

DOI: 10.7652/xjtuxb201901003

钻孔工件移动热边界条件估计及温度场重构

吕财¹, 王广军^{1,2}, 陈红^{1,2}, 章广祥¹, 陈泽弘¹

(1. 重庆大学动力工程学院, 400044, 重庆;

2. 重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 400044, 重庆)

摘要: 针对钻孔加工过程中工件受热边界条件难以直接准确测量的问题,建立了一种模型预测反演方案,并将该方法用于钻孔工件移动热边界条件的估计。在该方案中,采用阶跃响应系数建立工件温度的非参数化预测模型。利用工件的部分温度测量信息,通过滚动优化实现工件移动热边界条件的反演。文中利用数值仿真试验验证了上述方法的有效性,分析了钻具进给速度、温度测量误差、测点数以及未来时间步数对反演结果的影响,并以测量标准差为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下反求得到的边界条件为已知信息,重构了工件的瞬态温度场。研究表明:本文方案能够有效反演工件的移动热边界条件,且具有一定的抗干扰能力;此外,由于不需要对未来一段时间内移动热边界条件的变化进行假设,使得本文的方案降低了反演结果对于未来时间步数的依赖性。本研究为钻孔工件瞬态温度场的重构提供了一种解决方案。

关键词: 钻孔;移动热边界条件;反问题;模型预测控制;温度场重构

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)01-0018-07

Estimation of Moving Thermal Boundary Condition and Temperature Field Reconstruction of Workpieces in Drilling Process

LÜ Cai¹, WANG Guangjun^{1,2}, CHEN Hong^{1,2}, ZHANG Guangxiang¹, CHEN Zehong¹

(1. School of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory of Low-Grade Energy Utilization Technologies and Systems, MOE, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In view of the fact that it is difficult to directly and accurately measure the thermal boundary condition of workpieces in drilling process, a model predictive control method is established to estimate the moving thermal boundary condition of the workpiece in drilling. In the inverse scheme, the step response coefficients are used to establish the non-parametric prediction model of workpiece temperature. Based on the temperature measurement information, the estimation of the moving thermal boundary condition is realized by rolling optimization. The validity of the above method is verified by numerical simulation, and the effects of the moving velocity of drill, the temperature measurement errors, the number of measuring points and the number of future time steps on the inversion results are also discussed. Besides, the transient temperature field of the workpiece is reconstructed by using the thermal boundary condition obtained when the standard deviation is $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$. The results show that the proposed scheme can effectively estimate the moving thermal boundary condition, and has good anti-interference

收稿日期: 2018-08-06。 作者简介: 吕财(1990—),男,博士生;陈红(通信作者),女,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51676019,51876010)。

网络出版时间: 2018-10-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181023.1120.002.html>

ability. In addition, since it is not necessary to make assumptions about the changes of moving thermal boundary condition in the future time, the proposed inverse scheme reduces the dependence of inversion results on the number of future time steps. This study may provide a solution to the reconstruction of transient temperature field of the workpieces in drilling process.

Keywords: drilling; moving thermal boundary condition; inverse problem; model predictive control; temperature field reconstruction

孔钻削是机械加工过程常见的金属去除成型工艺^[1-2],与其他切削工艺相比,钻削是半封闭状态加工,摩擦严重、散热困难。在钻孔过程中,工件的温度分布是一个重要的参数,它不仅会影响钻具的寿命,还直接影响到工件的性能指标,如残余应力、尺寸误差和加工表面的硬度等。因此,全面了解孔钻削过程中工件的温度分布,有助于提高加工效率和产品工件的加工质量^[3-5]。

通常,实验测量只能获得部分的温度信息,为了获得钻孔工件完整的瞬态温度场,必须明确进入工件的瞬时热负荷。由于进入工件的瞬时热负荷难以直接准确测量,借助导热反问题方法,利用工件内部或表面的部分温度测量信息反求进入工件的瞬时热负荷,进而重构工件的瞬态温度场,是一种方便有效的解决方案。

