

预警的概念及相关物理问题*

吴忠良^{1,2,†} 蒋长胜²

(1 中国科学院研究生院地球科学学院 北京 100049)

(2 中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

摘要 预警是现代社会减轻自然灾害的工作中最重要的物理概念之一,也是在预测/预报的物理问题没有得到解决的情况下最具实际意义的技术之一. 文章介绍了与预警有关的概念和物理问题,包括预报和预警的概念,现地预警和异地预警,讨论了不同领域的预警技术中共同的物理问题,包括“有限传播”原理、“连锁效应”原理、“相似放大”原理,以及实际工作对预警系统的主要技术要求.

关键词 自然灾害, 预警系统, 地震预警

Early warning : concepts , techniques , and physics

WU Zhong-Liang^{1,2,†} JIANG Chang-Sheng²

(1 College of Earth Science , Graduate University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China)

(2 Institute of Geophysics , China Earthquake Administration , Beijing 100081 , China)

Abstract Early warning is one of the most important physical concepts in the reduction of natural disasters for modern society. Prediction/forecast face intrinsic difficulties in physics ,so early warning plays a most critical role in practical applications for sustainability. We review the basic concepts and physics of early warning ,including the difference between prediction/forecast and early warning ,front detection early warning and on-site early warning ,and the common physical problems of early warning systems in different fields-finite propagation , the ripple effect , and scaling , as well as the main technical requirements of practical early warning systems.

Keywords natural disasters , early warning system , earthquake early warning

1 预测/预报与预警

并不是所有的人对预测/预报(prediction/forecast)和预警(early warning)都有一个清晰的认识. 一个普遍流传的说法是患有关节炎的人往往比气象学家更能准确地“预报”天气的变化. 这个说法混淆了预测/预报和预警这两个本质上不同的概念. 前者是对还没有发生的事情做出描述, 后者是对业已开始、并且正在发生的事情做出描述. 在患有关节炎的人感到不适、并且觉得“好像要下雨”的时候, 与下雨有关的天气过程实际上已经开始, 空气中的气压和湿度都发生了变化. 最后下雨的过程, 不过是整个

变化过程中的一幕——当然是最重要的一幕. 这个已经开始发生的过程, 对于任何人来说都是可以感知的, 患有关节炎的人就更敏感一些. 可是, 如果试图对一个月以后是否会下雨做出预测/预报, 那就是非常困难的事情了. 事实上, 现在非线性动力学的研究表明, 这种预测/预报至少在一些情况下甚至是无法做到的.

如果所讨论的问题是战争, 那么预测/预报就是对对方什么时候将会发动多大规模的进攻的一种描述, 而预警则是在对方的进攻打响之后, 对“进攻已

* 国家重点基础研究发展计划(批准号 2004CB418406)资助项目
2007-01-12 收到

† 通讯联系人. Email: wuzhl@gucas.ac.cn

经开始”的一种描述.但这并不等于说预警是很容易的事情,因为此时此刻你只知道对方“已经开始了进攻”,但你并不知道对方在这次进攻中最终会投入多少兵力,以及将以怎样的部署进行攻击.预警的目的,正是要通过对对方的兵力部署的有效判断,采取有针对性的措施.换句话说,从实际应用的角度,导致有效的应对措施,是一条信息能够称为真正意义上的“预警信息”的一个必要条件.

预警可以分成两类^[1]:一类是以“威胁”为目标的预警,称为异地预警(front detection early warning),它专门监测“威胁”的出现,一旦“威胁”出现,就马上采取措施;另一类是以保护对象为目标的预警,称为现地预警(on-site early warning),它是在保护对象周围画一个“圈”,一旦在这个“圈”上检测到“风吹草动”,就立即采取措施.第一类预警相当于把岗哨设在敌人的据点周围,一旦敌人出动,就发出警报;第二类预警相当于把岗哨设在自己的阵地周围,一旦发现敌人,就采取行动.显然,这两类预警有各自的优点和不足:第一类预警由于有一定的空间距离,在操作上可以等测到比较可靠的信号之后再发布预警信息,因而更为可靠;但是,这类预警需要大致知道威胁可能会发生在什么地方,这并不总是容易做到的.第二类预警可以对直接威胁保护对象的事件(包括地点不可预测的事件),进行最高效率的预警,但是,这类“兵临城下”的预警,其时间要求很高,因而其科技含量要求也很高.

