

SPH 法中初始时粒子配置的分析

张姝慧, 汪继文

(安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039)

摘要:光滑粒子流体动力学(SPH)法是一种无网格拉格朗日粒子法。文中介绍了 SPH 法的常数和线性连续性条件, 测试求解一维溃坝问题时不同的初始粒子配置对实验结果的影响。结果表明在 SPH 法中, 初始时刻粒子应尽量均匀分布, 并且尽量使所有粒子的质量相同或者是呈连续变化的。

关键词:光滑粒子流体动力学法; 光滑核函数; 核近似; 人工粘性; 线性连续

中图分类号: TP18

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2007)06-0036-03

Analysis of Initializing Particle Configuration in Smoothed Particle Hydrodynamic Method

ZHANG Shu-hui, WANG Ji-wen

(Ministry of Education Key Lab. of Intelligent Computing & Signal Processing, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: Smoothed particle hydrodynamics (SPH) method, as a meshfree, Lagrangian, particle method, is developed in the past twenty years. In this paper, firstly, the zeroth-order consistency and linear consistency are introduced and then the influence of initializing particle configuration on the result in solving one-dimensional dam-break problem is examined. The results show that in the initialization all particles should be configured as uniform as possible, and their mass should be made equally or to change continuously.

Key words: smoothed particle hydrodynamics method; smoothing kernel function; kernel approximation; artificial viscosity; linear consistency

0 引言

光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 法是近二十年来发展起来的一种纯的拉格朗日无网格粒子法。由于这种方法计算空间导数时不需要使用网格并且具有自适应性质, 从而避免了高维拉氏网格法中的网格缠结和扭曲的麻烦, 被广泛地应用到了各种领域^[1]。但是仍然有很多问题值得研究, 如初始时粒子的配置对实验结果的影响等等。

1 粒子的常数和线性连续性条件

SPH 法是将问题域离散化为一系列不需要预定义网格来提供节点连接的粒子集, 通过使用光滑函数引进积分表示式。对于场函数 $f(x)$, 其核近似式如下:

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x') W(x - x', h) dx'$$

其中 h 是光滑长度, $W(x - x', h)$ 称为光滑核函数。

通常, 若一个近似能够准确地生成一个 k 的多项式, 那么就说这个近似式具有 k 阶连续性。由 SPH 核近似式对一个常量场函数 $f(x) = c$ 精确再生, 则应有

$$f(x) = \int_{\Omega} c W(x - x', h) dx' = c$$

$$\text{或} \quad \int_{\Omega} W(x - x', h) dx' = 1 \quad (1)$$

此归一化条件即为零阶或常数连续性条件。

对于线性函数 $f(x) = c_0 + c_1 x$ 的再生, 可得

$$f(x) = \int_{\Omega} (c_0 + c_1 x') W(x - x', h) dx' = c_0 + c_1 x$$

可简化为: $\int_{\Omega} x' W(x - x', h) dx' = x$, 又 $x \int_{\Omega} W(x - x', h) dx' = x$, 因此有:

$$\int_{\Omega} (x - x') W(x - x', h) dx' = 0 \quad (2)$$

此方程就是 SPH 核近似式线性连续性条件^[2,3]。若光滑函数能满足此方程, 则光滑函数就是对称的。对

收稿日期: 2006-08-31

基金项目: 安徽省高校自然科学基金项目 (2006KJ028B)

作者简介: 张姝慧 (1983-), 女, 山东淄博人, 硕士研究生, 研究方向为计算机模拟与仿真; 汪继文, 教授, 博士后, 博士生导师, 研究方向为智能计算。

称性表示与给定粒子距离相同但在不同位置上的粒子对给定粒子的影响该是相同的。

而方程(1)和(2)的常数和线性连续性条件对应的离散式为:

$$\sum_{j=1}^N W(x - x_j, h) \Delta x_j = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N (x - x_j) \nabla W(x - x_j, h) \Delta x_j = 0 \quad (4)$$

式中: N 是在 x 处粒子的支持域上所有粒子的总数。

若粒子不均匀分布,即使内部粒子的支持域没有被截断,离散形式的常数和线性连续性条件也不能被精确地满足,同样地,高阶连续性条件的离散化也不能被精确地满足^[1]。

现在有许多不同的方法可以用来修正离散化方程的连续性条件,如 Liu 及其合作者 1995 年通过在传统 SPH 方法上应用修正的光滑函数,提出的再生核粒子法(RKPM)^[4]。但是由于所有的粒子都是运动的,粒子位置同时也在改变,使用这种方法构造粒子形式的光滑函数在每个时间步内都要进行计算,需要考虑成本与效率问题,并且将这些光滑函数应用在流体动力学问题的模式时会出现光滑函数是负值等问题。所以这种方法应用起来非常困难^[3,4]。