目前,求解导热反问题的方法主要有梯度类优化方法^[6-7]、正则化技术^[8]、分散式模糊推理^[9-10]、顺序函数法(SFSM)^[11-12]、随机优化方法^[13-14]等。其中,SFSM利用未来一段时间内的测量温度信息反演当前时刻的未知参数,在非稳态导热反问题中得到了广泛的应用。然而,它需要假定未来一段时间内未知变量的变化形式,这会影响反演结果的准确性^[15]。针对这一问题,Wang等结合系统预测控制思想,建立了一种基于动态矩阵控制(DMC)的反演方法,实现了非稳态导热系统多个热边界条件的同时反演^[16-17]。与SFSM相比,DMC反演方案无需假定待反演参数在未来时间段的变化形式,降低了反演结果对于未来观测信息的依赖性,提高了反演结果的可靠性。作为一种顺序反演方案,DMC为钻孔工件的温度场在线重构提供了可能。

关于导热反问题方法在钻孔传热过程中的应用研究已经积累了一些成果。Huang等采用最速下降法反求了进入钻头的热流量^[18]。Tai等基于序列二次优化方法研究了深孔钻削时钻孔壁面和底面产生的热量,发现深孔钻削时预测工件温度需要考虑孔壁面热量的影响^[19]。De Sousa等建立了一种基于格林函数和动态观测器的反演方法,并将其用于

估算钻孔过程中进入工件的瞬时热流量^[20]。需要说明的是,在工件的钻孔加工过程中,随着钻具的持续运动,工件的受热边界不断发生移动,系统输入(瞬态热负荷)与系统输出(测点处温度)之间的动力学映射关系可能发生明显变化。本质上,钻孔传热系统是一类非线性传热系统,相对于线性系统,非线性传热系统反问题的不适定性更加突出^[7]。

本文基于模型预测控制思想研究了钻孔工件移动边界热流反演及温度场重构问题,以钻孔工件传热模型为基础,建立了工件瞬态温度场阶跃响应函数模型以及工件温度预测模型;利用工件的部分温度测量信息,通过滚动优化实现工件移动传热边界条件的反演及工件瞬态温度场的在线重构。文中利用数值仿真试验验证了上述方法的有效性,并详细讨论了钻具进给速度、温度测量误差、测点数等对反演结果的影响。

1 钻孔工件温度分布数学模型

钻孔工件的简化物理模型如图1所示。工件在加工过程中,一方面受到来自钻削产生的部分摩擦热 $q(t)$,另一方面与环境进行对流换热。对工件的传热过程引入如下假设^[5,18,20]:

- ①由于工件的对称性,只考虑工件沿径向和轴向的传热,将其简化为二维传热问题;
- ②工件的对称面视为绝热,其他边界则与环境发生对流换热;
- ③进入工件的热负荷沿孔径方向均匀分布,只随时间发生变化;
- ④工件材料的热物性各向同性且恒定。

根据上述假设,建立圆柱坐标下钻孔工件温度分布数学模型

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$T(r, z, 0) = T_0(r, z) \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{AB} = q(t) \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{BC, CD, DE, EO} = h(T(r, z, t) - T_\infty(t)) \quad (4)$$

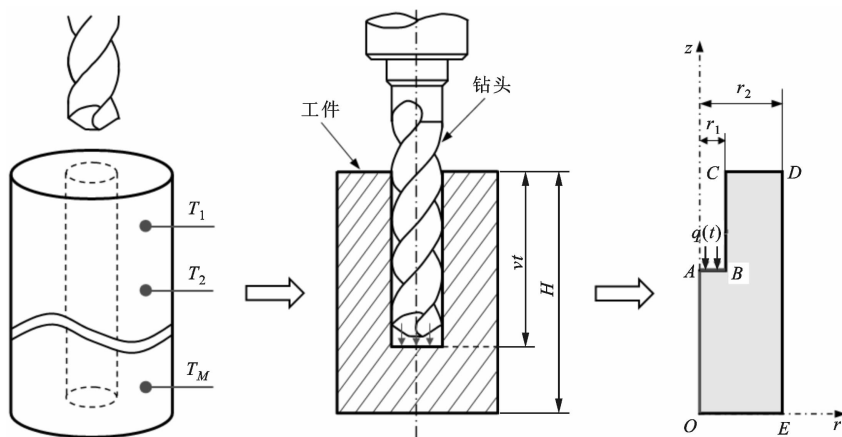


图1 钻孔工件的简化物理模型

$$-\lambda \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{OA} = 0 \quad (5)$$

式中: λ 、 ρ 和 c 分别为工件的导热系数、密度和比热容; $T_0(r, z)$ 为工件的初始温度; $q(t)$ 为进入到工件的瞬时热流密度; $T_\infty(t)$ 为环境温度; h 为对流换热系数; n 为界面的法线方向。

