



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105242541 A

(43) 申请公布日 2016. 01. 13

(21) 申请号 201510708068. X

(22) 申请日 2015. 10. 27

(71) 申请人 上海航天精密机械研究所

地址 201699 上海市松江区贵德路 76 号

(72) 发明人 曹玲玲 王海东 蔡琼 王国顺

(74) 专利代理机构 上海汉声知识产权代理有限公司 31236

代理人 郭国中

(51) Int. Cl.

G05B 13/04(2006. 01)

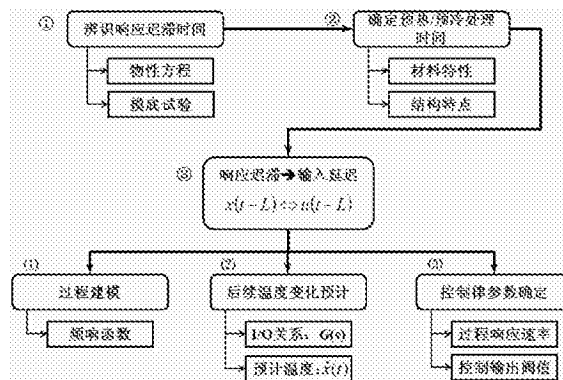
权利要求书1页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

面向响应迟滞过程的温度补偿控制方法

(57) 摘要

本发明提供了一种面向响应迟滞过程的温度补偿控制方法,包括如下步骤:(1) 确定最大载荷作用下产品的迟滞时间,所述迟滞时间通过所述产品的材料、结构特性及温度进行确定;(2) 根据所述迟滞时间确定产品的预热/预冷时间;(3) 将产品的所述迟滞时间和所述预热/预冷时间作差,作为控制输入的延迟时间,根据后续温度变化预计确定控制律参数;(4) 根据所述控制律参数确定产品的温度控制。本发明通过优化算法确定控制律参数,从而快速方便地实现温度补偿;大幅度提升了试验一次完成的成功率,有效避免了过试验考核;适用于各类存在响应延迟的试验与生产过程,对提升过程控制精度,提高试验与生产质量有积极推动作用。



1. 一种面向响应迟滞过程的温度补偿控制方法,其特征在于,包括如下步骤:

(1) 确定最大载荷作用下产品的迟滞时间,所述迟滞时间通过所述产品的材料、结构特性及温度进行确定;

(2) 根据所述迟滞时间确定产品的预热 / 预冷时间;

(3) 将产品的所述迟滞时间和所述预热 / 预冷时间作差,作为控制输入的延迟时间,根据后续温度变化预计确定控制律参数;

(4) 根据所述控制律参数确定产品的温度控制。

2. 根据权利要求 1 所述的面向响应迟滞过程的温度补偿控制方法,其特征在于,所述第 (1) 步中,确定所述迟滞时间过程为:开展多次摸底试验,取响应迟滞时间的平均值为最终的迟滞时间。

3. 根据权利要求 1 所述的面向响应迟滞过程的温度补偿控制方法,其特征在于,所述第 (1) 步中,确定所述迟滞时间过程为:利用产品的材料物性方程通过仿真确定迟滞时间。

4. 根据权利要求 1 所述的面向响应迟滞过程的温度补偿控制方法,其特征在于,所述第 (2) 步中,如果预热 / 预冷时间超过预设值,则通过提供激活能缩短所述预热 / 预冷时间。

5. 根据权利要求 1 至 4 中任一项所述的面向响应迟滞过程的温度补偿控制方法,其特征在于,所述第 (3) 步包括如下小步骤:

(a) 依据产品重点考核部位的温度变化规律建立传热模型;

(b) 根据所述传热模型得到响应温度;

(c) 结合预设的温升 / 温降速率,确定所述控制律参数。

6. 根据权利要求 5 所述的面向响应迟滞过程的温度补偿控制方法,其特征在于,所述第 (a) 小步中,采用输入延迟过程的频响函数来描述输入控制信号与产品温度响应的关系来建立所述传热模型。

7. 根据权利要求 5 所述的面向响应迟滞过程的温度补偿控制方法,其特征在于,所述第 (b) 小步中,使用频响函数与控制信号的卷积得到所述响应温度。

面向响应迟滞过程的温度补偿控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及试验件的试验与测试方法技术领域，具体地，涉及一种面向响应迟滞过程的温度补偿控制方法。

