论文

超声测量结构内部瞬态温度场的重建方法研究

石友安^{①②*}, 魏东^②, 桂业伟^②, 钱炜祺^②, 曾磊^②, 邱波^②

① 中国空气动力研究与发展中心空气动力学国家重点实验室, 绵阳 621000;

② 中国空气动力研究与发展中心计算空气动力学研究所, 绵阳 621000

* E-mail: youanshi@sina.com

收稿日期: 2015-12-20; 接受日期: 2016-02-23; 网络出版日期: 2016-04-13

国家自然科学基金(批准号: 11402285, 11372338, 51308531)、空气动力学国家重点实验室研究基金和国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB755800)资助项目

摘要 固体结构内部瞬态温度场的无损测量在航空航天、机械制造与材料加工等领域都具有十分重要的作用. 本文基于超声波传播速度与温度的相关性, 建立了超声测量各向同性材料内部瞬态温度分布的模型, 从反演角度入手, 将瞬态非均匀温度场的重建问题转化为热边界的反演和热传导正问题计算的问题, 应用参数辨识中的共轭梯度法, 发展了一种高分辨率的温度场重建方法, 并通过数值仿真系统分析算法的精度、抗噪性和稳定性等特性, 最后, 进行了实验验证与分析. 研究表明: 基于超声渡越时间反演得到的热边界条件, 符合物理实际, 重建得到的结构内部瞬态温度分布精度较高、实时性好、适用性强, 有利于促进超声无损测温技术的发展, 具有重要的工程应用价值.

关键词 超声测温, 温度场重建, 边界反演, 共轭梯度法, 实验验证

1 引言

固体结构内部瞬态温度场的探测和实时监控, 在材料制备、医学探测、铸造与冶金等工程问题中有广泛的应用前景和强烈需求^[1,2]. 目前, 结构内部的温度测量主要采用接触式, 但这种方法有一些局限性, 譬如打孔安装传感器容易破坏结构的原有形态导致局部的温度变化或应力集中. 红外技术、磷光热图等可以实现温度的无损测量, 但是仅限于结构表面^[3,4]. 因此, 发展内部温度分布的无损测量技术成为目前固体结构温度测量与控制中亟待解决的关键

问题之一.

超声波测温^[5,6]基于超声波传播速度与温度的相关性, 实现内部温度无损、快速与实时测量, 且已经在气体、液态材料等方面取得不少研究成果. 但是, 对于探测固体结构内部瞬态温度场的研究还比较少, 需要进一步研究诸如纳秒级声时测量技术、瞬态温度场重建的数理模型和多参数的反演计算方法等关键技术问题^[7,8].

目前, 超声测量结构内部瞬态温度场的重建大多采用近似求解和空间插值^[9,10], 这种方法计算速度快, 但温度分辨率不足, 且稳定性和抗噪性有待提高.

引用格式: 石友安, 魏东, 桂业伟, 等. 超声测量结构内部瞬态温度场的重建方法研究. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 509–517

Shi Y A, Wei D, Gui Y W, et al. Research on parameter estimation in ultrasonic measurement of internal transient temperature distributions (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 509–517, doi: 10.1360/N092015-00353

从原理上看, 超声测温是一种利用“结果”(超声波传播时间)逆求“原因”(结构内部温度分布)的过程, 本质上是一个“热-声-固耦合的反问题”^[11,12]。因此, 本文基于超声波传播速度与温度的相关性, 建立了超声测量固体结构内部瞬态温度分布的模型, 从求解热传导反问题角度入手, 将瞬态非均匀温度场的重建问题转化为热边界的反演和热传导正问题计算的问题, 应用参数辨识中的共轭梯度法, 发展了一种高分辨率的温度场重建方法, 并开展了一系列的数值仿真分析和实验验证, 得到了一些有意义的结果。

