



(21)申请号 201580016706.X

(22)申请日 2015.02.27

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 106133462 A

(43)申请公布日 2016.11.16

(30)优先权数据

14/228,632 2014.03.28 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2016.09.27

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2015/056575 2015.02.27

(87)PCT国际申请的公布数据

WO2015/146531 EN 2015.10.01

(73)专利权人 三菱电机株式会社

地址 日本东京都

(72)发明人 D·彭斯 M·瓜伊 W·韦斯

(74)专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司 11127

代理人 王小东

(51)Int.Cl.

F25B 49/02(2006.01)

(56)对比文件

CN 103616013 A, 2014.03.05,

US 2008179408 A1, 2008.07.31,

CN 103625475 A, 2014.03.12,

US 2011276182 A1, 2011.11.10,

CN 101861552 A, 2010.10.13,

US 2011167025 A1, 2011.07.07,

US 5735134 A, 1998.04.07,

US 2004083993 A1, 2004.05.06,

CN 103322648 A, 2013.09.25,

CN 102353119 A, 2012.02.15,

CN 102997374 A, 2013.03.27,

CN 102818336 A, 2012.12.12,

Daniel J. BURNS1, Christopher

LAUGHMAN.Extremum Seeking Control for

Energy Optimization of Vapor Compression

Systems.<<International Refrigeration and

Air Conditioning>>.2012,2192,Page1-2192,

Page7.

审查员 张思朝

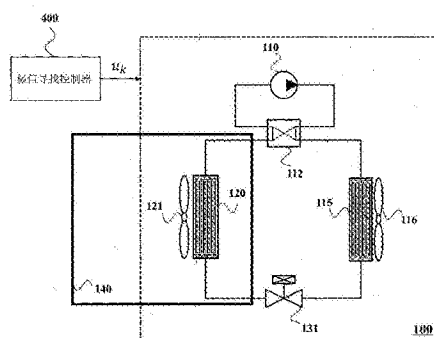
权利要求书2页 说明书10页 附图10页

(54)发明名称

用于控制蒸气压缩系统的极值寻找控制器和方法

(57)摘要

一种用于控制蒸气压缩系统的方法使用为控制的前一时间步长所确定的估计参数的前一值以及控制信号的前一值来确定所述蒸气压缩系统的性能度量的值。所述估计参数的所述值表示所述控制信号的值与所述性能度量的值之间的关系。基于所述估计参数的所述前一值以及所述性能度量的确定值与所述性能度量的测量值之间的误差来确定所估计参数的当前值。接着,基于所述估计参数的所述当前值确定所述控制信号的当前值。



1. 一种用于控制蒸气压缩系统的方法,该方法在控制的当前时间步长包括以下步骤:

基于为所述控制的前一时间步长所确定的估计参数的前一值以及为所述控制的所述前一时间步长所确定的控制信号的前一值来确定所述蒸气压缩系统的性能度量的值,其中,所述估计参数的值表示所述控制信号的值与所述性能度量的值之间的关系;

基于所述估计参数的所述前一值以及所述性能度量的确定值与所述性能度量的测量值之间的误差来确定所述估计参数的当前值,其中,所述估计参数的所述当前值被确定为减小所述误差;以及

基于所述估计参数的所述当前值来确定所述控制信号的当前值,其中,所述步骤由处理器来执行。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述估计参数为所述控制信号与所述蒸气压缩系统的所述性能度量之间的凸关系的梯度的估计。

3. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述估计参数为控制所述蒸气压缩系统的一组致动器的一组控制信号与所述蒸气压缩系统的所述性能度量之间的凸关系的梯度的向量。

4. 根据权利要求1所述的方法,其中,确定所述估计参数的所述当前值的步骤包括:

基于所述控制信号、遗忘因子以及时标分离参数来递归地更新协方差矩阵;以及

基于所述估计参数的所述前一值以及所述协方差矩阵来确定所述估计参数的所述当前值。

5. 根据权利要求4所述的方法,其中,所述协方差矩阵为所述控制信号的变化函数,其中,所述遗忘因子解释所述估计参数的所述前一值与所述估计参数的所述当前值之间的变化,并且其中,所述时标分离参数确保用于确定所述估计参数的时段慢于所述蒸气压缩系统的主时间常数。

6. 根据权利要求5所述的方法,其中,所述协方差矩阵基于

$$\Sigma_{k+1}^{-1} = \Sigma_k^{-1} + \epsilon \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \Sigma_k^{-1} - \frac{\epsilon}{\alpha^2} \Sigma_k^{-1} \phi_k \left(1 + \frac{1}{\alpha} \phi_k^T \Sigma_k^{-1} \phi_k \right)^{-1} \phi_k^T \Sigma_k^{-1}$$

来更新,其中,所述估计参数的所述当前值基于

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + \frac{\epsilon}{\alpha} \Sigma_k^{-1} \phi_k \left(1 + \frac{1}{\alpha} \phi_k^T \Sigma_k^{-1} \phi_k \right)^{-1} (e_k)$$

来确定,其中, ϵ 为时标分离参数, α 为遗忘因子, ϕ_k 为输入变化,并且 e_k 为误差信号, T 为转置运算符,并且 Σ_k^{-1} 为针对控制的时间步长 k 的所述协方差矩阵。

7. 根据权利要求1所述的方法,其中,确定所述控制信号的所述当前值的步骤包括:

将所述估计参数的所述当前值乘以适应增益和时标分离参数。

8. 根据权利要求7所述的方法,其中,所述性能度量为所述蒸气压缩系统的功耗,该方法还包括以下步骤:

如果所述估计参数的所述当前值为正,则将所述适应增益选择为负数;以及

如果所述估计参数的所述当前值为负,则将所述适应增益选择为正数。

9. 根据权利要求7所述的方法,所述方法还包括以下步骤:

将正弦扰动添加到所述控制信号。

10. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述控制信号表示被提供给反馈控制器的设定

点。

11. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述控制信号表示对致动器命令的修改。

12. 一种用于控制蒸气压缩系统的极值寻找控制器,该控制器包括:

处理器,所述处理器用于:使用为所述控制的前一时间步长所确定的估计参数的前一值以及控制信号的前一值来确定所述蒸气压缩系统的性能度量的值,其中,所述估计参数的值表示所述控制信号的值与所述性能度量的值之间的关系;以及基于所述估计参数的所述前一值以及所述性能度量的确定值与所述性能度量的测量值之间的误差来确定所述估计参数的当前值,其中,所述估计参数的所述当前值被确定为减小所述误差;以及

控制器,该控制器用于基于所述估计参数的所述当前值来确定控制信号。

13. 根据权利要求12所述的控制器,所述控制器还包括:

传感器,该传感器用于测量所述性能度量的所述值。

14. 根据权利要求12所述的控制器,其中,所述估计参数为所述控制信号与所述蒸气压缩系统的所述性能度量之间的凸关系的梯度的估计。

15. 根据权利要求12所述的控制器,其中,所述估计参数为一组控制信号与所述蒸气压缩系统的所述性能度量之间的凸关系的梯度的向量,其中,对于所述蒸气压缩系统的一个致动器有一个控制信号。

16. 根据权利要求12所述的控制器,其中,所述控制信号包括被提供给所述蒸气压缩系统的反馈控制器的设定点。

17. 根据权利要求12所述的控制器,其中,所述处理器被构造为基于所述控制信号、遗忘因子以及时标分离参数来递归地更新协方差矩阵,并且被构造为基于所述估计参数的前一值以及所述协方差矩阵来确定所述估计参数的当前值。

18. 根据权利要求17所述的控制器,其中,所述协方差矩阵为所述控制信号的变化函数,其中,所述遗忘因子解释所述估计参数的所述前一值与所述估计参数的所述当前值之间的变化,并且其中,所述时标分离参数确保用于确定所述估计参数的时段慢于所述蒸气压缩系统的主时间常数。

用于控制蒸气压缩系统的极值寻找控制器和方法

技术领域

[0001] 本发明属于用于蒸气压缩系统的控制领域,更具体地属于用于优化蒸气压缩系统的性能度量的控制方法。

背景技术

[0002] 蒸气压缩系统(诸如热泵、制冷和空调系统)广泛用于工业和居住应用。将变速压缩机、可变位置阀以及变速风机引入用于蒸气压缩循环已经大大提高了这种系统的操作灵活性。可以通过正确控制这些新部件来提高蒸气压缩系统的效率。

[0003] 例如,可以调节压缩机的速度来调制冷剂的流量。可以改变蒸发器风机和冷凝器风机的速度来改变空气和热交换器之间的热传递。膨胀阀开度的变化可能直接影响蒸气压缩系统中的高压和低压之间的压降,这转而影响制冷剂的流速以及对应蒸发器出口处的过热温度。

[0004] 到递送特定热量的蒸气压缩系统的命令输入的组合通常不是唯一的,并且这些各种组合消耗不同量的能量。因此,期望使用使系统能量最小化且使系统效率最大化的输入的组合来操作蒸气压缩系统。

[0005] 传统上,使能量效率最大化的方法依赖使用蒸气压缩系统的物理性质的数学模型。这些基于模型的方法尝试描述蒸气压缩系统的部件的命令输入对系统的热力学行为和所消耗能量的影响。在这些方法中,模型用于预测既满足热负荷要求且使能量最小化的输入的组合。

