



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106774514 B

(45)授权公告日 2018.05.29

(21)申请号 201710009038.9

G05B 13/04(2006.01)

(22)申请日 2017.01.06

(56)对比文件

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 106774514 A

CN 101929935 A,2010.12.29,  
CN 102798518 A,2012.11.28,  
CN 1955713 A,2007.05.02,  
JP H07306610 A,1995.11.21,  
CN 104571217 A,2015.04.29,

(43)申请公布日 2017.05.31

(73)专利权人 中国科学院力学研究所  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

审查员 赵楠

(72)发明人 虞钢 夏纯阳 郑彩云 何秀丽  
李少霞 宁伟健

(74)专利代理机构 北京和信华成知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11390  
代理人 胡剑辉

(51)Int.Cl.

G05D 23/20(2006.01)

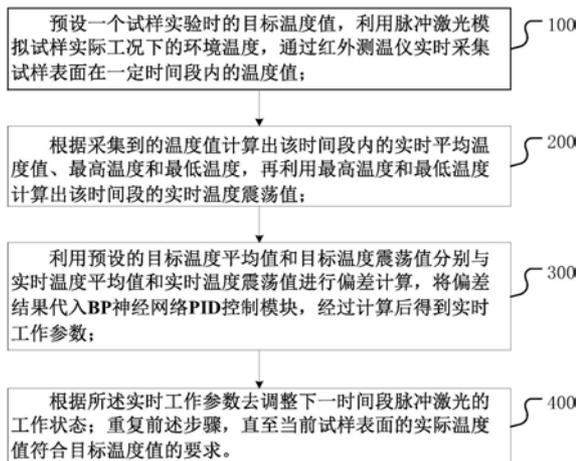
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

脉冲激光热疲劳实验时温度的闭环控制方法

(57)摘要

本发明提供了脉冲激光热疲劳实验时温度的闭环控制方法,先预设一个试样实验时的目标温度值,再获取试样表面在一定时间段内的温度值;计算出该时间段内的实时平均温度值、最高温度和最低温度、实时温度震荡值;然后利用预设的目标温度平均值和目标温度震荡值分别与实时温度平均值和实时温度震荡值进行偏差计算,将偏差结果代入BP神经网络PID控制模块,经过计算后得到实时工作参数;最后根据实时工作参数去调整下一时间段脉冲激光的工作状态;重复前述步骤,直至当前试样表面的实际温度值符合目标温度值的要求。本发明实现了热疲劳实验过程中脉冲激光作用区域温度的准确动态控制。为脉冲激光热疲劳实验提供了很大的便捷,大大提高了实验的可操作性与准确性。



1. 脉冲激光热疲劳实验时温度的闭环控制方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤100,预设一个试样实验时的目标温度值,利用脉冲激光模拟试样实际工况下的环境温度,通过红外测温仪实时采集试样表面在一定时间段内的温度值;

步骤200,根据采集到的温度值计算出该时间段内的实时平均温度值、最高温度和最低温度,再利用最高温度和最低温度计算出该时间段的实时温度震荡值;

步骤300,利用预设的目标温度平均值和目标温度震荡值分别与实时温度平均值和实时温度震荡值进行偏差计算,将偏差结果代入BP神经网络PID控制模块,经过计算后得到实时工作参数;

步骤400,根据所述实时工作参数去调整下一时间段脉冲激光的工作状态;重复前述步骤,直至当前试样表面的实际温度值符合目标温度值的要求。

2. 根据权利要求1所述的闭环控制方法,其特征在于,

所述时间段由所述脉冲激光的一个脉冲周期或指定数量的脉冲周期构成。

3. 根据权利要求1所述的闭环控制方法,其特征在于,

获取的温度值中的所述最高温度和所述最低温度是采用冒泡排序法得到的。

4. 根据权利要求1所述的闭环控制方法,其特征在于,

所述BP神经网络PID控制模块根据待调整的所述实时工作参数的数量设置对应数量的BP神经子网络和PID控制器。

5. 根据权利要求1-4任一所述的闭环控制方法,其特征在于,

所述实时工作参数包括峰值功率值和脉宽值,所述BP神经子网络和PID控制模块分别有两个。

6. 根据权利要求5所述的闭环控制方法,其特征在于,

每个所述BP神经子网络分别包括三个输入层神经元、八个隐含层神经元和三个输出层神经元;一个所述BP神经子网络的三个输入层神经元分别输出给自身的八个隐含层神经元,每个所述BP神经子网络的八个隐含层神经元分别输出给自身和并联的三个输出层神经元。

7. 根据权利要求6所述的闭环控制方法,其特征在于,

所述BP神经子网络的输入层神经元、隐含层神经元和输出层神经元采用前向算法和反向算法进行计算。

8. 根据权利要求7所述的闭环控制方法,其特征在于,

一个所述BP神经子网络的三个输入层神经元分别接收所述目标温度平均值与所述实时温度平均值的偏差值、该偏差值的累积计算值和该偏差值的作差计算值;

另一个所述BP神经子网络的三个输入层神经元分别接收所述目标温度震荡值与所述实时温度震荡值的偏差值、该偏差值的累积计算值和该偏差值的作差计算值。

9. 根据权利要求8所述的闭环控制方法,其特征在于,

两个所述PID控制模块分别接收一个对应所述BP神经子网络的三个输出参数,且同时接收相应的偏差值,然后进行比例、积分和微分运算后得到当前脉冲激光参数的增量,将该增量加上当前脉冲激光参数的实际值后,即得到下一时间段脉冲激光的实时工作参数。

