

中国工程热物理学会

第十一届年会论文集

传热传质学（中册）

二〇〇五

北京

中国工程热物理学会编



中国工程热物理学会

第十一届年会论文集

传热传质学（中册）



Chinese Society of Heat and Mass Transfer

2005年 北京

传热传质学学术会议论文集(中册) 目录

五. 辐射换热

- 053064 火焰热辐射的换热的光谱依赖性和 TRI 影响.....徐 晓 陈义良(623)
- 053068 MESAR 舰载相控阵雷达温度场及红外辐出度研究.....胡双喜 董士奎 杨 立 谈和平(629)
- 053073 一维介质热辐射特性反问题的微粒群方法.....王雁鸣 张昊春 谈和平(633)
- 053075 混凝土模板对太阳辐射吸收系数的影响.....张建荣 徐向东 刘文燕(637)
- 053078 空间差分格式对有限体积法数值散射的影响.....张昊春 谈和平 王雁鸣(642)
- 053126 定热流加热管湍流入口段的辐射—对流耦合热流分析.....任德鹏 夏新林 谈和平(646)
- 053127 求解介质内热辐射传递的双向统计蒙特卡罗法.....夏新林 任德鹏 郭 亮(651)
- 053173 一维系统介质温度场与辐射参数同时重建.....娄 春 周怀春(656)
- 053174 DRESOR 法对瞬态辐射传递问题的研究.....程 强 周怀春 黄志锋(661)
- 053175 DO 法和 DRESOR 法求解一维平行平板系统内辐射传递过程的比较分析.....黄志锋 周怀春 何 诚 程 强(668)
- 053220 最小二乘无网格法模拟一维瞬态辐射换热.....谭建宇 刘林华(673)
- 053223 有遮挡结构的无人机排气系统红外辐射特性的数值计算研究.....罗明东 吉洪湖(678)
- 053291 瞬态辐射传输的最小二乘有限元法.....安 巍 阮立明 谈和平(682)
- 053292 反演高温粒子辐射特性的实验研究.....阮立明 齐 宏 谢 鸣 刘晓东 戴景民 谈和平(686)
- 053293 非球形粒子的辐射特性研究.....齐 宏 阮立明 马晓波 谈和平(690)
- 053294 求解热辐射传递的非结构化有限体积法.....齐 宏 阮立明 朱安君 谈和平(694)
- 053325 球形粒子的近场辐射换热研究.....韩茂华 梁新刚(698)
- 053395 随机表面 BRDF 理论与实验的对比研究.....谢 鸣 邹 勇 任 虎 阮立明 谈和平(702)

六. 微小尺度传热

- 053033 微小孔径受限射流冲击换热的实验研究.....周子民 涂 娟 杨 莺 曾文辉 叶良春(707)
- 053081 纳米颗粒悬浮液池内泡状沸腾的实验研究.....施明恒 帅美琴 赖彦锴(713)
- 053116 微小尺度下自然对流换热特性实验研究.....杨德伟 黄善波 林日亿(717)
- 053133 微型直接甲醇燃料电池双级板内流动分析.....朱 恂 叶丁丁 廖 强(721)
- 053140 微通道反应器内甲醇蒸汽重整制氢的数值研究.....赵 翔 崔文智 李隆健 陈清华(726)
- 053142 致密微孔壁绝热冷却效果研究.....陈 炎 吉洪湖 高 潮 胡姬萍 刘 军(730)
- 053160 浮力对环形深液池内热毛细对流的影响.....彭 岚 李友荣 曾丹苓 今石宣之(734)
- 053161 浮力对环形浅液池内热毛细对流的影响.....石万元 李友荣 曾丹苓 今石宣之(739)
- 053162 开口圆形浅池内低 Pr 数流体的热毛细对流.....凌 芳 李友荣 彭 岚 吴双应(743)
- 053164 微喷管内气体流动传热过程及其推进性能分析.....张义华 李隆健 崔文智 陈清华(747)
- 053172 表面纳米结构对纳米通道流动的影响.....曹炳阳 陈 民 过增元(752)
- 053184 细小喷淋液滴冲击物面液体薄膜的动力学和传热特性理论研究.....郭加宏 戴世强(756)
- 053221 双电层交替时微通道内流动的数值模拟.....赵 亮 刘林华(764)

- 053233 粗糙度与气体稀薄性对微尺度流动特性的影响...唐桂华 陶文铨 何雅玲(770)
 053234 微圆管内流动与换热特性的实验研究...李 卓 吕嘉喜 陶文铨 何雅玲(774)
 053247 取压方式对微通道内单相摩擦阻力特性影响的研究.....李 卓 俞 坚 马重芳(778)
 053276 基于空气净化的介孔纳米 TiO_2 的应用研究.....桑丽霞 王 峰 常梦媛 孙继红 鹿院卫 马重芳(782)
 053329 水平圆管内纳米流体湍流流动实验研究.....陈 骁 李俊明 王补宣(786)
 053330 水平圆管内纳米流体湍流换热实验研究.....陈 骁 李俊明 王补宣(790)
 053331 水平微圆管内膜状凝结换热特性的影响因素研究.....安 刚 李俊明 王补宣(794)
 053344 纳米复合薄膜法向导热特性的 MD 模拟.....梁新刚 王帅创 孙 麟(801)
 053345 微尺度下壁面粗糙度对面向导热影响研究.....梁新刚 岳 宝(805)