2 模型预测控制方法求解反问题

2.1 反问题目标函数

如果方程组(1)~(5)中的其他条件均已知, 移动边界热流 $q(t)$ 未知时, 根据温度测点 m ($m=1, 2, \dots, M$) 在时刻 $k, k+1, \dots, k+R-1$ 的测量值来估计 q^k , 构成了对应的导热反问题。这里的 R 为预定的未来时间步数, q^k 为 $q(t)$ 在 k 时刻的估计值。

上述的导热反问题可以通过使以下目标函数最小化求解

$$\min J(Q) = (Y - T)^T (Y - T) + \alpha Q^T Q \quad (6)$$

式中: $Y = [Y^k, Y^{k+1}, Y^{k+2}, \dots, Y^{k+R-1}]^T$ 为测量温度矩阵, $Y^{k+j} = [Y_1^{k+j}, Y_2^{k+j}, Y_3^{k+j}, \dots, Y_M^{k+j}]^T$, Y_m^{k+j} ($j=0, 1, \dots, R-1$) 为测点 m 在 $k+j$ 时刻的温度测量值; $T = [T^k, T^{k+1}, T^{k+2}, \dots, T^{k+R-1}]^T$ 为预测温度矩阵, $T^{k+j} = [T_1^{k+j}, T_2^{k+j}, T_3^{k+j}, \dots, T_M^{k+j}]^T$, T_m^{k+j} 为测点 m 在 $k+j$ 时刻的温度预测值; α 为与 $q(t)$ 对应的正则化参数^[16-17]。

2.2 预测模型

采用阶跃响应函数建立工件温度的预测模型, 根据工件未来时间序列的热边界条件变化预测未来 R 个时刻测点 m 处的温度 T_m^{k+j} 。

根据叠加原理, 从 k 时刻起, 在移动边界热流 $q(t)$ 的作用下, 测点 m 处的温度等于没有 $q(t)$ 作用时 $k+j$ 时刻的温度输出 $\tilde{T}_m^{k+j}$ 与单独 $q(t)$ 作用下引起的测点处输出温度的叠加, 即

$$T_m^{k+j} = \tilde{T}_m^{k+j} + \Delta\phi_m^j q^k + \Delta\phi_m^{j-1} q^{k+1} + \Delta\phi_m^{j-2} q^{k+2} + \dots + \Delta\phi_m^0 q^{k+j} \quad (7)$$

$$\Delta\phi_m^j = \begin{cases} \phi_m^{j+1}, & j = 0 \\ \phi_m^{j+1} - \phi_m^j, & j \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

这里的 ϕ_m^{j+1} ($m=1, 2, \dots, M$) 为 $k+j$ 时刻测点 m 处的工件温度对于 q^k 的动态阶跃响应系数。

将上述方程转化为矩阵方程

$$T = \tilde{T} + A Q \quad (9)$$

$$\tilde{T} = [\tilde{T}^k, \tilde{T}^{k+1}, \dots, \tilde{T}^{k+R-1}]^T$$

$$\tilde{T}^{k+j} = [\tilde{T}_1^{k+j}, \dots, \tilde{T}_M^{k+j}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} \Delta\phi^0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \Delta\phi^1 & \Delta\phi^0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta\phi^{R-1} & \Delta\phi^{R-2} & \Delta\phi^{R-3} & \dots & \Delta\phi^0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta\phi^j = [\Delta\phi_1^j, \Delta\phi_2^j, \dots, \Delta\phi_M^j]^T; 0 = [0, 0, \dots, 0]^T$$

定义工件传热模型的阶跃响应函数

$$X(r, z, t) = \partial T(r, z, t) / \partial q^k \quad (10)$$

$X(r, z, t)$ 反映了 q^k 对温度场 $T(r, z, t)$ 的影响程度。将方程组(1)~(5)对 q^k 求导, 则在 $[t_k, t_{k+R-1}]$ 时间段内 $X(r, z, t)$ 应满足下列的阶跃响应方程组

$$\rho \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial X}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (11)$$

$$X(r, z, t_{k-1}) = 0 \quad (12)$$

$$-\lambda \frac{\partial X(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{AB} = 1 \quad (13)$$

$$-\lambda \frac{\partial X(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{BC, CD, DE, EO} = hX(r, z, t) \quad (14)$$

$$-\lambda \frac{\partial X(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{OA} = 0 \quad (15)$$