2 初始时粒子配置的原则

在 SPH 法中仍然经常使用的是已有传统的光滑函数,如高斯型核函数、B-样条核函数等等。这些光滑函数均满足归一化、对称性等条件^[1]。因此若初始时粒子不均匀分布,则方程(3)、(4)的左边并不总是等于右边。

粒子的配置是确定粒子的空间位置和属性,位置随时间演化而改变,但质量不变。传统的光滑函数具有对称性和归一性,因此初始时粒子配置的原则是尽量保持空间分布的均匀性,粒子分布在空间中要有一定的稠密度,各粒子之间的间隔一般要求 $\leq h$ ^[5]。对于不同构形的模型应采用不同的配置方法。对于具有良好对称性的简单模型,如直角六面体,通常可以直接均匀配置。对于较复杂的构形,则常需将模型划分成一系列多面体,多面体的中心坐标就是粒子坐标。多面体所含质量就是粒子的质量^[6]。但是各粒子在空间中尽量均匀分布的同时还需尽量满足什么样的条件,才能使结果更为精确,下面以一维溃坝问题为例,对此进行了分析。

3 数值实验

一个水平的无摩擦的水流,长度是 1000m,大坝位

于 500m 处,上游水深 10m,下游水深 2.0m,在 $t = 0$ 时刻,大坝崩溃,考虑以下几种初始时不同的粒子配置的情况:

第 1 种情况:所有粒子质量相同。

在 $[0, 1000]$ m 范围内总共使用了 1200 个粒子,1000 个粒子平均分布在上游区域 $[0, 500]$,200 个粒子平均分布在下游区域 $[500, 1000]$,所有粒子的单位宽度水的体积 V_j 相同,均为 5.0m^3 ,从而具有相同的质量。如图 1 所示。

