第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0111-07

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ　2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:雷　蕾, 陈　威, 王　宁, 等. 测点数量与位置对室内热源逆模型的影响分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 111—117
Lei Lei, Chen Wei, Wang Ning, et al. Analysis of the effects of the number and location of measure points on the inverse modelling for indoor heat sources[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 111—117

测点数量与位置对室内热源逆模型的影响分析

雷　蕾[1]　陈　威[1]　王　宁[1]　薛　雨[2]

(桂林电子科技大学建筑与交通工程学院[1],桂林 541004;大连理工大学土木工程学院[2],大连 116024)

摘　要　针对建筑室内热源逆模型中温度测点的选取是根据直觉或经验,而不是通过系统推导来确定的问题。采用矩阵奇异值分解和矩阵特征值分解原理,探讨温度测点数量与位置对室内热源逆模型的影响。将矩阵条件数和矩阵特征值之间建立函数关系,以逆模型中矩阵的最小条件数作为评判准则,优选温度测点数量与位置。应用该方法对一个三维通风空腔中的温度测点数量与位置进行分析。研究结果表明,通过该方法选取的温度测点可以提高热源逆模型的计算精度。

关键词　逆模型　传热　正则化逆矩阵　奇异值分解　特征值分解

中图法分类号　TU833.3;　　**文献标志码**　A

室内良好的温度分布对人员的舒适性至关重要,温度分布取决于室内热源[1,2]。如果已知热源信息,则较容易预测出室内的温度分布。然而在设计室内环境时,不能直接根据室内温度分布来确定热源信息。为获得所需的热源边界条件,需要经过一个较长时间的猜测、迭代和修正过程。针对这一问题,需建立逆向求解模型,即根据预期结果(例如室内温度分布),确定未知的热源信息。

建立逆模型的策略一般分为两种:①根据热源信息与温度分布之间的正向因果关系,优化出一个最适合目标函数的解决方案[3—9];②直接对热源与温度分布之间的因果关系进行逆向求解[10,11]。第一种策略是通过枚举不同的热源信息来求解能量方程,以获得目标函数的最优解,通常利用数学优化来寻找最优解;第二种策略对能量方程直接进行逆向求解,将某些位置的测点温度作为已知输入条件,逆向求解所需的热源信息。由于直接对能量方程进行逆向求解在数值上是不稳定的,因此需采用正则化技术来修正目标函数,以提高数值解的稳定性。

近年来,室内环境的逆向建模越来越受到人们的重视。近十年来,大气污染源辨识问题得到了广泛研究,而利用逆模型来求解室内热源则受到一些限制。文献[12]基于计算流体力学方法,根据室内气流模式,利用遗传算法逆向确定风口的送风量;文献[13]应用多目标遗传算法优化室内热舒适、吹风感和通风效率;文献[14]采用伴随方法来优化室内送风速度和送风温度,以满足室内热舒适和空气品质;文献[15]将遗传算法和人工神经网络方法相结合,来确定室内热环境的设计变量(例如,送风速度、送风温度、送风角度和送风口位置)。上述研究均是基于第一种逆向求解策略,即通过数学优化方法寻找一个满足求解条件的计算结果。然而上述模型均未能对室内多个热源同时进行求解,在室内环境中,热源的逆向确定与热传导逆问题的求解是相似的,均是根据系统中的已知温度信息确定热源表面的热流量[3—7]或温度[8,9]。大多数研究均使用第一种策略来枚举并优化可接受的解决方案。热源与其作用下的温度之间的因果关系可以是偏微分方程中的积分变换、有限差分或控制方程中的数值解。传统优化方法中使用较为广泛的是共轭梯度法耦合伴随方法[3—5],遗传算法[6,7]和神经网络方法[8,9]。另一些研究则运用第二种策略直接对因果关系进行逆向求解。例如,基于边界积分方程[10]或格林函数[11],将热源信息与已知温度之间的因果关系表示成矩阵,由于构建的因果关系矩阵条件数较差,因此采用正则化技术对方程进行修正。迄今为止,传热逆模型主要集中在热传导研究领域。

针对室内热环境中热源逆问题数学模型尚不明确的情况下,提出热源表面热流量与测点温度之间的因果关系矩阵的逆向求解方法。根据室内温度贡献率方法(contribution ratio of indoor climate, CRI)构建因果关系矩阵,基于计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD),结合最小二乘优化方

2018 年 7 月 29 日收到　　国家自然科学基金(51708146)、广西自然科学基金(2017GXNSFBA198148)和桂林电子科技大学研究生教育创新计划(2018XWYJ01)资助