由方程组(11)~(15)可以看出, $X(r, z, t)$ 随着边界 AB 的移动而发生变化。因此, 可以根据有限

容积法和高斯赛德尔迭代法在每一时刻求解上述的阶跃响应方程组,得到阶跃响应函数的离散值,进而按下式来确定测点 m 处的阶跃响应系数

$$\phi_m^{j+1} = X(r_m, z_m, t_{k+j}), \quad j = 0, 1, \cdots, R-1$$

(16)

2.3 滚动优化

模型预测反演方法通过采用滚动优化获得边界热流向量 $\boldsymbol{Q} = [q^k, q^{k+1}, \cdots, q^{k+R-1}]^T$ 。

将式(6)对 $\boldsymbol{Q}$ 求导,并令 $dJ(\boldsymbol{Q})/d\boldsymbol{Q} = 0$,得到移动边界热流向量的最优估计值

$$\boldsymbol{Q} = (\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{A} + \alpha \boldsymbol{E})^{-1} \boldsymbol{A}^T [\boldsymbol{Y} - \tilde{\boldsymbol{T}}]$$

(17)

式中 $\boldsymbol{E}$ 为 R 阶的单位矩阵。

在当前时刻 k ,只需根据式(17)确定即时热流量 q^k ,下一时刻按同样的优化方法求得 q^{k+1} ,此即滚动优化策略。

由式(17)得即时热流量的最优估计值为

$$q^k = d(\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{A} + \alpha \boldsymbol{E})^{-1} \boldsymbol{A}^T [\boldsymbol{Y} - \tilde{\boldsymbol{T}}]$$

$$\boldsymbol{d} = [1, 0, \cdots, 0]_{1 \times R}$$

(18)

3 仿真试验结果及讨论

3.1 仿真试验条件

对于图 1 所示的钻孔工件传热系统,其结构和物理参数为:外半径 $r_2 = 2$ cm,内半径 $r_1 = 0.5$ cm,高度 $H = 5$ cm;工件的材料为 AISI 1018 碳钢,导热系数 $\lambda = 51.9$ W · m⁻¹ · K⁻¹,密度 $\rho = 7\,870$ kg · m⁻³,比热容 $c = 486$ J · kg⁻¹ · K⁻¹。

取工件初始温度 $T_0(r, z) = 20$ °C,对流换热系数 $h = 30$ W · m⁻² · K⁻¹,环境温度 $T_\infty(t) = 20$ °C。

按式(19)和式(20)给定两组不同变化形式的热流密度

$$q_1(t) = 6 + 20 \sin(\pi t / 24) e^{-0.2t} \text{ (MW} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (19)$$

$$q_2(t) = \begin{cases} 6 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}, & t \leq 7 \text{ s} \\ (-0.4(t/7) + 14.8) \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}, & 7 \text{ s} < t \leq 17 \text{ s} \\ 7 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}, & t > 17 \text{ s} \end{cases} \quad (20)$$

根据网格无关性验证结果,在区域离散时,取空间步长 $\Delta r = \Delta z = 0.5$ mm,时间步长 $\Delta t = 0.5$ s。

仿真试验过程中,假定温度测点均匀布置于工件的外表面,具体位置见表 1。

表 1 温度测点位置

测点	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
$(r/\text{cm}, z/\text{cm})$	(2, 4.5)	(2, 3.5)	(2, 2.5)	(2, 1.5)	(2, 0.5)

考虑到实际温度测量结果不可避免地存在测量误差,在数值仿真试验中,按下式模拟测点处的实际测量温度

$$Y_m^k = (T_m^k)_{\text{exa}} + \omega \sigma$$

(21)

式中: ω 为区间 $[-2.576, 2.576]$ 内服从正态分布的一组随机数; σ 为温度测量误差的标准差; $(T_m^k)_{\text{exa}}$ 为测点 m 处温度的精确值,在仿真试验时,根据给定的实际热边界条件,通过求解方程组(1)~(5)确定。

为了评估反演方案的准确性,引入均方根误差 S_q 及平均相对误差 η

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K ((q^k)_{\text{exa}} - q^k)^2}$$

(22)

$$\eta = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K ((q^k)_{\text{exa}} - q^k)^2} / \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K ((q^k)_{\text{exa}})^2}$$

