

中国工程热物理学会

传热传质学学术会议

论文集

(下 册)

一九九八

合肥

中国工程热物理学会编



传热传质学目录(下册)

六. 数值模拟

- 983001 浸没于液体中的微小金属薄膜在激光脉冲加热下温度场的变化 李骥、张正芳 VI-1-6
- 983003 利用神经网络外推预测干燥过程降水率 吴涛、刘登瀛、许晓鸣、张浙 VI-7-8
- 983049 再入飞行器驻点流光电特性的理论建模 崔国民、谈和平、阮立明 VI-15-8
- 983065 齿型翅片管肋效率的数值计算 程贵兵、陈远国 VI-23-5
- 983081 混合对流绕圆柱涡旋脱落及对传热影响的数值研究 李光正、罗军、黄素逸 VI-28-7
- 983087 非均分网格 QUICK 差分格式 魏进家、权晓波、姜培正、宇波 VI-35-6
- 983088 Computation and Comparison for Heat and Fluid Flow Using QUICK and Other
difference Schemes ... Mo YANG、Wenquan TAO and Hiroyuki OZOE VI-41-8
- 983091 环扇形通道内湍流充分发展段的流动与换热的数值模拟 李增耀、王秋旺、陶文铨 VI-49-8
- 983120 陶瓷多孔体蓄热特性研究及其非稳态过程数值模拟 胡成、李成之 VI-57-8
- 983123 微细尺度对流体饱和和性质影响的 Monte Carlo 模拟 陈民、过增元 VI-65-5
- 983130 球形液化气容器在火焰环境下的热响应 单彦广、俞昌铭 VI-70-5
- 983133 宫颈癌微波热疗温度场的计算机模拟 胡振君、王怀军、南群、彭风曙 VI-75-7
- 983141 液体火箭发动机推力室发汗冷却传热过程的数值模拟 姜培学、任泽需、张左璠、陈旭扬 VI-82-8
- 983142 箱装发射药储存时非稳态耦合传热过程的数值模拟研究 姜培学、任泽需、江劲勇、陈明华、路桂娥 VI-90-8
- 983103 反向凝固器内铜液流动及相变传热的数值分析 张欣欣、卢彤、冯妍卉、王新华、许中波 VI-98-6
- 983105 线接触弹流润滑区域温度场的多重网格解 张广军、孟惠荣、温诗铸、黄平 VI-104-6
- 983113 汽轮机叶片中带侧向喷气孔的钉肋肋列通道传热的熵产分析 苏亚欣、骆仲决、岑可法 VI-110-6

983145 平行通道模拟热管融化起动过程的双倒易边界元分析	卢文强、曾蕴涛 VI -116-7
--------------------------------------	-------------------

七. 测量及显示技术

983008 PS-2119A/D 板在太阳能热水器热性能测试中存在的问题及分析	陈凡、吴明长、王志峰 VII -1-8
983017 应用热成像技术测量高温气流温度场	朱德忠、廖理 VII -9-5
983019 氩等离子体射流冲击平板壁面处电子温度的实验测量	李和平、张江龙、陈熙 VII -14-6
983034 超流氦中的热波实验研究	张鹏、王如竹 VII -20-6
983104 应用 LC/PIV 测量热毛细对流温度场和速度场	张曦、冯传玉、何世平 VII -26-6
983106 伍德合金相变过程中固、液相熔点导热系数的测定	周子民、杨怀东 VII -32-7
983132 热疗中组织温度的超声监测 — 装置部分: 一个双超声脉冲回波测量系统	夏雅琴、马蓉、彭见曙 VII -39-6
983140 薄带状物体热扩散系数测量方法的研究	张欣欣、左燚、于帆 VII -45-4
983136 混合二氯苯物系显微镜热台定向结晶过程实验研究	张建文、张政 VII -49-6

八. 工业应用、换热器及其它

983002 半环对撞流干燥的实验研究	淮秀兰、刘登瀛、吴涛 VIII -1-8
983014 流化床焚烧炉中颗粒扩散特性理论研究	魏小林、田文栋、孙满弟、盛宏至 VIII -9-7
983022 Convection Heat Transfer of High Moisture Content Gas 高水分烟气对流传热的理论分析	张衍国、王补宣、郭亮、彭晓峰、柯道友 VIII -16-8
983036 结霜翅片管式蒸发器压降特性的实验及仿真分析	于兵、冯寅山、阙雄才、陈芝久 VIII -24-5
983039 空调客车室内气流组织数值研究	吴俊云、童灵、陈芝久 VIII -29-6
983040 用于动态预测空调车室内温度分布的经验分布	童灵、李圣、陈江平、于兵 VIII -35-6
983042 轿车空调制冷系统与车室内部空气流场温度场的耦合特性研究	陈江平、陈芝久、阙雄才 VIII -41-6

983041	空调轿车室内三维空气流场温度场的数值模拟与实验研究	陈江平、陈芝久、阙雄才	VIII-47-6
983043	CO ₂ 速冻厢体内部温度场的数值模拟和试验研究	陶正良、钱锐、蔡保元、陈康民	VIII-53-5
983050	采用蒙特卡罗法的小卫星热分析计算	夏新林、孙凤贤、谈和平、高劲伦	VIII-58-4
983056	气流参数对冻结过程的影响	马一太、何绍书、郇中杰	VIII-62-6
983058	红外线螺旋式振动流化床干燥周期的分析	张宇、李汛、褚治德、周跃庆、朱强	VIII-68-6
983059	红外烤漆机理及轮毂模拟烤漆实验研究	褚治德、张宇、诸凯、李汛、汪健生、朱强	VIII-74-6
983060	双行程红外辐射振动流化种子干燥的传热传质研究	诸凯、褚治德、李汛、杨俊红	VIII-80-6
983061	蔬菜种子的非稳态干燥动力学特性与优化变温干燥机理研究	杨俊红、褚治德、吕灿仁	VIII-86-8
983066	翅片涂敷层的传热与吸附特性研究	童明伟、李玉春	VIII-94-5
983068	炉顶平焰加热炉供热负荷的变化对流场的影响	潘良明、刘成全、辛明道	VIII-99-5
983071	钢筋混凝土火灾下热湿耦合热过程研究	冯雅、陈启高、王尔其	VIII-104-5
983072	桥梁红外热特征分析	洪宇平、宣益民、韩玉阁	VIII-109-6
983074	闭式循环汽—液两相逆向流动管内流动和传热的理论分析	牟其峥、牟楷	VIII-115-6
983083	传热与流动系统熵产生的研究与进展	李大鹏、韩仁余、孙丰瑞	VIII-121-5
983086	对 CELS 算法在多重网格下的计算实践	何伯述、李彦鹏、许晋源	VIII-126-6
983093	油冷变压器自循环流量及传热研究	曹惠玲、俞颐秦、吕灿仁	VIII-132-6
983098	食品过热蒸汽干燥的实验研究	李业波、J. Seyed-Yagoobi R. G. Moreira	VIII-138-8
983099	脉动燃烧干燥技术综述	李保国、曹崇文、刘相东	VIII-146-6
983107	大型预焙铝电解槽电解温度动态预报	周乃君、胡志坤、梅炽	VIII-152-5
983110	垂直表面自由液体降膜流动表面波的数值模拟	叶学民、阎维平、蒋章焰、高正阳	VIII-157-6

