

粗糙表面之间接触热阻反问题研究¹⁾余远锋* 李泽卫[†] 郑晓亚^{*,2)}

*(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

[†](中国航天科技集团公司四院四十三所, 西安 710025)

摘要 当两个固体表面相互接触时, 由于接触面粗糙度的影响, 界面间就形成了非一致接触, 这种接触导致热流收缩, 进而产生接触热阻. 目前的理论研究主要集中在正问题研究, 对反问题的研究相对较少. 接触热阻反问题研究是通过研究部分边界温度、热流和部分测量点的温度来反演得到界面上的接触热阻. 反问题研究在很多工程领域都有应用, 如航空航天、机械制造、微电子等, 是工程中确定接触热阻一种快速有效的方法. 本文采用边界元法和共轭梯度法研究了二维空间随坐标变化的接触热阻反问题. 为了验证方法的准确性和可行性, 假定在已知部分测量点温度和真实接触热阻的情况下, 反演计算得到界面的温度和热流, 进而得到接触热阻, 并与真实接触热阻进行比较. 结果表明采用边界元法和共轭梯度法在无测量误差的情况下, 可以准确反演获得界面的真实接触热阻. 若存在测量误差, 反演计算结果对测量误差极其敏感, 反演结果误差会由于测量误差的引入而被放大. 为处理这种不稳定性, 采用最小二乘法对反演计算结果进行校正, 结果表明采用最小二乘法能够避开反问题中一些偏离实际值较大的测量点, 显著提高反演计算结果的准确性.

关键词 接触热阻, 反问题, 边界元法, 共轭梯度法, 最小二乘法

中图分类号: TU311 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-18-076

THE INVERSE PROBLEM OF THERMAL CONTACT RESISTANCE BETWEEN ROUGH SURFACES¹⁾Yu Yuanfeng* Li Zewei[†] Zheng Xiaoya^{*,2)}

*(School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[†](The 43st Institute of the Forth Academy of CASC, Xi'an 710025, China)

Abstract When two solid surfaces are in contact, it leads to non-uniform contact because of surfaces roughness. This causes constriction of heat flux and forms thermal contact resistance. The theoretical research is mainly focused on the positive problem, but there are few studies on the inverse problem. The inverse problem of thermal contact resistance is to obtain thermal contact resistance by a part of the boundary temperature, heat flux and some of the measured point temperature. The research has been applied in many fields, such as aerospace, mechanical manufacturing, microelectronics and other fields. It is a fast and effective method to determine thermal contact resistance in engineering field. In this paper, the inverse problem of thermal contact resistance with 2-D coordinate variation was solved by the boundary element method (BEM) and the conjugate gradient method (CGM). In order to verify the accuracy and feasibility of the method, according to the measured point temperature and the assumed thermal contact resistance, the temperature and the heat flux of the

2018-03-19 收稿, 2018-03-23 录用, 2018-03-29 网络版发表.

1) 国家自然科学基金资助项目 (11502207).

2) 郑晓亚, 副教授, 主要研究方向: 热力耦合和界面力学. E-mail: zhengxy_8042@nwpu.edu.cn

引用格式: 余远锋, 李泽卫, 郑晓亚. 粗糙表面之间接触热阻反问题研究. 力学学报, 2018, 50(3): 479-486

Yu Yuanfeng, Li Zewei, Zheng Xiaoya. The inverse problem of thermal contact resistance between rough surfaces. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(3): 479-486

interface could be obtained, and then calculated and compared with the value of actual thermal contact resistance. The results show that the actual thermal contact resistance can be accurately obtained by using the BEM and CGM without the measurement error. But there exists the measurement error, the calculated result will be extremely sensitive to the measurement error, and the error of inversion result will be amplified due to the measurement error. In order to deal with this ill-posed problem, the least-squares method (LSM) was used to correct the calculated results. The results show that it can avoid some points deviating from the actual value in the inverse problem, and obviously improve the accuracy of calculations.

Key words thermal contact resistance, inverse problem, boundary element method, conjugate gradient method, least square method

引 言

当两个粗糙表面相互接触时,其真实的接触仅发生在一些离散的点或微小面积上,其余的间隙部分是真空或介质,即使在 10 MPa 量级的接触压强下,真实的接触面积仅占名义接触面积的 1%~2%^[1-2]. 这种接触状况引起热流收缩,使两个相互接触的表面间的温度产生一个阶跃变化,从而产生接触热阻,因此,将接触热阻 R 定义为接触面温度变化值和热流的比值^[1],即

$$R(x, y) = \frac{\Delta T(x, y)}{q(x, y)} \quad (1)$$

式中, $\Delta T(x, y)$ 为接触面的温度变化值, $q(x, y)$ 为界面热流值.

