



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115509115 A

(43) 申请公布日 2022. 12. 23

(21) 申请号 202210824562.2

(22) 申请日 2022.07.14

(71) 申请人 福州大学

地址 350108 福建省福州市闽侯县福州大学城乌龙江北大道2号福州大学

(72) 发明人 汤云东 陈鸣 苏航

(74) 专利代理机构 福州元创专利商标代理有限公司 35100

专利代理师 陈鼎桂 蔡学俊

(51) Int. Cl.

G05B 11/42 (2006.01)

A61N 2/02 (2006.01)

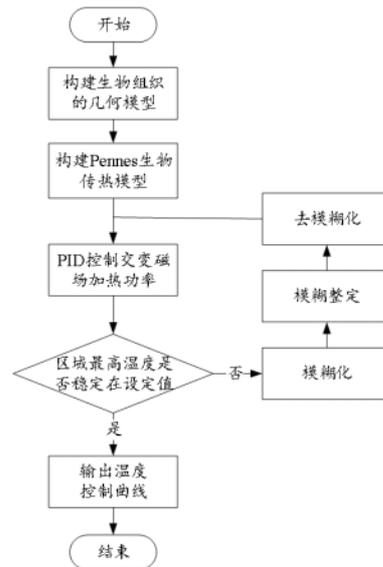
权利要求书2页 说明书4页 附图3页

(54) 发明名称

基于模糊自适应PID控制的磁纳米粒子产热优化方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于模糊自适应PID控制的磁纳米粒子产热优化方法,包括以下步骤:步骤S1:构建生物组织的几何模型;步骤S2:基于生物组织的几何模型,构建Pennes生物传热模型,并预测生物组织内的温度分布;步骤S3:通过PID算法控制交变磁场加热功率;步骤S4:基于PID控制交变磁场加热功率,判断区域最高温度是否收敛于设定值,若不是则利用模糊控制器对PID算法的参数进行整定,是则跳转至步骤S5;步骤S5:将整定后的参数用于PID算法中并输出优化后的温度控制曲线。本发明实现了通过模糊自适应PID控制磁纳米粒子在交变磁场的作用下的产热值,进而有效控制组织区域的温度分布。



1. 一种基于模糊自适应PID控制的磁纳米粒子产热优化方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤S1:构建生物组织的几何模型;

步骤S2:基于生物组织的几何模型,构建Pennes生物传热模型,并预测生物组织内的温度分布;

步骤S3:通过PID算法控制交变磁场加热功率;

步骤S4:基于PID控制交变磁场加热功率,判断区域最高温度是否收敛于设定值,若不是则利用模糊控制器对PID算法的参数进行整定,是则跳转至步骤S5;

步骤S5:将整定后的参数用于PID算法中并输出优化后的温度控制曲线。

2. 根据权利要求1所述的基于模糊自适应PID控制的磁纳米粒子产热优化方法,其特征在于,所述生物组织的几何模型由一个圆和一个椭圆构成,其中,半径为 R_1 的圆代表第一组织区域,长轴为 a 、短轴为 b 的椭圆代表第二组织区域,其中第一组织区域包含在第二组织区域中。

3. 根据权利要求1所述的基于模糊自适应PID控制的磁纳米粒子产热优化方法,其特征在于,所述Pennes生物传热模型为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \omega_b \rho_b c_b (T_b - T) + k \nabla^2 T + Q_m + \alpha P$$

其中, ρ 、 c 、 T 、 k 分别表示组织的密度、比热容、绝对温度、热传导系数, ω_b 、 ρ_b 、 c_b 、 T_b 分别表示血液灌注率、血液密度,血液比热容、血液温度, t 表示磁纳米粒子在交变磁场的作用下的加热时间,符号 ∇ 表示哈密顿算子, Q_m 表示单位体积的代谢热量, α 表示功率耗散的校正系数, P 表示功率耗散。