983117	采用 OMEGA 非均匀加热棒束热端破口实验数据对 CATHARE2 V1.5qR6 程序的评估	黄彦平、I. DOR、D. Bestion、B. Faydide	VIII -163-8
983124	番茄升华干燥过程的理论模型和时间预测	李蔚、陈民	VIII -171-6
983128	板—翅式换热器设计优化数值研究	宿国光、神家锐	VIII -177-5
983129	吸附床两相传热传质强化分析	徐靖中、江涛、陈坚、赵伟	VIII -182-6
983134	片式散热器传热特性分析及实验研究	陈玉宙、苟峰、杨春生、张汉勋、许国华	VIII -188-8
983139	舰船中压汽包锅炉蒸发系统运行特性及仿真	姚寿广、朱宽仁、朱德书、周剑平	VIII -196-8
983143	微尺度换热器的实验研究及性能评价	姜培学、范明红、任泽霏	VIII -204-8
983012	单面定向对流铸铁散热器的热工性能测试及分析	陈焕倬、顾维藻、刘文艳、张兴	VIII -212-6

九. 辐射换热

983018	红外景象投射器电阻加热微桥阵列的热辐射特性测量	顾毓沁、朱德忠、李红松	IX -1-6
983045	吸收散射性三维矩形介质内辐射源项的反问题	刘林华、谈和平、徐其铮	IX -7-8
983046	圆柱坐标系中辐射传递方程的离散坐标解法	刘林华、贺志宏、丘加友、谈和平、余其铮	IX -15-7
983047	含微粒非灰半透明流体层对入射辐射吸收的蒙特卡罗法模拟	夏新林、黄勇、谈和平、余其铮	IX -22-6
983048	用伪光源迭加法计算具有镜反射弯曲表面的半透明介质层表观光谱发射特性 ..	黄勇、夏新林、谈和平、余其铮	IX -28-8
983051	红外多光谱扫描仪遮阳罩与主体段的温度场分析	夏新林、谈和平、孙凤贤、肖淑琴	IX -36-5
983052	激光脉冲在吸收、各向同性散射性介质内引起的温度响应	谈和平、阮立明、刘林华、余其铮	IX -41-10
983078	一种非灰气体辐射传热的简化算法	邢华伟、殷健、柳朝辉、郑楚光	IX -51-6
983079	长方形封闭腔内吸收—发射—散射介质的三维辐射换热分析	邢华伟、郑瑛、郑楚光	IX -57-5
983085	用于故障诊断的印刷电路板 (PCB)	华顺芳、于胜学	IX -62-6

浸没于液体中的微小金属薄膜 在激光脉冲加热下温度场的变化

李 骥 张正芳

(中国科学院工程热物理研究所 北京 2706 信箱 100080)

摘要

本文对浸没于液体工质中的金属薄膜在激光脉冲加热下薄膜及工质在沸腾前及停止加热后的温度场进行了数值模拟, 得出了激光辐射强度与金属薄膜表面温升速率的关系; 得出了不同温升速率下液体工质内达到均质核沸腾理论温度时的温度场及其变化过程以及不同的温升速率所要求的激光脉冲强度及时间, 为以后进行超急速沸腾实验有关参数的确定、实验过程的监控以及处理实验数据打下基础。

前言

传统上对沸腾现象的研究, 温升速率(以下以 r 表示)较低, 主要原因是加热的能量密度小并且加热时间长, 研究的着眼点主要放在加热面的特性对沸腾的影响, 其 r 一般在 $10^{-3} \sim 1 \text{ K/s}$ 以下。随着现代科技的发展, 一些极端条件的沸腾传热问题逐渐成为各国学者研究的热点, 例如, 高温液体失压以及低温液体的贮存, 原子核反应堆中核燃料的泄漏引起的沸腾爆炸, 金属高温淬火中的沸腾现象等; 喷墨打印机的电脉冲加热喷头, 激光照射局部生物组织的外科手术, 利用激光清理贵重物件表面的微小污染物等等。以上例子中所出现的沸腾现象的共同点是沸腾发生是如此的快速和剧烈, 以至于在液体中微小气泡瞬间布满整个加热面附近的微薄区域(俗称“鱼子酱”气泡), 这与传统的表面沸腾现象是完全不同的, 也与建立在均匀液体温度及平衡态热力学基础上的均质核沸腾有着差别, 其加热面极高的温度变化及很薄的过热边界层是该现象的主要表现, 我们把该现象称为超急速沸腾现象, 据文献资料^{[1][2][3]}, 超急速沸腾现象发生的场合, r 不小于 10^3 K/s , 有的研究已达到 $9 \times 10^7 \text{ K/s}$ 左右。从七十年代开始俄、日、美、德、英等国的科学家对超急速沸腾现象进行了一些研究, Skripov et al (1974) 对有机液和水, Derewnicki (1985) 对水, Sinha 对液化气, Asai (1987) 对甲醇^[2], Okuyama 和 Inda (1991) 对液化氮和水^[1], H. k. Park (1994) 对水和甲醇^[3]等等做了实验, 他们的温升速率分别为: Skripov 和 Derewnicki 的 $r \leq 11 \times 10^6 \text{ K/s}$, Okuyama 和 Inda 的 $r \leq 93 \times 10^6 \text{ K/s}$, H. K. Park 的 $r \leq 9 \times 10^7 \text{ K/s}$, 其中 Skripov、Derewnicki 采用了电阻丝脉冲加热, Inda、Asai 采用了金属薄膜电脉冲加热液体, 而 Park 采用了激光加热方式。但是, 对于沸腾现象本质的理解, 依然存在一些不甚明了的地方: 对于液体内部产生均质核沸腾的微观机理不清楚; 没有一个较为全面的物理模型, 尤其是对气泡形成和消失过程; 建立在经典热力学上的均质核沸腾理论与实际实验值有差别; 对控制沸腾发生的条件和手段没有明确的认识, 例如, 在什么条件下液体内部可达到最大过热极限, 汽化核心的数目同过热度度的关系, 临界气泡半径同过热度、液体种类等的关系, 等等。尽管已有理论可以近似说明问题, 但是有效地控制核化沸腾仍是一个棘手的、关键的问题, 尤其是在超急速沸腾这样非常条件下的传热场合。

