

# 采用 TMS320F206 设计的心电监控模块

心脏在机械收缩之前，心肌预先发生电的激动，并向全身各部位放散，从而在体表的不同部位产生电位差。通过体表把这种变动着的电位差按时间顺序描记出来的连续曲线就是心电图 ECG。

心电图是诊断心律失常的最可靠的途径，其它临床检查虽然也可以诊断某些心律失常，但是准确率不高。通过观察患者的心电图，其诊断准确率几乎可以达到 100%。心电监护模块的功能就是实时地记录下病人的心电波形，并进行自动分析和处理，同时给出相应的结论。

随着数字信号处理技术和大规模集成电路工艺的发展，单片数字信号处理器的功能越来越强大，价格越来越低，越来越多地被应用到人们生产生活的各个领域。本文介绍一种基于 DSP 芯片的心电监护模块的解决方案，讨论了它的硬件结构和软件组成。

该心电监护模块是一个以美国德州仪器公司(TI)的 TMS320F206 为核心的 DSP 数据采集和处理模块。整个系统安装在一块 4 层的 PCB 板上，通过 9 针 RS-232 电缆和 PC 机进行通讯，其原理框图如图 1 所示。其中所有的输入信号包括 ECG1、ECG2(两路心电信号)、TEMP1(体温信号)、RESP(呼吸信号)、LEADOFF(导联脱落检测)、PACE(起搏器检测)等均来自心电信号前期模拟处理模块。

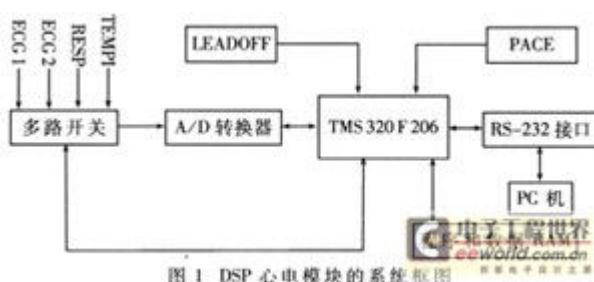


图 1 DSP 心电模块的系统框图

## 1 TMS320F206 简介

TMS320F206(以下简称 F206)是 TI 公司于 1996 年推出的一种性价比很高的 16 位定点 DSP 芯片，运算速度为 40MIPS。F206 体系采用改进的哈佛结构，将程序存储器和数据存储器的总线分开，以便最大限度地提高处理能力。其可寻址空间为 224K 字(64K 字程序空间，64K 字数据空间，64K 字 I/O 空间，32K 字全局空间)，64K 字程序空间中的前 32K 字可映射到 F206 片内集成的闪烁存储器(FLASH MEMORY)中，这样可以通过仿真器对 F206 进行在线的编程和擦写。F206 片内具有 4 级流水线结构，其指令集专门对信号处理中常用的乘一加运算作了优化，支持单周期的乘法/累加指令；支持存储器块搬移指令，以便更好地管理程序和数据；支持基 2 的 FFT 位倒序检索寻址。

除支持高速运算以外，F206 还具有众多的片上外设，主要包括：①软件可编程定时器；②用于程序、数据、I/O 存储空间的软件可编程等待状态发生器，便于和低速器件接口；③片内振荡器和锁相环(PLL)，用于时钟选择×1，×2，×4，÷2；④同步串口，便于和串行 CODEC 接口；⑤全双工的异步串口，便于和 PC 机通信。

## 2 硬件组成

该心电监护模块共有 4 路输入：两路心电信号 ECG1 和 ECG2、一路体温信号 TEMPI、一路呼吸信号 RESP，采用分时采样的工作方式。由于呼吸信号和体温信号的频率远小于心电信号的频率，在确定采样率时就以心电信号为基准。经验表明，在做常规心电图时，要求系统的带宽为 100Hz 左右，根据 Nyquist 采样定理，采样频率必须不低于 200Hz。考虑到一定的工作裕量，每个工作通道的采样率取 250Hz，这样对 4 个通道而言，总的工作频率为 1kHz。通道切换的工作由一片双向模拟开关 CD4051 来实现，将 C、B、A 控制端连接到 TMS320F206 的三根地址线上，通过 I/O 指令打开相应的模拟通道，进行信号的采样。

信号的采样和量化工作由一片 ADS774 完成。ADS774 是美国 Burr-Brown 公司生产的 12 位逐次逼近型并行 A/D 转换器，典型转换时间为 8.5 $\mu$ s，并且有多种工作方式可供用户选择。在本心电模块中我们选用了直通 throughout 模式，仅用两根控制线 R/C 和 STATUS 与 TMS320F206 接口，其工作原理和时序如图 2 所示。

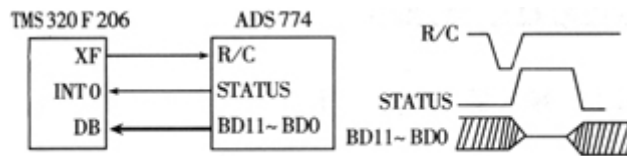


图 2 DSP 和 ADS774 的接口及时序

TMS320F206 通过指令在 XF 引脚上产生一个宽度大于 25ns 的低电平脉冲，启动 ADS774 进行一次转换。启动后 ADS774 的 STATUS 引脚变为高电平，转换结束后 ADS774 数据线上的数据有效，此时其 STATUS 引脚跳变回低电平，通过这个电平跳变触发 TMS320F206 的 INT1 外部中断，将 12 位转换数据读入数据存储器。