[0006] 然而,将数学模型用于选择优化输入具有若干重要缺点。首先,为了产生数学上易管理的表示,模型依赖简化假定。这些假定通常忽略重要效应或不考虑安装特定特性(诸如房间尺寸),这使得系统的模型与系统的实际行为偏离。

[0007] 其次,制造过程期间这些系统的变化通常如此大以至于产生展示不同输入输出特性的同一类型的蒸气压缩系统,因此,单个模型无法准确描述作为制造过程的结果而生产的副本之间的变化。

[0008] 第三,这些模型难以导出并校准。例如,对于所用的各类型压缩机在实验上确定描述蒸气压缩系统的部件(例如,压缩机)的操作的参数,并且完整蒸气压缩系统的模型可能具有几十个这种参数。对于各模型确定这些参数的值花费大量精力。同样,已知蒸气压缩系统随着时间变化。曾经准确描述蒸气压缩系统的操作的模型可能随着系统变化(例如,由于缓慢泄漏制冷剂或热交换器磨损的累积)而在后来不准确。

[0009] 优化性能度量的基于模型的控制器的另选方案由于它们使感兴趣的信号最大化或最小化的能力而包括“极值寻找”控制器(ESC)。传统ESC通过将扰动应用于一个或更多个输入且测量性能度量中产生的扰动来积极地以受控设备做实验。这些扰动在一些时窗上被平均,以产生性能度量的梯度的估计。梯度的该局部估计然后用于沿使成本最大化或最小化的梯度方向来导引输入的平均值。

[0010] 例如,US8,694,131中描述的方法教导:基于扰动的极值寻找控制器可以被构造为

修改蒸气压缩系统的操作,使得致动器的能量最佳组合用于指导蒸气压缩系统的操作。虽然基于扰动的极值寻找方法可以在不依赖模型的情况下实现凸性能度量的最佳值,但该方法经受缓慢的收敛速率。因为ESC的目的是找到最佳的稳态操作点,所以极值寻找控制器以准稳定方式(即,在没有引起设备的动态响应的情况下)控制设备。在其他方面,由于瞬态响应产生的在所施加控制与测量之间的相位信息无法与由于性能度量的正弦扰动测量而产生的相位信息区分。

[0011] 如果与蒸气压缩系统的自然力学关联的最慢(因此而主要的)时间常数称为 τ_{plant} ,那么扰动时段 τ_{perturb} 必须更慢(更大的时间常数): $\tau_{\text{perturb}} \gg \tau_{\text{plant}}$ 。进一步地,为了获得(平均)梯度的准确估计,ESC必须平均若干扰动,并且因为极值寻找发生在该平均梯度的时标上,所以极值寻找控制器的收敛速率比设备动力学慢两个时标: $\tau_{\text{adapt}} \gg \tau_{\text{perturb}} \gg \tau_{\text{plant}}$ 。

[0012] 因为蒸气压缩系统的主时间常数通常在数十分钟级,所以极值寻找控制器可能花费数小时来收敛到最佳点。并且因为已知作用于蒸气压缩系统的扰动具有更快的动力学,所以最佳操作点可能在扰动ESC收敛之前变化。因此,基于扰动的极值寻找的缓慢收敛特性代表对蒸气压缩系统性能的实时优化的解决方案的障碍。

[0013] 研究人员长期以来与基于扰动ESC的缓慢收敛速率作斗争。最初的努力集中于引入将响应瞬态部分的相位的效应与对扰动的响应分离的过滤器。然而,该方法需要凭借设备的特定详细知识来设计过滤器,并且即使在该信息可用时,因为仍然需要扰动平均,所以仅少量提高收敛速率。

[0014] 其他方法已考虑对性能度量的梯度进行经评估和考虑海森矩阵。然而,因为海森矩阵的值随着接近最佳点而快速接近零,所以该方法很快被噪声淹没。

[0015] 因此,领域中需要提高极值寻找控制器的收敛速率。

发明内容

[0016] 本发明的一些实施方式的一个目的是提高使表示蒸气压缩系统的性能度量的信号最大化或最小化的极值寻找控制方法的收敛速率。优化性能度量需要表示控制信号的值与性能度量的值之间的关系的参数的估计。这种参数的示例包括性能度量相对于控制信号的梯度(斜率)。本发明的一些实施方式基于以下认识:虽然不应对于控制的各时间步长精确估计这种参数,但只要估计在控制的瞬态时间期间收敛到参数的真实值就可以近似所述参数。

[0017] 这种认识允许利用极值寻找控制的迭代性质来递归且与控制信号的确定同时地更新参数。例如,估计参数的当前值可以基于估计参数的前一值以及性能度量的确定值与性能度量的测量值之间的误差来确定。这样,保证估计参数(例如,梯度)收敛到真实梯度,而不管噪声如何。

[0018] 本发明的一些实施方式基于以下认识:随着接近凸关系的最佳值,该关系的梯度可以用时变参数来表示。还认识到,估计算法可以被制订为估计该时变梯度,并且该估计梯度可以用于计算朝向最佳操作点驱动系统的控制动作。还认识到,当被作为时变估计问题而制订时,消除平均估计梯度的需要,这产生更快的收敛速率。

[0019] 本发明的一些实施方式基于以下认识:蒸气压缩系统输入与性能度量之间的凸关系可以由使用应用于蒸气压缩系统的同一输入的函数来近似,以基于估计梯度生成估计的

系统输出。一些实施方式在该函数中修改估计梯度,使得估计的性能度量与测量的性能度量匹配,并且将估计梯度驱动到实际梯度。为了将系统驱动至最佳点,控制规律使用估计梯度来确定,并且随着系统从次佳点移至最佳点,估计梯度的值随着它接近零而追踪时变实际梯度。

[0020] 在各种实施方式中,控制信号可以为向量,并且系数可以为标量、具有合适维度的向量或矩阵以确保多维计算是足够的。以该方式,一些实施方式可以同时优化多个蒸汽压缩系统致动器。

[0021] 因为可以在不干扰该极值寻找控制器的情况下拒绝干扰(诸如室外气温和热负荷的变化),所以本发明的一些实施方式应用于优化易变顾客环境中的蒸汽压缩系统。

[0022] 本发明的一些实施方式可以用来直接优化一个或更多个致动器命令(即,一些致动器由极值寻找控制器直接控制),或者通过修改源于反馈控制器的一个或更多个致动器命令来优化一个或更多个致动器命令。在后者的配置中,尽管仅一部分致动器受极值寻找控制器直接操纵,但所有致动器命令实现它们的最佳值。这是因为蒸汽压缩系统用同时控制全部输入以拒绝干扰(包括可以被视为源于极值寻找控制器的干扰)的多变量反馈控制器来反馈。

[0023] 本发明的一个实施方式降低能耗,在这种情况下,性能度量可以为蒸汽压缩机的测量能耗或估计能耗。

[0024] 本发明的另一个实施方式提高蒸汽压缩系统的供热或冷却能力,例如以在最少量的时间内实现设定点温度的变化。在这种情况下,性能度量可以为测量冷却能力或估计冷却能力或测量供热能力或估计供热能力。

[0025] 本发明的另一个实施方式提高性能系数(COP),该COP例如被定义为由能耗标准化的蒸汽压缩系统所提供的供热或冷却量。在该实施方式中,性能度量可以为所述能耗除以供热或冷却能力。

[0026] 因此,本发明的一个实施方式公开了一种用于控制蒸汽压缩系统的方法。该方法在控制的当前时间步长包括以下步骤:使用为所述控制的前一时间步长所述确定的估计参数的前一值以及控制信号的前一值来确定所述蒸汽压缩系统的性能度量的值,其中,所述估计参数的值表示所述控制信号的值与所述性能度量的值之间的关系;基于所述估计参数的所述前一值以及所述性能度量的确定值与所述性能度量的测量值之间的误差来确定所述估计参数的当前值;以及基于所述估计参数的所述当前值来确定所述控制信号的当前值。所述步骤由处理器来执行。

[0027] 另一个实施方式公开了一种用于控制蒸汽压缩系统的极值寻找控制器,该控制器包括:估计器,该估计器用于确定所确定的性能度量与所测量的性能度量之间的误差,并且用于估计表示控制信号的值与所述性能度量的值之间的关系的参数,其中,所述参数被确定为减小所述误差;以及控制规律单元,该控制规律单元用于基于所述估计参数来确定控制信号。

[0028] 定义

[0029] 在描述本发明的实施方式时,以下定义自始至终(包括上述内容)适用。

[0030] “计算机”是指能够接受结构化输入,根据规定规则处理结构化输入并产生处理结果作为输出的任意设备。计算机的示例包括计算机、通用计算机、超级计算机、大型计算机、

超级迷你计算机、迷你计算机、工作站、微型计算机、服务器、交互式电视、计算机和交互式电视的混合组合以及仿真计算机和/或软件的专用硬件。计算机可以具有单个处理器或多个处理器,多个处理器可以并行和/或非并行操作。计算机还指经由用于在计算机之间发送或接收信息的网络连接在一起的两个或更多个计算机。这种计算机的示例包括用于经由由网络链接的计算机处理信息的分布式计算机系统。

