强大的信号分析处理功能, 成为最具代表性并且应用最广的虚拟仪器开发平台<sup>[79]</sup>。

#### 4.5.1 LabVIEW 中 VI 程序的运行方式与控制技术

基于 LabVIEW 开发的 VI 应用程序由前面板和程序框图构成, 前面板提供了程序与用户交互的界面, 而程序框图则是程序功能的具体实现。程序框图又包括节点和数据连线两大组成部分。节点是系统的动作执行单元, 完成一定的数据操作, 它可以是一个简单的加减操作, 也可以是一个复杂的带有前面板的 SubVI, 而每个 SubVI 又可以往下细分成更小粒度的节点。节点包含若干个输入或输出端口(或两者兼备), 而数据连线就是负责将数据从一个节点的输出端口运送到另一个或多个节点的输入端口, 是数据流的载体。在系统程序框图(Block Diagram)中, 一个节点可以在不同的地方多次出现, 如果这个节点是可重入性的(Reentrant), 那么, 节点的每一次出现, 应用系统都会在内存中生成一个独立的实例, 这种情况下, 多次出现的节点可被看成是完成同样功能但互不相关的多个节点; 若节点是非重入性的, 则系统运行时, 内存中只有该节点的一个实例, 这种情况可以认为是同一个节点在不同的地方接收不同的数据流入, 或者将其产生的数据输出到不同的地方。LabVIEW 程序框图最终形成一张数据流图(Wire Diagram), 对于编程人员而言, 这张数据流图是不可见的, 它被 LabVIEW 编译器用于执行代码<sup>[80]</sup>。

##### 4.5.1.1 基于数据流的运行方式

作为一种图形编程语言, LabVIEW 具有很多和文本编程语言不同的特性, 其中关键的一点就是它基于数据流的运行模式。

从程序组成这个方面来讲, LabVIEW 中的 SubVI 相当于文本编程语言中的函数, 它们都是程序分解的产物, 负责具体的、局部的功能实现, 但从运行模式这一方面而言, 这两者间却又存在明显的差异。大多数的文本编程语言采用控制流的运行模式, 程序元素的先后顺序决定了程序的执行顺序; 而在 LabVIEW 中, 数据流经节点的动作决定了程序框图上 VI 节点的执行顺序。在不考虑动态加载的情况下, 运行 LabVIEW 程序时, 所有 SubVI 都会被加载到内存中, 在被调用之前, 它们处于“休眠”状态, 当一个 SubVI 所需要全部数据都流入其输入端口时, 它就被激活(Fire), 而当它完成预定的操作并输出结果之后, 它又重新回到休眠态, 等待下一次激活, 因此, SubVI 是一个相对独立的实体。如果一个 SubVI 节点的输入数据来源于另一个节点的数据输出, 那么, 前者对后者存在依赖关系; 而如果两个 SubVI 节点分处在两个条件 Case 中, 外界的数据按一定的条件判定准则流到其中的某一个节点中, 那么, 这两个节点之间就存在竞争关系。如果两个 SubVI 之间没有数据流的依赖或竞争关系, 当数据同时到达它们的输入端口时, 它们可以被视为同步执行,

这种模式大大降低了多线程的实现难度。

但是，作为数据流的常规载体，数据连线所定义的数据流的前后端和数据流向，是在编程者开发过程中确定下来的，在系统运行时，节点之间的数据关系保持不变，这就在一定程度上降低了系统的动态灵活性和 vi 的可重用性。

#### 4.5.1.2 数据同步技术

为了更好地协调相互并行的 SubVI 并弥补数据流上述的限制，LabVIEW 提供了局部变量和全局变量这两种数据传递工具以及强大的同步运行控制技术。其中，局部变量和全局变量从本质上讲并不属于数据流，它们掩盖了数据流的进程，因此，过多地使用它们对系统是无益的。而同步控制技术在大多数情况下可以用来取代它们完成更严格的数据传递和同步协调的工作<sup>[81]</sup>。

同步控制技术包括：通告（Notification）、队列（Queue）、信号量（Semaphore）、集合（Rendezvous）和事件发生（Occurrence）。通告和队列主要用于数据传递，而后三者主要用于 SubVI 或循环体之间的同步协调，应用相对较少<sup>[82]</sup>。

作为一种在并行任务间协调管理的有效途径，同步控制技术有助于用户开发出更强大的 LabVIEW 应用系统，但不可避免的，它也在一定程度上增加了编程难度、降低程序的可读性。

#### 4.5.1.3 程序的动态控制技术

对程序进行控制时涉及的对象包括编程环境、VI 和控件等，控制的内容包括对象的状态、外观和执行方式等。这些控制行为可能发生在同一程序内部，也可能是针对不同的程序，甚至是实现对网络上其它计算机中运行程序的控制。一般情况下，这些控制都是在程序设计时进行设置的，但有时候需要在程序运行过程中进行实时配置，这就是程序的动态控制，它使程序可以实现更复杂多变的高级功能。在 LabVIEW 中，实现程序动态控制功能的方法称为 VI Server 技术<sup>[81]</sup>。

在应用程序中，一个对象打开时，LabVIEW 自动为它创建一个唯一的参考号（Reference），并随对象存在直至关闭。参考号是贯穿 VI Server 技术始终的一条线索，根据参考号，VI Server 实现了对 VI 的远程调用、动态加载、运行控制以及期间各类参数的设置与查询。正是 VI Server 技术的存在，使 LabVIEW 应用程序的动态可配置性和伸缩性得到了很大程度的提高<sup>[83]</sup>。

### 4.5.2 LabVIEW 在测控系统中的应用现状

LabVIEW 自诞生以来，在研发设计、产品测试、生产监控等方面得到广泛应用，范围遍及电子、机械、通信、汽车、生物、医药、化工、科研、教育、军事等诸多行业领域，

而且随着新版本的不断推出,其功能、性能和可用性都有了持续提升。据统计,在测试与测量领域,其国际市场的占有率高达 65%,远远超过了其它竞争对手<sup>[79]</sup>。在国内,自上世纪 90 年代以来,部分高校相继开展了虚拟仪器技术的研究与开发工作,近年来,也有越来越多的企业和科研院所从事虚拟仪器技术的研究和应用。

但是应该看到,LabVIEW 与传统文本编程语言之间所存在的巨大差别,既限制了 LabVIEW 的推广应用,也增加了计算机学科中各种先进技术在 LabVIEW 虚拟仪器开发中的应用难度,其结果是目前 LabVIEW 开发过程中缺乏较为系统和宏观的软件工程思想的指导,这也是目前 LabVIEW 的应用大多仍停留在中小型测控系统中的原因之一。

## 4.6 基于 Agent 与空间概念的流量监测系统总体框架

针对大型管路系统和移动目标(如车辆等)的远程分布式流量监测正日益受到关注,并且随着计算机及网络技术的快速发展,远程流量监测技术水平也在不断提高。在这样的大型流量监测系统中,各个监测节点和用户终端往往都是分布性的、移动性的个体,因此,采用集中式的控制方式往往是不现实的,只有将系统的智能分解,在维持系统整体性的基础上赋予各个节点独立解决问题的能力,才能使系统效率最大化,而多 Agent 系统技术正是实现这一目标的一种新颖有效的理论工具。

### 4.6.1 流量监测系统中 Agent 与空间概念的提出

如前所述,Agent 是具有自治性、社会性、反应性和主动性的智能实体,而多 Agent 系统是多个 Agent 有机构成的集合。这是一个综合了计算机学、经济学、哲学、逻辑学、生态学和社会学等多个学科的高度交叉的研究领域。从某种意义上讲,多 Agent 系统是参考人类社会而建立起来的人工社会,一方面,多 Agent 系统理论为人类社会的建模和理解提供了强大而新颖的工具,另一方面,运用多 Agent 系统理论对与人类社会密切相关的各种系统进行建模,可以将这些系统和人类社会一起汇融成一个更宏观、更抽象的社会结构,使我们能够用一个新的角度去理解和分析目标系统及其与人和自然环境之间的交互关系。

包括流量监测系统在内的各种监测系统的本质目标是实现人和环境中各种对象的交互。人处在一定的环境当中,通过某些方式感知环境输入,并自主地对输入做出响应,进而通过适当的手段使环境按照人的意图产生改变,这就是人对环境中管路流量等各种状态信息进行监测的抽象描述,它与 Agent 的抽象体系结构是一致的,因此,人可以被视为一种特殊的 Agent,这种特殊性表现在其智能程度和粒度规模等方面,而与之同理,流量监测系统的目标对象从某种程度上讲也具有自治性等 Agent 的特性,并且同样接收包括人在内的外部环境输入信息,同时又对环境产生一定的影响,因此,它也可以被视为 Agent。由于人与流量监测对象这两种 Agent 在存在形式上具有较大的差别,在它们进行直接交互的

过程中就会遇到各种障碍,因此就必须依赖一系列其它类型的 Agent,作为两者交互的中介,这就是流量监测系统的软硬件。若不考虑各种 Agent 在粒度规模和智能程度上的差异,人、流体管路和流量监测系统中按 Agent 理论建构的各个软硬件实体实际上可以被看成是分处在不同生存空间中的平等 Agent,它们通过一定的方式进行交互、协商与合作。

一个大规模的完整的流量监测系统包括了环境空间、硬件空间、网络空间、软件空间和人类空间等五个空间。其中,环境空间和人类空间可以统称为自然空间,而相对应的,其余三个空间组成人工空间。

在各空间的分界线上分布着各类设备和模块,包括流量传感器、GPRS 收发器以及各种人机交互设备(如显示器、键盘)等,它们本身并非 Agent,而是负责跨空间的信息转译工作。

监测系统中还存在一类 Agent,如人机交互 Agent 和通讯 Agent 等,它们属于前面所述的代理 Agent,作为一个空间中的 Agent 在另一个空间的代理,代表它们参与另一个空间的活动,比如在软件空间中,人机交互 Agent 可以被视为是一个虚拟人存在。