背景技术

[0002] 在航天产品地面试验工程领域，尤其是深冷环境模拟与气动加热试验过程中，广泛存在着参试产品温度响应过缓的现象，导致参试产品整体温度难以精确控制，控制信号易发生跳变等问题。因此，对考虑温度补偿的控制方法需求迫切。例如：在运载火箭燃料输送管低温振动试验中，通过加注液氮模拟管路深冷环境，根据各测点温度反馈调节液氮流速。但是，加注初期测点温度响应（表现为温降）缓慢，控制信号很快达到输出上限并维持一段时间，管路冷透后实测温度（ -196°C ）低于液氧（ -183°C ）温度，出现过度考核。又如：在某型高超音速飞行器舱体地面气动热试验中，利用石英等热辐射模拟热载荷，考核舱内电子仪器工作性能。飞行器外部防热材料、舱体结构及内部绝热层使舱内环境温度响应远滞后于舱体表面，类似地，石英灯输出功率快速大幅提升，也导致过度考核。

[0003] 在工程应用领域，目前约有 95% 的航天产品地面试验采用传统的 PID 控制方法，该方法的优势在于设计简单、实施方便。对于存在响应迟滞时间较短的试验过程，沿用 PID 控制方法虽能实现稳定控制，但是控制精度不高，且易发生过试验，对参试产品造成不必要的损伤。

[0004] 在控制算法领域，Smith predictor 被认为是处理线性迟滞系统最便捷有效的控制算法，然而其应用范围仅限于稳定的、迟滞时间较短的过程。与 Smith predictor 类似的控制算法还有 Artstein model reduction 和 finite spectrum assignment (FSA)，但仅适用于响应变化范围较小的线性过程。近年来，采用优化控制算法实现迟滞过程精确控制引发学术界广泛关注，然而此类 H_{∞} 控制器的设计过程繁复、运算量大，算法的顺利实施对试验所用单机的配置要求较高，因此并没有获得广泛工程应用。基于 Lyapunov 方程的控制方法能有效实现复杂非线性系统的控制，该控制算法求解极其不易，虽然具备很高的学术价值，但工程应用价值并不高。

[0005] 综上所述，传统的 PID 控制方法已逐渐不能满足响应迟滞过程的控制要求，现有的迟滞补偿控制方法（如 Smith predictor, Artstein model reduction, FSA 等）仅能实现部分迟滞过程的控制要求，而优化控制方法、基于 Lyapunov 方程的控制算法因其复杂的设计过程与较高的硬件配置要求，难以广泛应用于工程领域。

发明内容

[0006] 针对现有技术中的缺陷，本发明的目的是提供一种面向响应迟滞过程的温度补偿控制方法。

[0007] 根据本发明的一个方面，提供一种面向响应迟滞过程的温度补偿控制方法，其特征是，包括如下步骤：

- [0008] (1) 确定最大载荷作用下产品的迟滞时间,所述迟滞时间通过所述产品的材料、结构特性及温度进行确定;
- [0009] (2) 根据所述迟滞时间确定产品的预热 / 预冷时间;
- [0010] (3) 将产品的所述迟滞时间和所述预热 / 预冷时间作差,作为控制输入的延迟时间,根据后续温度变化预计确定控制律参数;
- [0011] (4) 根据所述控制律参数确定产品的温度控制。
- [0012] 优选地,所述第(1)步中,确定所述迟滞时间过程为:开展多次摸底试验,取响应迟滞时间的平均值为最终的迟滞时间。
- [0013] 优选地,所述第(1)步中,确定所述迟滞时间过程为:利用产品的材料物性方程通过仿真确定迟滞时间。
- [0014] 优选地,所述第(2)步中,如果预热 / 预冷时间超过预设值,则通过提供激活能缩短所述预热 / 预冷时间。
- [0015] 优选地,其特征在于,所述第(3)步包括如下小步骤:
- [0016] (a) 依据产品重点考核部位的温度变化规律建立传热模型;
- [0017] (b) 根据所述传热模型得到响应温度;
- [0018] (c) 结合预设的温升 / 温降速率,确定所述控制律参数。
- [0019] 优选地,所述第(a)小步中,采用输入延迟过程的频响函数来描述输入控制信号与产品温度响应的关系来建立所述传热模型。
- [0020] 优选地,所述第(b)小步中,使用频响函数与控制信号的卷积得到所述响应温度。
- [0021] 与现有技术相比,本发明具有如下的有益效果:
- [0022] (1) 通过优化算法确定控制律参数,从而快速方便地实现温度补偿;
- [0023] (2) 大幅度提升了试验一次完成的成功率,有效避免了过试验考核;
- [0024] (3) 适用于各类存在响应延迟的试验与生产过程,对提升过程控制精度,提高试验与生产质量有积极推动作用。