七. 生物换热

- 053003 手分为多节段的人体热调节模型研究...丁 立 桑民敬 袁修干 邱义芬(809)
 053006 肝癌大血管热凝固场临界数值分析.....郑卫英 范周田 李冬果(813)
 053042 生物组织热损伤及最小热损伤剂量分析.....江世臣 张学学(817)
 053043 加入头形式对激光诱导间质肿瘤热疗的影响.....江世臣 张学学(821)
 053045 冻干溶液的低温显微研究与热分析.....左建国 华泽钊 刘宝林 周国燕(825)
 053060 舌模型建构与三维温度场数值模拟初探.....诸 凯 陈瑞球 刘 斌 魏 璠 王朝露(832)
 053065 激光生物传热的三维瞬态双倒易边界元模型.....周建华(838)
 053103 基于液氮喷雾式食品流态化速冻机的青刀豆速冻实验研究.....梁亚星 陶乐仁 刘贵庆(842)
 053110 用分布扫描量热法研究主动脉冻结过程未冻水份额.....胥 义 周国燕 华泽钊(846)
 053118 探针法测量低温下生物材料导热系数研究.....黄国钢 周国燕 李彩侠 华泽钊(850)
 053138 颈部平行逆流血管传热的理论模型研究.....夏 翔 张海峰(854)
 053153 牛乳比热与时间—温度关系的实验研究.....谷雪莲 周国燕 王 欣 华泽钊(859)
 053154 冷冻干燥脐血单核细胞的形态学分析.....李 军 华泽钊 习德成 谷雪莲 王 欣 张 喻(863)
 053155 苹果真空冷冻干燥实验研究.....习德成 陶乐仁 钱大钧 华泽钊(867)
 053156 组织工程化真空低温保护液的热分析.....王 欣 华泽钊(871)
 053157 三元溶液共晶 DSC 实验研究.....胡桐记 周国燕 高 才 胥 义 华泽钊(875)
 053158 食品玻璃化转变温度测量方法的比较.....周国燕 黄国纲 叶秀东 张 雷 华泽钊(879)
 053251 间质激光热凝固时组织热损伤的研究.....杨 昆 刘 伟 骆清铭(883)
 053302 考虑冷热刀刀头温度响应对制定肿瘤治疗计划的影响.....邓中山 刘 静 周一欣(889)

八. 数值模拟

- 053008 旋流分离的湍流涡动数学模型及数值模拟.....刘晓敏 檀润华 刘银梅(893)
 053009 特殊通风形式采空区自燃过程数值模拟.....李宗翔(898)
 053010 加支管前后弯管的三维数值模拟.....王未凡 刘爱萍(904)
 053013 流化床内单个颗粒传热特性的模拟.....刘安源 刘 石(908)
 053014 舰用中高速柴油机活塞传热问题三维数值模拟.....李冠男 姜任秋 李晓波 杨海彬(913)

- 053015 单效溴化锂吸收式制冷机的仿真计算.....刘德平 姜任秋(917)
- 053018 涡流管三维可压缩湍流流场数值模拟研究.....
.....王朋涛 姜任秋 宋福元 张 鹏 周少伟 蔡 洁(921)
- 053019 波纹壁面降膜过程的一种近似模型.....师晋生(927)
- 053025 非结构网格中导热和辐射复合传热的数值计算.....
.....张 敏 刘 晶 John C. Chai(931)
- 053027 非结构化网格中辐射传热的数值计算.....商立英 张 敏 John C. Chai(936)
- 053034 结构与非结构网格之间的转换及应用.....
.....刘 晶 张 敏 John C. Chai(942)
- 053035 不同网格中导热方程的精确解和数值解.....张 敏 刘 晶 John C. Chai(947)
- 053036 地板采暖办公室内热环境的数值模拟.....张雪梅 王如竹 翟晓强(953)
- 053039 现代数学理论在非牛顿流体问题研究中的应用.....郑连存 苏晓红 张欣欣(958)
- 053040 二元合金凝固过程枝晶结构尺度热质传输的影响分析.....
.....聂 红 冯研卉 张欣欣 张燎原(962)
- 053049 层流等离子体铸铁表面重熔过程的三维数值模拟.....
.....王海兴 程 凯 陈 熙 潘文霞(967)
- 053050 层流与湍流等离子体射流特性的模拟研究.....程 凯 陈 熙 潘文霞(971)
- 053054 热声波数值模拟的虚假振荡研究.....刘继平 周志杰 严俊杰(975)
- 053055 一维半无限大区域非稳态热声波的数值研究.....
.....周志杰 刘继平 严俊杰 种道彤(981)
- 053061 燃烧室迷宫复合冷却结构冷流入射角对压力损失影响的数值研究.....
.....李名魁 何立明 蒋永健 金 涛(985)
- 053063 启动汽水分离器运行工况数值模拟分析.....史 飞 刘 彤 王福珍(989)
- 053066 双温度通道电弧等离子体二维数值模拟.....李和平 陈 熙(994)
- 053069 碟型太阳能聚能系统辐射特性数值分析.....
.....帅 永 张晓峰 夏新林 谈和平(998)
- 053070 两种抛物面集热器的聚光特性数值研究.....张晓峰 帅 永 谈和平(1002)
- 053072 双原子分子振动—离解非平衡特性研究.....
.....马 宁 董士奎 段宗宪 谈和平(1006)
- 053105 BEPCII SSM 超导磁体降温 and 升温过程数值研究.....
.....汤洪明 王 莉 杜希阳 贾林祥(1010)
- 053106 百叶窗和针肋翅片的传热与流阻特性的数值研究.....梁新刚 任效明(1015)
- 053108 小圆柱列阵绕流的大涡模拟.....汪健生 汤俊洁(1019)
- 053112 三维对流扩散方程非等矩网格上的高精度多重网格方法.....
.....葛永斌 田振夫 吴文权(1023)
- 053123 U 型管地下换热系统非稳态传热数值模拟.....
.....顾中焱 吴玉庭 唐志伟 马重芳(1028)
- 053124 U 型管传热量影响因素的数值模拟研究.....
.....吴玉庭 顾中焱 马重芳 唐志伟(1032)
- 053129 太阳能电池帆板的周期性瞬态热分析.....夏新林 李 毅 吴 钢(1036)
- 053141 航空发动机进口支板雾凇积冰过程的数值模拟.....
.....王世忠 吉洪湖 胡姬萍(1040)
- 053147 矩形槽通道内对流换热振荡性的数值研究.....
.....李 凌 杨 荣 卢 玫 余 敏 单彦广(1045)
- 053148 锅炉干式除渣机内部空气流动的数值模拟.....
.....施 健 杨 荣 余 敏 田立君 郑臻轶(1049)
- 053149 火灾时 LPG 储罐内传热传质过程分析.....单彦广 杨 荣 李 凌(1053)
- 053159 多相气固反应与流动耦合问题数值模拟.....徐曾和 姜元勇 彭晓峰(1057)
- 053177 三角形突片对气膜冷却换热特性的数值研究.....姚 玉 张靖周 李永康(1063)
- 053190 复杂边界条件下三维热应力数值模拟研究.....杨 莺 周子民(1067)

