

岩体声发射监测现场噪声自适应数字滤波技术初探

马志敏 贾 嘉

(武汉水利电力大学水科所 武汉 430072)

摘要 介绍了应用自适应数字对消滤波抑制现场施工噪声的原理及系统的组成,并说明了室内和现场实验的情况。实践表明,应用自适应数字对消滤波可有效地改进声发射仪抗现场噪声干扰的性能。

关键词 声发射, 噪声, 自适应滤波

分类号 O 422.2, TU 455

1 引言

在岩石工程开挖过程中,利用声发射技术监测围岩的稳定性,施工噪声对声发射信号的干扰是一项十分突出的技术问题。所以目前声发射监测主要是利用施工间隙或有意安排一定的时段,专门进行声发射监测,这显然影响了监测的连续性和可靠性。因此,寻求一种有效的抑制施工噪声影响的方法,实现从噪声干扰中提取声发射信号是解决施工现场围岩稳定性声发射监测的技术关键。

为此,笔者对应用计算机自适应数字滤波技术抑制施工现场噪声的干扰进行了一定的试验研究,实践表明自适应数字滤波技术对于持续稳定的干扰噪声(如挖凿机的工作噪声)有较好的抑制效果,当信噪比大于 $1/2$ 时,可较为清晰地提取出岩石声发射信号,显然利用自适应滤波技术可显著改善声发射仪抑制背景噪声的性能,提高监测的可靠性。本文介绍了自适应滤波的方法、原理和实验的结果。

2 自适应数字对消滤波的原理

自适应数字对消滤波的基本思想是利用参考噪声来抵消信道的噪声,并在一定条件下系统能自适应噪声特征的变化,从而达到最佳滤波效果。为消除施工噪声的干扰影响,在测区内安装两个声发射信号传感器,如图1。其中传感器 T_1 安装在拟观测的区域内,接收来自观测区域内的声发射信号,当然也不可避免地会接收到来自作业区的施工噪声。设 T_1

接收到的信号为 $x(t)$, 则

$$x(t) = s(t) + v_0(t) \quad (1)$$

式中: $s(t)$ 为接收到的声发射信号, $v_0(t)$ 为接收到的施工噪声信号。

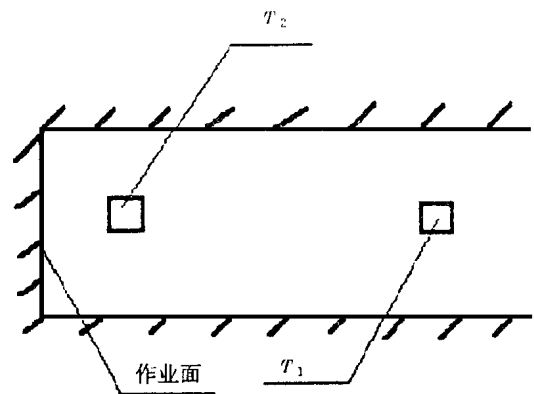


图1 声发射传感器的布置

Fig 1 Arrangement of AE sensors

T_2 安装在靠近作业区附近,主要用来接收施工噪声。设 T_2 接收到的信号为 $v(t)$, 由于其靠近作业区,噪声干扰相对于来自测区的声发射信号要强得多,所以可以认为 $v(t)$ 即为施工噪声。

