

中国工程热物理学会

传热传质学学术会议

论文集（上册）

二〇〇二

上海

中国工程热物理学会编



传热传质学学术会议论文集(上册) 目录

一. 热传导

- 023017 神经网络方法在导热反问题中的应用.....杨 鹏 王秀春(1)
- 023026 复合板材传热的传递函数与传热的不对称性.....王增刚 陈曹维(5)
- 023031 齿形翅片管翅片效率的理论分析研究.....何法江 曹伟武(9)
- 023046 Nafion 膜中质子传递理论的改进.....杨 震 彭晓峰 王补宣(13)
- 023055 两级敏度分析求解非线性稳态多宗量热传导反问题.....杨海天 薛齐文(17)
- 023057 周期震荡导热热应力的 Non-Fourier 分析.....李志生 姜任秋(21)
- 023058 无损辨识时间依赖型内热源的 Monte Carlo 方法.....邓中山 刘 静(25)
- 023065 非均匀内热源复合圆筒壁稳态导热微分方程组的解.....黄晓齐(29)
- 023081 建筑墙体传热传质耦合研究.....刘晓燕 贾永英(33)
- 023091 低温试验装置隔热层传热实验与分析.....王 芳 陈儿同 贺运红(37)
- 023093 提高重整化群精度的一个尝试.....
.....张海林 杨善让 徐志明 王升龙 倪绍一(41)
- 023098 移动物体导热和辐射耦合问题的数值计算.....
.....卢 玫 杨 茉 余 敏 王建刚 邓 君(45)
- 023174 激波内部的导热问题.....黄为民 刘夷平(49)
- 023213 载人航天器舱壁温度动态分析.....徐向华 梁新刚 任建勋(53)
- 023227 基于最小热量传递势容耗散原理的导热优化.....程新广 李志信 过增元(57)
- 023254 导热系数的分子动力学模拟研究中几种势能模型选取的探讨.....
.....袁世平 姜培学(61)

二. 对流换热

- 023034 旋转射流复合强化传热的液晶显示实验研究.....
.....陈玉阳 苑中显 马重芳 俞 坚 汪茂海 吴仲善 卢 伟 周志远(65)
- 023044 场协同理论在交变流动缝隙式回热器中的数值验证.....
.....黄鹏波 何雅玲 陶文铨 李景高(69)
- 023075 二维平板通道中流动与传热的格子-Boltzmann 模拟.....
.....唐桂华 陶文铨 伍华荣(73)
- 023077 平直开缝翅片传热特性的三维数值模拟及场协同理论分析.....
.....屈治国 何雅玲 陶文铨(77)
- 023078 管壁对脉管内自然对流换热的影响计算.....丁文静 何雅玲 陶文铨(81)
- 023080 辐射型开缝翅片的三维数值模拟及场协同原理的分析.....
.....周俊杰 李光熙 屈治国 陶文铨(85)

023097 水平空气层自然对流换热的分岔和振荡·····	殷俊 杨 荣 章立新 王建刚(89)
023105 非轴对称环形柱状封闭空腔内自然对流的实验研究·····	冷学礼 程 林 马 骏(93)
023110 非轴对称环形柱状封闭空腔内自然对流的数值分析·····	冷学礼 程 林 马 骏(97)
023120 竖直窄环隙通道内的强迫对流换热·····	孙中宁 曹夏昕 阎昌琪 谈和平 孙立成(101)
023122 离心力场作用下对流换热场协同理论的实验验证·····	施明恒 王 海(105)
023139 两种不同采暖方式温度场与流场分布·····	汪健生 王晨健 陈占秀(109)
023197 对流传质速度对扩散传质影响的非费克效应研究·····	许光映 崔肖洁 李文华(113)
023199 内翅片波纹管中对流换热与阻力特性的实验研究·····	贺群武 罗来勤 王秋旺 曾 敏 陶文铨(117)
023223 二维方腔内对流换热的场协同分析·····	魏 澍 过增元(121)
023225 非保守力与自然对流·····	杨立军 任建勋 宋耀祖 过增元(125)
023226 外磁场下封闭方腔自然对流的场协同分析·····	杨立军 任建勋 宋耀祖(129)
023229 管内湍流换热的场协同分析及换热强化·····	孟继安 陈泽敬 李志信 过增元(133)
023230 翅化平板通道对流换热的优化分析·····	俞接成 李志信(137)
023265 异形管管内强化换热性能的测试·····	刘 征 陈泽敬 孟继安 李志信(141)
023267 管内高温介质层流入口段中的热辐射作用·····	夏新林 黄 勇 任德鹏(145)
023274 平壁气膜冷却流场与温度场的协同分析·····	胡娅萍 吉洪湖(149)
023298 人为粗糙度对周期性冷却槽道换热效率的影响研究·····	毕林峰 张会强 王 兵 周立新 陈建华(153)
023300 建筑中自然通风传热的分岔与稳定性分析·····	钱 华 吴静怡 李玉国 许鹏程(157)
023303 强化对流换热的唯象理论·····	王松平 陈清林 尹清华 华 贲(161)
023304 新型涡流发生器强化换热及压降特性的影响参数分析·····	周国兵 张于峰 齐承英 王 艳(165)