[0031] “中央处理单元(CPU)”或“处理器”是指读取并执行软件指令的计算机或计算机的部件。

[0032] “存储器”或“计算机可读介质”是指用于存储可由计算机访问的数据的任意存储器。示例包括磁硬盘、软盘、光盘(像CD-ROM或DVD)、磁带、存储芯片、用于承载计算机可读电子数据(诸如用于发送和接收电子邮件或用于访问网络的数据)的载波以及计算机存储器(例如,随机存取存储器(RAM))。

[0033] “软件”是指操作计算机的规定规则。软件的示例包括软件、代码段、指令、计算机程序以及程控逻辑。智能系统的软件可以能够自学习。

[0034] “模块”或“单元”是指计算机中执行任务或任务的一部分的基本部件。它可以由软件或硬件二者之一来实施。

[0035] “控制系统”是指管理、命令、指导或调节其他装置或系统的行为的装置或一组装置。控制系统可以由软件或硬件二者之一来实施,并且可以包括一个或数个模块。

[0036] “计算机系统”是指具有计算机的系统,其中,计算机包括具体实施操作计算机的软件的计算机可读介质。

[0037] “网络”是指由通信设施连接的若干计算机和关联装置。网络涉及永久连接(诸如电缆)、临时连接(诸如借助电话或其他通信链路进行的连接)和/或无线连接。网络的示例包括互联网(诸如因特网)、内联网、局域网(LAN)、广域网(WAN)以及网络(诸如因特网和内联网)的组合。

[0038] “蒸气压缩系统”是指基于热力学、流体力学和/或热传递原理使用蒸气压缩循环来借助系统的部件移动制冷剂的系统。

[0039] “HVAC”系统是指实施蒸气压缩循环的任意供热通风与空调(HVAC)系统。HVAC系统涉及非常宽的一组系统,从向建筑物的居住者仅供给室外空气的系统到仅控制建筑物温度的系统,到控制温度和湿度的系统。

[0040] “蒸气压缩系统的部件”是指蒸气压缩系统的具有可由控制系统控制的操作的任意部件。部件包括但不限于具有用于借助系统压缩并泵送制冷剂的可变速度的压缩机、用于在系统的高压与低压之间提供可调压降的膨胀阀以及蒸发热交换器和冷凝交换器,蒸发热交换器和冷凝交换器各包含用于调节穿过热交换器的空气流速的变速风机。

[0041] “蒸发器”是指蒸气压缩系统中的热交换器,在该热交换器中,穿过热交换器的制冷剂在热交换器的长度上蒸发,使得制冷剂在热交换器出口处的比焓高于制冷剂在热交换器入口处的比焓,并且制冷剂通常从液体变为气体。在蒸气压缩系统中可以存在一个或更多个蒸发器。

[0042] “冷凝器”是指蒸气压缩系统中的热交换器,在该热交换器中,穿过热交换器的制冷剂在热交换器的长度上冷凝,使得制冷剂在热交换器出口处的比焓低于制冷剂在热交换器入口处的比焓,并且制冷剂通常从气体变为液体。在蒸气压缩系统中可以存在一个或更

多个冷凝器。

[0043] “一组控制信号”是指用于控制蒸气压缩系统的部件的操作的输入的具体值。该组控制信号包括但不限于压缩机的速度值、膨胀阀的位置、蒸发器中的风机的速度以及冷凝器中的风机的速度。

[0044] “设定点”是指系统(诸如蒸气压缩系统)的旨在作为操作的结果而达到并维持的目标值。术语“设定点”应用于具体组的控制信号以及热力学和环境参数的任意特定值。

[0045] “测量输出”是指可以使用机器中的传感器测量的信号(例如,房间气温)。

[0046] “控制输入”是指可以由控制器操纵的信号(例如,压缩机频率)。

[0047] “性能度量”是指待优化信号。可以测量或估计所述性能度量。

附图说明

[0048] 图1是根据本发明的一些实施方式的受极值寻找控制器(ESC)控制的蒸气压缩系统的部件和管路排列的图。

[0049] 图2是用于一些实施方式的蒸气压缩系统中的部件和信号、传感器以及控制器的构造的图。

[0050] 图3是蒸气压缩系统中的一个致动器与性能度量之间的凸关系的曲线图。

[0051] 图4A是根据本发明的一些实施方式的用于控制蒸气压缩系统的方法的框图。

[0052] 图4B是根据本发明的一些实施方式的时变极值寻找控制器的框图。

[0053] 图5是根据本发明的一些实施方式的用于确定估计参数的方法的图。

[0054] 图6是根据本发明的一个规划的用于确定控制信号的方法的图。

[0055] 图7A是用于使性能度量最小化问题的极值寻找方法的使用的示意图。

[0056] 图7B是表示图7A的控制器性能的比较的曲线图。

[0057] 图7C是表示图7A的控制器性能的比较的曲线图。

具体实施方式

[0058] 图1示出了根据本发明的一些实施方式的受极值寻找控制器(ESC)控制的蒸气压缩系统100的部件和管路排列。蒸气压缩系统100包括部件(例如,可变设置致动器)。部件可以包括位于室内空间或区域140中的室内单元热交换器120、位于周围环境中的室外单元热交换器115、压缩机110以及膨胀阀131。另外,系统100可以包括流动换向阀112,该流动换向阀112用于向室外单元热交换器或室内单元热交换器二者之一引导离开压缩机的高压制冷剂,并且向压缩机的入口引导从室内单元热交换器或室外单元热交换器二者之一返回的低压制冷剂。

[0059] 在向室外单元热交换器引导高压制冷剂的情况下,室外单元热交换器充当冷凝器,并且室内单元充当蒸发器,其中,系统拒绝热量从区域到周围环境,这在操作上称为“冷却模式”。相反,在向室内单元热交换器引导高压制冷剂的情况下,室内单元热交换器充当冷凝器,并且室外单元热交换器充当蒸发器,这从周围环境提取热量并将该热量泵送到区域中,这在操作上称为“供热模式”。

[0060] 图2示出了用于一些实施方式的蒸气压缩系统中的部件和信号、传感器以及控制器的构造。通常,反馈控制器205从传感器210读取信息,传感器210被构造为测量关于系统

操作的各种温度、压力、流量速或其他信息。另外,反馈控制器可以设置有设定点206,该设定点206表示过程的测量信号或估计信号的期望值,诸如所期望区域温度或所期望蒸发器过热温度。设定点信息可以来自恒温器、无线远程控制器或内部存储或储存介质。反馈控制器然后计算致动器命令,使得将一些所测量值驱动到它们的设定点。这些致动器命令可以包括室内单元风机速度命令220、室外单元风机速度命令221、压缩机转速222、膨胀阀位置223以及流动换向阀位置224。以该方式,控制器控制蒸气压缩系统的操作,使得对于给定热负荷实现设定点值。

[0061] 已经示出,增大数量的可变致动器已经为蒸气压缩系统提供另外的操作灵活度。该另外灵活度已经被开发为选择满足设定点且还使能耗最小化的致动器命令的组合。另外,设定点本身可以被视为可以被开发为使能耗最小化的蒸气压缩系统的操作的灵活度。

[0062] 极值寻找控制器400被构造为接受蒸气压缩系统的能耗201的测量或估计240,并且对由反馈控制器提供的致动器命令中的一个或更多个提供修改230、231,或者对设定点值206中的一个或更多个提供修改229。优化性能度量需要估计表示控制信号值与性能度量值之间的关系的参数。

[0063] 本发明的一些实施方式可以通过选择设定点而不是直接操纵致动器来优化性能度量。通常,用于蒸气压缩系统的反馈控制器被设计为向设定点调节测量信号。设定点可以在蒸气压缩系统之外(诸如期望的室温),或者它们可以在内部(诸如期望的压缩机排出温度或期望的蒸发器过热温度)。如果设定点与性能度量之间存在凸关系,则本发明的一些实施方式自动选择优化性能度量的设定点。

[0064] 图3A示出了在用于控制蒸气压缩系统的一个或数个致动器的控制信号(诸如室内单元风机速度350)与性能度量351之间映射的稳态的凸关系355的曲线图。例如,如果性能度量为蒸气压缩系统的能耗,则关系355示出了对于恒定温度和热负荷,存在使能耗370最小化的一组致动器命令。

[0065] 极值寻找控制器估计该映射的梯度或斜率,并且根据特定应用沿使整体性能度量最大化或最小化二者之一的方向驱动致动器。例如,如果初始风机速度365大于最佳风机速度,则极值寻找控制器估计风机速度与性能度量之间的关系的梯度366,并且将风机速度驱动至更小值,直到达到最佳值370为止。

[0066] 在一些实施方式中,表示控制信号值与性能度量值之间的关系的参数包括性能度量相对于控制信号的梯度(斜率)。本发明的一些实施方式基于以下认识:不应对于控制的各种时间步长精确估计这种参数,但只要估计在控制的瞬态时间期间收敛到参数的真实值就可以近似这种参数。