- 053197 电阻制动带内空气流动与传热特性研究.....华 亮 王良璧(1073)
- 053198 纵向涡强度衰减及其干涉的数值分析.....阳 祥 王良璧(1078)
- 053200 开缝翅片传热与流动特性的三维数值模拟.....吴学红 凌长明 赵冬梅(1082)
- 053201 热管内流动和传热的有限元分析.....吴邦贤 贾 峰 钱华山(1088)
- 053202 压差通风预冷过程的数值模拟.....郑小平 袁达忠 吴邦贤(1092)
- 053203 具有分离结构扰流柱的叶片内冷通道流动与换热数值研究.....
.....徐 青 凌长明 赵冬梅(1096)
- 053205 绕圆柱体的自由表面磁流体流动和传热的数值模拟.....方 莹 黄护林(1102)
- 053207 真空集热管—水冷式太阳能吸附集热床的传热传质数值模拟.....
.....王 洋 黄护林(1108)
- 053211 平板微反应器中甲醇蒸汽重整的数值模拟.....
.....王 锋 辛明道 李隆健 崔文智 陈清林(1114)
- 053212 圆转矩形大宽高比矩形喷管射流掺混特性研究.....张 勃 吉洪湖(1119)
- 053213 涡扇发动机轴承腔冷却性能的数值分析.....李 娜 吉洪湖(1123)
- 053217 油田地下盗油管道地表温度场模拟计算.....吴国忠 李 栋 刘 岩(1128)
- 053219 基于解析再生核的无网格法.....赵军明 刘林华(1133)
- 053224 涡轮导叶内部孔阵冲击冷却的数值模拟.....刘 军 吉洪湖(1139)
- 053225 涡轮叶片节孔冷却通道流固耦合传热研究.....杨 超 吉洪湖(1144)
- 053227 孔几何结构对气膜冷却效率影响的数值研究和实验验证.....
.....马国锋 张靖周 杨卫华(1149)
- 053228 预旋进气转静盘腔内流动与换热数值模拟.....杨成凤 张靖周(1153)
- 053231 三角形波纹翅片传热和阻力特性的三维适体坐标下数值模拟及场协同原理
分析.....陶于兵 何雅玲 吴志根 陶文铨(1157)
- 053232 非对称交错波纹通道内流动与换热的数值研究.....
.....阴继翔 李国君 丰镇平(1161)
- 053235 板式固体氧化物燃料电池的三维数值研究.....
.....张兄文 李国君 李 军 丰镇平(1167)
- 053236 水冷散热器传热与阻力特性的数值模拟.....谢旭良 陶文铨 何雅玲(1175)
- 053239 自由分子流微电热推力器耦合数值模拟.....
.....王裕峰 陶文铨 李增耀 韩先伟(1179)
- 053241 矩形管道湍流换热的直接数值模拟.....马良栋 李光熙 陶文铨 李增耀(1183)
- 053243 直接甲醇燃料电池的三维非等温模型.....闵春华 陶文铨 何雅玲(1187)
- 053245 空气横掠叉排圆翅片管束的数值研究.....
.....周 宇 李惠珍 屈治国 何雅玲 陶文铨(1191)
- 053268 肋角度对气膜冷却影响的数值模拟研究.....陆 犇 姜培学(1196)
- 053269 基于局部非热平衡模型的发汗冷却过程的数值模拟.....
.....孟丽燕 姜培学 蒋方帅 任泽霁(1200)
- 053270 甲烷重整过程中带有化学反应的气体流动与传热分析.....
.....杨国刚 任福安 岳丹婷 袁金良(1204)
- 053273 螺旋折流片强化传热的四管模型数值模拟.....陈亚平 梅 娜 施明恒(1213)
- 053275 磷化铟单晶生长的传热和流动分析.....李明伟 王凭青(1218)
- 053277 扁平管外蛇形翅片空间的流动换热性能数值模拟.....
.....杨立军 杜小泽 刘登瀛 杨勇平(1223)
- 053281 母线形式对扩缩管流动传热强化影响的数值计算研究.....
.....肖春华 桂业伟 李树民 朱国林(1227)
- 053286 Bridgman 晶体生长中溶质边界层的变化.....石科峰 卢文强(1232)
- 053289 具有隔板的平行通道内流动与换热的数值模拟.....
.....田立君 杨 荣 余 敏 施 健 侯 野 郭海生(1237)
- 053290 圆管内变密度流体的流动与换热.....
.....杨 荣 侯 野 卢 玫 张建生 朱惠中 郭海生(1241)

火焰热辐射的光谱依赖性和 TRI 影响

徐晓 陈义良

(中国科学技术大学热科学和能源工程系 安徽 合肥 230026)

Tel: 0551-3601650

E-mail: xuxiao@mail.ustc.edu.cn

摘要 标量联合概率密度函数(PDF)方法、求解辐射传递方程的有限体积法(FVM)联合求解介质吸收系数的关联 κ 分布(CK)模型数值模拟氢气射流扩散火焰,着重讨论火焰中辐射换热的光谱依赖性以及湍流辐射交互作用(TRI)对于辐射换热过程的影响。数值模拟结果表明,忽略辐射换热的光谱依赖性而采用灰气体模型来求解辐射吸收系数会造成对辐射热损失的过高估计;TRI的存在加强了发射辐射和辐射热损失;温度的脉动是造成TRI的主要原因。

关键词 湍流辐射交互作用 概率密度函数 有限体积 关联 κ

1 引言

辐射换热是火焰及燃烧过程中一种重要的换热方式,要准确模拟该过程存在着很多困难。首先,对于燃烧这个高温化学反应过程的模拟本身就是一项困难的工作^[1];其次,需要可以和CFD程序良好结合的辐射传递方程(RTE)的求解器;再次,需要准确计算辐射介质的非灰物性参数;最后,还必须考虑湍流辐射交互作用(TRI)的影响。

针对上述难点,本文数值模拟了Sandia实验室的氢气射流火焰^[2]。采用求解PDF输运方程^[3]的方法模拟高温化学反应过程,该方法具有精确模拟许多非线性关联项的优点,并且是迄今为止唯一可以精确计算TRI的方法^[4];对于辐射传热部分的模拟,本文选用FVM来求解RTE,同时选用窄谱带CK模型^[7]计算辐射介质的吸收系数;Modest最早提出了用PDF/MC方法研究TRI的思想^[4],并且和他的合作者们借助于Fluent平台采用PDF方法研究了TRI对辐射换热的影响^[9],但是,在他们的工作并没有考虑详细化学反应机理而采用了快速化学假设,本文就这点做了改进。本文讨论的重点围绕辐射问题展开,旨在探讨火焰中辐射换热的光谱依赖性以及TRI对于辐射换热过程的影响。