第一作者简介:雷　蕾(1984—),女,汉族,博士,讲师。E-mail:1222leilei@163.com。

法,利用 Tikhonov 正则化方法对逆因果关系矩阵进行修正,求解热源表面的热流量。然而,逆模型的计算结果高度依赖于作为已知条件的温度测点数量与位置,如果温度测点的数量发生改变,那么因果关系矩阵的维数也会随之发生改变,从而使逆模型变为超定方程或欠定方程。此外,温度测点的位置决定了因果关系矩阵的条件数。例如,如果某些温度测点位于室内气流旋涡处,那么这些测点则对热边界条件的变化不敏感。在这种情况下,因果关系矩阵是严重病态的,使得 Tikhonov 正则化方法反演无效。到目前为止,还没有研究报道测点数量与位置如何影响逆模型的求解性能,也没有一种恰当的数学方法阐明如何优选测点数量与位置。本文研究着重于室内热源逆模型中温度测点数量与位置的优化分析,探讨测点数量与位置对逆模型计算精度的影响。

1 室内热源逆模型

稳态流场下,室内温度改变量与热源表面对流换热量之间满足如下线性关系:

$$\Delta \boldsymbol{T}_{m\times 1} = \boldsymbol{A}_{m\times n}\Delta \boldsymbol{Q}_{n\times 1} \tag{1}$$

式(1)中:$\Delta \boldsymbol{T}_{m\times 1} = [\Delta T_1, \Delta T_2, \cdots, \Delta T_m]^{\mathrm{T}}$ 是一个 $m\times 1$ 维向量,表示室内温度改变量(℃),由若干测点温度改变量组成;$\Delta \boldsymbol{Q}_{n\times 1} = [\Delta Q_1, \Delta Q_2, \cdots, \Delta Q_n]^{\mathrm{T}}$ 是一个的 $n\times 1$ 维向量,表示热源表面对流换热改变量,由若干对流换热改变量组成,W;$\boldsymbol{A}$ 是温度与热源之间因果关系的 $m\times n$ 维的因果关系矩阵,m 为温度测点数量,n 为热源数量。因果关系矩阵 $\boldsymbol{A}$ 可由 CRI 方法获得,CRI 的定义式如下:

$$CRI_i(\boldsymbol{X}) = \frac{\Delta T_i(\boldsymbol{X})}{\Delta T_{\mathrm{P},i}} = \frac{\Delta T_i(\boldsymbol{X})}{\dfrac{\Delta Q_i}{\rho C_{\mathrm{p}} \dot{V}}} \tag{2}$$

式(2)中:Q_i 为第 i 个热源的热量变化值,W;$\Delta T_i(\boldsymbol{X})$ 为在位置 $\boldsymbol{X}$ 处引起的温度变化值,℃;$\Delta T_{\mathrm{P},i}$ 为所有热源均匀混合下第 i 个热源 Q_i 引起的温度变化值,℃;ρ 为空气密度,$\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$;C_{p} 为定压比热,$\mathrm{J\cdot kg^{-1}\cdot ℃^{-1}}$;$\dot{V}$ 为空气通量,$\mathrm{m^3\cdot s^{-1}}$。

根据温度测点数量 m 和热源数量 n 之间不同的对应关系,矩阵 $\boldsymbol{A}_{m\times n}$ 的维数会相应地发生改变,变化形式如下。

(1) 如果 $m = n$,即温度测点数量等于热源数量,矩阵 $\boldsymbol{A}$ 是方阵,式(1)为正定方程,可直接对其进行求解。

(2) 如果 $m > n$,即温度测点数量大于热源数量,矩阵 $\boldsymbol{A}$ 是长方阵,式(1)为超定方程,若要成功对其进行求解,需对长方阵 $\boldsymbol{A}$ 做矩阵转换处理。

(3) 如果 $m < n$,即温度测点数量小于热源数量,矩阵 $\boldsymbol{A}$ 是欠定矩阵,式(1)为欠定方程,会产生无数个计算结果,若要得到唯一解,必须补充温度测点。

2 测点数量与位置对逆模型影响分析

由于能量方程的发散性,$\boldsymbol{A}$ 是病态矩阵,因此式(1)不存在唯一解,或者对于输入数据中的任何微小干扰都会造成解的不稳定。Tikhonov 正则化方法常用于处理不确定问题,以提高解的稳定性。首先分析矩阵维数对逆模型的求解影响,矩阵维数由温度测点数量决定。

矩阵 $\boldsymbol{A}$ 为方阵时,即温度测点数量等于热源数量,反向求解式(1)得到热源表面的对流换热量为

$$\Delta \boldsymbol{Q}_{n\times 1} = (\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}_{n\times n}\boldsymbol{A}_{n\times n} + \beta^2 \boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}_{n\times n}\boldsymbol{L}_{n\times n})^{-1}(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}_{n\times n}\Delta \boldsymbol{T}_{n\times 1}) \tag{3}$$