接触热阻的研究包括正问题和反问题两个方面,其中正问题研究包括理论研究和试验研究^[3-9]. 目前,国内外学者对接触热阻的理论研究主要集中在正问题研究,而对反问题的研究比较少. 正问题中的理论研究是建立接触热阻的解析模型,具有代表性的接触热阻模型有 CMY 模型、GW 模型、BGT 模型、WA 模型、MT 模型等^[2]. 之后一些学者对接触面形状进行模拟,将数值求解与粗糙表面形貌描述相结合,发展了接触热阻的数值模型^[10-21]. 尽管接触热阻可以通过理论进行预测,但是试验研究仍是一种更快速准确的方法^[7,9,22]. 然而,目前的试验着重研究接触热阻随接触压强、界面温度、表面粗糙度等因素的变化规律^[23-28].

接触热阻反问题研究是指依据部分边界条件和部分测量点的温度值,通过优化算法反演计算得到接触面的温度和热流,进而得到接触热阻. 相对于接触热阻的正问题研究,它可作为实际工程中预测接触热阻的一个简洁有效的方法.

目前求解反问题主要依靠数值方法^[29],其数值

方法主要有有限差分法、有限体积法、有限元法和边界元法 4 种^[30-33]. 相比较于其他数值方法,边界元法具有简便且计算量小的特点,不需要计算区域内的温度和热流,而只需求解边界温度和热流,因此,对于实际问题求解具有较大优势^[32-33]. 同时,反问题的计算还需要结合优化迭代算法来反演计算得到所求信息^[29-30,32],在众多优化算法中,由于共轭梯度法具有简单,计算量小等优势^[30-32]. 因此,本文将边界元法和共轭梯度法结合起来,研究二维空间随坐标变化的接触热阻的反问题,通过算例验证方法准确性和可行性. 同时,由于求解反问题过程中不可避免其不适定性,即对误差敏感性^[30,32],为处理该问题,本文采用最小二乘法 (LSM),以避免反问题结果中一些偏离实际值较大的测量点,使得问题的求解结果与真实值更接近.

1 接触热阻反问题求解

1.1 正问题求解

计算模型域 Ω 内

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

边界条件为

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \text{ 在 } x = 0 \text{ 和 } x = 1.0 \text{ 处}$$

$$T = T_1, \text{ 在 } y = -1.0 \text{ 处}$$

$$T = T_2, \text{ 在 } y = 1.0 \text{ 处}$$

$$T_1(x, y) = T_i, \text{ 在 } y = 0.05$$

$$T_2(x, y) = T_j, \text{ 在 } y = -0.05$$

本文采用边界元法求解上述偏微分方程,因此

上式可将其转化为边界点的积分方程^[30,32-33], 即

$$C_i T_i + \int_{\Gamma_j} T_j q^* d\Gamma = \int_{\Gamma_j} q_j G^* d\Gamma \quad (3)$$

式中, Γ 为域 Ω 的边界; T 为温度; q 为热流密度; G^* 为基本解, 二维情况下, 为 $\frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{r}$; q^* 为 G^* 的法向导数, i 为 Ω 内或 Γ 上的点, 当 i 为 Ω 区域内的点时, $C_i = 1$, 当 i 为光滑边界 Γ 上的点时, $C_i = 0.5$. 将边界离散后得到

$$C_i T_i + \sum_{j=1}^n T_j \int_{\Gamma_j} q^* d\Gamma = \sum_{j=1}^n q_j \int_{\Gamma_j} G^* d\Gamma \quad (4)$$

记

$$\hat{H}_{ij} = \int_{\Gamma_j} q^* d\Gamma \quad (5)$$

$$G_{ij} = \int_{\Gamma_j} G^* d\Gamma \quad (6)$$

则式 (4) 可以写成

$$C_i T_i + \sum_{j=1}^n \hat{H}_{ij} T_j = \sum_{j=1}^n G_{ij} q_j \quad (7)$$

式 (7) 最终可化为如下形式的标准边界元离散方程

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \mathbf{q}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (8)$$

式中, $\mathbf{H}$ 和 $\mathbf{G}$ 是边界元离散矩阵, $\mathbf{T}$ 和 $\mathbf{q}$ 分别是温度和热流的列向量. 根据已知的边界条件, 求解上式可以得到边界温度和热流.