附图说明

- [0025] 通过阅读参照以下附图对非限制性实施例所作的详细描述,本发明的其它特征、目的和优点将会变得更明显:
- [0026] 图1为温度补偿控制方法的总体框架图;
- [0027] 图2为温度补偿控制方法的技术途径图;
- [0028] 图3为超音速飞行器地面气动热试验温度控制曲线;
- [0029] 图4为舱段地面气动热试验温度控制曲线;
- [0030] 图5为CZ-5循环预冷管路焊缝处温度曲线;
- [0031] 图6为不同输入延迟时间下的闭环控制图。

具体实施方式

- [0032] 下面结合具体实施例对本发明进行详细说明。以下实施例将有助于本领域的技术人员进一步理解本发明,但不以任何形式限制本发明。应当指出的是,对本领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干变形和改进。这些都属于本发明

的保护范围。

[0033] 所谓“面向响应迟滞过程的温度补偿控制方法”，是指针对存在反馈信号（如温度）延迟响应的试验过程，采取参试件预热或基于参试件状态预计的控制方法，实现温度补偿，保证较高的参试件温度控制精度。应用该控制方法能有效避免系统响应迟滞引发的过试验现象，提升试验与测试质量。

[0034] 本发明应用于运载火箭管路低温振动试验与某型号超音速飞行器舱体地面气动热试验的温度控制过程中。采用低比例加载辨识出试验过程响应延迟时间常数，并以此作为确定参试产品预热 / 预冷时间的判据，基于试验过程的频响函数对后续参试产品温度的变化规律做出预计，通过优化算法确定控制律参数，从而快速方便地实现温度补偿。

[0035] 针对存在温度响应迟滞的试验过程，本发明用于解决参试产品温度控制精度不高、控制信号发生突变引发的过试验等严重制约试验完成质量的工程问题。采用预热 / 预冷调试方法结合基于后续温度变化预计的控制算法，快速便捷地实现了响应迟滞过程的温度精确控制，大幅度提升了试验一次完成的成功率，有效避免了过试验考核。

[0036] 参见附图 1，本发明的基本思想是，参试产品状态变量（温度）响应存在延迟与迟滞时间过长是导致现有 PID 控制方法及其他延时补偿控制方法难以实现精确过程控制的主要原因。因此，可通过对参试产品进行预热 / 预冷处理，其特征就在于减少试验过程中的响应迟滞时间，再将存在较短响应迟滞的过程转化为存在较短控制信号输入延迟的过程，其特征就在于该等效过程将极大便利控制算法的设计与实施。

[0037] 参见附图 2，实现温度补偿控制方法的技术途径，其实施步骤包括：①辨识响应迟滞时间；②确定预热 / 预冷处理时间；③将响应迟滞过程转化为控制输入延迟过程，根据后续温度变化预计确定控制律参数。

[0038] 所述步骤①需确定产品温度响应迟滞时间（单位：s），即在最大载荷作用下产品到达试验要求温度的时间。其特征就在于必须结合参试产品的材料、结构特性及温度考核要求确定迟滞时间。

[0039] 优选地，开展多次摸底试验，取响应迟滞时间的平均值为最终的过程迟滞时间；也可以利用材料物性方程开展仿真确定迟滞时间。

[0040] 所述步骤②需根据步骤①的结论确认正式试验的预热 / 预冷时间。其特征就在于为参试产品（材料）提供激活能，使其快速跨过能障，有效减少迟滞时间。优选地，预热 / 预冷时间长短应更具产品材料与结构特点确定，尽量避免预热 / 预冷时间过长。