10. 根据权利要求9所述的闭环控制方法,其特征在于,

所述脉冲激光的峰值功率值通过下式得到:

$$U_1(k) = U_1(k-1) + k_{1p}[e_1(k) - e_1(k-1)] + k_{1i}e_1(k) + k_{1d}[e_1(k) + e_1(k-2) - 2e_1(k-1)]$$

其中k表示步数,  $e_1$ 表示目标温度平均值与实时温度平均值的偏差值,  $k_{1p}$ 、 $k_{1i}$ 、 $k_{1d}$ 分别为比例、积分和微分运算常数;

所述脉冲激光的脉宽值通过下式得到:

$$U_2(k) = U_2(k-1) + k_{2p}[e_2(k) - e_2(k-1)] + k_{2i}e_2(k) + k_{2d}[e_2(k) + e_2(k-2) - 2e_2(k-1)]$$

其中k表示步数,  $e_2$ 表示目标温度震荡值与实时温度震荡值的偏差值,  $k_{2p}$ 、 $k_{2i}$ 、 $k_{2d}$ 分别为比例、积分和微分运算常数。

## 脉冲激光热疲劳实验时温度的闭环控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及热疲劳实验领域,特别是涉及一种利用脉冲激光作为热源对试样进行热疲劳实验时,使试样表面的平均温度与温度震荡值趋近预设的目标值的闭环控制方法。

### 背景技术

[0002] 随着发动机向高功率密度、高紧凑方向发展,燃烧室组件(活塞和气缸)承受着较高的热负荷,由于结构设计不合理、冷却不足、材料性能达不到要求等原因,当这些受热部件的热负荷积累到一定程度时,可能会引起裂纹等热损伤。其中,热疲劳是主要的损伤形式,需要对其进行各种研究手段进行分析。

[0003] 激光束具有高功率密度、高时空可控性的特点,以激光作为热源更易于实现燃烧室部件随时间变化的非均匀温度场分布,激光热负荷试验将成为评价受热件热负荷强度的有效手段。

[0004] 发动机在实际工作时,由于启动、停车或急剧加减速时,燃烧室部件会产生较大温度变化,高达300℃,形成较大的动态热应力。这种温度波动的波动频率较小,故由此引起的热疲劳破坏称之为低周疲劳。燃烧室部件另一种温度循环波动是由于发动机工作循环产生的,幅值不大(20-30℃)频率却很高(数十赫兹),在发动机燃烧室部件表面产生相当大的附加热应力,引起疲劳破坏,这种形式的疲劳破坏称为高周疲劳。高周疲劳和低周疲劳是引起发动机燃烧室部件破坏的最主要形式。

[0005] 据相关研究表明,温度循环中的平均温度、温度差以及循环频率都会对热疲劳寿命产生影响。目前激光热负荷实验使用的激光多为连续模式激光,通过温度控制模式和时间控制模式来控制其温度循环。但是当震荡幅度较小时,由于激光的加热与冷却过程温度变化速度过快,使用开-关式闭环控制,很难使温度差、平均温度精确达到要求的数值。发动机实际运行中是高周、低周交替变化的负责过程,温度循环过程较为复杂,需引入智能控制算法才能满足需求。

[0006] 每次热疲劳实验时,都要为试样表面的温度分布(温度平均值和温度震荡值)设定目标值,作为热源的脉冲激光的参数需要人工进行多次调整,才能使脉冲激光当前的功率和脉宽达到使用要求,该调整方式效率较低,而且延长了整个热疲劳实验的时间。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的是提供一种利用脉冲激光作为热源对试样进行热疲劳实验时,自动调整脉冲激光的工作参数以快速达到预定目标温度值的方法。

[0008] 特别地,本发明一个实施方式提供一种脉冲激光热疲劳实验时温度的闭环控制方法,包括如下步骤:

[0009] 步骤100,预设一个试样实验时的目标温度值,利用脉冲激光模拟试样实际工况下的环境温度,通过红外测温仪实时采集试样表面在一定时间段内的温度值;

[0010] 步骤200,根据采集到的温度值计算出该时间段内的实时平均温度值、最高温度和

最低温度,再利用最高温度和最低温度计算出该时间段的实时温度震荡值;

[0011] 步骤300,利用预设的目标温度平均值和目标温度震荡值分别与实时温度平均值和实时温度震荡值进行偏差计算,将偏差结果代入BP神经网络PID控制模块,经过计算后得到实时工作参数;

[0012] 步骤400,根据所述实时工作参数去调整下一时间段脉冲激光的工作状态;重复前述步骤,直至当前试样表面的实际温度值符合目标温度值的要求。

[0013] 在本发明的一个实施方式中,所述时间段由所述脉冲激光的一个脉冲周期或指定数量的脉冲周期构成。

[0014] 在本发明的一个实施方式中,所述获取的温度值中的最高温度和最低温度是采用冒泡排序法得到的。

[0015] 在本发明的一个实施方式中,所述BP神经网络PID控制模块根据待调整的所述实时工作参数的数量设置对应数量的BP神经子网络和PID控制器。

[0016] 在本发明的一个实施方式中,所述实时工作参数包括峰值功率值和脉宽值,所述BP神经子网络和PID控制模块分别有两个。

[0017] 在本发明的一个实施方式中,每个所述BP神经子网络分别包括三个输入层神经元、八个隐含层神经元和三个输出层神经元;一个所述BP神经子网络的三个输入层神经元分别输出给自身的八个隐含层神经元,每个所述BP神经子网络的八个隐含层神经元分别输出给自身和并联的三个输出层神经元。