式(3)中:β 为正则化参数;$\boldsymbol{L}$ 为正则化操作矩阵;常采用 L 曲线方法获得最优的正则化参数 β。

矩阵 $\boldsymbol{A}$ 为长方阵时,即温度测点数量多于热源数量,式(1)为超定方程。若使式(1)能被顺利求解,需对长方阵 $\boldsymbol{A}$ 做转化处理,将等式(1)的两侧同时乘以矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的转置矩阵,如下:

$$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}_{n\times m}\boldsymbol{A}_{m\times n}\Delta\, \boldsymbol{Q}_{n\times 1} = \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}_{n\times m}\Delta \boldsymbol{T}_{m\times 1} \tag{4}$$

令 $\boldsymbol{B}_{n\times n} = \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}_{n\times m}\boldsymbol{A}_{m\times n}$,$\Delta \boldsymbol{T}^0_{n\times 1} = \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}_{n\times m}\Delta \boldsymbol{T}_{m\times 1}$,则式(4)整理为

$$\boldsymbol{B}_{n\times n}\Delta \boldsymbol{Q}_{n\times 1} = \Delta \boldsymbol{T}^0_{n\times 1} \tag{5}$$

虽然通过矩阵转换,将长方阵 $\boldsymbol{A}_{m\times n}(m > n)$ 转化为方阵 $\boldsymbol{B}_{n\times n}$;但 $\boldsymbol{B}_{n\times n}$ 仍是一个病态矩阵,依然采用 Tikhonov 正则化对其进行修正,计算结果表达式同式(3)。

除上述通过矩阵转换的方式求解超定方程,还可通过去除 $m-n$ 个冗余的温度测点将长方阵 $\boldsymbol{A}_{m\times n}$ $(m > n)$ 构造成一个新的方阵。如果从 m 个测点中选取 n 个测点温度作为输入值,则 $\boldsymbol{A}$ 为方阵。若剔除 $m-n$ 个冗余的测点,存在 C_m^{m-n} 种方法,或者存在 C_m^n 种方法从 m 个测点中选择 n 个测点温度。最佳的选择方式是降低因果关系矩阵的条件数,削弱其病态性,使得逆向操作可以顺利进行。选取恰当的温度测点应基于矩阵条件数,根据矩阵奇异值分解,将条件数定义为

$$Cond(\boldsymbol{A}) = \frac{\sigma_1}{\sigma_n} \tag{6}$$

式(6)中:σ_1 和 σ_2 为矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的奇异值,所有的奇异值都遵照 $\sigma_1 \geqslant \sigma_2 \geqslant \cdots \geqslant \sigma_n \geqslant 0$ 递减序列进行排序,在奇异值分解中,矩阵 $\boldsymbol{A}$ 可表示为

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

式(7)中:$\boldsymbol{U}=[u_1,u_2,\cdots,u_n]$ 和 $\boldsymbol{V}=[v_1,v_2,\cdots,v_n]$ 为正交矩阵,且 $\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{U}=\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}=\boldsymbol{I}_n$,$\boldsymbol{\Sigma}=\mathrm{diag}(\sigma_1,\sigma_2,\cdots,\sigma_n)$ 是对角元素为奇异值的对角方阵。条件数能够预示矩阵病态性的强弱,较小的条件数代表良性矩阵,较大的条件数代表病态矩阵。由于 σ_n 非常接近于 0,因此对病态矩阵进行求逆会存在一定的困难。剔除掉一些质量较差的测点可以削弱矩阵的病态性。

矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的维数取决于温度测点的数量,然而矩阵的病态性是由测点位置决定的。温度测点的不同位置会导致矩阵的不同条件数,鉴于此,为使矩阵求逆顺利进行,提出一种优选温度测点的计算方法。

对于测点数量大于热源数量的长方阵 $\boldsymbol{A}$,即 $m>n$,补充 $m-n$ 列的零向量后形成一个新的方阵:

$$\boldsymbol{A}_{m\times m}=\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} & 0_{1(n+1)} & \cdots & 0_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} & 0_{2(n+1)} & \cdots & 0_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} & 0_{m(n+1)} & \cdots & 0_{mm} \end{pmatrix} \tag{8}$$

为得到 $\boldsymbol{A}_{m\times m}$ 的特征值,需求解特征方程:

$$|\lambda\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}_{m\times m}|=(\lambda-\lambda_1)(\lambda-\lambda_2)\cdots(\lambda-\lambda_m)=0 \tag{9}$$