2 超声测温模型

如图1所示, 超声波探头在固体结构的某一端面激发超声波至结构内部, 通过观察来自另一端面的反射波的渡越时间的变化情况, 实现内部温度分布的测量, 这种测量方法称为脉冲回波时法。渡越时间可以描述为波传播路径上当地声时的积分关系式:

$$t_{\text{tof}} = 2 \int_0^L \frac{1}{V(T_s)} ds, \quad (1)$$

式中, t_{tof} 为超声波渡越时间; V 为超声波传播速度; T_s 为传播路径上的温度; s 为传播路径; L 为传播距离。

在各向同性介质中, 超声波波速可以表示为介质温度的函数^[13]如下:

$$V(T) = aT + b, \quad (2)$$

式中, a 和 b 为常值系数, 与材料的物性有关。

图2描述了钢中超声波横/纵波的波速与温度的变化关系^[14]。

本质上, 超声渡越时间反映了波传播路径上温度分布的累积量。因此, 基于超声波波速与温度的相关性, 通过测量渡越时间, 即可感知内部温度分布。

图1 (网络版彩图)超声脉冲回波探测一维温度分布示意

图2 (网络版彩图)钢中横/纵波波速与温度的关系

V_L 为纵波速度; V_S 为横波速度

3 基于边界反演的温度场重建算法

基于渡越时间进行温度场的重建, 本质上是一个热-声-固耦合的反问题。对于一维温度场重建而言, 可暂不考虑超声波传播路径的变化。

根据傅里叶定理, 对于无内热源的热传导问题而言, 边界条件是导致内部温度变化的主要原因。因此, 对于非瞬态强冲击的传热而言, 固体结构内部瞬态温度场的重建问题可以转化为热边界条件的反演和热传导正问题计算的问题。即, 基于反演的热边界条件, 通过求解热传导方程实现内部瞬态温度场的重建。重建算法思路见图3所示。

一维无内热源热传导正问题描述如下。

主控方程

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad x \in (0, L), t > 0; \quad (3)$$

边界条件

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q(t), \quad T|_{x=L} = T_0;$$

初值条件

$$t = 0, \quad T = T_0;$$

观测方程

$$t_{\text{tof},m} = t_{\text{tof},\text{ex}} + \varepsilon_{\text{tof},m}, \quad (4)$$

式中, ρ 为密度; C_p 为比热比; k 为导热系数; q 为热流; t 为时间; x 为坐标; ε 为测量误差; 下标 m 表示测量得

图 3 (网络版彩图)重建算法思路

到, ex 表示精确值。

反问题描述为: 已知测量的超声波渡越时间 t_{tof} ((4)式), 求解主控方程中的边界热流 $q(t)$ 。

反演思路: 以渡越时间为依据, 在数值求解正问题的基础上, 根据输出误差原则, 将反问题转化为一个优化问题, 等价于目标泛函 J 寻优函数 $q(t)$ 的过程如下:

$$J(q(t)) = \sum_{i=1}^n [\varepsilon(t_{\text{tof},i})]^2 = \sum_{i=1}^n \{t_{\text{tof},c,i} - t_{\text{tof},m,i}\}^2, \quad (5)$$

式中, J 为目标泛函; n 为测量时间点的总数; 下标 i 为时间序号; 下标 c 表示计算得到。

本文采用参数辨识中的共轭梯度法进行边界热流的反演。共轭梯度法也称为迭代正则化方法^[15,16], 可以分解为热传导正问题、灵敏度问题和伴随变量问题进行求解。优化算法^[15]描述如下:

$$q_i^{l+1} = q_i^l - \beta^l P_i^l, \quad (6)$$

$$\text{其中, } \begin{cases} P_i^l = J'^l, & l=1, \\ P_i^l = J'^l + \gamma^l P_i^{l-1}, & l \geq 2, \end{cases}$$

$$J'^l = (\partial J / \partial q_i)^l, \quad \gamma^l = \int_{t=0}^{t_{\text{max}}} (J'^l)^2 dt / \int_{t=0}^{t_{\text{max}}} (J'^{l-1})^2 dt,$$

式中, β 为步长; P 为搜索方向; J' 为目标泛函的梯度; γ 为梯度比; 上标 l 表示优化序号。 J' 可以采用灵敏度分析或求解伴随方程来获取。

为得到伴随方程, 引入伴随变量 λ , 将目标函数 (5) 式写为如下的扩展形式:

$$J = \sum_{i=1}^n (\varepsilon(t_{\text{tof},i}))^2 + \int_0^{t_{\text{max}}} \int_0^L \lambda(x,t) \left(\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) dx dt. \quad (7)$$

