

doi: 10.7690/bgzdh.2022.03.011

基于地震动信号的目标预警系统

王文伟^{1,2}, 盛才良¹, 陶桑彪¹

(1. 江苏永康机械有限公司, 江苏 宜兴 214203; 2. 近地面探测技术重点实验室, 江苏 无锡 214035)

摘要: 针对现代智能弹药系统低功耗的需求, 提出一种基于地震动信号的低功耗预警系统电路。通过分析地震动波的特点, 合理选择预警系统的地震动传感器; 在自适应浮动门限与目标通过特性提取原理的基础上, 设计低功耗硬件电路实现的震动预警系统; 给出电路的系统结构组成框图和主要环节电路的工作原理。试验结果表明: 该电路系统具有低功耗($<5\text{ mW}$)、低虚警($<6\text{ 次}/24\text{ h}$)和目标的预警距离远(装甲目标 350 m)等特点, 并能够抗战场爆炸等冲击干扰。

关键词: 预警; 地震动波; 自适应浮动门限; 目标通过特性

中图分类号: TN971 **文献标志码:** A

Target Early Warning System Based on Seismic Signal

Wang Wenwei^{1,2}, Sheng Cailiang¹, Tao Sangbiao¹

(1. Jiangsu Yongkang Mechanical Co., Ltd., Yixing 214203, China;

2. Science and Technology on Near-Surface Detection Laboratory, Wuxi 214035, China)

Abstract: According to the requirement of low power consumption of modern intelligent ammunition system, a low power consumption early warning system circuit based on seismic signal is proposed. Through the analysis of the characteristics of the seismic wave, the seismic sensor of the early warning system is selected reasonably. Based on the principle of adaptive floating threshold and target passing characteristics extraction, a low power hardware circuit is designed to realize the seismic early warning system, and the system structure block diagram and the working principle of the main circuit are given. The test results show that the circuit system has the characteristics of low power consumption ($<5\text{ mW}$), low false alarm rate ($<6\text{ times}/24\text{ h}$) and long early warning distance (armored target 350 m), and can resist the shock interference such as battlefield explosion.

Keywords: early warning; seismic wave; adaptive floating threshold; target passing characteristics

0 引言

智能弹药系统预警系统的任务是在长时间服役期内负责探测是否有目标进入警戒区域, 一旦预警系统报警, 则启动主探测系统对目标进行识别、定向和定位跟踪, 并对目标实施精确打击。若预警系统的功耗大和虚警率高, 电池能源会快速消耗, 不利于智能弹药系统的长期服役, 严重影响系统的整体性能。目前, 智能弹药系统预警系统采用软件算法技术, 通过 CPU 对目标物理场信号进行信号采集并依据现代信号处理的理论和方法对信号进行时域和频域处理及分析^[1], 大多数算法都是针对特定的应用, 具有局限性, 且功耗偏大, 不适应现代智能弹药系统低功耗的要求^[2]。笔者设计了一种用硬件电路实现的低功耗预警系统, 通过设计双积分目标通过特征提取电路, 高效提取目标的通过特性, 确保对目标的可靠预警, 降低环境干扰造成的虚警;

通过设计的抗干扰电路, 有效防止了战场各种冲击干扰引起的虚警, 解决了以往硬件电路存在虚警高的问题。采用低功耗硬件电路设计方法, 将系统的功耗降低到 5 mW , 较好地解决了智能弹药武器系统低功耗警戒预警问题。

1 地震动信号

地震动信号是由地面物体运动引起介质偏离平衡位置而产生的, 人员走动、坦克和车辆等目标的行驶, 都将产生地震波, 即地震动信号。在半空间介质中, 震源处的振动引起介质质点在其平衡位置附近运动并以波的形式向远处传播而产生地震动波。地震动波的传播主要有 3 种波: 压缩波(简称 P 波)、剪切波(简称 S 波)和表面波或瑞利波(简称 R 波)。

在各向同性的无限弹性介质中, 只存在 2 种弹性波: S 波和 P 波, 其在地球介质内独立传播, 遇

收稿日期: 2021-12-11; 修回日期: 2022-01-06

基金项目: 近地面探测技术重点实验室预研基金项目(6142414200410)

作者简介: 王文伟(1987—), 男, 江苏人, 硕士, 工程师, 从事智能弹药引信技术研究。E-mail: hswqhxy@163.com。

到界面时会发生反射和透射，在一定条件下会形成干涉并叠加产生一类频率较低、能量较强的次声波。如果是在半无限弹性介质表面，则还会存在一种弹性表面波(瑞雷波)。在半无限弹性介质表面传播的瑞雷波，具有如下性质^[3]：

