

从弹簧滑块到地震预测 :BK 模型今昔谈*

吴忠良^{1,2,†} 陈运泰²

(1 中国科学院研究生院 北京 100039)

(2 中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

摘要 Burridge - Knopoff 弹簧 - 滑块模型作为一个概念性的地震模型,自 1967 年提出以来一直为地震学家和物理学家所关注,对 BK 模型的研究成为物理学与地震学之间的一个活跃的交叉领域. BK 模型的一些性质,例如确定性混沌、自组织、孤立波,等等,能够为理解地震的性质和解决地震预测问题提供有用的线索. BK 模型与目前的一些悬而未决的复杂性物理问题的联系,使它不仅对地震研究,而且对更普遍的多体系统问题的研究,都有重要的影响.

关键词 BK 模型,地震,地震预测,统计物理,复杂现象

FROM SPRING-AND-BLOCK TO EARTHQUAKE PREDICTION :AN INTRODUCTION TO THE BURRIDGE-KNOPOFF MODEL FOR THE PHYSICS OF EARTHQUAKES

WU Zhong-Liang^{1,2,†} CHEN Yun-Tai²

(1 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, 100039 Beijing, China)

(2 Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, 100081 Beijing, China)

Abstract The Burridge-Knopoff (BK) spring-block model as a conceptual model for the physics of earthquakes has attracted much attention among physicists and seismologists since 1967, becoming an active research subject in the interdisciplinary approach to the physics of earthquakes. Certain characteristics of the BK model, such as deterministic chaos, self-organization, and solitary waves, among others, provide heuristic clues to the understanding of the nature of earthquakes and shed light on the problem of earthquake prediction. Due to its connection with several outstanding problems in the physics of complexity, the BK model has had significant impact not only on seismology but also on the physics of multi-body systems.

Key words BK model, earthquake, earthquake prediction, statistical physics, complexity

新千年伊始,适逢克依利斯 - 博罗克(В. И. Кейлис - Ёроок)院士 80 寿辰.为祝贺这位曾经对地球物理(尤其是计算地球物理)做出过诸多贡献的俄罗斯科学家的寿辰,《计算地球物理》系列丛书编辑一本纪念专号,特邀一些著名科学家撰稿.

作为克依利斯 - 博罗克的老朋友,美国洛杉矶加州大学地球与行星物理研究所(IGPP, UCLA)的诺波夫(L. Knopoff)教授也接到了邀请.出人意料的是,即使在这时,诺波夫也没忘“幽”老朋友——“默”.他提交的论文不但不涉及数学计算,而且题目偏偏是:“Rayleigh waves without cubic equations”(“谈瑞利波而不用三次方程”).

瑞利面波的性质研究,是数学在地球学中的成功应用的一个经典范例.不用数学方程来阐述瑞

利面波的性质,是一项很难完成的工作,除非对问题的物理本质有深刻的理解.看来,诺波夫的观点与一些物理学家(例如狄拉克和费曼)是相通的:只有不用数学或者用不太多的数学就能说清楚一个物理问题,才能说对这个问题有了真正的理解.问题是,这样的说法有是有的,能这样做的人却很少.

所以,从一开始我们就多少有些担心:不用数学,能说清楚著名的伯里奇(Burridge) - 诺波夫模型的故事吗?

* 国家重点基础研究发展规划项目(批准号:G1998040705);国家自然科学基金(批准号: NSF049725410)资助项目

2002 - 03 - 01 收到初稿, 2002 - 05 - 13 修回

† 通讯联系人, E-mail: wuzl@cdsn.org.cn

1 一个极为简单的地震模型

表面上看,这个任务似乎并不难.伯里奇-诺波夫模型(BK模型)是一个由弹簧和滑块组成的一维链(图1).滑块通过耦合弹簧互相连接,每一个滑块都通过加载弹簧与一个缓慢地运动着的板块连在一起.滑块与桌面之间存在摩擦.如果作用在一个滑块上的力达到最大静摩擦力,滑块就开始运动,直到动摩擦力的作用使它的运动停止.

