

第一节 发动机数据采集系统的硬件结构

根据车辆视情维修分析系统的要求,在发动机数据采集系统中设置有4路模拟量输入,1路发动机速度信号的数字量输入;对模拟量的采样频率,要求4通道同时采集时最高频率能达20kHz;数据传输采用USB接口方式。其系统原理图如图7-1所示

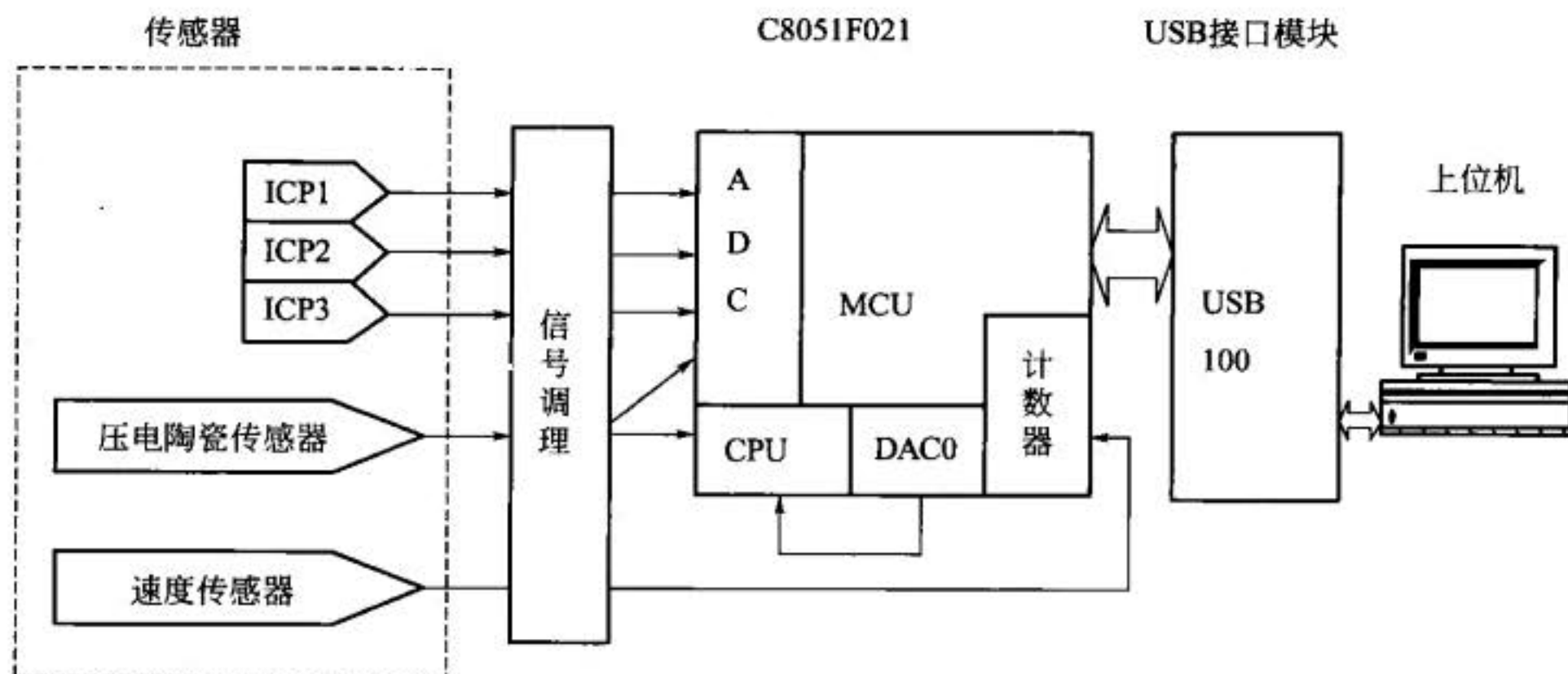


图 7-1 发动机数据采集系统总体原理图

一、传感器电路

系统采用 ICP 加速度传感器和压电陶瓷式振动传感器。

1. ICP 加速度传感器

系统采集发动机缸体的振动信号,采用美国 PCB 公司的 601A01 型 ICP[®] 加速度计,该加速度计噪声低,灵敏度高(可达 100mV/g),分辨率为 $\times 10^{-5}g$,频率范围为 0.3Hz~10kHz,工作温度范围为 -54~121℃。利用该传感器可有效采集发动机缸体的振动信号。

2. 压电陶瓷式振动传感器

压电陶瓷是人工制造的多晶压电材料。沿一定方向对其施力而使它变形时,晶体内部就

发生极化现象，在它的两个表面上产生符号相反的电荷；当外力去掉又重新恢复不带电状态，这种现象成为压电效应。利用压电陶瓷的这一特性，制作压电陶瓷式振动传感器可用来拾取振动信号。利用该传感器可采集喷油管供油信号。

二、信号调理电路

1. ICP 加速度传感器信号调理电路

ICP 传感器要求系统提供 2~20mA 恒流电流，其默认工作电流为 4mA，并要求电流范围最好设 4mA 以内。为此，本系统采用 LM334 电流源芯片，工作电压为 24V，如图 7-2 所示。通过调整 R ，可以得到不同的工作电流，为保证各通道的工作电流值一致，通过调整电阻 $R=20\Omega$ ，可以保证传感器工作电流为 3.84mA。

