

基于 I-DEAS 的非线性多热源温度场反演研究

帅 永¹, 张晓晨², 卿恒新³, 谈和平¹

(1. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001; 2. 北京临近空间飞行器系统工程研究所, 北京 100076;
3. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘 要: 本文对 I-DEAS 进行了二次开发, 完成了脚本与 I-DEAS 软件 TMG 模块的数据交互并自动控制计算流程, 采用自适应算法和加权算法求解航天器热平衡试验中多热源非线性温度场反演问题, 并研究了迭代初值、循环运算次数、迭代步长等参数对反演误差的影响规律。两种方法的反演结果吻合良好且精度满足设计要求, 其求解思路和算法可为航天器件内部温度场的热平衡试验及热源的优化设计提供参考和依据。

关键词: 温度场反演; I-DEAS; 二次开发; 非线性

中图分类号: V416.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2011)09-2088-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.09.031

Inversion Research on Temperature Field with Nonlinear Multiple Heat Source using I-DEAS

SHUAI Yong¹, ZHANG Xiao-chen², QING Heng-xin³, TAN He-ping¹

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;
3. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: An I-DEAS secondary development is performed on the basis of software calculation of heat transfer problem according to heat source optimization in dynamic thermal balance of closed system. A script program is compiled to realize data exchange between the calculating program and the TMG module in I-DEAS, and the batch processing is adopted to control calculation process automatically for improving the computational efficiency. An adaptive algorithm and a weighted algorithm are designed separately to solve the temperature field inversion problems with nonlinear multiple heat sources in the thermal balance experiment of spacecraft. Considering the influences of initial value, number of cycle operations and iterative steps on inversion error, it is shown that the results of two algorithms match well and meet requirement for accuracy. The calculational results would provide references and evidences for some thermal experiments of spacecrafts and optimal designs of inner heat sources in the inversion problem.

Key words: Temperature field inversion; I-DEAS; Secondary development; Nonlinear

0 引 言

传热学反问题是指通过测量温度场内部温度信息反求边界条件、初始条件或者导热系数的问题。在实际工业生产中有非常重要的应用, 如预测飞行器再入时外表面热流密度分布, 预测未知材料物性, 热控试验中的热源估算等^[1]。强晟^[2]针对混凝土

浇筑开裂问题, 采用遗传算法和温度场离散迭代算法对数据反演, 获取了相关的边界条件参数。杨冬^[3]建立了一维瞬态导热过程中由内部多点的温度测量值反演计算边界表面上未知的温度与热流密度的数学模型, 反演得到内壁温度与热流密度。Niliot^[4-5]运用边界元法研究了热扩散系统的线热源反演问题。

边界条件已知、有限热源未知的系统,其温度场反演计算及系统温度调整的机理复杂,无法通过传热方程的合理变换进行反问题数值计算。如何通过已知探测点的温度来推算外边界条件下全场的温度值及空间热源分布对其内部动态平衡环境产生的影响便成了此类问题的重点。如图 1 所示,在一个任意形状的封闭空间里,外边界条件(定温度边界)已知,内部有若干热源(图中红色圆点的个数和位置已知),其作用是保持整个系统内部温度的动态平衡。系统内还分布着若干已知探测点(图中蓝色的方形点),它们的温度实时探测已知。这类反问题解决的瓶颈在于如何构建一种行之有效、节约资源和节省开支的反演算法。本文采用 I-DEAS 软件计算传热^[6]过程,同时进行 I-DEAS 的二次开发^[7],编写脚本程序并建立与 I-DEAS 软件 TMG 模块的数据接口。为配合某航天器件热平衡实验,减少实验成本,本文采用两种不同算法实现在有限已知温度点求解了全场的温度,并对方法进行了比较分析,可为航天器件热平衡试验中热源优化设计提供依据。