如果把滑块的运动看成是地震,那么这一模型就相当于地震学中的“弹性回跳”模型的一种高度简化的量化——在“弹性回跳”模型中,地球的构造运动在地震断层上积累了应力(这里,地震断层既是应力相对集中的区域,又是较其周围的地球介质相对来说比较薄弱的区域),当积累起来的应力达到断层所能承受的最大应力时,就发生了地震.

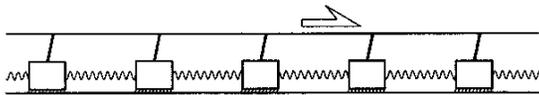


图1 弹簧-滑块模型

其实,无须写出数学公式就会看出,如果只考虑耦合弹簧,便可得到一维情况下以差分形式表示的弹性动力学方程,由滑块质量和弹簧的弹性系数,可以给出弹性波的传播速度.

但是这一模型中却有很多我们至今还不能完全理解的复杂性.事实上,作为一类简单的、概念性的地震模型,伯里奇-诺波夫模型在地震的物理学中的意义,多少有些类似于伊辛(Ising)模型或逾渗模型在临界现象的物理学中的意义.

BK模型是1967年提出的^[1].在BK模型刚刚提出的时候,计算机的应用还处于初级阶段,因此对这个模型的性质和意义还没有条件进行深入细致的研究.20世纪80年代,计算机在物理学和地震学中日益广泛的应用,以及物理学中对于分形、确定性系统中的混沌(deterministic chaos)、孤立子、临界现象、自组织临界性等问题的研究,使人们重新认识到BK模型的价值.因此在沉寂了20年之后,BK模型重新于20世纪80年代末引起物理学家和地震学家的关注.从20世纪80年代至今,在《物理评论》(Phys. Rev.)和《物理评论通讯》(Phys. Rev. Lett.)等主要的物理学刊物中发表的关于BK模型及其“变种”的文章不下几十篇,例如文献[2]—[9],在地球物理类

书刊中发表的结果更是不胜枚举.一些物理学家相信,对BK模型中的复杂性的研究,可能有助于我们理解地震和地震预测问题的复杂性^[10].更多的人则越来越感觉到,这一模型的意义可能并不限于地震.

2 简单模型中的复杂性

在工程问题和凝聚态物理问题的研究中,也有很多由弹簧元件和质量块体组成的模型. BK模型在相当程度上也借鉴了这些模型,或者至少与这些模型不无相似之处.但是作为一个地震模型的BK模型的特点之一,是引入了相当于地震的不稳定滑动的机制,在这一机制中扮演主要角色的是滑块与桌面之间的“摩擦”.不过,从能量消耗的角度说,在这个“摩擦”里,既包括克服把地震断层两侧的介质耦合在一起的力所做的功而造成的热消耗,即经典意义上的摩擦,也包括形成新的破裂面所需要消耗的能量(这是一种连续介质效应,在离散的差分模型中,只好把这一项也“交代”给“摩擦”),还包括由于地震波的辐射所损失的能量(在一维模型中,由于没有向系统之外“辐射”弹性波能量的渠道,这一效应也只能计入“摩擦”函数).这样写出的摩擦函数,通常是滑块运动的速度或者滑块的滑动位移的函数.静摩擦和动摩擦之间的切换则通常是突变式的,一旦作用在滑块上的外力达到最大静摩擦力,滑块就开始运动,静摩擦随之变成动摩擦.静摩擦和动摩擦之差,地震学中称为“动态应力降”,它是一个重要的地震参数.摩擦项的非线性导致了BK模型的很多复杂的行为.

稍微仔细地看一看BK模型,就会发现它所涉及的物理内容并不像一般所想象的那样简单.实际上,BK模型是与现代物理学中的一大类悬而未决的基本问题联系在一起.如果把每一个滑块的动力学方程都写出来,就得到了一个描述整个系统的动力学行为的常微分方程组,其中摩擦项是非线性的.即使仅考虑两个滑块,这一系统中的确定性混沌就有很多值得深究的地方^[11],而在研究地震时,通常需要考虑成千上万个滑块才行.事实上,目前,更多的研究者将与BK模型有关的问题视为一个“软凝聚态”物理问题.这里所说的“软凝聚态”,是指物质中的各个基本单元之间的相互作用都是经典的,没有量子效应.这样的系统作为一个整体,具有很多目前仍未充分掌握和充分理解的复杂行为.