1.2 反问题目标函数

在接触热阻反问题研究中, 接触界面温度与热流是未知的. 但其他边界温度与热流是已知的, 可选择在接近接触界面适当的位置布置温度测量点. 假设在 N 个位置布置测量点, 记测量点的温度为 $\bar{T}_i(\mathbf{x})$ ($i = 1, 2, \dots, N$), 则反问题研究就可以表示为: 用测点温度和部分已知的边界条件来反推出接触界面上未知的温度和热流密度, 进而获得接触热阻值.

反问题求解可以转化为以下目标函数泛函变分的最优化问题^[29-32], 即

$$J(T(\mathbf{x})) = \|\mathbf{T}_i - \bar{\mathbf{T}}_i\|^2 = \sum_{i=1}^N [T_i(\mathbf{x}) - \bar{T}_i(\mathbf{x})]^2 \quad (9)$$

式中, $\bar{T}_i(\mathbf{x})$ 是在模型测量点上实际测量的温度值, $T_i(\mathbf{x})$ 是根据估计的初始边界温度 T_0 反演计算得到的测量点处的温度值.

用共轭梯度法迭代来搜索边界温度 $T_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 涉及迭代停止的标准问题, 并同温度测量的误差有关, 在没有测量误差的情况下, 停止标准为

$$J[T^{k+1}(\mathbf{x})] < \varepsilon \quad (10)$$

式中, ε 是一个较小的正数. 存在测量误差的情况下, 假设温度测量的标准差为 σ , 在测量点上加上测量误差后, 温度差值近似可表示为

$$T_i(\mathbf{R}) - \bar{T}_i \approx \sigma \quad (11)$$

则 ε 可以写成

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N \sigma^2 = N\sigma^2 \quad (12)$$

根据计算值 $T_i(\mathbf{x})$ 和测量值 $\bar{T}_i(\mathbf{x})$, 计算反问题目标函数式 (3), 判断目标函数结果是否满足迭代停止标准, 进而判断是否还需要进行迭代.

1.3 共轭梯度法

求解反问题所涉及的方法较多, 鉴于共轭梯度法的简单性和高效性^[29-30], 本文采用共轭梯度法来优化目标函数. 未知的边界温度 $T_i(\mathbf{x})$ 是初始的估计值或迭代过程中通过搜索得到的, 即

$$\hat{\mathbf{T}}^{n+1}(\mathbf{x}) = \hat{\mathbf{T}}^n(\mathbf{x}) - \beta^n \mathbf{p}^n(\mathbf{x}) \quad (13)$$

式中, β^n 为 n 到 $n+1$ 次迭代的搜索步长; $\mathbf{p}^n(\mathbf{x})$ 为搜索方向, 即

$$\mathbf{p}^n(\mathbf{x}) = \mathbf{J}^n(\mathbf{x}) + \gamma^n \mathbf{p}^{n-1}(\mathbf{x}) \quad (14)$$

式中, $\mathbf{J}^n(\mathbf{x})$ 为梯度方向, 因此第 n 次的搜索方向 $\mathbf{p}^n(\mathbf{x})$ 是梯度方向 $\mathbf{J}^n(\mathbf{x})$ 和第 $n-1$ 次的搜索方向 $\mathbf{p}^{n-1}(\mathbf{x})$ 的线性组合, 其中 γ^n 为共轭系数, 可由下式计算得到

$$\gamma^n = \frac{\int_0^L (\mathbf{J}^n)^2 dx}{\int_0^L (\mathbf{J}^{n-1})^2 dx} \quad (15)$$

式中, $\gamma^0 = 0$. 从式 (14) 可知, 当 $\gamma^n = 0$ 时, 无论 n 为何值, $\mathbf{p}^n(\mathbf{x})$ 变成梯度方向.

灵敏度方程可由控制方程 (2) 求其增量得到

$$\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2} = 0 \quad (16)$$

采用边界元法求解灵敏度方程, 即可得到式 (13) 中的搜索步长 β^n

$$\beta^n = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \hat{T}_i) \Delta T_i}{\sum_{i=1}^n \Delta T_i^2} \quad (17)$$

伴随方程可由控制方程 (2) 的泛函求导得到

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} = 0 \quad (18)$$

同样采用边界元法求解伴随方程, 结合正问题的计算结果, 得到泛函 $J(T(x))$ 的导数为

$$J'(T(x)) = -\frac{\partial \lambda}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (19)$$

其中, $\lambda(x, y)$ 为拉格朗日算子. 结合正问题得到的温度在 y 方向上的导数 $\partial T / \partial y$, 可计算出来泛函 $J(T(x))$ 的导数 $J'(T(x))$. 根据式 (15), 可计算出共轭系数 γ^n , 结合 $n-1$ 次的搜索方向 $\mathbf{p}^{n-1}(x)$, 就可求解新的搜索方向 $\mathbf{p}^n(x)$. 由式 (13) 可知, 依据灵敏度方程求解得到的搜索步长 β^n , 就可计算出新的边界温度函数 $\hat{T}^{n+1}(x)$.