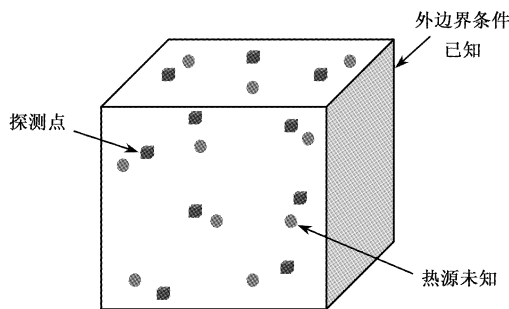


图 1 三维多源温度场反演问题示意图

Fig. 1 Inversion schematic diagram of temperature field with multiple heat source

1 非线性多热源温度场反演模型

航天器件的热平衡试验需要在其内部设置 n 枚加热片(功率未知)模拟该器件在空间环境下工作的温度条件。为检测器件的整体温度变化情况,在每枚加热片处及其周围各设置一个灵敏热电偶以测量加热片区域及周围区域的温度分布。分别称加热片处和其周围的热电偶测得温度为控温点温度和遥测点温度,且都是已知的目标温度(试验温度)。试验器件考察区域的总场边界条件及内部加热片和热电偶的位置均为已知,且加热片的功率变化会同时影

响该处的控温点温度和周围分布的其他热电偶测得温度,即热源属于非线性分布。

加热片功率(自变量 x_i)是需要求解的定解条件,控温点和遥测点的温度数值(因变量)是计算依据。自变量与因变量的数量较多,且自变量对因变量的影响并不独立而是相互影响、彼此制约的,使该问题具有一定的复杂性。由于温度总场函数 $T = T(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 中的 T 没有明确的表达式,不能求取关于每个变量的偏导数,因而迭代过程不能应用梯度法。为此选择一种多变量迭代逼近法作为本项目的求解算法,即重复修改加热功率(自变量)计算对应单元温度数值并与目标值比较后更新加热功率,通过多次迭代使加热功率不断向满足条件的目标值靠近。这种方法适用于迭代次数不多(小于 100 次)的反问题计算。 n 个自变量之间存在相互影响、相互制约的关系,利用软件进行温度场运算,通过脚本编程实现多变量迭代逼近算法的反问题求解。

本文计算对象的传热途径主要是热传导和热辐射,运用有限控制容积法求解温度场,其热平衡方程为:

$$\int_A q_n da + \int_V q_o dV = \int_V \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) dV \quad (1)$$

$$Q_b + Q_o = \frac{dU}{dt} \quad (2)$$

式中, Q_b 为通过控制容积边界的热流; Q_o 为控制容积内产生的热量; U 为控制容积内贮存的能量。对整个能量交换区域,通过相邻控制容积之间边界的热流用传热系数 G 来表征:

$$Q_{ij} = G_{ij} \times f(T_i, T_j) \quad (3)$$

温度 T_i 和 T_j 在控制容积的有限差分计算点被估算。对于导热系数为线性的情况, G 为常值,热流与有限差分计算点的温差成正比, $f(T_i, T_j)$ 表示相邻控制容积之间的温度函数,此处仅考虑导热系数和辐射换热系数(辐射换热仅发生于物体表面,太空环境不考虑介质的辐射)。假设航天器件的密度和比热均为常数,热平衡方程化为:

$$Q_i + \sum G_{ij} \times f(T_i, T_j) = C_i \frac{dT_i}{dt} \quad (4)$$

若只考虑稳态情况则有 $Q_i + \sum G_{ij} \times f(T_i, T_j) = 0$, 这将产生整个反演区域内的一系列代数方程,求解这些方程即可得到各个控制容积计算点上的温度

值。I-DEAS 热分析软件所用控制容积法可以和有限元建模法兼容,只要把每个几何单元当作一个控制容积,一个有限元网格就可以用来直接生成一个有限差分模型。本文使用某航天器件的三维网格模型进行传热分析计算,其各控制容积单元依次编号求解。