对 (7) 式右边第 2 部分做分部积分后再做变分, 得到伴随方程为

$$\rho c \frac{\partial \lambda}{\partial t} + k \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} = (t_{\text{tof},c,i} - t_{\text{tof},m,i}) \frac{-4}{V^2} \frac{\partial V}{\partial T} \delta(t - t_i); \quad (8)$$

$$\text{边界条件} \quad \left. \frac{\partial \lambda}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \lambda \right|_{x=L} = 0;$$

$$\text{初值条件} \quad t = t_{\text{max}}, \quad \lambda = 0,$$

式中, δ 为克罗内克符号。该方程与 (3) 式类似, 但需注意时域边界的不同。目标函数对 $q(t)$ 的梯度为

$$\frac{\partial J}{\partial \lambda}(t) = -\lambda(0, t); \quad (9)$$

步长计算公式为

$$\beta^l = \frac{\int_0^{t_{\text{max}}} [t_{\text{tof},c,i}(q^l) - t_{\text{tof},m,i}] [\Delta t_{\text{tof},c}(p^l)] \delta(t - t_i) dt}{\int_0^{t_{\text{max}}} [\Delta t_{\text{tof},c}(p^l)]^2 \delta(t - t_i) dt}, \quad (10)$$

式中, Δt_{tof} 是 $\Delta q = P^l$ 引起的渡越时间的变化值。在优化过程中, 收敛准则根据输出误差原则获得

$$J < \delta_c, \quad \delta_c = M \sigma^2, \quad (11)$$

式中, σ 为测量误差的标准差; M 为测量位置点的总数; δ_c 为收敛判断值。

至此, 梯度、步长均已求出, 共轭梯度可由梯度、步长构造。具体优化过程可参阅文献[17]。

4 实验验证

本节借鉴文献[18]中的实验数据, 进行算法的实验验证, 分析算法的可行性、适用性及精度等。

文献中的测试材料为 SKD 钢, 长度为 30 mm, 测试时间为 350 s。底部热边界共包含 3 个阶段, 依次为 100 s 的 200℃ 恒温加热, 10 s 左右的空冷, 最后为 20℃ 的水冷, 其他边界可以假定为绝热。为了对比分析超声测温数据, 在试件内部的长度方向, 均布 5 个热电偶。初始温度为 26℃。实验示意图 4 所示。

试件中超声波的波速与温度的关系式如下:

$$V(T) = -6.036 \times 10^{-4} T^2 - 0.542 T + 5920.7. \quad (12)$$

图 5 给出了超声波渡越时间及 TC1 测点上的温升历程的反演值与文献实验测量值的对比。可以发现, 渡越时间的反演值与测量值吻合得非常好, 最大

图4 (网络版彩图)实验示意图

图5 (网络版彩图)渡越时间和TC1点上温度升历程反演值与文献对比

偏差小于 0.1%; 在 TC1 点上的温升数据反演值中, 可以清晰地分辨出热边界的 3 个阶段, 以及空冷、水冷的起始时刻点; 除了起始点与尾点处温升数据反演值与测量值差异较大外, 其他点均与实验测量吻合较好, 温升数据偏差小于 0.5%. 起始点和尾点处的偏差较大, 主要是与起始点处灵敏度较小, 尾点处伴随变量始终为 0 有关, 可以参考第 3 节.

图 6 给出了不同时刻温度分布的重建值与文献测量值的对比. 可以发现, 除了 10, 120 和 340 s 在 TC1 点处与测量值略有差异外, 其他点均吻合得较好.

图 7 给出了反演得到的热流. 可以清晰地分辨出热边界的三个阶段, 即 200°C 恒温加热、空冷以及后续的 20°C 水冷. 在恒温加热过程中, 随着接触面温

度的升高, 加热热流减小; 在水冷过程中, 随着接触面温度的降低, 散热热流也减小. 在起始段 0~25 s 和结束段 340~350 s, 热流呈现“非物理增长”趋势, 这主要是因为起点处热流值偏低, 尾点处的热流值偏高. 起点处热流值偏低, 尾点处的热流值偏高, 这主要与起始点处灵敏度较小, 尾点处伴随变量始终为 0 有关. 这两个点的反演值受初值影响较大.

总体来看, 基于超声渡越时间反演得到的热边界条件, 符合物理实际, 重建得到的内部瞬态温度分布精度较高, 实时性好, 算法有效, 具有重要的工程应用价值.

