



工程安全监测技术 2006

GONGCHENG ANQUAN
JIANCE JISHU 2006

© 赵 卫 杨定华 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

工程安全监测技术 2006

GONGCHENG ANQUAN
JIANCE JISHU 2006

◎ 赵 卫 杨定华 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

工程安全监测技术. 2006/赵卫, 杨定华主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2006
ISBN 7-5084-4144-3

I. 工... II. ①赵... ②杨... III. 水利工程—安全管理—监测—文集 IV. TV513-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 126189 号

书 作 者 出版 发行 经 售	工程安全监测技术 2006 赵 卫 杨定华 主编 中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales @ waterpub. com. cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 印 规 版 印 定	中国水利水电出版社微机排版中心 北京市兴怀印刷厂 787mm×1092mm 16 开本 24.25 印张 575 千字 2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月第 1 次印刷 0001—2000 册 66.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

会议主办单位

全国大坝安全监测技术信息网

会议承办单位

长江勘测规划设计研究院

会议协办单位

长江科学院

长江空间信息技术工程公司

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室

中国长江电力股份公司

中国长江三峡工程开发总公司

中国水利水电第八工程局科研设计院

会议赞助单位

南京南瑞集团公司

基康仪器（北京）有限公司

成都经纬科技仪器有限公司

北京达汉新柯仪器有限公司

常州科亚电缆有限公司

北京木联能工程科技有限公司

欧美大地仪器设备中国有限公司

主 编 单 位

全国大坝安全监测技术信息网

长江勘测规划设计研究院

长江科学院

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室

编 辑 委 员 会

主 编 赵 卫 杨定华

编 委 (以姓氏笔画为序)

马能武 刘观标 杨定华 李端有 何金平

陈绪春 於三大 赵 卫 郝长江 段国学

郭 建 鲁结根 裴灼炎

序

工程安全监测是监视工程安全的重要手段。其可以及时获取第一手的资料,了解建筑物的工作性态,为评价建筑物的安全状况、发现建筑物的异常迹象提供科学依据,从而可以制定适当的措施来保障工程的安全;监测的基本目标是实现对工程建筑物的在线、实时安全监控,通过建立监控模型和拟定监控指标,及时掌握和预测运行中建筑物的安全状态,防患于未然;监测也是实施工程安全预警和制定工程安全应急预案的基础,在建筑物可能失事前,及时评估安全等级,发布预警信息,以避免或减轻失事损失;在建筑物可能失事时,通过实施应急预案,采取恰当的措施,将失事损失降低到最小程度。因此,实施安全监控,对充分发挥工程效益、促进社会经济可持续发展、保障社会安定和人民生命财产安全具有极其重要的意义。

工程安全监测包括监测仪器及其自动化系统的研制、监测设计和施工、监测资料分析以及运行安全评估和监控等多个环节。仪器是安全监测的基础,它不仅要求质量优良,具有长期工作的稳定性和恶劣环境下的可靠性,而且要求技术上先进,能适应复杂工程安全监测的需要。设计是安全监测的龙头,监测设计不仅要满足建筑物性态分析和安全监控的需要,而且要从建筑物的工作机制上去研究监测仪器的选型和布置。施工是安全监测的保障,监测施工应严格按照规范规定和设计要求进行,不仅要做好仪器埋设安装工作,而且要做好施工期数据采集工作,特别是基准值的取得。资料分析是安全监测的重要环节,资料分析不仅要對建筑物运行性态作出解释,对安全状况作出评价,而且要通过监测资料及时发现工程安全隐患,为除险加固提供依据。监控是安全监测的关键,对建筑物安全状态进行监控,是工程安全监测的根本性目的,安全监控不仅要力求准确,不枉不纵,而且要实现实时在线。

几十年来，我国工程安全监测技术人员为保障工程安全付出了大量的心血，取得了丰硕的成就。由全国大坝安全监测技术信息网主办、长江勘测规划设计研究院承办的“2006年监测技术信息交流会”即将于2006年11月在长江三峡召开。本次会议是全国工程安全监测领域的一次盛会，将汇聚全国工程安全监测界的精英，对总结和交流工程安全监测成果、展望和开拓工程安全监测未来具有重要的推动作用，是一次非常有意义的会议。