1.1 数学模型

设温度场 T 是定义在 n 维欧式空间 R^n 内区域 D 上的函数, T 可表示为:

$$T = \{T_i(X) \mid i = 1, 2, \dots, n\}, \quad (X \in D \subseteq R^n) \tag{5}$$

其中向量 X 的分量 x_1, x_2, \dots, x_n 为函数 $f(X)$ 的自变量即场内热源功率值, n 表示源的数量, $T_i(X)$ 为温度场 T 的分量, 向量 X 的分量则为 x_1, x_2, \dots, x_n 。目标温度为热控试验中热源处需达到的温度指标,

$$T^* = (T_1^*, T_2^*, \dots, T_i^*) \tag{6}$$

定义目标函数:

$$G(x_i) = |T_i - T_i^*| \tag{7}$$

此时热源优化问题转化为求解函数 G 的最小值问题。如前所述,非线性多热源的温度场无法使用梯度法求解,故运用 Newton 迭代法^[8], 设 $Y = G(x_i)$ 有反函数 $x_i = g(Y)$ 则:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{T(x_i)}{T'(x_i)} = x_i \mp \Delta P, \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{8}$$

式中 ΔP 表示 x_i 的迭代步长。基于 Newton 迭代法分别设计自适应及加权两种算法来求解满足温度精度 δ 要求的热源功率值。

1.2 自适应算法模型

图 2 是自适应算法流程图, 其中 δ_j 和 ΔP_j 分别表示 j 个不同的温度偏差和其对应的功率步长; y'_i, y_i 分别表示控温点温度和其目标温度, e_{1i} 表示控温点温度与目标温度(试验温度)的偏差。自适应算法通过对不同温度偏差 e_{1i} 设定相应功率步长以提高平均温度偏差 σ 收敛速率的方法实现热源初值的自适应计算。该算法只考虑控温点温度偏差 e_{1i} 作为自变量更新依据, 由于遥测点位于加热片附近, 默认控温点温度达到要求后遥测点温度可自然逼近真实值。针对控温点温度与目标温度的差值, 设置不同功率步长 ΔP_j 调节自变量逼近速率, 达到不同热源初值条件下自适应计算的目的。