基于上述的 Agent 和空间概念,流量监测系统结构如图 4-4 所示。其中,人类空间中担任不同职责的各个用户通过人机界面等设备与其它各个空间进行交互,而其它空间之间也通过传感器等实体进行信息传递,流量等信息可以依托于各种 Agent 以不同的物理逻辑形式在各个空间中进行流动。

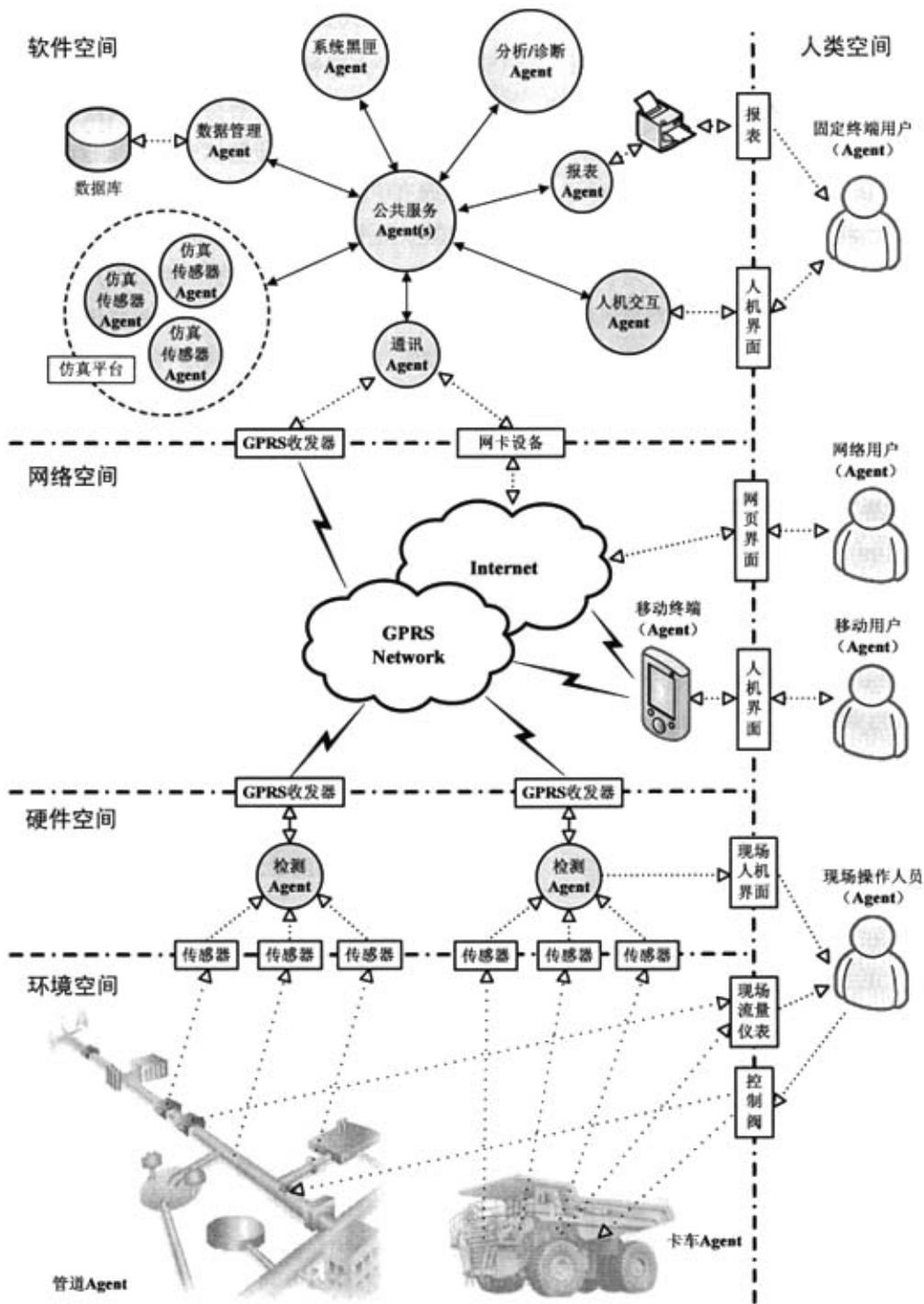


图 4-4 基于 Agent 的流量监测系统结构示意图

#### 4.6.2 空间概念与测控系统中的层次概念的对比

目前针对测控系统存在一种层次分解的分析方法,这种方法将测控系统体系结构分为四层,分别为硬件与硬件接口层、硬件接口驱动层、应用编程框架层和仪器应用层<sup>[84]</sup>,这种分解方法通常是针对基于单台 PC 的测控系统而言,而往往并不涉及系统的分布特性,在这一类系统中,系统的智能大都集中在应用顶层中,层与层之间是控制与被控制的关系,并且控制级别沿纵向递增。而本文所描述的空间构成是针对分布式系统而言的,每一个终端个体都只实现总系统中的局部智能,因此,各空间之间可以看成是横向对等的,不同个体之间并没有绝对的控制与被控制的关系。可以说,空间和层次实际上是两种不同方向的分解途径,在进行横向的空间分析时,忽略了系统纵向的层次结构。

#### 4.6.3 监测系统中空间的融合

监测系统的五个空间中,人类空间和环境空间是最原始、最根本的两个空间,贯穿监测系统发展的始终,而其余的三个空间是随着人类生产规模的扩大和科学技术水平的进步而逐渐衍生出来的,作为人类空间与环境空间之间的过渡环节。

如上所述,在对监测系统进行空间构成分析时,各空间的层次结构被忽略了,只体现其中反映其特征的关键的一层,而实际上,三个人工空间通常具有相似的层次结构,都包含了硬件和软件两部分,软件是 Agent 智能的具体实现,而硬件为 Agent 提供了生存平台。目前,受限于各空间内硬件不同的发展水平,这三个空间的 Agent 呈现了不同的特点、功能和适用范围,但随着计算机和微电子等多个学科技术的不断发展,Agent 所存在的硬件环境的限制将逐渐减小,这三个空间的界线也将因此而日趋模糊并最后融为一体。

#### 4.6.4 任务求解空间的变迁与监测技术发展的关系

监测系统中的 Agent 都有其各自的任务和作用。在同一个空间内,任务从一个 Agent 转交给另一个 Agent,可以看成是一个竞争或升级的过程,但由于空间本身存在的各种各样的局限,通过 Agent 的竞争和升级有时难以从根本上提高任务的执行效果,这就需要将任务迁移到另一个空间来进行求解,从而使其效果产生质的变化,监测技术往往也就在这一过程中得到革命性的进步。

流量监测系统本身的作用就是代替人完成流量检测和数据信息的收集、汇总和再现,这一过程,抽象而言就是部分检测任务从人类空间迁移到人工空间(硬件空间、软件空间和网络空间)的过程。由于监测系统在完成这些检测任务的效率和准确程度等方面是人所无法比拟的,所以,监测系统的应用极大地提高了人对环境的监测能力。

又如虚拟仪器,它将监测仪器的数据分析等功能从硬件系统中抽离出来,而在软件系统中进行实现,这一过程即是监测系统中分析任务从硬件空间迁移到软件空间、甚至是网

络空间进行求解的过程，由于软件所具有的灵活性和低成本等优势，使监测仪器的分析能力、生产成本和配置难度等方面都得到显著提高。

因此，运用 Agent 和空间概念对流量监测系统进行建构，可以是我们更清晰地了解和析流量监测系统的智能分布和任务求解方式，为其进一步发展提供了良好的基础。

#### 4.7 本章小结

本章首先给出了流量监测系统的基本结构，指出了其目前发展中存在的一些问题，针对这些问题，介绍和分析了与之相关的 GPRS 无线通讯技术、虚拟仪器技术和多 Agent 技术，最后结合 Agent 思想和流量监测系统的特点，提出了基于 Agent 和空间概念的大型流量监测系统总体框架，并从 Agent 和空间概念的角度论述了监测系统的组成结构与演化过程，为大规模远程流量监测系统的建构与实现提供了一种新颖的思路。

## 第五章 基于 MAS 与 LabVIEW 的远程流量监测系统原型设计

### 内容提要

前一章提出了基于 Agent 和空间概念的流量监测系统总体框架,在此基础上,本章对其中的软件空间进行了总体设计,并对其实现过程中需要首先解决的两个关键问题,即通讯系统设计和运行机制实现,进行了分析研究和原型设计,最后提出了基于配置表的系统组态方式。

### 5.1 引言

在前面总体框架所述的流量监测系统硬件空间、网络空间和软件空间等三个人工空间中,软件空间通常是智能最集中的一部分,因此它也是监测系统设计的重点所在。

在大型的流量监测系统中,通常包括了多个计算机终端,分别实现不同的功能,如监测分析、实时记录、虚拟仿真等功能,因此它同样也是通过一定的网络途径连接而成的分布式结构。每一台 PC 终端中都驻扎着一定数量的 Agent,这些 Agent 的功能和类型决定了这台 PC 终端在流量监测系统当中所扮演的角色及其作用,而 PC 终端则为这些 Agent 提供了物理运行平台的支持。空间中的 Agent 可以在 PC 终端间迁移,或者某一个 PC 终端中的某个 Agent 向另一台 PC 终端的另一个 Agent 提出任务申请,在这样的运行方式下,从应用的角度来看,PC 终端之间是透明的,甚至于 Agent 可以不必关心交互的目标 Agent 是处于本地的同一 PC 终端还是处于远程的另一个 PC 终端内,通讯过程中的网络传输工作由系统中相关的公共服务 Agent 和通讯 Agent 自动完成。