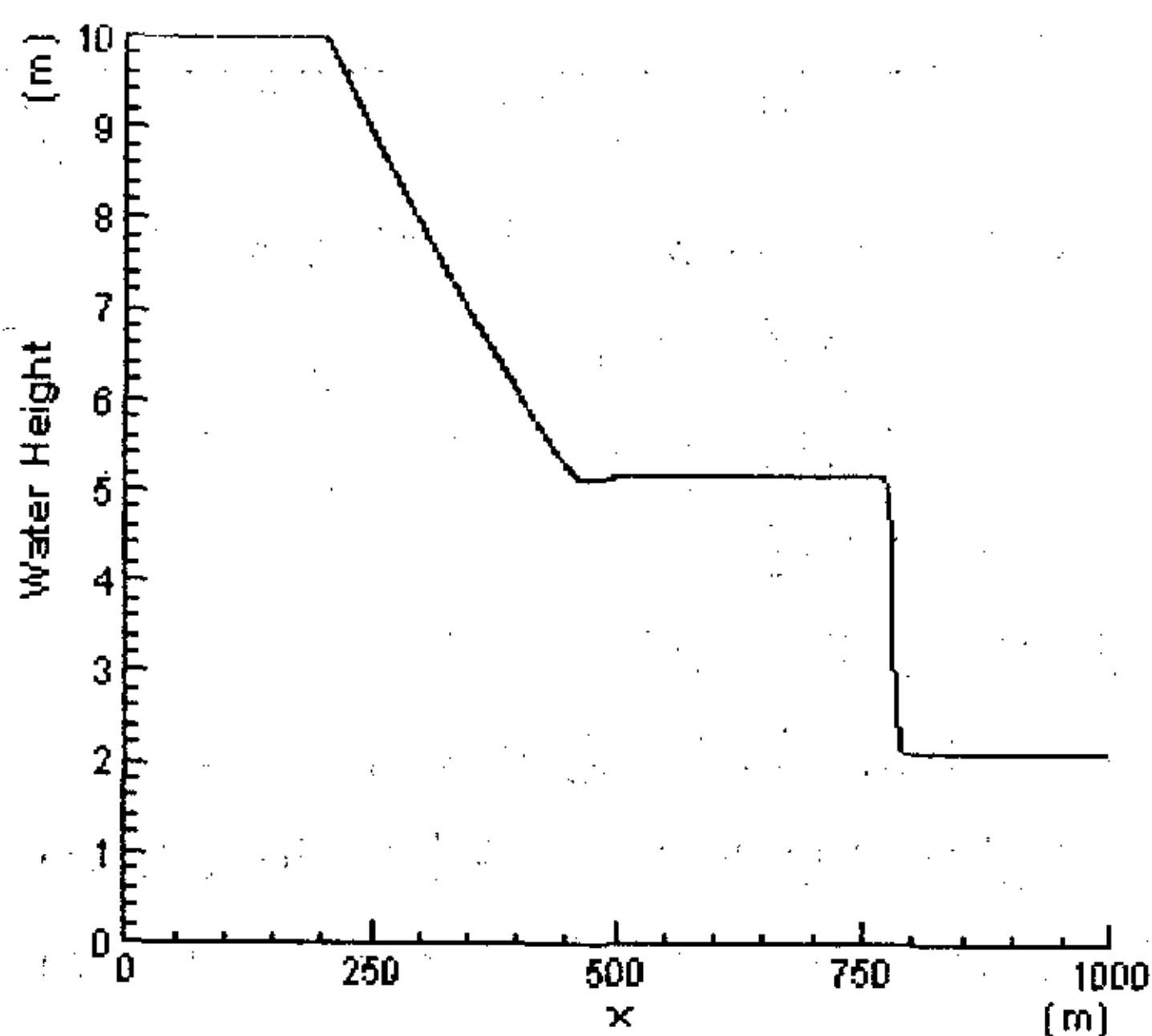


图 1 在 $t = 30$ 秒时的水流深度图
(在第 1 种情况下)

第 2 种情况:粒子质量非连续变化。

(1) 在 $[0, 1000]$ m 范围内总共使用了 1200 个粒子,所有粒子均匀分布,则上游每个粒子的 