

**12.1 传感器的智能化和微型化概述**

**12.2 智能传感器**

**12.3 微型传感器**

**思考题与习题**



# 12.1 传感器的智能化和微型化概述

## 12.1.1 传感器的智能化

智能传感器是带有微处理器，兼有信息检测、信号处理、信息记忆、逻辑思维与判断功能的传感器，应自动测控系统发展的需要而产生，集传感器技术、微型计算机技术、控制理论与现代通信技术等于一体，是一门多学科交叉的技术，也是传感器技术克服自身不足向前发展的必然趋势和结果。

目前，智能传感器的发展尚处于初级阶段，多数智能传感器由几块相互独立的模块电路与传感器组装在一起构成。未来的智能传感器将是传感器、信号调理电路和微型计算机等集成在同一芯片内，即由超大规模集成电路构成的芯片式智能传感器，因此智能传感器的发展关键在于半导体集成技术。

## 1. 国内智能传感器的研究

与国外相比，我国智能传感器的研究主要集中在以下几个方面：

(1) 采用先进的微电子技术、计算机技术，研究开发将传感器和微处理器相结合、具有各种功能的单片集成化智能传感器，这是智能传感器的主要发展方向之一。

(2) 利用生物工艺和纳米技术研制传感器功能材料，开发分子和原子生物传感器，为智能传感器的发展奠定基础。

(3) 采用部分进口芯片、国产芯片和敏感元件，利用现有条件研究实现混合型集成智能传感器(系统)。

## 2. 智能传感器的发展

从工程应用看，智能传感器不断向网络化、柔性化方向发展。

### 1) 网络化

网络化智能传感器是智能传感技术和计算机通信技术相结合的产物。随着计算机技术、网络技术及通信技术的高速发展与广泛应用，出现了网络化的自动测控技术。用网络化测控系统实现大型复杂系统的远程测试，是信息时代测试技术发展的必然趋势。传感器作为信息采集必不可少的装置，也必然顺应这一潮流而出现网络化智能传感器，如分布式测控系统等。

网络化智能传感器技术致力于研究智能传感器的网络通信功能，将传感器技术、通信技术和计算机技术融合，从而实现信息的采集、传输及处理的真正统一和协同。它不仅实现了智能化，如自补偿、自校准、自诊断、数值处理、双向通信、信息存储、数字量输出等功能，而且，它还将敏感元件、转换电路和变送器结合为一体，并在自身内部嵌入了通信协议，直接传输满足通信协议的数字信号，从而具有强大的通信能力。

网络化智能传感器是以嵌入式微处理器为核心，集成了传感单元、信号处理单元和网络接口单元的新一代传感器。

网络化智能传感器使传感器由单一功能、单一检测向多功能和多点检测方向发展；从被动检测向主动进行信息处理方向发展；从孤立元件向系统化、网络化方向发展；从就地测量向远距离实时在线测控方向发展。而且，网络化智能传感器使传统测控系统的信息采集、数据处理等方式产生了质的飞跃——各种现场数据直接在网络上传输、发布和共享，使测控系统本身也产生了质的飞跃——可以在网络中的任何节点处对现场传感器进行在线编程和组态。

## 2) 柔性化

柔性传感器也称为软传感器，是一种以软件算法为主的测量手段。与传统意义上的传感器不同，软传感器所测量的参数一般不是某个特定的物理量或化学量，而是针对具体的应用问题，采用较易直接测得的工艺参数(二次测量变量)，通过数学模型的计算，得到难以测量或者根本无法直接测量的关键变量值，是一种间接的测量方法。在软传感器中，敏感元件可以是一个，也可以是多个。数据采集通道将由传感器输出的多元信息不做任何筛选和辨别地进行获取和读入，再通过相应的信息处理手段得到与所需被测参量相关的检测信息，例如红外光谱分析等。

随着计算机技术的发展，尤其是嵌入式软/硬件水平的提高，对多参数模型的在线处理已经成为可能。它一方面可以解决工程上难以检测的变量值问题，另一方面又可为用某些硬件方法测量到的变量值提供校正和参考，避免了昂贵的硬件设备费用。在工业应用的众多领域中，软传感器以其高度柔性化及与计算机系统结合方便等独特优势，成为传感器智能化的一个重要发展方向。