显然两路传感器所接收的噪声 $v(t)$ 和 $v_0(t)$ 系来自于同一噪声源,因而它们一定是相关的,适合于采用自适应对消的方法来消除噪声干扰的影响。

为了便于计算机处理,可对两路传感器的信号进行同步采样,得到的离散序列值用矩阵表示为

$$X^T(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-m+1)]$$

$$V^T(n) = [v(n), v(n-1), \dots, v(n-m+1)]$$

式中: n 为采样的序号, m 为所取序列的长度。

1998年7月9日收到初稿,1998年9月10日收到修改稿。

作者 马志敏 简介:男,44岁,硕士,1987年毕业于武汉水利电力学院水电系传感与电子技术专业,现主要从事信号检测与处理的研究工作。

自适应对消滤波器的结构如图 2, 它由带分支延时的有限冲激响应(FIR)滤波器、自适应调适器和加法器三部分组成, 具有自适应和自调整功能。

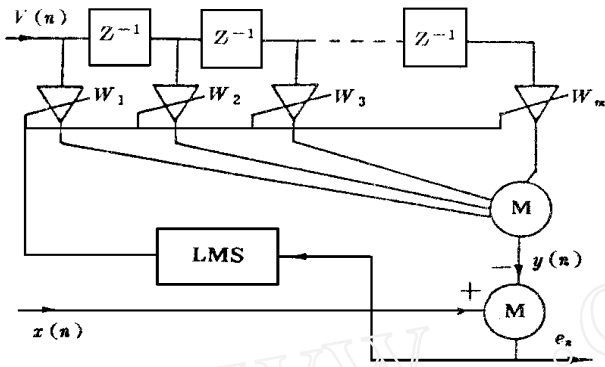


图 2 自适应数字滤波器的结构

Fig 2 The structure of adaptive filter

由 T2 获得的施工干扰信号 $V(n)$ 经 FIR 滤波器滤波处理得到输出 $y(n)$, 再与 T1 的信号 $x(n)$ 相减得到误差信号 e_n 。调适器将按照误差信号 e_n 和 $V(n)$ 调整 FIR 滤波器的参数 w_1, \dots, w_n ; 并按 e_n 均方差最小的原则, 逐步调整 w_1, \dots, w_n ; 直到寻求出一组最佳的 w_1, \dots, w_n 值使得 e_n 的均方差最小, 也即最大限度的使得 $y(n)$ 与 $x(n)$ 中的噪声信号相等, 从而使得输出误差信号仅含 T1 所接收的声发射信号 $s(t)$, 而不再含干扰信号 $v_0(t)$ 。

FIR 滤波器的输出为

$$y(n) = \sum_{i=1}^m w_i(n)v(n-i+1) = W^T V(n)$$

式中: $W^T(n) = [w_1(n), w_2(n), \dots, w_m(n)]$

$$V^T(n) = [v(n), v(n-1), \dots, v(n-m+1)]$$

式中: m 为滤波器的阶数, 对应所取 $V(n)$ 序列的长度。 $w_i(n)$ 为在 n 时刻 FIR 第 i 个分支系数, $w_i(n)$ 是时变的。

业已证明, 对于给定的输入 $v(n)$ 和 $x(n)$, 只要 $v(n)$, 即 $v(t)$ 满足平稳随机过程的条件时, 存在一组 $w_i(n)$ 最佳值, 使得 e_n 满足均方差最小的准则, 满足上述条件的 $w(n)$ 为

$$W^* = R^{-1}P \quad (2)$$

式中: R 为输入信号 $V(n)$ 的自相关矩阵, P 为输入信号 $V(n)$ 与 $X(n)$ 的互相关列向量。式(2)即为 Wiener-Hopf 方程。

根据上式可求出最佳 W^* , 但由于需求取自相关矩阵 R 的逆矩阵和互相关列向量 P , 运算极为繁复。实际中采用最小二乘迭代法, 而不是通过直接求解 Wiener-Hopf 方程, 因为利用 LMS 算法, 采用循环迭代计算, 计算简单, 所需存贮容量小, 适合于实时性处理。LMS 算法可用下面的迭代式表示:

$$W(n+1) = W(n) + \mu e_n V(n) \quad (3)$$

式中: μ 为收敛因子, 其取值影响收敛的速度和稳定性。只要 μ 取值适当, 通过循环迭代计算, 将使 $W(n)$ 逐步趋于 W^* , 达到最佳滤波状态。此时误差信号 e_n 中的干扰信号分量 $v_0(t)$ 被削减到最小程度, 使得 e_n 接近于 T1 的声发射信号 $s(t)$, 实现了信号与噪声的分离。

3 自适应数字对消滤波系统的组成

3.1 硬件组成

自适应数字对消滤波系统硬件组成如图 3 所示。由主测量传感器 T1 和参考传感器 T2 获取观测信号和参考噪声信号, 经过两个独立 A/D 转换器进行同步采样后, 分别存放于 RAM 1 和 RAM 2 中, 通过接口电路送至微机进行自适应运算处理, 从而获得 e_n 。由于岩石声发射信号频率一般为几十 Hz~ 几十 kHz, 采样频率可取 500 kHz, 采用 8 位并行 A/D 转换器。计算机还可以进行事件的分析 and 事件的记录存贮。

