矿井作业下抗噪声通信系统设计

矿工每日工作在矿井下复杂的噪声环境中，其身心健康和工作效率都受到严重影响，特别是井下通信中的噪声直接影响到收听的质量，给工作带来极大的不便，甚至误听误判造成重大事故，因此滤除井下通信噪声是当务之急。设计了矿井作业下抗噪声系统，以解决矿井下嘈杂的噪声对语音信号传输的影响，具有现实意义和实用价值。通过运用切比雪夫滤波器的工作原理开展实验研究发现，当切比雪夫低通滤波器在全极点转移函数$n=2$的情况下，所设计的运算放大器带通滤波器可使声音传播带宽达到300 Hz～5.9 kHz，能够有效地滤除噪声并完整地传输语音信息。研究成果的应用，将会有效改善矿井下的通信质量，给矿井员工的工作提供极大便利并提高通信收发效率，同时也使工人的身心健康得到保护。

赵学军　曹立波　兰西柱/中国矿业大学（北京）

赵学军/副教授

关键词/Keywords

矿井·

抗噪声·

滤波器·

运算放大器·

语音信号·

矿井通信噪声繁多且频带很宽，不利于语音信号的传输。目前关于矿井中通信抗噪声相关的研究较少，部分学者对抗噪声方面的研究主要是基于扩频技术或频率选择技术来提高信噪比并降低噪声。但是这些研究在一定程度上会造成元器件频带的浪费，使频带宽度增加。由于井下的噪声源频率范围很宽且很丰富，而传输人语音的频率范围特定在100 Hz～3 kHz之间，因此基于此频率范围的传输语音信号，利用切比雪夫滤波器原理进行矿井作业下抗噪声通信系统的研究，具有现实意义及实用价值。

抗噪声电路的设计

抗噪电路由三部分组成，分别是前端输入级电路、中间处理级电路和后端输出级电路。图1为前端输入级电路，主要作用是隔离前级电路，放大信号供中间处理级电路处理，消除高次谐波干扰。R_{14}、R_{16}和运算放大器起到放大信号的作用，当信号放大至足够幅值时，供中间处理级电路处理收集到的声波信号。电容C_{17}的容值为100 pF，主要是为了消除高频谐波干扰。除噪电路中采用了运算放大器，选取了NE5532运放模块，这里处理的是声波信号，信号比较复杂，其中掺杂很多幅值各异、频率不一的信号。所以应当采用对交流变信号处理较好的运算放大器，研究发现NE5532各种性能参数较适合。图2为中间处理级电路，属除噪电路的关键部分。经过多种设计理念的对比，最终选用运

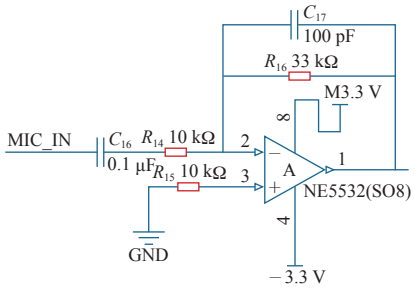

图1　前端输入级

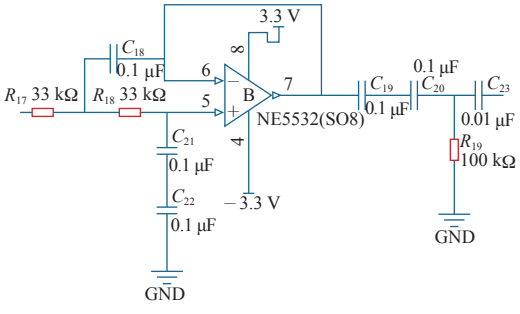

图2　中间处理级

国土资源部公益性行业科研专项：绿色煤炭矿山标准研究（编号201211003），绿色矿业发展模式研究（2012－2014）。

中国知网　https://www.cnki.net

算放大器低通滤波器和高通电路来构成带通滤波器，滤波频率范围为150 Hz～6.9 kHz。C_{18}、C_{20}、C_{21}、C_{22}、R_{17}、R_{18}、R_{19}和运算放大器一起构成二级带通运算放大器滤波器。其中带通滤波器的频率截止上限是通过二级滤波电路实现的，下限是通过一级滤波电路实现的。这样滤波效果比较理想，有效地降低并滤除了噪声。达到了很好的抗噪效果。图3为后端输出级电路，主要作用是隔离抗噪电路，不影响下级的处理电路。同时放大处理后的干净声波信号，这样足够驱动下级AD采集电路。