V_j 为 8.333m^3 ,下游每个粒子的 V_j 为 1.667m^3 。结果如图 2 所示。

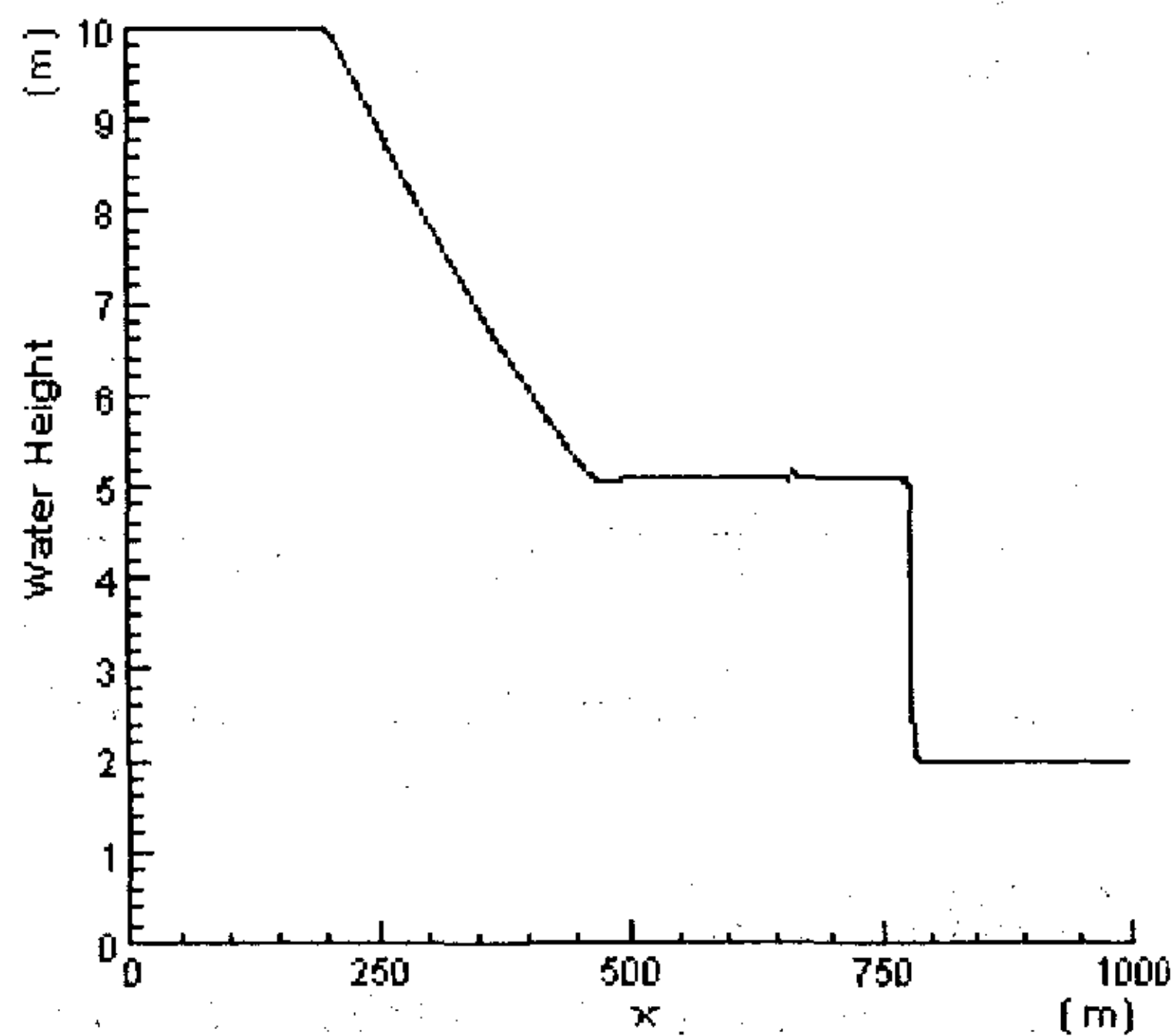


图 2 在 $t = 30$ 秒时的水流深度图
(在第 2 种情况下(1))