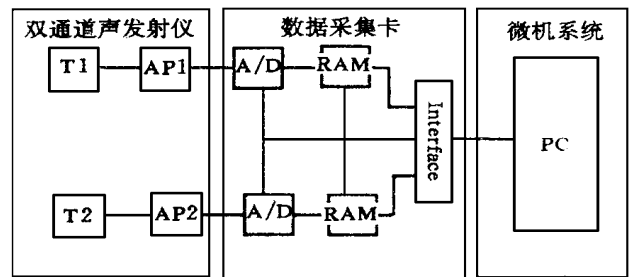


图 3 滤波器的硬件组成

Fig 3 The hardware composition of the filter

3.2 软件设计

自适应数字对消滤波的处理通过软件实现。图 4 是计算程序的流程图。

收敛因子 μ 值的设定对计算的收敛性和收敛速

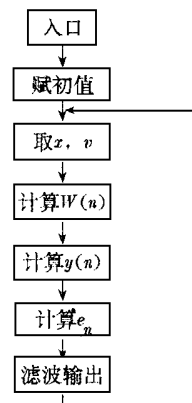


图 4 程序框图

Fig 4 The flow chart of program

度有很大的影响。 μ 值过大系统将可能不收敛, 也即 $W(n)$ 无法逼近最佳 W^* ; μ 值太小收敛速度太慢, 迭加稳定的过程长。一般 μ 的取值范围为 $0 < \mu < 1$, 主要由现场噪声的特性决定。我们根据实测信号进行了不同 μ 值的实验, 结果表明 μ 为 0.2~0.25 时系统稳定且收敛较快。

m 为滤波器的阶数, 关系到滤波的效果和计算的时间, 由实验确定, 一般取 $m = 10 \sim 20$ 即可。

$W(n)$ 的初值对最终的收敛稳定值无影响, 对收敛速度影响也不大。我们对 $W(n)$ 的初值取各分量均为 0 和 $1/m$ 的两种情况进行了计算。假定输入信号 $X(n) = 0, V(n) = 1$ 时, 前者经 20 次迭加后, $W(n)$ 基本稳定; 后者经约 15 次迭加后 $W(n)$ 也基本稳定。所以 $W(n)$ 的初值无关重要, 各分量的初值可取为零。

4 实验结果分析

为了验证上述自适应数字滤波系统对于背景噪声的抑制效果, 利用研制的双通道声发射仪和数据采集系统进行了室内模拟试验和现场实测试验, 以下是实验结果。

4.1 微机模拟干扰试验

根据对现场噪声的测试分析, 挖凿机连续施工噪声基本为周期重复性噪声。为了验证自适应滤波系统对周期重复性干扰信号和快变信号的抑制能力, 分别利用计算机模拟了正弦波干扰输入和方波干扰输入时的情况。图 5(a) 是系统对正弦波干扰输入的抑制情况。 $s(t) = 0, v(t) = v_0(t) = \sin(2\pi \times 1000 t)$ 。其中 n 为取样序号, 可以看出自适应对消滤波系统很快收敛稳定。当 $n = 100$ 时, 干扰信号幅度已衰减为 10^{-3} , 平稳后衰减为 10^{-5} , 抑制比达 100 dB, 系统有效抑制了正弦干扰输入。

图 5(b) 是系统对方波干扰的抑制情况, 此时, $s(t) = 0, v(t)$ 及 $v_0(t)$ 为方波信号, 幅度为 1, 频率为 10 kHz。同样可以看出, 当 $n = 120$ 时, 方波干扰幅度已衰减 60 dB, 平稳后衰减大于 100 dB。可见自适应数字滤波系统对于快变的方波干扰同样有很好的抑制效果。图 5(c) 是假设系统输入 $x(t) = \sin(2\pi \times 1000 t)$, $v(t)$ 和 $v_0(t)$ 为方波时的情况, 其中方波幅度为 1, 频率为 10 kHz。可以看出, 经历两个正弦周期后, 方波干扰得到了充分的抑制, 正弦波得到了很好的复现。以上结果说明系统对周期重复性的稳定干扰具有很好的抑制性, 而岩石挖凿机持续工作产生的噪声应属于这一类干扰。