作者试图用激光加热浸没于液体中的金属薄膜,使其产生较高的温升速率,观测液体发生超急速沸腾时有关现象并对其进行分析。本文针对建立的实验装置抽象出不同激光能量密度条件下金属薄膜及其周围工质的温度变化的导热模型,然后对几种加热条件进行了数值模拟。通过数值模拟, 1) 得出了某次激光辐射下,金属薄膜的温度变化,以及不同加热条件下液体沸腾前和停止加热后温度场的变化,得出了金属表面温升速率达到 $1 \times 10^3 \text{ k/s}^{-1}$ 所需的加热条件,为以后实验和理论分析打下初步基础; 2) 可以对比温升变化,反推其工质实际吸热量; 3) 为全面的沸腾换热模型打下初步基础。

数学模型

1 数学模型

在图 1 中示出实验件示意图,金属薄膜受热件由 $0.1\mu\text{m}$ 厚的黑铬镀层和 $0.8\mu\text{m}$ 厚的铂镀层组成,基质为石英玻璃,其受热面直径为 $\Phi 1\text{mm}$,由于其直径是厚度的 1000 倍,故其表面可示为平板受热面。如此小薄的受热面是为了保证在接收一定的脉冲辐射能量后,会产生一个非常高的温升速率,并且可以使金属薄膜的温-阻特性曲线变化显著,这样有利于保证测量结果的精确度。

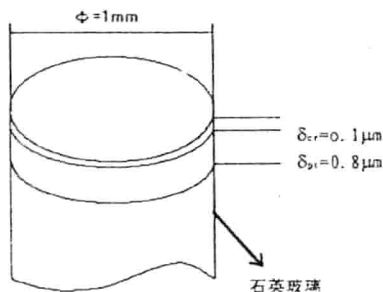


图 1 实验件结构示意图

激光加热器的波长为 $1.06\mu\text{m}$,其脉冲宽度为 $10\sim 30\mu\text{s}$,脉冲光斑直径为 $1\text{mm}\sim 10\text{mm}$,在实验时激光一次脉冲的能量密度最高可达约 $1 \times 10^4 \text{ Mw/m}^2$ 。

本实验件为圆柱状,并且为激光加热,这样抽象出的二维导热模型是足够精确的。该二维导热模型具有瞬态、变导热系数、较复杂的边界条件的特点。

依据柱坐标二维导热方程,针对实验件结构(图 2),有如下的数学表达式:

$$\text{控制方程为: } \left\{ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right.$$

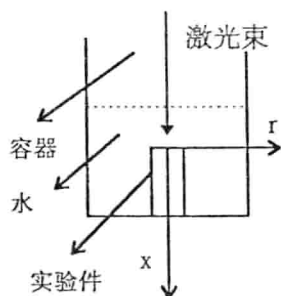


图 2 实验装置简图

初始条件: $\tau=0, T(x, r, 0) = T_0$;

边界条件: $0 \leq r \leq R, x=0$,

$$-\left(k \frac{\partial T(0-, r, \tau)}{\partial x} \right) - \left(k \frac{\partial T(0+, r, \tau)}{\partial x} \right) = q(0, r, \tau) = FU(\tau)$$

其中 F 为激光脉冲能量被金属表面吸收的部分,

$$U(\tau) = \begin{cases} 0, & \tau < 0 \\ 1, & 0 \leq \tau \leq \tau_0, \tau_0 \text{ 为一次激光脉冲时间} \\ 0, & \tau > \tau_0 \end{cases}$$

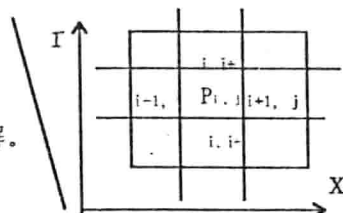
2 数值计算

1) 控制方程的离散及求解

采用两步隐式格式,即 P-R 格式及 ADI 方法求解。

有关网格划分信息见右图,差分格式如下式;

边界条件的处理:在 $x=0, 0 \leq r \leq 500\mu\text{m}$ 处,



引入第二类边界条件, 离散方程同下式, 但在离散方程的右边加上 $FU(\tau)\Delta S$, 式中 ΔS 为控制微元的前端面积 $r_p \Delta \theta \Delta r$ 。

$$\frac{U_{i,j}^{n+1/2} - T_{i,j}^n}{\Delta \tau / 2} = a(\delta_r^2 U_{i,j}^{n+1/2} + \delta_r^2 T_{i,j}^n), \quad \frac{T_{i,j}^{n+1} - U_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta \tau / 2} = a(\delta_r^2 U_{i,j}^{n+1/2} + \delta_r^2 T_{i,j}^{n+1}) \quad (1)$$

$$\text{其中 } a = \left(\frac{k}{\rho c} \right)_p, \quad \delta_r^2 U = \frac{U_{i+1,j} - 2U_{i,j} + U_{i-1,j}}{(\Delta r)^2}, \quad \delta_r^2 T = \frac{Q + \frac{\Delta r}{r_{i,j}} T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + \left(1 - \frac{\Delta r}{r_{i,j}}\right) T_{i,j-1}}{(\Delta r)^2}$$

2) 计算区域的确定

对于无边界问题的数值求解, 大都采用人为边界, 即在任何热交换的边界上采用绝热, 或者在边界与边界外的介质随时处于热平衡则采用定常边界温度。由于一次激光脉冲的能量不超过 7-8 mJ, 被液体工质及金属薄膜吸收的能量不超过 5mJ, 故其实际影响区域很小, 据估算, 该能量仅够 0.3^3 (mm^3) 的水温升高 1°C , 把计算区域取为 $\pi \times 600^2 \times 200$ (μm^3), 足可以保证其边界温度不会变化, 即在边界上, 温度维持 T_0 不变。从计算结果可看出其实际热影响区是很小的。

该格式是无条件稳定的, 根据 Fourier 分析法和 Von Neumann 条件^[6], 经过计算, 上面关于柱坐标的二维离散两步 P-R 格式其过渡因子为:

$$G(r, K) = \frac{(1 - a\lambda_1 \sin^2 \frac{k_1 h}{2})(1 - 2a\lambda_2 \sin^2 \frac{k_2 h}{2} + j \frac{a\lambda_2 \Delta r}{r_{i,j}} \sin k_2 h)}{(1 + a\lambda_1 \sin^2 \frac{k_1 h}{2})(1 + 2a\lambda_2 \sin^2 \frac{k_2 h}{2} - j \frac{a\lambda_2 \Delta r}{r_{i,j}} \sin k_2 h)}, \quad \text{显然, 有 } |G(r, K)| \leq 1 \text{ 成立。}$$