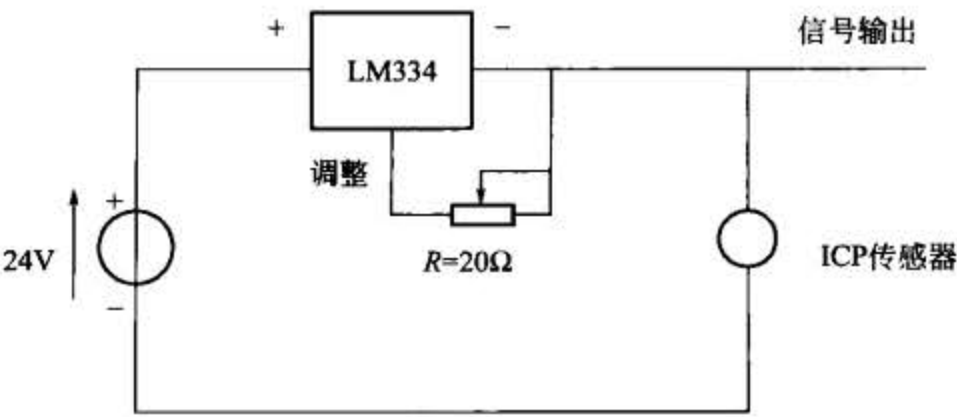


图 7-2 ICP 加速度传感器信号调理电路

2. 电荷放大器

调理压电陶瓷式振动传感器的信号通常是设计电荷放大器。电荷放大器是一个具有深度负反馈的高增益放大器，其等效电路如图 7-3 所示。若放大器的开环增益 A_0 足够大，输入阻抗很高，则放大器输入端几乎没有分流，运算电流仅流入反馈回路 C_F 与 R_F 。由图 8-3 可知

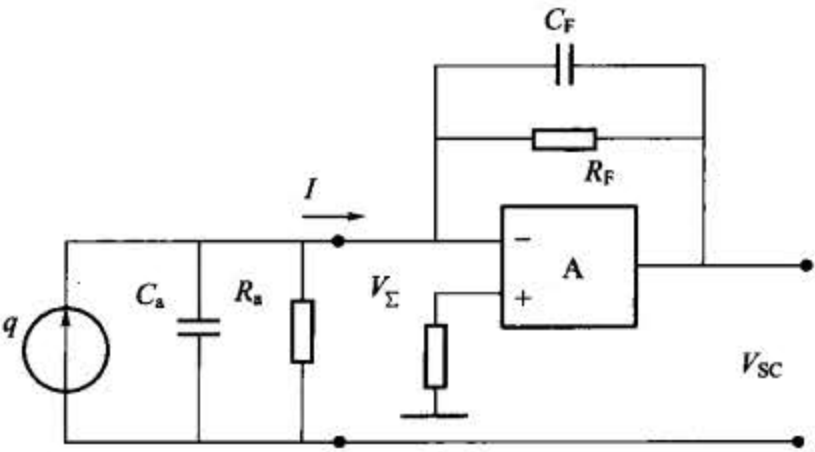


图 7-3 电荷放大器原理电路

$$\begin{aligned}
 I &= (V_{\Sigma} - V_{sc}) \left(j\omega C_F + \frac{1}{R_F} \right) = [V_{\Sigma} - (-A_0 V_{\Sigma})] \left(j\omega C_F + \frac{1}{R_F} \right) \\
 &= V_{\Sigma} \left[j\omega (A_0 + 1) C_F + (A_0 + 1) \frac{1}{R_F} \right]
 \end{aligned}$$

根据上式可画出等效电路如图 7-4 所示。

由上式可见， C_F 、 R_F 等效到 A_0 的输入端时，电容 C_F 将增大 $1+A_0$ 倍。电导 $1/R_F$ 也增大了 $1+A_0$ 倍。所以图中 $C'=(1+A_0)C_F$ ， $1/R'=(1+A_0)/R_F$ 。由此可以很方便地求出结点电压 V_{Σ} 和 V_{sc} ，即

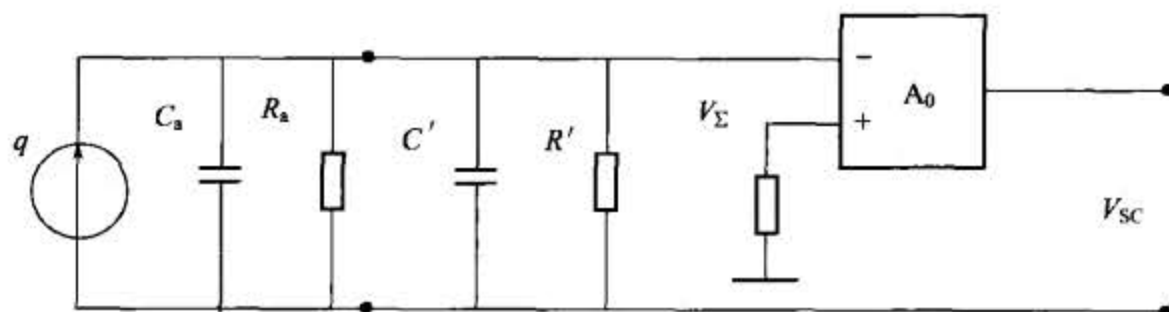


图 7-4 电荷放大器等效电路

$$V_{SC} = -A_0 V_\Sigma = \frac{-j\omega q A_0}{\left[\frac{1}{R_a} + (A_0 + 1) \frac{1}{R_F} \right] + j\omega [C_a + (A_0 + 1) C_F]}$$