在这里,地震问题与纳米物理中的一类理论问

题非常相似.在 BK 模型中,如果只需要考虑几个滑块(比如 3 个滑块),那么用通常的处理动力系统的数学工具就可以解决很多问题(尽管也比较复杂).如果需要考虑的是非常多的(比如 10^{23} 个)滑块,那么统计物理就可以发挥作用,此时系统的统计涨落可以很小.可是现在看来,在地震研究中,这两个优势都无法利用,地震学家要求我们考虑由“不多不少”的滑块所组成的系统(比如考虑 10^5 个滑块)这样的系统,才更能反映地震的“真实”情况.可是这样的系统中的很多性质,迄今尚不清楚.

也许,连续介质力学方程的离散化带来了不必要的困难.那么回到连续介质行不行?答案是,也不行.因为在那里,我们碰到了一个现在还没有解决得很好的数学问题——运动边界的偏微分方程.

所以,BK 模型虽然简单,它所包含的物理内容却是“麻雀虽小,五脏俱全”的.人们经常问起的一个问题是,作为现代地球物理学的一个分支学科的地震学,已经有百余年的历史,为什么经过这样长时间的发展之后,地震预测仍是一个没有得到解决的问题?考虑一下 BK 模型的复杂性,地震预测问题的难度便可窥见一斑了.

3 不仅仅是一个“玩具”

BK 模型的魅力在于,它不仅在理论上有着丰富的物理内容,而且更重要的是,它可以对地震学中的很多重要的观测现象的解释提供有用的线索,这些现象被认为是解决“地震是否能够预测”的科学问题的钥匙.

但是这种想法只是 20 世纪 90 年代以后的想法.BK 模型提出之后,大约有 20 年左右的时间并没有引起地震学家广泛的重视.原因之一是,这个模型似乎过于简单,许多人不认为这类理论“玩具”在地震学中会有多少实际应用价值.只是到了 20 世纪 80 年代末,统计物理中的一些思维方式,开始影响地震的物理学研究,人们的观念才开始发生变化,意识到这类简单的模型的一些性质,可能是具有普遍性的,把这些带有普遍性的性质研究清楚,对于研究更“真实”的系统非常有用.

想一想 BK 模型与地震现象之间的联系,就会注意到在这个模型中有两个主要的时间尺度,或者说有两个主要的物理过程.一个是“慢过程”,就是一个地震断层上的构造应力通过板块运动的加载和周围地震的发生不断地积累起来的过程;另一个是

“快过程”,就是在一定的条件下,一个地震的滑动从起始到传播再到停止的过程.在地震学中,前者是地震孕育的过程,后者是地震发生的过程.BK 模型的一个深刻之处在于,它指出了这两个过程在物理上是联系在一起的,并且给出了这种联系的也许是不能再简单的描述.

下面我们分别就“慢时间”和“快时间”这两个时间尺度,给出目前在地震学中使用 BK 模型较多的讨论实际地震学问题的例子.一个是地震的能量-频度关系,另一个是地震破裂过程中的“自愈合脉冲”现象.

3.1 地震的能量-频度关系

地震学家很早就注意到,地震的能量和地震的频度之间,在一定的能量范围内,在双对数坐标图上,呈现出一个简单的斜率为负的线性关系,这一关系在地震学中称为古登堡(Gutenberg)-里克特(Richter)关系^[10,11].顺便说一句,我们通常使用的“里氏震级”就是里克特提出的.理论上,震级与能量之间存在对数关系:震级增加 1 级,能量增加约 30 倍.实际上,大地震少,小地震多,这件事情并不出人意料,但是在地震大小和地震频度之间存在这样一个简单的对数线性反比关系,却不能不引起人们的思考,而且需要从物理上回答的问题是,为什么双对数图上的斜率不是 1000,不是 0.001, ..., 而“恰好”是 $2/3$.