计算结果与分析

由 Laplace 方程和 Clausius-Clapeyron 方程以及热力学第二定律, 我们知道水在一个大气压下发生均质核沸腾所需的过热度, 虽然不同学者考虑的因素略有不同, 但计算结果差别不大 (几十 K), 其中 Skripov 结合实验结果通过计算给出 585.65K 作为水的均质核沸腾的理论值。根据参考文献^[1]上已有的数据, 作者针对几种实验工况进行了计算 (仅对工质为水的情况)。

图 3 为金属薄膜中心点处的温升速率 r 与金属表面吸热量 F (分别为 452、134、198 Mw/m^2) 的关系曲线; 图 4 分别为不同温升速率下表面温度的变化过程; 图 5 分别为金属表面吸热量在 $F_1=452 \text{ Mw/m}^2$ 和 $F_2=134 \text{ Mw/m}^2$ 条件下工质达到均质核沸腾理论温度时的局部温度场及时间的计算结果。

从计算结果可以看出在不同的温升速率下, 液体工质的温度变化是不同的。图 5-1 为温升速率 $r_1=53.56 \times 10^6 \text{ K/s}$ 的计算结果, 图 5-2 为温升速率 $r_2=6.65 \times 10^6 \text{ K/s}$ 的计算结果, 从热边界层可以看出 r_1 的热边界层厚度极小, 仅有 $2-3 \mu\text{m}$ 左右, 而 r_2 下则有 $7-8 \mu\text{m}$ 左右。该结果同文献^{[1][2][3]}的结果是一致的。

以上计算均未考虑到激光辐射和金属表面及液体工质的辐射特性, 为了在实际应用中能更好地指导实验, 依据辐射网络, 考虑到液体工质对辐射能量的吸收及金属薄膜表面的辐射特性, 计算得出不同的温升速率下所需的激光辐射能量, 即 $F = \frac{(1 - \rho - \alpha) F_0 - E_{b,cr}}{\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon S} + \frac{1}{S X_{1,2}}}$, 式中 F_0 为所需的激光脉冲能量, F 即为金属薄膜

表面吸收的热量, ε 为金属薄膜表面铬镀层的黑度或辐射率, S 为金属薄膜表面面积,

$\chi_{1,2}$ 为金属薄膜表面对入射激光的角系数 $\chi_{1,2}=1$ ， α 为液体工质对入射波长 $\lambda=1.06\mu\text{m}$ 的激光辐射的吸收率， ρ 为液体表面对入射光的反射率。通过查文献^[6]，得到 $\epsilon=0.88-0.89$ ，由于目前对水的辐射特性了解不够，通过文献查得对 $\lambda=1.06\mu\text{m}$ 红外光水的透过

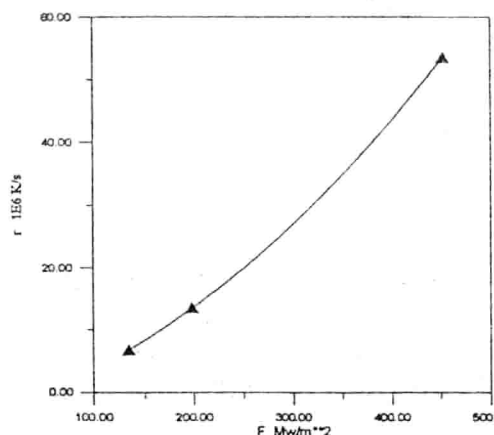


图 3 金属薄膜中心点处的温升速率 r 与 F 的关系曲线

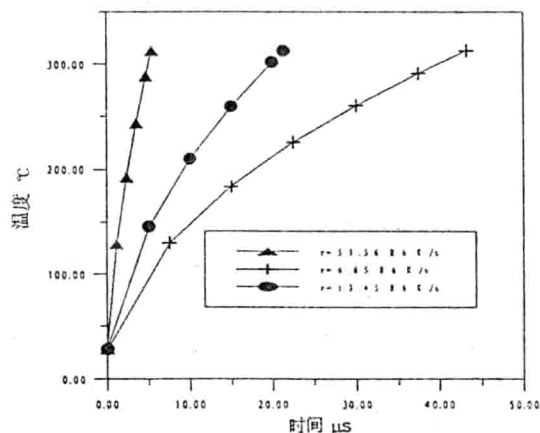


图 4 不同温升速率下表面温度的变化过程

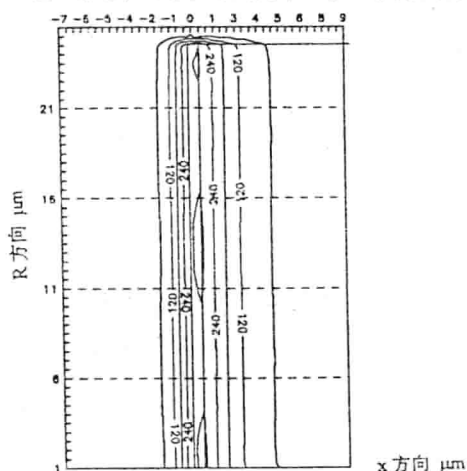


图 5-1 $F=452\text{Mw/m}^2$, $\tau=5.37\mu\text{s}$

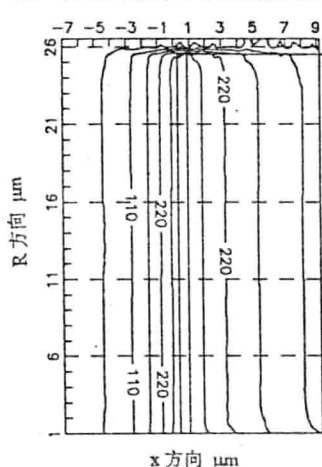


图 5-2 $F=134\text{Mw/m}^2$, $\tau=43.25\mu\text{s}$

图 5 金属表面吸热量在 $F_1=452\text{Mw/m}^2$ 和 $F_2=134\text{Mw/m}^2$ 条件下工质达到均质核沸腾时的局部温度场计算结果(说明, R 方向坐标值缩小 20 倍, 下同)

率约 $\tau=0.6$ ，这里假定吸收率 $\alpha=0.3$ ，而其反射率 $\rho=0.1$ ，以后经过测定后加以修正。金属薄膜表面并非为灰体，因此，其实际吸收的分额应由所测得的反射分额得出。这里仅为了得出所需的辐射能量的参考值，供确定实验参数时参考使用。

图 6 为考虑到液体和金属表面的辐射特性后 F 分别为 452、134、198 Mw/m^2 时的金属薄膜中心点处的温升速率 r 与 F 的关系曲线；图 7 分别为不同温升速率下表面温度的变化过程；把图 6、图 7 的结果同图 3、4 结果进行比较，可以发现即使考虑水对激光辐射能量的吸收其差别也不明显，其原因在于在如此小的激光照射下（几个毫焦），容器内水的温升几乎可以忽略。不过通过考虑金属表面及水的辐射特性，我们得到如果要使金属表面的热流密度达到某一数值，则激光的能量密度必须远高于该数值，因为液体和金属表面要反射一部分入射能量，液体要吸收一部分能量，其结果参见图 10。