2 预警问题举例

预测/预报的基础是物理,预警的基础也是物理.由于任何物理过程都是以有限速度传播的,所以动态的监测常常成为预警的基础.洪水的预报一般很难.但是洪水一旦形成,沿着特定的流域,洪峰下一步将到什么地方,还是可以进行动态追踪和预警的.不过,洪峰究竟多强,还有着很大的不确定性,还要考虑天气、地势等很多因素.台风传播路径的预报通常很难.但是通过对台风的动态追踪,人们还是可以知道台风在下一步袭击的地方可能是在哪里,从而进行必要的准备.当然,台风在那里将逗留多久,能引起多强的降水,还有着很大的不确定性.人们大体上知道泥石流会在哪些地方、在什么时段发生,但泥石流到底在哪个时刻发生,怎样发生,也是难于进行预测/预报的.然而另一方面,对泥石流的传播可以进行动态监测.根据这种监测,对已经发生的泥石

流在下一步将要袭击的地方发出预警也是可能的,尽管这种预警信息也同样有着比较大的不确定性.对小行星撞击地球,目前预测预报的能力还有限.一个解决方案是,对地球周边的小行星进行动态监测,如果有哪个小行星进入与地球“亲密接触”的危险区,就立即发出预警,采取措施.在一些特殊的情况下,人们大致上已经知道哪个地方的地震对城市或重大工程威胁最大,从而可以在这些地震的周围布设监测系统,一旦地震发生,就立即发出预警信息.表面上看,这类地震的“异地预警”与前面的几种预警很不相同.但实际上,这类地震预警同样是利用了有限传播效应——地震波的传播速度有限,或者说,地震波传播的速度远远低于无线电波的传播速度.1995年,在墨西哥格雷罗地区7.3级地震中,墨西哥市地震预警系统SAS(seismic alarm system)在地震波到达墨西哥市前72s发出了地震警报,广播电台、小学、住宅区等及时采取了有效的应对措施,特别是地铁系统在地震波到达之前50s停止了运行.此次地震未造成人员死亡,只有少数人员受伤,是地震预警系统的一个成功的应用实例^[2].

一些海啸是海底发生的地震造成的,称为地震海啸^[3].海啸横跨大洋传播的速度,与一架波音飞机的飞行速度相当.因此,如果能检测到海啸,人们还是有可能像战争时期看到敌方的轰炸机群起飞之后立即发出防空警报一样,做出海啸的预警.而如果能迅速地检测到引起海啸的地震的发生,则地震海啸的预警还可以争取到更多的时间.海啸的预警分为两类:如果在日本,如果智利发生特大地震,那么海啸预警有若干小时的时间可以利用;但如果发生地震的位置是日本海沟,那么对近海沿岸的海啸预警的时间就短得多.火灾的发生一般没人能做出预报.但一旦火灾发生,还是可以根据火势,对火灾现场周边的地区采取措施,特别是对火灾可能会引起“连锁反应”的地方,比如,有可能引起有毒气体泄露的地方,有可能引起爆炸的地方,采取必要的措施.火灾的动力学与地震海啸的动力学很不相同,但在这一点上,它们的预警有着相通的道理:知道前一个过程发生了之后,可以对后面的“连锁效应”(ripple effect)进行预警.

地震的“现地预警”也许是预警问题中最为特殊、也最具挑战性的例子^[4].人们早就知道地震所激发的纵波(振动方向与传播方向一致的波)比横波(振动方向与传播方向垂直的波)早一些到达,并且纵波的振幅比横波的小.这个现象可以用来进行

地震的预警.但定量地说,人们可以利用的这一“时间差”短到近乎残酷的地步.近似地,对发生在地壳里的浅源地震,这种时间差可以通过与地震之间的水平距离除以 8km/s 的“视速度”来估计.如果与地震的水平距离是 100km ,例如唐山地震的时候你在天津,那么这个时间只有十几秒.充分地利用这宝贵的“时间差”来对诸如高速铁路之类的设施采取应急措施,还是可以尽可能地减轻地震造成的损失.但实际上这给人们留下的预警时间毕竟还嫌太短.因此目前地球物理学家探讨的一个问题是,能不能从这宝贵的时间里再“争取”几秒,即,不用等到纵波的最大振幅,而是从最初几秒到达的信号中,就能判断出地震到底有多大,或者用“阈值预警”的语言说,判断出地震至少有多大.现在发展的方法,可望利用最初 3s 接收到的地震信号来判断地震至少有多大,这对于地震的应急响应是必不可少的信息.

