



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104011525 B

(45)授权公告日 2016.12.21

(21)申请号 201280063386.X

(22)申请日 2012.12.14

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104011525 A

(43)申请公布日 2014.08.27

(30)优先权数据
1122111.6 2011.12.21 GB

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2014.06.20

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2012/069711 2012.12.14

(87)PCT国际申请的公布数据
W02013/096111 EN 2013.06.27

(73)专利权人 伊利诺斯工具制品有限公司
地址 美国伊利诺伊州

(72)发明人 史蒂文·R·斯夸尔斯

本杰明·P·杰普森

安德鲁·约翰·史密斯

(74)专利代理机构 上海脱颖律师事务所 31259
代理人 脱颖

(51)Int.Cl.
G01N 3/32(2006.01)

(56)对比文件
KR 10-1041899 B1,2011.06.15,
SU 1826029 A1,1993.07.07,
US 2002/0170361 A1,2002.11.21,
US 5,712,431 A,1998.01.27,
CN 101688824 A,2010.03.31,
V. Bellenger. Thermal and mechanical
fatigue of a PA66/glass fibers composite
material.《International Journal of
Fatigue》.2006,

审查员 尹文杰

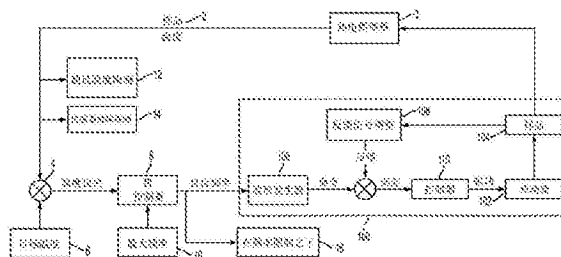
权利要求书3页 说明书9页 附图3页

(54)发明名称

材料测试装置与方法

(57)摘要

一种操作材料测试装置的方法,包括通过以可变的测试频率将脉动载荷施加于材料样品而进行测试、在载荷的施加过程中测量样品的温度,并且基于测量到的温度改变测试频率,借此,防止样品在测试过程中超过预定的最大温度。还提供相应的材料测试装置。



1. 一种操作材料测试装置的方法,包括将脉动载荷以可变的测试频率施加于材料样品从而以可变的测试频率对材料样品进行测试,在施加载荷的过程中测量所述样品的温度,并且基于测量到的温度改变所述可变的测试频率,进而以改变后的测试频率继续对材料样品进行测试,借此,防止所述样品在所述测试过程中超过预定的最大温度。

2. 根据权利要求1所述的方法,进一步包括比较所述测量到的样品温度与规定的目标温度,以确定温度误差,并且基于所述确定的温度误差控制所述测试频率。

3. 根据权利要求2所述的方法,进一步包括在开始所述测试之前规定测试频率控制增益。

4. 根据权利要求3所述的方法,其中,使用在开始所述测试之前由使用者规定的模型参数,基于所述样品的热模型计算所述控制增益。

5. 根据权利要求2所述的方法,进一步包括通过在所述测试过程中连续计算测试频率控制增益而提供所述测试频率控制的自适应调节。

6. 根据权利要求5所述的方法,其中,使用在所述测试过程中估算的模型参数,基于所述样品的热模型计算所述控制增益。

7. 根据权利要求6所述的方法,其中,基于所述样品的加热系数与冷却系数而计算所述控制增益。

8. 根据权利要求7所述的方法,其中,加热速度与所述加热系数成比例,并且与所述测试频率成比例,冷却速度与所述冷却系数成比例,并且与所述样品温度与环境温度之间的差值成比例。

9. 根据权利要求8所述的方法,进一步包括测量所述环境温度或确定环境温度的假定值。

10. 根据权利要求4或6至9中任一项所述的方法,其中,在所述样品表面处测量所述样品温度,并且所述热模型基于所述测量到的表面温度以及所述样品的热参数估算所述样品的内部温度。

11. 根据权利要求5所述的方法,其中,在所述测试开始之前,将所述控制增益初始化为零,并且在所述测试过程中,使用指数移动平均滤波器过滤所述计算得到的控制增益。

12. 根据权利要求3所述的方法,其中,所述控制增益包括比例与积分控制增益。

13. 根据权利要求1所述的方法,其中,基于测量到的最大样品温度改变所述测试频率,所述测量到的最大样品温度从在所述样品各处的不同位置确定。

14. 根据权利要求1所述的方法,进一步包括在所述测试过程中确定测量到的样品温度的改变速度,并且仅在一旦在所述测试开始之后确定样品温度改变速度降低,基于所述测量到的样品温度改变所述测试频率。

15. 根据权利要求1所述的方法,进一步包括如果探测到错误状态,中断所述测试。

16. 根据权利要求15所述的方法,其中,使用提供温度信号的传感器测量所述样品温度,并且基于所述测量到的样品温度的突然下降或所述测量到的温度信号的中断探测到错误状态。

17. 根据权利要求1所述的方法,其中,由规定次数的载荷循环或由样品故障确定所述测试的持续时间,并且在所述测试过程中以最小化所述测试持续时间而样品在所述测试过程中不超过所述最大温度的方式改变所述测试频率。

18. 一种材料测试装置,包括用于以可变测试频率将脉动载荷施加于材料样品从而以可变测试频率对材料样品进行测试的致动器、用于在载荷的施加过程中测量所述样品的温度的装置、以及用于基于所述测量到的温度改变所述可变测试频率的装置,其中,在所述可变测试频率改变后,所述致动器以改变后的测试频率将脉动载荷施加于材料样品从而以改变后的测试频率对材料样品进行测试,借此,防止所述样品在载荷的施加过程中超过预定的最大温度。

19. 根据权利要求18所述的装置,进一步包括控制器,所述控制器用于基于所述测量到的样品温度与规定的目标温度之间的差值,提供表示目标测试频率的控制信号,用于控制所述致动器。