图 8 为 $F=452\text{Mw/m}^2$ 时金属表面温度将要达到工质（水）的均质核态沸腾温度时的温度场及时间。从图 8 同图 5 对比可以发现其温度场变化极小，热边界层略有增大，温

升速率略有提高，这是因为水吸收辐射能量的结果。

图 9 为 $F=452\text{Mw/m}^2$ ，激光加热时间为 $5.5\mu\text{s}$ 下达到均质核沸腾前及停止加热后热边界层计算结果示意图。在超急速沸腾现象产生的场合，很高的温升速率导致微小边界

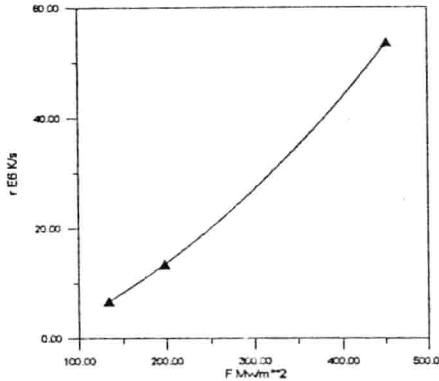


图 6 温升速率 r 与 F 的关系曲线
层和高的壁面过热度，通过文献^{[1][2][3]}知道核化汽泡半径在几个微米到几十个微米量

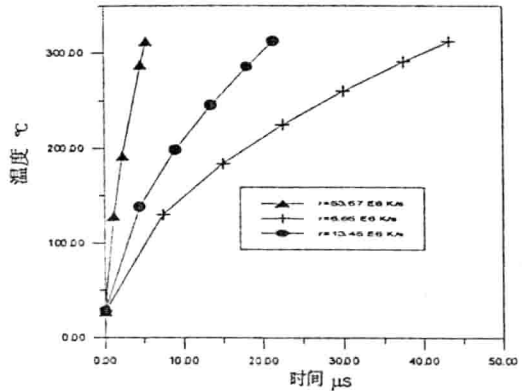


图 7 不同温升速率下表面温度的变化过程

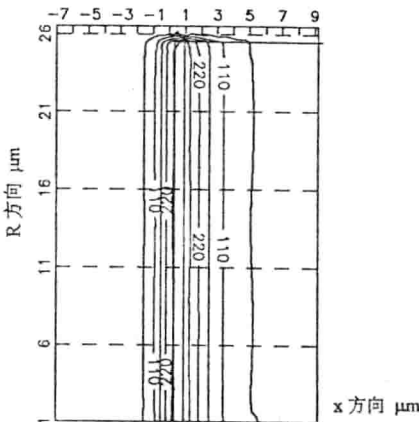


图 8 $F=452\text{Mw/m}^2$ 时工质达到均质核态沸腾温度时的温度场， $\tau=5.37\mu\text{s}$

级，这与图 9 所示的热边界层的计算结果是一致的。图 9-1 为金属表面中心位置沿高度方向的液体温度变化，其中曲线 1、2 为工质未达到均质核沸腾温度的情况，曲线 3 为达到均质核沸腾温度时的情况，曲线 4、5 为激光加热过后，液体温度的变化。可以看出热影响区逐渐外移，尤其在加热过后，这也是造成文献^{[1][2]}中所描述的脉冲加热过后，汽泡数依然增加的原因。图 10 为某温升速率 r 下所需的激光辐射能量密度及脉宽关系曲线图。在以后的实验中工况的选取则参考本图即可，不过不同的实验件结构有不同的温升变化，因此当实验件结构变化时，需要重新计算。