[0067] 这种认识允许利用极值寻找控制的迭代性质并递归且与控制信号的确定同时地更新参数。例如,极值寻找控制可以被形成为(i)所耦合参数的时变估计(ii)使用所估计参数来导引控制信号的控制规律。具体地,估计参数的当前值可以基于估计参数的前一值以及性能度量的确定值与性能度量的测量值之间的误差来确定。这样,保证估计参数(例如,梯度)收敛到真实梯度,而不管噪声如何。进一步地,该方法不依赖平均,因此比通常使用的基于扰动的方案更快地收敛。当该估计的梯度用于控制规律时,控制信号被驱动到优化性能度量的值。

[0068] 图4A示出根据本发明的一些实施方式的用于控制蒸气压缩系统的方法的框图。该

方法的步骤可以由处理器(例如,控制器400的处理器)来执行,并且包括在控制k的当前时间步长时,使用对于控制的前一时间步长所确定的估计参数的前一值472和控制信号的前一值471来确定470蒸汽压缩系统的性能度量值475。

[0069] 所估计参数的值表示控制信号的值与性能度量的值之间的关系。在一个实施方式中,估计参数为凸关系的梯度(例如,凸关系355的梯度366)的估计。

[0070] 在另一个实施方式中,将对多个致动器的命令收集在向量中,并且通过同时修改对多个致动器的命令来优化性能度量。估计参数在该实施方式中然后表示凸关系的梯度的向量,其中,向量中的各项表示性能度量相对于特定致动器的梯度。进行对极值寻找算法中的项的合适修改,以确保多维计算是合适的。

[0071] 各种实施方式基于以下认识:当估计输出追踪测量输出时,估计梯度被收敛到真实梯度。因此,该方法还包括以下步骤:基于估计参数的前一值475和性能度量的确定值475与性能度量的测量值476之间的误差481确定480估计参数的当前值485。例如,确定估计参数的当前值,以减小误差。

[0072] 接着,该方法包括以下步骤:基于估计参数485的当前值确定490控制信号的当前值495,使得优化性能度量,例如,降低系统的能耗。

[0073] 图4B是根据本发明的一个实施方式的时变极值寻找控制器的框图。控制器包括时变参数估计器,该估计器用于确定表示控制信号的值与性能度量的值之间的关系的参数(例如,估计梯度430);以及控制规律单元,该控制规律单元用于基于估计梯度确定控制信号,以提高性能度量。

[0074] 控制器例如从传感器接收离散时间测量或接收性能度量的估计 y_k 440。可选地,可以预调节401或重构表示性能度量的信号。预调节操作可以包括用前一测量 y_{k-1} 减去当前测量 y_k ,以获得测量的变化 Δy_k 402。

[0075] 单独地,还可以根据估计例程的详情预调节403或重构控制信号 u_k 450(例如,应用于受控系统的输入或提供给反馈控制器的设定点)。与测量预调节相同,输入预调节可以包括用前一输入 u_{k-1} 减去当前输入 u_k ,以获得输入的变化 $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$ 404。

[0076] 使用输入的变化,如下使用预测405操作计算所估计的输出变化:假定系统的真实梯度为时变参数 θ_k 。所估计的输出变化 $\Delta \hat{y}_k$ 406根据 $\Delta \hat{y}_k = \hat{\theta}_k^T \Delta u_k$ 与输入的变化有关,其中, $\hat{\theta}_k$ 表示所估计的梯度。

[0077] 时变参数估计器的剩余部件被设计为通过操纵所估计梯度来向所测量的输出变化驱动所估计的输入变化。为了获得误差信号410,从所测量的输出变化 Δy_k 402减去所估计的输出变化 $\Delta \hat{y}_k$ 406。该误差信号用于驱动递归参数估计例程415,并且获得要在下一时间步长期间使用的梯度 $\hat{\theta}_{k+1}$ 420的新估计。

[0078] 随着朝向最佳操作点驱动系统,梯度大小(和实施方式的多变量版本中的方向)变化,并且在估计例程中解释该时变性质。递归参数估计例程不使用平均来获得梯度的估计。出于该原因,到真实梯度的收敛比在基于扰动的极值寻找方法中进行得更快。

[0079] 除了在确定所估计输出中的作用,所估计梯度 $\hat{\theta}_k$ 430还用于计算极值寻找控制器的控制规律部件中的控制动作460。使用所估计的梯度,确定控制规律,使得输入朝向最佳点(即,朝向零驱动梯度的点)驱动系统。另外,可以将正弦扰动455添加到输入,以提供对系

统的充足激励,使得可以估计梯度。下面提供关于计算控制动作460的更多细节。

[0080] 在一些实施方式中,信号可以为向量值,并且系数可以为标量,确保多维计算的向量或合适维数的矩阵是适合的。以该方式,不同实施方式可以同时优化蒸气压缩系统致动器的多样性。

[0081] 参数估计

[0082] 图5是根据一个实施方式的用于递归地更新估计参数(例如,梯度415)的方法的框图。参数估计器的目的是通过如下方式获得用于梯度 $\hat{\theta}_k$ 430的估计:递归地更新协方差矩阵 Σ_k^{-1} 516,且使用该矩阵来:(i)更新增益矩阵 M_k 501,增益矩阵 M_k 501乘以误差信号 e_k 且在时间503上积分;以及(ii)更新增益矩阵 R_k 511,增益矩阵 R_k 511被低通滤波513,以在当前时间步长 Σ_{k+1}^{-1} 514获得协方差矩阵的估计,所述协方差矩阵的估计被延迟515,以便用于下一迭代中。从前一迭代延迟的值能在延迟块 Σ_k^{-1} 516的输出端获得,该延迟块 Σ_k^{-1} 516用于更新协方差矩阵 Σ_k^{-1} 516,并且递归循环重复。

[0083] 因此,本实施方式基于控制信号、遗忘因子以及时标分离参数来递归地更新协方差矩阵,并且基于估计参数的前一值与协方差矩阵确定估计参数的当前值。

[0084] 在一些实施方式中,协方差矩阵 Σ_k^{-1} 516为控制信号 k 的变化的函数。遗忘因子解释估计参数的前一值与当前值之间的变化。同样,时标分离参数确保用于确定估计参数的时段慢于蒸气压缩系统的主时间常数。

[0085] 低通滤波操作513的替代解释是具有遗忘因子 α 的离散时间积分器,该离散时间积分器允许参数估计方法估计时变信号。遗忘因子 α 是常数,值在0和1之间。例如,遗忘因子的值基于所期望的收敛速率来选择。接近1的遗忘因子 α 的值用于期望时变参数快速变化的系统,相反,接近0的遗忘因子 α 的值用于期望时变参数缓慢变化的系统。

[0086] 增益矩阵 M_k 501可以根据 $M_k = \frac{\Sigma_k^{-1} \phi_k}{1 + \phi_k^T \Sigma_k^{-1} \phi_k}$ 来确定,并且基于协方差矩阵 Σ_k^{-1} 和输入变化 k 的新值且还使用遗忘因子 α 和时标分离参数 ϵ 在各时间步长更新。当用于 M_k 501、离散时间积分器503以及单个步长延迟425的运算被展开到用于 $\hat{\theta}_{k+1}$ 420的方程中时,产生的方程提供递归梯度更新计算: $\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + \frac{\epsilon}{\alpha} \Sigma_k^{-1} \phi_k (1 + \frac{1}{\alpha} \phi_k^T \Sigma_k^{-1} \phi_k)^{-1} (e_k)$,其中, e_k 为之前描述的误差信号。

[0087] 用于 R_k 511的方程被定义为: $R_k = \frac{\Sigma_k^{-1} \phi_k \phi_k^T \Sigma_k^{-1}}{1 + \phi_k^T \Sigma_k^{-1} \phi_k}$,并且,类似于 M_k ,基于协方差矩阵 Σ_k^{-1} 和输入变化 k 的新值且还使用遗忘因子 α 和时标分离参数 ϵ 在各时间步长更新该方程。当用于 R_k 511、离散时间低通滤波器513以及单个步长延迟515的运算被展开到用于 Σ_{k+1}^{-1} 514的方程中时,时变估计器的递归特性变得清楚: $\Sigma_{k+1}^{-1} = \Sigma_k^{-1} + \epsilon \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \Sigma_k^{-1} - \frac{\epsilon}{\alpha^2} \Sigma_k^{-1} \phi_k \phi_k^T \Sigma_k^{-1} + \frac{1}{\alpha^2} \phi_k^T \Sigma_k^{-1} \phi_k \Sigma_k^{-1}$ 。

[0088] 控制规律计算

[0089] 图6示出了用于计算控制动作460的方法的框图。估计参数的当前值(例如,估计梯

度 $\hat{\theta}_k$ 430)乘以适应增益 k_g 和时标分离参数 ϵ 601。该运算的结果被加到可选抖动信号455,该抖动信号通常被实施为正弦。然后将产生的信号传到离散时间积分器602,以获得下一时间步长 u_{k+1} 的控制值,并且传到单个步进延迟603,以获得当前时间步长 u_k 的输入。