[0018] 在本发明的一个实施方式中,所述BP神经子网络的输入层神经元、隐含层神经元和输出层神经元采用前向算法和反向算法进行计算。

[0019] 在本发明的一个实施方式中,一个所述BP神经子网络的三个输入层神经元分别接收所述目标温度平均值与所述实时温度平均值的偏差值、该偏差值的累积计算值和该偏差值的作差计算值;

[0020] 另一个所述BP神经子网络的三个输入层神经元分别接收所述目标温度震荡值与所述实时温度震荡值的偏差值、该偏差值的累积计算值和该偏差值的作差计算值。

[0021] 在本发明的一个实施方式中,两个所述PID控制模块分别接收一个对应所述BP神经子网络的三个输出参数,且同时接收相应的偏差值,然后进行比例、积分和微分运算后得到当前脉冲激光参数的增量,将该增量加上当前脉冲激光参数的实际值后,即得到下一时间段脉冲激光的实时工作参数。

[0022] 在本发明的一个实施方式中,所述脉冲激光的峰值功率值通过下式得到:

$$[0023] \quad U_1(k) = u_1(k-1) + k_{1p}[e_1(k) - e_1(k-1)] + k_{1i}e_1(k) + k_{1d}[e_1(k) + e_1(k-2) - 2e_1(k-1)]$$

[0024] 其中k表示步数, $e_1$ 表示目标温度平均值与实时温度平均值的偏差值, $k_{1p}$ 、 $k_{1i}$ 、 $k_{1d}$ 分别为比例、积分和微分运算常数;

[0025] 所述脉冲激光的脉宽值通过下式得到:

$$[0026] \quad U_2(k) = u_2(k-1) + k_{2p}[e_2(k) - e_2(k-1)] + k_{2i}e_2(k) + k_{2d}[e_2(k) + e_2(k-2) - 2e_2(k-1)]$$

[0027] 其中k表示步数, $e_2$ 表示目标温度震荡值与实时温度震荡值的偏差值, $k_{2p}$ 、 $k_{2i}$ 、 $k_{2d}$ 分别为比例、积分和微分运算常数。

[0028] 本发明利用红外测温仪实时获取当前试样表面温度,以确认当前温度是否符合预定的目标温度值。通过温度信号实时采集与BP神经网络PID控制模块的结合,可形成闭环的

检测和控制过程,对激光热疲劳实验过程中的温度进行实时监测与控制。通过对每次实时温度与目标温度之间的偏差计算,即可利用脉冲激光快速实现热疲劳实验所需要的温度环境。

[0029] 本发明为脉冲激光热疲劳实验时模拟发动机燃烧室部件实际工况温度提供全自动的控制方法,实现了热疲劳实验过程中脉冲激光作用区域温度的准确动态控制。为脉冲激光热疲劳实验提供了很大的便捷,大大提高了实验的可操作性与准确性。

## 附图说明

[0030] 图1是本发明一个实施方式的闭环控制方法流程示意图;

[0031] 图2是本发明一个实施方式的BP神经网络PID控制模块的计算过程示意图;

[0032] 图3是本发明一个实施方式的闭环控制方法的工作过程示意图;

[0033] 图4是本发明一个实施方式的闭环控制方法的执行过程示意图。

## 具体实施方式

[0034] 如图1所示,本发明一个实施方式的脉冲激光热疲劳实验时温度的闭环控制方法包括如下步骤:

[0035] 步骤100,预设一个试样实验时的目标温度值,利用脉冲激光模拟试样实际工况下的环境温度,通过红外测温仪实时采集试样表面在一定时间段内的温度值;

[0036] 这里的目标温度值即是试样在实际环境下的工作温度,是一个范围值,包括预设的目标温度平均值和目标温度震荡值。测温仪可以是红外测温仪,也可以是温差电偶温度计,其获取的温度值是该时间段内持续测量到的多个温度值。这里的时间段为选择的参考时间,可以以脉冲激光的脉冲周期作为选择基础,也可以根据试样实际环境下的温度循环周期作为选择基础。

[0037] 步骤200,根据采集到的温度值计算出该时间段内的实时平均温度值、最高温度和最低温度,再利用最高温度和最低温度计算出该时间段的实时温度震荡值;

[0038] 本步骤中,最高温度和最低温度可以采用冒泡排序法确定。而实时温度震荡值则通过最高温度减去最低温度得到。

[0039] 步骤300,利用预设的目标温度平均值和目标温度震荡值分别与实时温度平均值和实时温度震荡值进行偏差计算,将偏差结果代入BP神经网络PID控制模块,经过计算后得到实时工作参数;

[0040] 由于脉冲激光热疲劳实验过程是一个多输入多输出系统,系统具有多个输入(如:电流、脉宽、频率)和多个输出(如:平均温度、温度振荡值),内部结构复杂,而且存在着一定的耦合作用。基于BP神经网络PID控制模块的参数自整定多输入多输出控制器,用来对有强耦合的一类多输入多输出系统进行解耦控制,通过网络在线调整PID控制器的比例、积分和微分参数,从而利用经典的PID控制算法得到相应各变量的控制量参与控制,并能在该过程中实现解耦控制,而不用给定样本信号进行离线的学习。