(23)

式中: K 为待反演热流总的时间离散点数; $(q^k)_{\text{exa}}$ 为热流密度 $q(t)$ 在 k 时刻的真实值。

3.2 移动热边界条件反演

取未来时间步数 $R = 3$, 钻具进给速度 $v = 0.002$ m/s,测量误差的标准差 $\sigma = 0$,利用测点 T_2 和 T_4 提供的温度信息反演未知热边界条件 $q(t)$ 。图 2 和图 3 分别给出了边界热流 $q_1(t)$ 和 $q_2(t)$ 的反演结果。

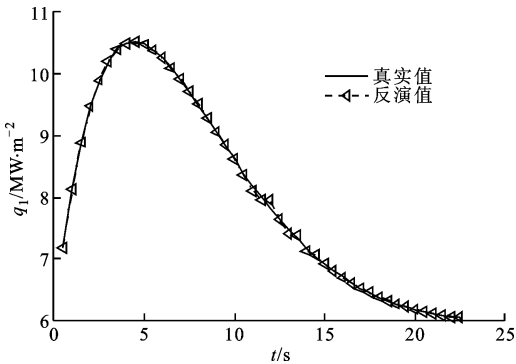


图 2 热流 $q_1(t)$ 的反演结果

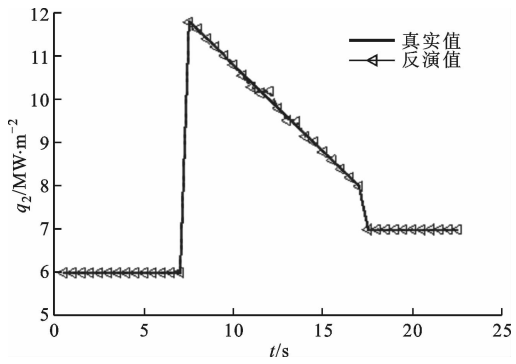


图 3 热流 $q_2(t)$ 的反演结果

由图 2 和图 3 可知,对于不同变化形式的移动边界热流 $q(t)$,本文方法均可以获得良好的反演结果,证明了本文反演方案的有效性。

3.3 进给速度的影响

采用测点 T_2 和 T_4 的温度信息,在 $R=3$ 、 $\sigma=0$ 的条件下,分别取 $v=0.001,0.002,0.003$ m/s 来考察钻具进给速度对反演结果的影响,如图 4 和图 5 所示,对应的反演误差见表 2。

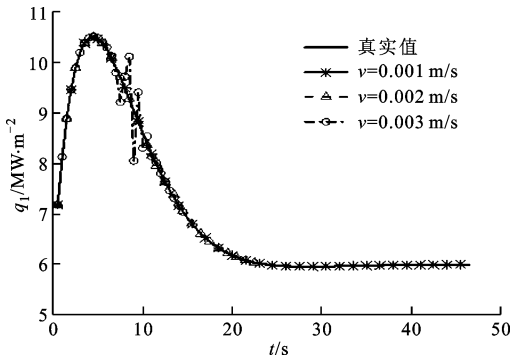


图 4 不同进给速度下 $q_1(t)$ 的反演结果

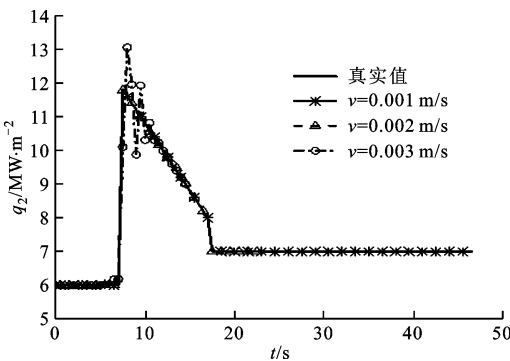


图 5 不同进给速度下 $q_2(t)$ 的反演结果

表 2 不同进给速度下的反演误差

$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\eta/\%$		$S_q/W \cdot \text{m}^{-2}$	
	q_1	q_2	q_1	q_2
0.001	0.01	0.02	1.04×10^3	1.77×10^3
0.002	0.38	0.50	3.14×10^4	4.08×10^4
0.003	3.23	6.23	2.92×10^5	5.35×10^5