[0090] 控制规律被设计为基于估计梯度沿使性能度量最大化或最小化的方向驱动输入。如果目的是使功耗最小化,并且当前时间步长的估计梯度为正(例如,时间步长 k 时的当前风机速度处于图3中的点365处),那么当前致动器值大于最佳值且其值应由控制器减小。为了最小化目的, k_g 被选择为负,因此在该示例中向离散时间积分器提供负值,并且结果为控制动作的平均值如所期望的随着时间而降低。

[0091] 因此,如果性能度量为蒸气压缩系统的功耗,那么如果估计参数的当前值为正,则一些实施方式将适应增益选择为负数,并且如果估计参数的当前值为负,则将适应增益选择为正数。

[0092] 一个实施方式将用于蒸气压缩系统的时变极值寻找控制器表示为如下的一组离散时间方程式。

[0093] 时变梯度估计器方程采取以下形式:

$$[0094] \quad \Delta \hat{y}_k = \phi_k^T \hat{\theta}_k$$

[0095]

$$\Sigma_{k+1}^{-1} = \Sigma_k^{-1} + \epsilon \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \Sigma_k^{-1} - \frac{\epsilon}{\alpha^2} \Sigma_k^{-1} \phi_k (1 + \frac{1}{\alpha} \phi_k^T \Sigma_k^{-1} \phi_k)^{-1} \phi_k^T \Sigma_k^{-1}$$

$$[0096] \quad \hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + \frac{\epsilon}{\alpha} \Sigma_k^{-1} \phi_k (1 + \frac{1}{\alpha} \phi_k^T \Sigma_k^{-1} \phi_k)^{-1} (e_k)$$

[0097] 控制规律方程为 $u_{k+1} = u_k - \epsilon k_g \hat{\theta}_k + \epsilon d_k$ 。

[0098] 可选地,射影算子可以用于计算 $\hat{\theta}_{k+1}$,该射影算子将 $\hat{\theta}_{k+1}$ 的计算值约束在预定可行一组估计参数 Θ_0 内。例如,人们可以确定全部估计梯度必须小于某一上限 L_1 的先验,在这种情况下,可行的一组估计参数为 $\Theta_0 = \{ \hat{\theta}_k | \|\hat{\theta}_k\| \leq L_1 \}$ 。在这种情况下,用于 $\hat{\theta}_{k+1}$ 的方程变为

$$\hat{\theta}_{k+1} = \text{Proj} \left[\hat{\theta}_k + \frac{\epsilon}{\alpha} \Sigma_k^{-1} \phi_k (1 + \frac{1}{\alpha} \phi_k^T \Sigma_k^{-1} \phi_k)^{-1} (e_k), \Theta_0 \right]$$

[0099] 示例

[0100] 图7A示出了使用极值寻找方法用于使包括一阶线性差分方程720和静态输出非线性725的简单汉默斯坦(Hammerstein)系统的性能度量最小化问题的示意图。控制器710生成被提供给优化目标730的控制信号701,并且接收性能度量703的测量值。除了假定输入与输出之间的关系为凸且性能度量 y 703的最佳值最小之外,控制器没有汉默斯坦(Hammerstein)系统的模型或不明确知道其最佳值的性质。

[0101] 该系统730的方程由 $\begin{matrix} x_{k+1} = 0.8x_k + u_k \\ y_k = (x_k - 3)^2 + 1 \end{matrix}$ 给出,该方程在 $\begin{matrix} u^* = 0.6 \\ y^* = 1 \end{matrix}$ 时具有单个最佳点。

[0102] 图7B和图7C示出了表示控制器710从初始输入值 $u=2$ 开始且100个步长之后启动

(ON) 的性能的比较好的曲线图。传统控制器选择将系统输出750在大约4000个步长中驱动到它的最佳值770的输入740 (由于传统方法的缓慢速率, 图7B和图7C中无法示出最终的收敛), 而一些实施方式的时变ESC选择将系统输出755在大约250个步长中驱动到它的最佳值770的输入745。

[0103] 本发明的上述实施方式可以以大量方式中的任一方式来实现。例如, 实施方式可以使用硬件、软件或其组合来实施。当在软件中实施时, 可以在任意合适的处理器或处理器集合上执行软件代码, 无论处理器或处理或处理器集合是设置在单个计算机中还是分布在多个计算机之间。这种处理器可以被实施为集成电路, 一个或更多个处理器在集成电路部件中。但是, 处理器可以使用任何合适格式的电路来实施。

[0104] 同样, 这里概述的各种方法或处理器可以被编码为可以在采用各种操作系统或平台中的任意一个的一个或更多个处理器上执行。另外, 这种软件可以使用若干合适编程语言和/或编程或脚本工具中的任一来书写, 并且还可以被编译为可执行的机器语言代码或在框架或虚拟机上执行的中间代码。通常, 在各种实施方式中, 可以根据期望组合或分配程序模块的功能。

[0105] 同样, 本发明的实施方式可以具体实施为已提供示例的方法。被执行为方法的一部分的动作可以以任意合适的方式来排序。因此, 实施方式可以被构建为在实施方式中, 动作以不同于所例示的顺序来执行, 这可以包括同时执行一些动作, 即使该动作在示例性实施方式中被示出为顺序动作。

