

# MSP430F449 在超低功耗高精度雷达液位仪中的应用

北京理工大学电子工程系微波电路实验室(100081) 顾伟 周建明

**摘要:** MSP430 系列是 TI 公司的超低功耗单片机系列产品。这个系列的 MCU 具有极低的功耗,丰富的片内外设,强大的处理能力,稳定的工作状态,非常适用于要求低功耗、高性能的嵌入式智能系统中。介绍了 MSP430F449 在低功耗、高精度智能雷达液位仪中的应用,保证了系统达到较高的性能指标。

**关键词:** MSP430F449 雷达液位仪 直接数字频率合成 HART 协议

单片机技术已经渗透到人类生活的各个方面,广泛应用于家用电器、通信、工业控制等领域。随着电子技术的发展,单片机也呈现出高集成度、低功耗、基于闪存的可编程技术和将复杂模块集成到内部等发展趋势。

TI 公司的 MSP430 系列单片机就顺应了这些发展趋势。它的低功耗特点使之特别适用于电池供电设备或手持设备中。该系列单片机还将大量的外围模块整合到片内,所以也适合构成较完整的片上系统。其丰富的型号给设计者选择带来了很大的灵活性。MSP430 系列采用 16 位精简指令架构,有大量工作寄存器和数据存储器(MSP430F449 含有最多的 2KB 的 RAM),可以说, MSP430 系列单片机凭借这些杰出的性能特点,已成为众多单片机中耀眼的新星。

雷达液位仪是雷达技术应用于民用领域的典型例子,它用于石油工业等行业里高压储罐的液位测量中。国外公司开发的产品价格昂贵,而国内的相关研究结果还不能令人满意。所以研制高性能、智能化的雷达液位仪,对我国石油工业液位测量仪器的更新具有重要意义。

为达到本质安全的工业标准,研制的雷达液位仪对系统提出了极为严格的要求,其功耗必须低于 70mW,同时精度要达到 $\pm 5\text{mm}$ 。这给 MSP430 系列单片机提供了发挥特长的机会。通过选用这个系列产品中最高端的 MSP430F449,充分利用其低功耗、高性能、丰富的片上外设等特点搭建系统平台,再加上采用特殊的系统控制和信号处理机制,非常好地实现了系统指标要求。

## 1 MSP430F449 简介

MSP430F449 是 MSP430 系列产品中最高档的型号。它采用 16 位 RISC 结构,具有丰富的片内外设和大容量的片内工作寄存器和存储器,性能价格比很高。它的特点有:

- 超低的功耗:能够在 1.8V~3.6V 的电压下工作;具有工作模式 (AM) 和五种低功耗模式 (LPM)。在 3V、1MHz 时钟驱动下,各个工作模式下的供电电流典型值如表 1 所示。

可见工作模式供电电流典型值低达 420 $\mu\text{A}$ ,低功耗

表 1 MSP430F449 工作模式与耗电电流

工作模式	AM	LPM0	LPM2	LPM3	LPM4
供电电流/ $\mu\text{A}$	420	55	17	1.6	0.1

模式电流更是显著降低,最低为 0.1 $\mu\text{A}$ 。

在低功耗模式下,CPU 可以被中断唤醒,响应时间小于 6 $\mu\text{s}$ 。

- 较强的运算能力:16 位的 RISC 结构,丰富的寻址方式;具有 16 个中断源,并且可以任意嵌套;在 8MHz 时钟驱动下指令周期可达 125ns;内部包含硬件乘法器和大量寄存器以及多达 64K Byte 的 FLASH 程序空间和 2K Byte 的 RAM 空间,为存储数据和进行运算提供了保证。这些特点使 MSP430F449 具有很强的数字信号处理能力,可以开发出高效率的源程序。

- 丰富的片上外设:包括看门狗定时器,基本定时器,比较器,16Bit 定时器(TA、TB),串口 0、1,液晶显示驱动器,六个 8bit 的 I/O 端口,12 位 ADC (最高采样率 200kHz)等。丰富的片上外设使设计者可以很方便地构建一个较为完整的系统。另外,充分利用计数器的多路任意波形产生功能和中断控制功能,保证了一些复杂的时序控制任务的完成。