4.2 现场实测试验

4.2.1 信号采集与处理

现场实测试验中, T2 安装在距作业面 2m 处的

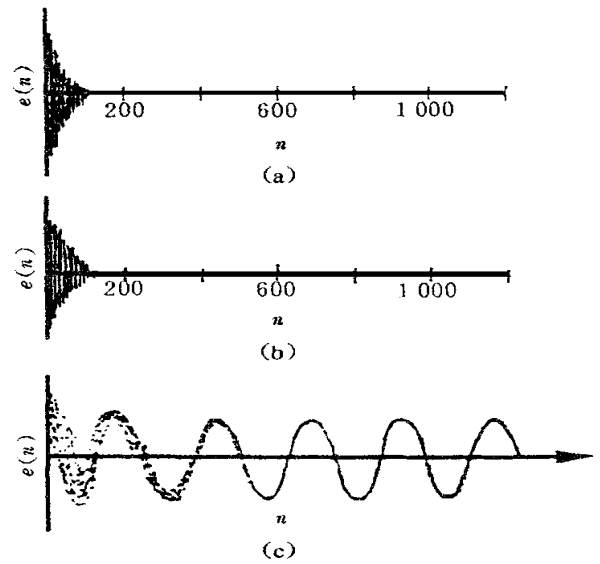


图 5 模拟噪声的抑制效果

Fig 5 The restraining effect to imitate noise

洞壁上, T1 安装在距作业面 20 m 处的洞壁上, 两者均安放在直径 50 mm, 深 400 mm 的孔内, 用棉纱堵好孔口。图 6(a) 和图 6(b) 所示为岩洞开挖现场采集的一组数据, 图 6(a) 为 T2 采集的信号, 主要是挖凿机的工作噪声。图 6(b) 为 T1 采集的信号, 同样也包含挖凿机的工作噪声。采集过程中无车辆通过, 采集时段内捕捉到一次中级强度的声发射信号, 现场利用记录仪记录下二者的波形, 然后在室内利用计算机自适应滤波系统进行处理。图 6(c) 为经自适应滤波处理后的信号。可以明显看出, 经自适应滤波处理后, 挖凿机的干扰噪声得到明显的抑制, 声发射信号明显分离出来。

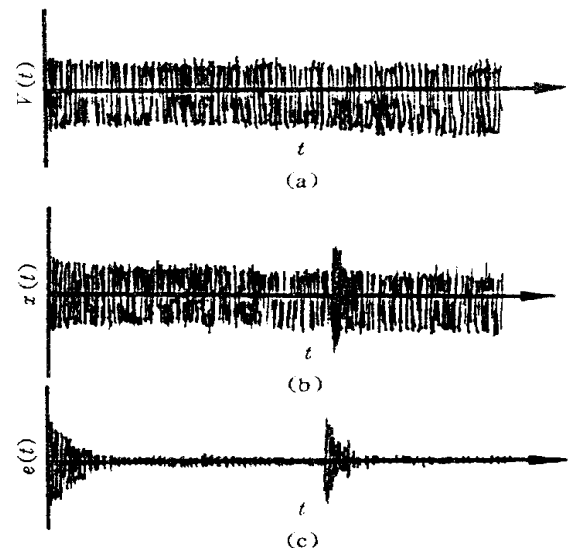


图 6 现场噪声的抑制效果

Fig 6 The restraining effect of site noise

另需说明的是在现场试验的过程只采集了挖凿机连续工作的一段时间内信号，不包括挖凿机启停的状况。显然在挖凿机启停的过程中工作噪声将发生突然变化，自适应滤波处理需要一个逐步调整收敛的过程，所以在启停时将会产生较大的误差 e_n 信号输出，对于这种干扰噪声计算机可另作处理。另外，在试验过程中不包括运输工具引起的噪声，这些噪声由于时间短，突发性强，很难利用自适应滤波的方法抑制，但可通过其他的方法来剔除。

4.2.2 μ 和 m 值的试验确定

μ 的取值直接关系到系统的收敛性，是 LMS 算法中最重要的参数， μ 的取值主要由现场噪声的特性以及滤波器阶数 m 的值决定。表 1 是当 $m = 10$ 时， μ 取不同的值时对现场噪声计算结果。

从表 1 可看出， μ 在 0.2~0.25 时，系统有较好的收敛性； μ 超过 0.28 后，系统开始出现衰减性振荡，收敛时间显著加长。当 $\mu = 0.32$ 时，系统完全发散；相反，当 $\mu < 0.1$ 时，系统呈过阻尼特征。 μ 值愈小，收敛于稳态的时间愈长。综上所述，宜取 $\mu = 0.2 \sim 0.25$ 。