### 5.2 流量监测系统软件空间的总体设计

#### 5.2.1 软件空间的实现平台

从某种意义上讲,流量监测系统软件空间的实现就是面向 Agent 的软件开发过程。由于 Agent 概念的抽象性及其应用目标的不确定性,目前面向 Agent 的软件开发并没有形成通用的指导理论和实现手段:一方面,在现有的面向对象程序语言的基础上发展起来的 Agent 开发环境很难将多 Agent 系统的优点和特性充分地体现出来,只能是作为面向对象设计方法的一种变体,而另一方面,真正面向 Agent 的程序语言又存在原型化、实用性不高的局限性。但是,同样作为一种软件开发语言的 LabVIEW,却很少被用于多 Agent 系统的开发,而实际上,LabVIEW 中的 VI 程序单元与 Agent 在特性上存在一些相似之处,如果能将 LabVIEW 和多 Agent 系统理论有效地结合起来,不仅可以为多 Agent 系统提供一种行之有效的实现方式,而且也使 LabVIEW 应用程序的设计开发更加有理可循,使 LabVIEW

能够在诸如远程流量监测系统这样的大型系统的开发中得到更好的应用。

前面的章节对 Agent 与对象的差别做过较为详细的阐述，与对象不同，Agent 以并行的方式运行，各 Agent 拥有专属的控制线程，它们之间没有调用与被调用的关系，而是通过系统的通讯设施完成数据信息的交互。而 LabVIEW 是一种基于数据流的图形化编程语言，在其应用系统中，VI 一旦得到它所需要全部数据，它就可以触发运行，各个 VI 之间如果没有数据流的竞争或依赖关系，则它们之间也可以被看成是并行的、相互独立的关系，并且，如果把 LabVIEW 中的数据流机制及其数据流图看成是 LabVIEW 开发环境所建设的一种通讯设施的话，那么 VI 之间也是利用系统提供的这样一种通讯设施来进行交互的。

有一点需要补充的是，在 LabVIEW 系统中，VI 是一种粒度灵活性很大的实体，它可以完成大到整个系统、小到局部函数的功能实现，而 Agent 通常是粒度相对稳定的一类实体，因此，当我们将 VI 和 Agent 相提并论的时候，通常是特指系统中具有与 Agent 相似粒度的一类 VI。

### 5.2.2 流量监测系统软件空间的基本构成

流量监测系统软件空间的基本构成元素如图 5-1 所示。

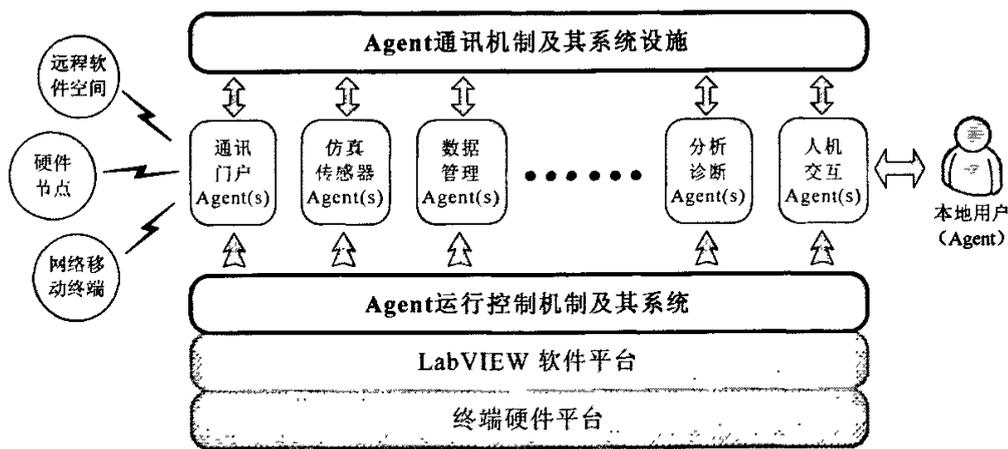


图 5-1 流量监测系统软件空间的结构示意图

从图 5-1 中可以看出，流量监测系统软件空间是在 LabVIEW 软件平台和一定的终端硬件平台上建构的软件系统，流量监测等一系列功能模块都以 Agent 的形式存在于这一系统。其中，Agent 通讯系统和运行控制机制是建构流量监测系统软件空间中最先需要设计实现的两部分。Agent 运行控制机制及其系统使各功能模块以 Agent 的运行方式参与到系统中来，而 Agent 通讯系统为这些以 Agent 形式存在的功能模块提供通讯交互的基础支持，在此基础上，才能通过不同功能 Agent 的开发来实现流量监测系统中的不同功能。

另一方面，就目前而言，LabVIEW 平台中 VI 所具有的类似于 Agent 的自治特性还没

有被充分地体现出来,表现在 VI 的激活和休眠状态仍然由系统代为控制,甚至于 VI 很多时候被弱化为完成一定数据处理功能的函数,而且基于数据连线的“有线数据流”方式也束缚了 VI 系统的动态扩展性。因此,在将 LabVIEW 与多 Agent 系统理论结合时首先必须建立面向 Agent 的 VI 间非连线的信息交互机制和独立于数据连线的 VI 运行机制。

## 5.3 通讯方法研究与系统设计

### 5.3.1 通讯方式的选择与设计

#### 5.3.1.1 通讯模型的选择与设计

目前,多 Agent 系统常用的通讯模型有管道模型、黑板模型和邮箱模型三种<sup>[72]</sup>。

在管道模型中,参与交互的 Agent 之间通过建立的通讯管道进行消息传递。一旦在 Agent 之间建立了通讯管道,那么 Agent 双方的通讯是双向、对等的,管道归属于交互双方,不与第三者共享。这种方式的优点是通讯的实时性和保密性可以得到较好的保证,但不适合一对多、多对多的通讯场合。

黑板模型中,通讯消息是以广播的形式传输的,参与通信的一组 Agent 共享一个公共的存储区域,即所谓的“黑板”,组内的所有 Agent 都可以对这个区域进行访问,包括信息的读写操作等。由于黑板模型是基于信息共享的,因此不需要为每一个通讯组合建立通道设施,但也因此存在保密性和实时性较差的缺点。

邮箱模型是介乎于管道模型和黑板模型之间的一种通讯模型。与管道模型一样,邮箱模型也需要为参与通讯的 Agent 建立管道,但不同的是,邮箱模型中的邮件管道一般是由多个 Agent 共享的。通讯时,发送者 Agent 将消息打包成邮件形式,通过邮件管道发送到目标邮箱中,目标方 Agent 可以定期或不定期的访问邮箱,查收邮件。因此,在邮箱模型中,邮件可以是多方共享利用的,特别是对于数据量较大的消息传输,邮件共享可以减少系统的信息冗余,并且其收发方式具有异步性,可以避免消息收发过程 Agent 之间的相互制约,但其保密性和实时性同样难以得到保证。

从以上分析可以看出,上述三种方式各有所长,但又都存在一定的不足,难以独立支撑整个系统的通讯任务。

除了上述的三种通讯模型,在大规模分布式计算应用领域,还有另外一种广泛使用的通信模型——发布者/订阅者模型<sup>[85; 86]</sup>。这种模型将交互过程中传输的信息称为事件,订阅者(如客户端)以事件订阅的方式向系统或发布者描述它感兴趣或关注的一个事件或一类事件的匹配条件;当事件的发布者(如服务器)形成一个事件时,发布者可将其直接或间接地发送给感兴趣的所有订阅者,并且这个发送的过程通常以异步的方式进行。一个典型的发布者/订阅者模型包括拓扑结构、事件模型、订阅模型、匹配算法、路由算法和提供服

务质量保证的设施,其中,拓扑结构决定了系统的可扩展性;事件模型定义了事件的数据结构;订阅模型定义了系统能够支持的订阅条件,指明了订阅者如何表达对事件子集的兴趣;匹配算法和路由算法一般要根据前面三者进行优化。发布者/订阅者模型的表达能力、效率、可扩展性和服务质量是其主要目标,但这些目标往往是相互矛盾的,需要根据具体需求权衡利弊,综合考虑<sup>[85]</sup>。

发布者/订阅者通信模型提供的发布者和订阅者之间的非耦合特性是其主要的优点之一,具体可分为下面三种:1、时间非耦合,发布者和订阅者不必同时参与交互,不必同时处于空闲状态;2、空间非耦合,发布者和订阅者不必知道对方的数量和位置,两者间接地完成数据的传递;3、同步非耦合,发布者和订阅者可以异步执行,不必刻意保持一致的步调<sup>[86]</sup>。

根据前面所述多 Agent 系统现有的三种通讯模型存在的优缺点,本设计将传统管道模型中的通讯管道私有化,即每一个管道归一个特定的 Agent 所有,并且作用于该 Agent 的整个生命周期,同时在此基础上引入发布者/订阅者通信模型,使其更适合流量监测系统中大数据量的消息传送。

每一个 Agent 启动时,系统都会为其分配一个通讯管道,Agent 独享该管道,并将其作为其唯一的外界信息传入途径。这个管道只为其拥有者和系统设施所知,对于其它无关 Agent 来说是不可获取的,即一个 Agent 既无法直接向另一个 Agent 发送消息,也无法窃听另一个 Agent 的接收信息,因此,Agent 之间的信息传输都必须经过相关的系统公共服务设施进行转发。这样的设计有三个优点:

1、保证系统对其管辖区域内 Agent 的通讯行为具有管理能力,也即是说,系统有权拦截某一个 Agent 接收的部分或全部信息,同时也能够禁止某些 Agent 之间的通讯行为。在开放式的大型流量监测系统中,Agent 可能来源于不同的开发者,其稳定性和诚信度难以绝对保证,甚至可能存在恶意的 Agent,此时,上述的这一优点使系统能够将这些不稳定或不安全的 Agent 屏蔽掉,以保证系统的安全性、稳定性和抗干扰性。

2、保证系统信息的保密性。在这样的通讯模型中,除了系统基础设施 Agent 外,其它 Agent 无法获知另一个 Agent 的通讯管道,因此也就无法对其输入的信息进行窃听,所以,发完某一个 Agent 的信息,对于其它无关 Agent 来讲是保密的。

3、提高管道的稳定性。由于在 Agent 的生命周期中,其信息输入管道一般是不变的,换言之,通讯管道是相对于 Agent 而言,与传统管道模型中相对于会话的管道模型不同,因此,系统不必频繁地创建和销毁管道,并且便于通讯资源的管理。