三. 相变换热

023006 CPL 蒸发器非饱和多孔芯内流动与传热分析·····	黄晓明 刘 伟 申 盛 韩延民 侯增祺(169)
023013 冷面结霜的微细观过程及表面湿润性对其影响·····	吴晓敏 单小丰 王维城 唐黎明(173)

023014	冷面结霜初始形态的理论分析·····	吴晓敏	王维城	(177)
023015	水平微肋管内流动蒸发换热及流阻特性·····	吴晓敏	王晓亮	王维城(181)
023016	水平冷凝微肋管的传热特性和性能评价·····			
	·····	王晓亮	吴晓敏	王维城
			赵红艺	(185)
023018	第二类边界条件下一维有限域熔化问题的积分近似解·····			刘爱萍(189)
023028	R11/R134a 混合工质管束外沸腾传热的 EHD 强化试验研究·····			
	·····	黄 烜	李瑞阳	郁鸿凌(193)
023035	圆筒壁和球壁固液相变强化传热研究·····	王 馨		张寅平(197)
023039	动态接触角的初步分析·····	王晓东		彭晓峰(201)
023040	加热丝上汽泡自发振荡现象初探·····	王 昊	彭晓峰	王补宣(205)
023041	气液相变过程亚稳态体相内部界面分析·····	田 勇	王晓东	彭晓峰(209)
023050	三维微肋螺旋管内流动沸腾传热强化特性·····	崔文智	辛明道	廖 全(213)
023051	倾斜往复式冷凝器换热研究·····	余广炜		陈文仲(217)
023064	水平柱体热源内接触熔化的研究·····	陈文振	桂学文	孙丰瑞(221)
023087	水平排管串联分离式热管充液率实验研究·····	陈 岚	苏俊林	伍贻文(225)
023092	热分层对液化气储罐热响应的影响·····	弓燕舞	林文胜	顾安忠(229)
023119	相变乳状液的储冷模型与参数分析·····	赵镇南		时雨荃(233)
023126	微肋螺旋管内 R134a 流动沸腾的流型·····	崔文智	辛明道	廖 全(237)
023127	液氮喷淋流态化速冻系统及冷冻性能研究·····	郭旭峰		陶乐仁(241)
023136	重力热管泡状流工况的定量描述·····	唐志伟	马重芳	蒋章焰(245)
023142	氨水混合工质的池内核沸腾换热·····	王 迅	刘奕晴	门出正则(249)
023167	等热流圆管内潜热型功能热流体层流换热的内热源模型及分析·····			
	·····	张寅平	胡先旭	郝 磬
				王 馨(253)
023168	定形相变材料蓄热电加热地板采暖系统的热性能分析·····	林坤平		张寅平(257)
023173	液滴生成外场的动力学研究·····	刘夷平	宫 大	黄为民(261)
023180	定形相变材料的研制及热性能分析·····	秦鹏华	张寅平	杨 睿
				林坤平(265)
023182	相变微胶囊功能热流体的制备和性能研究·····	徐 慧	杨 睿	张寅平(269)
023183	相变微乳液的制备与性能研究·····	洪 波	杨 睿	张寅平(273)
023189	蒸气凝结相关问题探讨·····			闵敬春(277)
023190	相变换热表面直接与间接测温的对比性实验研究·····	龙恩深	张 川	(281)
023192	CPL 芯体工作机理及工质特性分析·····	宣益民	钱吉裕	李 强(285)
023196	垂直窄缝流道内过冷沸腾时的汽泡行为·····			
	·····	潘良明	辛明道	何 川
				陈 军(289)
023220	水平三维肋管管外凝结换热实验与分析 (I 实验研究) ·····			
	·····	廖 强	朱 恂	辛明道(293)

023221 水平三维肋管管外凝结换热实验与分析 (II 理论模型)	廖 强 朱 恂 辛明道(297)
023245 R134a 水平细圆管内流动沸腾换热的实验研究	辛公明 曹炳阳 程 林 陈 民(301)
023257 固液界面能差强化冷凝传热的实验研究	陈晓峰 马学虎 陈嘉宾(305)
023259 环状狭缝通道流动沸腾的实验研究	苏顺玉 黄素逸 王晓墨(309)
023260 恒热流下硬脂酸融化传热的实验研究	孙 旋 刘中良 马重芳 刘 威 滕 博(313)
023277 竖直管内混合气体的凝结换热与 SO_2 传递机理的理论研究	鲁国丽 贾 力(317)
023282 结霜过程实验研究	李智敏 彭晓峰(321)
023288 混合制冷工质核态沸腾的实验研究	赵耀华 刁彦华 鹤田隆治(325)
023289 饱和沸腾临界热流密度综合模型的探讨	赵耀华 姬朝玥(329)
023290 有限空间核态沸腾强化换热的实验研究	赵耀华 姬朝玥(333)
023291 过冷沸腾气泡行为的实验研究	赵耀华 姬朝玥(337)
023295 混合气体管内对流凝结传热研究	贾 力(341)
023299 蒸汽爆炸机理研究的实验设计	李小燕 杨燕华 徐济鋈(345)
023307 混合冷凝的形成机理	曹治觉(349)

四. 多孔介质传热传质

023001 多孔介质快速干燥过程热质耦合方程的代数显式解析解	蔡睿贤 张 娜(353)
023003 非饱和多孔介质中自然对流传热的场协同分析	申 盛 刘 伟 陶文铨(357)
023022 海带薄层物料干燥过程内部水分扩散研究	肖美添 朱 艳 刘华信(361)
023033 含湿毛细多孔介质干燥过程相变传热传质分析	卢 涛 沈胜强 葛玉林(365)
023045 空间结构对多孔球层内沸腾过程的影响	王 峥 彭晓峰 王补宣(369)
023048 污泥干燥特性的可视化实验	陈剑波 彭晓峰 薛 元 李笃中 朱敬平(373)
023049 污泥冷冻冰晶与颗粒团相互作用的可视化实验	陶 涛 彭晓峰 朱敬平 李笃中(377)
023056 湿热气候下墙体内湿迁移特性研究	苏向辉 昂海松(381)
023083 分形介质的传热与传质分析 (综述)	郁伯铭(385)
023123 燃料电池中质子交换膜干涸的热物理机制	王 江 施明恒(389)
023124 多孔介质剖面分形维数的一种计算方法	樊 荟 施明恒(393)
023125 分形多孔介质中的热传导	张东辉 金 峰 施明恒 杨 浩(397)
023134 活性炭对苯蒸汽吸附分离过程的实验研究	蒋绿林 施明恒 高玉明(401)
023184 规则结构多孔填料床两相流动特性实验研究	廖 强 陈 蓉 朱 恂(405)
023253 微细板翅结构强化对流换热实验研究	姜培学 胥蕊娜 李 勐(409)

023255 流体在烧结多孔槽道中换热和流动的实验研究.....	李 勐 姜培学 余 磊 任泽霈(413)
023258 烧结多孔表面强化冷凝传热实验研究.....	汪 琳 马学虎 朱晓波 安家明 陈嘉宾(417)
023285 高含水多孔介质体的干燥机构研究.....	赵耀华 鹤田隆治 张春平(421)

五. 辐射换热

023023 用蒙特卡罗法计算矢量喷管的红外特性.....	张小英 朱谷君(425)
023052 用离散坐标法计算炉膛火焰辐射针孔成像.....	李宏顺 周怀春 陆继东 郑楚光(429)
023147 贴体坐标系下复杂几何形体内辐射传递研究.....	郝金波 阮立明 谈和平(433)
023149 卫星太阳电池阵的热分析.....	韩玉阁 宣益民(437)
023162 湍流脉动对发动机尾喷焰红外信号的影响.....	董士奎 刘林华 马晓波 谈和平(441)
023164 贴体坐标系下 DOM 计算尾喷焰辐射特性.....	谈和平 李东辉 董士奎(445)
023175 求解二维辐射换热的有限单元法研究.....	谭建宇 阮立明 齐 宏 谈和平(449)
023176 利用蒙特卡洛数值实验反演辐射物性参数的研究.....	阮立明 郝金波 林志强 谈和平(453)
023177 辐射传递蒙特卡洛模拟的精度及运行时间分析.....	阮立明 谭建宇 董士奎 谈和平(457)
023179 采用新立体角网格划分的有限体积法.....	郝金波 阮立明 谈和平(461)