2. 数学模型

2.1 标量联合PDF方法

有关PDF方法具体可以参考文献^[5,6]。

本文采用了11组分23基元反应的化学反应机理^[12]。

由组分质量分数以及能量守恒方程可以推出标量联合的PDF方程:

$$\bar{\rho} \tilde{u} \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x} + \bar{\rho} \tilde{v} \frac{\partial \tilde{f}}{\partial r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r < v'' | \underline{\psi} > \bar{\rho} \tilde{f}) - \frac{\partial}{\partial \psi_\alpha} [\bar{\rho} S_{\alpha, reaction}(\underline{\psi}) \tilde{f}]$$

$$-\frac{\partial}{\partial \psi_\alpha} [\bar{\rho} \left\langle \frac{1}{\rho} \frac{\partial (r J_r^\alpha)}{r \partial r} \middle| \underline{\psi} \right\rangle \tilde{f}] + [\bar{\rho} \frac{\partial}{\partial \psi_\alpha} (\delta_{\alpha s} \frac{4\pi k I_b}{\rho} \tilde{f}) - \frac{\partial}{\partial \psi_\alpha} (\bar{\rho} < \delta_{\alpha s} \frac{kG}{\rho} \middle| \underline{\psi} > \tilde{f})] \quad (1)$$

方程(1)中下标 i 和 α 分别指代物理空间和标量空间。 $\delta_{\alpha s}$ 是 Kronecker 变量,表示相关源项只出现在能量方程中。方程(1)等号右边的项分别表示湍流混合过程、化学反应过程、小尺度混合过程以及仅在能量方程中出现的发射辐射、吸收辐射过程,方程(1)完整地描述了 PDF 随 Favre 平均流流动的过程。

2.2 辐射模型

有关 CK 模型的具体思想可以参考文献^[7]。本文将水蒸汽的光谱划分为 43 个谱带,每个谱带内采用 7 点高斯求和。谱带划分、高斯求和点、相应权值以及模型参数均参考文献^[8]。

求解 RTE 的 FVM 具体可以参考文献^[7],本文着重介绍 FVM 和 CK 的联用。在柱坐标系下,对于给定的立体角 $d\Omega^{lm}$,时间平均后的离散 RTE 方程可以记为:

$$\mu^{lm} \frac{\partial \overline{I_{j,\Delta v_k}^{lm}}}{\partial x} + \frac{\xi^{lm}}{r} \frac{\partial (r \overline{I_{j,\Delta v_k}^{lm}})}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \psi} (\eta^{lm} \overline{I_{j,\Delta v_k}^{lm}}) = -\overline{\kappa_j I_{j,\Delta v_k}^{lm}} + \overline{\kappa_j I_{b,\Delta v_k}^{lm}} \quad (2)$$

$\overline{I_{j,\Delta v_k}^{lm}}$ 是立体角 Ω^{lm} 方向上第 k 个谱带的第 j 个求和点上的平均辐射强度。坐标系的布置情况如图 1 所示。

本文假设计算域边界为室温条件下的黑体,边界条件记为:

$$\overline{I_{w,j}} = I_{bw} \quad (3)$$

立体角 $d\Omega^{lm}$ 内总的辐射强度为:

$$\overline{I^{lm}} = \sum_{k=1}^{N_b} \Delta v_k \sum_{j=1}^{N_Q} \omega_j \overline{I_{j,\Delta v_k}^{lm}} \quad (4)$$

N_b 是谱带总数。

应用湍流涡团光学薄假设^[10],方程(2)中吸收系数和辐射强度的脉动关联项简化为:

$$\overline{\kappa_j I_{j,\Delta v_k}^{lm}} \sim \overline{\kappa_j} \overline{I_{j,\Delta v_k}^{lm}} \quad (5)$$

根据 PDF 的思想,有:

$$\overline{\kappa_j} = \int_0^1 \kappa_j(T(f), X_{H_2O}(f)) p(f) df \quad (6)$$

$$\overline{\kappa_j I_{b,\Delta v_k}} = \int_0^1 (\kappa_j(T(f), X_{H2O}(f))) \times \left(\frac{1}{\Delta v_k} \int_{\Delta v_k} I_{b,v}(T(f), v) \right) p(f) df \quad (7)$$

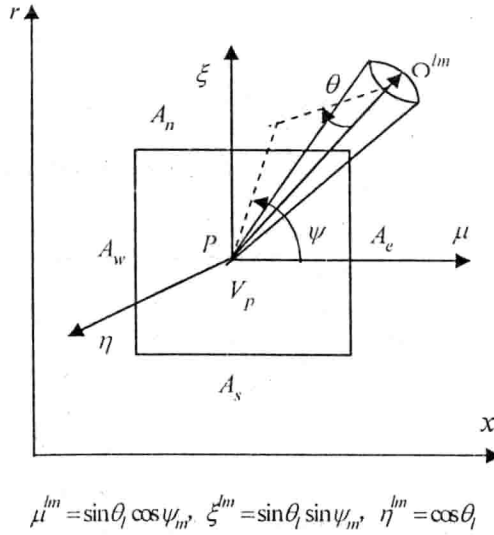


图1 系统坐标系和局部坐标系图

方程(6)和(7)中出现的概率密度函数 f 由2.1节中的PDF/MC算法提供。

数值求解中,采用阶梯格式:

$$\overline{I_{jk,x,out}^{lm}} = \overline{I_{jk,r,out}^{lm}} = \overline{I_{jk,p}^{l(m+1/2)}} = \overline{I_{jk,p}^{lm}} \quad (8)$$

此时,在控制体积、控制立体角单元内,有:

$$\begin{aligned} & \left| \mu^{lm} \right| A_x (\overline{I_{j,\Delta v_k,x,out}^{lm}} - \overline{I_{j,\Delta v_k,x,in}^{lm}}) + \left| \xi^{lm} \right| [A_{r,out} \overline{I_{j,\Delta v_k,r,out}^{lm}} - A_{r,in} \overline{I_{j,\Delta v_k,r,in}^{lm}}] \\ & - [A_{f,out} - A_{f,in}] \frac{\alpha_{m+1/2} \overline{I_{j,\Delta v_k,p}^{l(m+1/2)}} - \alpha_{m-1/2} \overline{I_{j,\Delta v_k,p}^{l(m-1/2)}}}{\Delta \psi} = (\overline{\kappa_j I_{b,\Delta v_k}} - \bar{\kappa}_j \overline{I_{j,\Delta v_k,p}^{lm}}) V_p \Delta \Omega^{lm} \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中 A 是控制单元的表面积, V 是控制单元的体积。下标 in(out) 分别指代辐射能是流入(出)该控制单元表面。式(9)可以采用扫描的方式进行求解^[7]。