奇异值分解中的对角矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}=\mathrm{diag}(\sigma_1,\sigma_2,\cdots,\sigma_m)$ 和特征值分解中的对角矩阵 $\boldsymbol{\Lambda}=\mathrm{diag}(\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_m)$ 满足关系:

$$\boldsymbol{\Sigma}=\boldsymbol{F}\boldsymbol{\Lambda} \tag{10}$$

式(10)中:$\boldsymbol{F}$ 为非奇异系数矩阵。矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的条件数可以表示为特征值的函数:

$$Cond(\boldsymbol{A}_{m\times m})=\frac{\sigma_1}{\sigma_n}=\left|\frac{f_{11}\lambda_1}{f_{mm}\lambda_m}\right| \tag{11}$$

根据式(11)可知,当且仅当 $\lambda=0$ 时,矩阵是病态的。因为 $m-n$ 列零向量填充在式(8)中,则至少存在 $m-n$ 个特征值必须为零。因果关系矩阵中的每个行向量都对应一个温度测点,必须删除其特征值等于零的 $\boldsymbol{A}_{m\times n}$ 中相应的行向量。当剔除多余的温度测点时,应首先移除使矩阵中某些行向量的特征值接近于 0 的测点。最佳的温度测点对应于方阵 $\boldsymbol{A}_{n\times n}$ 的最小条件数,式(11)揭示了当移除多余的温度测点时,矩阵中某些行向量的特征值接近于 0 的点应首先被移除。尽管存在 C_m^n 种选择温度测点的方法,但选择任何包含特征值等于零的测点都会引起矩阵的病态性。

在某些情况下,构成的新方阵可能仍然是病态的,即 $\lambda_n=0$。若继续移除一些温度测点会导致控制方程形成一个欠定系统,即式(1)中的 $m<n$ 情况。此时,必须补充更多的温度测点,直到 Tikhonov 正则化反演能提供一个可接受的唯一解。

3　实验验证

为评价所提方法的有效性,搭建三维通风空腔实验台,在空腔内温度测点数量与位置已知的情况下,逆向确定三维通风空腔中天花板、地板、左侧壁面及右侧壁面的对流换热量。应用建立的方法评价温度测点的质量,选择最佳的温度测点数量与位置,降低因果关系矩阵的病态性,提高逆模型的计算精度。

三维通风空腔实验台的几何尺寸为 1.04 m × 1.04 m × 0.7 m($X\times Y\times Z$),如图 1 所示。空气由左上方宽度为 0.018 m 的条形风口送入,从空腔右下方宽度为 0.024 m 的排风口排出。根据空腔内的测点温度,应用逆模型求解图 1(a)中天花板、地板、左侧壁面及右侧壁面的对流换热量。

图 2 中列出了温度测点的数量及位置分布,测点温度值见表 1。由于图 2(a)中的 6 个测点位于气流中心混合区域内,所以温度值较相似。总共设计

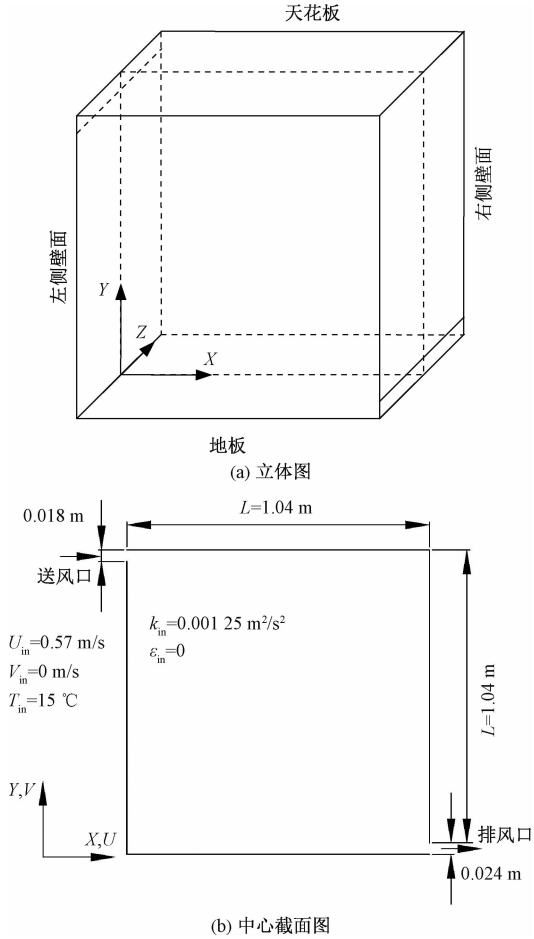
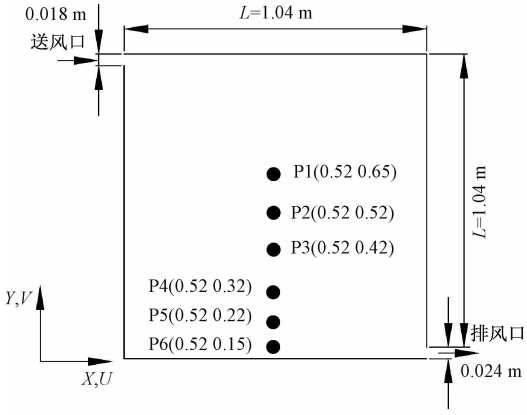