(2) 在 $[0, 1000]$ m 范围内总共使用了 1200 个粒子,800 个粒子平均分布在上游区域 $[0, 500]$,400 个粒子平均分布在下游区域 $[500, 1000]$ 。则上游每个粒子的 V_j 为 5.625m^3 ,下游每个粒子的 V_j 为 2.500m^3 。结果如图 3 所示。

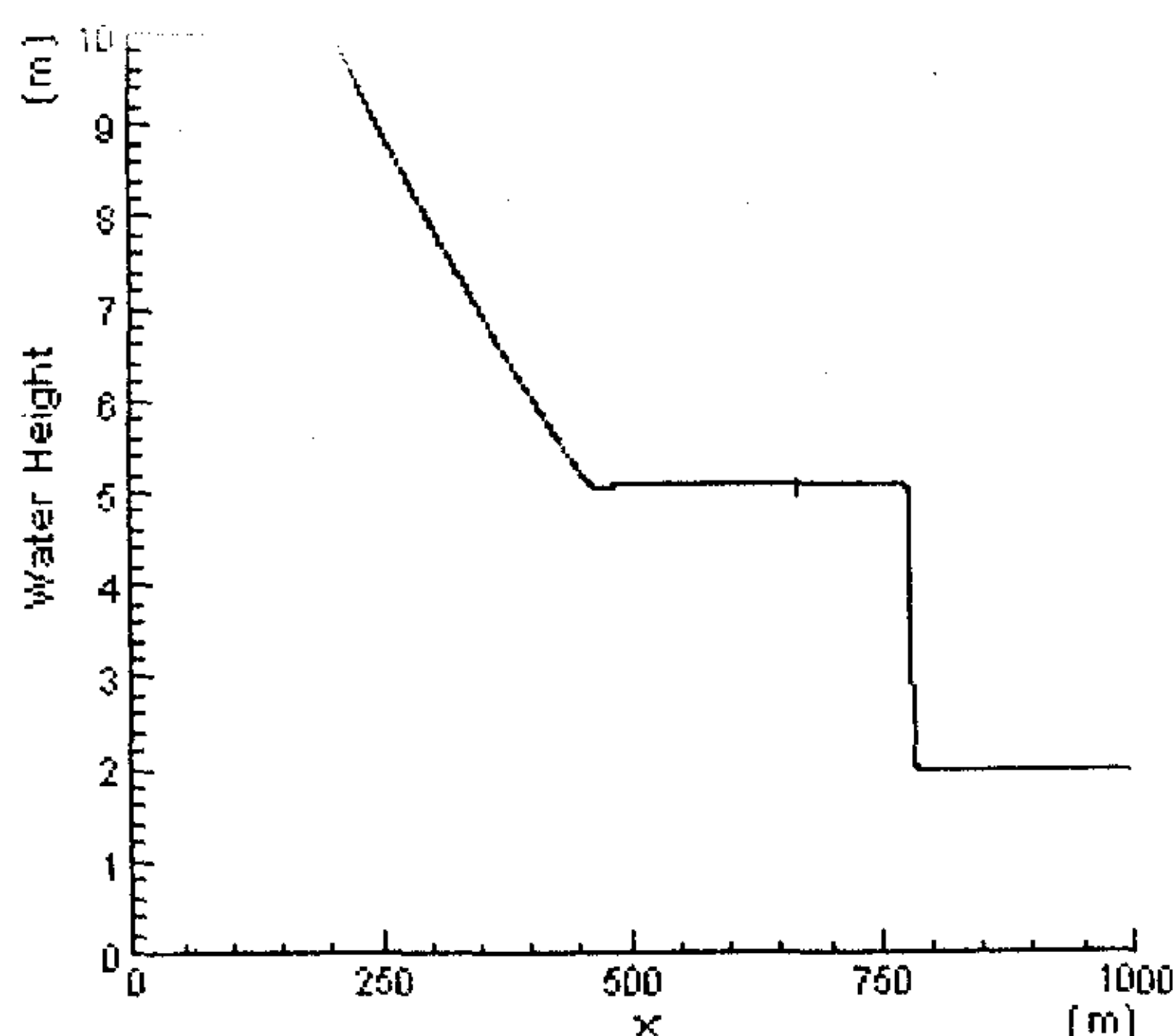


图 3 在 $t = 30$ 秒时的水流深度图
(在第 2 种情况下(2))