图6 (网络版彩图)不同时刻温度分布重建值与文献对比

图7 (网络版彩图)反演得到的热边界条件

5 仿真分析

为了进一步分析重建算法的特性, 本节通过数值仿真, 分析本算法的精度、抗噪性以及稳定性等.

数值仿真中, 假定超声波波型为纵波, 介质材料为钢, 长度 5 cm, 计算时间 5 s. 钢中纵波波速与温度的关系如下:

$$V(T) = -0.6480T + 5928. \quad (13)$$

边界热流为正弦热流.

首先, 通过计算相应的正问题获得超声波渡越时间 t_{tof} 的无噪声仿真值(下称“真值”). 图 8 显示了模拟的热流边界及渡越时间. 图 9 显示了不同时刻温度分布与仿真值的对比. 图 10 显示了内部 3 测点升温

图 8 (网络版彩图)模拟的热流边界与渡越时间

图 9 (网络版彩图)不同时刻温度分布与真值对比(无噪声)

图 10 (网络版彩图)内部测点升温历程与真值对比(无噪声)

历程与仿真值的对比. 可以发现, 超声波的渡越时间非常短暂, 为微秒量级; 基于反演边界重建的温度分布与真值吻合得较好, 相对偏差为 0.001°C .

由于实际测量中误差无法避免, 因此, 本文在真值基础上叠加白噪声作为模拟测量值.

在叠加白噪声前, 特别强调超声波测量固体结构内部温度的灵敏度. 对(1)式关于温度求导得到渡越时间的温度灵敏度(S_{tof})为

$$S_{\text{tof}} = \frac{\partial t_{\text{tof}}}{\partial T} = 2 \int_0^L \frac{-1}{V(T(x))^2} \frac{\partial V(T(x))}{\partial T(x)} dx. \quad (14)$$

从上式可知, 渡越时间关于温度的灵敏度与传播路径长度和波速有关. 假定结构内部温度为均匀温度, 结合(11)式, 对于本节的算例而言, 材料温度变化 1°C , 渡越时间变化约 $1.8 \times 10^{-9} \text{ s}$. 图 11 给出了纵波渡越时间单位长度的温度灵敏度, 可以发现: 对于单位长度而言, 渡越时间的温度灵敏度为 1×10^{-8} 量级; 随着温度的增加, 温度灵敏度增大.

从上述分析表明, 超声波对于结构内部温度的敏感度非常微弱($1 \times 10^{-8} \text{ s/K}$). 这对测试信号的信噪比和重建算法的抗噪性提出要求. 为了检验算法的抗噪性, 本文在真值基础上分别叠加标准差为 1×10^{-8} , 1×10^{-9} 和 $1 \times 10^{-10} \text{ s}$ 的白噪声作为模拟测量值(图 12).

图 13 显示了叠加不同白噪声后, 2 和 5 s 时刻的温度分布与真值对比. 可以发现: 热边界处温度偏差最大, 除此之外, 计算值与真值吻合较好; 随着误差的增加, 偏差增大; 5 s 时刻, 当白噪声的标准差为

图 11 钢中纵波渡越时间单位长度的温度灵敏度

图 12 (网络版彩图)叠加不同白噪声的渡越时间

1×10^{-8} s 时, 最大偏差 55°C (起始点处), 约 10%; 1×10^{-9} s 时, 最大偏差 48°C (起始点处), 约 8.8%, 1×10^{-10} s 时最大偏差急剧减小至 10°C , 约 2%。最大偏差出现在起始点处, 主要是与该点的灵敏度较小有关(可参见上节中相应的公式)。这是由热传导过程的扩散特性决定的。

图 14 显示了叠加不同白噪声后, 内部 3 测点温升历程与真值的对比。3 测点依次距离底部加热面为 5, 10 和 20 mm。可以发现, 内部测点的温升历程与真值吻合很好; 随着误差的增加, 距离热边界越近, 偏差越大; 当距离为 5 mm, 白噪声的标准差为 1×10^{-8} s

图 13 (网络版彩图)叠加不同白噪声不同时刻温度分布与真值对比

图 14 (网络版彩图)叠加不同白噪声内部测点温升历程与真值对比

时, 最大偏差 16°C (约 3 s 处), 约 7%, 1×10^{-9} s 时, 最大偏差 2°C , 约 1.5%, 1×10^{-10} s 时, 最大偏差 1°C , 约 0.8%。