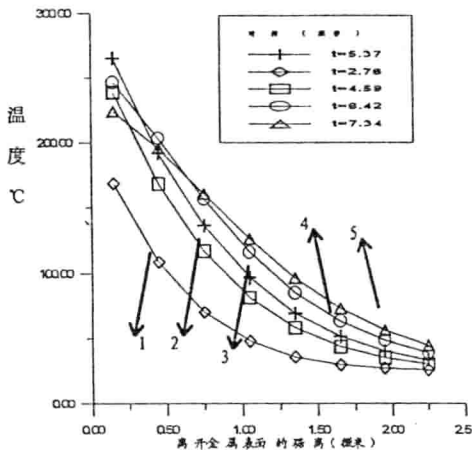


图 9-1 工质（水）温度随时间变化过程

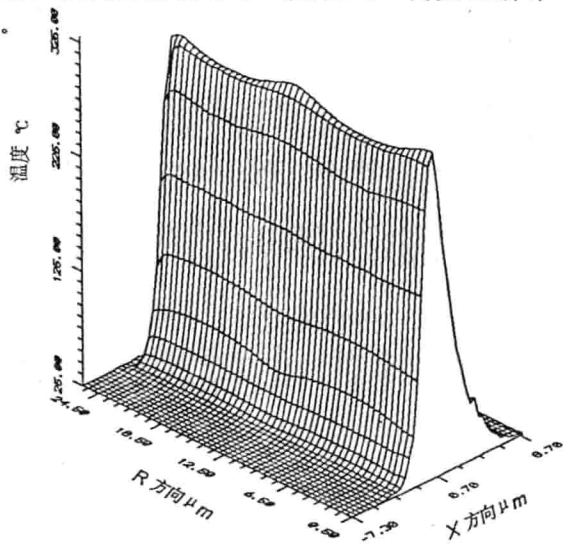


图 9-2 热边界层示意图

图 9 为 $F=452\text{Mw/m}^2$ ，激光加热时间为 $5.5\mu\text{s}$ 下热边界层计算结果示意图

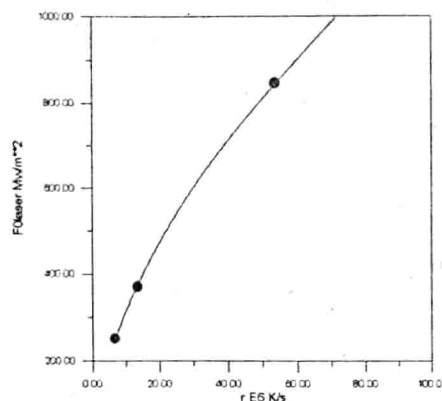


图 10-1 温升速率 r 与人射激光能量密度 F_0 的关系

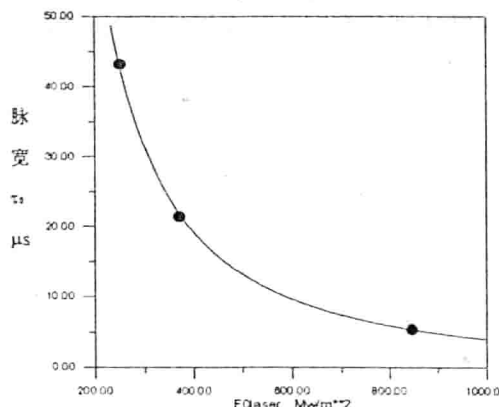


图 10-2 与激光能量密度 F_0 对应的脉宽 τ

图 10 温升速率 r 所需的激光辐射能量密度及脉宽关系曲线图

结论

本文针对超急速沸腾实验中使用的实验件结构抽象出工质及金属薄膜在激光加热下的导热物理模型，并对其进行了数值计算，得出以下结论：1) 在很高的激光能量密度脉冲照射下，在达到理论均质核沸腾温度时工质中的热边界层是非常小的，仅有几个微米；2) 在不同的温升速率条件下，较低的激光能量密度需要较长的加热时间才能达到均质核沸腾温度；3) 考虑工质及金属表面辐射特性对温度场影响不大，但是，激光辐射能量比金属实际吸热量大很多，其余一部分能量以反射形式离开容器；4) 热边界层随加热过程逐渐增大，加热停止后，在一段时间内热边界层依然增大，随后，由于周围工质的冷却，温度场整体下降。计算结果与理论认识是一致的，本文主要作用在于两方面，一是得出热边界层的量级及随时间的变化过程；二是得出了不同温升速率下所需的激光加热能量密度和加热时间的关系曲线，为以后的实验工作起到指导和参考作用。

本课题为中国科学院 95 基础课题重大项目（项目编号：KJ951-B1-704）。

参考文献：

1. Y. Iida and K. Okuyama, Boiling Nucleation on a Very Small Film Heater Subjected to Extremely Rapid Heating. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33, No. 17, pp2771-2780, 1994.
2. A. Asai, Bubble Dynamics in Boiling Under High Heat Flux Pulse Heating. J. Heat Transfer, 973/Vol. 113, 1991.
3. H. K. Park, X. Zhang, C. P. Grigoropoulos, C. C. Poon, A. C. Tam, Transient Temperature During the Vaporization of Liquid on a Pulsed Laser-Heated Solid Surface. Tran. the ASME, 702/Vol. 118, 1996.
4. 陶文铨, 《数值传热学》，西安交通大学出版社，1995。
5. 葛绍岩, 那鸿悦, 《热辐射性质及其测量》，科学出版社，1989。
6. 陆金甫, 关冶, 《微分方程数值解法》，清华大学出版社，1989。

利用神经网络外推预测干燥过程降水率^{*}

吴涛¹ 刘登瀛² 许晓鸣¹ 张浙²

摘要 对于垂直对撞流干燥系统, 本文给出了一种利用神经网络外推预测干燥过程降水率的方法。为了提高预测的快速性和准确性, 针对 BP 算法的缺点, 本文给出了基于目标函数的一阶和二阶导数同时优化学习率和确定动量系数的方法, 并将这种方法应用于外推预测物料降水率的过程之中。仿真结果表明, 对于运动规律十分复杂, 目前仍无法从其内部的运动机理和传热传质特性出发预测干燥过程降水率的一类高强度的干燥方式而言, 本文所提出的神经网络模型能够较正确、快速地预测干燥过程中物料降水率的变化。

1、引言

干燥, 几乎涉及国民经济的各个部分, 尤其在化工、农业、建材等领域, 更是一种主要的操作工艺。干燥的目的是使湿物料减少含水量, 是水份由液相转为气相, 直至两相平衡的过程。同时, 干燥又不仅仅是为了除去物料的多余水分, 还必须满足对干燥质量的不同要求。高效与优质相结合, 是发展现代干燥技术的主要目标。

近年来, 干燥理论、干燥技术和干燥工艺均取得了较大的发展, 对撞流干燥就是一种目前国内外正在研究开发的新型干燥方式, 具有高强度的干燥效果^[1]。它是在很短的时间内 (1~20 秒) 完成数倍乃至数百倍于常规干燥方式脱水量的一种超常的干燥工艺, 具有干燥强度大, 节能效果明显, 物料的干燥品质好以及设备紧凑, 适应性强, 易于推广等突出的优点, 其传热传质规律呈现出与常规过程明显不同的特征。方便而有效地建立对撞流干燥器的干燥特性, 即干燥过程中物料降水率的预测模型是设计对撞流干燥控制系统的一个重要基础, 有了适当的模型, 才便于开展有关的分析、设计、预报以及计算机仿真等研究工作。

传统上, 干燥特性预测模型的建立有两种方式, 一种是通过分析被干燥物料在干燥过程中的流动、传热传质特性而建立描述其干燥特性的数学模型, 然后通过对数学微分方程的求解进行干燥过程的预示计算^[2]。另一种方法则是根据对干燥机的实验或运行结果, 采用多项式模拟等近似方法获得干燥机的经验或半经验模型。实际上, 对于许多复杂的干燥过程而言, 采用多项式近似等方法获得的经验模型, 由于其过于简化, 在实际应用中, 由模型得出的结果与实际结果有时相差较远。而要建立干燥过程

^{*} 本课题得到了国家自然科学基金重点基金 (59736130) 和中国科学院“九五”基础性研究重大项目 (KJ951-B1-704) 的资助

¹ 上海交通大学, 上海, 200030

² 中国科学院工程热物理研究所, 北京, 100080

精确的数学模型, 需要解决很多困难, 其中包括确定动力学系数、确定被干燥物料和干燥介质的热物理特性等。即使建立了数学模型, 往往也会因为模型太复杂而无法用软件实现。尤其是对于对撞流干燥这类新型高强度的干燥方式而言, 颗粒在干燥器内悬浮流动, 高度湍流, 运动规律十分复杂, 目前仍无法从其内部的运动机理和传热传质特性出发建立准确模型。

近年来, 人工神经网络在过程控制界及其相关领域得以广泛的研究和利用。人工神经网络具有捕捉过程输入—输出之间的非线性关系的能力和强大的学习推理能力, 它不需要了解过程复杂的内在机理, 只需通过对训练样本的学习, 即可获得过程的动态知识, 故有望作为外推预测干燥机干燥特性的一种新方法。本文在对垂直对撞流干燥系统实施有效控制的过程中, 采用神经网络对干燥过程的物料降水率进行了外推预测, 为了提高预测的准确性和快速性, 本文针对常用 BP 算法收敛速度慢, 动量系数无法确定等缺点, 对 BP 算法进行了适当的改进, 提出了一种基于目标函数的一阶和二阶导数优化学习率以及确定动量系数的方法, 并将这种基于改进 BP 算法的神经网络预测方法应用于垂直对撞流干燥过程中物料降水率的外推预测之中。

