

蒋宏毅, 李丽, 丁晶, 等. 2025. 地震预警信息服务的时效性分析与探讨. 中国地震, 41(2): 354~360.

地震预警信息服务的时效性分析与探讨

蒋宏毅^{1,2)} 李丽³⁾ 丁晶⁴⁾ 包文超⁵⁾
翟颖³⁾ 马秀丹³⁾

1) 河北省地震局, 石家庄 050021

2) 河北红山巨厚沉积与地震灾害国家野外科学观测研究站, 河北邢台 055350

3) 中国地震台网中心, 北京 100045

4) 天津市地震局, 天津 300201

5) 内蒙古自治区地震局, 呼和浩特 010010

摘要 破坏性地震发生后, 高效的地震预警服务对于降低人员伤亡、减少地震造成的损失至关重要。预警服务的时效性, 定义为从地震发生时刻至地震警报(一般指地震预警系统发出的第一报)发出的时间差。时效性是地震预警系统工程的重要评估指标, 其关系到地震预警的盲区大小和为地震预警区提供的避险逃生时间, 即预警时间的长短。因此, 缩小地震警报的用时, 优化和控制时延是地震预警系统最重要的技术。本文探讨了地震预警的原理及其工程架构, 重点分析影响预警时效性的关键因素, 并据此提出控制预警时效性的策略和关键保障方法。

关键词: 时效性 地震预警信息服务 预警时间 地震预警终端

[文章编号] 1001-4683(2025)02-0354-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

中国是大地震多发的国家之一, 根据 20 世纪初以来的统计数据^①, 自 1900 年起至 2024 年年底我国发生 766 次 6.0~6.9 级地震, 125 次 7.0~7.9 级地震, 以及 11 次 8.0 级及以上强烈地震。这些自然灾害不仅给人民生命安全带来了极大的威胁, 也造成了巨大的经济损失。据统计, 地震灾害已导致超过 70 万人死亡或失踪, 近百万人受伤致残, 受灾人数更是达到了数亿人。

2008 年 5 月 12 日发生的汶川 8.0 级大地震, 不仅夺走了无数宝贵的生命, 还给当地社会经济发展带来了长期深远的影响。面对如此严峻的地震形势, 我们迫切需要寻找有效的途径来减轻地震带来的破坏和损失。在地震预报这个科学难题尚未取得突破性进展的背景下, 地震预警技术(袁志祥等, 2007; 吴逸民, 2004; 金星等, 2023)显得尤为重要。作为一种减少伤亡、降低损失的有效手段, 地震预警已经在全球多个地震频发的国家和地区得到了应

[收稿日期] 2024-06-28 [修定日期] 2025-05-19

[项目类别] 地震科技星火计划项目(XH24003A)、应急管理部重点科技计划(2024EMST040402)共同资助

[作者简介] 蒋宏毅, 男, 1982 年生, 高级工程师, 主要从事地震监测预警研究。E-mail: 88393309@qq.com

李丽, 通讯作者, 女, 1982 年生, 高级工程师, 主要从事地震信息和公共服务相关研究。E-mail: lili@seis.ac.cn

① <https://data.earthquake.cn>

用和认可。通过提前几秒到几十秒的预警时间,人们可以迅速采取措施保护自己,避险逃生,避免或减少伤亡;城市生命线工程等重要设施和重大工程也可以利用这段时间进行紧急处理,以降低潜在的损失。

因此,加强地震预警系统的建设(周彦文等,2008;陈会忠等,2011),提高预警准确性和扩大预警覆盖范围,对于提升我国地震灾害应对能力具有重要意义(陈颢等,2005)。同时,普及地震知识和逃生技能,增强公众的防灾减灾意识,也是减轻地震灾害影响的关键环节。通过综合运用科技手段(李山有等,2004)和社会力量,更好地保护人民生命财产安全,共同构建更加安全、稳固的家园。