- 方便高效的开发环境:MSP430F449 是 FLASH 型器件,片内有 JTAG 调试接口和电可擦写的 FLASH 存储器,所以可以先下载程序到 FLASH 内,再在器件内通过软件控制程序的运行,由 JTAG 接口读取片内信息供设计者调试。这种方式不需要仿真器和编程器,调试十分方便。

## 2 雷达液位仪实现方案

### 2.1 雷达液位仪系统结构

低功耗、高精度智能雷达液位仪的系统结构如图 1 所示。

系统硬件分为三部分:测量模块、HART 通信模块和测量线。测量模块电路板包括 MSP430F449 控制器、直接数字频率合成器(DDS)控制的窄脉冲产生电路、脉冲收发与处理电路、A/D 采样、结果显示等。这个模块完成距

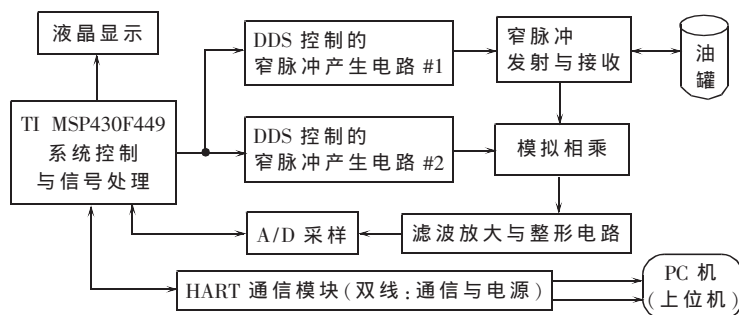


图1 雷达液位仪系统结构框图

离的精确测量，并实时地通过HART板上位机进行数据通信。HART板完成MSP430F449控制器与上位机的通信、4~20mA电流的产生、电源电压的转换。测量线包括与测量板之间的机械接口、法兰和电缆。该系统还包括主控计算机上的人机交互软件，系统和主控计算机的连接采用符合工业标准的两线制，即电源线和信号线共用。

在系统工作时序的设计中，采用系统间歇工作方式，以40ms为一个周期。前1ms为电路工作时间，MSP430F449的CPU被中断唤醒后，打开电路中双路DDS、双路窄脉冲产生电路、ADC等部分电路，自身采集A/D转换后得到的数据。后39ms为电路休眠时间，MSP430F449的CPU关闭这些外围电路和片内外设，自身进入信号处理主程序，完成信号处理工作后再进入休眠模式。这种工作方式既考虑到对系统功耗的要求，也兼顾了MSP430F449的信号处理速度。

在信号处理机制上，由于系统要求的测量范围为0.25m~30m，精度为±5mm，以目前的电子技术水平，如果采用直接测量一个周期发射脉冲和接收脉冲之间的时间间隔的方法，是很难达到这样的要求的。所以在信号处理机制中采用了时间比例放大技术，并且以模拟相乘的方法实现了时间轴的放大。具体的电路实现用到了DDS技术和窄脉冲产生技术。

MSP430F449在系统中完成了对系统工作时序的控制、数据采集与信号处理、结果显示、与主机通信等诸多任务。下面将对具体的设计作一介绍。

### 2.2 MSP430F449对系统工作时序的控制

前面已经介绍过系统的间歇工作方式，这种工作方式的时序控制是利用MSP430F449的计数器的多路任意波形产生功能和中断控制功能，以及CPU的中断快速唤醒功能实现的。

系统复位后，MSP430F449首先对电路进行初始化，包括设置MSP430F449内部两个16位计数器TA和TB及其中断、设置两路DDS、设置片内ADC、设置HART板等。之后，MSP430F449的CPU开计数器TB使其开始计数，自身则进入功耗极低的休眠模式。系统就在TB输出信号的控制下实现要求的工作时序。TB、TA的输出波形如图2所示。

其中，计数器A的输出信号设置为片内ADC的采样时钟源，采样频率设置为200kHz；计数器B的计数周期则设为40ms，并且设置相应通道的输出波形类型，用于控制MSP430F449和外部电路的工作或者休眠。需要设置的TB的寄存器有控制寄存器、计数值寄存器、捕获/比较控制寄存器、捕获/比较寄存器等，它们规定了TB的时钟源、工作方式、计数周期、输出模式、中断等。