实际上，软传感器主要是指处理单个或多个测量信号的软件。因此，软传感器也称为虚拟传感器(virtual sensor)或软测量技术。在软传感器系统中，有时需要从数个乃至数百个测量信号中得到关于被测对象的特定参数。软传感器尤其适用于那些不同静、动态特性混合在一起的场合，称为数据融合(data fusion)，常见于系统控制和故障诊断等。

软传感器的一个重要应用领域就是过程控制。在对工业过程进行测控时，由于检测元件及传感器的限制，某些过程输出的采样时间间隔很长，影响了对扰动的行之有效的监测。此外，还有一些过程参数，无法或难以用传感器直接测量。例如，蒸馏塔塔顶/塔底产品的化学成分检测与控制、化学反应器反应速率、化工产品生产过程中各种成分的检测、生物发酵罐生物量参量、炼钢过程中钢水温度及成分的控制、高炉铁水的含硅量、熔炼钒铁、水泥回转窑烧成段的温度控制及连铸连轧钢坯表面温度控制等。

在实际应用中，解决以上问题的方法有两种：其一，选择与不易检测的输出量相关的一些中间量进行快速测量，再通过软件算法获取被测量，此类系统结构简单，响应时间短，但中间变量如果选择得不好，很难达到理想的效果；其二，利用传感器或分析仪器在线测量所需参数，再通过数据处理得到相应的控制决策，该方法比较直观，但系统结构复杂，易出现控制滞后的问题。

## 12.1.2 传感器的微型化

传感器的微型化是近年来传感器发展的重要方向之一，且发展极为迅速，以至逐渐发展成为一门独立技术。

微机械电子系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)技术的发展是传感器微型化的基础，微型传感器是目前最为成功、最具实用性的微机械电子系统装置。可以说，没有微机械电子系统技术，就没有微型传感器。因此，微机械电子系统技术的发展决定了微型传感器技术的发展。

微机械电子系统简称微机电系统，是20世纪80年代发展起来的一门综合性技术。

通常认为，微机电系统是在微电子技术基础上发展而来，融合了硅、非硅微加工和精密机械加工等多种微加工技术，并应用现代信息技术构成的微型系统，它可将信息获取、处理和执行集成于一个器件上。

微机电系统可以制作微传感器、微执行器、微能源等微机械基本部分，也可制作由高性能的电子集成电路组成的微机电器件和装置。

微机电系统目前的研究主要包括以下几个方面。

## **1. 基础理论研究**

随着尺寸的缩小，物质的宏观特性将发生改变，因此在微机电系统中，需要研究微机械学、微流体力学、微热力学、微摩擦学、微光学、微结构学、纳米生物学等。

## **2. 技术基础研究**

微机电系统技术基础主要涉及设计技术、加工技术、材料技术、测量技术、集成与控制技术等。

## 1) 设计方法研究

微机电系统的设计方法主要有自底向上设计、自顶向下设计和中间相遇设计等方法。

自底向上设计法的仿真和设计费用较少，但难以对系统功能和经济性进行优化；自顶向下设计法虽然可以进行系统优化，在整个过程中进行仿真，但由于微机电系统涉及的因素太多，目前在计算能力和仿真建模上还不能满足系统的要求；中间相遇设计法可利用宏观模型，以这些模型描述不同物理状态的特性，在系统层面上进行合理仿真，相比之下这是比较可行的设计方法。

微机电系统的设计依赖于成熟的CAD系统，与国际先进水平相比，我国起步较晚，但在一系列国家科研计划的支持下，也展开了研究，如北京大学联合东南大学、南开大学、华大公司等单位，受国家973计划的资助，开展了微系统设计方法的研究，已建立了包括版图设计、工艺模拟、性能分析等主要功能的MEMS CAD原型系统。

## 2) 材料技术

微机电系统的材料既要保证微机电系统的性能要求，又必须满足系统中加工方法的要求，因此材料起着举足轻重的作用。目前，微机电系统中使用的材料主要包括硅、形状记忆合金、压电材料、磁致伸缩材料、电流凝胶等。

### 3) 微加工技术

微加工技术是微机电系统设计的核心技术，是其研究领域中最活跃的部分。微机电系统涉及的材料品种很多，加工方法各异，发展速度快，不断有加工方法的改进，也不断有新的加工方法涌现。