[0041] 所述步骤③将响应迟滞过程等效为控制信号输入延迟过程，且延迟时间均为 L。其特征就在于：首先，其中为过程响应迟滞时间，为预热 / 预冷处理时间；其次，对于存在较短控制信号输入延迟的过程，可以选择基于后续温度变化预计的控制算法实现精确控制。

[0042] 所述步骤③进一步又可分为（1）过程建模；（2）后续温度变化预计与（3）控制律参数确定来实现参试产品的温度控制。

[0043] 所述分过程（1）为试验过程建模，其特征就在于依据产品重点考核部位温度变化规律建立传热模型，该模型具备用于温度反馈的测量信号与控制输入。

[0044] 优选地，采用输入延迟过程的频响函数来描述输入控制信号（一般为电流或电压）与产品温度响应的关系；对于实测响应较多的试验过程，可以考虑使用状态变量方程建模。

[0045] 所述分过程 (2) 为后续温度变化的预计,其特征在于根据所述分过程 (1) 建立的模型,推算出 L 单位时间后的响应温度,可以证明,预计温度与实际温度的误差是有限的。

[0046] 优选地,可以使用频响函数与控制信号的卷积估计试验过程后续温度,可通过计算机运算完成。

[0047] 所述分过程 (3) 用于确定控制律的参数,其特征在于需结合试验过程所要求达到的温升 / 温降速率,以及试验设备对控制信号输出的限制 (即输出阈值),合理、优化选取控制律参数 (极点位置),保证该控制算法能有效实现。

[0048] 优选地,闭环过程极点位置选取在远离开环过程极点位置的 3-5 倍,对于温升 / 温降速率极高的试验过程,闭环过程极点位置可以选在更远处。

[0049] 下面通过应用实例对本发明作详细说明。

[0050] 参见附图 3,为超高音速飞行器地面气动热试验内壁温度控制曲线。试验过程的前 20s 为预热过程,经过响应温度没有发生显著变化,但参试产品材料已获得足够能力快速突破温升能障。20s—40s 为快速温升段,控制精度较好。由于试验过程没有设置主动降温控制,温降段误差较大。

[0051] 参见附图 4,为舱段地面气动热试验温度控制曲线,同样地,试验前 16s 为预热时间,温升段的控制精度较高。

[0052] 参见附图 5,为 CZ-5 循环预冷管路焊缝处温度曲线。整个试验过程的前 200 秒为管路预冷处理,通过调节液氮流速控制焊缝处的温度,如图所示,控制误差在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内,实现了精确控制。

[0053] 上面实施方式中的温度补偿控制的详细算法分步叙述如下:

[0054] 温度补偿控制的详细算法分步叙述如下:

[0055] 分析参试产品材料特性、结构特点,结合试验要求的参试产品温度变化曲线,开展摸底试验,计算该产品的温度响应迟滞时间 λ 。

[0056] 通过低比例加载试验确定参试产品正式试验的预热 / 预冷时间 λ^* 。

[0057] 将响应迟滞过程等效转化为预热 / 预冷处理与存在较短控制输入延迟的试验过程,延迟时间 $L = \lambda - \lambda^*$ 。

[0058] 使用频响函数完成试验过程建模,试验过程的控制输入 / 响应输出信号之间的关系可表达为:

$$[0059] \quad Y(s) = \frac{B(s)}{A(s)} e^{-Ls} U(s) \quad (1)$$

[0060] 其中 $B(s)$ 和 $A(s)$ 分别为 n 阶、m 阶多项式, L 是输入延迟时间; $Y(s)$ 为频域下的过程响应, $U(s)$ 为频域下的控制输入信号。

[0061] L 单位时间后的响应估计可以表示为

$$[0062] \quad \hat{y}(t+L) = F(y(t), y'(t), \dots, y^{(n-1)}(t)) + \int_t^{t+L} h(t+L-\tau) u(\tau-L) d\tau \quad (2)$$

[0063] 其中右式的第一项表示的是前一时刻 t 参试产品的响应,当 $t = 0$,表示预热 / 预冷处理刚结束时的参试产品温度响应;右式的第二项为一积分运算,函数 $h(t)$ 为时域下的产品加载冲击响应函数,经 Laplace 变换后即为试验过程的传递函数。