由图 4、图 5 及表 2 可知,随着钻具进给速度的增大,导致传热过程非线性特征进一步加强,当 R 一定时,对应的热边界条件反演精度有所降低,但在仿真试验所讨论的进给速度范围内,仍然可以获得较好的反演结果。

3.4 测量误差的影响

采用测点 T_2 和 T_4 的温度信息,在 $R=3$ 、 $v=0.002$ m/s 的条件下,分别取 $\sigma=0.01,0.03,0.05$

来考察温度测量误差对反演结果的影响,如图 6 和图 7 所示,对应的反演误差见表 3。

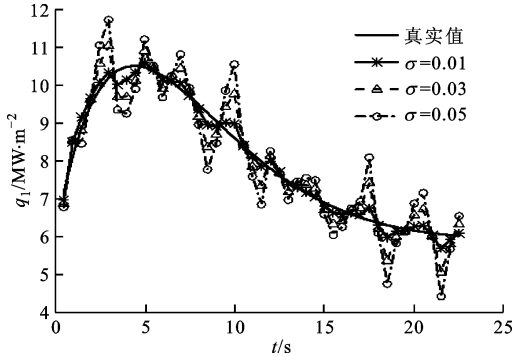


图 6 不同测量误差下 $q_1(t)$ 的反演结果

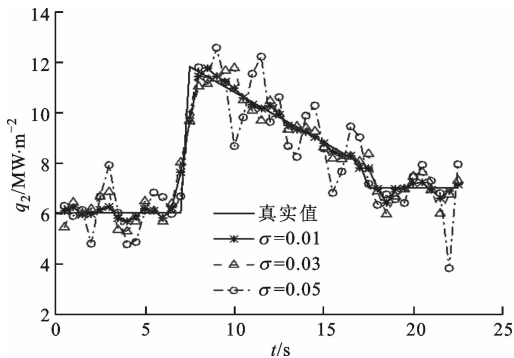


图 7 不同测量误差下 $q_2(t)$ 的反演结果

表 3 不同测量误差下的反演误差

σ	$\eta/\%$		$S_q/W \cdot \text{m}^{-2}$	
	q_1	q_2	q_1	q_2
0.01	2.27	5.59	1.86×10^5	4.58×10^5
0.03	6.00	8.03	4.92×10^5	6.59×10^5
0.05	9.97	12.94	8.18×10^5	1.06×10^6

根据 $\sigma=0.05$ 条件下的反演结果 $q_1(t)$ 和工件的传热模型,重构工件的瞬态温度场如图 8 所示。作为对比,图 9 给出了空间点 1(0.5 cm,4.5 cm)、2(0.5 cm,3.5 cm)、3(0.5 cm,2.5 cm)、4(0.5 cm,1.5 cm)和 5(0.5 cm,0.5 cm)处工件温度的重构值和根据实际热边界条件得到的模拟结果。

由以上结果可知,虽然随着温度测量误差的增大,移动边界热流的反演精度有所降低,但仍然可以获得较好的反演结果,表明本文的模型预测反演方案具有一定的抗干扰能力。

3.5 测点数的影响

在 $R=3$ 、 $\sigma=0.01$ 、 $v=0.002$ m/s 的条件下,分别取测点数 $M=1,2,5$ 进行数值试验,考察测点数对热边界条件反演结果的影响。其中,当 $M=1$ 时,