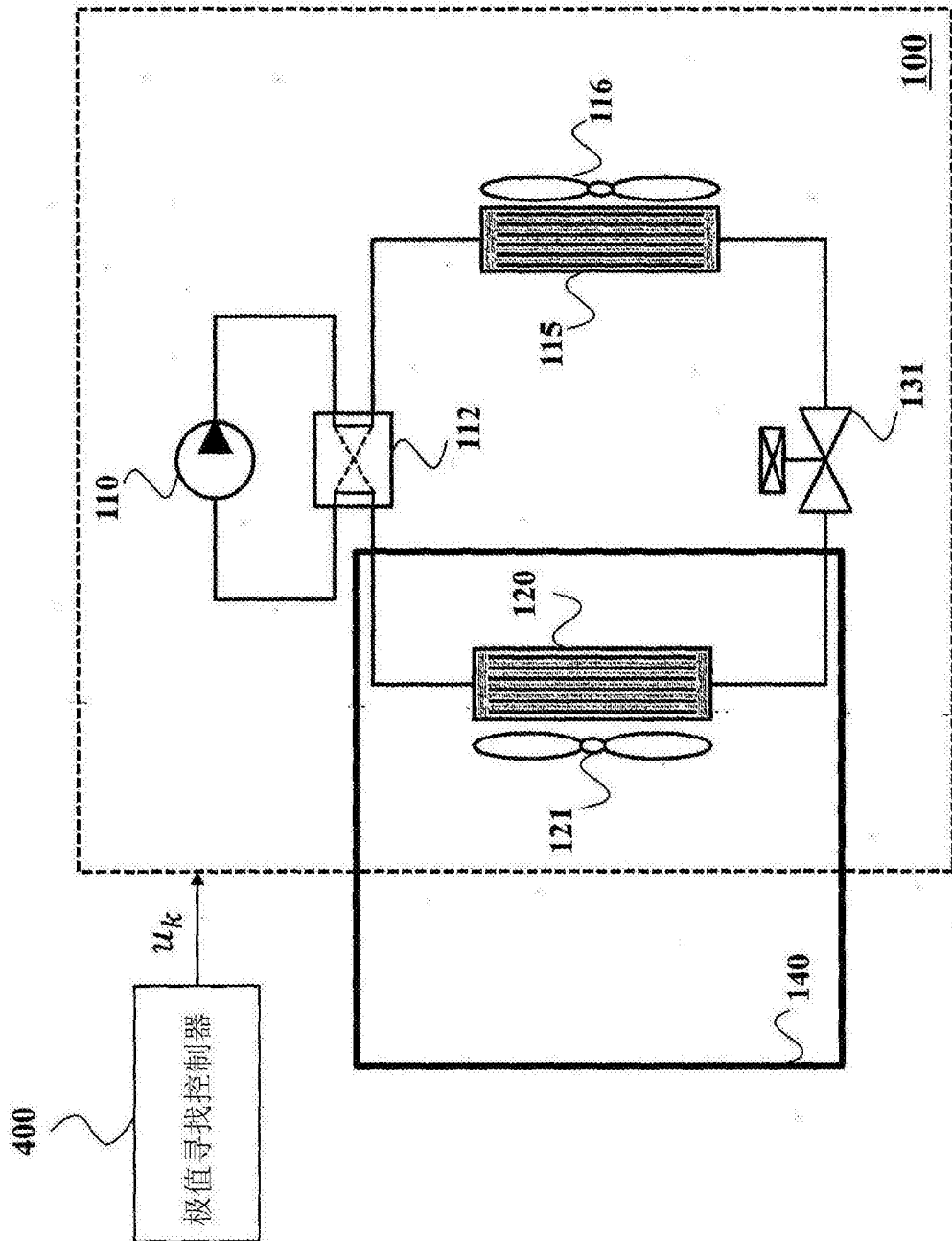


图1

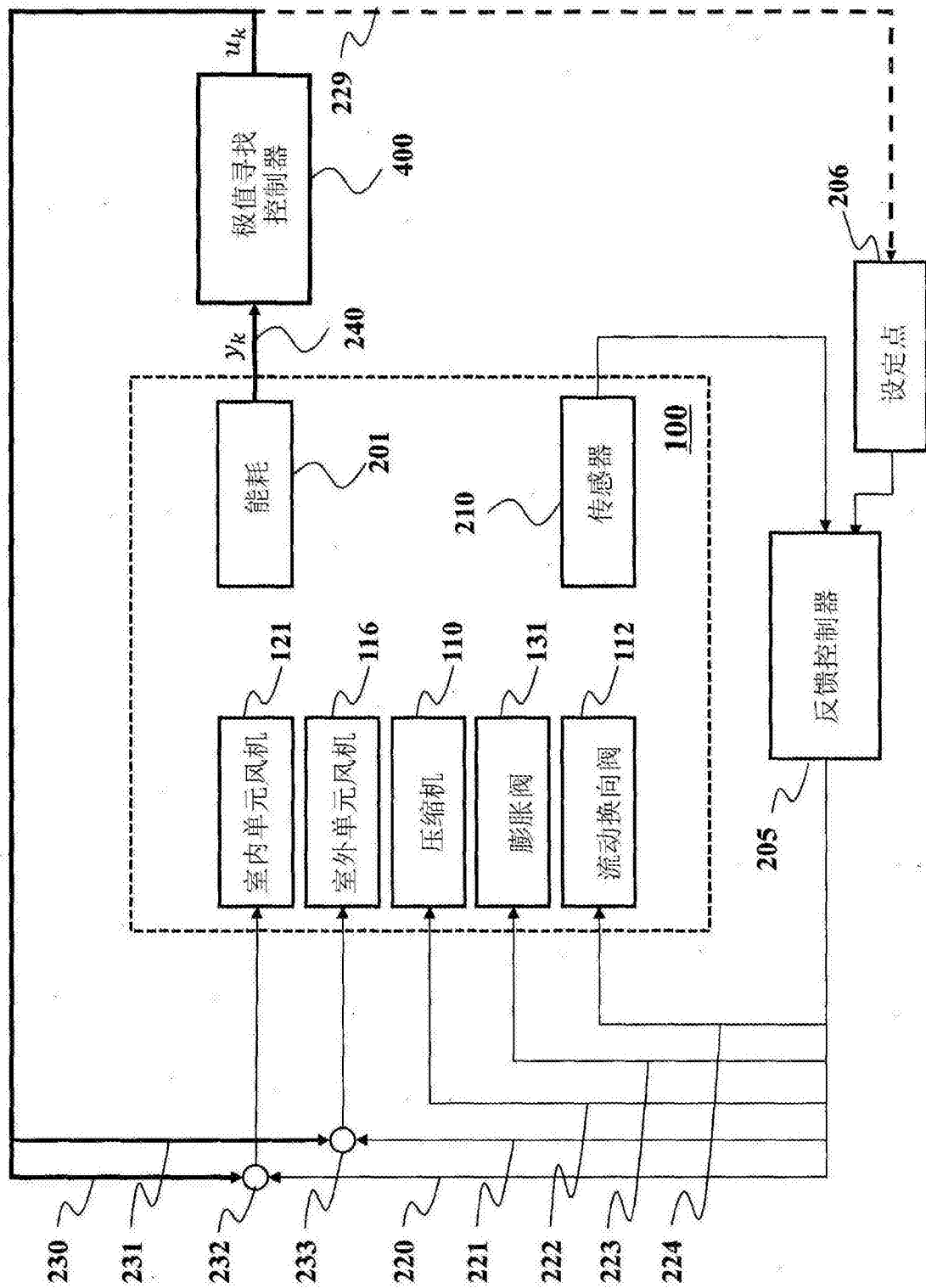


图2

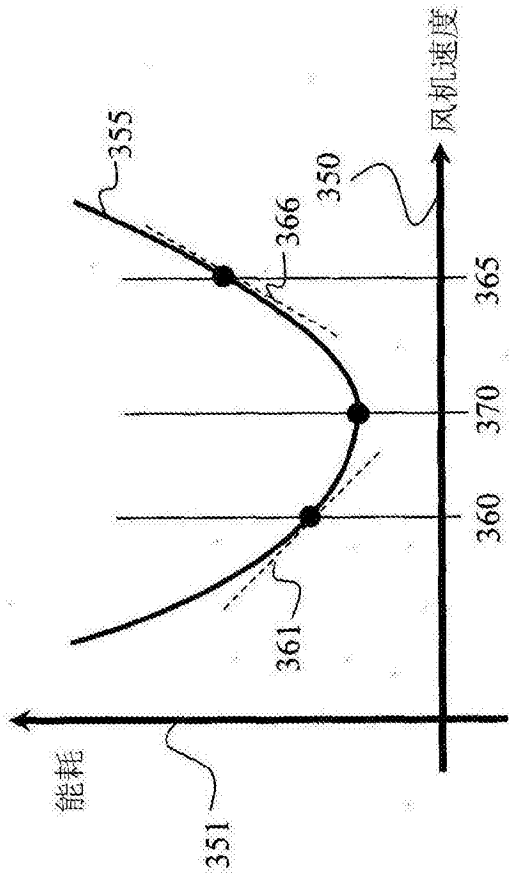


图3