应该指出，不同的对象现场噪声的特性不一样， μ 值也不同。因此，应根据具体应用对象，通过试验确定合适的 μ 值。

m 值确定主要考虑到系统的适时性和收敛性两个方面。 m 增大，将显著增加系统处理时间，从而影响信号处理的速度。另一方面，若 m 过小（如 < 5 时），系统收敛性变差，一般取 10~20 为宜。

表 1 不同 μ 值的噪声情况

Table 1 The noise with different value of μ

μ	收敛序数 n	收敛性
0.05	620	收敛
0.10	240	收敛
0.20	150	收敛
0.25	140	收敛
0.28	300	振荡收敛
0.30	640	振荡收敛
0.32	-	发散
0.50	-	发散

4.2.3 现场噪声抑制效果的试验分析

自适应数字滤波系统抑制现场噪声的能力主要取决于探头 T1 和 T2 所获得的噪声信号的相关性，如果两者是完全相关的，而且噪声信号的特征是稳定的，那么这种噪声可得到完全的抑制。计算机模拟试验的结果也证明了这一点。用一个在 0~1 区间内均匀分布的随机信号代替 T1 和 T2 的输入，经系统处理后的输出信号能很好收敛，在计算点序数 $n > 200$ 后，输出噪声幅度小于 10^{-5} ，而且对有意叠加

在 T1 上幅度为 0.01 的单个窄脉冲信号也能显著的凸现出来。

实际系统对于现场噪声抑制能力远低于理想情况，这是因为实际由探头 T1 和 T2 得到的现场噪声不可能完全相关。因为 T1 和 T2 的频率特性不完全一致，岩体和裂隙层对不同频率的信号吸收也不一样，因此引起信号在传输和接收过程中产生畸变，使得 T1 和 T2 接收到的现场噪声不可能完全相关，从而造成自适应数字滤波系统输出端产生一定幅度的噪声输出。另一方面，施工机械的工作状态也不是稳定不变的，当其工况发生较快变化时，系统也会产生一定的输出噪声，显然这些输出噪声限制了系统识别声发射信号的能力。表 2 是对不同测点获得的 30 组数据处理的结果。

从表 2 可看出，多数情况下输出噪声为输入噪声幅度的 5%~20%，但也有少数情况输出噪声高达输入噪声幅度的 30%，这就限制了对较弱的声发射信号的识别和提取。目前，从处理的结果看，系统尚只能可靠识别信噪比（幅值之比）为 1/2 以上的声发射信号。

表 2 现场噪声抑制比

Table 2 The restraining ratio of site noise

输出/输入噪声比	数据组数
0~0.1	6
0.1~0.15	10
0.15~0.2	8
0.2~0.3	6

5 结束语

综上所述，采用自适应数字对消滤波的方法的确可显著地抑制挖凿机械作业噪声的干扰，很大程度上改善了声发射仪的现场抗干扰性能，为实现施工过程中声发射的连续监测提供了一个重要的手段。然而目前的结果与实际应用的要求还有较大的距离，尚只能可靠提取距施工作业面 20m 以外中级强度以上的声发射信号，信噪比应大于 1/2 以上，而对于信噪比低于 1/2 以下深度淹没的声发射信号尚难以提取，有待于在进一步深入研究中，改善和提高自适应数字滤波系统的性能，从而达到更为有效地抑制现场噪声干扰的目的。

参 考 文 献

- 1 吴兆熊 数字信号处理 北京: 国防工业出版社, 1985
- 2 何振亚 数字信号处理的理论与应用 北京: 人民邮电出版社, 1983
- 3 Rabiner L R, God B. Theory and Application of Digital Signal Processing. New York: Prentice-Hall, Inc., 1975

EXPLORATION ON ADAPTIVE DIGITAL FILTERING OF SITE NOISE IN ROCK AE TEST

Ma Zhimin Jia Jia

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan 430072 China)

Abstract A method of adaptive digital filter for restraining noise is presented and its application result is introduced. It has been proved that this method can effectively improve the property of AE instruments on restraining site noise.