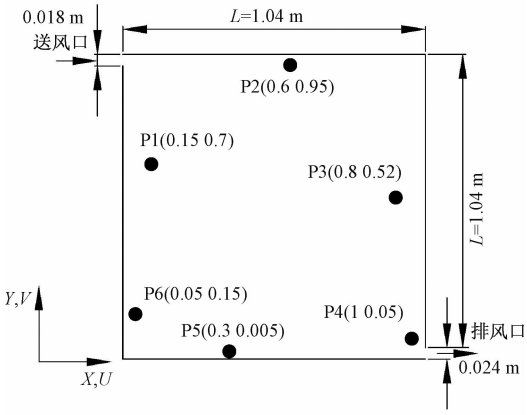
图 1　三维空腔通风实验台

Fig. 1　A three-dimensional enclosure applying the mixing ventilation mode

四组验证算例,如表 2 所示。算例 1 ~3 的温度测点均在一条垂直线上;算例 4 中的温度测点分散在墙壁附近;只有算例 2 将 6 个测点全部采用,而其他算例中只采用了 4 个测点。



(a) 算例1、2、3的测点分布在一条垂线上



(b) 算例4的测点分散在壁面附近

图 2 空腔内温度测点的位置

Fig. 2 The locations of temperature measurement points in the enclosure

表 1 逆模型中的测点温度值

Table 1 The measured temperatures used in the inverse modelling

测点	图 2(a)中的测点温度/℃	图 2(b)中的测点温度/℃
P1	19.40	20.96
P2	19.30	16.31
P3	19.10	18.33
P4	18.70	19.27
P5	18.90	33.72
P6	20.00	30.53

表 2 温度测点的设置

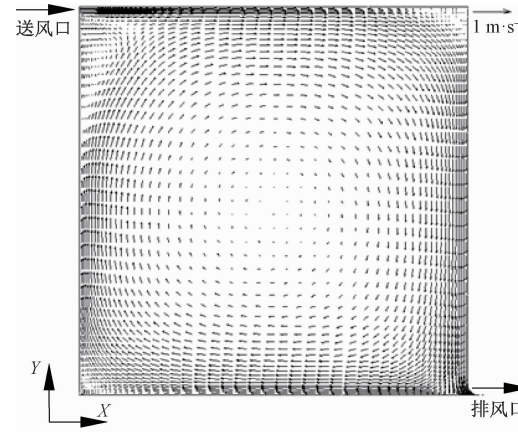
Table 2 The setting of temperature measurement points

算例	温度测点的分布位置	选取的温度测点
1	图 2(a)中的中心垂线上	P1 ~ P4
2	图 2(a)中的中心垂线上	P1 ~ P6
3	图 2(a)中的中心垂线上	P3 ~ P6
4	图 2(b)中的壁面附近	P1、P2、P5、P6

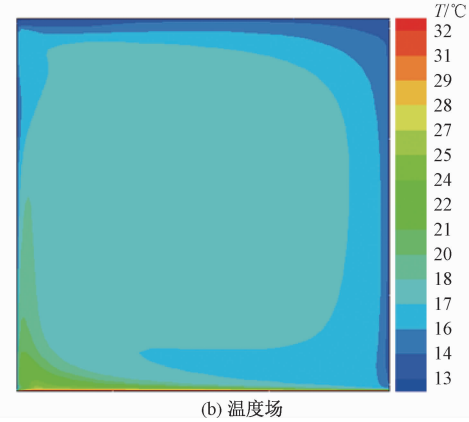
4 计算结果

4.1 速度场、温度场及 CRI 分布的模拟

在应用逆模型之前,首先借助 CFD 数值模拟技术获得三维通风空腔内的速度场和温度场,在此基础上构建因果关系矩阵 $\boldsymbol{A}$。图 3 是沿 Z 轴方向中心界面处的速度场和温度场。从图 3(a)中的速度场可知,腔内气流呈顺时针方向流动,在中心区域形成一个巨大的漩涡,且中心位置处的速度近似为 0;从图 3(b)中的温度场可知,温度受气流影响,中心区域的温度分布较为均匀,地板温度略高,天花板温度较低。



(a) 速度场



(b) 温度场

图 3 空腔内中心界面位置的速度场与温度场

Fig. 3 The velocity field and temperature field of center interface in cavity

在获得空腔内速度场和温度场的基础上,再借助 CFD 模拟得到天花板、地板、左侧壁面及右侧壁面的 CRI 分布图,截取沿 Z 轴方向中心横截面位置的四个固体壁面的 CRI 分布图,如图 4 所示。每一个固体壁面的 CRI 代表该壁面对空间温度分布的贡献率,它是一个无量纲的数值,在速度场和温度场固定不变的情况下,它是一个常值,且沿气流流动方向分布。