但是不可否认,如果处理不当,这种由系统转发的集中式通讯方式也有可能成为系统通讯的瓶颈,造成信息阻塞。为了避免这一点,需要有一套有效的负载平衡机制来对系统基础设施进行管理,这将在后续的章节中进行进一步阐述。

在流量监测系统中, Agent 间的交互内容可分为常规消息和出版物两种。常规消息通常是事务性的, 它可以是某个 Agent 向另一个 Agent 提出的一次任务申请, 或者是协商过程中的一次应答等等, 交互双方为某一个目标而产生的一系列常规消息组成一次会话。会话的产生和组成通常是不确定的, 并且一般是一对一的交互关系。但是, 在流量监测系统中, 除了平常事务性的交互外, 还有很大一部分交互内容是监测、分析等过程中的各种数据型信息, 其传播通常是定期的、单向的、一对多甚至多对多的, 并且某一对象信息的数据格式往往具有一定的规则, 对于这样一类交互, 采用常规的消息方式是不合适的, 因此本文借鉴了发布者/订阅者通信模型, 引入“出版物”的概念, 即将某一个 Agent 定期或不定期产生的一类具有一定规则性的数据称为出版物, 比如某个监测 Agent 对某一管道进行定期的流量数据采集而产生的流量数据。此处“出版物”的概念与上述发布者/订阅者通信模型中的“事件”相似。一个 Agent 可以既作为多个出版物的发布者, 又是其它多个出版物的订阅者。

系统中, 负责常规消息转发的基础 Agent 命名为 ACC (Agent Communication Channel), 而负责出版物转发 (投递) 的基础 Agent 命名为 APC (Agent Publication Channel)。ACC 和 APC 是重入性的, 即系统中可以存在多个 ACC 或 APC, 不同 ACC 可以同时负责一组 Agent 的消息转发, 也可以分别针对不同组的 Agent, APC 亦然。

此外, 出版物的发布者并不维护出版物的订阅名单, 即发布者不需要关心出版物的投递目标, 这部分维护工作同样由系统公共基础设施来完成, 将这个基础 Agent 称为 APM (Agent Publication Manager)。Agent 启动的初始化过程中, 它将向 APM 注册其所拥有的出版物信息, 同时向 APM 订阅它所关注的出版物, 必要时也可以退订或注销。之所以将 APC 与 APM 分离, 主要是为了保证出版物转发过程中, APC 不被订阅等出版物操作所干扰。

### 5.3.1.2 通讯管道的设计

上一节的通讯模型多次提到了通讯管道, Agent 通过它接收外界信息, 又通过系统基础设施 ACC 和 APC 的通讯管道输出信息, 并且, 不同于 LabVIEW 中通过数据连线进行的数据流传输, 通讯管道应当是“无线”的, 要实现通讯管道的这一功能, 在 LabVIEW 开发平台中有三种方式: 全局变量、通告 (Notification) 和队列 (Queue)。

全局变量采用控件的形式存放数据, 系统中各个 VI 都可以对其进行访问, 以达到共享的目的; 通告以广播的方式发布数据, 所有收听通告的节点都可以从中接收数据; 而队列传输的数据是独占性的, 动作最快的队列监听者可以从队列中读取数据并将其擦除。

这三种方式的不同工作方式, 与 Agent 原有的三种通讯方式对比可以发现, 它们有一一对应的类似关系。全局变量类似于邮箱, 可供多个 Agent 访问, 保密性难以保证, 通告

类似于黑板，信息以广播的形式共享，而队列则类似于管道，信息只流向目标一方。这样的类比并不十分严密，但可以在一定程度上说明三者的差别。除此之外，全局变量和通告都没有提供队列的数据缓存机制，它们所保存的永远是最新的数据，新加入的元素将覆盖原有的数据，因此，基于全局变量或通告的通讯管道设计存在信息丢失的隐患。综上所述，队列是通讯管道的最佳实现方法。

在 LabVIEW 平台中，由 Obtain Queue.vi 来创建一个新的队列，创建之后，函数将返回该队列的参考号，系统基础设施一方面将该参考号告知其拥有者 Agent，另一方面将该参考号及其拥有者的身份信息记录备案，通信时，ACC 或 APC 从记录表中检索得到信息接收者的队列参考号，在往该队列中传入信息，而 Agent 通过监听其拥有的管道队列来获取外部信息。

前面提到，通过管道的私有化可以防止 Agent 对其它 Agent 的非法监听，但是由于 ACC 和 APC 通过其本身拥有的管道队列直接接收其它所有 Agent 的信息，因此它们的管道队列参考号是对其服务的一组 Agent 公开的，这样，信息保密性的问题依然存在，为了解决这一点，本设计对 ACC 和 APC 的队列参考号进行加密处理，并由系统为各个 Agent 提供解密发送的 SubVI，即禁止 Agent 对 ACC 和 APC 的接收队列直接进行操作。下面图 5-2、图 5-3 给出了一种基于凯撒密码<sup>[82]</sup> (Caesar Cipher) 的管道队列加密和解密的方法。

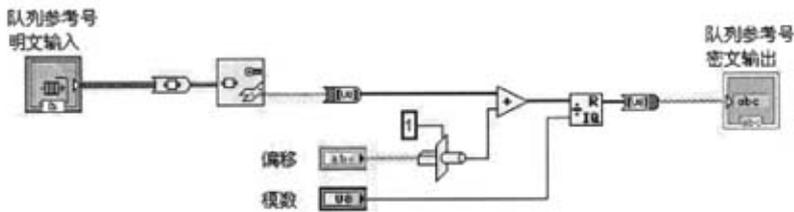


图 5-2 基于凯撒密码的队列参考号加密方法

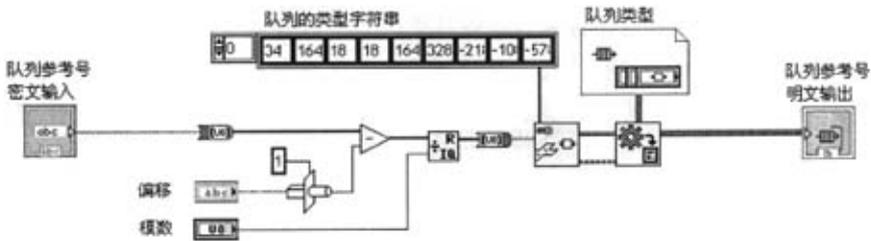


图 5-3 基于凯撒密码的队列参考号解密方法

### 5.3.1.3 网络通讯的实现

在流量监测系统的软件空间中，将每一个 PC 终端看成是支撑一系列 Agent 的一个局部

平台，通过通讯 Agent VI 可以实现不同平台上的 Agent 信息互联，在本设计中，将这个通讯 Agent 命名为平台门户 Agent (Platform Gateway, 简称 PG)。在 ACC 和 APC 对信息进行转发时，首先判断接收者的地址，即是否为本地 Agent，如果不是，则直接将信息发送给 PG，PG 再转发到对方平台中，通讯的过程如图 5-4 所示。一般情况下，在跨平台的交互过程中，对于交互双方而言，转发的中间环节可以被看成是透明的，即 Agent 不一定需要区分对方处于本地或是远程，甚至不必区分对方是处于软件空间的同类 Agent，还是处于其它空间的异类 Agent。

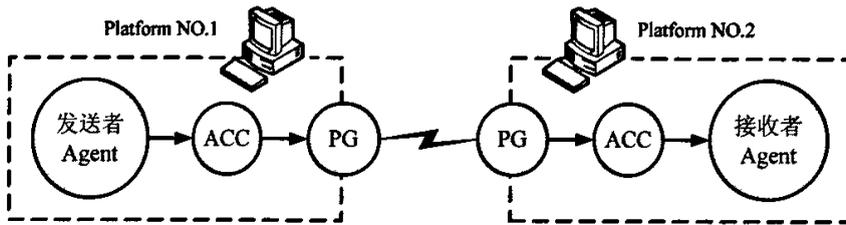


图 5-4 跨平台的 Agent 信息发送

在 LabVIEW 开发环境中，可以通过 DataSocket 实现数据信息的网络传输。DataSocket 极大地简化了应用程序之间以及计算机之间进行数据传输的过程，它建立在 TCP/IP 协议的基础之上，但是并不需要进行复杂的底层 TCP 编程，也不需要将数据转换成非结构化的字节流，而是以自己特有编码格式传输各类数据<sup>[81]</sup>。

采用 DataSocket 传输数据时涉及到三个角色：数据发布 VI、数据订户 VI 和 DataSocket Server，在图 5-4 所示的跨平台 Agent 信息交互过程中，Platform NO.1 中的 PG 就是数据发布 VI，而 Platform NO.2 中的 PG 就是数据订户 VI。DataSocket Server 是 LabVIEW 附带的一个独立运行的小程序，发布数据的程序通过它进行数据输出，而输入数据的程序通过它进行数据接收<sup>[81]</sup>。

使用 DataSocket 协议传输数据时，在默认情况下，DataSocket Server 只向数据客户发布最新的数据，当数据发布的速度大于数据接收时，则有一些数据被覆盖而遗漏。由于在 Agent 的交互过程中，每一次信息通常都是不可丢失的，因此这种方式并不适用，必须通过设置数据缓冲区，采用缓冲方式来收发数据。具体的信息收发过程如图 5-5、图 5-6 所示。