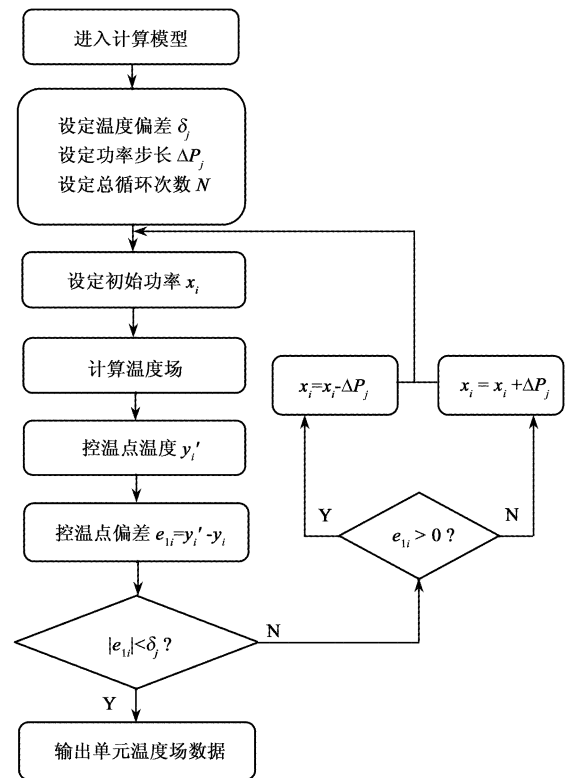


图 2 自适应算法流程图

Fig. 2 The flow chat of adaptive algorithm

1.3 遥测点加权算法模型

图 3 是遥测点加权算法流程图, 其中 z'_i, z_i 分别表示遥测点温度和其目标温度, e_{2i} 表示遥测点温度与目标温度(试验温度)的偏差。遥测点加权法不考虑控温点温度达到要求后遥测点温度可自然逼近真实值的默认条件, 在自适应算法的基础上加入了对遥测点温度偏差 e_{2i} 的考察, 同时以 e_{1i} 和 e_{2i} 的大小作为自变量更新依据。遥测点温度对控温点温度的优先级由相应的权值(遥测点对应功率步长 ΔP_j)决定, 权值越高代表此处需优先满足遥测点温度要求, 权值低则代表在满足控温点目标温差范围内微调遥测点温度以尽量满足遥测点温度要求。

1.4 I-DEAS 软件的二次开发

I-DEAS 是由美国 UGS 公司开发的在一体化技术方面雄居世界榜首的 CAD/CAE 软件。I-DEAS 的内嵌开发机制利用集成的宿主程序脚本解释器解释编写脚本程序, 控制宿主程序调用相应的功能模块, 达到与宿主程序交互操作的目的。

本文通过重复修改内部热源的功率, 实现温度场自动化运算求解与热试验数据相吻合热源功率分

布。结合自编辑的 I-DEAS TMG 模块接口程序实现温度数据在仿真软件与内嵌脚本程序间的交互。按前述算法分别编写自适应和加权法两种 I-DEAS 内嵌脚本程序。同时为保证计算结果的收敛与准确性,在程序中加入实时输出模块对迭代运算数据实行监控及存储,可预防突然死机、断电等突发事件对计算的影响,保证计算数据的可延续性。

2 计算结果与分析

本文以 $i = 10$ 的温度场反演为算例,即温度场内具有 10 个热源,10 个控温点和 10 个遥测点,求解热源 x_i 的功率数值并由反演得到 x_i 来重构整个温度总场。设定导热边界条件(第一类边界)和辐射边界条件来模拟太空中的散热环境。分别针对不同温度偏差 $\delta_j(j = 3)$ 设定不同功率步长 $\Delta P_j(j = 3)$ 来控制收敛速度和反演精度,将特定点温度与目标温度进行对比得到平均温度偏差 σ_v 及最大温度偏差 σ_m 作为考察反演准确性的依据,其中 $\sigma_{v1}、\sigma_{m1}$ 分别表示控温点平均温差及最大温差, $\sigma_{v2}、\sigma_{m2}$ 分别表示遥测点平均温差及最大温差。

$$\begin{cases} \sigma_{v1} = \frac{1}{i} \sum_i |y'_i - y_i| = \frac{1}{i} \sum_i |e_{1i}| \\ \sigma_{m1} = \max_i |y'_i - y_i| = \max_i |e_{1i}| \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \sigma_{v2} = \frac{1}{i} \sum_i |z'_i - z_i| = \frac{1}{i} \sum_i |e_{2i}| \\ \sigma_{m2} = \max_i |z'_i - z_i| = \max_i |e_{2i}| \end{cases} \quad (10)$$

加热功率 x_i 迭代初值的选择由仿真的实际情况确定。若通过目标温度对所求温度场进行试仿真,可得到较随机选取情况相对准确的初值。例如通过一次试仿真发现设 x_i 迭代初值均等于 3 时较等于 1 时可大大缩小 σ_{v1} 和 σ_{v2} 的数值,此时称前者为优初值,相比之下后者为劣初值。若热试验中热源的功率范围为已知条件,可在很大程度上提高迭代初值的质量进而影响反演的精度。

温度偏差 δ_j 的设定是根据具体技术要求而定,例如此处要求反演总场特定点温度与目标温度的平均偏差在 1℃ 以内,则可选取 $\delta_1 = 0.3, \delta_2 = 0.5, \delta_3 = 1.0$ 。功率步长 ΔP_j 的选取则是依据对应的温度偏差 δ_j 而定,即依据温度偏差 δ_j 经过多次试算确定。对于以上三个 δ_j 则可分别选择 $\Delta P_1 = 0.01, \Delta P_2 = 0.05, \Delta P_3 = 0.25$ 。