4. 根据权利要求3所述的基于模糊自适应PID控制的磁纳米粒子产热优化方法,其特征在于,所述预测生物组织内的温度分布,具体为:设置组织区域的属性参数,并采用有限元的方法求解Pennes生物传热模型,其中,组织区域参数包括组织的密度、比热容、导热系数。

5. 根据权利要求1所述的基于模糊自适应PID控制的磁纳米粒子产热优化方法,其特征在于,所述PID算法的控制方程为:

$$\text{error}(t) = y_d(t) - y(t)$$

$$u(t) = k_p \text{error}(t) + k_i \int_0^t \text{error}(t) dt + k_d \frac{d\text{error}(t)}{dt}$$

其中, $\text{error}(t)$ 表示设定温度 $y_d(t)$ 与实际输出温度 $y(t)$ 之间的差值, $u(t)$ 表示PID控制方程, k_p 表示比例系数, k_i 表示积分时间常数, k_d 表示微分时间常数。

6. 根据权利要求1所述的基于模糊自适应PID控制的磁纳米粒子产热优化方法,其特征在于,所述步骤S4具体包括以下步骤:

步骤S41:给定PID控制的初始参数 k_p 、 k_i 、 k_d ;

步骤S42:求误差 $\text{error}(t)$ 和误差的导数 $\frac{d\text{error}(t)}{dt}$;

步骤S43:确定输入隶属度函数,对误差error(t)和误差的导数 $\frac{derror(t)}{dt}$ 进行模糊化;

步骤S44:确定模糊规则,对参数 k_p 、 k_i 、 k_d 进行模糊整定;

步骤S45:确定输出隶属度函数,对输出的模糊量解模糊得到精确量;

步骤S46:将 k_p 、 k_i 、 k_d 的初始值与步骤S45求得的精确值进行线性组合构成PID方程新的控制量,并将新的控制量带回PID控制方程,判断温度是否收敛于设定值;如果温度不收敛于设定值,则需要重复以上步骤直至温度收敛于设定值。

7.根据权利要求6所述的基于模糊自适应PID控制的磁纳米粒子产热优化方法,其特征在于,所述模糊化是将误差和误差的导数的大小通过语言形式描述,模糊子集为:{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB},分别代表{负大,负中,负小,零,正小,正中,正大}。

8.根据权利要求6所述的基于模糊自适应PID控制的磁纳米粒子产热优化方法,其特征在于,所述去模糊化采用重心法求解模糊输出,其表达式为:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=0}^n \mu_c(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=0}^n \mu_c(z_i)}$$

其中, z_0 表示模糊控制器输出量解模糊后的精确值, $\mu_c(z_i)$ 表示 z_i 的隶属度值, z_i 为模糊控制量论域内的值。

基于模糊自适应PID控制的磁纳米粒子产热优化方法

技术领域

[0001] 本发明涉及交变磁场中磁纳米粒子的建模技术领域,具体涉及一种基于模糊自适应PID控制的磁纳米粒子产热优化方法。

背景技术

[0002] 新兴技术随着科技的发展不断涌现,近年来,磁纳米热疗以其安全性高、副作用少、靶向性高等优势成为了一种颇具潜力的组织热消融技术。在交变磁场的作用下,磁纳米粒子可以将磁场能量转化为热能,从而使得目标区域的温度提高至42℃-46℃,实现局部组织消融的目的。

[0003] 在磁纳米热疗中,需要保持目标区域温度在42℃-46℃的范围内,使得组织内温度能杀死特定细胞,同时又不破坏正常组织。因此,在磁纳米热疗中需要对磁纳米粒子的产热进行控制与优化,从而提高磁纳米热疗中治疗温度的精确性和稳定性。

发明内容

[0004] 有鉴于此,本发明的目的在于提供一种基于模糊自适应PID控制的磁纳米粒子产热优化方法,实现了通过模糊自适应PID控制磁纳米粒子在交变磁场的作用下的产热值,进而有效控制组织区域的温度分布。