是以欣然为本次会议论文集作序。

中国工程院院士

吴中如

2006年10月

目 录

序

监测仪器与系统

土坝渗流热监测理论研究	李端有 熊健 王煌 (3)
分布式光纤传感技术在隧道健康监测中的综合应用	徐卫军 李端有 (12)
关于大坝安全监测仪器设备选型问题的探讨	刘观标 (19)
岩土工程监测自动化网络系统现状与发展	刘爱梅 陆声鸿 尚宏 (24)
差动电阻式仪器的发展与改进	赵斌 吕刚 (39)
葛洲坝工程引张线自动化观测实践探讨	鲁结根 宫玉强 (46)
活动测斜仪的研制及应用	李朝晖 孙骏 (50)
测斜仪无缆监测系统的开发与研制	李积胜 (55)
安康水电站大坝监测系统一期自动化改造	张世东 韩耀铭 冯超 (60)
陈村大坝安全监测自动化系统的应用	叶桂萍 (66)
密云水库大坝安全监测系统建设与应用	张浩 (75)
新疆恰甫其海水库大坝安全监测系统	卢新民 耿凡坤 沈志刚 刘广林 彭虹 李鹏 王迎春 曲苓 汪洋 (79)
电磁式沉降自动测量装置在恰甫其海水利枢纽工程的应用	叶宗顺 李朝晖 (90)
无线 ZigBee 技术在测斜仪及其倾角自动测量系统中的运用	华涛 (96)
移动通信网络在工程安全监测自动化系统中的应用	占亮亮 蓝彦 (102)

监测设计与施工

皂市水利枢纽碾压混凝土大坝安全监测设计	武方洁 饶延平 (109)
遵义灌区水泊渡水库面板堆石坝安全监测设计	张健民 杨汉海 (113)
潘口水电站混凝土面板堆石坝安全监测设计	张雄 (118)
GPS 技术在武汉段长江大堤变形监测中的应用	杨定华 饶延平 季凡 施闾 (124)
GIS 技术在工程安全监测信息管理中的设计与应用	高磊 王卫列 (129)
李家峡水电站大坝安全监测自动化系统的	

设计与运行	李季 陆声鸿 刘爱梅 乔吉庆 李媛	(135)
乌江彭水水电站地下厂房开挖施工期安全监测	欧阳涛 孙元会	(143)
清江水布垭水电站马崖高边坡施工监测与分析	张文胜 李红霞	(150)
安全监测项目的施工管理	钟亮 姜恒	(157)
地下洞室多点位移计安装埋设及观测	李军	(163)
泄洪坝段上游面裂缝处理监测仪器埋设安装及分析	李军	(171)
提高滑坡体变形监测自动化系统可靠性的实践	赖峰 郭文泉	(176)
地下厂房岩锚梁承载试验自动监测方法探讨	吴骏	(179)

监测管理与资料分析

土石坝安全监测技术及监控理论研究综述	马福恒 向衍 刘成栋	(187)
论水电工程安全监测中心的设置	赵卫	(195)
大坝多监测项目综合评价基本方法研究	施玉群 何金平	(201)
BP 网络在大坝变形空间多测点监测模型中的应用	李端有 周元春	(208)
均匀设计及遗传神经网络在清江隔河岩大坝反演 分析中的应用	李端有 甘孝清 周武	(212)
地质统计学纹理在滑坡遥感解译中的应用	王志旺 李端有	(224)
多维时间序列方法在大坝监测资料分析中的应用	杨定华 李小平 杨金平	(229)
大坝状态安全监测虚拟仿真平台研究	龙军 唐文勇 阳春华 刘高嵩 杨定华	(235)
基于数据分析引擎的大坝状态三维 可视化系统研究	刘高嵩 邓子畏 桂卫华 龙军 杨定华	(241)
基于人工神经网络方法的滑坡稳定性评估研究	李强 李端有	(246)
面板坝堆石体沉降分析模型研究	方国宝 杨启贵	(252)
三峡船闸边坡变形收敛特点分析	段国学 许晖 徐化伟 彭绍才	(257)
湖北龙洞水电站大坝变形特性分析	李小平 杨定华 周启 卢德军	(262)
水布垭大岩淌滑坡体变形及稳定性分析	叶查贵 赵卫 闫生存	(269)
水布垭面板堆石坝施工期变形及应力应变分析	叶查贵 季凡 赵卫	(273)
葛洲坝枢纽大江工程变形性态分析	宫玉强 汪海平 赵建华	(278)
五强溪船闸一闸室开合度资料分析 和初步预测	赵春 卢正超 李素梅 杨国祥 陈冬勇	(285)
碗窑大坝变形成因分析及监控指标拟定	刘成栋 马福恒 向衍	(292)
某水电站主要建筑物监测性态分析	何金平 陈加兴 吴云芳	(298)