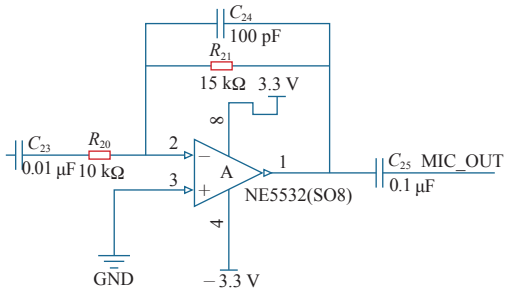

图3 后端输出级

模型设计及计算

所设计的矿井作业下抗噪声通信系统的中心部分如图4所示，此模拟电路的设计原理依据的是切比雪夫滤波器。中间处理级电路主要是应用运算放大器低通滤波器的设计理念。运放低通二次滤波器的转移函数表达式为

$$H(s)=\frac{b_1}{s^2+\alpha_1 s+\alpha_0} \tag{1}$$

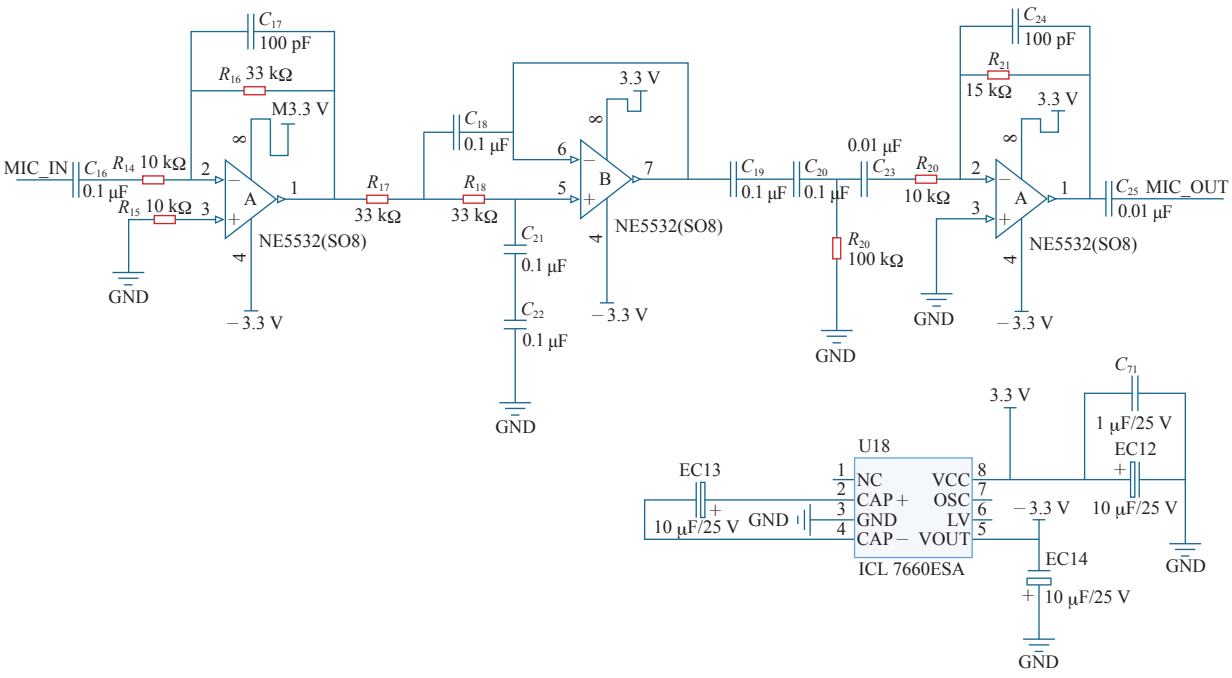

图4 抗噪电路

常见的高阶运放低通滤波器有两种：一种是在同相模式的运放上采用正反馈；另一种是在反相模式的运放上采用负反馈。在运放的理想情况下，电压转移函数表达式为

$$H(s)=\frac{KG_1G_2S_1S_2}{s^2+s(G_1S_1+G_2S_1+G_2S_2-KG_2S_2)+G_1G_2S_1S_2} \tag{2}$$