1) 瑞雷波是由纵波和横波叠加而成的，沿着介质表面传播，并随着深度的增加而呈指数衰减；

2) 在瑞雷波的传播过程中，弹性介质的质点运动轨迹为一椭圆，其长轴垂直于地面，地表处质点位移的水平分量与垂直分量的幅值之比约为 $2/3$ ，质点的运动轨迹为绕其平衡位置的椭圆，质点在平衡位置上方时其运动方向与波的传播方向相反；

3) 瑞雷波的传播速度略小于同一介质中横波的传播速度，大约是 0.9194 倍；

4) 瑞雷波在地表处的垂直位移分量大于水平位移分量，大约是 1.8 倍。

沿自由表面传播的瑞雷波频率较低，能量最强。地球大地表面在脉冲载荷作用下，在离震源稍远处，P 波和 S 波在地波产生的位移和 R 波相比几乎可以忽略，外力在地表一点上作上下激振时，产生的纵波、横波、瑞雷波所占的相对能量是不一样的，瑞雷波占 67% ，纵波占 7% ，横波占 26% ，可见瑞雷波占地震波全部能量的 $2/3$ 。另外，随着地震波的传播，单位面积内地震波的能量将逐渐减小，从而随着距离的增加，地震波的振幅会逐渐衰减，其瑞雷波的衰减要比体波慢得多。

以上分析可知，利用震动传感器得到的基本为 R 波的垂直分量。由于 R 波具有能量较强、在自由表面传播距离较远等特征，其震源能量的大约 $2/3$ 是由 R 波携带的，故最适合远距离目标震源的探测和识别。笔者选择垂直分量的无源震动电磁感应检波器作为预警系统的震动输入传感器，且电磁感应检波器的无源特征正好满足预警系统的低功耗需要。

2 自适应浮动门限与目标通过特性提取

由于人员、车辆等地面目标在相同的距离时地震动信号的强度不一样，地面目标的地震动信号与目标所处的地质条件、目标与传感器的距离、车辆发动机及车辆类型等因素有关，因而不可能提前设定一个固定信号幅值的阈值来判断目标是否出现。在单片机组成的警戒系统中可利用软件方便地实现

自适应浮动门限技术来提高警戒系统的正确率和降低虚警率。

在数字信号处理的警戒系统中，认为理想高斯白噪声的均值为 0 ，通常取前 3 组信号数据的平均值为 a ，基于概率学的 3σ 原则，选择阈值为 $V = a \pm 3\sigma$ ，那么噪声幅值 X 出现在区间 $(a-3\sigma, a+3\sigma)$ 的概率为 $P(a-3\sigma < X \leq a+3\sigma) = 99.7\%$ ，当目标进入传感器的有效探测区域时，信号幅值超过此设定阈值的概率逐渐增大，以达到预警警戒目的^[8]。

对于由硬件电路组成的预警警戒系统，无法实现较精确的自适应浮动门限值；为此，笔者新设计了由硬件电路实现自适应浮动门限值与目标通过特征提取的电路，在满足预警门限的自适应调整要求的前提下，对进入警戒区域的目标正确警先报警，其基本原理如下：

电路对震动传感器获得的震动信号进行放大和滤波后，利用全波检波电路提取目标信号的特征幅值，全波检波电路提取目标信号的特征幅值再输入给自适应控制，对目标信号进行自适应负反馈控制，目的防止突变干扰信号引起目标通过特征提取电路误动作而误报目标预警信号，并对浮动门限电路提供一个自适应变化的控制电压值。浮动门限电路在目标出现前自动调整略高于环境噪声的门限值，确保在不同环境噪声情况下自动调整门限电平，防止环境噪声引起目标通过特征提取电路误动作而误报目标预警信号。

同时，经主放大器放大的目标信号通过全波检波电路提取目标信号的特征幅值分别输入给长积分时间信号提取电路和短积分时间信号提取电路，其积分时间信号提取电路的目的是对目标信号的特征幅值分别采用不同的积分时间常数来保持目标信号特征幅值的增长率。当目标进入警戒区域时，目标信号的特征幅值的增长会超过自适应浮动门限值，只有目标是渐渐进入警戒区域，其 2 路不同积分时间常数的目标信号特征幅值通过由比较器构成的特征提取电路进行实时比较获得目标的通过特性，迅速判断确认有目标进入防御区域，报目标预警信号。