在众多的材料中，最常用的是硅，因此涉及到硅微加工的方法很多，很多技术和集成电路制造中的技术通用，如氧化、掺杂、光刻、腐蚀、外延、淀积、钝化等，还有体硅微加工技术和表面硅微加工技术。另外还有一些新的加工方法，如键合技术、LIGA技术、准分子激光加工技术和特种精密加工技术等，这些方法极大地促进了微机电系统的发展。

#### 4) 微检测技术

微检测技术是保证加工质量、研究加工规律和提高加工水平的基础，为加工过程提供定性或定量的评判依据。

微机电系统检测主要包括系统的材料特性检测、结构性能检测和系统综合性能检测等。

#### 5) 集成与控制技术

集成化是微机电系统发展的必然趋势，包括微传感器、微执行器、微控制器、通信电路以及微能源的集成等。

### 3. 应用研究

微机电系统的应用主要集中在信息科学、生物科学、航空航天、精密仪器、国防工业和汽车工业等方面，每年的市场份额已经达到几十亿美元，增长迅速。微机电系统将带来一场新的技术革命。

#### 1) 在汽车工业中的应用

为实现安全、舒适、无污染、经济性的目标，需在汽车上安装各种传感器，以及时获取各种信息。传统传感器因体积大、质量大、成本高，其应用受到很大限制。而微传感器具有高精确度、高可靠性和低成本的特性，因而成为汽车工业的首选。

目前，一般汽车上要安装几十个传感器，而高档豪华汽车则多达几百个，这些传感器正逐步被微传感器取代。微传感器在汽车工业中的应用主要包括以下几方面。

(1) 发动机控制和传动系统中: 流量绝对压力测量、气压测量、排气回流测量、燃料压力测量等。

(2) 悬挂/制动和牵引控制系统中: 轮胎压力监测、主动悬挂液压测量等。

(3) 驾驶与乘坐环境控制系统中: 座椅腰部支撑压力测量、空调控制压力测量等。

## 2) 在机器人中的应用

机器人学是近几十年来迅速发展起来的综合学科，代表了机电一体化最高成就，是科学研究的热点之一。机器人的发展受到传感器发展水平的限制，所使用的传感器的数量和种类，决定了机器人的智能化程度。

典型的机器人内部的传感器包括位移传感器、速度传感器、力觉传感器、温度传感器、平衡觉传感器等；外部的传感器主要有视觉传感器、听觉传感器、触觉传感器、压觉传感器、接近觉传感器和滑觉传感器等。

在机器人中所使用的各种不同的传感器，随着微传感器技术的发展，都逐渐由微传感器代替，这不仅提高了机器人的智能水平，而且丰富了机器人的品种，如微型机器人、微型飞行器等。

例如，在工业上，美国Dwkane公司研制了一种型号为AL5010的小型机器人，可以完成光导纤维的引线、粘接和对接等复杂操作，不仅提高了生产效率，而且稳定了产品质量。

在军事上，微型飞行器可用于侦察、通讯中继、战场评估、核生化探测、反恐防暴、对特定目标进行攻击等；在民用上，可用于交通、消防救援、防灾救灾、农业、气象、环境监测等。因此各国对微型飞行器都非常重视，并投入大量的人力、物力进行研究开发。

### 3) 在生物医学中的应用

微传感器在生物医学及工程上的应用，对促进医疗器械的改善以及疾病的预防、诊断和治疗等都有重要作用。

例如，颅内压力监测系统由微压力传感器和遥测单元组成，其中，微压力传感器完成颅内压力的测量，遥测单元完成信号的输出；又如，将微型探测器插入肿瘤中，利用声波脉冲为周围组织成像，对肿瘤鉴定和分类，可及早判定肿瘤是良性还是恶性；再如，通过生物芯片可完成对人类基因组DNA长链上的化学序列的测定、基因图谱的鉴定以及基因突变体的检测和分析等。



## 12.2 智能传感器

### 12.2.1 智能传感器的概念和特点

#### 1. 智能传感器的基本概念

早期，人们认为智能传感器是将“传感器和微处理器组装在同一芯片上的装置”，或认为是“一个或多个敏感元件和信号处理器集成在同一芯片上的装置”。随着传感器智能化程度的进步，传感器的概念也逐步扩展和延伸，由单一的敏感元件扩展为集信号获取、处理、存储与传输等功能在内的传感器系统。因此，一个真正意义上的智能传感器是具备感知、学习、推理、通信以及管理功能的系统。