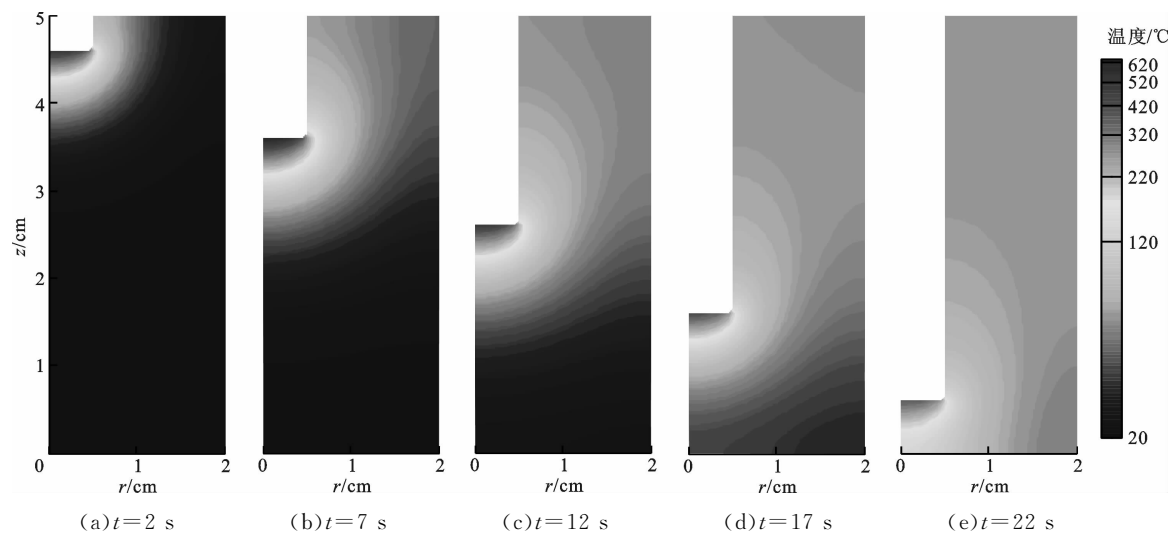


图 8 工件瞬态温度场的重构结果

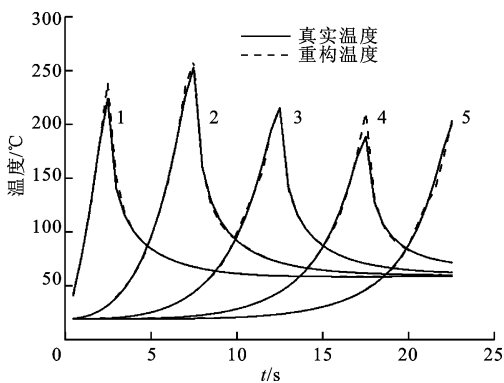


图 9 $\sigma=0.05$ 时工件内部温度重构结果

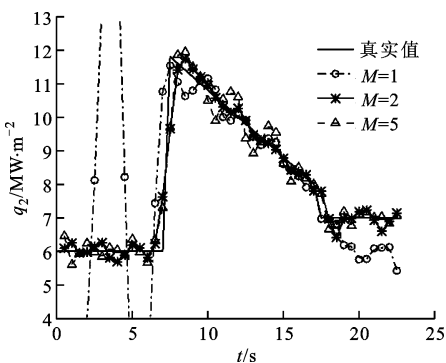


图 11 不同测点数下 $q_2(t)$ 的反演结果

温度测点取 T_3 ;当 $M=2$ 时,温度测点取 T_2 和 T_4 ;当 $M=5$ 时,温度测点取 $T_1 \sim T_5$ 。对应的结果见图 10、图 11 和表 4。

表 4 不同测点数下的反演误差

M	$\eta/\%$		$S_q/W \cdot m^{-2}$	
	q_1	q_2	q_1	q_2
1	61.85	41.38	5.07×10^6	3.40×10^6
2	2.27	5.59	1.86×10^5	4.58×10^5
5	3.44	6.06	2.82×10^5	4.97×10^5

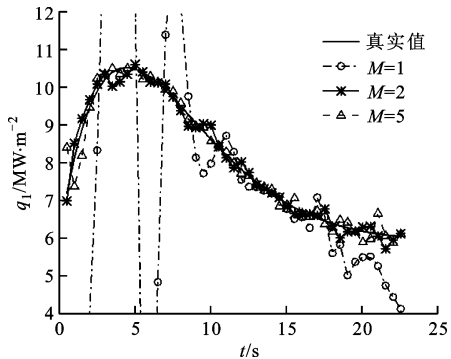


图 10 不同测点数下 $q_1(t)$ 的反演结果

当 $M=1$ 时,测点位置离初始和结束时的热边界较远,对应的阶跃响应系数较小,使得在钻削起始段和结束段的热流反演结果较差。在钻削方向上增加温度测点数,可以明显改善热流的反演结果。对于本文工件的钻削深度而言, $M=2,5$ 时的反演结果相差不大。

3.6 未来时间步数的影响

采用测点 T_2 和 T_4 的温度信息,在 $\sigma=0.01$ 、 $v=0.002$ m/s 的条件下,分别取 $R=3,6,9$ 来讨论未来时间步数的选取对反演结果的影响,对应的结果见图 12、图 13 及表 5。