最后,辐射热源项可以通过下面的式子进行求解:

$$\overline{\nabla \cdot q} = \sum_{n=1}^{N_h} \Delta v_k \sum_{j=1}^{N_Q} \omega_j (4\pi \overline{\kappa_j I_{b,\Delta v_k}} - \bar{\kappa}_j \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \Delta \Omega^{lm} \overline{I_{j,\Delta v_k}^{lm}}) \quad (10)$$

式中 L 和 M 分别离散的极角和方位角数。

3. 计算结果和讨论

3.1 辐射换热光谱依赖性研究

对于计算精度要求不高的工程问题,灰气体模型经常是求解辐射物性参数的首选模型。灰气体模型中最常用的概念是普朗克平均吸收系数,本文所采用的普朗克平均吸收系数都取自于文献^[11]。图2将FVM/CK(记为方法1)计算所得的辐射热损失和FVM/普朗克平均吸收系数(记为方法2)

$$\overline{\nabla \cdot q} = 4\pi \overline{\kappa_p I_b} - \overline{\kappa_p G} \quad (11)$$

的计算结果作了比较。由图2可见,方法2的计算结果高估了辐射效应(体现为计算所

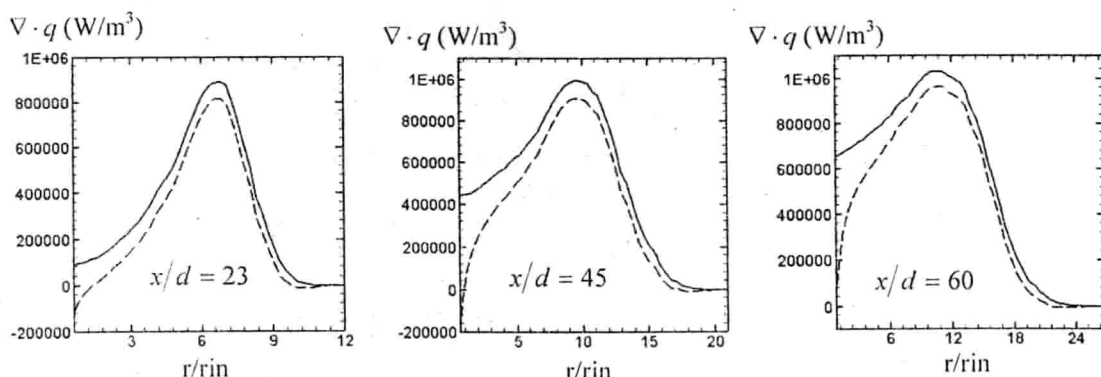


图2 截面辐射热损失,实线表示FVM/普朗克函数模型的结果,虚线表示FVM/CK模型的计算结果

得的辐射热损失偏大),根据我们的计算,由方法2计算所得的整个流场的辐射热损失 $\iiint_{\Delta V} \nabla \cdot q dV$ 为0.0832KW,而方法1计算所得的辐射热损失仅为0.0702KW,模型相对误差

$$error(\%) = \frac{\nabla \cdot q_{gray} - \nabla \cdot q_{CK}}{\nabla \cdot q_{CK}} \times 100 \quad (12)$$

达到了18.5%。实际上,对于本文算例,方法2的计算结果和直接忽略当地吸辐射的光学薄假设:

$$\overline{\nabla \cdot q} = 4\pi \overline{\kappa_p I_b} \quad (13)$$

得到的结果十分相近。光学薄假设下得到的辐射热损失为0.0843KW,相对方法1的模型误差为20.1%。

3.2 TRI对辐射换热的影响

为了研究TRI对辐射换热的影响,本文针对四种不同的工况进行了计算:

1. 完整地考虑TRI;
2. 仅在计算普朗克函数的时候考虑TRI;

$$\bar{\kappa}_j = \kappa_j(\bar{T}, \bar{X}_{H_2O}) = \bar{X}_{H_2O} p_s \kappa_j^*(\bar{T}, \bar{X}_{H_2O}) / (\bar{T} Q(\bar{T})) \quad (13)$$

$$\overline{\kappa_j I_{b, \Delta v_k}} \approx \bar{\kappa}_j \overline{I_{b, \Delta v_k}} = \bar{\kappa}_j \left(\frac{1}{\Delta v_k} \int_{\Delta v_k} I_{b, v}(T(f), v) p(f) df \right) \quad (14)$$

3. 仅在计算吸收系数的时候考虑 TRI:

$$\overline{\kappa_j I_{b, \Delta v_k}} \approx \sigma \bar{T}^4 \int_0^1 (\kappa_j(T(f), X_{H_2O}(f))) P(f) df \quad (15)$$

$x (=r/dm)$	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
0.500D+00	-0.365D+04	-0.355D+04	-0.350D+04	-0.345D+04
0.850D+01	0.231D+06	0.218D+06	0.202D+06	0.201D+06
0.165D+02	0.366D+06	0.356D+06	0.335D+06	0.334D+06
0.245D+02	0.552D+06	0.546D+06	0.513D+06	0.510D+06
0.325D+02	0.711D+06	0.709D+06	0.689D+06	0.686D+06
0.405D+02	0.857D+06	0.851D+06	0.837D+06	0.835D+06
0.485D+02	0.904D+06	0.899D+06	0.882D+06	0.881D+06
0.565D+02	0.979D+06	0.970D+06	0.961D+06	0.960D+06
0.645D+02	0.982D+06	0.981D+06	0.978D+06	0.975D+06
0.725D+02	0.971D+06	0.969D+06	0.959D+06	0.957D+06

表 1 不同截面上辐射热损失

4. 完全忽略 TRI:

$$\overline{\kappa_j I_{b, \Delta v_k}} \approx \kappa_j(\bar{T}, \bar{X}_{H_2O}) I_{b, \Delta v_k}(\bar{T}) = \bar{X}_{H_2O} p_s \kappa_j^*(\bar{T}, \bar{X}_{H_2O}) \sigma \bar{T}^4 / (\pi \bar{T} Q(\bar{T})) \quad (16)$$

表 1 比较了四种工况下不同截面上的辐射热损失, 表 2 则比较了不同工况下整个流场的辐射热损失($\iiint_{\Delta V} \nabla \cdot q dV$)。表 1 和表 2 都反应出 TRI 对发射辐射和辐射热损失都有较强的加强作用。根据我们的计算, 由 TRI 引起的发射辐射占了整个发射辐射的 6.6%, 而由 TRI 引起的辐射热损失则占到了整个辐射热损失的 8.1%。由表 1 可见, 工况 2 和工况 1 的计算结果十分接近, 而工况 3 的计算结果和完全不考虑 TRI 的计算结果十分接近。由于普朗克函数是有关温度的一个非线性函数, 因此可以得出结论对于本文算例, TRI 的主体是由温度脉动引起。