20. 根据权利要求19所述的装置,其中,所述控制器被布置成使用预定的控制增益生成所述目标测试频率信号。

21. 根据权利要求20所述的装置,其中,所述控制器被布置成基于所述样品的热模型,使用由使用者在将载荷施加于所述样品之前规定的模型参数,计算所述控制增益。

22. 根据权利要求19所述的装置,其中,所述控制器被布置成在载荷施加的过程中,连续计算控制增益,用于所述目标测试频率信号的生成。

23. 根据权利要求22所述的装置,其中,所述控制器被布置成基于所述样品的热模型,使用在所述测试过程中估算的模型参数计算所述控制增益。

24. 根据权利要求23所述的装置,其中,所述控制器被布置成基于所述样品的加热系数与冷却系数计算所述控制增益。

25. 根据权利要求24所述的装置,其中,加热速度与所述加热系数成比例,并且与所述测试频率成比例,并且冷却速度与所述样品温度与环境温度之间的差值成比例。

26. 根据权利要求25所述的装置,进一步包括用于测量所述环境温度的装置或用于将预先确定的环境温度的值提供至所述控制器的装置。

27. 根据权利要求21或23至26中任一项所述的装置,所述样品温度测量装置被布置成测量所述样品表面处的温度,并且所述热模型被布置成基于所述测量到的表面温度与所述样品的热参数估算所述样品的内部温度。

28. 根据权利要求22所述的装置,其中,所述控制器被布置成在施加载荷之前,将所述控制增益初始化为零,以及在载荷的施加过程中,使用指数移动平均滤波器过滤所述计算得到的控制增益。

29. 根据权利要求20所述的装置,其中,所述控制增益包括比例与积分控制增益。

30. 根据权利要求18所述的装置,其中,所述测试频率改变装置被布置成基于测量到的最大样品温度改变所述测试频率,所述测量到的最大样品温度从在所述样品各处的不同位置确定。

31. 根据权利要求19所述的装置,其中,所述控制器被布置成在载荷的施加过程中确定测量到的样品温度的改变速度,并且仅在一开始向所述样品施加载荷之后确定样品温度的改变速度下降,基于所述测量到的样品温度改变所述测试频率。

32. 根据权利要求19所述的装置,其中,所述控制器被布置成如果探测到错误状态,中断载荷的施加。

33. 根据权利要求32所述的装置,包括用于将表示所述测量到的样品温度的信号提供

至所述控制器的装置,其中,所述控制器被布置成基于所述测量到的样品温度的突然下降或所述测量到的温度信号的中断探测错误状态。

34.一种用于控制材料测试装置的控制系统,所述材料测试装置布置成以可变的测试频率将脉动载荷施加于材料样品,所述控制系统包括用于在载荷的施加过程中测量所述样品的温度的装置,以及用于提供控制所述测试频率的控制信号的控制器,所述控制系统被布置成根据权利要求1至17中任一项所述的方法操作所述材料测试装置。

35.一种操作材料测试装置的方法,包括将脉动载荷以可变的测试频率施加于材料样品从而以可变的测试频率对材料样品进行测试,在施加载荷的过程中测量所述样品的温度,并且基于测量到的温度改变所述可变的测试频率,进而以改变后的测试频率继续对材料样品进行测试,借此,防止所述样品在所述测试过程中超过预定的最大温度,其中,所述改变后的测试频率是基于所述材料样品的温度而可变的。

36.一种材料测试装置,包括用于以可变测试频率将脉动载荷施加于材料样品从而以可变测试频率对材料样品进行测试的致动器,用于在载荷的施加过程中测量所述样品的温度的装置,以及用于基于所述测量到的温度改变所述可变测试频率的装置,其中,在改变所述可变测试频率后,所述致动器以改变后的测试频率将脉动载荷施加于材料样品从而以改变后的测试频率对材料样品进行测试,借此,防止所述样品在载荷的施加过程中超过预定的最大温度,其中,所述改变后的测试频率是基于所述材料样品的温度而可变的。

37.一种用于控制材料测试装置的控制系统,所述材料测试装置布置成以可变的测试频率将脉动载荷施加于材料样品,所述控制系统包括用于在载荷的施加过程中测量所述样品的温度的装置,以及用于提供控制所述测试频率的控制信号的控制器,所述控制系统被布置成根据权利要求35所述的方法操作所述材料测试装置。

材料测试装置与方法

[0001] 本发明涉及材料测试机与操作材料测试机的方法,并且尤其涉及疲劳测试领域与对测试过程中自生的样品加热的控制。

[0002] 将材料测试机用于测试材料样品或元件的物理特性。疲劳测试包括确定脉动(fluctuating)载荷之下的材料行为。典型地,将规定的平均载荷(其可以是零)与交变载荷应用于样品,并且记录产生故障需要的循环次数(疲劳寿命)。载荷例如可以通过扭转、弯曲、剪切、摩擦或这些的任意组合轴向施加。

[0003] 在机械地用机器测试材料样品与试样的过程中,通过在测试过程中施加的机械力与变形将能量给予样品。部分该能量将其自身表现为样品的自生热。在循环疲劳测试中,以重复方式施加力与变形,并且能量吸收率大致与测试频率成比例(即,测试频率越快,样品将变得越热)。

[0004] 在更高的测试频率处,样品上的自热效应可以导致显著的温度升高。这是任意循环加载测试,包括使用伪随机光谱波形的复杂循环加载或测试中的情况,无论以拉伸或扭转等向样品施加载荷。

[0005] 同时,对于金属样品,通常能够以相对较高的测试频率实施这种疲劳测试,对于某些样品材料类型,例如,塑料与复合材料,疲劳测试的自热效应可以使得样品温度超过预定的测试限制(例如,复合材料中的树脂可能超过其工作温度),这可以降低测试结果的有效性。

[0006] 为解决这个问题,进行疲劳测试的操作者通常将测试频率设置为保守值,对于该保守值,认为在测试过程中,工作温度将不被超过。测试标准(例如,ISO标准、或由制造商或客户设定的标准)可以规定在测试过程中不会被超过的最大温度,或允许的最大温度升高,并且操作者被要求限制疲劳测试频率,从而自加热不会引起该限制被超过。因此,会不必要延长测试的持续时间的保守的测试频率被使用,这减少了机器上的测试量,并且增加每次测试的成本。在某些情况中,测试标准可以简单地将最大测试频率规定为防止样品过热的简单与过度谨慎的方式。相关标准的例子为EN ISO 13003,ASTM D3479/D3479M“用于聚合物基体复合材料的拉-拉疲劳的标准测试方法”(Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials)与ASTM D7615/7615M“用于聚合物基体复合材料层压板的开孔疲劳响应的标准惯例”(Standard Practice for Open-Hole Fatigue Response of Polymer Matrix Composite Laminates)。

[0007] 很多不同材料测试系统在现有技术中是已知的,包括设计用于在高温或低温测试样品的测试系统。GB214,737公开用于测试材料样品的方法与装置,其中,在测试过程中,将样品保持(hold)在液体腔内,并且通过调节经过腔室的液体流量而将样品温度保持恒定。