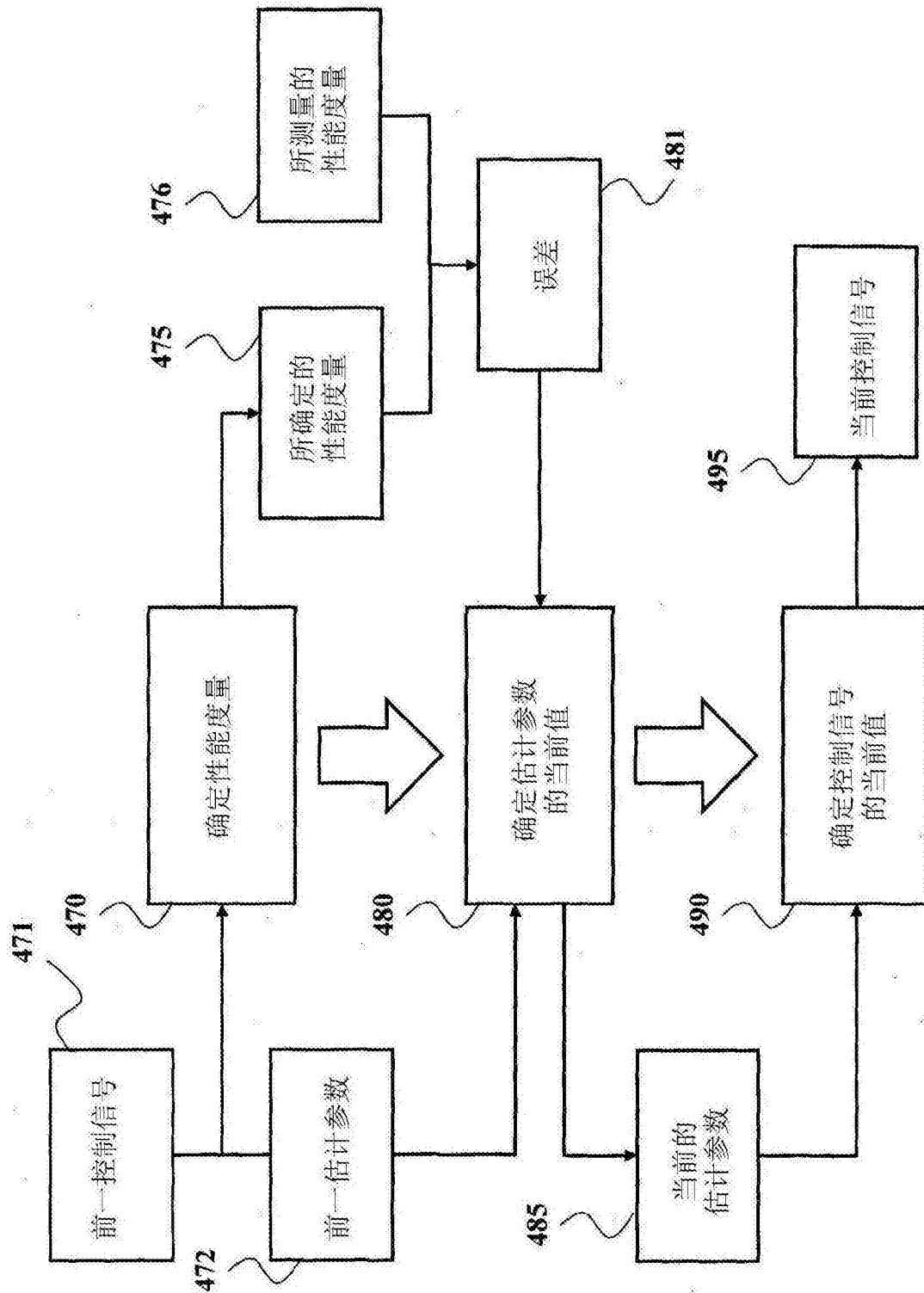


图4A

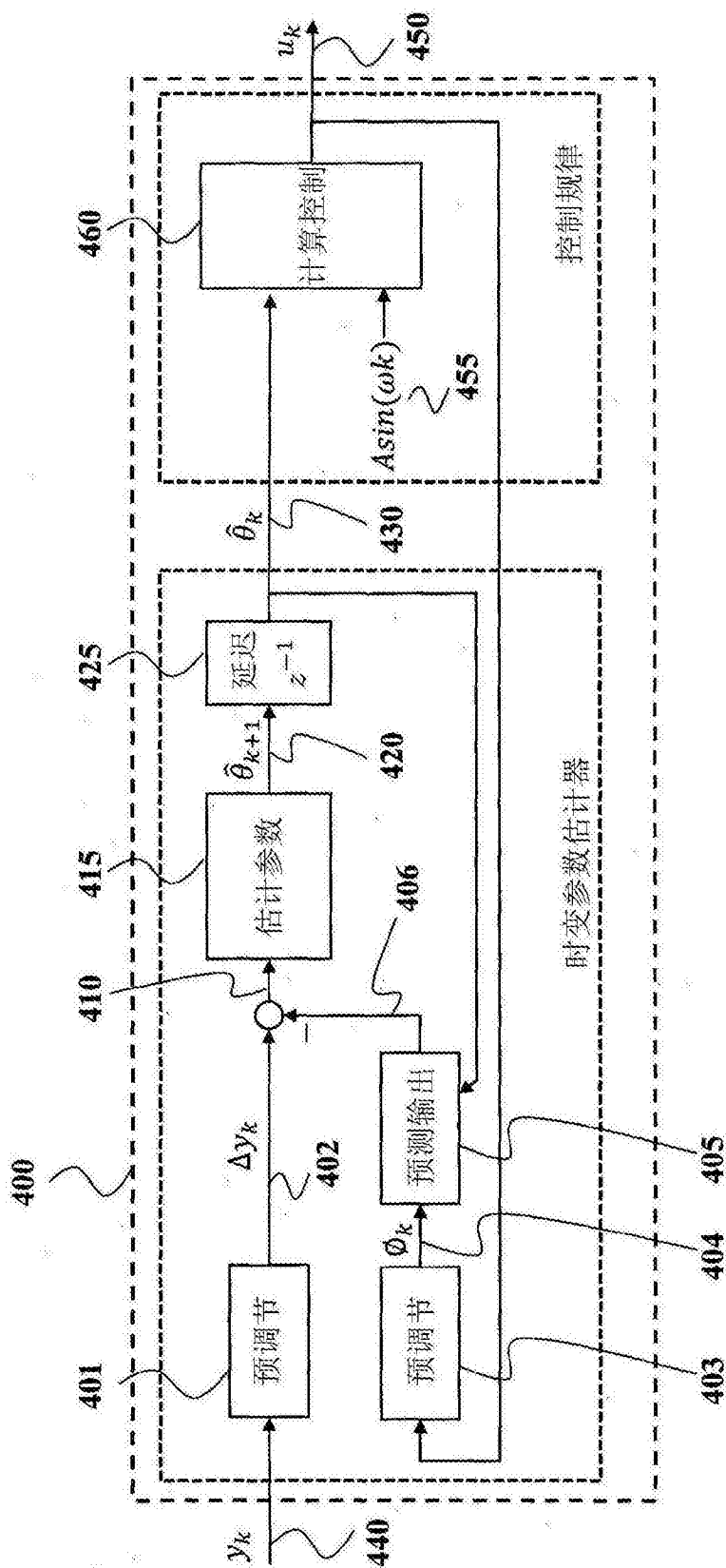


图4B

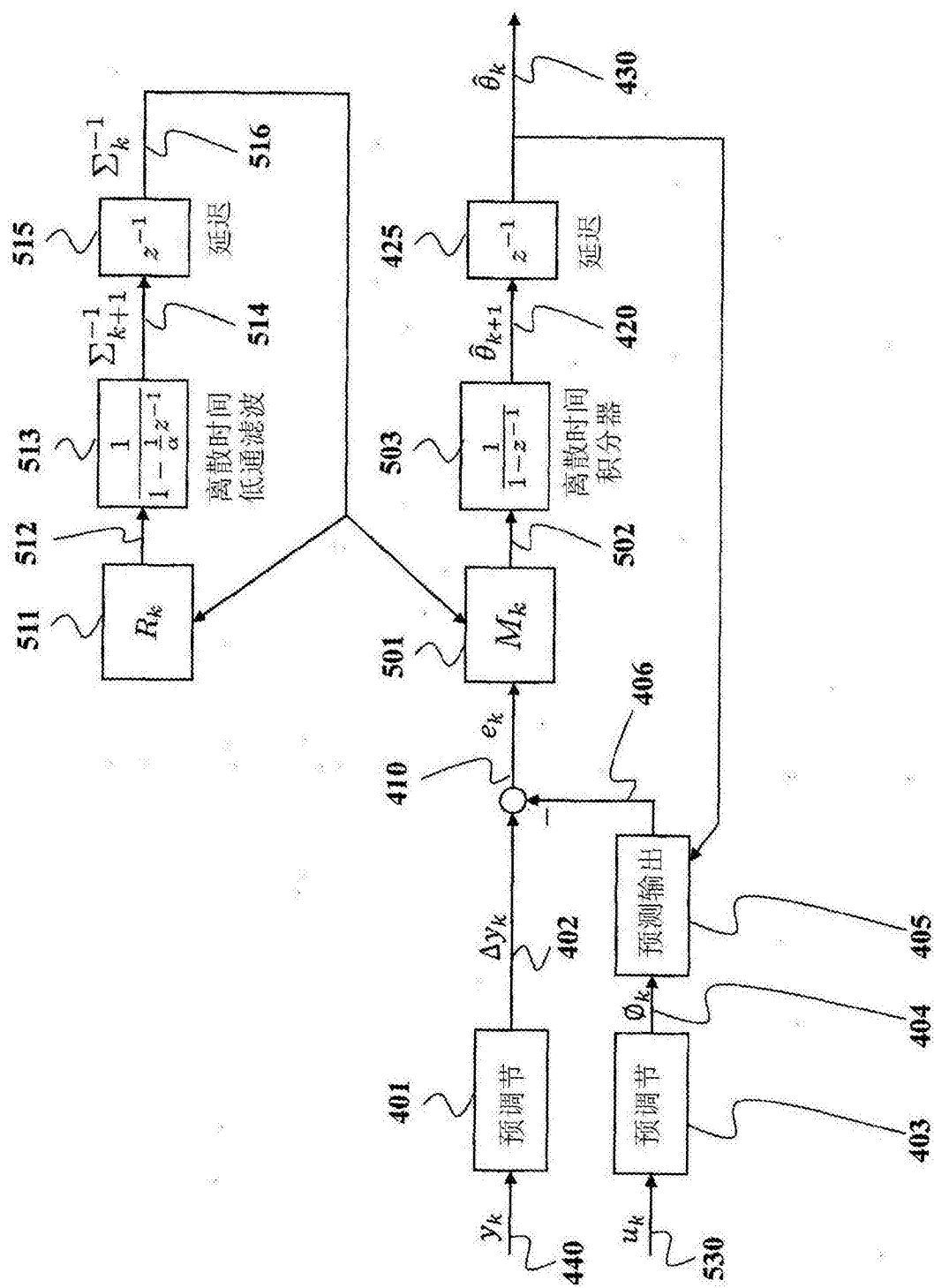


图5

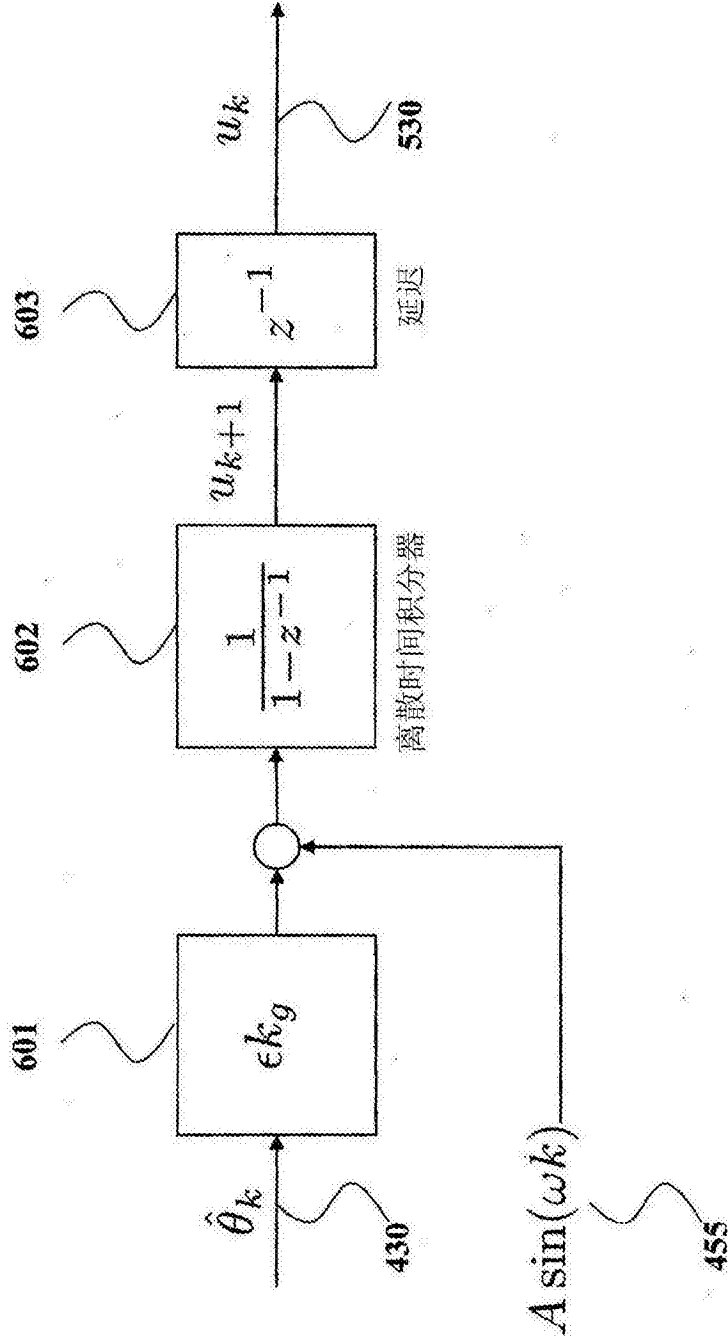