看上去,不同的预警问题的差别在于预警过程的特征时间不同.但值得指出的是,预警系统中特征时间的“长”与“短”,是个相对概念,它的参照系是可能采取的应急措施所用的特征时间.比如,对洪峰的预警时间可以做到一天或者几天,可是,相对于防范洪水所必需的工程措施,无论是组织加固还是组织撤离,几天的时间都还是很短的.

3 预警的物理问题

预警的技术,从原理上说就是要充分地利用三个物理原理:“有限传播”原理、“连锁效应”原理、“相似放大”原理.前两个属于已有物理知识的应用,第三个目前还属于物理研究的前沿领域.

3.1 “有限传播”原理

任何物理过程,其传播的速度都是有限的.充分地利用有限的传播时间来进行预警,是一个实际可行的措施.台风的预警、洪水的预警、泥石流的预警、小行星撞击的预警、地震的异地预警,都属于这种情况.不同的预警技术中一个共同的问题,是这些传播过程的物理.了解了这些过程的物理,比如火的物理、云的物理、台风的物理、洪水的物理、泥石流的物理、小行星运行的物理、地震波传播的物理,就能有效地利用有限传播效应和这种效应所带来的宝贵的时间差,采取必要的措施.而对这些过程的物理解得越多,在采取措施的时候就越主动.

3.2 “连锁效应”(ripple effect)原理

一个物理过程往往可以通过“连锁反应”的方式引发另外一个物理过程.地震海啸的预警、火灾中化学气体的泄露和爆炸的预警等,实际上就利用了这个道理.在实际应用中,通常不是单纯地利用这种“连锁”效应,而是把这种“连锁”效应和前面所说的有限传播效应结合起来,以获得更长的预警时间.

3.3 “相似放大”(scaling)原理

如何在事件刚刚发生时就能有效地判断它究竟能“发展到什么程度”,这是一个带有一定的普遍性并且还没有很好地解决的物理问题.这个问题相当于说在战斗开始时,如何在尽可能短的时间内从对方的火力和进攻态势上对对方的部署和战斗力做出正确的判断.一个关键问题是,到底最少需要了解多长时间的“局部”,才能正确地描述出一个过程的“整体”,或者说“局部”和“整体”之间具有怎样的“相似性”和“尺度效应”.一般说来,所用时间越长,得到整体概念的准确性就越大.但另一方面,时间越长,对预警的实际意义就越低.这就好像你在一个漆黑的丛林中突然触摸到一个湿润冰凉的东西,你必须在最短的时间里判断你所碰到的家伙有多大.你也许会认为只有从头摸到尾,才能知道它到底有多大,可问题是等你从头摸到尾的时候,你的麻烦就大了.在这方面,地震学家的做法可能是有启发性的,他们试图用最初 3s 的信号来判断一次持续时间可达十几秒的地震的大小的“底线”^[5].那么,怎样从最初的信号来判断地震的整体性质呢?原理是,不同大小的地震所辐射出的地震波,其频谱成分是不同的,如同不同大小的恒星所辐射出的光的频谱是不同的.利用这个性质,最短的可供分析的信号长度,就是能够得到可信的“平均频率”或“平均周期”的信号的长度.不过,地震破裂的过程没有最后结束之前,谁也说不清它到底会有多大,所以由此而给出的信息是“阈值”性质的:地震“至少”有多大.但即使是这种很“粗”的信息,也已经足够用来采取实际措施.日常生活中,这个道理实际上也不难理解:丛林中的“大家伙”肯定不会是“细皮嫩肉”的,因此你和它“第一次接触”的时候,那“皮糙肉厚”的感觉本身就应该是你立即逃跑的预警信号,至于它究竟是 1 吨重还是 10 吨重,倒不是很重要的事情.

4 预警的物理问题之外

预警,从本质上说不是抽象的理论概念.预警只

有变成实用技术,才能真正发挥作用.预警问题在技术上的复杂性,一点都不比它的物理问题差.而从一定意义上说,对物理了解得越透,在技术上的机动性和主动性也就越大.

从技术上看,对所防范的自然现象进行动态监测,是进行有效的预警的一个关键问题和必要条件.在动态监测的过程中,一定要进行观测数据的“实时”(real-time)传输和“实时”处理.其中一个重要的技术问题,就是如何有效地区分信号和干扰.