(2) 比(1)中的上下游粒子的 V_j 更为接近,粒子的质量也就更为接近。

第 3 种情况:粒子质量连续分布。

在 $[0, 1000]$ m 范围内总共使用了 1431 个粒子, 800 个粒子平均分布在上游区域 $[0, 450]$, 每个粒子的 V_j 为 5.625m^3 , 500 个粒子平均分布在下游区域 $[500, 1000]$, 每个粒子的 V_j 为 2.0m^3 , 在区域 $[450, 500]$ 内分布有 131 个粒子, 这些粒子的 V_j 从 5.625m^3 线性变为 2.0m^3 。结果如图 4 所示。

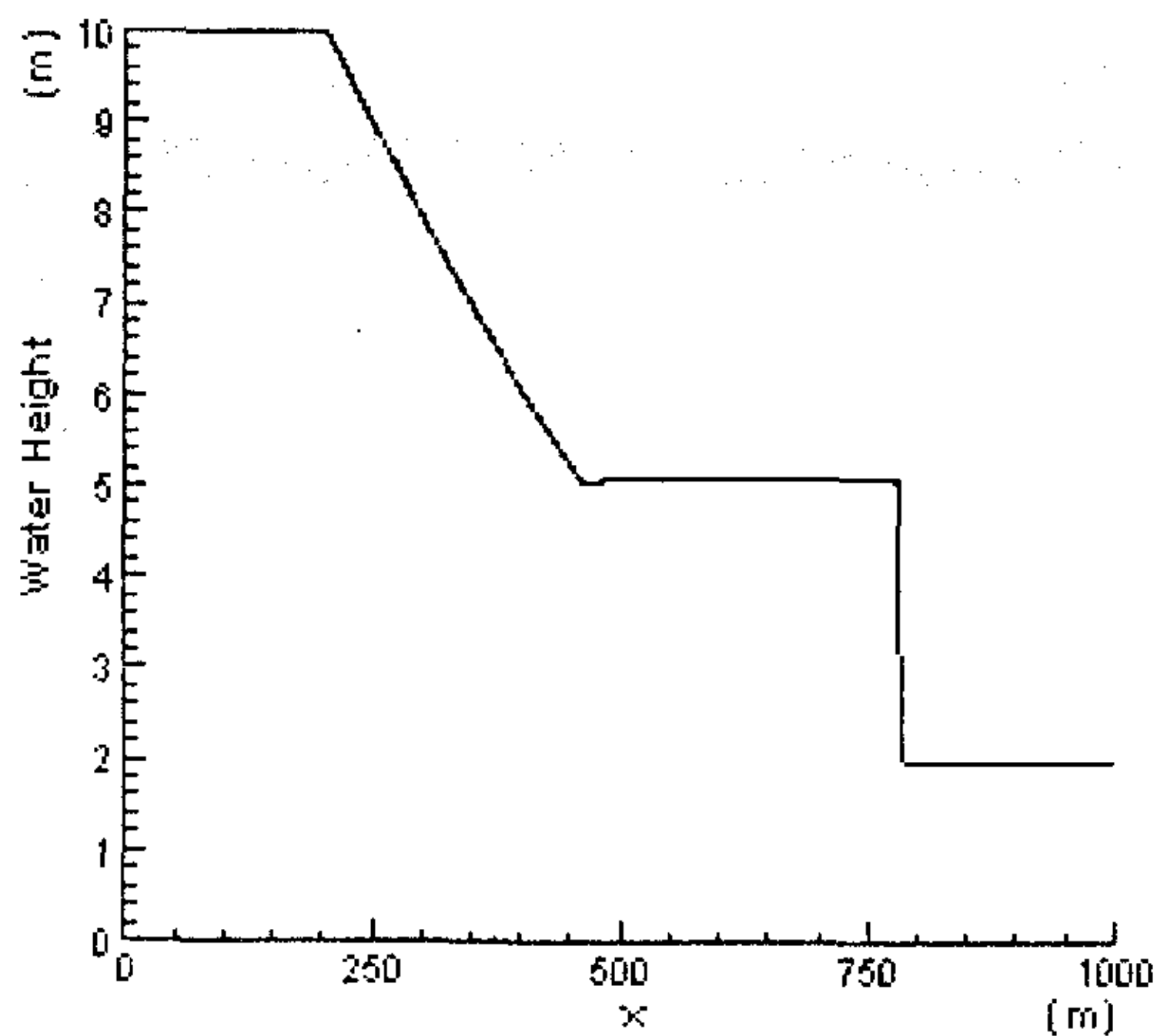


图 4 在 $t = 30$ 秒时的水流深度图(在第 3 种情况下)