[0005] 为实现上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0006] 一种基于模糊自适应PID控制的磁纳米粒子产热优化方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤S1:构建生物组织的几何模型;

[0008] 步骤S2:基于生物组织的几何模型,构建Pennes生物传热模型,并预测生物组织内的温度分布;

[0009] 步骤S3:通过PID算法控制交变磁场加热功率;

[0010] 步骤S4:基于PID控制交变磁场加热功率,判断区域最高温度是否收敛于设定值,若不是则利用模糊控制器对PID算法的参数进行整定,是则跳转至步骤S5;

[0011] 步骤S5:将整定后的参数用于PID算法中并输出优化后的温度控制曲线。

[0012] 进一步的,所述生物组织的几何模型由一个圆和一个椭圆构成,其中,半径为 R_1 的圆代表第一组织区域,长轴为a、短轴为b的椭圆代表第二组织区域,其中第一组织区域包含在第二组织区域中。

[0013] 进一步的,所述Pennes生物传热模型为:

$$[0014] \quad \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \omega_b \rho_b c_b (T_b - T) + k \nabla^2 T + Q_m + \alpha P$$

[0015] 其中, ρ 、 c 、 T 、 k 分别表示组织的密度、比热容、绝对温度、热传导系数, ω_b 、 ρ_b 、 c_b 、 T_b 分别表示血液灌注率、血液密度,血液比热容、血液温度, t 表示磁纳米粒子在交变磁场的作用下的加热时间,符号 ∇ 表示哈密顿算子, Q_m 表示单位体积的代谢热量, α 表示功率耗散的校正系数, P 表示功率耗散。

[0016] 进一步的,所述预测生物组织内的温度分布,具体为:设置组织区域的属性参数,并采用有限元的方法求解Pennes生物传热模型,其中,组织区域参数包括组织的密度、比热容、导热系数。

[0017] 进一步的,所述PID算法的控制方程为:

[0018] $error(t) = y_d(t) - y(t)$

[0019]
$$u(t) = k_p error(t) + k_i \int_0^t error(t) dt + k_d \frac{derror(t)}{dt}$$

[0020] 其中, $error(t)$ 表示设定温度 $y_d(t)$ 与实际输出温度 $y(t)$ 之间的差值, $u(t)$ 表示PID控制方程, k_p 表示比例系数, k_i 表示积分时间常数, k_d 表示微分时间常数。

[0021] 进一步的,所述所述步骤S4具体包括以下步骤:

[0022] 步骤S41: 给定PID控制的初始参数 k_p 、 k_i 、 k_d ;

[0023] 步骤S42: 求误差 $error(t)$ 和误差的导数 $\frac{derror(t)}{dt}$;

[0024] 步骤S43: 确定输入隶属度函数,对误差 $error(t)$ 和误差的导数 $\frac{derror(t)}{dt}$ 进行模

糊化;

[0025] 步骤S44: 确定模糊规则,对参数 k_p 、 k_i 、 k_d 进行模糊整定;

[0026] 步骤S45: 确定输出隶属度函数,对输出的模糊量解模糊得到精确量;

[0027] 步骤S46: 将 k_p 、 k_i 、 k_d 的初始值与步骤S45求得的精确值进行线性组合构成PID方程新的控制量,并将新的控制量带回PID控制方程,判断温度是否收敛于设定值;如果温度不收敛于设定值,则需要重复以上步骤直至温度收敛于设定值。

[0028] 进一步的,所述模糊化是将误差和误差的导数的大小通过语言形式描述,模糊子集为: {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 分别代表 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}。

[0029] 进一步的,所述去模糊化采用重心法求解模糊输出,其表达式为:

[0030]
$$z_0 = \frac{\sum_{i=0}^n \mu_c(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=0}^n \mu_c(z_i)}$$

[0031] 其中, z_0 表示模糊控制器输出量解模糊后的精确值, $\mu_c(z_i)$ 表示 z_i 的隶属度值, z_i 为模糊控制量论域内的值。

[0032] 本发明与现有技术相比具有以下有益效果:

[0033] 本发明实现了通过模糊自适应PID控制磁纳米粒子在交变磁场的作用下的产热值,进而有效控制组织区域的温度分布,从而有效改善了组织热消融的效果,提高了控制的精度。

附图说明

[0034] 图1是本发明方法流程图;

- [0035] 图2是本发明实施例中构建的几何模型示意图
 [0036] 图3是本发明实施例中未进行模糊自适应PID控制的温度分布预测示意图
 [0037] 图4是本发明一实施例中未进行模糊自适应PID控制的温度曲线；
 [0038] 图5是本发明一实施例中模糊自适应PID控制的温度曲线。

具体实施方式

- [0039] 下面结合附图及实施例对本发明做进一步说明。
 [0040] 请参照图1,本发明提供一种基于模糊自适应PID控制的磁纳米粒子产热优化方法,包括以下步骤:
 [0041] 步骤S1:构建生物组织的几何模型;
 [0042] 步骤S2:基于生物组织的几何模型,构建Pennes生物传热模型,并预测生物组织内的温度分布;
 [0043] 步骤S3:通过PID算法控制交变磁场加热功率;
 [0044] 步骤S4:基于PID控制交变磁场加热功率,判断区域最高温度是否收敛于设定值,若不是则利用模糊控制器对PID算法的参数进行整定,是则跳转至步骤S5;
 [0045] 步骤S5:将整定后的参数用于PID算法中并输出优化后的温度控制曲线。
 [0046] 较佳地,在本实施例中,所述步骤S1中所描述的几何模型如图 2所示,模型由一个圆和一个椭圆构成,其中,半径为 $R_1 = 5\text{mm}$ 的圆代表第一组织区域,长轴为 $a = 20\text{mm}$ 、短轴为 $b = 15\text{mm}$ 的椭圆代表第二组织区域,其中第一组织区域包含在第二组织区域中。
 [0047] 较佳地,在本实施例中,所述步骤S2中构建Pennes生物传热模型,预测生物组织内的温度分布,其中,所述Pennes生物传热模型为:

$$[0048] \quad \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \omega_b \rho_b c_b (T_b - T) + k \nabla^2 T + Q_m + \alpha P$$

[0049] 其中, ρ 、 c 、 T 、 k 分别表示组织的密度、比热容、绝对温度、热传导系数, ω_b 、 ρ_b 、 c_b 、 T_b 分别表示血液灌注率、血液密度,血液比热容、血液温度, t 表示磁纳米粒子在交变磁场的作用下的加热时间,符号 ∇ 表示哈密顿算子, Q_m 表示单位体积的代谢热量, α 表示功率耗散的校正系数, P 表示功率耗散。

[0050] 较佳地,在本实施例中,所述设置组织区域的属性参数,并采用有限元的方法求解生物传热方程,组织内温度分布如图3所示,其中,组织区域参数包括组织的密度、比热容、导热系数。第一组织区域对应的参数数据为: $1060\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $3540\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 、 $0.52\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,第二组织区域对应的参数数据为: $1064\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $4500\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 、 $0.59\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

[0051] 较佳地,在本实施例中,所述步骤S3中通过PID算法控制交变磁场加热功率,所述PID算法的控制方程为 $\text{error}(t) = y_d(t) - y(t)$

$$[0052] \quad u(t) = k_p \text{error}(t) + k_i \int_0^t \text{error}(t) dt + k_d \frac{d\text{error}(t)}{dt}$$

[0053] 其中, $\text{error}(t)$ 表示设定温度 $y_d(t)$ 与实际输出温度 $y(t)$ 之间的差值, $u(t)$ 表示PID控制方程, k_p 表示比例系数, k_i 表示积分时间常数, k_d 表示微分时间常数。

[0054] 较佳地,在本实施例中,步骤S41:给定PID控制的初始参数 $k_p = 1$ 、 $k_i = 0.05$ 、 $k_d =$

0.05;