传感器的智能化所涉及的基本概念如下。

(1) 系统: 两个或两个以上元件、子系统以及其它部件的组合, 用以实现一个或多个功能。实际用于测量控制的系统应包括输入单元(传感器)、输出单元(执行器)及处理单元(对信号进行处理, 得到所需的信息及知识)。

(2) 传感器: 接收并响应外界激励的器件。外界激励就是被测量, 可以是机械、热、磁、电、光、化学等参量。

(3) 智能: 将先验知识(调试或应用以前已知)与自适应学习(在调试或应用过程中获得)组合起来的能力。

传感器的智能化随着技术的进步而不断完善，期间产生了多种智能传感器的定义。

定义1: 智能传感器是能够调节系统内部性能以优化外界数据获取能力的传感器系统。在这一定义中，对环境的适应及补偿能力是智能化传感器的核心。

定义2: 智能传感器是将敏感元件及信号处理器组合为单一集成电路的器件。该定义侧重于信号处理能力。一般来说，系统中应包括基本的电路组件(信号调理、A/D转换器)、微处理器、逻辑功能以及得出结论的功能。

定义3: 智能传感器是可提供比正确表达被测对象参量更多功能的传感器。符合这一定义的传感器即俗称的“灵巧传感器”。

尽管有多种不同的定义，但智能传感器的主要组成部分和功能特点是相同的，都是一个集敏感元件，数据获取、处理及传输功能于一体的系统，硬件的集成度很高，有些甚至是芯片级的集成，即所谓的“芯片系统”(system on chip)。

## 2. 智能传感器的特点

与传统意义上的传感器相比，智能传感器(系统)具有以下特点:

(1) 精度高。智能传感器能够通过自校正零点消除系统零点偏差，通过自动切换量程、软件数字滤波、相关分析等处理保证高测量分辨力，能自动完成系统的非线性误差校正，与预置参考基准进行实时对比并自动完成系统标定等，从而保证智能传感器实现高精度检测。 

(2) 可靠性和稳定性高。自动补偿能力可使智能传感器能在系统参数发生变化后自动进行量程转换；能自动补偿因环境条件变化而产生的系统特性的漂移，如零点漂移、灵敏度漂移等；能实时进行系统的自检，分析、判断系统运行的合理性，针对异常情况发出报警和故障提示；等等。这些特性保证了智能传感器工作的高稳定性和高可靠性。

(3) 信噪比和分辨力高。智能传感器具有数据存储和信息处理能力，通过软件可以实现滤波、误差分析等处理，方便去除数据中的噪声和奇异点，提取有用信号，保证它具有高的信噪比。另外，通过数据融合、神经网络等技术，智能传感器能消除多参数状态下交叉灵敏度的影响，从而保证了在多参数状态下对特定参数测量的分辨能力。

(4)自适应性强。智能传感器具有判断、分析和处理功能，能根据系统的实时工作情况决定各部件接电情况、与系统中上位机的数据传输速率，从而使系统工作在最优低功耗状态下，并能优化传输速率。

(5) 性价比高。智能传感器通过与微处理器/微计算机相结合，采用廉价的集成电路工艺和芯片以及强大的软件来实现检测，具有高的性价比。

## 12.2.2 智能传感器的结构和功能

### 1. 智能传感器的结构

智能传感器由经典传感器和微处理单元两部分构成，其典型结构框图如图12-1所示。

传感器完成被测对象信息的拾取，预处理器实现信号的放大、滤波和模/数转换等预处理功能，微处理器完成信号的分析、补偿或校正的运算、数据的融合、各种逻辑控制等任务，由存储记录模块保存数据信息，通讯接口实现与上位机的数据交换，控制输出模块实现报警等标志的输出。