[0064] 利用预计的产品温度响应 $\hat{y}(t+L)$,确定控制律,其表达式如下:

[0065]
$$U(s) = -\frac{S(s)}{R(s)} e^{Ls} \hat{Y}(s) \quad (3)$$

[0066] 其中 $A(s)R(s)+B(s)S(s)$ 的零点均需小于零以保证闭环系统稳定。

[0067] 仿真验证使用该控制方法后的闭环过程,某二阶控制输入延迟过程的闭环仿真结果如附图 6 所示。

[0068] 以上对本发明的具体实施例进行了描述。需要理解的是,本发明并不局限于上述特定实施方式,本领域技术人员可以在权利要求的范围内做出各种变形或修改,这并不影响本发明的实质内容。

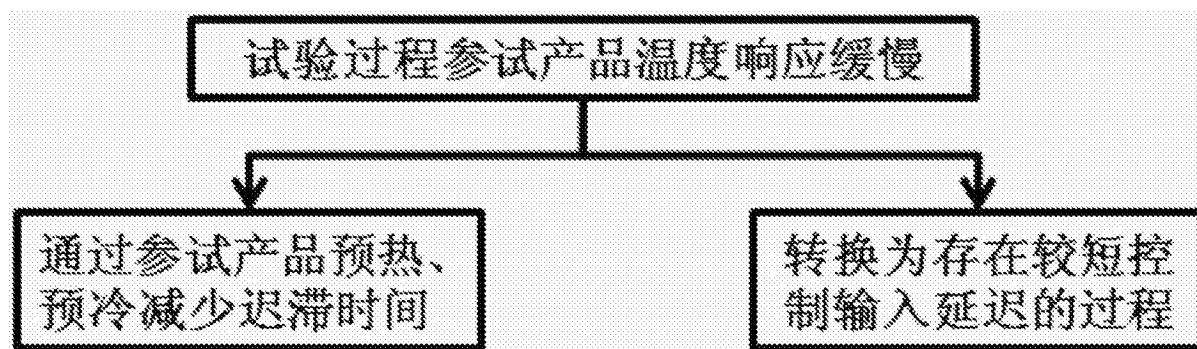


图 1

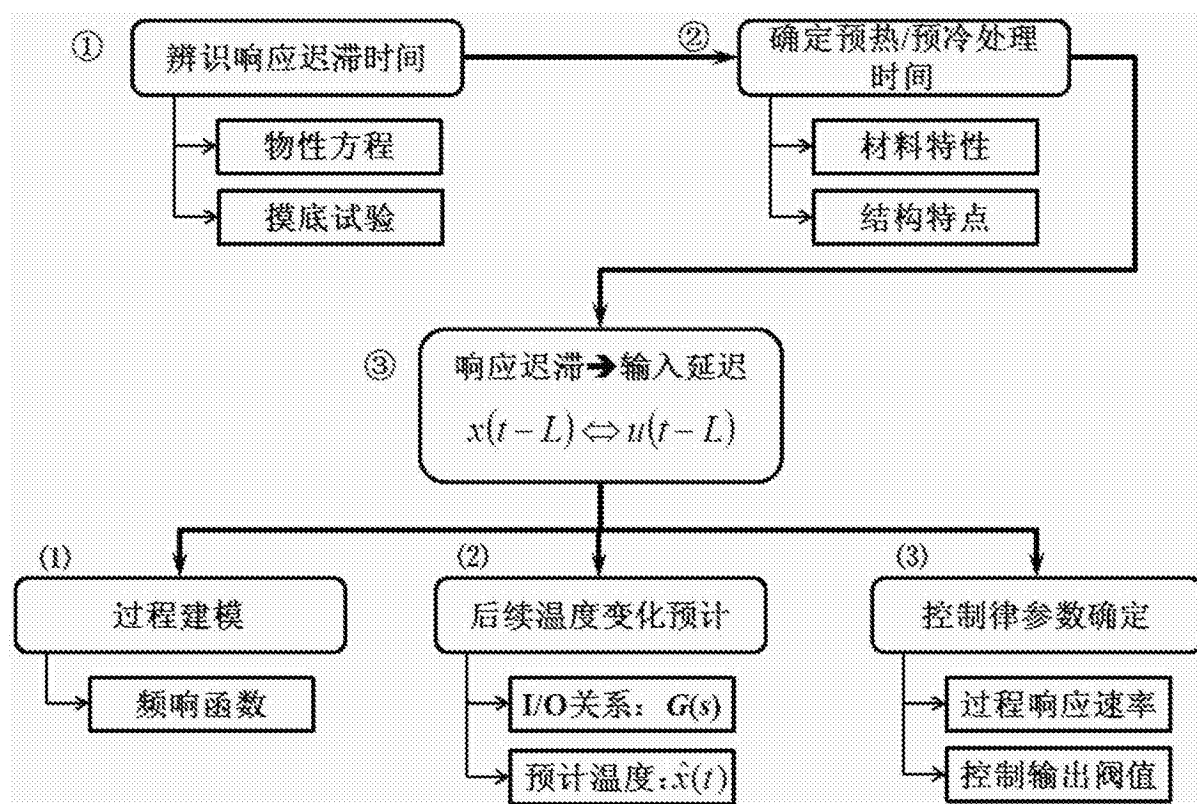


图 2

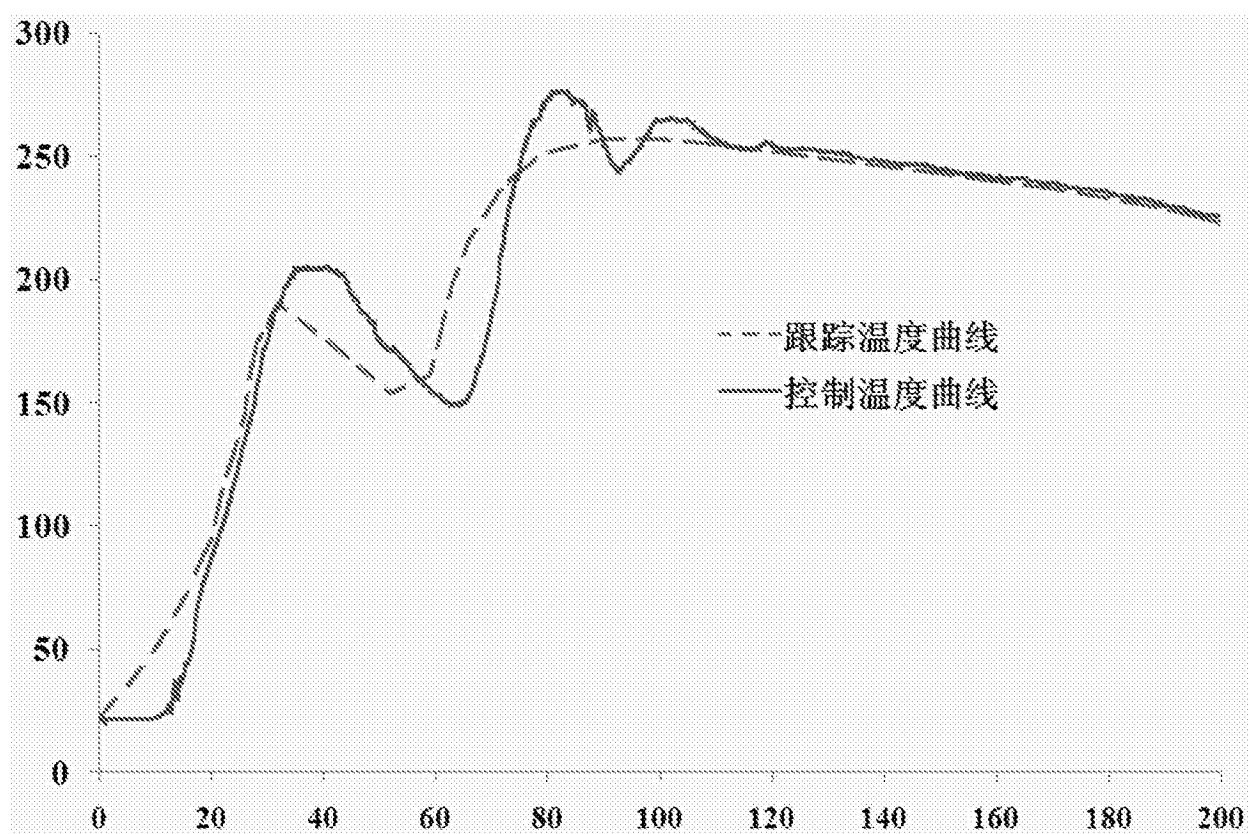


