



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104898425 B

(45)授权公告日 2017.08.04

(21)申请号 201510254086.5

(22)申请日 2015.05.19

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104898425 A

(43)申请公布日 2015.09.09

(73)专利权人 北京化工大学
地址 100029 北京市朝阳区北三环东路15号

专利权人 北京国控天成科技有限公司

(72)发明人 靳其兵 戚林锋 王琪 周星

(74)专利代理机构 北京思海天达知识产权代理有限公司 11203

代理人 刘萍

(51)Int.Cl.

G05B 13/04(2006.01)

(56)对比文件

CN 1420380 A,2003.05.28,

CN 1588246 A,2005.03.02,

靳其兵.基于Bessel滤波器改进内模抗饱和控制的设计.《控制工程》.2011,第18卷(第1期),李钟慎等.基于条件技术的静态内模抗饱和控制系统的设计.《电子测试》.2013,(第17期),

审查员 刘佳妮

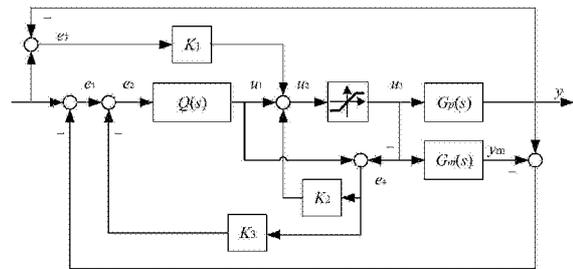
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

基于静态前馈补偿的抗饱和内模控制系统设计方法

(57)摘要

基于静态前馈补偿的抗饱和内模控制系统设计方法,用于过程工业控制系统。该方法包括控制器Q、含有饱和环节的被控对象 G_p 、被控对象的内部模型 G_m 以及三个静态补偿器 K_1 、 K_2 、 K_3 ;通过在原有的内模控制系统基础上进行静态前馈分析,分别就饱和现象引起的控制器输入偏差、控制器输出偏差和对象输出减缓引起的控制器输出偏差进行补偿。通过在原有内模控制系统中引入3个补偿回路,改善了对对象的输出响应。与现有技术相比,本发明是基于对象的传递函数进行控制器、补偿器设计,使工程师更容易理解;同时,本发明与传统的抗饱和内模控制思想不同,是以静态前馈补偿思想改善对象的输出响应,在实际应用中有更高的可实现性。



1. 基于静态前馈补偿的抗饱和内模控制系统设计方法,其特征包括以下步骤:

第一步,按照传统内模控制器方法设计内模控制器Q,构成基础的内模控制回路;

第二步,观察控制器输出和对象输入,判断控制器输出是否超出对象输入饱和范围,若超出,则在已经设计好的内模控制回路上增加3个静态前馈补偿回路,在这3个补偿回路中,分别含有3个静态补偿器,即

(1) 输出静态前馈补偿器 K_1 ,该输出静态补偿器 K_1 补偿了由输入饱和现象引起的动态过程中,实际输出比预期输出减小的部分;

(2) 输入静态前馈补偿器 K_2 ,该输入静态补偿器 K_2 补偿了由输入饱和现象引起的控制器输出大于对象输入的部分;

(3) 偏差静态前馈补偿器 K_3 ,该偏差静态补偿器 K_3 补偿了由输入饱和现象引起的控制器输入偏差增大的部分;

根据补偿系数 K_1 、 K_2 、 K_3 的不同,将系统输出补偿至理想补偿状态、欠补偿状态或过补偿状态;

第三步,通过智能优化算法来确定静态补偿器 K_1 、 K_2 、 K_3 的参数数值。

基于静态前馈补偿的抗饱和和内模控制系统设计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于静态前馈补偿的抗饱和和内模控制系统设计方法,包括抗饱和和内模控制系统结构和补偿器设计方法,主要应用于控制工程领域。

背景技术

[0002] 在实际的工业控制中,输入饱和现象是普遍存在的。例如,带有阀门的管道流量,最大只能到达阀门开度为100%的流量值,无法突破;再例如,泵能够输出的流量,最大只能达到泵转速最大时的流量值,这也无法无限制的增加。种种实际案例表明,在工业中普遍含有输入饱和现象。

[0003] 然而,输入饱和现象,对于控制系统控制效果的影响的是不可忽略的。这是因为,输入饱和现象的存在,导致控制器的输出与对象的输入不相等,使得对象的输出要慢于控制器预期的输出,控制效果变差。如图2的曲线2和曲线3,可以发现,当对象出现输入饱和现象(如曲线2)时,对象输出的斜率是有限制的,小于无输入饱和现象的输出曲线(如曲线3),以至于对象输出的调整时间变长,控制性能下降,这就造成实际工业过程中原料的浪费增加,污染物排放增加。

[0004] 针对具有输入饱和现象的控制系统设计与改进,前人已经有了一定的研究成果。而基于内模控制系统的抗饱和策略,应用较为广泛的是Kothare等在“A Unified Framework for the Study of Anti-Windup Designs.Control and Dynamical System.1993”中提出的,主要思想是通过饱和结构进行补偿,提出了抗饱和和无扰动转换(AWBT)结构,用以减小饱和带来的影响。上述这两种方法是目前大多数抗饱和和内模控制器设计的基础。

[0005] 就基于补偿思想的抗饱和控制的专利方面,王景成等在2005年发表了“误差反馈抗饱和和静态补偿控制器及补偿器的确定方法”(申请号:200410066784.4)。该发明利用Mulder等在“Multivariable anti-windup controller synthesis using linear matrix inequalities.Automatica.2001,37:1407-1416”发表的基于线性矩阵不等式进行AWBT结构设计的基础上,增加误差反馈回路,改善控制器的控制效果。