六. 微小尺度传热

023047 粘度对纳米颗粒悬浮液稳定性的影响.....	王补宣 李春辉 彭晓峰(465)
023059 基于 Boltzmann 方程的传质理论.....	吕永钢 刘 静(469)
023082 微小型平板热管的传热特性分析.....	曲 伟 马同泽(473)
023117 微通道气体流动的格子---Boltzmann 法模拟.....	马 斌 雷树业 郝锦志 卢秋敏(477)
023150 基于晶格---Boltzmann 方法的纳米流体流动和传热模型.....	吴 轩 宣益民(481)
023172 超微气泡生成动力学研究.....	宫 大 黄为民 刘夷平(485)
023202 纳米颗粒悬浮液换热强化中吸附作用的实验研究.....	王补宣 李 宏 彭晓峰(489)
023205 超急速爆发沸腾传热的实验与理论研究.....	董兆一 淮秀兰(493)
023206 微圆管内环状流凝结换热特性的数值模拟.....	安 刚 王补宣 李俊明(497)
023209 测量微细尺度流体温度场的傅立叶变换激光云纹技术.....	张鸿凌 宋耀祖 张香春(501)

023217	单晶硅薄膜面向热导率分子动力学研究·····	肖 鹏 李志信(505)
023218	微型热管的蒸发传热分析·····	范春利 曲 伟 杨 立 华顺芳 马同泽(509)
023219	轴向定热流加热下任意截面形状微槽内滑移流动的换热特性·····	·····朱 恂 辛明道(513)
023222	热辐射的微尺度效应对微结构气敏传感器的影响·····	韩茂华 梁新刚(517)
023224	细圆管内氧化铜纳米颗粒悬浮液层流流动的实验研究·····	·····戴闻亭 李俊明 王补宣 陈 骁(521)
023231	壁面轴向导热对微细管内对流换热的影响·····	·····王 玮 葛 峰 李志信 过增元(525)
023235	细圆管内纳米颗粒悬浮液对流换热的实验研究·····	·····戴闻亭 李俊明 王补宣 陈 骁(529)
023236	添加表面活性剂对纳米颗粒悬浮液稳定性及粘度的影响·····	·····胡海滔 李俊明 王补宣(533)
023237	十二烷基苯磺酸钠对氧化铜纳米颗粒悬浮液粘度的影响·····	·····李泽梁 李俊明 王补宣 胡海滔(537)
023238	胚泡结构和连续相变·····	陆建峰 彭晓峰(541)
023239	自由程理论在纳米流体中的应用·····	陆建峰 彭晓峰 刘 涛(545)
023243	经典理论对超急速爆发沸腾的适用性·····	金仁喜 淮秀兰 刘登瀛(549)
023246	纳米通道滑移流动的分子动力学研究·····	曹炳阳 陈 民 过增元(553)
023262	热物理问题的 MD 并行计算·····	王 冰 舒继武 王金照 陈 民(557)
023263	非液相空间的势能判别法·····	王金照 陈 民 过增元(561)
023266	封闭空间内小尺度等温竖板自然对流的三维效应·····	·····李 娜 李志信 过增元(565)
023270	重力场下细微循环通道热驱动现象实验研究初步·····	·····方 立 常海萍 毛军逵(569)
023272	重力场下微小循环通道内流体热驱动现象研究·····	毛军逵 常海萍(573)
023278	矩形微通道内滑移区气体流动换热的数值模拟·····	·····柏 巍 王秋旺 王 娟 陶文铨(577)
023279	三角形微槽内蒸发薄液膜的壁面滑移边界下的流动特性·····	·····张丽春 马同泽 葛新石(581)
023280	微槽平板热管传热性能的实验研究·····	张丽春 马同泽 张正芳 葛新石(585)
023281	楔型夹缝内液膜核态沸腾实验现象·····	徐 罕 彭晓峰(589)
023284	利用毛细力驱动的微槽蒸发器内流动与传热的数值模拟·····	·····赵耀华 胡学功(593)
023296	体硅、SOI 及 DSOI MOSFET 器件级电、热分析·····	梁新刚 刘宏伟(597)

神经网络方法在导热反问题中的应用

杨鹏, 王秀春

河北工业大学 能源与环境工程学院, 天津

Email xiuchun_wang@sina.com pqxx@etang.com; 电话: 022-26564554
022-26552999

摘要: 本文提出将神经网络方法引入导热反问题研究的思路, 分析了利用神经网络对导热关系学习的可行性, 并通过数值模拟的计算结果验证了算法的可用性。文中的思路为导热反问题的研究提供了一种新的方向。

关键词: 导热反问题 神经网络算法 导热正问题

ABSTRACT: This paper present a method by which inverse heat conduction problem can be solved by neural network algorithm. The feasibility of this method is proved in mathematics and the validity is examined by numerical simulation. The algorithm throws new light on the study of inverse heat conduction problem.

Keywords: Inverse heat conduction; Neural network algorithm; positive heat conduction problem

一. 引言:

导热反问题是相对与正问题而言的, 在正问题中被研究对象的热物性和边界条件以及初始条件都是已知的, 我们可以通过这些条件求得其内部的温度场。导热反问题是通过测量被研究对象内部多点的温度值及其温度变化, 反推出边界条件以及边界的温度值。国外对导热反问题的研究可以追溯到 20 世纪 50 年代, 到 80 年代初期已经有 300 多篇论文发表^[1]。国内对于导热反问题的研究起步较晚, 最早的一篇论文发表于 80 年代。目前国内已有众多学者投入到反导热问题研究中。

导热反问题的研究在工程实际中有重要价值。在航空航天、冶金铸造、食品加工和热图诊断等方面都有广阔的应用前景。因此对导热反问题的探索逐渐成为应用研究中比较活跃的领域。

与导热正问题相比反问题主要有以下一些特点: 1) 在导热反问题中, 一般可以比较精确的测量物体内部的温度, 而边界条件却无法直接测得。即使在物体表面布置了测点, 其测量精度也无法满足要求。或者希望确定对物体施加什么边界条件才可以使其内部产生预期的温度 (也可以是预期温度变化) 2) 导热是一种扩散过程, 内节点对边界上的温度、热流的响应是经过衰减的, 并在时间上有一个滞后效应。从数学的角度来说, 反问题是一种不适定问题 (或者称为病态问题), 它不象一般适定问题那样在解的存在唯一和稳定性方面有较好的性质, 因此, 至今导热反问题仍是导热研究中的一个重要课题。

导热反问题主要通过数值解法来处理, 传统的方法主要包括: 单时间步法、明确函数法、规则方法及实验函数法。这些方法的总体思想基本是相同的, 即通过定义内节点温度对边界热流的变化率为敏感系数, 以敏感系数作为联系内节点温度和边界条件的桥