[0008] US2002/0170361 A1公开一种装置,该装置用于测试材料对重复的剪切力的响应,其中,将材料样品置于环境控制腔中,该环境控制腔具有加热元件和制冷元件,并且使用PID控制系统,腔室可以被设定成期望的温度,并且在整个测试过程中保持恒定温度。

[0009] 然而,这些系统依靠控制测试样品周围的环境温度,这增加了装置的复杂性。而且,如果相关的测试标准允许,这种还可以通过引入更冷的空气或使用风扇而实现的强制

冷却仅可以用于限制样品加热。并不总是这种情况,因为强制冷却改变测试环境,并且某些测试标准规定了不进行冷却的测试条件。此外,强制冷却在样品各处产生较大的温度梯度,使得估计真实的样品温度变得更困难。因此理想的是,提供一种测试装置与方法,通过该装置及方法,通过控制样品的自热,而不需要控制样品周围的环境的温度的情况下,可以在样品温度不超过特定温度限制的情况下,将测试时间最小化,将测试量最大化。

[0010] 本发明提供一种方法与装置,借此,可以自动地调节测试频率,以便在维持规定的循环载荷或压力的同时缩减测试时间,而不超过规定的样品工作温度。优选地,本发明布置成在最短的可能时间进行测试,即,主动地(actively)控制测试频率,以最小化测试时间。

[0011] 尤其,本发明提供如权利要求1所述的操作材料测试装置的方法。根据本发明,本方法包括通过以可变测试频率将脉动载荷施加至材料样品而进行测试,在载荷的施加过程中测量样品的温度,并且基于测量到的温度改变测试频率,以便防止样品在测试过程中超过预定的最大温度。典型地,测试持续直至发生样品的故障,或载荷循环被执行规定次数。优选地,以以下方式改变测试频率测试:最小化用于完成测试的时间而在测试过程中样品不超过最大温度。

[0012] 优选地,该方法包括使用反馈控制回路,并且将测量到的样品温度供应至控制器,其基于测量到的样品温度控制测试频率。在测试过程中(即,在载荷的施加过程中)可以通过使用样品频率的比例-积分控制,基于测量到的样品温度,或通过使用比例-积分-微分控制或其他相关类型的控制改变样品频率。以这种方式,在测试过程中可以最大化频率,以使得样品温度紧密地跟随目标温度,而不超过任何给定的温度限制。

[0013] 尽管要求的控制回路参数可以由操作者选择,在一个实施例中,本发明提供控制回路的自动自适应调节,从而最少化操作者输入,并且最大化控制参数的有效性。

[0014] 通过使用有效的控制系统,以响应于样品温度控制测试频率,通过将平均温度保持为更加靠近理想目标温度,测试时间被缩减很多,并且避免温度的大幅度摇摆,这种温度的大幅度摇摆可能加剧材料疲劳。

[0015] 在另一方面中,本发明提供一种材料测试装置,其包括用于以可变的测试频率将脉动载荷施加于材料样品的致动器,用于在载荷的施加过程中测量样品温度的装置,以及用于基于测量到的温度改变测试频率以便防止样品在测试过程中超过预定的最大温度的装置。

[0016] 现将通过例子,参照附图描述本发明的实施例,其中:

[0017] 图1示意性地示出了用于实施根据本发明的第一实施例的方法的材料测试系统,其具有对反馈控制的固定调节(fixed tuning);

[0018] 图2示意性地示出了根据本发明的又一实施例的材料测试系统,包括根据测量到的环境温度对反馈控制增益的自适应调节;以及

[0019] 图3示意性地示出了包括使用假定的(固定的)环境温度,根据可替换地布置对反馈控制增益的自适应调节的实施例。

[0020] 在传统材料测试机中,基于规定的测试参数,或命令变量,例如位移、载荷或应变,致动器将载荷施加至样品测试。在疲劳测试中,将脉冲载荷以规定的测试测试频率施加于样品。将要求的测试频率输入至波形发生器,波形发生器生成所要求的控制信号,用于根据命令变量驱动致动器。为了实际施加至样品的载荷完美符合(closely follow)所期望的载

荷模式(pattern),典型地,反馈控制被用于最小化命令变量与测量值之间的误差,并且误差被提供至驱动致动器的控制器。

[0021] 在典型的疲劳测试中,基于规定的测试标准或已知的足够低的值,操作者将测试频率设定为合适的值,以便不会引起样品在测试过程中过热。在以上两种的任何情况中,典型地,将测试频率设置为保守值,尤其当测试复合材料时,因为如果样品温度超过材料的工作限制,则将有损测试结果。

[0022] 本发明目标在于通过以下方式在不超过规定的样品工作温度的情况下,增加测试装置的测试量:通过在测试过程中监控样品的温度,并且通过将样品温度保持在可接受的限制内的方式来控制样品的循环加载的频率。换句话说,通过调节测试频率控制样品的温度。

[0023] 图1示例了根据本发明的一个实施例的测试测试装置,包括用于响应于探测到的样品温度调节测试频率的控制系统。在该实施例中,装置包括传统疲劳测试系统的元件,包括用于根据由波形发生器106生成的命令信号将循环载荷施加至样品104的致动器102,该波形发生器106具有期望的测试频率作为输入。如上所述,经由合适的信号调整(condition)108,在控制回路中测量并且反馈施加至样品的实际力,并且命令的值与测量到的值之间的差值被提供至控制器110,控制器110生成致动器的驱动信号。这些传统特征总地在虚线100中示出。在一个实施例中,虽然可以使用其他控制器,控制器110为比例积分微分延迟(PIDL)控制器。应该知道的是,可使用位置而不是载荷作为控制参数来运行疲劳测试。在这种情况下,借助于任意要求的位置信号调整(condition)位置被测量,并且位置被反馈至控制器110。

[0024] 为了根据本发明控制样品的温度,装置包括外部回路控制系统,其包括用于测量样品温度2的装置、用于比较测量到的温度与目标温度6以产生温度误差值的装置4,以及控制器8,控制器8用于接收温度误差值、基于温度误差确定要求的测试频率、并且将输出提供至波形发生器106,以相应地调节测试频率。提供温度控制函数作为外部回路控制系统的好处之一就在于其可以对现有的测试系统翻新,现有的测试系统可以对应于由100表示的特征。