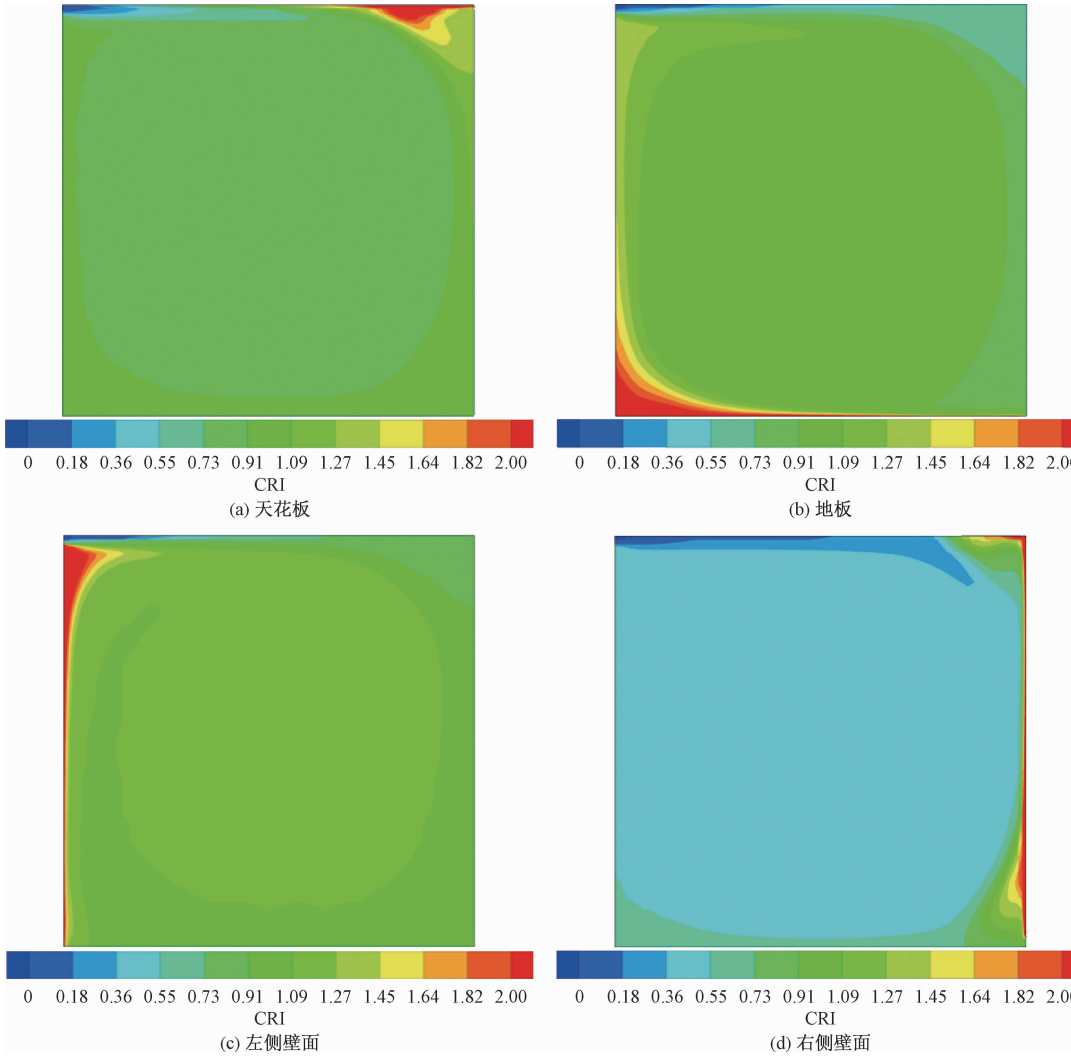


图 4　每个壁面的 CRI 分布

Fig. 4　CRI distribution for each wall

4.2　温度测点的分析结果

4.2.1　算例 1

选取图 2(a)中 P1 ~ P4 四个测点的温度作为已知输入数据,用来求解四个壁面的对流换热量,得到一个四维方阵 $\boldsymbol{A}$,$Cond(\boldsymbol{A}_1)=72\ 661$。根据 L 曲线方法选定 $\beta=5.72\times10^{-3}$ 为最优正则化参数,得到四个壁面的对流换热量 $\boldsymbol{Q}=[-7.84\ \text{W},\ 90.51\ \text{W},\ -36.12\ \text{W},\ -10.85\ \text{W}]^{\mathrm{T}}$,分别对应天花板、地板、左侧壁面和右侧壁面。表 3 中给出了四个壁面对流换热量的逆向求解值与实验测量值,两者之间的均方根误差为 0.3 W,计算结果在接受范围之内。