接着, 分析一下算法的稳定性。热传导反问题是一个不适定的问题, 体现在解不连续依赖于数据, 即观测数据的细微误差可能导致巨大变化。要克服这种不稳定性, 通常的做法是对目标函数正则化, 使不适定性问题变为适定。

正则化主要有两种方法, 一种是 Tikhonov 的正

则化方法, 即对不适定的目标函数(5)式引入正则算子、正则参数, 使其适定:

$$J^\alpha(q) = \sum_{i=1}^n [\varepsilon(t_{\text{tof},i})]^2 = \sum_{i=1}^n \{t_{\text{tof},c,i} - t_{\text{tof},m,i}\}^2 + \alpha \Omega(q), \quad (15)$$

式中, α 为正则参数, $\Omega(q)$ 为正则算子. 一般而言, 正则算子的构造往往比较复杂, 正则函数形式和参数的选择也比较麻烦. 另一种是文献[19]中 Alifanov 的迭代正则化方法, 通过设定合适的收敛准则来达到正则化的目的, 例如, 本文的(10)式. 该方法实现方便, 适于工程应用.

定义辨识值与真值之间的相对偏差 E 为

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{i,c} - q_{i,\text{ex}})^2} / q_{\text{exact,av}}, \quad (16)$$

式中, 下标 av 表示平均值.

定义计算渡越时间与测量值之间的平均偏差 S 为

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \{t_{\text{tof},c,i} - t_{\text{tof},m,i}\}^2} / n. \quad (17)$$

从图 15 可以看出: E 的极小值并非出现在 J 的极小值处, 而是在某一局部值, 约 $M\sigma^2$, 即(11)式. E - J 关系是输出误差原则的体现, 只要合理利用这种关系即可使算法具有良好的稳定性.

最后, 本文通过数值模拟与文献[13]中的算法进行对比(图 16). 可以发现, 本文的重建方法能更好地吻合测量值. 在文献中, 加热条件由恒温热水提供, 而其重建方法假定为一温度恒值, 分析认为, 采用瞬态热流边界条件更符合物理实际. 同时, 在内部温度分布重建的过程中, 文献依靠假定的温度值, 通过空间插值获得内部温度分布. 此种方法的主要误差由假定的温度值决定, 空间插值为条件性稳定, 温度分辨率有限, 难以扩展为多维问题.

综上所述, 从直接求解反问题入手, 基于反演热边界进行瞬态温度分布重建的方法, 灵活性好, 精度较高、抗噪性较好, 且具有可靠的稳定性.

6 总结

本文针对固体结构内部瞬态温度分布无损测量的需求, 根据超声测温特点, 建立了测温模型, 应用共轭梯度法, 发展了一种基于边界反演的瞬态温度场重建方法, 并进行了一系列数值仿真和实验验证,

图 15 E 随目标函数 J 下降的变化过程

图 16 (网络版彩图)不同时刻温度分布重建值与文献对比

得到了一些有意义的结果.

1) 尽管超声探测固体结构内部温度的灵敏度较微弱(1×10^{-9} s 量级), 本文基于反演边界重建得到的结构内部瞬态温度分布, 除个别点外, 与真值吻合基本一致, 温度分辨率高、稳定性好、抗噪性强, 算法有效.

2) 超声渡越时间本质上是反映了波传播路径上温度分布的累积量. 基于渡越时间重建瞬态温度场, 是一个热-声-固耦合反问题. 对于一维而言, 可暂不考虑传播路径的反演. 若推广应用于多维问题, 需同时考虑传播路径的计算.

3) 实验验证表明, 基于超声渡越时间反演得到

的热边界条件, 符合物理实际, 重建得到的固体结构内部瞬态温度分布精度较高, 实时性好, 适用性强, 有利于促进超声无损测温技术的发展, 具有重要的工程应用价值.