$$V_\Sigma = \frac{j\omega q}{\left[\frac{1}{R_a} + (A_0 + 1) \frac{1}{R_F} \right] + j\omega [C_a + (A_0 + 1) C_F]}$$

若考虑电缆电容 C_c ，则有

$$V_{SC} = \frac{-j\omega q A_0}{\left[\frac{1}{R_a} + (A_0 + 1) \frac{1}{R_F} \right] + j\omega [C_a + C_c + (A_0 + 1) C_F]}$$

当 A_0 足够大时，传感器本身的电容和电缆电容将不影响电荷放大器的输出。因此输出电压 V_{SC} 只决定于输入电荷 q 及反馈回路 C_F 和 R_F 。由于 $1/R_F \ll \omega C_F$ ，则

$$V_{SC} \approx \frac{-q A_0}{(A_0 + 1) C_F} \approx -\frac{q}{C_F}$$

可见当 A_0 足够大时，输出电压只取决于输入电荷 q 和反馈电容 C_F ，改变 C_F 的大小可得到所需的电压输出。

三、滤波电路

在分析发动机振动信号时，重要的是对故障信号进行分析，而该信号的频率取决于相对运动速度和机械物理特性的变化速度，如故障出现时产生的振动信号总是与正常信号有差别的。因此，在采集这些信号时，需要抑制干扰信号。处理前后的信号形式如图 7-5 所示。

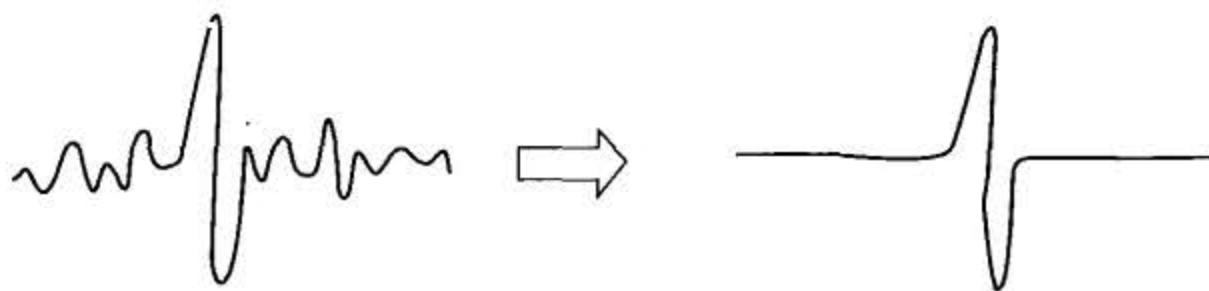


图 7-5 处理前后的信号

1. 振动信号的处理电路

对于 ICP 传感器，输出信号有 10V 的直流分量，该直流分量对于故障分析毫无意义，因此在电路中引入高通滤波电路，利用电容的隔直特性将直流信号滤去，如图 7-6(a) 所示，其中 C_1 取 $10\mu\text{F}$ 。