式中，$G_i=1/R_i$；$S_i=1/C_i$；$i=1$，2。

在理想情况下，由式（1）、式（2）可以推导出

$$b_0=\frac{K}{R_1R_2C_1C_2} \tag{3}$$

$$\alpha_1=\frac{1}{R_1C_1}+\frac{1}{R_2C_1}+\frac{1}{R_2C_2}(1-K) \tag{4}$$

$$\alpha_0=\frac{1}{R_1R_2C_1C_2} \tag{5}$$

中国知网 https://www.cnki.net

为了方便推导，设$C_1=C$，$C_2=\alpha C$，因此$\alpha=C_2/C_1$。其中，α为运放低通滤波器的电容散布度。从而进一步得出

$$K=\frac{b_0}{a_0} \tag{6}$$

$$R_1=\frac{1}{\alpha_0\alpha_1C^2R_2} \tag{7}$$

$$R_2=\frac{1}{2\alpha_0\alpha_1C}\left[\alpha_1+\sqrt{\alpha_1^2+4\alpha_0(K-1-\alpha)}\right] \tag{8}$$

根据式（7）、式（8）可以看出，当$K=1$时，得

$$R_1=R_2=\frac{1}{\alpha_0\alpha_1C^2R_2} \tag{9}$$

在设计除噪电路时，根据式（9）能够方便地进行计算，而且设计电路也会变得很简单，在运算放大器处只需设计一个电压跟随器，而无须设计运算放大器的放大倍数，更无须考虑交流信号（声波信号）在运算放大器NE5532的变化。在设计抗噪电路时使$R_1=R_2$，NE5532直接将反相输入端和输出端相连构成运算放大器。运算放大器的实际增益K^{∇}是关于$\alpha(s)$的函数，其表达式为

$$K^{\nabla}=\frac{K}{1+\frac{K}{\alpha(s)}}=K[1+\frac{K}{\alpha(s)}]^{-1} \tag{10}$$

当运算放大器$\alpha(s)\to\infty$时，得

$$K^{\nabla}\to K \tag{11}$$

由高等数学知识可知，当$|K/\alpha(s)|\ll1$时，得

$$K[1+\frac{K}{\alpha(s)}]^{-1}\approx K[1-\frac{K}{\alpha(s)}] \tag{12}$$

$$\alpha(s)\approx a_0p_0/s=GB/s \tag{13}$$

再考虑$G_2S_2K^2/GB\ll1$，可以作代换，得

$$(1+\frac{G_2S_2K^2}{GB})^{-1}\approx1-\frac{G_2S_2K^2}{GB} \tag{14}$$

$$H\cong\frac{K(1-\frac{G_2S_2K^2}{GB})(1-\frac{K}{GB}s)G_1G_2S_1S_2}{s^2+s[(G_1S_1+G_2S_2+G_2S_2(1-K))(1-\frac{G_2S_2K^2}{GB})]+G_1G_2S_1S_2(1-\frac{G_2S_2K^2}{GB})}=\frac{N(s)}{s^2+a_1s+a_0} \tag{15}$$

由式（2）、式（10）～式（14）推导可得

因此

$$a_1=[G_1S_1+G_2S_2+G_2S_2(1-K)](1-\frac{G_2S_2K^2}{GB}) \tag{16}$$

$$a_0=G_1G_2S_1S_2(1-\frac{G_2S_2K^2}{GB}) \tag{17}$$

将a_1、a_0代入R_2可得

$$R_2^3-\frac{\alpha_1}{\gamma C\alpha_0}R_2^2+\frac{\gamma+1-K}{\gamma^2C^2\alpha_0}R_2-\frac{K^2(\gamma+1-K)}{\gamma^3C^3\alpha_0GB}=0 \tag{18}$$

$$\omega_C=\sqrt{\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}} \tag{19}$$

根据已知数据可以进一步推导出R_2的阻值，再根据$R_1=R_2$的关系计算出R_1的阻值。

其设计原理是基于切比雪夫低通滤波器，切比雪夫低通滤波器全极点转移函数表达式为

$$H(s)=\frac{H(0)}{s^n+a_{n-1}s^{n-1}+a_{n-2}s^{n-2}+\cdots+a_1s+a_0} \tag{20}$$

切比雪夫低通滤波器的3 dB带宽为

$$\frac{\omega_{3\,\mathrm{dB}}}{\omega_c}=\cosh(\frac{1}{n}\cosh^{-1}\frac{1}{\varepsilon}) \tag{21}$$