1 地震预警原理和系统组成

1.1 地震预警原理和分类

地震预警原理是在地震发生后利用电磁波和地震波的速度差,P波和S波的速度差来进行及时预警(马强等,2013)。地震发生后,地震P波先于S波到达附近的监测站,在监测站收到地震P波信号后,经过快速计算处理,估算出地震的发震时刻、震级大小、震中位置、震中烈度等基本信息,利用电磁波远远快于地震波速度的特点,对破坏性地震波(一般指S波)尚未到达的地区提供数秒或数十秒的预警时间。

地震预警可以分为现地预警和区域预警两种形式(图1)。其中,现地预警是指地震发

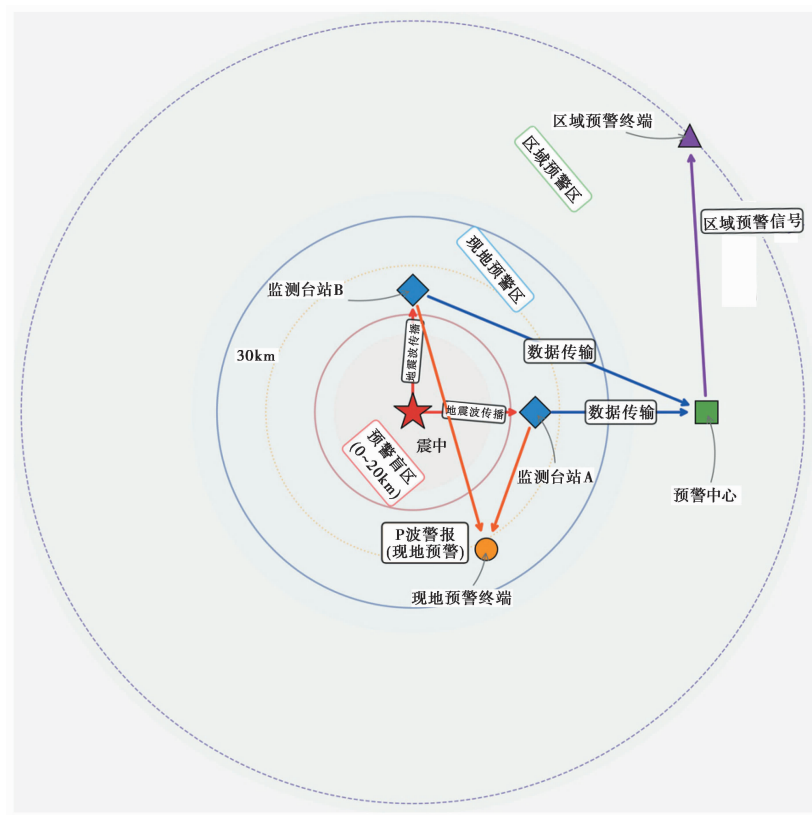


图1 地震预警示意图

生后当地地震监测网络的台站利用 P 波速度快于 S 波的特性,利用 P 波确认地震后对 S 波还未到达的地区发出警告,这种警报被称为 P 波预警。区域预警是利用密集地震预警监测网络,在地震发生后利用电磁波远远快于地震波的原理向 S 波还未到达地区的预警区域发送地震警告,预警时间一般在十秒至数十秒。对于浅源地震,如果地震发生后 5s 发出地震警报,在地震震中 20km 以内,不论是现地预警还是区域预警,基本均没有预警时间,因此该区域被称为预警盲区。对于震源较深的地震(震源深度一般大于 30km),地震 P 波到达地面台站的时间加上 3s 的 P 波处理地震时间,之后发布地震预警警报,S 波尚未到达地面,地震盲区则为零。

总的来说,地震预警系统(夏玉胜等,2000;张延年等,2009)通过精确的监测和快速的信息传递,为人们提供了宝贵的时间采取避险措施,从而在一定程度上减少地震可能造成的人员伤亡和经济损失。随着科技的不断进步,未来的地震预警系统将更加高效和准确(Gasparini et al,2007),为人类社会的安全提供强有力的保障。