为消除电路中的噪声干扰，在电路中还引入了低通滤波电路，如图 7-6(b) 所示，其中 C_2 取 $0.1\mu\text{F}$ 。

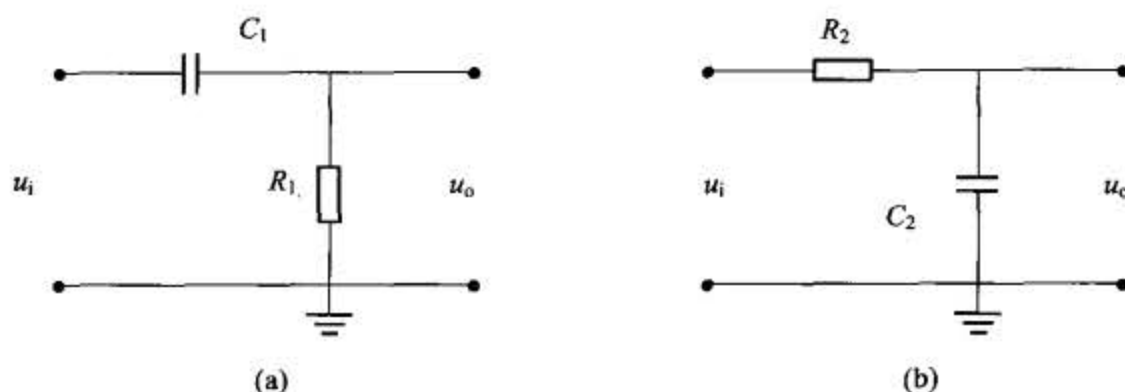


图 7-6 RC 滤波电路

2. 喷油管油压信号的处理电路

柴油机每转两转，各缸喷油一次。在时域波形图上，这一信号为一脉冲衰减信号。因此，在采集单缸喷油供油信号时，引入了二阶低通滤波电路，如图 7-7 所示。

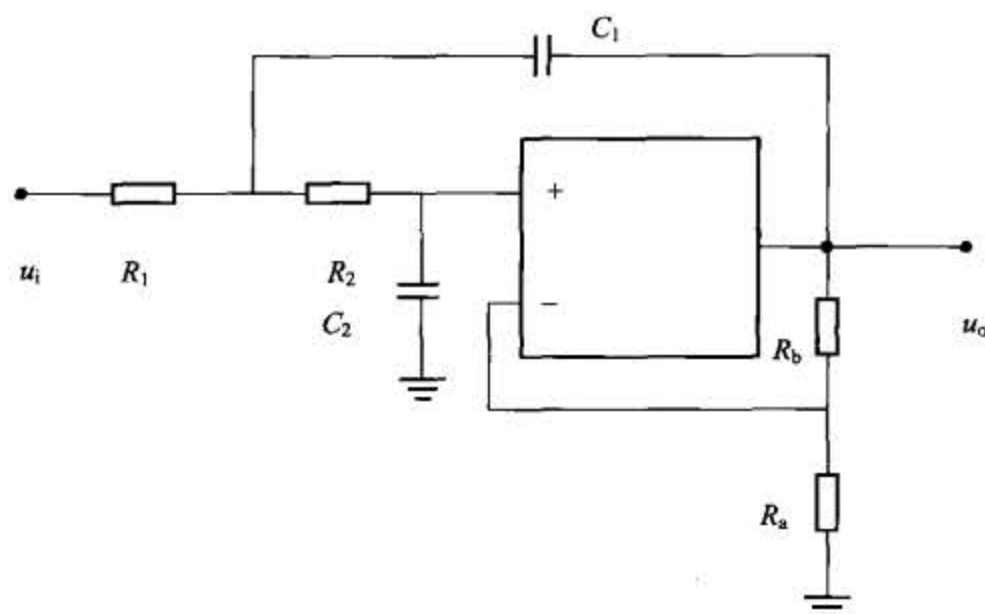


图 7-7 二阶 RC 有源低通滤波电路

在发动机数据采集系统中，采用一个二阶 RC 有源低通滤波器。此电路为压控电压源电路，其中运放为同相输入，输入阻抗很高，输出阻抗很低，滤波器相当于一个电压源，故称电压控制电压源电路。其优点是电路性能稳定、增益容易调节。

由于喷油管喷油信号频率小于 100 Hz，因此可设计滤波器截止频率 $f_c \approx 100 \text{ Hz}$ ，对于二阶低通滤波电路，通常取品质因数 $Q = 0.707$ 。

对于图 7-7 所示二阶低通滤波电路，其传递函数为

$$A(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A_0 \omega_c^2}{s^2 + \frac{\omega_c}{Q}s + \omega_c^2}$$

在上式中，一般定义放大倍数、角频率为

$$A_0 = A_{VF} = 1 + \frac{R_b}{R_a}$$

$$\omega_c^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$$

则截止频率及品质因数为

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_2 (R_1 + R_2) + R_1 C_1 (1 - A_{VF})}$$

根据系统滤波所需要的截止频率 (100Hz) 和品质因数 (0.707) 可以确定 R_1 、 R_2 、 C_1 、 C_2 的值。由图 7-8 中的幅频特性曲线可知, 当 $Q=0.707$ 时, 当信号频率为截止频率的 10 倍时, 衰减 40dB, 滤波效果良好。

四、速度传感器及其信号处理电路

为了解体能得到比较准确的发动机转速信号, 可直接取康明斯 (或斯太尔) 柴油发动机飞轮壳上的速度传感器信号进行分析。该速度传感器内部有一电磁感应线圈, 安装在飞轮壳上, 并靠近飞轮齿圈, 如图 7-9(a) 所示。当飞轮齿圈每个齿经过传感器时, 在传感器中就会产生一个感应信号。