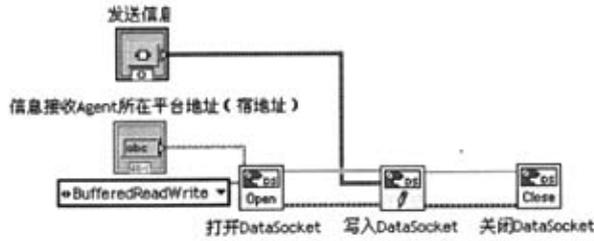


图 5-5 向远程平台发送信息

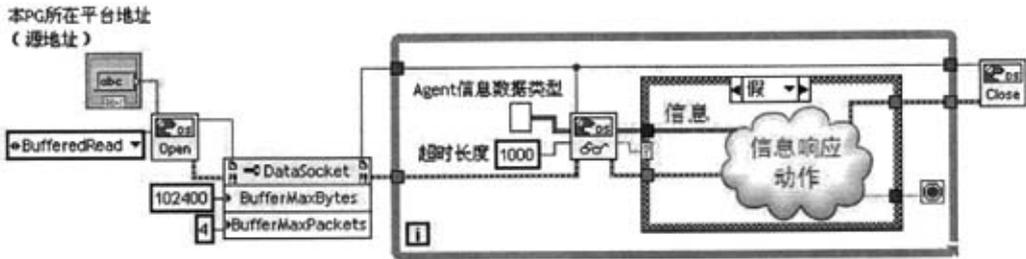


图 5-6 接收外部传入信息

### 5.3.2 通讯消息的格式框架

根据前面的通讯设计方案，在系统中传输的交互信息包括出版物信息和常规会话消息，根据两者的功能作用的不同，其的内容框架也有所差异，参考了 FIPA-ACL 的规范，本设计将出版物信息和常规会话消息的格式框架定义为下表 5-1 和 5-2 所示的形式。需要特别指出的是，收发双方的所在终端地址集成在 Agent 的名字中，如“Agent1@10.11.112.6”。

表 5-1 出版物消息格式

字段	中文名称	合法填写者
<b>Type</b>	消息类型	固定为“Publication”
<b>Name</b>	出版物名称	发布者
<b>Pub-ID</b>	出版物索引号	发布者
<b>To</b>	订阅者名单	APC
<b>From</b>	发布者名称	发布者收发器
<b>Send-Time</b>	发布时间	发布者收发器
<b>Pub-Time</b>	出版时间	APC
<b>Receive-Time</b>	接收时间	订阅者收发器

<b>Content</b>	出版物内容	发布者
<b>Description</b>	(描述)	所有相关者

表 5-2 常规会话消息格式

字 段	中文名称	合法填写者
<b>Type</b>	消息类型	发送者
<b>Dialogue-ID</b>	所属会话编号	ACC / 发送者
<b>To</b>	接收者名单	发送者
<b>From</b>	发布者名称	发送者收发器
<b>Send-Time</b>	发送时间	发送者收发器
<b>Transmit-Time</b>	转发时间	ACC、PG
<b>Receive-Time</b>	接收时间	接收者收发器
<b>Content</b>	消息内容	发送者
<b>Description</b>	(描述)	所有相关者

### 5.3.3 Agent 通讯消息的表达与封装

通讯信息的表达与封装问题是指 Agent 间交互的消息应该以什么样的形式和规范来表达和传输。由于在流量监测系统中，消息的内容既包括了大量的流量监测数据，又包括各个 Agent 进行协商、合作的交互内容，因此，消息内容的数据格式是不确定的，或者说多样化的。同时，由于消息还需要在多个 PC 终端之间进行传输，因此还希望其具有较好的平台无关性。

目前，在 LabVIEW 平台上，能够满足上述需求的数据表达方式主要有 XML 和变体两种，并且两者具有各自不同的优缺点。

#### 5.3.3.1 基于 XML 的消息表达与封装方式

XML (eXtensible Markup Language, 可扩展标记语言) 是基于文本的标记语言，是通用标记语言 (SGML) 的一个子集，由互联网国际标准组织 W3C 于 1998 年 2 月发布。近年来，凭借着强大的生命力和重大实用价值，XML 正成为数据交换的事实上的业界标准，它具有以下几个特点<sup>[87; 88]</sup>：

- 1、XML 是结构化的。在不同的领域中，为特定需要所构造的一套标记可以用文档类

型定义 (Document Type Definition, DTD) 以文档形式保存, 并且可以依靠特定的数据解释分析程序识别和审核其中的内容, 实现 XML 的自我描述功能;

2、XML 是一种独立于平台的标准。XML 通过使用有意义的标签以结构化的格式存储数据, 这种格式可以被任何一种计算机系统所解释。因此, XML 是一种跨平台、硬件和软件独立的标记语言, 可以在不同类型的系统间传递格式化的数据, 成为各种应用程序的通用数据交换格式;

3、XML 是可扩展的。XML 没有预先定义标记, 而由用户根据需求定义, 加大了应用空间;

4、XML 具有强大的链接查询功能。可以用链接去定义相似文档的关系, 确定文档的顺序, 允许链接多个资源。而且 XML 文档可以使用 HTTP 协议, 与二进制数据相比, 通过防火墙可更容易地传送;

5、XML 以 Unicode 为基础, 提供了对多种语种的支持, 使得它具有世界通用性。

Agent 采用 ACL 通讯时, 其消息可划分为通讯原语层和通讯内容层两个层面, 这两者是相对独立的。实现时, 可以使用 XML 来封装通讯原语消息, 也可以同 XML 来表述通讯内容。这样可以充分利用 XML 的平台无关性和通用性, 增强不同种类的 Agent 之间的通讯, 降低通讯复杂程度, 使一些棘手的通讯问题得以解决, 有利于 Agent 寻址、安全性以及标准词汇集定义和共享, 有利于 Agent 的协调合作, 有利于增强多 Agent 系统的灵活性和可扩充性, 有利于 Agent 技术融入 www 环境, 并且不依赖于特定的网络通信协议<sup>[89]</sup>。

由于 XML 的优秀特性及其不断提高的应用普及程度, 基于 XML 的 Agent 通讯语言实现方法越来越受到关注, 并已得到了一定的应用。在 LabVIEW 中, 采用 XML 进行 Agent 通讯消息的封装表达的方法如图 5-7 所示 (以出版物信息为例)。

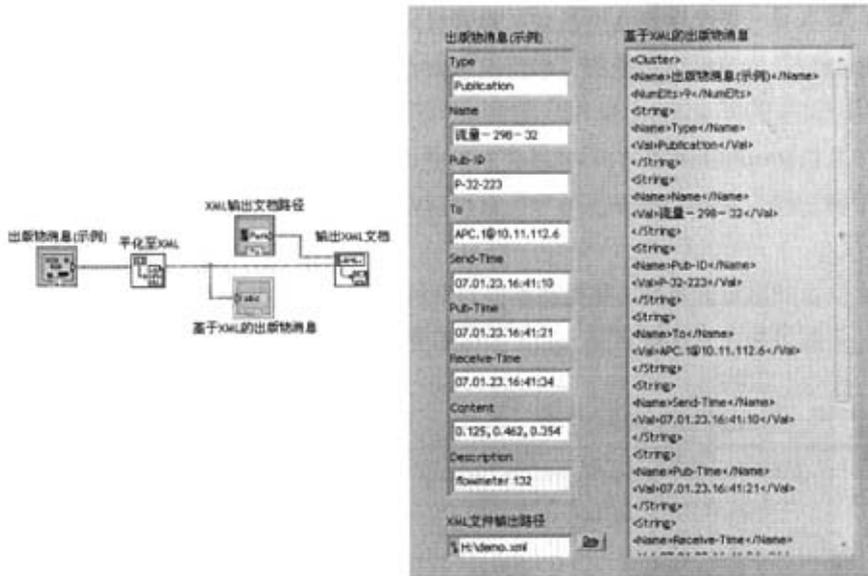


图 5-7 基于 XML 的出版物信息封装表达方法

从图 5-7 中可以看出，采用 LabVIEW 自带的 XML 操作函数，可以很容易地将信息封装为 XML 格式，并且可以 XML 字符串和 XML 文档两者方式输出，但是，目前 LabVIEW 尚不支持用户对 XML 标记规范（XML Schema）的自定义，因此，XML 形式的出版物消息不够简洁，灵活性和可读性较差，特别是在单个 PC 终端的系统内部，采用 XML 形式的消息描述容易产生大量冗余数据。所以，基于 XML 的消息表达与封装方式比较适合于远程跨平台的 Agent 交互。

### 5.3.3.2 基于变体的消息表达与封装方式

变体 (Variant) 是 LabVIEW 中一种特殊的数据类型，没有特定的数据类型，并且可具有属性信息。由于变体数据操作不受数据类型的影响，因此可以被用于不确定类型数据的传输或保存和对未知设备的读写等，同时，变体数据在 ActiveX, COM 和 OLE 控件操作时可以得到很好的应用。

在 LabVIEW 中，平化至字符串函数也可用于将某一数据类型转换为字符串数据类型，从而以独立于数据类型的形式表示该数据。然而，使用平化数据存在一定的限制，即当原始数据类型与所要转换的数据类型不匹配时，LabVIEW 无法对该数据进行强制平化，而被平化的整数也无法还原为扩展精度浮点数。而变体数据类型避免了数据从内存读写时进行还原操作和平化操作，使用更为灵活。

变体数据类型的另一个优点是可存储数据的属性。属性是定义的数据及变体数据类型所存储的数据的信息。例如，如需知道某个数据的创建时间，可将该数据存储为变体数据

并添加一个时间属性来存储时间字符串。属性数据可以是任意数据类型，并且可以作为对数据进行排序的依据、标识生成数据的设备或应用程序，或对数据进行过滤以获取那些有特定属性的变体数据。

变体的数据类型无关性和属性存储能力使其成为 LabVIEW 中表达 Agent 消息的一种行之有效的工具。通讯时，可以通过转换函数将消息内容转换成变体格式，同时将消息通讯原语以属性的形式叠加到变体中。

与 XML 相比，作为 LabVIEW 中的一种特殊的数据类型，变体在使用和自定义方面具有更高的灵活性。以出版物信息为例，采用变体描述 Agent 交互信息的方法如图 5-8 所示。