工况	发射辐射 (KW)	辐射热损 (KW)
1	0.0868	0.0702
2	0.0844	0.0676

3	0.0813	0.0652
4	0.0811	0.0647

表 2 全流场辐射热损失

5. 结论

本文数值模拟了 Sandia H_2/He /空气扩散火焰, 模拟中用 PDF/MC 模拟燃烧过程, FVM/CK 模拟辐射换热。数值计算结果表明忽略辐射换热的光谱依赖性会导致辐射热损失偏高, TRI 对发射辐射和辐射热损失都有增强作用。由温度脉动带来的 TRI 在整个 TRI 中居于主导地位。

参考文献

1. R. Borghi, Turbulent combustion modeling, Prog. Energy Combust. Sci. 14 (1988) 245-292
2. R. S. Barlow, Sandia H_2/He Flame Data-Release 1.1 (1997).
3. S.B. Pope, PDF methods for turbulent reactive flows, Prog. Energy Combust. Sci. 11 (1985) 119-192.
4. S. Mazumder, M.F. Modest, A PDF approach to modeling turbulence-radiation interactions in nonluminous flames, Int. J. Heat Mass Transfer 42 (1998) 971-991.
5. S.B. Pope, Monte Carlo method for the PDF equations of turbulent reactive flow, Combust. Sci. and Tech 25 (1981) 159-174.
6. M. Muradoglu, S.B. Pope, P. Jenny, A consistent hybrid finite-volume/particle method for the PDF executions of turbulent reactive flows, J. Comput Physics 154 (1999) 342-371.
7. M.F. Modest, Radiativ heat transfer, McGraw-Hill, New York (1993).
8. A. Soufiani, J. Taine. High temperature gas radiative property parameters of statistical narrow-band model for H_2O , CO_2 and CO , and correlated-K model for H_2O and CO_2 . Int. J. Heat Mass Transfer 40 (1997) 987-991.
9. G. Li, M.F. Modest. Application of composition PDF methods in the investigation of turbulence-radiation interactions. J. Quant. Spectrosc. Radiative Transfer 73 (2002) 461-472.
10. V.P. Kabashnikov, G.I. Myasnikova. Thermal radiation in turbulent flows-temperature and concentration fluctuations. Heat Transfer-Sov Res 17 (1985) 116-25.
11. H. Zhang. Radiative properties and radiative heat transfer calculations for high temperature combustion gases. Pennsylvanian sates university thesis (2002).
12. 李艺, PDF 方程中的小尺度混合项和当地自适应建表方法的研究, 中国科学技术大学博士论文 (2002)。

MESAR 舰载相控阵雷达温度场 及红外辐出度研究

胡双喜¹, 董士奎¹, 杨立², 谈和平¹

(1 哈尔滨工业大学, 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001 2 海军工程大学, 武汉 430033)

Tel: 0451-86412308 E-mail: hushuangxi@163.com

摘 要 目标与环境红外辐射特性的研究是目标与环境特性研究领域中的重要课题。本文采用区域分解法和蒙特卡罗法对英国的 MESAR 型多功能相控阵雷达的实验阵进行了较为细致的热分析, 计算了各种情况下的雷达稳态及关机时的瞬态温度场和红外辐射出射度。

关键词 MESAR 红外建模 相控阵雷达

1 引言

近几十年来, 随着舰艇作战环境的不断恶化, 对舰载雷达的要求也越来越高。由此提出了舰载多功能相控阵雷达的概念, 即考虑将各种雷达的功能集中在一部雷达上。相控阵雷达目标容量大、数据率高等特点较好地满足了舰艇作战的需求, 大大提高了舰艇的进攻和防御能力, 使得舰艇海上作战的能力得到明显增强^[1]。我国最新研制的正在试航中的某型舰艇就在国内首次采用了相控阵雷达技术。本文以 MESAR 为例对相控阵雷达各种情况下的雷达稳态及关机时的瞬态温度场和红外辐射出射度进行了分析, 其分析方法可用于新一代舰载相控阵雷达的分析。

MESAR (Multifunction Electronically Scanned Adaptive Radar 多功能电子扫描自适应雷达) 于 1982 年开始开发, 1993 年起在英海军国防技术研究所进行评估试验。它是英国研制的一部舰载有源多功能相控阵雷达, 能满足 90 年代中期至 2000 年北约舰艇对空防御的要求^[2, 3]。

2 T/R 组件位置的确定及热分析

有源相控阵天线的重要组成部分是安置在每一个天线单元上的发射/接收组件 (T/R 组件), 实际上, 一个 T/R 组件就是一部雷达的发射/接收前端。

相控阵雷达发热电子元器件主要即为 T/R 组件。MEASE 试验阵单个阵面上有阵列单元 1060 个, 其内部结构图见图 1^[4], 用 AUTOCAD 将这 1060 个 T/R 组件的插入位置进行了模拟, 见图 2, 与图 1 比较, 情况比较符合。

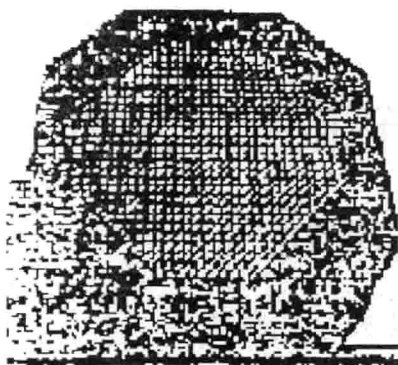


图1 阵面结构图

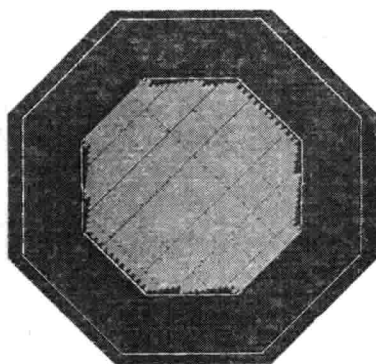


图2 模拟结构图

参照某型 T/R 组件对相控阵雷达的核心部 T/R 组件 (图 3^[5]) 进行细致的网格划分 (图 4) 以对其进行热分析。其计算出的三维非稳态温度场的结果不仅能细致的反映出 T/R 组件工作的热环境, 为改善 T/R 组件工作温度, 提高散热效果提供理论依据, 而且由于物性参数仅与物体性质有关, 所以可以根据温度场算出其各项等效热物性参数, 将其代入原程序中能大大的简化计算, 减少计算时间。