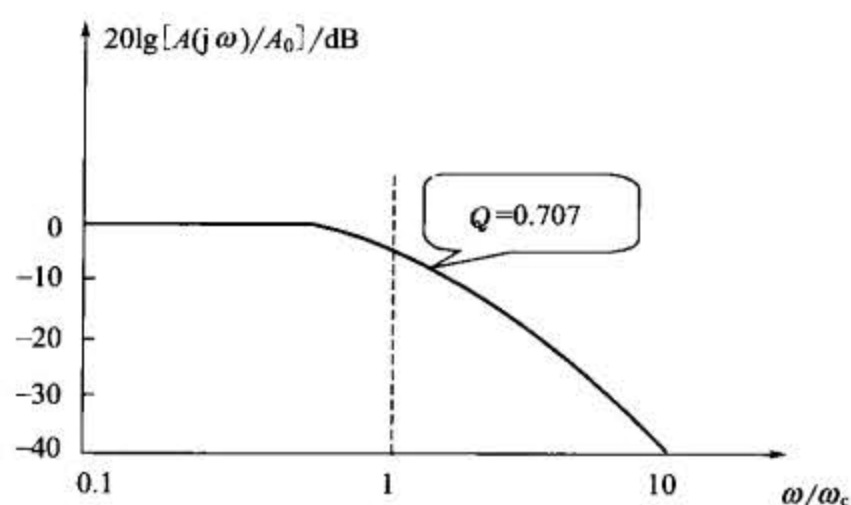


图 7-8 二阶低通滤波电路的幅频响应

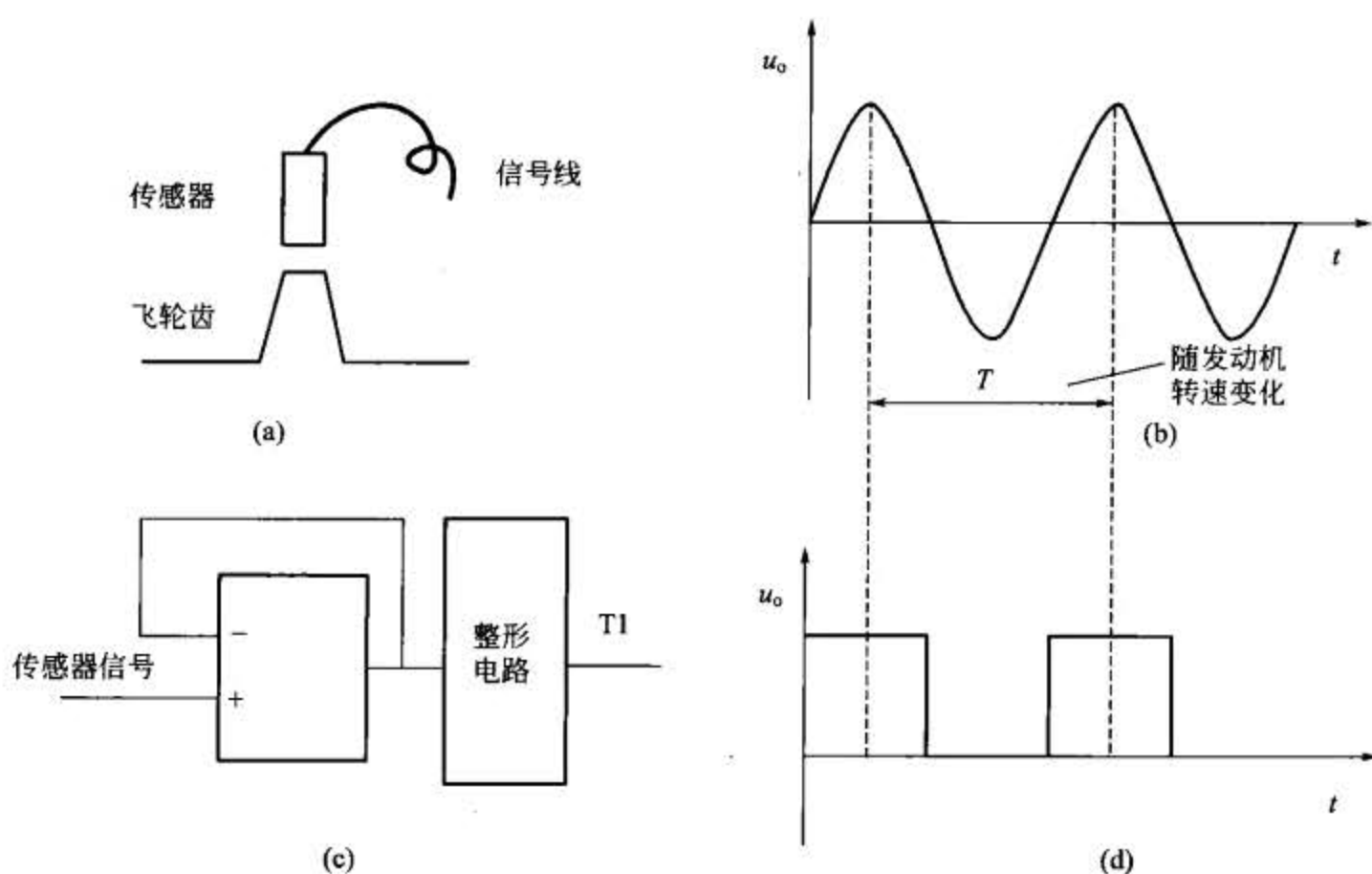


图 7-9 速度传感器

试验表明, 在发动机转动时, 传感器输出信号为正弦交流信号, 发动机转速改变, 则该交流信号的频率发生改变。如图 7-9(b) 所示。

此信号经过电压跟随器后整形, 如图 7-9(c) 所示, 变成一同频率的方波信号, 如图 7-9(d) 所示, 该方波信号作为 MCU 的计数器 T1 的输入信号, 根据在一段时间 T_0 内计数的个数, 可以确定发动机的转速。其转速的计算如下:

$$n = \frac{60 \times 1000 N}{T_0 N_0} \quad (\text{r/m})$$

式中 N ——在规定时间 T_0 (单位为毫秒) 内计数个数;