[0055] 步骤S42:求误差error(t)和误差的导数 $\frac{derror(t)}{dt}$;

[0056] 步骤S43:确定输入隶属度函数,对误差error(t)和误差的导数 $\frac{derror(t)}{dt}$ 进行模

糊化;

[0057] 步骤S44:确定模糊规则,对参数 k_p 、 k_i 、 k_d 进行模糊整定;

[0058] 步骤S45:确定输出隶属度函数,对输出的模糊量解模糊得到精确量;

[0059] 步骤S46:将 k_p 、 k_i 、 k_d 的初始值与步骤S45求得的精确值进行线性组合构成PID方程新的控制量,并将新的控制量带回PID控制方程,判断温度是否收敛于设定值。如果温度不收敛于设定值46℃,则需要重复以上步骤直至温度收敛于设定值。图4所示是中心点未进行模糊自适应PID控制的温度曲线,图5所示是中心点模糊自适应PID控制的温度曲线。

[0060] 较佳地,在本实施例中,步骤S4所述模糊化是将误差和误差的导数的大小通过语言形式描述,模糊子集为:{NB,NM,NS,Z0,PS,PM,PB},分别代表{负大,负中,负小,零,正小,正中,正大}。

[0061] 较佳地,在本实施例中,步骤S4所述去模糊化采用重心法求解模糊输出,其表达式为:

$$[0062] \quad z_0 = \frac{\sum_{i=0}^n \mu_c(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=0}^n \mu_c(z_i)}$$