Key words acoustic emission, noise, adaptive filter

书评

程谦恭, 彭建兵, 胡广韬, 胡厚田著《高速岩质滑坡动力学》

1999 年 9 月由西南交通大学出版社出版

滑坡动力学是胡广韬教授致力倡导的一门工程地质分支学科。在这项研究中, 对所处特定应力场或力学系之中具有一定本构的斜坡坡体, 在内在和外在机械力相互有机联系并制约的条件下, 着重研究滑坡形成、演化全过程的发育、滑动、解体、运行、停滞与消亡, 以至更新斜坡出现的动力学规律。

由中国工程院院士、中国工程地质学与环境学会理事长、中国岩石力学与工程学会理事长王思敬教授为之题序的《高速岩质滑坡动力学》一书, 以西南某水电站坝址区滑坡(坝)为典型研究对象, 从分析高山峡谷区大型滑坡的成坝作用机理入手, 系统地研究了高陡边坡岩体的破裂、变形、破坏、失稳与滑坡体的启动启程、高速运行、碰撞解体及冲击成坝等剧冲式高速岩质滑坡运动全过程的动力学规律, 应用弹塑性力学、断裂力学、岩石动力学理论和计算机数值模拟技术, 提出和论证了高速岩质滑坡动力学理论和方法, 是滑坡动力学的创新和发展。

该书选题先进, 新颖独创。书中介绍的在大江大河上利用滑坡体筑坝, 将实现把滑坡自然灾害体变为人类工程体的转化, 国内外尚无先例, 是当今工程地质和坝工研究的崭新的前沿方向。

该书资料丰富翔实, 系统全面。在广泛深入的现场调查和室内外岩土体物理力学性质综合测试的基础上, 对斜坡变形破坏及剧冲式岩土滑坡运动全过程的动力学机制进行了全面、系统地研究。现场及室内试验工作量大, 研究方法手段先进齐全, 对区域工程地质条件、斜坡岩体结构特征及滑坡结构特征、滑坡滑体物质基本特征等进行了从面到点、从宏观到微观、从定性到定量的深入分析, 取得了大量的资料和数据, 从而使理论研究具有客观、充分的证据, 反映出作者具有严谨的科学态度, 所得结论真实可信、正确可靠。

该书在滑坡理论上有重大突破和创新: (1) 首次将高速岩质滑坡运动的全过程系统归纳为启动启程、行程高速、高速凌空飞越及撞击弹落重夯成坝等阶段, 建立了高速岩质滑坡动力学的理论体系; (2) 明确提出高陡斜坡滑坡机制研究, 应包括斜坡岩体结构特征、启程动力学机制研究和滑坡运动过程动力学机理研究三部分。对于后两者, 国内外研究较少, 而本书对后两者进行了大量深入的研究, 首次提出了三种具有重要理论意义及实用价值的新的动力学机理和 9 个动力学方程式, 填补了滑坡动力学研究的空白, 即: 运用断裂力学的原理和方法, 分析了滑坡累进性破坏过程中锁固段岩体的剪断释能效应, 论证了高速岩质滑坡启动启程阶段峰残强降加速动力学机制, 并提出了不同应力状态下的启程启动速度计算公式; 运用断裂力学和弹性力学的原理和方法, 提出并分析了平缓内倾层状岩体斜坡锁固段岩体突然剪断时出现的“临床弹冲-峰残强降”复合加速动力学机制, 并导出了平面二维应力状态下启程启动速度计算公式; 运用岩石弹性动力学理论及弹性力学变分法原理, 提出、分析并论证了滑坡堵江成坝的冲击夯实动力学机制, 并导出不同应力状态下, 滑坡坝土石体压实密度的计算公式, 用该公式计算的密度与现场实测值符合。

该书对斜坡变形破坏及运动全过程进行了系统的数值模拟分析, 包括斜坡初始应力场、斜坡变形应力场、斜坡累进性破坏过程、斜坡失稳暴雨触发过程的有限元数值模拟和滑坡运动全过程离散元数值模拟, 形象地揭示和再现了斜坡破坏及失稳后大变形阶段的运动过程及滑坡冲击成坝的机制和过程, 为滑坡动力学分析提供了几何学、运动学、动力学理论依据。

综上所述, 该书资料丰富, 方法先进, 理论上重大突破, 实际工程应用上有很大价值, 是一部学术水平高的论著。

(西南交通大学出版社李彤梅)