由于 TMS320F206 片内的数据存储空间有限，为保存大量的采样数据和运算的中间结果，需增加外部数据存储器；同时为了在调试程序时能够设置断点和进行单步操作，也需要增加外部程序存储器。我们采用了 4 片日立公司的 8 位 SRAM HM62256-10，两两组成 16 位的程序存储器和数据存储器，分别用 F206 的 PS 和 DS 信号进行片选。HM62256-10 的典型存取时间为 100ns，而 TMS320F206 的指令周期为 50ns。为节省硬件等待电路的开支，利用了 TMS320F206 片内的可编程软件等待状态发生器产生两个等待状态，从而满足存储器的操作时间要求。利用 TMS320F206 片上集成的全双工异步串口，可以实现心电模块和 PC 机的通信。但是 RS232 电平和 TTL 电平不兼容，我们使用了一片电平转换芯片 MAX202，它采用 +5V 单电源供电，使用时只需加几个电容，便能完成两种电平的转换。为防止数据在传输过程中受到干扰，在输入输出端都加上光电耦合器。

R 波的精确定位是心电监护模块的一个重要功能，它关系到后面进行心率计算及心律失常分析结果的正确性。一个正常人完整的心电波形由 P、Q、R、S、T 五个部分组成，其中 R 波和 T 波的幅值相对较高。心率计算通常是根据心电波形中 R 波的间距来推算得到。但在少数异常波形中，T 波的幅值会超过 R 波，如果把 T 波误判为 R 波来进行心率计算，则会产生很大的误差。通过对大量的心电信号进行频谱分析，发现 R 波通常位于 0~33Hz 的频率范围内，而 T 波位于 0~9Hz 的频率范围内。为了在心率计算时消除 T 波可能引起的干扰，我们设计了一个有源带通滤波器，其中心频率  $f_0=12.867\text{Hz}$ ，带宽  $B=f_0/Q=5.629\text{Hz}$ ，

下限截止频率  $f_1=10.3565\text{Hz}$ ；上限截止频率  $f_2=15.9855\text{Hz}$ 。标准心电信号通过该带通滤波器前后的波形如图 3 所示。可以看出，频率相对较低的 T 波有很大的衰减而 R 波基本保持不变。

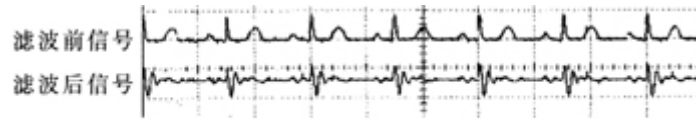


图 3 标准心电信号带通滤波结果

### 3 软件设计

该心电监护模块的软件由两部分组成。一是运行在 TMS320F206 片内 FLASH MEMORY 中的系统监控程序，二是运行于 PC 机端的图形界面用户程序。前者对实时性的要求较高，为提高运行效率，采用 TMS320C2XX 汇编语言编写，经汇编、链接后在外部程序 RAM 中调试，调试成功后烧写到 TMS320F206 的 FLASH 中。它主要由如下几个功能模块组成：①系统初始化模块。完成 RAM、ADS774、中断以及定时器等外设的初始化设置；②定时采样模块，进行四路信号的分时采集，经预处理后存入数据 RAM；③心率、呼吸率计算和体温插值运算模块；④512 点心电信号的基 2 FFT 运算模块；⑤异步串行通信模块，实现与 PC 机之间的通信协议。

下面简要介绍一下心率计算模块的算法。设  $dR-R$  是相邻两个 R 波的间距(即两个 R 波之间有  $dR-R$  个采样点)，由于心电通道的采样率为  $250\text{Hz}$ ，所以  $250 \div dR-R$  即为一秒钟内 R 波的个数， $60 \times 250 \div dR-R$  即为一分钟内的心跳次数。因此关键在于对 R 波进行准确定位。算法流程如图 4 所示。其中 FI 为数据 RAM 中最新的 1024 个心电信号值，一次运算后，FIFO 即被刷新，准备进行下次运算。图 5 显示了 R 波的定位结果，“X”标识出查找到的 R 波最高点。



图 4 心率计算流程

为了验证这个算法的正确性，我们以 BIO-TECH 心电信号仿真器产生的标准心电信号作为测试信号，发现它对正常信号和大部分异常信号均能准确地测出心率。

#### 4 模块调试过程

整个心电模块的调试过程分三个阶段：①硬件调试，确保 DSP 板上的各器件均正常工作，这是进行软件调试的基础；②TMS320F206 端软件调试，采用模块化方法，对各个功能编写相应的子程序，分别调通各个功能模块，然后把把这些模块通过接口组装起来，实现整个系统的功能；③图形用户界面 GUI 软件调试，与 TMS320F206 的通讯模块调试同时进行，确保数据的正确收发，并在此基础上逐步增加新的功能。

调试结束后，用仿真器的 FLASH 烧写程序将目标代码通过 JTAG 口下载到 TMS320F206 中去，实现整个系统的脱机运行。

本系统已经达到设计任务书规定的要求，但还具有进一步扩展的潜力。软件方面，由于采用模块化设计，可以方便地增加新的功能模块，如自相关处理等；在硬件方面，TMS320F206 和外围芯片的接口逻辑目前是用小规模集成电路实现，今后可改用 PLD 或 FPGA 芯片编程实现接口逻辑，减少芯片的数量，提高系统的可靠性。