梁。但由于敏感系数的数量级极小,经常引起算法的发散,而且其对测量误差相当敏感。

二. 导热反问题与神经网络

对于导热反问题的求解,近年来飞速发展的人工神经网络技术为这一研究提供了全新的途径。不同于以往的任何传统研究方法,人工神经网络是仿生物的神经网络的人工智能系统,利用非线性处理单元模拟生物神经元,处理单元之间的可变连接强度来模拟突触行为,处理单元依一定的形式连接而成的网络呈现高维性、自组织性、模糊性和自学习能力。利用神经网络的记忆性和智能性将导热过程当作一个黑箱,通过对导热正问题的反复求解得到多组温度分布数据,将其用于神经网络的训练,训练结束后用试验测量值,作为网络的外部输入,由网络映射出实际情况的边界条件。

对于具有 n 个输入单元, l 个输出单元的前向网络,其作用是从 n 维空间 R^n 到 l 维空间 R^l 的映射。1957 年由原苏联科学家提出定理^[2]:任何定义在单位闭区间 I^n ($n \geq 2$) 的多变量连续函数都可以表示为

$$f(x) = \sum_{j=1}^{2n+1} g_j \left(\sum_{i=1}^n h_{ij}(x_i) \right) \quad (1)$$

其中 g_j 为连续单变量函数,且 h_{ij} 为与 $f(x)$ 无关的单调函数。D.A.sprecher 又证明了函数组 $h_{ij}(x_i)$ 可化为 $a_i h_i$ 的形式,其中 a_i 是常数,所以式 (1) 可以进一步写成

$$f(x) = \sum_{j=1}^{2n+1} g_j \left(\sum_{i=1}^n a_i h_i(x_i) \right) \quad (2)$$

式 (2) 直接对应单输出三层前向网络。在以上定理的基础上,通过较复杂的证明过程可以得出以下定理:令 $\varphi(x)$ 为非常量有界单调增连续函数, k 为 R^n 的紧致子集, $f(X) = f(x_1, x_2 \cdots x_n)$ 为 k 上实值连续函数,则对于任意存在整数 N 和实常数 $C_i, \theta_i (i = 1, 2 \cdots n)$ 使得

$$\hat{f}(x_1, x_2 \cdots x_n) = \sum_{i=1}^n C_i \Phi \left(\sum_{j=1}^n W_{ij} x_j - \theta_i \right) \quad (3)$$

满足

$$\max |f(x_1, x_2 \cdots x_n) - \hat{f}(x_1, x_2 \cdots x_n)| < \varepsilon \quad (4)$$

其中 W_{ij} 对应网络中神经元的权值。以上推证说明,对任意 $\varepsilon > 0$ 的情况存在三层前向网络,隐层神经元激发函数为 $\Phi(x)$,输入及输出层的激发函数为线性的,此三层前向网络输出为式 (3),可以使式 (4) 成立。^[2] 上述定理为我们采用前向神经网络解决导热反问题奠定了理论基础。

Rumalhart^[3] 提出的改进误差反向传播 (BP) 训练算法,理论依据坚实,推导过程严谨,物理概念清楚 (误差的反向传播),通用性强。因此程序中的神经网络部分我们选用 BP 网络,算法流程见图 1。

三. 用神经网络方法解决导热反问题

本算例是用于求解第三类边界条件的一维有内热源导热反问题。在程序中边界换热

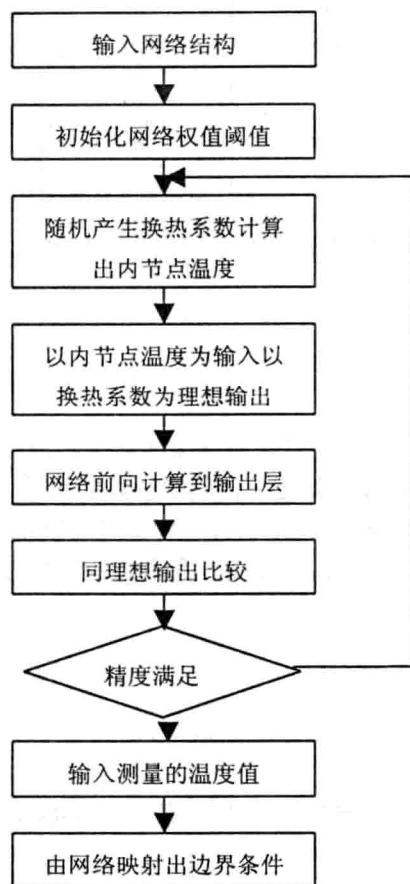
系数由随机数生成,由导热正问题计算模块求解测温点的温度,其计算结果作为网络的导师数据来源。以布置测温热电偶处的温度作为网络的输入,以换热系数作为网络输出。当网络训练稳定后,输入热电偶的测量值,由网络映射出边界换热系数。

网络拓扑结构为 7 个输入节点,13 个隐层节点,单个输出结点。网络的 Sigmoid 函数选取为

$$f(s) = \frac{1}{1 + \exp(-s)} \quad (5)$$

标准 BP 算法实质上是一种简单的最速下降静态寻优算法,在修正 $w(k)$ 时只是按 k 时层的负梯度方向进行修正,而没有考虑到以前的经验,从而使学习过程发生振荡,收敛缓慢。^[4] 因此进行调整如下:

$$w(k+1) = w(k) + \alpha D(k) + \eta D(k-1) \quad (6)$$



其中 $w(k)$ 既可表示单个权系数,也可表示连接权向量(其元素为连接权系数)。 $D(k) = -\partial E / \partial w(k)$ 为 k 时刻的负梯度, $D(k-1)$ 是 $k-1$ 时刻的负梯度。 α 为学习率。 η 为动量项因子^[4]。在程序中取 $\alpha = 0.5$ $\eta = 0.5$

按照熵函数准则^[5],网络的误差修正公式为

$$\delta = \frac{\partial E}{\partial W_{jk}} = \frac{\partial E}{\partial o_k} \cdot \frac{\partial o_k}{\partial W_{kj}} = y_k - y_k' \quad (7)$$

四. 运算结果

网络的绝对误差值随训练次数的变化趋势见图.2 当网络稳定后,以测量点的温度值作为网络的输入,由网络映射出所欲求解的边界换热系数。在训练网络之前,我们对换热系数的可能变化区间进行了限定(本程序将其限定在 $20 \sim 50 W / [m^2 \cdot K]$ 之间)作为网络的上下限。当实际换热系数靠近区间边界时,无论绝对误差还是相对误差都比较大,但当实际的换热系数比较接近区间中部时,网络的计算结果非常良好。具体运算结果见表 1 和图 3