[0025] 装置可以为操作者提供输入最大样品温度和/或最大测试频率10的能力,或替换地这些参数可以被生成或输入至系统,而不是由操作者提供。这些最大值典型地用于确保测试没有超过合适的操作限制。如果样品达到规定的最大温度,这通常表示控制没有充分起作用,并且测试应当停止。最大频率典型地为测试机的规定的最大操作限制,并且能够以该频率无限地连续测试。作为对最大频率的替换,可以优选地规定最大应变率,可以根据最大应变率自动获得最大测试频率。

[0026] 现将参照图1描述温度控制系统的操作。在图1中所示的控制器8由已知类型的比例与积分(PI)控制器构成,其在以下变量下操作:

[0027] -工艺参数(PV)为样品温度

[0028] -操纵量(MV)为测试频率

[0029] -设定点(SP)为目标样品温度

[0030] -误差(e)=SP-PV

[0031] 在其他实施例中,控制器可以是比例-积分-微分(PID)控制器,或可以使用比例、

积分与微分控制的其他组合,例如PD、P或I控制器。任意这种控制器及对本领域技术人员而言明显的合适的修改可以在以下描述的任意实施例中使用。

[0032] 在示例的实施例中,PI控制器为这样的形式:

[0033]
$$M(t) = K_P e(t) + \int_0^t K_I e(\tau) d\tau$$

[0034] 其中, K_P 为比例增益, K_I 为积分增益。

[0035] 在上述装置中,PI控制器由标准形式修改而来,以使得积分器为关于(in terms of)测试频率(即,对 $K_I e$ 积分)。通过在测试开始时使用测试开始频率作为初始积分器值允许系统的简单明了地初始化。

[0036] 在图1的实施例中,借助于至控制器8(未示出)的适当输入,比例增益 K_P 与积分增益 K_I 可以由操作者设定。

[0037] 将测量到的样品温度与输入目标温度之间的差值确定为温度误差值,其随后作为输入提供至PI控制器8。目标温度可以由操作者直接输入,或可以由其他合适的方式确定。例如,目标温度能够以确保在测试过程中样品温度不超过最大温度的方式从最大温度得来。PI控制器以以上陈述的形式执行反馈控制,并且通过将生成的测试频率信号传送至波形发生器106而与传统测试系统100相合作。

[0038] 在图1的实施例中,使用热电偶测量样品温度,并且经由任意要求的对热电偶信号的调整(condition)3将测量温度反馈入外控制回路。可以通过已知的电子模块执行这种调节。虽然一个或更多热电偶可以嵌入样品中,或以其他方式一体形成于其中,典型地,将热电偶附接至样品表面。可以使用其他温度测量装置作为替换,或作为对使用热电偶的补充,例如红外线探测器、高温计或热成像摄像机。可以使用多个传感器实现温度测量,多个传感器可以位于样品的不同部分之中或之上,并且在控制回路中使用的温度测量能够以各种不同方式从多个测量获得。例如,可以平均多个测量,或可以使用各个测量的最大值。例如,热成像摄像机或其他装置可以允许峰值样品温度被识别与控制。这样,可以在整个样品上测量温度分布,而不仅仅是单个点,并且无论何时峰值温度出现在样品上,可以使用探测到的峰值温度控制测试。而且,可以设想的是,能够以任意相关的测试标准规定的方式确定样品温度。

[0039] 在示例的系统实施例的操作中,由操作者将测试样品置于测试机中,并且操作者设定比例与积分增益,或可以将这些设定为缺省值。虽然在某些实施中,增益可以在测试过程中由操作者调节,在测试的持续期间,增益典型地被固定。操作者还可以设定最大样品温度和/或最大测试频率。在通过集成在样品中或附接至样品的测量系统实施温度测量的情况下,在开始测试之前,测量系统被适当地连接至测试机。

[0040] 以传统方式开始测试,并且将规定的加载曲线(loading profile)施加至样品。通过图1中所示的外部反馈回路,测量样品温度,并且将其与目标温度相比较,以产生提供至PI控制器8的温度误差。PI控制器使用温度误差产生提供至波形发生器106的测试频率信号,并且从而测试频率被调整,以控制样品温度。因此,在样品不超过其工作温度,或任何其他规定的最大温度的情况下,可以最大化测试频率,从而最小化测试时间,并且最大化测试量。

[0041] 根据控制增益与初始测试频率,可以使用不同的控制曲线(control profile)

(即,测试频率曲线(test frequency profile)),以尤其有效的方式缩减测试时间。例如,最大频率可以被选择作为测试开始时的初始频率,从而尽快将样品温度升高至接近目标温度。通过选择强的控制增益,一达到目标温度,频率就可以快速地被减小。然而,这方法将产生对受控温度有些超过,这进而要求设定更加保守的目标温度,从而避免样品过热。因此,当进行长时间的测试时,可替换的方法是以在预期的长时间频率值之下的频率开始测试,从而允许目标温度不那么保守,并且进一步缩减长时间测试过程的测试时间。

[0042] 可以提供如图1中所示的额外限制机构,从而在某些情况之下暂停测试。尤其,系统可以布置成探测测量到的样品温度超过规定的最大值,如由“温度限制之上”探测12表示的。可以提供对温度传感器故障的额外探测,如由“传感器故障探测器”14表示的。传感器的故障可以由传感器自身的故障造成,或由样品与传感器的连接被中断(detachment)造成,或由至PI控制器的温度测量的反馈的某些其他故障造成。这样的故障可以通过监控样品温度信号,并且探测温度反馈的中断(其能表示彻底的传感器故障或连接故障)、或测量到的温度的突然下降(其例如可能表示热电偶与样品的连接被中断(detachment))而被探测到。可以提供其他错误探测,例如,诸如探测例如来自PI控制器8的目标测试频率输出过高或过低的控制错误。这种控制错误可以通过监控相关的控制信号,并且将它们与规定的阈值相比较来探测到,如由图1中的“在频率限制之下”探测16表示。任意规定的限制机构可以被布置成当探测到问题时,停止或暂停测试,或提供合适的校正动作。

[0043] 图2示例了温度受控的测试系统的又一实施例,其中,自动实施对外部回路温度控制的调节。优选地,该实施例提供对外部温度控制回路的全自动、自适应调节。测试系统的主元件与图1中所示的那些相同,并且相同的元件被给予相同的附图标记。图2的系统中的主要不同为提供热模型识别模块26,用于计算由PI控制器28使用的比例与积分增益。基于来自系统的各种输入,即测量到的样品温度2、由波形发生器106提供的运行频率(即,命令的测试频率),以及优选地,测量到的环境温度,由热模型识别模块确定增益。通过任意合适的测量装置,经由任意必需的信号调整(condition)24,可以由任意适合的测量装置,例如热电偶,确定环境温度22,并且将其提供至热模型识别模块26。期望通过引入额外的动力学(dynamics),以相同的滤波动力学(filter dynamics)调整(condition)热参数识别使用的所有信号(具体地,样品与环境温度、样品温度变化率与测试频率),从而不降低识别过程的有效性。例如,如果低通过滤样品温度信号,则将优选地对识别算法所使用的环境温度、样品温度变化率及测试频率应用相同的低通过滤。