N_0 ——齿圈的齿数 (如康明斯发动机为 173 个)。

五、CPU 处理系统

1. 采样信号特点

振动信号进入计算机的第一步就是数字化，数字化实际上就是采样和量化。通常，模拟信号的数字化需从时间和幅度两个方面来实现。一方面，连续时间的离散化通过采样来实现，即每隔相等的一小段时间采样一次，这种采样称为均匀采样（uniform sampling）；另一方面，对于连续幅度的离散化通过量化（quantization）来实现，即把信号的强度划分成多个小段，如果幅度的划分是等间隔的，就称为线性量化，否则就称为非线性量化。图 7-10 表示了模拟信号离散化的概念。

采样信号数字化需要解决两个问题：每秒钟需要采集多少个信号样本，也就是采样频率（ f_s ）是多少；每个信号样本的位数（bit per sample, bps）应该是多少，也就是量化精度。

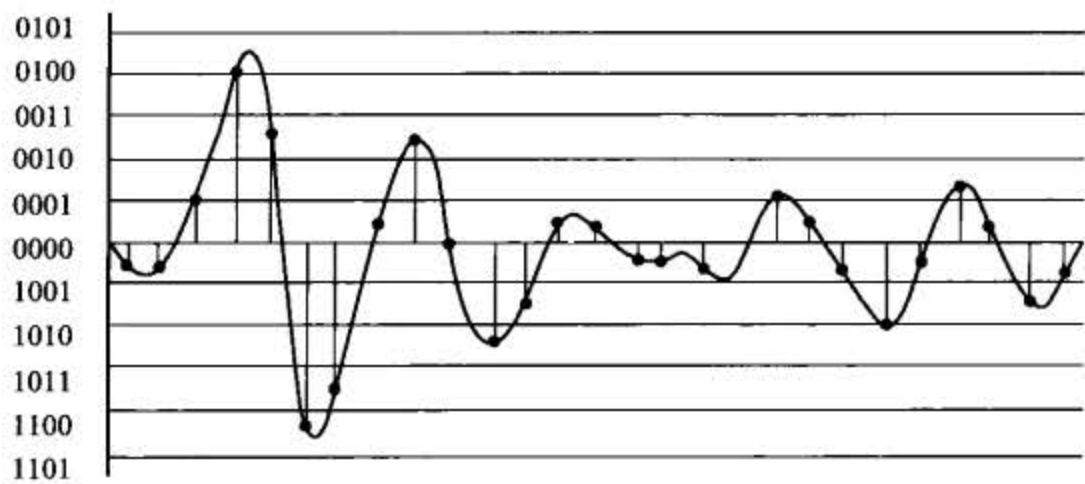


图 7-10 模拟信号离散化

(1) 采样频率 其高低是根据奈奎斯特理论（Nyquist theory）和分析信号的最高频率决定的。奈奎斯特理论指出，采样频率不应低于分析信号最高频率的两倍，这样就能把以数字表达的分析信号还原成原来的信号，称为无损数字化（lossless digitization）。采样定律用公式表示为

$$f_s \geq 2f \quad \text{或} \quad T_s \leq T/2$$

式中 f ——分析信号的最高频率。

根据奈奎斯特理论，如果一个分析信号的最高频率为 $f_{\max}$ ，采样频率最低要选择 $2f_{\max}$ ，通常取 $2.56f_{\max}$ ，如果需要还原信号波形，则需取 $10f_{\max}$ 或更高频率。

根据系统的要求，采样分析信号的最高频率为 10kHz，因此选取采样频率为 25kHz 即可满足无损数字化要求。

(2) 采样精度 信号精度是用每个信号样本的位数 bit/s（即 bps）表示的，例如，每个信号样本用 12 位（1.5B）表示，测得的信号样本值是在 0~4095 的范围内，它的精度就是输入信号的 1/4095。样本位数的多少影响信号的质量，位数越多，信号的质量越高，而需要的存储空间也越多；位数越少，信号的质量越低，需要的存储空间越少。

2. A/D 转换器件

A/D 转换器件是将模拟量（一般为随时间连续变化的电信号）转化成数字量的器件，常用的有逐次逼近型、并行比较型、双积分型以及 Σ - Δ 型，考虑到系统的要求：信号最高频率为 10kHz，采样频率取为 20kHz，采样精度为 12 位。同时要求有 4 个工作通道，因此，本系统选用最高采样频率为 100kHz，转换精度为 12 位的 A/D 转换器

作为采样器件。

3. 中央处理器

针对系统的要求,基于“器件解决”的思想,选用 C8051F021 单片机作为中央处理器。C8051F021 是一款基于 CIP-51 内核并在几项关键性技术方面进行了改进的 MCU (micro-programmed control unit),具有高速、流水线结构的 8051 兼容的 CIP-51 内核,最高速度可达 25MIPS,支持全速、非侵入式在系统调试接口 (JTAG 接口),具有 12 位 100Ksps 带 PGA 和模拟多路开关的 8 通道 ADC,2 路 12 位 DAC,32 个数字 I/O 口,具有 64KB 在系统编程的 FLASH 存储器和 4352B 的 RAM。

基于 C8051F021 单片机的一些特点,将它应用于发动机数据采集系统中作为中央处理单元完全能满足工作要求。采用 22.1184MHz 晶振,所以单字节指令周期为 45.2ns。