[0041] 步骤400,根据所述实时工作参数去调整下一时间段脉冲激光的工作状态;重复前述步骤,直至当前试样表面的实际温度值符合目标温度值的要求。

[0042] 本实施方式利用红外测温仪实时获取当前加热试样表面的温度,以确认当前温度

是否符合预定的目标温度值。通过温度信号实时采集与BP神经网络PID控制模块的结合,可形成闭环的检测和控制过程,对激光热疲劳实验所需要模拟的温度进行实时监测与控制。通过对每次实时温度与目标温度之间的偏差计算并调整脉冲激光的工作参数,即可利用脉冲激光快速实现热疲劳实验所需要的温度环境。

[0043] 本发明为脉冲激光热疲劳实验时模拟发动机燃烧室部件温度提供全自动的控制方法,实现了热疲劳实验过程中脉冲激光作用区域温度的准确动态控制。为脉冲激光热疲劳实验提供了很大的便捷,大大提高了实验的可操作性与准确性。

[0044] 在本发明的一个实施方式中,作为计算基础的时间段可以是脉冲激光的一个脉冲周期或指定数量的脉冲周期。时间段越短对脉冲激光的调整次数就越多,同时控制精度就越高,响应时间越短。

[0045] 在本发明的一个实施方式中,针对热疲劳实验的多输入多输出特性,BP神经网络PID控制模块可以根据需要实时调整的激光参数的数量设置对应数量的BP神经网络和PID控制器。如需要调整脉宽、功率和频率时,则可以选择三个BP神经网络和三个PID控制器;如需要调整脉宽、功率时,则可以选择二个BP神经网络和二个PID控制器。

[0046] 在本发明的一个实施方式中,具体的实时工作参数可以是脉冲激光的峰值功率值和脉宽值,相应的BP神经网络和PID控制器则可以分别设置两个。

[0047] 如图2所示,在本发明的一个实施方式中,限定每个BP神经网络可以分别包括三个输入层神经元、八个隐含层神经元和三个输出层神经元;其中,三个输入层神经元分别接收一个输入参数,一个BP神经网络的三个输入层神经元则分别输出给自身的八个隐含层神经元,而每个BP神经网络的八个隐含层神经元除分别输出给自身的三个输出层神经元外,还输出给其他神经网络的三个输出层神经元,每个BP神经网络的三个输出层神经元分别将结果输出给对应的PID控制器。

[0048] 在本发明的一个实施方式中,根据待调整的参数不同,一个BP神经网络的三个输入层神经元分别接收目标温度平均值与实时温度平均值的偏差值、该偏差值的累积求和计算,和该偏差值的作差计算结果作为输入量。

[0049] 而另一个BP神经网络的三个输入层神经元分别接收目标温度震荡值与实时温度震荡值的偏差值、该偏差值的累积求和计算,和该偏差值的作差计算结果作为输入量。如:

[0050] 以 $e_1$ 为目标温度平均值与实时温度平均值的偏差值,则累积求和计算表达式为:

$$\sum_{i=1}^k e_1(i), \text{作差计算结果表达式为: } e_1(K) - e_1(K-1), K \text{ 表示时间步};$$

[0051] 以 $e_2$ 为目标温度震荡值与实时温度震荡值的偏差值,则累积求和计算表达式为:

$$\sum_{i=1}^k e_2(i), \text{作差计算结果表达式为: } e_2(K) - e_2(K-1), K \text{ 表示时间步}。$$

[0052] 在本发明的一个实施方式中,BP神经网络的输入层神经元、隐含层神经元和输出层神经元分别进行前向计算输出和反向连接权值调整。举例如下:

[0053] (1) 输入层

[0054] 输入层有3个神经元,输入层的输出可以表示为:

[0055] 
$$o_{s1}^{(1)}(K) = e_s(\mathbf{K})$$

[0056] 
$$o_{s2}^{(1)}(K) = \sum_{i=1}^K e_s(i)$$

[0057] 
$$o_{s3}^{(1)}(K) = e_s(\mathbf{K}) - e_s(\mathbf{K}-1)$$

[0058] 其中K为任意时刻的采样点, s=1或2, 代表BP神经网络的序号,

[0059] (2) 隐含层

[0060] BP神经网络的隐含层输入、输出分别为:

[0061] 
$$net_{sj}^{(2)}(K) = \sum_{i=1}^3 W_{sij} o_{si}^{(1)}(K)$$

[0062] 
$$o_{sj}^{(2)}(K) = f[net_{sj}^{(2)}(K)]$$

[0063] s=1, 2, 代表BP神经网络的序号。上标中的(1)、(2)、(3)分别代表输入层神经元、隐含层神经元和输出层神经元。i=1, 2, 3, 代表BP神经网络输入层神经元的序号, j=1, 2, …, 8, 代表BP神经网络隐含层神经元序号,  $W_{sij}$ 代表隐含层神经元权系数,  $f[x]$ 为隐含层神经元激发函数,  $f[x] = \tanh(x)$ 。

[0064] (3) 输出层

[0065] BP神经网络的输出层神经元的输入、输出分别为:

[0066] 
$$net_{sk}^{(3)}(K) = \sum_{s=1}^3 \sum_{j=1}^9 W_{sjk} o_{sj}^{(2)}(K)$$

[0067] 
$$o_{sk}^{(3)}(K) = g[net_{sk}^{(3)}(K)]$$

[0068] 上式中, k=1, 2, 3, 为输出层神经元序号,  $W_{sjk}$ 为输出层神经元权系数,  $g[x]$ 为输出层神经元激发函数。

[0069] 
$$g[x] = \frac{1}{2} [1 + \tanh(x)]$$

[0070] 其中:  $o_{s1}^{(3)}(K) = \mathbf{K}_{sp}$ ,  $o_{s2}^{(3)}(K) = \mathbf{K}_{si}$ ,  $o_{s3}^{(3)}(K) = \mathbf{K}_{sd}$ 。

[0071] 神经网络反向算法为:

[0072] 选取性能指标函数为: 
$$\mathbf{J} = \sum_{p=1}^2 \frac{1}{2} [R_p(K+1) - Y_p(K+1)]^2$$

[0073] 式中, p代表控制系统回路数。R<sub>1</sub>代表目标温度平均值, Y<sub>1</sub>代表实际温度平均值, R<sub>2</sub>表示目标温度差, Y<sub>2</sub>表示实际温度差。按照最速下降法修正BP神经网络的权系数, 即按J对权系数的负梯度方向搜索调整, 并且附加上一项使搜索快速收敛到全局最小的惯性项, 输出层神经元权值调整算法为:

[0074] 
$$\Delta W_{sjk}(\mathbf{K}+1) = -\eta \frac{\partial J}{\partial W_{sjk}} + \alpha [W_{sjk}(\mathbf{K}) - W_{sjk}(\mathbf{K}-1)]$$

[0075] 隐含层神经元权值调整算法为:

[0076] 
$$\Delta W_{sij}(\mathbf{K}+1) = -\eta \frac{\partial J}{\partial W_{sij}} + \alpha [W_{sij}(\mathbf{K}) - W_{sij}(\mathbf{K}-1)]$$

[0077] 式中,  $\eta$ 表示学习速率, 取值为 $\eta = 0.5$ ,  $\alpha$ 为平滑因子, 取值为 $\alpha = 0.05$ 。隐含层神经

元权值 $W_{sij}$ 和输出层神经元权值 $W_{sik}$ 的初值均取 $(-1, 1)$ 上的随机数。

[0078] 如图3、4所示,将前述计算方法应用至本实施方式中的BP神经网络PID控制模块的说明如下:

[0079] 1) 对隐含层神经元权值 $W_{sij}$ 和输出层神经元权值 $W_{sik}$ 进行初始化,初值均取 $(-1, 1)$ 上的随机数。

[0080] 2) 实时采集温度信号并计算得到 $Y_1$ 和 $Y_2$ 。

[0081] 3) 计算得到 $e_s = R_s - Y_s$ ,并将偏差值 $e_s$  ( $s=1, 2$ ) 输入给相应的PID控制器和BP神经网络模块。BP神经子网络进行前向计算并输出 $K_p$ 、 $K_i$ 和 $K_d$ 的值给PID控制器,PID控制器计算输出 $u_s$  ( $s=1, 2$ ),并传送给执行机构。本实施方式中神经网络前向算法为:

[0082] BP神经子网络的输入层神经元输入分别是偏差量 $e_s(k)$ 、 $\sum_{i=1}^k e_s(i)$ 和 $e_s(K) - e_s(K-1)$  ( $s=1, 2, K$ 表示步数)。输入层神经元的输出可以表示为:

$$[0083] \quad o_{s1}^{(1)}(k) = e_s(K)$$

$$[0084] \quad o_{s2}^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k e_s(i)$$

$$[0085] \quad o_{s3}^{(1)}(k) = e_s(K) - e_s(K-1)$$

[0086] BP神经子网络的隐含层神经元输入、输出分别为:

$$[0087] \quad net_{sj}^{(2)}(k) = \sum_{i=1}^3 w_{sij} o_{si}^{(1)}(K)$$

$$[0088] \quad o_{sj}^{(2)}(K) = f[net_{sj}^{(2)}(K)]$$

[0089]  $s=1, 2$ ,代表子网络的序号。上标中的(1)、(2)、(3)分别代表输入层神经元、隐含层神经元和输出层神经元。 $i=1, 2, 3$ ,代表BP神经子网络输入层神经元的序号, $j=1, 2, \dots, 8$ ,代表子网络隐含层神经元序号, $w_{sij}$ 代表隐含层神经元权系数, $f[x]$ 为隐含层神经元激发函数, $f[x] = \tanh(x)$ 。

[0090] BP神经子网络的输出层神经元的输入、输出分别为:

$$[0091] \quad net_{sk}^{(3)}(K) = \sum_{s=1}^3 \sum_{j=1}^8 W_{sjk} o_{sj}^{(2)}(K)$$

$$[0092] \quad o_{sk}^{(3)}(K) = g[net_{sk}^{(3)}(K)]$$

[0093] 上式中, $k=1, 2, 3$ ,为输出层神经元序号, $w_{sjk}$ 为输出层神经元权系数, $g[x]$ 为输出层神经元激发函数。其中  $g[x] = \frac{1}{2} [1 + \tanh(x)]$ 。