1.2 预警系统组成

地震预警系统(赵纪东等,2009)是地震预警技术的实际应用,一般由四部分组成,即密集地震预警监测系统、通信网络系统、计算和处理系统和预警信息发布系统。

(1)密集地震预警监测系统是预警的基础,一般部署在地震活跃和高烈度区域,为了快速测定地震的位置,地震预警监测系统必须是高密度地震观测网,通过部署低成本的 MEMS 加速度计,实现高密度站网乡镇全覆盖;部署市县少量速度地震计和强震加速度计,提升预警处理结果精度。

(2)通信网络系统保障预警站网监测数据实时传输。其利用光缆、移动通信或卫星作为传输媒介,以实现地震数据实时传输至地震预警处理计算中心。通信网络系统作为地震预警系统运行的核心支撑,确保地震数据传输的承载能力,并尽量降低通信网络系统所带来的时延(何凯等,2016),以实现数据传输的低时延和高质量,防止关键节点出现单点故障。

(3)计算和处理系统作为预警系统的核心,实时汇集、交换、处理台站观测系统产出的波形数据,产出地震烈度速报信息、地震预警信息、地震基本参数、震源参数和破裂过程等数据产品以及地震目录、震相数据和地震事件波形等常规数据产品。在计算和处理系统中,预警处理计算模型是关键。如果参与计算的台站数据越多,数据的可靠性越高,那么预警的结果就越准确,但是所需要的处理时间就会越长。因此,处理方法和模型影响共同制约着预警时效,需要合理地平衡地震预警的时效性和准确性。

(4)预警信息发布系统(赵国峰等,2023)是预警系统面向社会公众的出口,承担预警信息的实时发布职责(申源等,2024;张建勇等,2024)。该系统需要对地震预警区域内的用户提供高效的预警信息服务,确保及时向广播、电视、主流网站以及社会公众提供地震预警信息。该系统必须充分考虑其承载能力,确保信息能够及时地传达至社会公众用户,因此降低信息传递时间延迟至关重要。预警信息每延迟 1s 就意味着避险逃生和应急处置时间减少,而预警盲区半径将扩大近 4km。

2 地震预警发布用时分析

从地震预警的角度来说,每一秒都意味着人员伤亡的减少和财产损失的降低(吴忠良

等,2007)。一般情况下,震中周围破坏最严重,预警时间很短,甚至预警时间为 0。

2.1 地震监测系统用时影响

在地震监测系统中,时延的影响因素主要有两个方面。首先,地震预警观测站网密度直接影响地震波的拾取效率和精度,站网密度越高,首台触发时间越早,预警时效性越高,反之,时效性越差。目前,我国地震烈度速报与预警工程中,预警重点区平均台间距达 12km 左右,首台触发时间一般在 3~5s 之间(张晁军等,2014)。其次,是地震监测设备仪器的采样间隔,即采样率,采样率越大,采样间隔越低。目前地震监测设备仪器的采样率通常为 100Hz,其影响因素为秒级以下。采样率的增高对整个预警工程(赵国峰等,2022)的整体时延影响可以忽略(捕捉到信号的时间缩短与处理计算的提升,影响因素在 10ms 以内)。

尽管当前的地震监测设备仪器的采样率已经能够满足预警需求,为了实现现地预警,一般在仪器上设置阈值和警报,进行自动告警触发,实现本地告警目标。然而,单设备告警准确性受众多因素制约,如周边环境干扰、设备本身信号干扰等,存在误触发的风险。

2.2 数据传输时延影响

数据传输时延指监测设备获取数据后,到将数据传输至预警台网的处理中心的用时,包括数据封装时延(主要是数据包内数据的时间长度)、传导时延、通信滞留时延(包括交换时延和队列时延)和介质访问时延。

封装时延是指将监测数据封装成众多数据包,封装的数据包越小,数据延迟越小,实时性越高,数据传输效率(数据在 IP 包中所占的比率)就越低,但是数据所需带宽也越大。数据包中数据时间不能无限大(受 IP 包本身限制),其越大预警时延越多,因此必须权衡,例如,可以考虑 100ms、200ms 或 500ms。当前我国测震实时波形数据传输为流形式,数据格式为 512 字节长的 miniseed 格式,采用压缩算法一般一个包含 3~5s 数据。由于地震预警对实效性要求较高,综合考虑数据包打包延时、数据带宽以及数据处理模型等多因素,预警数据传输采用 256 字节打包,打包时长为 0.5~1s。