图2中TB输出的几路波形中，TB1作为系统中断源，中断1时刻唤醒CPU，CPU打开ADC对回波信号进行采样，并采集回波数据；中断2时刻CPU关闭ADC和外部电路。TB2、TB3分别控制两路窄脉冲产生电路的开与关。TB4作为双路DDS的开关信号。

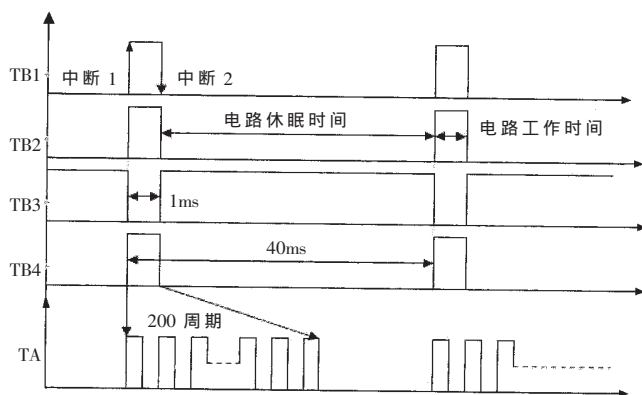


图2 TB、TA输出的系统控制信号时序图

### 2.3 MSP430F449测量方式与信号处理

前面说过，在信号处理机制上使用了具有创新意义的时间比例放大技术。这种技术将发射脉冲和接收脉冲之间的时间间隔按一定的比例放大，时间比例放大需要另一个频率与发射脉冲频率很近的参考信号。本设计中根据时间比例放大测量的要求分别产生1MHz、1MHz+100Hz和1MHz、1MHz+4Hz的双路信号控制发射脉冲和参考脉冲产生电路，并且需要能够精确控制它们的相对相位。这两路信号是通过MSP430F449控制双路直接数字频率合成器(DDS)AD9834而产生的。

DDS技术以其极高的频率分辨率、极短的频率转换时间、输出信号相位连续等特点而得到广泛应用。本设计中使用AD公司的DDS芯片AD9834，其内部包含相位累加器、编程寄存器、串行I/O接口、正弦查询表、D/A变换器等。AD9834频率控制字为28位，5MHz系统时钟时频率分辨率为0.0186Hz，3V电源电压供电时功耗为20mW。AD9834提供低功耗模式，由TB4的输出信号进行控制。MSP430F449通过串行I/O口控制双路DDS输出频率和相对相位。MSP430F449控制两路频率分别为1.000119MHz和1.000123MHz的AD9834输出信号时频谱如图3所示。