式中，$\varepsilon^2=10^{0.1\delta}-1$，$\varepsilon$通常为小于1的实常数，$\delta$为带通文波。

当$n=2$时，本文中滤波器的转移函数表达式为

$$H(s)=\frac{H(0)}{s^2+\alpha_1s+\alpha_0} \tag{22}$$

切比雪夫低通滤波器的3 dB带宽为

$$\frac{\omega_{3\,\mathrm{dB}}}{\omega_c}=\cosh(\frac{1}{2}\cosh^{-1}\frac{1}{\varepsilon}) \tag{23}$$

因此，根据式（23）可以轻松得出二阶切比雪夫低通滤波器的截止频率。

通信系统的整体设计

本文通过对抗噪系统性能理论的研究，并基于切比雪夫滤波器原理设计出实际电路，如图5所

中国知网 https://www.cnki.net

示。所设计的拾音器可以采集声音信号，并将发出的声波振动信号转化为电信号，具有体积小、频率范围宽、高保真和低成本的特点。

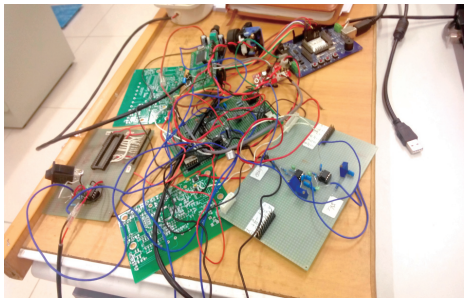

图5 实际电路

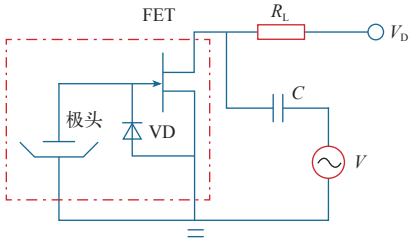

图6 拾音器简易原理

图6是经过极头的振动转化为从电容*C*处支路输出的电压，这个电信号的采集质量好坏直接关系到整个电路声音信号的处理质量。此处拾音器采用驻极体话筒，驻极体话筒选用市场上较通用、灵敏度较高且动态范围宽度较小的类型。声波信号采集后，需要采用专用于声波采集信号放大的运放做放大处理，该运算放大器采用的是MAX9812。MAX9812有两个输入端，分别是单/双输入。此运放突出特点之一是20dB固定增益的麦克风放大器。芯片的封装尺寸小，并且内部有低噪声麦克风偏置，适用于笔记本电脑、手机等便携式音频装置。这类放大器的增益带宽积是500 kHz，输出能达到满幅，有业界先进的100 dB电源抑制比。MAX9812采用供电范围是0～6 V，MAX9812采集声波信号后，最终要送至ARM进行处理，随着科技发展，现在ARM都在采用3.3 V供电，低压工作可以减少功耗，增加工作时间。考虑到与ARM链接，MAX9812的供电设计采用3.3 V供电。原始声波信号经过MAX9812内置固定增益20 dB处理后，输出信号大小约几百毫伏，再送入下一级。

CSP1027是一个专业的AD/DA芯片，标准的16位串行I/O接口。且CSP1027是低功耗设计，静态待机状态下功耗是68 mW，数字供电电压是0～5.0 V，模拟电源是5.0 V。声波采样率高达24 kHz，并有声波信号稳压电源。内置声波前置放大器和输出放大器，前置放大器可编程输入0.16 Vp和0.5 Vp范围内的声波电压。输出放大器可编程增益设置，CSP1027含有上电复位脉冲发生器。声音信号输入有两路：一路是由驻极体话筒输入的人的声音信号；一路是由电路传输过来的报警信号。CSP1027不能编程设计为一直转换采集，因此需要一个触发信号。驻极体话筒采集的是人的说话声音，触发信号来自人的操作，只需说话时按住按键，这样会给CSP1027一个触发信号。另一路由电路传输过来的报警信号却不容易找到触发信号。本文通过将电路传输过来的报警信号转换为直流信号实现触发。这样处理后，当电路传输过报警信号后，便会产生一个0～3.0 V的跳变；报警信号消失后，随即产生一个由3.0 V降低至0 V的低跳变。如此产生了两个触发CSP1027的信号。CSP1027采集的AD信号会送至AMBE－1000。