乌江构皮滩水电站坝肩及水垫塘边坡开挖施工期

监测成果分析	王朝晴	曹建勇	王吉志	(304)
滑坡变形监测及资料分析	饶延平	杨定华	袁菲菲	(309)
二道湾隧洞安全监测资料分析	曲传勇	卢新民		(313)
索溪水库大坝监测资料分析	曹超然	许志宏	饶延平	杨定华 (321)
大坝安全监测资料远程分析系统	徐化伟	段国学		(325)
大坝安全监测数据库信息管理系统开发设计	卢娟	马能武		(330)
面向工程对象的软件测试	李素梅	赵春	黎利兵	(337)
大坝安全监测资料图形化处理方法研究	程丽	何金平	吴云芳	赵卫 (342)
大坝施工期监测信息管理系统数据录入模块开发	吴云芳	何金平	程丽	(348)
大坝施工期监测信息管理系统开发的几点考虑	吴云芳	何金平	程丽	(354)
大坝安全风险评估初探	周元春	薛桂玉	何金平	(359)
三门峡大坝安全监测与运行管理	程利平	周建强	王青	(366)
沙溪口大坝灌浆廊道裂缝调查分析	何金平	龚静	黄剑文	(370)
.Net 技术处理多种客户端在 DSIMS4.0 系统中的应用	徐骏			(375)

监测仪器与系统

土坝渗流热监测理论研究

李端有¹ 熊 健¹ 王 煌²

(1. 长江科学院 水利部水工程安全与病害防治工程技术研究中心 湖北省武汉市 430010;

2. 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院 湖北省武汉市 430010)

摘 要 本文对土坝渗流热监测技术的基本原理、研究历史和现状进行了介绍,对土坝的热学特性以及土坝温度与渗流的关系等关键技术问题进行了讨论。以匀质土坝为例,提出了渗流场和温度场的耦合模型,分析得到了渗流场和温度场之间的定量关系,依据理论分析的结果选用了适宜的数学模型,并采用简单并行之有效的优化算法,通过有限元数值计算分析工作,对渗流场进行反分析,得到了渗流场的渗透系数;从而通过监测土坝坝体温度实现对土坝渗流状态的监控。

关键词 土坝 渗流热监测技术 温度 渗流 耦合

1 渗流热监测技术的基本原理

土石坝的土石体介质内非渗流区的温度场分布受单纯的热传导控制,当土石体内存在大量水流动时,土石体热传导强度将随之发生改变,土石体传热传递将明显被流体运动所引起的对流热传递所超越。即使很少的水体流动也会导致土石体温度与渗漏水温度相适应,由此引起温度场的变化。

将具有较高灵敏度的温度传感器埋设在土坝的坝体或内部的不同深度,如测量点处或附近有渗流水通过,将打破该测量点处附近温度分布的均匀性及温度分布的一致性。土体温度随渗水温度变化而变化。在研究该处正常地温及参考水温后,就可独立地确定测量点处温度异常是否是由渗漏水活动引起的,这一变化可作为渗漏探测的指征,从而实现对土体内集中渗漏点的定位和监测。

2 渗流热监测技术的研究历史和现状

2.1 利用点式热敏温度计测量温度进而监测渗流场

早期渗流热监测技术主要是通过在水工建筑物或其基础内埋设大量热敏温度计来进行温度测量的。美国加利福尼亚 Occidental 大学地质系的 Joseph H. Birman 等人从 1958 年开始研究利用这一技术勘探地下水,1965 年 Joseph H. Birman 将这一技术用于水坝的漏