[0094] 4) 根据偏差信号 $e_s$  ( $s=1, 2$ ) 进行权值修正计算。

[0095] BP神经子网络的反向算法:

[0096] 输出层神经元权值调整算法为,

$$[0097] \quad \Delta W_{sjk}(K+1) = -\eta + \frac{\partial J}{\partial W_{sjk}} \alpha [W_{sjk}(K) - W_{sjk}(K-1)]$$

[0098] 隐含层神经元权值权值调整算法为:

$$[0099] \quad \Delta W_{sj} (K+1) = -\eta + \frac{\partial J}{\partial W_{sj}} \alpha [W_{sj} (K) - W_{sj} (K-1)]$$

[0100] 式中,  $J = \sum_{p=1}^2 \frac{1}{2} [R_p(K+1) - Y_p(K+1)]^2$ , 代表性能指标函数,  $p$  代表控制系统回路数, 按照最速下降法修正BP神经网络的权系数, 即按  $J$  对权系数的负梯度方向搜索调整, 并且附加上一项使搜索快速收敛到全局最小的惯性项。  $\eta$  表示学习速率, 取值  $\eta = 0.5$ ,  $\alpha$  为平滑因子, 取值  $\alpha = 0.05$ 。

[0101] 新的权值  $W_{sij}(K+1) = W_{sij}(K) + \Delta W_{sij}(K+1)$ ,  $W_{sjk}(K+1) = W_{sjk}(K) + \Delta W_{sjk}(K+1)$ 。

[0102] 5) 判断是否达到控制目标 (即偏差  $e_s$  是否小于某预设的值, 这里是指目标温度值), 若没有达到, 则返回第二步, 使用修正后的权值进行新一轮循环 ( $K=K+1$ ), 若达到控制目标, 则停止控制。

[0103] 在本发明的一个实施方式中, 两个PID控制模块分别接收一个对应的BP神经网络的三个输出参数, 且同时接收相应的偏差值, 然后进行比例、积分和微分运算后得到当前脉冲激光参数的增量, 将该增量加上当前脉冲激光参数的实际值后, 即得到下一时间段脉冲激光的实时工作参数。每个PID控制模块由比例单元P、积分单元I和微分单元D组成。两个

BP神经网络分别以对应的  $e_s(k)$ 、 $\sum_{i=1}^k e_s(i)$  和  $e_s(K) - e_s(K-1)$  ( $s=1, 2$ ) 为输入量进行计算,

并在各BP神经网络的输出端神经元分别输出三个控制参数  $K_{sp}$ 、 $K_{si}$  和  $K_{sd}$  ( $s=1, 2$ ), 控制参数  $K_{sp}$ 、 $K_{si}$  和  $K_{sd}$  ( $s=1, 2$ ) 分别作为两个PID控制器中PID数学控制模型的控制参数。

[0104] PID控制器根据偏差信号  $e_s$  和三个控制参数  $K_{sp}$ 、 $K_{si}$  和  $K_{sd}$ , 利用比例、积分和微分运算以获得PID控制器的输出信号  $U_s$ , 输出信号  $U_s$  与热疲劳实验的执行模块的输入端相连。  $U_s$  分别代表脉冲激光的峰值功率值与脉宽值。本段中的  $s$  取值为1或2, 以表示在涉及两个参数时的区别, 在其它实施方式中, 如果参数涉及到两个以上时,  $s$  的取值可以是1、2或3。

[0105]  $U_s$  获取的方法如下:

[0106] 其中, 脉冲激光的峰值功率值通过下式得到:

$$[0107] \quad U_1(k) = U_1(k-1) + k_{1p}[e_1(k) - e_1(k-1)] + k_{1i}e_1(k) + k_{1d}[e_1(k) + e_1(k-2) - 2e_1(k-1)]$$

[0108] 其中,  $U_1(k)$  表示需要调整的峰值功率值,  $U_1(k-1)$  表示上轮峰值功率值, 后面的内容为峰值功率的增量,  $k$  表示步数,  $e_1$  表示目标温度平均值与实时温度平均值的偏差值,  $k_{1p}$ 、 $k_{1i}$ 、 $k_{1d}$  分别为比例、积分和微分运算;

[0109] 而脉冲激光的脉宽值通过下式得到:

$$[0110] \quad U_2(k) = U_2(k-1) + k_{2p}[e_2(k) - e_2(k-1)] + k_{2i}e_2(k) + k_{2d}[e_2(k) + e_2(k-2) - 2e_2(k-1)]$$

[0111] 其中,  $U_2(k)$  表示需要调整的脉宽值,  $U_2(k-1)$  表示上轮脉宽值, 后面的内容为脉宽的增量,  $k$  表示步数,  $e_2$  表示目标温度震荡值与实时温度震荡值的偏差值,  $k_{2p}$ 、 $k_{2i}$ 、 $k_{2d}$  分别为比例、积分和微分运算。

[0112] 至此, 本领域技术人员应认识到, 虽然本文已详尽示出和描述了本发明的多个示例性实施例, 但是, 在不脱离本发明精神和范围的情况下, 仍可根据本发明公开的内容直接确定或推导出符合本发明原理的许多其他变型或修改。因此, 本发明的范围应被理解和认定为覆盖了所有这些其他变型或修改。