AMBE－1000是一个性能高、速率多的语音编解码芯片，利用MBE理论的语音压缩算法，有语音音质质量好和编码的速率低等较多优点，目前语音的编解码速率能在2.4～9.6 Kbit/s之间以50 bit/s的间隔变化，即便在2.4 Kbit/s的速率，仍能保持自然的语音质量。而且全部编解码操作都能在芯片的内部完成，无须外部的存储器。综上所述，这个芯片很适合用于数字语音通信、语音存储和其他对语音进行数字处理的场合。

AMBE－1000由一个编码器和一个解码器构成，这两个部分互相独立。编码器接收8 kHz采样的语音数据流，且能够以一定的速率输出信道数据。与此相反，解码器接收信道数据且合成语音数据流。编码器和解码器接口的时序是完全异步的。AMBE－1000利用AD－DA芯片做语音信号的接口。输入输出的语音数据流格式必须完全相同，信道接口采用的是8位或16位的微控制器。

中国知网 https://www.cnki.net

CAN是现场总线的范围，CAN通信是一种有效支持分布式控制或实时控制的串行通信网络。就许多基于RS 485构建的分布式控制系统来说，CAN总线的分布式控制系统有很多优点，具体如下：

1）CAN控制器工作有很多种方式，网络里的各个节点都能根据总线访问的优先权（取决于报文标识符）利用无损结构的逐位仲裁方式竞争向总线发送数据，而且CAN协议摒弃了站地址编码，取而代之的是对通信数据的编码，使不同的节点能够同时接收到相同的数据，此特点能使CAN总线构成在各个网络节点之间数据的通信实时性变强，而且容易构成冗余结构，提升了系统性能的可靠性和灵活性。然而利用RS 485仅能构成主从式结构系统，通信方式只是单一能在主站轮询的方式进行，系统的实时性、可靠性较差。

2）CAN总线有效地缩短了开发周期，通过CAN收发器接口芯片的两个输出端CANH和CANL与物理总线相连，且CANH端的状态只是高电平、悬浮状态，同样的CANL端只能是低电平、悬浮状态。

3）CAN协议已形成国际标准的现场总线，CAN总线具有通信速率高、容易实现且性价比高等诸多特点，并且它是最有前途的现场总线之一。

实验

通过三组实验对比了电路的抗噪性能，测试分别如下：

实验1：在没有噪声的情况下，没有抗噪电路，通话质量良好，波形良好。

实验2：在含有噪声的情况下，没有抗噪电路，通话质量差，波形差。用风机做噪声源，风机发出的声音淹没了有用的声音信号。

实验3：在含有噪声的情况下，添加抗噪声电路，通话质量良好，波形良好，音色良好，音质良好。能完整地传达语音信息，并能够良好地区别出不同人的说话声音。

由以上对比实验可以证明抗噪声电路的效果显著，能够完整地传输语音信号。抗噪声电路部分实际效果如图7所示，非抗噪声的实验结果如图8所示。两组实验对比后，抗噪声电路声音信号明显，频率单一。而非抗噪声电路中能明显看出声音信号被噪声淹没，掺杂较多的其他频率。所以抗噪电路能明显改善矿井下的通信质量，使语音信号完整准确地传输。

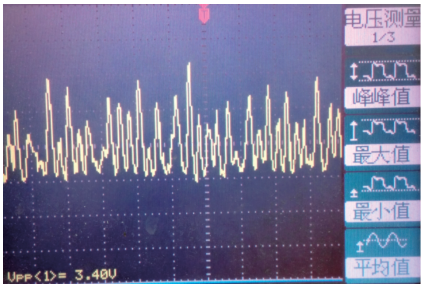

图7 抗噪实验结果

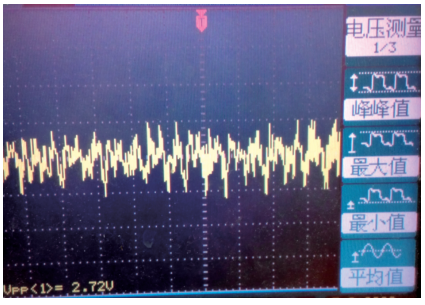

图8 非抗噪实验结果

结束语

本文运用切比雪夫滤波器的工作原理，即一种有效逼近滤波器上限值和下限值的数学依据，能够清晰有效地计算出理论值，并逼近实际值，从而设计出适用于各种场合的切比雪夫滤波器，通过三组实验证明了所设计的滤波器能够有效滤除噪声，并消除噪声对语音信源的影响，在矿井作业下能很好地改善通信质量，完整清晰地传输语音信息。

（收稿日期：2015－02－10）EA

中国知网 https://www.cnki.net