传导时延指数据在传输介质(通常是光缆)中传输所造成的时延,与传输距离成正比,但考虑到传输速度,与其他时延相比传导时延可以忽略不计。

通信滞留时延指数据在途经各站点时排队、等待调度的时延(如路由排队等待、路由路径不确定等),也可称为路径时延,受网络拥塞、路由策略等影响。可以通过设置固定路由、网络带宽冗余等措施确保预警数据传输畅通,避免拥塞,减少路由排队和等待时间,从而降低通信滞留时间。

介质访问时延指数据抵达目标网络后,受服务器处理并发能力的影响,由于资源等候造成进程处理等待延时。该时延的长短与目标主机的负载状况密切相关,为了降低这一时延,必须确保主机具备足够的承载能力,并通过优化主机上的应用程序以及提升系统性能来实现。

2.3 预警信息发布时延

预警信息发布时延,取决于发布方式和手段(侯建民等,2009)。目前,地震预警的发布手段有地震预警终端,即地震警报器;手机发布,包括手机操作系统嵌入地震警报程序模块、地震预警 APP、微信公众号和小程序等;广播电视发布,包括应急广播发布地震警报、电视插播地震警报等;农村、城市及学校采用大喇叭地震警报等。地震预警发布是地震预警工程整个环节的“最后一公里”,快速让公众收到地震警报,采取闻警即动的避险逃生行动。



例如,大喇叭地震警报的设置必须考虑声音的传播速度,保证一个村、一个社区所有的人同时听到警报。再如,依据发布系统承载能力来制定发布策略,若发布系统承载能力是 20 万次/s,则制定地震警报首先要发布到盲区以外 10s 到达的地区,再依次向远处发布等策略,确保不因为发布系统承载能力造成的时延而影响地震预警的效益。

3 地震预警发布用时案例分析

2024 年 1 月 23 日 2 时 9 分新疆阿克苏地区乌什县(78.57°E,41.30°N)发生 7.0 级地震,震源深度 5km。中国地震预警网于震后 13s 发布地震预警(首报),此次地震共发出地震预警信息 4 报,各报具体参数如表 1 所示。

表 1 地震预警信息

报次	产出时间(消息源) (年-月-日 T时:分:秒)	发布时间(发布系统) (年-月-日 T时:分:秒)	发震时间 (年-月-日 T时:分:秒)	震级	震中 烈度	震中位置
首报	2024-01-23 T02:09:17.200	2024-01-23 T02:09:17.339	2024-01-23 T02:09:04.000	5.8	7.6	78.60°E,41.27°N
第 2 报	2024-01-23 T02:09:19.700	2024-01-23 T02:09:19.774	2024-01-23 T02:09:04.600	6.2	8.2	78.64°E,41.19°N
第 3 报	2024-01-23 T02:09:26.700	2024-01-23 T02:09:26.772	2024-01-23 T02:09:04.600	6.6	8.8	78.58°E,41.29°N
第 4 报	2024-01-23 T02:09:30.300	2024-01-23 T02:09:30.393	2024-01-23 T02:09:04.400	7.0	9.4	78.57°E,41.30°N

本次地震共有1208 台预警终端收到预警信息,其中有 6 台预警终端达到最大响应烈度 7 度,分布于新疆维吾尔自治区克孜勒苏柯尔克孜自治州阿合奇县;15 台预警终端响应烈度为 6 度;25 台预警终端响应烈度为 5 度;67 台预警终端响应烈度为 4 度;350 台预警终端响应烈度为 3 度;495 台预警终端响应烈度为 2 度;250 台预警终端响应烈度为 1 度。