4 实验结果分析

从图 1~图 4 可以看出,初始时,在第 1 和第 3 种情况下,所得结果更为平滑,参照文献[7]、[8]给出的使用有限差分法和间断 Glerkin 法得到的历时 30 秒后的水流深度图,可以看出,使用 SPH 法得到的结果与使用这些方法得到的结果基本吻合。在第 3 种情况中初始时下游的粒子数较第 1 种情况要多,所得结果在间断处也更为锐利。在第 2 种情况下,如图 5 所示,实线和点线分别表示的是初始时上游 800 个粒子、下游

400 个粒子和上游 600 个粒子、下游 600 个粒子在坝崩后 30 秒时位于区域 $[640, 690]$ 内的水流深度。初始时刻上下游粒子在坝址两边的单位宽度水的体积不同,质量也就不相同,所得结果在 $t = 30$ 秒时,区域 $[650, 680]$ 内存在着轻微的震动。因此当初始时上下游粒子的单位宽度水的体积或粒子的质量越接近时出现震动范围就会越小。

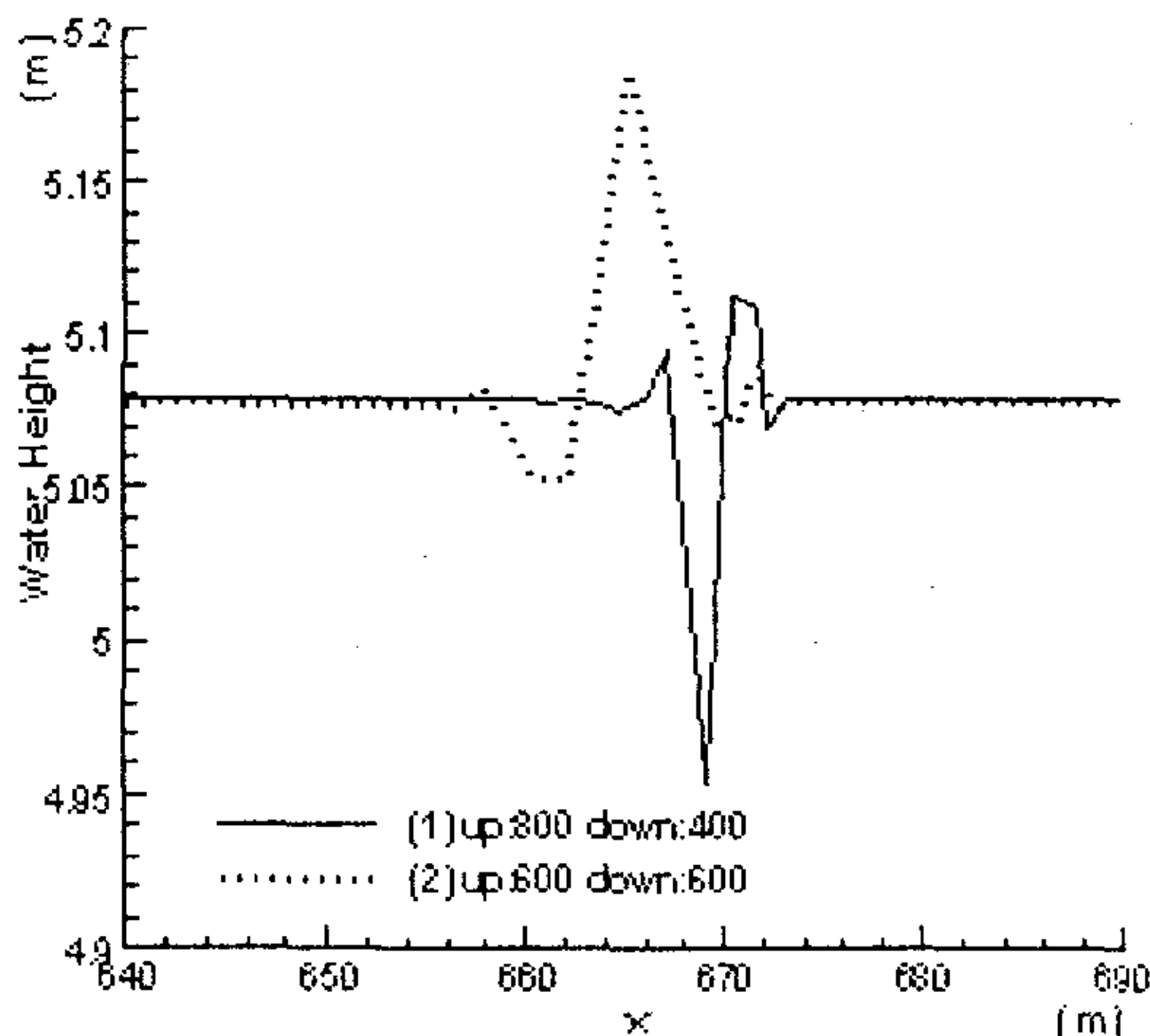


图 5 第二种情况下(1)、(2)在 $t = 30$ 秒时
位于 640 至 690 米处的水流深度对比图

5 结束语

通过初始时采用不同的粒子配置,对一维溃坝问题进行模拟,通过实验结果可看出初始配置粒子时,须尽量将粒子均匀分布,并且使所有粒子质量相同或者质量呈连续变化。在溃坝问题中,坝崩后相当于坝两侧的粒子发生碰撞,这些粒子属于同种材质的,若发生碰撞的粒子属于不同的材质,如果在初始配置粒子时,使要碰撞的粒子即位于要碰撞的两物体的碰撞面附近的粒子的质量相同或呈连续变化,如在文献[6]中讨论的铁质球形弹丸撞击一块铝质靶板此实验的撞击面附近的粒子,对实验结果会有何影响,这仍待以后继续深入研究。

参考文献:

- [1] Liu G R, Liu M B. Smoothed Particle Hydrodynamic - a meshfree particle method[M]. [s. l.]: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003.
- [2] Belytschko T, Krongauz Y, Dollbow J, et al. On the completeness of the meshfree particle methods[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996, 43(5): 785 - 819.
- [3] Belytschko T, Krongauz Y, Organ D, et al. Meshless methods: an overview and recently developments[J]. Computer Meth

(下转第 175 页)

得系统具有动态可扩展性^[6]。

在图1的外围无线局域网中,MSS位于固定高速网络中,用于支持无线网络单元,它既能通过无线链路与移动终端设备通信,也可通过固定网络与服务器通信。而移动Agent码头是位于MSS上的移动Agent管理系统。

这里首先为基于网络的入侵检测设计网络数据收集Agent,由移动Agent码头统一管理。移动Agent码头根据需要创建网络数据收集Agent,并将移动Agent送到正确地址。

其次在每个MSS安装网络入侵检测部件。因无线终端设备的网络通信都要经过MSS,一旦检测部件检测到无线终端设备网络通信的嫌疑事件,要求移动Agent码头创建多个网络数据收集Agent负责跟踪到目标系统,这些移动代理能够智能地进行入侵路由跟踪,自动在每一台移动终端之间进行迁移跟踪入侵并收集嫌疑事件信息数据。MSS汇总各Agent收集的数据信息,并进行分析处理,如果处理后得到响应结果,就把该结果传递给相应的目标终端,如果经分析处理无法得到响应结果,则把信息传递给上一级(固定网络中的入侵检测中心),这样整个网络系统的入侵检测就会更全面、更完整。