GR 关系是 20 世纪 40 年代提出的^[12],在其后很长的时间里,地震学家并不十分理解这一定律的物理意义.20 世纪 70 年代以来,越来越多的对于尺度不变性(标度律)的研究,使人们对这类关系更加关注.有趣的是,BK 模型也可以在一定的能量范围内“产生”类似于 GR 关系的能量-频度分布,它的斜率(即“标度常数”)可以与观测结果进行比较,BK 模型甚至还能很好地描述在一些情况下对 GR 关系的偏离.但是,目前争论较多的一个问题是,这种“类 GR 关系”究竟是系统内在的性质,还是由外在的几何条件(主要是静摩擦强度的分布)所决定的.这个问题所涉及的一个理论问题是,地震活动能否被描述成一种自组织临界现象^[13,14].从计算物理的角度讲,这一问题所涉及的一个不完全是技术性的问题是,由有限的计算步骤和计算时间得到的 BK 模型的行为,究竟是它“真正的”长期行为,还是仅仅是一种暂态^[5,7].关于这些问题,目前还在讨论之中.但现在看来,至少有一点可以讲的是,最初的自组织临界性(SOC)地震模型,在这方面的考虑显然是欠周

到的。

这类看上去像是数学游戏的问题,事实上在地质学中是非常有实际意义的。我们知道,对于现代的人类文明来说,地震属于一种小样本事件。人类所拥有的地震的样本数实在太小。以中国为例,从有比较完整的地震记载的明朝算起,至今只有几百年的地震记录。7级以上的地震的数目,也只有百十个。这种样本的匮乏,使得像天气预报那样的经验性的、或者统计性的地震预测成为几乎不可能。BK模型以及其他类似的模型的应用提供了一种可能,使人们可以在计算机上“产生”数万年时间尺度的地震活动,再把对这种“计算合成”的地震活动的预测的经验应用到实际地震预测研究中。

那么,怎样才能说由一个模型所“产生”的“地震活动”更“像是”“真实的地震活动呢?能不能“产生”出同天然地震类似的统计性质,是比较自然的,也是用得比较多的判断标准之一。比如,如果所用的模型能够“产生”出GR关系,那么模型或许是对的;如果它“产生”不出GR关系,那么它肯定就是错的。

物理学家需要回答的一个问题是,BK模型到底是“对的”还是“错的”?有趣的是,现在这个问题还没有标准答案。BK模型中的一个我们现在还不能理解的性质是,在BK模型的“长期演化”中,存在着所谓“模式切换”(mode switching)的现象。有时,BK模型可以“产生”很好的GR关系,但有时BK模型又出现新的状态,只“产生”周期性的“大地震”。这两个“态”之间如何转换,在什么条件下转换,到现在还不清楚。我们不知道物理学家是如何描述这样一种“相变”的过程的。可是在天然地震中,的确可以在不同的地区和不同的时间,看到地震活动的这两类典型的特征。

3.2 自愈合脉冲

数值模拟的一个作用,是可以在很短的计算时间内,重现非常长的时间尺度上的物理过程。它的另一个作用,则是可以把非常短的时间过程放大,使人们能够更仔细地观察和研究在这样短的时间内究竟发生了什么。

但是这样的模拟必须有实际观测作为基础。在地质学中,这样的条件是20世纪70年代才开始具备的。20世纪70年代以来宽频带数字地震学的发展使地震学家可以对一次地震的破裂过程做出比较详细的描述。宽频带地震学的出现,其重要性与X射线天文学类似:由于观测频段从可见光扩展到了X射线,人们“看到”了类星体;类似地,由于可以在