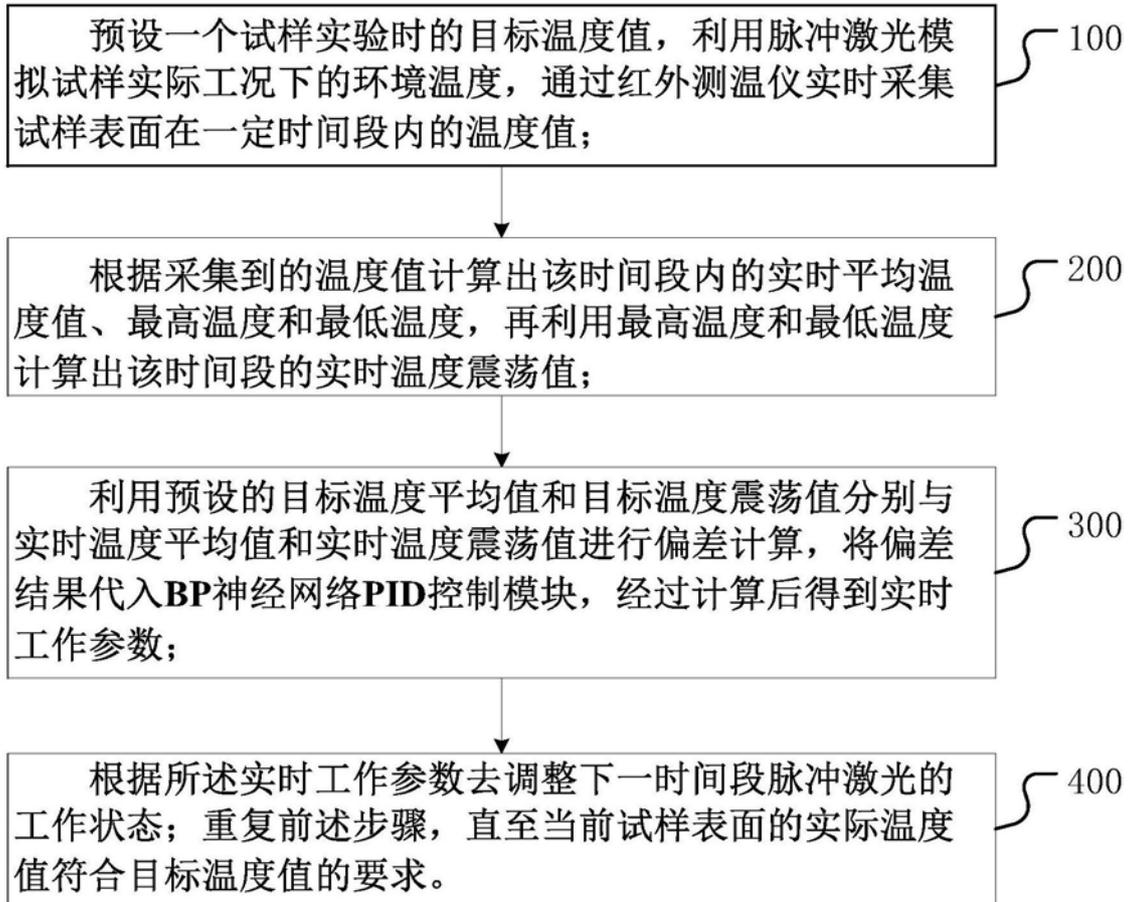


图1

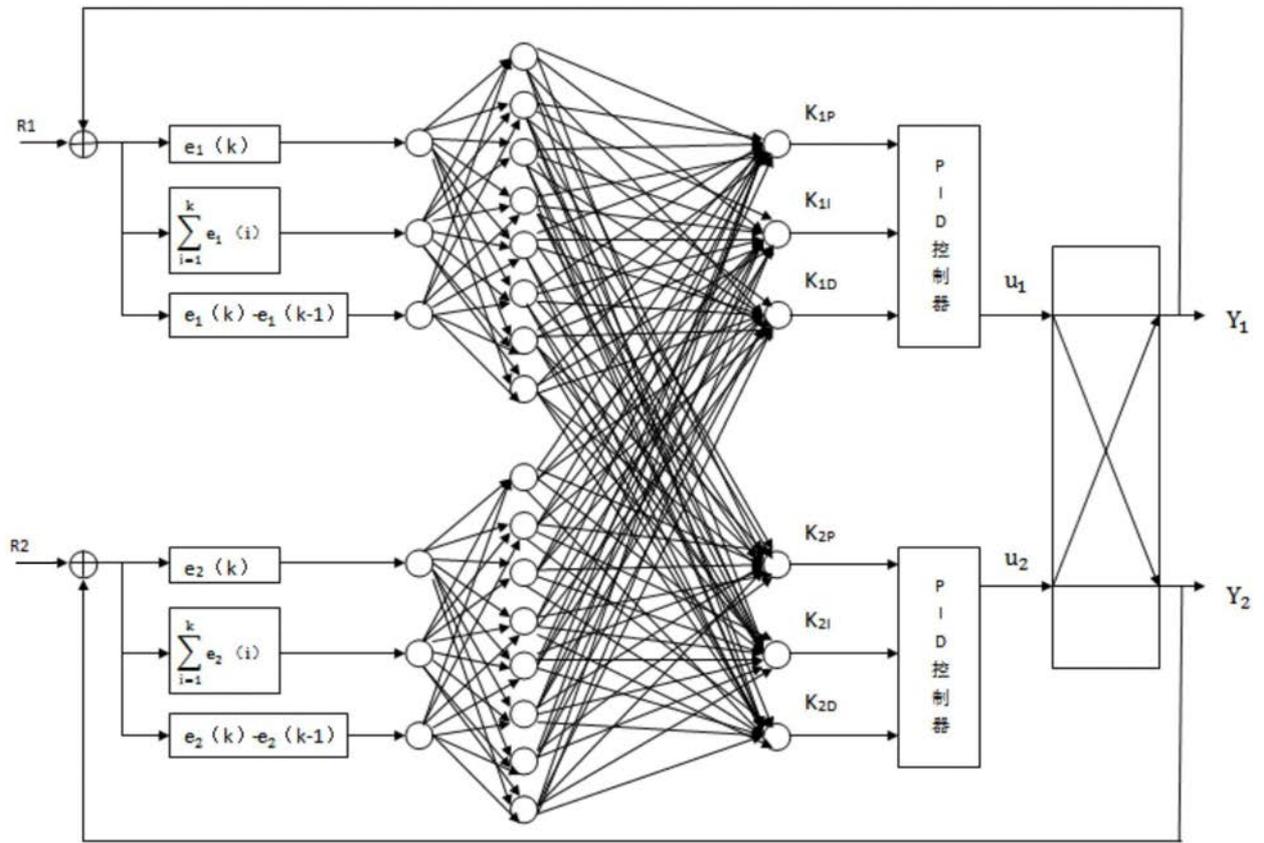


图2