2 接触热阻反问题方法验证

为了验证接触热阻反问题方法的准确性和可行性, 假定真实接触热阻的函数形式已知, 并且还获得部分测点温度, 采用边界元法和共轭梯度法反演计算得到界面的温度和热流, 进而得到接触热阻值.

2.1 计算模型

考虑一个二维的稳态情况的接触热阻问题. 计算模型如图 1 所示, 是一个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 和 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的模型, 在 $y=0$ 处两模型接触^[9]. 模型的左右边

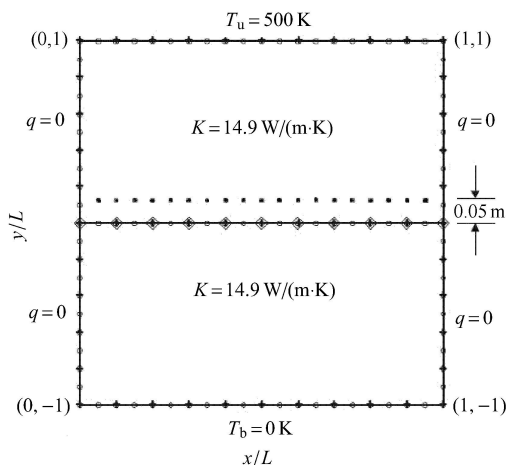


图1 接触热阻模型

Fig. 1 Mode of thermal contact resistance

界为绝热, 上下表面保持温度不变, $T_u = 500\text{ K}$, 下边界 $T_b = 0\text{ K}$, 两个区域材料为导热系数相同 $\lambda = 14.9\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 不锈钢, 环境温度 $T = 293\text{ K}$, 在接触界面上方 $y = 0.05\text{ m}$ 处设置一系列温度测点, 而在接触面位置假定接触热阻为一个已知函数.

2.2 边界条件

计算模型域 Ω 内

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

边界条件为

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \text{ 在 } x = 0 \text{ 和 } x = 1.0 \text{ 处}$$

$$T = 0\text{ K}, \text{ 在 } y = -1.0 \text{ 处}$$

$$T = 500\text{ K}, \text{ 在 } y = 1.0 \text{ 处}$$

内部测量点的温度值为

$$T_1(x, y) = 285 + 0.25 \sin(6\pi x), \quad y = 0.05$$

式中, $T = 285\text{ K}$ 为准确值, $0.25 \sin(6\pi x)$ 为测量误差, 以模拟实际测量等造成的误差. 为刻画其分布情况, 可采用通常的函数形式, 如多项式或三角函数, 这里, 采用三角函数形式. 其相对于准确值, 测量误差很小, 约 $\xi = 0.09\%$.

假定真实的接触热阻随空间的变化函数为

$$R(x) = 0.0015 - 0.004x + 0.004x^2 + 0.00005 \sin(4\pi x)$$

2.3 计算结果

首先考虑没有测量误差的情况, 反演获得界面的接触热阻如图 2 所示.

从图 2 可以看出, 在没有测量误差的情况下, 边界元法和共轭梯度法可以准确计算出接触热阻值,

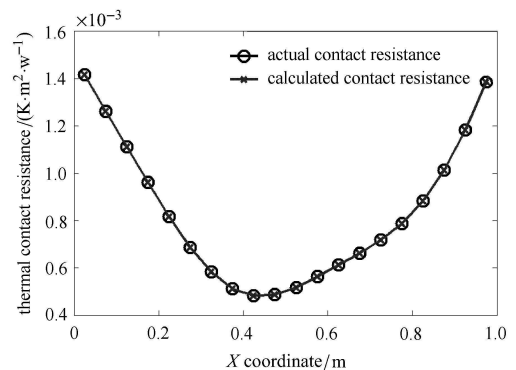


图2 计算结果比较

Fig. 2 Comparison of calculation results

与真实值没有差别, 说明了所采用的方法在没有测量误差的情况下, 计算结果的准确性。

现在考虑有 $\xi = 0.25 \sin(6\pi x)$ 的误差情况, 计算得到接触热阻值, 为了反映出结果的准确性, 定义以下各类误差。

将计算结果的相对误差定义为

$$\varepsilon = \left| \frac{R_i^* - R_i}{R_i} \right| \times 100\% \quad (20)$$

将计算结果的平均相对误差定义为

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{R_i^* - R_i}{R_i} \right| \times 100\% \quad (21)$$