水探查中,并申请了专利。上述测量方法的致命缺陷是对土体内温度实施点式测量,因测量点有限,对温度场分布中的不规则区域集中渗漏可能发生漏检。

2.2 分布式光纤热渗流监测技术

近年来,各种类型分布式光纤传感器系统有了迅速发展,现有的光纤温度测量系统能够沿长达40km的光纤上实时连续采样并能对测量点定位,测温精度和空间分辨率也都有很大的提高。当存在渗漏水流时,光缆加热过程中可以看到渗漏区的明显温度分布异常。在对土坝渗流场监测方面以其直观、准确,成本相对较低的优势,具有广阔的发展前景和良好的应用价值。但目前停留在定性判断阶段,为了进一步定量地了解渗流场的分布,求得渗流场的水力要素,还需要利用量测得到的温度来进行渗流场反分析,得到渗流场的渗透系数,从而进一步更有效地对渗流场进行定量监测。但目前缺乏一套完善的成系统的理论,这就需要进一步发展渗流热监测理论。

3 土坝的热学特性

土坝的热学特性比较复杂,它包括诸如热传导、对流热传输和热辐射等基本热过程。其中,来自太阳的辐射和对大气层的辐射的影响仅局限在大坝表面,主要是昼夜间短脉冲,因此,一般情况假定坝内部温度与坝表面的辐射无关。

3.1 热传导

热传导主要发生在垂直方向,因为地热的基流是向上运动的,空气温度变化引起的年温度脉冲是向下运动的。地热流动通常比较小,约 $0.1\text{W}/\text{m}^2$,大多数情况下可忽略不计。坝体内非渗流区的温度是由热传导控制的。

3.2 对流热传输

热的对流方式传输比纯热传导更有效,坝体内只要有小量的水流就会对温度分布产生相当大的影响。所以温度是探测土坝内渗漏的一个非常敏感的指标。

4 土坝温度场与渗流场的关系

坝体中渗流场与温度场是相互作用、相互影响的。坝体中渗流场与温度场双场相互作用、相互影响的结果,会使双场耦合到达某一动平衡状态,形成温度场影响下的渗流场及渗流场影响下的温度场。

温度场和渗流场耦合的过程实际上是热能和流体在介质中一个动态调整变化的过程,一方面从物理过程来看,热能通过介质的接触进行热交换,而渗流流体则因存在势能差在多孔介质的孔隙进行扩散和流动,同时流体也作为热能传播的介质,在多孔介质中携带热能沿运动迹线进行交换和扩散。另一方面从理化过程来看,热能的变化导致介质温度的变化,从而影响介质和流体本身的理化特性的改变,主要表现为介质和流体体积效应的改

变, 和流体流动特性参数的改变等方面。因此, 渗流和温度相互影响的过程实际上包括了能量平衡和耗散过程, 以及媒介物质发生理化反应等过程。

渗流场和温度场的相互影响、相互作用的过程是一个十分复杂的问题, 目前综合考虑这两方面相互影响问题的研究还比较少, 且大多处于定性研究的阶段上。为达到通过对温度场的监测期望获得渗流场的变化情况这一目的, 本文将从渗流场和温度场耦合的角度进行定量的探讨。

4.1 温度变化对渗流场的影响

温度变化时会影响水体和土体的物理和化学参数, 从而影响渗流场在坝体内部的分布。土体中与渗流场和温度场密切相关的参数有孔隙率、比热容、热传导、导热系数等参数, 这些参数中在温度变幅为 10°C 内变化极小或无变化, 故可认为温度变化对土体的这些参数没有影响。水体物理化学参数中和温度场、渗流场密切相关的参数包括密度 ρ 、重度 γ 、粘度 μ 、导热系数 λ 、热膨胀系数 θ 、水体导温系数 α 、比热 c 、运动粘度系数 ν 等参数。假定水温从 $T_1 = 15^{\circ}\text{C}$ 上升到 $T_2 = 20^{\circ}\text{C}$, 研究温度变化对水体的物理化学性质的影响过程中, 比热 c 、密度 ρ 、导温系数 α 、导热系数 λ 、重度 γ 在 $15 \sim 20^{\circ}\text{C}$ 之间变化较小, 可以不计其影响; 运动粘度系数 ν 、动力粘度系数 u 和水体热膨胀系数 θ 的变化直接影响水体渗流特性, 因此在耦合计算分析中需要考虑。