3 震动警戒系统设计

根据上述分析的自适应浮动门限与目标通过特性提取原理，笔者设计了完全由硬件电路实现的低功耗警戒预警系统，其原理结构如图 1 所示。

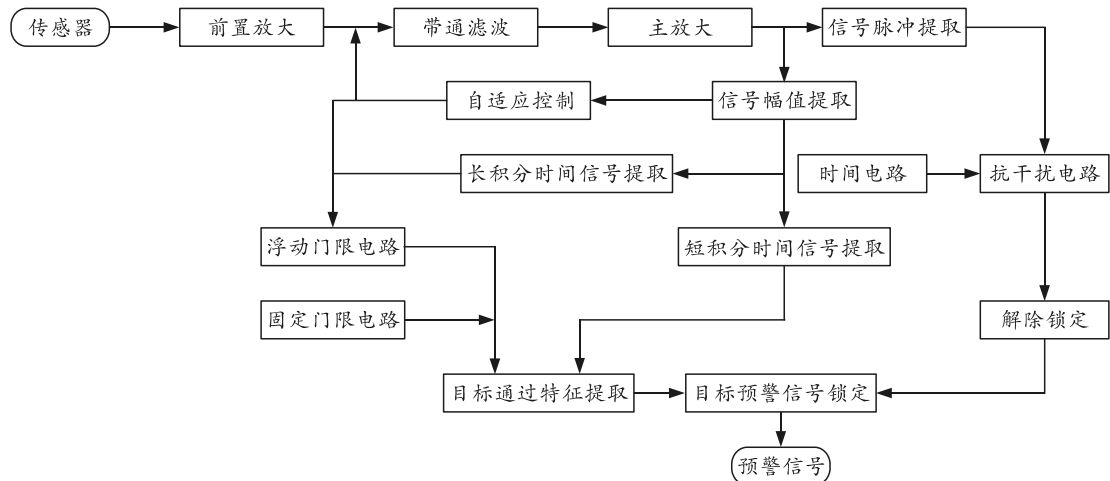


图 1 警戒预警系统电路结构

其中，震动传感器使用动圈式电磁感应传感器，其线圈震动信号直接输出连接到前置放大器输入端。由于震动传感器的输出阻抗较大(3 kΩ 左右)，且整个探测系统的噪声较大，对震动探测电路的前置放大影响较大，为此设计差动输入放大器作为前置放大器，放大倍数为 50。

为了排除其他频率成分及干扰信号对电路的影响，有效保留目标特征信号成分，采用 2 个二阶带通有源滤波器串联实现四阶带通滤波进行目标震动信号滤波，其二阶带通有源滤波器的带通和中心频率根据目标震动的信号的特征频率来确定。根据对装甲车辆的震动信号进行分析，确认震动信号的只有功率谱成分在 25~30 Hz 之间；因此，选择二阶带通有源滤波器的带通频率为 20~35 Hz。

信号幅值提取电路是利用全波检波电路加积分电路来提取目标信号的有效幅值。

自适应控制电路是取样信号幅值对目标信号负反馈控制，利用工作在线性放大区的场效应三极管对主通道的目标信号进行分压处理，对异常的突变干扰信号进行有效压制，防止突变干扰信号引起目标通过特征提取电路误动作而误报目标预警信号。

信号幅值提取电路得到的目标震动信号幅值分别输入给长积分时间信号提取电路和短积分时间信号提取电路，该积分时间信号提取电路利用不同 RC 积分时间常数分别来保持目标信号的特征幅值，通过设计合理的积分时间差异，由比较器构成的目标通过特征提取电路实时判断目标震动信号是否处于递增过程，即由目标的通过特征来确认有无目标进入预警区域。

固定门限电路的功能是将目标通过特征提取电路的动作门限值设定为高于电路本底噪声，防止电

路噪声误触发目标预警电路，其电路设计采用一个基准电源，再用电阻分压取得目标通过特征提取电路的固定门限值。

浮动门限电路是将来自长积分时间信号提取电路的震动信号进行一定的放大再输入到目标通过特征提取电路，其目的是适应环境噪声的改变而改变目标通过特征提取电路的动作门限值，防止环境噪声的变化误触发目标预警电路。另外，当有目标来时，来自长积分时间信号提取电路的震动信号幅度会提高，但提高的变化率小于短积分时间信号提取电路的震动信号幅度，确保只有目标进入警戒区域，具有明显的目标通过特征，则报目标预警信号。

考虑到目标通过特征提取电路的输出是不稳定的信号，主要是由于目标行驶在不平坦路面上及不稳定行驶，导致目标通过特征提取电路的输出断续，其断续的目标预警会导致后续电路工作的不稳定。笔者设计由 DS 触发器组成的目标预警信号锁定电路，确保一旦确认是目标信号，则锁定目标预警信号。解除锁定目标预警的控制信号可由后续目标识别系统确认是非攻击目标来控制，或者检测目标震动信号小于某特定值，认为目标不在警戒区域了，解除锁定目标预警。

抗干扰电路的作用是排除战场和环境的各种干扰信号，提高目标预警信号的正确率。其电路的实现原理：对目标通过特征提取电路提取的目标通过特征有效信号如果在一定的时间间隔内保持连续性，则认为是有目标进入警戒区域，锁定目标预警信号，报目标预警信号。