2.3.3 无线网络系统入侵检测框架

外围无线局域网的整体入侵检测框架如图2所

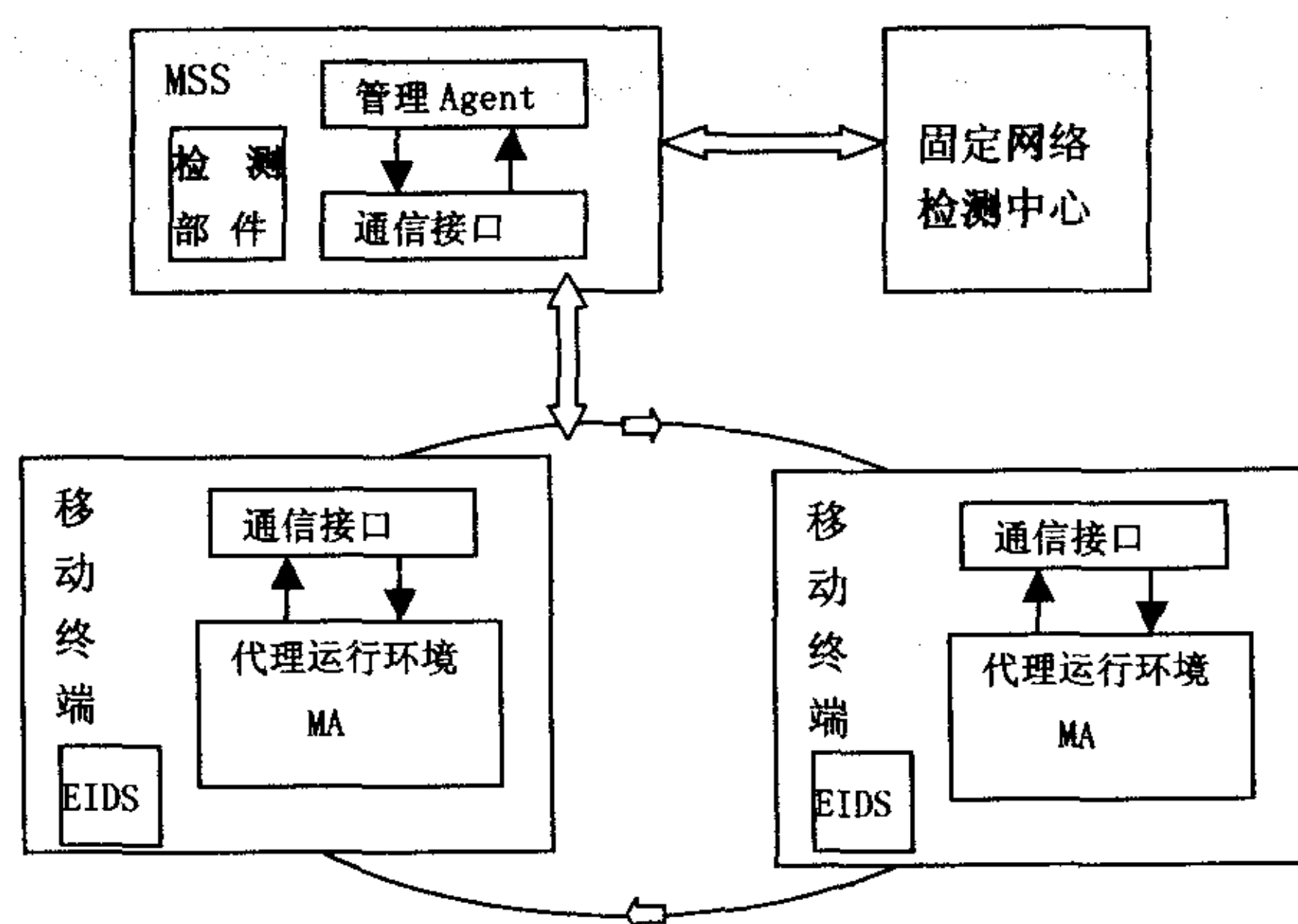


图2 系统入侵检测框架

示,其中,EIDS是嵌入移动终端的基于主机的入侵检测系统,基于网络的入侵检测主要在MSS中实现,MA为MSS派往各移动终端的网络数据收集Agent。

在网络入侵检测系统中,各网络数据收集Agent由于时间和空间的局限性,根据现有的信息很难判断是否是攻击,必须同时提交给MSS才能作出判断。由于某些攻击在空间上或时间上具有一定的连续性,当某个代理检测出攻击时,可以让其它的代理获得先验知识,来提高检测效率,这时代理就会用广播消息来通知其它代理。

3 小结

网络安全是自网络出现以来一直被普遍关注的问题。文中就基于网络基础设施的无线局域网,提出了自己的一套入侵检测方案。其中,基于嵌入式入侵检测系统用于嵌入到移动终端作为基于主机的入侵检测系统;同时,借助于原有网络基础设施的MSS和移动Agent平台,把网络检测部件安装到MSS,设计网络数据收集Agent为MSS到各移动终端收集入侵证据,实现无线局域网的基于网络的入侵检测。下一步的工作是把这套入侵检测方案在实际的应用中实现。

参考文献:

- [1] 唐正军. 入侵检测技术导论[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [2] 李捷. IEEE802.11i无线局域网安全技术[J]. 中国无线电, 2006(7):9-11.
- [3] 吴越. IEEE802.11标准无线局域网安全缺陷分析及解决方案研究[J]. 计算机工程与应用, 2003(5):31-34.
- [4] Imielinski T, Badrinath B R. Mobile Wireless Computing Solution and Challenges in Data Management[R]. DCS-TR-296/WINLAB TR-49. USA: Rutgers University, 1993.
- [5] 赵跃华, 蒋军, 蔡贵贤. 嵌入式系统中入侵检测的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2006(5):62-63.
- [6] Dalmeijer M, Hammer D K, Aerts A T M. Mobile Software Agents[J]. Computers in Industry, 2000, 41:251-260.

(上接第38页)

- ods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, 139:3-47.
- [4] Liu W K, Jun S, Zhang Y F. Reproducing Kernel Particle Methods[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1995, 20:1081-1106.
- [5] 张锁春. 光滑质点流体动力学(SPH)方法(综述)[J]. 计算物理, 1996, 13(4):385-397.

- [6] 贝新源, 岳宗武. 三维SPH程序及其在斜高速碰撞问题的应用[J]. 计算物理, 1997, 14(2):156-166.
- [7] 李付鹏, 汪继文. 一种复合型数值方法的改进与算法实现[J]. 微机发展, 2003, 13(12):122-124.
- [8] 张飞, 汪继文. 一维溃坝问题的间断 Galerkin 方法[J]. 安徽大学学报:自然科学版, 2005, 29(2):5-8.