土坝等水工建筑物土体饱和状态时, 温度发生变化时, 必然引起土石体和孔隙水的体积发生变化, 通常情况下 (对水而言大于 4°C 时) 温度上升时, 体积膨胀, 孔隙水压力将上升。在总应力保持不变情况下, 孔隙水压力上升必然会导致有效应力的相应减小, 进而引起水体的体积及土体体积的进一步变化, 因此, 在温度变化时, 介质内固相体积、孔隙水体积, 有效应力、孔隙水应力将进行调整, 重新达到平衡状态, 满足总体积不变和质量守恒的条件。可以定量地认为, 当温度上升时, 有效应力减小, 孔隙水压力增大, 即渗透压力增大, 当温度下降时反之。又根据现有研究证明: 由温度差形成的温度势梯度也会影响水的流动。由于温度势本身就是较为复杂的问题, 因此, 温度对水流运动的影响目前只能用温度梯度的一种经验表达式。例如, 对一维情况, 有^[7]:

$$q_{Tx} = -D_T \frac{\partial T}{\partial x}$$

式中: q_{Tx} 为温度变化引起的水流量; D_T 为温差作用下的水流扩散率, D_T 中已经包含水体和土体的热膨胀系数, 物理化学变化系数的影响。

温度沿 x 维坐标轴 x 方向的梯度为

$$q_x = -K(T) \frac{\partial H}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_y = -K(T) \frac{\partial H}{\partial y} - D_T \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_z = -K(T) \frac{\partial H}{\partial z} - D_T \frac{\partial T}{\partial z}$$

可推出温度场影响下的渗流场方程

$$\nabla(K \nabla H) + \nabla(D_T \nabla T) = S_s \frac{\partial H}{\partial t}$$

式中: S_s 为储水系数。

4.2 渗流场对温度场的影响

水体从坝体中流过, 当两种介质存在温度差时, 必然产生热量交换。坝体或坝基内部存在渗流时, 其热量交换应包括两部分: 一部分为本身的热传导作用; 另一部分为渗流夹带的热量。

在一向导热的情况下, 当土坝内部存在渗流时, 热流量包括两部分: 一部分是由于土体本身的热传导作用, 等于 $-\lambda aT/a_x$; 另一部分是由渗流夹带的热量, 等于 $c_w \rho_w vT$, 因此热流量为^[8]

$$q_x = c_w \rho_w vT - \lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

式中: q_x 为沿一维坐标轴 x 方向的热流量; c_w 为水的比热; ρ_w 为水的密度; λ 为土的导热系数。

因此, 在单位时间内流入单位体积的净热量为

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} = -c_w \rho_w \frac{\partial(vT)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

这个热量必须等于单位时间内坝体温度升高所吸收的热量, 故

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -c_w \rho_w \frac{\partial(vT)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

式中: c 为土体的比热; ρ 为土体的密度。

将该式推广到三向导热的情况下, 可得到考虑渗流影响下的温度场三维导热方程

$$\nabla[\lambda \nabla T] - c_w \rho_w \left[\frac{\partial(v_x T)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y T)}{\partial y} + \frac{\partial(v_z T)}{\partial z} \right] = c\rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

根据渗流场对温度场的影响机理分析, 可以知道渗流速度直接影响了温度场的变化。

4.3 渗流场和温度耦合的一维求解

理论上, 能同时满足两组数学模型的渗流场水头分布 $H(x, y, z, t)$ 与温度场分布 $T(x, y, z, t)$ 即为土坝渗流场与温度场耦合分析的精确解, 这就需要联合求解两式。众所周知, 在大多数情况下, 目前在数学上要单独求解每式的解析解也是不可能的, 联合求解则更是难上加难。所以有必要讨论一下双场在一维状态下的解析解, 从而得出一些结论。

假定一维渗流场和温度场的边界条件为

$$\begin{cases} x \in [0, l]; & H(0) = l, H(l) = 0 \\ & T(0) = T_1, T(l) = T_2 \end{cases}$$

求解可得近似解析解, 渗流场影响下的温度场分布和温度场影响下的渗流场分布为

$$T_1(x) = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{x}{l} + (T_1 - T_2)$$

$$\left[-\frac{l-x}{l} + \frac{(e^{ax} - e^{la})}{1 - e^{la}} \right] = T_0(x) + T_H(x)$$

$$H_1(x) = l - x + \frac{-(T_1 - T_2)be^{ax}}{1 - e^{la}} + \left[-\frac{b(T_1 - T_2)}{l} \right]x + \frac{b(T_1 - T_2)}{1 - e^{la}}$$

$$= H_0(x) + H_T(x)$$

若取工程中的参数如下:

$$l = 100\text{m}, T_1 = 100^\circ\text{C}, T_2 = 0^\circ\text{C}, c_w = 4.1868\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$c_w = 4.1868\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}), D_T = 1.01 \times 10^{-12}\text{m}^2/(\text{s} \cdot \text{K}),$$

$$\rho_w = 10^3\text{kg}/\text{m}^3, \lambda = 2.575 \times 10^{-3}\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{K})$$