将计算结果的标准差定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_i^* - R_i)^2} \quad (22)$$

式中, R_i^* 为计算值, R_i 真实值。

接触热阻的真实值和考虑有测量误差情况下的计算值对比如图 3 所示。相对误差沿着 x 轴变化曲线见图 4。

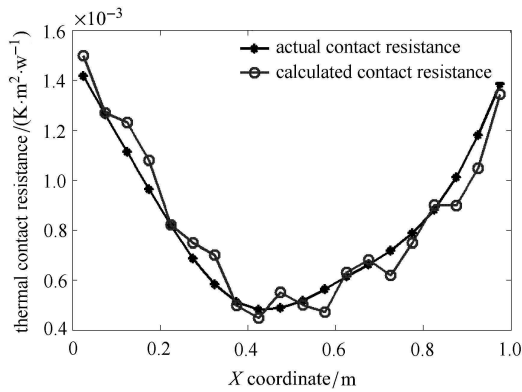


图 3 计算结果比较

Fig. 3 Comparison of calculation results

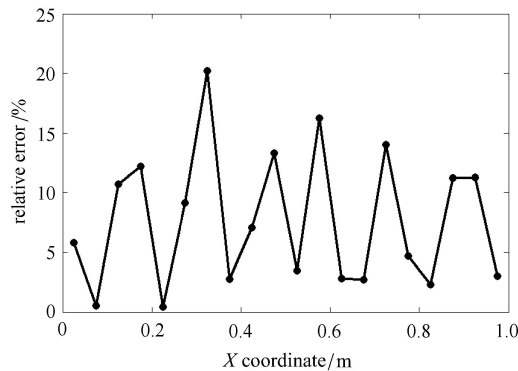


图 4 相对误差曲线

Fig. 4 Relative error curve

由图 3 和图 4 可以看出, 正问题的测量误差会随着反问题的求解而被放大。在 $x = 0.325 \text{ m}$, 相对误差最大量为 20.23%; 在 $x = 0.225 \text{ m}$, 相对误差最小为 0.43%, 平均的相对误差 $\bar{\varepsilon} = 6.15\%$, 标准差为 $\sigma = 5.31 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{m}^2 / \text{W}$, 其结果的相对误差的最大值和最小值与测量误差相比, 分别被放大了约 225 倍和 5 倍。本节算例说明本文所采用的边界元法和共轭梯度法可以解决接触热阻反问题, 但反问题的求解对测量误差比较敏感, 结果会因测量输入误差而产生较大偏差。

3 接触热阻反问题算例

3.1 基于最小二乘法的结果校正

由 2.3 节可知, 由于测量误差的存在, 若采用上述方法直接求解, 可能导致计算结果不准确^[30,32]。这时就需要采用特殊的校正方法, 来校正因测量等造成的误差对计算结果的影响, 本文采用最小二乘法来优化计算结果。

为了简化问题, 假设接触热阻 R 是 x 的连续函数 $R(x)$ 。为了确定未知的接触热阻 $R(x)$, 又不失一般性, 可假设

$$R(x) = \sum_{n=1}^n \alpha_n x^n \quad (23)$$

其中, α_n 是未知的系数。

将最小二乘法准则 $S(\alpha_n)$ 定义为

$$S(\alpha_n) = \sum_{i=1}^N (\bar{R}_i(x, y) - R)^2 \quad (24)$$

对于其中的未知系数 α_n , 可通过最小化 $S(\alpha_n)$ 得到, 对 $S(\alpha_n)$ 进行微分, 使其结果等于零, 即

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha_n} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial R}{\partial \alpha_n} (\bar{R}_i - R) = 0 \quad (25)$$

再结合反问题得到的结果 $\bar{R}_i$, 由式 (25) 就能确定未知的系数 α_n , 根据式 (23) 计算接触热阻 $R(x)$ 。

3.2 计算模型

实际工程中, 通常在接触界面两边布置温度测点, 反演出接触热阻。仍然采用 2.1 节的计算模型, 在距离接触界面 $\pm 0.05 \text{ m}$ 处布置温度测点, 具体形式如图 5 所示。