[0044] 作为对如图2中所示的环境温度的测量的替换,由热模型识别模块使用的环境温度可以作为固定值输入。可以由操作者输入环境温度值,或从其他来源获得环境温度值。这种安排在环境温度恒定与已知及因此没有主动(active)环境温度测量的需要的情况下可以是合适的。例如,测试装置可以被使用在温度受控环境中,在该温度受控环境中,操作者可以输入已知的温度,或可替换地,温度可以作为来自控制受控环境的温度的系统的输出被提供至测试装置。图3示出了相似于图2的装置,包括热模型识别模块26,但在该实施例中,模块设置有作为输入的固定环境温度30,而不是图2的实施例中的测量到的环境温度。

[0045] 在可替换的实施例中(未示出),即使在不存在反馈参数的自适应调节的情况下,可以使用测量到的环境温度作为至控制测试频率的反馈控制器的输入。例如,可以在测试频率的控制中使用预设的或操作者控制的反馈增益,如图1,由于反馈控制的设定值可以是

样品温度与环境温度之间的差值,而不是样品温度本身。在该情况中,测量到的环境温度、或假定的环境温度值可以用作输入。

[0046] 在图2与3的两个系统中,由热模型识别模块26计算的增益随后被输出至PI控制器28。在使用不同类型的控制器替代PI控制器(例如,PID控制器)的地方,相应地计算所需的增益。

[0047] 使用示例的PI控制器28,热模型识别模块26被设计成确定比例与积分增益的理想值,并且消除对操作者手动调节增益的需要,从而使得能够更加有效的控制样品温度,并且能够进一步提高测试量。这通过使用如以下详细陈述的热模型计算增益实现,虽然可以使用其他热模型实现相似的结果。所述的热模型允许基于样品温度、环境温度与测试频率有效计算增益。

[0048] 一旦在测试过程中估算了样品的热参数与合适的控制增益,则它们将适用于对物理上相似的样品的其他测试。实际上,如果在每个以下测试开始时,将合适的热参数或控制增益设定为固定值,则使得频率控制更加准确,并且因此使得对相似样品的以下测试变得更快。为了方便以及更好的物理理解,当设置以下测试时,使用者可能宁愿记录(note)与再利用热参数值,而不是控制器增益。因此,控制系统可以给出选项,以使用固定控制调节或自适应(自动估算)控制调节;如果控制调节被固定,则可以对使用者给出进一步选择,以直接规定控制器增益或规定确定它们的热参数值。

[0049] 在本实施例中,使用简单的热模型,其为预测样品温度变化率的普通微分方程,其中给定了测试频率以及样品与环境温度之间的差:

$$[0050] \quad \frac{d\theta_s}{dt} = c_F F - c_L (\theta_s - \theta_a) \quad (1)$$

[0051] 其中,

$$[0052] \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \text{样品温度的变化率} [^{\circ}\text{C/s}]$$

$$[0053] \quad c_F = \text{加热系数} [^{\circ}\text{C}/(\text{s Hz})]$$

$$[0054] \quad c_L = \text{冷却系数} [1/\text{s}]$$

$$[0055] \quad F = \text{测试频率} [\text{Hz}]$$

$$[0056] \quad \theta_s = \text{样品温度} [^{\circ}\text{C}]$$

$$[0057] \quad \theta_a = \text{环境温度} [^{\circ}\text{C}]$$

[0058] 假定每个测试循环将相同量的能量引入样品中,并且假定由于冷却导致的能量损失率与样品温度与环境温度之间的差值成比例,考虑能量流入样品而得到模型。

[0059] 值得注意的是,在每个循环中施加于样品的动态载荷必须保持恒定,否则 c_F 将改变。

[0060] 识别方程

[0061] 方程(1)的热模型可以写成简单线性代数方程:

$$v = c_F F - c_L \delta$$

$$[0062] \quad v = \begin{pmatrix} c_F & -c_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F \\ \delta \end{pmatrix} \quad (2)$$

[0063] 其中, $v = \frac{d\theta_s}{dt}$, 并且 $\delta = \theta_s - \theta_a$

[0064] 通过写类似的方程, 标准参数识别技术(例如参见Karl J. Åström与Björn Wittenmark的自适应控制(Adaptive Control)书的第二版)可用于估算 c_F 与 c_L 。方程的标准形式为:

$$[0065] \quad \underline{y} = C^T \underline{x} + \varepsilon_y \quad (3)$$

[0066] 其中, $\underline{y}$ 为由误差 ε_y 与由 $C^T \underline{x}$ 计算而来的校正值构成的噪音测量(noisy measurement)。C为将要识别的参数矩阵, 并且 $\underline{x}$ 为“已知的”输入, 这些输入被认为无误差。如果可获得一系列值 $X = [\underline{x}_1 \ \underline{x}_2 \ \dots \ \underline{x}_n]^T$ 与 $Y = [\underline{y}_1 \ \underline{y}_2 \ \dots \ \underline{y}_n]^T$, 则C的“最小平方”最佳估算为:

$$[0067] \quad \hat{C} = (X^T X)^{-1} X^T Y = PQ \quad (4)$$

[0068] 其中 $P = (X^T X)^{-1}$ and $Q = X^T Y$ 。

[0069] 当这些方程被用于对“自适应”控制的实施估算时, 这些方程通常被转变为具有“遗忘因子”的“递推”形式, “遗忘因子”控制多快“遗忘”旧数据, 转而选择(in favour of)新数据。因为旧数据最终被遗忘, 为了保持准确性, 在测量到的变量(variable)中必须存在频率改变, 否则估算将开始“偏离”。然而, 在该应用中, 期望参数恒定, 并且期望测量中的最明显的改变发生在测试开始时, 因此使用以下程序直接应用方程(4):

[0070] 通过将方程(3)与方程(2)比较, 可以发现:

$$[0071] \quad \underline{y} = v = \frac{d\theta_s}{dt}, \quad C = \begin{pmatrix} c_F \\ -c_L \end{pmatrix} \text{ 以及 } \underline{x} = \begin{pmatrix} F \\ \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ \theta_s - \theta_a \end{pmatrix} \quad (5)$$