其中，传感器部分可以是单个或多个传感器，也可以把多个功能相同的传感器按一定规律组成阵列，而微处理器的强大功能使传感器具有了智能。

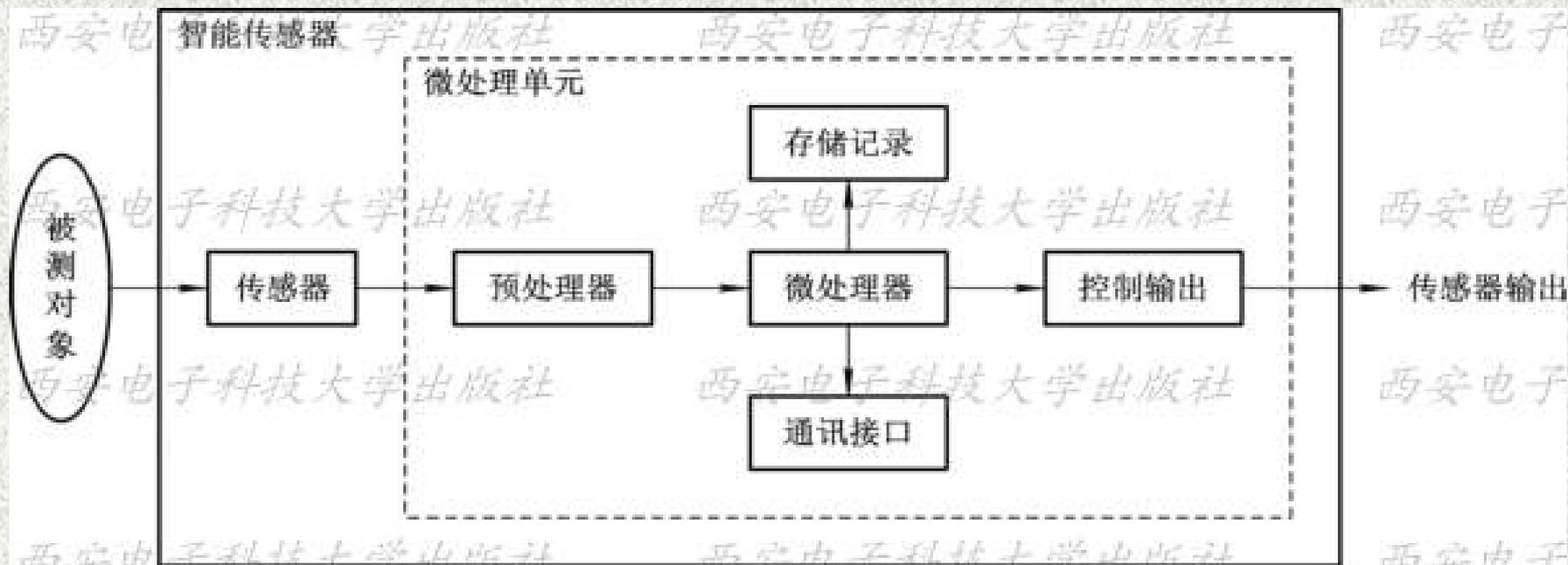


图 12-1 智能传感器的典型结构框图

## 2. 智能传感器的功能

### 1) 处理功能

智能传感器具有逻辑判断和统计处理功能，可对检测数据进行分析、统计和修正，还可对线性、非线性、温度、噪声、响应时间、交叉感应以及缓慢漂移等误差进行补偿，提高测量精度。

### 2) 自诊断功能

智能传感器能在接通电源时进行开机自检，并在工作中进行自检，可实现自行诊断测试，以确定哪一组件有故障，从而提高系统工作的可靠性。

### 3) 自适应自调整功能

智能传感器可根据待测物理量的数值大小及变化情况自动选择检测量程和测量方式，提高检测适应性。

### 4) 记忆存储功能

智能传感器可进行检测数据的随时存取，加快信息的处理速度。

### 5) 组态功能

智能传感器可实现多传感器、多参数的复合测量，扩大检测与使用的范围。

### 6) 通讯功能

智能传感器具有数据通信接口，能与计算机直接连接，相互交换信息，提高信息处理的质量。

### 3. 智能传感器的实现方式

#### 1) 非集成化实现

非集成化实现是将经典传感器、信号调理电路、带数字总线接口的微处理器组合成一个智能传感器系统。其中，经典传感器只具有信号检测能力；信号调理电路是将传感器输出信号进行放大并转换成数字信号后送入微处理器，再由微处理器通过数字总线接口连接到现场数字总线上。数字总线是连接测控系统中各种智能装置(包括智能传感器)的双向数字通信网络，它的主要特点是传输数字信号，实现标准化和智能化。