2、基于神经网络的外推预测方法

2.1 神经网络的结构

神经网络是对生物神经系统的模拟, 它的信息处理功能是由神经元的激活特征、网络的拓扑结构、连接权的大小以及神经元的阈值所决定的。神经网络是由众多的神经元广泛相互连接而成的, 每层中的每个神经元与上、下层次各个神经元全连接, 模拟人脑神经元之间相互发出的抑制与激励信息, 连接强度是由连接权值所决定的。输入层的神经元是线性单元, 即:

$$y_i = x_i \quad (1)$$

式中, $i=1,2,\dots,n$, n 是输入层神经元的个数。而每个隐含层和输出层的神经元可以用如下的多输入、单输出单元来表达:

$$y_j = f\left(\sum_i w_{ij} x_i + \theta_j\right) \quad (2)$$

式中 $\{x_i\} i=1,2,\dots,m$ 和 y_j 分别表示神经元 j 的输入和输出变量, 而 $\{w_{ij}\} i=1,2,\dots,m$ 称为 $\{x_i\}$ 与 y_j 之间的连接加权, y_j 亦称为神经元 j 的激活值。

非线性变换函数 $f(\cdot)$, 即激活函数, 有多种形式, 通常选择如下的 Sigmoid 函数:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3)$$

2.2 基于神经网络的外推预测方法

从控制的角度来看, 神经网络所具有的建模非线性系统的能力, 即根据已知的输入—输出数据外推预测系统行为的能力是神经网络在控制领域中得以广泛应用的主要原因。非线性系统的多样性导致了到目前为止, 虽然已存在多种针对某种非线性系统

适用的传统分析和设计方法,如相平面法、线性化技术以及描述函数等,但还没有一种系统通用的非线性系统设计理论。由于神经网络具有不需要了解过程的内在机理而捕捉过程的输入输出之间非线性关系的特性,可以有效地解决非线性系统的多样性问题,因此利用神经网络对非线性系统的行为特性进行外推预测,是一种很有发展前途的方法。而且,很多文献中指出,一个三层 BP 网络可以实现以任意精度近似任何连续函数^[3],从这个意义上讲,神经网络模型也是一种具有任意逼近性质的函数类,从而在理论上为基于神经网络的外推预测方法奠定了基础。

神经网络的类型很多,但是用于外推预测问题的神经网络主要是多层前向网络模型。多层前向网络的输入输出关系可以表达为:

$$y(t) = NN[W, X(t)] \quad (4)$$

其中, NN 表示神经网络表达的非线性关系, $W \in R^N$ 是由网络连接权值和有关节点参数共同组成的网络学习参数, N 是网络节点总个数, $X(t)$ 是网络的输入向量, $y(t)$ 是网络的输出。基于神经网络的外推预测问题可以归结为确定网络的拓扑结构并找出一组网络学习参数 $W^* \in R^N$, 使得

$$\hat{y}(t) = NN[W^*, X(t)] \quad (5)$$

任意逼近(4)式所表示的非线性关系。

在神经网络的学习过程中,通常采用 BP 算法对网络参数进行学习。BP 算法可以充分利用多层前向网络的结构优势,在正、反向传播过程中的每一层的计算上都是并行的,且具有广泛的非线性适应能力。但是 BP 算法也存在着收敛速度慢等缺点,本文针对 BP 算法收敛速度慢、动量系数无法确定等缺点,基于目标函数的一阶和二阶导数,对 BP 算法进行了适当的改进,提出了一种同时优化学习率和确定动量系数的方法。

3、改进的 BP 算法

根据突触修正假说,即认为在学习过程中,神经元之间的突触联系发生了变化,神经网络在拓扑结构固定时,其学习归结为连接权的变化。神经网络连接权的学习算法可分为三类:监督式学习算法、非监督式学习算法和增强式学习算法,其中,监督式学习算法是根据网络的实际输出与期望输出之间的偏差调整网络权值,反向传播学习算法(BP 算法)就是一种颇具潜力的监督式学习算法。BP 算法的学习过程分为两个步骤:首先,在目前输入模式下,利用前向计算产生出神经网络的输出,并将它与学习样本的输出模式比较,生成输出的均方误差。在此基础上,改变最上层网络的权值,并通过逐层回溯的递归计算,改变整个网络的权值,减少神经网络的输出对样本输出模式的误差,并通过较长的递归计算,使得学习误差低于用户的期望误差。

针对 BP 算法具有“健忘性”、收敛速度慢等缺点,很多文献^{[4][5]}建议采用带动量系数 μ 的累积误差 BP 算法对权值进行更新。这种算法虽然可以在一定程度上提高学习速度,克服“健忘性”,但是我们通常只能根据经验,选择动量系数 μ 和固定不变的步长 α (学习率),从而导致在实际应用中往往会出现学习参数选择不当的现象。因为 BP 网络的误差曲面包含大量的平坦区和误差剧烈变化的区域,如果在平坦区上选择太小的学习率,势必使迭代次数增加,降低收敛速度;但如果我们试图选择较大的学

习率以加速收敛，当连接权值落到误差剧烈变化的区域时， α 太大会使误差快速增加，从而可能使学习过程不收敛。同时，如果动量系数选择不当，不仅不会加速收敛，防止振荡，反而适得其反。因此，我们需要提出一种合理的步长调节方法和动量系数选择方法，以优化 BP 算法中的学习率和动量系数。

3.1 学习率 α 的优化

在学习率的优化过程中，不考虑动量系数的影响，即令 $\mu = 0$ 。权值调整过程即为选择合适的网络参数（网络节点的连接权值），使如下的误差平方和（目标函数）最小：

$$J(W) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{num} \sum_{j=1}^q (o_j^k - c_j^k)^2 \quad (6)$$

式中， o_j^k 和 c_j^k 分别表示对于第 k 对模式样本，样本输出和网络的实际输出， w 是网络权值向量， num 是训练样本个数， q 是输出节点数。

在不考虑动量系数的情况下，权值调整公式可表示为：

$$W(n+1) = W(n) - \alpha \nabla J[W(n)] \quad (7)$$

如果用 $P(n)$ 表示权值的梯度下降方向，则

$$W(n+1) = W(n) + \alpha P(n) \quad (8)$$

我们注意到，当 $W(n)$ 和 $P(n)$ 确定后，目标函数 $J(W)$ 就仅仅是学习率 α 的函数，即 $h(\alpha) = J(W(n) + \alpha P(n))$ ，因此学习率的优化问题即为：

$$h(\alpha^*) = \min \{h(\alpha) = J(W(n) + \alpha P(n)) \mid \alpha > 0\} \quad (9)$$