4.2.2　算例 2

选取图 2(a)中 P1 ~ P6 六个测点的温度作为已知输入数据,温度向量 $\boldsymbol{T}\in R^{6\times1}$,矩阵 $\boldsymbol{A}\in\boldsymbol{R}^{6\times4}$。采用计算式(4)将超定方程转换为正定方程后进行求解,$\beta=4.37\times10^{-4}$,得到 $\boldsymbol{Q}=[-7.55\ \text{W},\ 89.64\ \text{W},\ -35.06\ \text{W},\ -9.97\ \text{W}]^{\mathrm{T}}$,分别对应天花板、地板、左侧壁面和右侧壁面。表 3 中四个壁面对流换热量的逆向求解值与实验测量值之间的均方根误差为 0.61 W,由此可见,算例 2 的计算精度低于算例 1,增加温度测点数量并没有提高逆模型的计算精度。其原因是,通过式(4)将长方阵 $\boldsymbol{A}$ 转换为方阵 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$ 后,增大了方阵 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$ 的条件数,进而加重了方阵 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$ 的病态性,算例 2 的 $Cond(\boldsymbol{A}_2)=3\ 640\ 455$,而算例 1 的 $Cond(\boldsymbol{A}_1)=72\ 661$,算例 2 中因果关系矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的条件数明显大于算例 1 中矩阵条件数。因此,采用多于待求解热边界数量的温度测点并不能提高逆模型的计算精度。

4.2.3　算例 3

为提高算例 2 的计算精度,使因果关系矩阵的条件数达到最小,需采用矩阵特征值分解原理。根据式(8),在长方阵 $\boldsymbol{A}$ 中添加两列零向量创建一个方阵 $\boldsymbol{A}_0$。通过求解方阵 $\boldsymbol{A}_0$ 的特征值可知,$\boldsymbol{A}_0$ 中前两行向量对应的特征值为 0。因此,剔除掉 P1 和 P2

两个温度测点,将 P3 ~ P6 四个测点的温度值作为已知输入数据,重新构建因果关系矩阵 $\boldsymbol{A}_3$,求解壁面对流换热量。得到 $\beta = 6.21 \times 10^{-3}$, $\boldsymbol{Q} = [-7.86\ \text{W}, 89.97\ \text{W}, -35.82\ \text{W}, -10.94\ \text{W}]^{\text{T}}$,表 3 中四个壁面对流换热量的逆向求解值与实验测量值之间的均方根误差为 0.2 W。结果表明,算例 3 的计算精度高于算例 1 和算例 2,因为算例 3 中因果关系矩阵的条件数是最小的,$Cond(\boldsymbol{A}_3) = 1\ 559$,算例 3 中的矩阵条件数低于算例 1 和算例 2 中矩阵条件数。

4.2.3 算例 4

除了温度测点数量会影响逆模型的计算精度外,温度测点位置同样也对逆模型的计算精度产生影响,为说明如何优选温度测点位置,应用图 2(b)中六个温度测点进行计算。基于式(8),增加两列零向量将长方阵转换为方阵。通过特征值分解原理,得到方阵中第三行和第四行向量对应的特征值为 0,因此剔除测点 P3 和 P4。采用测点 P1、P2、P5 和 P6 的温度值来求解壁面对流换热量。得到 $\beta = 0.255\ 7$, $\boldsymbol{Q} = [-7.88\ \text{W}, 89.99\ \text{W}, -35.79\ \text{W}, -10.91\ \text{W}]^{\text{T}}$。表 3 中四个壁面对流换热量的逆向求解值与实验测量值之间的均方根误差为 0.17 W。与前三个算例相比,算例 4 的均方根误差最小,因为逆模型中因果关系矩阵的条件数最小,$Cond(\boldsymbol{A}_4) = 117$。

表 3 逆模型计算结果与实验数据的对比

Table 3 Comparison of the inversely determined wall results with experimental data

边界	实验数据/W	逆模型计算结果/W			
		算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
天花板	-8.06	-7.84	-7.55	-7.86	-7.88
地板	90.19	90.51	89.64	89.97	89.99
左侧壁面	-35.67	-36.12	-35.06	-35.82	-35.79
右侧壁面	-10.73	-10.85	-9.97	-10.94	-10.91

注:对流换热量的正值表示热源(释放热量),负值表示热汇(吸收热量)。

5 结论

提出了一种优选室内热源逆模型中温度测点数量与位置的计算方法。基于计算结果分析,得到以下结论。

(1)在给定合适的温度测点情况下,逆模型能够较为准确地求解室内对流换热量。作为已知输入条件的温度测点数量与位置会影响逆模型计算结果的精度,温度测点的数量决定因果关系矩阵的维数,而因果关系矩阵的病态性取决于测点的位置。