[0072] 在热参数识别过程的每一次更新中, 如下更新矩阵Pinv(最初为了方便替代P被使用)、方程(4)的Q及参数估计:

$$[0073] \quad \begin{aligned} \text{inv}P_k &= \text{inv}P_{k-1} + \begin{pmatrix} F_k^2 & F_k \delta_k \\ F_k \delta_k & \delta_k^2 \end{pmatrix} \\ Q_k &= Q_{k-1} + \begin{pmatrix} F_{k-1} v_k \\ \delta_{k-1} v_k \end{pmatrix} \\ \hat{C}_k &= (P_{\text{inv}k})^{-1} Q_k \end{aligned} \quad (6)$$

[0074] 典型地, 仅当满足特定条件时, 更新这些方程, 这样的条件可以包括:

[0075] • 自从最近的一次更新开始, 温度已经改变了规定的最小量, 以及 δ 的大小足够(如在以下更加详细论述的);

[0076] • 不倒置(invert)Pinv, 直至已经对其进行足够的更新以在数量上得到良好的调整以及因此可倒置。

[0077] 设定 K_P and K_I 的规则

[0078] 用于基于比例增益 K_P 、积分增益 K_I 与目标温度 θ_t 设定测试频率F的控制方程为(拉普拉斯变换(Laplace Transform)形式):

$$[0079] \quad F = \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right) (\theta_t - \theta_s) \quad (7)$$

[0080] 通过将原始热方程(1)转换为拉普拉斯变换(Laplace Transform)形式,并且将F的方程(7)替换入该方程,可得到包括控制器的热系统的传递函数:

$$\theta_s = \frac{\left(1 + s \frac{K_P}{K_I}\right) \theta_i + \left(\frac{c_F}{c_L}\right) \frac{s}{K_I} \theta_a}{1 + s \left[\frac{1 + \left(\frac{c_F}{c_L}\right) K_P}{\left(\frac{c_F}{c_L}\right) K_I} \right] + \frac{s^2}{c_F K_I}} \quad (8)$$

[0082] 方程(8)示出了如果发生以下情况,误差将趋于零,即,如果环境温度保持恒定,并且动力学(dynamics)为“二阶”(second order),“自然频率”(对于零误差响应的速度) $\Omega = \sqrt{K_I c_F}$ 以及“阻尼系数”:

$$\zeta = \frac{1 + \left(\frac{c_F}{c_L}\right) K_P}{\left(\frac{2}{c_L}\right) \sqrt{K_I c_F}} \quad (9)$$

[0084] 通过重写方程(9),可以根据(in terms of)其他项目(term)获得积分增益 K_I 的方程:

$$K_I = \frac{c_L^2}{4\zeta^2 c_F} \left(1 + \left(\frac{c_F}{c_L}\right) K_P \right)^2 \quad (10)$$

[0086] 在该实施中,使用两个设计参数 n 与 ζ_{design} 设计控制器。 K_P 与 K_I 应当被选择,以获得阻尼系数 ζ_{design} 以及给出比如果 K_P 为零时快 n 倍的受控的响应这些规则带来 K_P 与 K_I 的以下方程:

$$K_P = (n-1) \left(\frac{c_L}{c_F} \right) \quad (11)$$

$$K_I = \frac{n^2 c_L^2}{4\zeta_{\text{design}}^2 c_F}$$

[0088] 应该注意的是,如对本领域技术人员明显的那样,可以使用很多其他设计规则调节 K_P 与 K_I 。

[0089] 可以对控制增益的确定作出进一步的修改,从而改进自动调节的执行。

[0090] 尤其,已经明确,温度噪声(noise)可能引起欠佳的热模型识别。为了降低温度噪声对热模型识别的影响,可能期望仅当温差(delta temperature)(样品-温度)已经改变超过规定的量的时候执行对模型的更新。

[0091] 其他困难可能由系统对温度测量的偏差的敏感性引起。热模型基于输入 $\delta = \theta_s - \theta_a$,其由参数识别程序假定为“零误差”。任何误差将引起识别的参数值的偏差。对于 δ 的小值, θ_s 与 θ_a 之间的校准补偿的差值将引起 δ 中成比例的更大误差。为避免这明显影响估算的值,在一个实施例中,不开始控制参数的估算,直至达到 δ 的规定的最小值。此外,测试程序优选地包括将测量到的样品温度校准至环境温度。

[0092] 在本发明的测试过程中,发现在频率恒定的测试刚开始阶段,测量到的样品温度趋于以指数形式升高(即,温度速率增加)。此现象的一个原因在于内部加热以与热电偶建立联系(reach),即,通过附接至样品表面的热电偶测量温度,所花的时间。为解决该问题,在一个布置中,热模型拒绝(reject)样品温度值,直至温度的变化率开始下降。

[0093] 还发现的是,在测试开始之后不久,热模型 c_F 与 c_L 误差,以及因此所得到的 K_P 与 K_I 误差可以很大,并且可以使得控制回路不稳定。为解决这个问题,在将原始 K_P 与 K_I 系数发送至PI控制器之前可以使用指数移动平均(EMA)滤波器对原始 K_P 与 K_I 系数进行过滤。在测试开始时以零初始化EMA滤波器,以使得经过滤的 K_P 与 K_I 值从零朝向最终值逐步移动(为零的 K_P 与 K_I 明确地意味着测试频率没有发生改变)。该修改带来样品温度控制回路的稳定性的改进。

[0094] 应该知道的是,可以使用不同于上述的热模型,以确定PI控制器的比例与积分增益,或使用不同于PI控制器的控制器时的相关控制增益。在热模型的又一发展中,可以使用其他参数,以更加准确地控制测试频率。例如,当测量样品的温度时,可以将温度传感器嵌入样品中,但更常见和更简单的是,将一个或多个传感器,例如热电偶,黏结(bond)至样品表面。这样的传感器不必须给出对样品内温度的真实指示,该样品内温度可能明显高于表面温度。因此,尽管探测到的表面温度仍处于工作范围内,样品的内部温度可能超过材料的工作温度。虽然可以通过降低允许的表面温度阈值而考虑这些,但内部与表面温度之间的实际差值将根据样品的加载曲线与其他因素而改变。例如,如果测试频率缓慢增加,则表面温度可以比如果测试以高频率开始时更少地滞后于内部温度。因此,简单降低表面温度的温度阈值,以考虑内部温度可能更高的情况可导致应用过度保守的温度阈值,这可能不必要地增加某些情况下的测试时间。