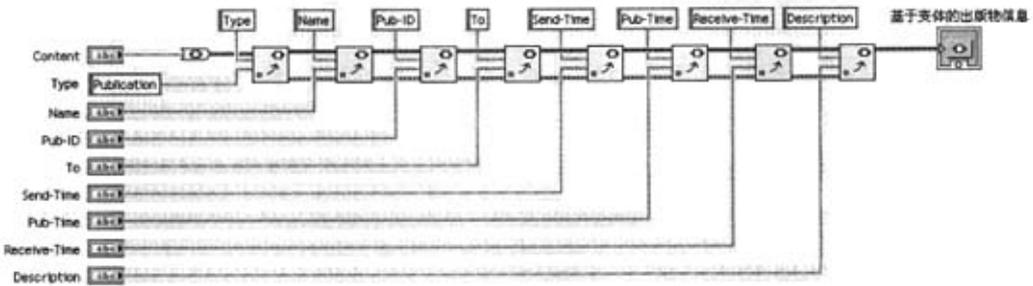


图 5-8 基于变体类型的出版物信息封装表达方法

从图 5-8 中可以看出，消息的内容被转换为变体数据格式，而其它字段作为这个变体的属性被附加在其上面，因此灵活性强，但由于它没有 XML Schema 那样的标记规范进行约束，无法实现格式的校验，需要依靠外部判定，因此，基于变体的消息表达与封装方式更适合与 LabVIEW 平台内部 Agent 的本地交互，与 XML 方式形成互补。

## 5.4 Agent 运行机制的设计与实现

在 LabVIEW 进行流量测控系统的设计中引入多 Agent 系统技术，其中一个重要的原因就是为流量监测系统更好地管理其各个功能模块提供一个宏观的总体的理论指导，使各模块（大粒度 SubVI）能够摆脱 LabVIEW 常规数据连线的约束，使流量监测系统更具伸缩性和扩展性。因此，从这个角度来看，如何让这些具有一定粒度规模的系统功能模块以 Agent 的形式参与到系统当中，也是系统设计当中除通讯以外需要重点考虑的一个问题，在下文中，我们将这种以 Agent 形式存在于系统中的 VI 称为 Agent VI。

### 5.4.1 Agent VI 的动态运行控制

在传统的 LabVIEW 应用系统中，VI 在程序启动时即被载入内存中，并处于休眠的状态，当数据传入时，VI 被激活，完成预定的操作，输出数据，再重新回到休眠状态，等待

下一次激活。因此，VI 的生命周期始终保持与主程序一致，而间断性地处于工作状态，并且其状态是由系统和外界数据流进行控制的。而 Agent 是具有自主性的并行实体，常规 VI 的这种运行方式显然无法符合 Agent 的要求，因此必须利用 VI Server 技术实现对 Agent VI 的动态加载和运行控制。

按照前面 Agent 通讯方式的设计，Agent VI 不再通过连接到 VI 的数据连接来传输数据，而通过队列的途径“无线”地接收信息，原来 LabVIEW 中通过代码框图所定义的数据流图不再对 Agent VI 产生作用(但是在 Agent VI 的内部实现中依然存在)，可以说，基于多 Agent 系统所建构的 LabVIEW 应用系统中，主程序更主要的作用是为本地的各个 Agent VI 开辟一个(局部的)软件空间，而 Agent VI 的运行由系统基础设施中的管理调度 VI 利用 VI Server 技术进行管理。

按照这样的运行方式，Agent VI 的加载方式如图 5-9 所示。系统从 Agent VI 的配置信息中获取 VI 的存储路径、是否重入加载以及加载密码，并通过这三个参数创建 Agent VI 的参考号，根据这个参考号，VI Server 可以启动 Agent VI 并将配置信息中的 Agent VI 运行参数输入给 Agent VI，在上述操作完成后，系统将 Agent VI 中的“Activate”输入置为 True，即告知 Agent VI 进入工作状态。最后，系统还需要将输出的 Agent VI 参考号保存，此后，系统仍可以通过该参考号对 Agent VI 进行其他控制。

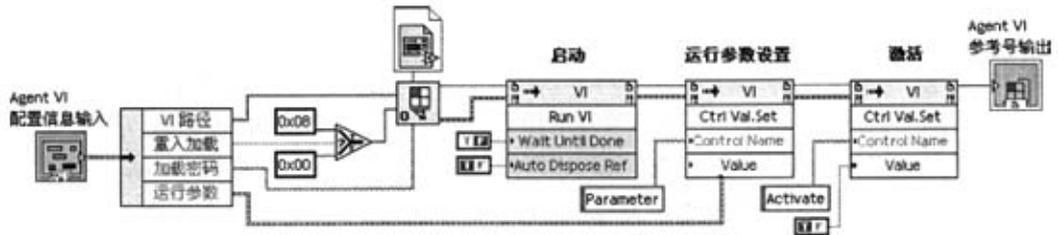


图 5-9 Agent VI 的加载

### 5.4.2 Agent VI 的重入调用

严格来讲，设计生成的 Agent VI 程序代码只是这种 Agent 的蓝本，只有当 Agent 加载过程中由这个蓝本在内存中实例化，得到的这个实例才是真正的 Agent VI，这和面向对象编程语言中的类和对象的关系是相似的。

在多 Agent 系统中，一般情况下，一种任务由一个 Agent VI 实例负责完成，但若这个任务对实时性要求较高，比如前面 ACC 或 APC 的信息转发任务，这就需要多个 Agent VI 实例同时对一种任务负责，这就要求这个 Agent VI 具有可重入特性。

当 Agent VI 需要多个实例同时运行时，除了 Agent VI 本身需要设置为“重入执行”外，它所拥有的不可在 AgentVI 实例间共用的 SubVI 也必须设置为“重入执行”，否则，该

AgentVI 的所有实例将调用同一个 SubVI 实例。但是，反过来，当某个 SubVI 被设置为“重入执行”后，若它在一个 AgentVI 内部被多次调用，那么每次被调用的也将是独立的 SubVI 实例，即这个 AgentVI 将包含这个 SubVI 的多个实例，各实例的数据是不共享的，这与常规的设计目的是有差异的。因此，有可能出现下面描述的情况：某个 AgentVI 需要多实例同时运行，且其中的某一个 SubVI 是不可以被各 AgentVI 实例之间共用的，但是在一个 AgentVI 实例内部，又需要在多处调用这个 SubVI 的同一个实例，这种“在 AgentVI 实例内部多处调用同一个 SubVI 实例”的问题可以被看成是“同一个 SubVI 实例需要在其所在的 AgentVI 实例内部的多个地方接收（或输出）不同的数据流”，因此，解决上述情况的方法之一是同样为这个 SubVI 建立一个队列或通告，并把这个 SubVI 设计成可以在 AgentVI 里面独立运行，同时人为地保证这个 SubVI 在该 AgentVI 里面只被调用一次（即只有一个实例），然后，在（AgentVI 内部）原先需要 SubVI 多次出现的地方，将数据流中的数据以队列或通告的形式传递给 SubVI（指 subVI 为接收数据流的情况，输出数据同理）。

### 5.4.3 Agent VI 的休眠与更替

由于 Agent VI 是通过动态加载的形式创建和销毁的，因此，其生命周期由系统基础设施进行控制（在某些情况下，也不排除 Agent VI 自行终结的可能）。在 Agent VI 的整个生命周期内，它并没有传统 vi 由系统赋予的休眠状态，但当 Agent VI 完成当前对接收信息的响应动作之后，它通常只剩下一项工作，就是监听它的通讯队列管道，等待外界传入的新信息，按照 LabVIEW 队列操作的特点，在等待新队列元素的过程中，Agent VI 并不占用 CPU 资源，因此这个过程也可以看成是一个准休眠状态。

由于 Agent VI 生命周期的可控性和其通讯方式的非耦合性，使其升级更替的难度大大降低。当一个 Agent VI 需要被更高的版本或其它 Agent VI 替换时，只需要将 Agent VI 动态卸载，在将新的 Agent VI 加载到系统中即可，这个过程中，系统的其它功能并不会受到影响。特别的，如果这个 Agent VI 所负责的任务是不可中断的，或者对 Agent VI 的可靠性和稳定性有较高的要求，那么可以先加载新的 Agent VI，使其有一个与旧 Agent VI 共存的过渡期，以保证任务的平滑过渡，在这个过渡期内，还可以让两者同时执行一个任务，并对比评估新老 Agent VI 的执行效果，判定新 Agent VI 的可靠性和稳定性。

### 5.4.4 任务的负载监管机制

在系统中，通常有一些任务对实时性的要求较高，比如在前面的通讯系统设计中提到的信息转发工作，这些任务如果交由一个 Agent VI 实例来完成，容易出现任务阻塞的情况，成为系统性能的瓶颈，因此必要时需要同时加载 Agent VI 的多个实例，并对同一个任务信息输入管道（队列）进行监听，每一个任务都由响应最快的实例取走并执行，而任务的发起者并不需要对 Agent VI 各个实例进行区分，或者说只需要将它们当成是一个实例对待。

相反的，当 Agent VI 的实例个数过多时，大部分的实例将长期处于空闲状态，容易造成系统资源的浪费，因此需要系统对这类 Agent VI 的实例个数进行动态的控制，通常情况下，任务的负载情况可以通过任务信息输入队列中元素的滞留个数来判断。

### 5.5 基于配置表的系统组态功能实现方式

按照上述的通讯方式和运行控制方式的设计，流量监测软件系统的功能实际上是这个系统当前所存活的所有 Agent 的功能综合。如果采用一张配置表来记录系统所加载的 Agent VI 的配置信息，那么，这张配置表也就决定了系统所将具有的功能，换言之，配置表描述了系统的组态行为。在 Agent VI 资源不变的情况下，可以通过修改配置表来调整流量监测系统的功能分布，如果配置表是可以动态修改的，那么系统就具有了动态伸缩性。