(2)不需要采用比待求解热源数量多的温度测点。若某些测点质量较差,则应补充一些质量较好的测点,直到逆模型可以成功进行求解。

(3)热源附近的温度测点易于感知热源所释放的热量,因此热源附近是温度测点位置的理想选择。流动漩涡中的温度测点彼此之间的温度值很接近,应避开这样的位置。

(4)在某些情况下,如果提供比热源数量更多的温度测点,需应用矩阵特征值分解原理优选测点。以因果关系矩阵的最小条件数为准则,将矩阵条件数作为矩阵特征值的函数(因果关系矩阵的最大特征值与最小特征值之比),应用该定义来优选温度测点。由于一个温度测点对应因果关系矩阵的一个特征值,因此应保留矩阵特征值远离零的温度测点。

参 考 文 献

1 刘桂涛. 建筑电气设备自适应模糊 PID 节能控制研究. 科学技术与工程, 2016;16(23): 268—272
Liu Guitao. Building electrical equipment adaptive fuzzy PID control energy-saving research. Science Technology and Engineering, 2016;16(23): 268—272

2 洪勇吉. 低矮建筑非定常绕流大涡模拟影响因素. 科学技术与工程, 2017;17(14): 243—250
Hong Yongji. Large eddy simulation influence factors of the unsteady flow around a low-rise building. Science Technology and Engineering, 2017;17(14): 243—250

3 Luchesi V M, Coelho R T. An inverse method to estimate the moving heat source in machining process. Applied Thermal Engineering, 2012;45(2): 64—78

4 Ma Y T, Fu C S, Zhang Y. Identification of an unknown source depending on both time and space variables by a variational method. Applied Mathematical Modelling, 2012;36(11): 5080—5090

5 Silva-Neto A J, Ozisik M N. Two dimensional inverse heat conduction problem of estimating the time-varying strengths of line heat sources. Journal of Applied Physics, 1992;71(11): 5357—5362

6 Balazs C, Gyula G. Inverse identification of temperature-dependent thermal conductivity *via* genetic algorithm with cost function-based rearrangement of genes. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012;55(6): 4254—4263

7 Reza P, Hassan D, Seyed H T. Solving an inverse heat conduction problem using genetic algorithm: Sequential and multi-core parallelization approach. Applied Mathematical Modelling, 2014;38(9): 1948—1958

8 Deng S, Huang Y. Applying neural networks to the solution of forward and inverse heat conduction problems. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006;49(2): 4732—4750

9 Balazs C, Keith A W, Gyula G. Simultaneous estimation of temperature-dependent volumetric heat capacity and thermal conductivity functions *via* neural networks. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014;68(5): 1—13

10 Fred L, Christophe L N. Multiple transient point heat sources identification in heat diffusion: Application to experimental 2D problems. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002;45(9): 1951—1964

11 Hon Y C, Li M, Melnikov Y A. Inverse source identification by Green's function. Engineering Analysis with Boundary, 2010;34(4):352—358

12 Xue Y, Zhai Z Q, Chen Q Y. Inverse prediction and optimization of flow control conditions for confined spaces using a CFD-based genetic algorithm. Building and Environment, 2013;64(2):77—84

13 Zhai Z Q, Xue Y, Chen Q Y. Inverse design methods for indoor ventilation systems using CFD-based multi-objective genetic algorithm. Building Simulation, 2014;7(11):661—669

14 Liu W, Chen Q Y. Optimal air distribution design in enclosed spaces using an adjoint method. Inverse Problem Science Environment, 2015;23(6):760—779

15 Zhang T H, You X Y. A simulation-based inverse design of preset aircraft cabin environment. Building and Environment, 2014;82(5):20—26

Analysis of the Effects of the Number and Location of Measure Points on the Inverse Modelling for Indoor Heat Sources

LEI Lei[1], CHEN Wei[1], WANG Ning[1], XUE Yu[2]

(School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology[1], Guilin 541004, China; School of Civil Engineering, Dalian University of Technology[2], Dalian 116024, China)

[**Abstract**] The current temperature specification is determined by intuition or experience rather than by systematic derivation. This investigation proposes to evaluate the specification of temperature points using the eigenvalue decomposition to the governing matrix. A connection was established between the eigenvalues and the condition number of the matrix that describes the posedness of the problem. The effects of the number and locations of temperature points on the inverse solution were analyzed based on a three-dimensional ventilation enclosure. The results showed that the proposed inverse model provides accurate solutions with appropriately specified temperature points.

[**Key words**] inverse modeling　heat transfer　regularized matrix inversion　singular value decomposition　eigenvalue decomposition