非集成化实现是实现智能传感器的一种最快捷的途径与方式。例如，美国罗斯蒙特公司、SMAR公司生产的电容式智能压力(差)变送器系列产品，是在传统非集成电容式变送器的基础上，附加一块带数字总线接口的微处理器插板后组装而成的，并具有通信、控制、自补偿、自校正、自诊断等功能，从而实现了智能化。

## 2) 集成化实现

集成化实现是利用半导体技术把传感器部分与信号预处理电路、输入/输出接口、微处理器等制作在同一块芯片上，组成大规模集成电路智能传感器，简称集成式智能传感器。集成式智能传感器具有多功能、一体化、高精度、适宜大批量生产、体积小和便于使用等优点，是传感器发展的必然趋势，它的实现主要取决于半导体集成化工艺水平的提高与发展。随着微米/纳米技术的问世，大规模集成电路工艺技术日臻完善，集成电路器件密度越来越高，使各种芯片的性价比不断提高，而这反过来又促进了微机械加工技术的发展，形成了与传统传感器制作工艺完全不同的现代传感器技术。这类传感器的特点是微型化、结构一体化、高精度、多功能、阵列式、全数字化，且使用方便，操作简单。

然而，要在一块芯片上实现智能传感器系统，存在着许多困难，如：功耗、自热、电磁耦合带来的相互影响如何在一块芯片内消除；哪一种敏感元件比较容易采用标准的集成电路工艺来制作；选用何种信号调理电路；如何减少外接元器件等。因此，更实际的途径是采用混合实现的方式。

### 3) 混合实现

混合实现是将系统的各个集成化环节，如敏感元件、信号调理电路、微处理单元、数字总线接口，以不同的组合方式集成在两块或三块芯片上，并装在一个外壳里，组成混合实现式智能传感器。

目前，已有少数以组合形式出现的智能传感器产品，如美国Honeywell公司的DSJ-3000型硅压阻式智能传感器、Par Scientific公司的1000系列数字式石英智能传感器。我国也非常重视智能传感器的研究与开发，主要以传统的传感器为基础，采用先进的微处理器和微型计算机系统，非集成化实现传感器的智能化。

## 12.2.3 智能传感器的应用

### 1. 智能数据采集仪

智能数据采集仪的主要功能有定时数据采集、实时数据采集和上报、数据存储、历史数据上报、自动校时、自动报警、服务器地址设置、联网状况检测等，其工作原理如图12-2所示。下面介绍各模块的具体功能。