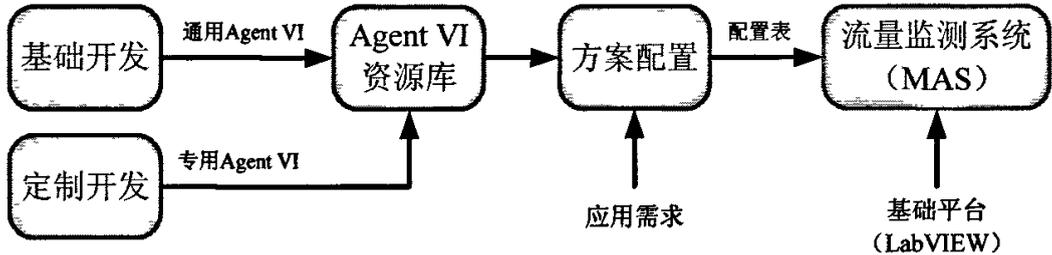


图 5—10 基于配置表的系统组态

### 5.6 本章小结

本章对流量监测系统总体框架中的软件空间进行了结构分析和总体设计，论述了面向 Agent 的虚拟仪器设计方法的可行性和重要性，并利用该方法设计和实现了流量监测系统软件空间中最为关键的通讯系统和运行机制两个问题，并提出了基于配置表的系统组态方式。

## 第六章 总结与展望

### 内容提要

本章对全文的研究工作进行了总结,并结合课题对热分布式微流量计及其系统研究工作进行了展望。

### 6.1 全文总结

流量监测是工业测控领域中一个重要的应用方向,不断发展的工业现代化向流量监测技术提出了越来越苛刻的要求,而与此同时,飞速发展的 MEMS 技术和计算机技术又为流量监测技术提供了良好的发展契机和推动作用。

本文首先针对热分布式微流量计的检测原理,建立了恒功率模式和恒温模式下的数学模型,并通过有限元分析软件 ANSYS 对模型进行仿真验证,随后,利用建立的数学模型分析了流量计的响应特性和误差与流速和设计尺寸等方面的关系。在此基础上,本文还提出了基于虚拟仪器技术和多 Agent 系统理论的流量监测系统框架模型,并分析了其中的通讯和运行控制等关键问题,进行了原型系统的设计。

全文的主要研究内容总结如下:

(1) 根据传热学理论,建立了热分布式微流量计的传热微分方程,并根据流量计在恒功率模式和恒温模式下不同的边界条件对微分方程进行求解,得出这两种模式下的流量计数学模型。与同类型的传统数学模型相比,该模型去除了传统模型分析过程中的部分假设条件和简化过程,使模型能够更真实、更精确地反映流量计的实际热分布情况。在模型建立之后,本文还利用有限元分析软件 ANSYS 的二维热-流体耦合分析单元,对模型的准确性和误差来源进行了验证和分析。

(2) 利用建立的数学模型,分析了流量计的温差响应特性和灵敏度,分析了流量计结构尺寸参数的取值和加工误差对温差响应、灵敏度和测量误差的影响。最后对微流量传感器进行了简要的设计。

(3) 针对规模不断扩大的流量监测系统所呈现的分布性和移动性等特点,指出大型流量监测系统需要解决的两个关键问题,并介绍和分析了与此相关的现有技术,最后,对现有技术加以综合,提出基于 Agent 和空间概念的流量监测系统总体设计方案。

(4) 针对上述总体设计方案中需要解决的两个首要问题,即通讯系统设计和运行机制实现,结合 LabVIEW 编程语言和 Agent 概念的特性,设计了原型系统。最后,在上述设计方案和原型系统的基础上,提出了基于配置表的系统组态设计方式。

## 6.2 未来展望

随着流量测量目标的多样化和复杂化,以及流量监测系统规模的不断扩大,流量监测技术与系统设计方法研究的重要性和迫切性日益突出。目前,随着多个学科技术的快速发展和日趋综合,流量监测与系统设计中涉及的诸多问题都得到了不同程度的研究,并涌现了一批行之有效的解决方案,但从实用性和广泛应用的角度来看,往往仍存在一些问题。本文就热分布式流量测量原理的数学分析以及流量监测系统的设计等方面进行了一些有益的探索,但其研究工作还有很长的路要走。结合本论文研究成果,作者认为,在以下一些方面有待进一步研究:

(1) 和其它传统模型一样,本文在对热分布式流量计进行数学建模分析过程中,仍然加入了一些假设和简化措施,对热传递的微尺寸效应等方面也没有进行细致周密的探讨,因此有待深入研究以进一步提高模型的分析精度。

(2) 在模型基础上,本论文分析了流量计的响应特性、灵敏度及其与结构尺寸等方面的关系,但尚有很多方面没有涉及,仍值得以后更全面的探讨和分析。

(3) 本论文将 LabVIEW 与多 Agent 系统技术相结合,这无论是对基于 LabVIEW 的测控系统的开发,还是对多 Agent 系统技术的发展,都具有较好的推动作用。但是,这方面的研究目前才刚刚开始,要将其应用于大规模复杂系统的具体开发,当中还有很多工作要做。并且就目前而言,多 Agent 系统技术本身也仍然处于研究阶段,如何在其基础上结合 LabVIEW 开发平台本身的特性以及测控系统的应用特点,有所取舍、有所侧重地进行分析研究,也是一个值得探讨的问题。

## 参考文献

- [1] 祝海林. 管道流量非接触测量-方法与技术: 气象出版社, 1999.
- [2] 毛新业. 流量仪表的发展趋势及热点. 世界仪表与自动化, 2006, (8):59-61.
- [3] 梁国伟. 流量测量技术及仪表: 机械工业出版社, 2002.
- [4] 苏彦勋. 流量计量与测试: 中国计量出版社, 1992.
- [5] 张学庆. 流量测量的意义及流量传感器的现状. 石油化工自动化, 2005, (5):99-101.
- [6] 姜万录, 孙红梅, 高明. 基于超声检测的动态流量测试技术研究. 机床与液压, 2004, (10):227-229.
- [7] 阮芬, 马树升, 白清俊, 樊铭京. 超声波流量计的测流原理及其应用研究. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2006, (1):99-104.
- [8] 皇甫立群, 张处武. 数字式超声波相关流量测量研究. 淮阴工学院学报, 2005, (1):12-14.
- [9] Lynnworth, L. C., Liu, Y. Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955-2005. Ultrasonics, 2006, 44(Supplement 1):e1371-e1378.
- [10] 刘志成, 陈祥光. 科氏质量流量计在外输原油自动计量中的应用. 微计算机信息, 2006, (10S):305-307.
- [11] Anklin, M., Drahm, W., Rieder, A. Coriolis mass flowmeters: Overview of the current state of the art and latest research. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(6):317-323.
- [12] 陈世超, 苏昌林, 姚小兵, 刘绪林. 科氏力质量流量计及其在酒类行业的应用. 酿酒科技, 2004, (5):63-64.
- [13] 刘峰凤. 科氏流量计检测技术新方法的研究与开发.[硕士学位论文]. 华中科技大学, 2003.
- [14] 周庆, 王磊, R.Haag. 实用流量仪表的原理及其应用: 国防工业出版社, 2003.
- [15] 李耀民. 智能电磁流量计系统的研究开发.[硕士学位论文]. 浙江大学, 2003.
- [16] Cha, J.-E., Ahn, Y.-C., Kim, M.-H. Flow measurement with an electromagnetic flowmeter in two-phase bubbly and slug flow regimes. Flow Measurement and Instrumentation, 2002, 12(5-6):329-339.
- [17] 崔铮. 微纳米加工技术及其应用: 高等教育出版社, 2005.
- [18] 彭杰纲, 周兆英, 叶雄英. 基于 Mems 技术的微型流量传感器的研究进展. 力学进展, 2005, (3):361-376.
- [19] Nguyen, N. T. Micromachined flow sensors--a review. Flow Measurement and Instrumentation, 1997, 8(1):7-16.
- [20] Beeby, S. MEMS mechanical sensors. London: Artech House, 2004.
- [21] Oosterbroek, R. E., Lammerink, T. S. J., Berenschot, J. W., Krijnen, G. J. M., Elwenspoek, M. C., van den Berg, A. A micromachined pressure/flow-sensor. Sensors and Actuators A: Physical, 1999, 77(3):167-177.

- [22] Yoshihiro Ozaki, T. O., Takashi Yasuda, Isao Shimoyama. An Air Flow Sensor Modeled on Wind Receptor Hairs of Insects. 2000.
- [23] 周正深. 流量测量技术的成本分析及其发展趋势. 集团经济研究, 2005, (09X):172-172.
- [24] 孙承松, 李瑞. 热式气体质量流量传感器研究与发展. 传感器世界, 2005, (10):29-32.
- [25] 盛森芝, 徐月亭, 袁辉靖. 热线热膜流速计. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
- [26] 刘焱, 宋彦铮. 热线式流量传感器的研究. 活力, 2004, (8):181-181.
- [27] 吴江. 热式流量计的研究与制作.[硕士学位论文]. 中国科学院低温技术实验中心, 2001.
- [28] Baker, R. C., Gimson, C. The effects of manufacturing methods on the precision of insertion and in-line thermal mass flowmeters. Flow Measurement and Instrumentation, 2001, 12(2):113-121.
- [29] 崔学雷. 热式质量流量计的应用及工程设计. 冶金自动化, 2000, (5):51-53.
- [30] 吴江, 刘立强. 低温工质液位与流量的热式测量方法的研究. 低温与特气, 2000, (3):8-10.
- [31] 夏征勇. 热导式质量流量计在煤气流量计量中的应用. 中国计量, 2004, (1):50-50.
- [32] 刘跃辉. 热导式质量流量计在大管径气体流量测量中的应用. 烧结球团, 2003, (3):27-29.
- [33] 田林清, 张庆生, 卢彩云, 李彦军. 大管径热式气体质量流量计在烧结生产中的应用. 中国仪器仪表, 2005, (11):97-98,108.
- [34] 余莉, 朱春玲, 孙卫平. 热式质量流量计在多通道管路系统中的应用. 传感器技术, 2005, (1):81-83.
- [35] 刘兴煜, 黄伟才等. 恒功率式与恒温差式热式气体质量流量计的区别. 油气田地面工程, 2002, (5):100-100.
- [36] 杨敏官, 王军锋, 罗惕乾, 康灿. 流体机械内部流动测量技术: 机械工业出版社, 2006.
- [37] 罗晶, 陈平. 分段恒流式热式质量流量计. 自动化仪表, 2004, (11):35-36.
- [38] 肖素琴, 韩厚义. 质量流量计. 北京: 中国石化出版社, 1999.
- [39] 胡学海, 古天祥. 智能热式流量传感器的设计. 仪表技术与传感器, 2003, (6):1-3.
- [40] 张昭勇. CMOS 集成二维热流量传感器的研究.[硕士学位论文]. 东南大学, 2002.
- [41] Ashauer, M., Glosch, H., Hedrich, F., Hey, N., Sandmaier, H., Lang, W. Thermal flow sensor for liquids and gases, pp. 351-355. 1998.
- [42] Ashauer, M., Glosch, H., Hedrich, F., Hey, N., Sandmaier, H., Lang, W. Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two principles. Sensors and Actuators A: Physical, 1999, 73(1-2):7-13.
- [43] 尚丽平, 郑德忠. 基于双原理的热流量传感器的研究. 传感器技术, 2000, (4):14-16.
- [44] 阳宪惠. 现场总线技术及其应用: 清华大学出版社, 1999.
- [45] 周祖德. 基于网络环境的智能控制. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [46] 刘俊. 天然气流量计量中的分布式测控系统的研究.[硕士学位论文]. 中国科学院, 2000.
- [47] 郁岚. 热工基础及流体力学. 北京: 中国电力出版社, 2006.