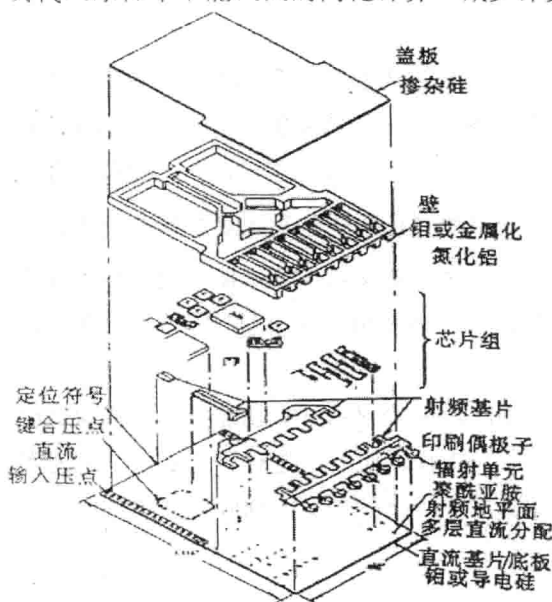


图3 T/R 组件结构图

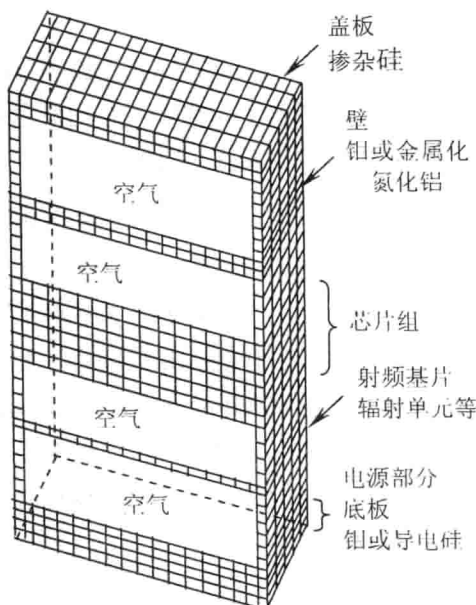


图4 T/R 组件网格图

3 温度场及辐射出射度的计算

采用热网络法—控制容积法计算舰载相控阵雷达天线阵面的三维非稳态的温度场。各个子系统的温度场计算采用三维直角、圆柱、球坐标系下的控制容积法分别处理, 而整体结构 (子系统与子系统间) 用热网络法, 综合考虑导热、对流和辐射。每个子系统在合适的坐标系下划分成若干个单元 (体元和面元)。

对体元, 可用三维直角坐标系 (x, y, z) 下含内热源的瞬态热传导方程进行计算:

$$C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\psi}{V} \quad (1)$$

式中: C 为单位体积热容 $[\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$; k 为导热系数 $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$; ψ 为源项。对于表面面元, 以面元 i 为例, 则边界热平衡方程为:

$$\begin{aligned} & \sum_j k_{i,j} \cdot F_i \cdot (T_j - T_i) / L_{i,j} + a_i^{\text{visib}} \cdot F_{\text{sun}i} \cdot P_{\text{irradia}} \cdot C_{\text{sun}} + a_i^{\text{visib}} \cdot F_i \cdot P_{\text{scatt}} \cdot C_{\text{sun}} \\ & + \sum_{j=1}^{N_{\text{contr}}} RD_{j,i}^{\text{visib}} \cdot \left[\begin{aligned} & (1 - a_j^{\text{visib}}) \cdot F_{\text{sun}j} \cdot P_{\text{irradia}} \cdot C_{\text{sun}} \\ & + (1 - a_j^{\text{visib}}) \cdot F_j \cdot P_{\text{scatt}} \cdot C_{\text{sun}} \end{aligned} \right] \\ & = h_i \cdot F_i \cdot (T_i - T_f) + \sigma \cdot \varepsilon_i^{\text{inf ra}} \cdot F_i \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_{\text{contr}}} RD_{i,j}^{\text{inf ra}} \cdot (A_{T_i}^{\text{inf ra}} \cdot T_i^4 - A_{T_j}^{\text{inf ra}} \cdot T_j^4) \right] \\ & + \sigma \cdot \varepsilon_i^{\text{inf ra}} \cdot F_i \cdot RD_{i,\text{sky}}^{\text{inf ra}} \cdot (A_{T_i}^{\text{inf ra}} \cdot T_i^4 - A_{T_{\text{sky}}}^{\text{inf ra}} \cdot T_{\text{sky}}^4) \\ & + \sigma \cdot \varepsilon_i^{\text{inf ra}} \cdot F_i \cdot RD_{i,\text{gro}}^{\text{inf ra}} \cdot (A_{T_i}^{\text{inf ra}} \cdot T_i^4 - A_{T_{\text{gro}}}^{\text{inf ra}} \cdot T_{\text{gro}}^4) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: 左端: 第一项为面元 i 与相邻单元 j 的热传导; 第二项为太阳(可见光波段)一次照射(包括直射和散射)对面元 i 的贡献; 第三项为太阳一次照射在相控阵阵面其它各面元 j ($j = 1 \sim N_{\text{contr}}$) 上, 经过一次或多次反射后, 最终对面元 i 的贡献, $RD_{j,i}$ 为面元 i 对面元 j 的辐射传递系数, 详见文献[6]。右端: 第一项为面元 i 与相邻流体的对流换热, 对流换热系数 $h_i(T, \phi, u)$ 是温度, 湿度 ϕ 和速度 u 的函数, 详见文献[6]; 第二项为面元 i 与相控阵阵面其它各面元 j 的红外辐射换热; 第三项为面元 i 与天空背景各单元的红外辐射换热; 第四项为面元 i 与地面背景各单元的红外辐射换热。

4 算例及分析

以某型舰艇某种工况为例时计算了有无电馈效果, 物性参数的改变时以及关机瞬态的温度场、 $3-5 \mu\text{m}$ 辐射出射度场、 $8-12 \mu\text{m}$ 辐射出射度场、及光谱辐射出射度, 由于篇幅有限, 仅将关机时 2[s] 和 16[s] 的瞬态变化情况列出以说明情况, 见图 5 和图 6。