一个比较宽的频带内观测地震现象,人们“看到”了很多原来未曾“看到”、或者“看”不清楚的地震现象。

一类有趣的观测现象是地震破裂的过程。现在,地震学家可以用“快照”的方式,重现比较大的地震的发生过程。一个重要的观测事实是,与“经典”的震源理论的预测不同,地震破裂“正在发生”的区域,仅仅是整个地震断层面上比较小的一部分,看上去,仿佛在发生破裂的同时,又在“自动地”进行着愈合。这一“自组织地”发生破裂-愈合过程,以一定的速度沿着断层面传播。这种现象,称为“自愈合脉冲”(self-healing pulse)现象^[15]。

一些物理学家认为,“自愈合脉冲”现象,也许可以看成是地震学中的孤立波现象。实际上,在BK模型中,的确存在孤立波解^[6,8]。BK模型的动力学性质,可以看成是由耦合弹簧、加载弹簧、滑块质量、摩擦函数等共同控制的一种“相变”。在相空间中的一些区域里,BK模型具有孤立波解。但是这种孤立波是怎样“从无到有”开始形成的,却仍是一个悬而未决的问题。对于地震的“起始”问题,有很多理论上和观测上的研究,但由这些研究所引出的问题,却远远多于它们所得到的结论。

另一个问题是,BK模型毕竟是一个简化的一维模型。BK模型中的孤立波解,究竟是所有的“类BK模型”的一个共同特征,还是仅仅是一个最近邻相互作用的一维模型中的特殊情况,还是需要研究的。

4 “它们的确模拟了某种现象,但它们模拟的却并不是地震”

科学史上经常有这样的情况,研究方向正确,并不等于说一定能够得到“好的”结果。在相当多的情况下,对细节的处理往往可以决定一项研究的“好”与“坏”。BK模型貌似简单,其实有很多值得注意的细节问题。也许正因为貌似简单,有相当一些作者在处理细节问题时过于“轻敌”,以致“失之毫厘,谬以千里”。诺波夫曾这样评论一些研究结果:“它们的确模拟了某种现象,但它们模拟的却并不是地震。”这里我们略举两例。这两个例子,都是细节问题。但有趣的是,在文献中总能找到在这些细节问题上“栽了跟头”的“案例”。

4.1 因果律

第一个例子是因果律问题。在一些结果中,仔细观察一下模型“地震”的破裂过程,就会发现破裂的传播速度似乎太大。有些“地震”的破裂传播速度竟

超出了地震波的传播速度.应该说,大于声速的破裂传播速度,理论上并不是不允许的.但是,用 BK 模型“算出来”的地震破裂传播速度大于地震波速的结果,却不是物理的结果,而是计算过程有问题.

问题出在对离散系统的因果律问题的考虑上^[16].之所以需要因果律的考虑,是因为相邻滑块之间的弹性相互作用的传播速度是有限的.考虑了这个问题之后,计算得到的地震破裂的传播速度便可以为地震学家所接受了.在用差分方程解微分方程时没有这个问题,因为当滑块之间的间隔很小时,弹性波传播速度为有限的效应,可以忽略.但这里的问题是, BK 模型相当于但不是严格地等同于地震问题的差分解,所以在 BK 模型中考虑因果律便成为非常必要.

在动力学中需要考虑因果律,这个概念在物理学中并不是新东西.但耐人寻味的是,人们直到 20 世纪 90 年代末才注意到这一非常基本的概念的重要性^[16].回过头看,如果在一篇论文中发现用 BK 模型竟可以“算出”超声速破裂的结果,那一定是没有考虑因果律的缘故.

4.2 摩擦函数

第二个例子是摩擦函数. BK 模型把断层两侧的介质之间的耦合、新破裂面的产生、地震波辐射等等,统统简化成了滑块与桌面之间的摩擦函数.这样看来,人们似乎可以在摩擦函数当中加进任意的东西.的确曾有一些工作,改变这一项的参数或形式,得出不同的结果,再由此去讨论所得结果在地震预测中的意义.