六、数据传输系统

USB 是近年来应用在 PC 领域的新型接口技术,是一些 PC 大厂商,如 Microsoft、Intel 等为了解决日益增加的 PC 外设与有限的主板插槽和端口之间的矛盾而制定的一种串行通信的标准,自 1995 年在 Comdex 上亮相以来至今已广泛地为各 PC 厂家所支持。现在生产的 PC 几乎都配备了 USB 接口。Microsoft 的 Windows98、Windows2000、WindowsXP、WindowsNT 以及 MacOS LinuxFreeBSD 等流行操作系统都增加了对 USB 的支持。

USB 的主要优点如下。

① 使用方便,连接外设不必再打开机箱,允许外设热插拔而不必关闭主机电源。

② 速度快,USB 接口的最高传输率可达 12Mbit/s,提供低速方式速率为 1.5Mbit/s,扣除用于总线状态控制和错误检测等数据,传输最大理论速度也能达到 1.2Mbit/s 和 9.6Mbit/s。

③ 连接灵活,一个 USB 口理论上可以连接 127 个 USB 设备,连接的方式也十分灵活,既可以使用串行连接,也可以使用集线器 HUB,把多个设备连接在一起再同 PC 机的 USB 口相接。

④ 独立供电 USB 接口提供了内置电源。

根据以上特点,在发动机数据采集系统中采用某公司的 USB 通信模块 USB100。该模块是一个完全集成化的 USB 接口模块;满足 USB1.1 标准;无须用户编写驱动程序;具有 8 位单片机总线接口;内部有 384B 的发送缓冲区和 128B 的接收缓冲区;数据通信速率最高可达 8Mbit/s;而且可靠性高。利用该模块与 C8051F021 单片机接口可以实现与上位机的数据通信,完全可以满足在发动机数据采集系统中所要求的数据传输速度。其接口电路如图 7-11 所示。

在图 7-11 中,USB100 模块的八位总线与 C8051F021 单片机的八位端口 P_3 相连,模块的 WR、RD、TXE 与 I/O 口 P_2 相连,RXF 与单片机的外部中断相连,单片机根据 TXE 和 RXF 的状态进行数据收发。

1. 发送数据

当 USB100 模块的 TXE 为高时,为禁止发送数据,当 C8051F021 单片机检测到 USB100 模块的 TXE 为低时,则表示模块的内部发送缓冲区允许发送数据到 USB100 模块,发送数据锁存由 WR 控制,在 WR 控制线的下降沿,将数据送入缓冲区。其工作时序如图 7-12 所示。