α^* 为最优学习步长。

将 $h(\alpha)$ 在 $\alpha = 0$ 点展开得到，

$$h(\alpha) = h(0) + h'(0)\alpha + \frac{1}{2}h''(0)\alpha^2 \quad (10)$$

目标函数 $h(\alpha)$ 对 α 求一阶和二阶导数，得到

$$h'(\alpha) = h'(0) + h''(0)\alpha \quad (11)$$

$$h''(\alpha) = h''(0) \quad (12)$$

那么，最优 α^* 可以表示为：

$$\alpha^* = -h'(0)/h''(0) \quad (h''(0) > 0) \quad (13)$$

根据 $h(\alpha) = J(W(n) + \alpha P(n))$ ，可得：

$$h'(\alpha) = \nabla J[W(n) + \alpha P(n)]^T P(n) \quad (14)$$

$$h''(\alpha) = P(n)^T \nabla^2 J[W(n) + \alpha P(n)] P(n) \quad (15)$$

将(14)(15)代入(13)，得到最优学习率 α^* 。

3.2 动量系数 μ 的选择

令 $\Delta W(n+1) = W(n+1) - W(n)$ ，则带有动量系数 μ_1 的权值调整公式可以表示为：

$$\Delta W(n+1) = -\alpha_1(n) \nabla(n) + \mu_1(n) \Delta W(n) \quad (16)$$

式中, $\nabla(n)$ 是 $\nabla J[W(n)]$ 的缩写形式。

如果用 $P(n)$ 表示权值的梯度下降方向, α^* 表示最优学习率, 则有:

$$\Delta W(n+1) = \alpha^*(n)P(n) \quad (17)$$

由(16)(17)式得:

$$\alpha^*(n)P(n) = -\alpha_1(n)\nabla(n) + \mu_1(n)\alpha^*(n-1)P(n-1) \quad (18)$$

$$P(n) = -\frac{\alpha_1(n)}{\alpha^*(n)}\nabla(n) + \frac{\mu_1(n)\alpha^*(n-1)}{\alpha^*(n)}P(n-1) \quad (19)$$

我们采用[6]中所介绍的循环共轭梯度法, 在[6]中, $P(n)$ 表示为:

$$P(n) = -\nabla(n) + \beta(n)P(n-1) \quad (20)$$

比较(19)和(20), 我们不难得到:

$$\alpha_1(n) = \alpha^*(n) \quad (21)$$

$$\mu_1(n) = \frac{\alpha^*(n)\beta(n)}{\alpha^*(n-1)} \quad (22)$$

这样我们就可以同时调整最优学习率和动量系数: 首先由(20)确定梯度方向, 然后根据上面介绍的学习率的优化方法得到 α^* , 最后, 由(22)确定动量系数。

4、利用神经网络对干燥过程的降水率进行外推预测

建立对碰撞流干燥器干燥特性的预测模型是设计碰撞流干燥控制系统的一个重要基础。利用神经网络对碰撞流干燥过程的降水率进行外推预测包括以下三个步骤: (1) 产生用于神经网络的学习和测试的输入输出数据; (2) 选择合适的网络拓扑结构; (3) 训练神经网络, 并对网络的建模功能进行测试。

4.1 产生网络数据

用于训练神经网络的数据, 需要包括所有关于碰撞流干燥器动态特性的信息。本文采用[7]中的实验数据对神经网络进行学习和训练, 共有 140 对数据用于训练和测试这一神经网络, 其中 110 对用于 ANN 的训练和学习, 30 对用于测试。

4.2 确定神经网络的拓扑结构

在对垂直碰撞流干燥器的物料降水率进行外推预测的过程中, 本文采用三层前馈网络。为了寻求最优的网络结构, 本文针对具有不同隐含节点个数的 BP 网络, 计算其对应的均方根 (RMS) 误差, 图 1 表示 RMS 误差随隐含节点数的变化曲线。从图中可以看出, 具有 4 个隐含节点的神经网络对应最小的 RMS 误差, 因此我们选择如图 2 所示的网络结构进行建模。其中输入层有三个节点, 分别表示载带率 (进料量与空气流量之比)、热风温度和被干燥物料的初始湿含量; 输出层有一个节点, 表示物料的降水率; 隐含层有 4 个节点。

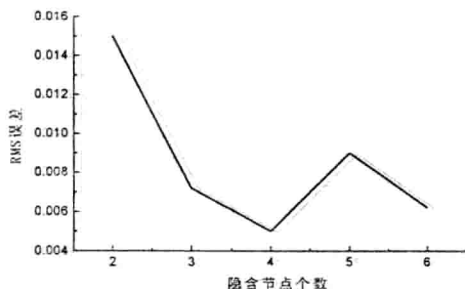


图 1 均方根误差随隐含节点数的变化

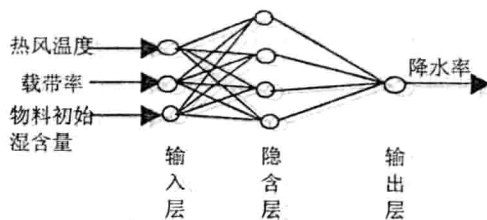


图 2 用于对流化干燥器建模的神经网络拓扑结构

4.3 网络权值的学习机制

在用神经网络对干燥过程的降水率进行外推预测时，采用带动量系数 μ 的累积误差 BP 算法对网络权值进行学习：

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) + \Delta w_{ij}(n+1) \quad (23)$$

$$\Delta w_{ij}(n+1) = -\alpha \frac{\partial E_k}{\partial w_{ij}} + \mu[\Delta w_{ij}(n)] = \alpha \delta_j x_i + \mu[\Delta w_{ij}(n)] \quad (24)$$

$$\delta_j = \left(\frac{\partial f}{\partial net_j} \right) (y_j^{(i)} - y_j) \quad (25)$$

(神经元 j 是输出层神经元)

$$\delta_j = \left(\frac{\partial f}{\partial net_j} \right) \sum_q w_{jq} \delta_q \quad (26)$$

(神经元 j 是隐含层神经元)

在式(25)(26)中， net_j 是神经元 j 所有输入信号的加权和， $f(\cdot)$ 是神经元 j 的激励函数， $y_j^{(i)}$ 是神经元 j 的希望输出，学习率 α 和动量系数 μ 采用第三节所提出的方法确定。对于隐含层和输出层的激活函数，我们选择式(3)中的 Sigmoid 型函数，并采用如下根均方误差对神经网络的预测功能进行评价：

$$RMSError = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n [y(k) - y_{net}(k)]^2}{n}} \quad (27)$$

式中 $y(k)$ 为测试样本集的输出， $y_{net}(k)$ 为神经网络的输出， n 为测试样本的数目。

5、仿真结果和讨论

图 3 是采用学习率优化算法后，学习率 α 随运行时间变化的曲线，从图中可以看