图6

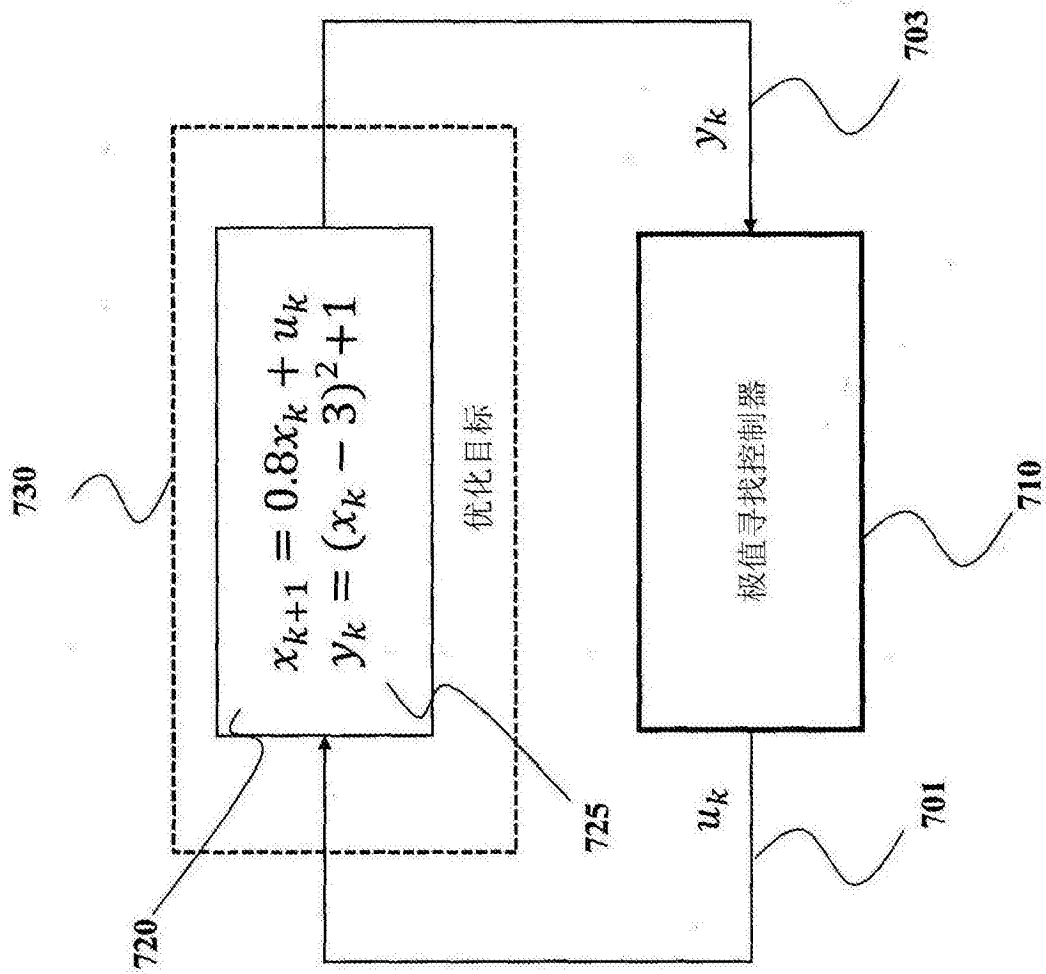


图7A

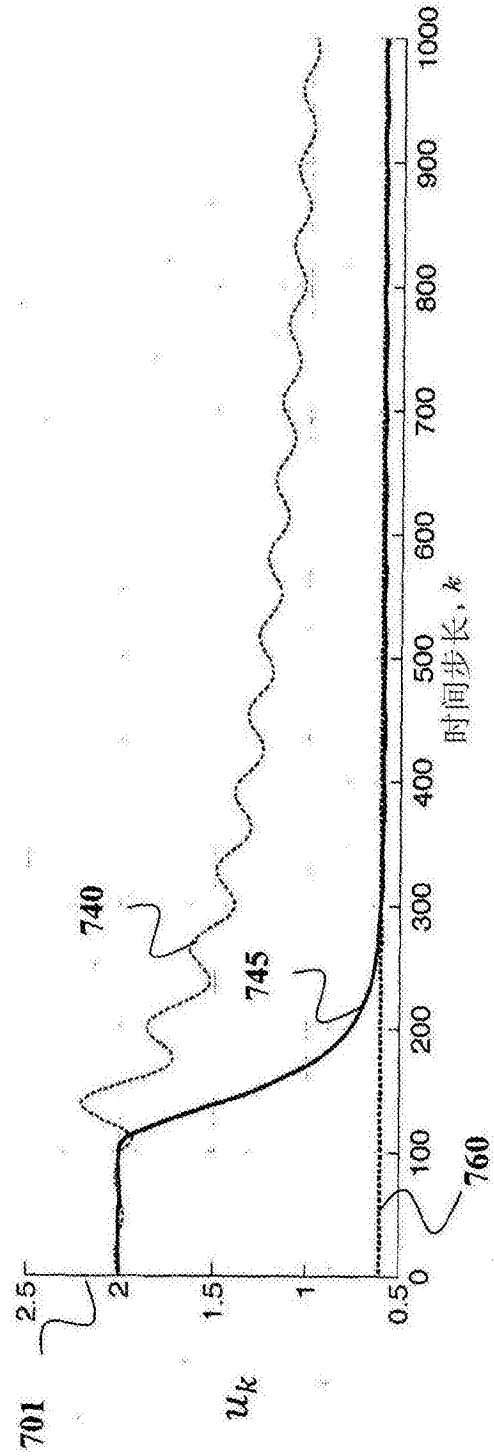


图7B

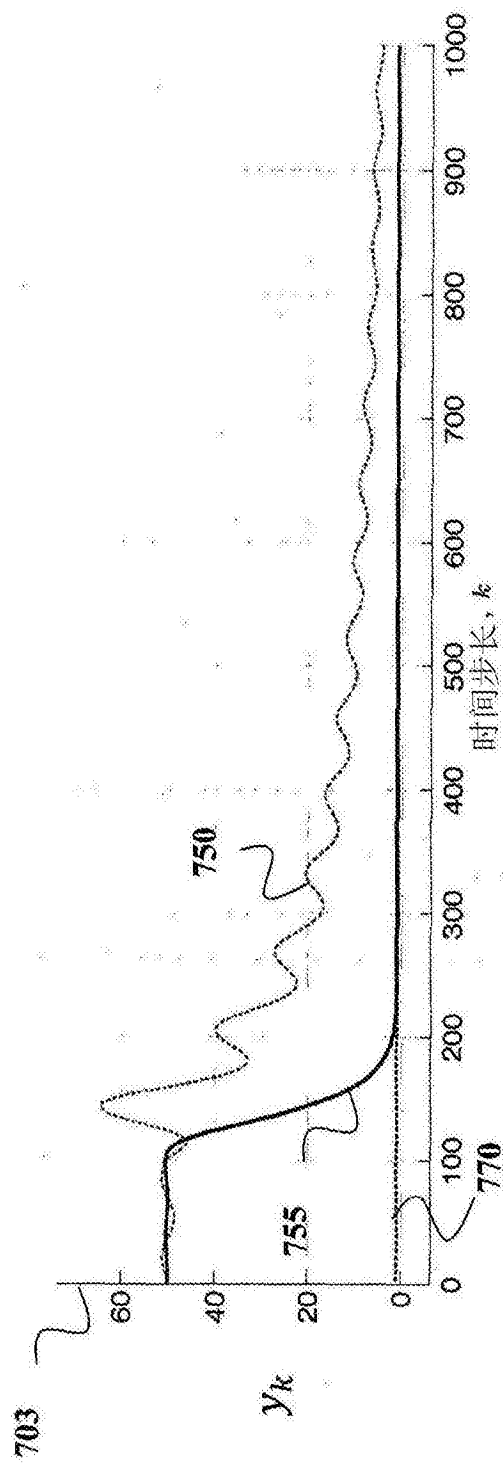


图7C