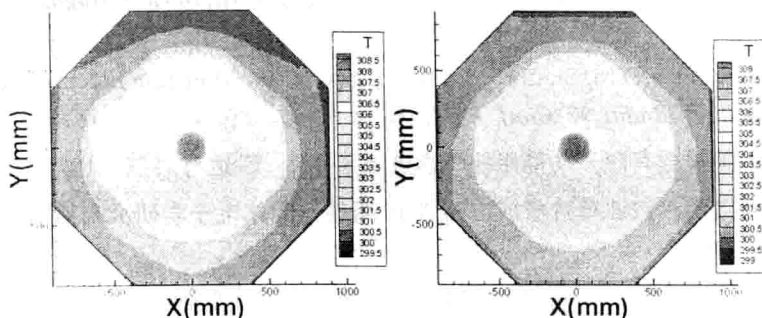


图 5-1 关机 2[s]

图 5-2 关机 16[s]

图 5 关机温度场的变化示意图

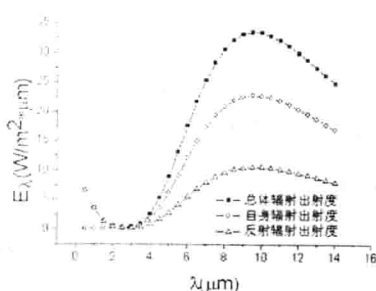


图 6-1 关机 2[s]

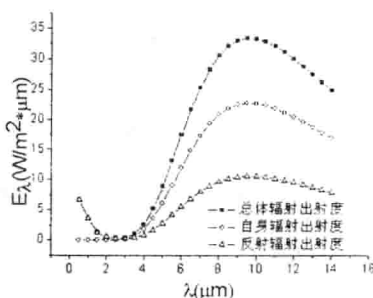


图 6-2 关机 16[s]

图 6 关机光谱辐射出射场的变化示意图

从图 5 至图 6 中可以看出, 由于阵面材料采用的玻璃纤维增强塑料(GRP)材料的热容非常小, 所以当关机后, T/R 组件不再发热, 空馈效应消失, 相控阵雷达阵面的温度场及红外辐射出射度场迅速下降, 同时沿着海面海气的流动方向, 温度场也有所变化, 同时由于 GRP 材料导热系数也非常小, 所以雷达阵面的温度场及红外辐射出射度场在其后的变化过程中变化不大。虽然关机后相控阵雷达阵面的温度场及红外辐射出射度场迅速下降, 但是还是高于环境的温度场及红外辐射出射度场, 可以将其目标特性作为打击目标, 特别是在其后的变化过程中变化不大比较适合红外制导雷达的跟踪和识别。

5 结论

本文采用蒙特卡罗法计算了太阳辐射和表面辐射传递系数, 用热网络法—控制容积法计算舰载相控阵雷达天线阵面的三维非稳态的温度场, 根据计算出的温度场考虑环境背景的辐射影响计算出目标的波段辐射出射度, 并重点分析和计算了电馈效果, 物性参数的改变对温度场和辐射出射度影响以及关机时的瞬态变化情况。最终为保证舰载相控阵雷达的各组件的温度环境的一致性和相控阵雷达的正常工作; 在特定环境下使红外信号消减, 减少舰载雷达甚至舰艇受到攻击的可能提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 陈绪元. 舰载多功能相控阵雷达概述. 现代雷达, 2002, 2: 20~24
- 2 Steven N. Stitzer. History of the MERA antenna. *IEEE Microwave Magazine*, 2004, 6: 44
- 3 Moore, A.R. Salter, D.M. Stafford, W. K. MESAR (Multi-function Electronically Scanned Adaptive Radar). *Radar 97.Conf. Publ*, No. 449: 55~59
- 4 徐产兴. 英国舰载有源多功能相控阵雷达 MESAR. 雷达与对抗, 1994, 1: 6~18
- 5 陆懋权, 刘自明. 微波单片集成电路 T/R 组件. 固体电子学研究与进展, 1996, 8, 16(3): 417~423
- 6 胡双喜, 董士奎, 杨立, 谈和平. MESAR 舰载相控阵雷达温度场及红外辐射边界条件的研究. 中国教育学会工程热物理专业委员会第十一届全国学术会议, 2005, 5: 276~282

一维介质热辐射特性反问题的微粒群方法

王雁鸣 张昊春 谈和平

(哈尔滨工业大学, 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

Tel: 0451-86412308 E-mail: hit_wangym@eyou.com

摘 要 本文针对一维半透明介质热辐射特性的反问题进行研究。采用离散坐标法求解辐射正问题, 用微粒群算法优化目标函数, 同时反演了热辐射介质的反照率、散射不对称因子以及边界发射率。计算分析了测量误差对反演精度的影响, 与遗传算法反演结果进行了比较。结果表明, 微粒群算法可以很好的实现一维半透明介质热辐射特性的多参数反演问题, 反演精度优于遗传算法。

关键词 辐射反问题 离散坐标法 微粒群算法

1 引言

辐射反问题是当前的研究热点之一, 国内外学者针对如反演介质的辐射特性、介质内部的温度分布等问题开展了大量研究^[1-4]。采用的反演方法主要是共轭梯度法、Levenberg-Marquardt、Newton-Raphson 等局部最优化方法。这些解析性优化方法难以适用于目标函数不连续、约束域内存在多峰值等情况, 其求解结果与初始值相关而易陷入局部“陷阱”。

为可靠解决全局优化问题, 近十几年来发展起来一系列仿生型智能优化算法, 如进化类算法、群体智能算法等。这些随机型优化方法的优越性在于搜索过程中不容易陷入局部最优, 即使目标函数是不连续的、非规则的或有噪声的情况下, 也能以很大的概率找到整体最优解。微粒群算法(PSO)^[5]作为群算法的重要成员, 是近几年迅速发展起来的一种全新的随机搜索与优化算法, 在许多领域获得广泛应用。但国内外文献中将微粒群算法应用于介质辐射特性反问题的研究尚不多见。本文在辐射传递方程离散坐标近似的基础上, 采用 PSO 方法对一维半透明介质辐射特性的多参数反演方法进行研究。

2 正问题

考虑由吸收系数、散射系数分别为 κ_a 、 κ_s 的介质组成的一维半透明灰体介质平板。介质厚度为 L , 边界发射率为 ε 。正问题为已知上述参数求边界出射辐射强度。

控制方程及其边界条件分别为:

$$s \cdot \frac{\partial I(\tau, s)}{\partial \tau} = -I(\tau, s) + (1 - \omega) I_b(\tau) + \frac{\omega}{4\pi} \int_{4\pi} I(\tau, s') \Phi(s \cdot s') d\Omega \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 50336010) 资助