这样做在理论上无可厚非,只是有一点需要特别小心:摩擦函数是不能“随心所欲”地取定的.对于 BK 模型,还有一个重要的约束,就是在滑块取到非常非常小时,模型应该渐近地“回到”连续介质力学的情况.这样,摩擦函数的形式和函数中的参数便不能随便选取,否则,在趋近连续介质的极限时,便会造成人为的“弥散”效应.实际上,能够满足这样的条件的函数并不多^[5].在有些工作中过于任意地取定的摩擦函数,不但在应用上与地震的实际不符,而且在理论上也是不自洽的.

4.3 关于 BK 模型的推广

BK 模型是一个非常简单的模型:它把地震断层面简化成一个由弹簧和滑块组成的链条,把断层两侧的两个半无限空间简化成一系列加载弹簧.另外, BK 模型中没有余震,除非在原来的 BK 模型中加入能够反映弛豫过程的“元件”.因此对于 BK 模型,自

然也有很多推广的尝试.目前比较多的推广,一是试图把一维模型变成准二维模型,二是试图在 BK 模型中加入更多的和更“真实”的物理内容,比如加进粘弹性的元件,用来模拟构造运动过程中的流变.有些模型的确给出了新的东西,但也有些模型因“推广”不当“画虎不成反类犬”.从某种意义上说,犹如在中国画中最难“画好”的反而是貌似简单、几近随意挥洒的“大写意”,在物理上比较难“搞”的,反倒是那些貌似简单但其实有着丰富的物理内容的东西.杨振宁先生曾评论一些工作“甚至不懂得什么是物理”.这样的工作,在 BK 模型的研究中实际上也有不少.

5 “钻牛角尖”的问题;“钻牛角尖”的人

BK 模型虽然是一个“小的”研究领域用于研究“小问题”的“小”模型但却涉及到很多更深入的“大”问题.在物理学研究中,有些看上去简直是在“钻牛角尖”的问题,却也有重要的意义.因此一些爱“钻牛角尖”的科学家,有时居然还真的“钻”出了名堂.在 BK 模型的研究中也有一些有趣的“牛角尖”问题,目前我们既不知道如何回答这些问题,也不知道这些问题究竟有什么意义.

这里略举两例.一个是与离散化模型有关的.考虑一个二维的 BK 模型.一个滑块发生滑动,有两种情况:一种是,作用在滑块上的力达到最大静摩擦强度,这种情况是我们所熟悉的;另一种情况是,作用在滑块上的扭矩达到滑块的最大抗扭转强度,这种情况在一维模型中是没有的,在连续介质模型中也是没有的,但是在二维 BK 模型中却不能不考虑.常识告诉我们,用扭转的方式,更容易造成破裂,所以这“另一种”可能,是不可以忽略不计的.但问题是:离散模型中的这种扭转破坏,在物理上是真实的吗?目前,有很多准二维 BK 模型的结果,但真正的二维 BK 模型还没有.出现这种情况,不是计算机不行,而是在物理上还不清楚.一个不清楚的问题,就是扭转问题.

另一个问题也是与离散模型有关的.我们知道,在连续介质力学中,把高维问题表示成低维问题是有明确的条件的.但是在离散模型中这些条件如何体现,却是一个有待讨论的问题.表面上看,离散模型似乎“自由”得很,连续介质模型中的很多问题,例如破裂尖端应力的奇异性问题,在离散模型中都没有了.但是如何使离散模型和连续介质模型之间有一

个“平稳过渡”却是理论工作者不能不考虑的问题。

更进一步说,复杂性物理中的很多现象,是通过离散系统观察到的。现在看来,离散系统并不能简单地看成连续系统的离散化。同样,连续系统也不能简单地看成离散系统的渐近情况。这两者究竟是什么关系,看来是一个重要的哲学问题。但解决这一哲学问题,仅靠哲学思辨是远远不够的。

无独有偶,在其他领域中,科学家们也不得不面对离散和连续的辩证关系这样一个复杂的哲学问题。例如在生态学中,生物个体都是“离散”的,但是生态学中的一些函数,却常常表现为连续函数。生态系统的复杂性,有时是根据这些连续函数所描述的动力系统得到的。问题是,这样得到的复杂性究竟是真实的生态系统本来所具有的,还是离散函数的连续化所造成的?^[17]