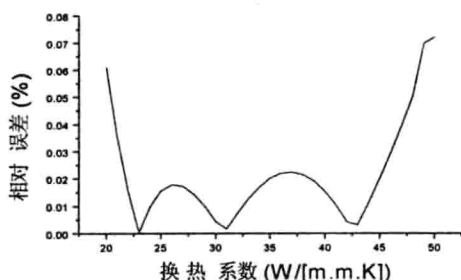


图.2 误差变化趋势

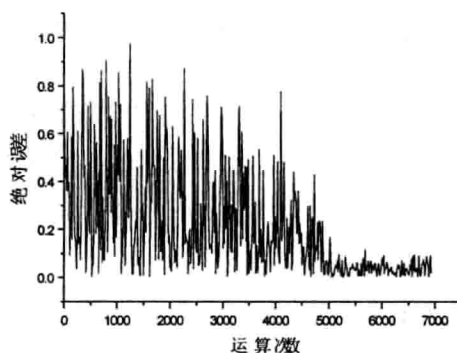


图.3 误差随迭代变化趋势

实际换热系数 $W/[m^2 \cdot K]$	23	26	29	32	35	38	41	44	47
网络换热系数 $W/[m^2 \cdot K]$	23.0092	25.5399	28.7160	32.2329	35.7016	38.8104	41.4205	43.5096	45.1432
绝对误差 $W/[m^2 \cdot K]$	0.0092	0.4601	0.2840	0.2329	0.7016	0.8104	0.4205	0.4904	1.8568
相对误差	0.0004	0.0177	0.0098	0.0073	0.0200	0.0213	0.0103	0.0111	0.0395

表.1 部分运算结果

五. 结论:

本文是以神经网络方法对于稳态导热反问题进行了尝试,从运算结果可以看出神经网络可以完成对导热关系的逼近。由于网络的导师数据没有限定为正问题的数值结果,所以当工程中的实际情况难以建立数学模型但拥有足够测量数据时,神经网络也同样适用,而对于此种情况,传统算法是无法应用的。在以上成果的基础上,我们将对非稳态导热反问题的情况做进一步的研究。

参考文献

- 1 Beck J V, Blackwell B Clair C R. Inverse Heat Conduction [M] New York: John Wiley & Sons. Inc. 1985. p5.
- 2 赵林明,胡浩云,魏德华,王树谦. 多层前向人工神经网络[M] 郑州市 黄河水利出版社, 1998
- 3 J.Taler, W.zima, Solution of Inverse Heat Conduction Problems Using Control Volume Approach; International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, Vo 1. 42, 1123—1140.
- 4 孙增圻,张再兴,邓志东. 智能控制理论与技术. 北京 清华大学出版社, 1997, 125-136
- 5 孙泽行, 胡绍海, 张思东, 侯唯一. The Entropy Function Criterion for BP Algorithm 北方交通大学学报[英文版]1997。

复合板材传热的传递函数 与传热的不对称性

王增刚 陈曹维

河北科技大学机械电子工程学院, 河北石家庄 050054
Tel: (0311)8632190, E-mail: hbwzg@163.net

工业中广泛使用着复合板材, 例如, 为防腐而使用的不锈钢和碳钢的复合钢板, 或是在碳钢板上涂上一层防锈涂层, 或为隔热而在钢板上使用保温层等等。研究复合板材稳定传热过程的文献很多。为了对传热过程实施实时有效的在线控制, 为了开发高效的传热设备, 需要研究复合板传热的动态特性。

关于动态传热过程的研究方法, 目前主要用传递函数法和状态空间法。文献^[1]用传递函数法给出了单层壁和多层壁传热的数学模型。文献^[2]给出了传热的状态空间法数学模型。用这些方法得到的结果是超越方程或无穷级数的形式。这里采用传递函数的方法对两层复合板材传热过程的动态特性进行了研究, 得到了近似的一阶、二阶和三阶系统。通过计算机动态仿真, 表明近似的二阶系统模型可以很好的代表传热的动态特性。

1 数学模型的建立

对复合板传热的数学模型作如下假设: (1) 平面复合板的面积无限大, 两侧温度均匀一致; (2) 复合板的接触面处处紧密, 结合面上无热阻; (3) 材料的各种性质, 如密度、比热、导热系数等均匀一致, 因而同一层面上的温度相同; (4) 复合板每层的厚度均匀, 而且厚度较薄; (5) 材料中无热源或热汇, 即传输过程中热量无增加或损失。这样, 复合板材的传热可看作是一维传热。适用一维的热传导傅里叶微分方程^[3]

$$\frac{d^2 u(x, t)}{dx^2} = \frac{1}{\kappa} \frac{du(x, t)}{dt} \quad (1)$$

式中 $\kappa = \lambda / c\rho$ 为导温系数, λ 、 c 和 ρ 分别是材料的导热率、比热和密度。初值条件是 $u(x, 0) = 0$ (2)

对 (1) 式进行拉氏变换得到

$$\frac{d^2 \bar{u}(x, s)}{dx^2} - \frac{1}{\kappa} s \bar{u}(x, s) = 0 \quad (3)$$

式中 $\bar{u}(x, s)$ 表示对 $u(x, t)$ 的拉式变换。此方程的通解是:

$$\bar{u}(x, s) = Ae^{qx} + Be^{-qx} \quad (4)$$

其中 A 、 B 与 x 无关(可以是 s 的函数), $q = \sqrt{s/\kappa}$ 。

设复合板两层的厚度分别是 l 和 h , 下面研究每层中的温度分布。

1.1 求解厚度为 l 的一层中温度的变化

假设该层一侧温度固定为 u_0 , 另一端不是绝热, 这一层的边界条件为:

$$u_l(0, t) = u_0 \quad (5)$$

$$\left. \frac{du_l(x, t)}{dx} \right|_{x=l} = \frac{1}{\lambda_l} v(l, t) \quad (6)$$

其中 $v(l, t)$ 是热流密度, 是待定函数, 与两层材料的物性相关; λ_l 是该层材料的导热率。

对边界条件作拉氏变换得到

$$\bar{u}_l(0, s) = \frac{u_0}{s} \quad (7)$$

$$L \left\{ \frac{du_l(x, t)}{dx} \right\} \Big|_{x=l} = \frac{1}{\lambda_l} \bar{v}(l, s) \quad (8)$$

式中 $\bar{u}_l(0, s)$ 和 $\bar{v}(l, s)$ 是 $u_l(0, t)$ 和 $v(l, t)$ 的拉氏变换, L 为拉式变换算子。由(4)和(7)得到

$$A_l + B_l = \frac{u_0}{s} \quad (9)$$

注意到 $L \left\{ \frac{du_l(x, t)}{dx} \right\} \Big|_{x=l} = \frac{d\bar{u}_l(x, s)}{dx} \Big|_{x=l}$, 由(4)和(8)得到

$$A_l q_l e^{q_l l} - B_l q_l e^{-q_l l} = \frac{1}{\lambda_l} \bar{v}(l, s) \quad (10)$$

式中 $q_l = \sqrt{s/\kappa_l}$, κ_l 对应这一层材料的导温系数。解方程(9)和(10)得到

$$A_l = \left(\frac{1}{\lambda_l} \bar{v}(l, s) + \frac{u_0}{s} q_l e^{-q_l l} \right) / 2q_l \cosh(q_l l), \quad B_l = \left(\frac{u_0}{s} q_l e^{q_l l} - \frac{1}{\lambda_l} \bar{v}(l, s) \right) / 2q_l \cosh(q_l l)$$