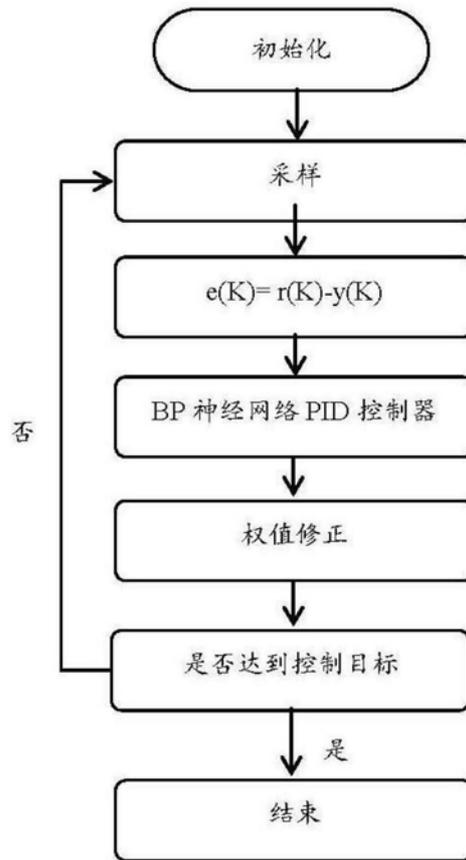


图3

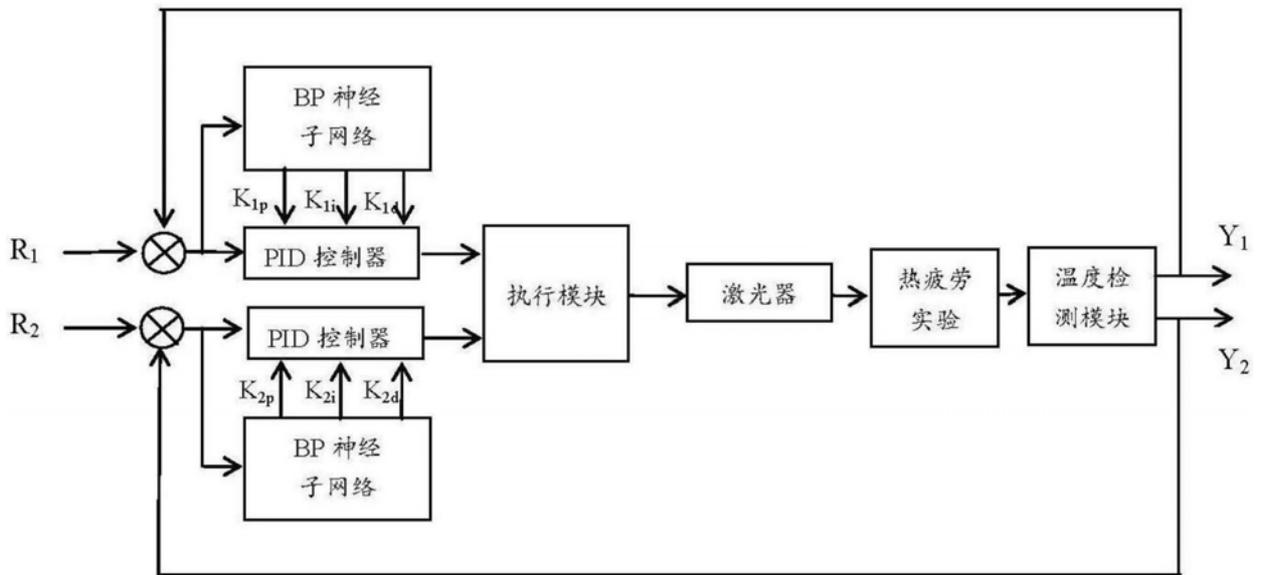


图4