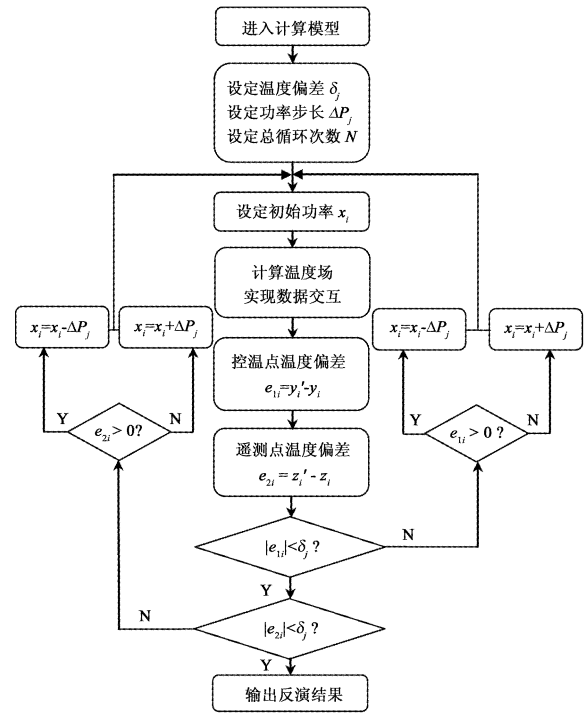


图 3 遥测点加权算法流程图
Fig. 3 The flow chat of weighted

2.1 自适应算法求解结果

在自适应算法不同参数条件下分别比较 10 个控温点和 10 个遥测点对比热试验目标温度的平均温度偏差和最大温度偏差,以考察温度场反演计算的准确性。由图 4 和图 5 可知功率初值对收敛速度的影响十分明显,较优的初值可大大缩小运行时间,提高运行效率,减小数据的振荡。如果选择劣初值对应大步长会在迭代若干次后造成计算数据的发散,因此这里未考虑劣初值大步长的情况。在初值范围无法确定时选择较小的步长可以通过提高循环次数来得到满足要求的温度数据。自适应算法中参数的差异不会对温度场平均温度偏差的收敛值造成影响。

2.2 遥测点加权法求解结果

遥测点加权算法适用于对非热源处特定点温度有特殊要求的温度场反演计算,可通过选择合适的权值求解总场内精度要求不同的多考察点温度反演问题。图 6 和图 7 表明遥测点加权法的高权值提高了温度数据随迭代次数的振荡效应,延长了收敛时间。由于大步长低权值容易导致数据发散,而小步长高权值又等同于控温点与遥测点互换的大步长低权值算法,因此忽略这两种控制参数组合的比较。

遥测点加权法可有效缩小遥测点与目标温度的偏差值,但由于同时考虑控温点与遥测点的温度值会导

致该处热源功率在某一数值范围内的振荡效应。

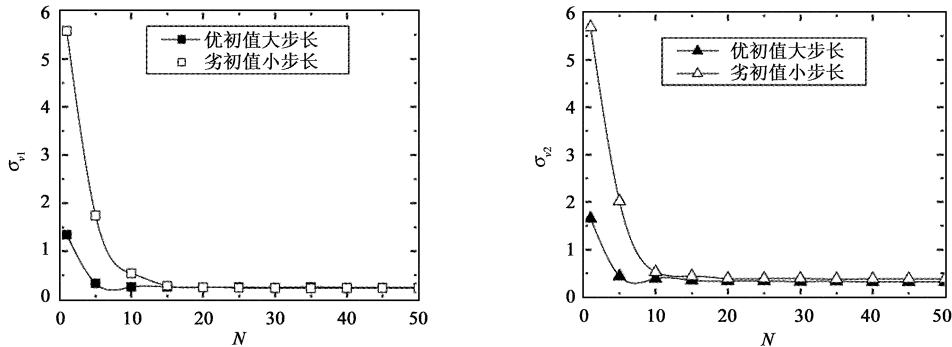


图 4 自适应算法中控制参数对平均温度偏差的影响

Fig.4 Influences of controlling parameters on average temperature deviation in adaptive algorithm