将 A_l 和 B_l 的表达式代入通解方程(4), 并利用双曲函数的定义式, 得到

$$\bar{u}_l(x, s) = \left[\frac{1}{\lambda_l} \bar{v}(l, s) \sinh(q_l x) + \frac{u_0}{s} q_l \cosh(q_l(l-x)) \right] / q_l \cosh(q_l l) \quad (11)$$

将 $x=l$ 代入上式, 得到复合板两层接触面上温度变化的拉氏变换表达式

$$\bar{u}_l(l, s) = \left[\frac{1}{\lambda_l} \bar{v}(l, s) \sinh(q_l l) + \frac{u_0}{s} q_l \right] / q_l \cosh(q_l l) \quad (12)$$

1.2 求解厚度为 h 的一层中温度的变化

在这一层中, 热传导傅里叶微分方程(1)的通解是

$$\bar{u}_h(x, s) = A_h e^{q_h(x-l)} + B_h e^{-q_h(x-l)} \quad (13)$$

其中 $x \in [l, l+h]$, $q_h = \sqrt{s/\kappa_h}$ 。

结合面上温度 $u_l(l, t)$ 相同, 热流密度 $v(l, t)$ 相同, 假设另一端绝热, 得到边界条件:

$$\frac{du_h(x, t)}{dx} \Big|_{x=l} = \frac{1}{\lambda_h} v(l, t) \quad (14)$$

$$\frac{du_h(x, t)}{dx} \Big|_{x=l+h} = 0 \quad (15)$$

注意到 $L \left\{ \frac{du_h(x, t)}{dx} \right\} \Big|_{x=l+h} = \frac{d\bar{u}_h(x, s)}{dx} \Big|_{x=l+h}$, 将边界条件作拉氏变换, 得到

$$\frac{d\bar{u}_h(x, s)}{dx} \Big|_{x=l} = \frac{1}{\lambda_h} \bar{v}(l, s) \quad (16)$$

$$L \left\{ \frac{du_h(x, t)}{dx} \right\} \Big|_{x=l+h} = 0 \quad (17)$$

由式(13)(14)和(15)可得 $A_h q_h - B_h q_h = \frac{1}{\lambda_h} v(l, t)$, $A_h q_h e^{q_h h} - B_h q_h e^{-q_h h} = 0$, 进而求得

$$A_h = -\frac{1}{\lambda_h} \bar{v}(l, s) e^{-q_h h} / 2q_h \sinh(q_h h), \quad B_h = -\frac{1}{\lambda_h} \bar{v}(l, s) e^{q_h h} / 2q_h \sinh(q_h h)$$

将 A_h 和 B_h 代入方程的通解(13)中, 并利用双曲函数的定义式得到

$$\bar{u}_h(x, s) = -\frac{1}{\lambda_h} \bar{v}(l, s) \frac{\cosh(q_h(l+h-x))}{q_h \sinh(q_h h)} \quad (18)$$

将 $x = l$ 和 $x = l + h$ 代入上式得到该层两侧温度变化的拉氏变换表达式

$$\bar{u}_h(l, s) = -\frac{1}{\lambda_h} \bar{v}(l, s) \frac{\cosh(q_h h)}{q_h \sinh(q_h h)} \quad (19)$$

$$\bar{u}_h(l + h, s) = -\frac{1}{\lambda_h} \bar{v}(l, s) \frac{1}{q_h \sinh(q_h h)} \quad (20)$$

1.3 复合板的传递函数

因为复合板两层接触面上的温度相等, 因此(12)和(19)表达的是同一点温度的拉氏变换, 应该有 $\bar{u}_l(l, s) = \bar{u}_h(l, s)$, 所以得到下式

$$\left[\frac{1}{\lambda_l} \bar{v}(l, s) \sinh(q_l l) + \frac{u_0}{s} q_l \right] / q_l \cosh(q_l l) = -\frac{1}{\lambda_h} \bar{v}(l, s) \frac{\cosh(q_h h)}{q_h \sinh(q_h h)} \quad (21)$$

由(20)得到 $\bar{v}(l, s) = -\lambda_h \bar{u}_h(l + h, s) q_h \sinh(q_h h)$, 代入(21)得到

$$\bar{u}_h(l + h, s) \left[\cosh(q_l l) \cosh(q_h h) + \frac{\lambda_h}{\lambda_l} \frac{q_h}{q_l} \sinh(q_l l) \sinh(q_h h) \right] = \frac{u_0}{s}$$

因为输入端的输入 $u_l(0, t) = u_0$, 是常数, 它的拉氏变换是 $\bar{u}_l(0, s) = u_0/s$, 输出端温度的拉氏变换是 $\bar{u}_h(l + h, s)$, 所以传递函数是

$$G(s) = \frac{\bar{u}_h(l + h, s)}{\bar{u}_l(0, s)} = \frac{1}{\cosh(q_l l) \cosh(q_h h) + (\lambda_h / \lambda_l)(q_h / q_l) \sinh(q_l l) \sinh(q_h h)}$$

应该指出的是, 由于传递函数是系统本身固有的性质, 得到的传递函数不失一般性。

注意到 $q = \sqrt{s/\kappa}$, $\kappa = \lambda/c\rho$ 。令 $\psi = \frac{\lambda_h c_h \rho_h}{\lambda_l c_l \rho_l}$ 则传递函数变为

$$G(s) = \frac{1}{\cosh(q_l l) \cosh(q_h h) + \psi \sinh(q_l l) \sinh(q_h h)} \quad (22)$$

将上式的分母展开成泰勒级数, 得到 s 的多项式。

$$G(s) = \frac{1}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3 + \dots} \quad (23)$$

其中 $a_0 = 1$, $a_1 = \frac{1}{2!} \left[f(\psi) \left(\frac{l}{\sqrt{\kappa_l}} \right) + \left(\frac{h}{\sqrt{\kappa_h}} \right) \right]^2$, $a_2 = \frac{1}{4!} \left[f(\psi) \left(\frac{l}{\sqrt{\kappa_l}} \right) + \left(\frac{h}{\sqrt{\kappa_h}} \right) \right]^4$ 等。通式是

$a_n = \frac{1}{(2n)!} \left[f(\psi) \left(\frac{l}{\sqrt{\kappa_l}} \right) + \left(\frac{h}{\sqrt{\kappa_h}} \right) \right]^{2n}$ 。通式中的函数 $[f(\psi)] = \begin{cases} \psi & \forall \text{奇数 } i \\ 1 & \forall \text{偶数 } i \end{cases}$ 。系数表达式的前