通过对地震预警信息终端接收用时分析统计,用时信息存在三类情况:一是用时过低,甚至负延时的情况,由于终端的时钟服务器与地震预警发布系统不一致,或者终端的时钟服务器失效,导致终端时间和发布系统时间存在钟差;二是用时在 0.1~2s 之间,平均用时为 0.6s 左右,预警终端运行正常,并有效进行地震预警报警;三是用时过高,在 10s 以上,可能的情况是终端网络环境较差,网络延时较高,导致接收预警信息接收用时较高。预警信息的发布与接收过程主要涉及两部分延时,一是紧急信息服务系统的发布时效,主要取决于服务系统的处理及并发性能;二是预警终端的接收时效,主要取决于预警终端物联网卡的网络延时及性能。

3.1 预警信息服务系统优化措施

预警信息服务系统的处理及并发性能,也就是地震预警发布系统的承载能力,需要指出的是,本文提供的数据仅仅是地震预警工程提供的预警终端,这些终端总数量不多,基本没有并发承载能力的问题,而实际中需要 1 万、10 万、100 万甚至 1000 万的并发承载能力实际测试数据。但是为提高发布时效,必须首先考虑以下措施:

(1)硬件升级,为紧急信息服务系统配置更高的硬件资源,以提升系统的处理能力和响



应速度。例如,对紧急信息服务系统所在的虚拟机分配更多的 CPU 核数、增加系统内存和存储空间等。

(2) 负载均衡,在高并发情况下,使用负载均衡技术将请求分发到多个 EMQX 消息中间件服务器上,从而提高发布系统的并发性能和可靠性,同时也有助于减少单个服务器的负载,提高整体响应及处理速度。

3.2 预警终端系统优化措施

预警终端系统的网络延时和系统稳定性是影响预警信息发布时效性的重要因素之一。为降低接收耗时,可以考虑以下措施:

(1) 优化网络覆盖,如果采用无线物联网传输,首先要考虑所在地区的网络覆盖情况,选择信号良好的位置使用。如果受安装环境影响,可以改为有线传输,或者可以尝试使用信号增强器或优化网络设备放置位置。

(2) 选择高质量的物联网服务提供商,不同的物联网服务提供商可能提供不同的网络质量和延时性能。选择具有良好口碑和高质量服务的提供商,有助于降低网络延时。

4 结论

本文讨论的时效性是从地震发生到地震警报发到各种用户终端报警器之间的用时。提升地震预警发布时效性,尽量减小地震预警的盲区,可真正发挥地震预警的减灾效益。

地震预警系统是高度复杂和多元的,不仅涵盖了地震学、通信技术、计算技术等多个技术领域,还与教育、社会等多个层面息息相关。因此,地震预警既是专业技术系统工程,也是复杂的社会工程,需要全面提升社会公众对地震预警体系的认知,包括普及地震预警采取“安全胜于遗憾”的服务策略、“闻警即动”的避险准则等一系列科学知识。此外,各级政府及单位应加强地震预警避险逃生应急的培训和演习,对于提升整个社会防灾减灾能力至关重要。

随着大数据、AI 等新技术的发展,地震预警技术需要不断创新和迭代更新,从而为公众提供更快和更精确的地震预警信息。未来在对地震预警系统进行优化升级时,建议考虑以下四方面:①继续优化观测系统站网布局,开发和制造新型传感器,提高台站监测数据的准确率和效率;②加强云技术和智能自组网技术研究,结合 AI 技术创建新型地震预警处理模型,提升地震预警服务的时效性和准确性;③加强地震预警产品和预警服务渠道的拓展,推进预警信息与智能产品的融合发展,为用户提供多样化的预警信息服务;④加强地震科普宣传,强化公众对地震预警认识,提升社会公众对地震预警科学认知,建立预警信息“闻警即动”的避险意识。

参考文献

- 陈会忠,侯燕燕,何加勇,等. 2011. 2011 年 3 月 11 日本地震预警系统评述. 见:中国地球物理学会第二十七届年会论文集. 合肥:中国科学技术大学出版社.
- 陈颢,陈运泰,张国民,等. 2005. “十一·五”期间中国重大地震灾害预测预警和防治对策. 灾害学,20(1):1~14.
- 何凯,杜瑞林,魏贵春,等. 2016. 地震预警信息发布时效分析. 大地测量与地球动力学,36(11):1031~1034.
- 侯建民,黄志斌,代光辉,等. 2009. 国家台网地震速报综合信息发布系统研究. 中国地震,25(4):445~454.
- 金星,马强. 2023. 从研究到应用:我国地震预警技术的发展. 防灾博览,(1):10~17.