BK模型看上去简单,但它所考虑的,却是地震学中的两个重要的问题:一个问题是,一个地震究竟是怎么发生的;另一个问题是,地震与地震之间,地震与构造运动之间,究竟是什么关系。如同在伊辛模型中物理学家抓住了两个最主要的因素——相互作用和外场,在BK模型中,地震学家也抓住了四个主要的因素:加载、耦合、质量、摩擦。其中质量是BK模型成为动力学模型而不是静态模型的主要原因。诺波夫夫人一直对BK模型的一种简化形式——元胞自动机(CA)模型持保留意见,也与这种考虑不无关系。

伯里奇-诺波夫模型是师生合作的结果,诺波夫是老师。诺波夫生于1925年,长期担任美国洛杉矶加州大学(UCLA)教授,在地震学、物理学和音乐方面颇多贡献,1962年当选为美国国家科学院院士。伯里奇和诺波夫在20世纪60年代早期关于地震位错的理论,被认为是现代地震学的“第一原理”。诺波夫曾率先将模式识别技术应用于分析音乐。他曾写过一篇题目不能说长得不能再长[Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? (去掉余震之后南加州的地震活动能不能被看作是一种泊松过程?)]但摘要却是短得不能再短的论文[摘要只有一个词:Yes(是)]。他还写过另一篇讨论地震波衰减和地球介质的品质因子(地震学中通常称为 Q 值)的经典论文,

这篇论文的题目大概是世界上最短的,只有一个字母: Q 。诺波夫是中美关系解冻前后最早来华访问的美国科学家之一,与中国学者一直有密切的合作。他注重原创性研究,成果颇丰,讲课引人入胜,富有启发性,但在编写讲义方面却一直“述而不作”。这种谨慎不能不说是一种遗憾,否则地震学也早有自己的“费曼讲义”了。

致谢 L. Knopoff教授与作者就BK模型做过很多讨论,这些讨论对本文的写作有非常大的启发和帮助。美国洛杉矶加州大学地球与行星物理研究所(IGPP, UCLA)提供了作者2000年在IGPP, UCLA访问期间的资助和研究条件。陈晓非教授建议和推荐作者撰写这篇文章。《物理》编辑部冯禄生老师的建议对改进文章的可读性有很大的帮助。这里谨表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] Burridge R, Knopoff L. Bull. Seism. Soc. Amer., 1967, 57: 341
- [2] Carlson J M, Langer J S. Phys. Rev., 1989, A40: 6470
- [3] Carlson J M, Langer J S, Shaw B E *et al.* Phys. Rev., 1991, A44: 884
- [4] Langer J S, Tang C. Phys. Rev. Lett., 1991, 67: 1043
- [5] Knopoff L, Landoni J A, Abinante M S. Phys. Rev., 1992, A46: 7445
- [6] Vieira M D, Vasconcelos G L, Nagel S R. Phys. Rev., 1993, E47: R2221
- [7] Xu H J, Knopoff L. Phys. Rev., 1994, E50: 3577
- [8] Espanol P. Phys. Rev., 1994, E50: 227
- [9] Muratov C B. Phys. Rev., 1999, E59: 3847
- [10] Rundle J B, Turcotte D L, Klein W (ed). Geocomplexity and the Physics of Earthquakes (Geophysical Monograph Series No. 120). Washington: AGU, 2000. 284
- [11] Turcotte D L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. New York: Cambridge Univ. Press, 1992. 221
- [12] Gutenberg B, Richter C F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. 2nd ed. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1954. 310
- [13] Bak P, Tang C J. Geophys. Res., 1989, 94: 15635
- [14] Ito K, Matsuzaki M. J. Geophys. Res., 1990, 95: 6853
- [15] Heaton T H. Phys. Earth Planet. Interiors, 1990, 64: 1
- [16] Knopoff L. Annali di Geofisica, 1997, 40: 1287
- [17] Henson S M, Costantino R F, Cushing J M *et al.* Science, 2001, 294: 602