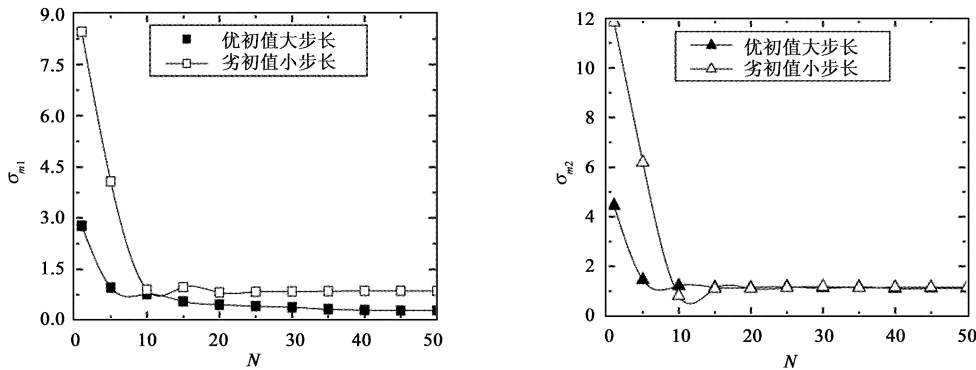


图 5 自适应算法中控制参数对最大温度偏差的影响

Fig.5 Influences of controlling parameters on maximal temperature deviation in adaptive algorithm

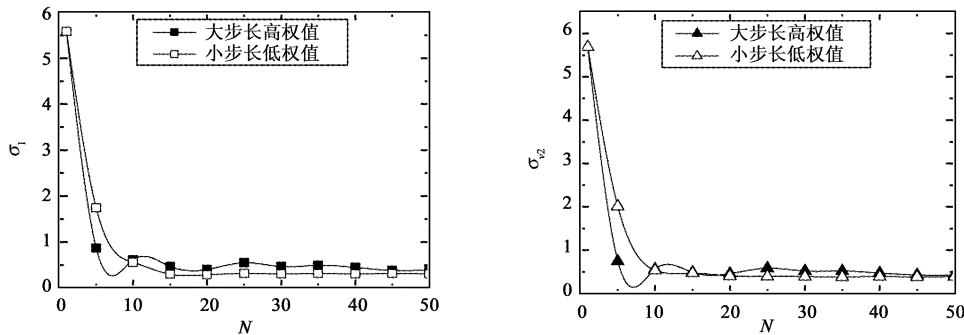


图 6 加权算法中控制参数对平均温度偏差的影响

Fig.6 Influences of controlling parameters on average temperature deviation in weighted algorithm

2.3 两种算法比较

加权算法由于同时考察控温点与遥测点的温度偏差,微小的数据振荡现象不可避免。两种算法在初值相同的条件下最终收敛于同一数值正表明温度场反演结果的唯一性。如图 8,其中 σ_T 代表控温点与遥测点的总平均温度偏差:

$$\begin{aligned} \sigma_T &= \frac{1}{2i} \left(\sum_i |y'_i - y_i| + \sum_i |z'_i - z_i| \right) \\ &= \frac{1}{2i} \left(\sum_i |e_{1i}| + \sum_i |e_{2i}| \right) \end{aligned} \quad (11)$$