[0063] 其中, z_0 表示模糊控制器输出量解模糊后的精确值, $\mu_c(z_i)$ 表示 z_i 的隶属度值, z_i 为模糊控制量论域内的值。

[0064] 较佳地,在本实施例中,所述步骤S5中,将步骤S4中整定 k_p 、 k_i 、 k_d 用于PID算法中,并输出优化后的温度控制曲线。

[0065] 以上所述仅为本发明的较佳实施例,凡依本发明申请专利范围所做的均等变化与修饰,皆应属本发明的涵盖范围。

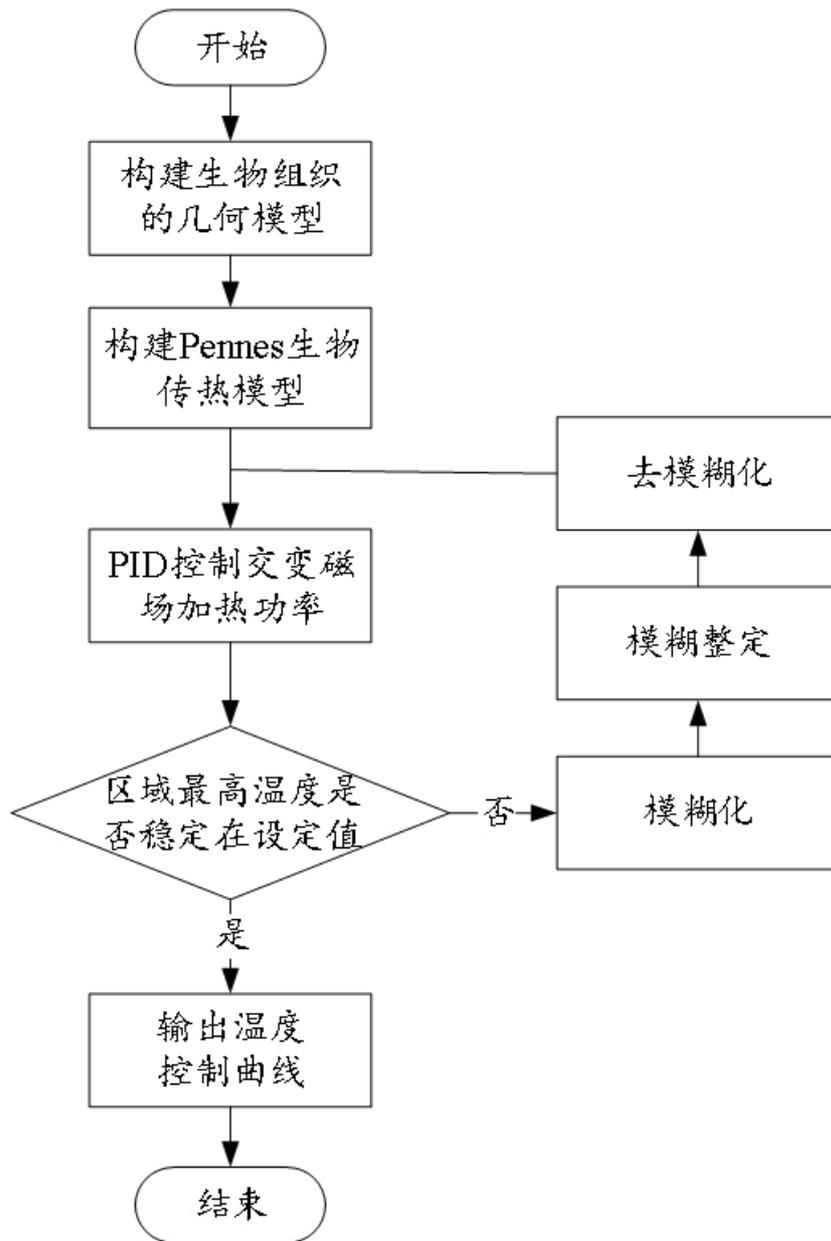


图1

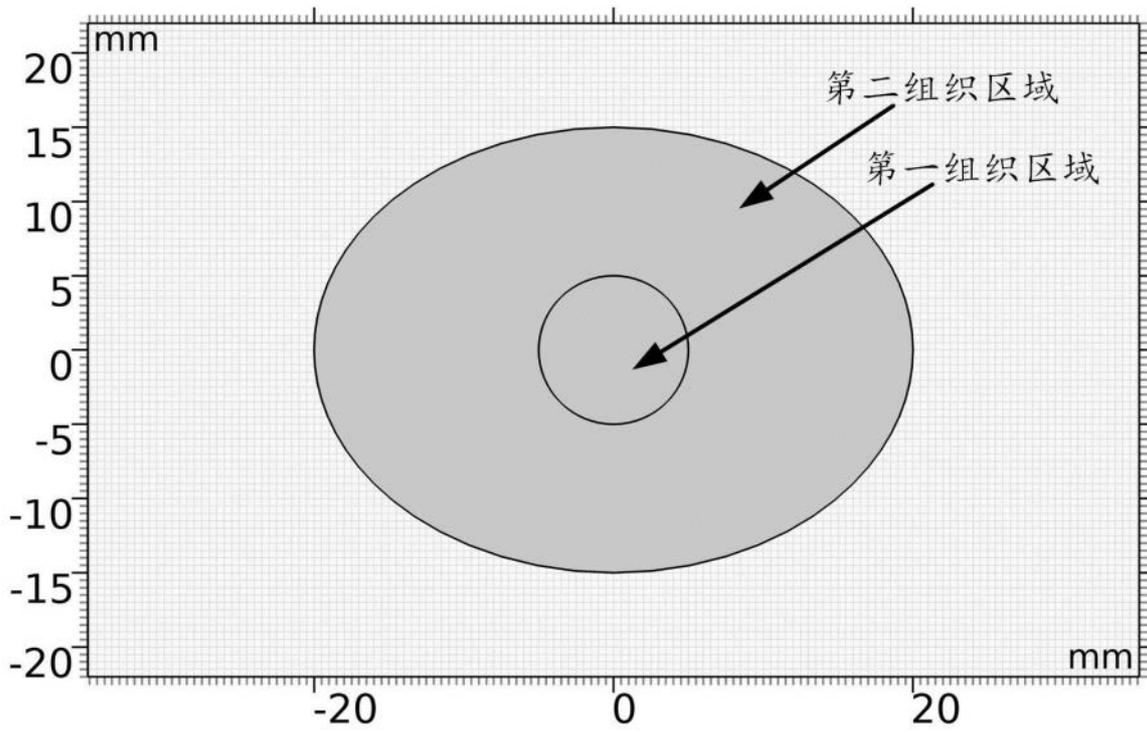