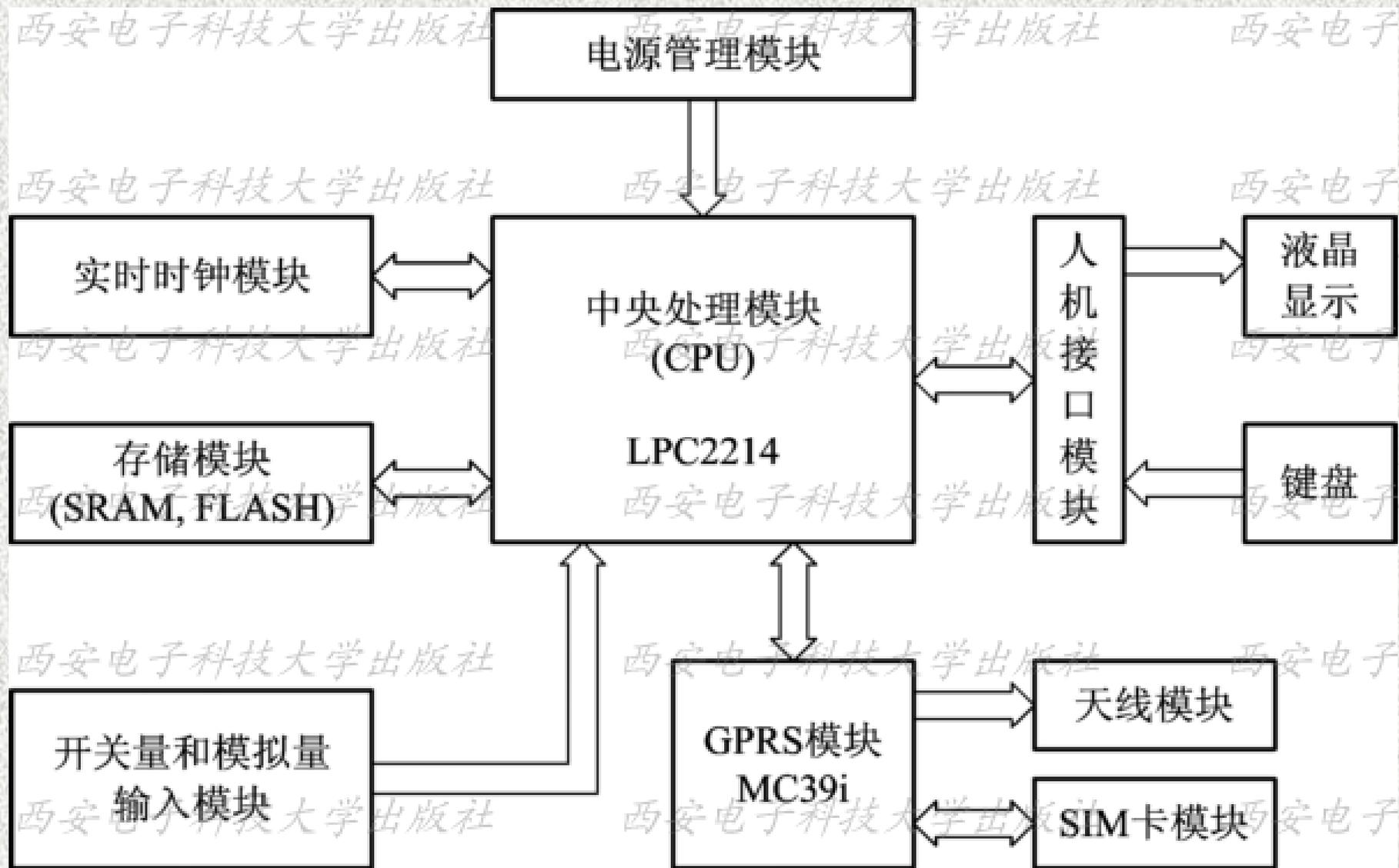


图 12-2 数据采集仪工作原理图

## 1) 中央处理模块

数据采集仪以ARM系列LPC2214为核心，ARM芯片内部集成EPROM、RAM、总线、I/O、串行口等，通过丰富的外围接口与各外部硬件模块连接。在ARM芯片内部运行嵌入式操作系统，控制和管理各外部硬件模块，以完成系统的各个功能。

CPU外设看门狗模块，实现系统的监控，必要时重启系统，增加系统的抗干扰性。

## 2) 存储模块

外部数据存储单元通过外部总线实现系统存储容量的扩充。本系统选用SST公司生产的SST39VF160存储芯片，是一个1 M×16 bit的CMOS多功能FLASH(MPF)器件，属于NOR型FLASH。其工作电压与LPC2214相兼容，接口能直接挂到ARM的16位总线上。 

LPC2214提供16 KB RAM。考虑到系统程序总容量及需要处理的数据量较大，可通过外部扩展增加RAM的容量。本系统选用的ISSI公司生产的IS61LV25616AL芯片，是高速SRAM器件，采用CMOS技术，存储容量为512 KB，具有16位数据宽度。

### 3) 输入模块

数据采集模块负责接收由现场仪表测得的信号，包括格雷码和4~20 mA信号，并转换成原始数据传给处理器。

### 4) GPRS模块

GPRS模块完成GPRS的接入，实现数据采集终端与GPRS网络的数据通信。

### 5) 人机接口模块

人机接口包括LCD显示模块和按键接口，实现人机交互功能。数据采集仪通过液晶显示屏显示其工作状态，例如，采集仪的网络状况、当前的采集数据、电源状况等。通过键盘可以对采集仪的菜单进行操作，例如设定数据采用间隔、查询站点号、设定时间等。

## 6) 实时时钟模块

实时时钟模块为系统提供准确的时间。

LPC2214芯片内部带有实时时钟，但当芯片复位后实时时钟也同时复位，这样无法满足数据采样、存储实时性的要求，故采用专用实时时钟芯片，配备后备电源，使采集系统关机后仍能准确走时。实时时钟选用PHILIPS公司生产的PCF8563，它是一种低功耗的CMOS实时时钟日历芯片，能提供一个可编程时钟输出、一个中断输出和掉电检测器，地址和数据通过I<sup>2</sup>C总线接口串行传递。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/548003066045007002>