[0095] 考虑到该影响,热模型可以配置成基于表面温度与其他样品及环境信息,例如,样品的尺寸或形状,材料的热特性以及加载曲线,预测样品的内部温度。更具体地,热模型可以使用一个或多个:材料的规定的热容量与热阻(值得注意的是,对于复合材料,热阻可以根据相对于织物(weave)或层的方向的传导方向而不同);材料表面与处于环境温度下的质量(the mass of)空气之间的热阻;样品与机器的其余部分的热质量(thermal mass)之间的热阻;热电偶与沿一个方向的环境空气及沿另一方向的样品表面之间的热阻等。使用这种额外的信息,可以改进温度控制的精确度,带来缩减的测试时间与增加的测试量。

[0096] 尽管已经根据其在传统疲劳测试中的使用描述了本发明,各种修改是可能的,并且本发明的原理可以应用于其他应用中,以实现相同的优势。尤其,本发明可以在任意材料测试装置中应用,在这样的材料测试装置中,将脉动载荷以可控制的测试频率施加于材料,包括旋转弯曲疲劳测试,以及多轴疲劳测试(例如,十字形测试)。在旋转弯曲疲劳测试中,旋转样品,并且另外加载有垂至于旋转轴的弯曲力。因此通过弯曲样品的旋转提供脉动载荷,其尤其在样品表面处提供快速拉伸压缩载荷,并且因此测试频率取决于旋转速度。因此可以通过调节旋转速度而控制样品温度。