图2

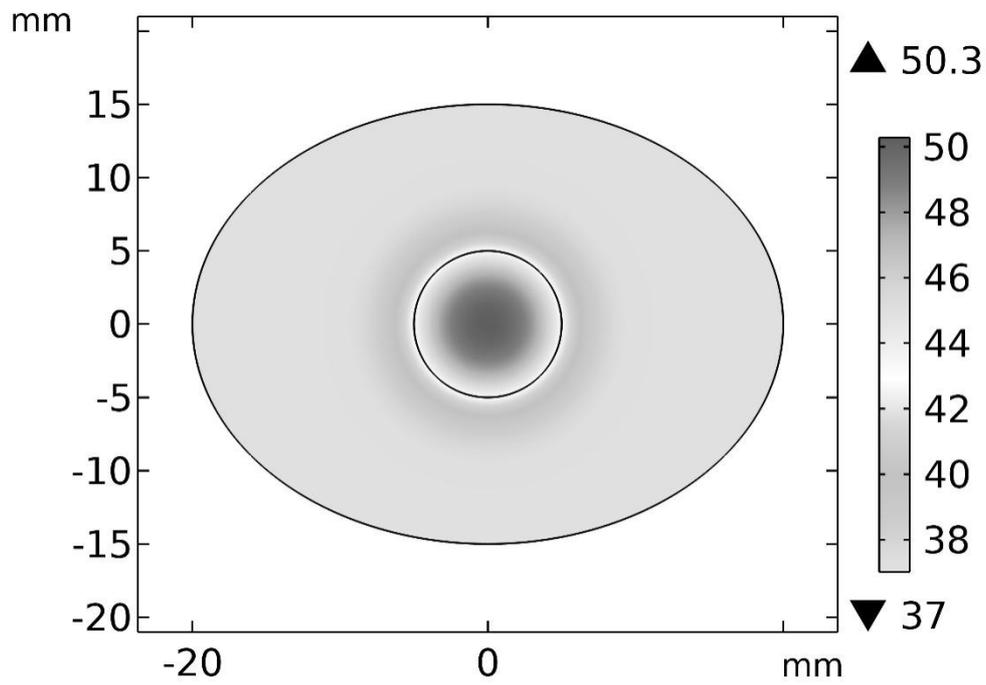


图3

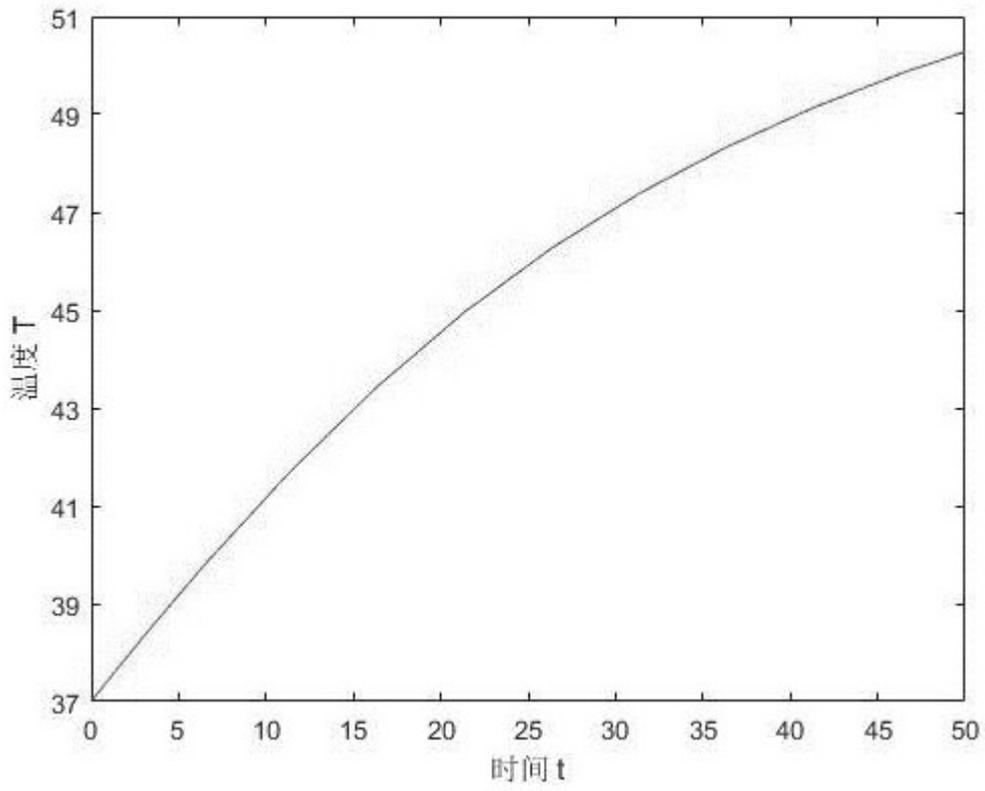


图4

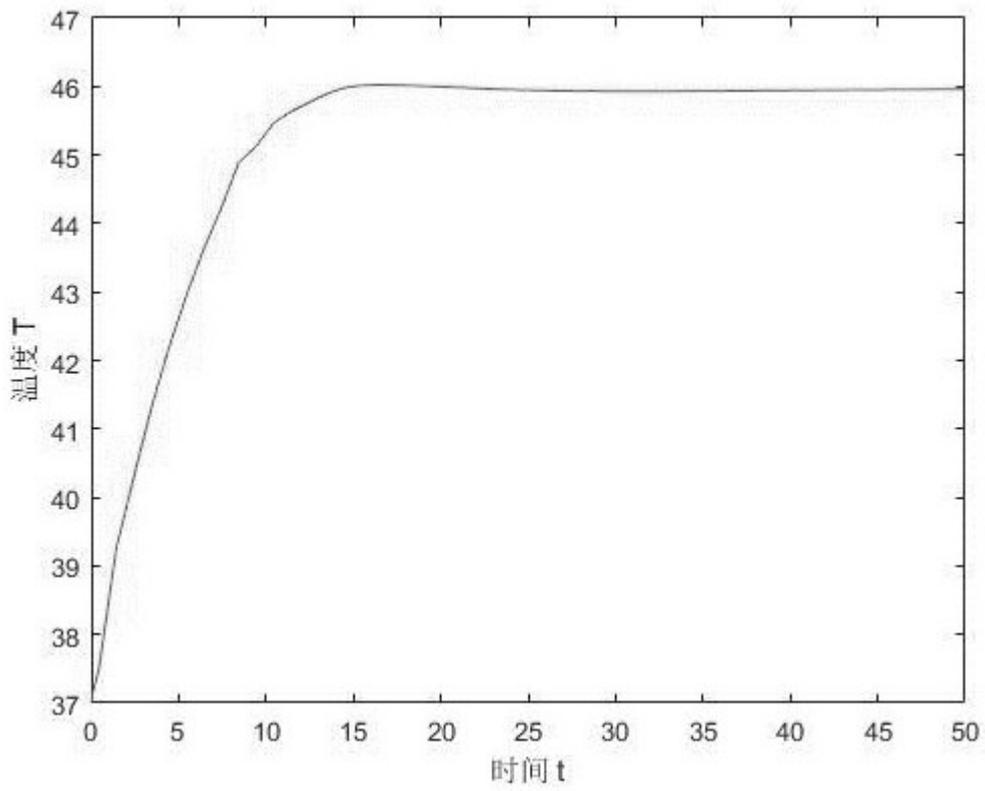


图5