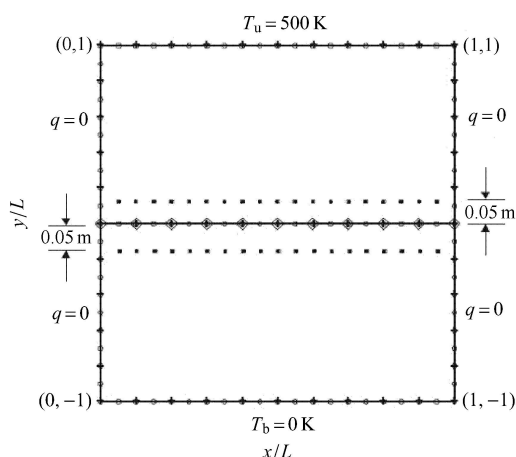


图 5 接触热阻模型

Fig. 5 Mode of thermal contact resistance

3.3 边界条件

计算模型域 Ω 内

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

边界条件为

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \text{ 在 } x = 0 \text{ 和 } x = 1.0 \text{ 处}$$

$$T = 0 \text{ K, 在 } y = -1.0 \text{ 处}$$

$$T = 500 \text{ K, 在 } y = 1.0 \text{ 处}$$

内部测量点的温度值为

$$T_1(x, y) = 285 + 0.25 \sin(6\pi x), \quad y = 0.05$$

$$T_2(x, y) = 257 + 0.25 \sin(6\pi x), \quad y = -0.05$$

式中, $0.25 \sin(6\pi x)$ 同样为测量误差, 其相对于准确值测量误差很小, 约 $\xi = 0.09\%$.

3.4 计算结果

由 2.3 节可知, 在没有测量误差情况下, 采用边界元法和共轭梯度法反演获得界面的真实接触热阻, 见图 6 中标记符为五角星的曲线所示. 有测量误差情况下, 采用边界元法和共轭梯度法反演获得的接触热阻见图 6 中标记符为三角形的曲线所示.

基于最小二乘法对考虑测量误差反演出的接触热阻值进行校正, 取 $n = 6$. 由最小二乘法计算出来

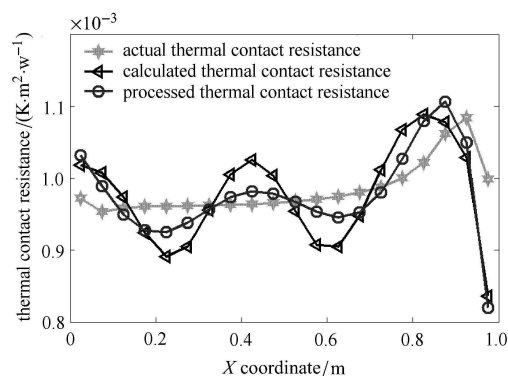


图 6 计算结果比较

Fig. 6 Comparison of calculation results

的接触热阻函数为

$$R(x) = 0.001 - 0.0003x - 0.0109x^2 + 0.0784x^3 - 0.1978x^4 + 0.2135x^5 - 0.0833x^6 \quad (26)$$

校正后的接触热阻见图 6 中标记符为圆圈的曲线所示.

校正处理前后部分点的相对误差的减小量如表 1 所示, 相对误差沿着 x 轴变化曲线如图 7 所示.

表 1 相对误差减小量

Table 1 Reduction of relative error

x/m	0.225	0.275	0.375	0.425	0.475
before LSM process	7.27%	5.88%	4.32%	6.31%	3.93%
after LSM process	3.70%	2.42%	1.04%	1.78%	1.34%
reduction of error	49.1%	58.8%	75.9%	71.9%	65.6%

x/m	0.575	0.625	0.725	0.775	0.925
before LSM process	6.56%	7.14%	2.46%	6.77%	5.06%
after LSM process	1.76%	2.97%	0.79%	2.68%	3.12%
reduction of error	73.2%	58.3%	67.7%	60.5%	38.2%