表 5 不同未来时间步数下的反演误差

R	$\eta/\%$		$S_q/W \cdot m^{-2}$	
	q_1	q_2	q_1	q_2
3	2.27	5.59	1.86×10^5	4.58×10^5
6	3.91	6.07	3.26×10^5	5.03×10^5
9	2.79	6.03	2.37×10^5	5.05×10^5

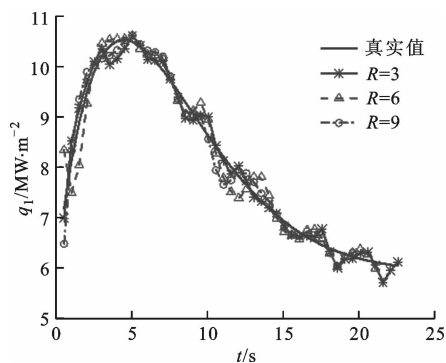


图12 不同未来时间步数下 $q_1(t)$ 的反演结果

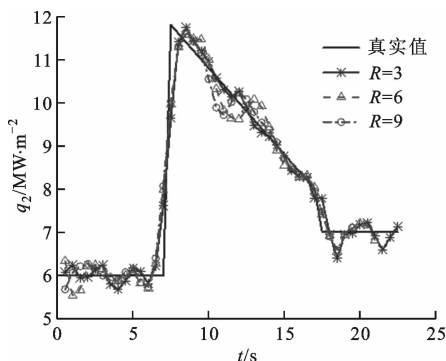


图13 不同未来时间步数下 $q_2(t)$ 的反演结果

由图12、图13及表5可知,采用本文的模型预测反演方法,在不同的未来时间步数下均能够获得较为满意的结果,降低了移动边界热流反演结果对于未来时间步数的依赖性。

4 结 论

本文采用模型预测控制方法研究了钻孔工件移动边界热流的反演以及温度场重构的问题,并讨论了钻具进给速度、温度测量误差、测点数等对边界热流反演结果的影响,得到的主要结论如下。

(1) 本文建立的反演方案能够有效反演钻孔工件的移动热边界条件,为钻孔工件瞬态温度场的在线重构提供了一种解决方案。

(2) 当测量温度数据存在一定的误差时,本文的模型预测控制方案仍然可以获得较为满意的反演结果,表明该方案具有一定的抗干扰能力。

(3) 由于不需要对未来一段时间内移动热边界条件的变化进行假设,使得本文的模型预测反演方案降低了反演结果对于未来时间步数的依赖性。

参考文献:

[1] BAGCI E, OZCELIK B. Investigation of the effect of drilling conditions on the twist drill temperature during

step-by-step and continuous dry drilling [J]. Materials and Design, 2006, 27(6): 446-454.

[2] KUZU A T, BERENJI K R, BAKKAL M. Thermal and force modeling of CGI drilling [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82: 1649-1662.

[3] KUZU A T, BERENJI K R, EKIM B C, et al. The thermal modeling of deep-hole drilling process under MQL condition [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 29: 194-203.

[4] WU J, HAN R D. A new approach to predicting the maximum temperature in dry drilling based on a finite element model [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2009, 11(1): 19-30.

[5] KALIDAS S, KAPOOR S G, DEVOR R E. Influence of thermal effects on hole quality in dry drilling: part 1 A thermal model of workpiece temperatures [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, 124(2): 258-266.

[6] 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): 14-17.

DING Peng, TAO Wenquan. Reduced order model based algorithm for inverse convection heat transfer problem [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(3): 14-17.

[7] CUI M, YANG K, XU X L, et al. A modified Levenberg-Marquardt algorithm for simultaneous estimation of multi-parameters of boundary heat flux by solving transient nonlinear inverse heat conduction problems [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 97: 908-916.

[8] BOZZOLI F, CATTANI L, RAINIERI S, et al. Estimation of the local heat-transfer coefficient in the laminar flow regime in coiled tubes by the Tikhonov regularisation method [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 72: 352-361.

[9] WANG G, LUO Z, ZHU L, et al. Fuzzy estimation for temperature distribution of furnace inner surface [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 51: 84-90.

[10] LI Y, WANG G, CHEN H, et al. A decentralized fuzzy inference method for the inverse geometry heat conduction problem [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 106: 109-116.

[11] BEHBAHANI-NIA A, KOWSARY F. A dual reciprocity BE-based sequential function specification solution method for inverse heat conduction problems [J].

(下转第43页)