一次完整的测量过程分为目标搜索和精确测量两

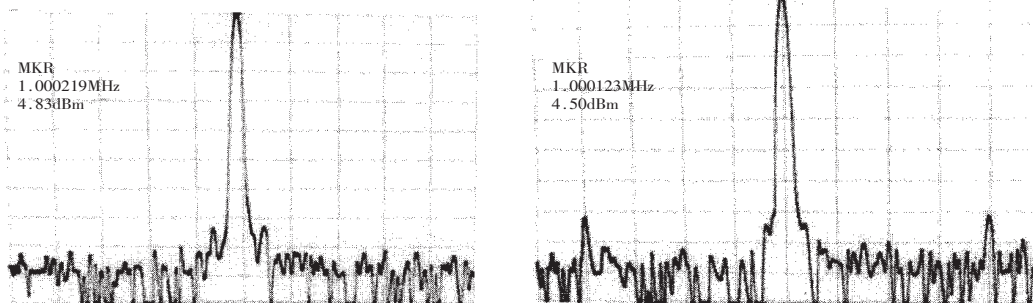


图3 AD9834 输出两路相差4Hz的信号时的频谱图

部分。完成一次目标搜索需要两个TB周期，在这个阶段，发射脉冲的频率为1MHz+100Hz，参考脉冲的频率为1MHz。根据分析，此时时间比例放大系数 $K=10001$ ，系统最大测量距离为30m，发射脉冲和接收脉冲最大时间间隔为200ns；经过时间比例放大后，最大时间间隔为2.0001ms，所以两个采样周期就可以把目标可能出现的位置都记录到。根据两次记录的数据判断目标出现位置，并换算成相位。在第三个TB周期，MSP430F449进入精确测量阶段，由目标搜索阶段中记录的目标相位值设置产生参考脉冲时钟的AD9834相位，频率设置为1MHz+4Hz，产生脉冲时钟的AD9834频率设置为1MHz。此时，相应的比例放大系数 $K=250001$ ，在200kHz采样时钟下，时间的分辨率为20ps，相应的距离分辨率为3mm，在精确测量阶段可以满足系统距离精度的要求。

#### 2.4 MSP430F449与HART协议通信模块

液位仪的测量结果和PC机对液位仪的控制信号经HART通信模块传输。HART可寻址远程传感器。高速通道开放通信协议是一种应用于现场智能仪表和控制室设备间的通信协议，它采用在4~20mA模拟信号上叠加音频数字信号进行双向数字通讯，而不影响传送给控制系统的模拟信号的大小，保证了与现有模拟系统兼容。本设计中采用HART协议的简化三层模型结构，即第一层物理层、第二层数据链路层和第七层应用层。HART协议框图如图4所示。

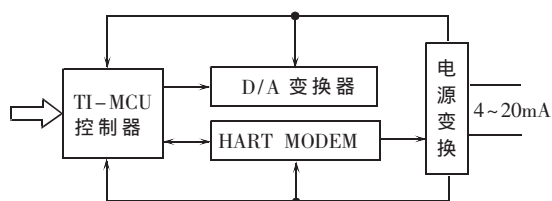


图4 智能雷达液位仪HART协议框图

HART通信模块在硬件设计中也采用了低功耗设计方案并选用低功耗器件，其硬件实现框图如图5所示。

D/A转换器AD421输出符合两线制的4~20mA电流的直流信号，HART调制解调器HT2015及其附属电路实现HART通信的调制解调功能。MSP430F449通过内部集成的通用串行收发模块UART与HART通信模块连

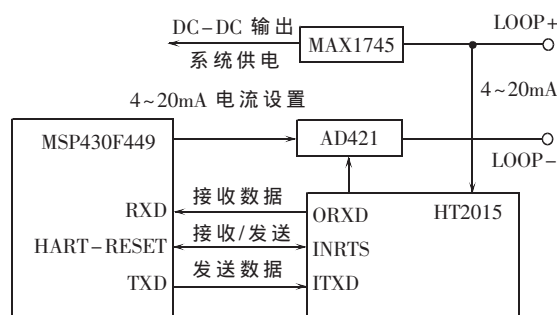


图5 HART通信协议硬件实现框图

接，经过HART通信模块对信号的调制解调后再通过双线与主控计算机的串口进行异步串行通信，计算机的串口上装有HART转换卡。另外，HART通信模块还采用DC-DC转换芯片MAX1745完成电源电压的转换，为整个系统供电。

具体协议的软件实现可以自己灵活编制。与传统方案相比，该方案具有可靠性较高、实时性较强、成本较低等优点。

雷达液位仪达到的技术指标主要有：最大测量范围30m，分辨率1mm，测量误差 $\leq 5\text{mm}$ ，3.3V电压工作时工作电流8.5mA，功耗30mW。

#### 参考文献

- 1 MSP430x4xx Family User's Guide. Texas Instruments Inc, 2003
- 2 MSP430x43x, MSP430x44x Mixed Signal Microcontrolle. Texas Instruments Inc, 2002~2003
- 3 魏小龙. MSP430系列单片机接口技术及系统设计实例. 北京:北京航空航天大学出版社, 2002
- 4 周建明. 智能液位仪的开发设计和研制:[博士学位论文]. 北京:北京理工大学, 2004
- 5 Qi G Q. Digital Signal Processing in FMCW Radar Marine Tank Gauging System. 1996 3rd International Conference on Signal Processing Proceedings[C]. Edited by Yuan Baozong and Tang Xiaofang. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1996.7~11
- 6 Low Power, +2.3 V to +5.5 V, 50 MHz Complete DDS AD9834. Analog Device Inc, 2002

(收稿日期:2004-10-10)