- 李山有,金星,马强,等. 2004. 地震预警系统与智能应急控制系统研究. 世界地震工程, **20**(4):21~26.
- 马强,金星,李山有,等. 2013. 用于地震预警的 P 波震相到时自动拾取. 地球物理学报, **56**(7):2313~2321.
- 马强,李山有,金星,等. 2023. 地震预警是如何实现的. 防灾博览, (1):4~9.
- 申源,郭凯,梁厚朗,等. 2024. 国家紧急地震信息服务系统的设计、开发及实践. 中国地震, **40**(1):1~23.
- 吴逸民. 2004. 地震预警之研究及现状. 见:台湾活动断层与地震灾害研讨会. 162~172.
- 吴忠良,蒋长胜. 2007. 预警的概念及相关物理问题. 物理, **36**(6):472~475.
- 夏玉胜,杨丽萍. 2000. 地震预警(报)系统及减灾效益研究. 西北地震学报, **22**(4):452~457.
- 袁志祥,单修政,徐世芳,等. 2007. 地震预警技术综述. 自然灾害学报, **16**(6):216~223.
- 张晁军,陈会忠,蔡晋安,等. 2014. 地震预警工程的若干问题探讨. 工程研究-跨学科视野中的工程, **6**(4):344~370.
- 张建勇,席楠,徐泰然,等. 2024. 国家中心地震烈度速报与预警技术平台. 中国地震, **40**(1):54~68.
- 张延年,刘丽,刘明,等. 2009. 基于地震预警的台阵布局优化. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), **25**(1):1~5.
- 赵国峰,高楠,杨大克. 2022. 国家地震烈度速报与预警工程建设进展. 地震地磁观测与研究, **43**(3):165~171.
- 赵国峰,李卫东,李丽,等. 2023. 基于国产密码的地震预警服务系统防篡改框架设计与应用. 地震工程学报, **45**(1):145~152.
- 赵纪东,张志强. 2009. 地震预警系统的发展、应用及启示. 地质通报, **28**(4):456~462.
- 周彦文,刘希强,胡旭辉,等. 2008. 早期地震预警方法研究现状及展望. 国际地震动态, **29**(4):28~34.
- Gasparini P, Manfredi G, Zschau J. 2007. Earthquake Early Warning Systems. Berlin Heidelberg:Springer.

Timeliness Analysis of Earthquake Early Warning Information Services

Jiang Hongyi^{1,2)}, Li Li³⁾, Din Jing⁴⁾, Bao Wenchao⁵⁾, Zhai Ying³⁾, Ma Xiudan³⁾

1) Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, China

2) Hebei Hongshan National Observatory on Thick Sediments and Seismic Hazards, Xingtai 055350, Hebei, China

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

4) Tianjin Earthquake Agency, Tianjin 300201, China

5) Inner Mongolia Autonomous Region Earthquake Agency, Hohhot 010010, China

Abstract Following a destructive earthquake, timely and effective early warning is essential for reducing casualties and mitigating damage. In this study, warning timeliness is defined as the time interval between the onset of the earthquake—or the arrival of the first seismic wave—and the issuance of the initial alert by the earthquake early warning (EEW) system. As a critical metric for evaluating EEW system performance, timeliness directly affects the size of the warning blind zone and the time available for evacuation within the warning region. Thus, minimizing alert latency and optimizing delay control are central technical challenges in EEW systems. This paper investigates the fundamental principles and system architecture of EEW, with particular emphasis on the key factors influencing warning timeliness. Based on this analysis, it proposes strategies and core methodologies for controlling and improving timeliness. Furthermore, practical recommendations and measures are presented to ensure the efficiency and reliability of EEW systems, thereby enhancing their overall effectiveness in disaster risk reduction.

Keywords: Timeliness; Earthquake early warning information services; Early warning time; Earthquake early warning terminal