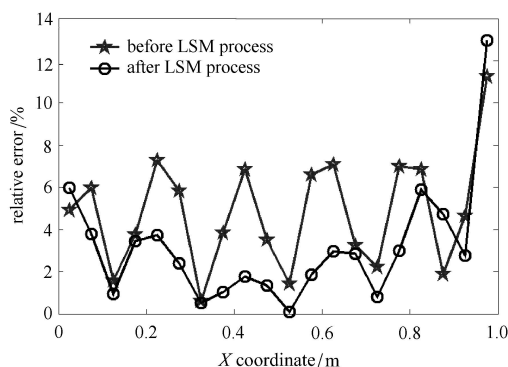


图 7 相对误差曲线

Fig. 7 Relative error curve

从表 1 可以看出, 在一些位置上, 经过最小二乘法优化后, 其计算结果的相对误差下降明显, 与真实值更接近. 由图 7 可以看出, 采用最小二乘法优化后, 整体的相对误差有所下降. 在处理之前平均相对误差为 $\bar{\varepsilon} = 5.06\%$, $\sigma = 6.11 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$, 处理后平均相对误差为 $\bar{\varepsilon} = 2.96\%$, $\sigma = 5.69 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$, 经过最小二乘法处理后, 平均相对误差减小 41.5%, 标准差减小 2.45%. 最小二乘法拟合的曲线既反映接触热阻的变化趋势, 还消除了其局部波动, 避开了计算结果中偏离真实值较大的测量点, 使其总体误差进一步减小, 计算结果更准确. 本节算例说明了最小二乘法可以作为处理不适定性问题的一种有效方法, 最小二乘法优化算法可以使误差减小, 使计算结果较不适定处理前的计算值更接近真实值, 显著提高了计算结果的准确性.

4 结 论

本文将边界元法和共轭梯度法结合起来, 研究了二维空间随坐标变化的接触热阻反问题, 具有一定的实际参考价值, 所得结论如下:

(1) 在接触热阻的反问题识别中, 采用边界元法和共轭梯度法可求解反问题. 由于边界元法不需要知道和计算内部区域的温度和热流, 因而大大减少了计算量.

(2) 在无测量误差的情况下, 本文采用的方法准确可行, 可以真实地反演计算得到接触面上的接触热阻值.

(3) 反问题对测量误差较敏感, 存在误差的情况下, 计算结果会偏离真实值. 且正问题的误差会随反问题的求解而被放大, 使得反问题求解的数值结果误差较大.

(4) 在正问题中的误差在反问题中被放大的情况下, 为处理不适定性问题, 采用了最小二乘法, 使曲线避开反问题计算结果中一些偏离实际值较大的点, 显著提高了反演计算结果的准确性.

参 考 文 献

- Madhusudana CV. Thermal Contact Conductance. Switzerland: Springer International Publishing, 2014: 1-3
- Yovanoovich MM. Four decades of research on thermal contact gap, and joint resistance in microelectronics. *IEEE Trans Compon Pack-agechnol*, 2005, 28(2): 182-206
- 张平, 宣益民, 李强. 界面接触热阻的研究进展. *化工学报*, 2012, 63(2): 335-349 (Zhang Ping, Xuan Yimin, Li Qiang. Development on thermal contact resistanc. *CIESC Journal*, 2012, 63(2): 335-349 (in Chinese))
- Levy A, Heider D, Tierney J, et al. Inter-layer thermal contact resistance evolution with the degree of intimate contact in the processing of thermoplastic composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 2014, 48(4): 491-503
- Wang AL, Zhao JF. Review of prediction for thermal contact resistance. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53: 1798-1808
- Oclon P, Lopata S. Study of the effect of fin-and-tube heat exchanger fouling on its structural performance. *Heat Transfer Engineering*, 2017, 1(1): 1-17
- 方文振, 任兴杰, 陶文铨. 基于多块格子 Boltzmann 方法模拟接触热阻. *工程热物理学报*, 2017, 38(3): 595-599 (Fang Wenzhen, Ren Xingjie, Tao Wenquan. Numerical predictions of thermal contact resistance based on the multi-block lattice Boltzmann method. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(3): 595-599 (in Chinese))
- Zhu Z, Zhang LW, Wu QK, et al. An experimental investigation of thermal contact conductance of Hastelloy C-276 based on steady-state heat flux method. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 2013, 41: 63-67
- 刘东欢, 郑小平, 黄拳章等. C/C 复合材料与高温合金 GH600 之间高温接触热阻的试验研究. *航空学报*, 2010, 31(11): 2189-2194 (Liu Donghuan, Zheng Xiaoping, Huang Quanzhang, et al. Experimental investigation of high-temperature thermal contact resistance between C/C composite material and superalloy GH600. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(11): 2189-2194 (in Chinese))
- Gill J, Divo E, Kassab AJ. Estimating thermal contact resistance using sensitivity analysis//Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition. California, 2004
- Zhang X, Cong PZ, Fujiwara SJ, et al. A new method for numerical simulation of thermal contact resistance in cylindrical coordinates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 1091-1098
- Ngo IL, Vattikuti SVP, Byon C. Effects of thermal contact resistance on the thermal conductivity of core-shell nanoparticle polymer composites. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 102: 713-722
- Lopata S, Oclon P. Numerical study of the effect of fouling on local heat transfer conditions in a high-temperature fin-and-tube heat exchanger. *Energy*, 2015, 92: 100-116
- Cui TF, Li Q, Xuan YM, et al. Multiscale simulation of thermal contact resistance in electronic packaging. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 83: 16-24
- Taler D, Oclon P. Thermal contact resistance in plate fin-and-tube heat exchangers, determined by experimental data and CFD simulations. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 84: 309-322
- Barber AD, Werner JH, Bole BA, et al. An analysis of the effect of thermal contact resistance in a sheet-stringer structure. *Journal of The Aeronautical Sciences*, 1957, 3: 232-240
- Hay BA, Bourouga B, Dessain C. Thermal contact resistance estimation at the blank/tool interface: Experimental approach to simulate the blank cooling during the hot stamping process. *Int J Mater Form*, 2010, 3: 147-163