取 $k = 10^{-9}, 10^{-8}, 10^{-7}, 10^{-6}, 10^{-5}\text{m/s}$ 时, 分别计算 $H_0(x), T_0(x), T_1(x), H_1(x)$ 并用图 1~图 4 表示。

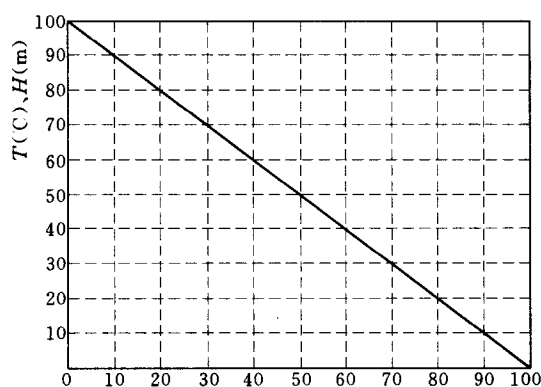


图 1 不考虑耦合情况 $H_0(x)$ 、 $T_0(x)$

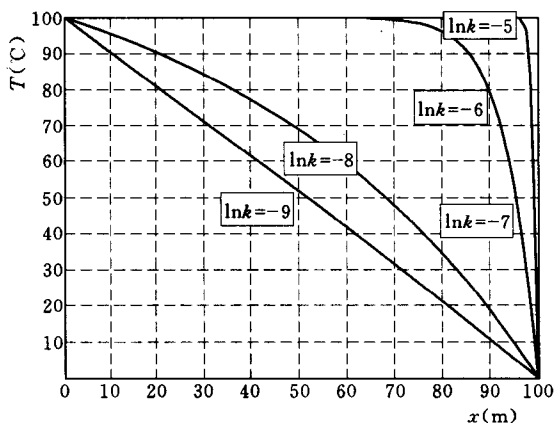


图 2 考虑耦合情况不同 K 值下温度 $T_1(x)$ 比较

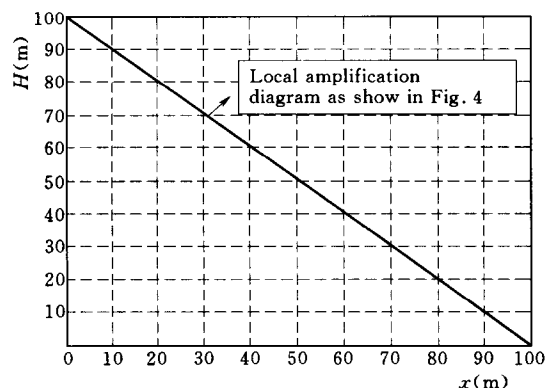


图 3 考虑耦合情况不同 K 值下 $H_1(x)$ 比较

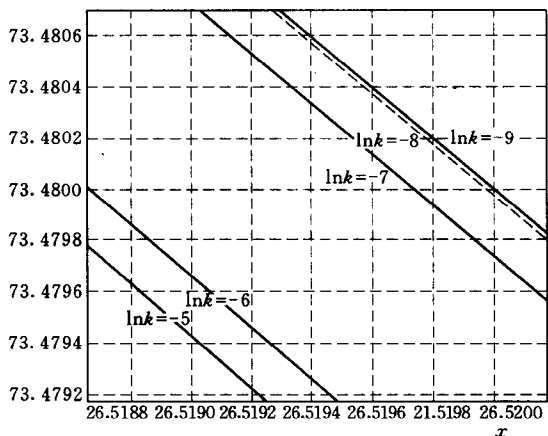


图 4 考虑耦合情况不同 K 值下比较局部放大图

由图 1~图 4 可以看出, 耦合解析解 [即 $T_1(x)$ 及 $H_1(x)$] 与非耦合解析解 [即 $T_0(x)$ 及 $H_0(x)$] 有很大的不同, 渗流场对温度场的影响更为明显。还可以看出, 随着渗透系数的增大, 渗流场对温度场的影响更加明显, 而温度场对渗流场的影响减弱; 且渗流