参考文献

- 1 Brown E C, Olley P, Coates P D. Inline melt temperature measurement during real time ultrasound monitoring of single screw extrusion. *Plast Rubber Compos*, 2000, 29: 3–13
- 2 Lu C H, Tsai C C. Adaptive decoupling predictive temperature control for an extrusion barrel in a plastic injection molding process. *IEEE T Ind Electron*, 2001, 48: 968–975
- 3 Smith T B, Schetz J A. Development and ground testing of heat flux gages for high enthalpy supersonic flight tests. In: 22nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. St Louis, 2002. 24–26
- 4 Gartenberg E, Roberts A S. Twenty-five years of aerodynamic research with infrared imaging. *J Aircraft*, 1992, 29: 161–171
- 5 Wang H Z, Yu H B, Lin F L. Method and experiment of noninvasive temperature estimation by ultrasound echo pulses. In: Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Hong Kong, 1998. 1513–1516
- 6 Koo K M, Jeong D G, Choi J H, et al. A new measurement system of very high temperature in atomic pile using ultrasonic delay time. In: Proceedings of IEEE Region 10th International Conference on Electrical and Electronic Technology. IEEE, 2001. 860–863
- 7 孙崇正. 超声波测温技术进展. *宇航计测技术*, 1995, 15: 34–41
- 8 常蕾, 赵俭. 超声波测温技术在高温气流温度场测量中的应用. *计测技术*, 2014, 34: 1–9
- 9 Chertov A M, Roman Gr M. A one-dimensional numerical model of acoustic wave propagation in a multilayered structure of a resistance spot weld. *IEEE T Ultrason Ferr*, 2005, 52: 1783–1790
- 10 Ihara I, Yamada H, Kosugi A, et al. New ultrasonic thermometry and its applications to temperature profiling of heated materials. In: 2011 5th International Conference on Sensing Technology. Palmerston North, 2011. 60–65
- 11 Mizutani K, Kawabe S, Saito I, et al. Measurement of temperature distribution using acoustic reflector. *Jpn J Appl Phys*, 2006, 45: 4516–4520
- 12 Beck J V. Nonlinear estimation applied to the nonlinear inverse heat conduction. *Int J Heat Mass Transfer*, 1970, 13: 703–716
- 13 Takahashi M, Ihara I. Ultrasonic sensing of internal temperature distributions in heated materials. In: 2006 SICE-ICASE International Joint Conference. Busan, 2006. 1071–1074
- 14 Ihara I, Takahashi M. A new method for internal temperature profile measurement by ultrasound. In: Instrumentation and Measurement Technology Conference. Warsaw, 2007. 1–5
- 15 钱炜祺, 何开锋, 汪清. 三维非稳态热传导逆问题反演算法研究. *力学学报*, 2008, 40: 611–618
- 16 Shi Y A, Zeng L, Qian W Q, et al. A data processing method in the experiment of heat flux testing using inverse methods. *Aerosp Sci Technol*, 2013, 29: 74–80
- 17 解可新, 韩健, 林友联. 最优化方法. 天津: 天津大学出版社, 1997
- 18 Ihara I, Takahashi M. Ultrasound thermometry for monitoring internal temperature gradient in heated material. In: 2009 IEEE International Ultrasonic Symposium. Rome, 2009. 1199–1202
- 19 Alifanov O M. Inverse Heat Transfer Problems. Berlin: Springer-Verlag, 1994

Research on parameter estimation in ultrasonic measurement of internal transient temperature distributions

SHI YouAn^{1,2}, WEI Dong², GUI YeWei², QIAN WeiQi², ZENG Lei² & QIU Bo²

¹ State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

² Computational Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China

A new reconstruction method of internal unsteady temperature distributions in solid structure using ultrasonic thermometry technique is presented in this paper. This method mainly consists of a joint of heat conduction calculation and an inverse analysis for boundary parameter estimation using ultrasonic time of flight by Conjugate Gradient method. The principle for internal temperature sensing is

based on temperature dependence of the velocity of the ultrasonic wave that propagates through solid material. Simulation and stability analysis are made in which classic function form of heat flux is estimated to illustrate accuracy, as well as factors of influencing quality of this reconstruction method. Validation experiments with a steel plate whose single side is heated by a heater and then cooled down by water are referred. It is verified that the temperature gradient and its variation estimated by this method agree well with the measured values using thermocouples installed in the steel. The results demonstrate that the method presented in this work is a promising means for high accurate rebuilding internal unsteady temperature distributions in solid structure.

ultrasonic thermometry, reconstruction of internal temperature distribution, boundary parameter estimation, conjugate gradient method, experiment validation

doi: 10.1360/N092015-00353