图 3

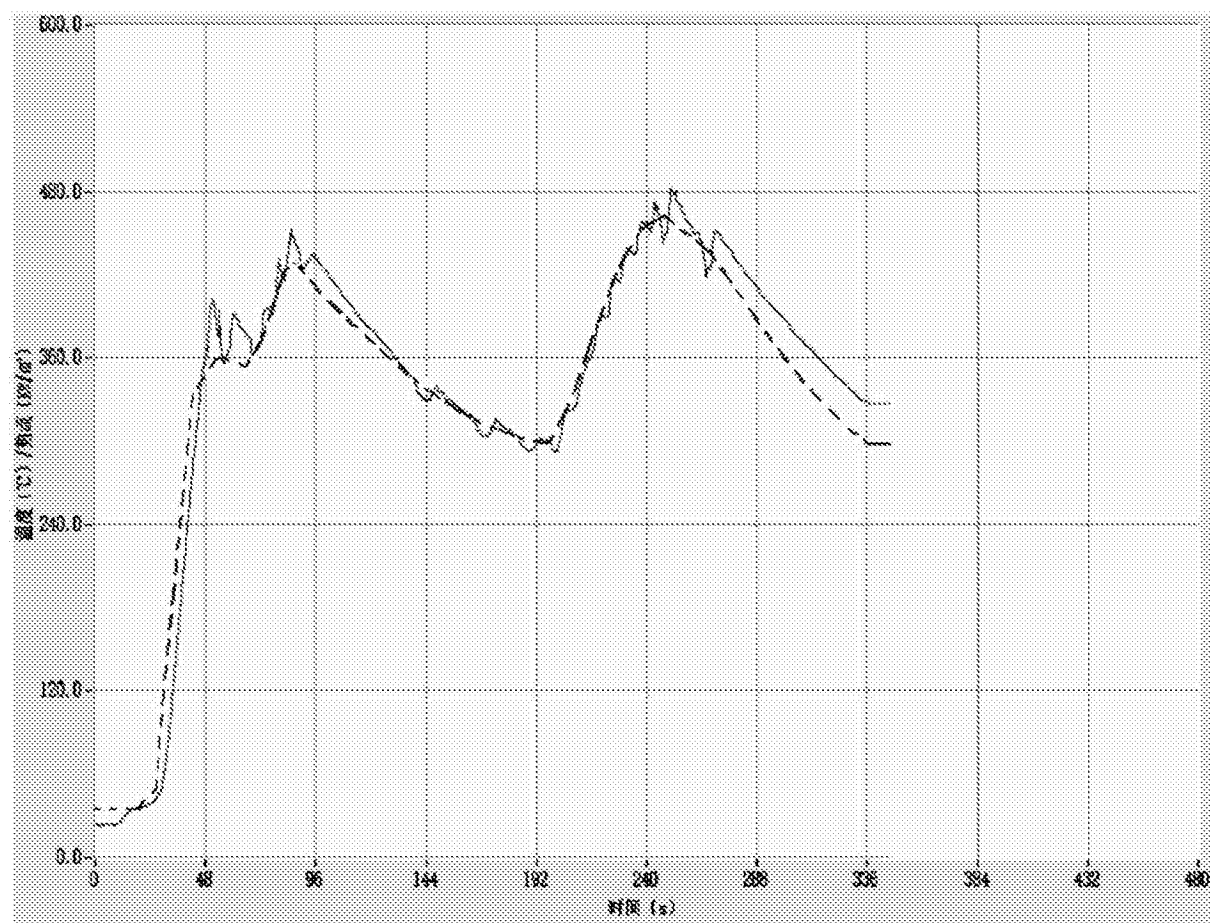


图 4

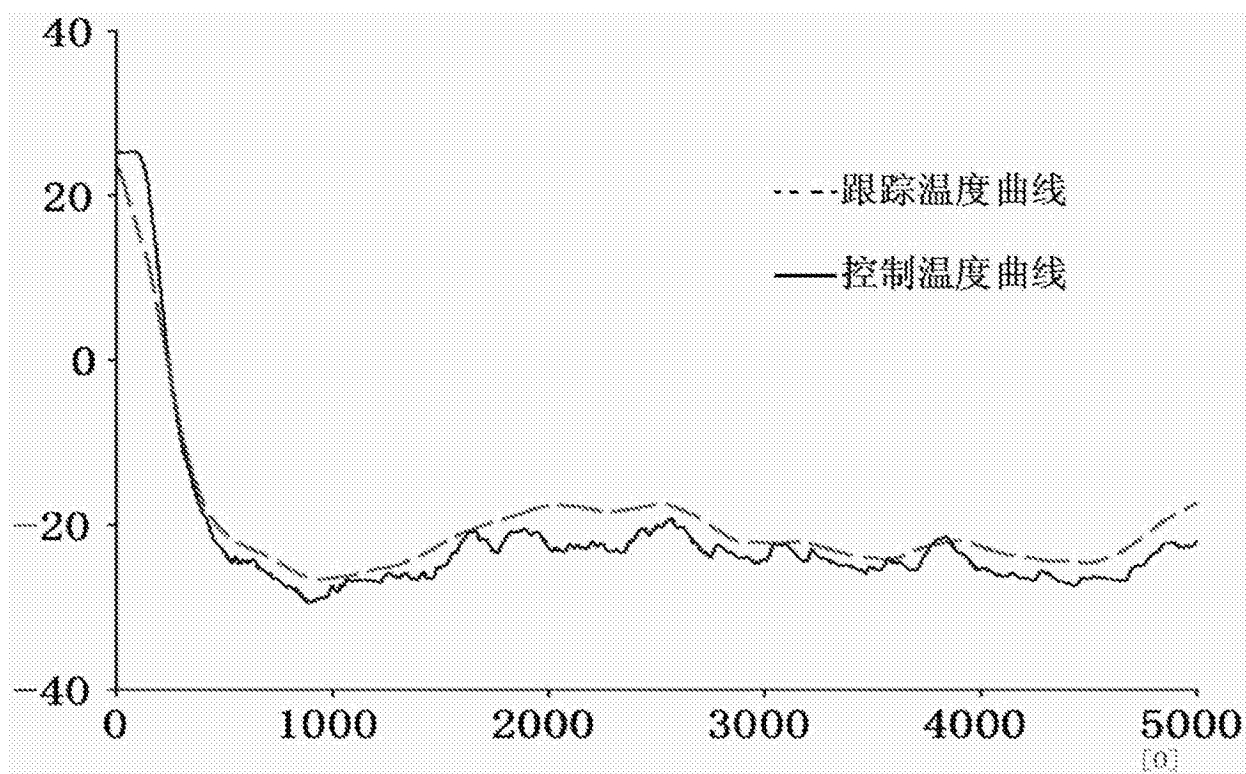


图 5

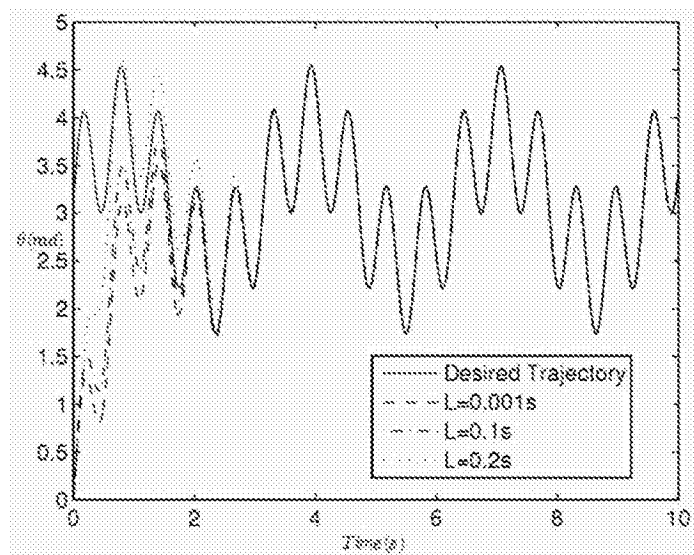


图 6