几项可以直接验证。篇幅所限, 这里略去系数通式的证明。

在(23)式的分母中分别取两项和三项可以得到近似的一阶和二阶系统的传递函数。可以推出对应的阶跃响应分别是

$$y_1(t) = 1 - e^{-t/a_1} \quad (24)$$

$$y_2(t) = 1 + \frac{1}{a_2 s_1^2 - 1} e^{s_1 t} + \frac{1}{a_2 s_2^2 - 1} e^{s_2 t} \quad (25)$$

其中 s_1 和 s_2 是二阶传递函数特征多项式的根。对应三阶近似的解析解较复杂。

2 公式的应用

以钢-铜复合板和钢-聚四氟乙烯复合板传热为例, 比较不同阶次数学模型的差别。它们代表了导热率相差悬殊的两类复合板材。根据[4], 查出钢、铜和聚四氟乙烯导热率 λ , 比热 c , 密度 ρ , 并计算导温系数 $\kappa = \lambda/c\rho$ 。首先以

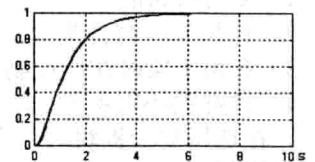


图1 钢-铜复合板材二阶和三阶数学模型比较

钢-铜复合板为例, 取板厚为 $l = h = 0.005\text{m}$, 铜板在恒高温侧, 钢板在绝热侧。将钢和铜的物性参数代入传递函数(23)式中, 得到

$$G(s) = \frac{1}{1 + 1.3484s + 0.3666s^2 + 0.0424s^3 + \dots}$$

取特征多项式的前三项和前四项, 得到近似的二阶和三阶系统。求解三阶系统的解析解比较繁琐。在 MATLAB 软件平台上模拟, 所对应的阶跃响应如图 1 所示。可见, 两条曲线几乎重叠在一起。因此, 取二阶模型精度足够了。

对钢-铜复合板, 当钢在恒高温侧时, 将钢和铜的物性参数值代入(23)式, 求出特征根后, 代入(24)和(25)得到一阶和二阶近似的阶跃响应

$$y_1(t) = 1 - e^{-t/2.9590}$$

$$y_2(t) = 1 + 0.1682 e^{-2.6851t} - 1.1682 e^{-0.3866t}$$

当钢-铜复合板恒高温侧是铜时, 阶跃响应是

$$y_1(t) = 1 - e^{-t/1.3484}$$

$$y_2(t) = 1 + 0.6370 e^{-2.6476t} - 1.6370 e^{-1.0302t}$$

当钢-PTFE 复合板恒高温侧是钢时, 阶跃响应是

$$y_1(t) = 1 - e^{-t/114.7135}$$

$$y_2(t) = 1 + 0.3972 e^{-0.0394t} - 1.3972 e^{-0.0112t}$$

当钢-PTFE 复合板恒高温侧是 PTFE 时, 阶跃响应是

$$y_1(t) = 1 - e^{-t/450.0000}$$

$$y_2(t) = 1 + 0.3660 e^{-0.0105t} - 1.3660 e^{-0.0028t}$$

在图 2(a)中, 曲线 1 是钢-PTFE 复合板从钢向 PTFE 传热时的一阶近似解, 曲线 2 是其二阶近似解。图 2(b)是曲线 1 和 2 在开始阶段的局部放大图。二者有 15 秒以上的误差。图 3 比较了相同复合板传热方向不同时的差别。图 3(a)中曲线 1 表示钢-PTFE 复合板的钢在恒高温侧; 曲线 2 表示 PTFE 在恒高温侧; 图 3(b)中曲线 3 表示钢-铜复合板的钢在恒高温侧; 曲线 4 表示铜在恒高温侧。二者有很大的区别, 说明传热的不对称性。因此在系统仿真和控制中, 对升温 and 降温过程应考虑采用不同的数学模型。

3 结论

- (1) 复合板材的数学模型采用近似的一阶或二阶系统即可。不必采用更高阶数学模型。
- (2) 如果只研究传热达到的稳定状态的时间等问题, 采用一阶近似即可。
- (3) 在用于实时在线控制, 或用于传热效率的研究时, 应该采用二阶近似的系统模型。
- (4) 传热的不对称性。在系统仿真和控制中, 对升温 and 降温过程应采用不同的数学模型。在选用复合板材时, 也应考虑传热的方向。

参考资料:

- [1] 陈芝久, 阙雄才, 丁国良著. 《制冷系统热力学》北京: 机械工业出版社, 1998, p148-181
- [2] 王骥程, 祝和云主编. 《化工过程控制工程》, 北京: 化学工业出版社, 1991 年第二版, p260-274
- [3] 郭敦仁编. 《数学物理方法》北京: 人民教育出版社, 1965, p366-370
- [4] 国家医药管理局上海医药设计院编. 《化工工艺设计手册》(上册), 北京: 化学工业出版社, 1996 第二版, p2-411

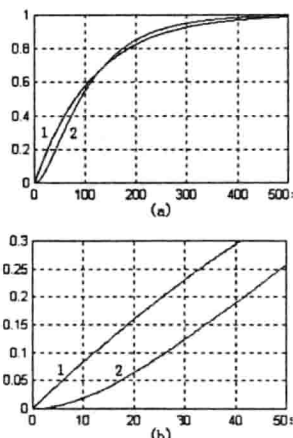


图 2 钢-PTFE 复合板材的一阶和二阶数学模型比较

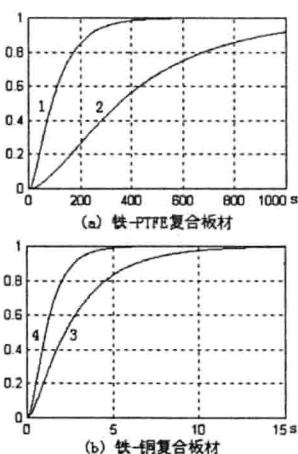


图 3 传热方向不同时的响应曲线

齿形翅片管翅片效率的理论分析研究

何法江

曹伟武

上海工程技术大学机械工程学院

上海工程技术大学能源研究所, 上海 200336

联系电话: 021-62750186

E-mail: mikehfj@sues.edu.cn

摘要: 本文建立了完整的齿形翅片传热的理论分析模型, 求解微分方程时作了两个基本假定, 一是假定翅片表面的传热系数为均匀分布, 二是假定翅顶为绝热, 同时考虑了齿型翅片的侧面传热, 用修正的贝塞尔函数求解方程, 得到齿形翅片的翅片效率的理论解, 给出了翅片效率 η_f 与无量纲参数 d_f/d_0 , h_f/h , mh , δ/w 之间的关系曲线。

一、引言

对于管外侧流体为气相或气固两相流体, 管内流体为液相或气液两相流体的换热设备, 由于管外侧气相的换热系数远低于管内给水侧, 因此为了达到强化传热的目的, 通常的方法是将换热系数较低的管外侧表面积得到充分扩展^[1-2]。外螺旋翅片管是扩展表面受热面的一种常用形式, 具有结构紧凑, 金属耗量低, 传热效率高, 运行费用省等许多优点, 在许多工业领域中已得到广泛应用。