另一个问题是,如何在最短的时间里提取出对预警最有实际价值的信息.这里面,如何给出信息,给出什么样的信息,还是很有“学问”的.“足够”和“有效”恐怕是进行预警系统的技术设计中应该首先考虑的原则.假如在北京附近发生了一次地震,大家都感受到了它的震动.人和设备需要的信息,是这次地震的精确的定位和精确的震级吗?恐怕不是.这时候人们急于知道地震是近还是远,但具体是100km北还是150km北,北东倒不是特别重要;人们急于知道地震是大还是小,具体是6.2级还是6.5级倒在其次.

一个预警系统既要避免漏报(failure),又要避免虚报(false alarm).但实际上,理想的预警系统是没有的.如何根据保护对象的性质,在保证安全和避免虚报带来的负面影响之间寻求一种“平衡”,这也是一个并不简单的技术问题.

还有一个非常实际的问题,听起来有点像“杞人忧天”,就是,与特大自然灾害(所谓 extreme events)有关的预警系统在实际操作中应该如何维护、如何“训练”(learning)、如何标定(calibration).因为一个规律是,越大的自然灾害,发生率就越低.根据“墨菲定律”,如果什么事情有可能往坏的方向发展,它就一定会往最坏的方向发展.预警系统最令人担心的问题就是,面向特大“事件”的预警系统,对中小事件看来还算“管用”,可是特大事件“来了”的时候,它反而“失效”了.

5 结束语和讨论

我们概述了预警技术及其相关的物理问题.我们看到在预测/预报的科学问题还没有得到解决的情况下,预警技术在实际应用方面发挥着重要作用.我们常说的“时间就是生命”,在一定意义上可以作

为不同领域的预警技术的一个共同目标,而这个“时间”,确切地说,“时间差”,是靠科技“抢出来”的.例如,1994年美国加州北岭6.7级地震和1995年日本兵库县南部7.2级地震中,当地的燃气和煤气地震紧急自动处置系统(这是专门针对重大基础设施和生命线工程,可在综合决策后自动或人工启动应急控制装置的地震预警系统),由于自动关闭装置运行良好,没有发生因可燃气体泄漏而引发的次生灾害,均取得了显著的减灾实效^[6].日本正在使用的紧急地震检测和预警系统 UrEDAS(urgent earthquake detection and alarm system),使得新干线列车在多次地震中安然无恙,即使是2004年新潟地震时,距震中太近而脱轨的列车也由于启动了紧急制动装置,列车减速及时,避免了列车倾覆和人员伤亡^[7].

随着科技和社会的发展,人们对不同类型的突发性自然过程的了解越来越多,预测预报问题作为一个科学难题久攻不下,信息技术的发展日新月异,人类对减轻灾害的要求与日俱增.所有这一切都使得预警技术成为目前发展很快的一个研究领域,并且涉及不同的学科领域.重要的是,在不同的学科领域中有些物理问题实际上是相通的,并且,也很可能从这些实际问题中抽象出有意义的、带有普遍性的物理问题——所谓“巴斯德象限”^[8],实际上就是这么回事.

参考文献

- [1] Kanamori H, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 2005, 33: 195
- [2] Espinosa-Aranda J, Jiménez A, Ibarrola G *et al.* Seism. Res. Lett., 1995, 66: 42
- [3] Satake K. Tsunami. In: Lee W H K, Kanamori H, Jennings P C *et al.* (eds), International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. San Diego: Academic Press, 2002, 437
- [4] Wu Y M, Kanamori H. Bull. Seism. Soc. Amer., 2005, 95: 347
- [5] Wu Y M, Kanamori H. Bull. Seism. Soc. Amer., 2005, 95: 1181
- [6] 郭恩栋, 李山有, 赵振东等. 世界地震工程, 2005, 21(2): 44
[Guo E D, Li S Y, Zhao Z D *et al.* World Information on Earthquake Engineering, 2005, 21(2): 44 (in Chinese)]
- [7] 刘如山, 林均歧, 郭恩栋. 自然灾害学报, 2005, 14: 140 [Liu R S, Lin J Q, Guo E D. Journal of Natural Disasters, 2005, 14: 140 (in Chinese)]
- [8] Stokes D E. Pasteur's Quadrant: Basic Science and Technological Innovation. Washington, D. C.: Brookings Institution Press, 1997, 75