- 18 Mutlu M, Kiliç M. Three-dimensional conjugate numerical analysis of fin and tube heat exchangers with various fin thermal conductivity values and geometric parameters. *J of Thermal Science and Technology*, 2016, 36(1): 85-98
- 19 de Assis LHP, Romão EC. Numerical simulation of 1d heat conduction in spherical and cylindrical coordinates by fourth-order finite difference method. *International Journal of Mathematics Trends and Technology*, 2017, 46(3): 125-128
- 20 沈军, 马骏, 刘伟强. 一种接触热阻的数值计算方法. 上海航天, 2002 (4): 33-36 (Shen Jun, Ma Jun, Liu Weiqiang. A numerical calculation method of thermal contact resistance. *Aerospace Shanghai*, 2002, (4): 33-36 (in Chinese))
- 21 李磊涛, 郑晓亚. 一种瞬态接触热导数值模拟方法. 机械工程学报, 2016, 52(6): 174-180 (Li Leitao, Zheng Xiaoya. A numerical simulation method of transient thermal contact conductance. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(6): 174-180 (in Chinese))
- 22 王安良, 马松阳. 一种测量板间接触热阻的新方法. 工程热物理学报, 2017, 38(11): 2393-2398 (Wang Anliang, Ma Songyang. A new method for measuring the thermal contact resistance between plates. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(11): 2393-2398 (in Chinese))
- 23 黄正兴, 王志刚, 张鑫. 高压下碳纳米管阵列与金属接触热阻研究. 大连理工大学学报, 2017, 57(6): 638-643 (Huang Zhengxing, Wang Zhigang, Zhang Xin. Study of thermal contact resistance between CNT array and metal under high pressure. *Journal of Dalian University of Technology*, 2017, 57(6): 638-643 (in Chinese))
- 24 Dou RF, Ge TR, Liu XL, Zhi Wen. Effect of contact pressure, interface temperature, and surface roughness on thermal contact conductance between stainless steel surfaces under atmosphere condition. *Int J Heat Mass Transfer*, 2016, 94: 156-163
- 25 Wilson WE, Angadi SV, Jackson RL. Surface separation and contact resistance considering sinusoidal elastic-plastic multi-scale rough surface contact. *Wear*, 2010, 268: 190-201
- 26 Ma C, Zhao L, Shi H, et al. A geometrical mechanical thermal predictive model for thermal contact conductance in vacuum environment. *J Engineering Manufacture*, 2016, 230(8): 1451-1464
- 27 邓二平, 赵志斌, 张朋等. 温度对压接型 IGBT 器件内部接触热阻的影响. 半导体技术, 2016, 41(12): 906-923 (Deng Erping, Zhao Zhibin, Zhang Peng, et al. Influence of the temperature on the thermal contact resistance within press pack IGBTs. *Semiconductor Technology*, 2016, 41(12): 906-923 (in Chinese))
- 28 Fieberg C, Kneer R. Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51: 1017-1023
- 29 薛齐文. 多宗量热传导反问题的数值求解. [博士论文]. 大连: 大连理工大学, 2005 (Xue Qiwen. Numerical solutions of inverse heat conduction problems with multi-variables. [PhD Thesis]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005 (in Chinese))
- 30 李斌. 导热几何反问题的边界元法. [博士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008 (Li Bin. Boundary element method for inverse geometry problem of heat conduction. [PhD Thesis]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008 (in Chinese))
- 31 Alifanov OM. Solution of an inverse problem of heat conduction by iteration methods. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, 1974, 26(4): 682-689
- 32 陈生. 基于边界元方法求解热传导正反问题. [博士论文]. 长沙: 湖南大学, 2007 (Chen Sheng. Direct and inverse heat conduction problems solving by the boundary element method. [PhD Thesis]. Changsha: Hunan University, 2007 (in Chinese))
- 33 姚振汉, 王海涛. 边界元法. 北京: 高等教育出版社, 2010 (Yao Zhenghan, Wang Haitao. Boundary Element Method. Beijing: Higher Education Press, 2010 (in Chinese))