齿型螺旋翅片管与整体型螺旋翅片管相比较, 能使传热边界层进一步减薄, 从而达到进一步强化传热的效果, 具有更广泛的应用前景。其结构见图 1。

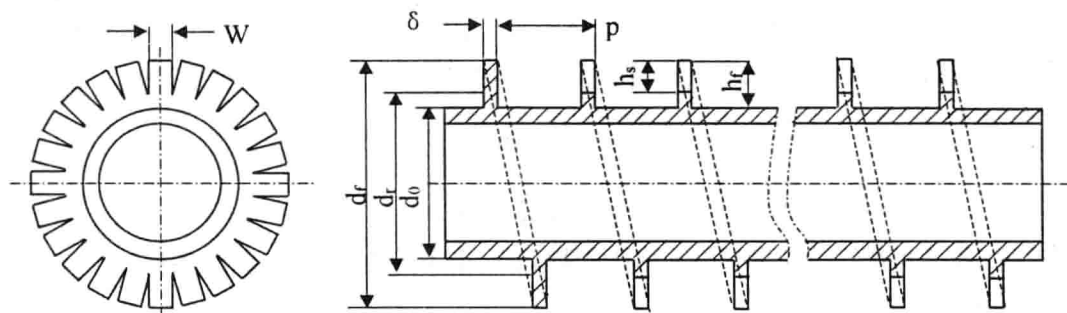


图 1 齿型螺旋翅片管的结构图

齿型螺旋翅片管的传热分析比较复杂, 一般采用实验手段进行了传热和阻力特性试验^[3-5]。这种类型翅片的翅片效率的计算对于翅片管的传热分析是十分重要的, 文献^[6]分析了齿型翅片的传热后得出了齿型翅片翅片效率的理论计算式, 但采用的是定截面矩形直肋公式。文献^[7]对齿型翅片的翅片效率作了理论推导, 但对齿型翅片的侧面和端面都作了绝热的假设。对于齿型翅片, 端部传热一般是可以忽略的, 然后齿型侧面的传热往往是不能忽略的。本文考虑到齿型翅片侧面的传热不能忽略, 尤其是对于高肋, 齿宽窄的翅片管, 通过建立一个完整的齿型翅片管的传热模型, 作了一些简化, 考虑翅片侧面的传热因素, 理论推导了齿型翅片管的翅片效率。

二、传热模型的建立

简化后的模型如图 2 所示, 该模型由一个环型平肋片 ($r_0 \leq r \leq r_r$) 和 n 个等截面矩形直肋 ($r_r \leq r \leq r_f$) 组成。模型的传热分析作了如下的假设: 翅片管的导热系数 λ , 周

围环境温度 T_∞ 为稳态, 翅片表面的换热系数 α 在整个翅片上均匀, 忽略翅片和基管之间的接触热阻, 沿管长方向的热流和温度也是均匀的, 由于翅片的 δ/h 很小, 可以认为翅片只有沿径向导热, 温度仅沿径向变化, 即 $T=f(r)$ 。

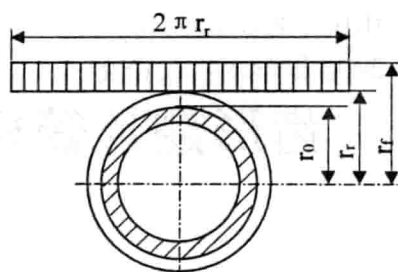


图2 齿型翅片传热分析模型

三、理论分析与传热计算

根据上述的模型分析, 在稳态条件下, 由热量平衡可以分别导出环形平肋片和矩形直翅的传热方程:

$$\frac{d^2\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\theta}{dr} - m^2\theta = 0 \quad (r_0 \leq r \leq r_r) \quad (1)$$

$$\frac{d^2\theta}{dr^2} - m_1^2\theta = 0 \quad (r_r \leq r \leq r_f) \quad (2)$$

式中:

$$\theta = T - T_f \quad m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda_f \delta}} \quad m_1 = \sqrt{\frac{2\alpha(1 + \delta/w)}{\lambda_f \delta}} = \sqrt{(1 + \delta/w)} \times m$$

如果翅厚 δ 与翅宽 w 相比很小时, 则 $m_1 = m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda_f \delta}}$ 那么就可以得到文献^[7]的计算效率。

但是, 从国内外齿形翅片管生产厂家的齿形尺寸来看, δ/w 的影响往往不能忽略, 尤其是那些高肋, 翅间距大, 翅宽较窄的翅片, 更不能不考虑翅片的锯齿型段侧面的传热影响, 因此, 为了得到这类问题的一般解, 需要考虑 δ/w 的影响。方程 (1)、(2) 的解^[8]为:

$$\theta(r) = c_1 I_0(mr) + c_2 K_0(mr) \quad (3)$$

$$\theta(r) = c_3 sh(m_1 r) + c_4 ch(m_1 r) \quad (4)$$

式中 I, K 为贝塞尔函数, sh, ch 为双曲线函数。若不计端部放热, 边界条件为:

$$\begin{aligned} r=r_0 & \quad \theta=\theta_0 \\ r=r_r & \quad \theta=\theta_r \\ r=r_f & \quad \frac{d\theta}{dr}=0 \end{aligned} \quad \frac{d\theta}{dr} \Big|_{\text{方程3}} = \frac{d\theta}{dr} \Big|_{\text{方程4}}$$

将上述边界条件代入方程 (3)、(4) 求得常数 c_1, c_2, c_3, c_4 的值分别为:

$$c_1 = \theta_0 \{ K_0(mr_r) \times sh[m_1(r_r - r_f)] + K_1(mr_r) \times ch[m_1(r_r - r_f)] \} / C \quad (5)$$

$$c_2 = -\theta_0 \{ I_0(mr_r) \times sh[m_1(r_r - r_f)] - I_1(mr_r) \times ch[m_1(r_r - r_f)] \} / C \quad (6)$$

$$c_3 = -\theta_0 \{ I_0(mr_r) K_0(mr_r) + I_1(mr_r) K_1(mr_r) \} \times sh(m_1 r_f) / C \quad (7)$$

$$c_4 = \theta_0 \{ I_0(mr_r) K_0(mr_r) + I_1(mr_r) K_1(mr_r) \} \times ch(m_1 r_f) / C \quad (8)$$

$$C = \{ I_0(mr_0) K_1(mr_r) + I_1(mr_r) K_0(mr_0) \} \times ch[m_1(r_r - r_f)] + \{ I_0(mr_0) K_1(mr_r) - I_0(mr_r) K_0(mr_0) \} \times sh[m_1(r_r - r_f)] \quad (9)$$