- [48] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第三版). 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [49] Lammerink, T. S. J., Tas, N. R., Elwenspoek, M., Fluitman, J. H. J. Micro-liquid flow sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1993, 37-3845-50.
- [50] 段萱苒, 谢海波, 傅新, 杨华勇. 微型热式液体流量传感器的设计. *传感器技术*, 2005, (8):83-85.
- [51] 斯东浩, 李艳松. 基于 Mems 技术的热式质量流量传感器. *国外电子测量技术*, 2005, (1):49-52.
- [52] 吴晓波, 赵梦恋, 严晓浪. 一种基于温差测量原理工作的集成型流量传感器. *传感技术学报*, 2004, (1):101-105.
- [53] Nam-Trung, N. A novel thermal sensor concept for flow direction and flow velocity. *Sensors Journal, IEEE*, 2005, 5(6):1224-1234.
- [54] Rudent, P., Navratil, P., Giani, A., Boyer, A. Design of a new sensor for mass flow controller using thin-film technology based on an analytical thermal model. *Journal of Vacuum Science & Technology a-Vacuum Surfaces and Films*, 1998, 16(6):3559-3563.
- [55] Dennis G.Zill, R.Cullen, M. *Differential Equations with Boundary-Value Problems: Thomson Learning*, 2001.
- [56] 刘涛, 杨凤鹏. 精通 ANSYS: 北京: 清华大学出版社. 2002.
- [57] 龚曙光. ANSYS 工程应用实例解析: 机械工业出版社, 2003.
- [58] 席文柱, 闫卫平, 马灵芝, 牛德芳. 硅基热流式微流量传感器研究. *传感技术学报*, 2004, 17(003):446-448.
- [59] Gad-el-Hak, M., Seemann, W. E. MEMS Handbook. *Applied Mechanics Reviews*, 2002, 55B109.
- [60] Gardner, J. W., Awadelkarim, O. O. *Microsensors, MEMS, and Smart Devices: John Wiley and Sons*, 2001.
- [61] 陈爱平, 郭华芳, 王志平, 胡战虎. 基于 Gprs 的分水点流量计量仪表数据采集系统的设计与实现. *测控技术*, 2006, (5):51-54,58.
- [62] 刘泉, 陈吴鹏. 基于无线网络的城市天然气管控一体化系统设计. *计算机工程*, 2004, (B12):524-526.
- [63] 韩斌杰. GPRS 原理及其网络优化. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [64] 吕捷. GPRS 技术. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.
- [65] 彭席汉. 变压器 DGA 智能在线监测仪的研究与开发[硕士学位论文]. 浙江大学, 杭州. 2006.
- [66] Ghribi, B., Logrippo, L. Understanding GPRS: the GSM packet radio service. *Computer Networks*, 2000, 34(5):763-779.
- [67] Nicholas R. Jennings, Wooldridge, M. J. *Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets: Springer*, 2002.
- [68] 殷秀莲, 程显毅. 面向 Agent 软件开发平台的特色. *计算机工程与应用*, 2004, (23):114-116,154.
- [69] 詹剑锋, 程虎. 基于 Mobile Agent 技术的遗留系统再工程方法. *软件学报*, 2002, (12):2343-2348.

- [70] 史忠植. 智能主体及其应用. 北京: 科学出版社, 2000.
- [71] 朱义强. Agent 与 Object. 阜阳师范学院学报: 自然科学版, 2003, (3):28-31.
- [72] 毛新军. 面向主体的软件开发. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [73] Wooldridge, M. An Introduction to MultiAgent Systems: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [74] 王世进, 周炳海, 陶丽华, 奚立峰. Agent 通信语言综述. 计算机工程与应用, 2005, (21):32-37,57.
- [75] 魏晓斌, 周盛宗等. Agent 通信机制探讨. 计算机工程与应用, 2002, (5):66-70.
- [76] Chaib-draa, B., Dignum, F. Trends in Agent Communication Language. Computational Intelligence, 2002, 1889-101.
- [77] 毛新军, 闫琪, 王怀民, 楚蓓蓓. 面向 agent 的软件开发方法. 计算机科学, 2003, (5):94-96.
- [78] 柳娟, 姜同强. 面向 Agent 的软件开发方法. 北京工商大学学报: 自然科学版, 2006, (1):46-48,52.
- [79] 袁媛, 李绍稳, 汪伟伟, 房文娟. 基于 LabVIEW 的虚拟仪器技术研究与应用. 农业网络信息, 2005, (4):6-10.
- [80] Rick Bitter, Taqi Mohiuddin, Nawrocki, M. LabVIEW Advanced Programming Techniques: CRC Press, 2000.
- [81] 雷振山. LabVIEW 7 Express 实用技术教程: 中国铁道出版社, 2004.
- [82] 杨乐平. LabVIEW 高级程序设计: 清华大学出版社, 2003.
- [83] Ritter, D. J. LabVIEW GUI: Essential Techniques: McGraw-Hill Professional, 2001.
- [84] 许亚兰, 曹柏荣, 刘正国. 计算机与可编程仪器的串行通信. 仪表技术, 2004, (5):32-33,45.
- [85] 马建刚, 黄涛, 汪锦岭, 徐罡, 叶丹. 面向大规模分布式计算发布订阅系统核心技术. 软件学报, 2006, 17(1):134-147.
- [86] 汪洋, 谢江, 王振宇. 基于事件的发布-订阅系统模型. 计算机科学, 2006, (1):111-115,123.
- [87] 罗锡梁, 杨世锡, 蔡清华, 钱苏翔, 焦卫东. LabVIEW 中创建和访问 XML 文件的实现. 现代机械, 2006, (002):62-63.
- [88] 凌兴宏, 李绪蓉, 丁秋林. 基于 XML 的 Agent 通信语言. 计算机应用研究, 2003, 20(007):152-154.
- [89] 魏晓斌. 一个基于 XML 的 Agent 通信框架. 计算机应用研究, 2001, 18(010):108-112.

## 攻读硕士学位期间发表的学术论文及参加的项目

1. 第一作者. 一种基于 LabVIEW 的大型测控软件数据传递方式的研究. 工业控制计算机, 已录用, 于 2007 年第 7 期发表.
2. 参与杭州市科技创新项目“基于 MEMS 技术的嵌入式智能质量流量计”的研究工作.
3. 参与国家自然科学基金资助项目“基于温度场模型及特征提取的大型变压器远程诊断方法与技术的研究”的研究工作.

## 致谢

岁月荏苒，光阴如梭，在浙江大学两年的研究生生涯即将画上句号。在这两年的时间里，在向往已久的浙大求是园中，我有幸得到了诸多良师益友在学业和生活上的帮助，在此深表感激。

本学位论文是在导师杨世锡教授的耐心引导和关怀鼓励下完成的。导师高度的责任心、严谨的治学作风、诲人不倦的品德、渊博的知识给我留下了深刻的印象，他的言传身教使我受益匪浅。在此，谨向我的恩师表示由衷的感谢并致以崇高的敬意！

特别感谢远在华南理工大学的姚国兴副教授，正是他无私的关心和栽培，才有了我于浙大求学的两年。

论文的研究和撰写过程中还得到了吴昭同教授、严拱标教授、杨将新教授、何闻教授、曹衍龙副教授以及其他老师的帮助和支持，在此也向他们致以深切的谢意。

自初入实验室以来，在项目开发和论文研究过程中，得到了顾小军博士和周晓峰博士大力的帮助和指导，使我的项目与论文工作得以顺利开展，在此特表谢意。

衷心感谢课题组的其他各位同学。课题组良好的学习和工作氛围，勤奋求实的工作作风都让我受益匪浅。在本论文的研究过程中，得到了任达千博士、纪华伟博士、叶红仙博士、曹冲锋博士、彭席汉硕士、黄超胜硕士、罗锡梁硕士、蔡清华硕士、黄挺朋硕士、项荣杰硕士、张娇娜硕士、项文娟硕士、杨可卫硕士、刘仲宇硕士、张文雷硕士、熊忻硕士等同学的帮助与支持，在此表示衷心的感谢。

感谢室友吴锋、罗建松、朱文斌及其他所有给予我支持和帮助的老师 and 同学。

由衷感谢父母家人及亲朋好友多年来在生活和学习上给予我无私的关怀、支持和鼓励，在此向你们致以最崇高的敬意！

最后，谨向百忙中抽出宝贵时间评审本论文的各位专家、学者致敬！

谢之柱

2007年5月于浙大求是园