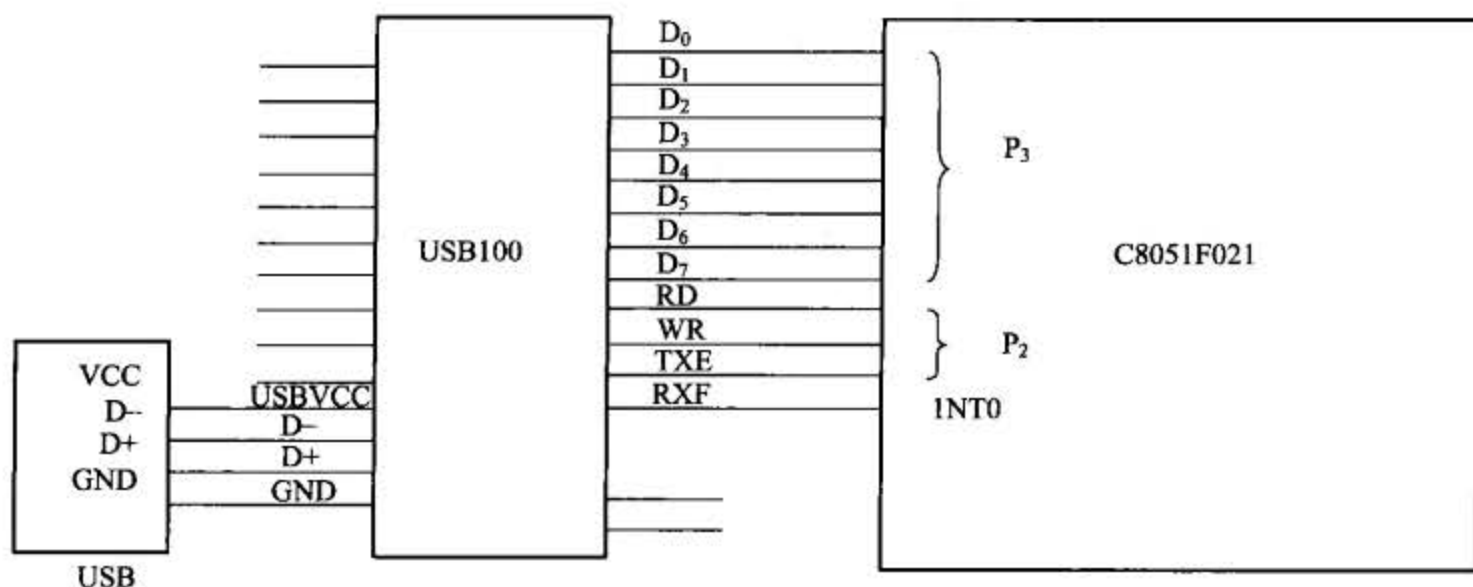


图 7-11 USB100 与 C8051F021 单片机的硬件连接图

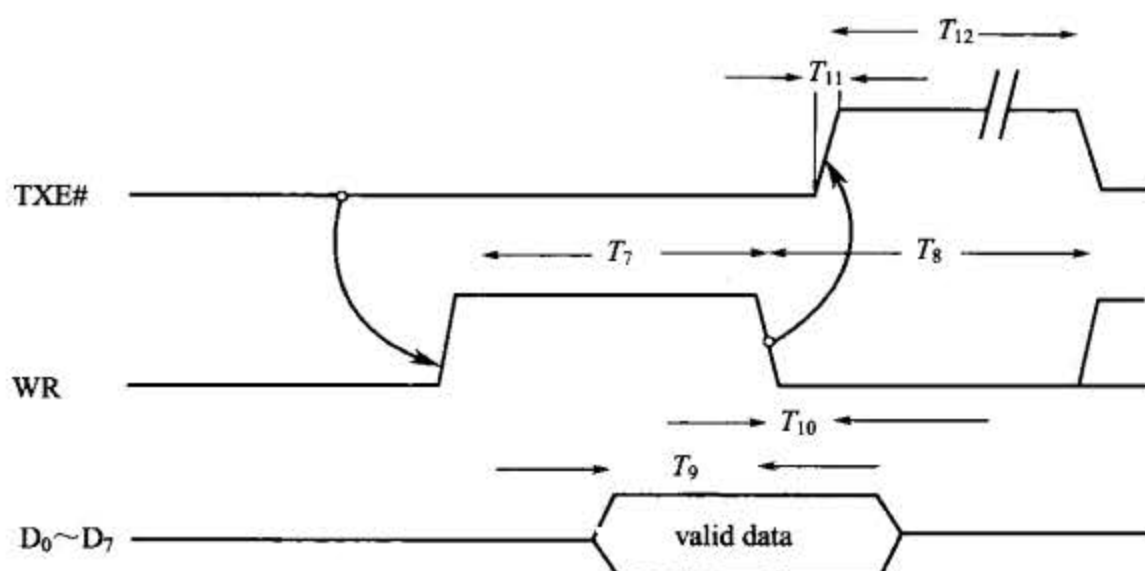


图 7-12 USB100 发送数据工作时序

2. 接收数据

当 C8051F021 单片机检测到 USB100 模块的 RXF 为低时，则表示模块的内部接收缓冲区有来自 USB 端口的数据，可以通过八位数据总线将数据读入，接收数据锁存由 RD 控制，在 RD 控制线的上升沿，将数据从缓冲区中读出。其工作时序如图 7-13 所示。

利用 USB100 模块，能实现 C8051F021 单片机与上位机之间的 USB 接口通信，通过实验，其实际数据通信速率能达到 400Kbyte/s，这完全能满足在发动机数据采集系统中所要求的数据通信速率。

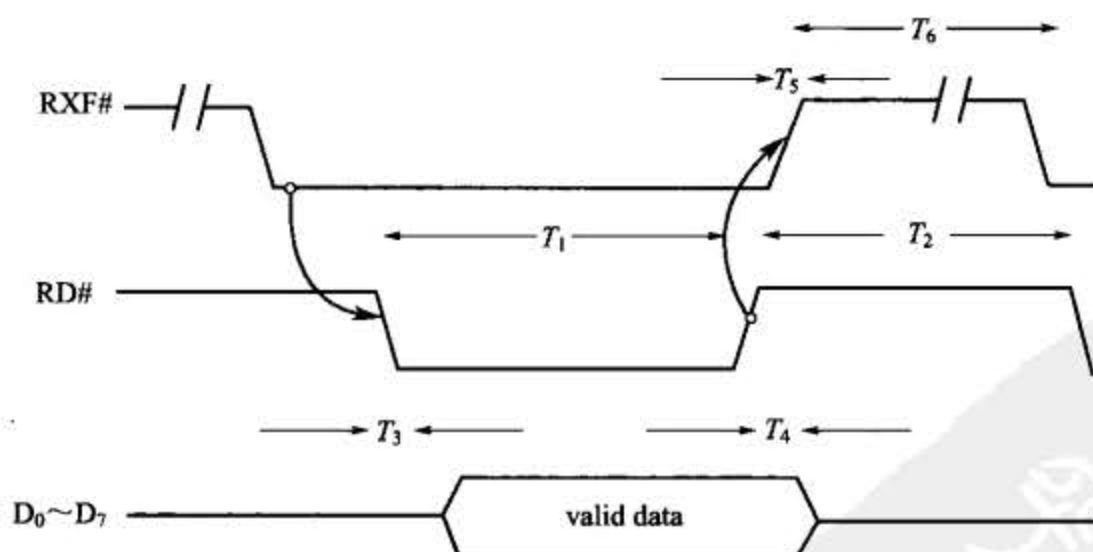


图 7-13 USB100 接收数据工作时序