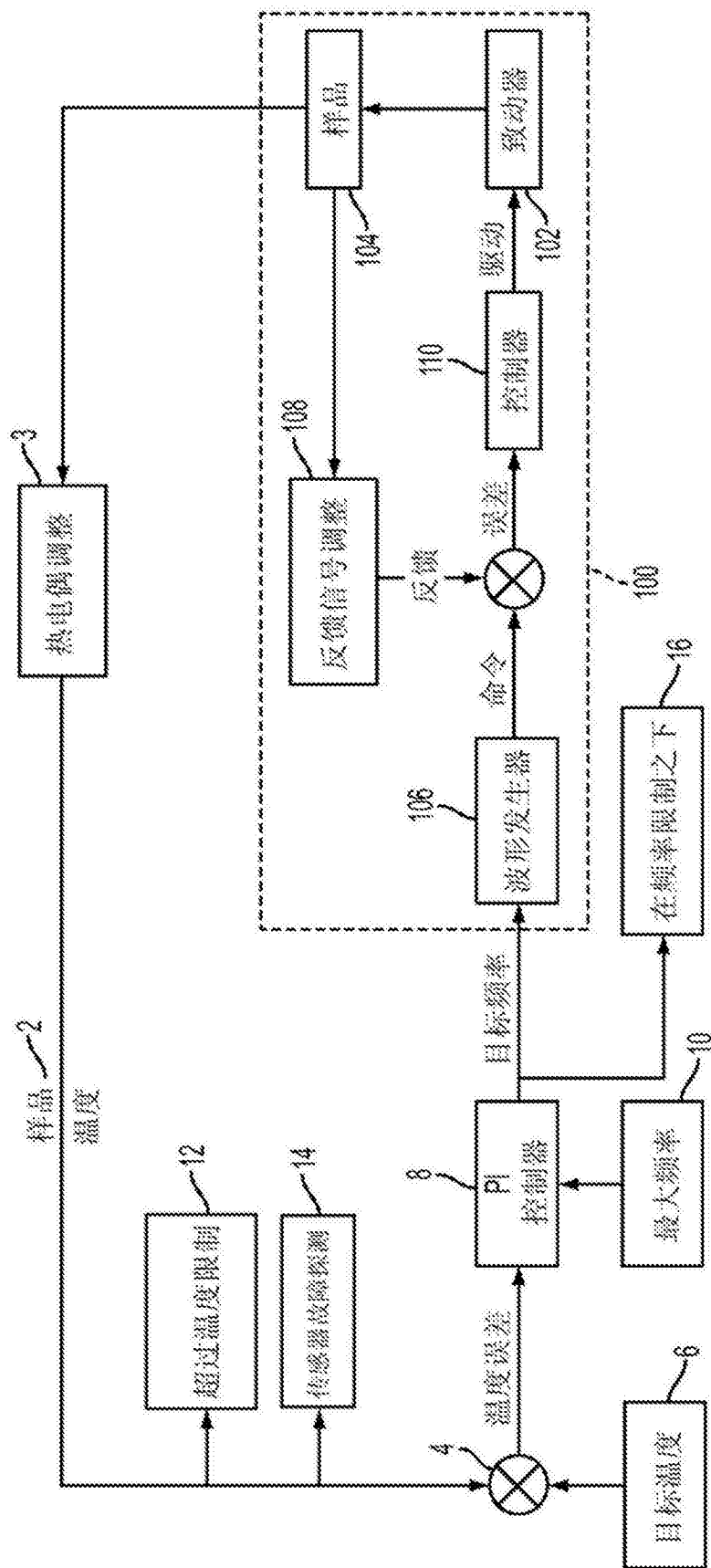


图1

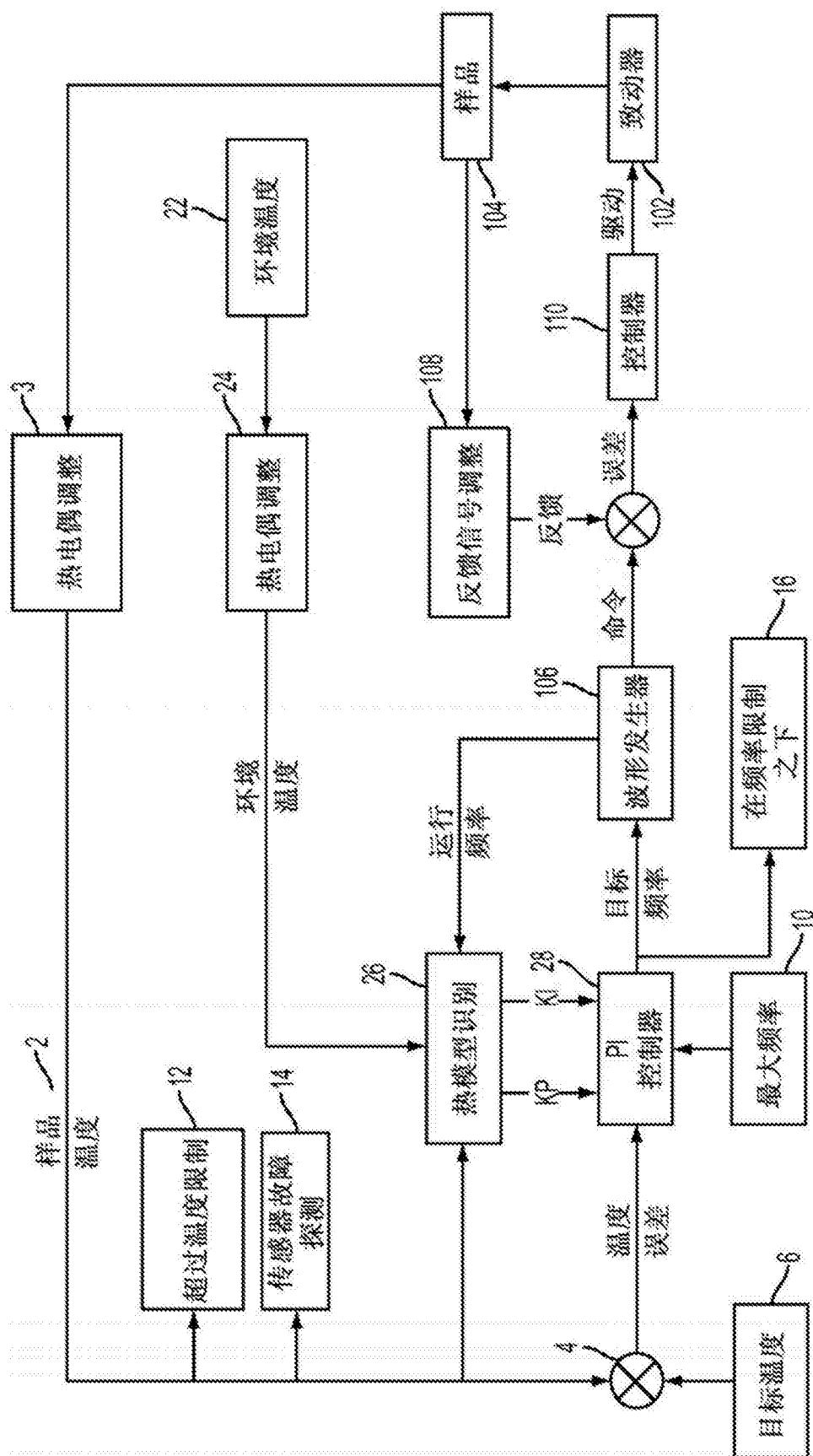


图2

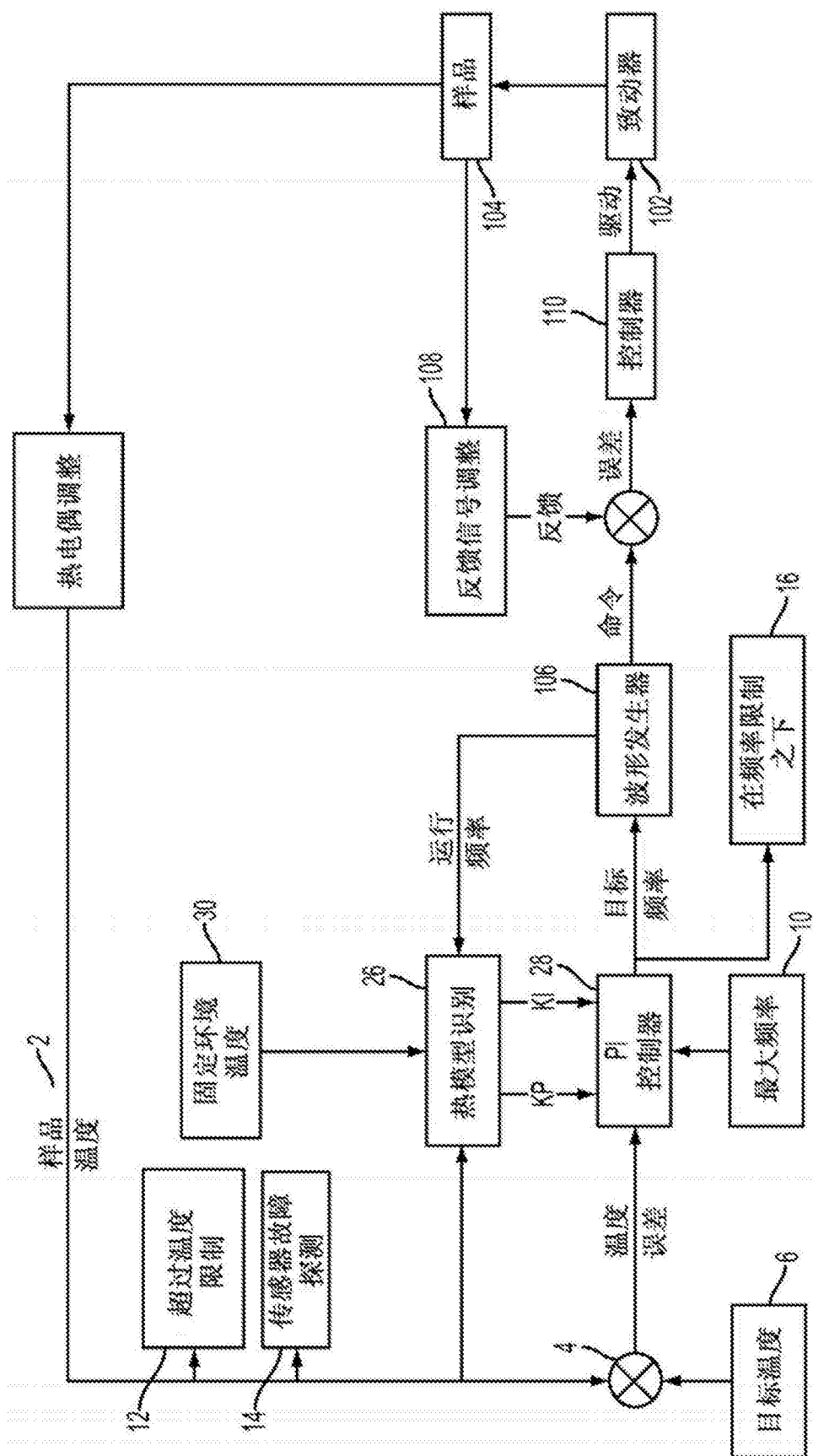


图3