虽然自适应算法的平均温差较小,但其未考虑遥测点的偏差导致遥测点最大温度偏差较大,容易

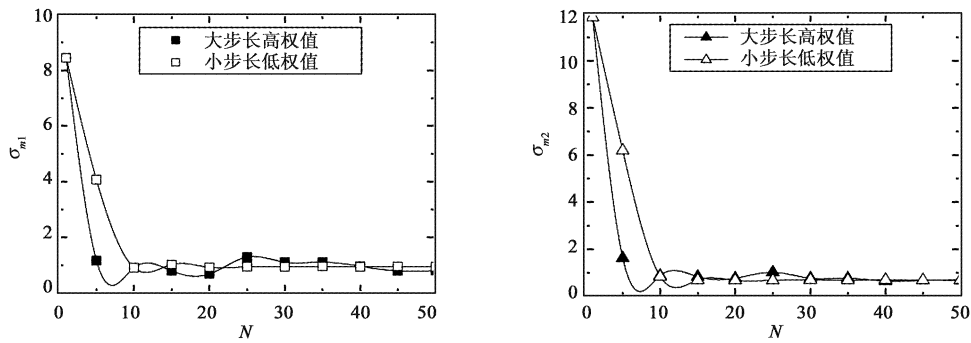


图 7 加权算法中控制参数对最大温度偏差的影响

Fig. 7 Influences of controlling parameters on maximal temperature deviation in weighted algorithm

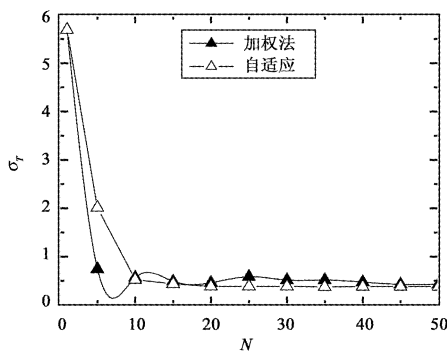


图 8 自适应算法与加权算法总平均温度偏差的比较

Fig. 8 Comparison of total average temperature deviation between two algorithms

引起局部过热现象,因此在这一方面遥测点加权算法较优,可在控制点优先级确定的情况下选择合适的权值来得到满足要求的结果。两种算法反演结果均能保证控温点和遥测点的温度偏差低于 0.5℃且最大偏差小于 1.5℃。算法的选择可依据真实情况下不同位置点处对温度的要求而定,如只需热源处温度达到要求可选择自适应算法以提高收敛速度,如需热源处及其周围多点温度按不同精度达到要求则应选择加权算法,通过合理配置各点权值而分别满足不同位置的精度要求。图 9 显示了该航天器件中某两元件经过加权算法反演后代入加热片功率计算得到的温度场分布。两元件三维模型温度分布均匀,满足平均温度偏差要求。

3 结 论

针对封闭系统动态热平衡的源参数优化问题通过特定点温度推算出传热问题的边界条件(热源功率)并重构整个区域的温度场。进行 I-DEAS 二次开发,编写脚本程序实现与 I-DEAS 软件 TMG 模块

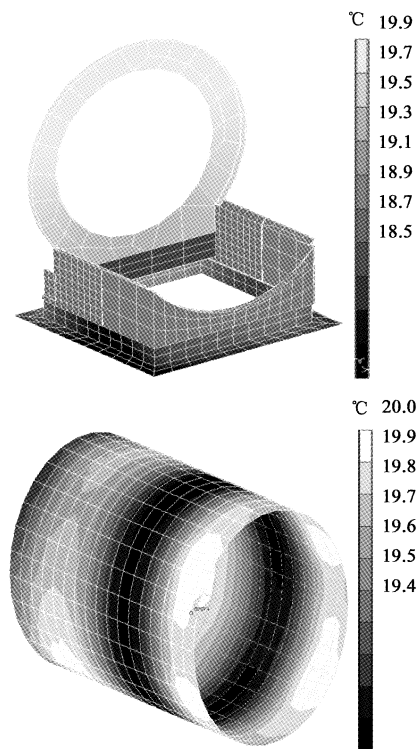


图 9 元件温度场分布图示意图

Fig. 9 Temperature field of certain component

的数据交互,提高运算效率。分别采用自适应算法和加权法求解航天器热平衡试验中多热源非线性温度场反演问题并获得以下结论:

(1) 自适应算法比加权法收敛速度快,迭代 15 次即可满足平均温差 1℃ 的要求。对控温点的平均温差 σ_{v1} 和遥测点的平均温差 σ_{v2} 的控制效果好, σ_{v1} 、 σ_{v2} 均小于 0.5℃且收敛结果受迭代初值和功率步长的影响较小,但最大温差 σ_m 的控制效果欠佳;

(2) 加权算法对控温点最大温差 σ_{m1} 和遥测点最大温差 σ_{m2} 的控制效果较好, σ_{m1} 、 σ_{m2} 均小于 1℃

且 σ_{v1} 、 σ_{v2} 也保持在 0.5°C 以内,可在温度场内避免局部过热现象的发生。但功率步长 ΔP_j 对加权法中 σ_v 和 σ_m 的收敛速度影响较大且迭代初期存在一定的振荡效应;

(3) 自适应法和加权法的计算结果均可达到平均温差小于 1°C 、最大温差小于 1.5°C 的目标。其中前者可控制 σ_v 小于 0.5°C ,后者可控制 σ_m 小于 1°C 。若只需热源处温度达到要求可选择自适应算法以提高收敛速度,若需热源处及其周围多点温度按不同精度达到要求则应选择加权算法。以上计算结果可为航天器件内部温度场的热平衡试验及热源的优化设计提供参考和依据。

参 考 文 献

- [1] 丁鹏,陶文铨. 求解对流换热反问题的低阶模型[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(3): 14 - 16. [Ding Peng, TAO Wen-quan. Reduced order model based algorithm for inverse convection heat transfer problem[J]. Journal of Xi' AN Jiaotong University, 2009, 43(3): 14 - 16.]
- [2] 强晟,朱岳明,许朴,等. 南水北调高性能混凝土温度边界条件的试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2008, 30(3): 11 - 12. [Qiang Sheng, Zhu Yue-ming, Xu Pu, et al. Experimental study of temperature boundary condition of high performance concrete for south-north water transfer project [J]. Journal of China Three Gorges University (Nature Science), 2008, 30(3): 10 - 12.]
- [3] 杨冬,陈听宽. 导热反问题方法在计算瞬态传热过程中的应用[J]. 核动力工程, 1997, 18(6): 554 - 559. [Yang Dong, Chen Ting-kuan. Application of inverse heat conduction problem in transient heat transfer calculating[J]. Nuclear Power Engineering, 1997, 18(6): 553 - 559.]
- [4] Le Niliot C, Rigollet F, Petit D. An experimental identification of line heat sources in a diffusive system using the boundary element method[J]. Heat and Mass Transfer, 2000, 43: 2205 - 2220.
- [5] Le Niliot C, Rigollet F. A method for multiple steady line heat sources identification in a diffusive system; application to an experimental 2D problem[J]. Heat and Mass Transfer, 2001, 44: 1426 - 1438.
- [6] 余其铮. 辐射换热原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000: 111 - 112.
- [7] 张庆. 基于太空辐射的星载天线在轨热性能分析与优化[D]. 西安电子科技大学硕士学位论文, 2007. [Zhang Qing. Analysis and optimization of on-orbit thermal performance for a satellite antenna under space radiation [D]. Xi' an: Master' s Dissertation of Xidian University, 2007.]
- [8] 吴勃英. 数值分析原理[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

作者简介: 帅永(1978 -), 男, 博士, 副教授, 主要从事航空航天热控分析、太阳能热利用、热辐射机理等领域的研究工作。
通信地址: 哈尔滨工业大学 456 信箱(150001)
电话: (0451)86412308
E-mail: shuaiyong78@yahoo.com.cn

(编辑: 沃云峰)