[0006] 然而,现有的抗饱和控制技术仍存在一些缺点。首先,基于线性矩阵不等式的AWBT抗饱和控制策略,主要以状态空间模型为研究基础,对于工程师的理解较为困难。其次,上述方法需要建立线性矩阵不等式,过程复杂,且要保证理想的控制效果需要有精确的被控对象模型。再次,王景成等通过手动调整设计补偿器,难以保证对象输出达到最优。

发明内容

[0007] 有鉴于此,本发明的主要目的是提供一种抗饱和的内模控制系统结构和设计方法,该方法主要依据静态补偿的思想进行抗饱和和补偿器的设计。该结构是在已有的内模控制结构基础上,增加了3个静态补偿回路;同时采用智能优化算法,确定3个补偿回路中补偿器的参数。

[0008] 基于静态前馈补偿的抗饱和内模控制系统设计方法,其特征在于包括以下步骤:

[0009] 第一步,按照传统内模控制器方法设计内模控制器Q,构成基础的内模控制回路;

[0010] 第二步,观察控制器输出和对象输入,判断控制器输出是否超出对象输入饱和范围,若超出,则在已经设计好的内模控制回路上增加3个静态前馈补偿回路,在这3个补偿回路中,分别含有3个静态补偿器,即

[0011] (1) 输出静态前馈补偿器 K_1 ,该补偿器补偿了由输入饱和现象引起的动态过程中,实际输出比预期输出减小的部分;

[0012] (2) 输入静态前馈补偿器 K_2 ,该补偿器补偿了由输入饱和现象引起的控制器输出大于对象输入的部分;

[0013] (3) 偏差静态前馈补偿器 K_3 ,该补偿器补偿了由输入饱和现象引起的控制器输入偏差增大的部分;

[0014] 第三步,通过任意智能优化算法来确定静态补偿器 K_1 、 K_2 、 K_3 的参数数值。

[0015] 下面首先分析输入饱和现象对对象输出响应 y 的影响,该分析方法不只局限于抗饱和内模控制结构。输入饱和现象对系统动态性能的影响主要是在控制器输出 u 超出对象输入饱和范围 $[u_1, u_0]$ 的阶段。其中, u_1 和 u_0 分别表示输入饱和值的下限和上限。此时,对象输入 u' 不等于控制器输出 u ,而是等于输入饱和值。而一旦控制器输出 u 在对象输入饱和范围内时,对象的输入 u' 就等于控制器输出 u 。

[0016] 在控制器输出处于饱和阶段时,若以上限饱和为例,对象输入 u' 会小于控制器输出 u ,这就导致对象的输出 y 比预期的输出小。另外,由于处于饱和时期所输入的控制能量 E 小于实际所需要的控制能量 E' ,使得带有饱和现象的对象输出 y 比无饱和的对象输出响应慢。实际上,由于反馈回路的存在,饱和现象还不仅只影响控制器输出 u 和对象输出 y ,它同时还影响控制器的输入 e 。这是因为在输入饱和期间,对象的输出 y 比预期的输出小,导致实际控制器的输入 $e=r-y$ 比预期的大,造成了更大的偏差。总结地说,由于饱和现象的存在,对系统的动态性能的影响主要体现在三个方面:

[0017] 1) 使得处于饱和阶段的对象输入小于实际所需的对象输入。

[0018] 2) 使得处于饱和阶段的对象输出小于实际需要达到的对象输出。

[0019] 3) 使得处于饱和阶段的控制器输入大于实际需要的控制器输出。

[0020] 综上分析,为了提升带有饱和系统的动态性能,应当对该系统控制结构进行补偿。按照定性分析的结果,应该根据需要对系统进行三种补偿。

[0021] 首先,处于饱和阶段的对象输出小于实际需要达到的对象输出,将设定值与对象输出的偏差引入控制器输出以补偿由对象输出减小引起的偏差。

[0022] 其次,将控制器输出与对象输入的差看做是一种干扰,这是引起控制器控制效果的主要原因。利用前馈的思想,将这种干扰补偿至控制器输出端。然而由于饱和特性的非线性特性,本发明中采用静态补偿的方法补偿饱和特性对控制器输出的影响。

[0023] 最后,控制器输出与对象输入的差异,还间接使控制器输入提高,所以该偏差也同时需要被补偿。补偿方式是将控制器输入与对象输入的差引入控制器输入端,同样采用的是静态补偿的方式。

[0024] 所以,在这种基于定性分析的前馈抗饱和的内模控制器设计方法中,需要加入三个静态前馈补偿回路及补偿器,分别是 K_1 、 K_2 和 K_3 。图1给出了本发明所介绍的抗饱和内模控

制结构。

[0025] 补偿系数 K_1, K_2, K_3 的不同,会造成输出的不同效果。如图2,曲线1是系统在无饱和现象时的输出曲线,而曲线2是系统在有饱和现象时,未进行补偿的输出曲线。按照补偿的程度可以将补偿分为以下几种:

[0026] 如曲线3,如果补偿器补偿合理,使得在系统输出在控制器进入饱和区域内时与无饱和现象时的响应相同,这种状态被称为理想补偿状态。

[0027] 如曲线4,如果补偿器补偿的不够,使得系统的输出没有无饱和现象时响应那么快,这种现象被称为欠补偿状态。

[0028] 如曲线5,如果补偿器补偿的太多,使得系统的输出比无饱和现象时响应快,这种状态被称为过补偿状态。

[0029] 从对象输入看上述的几种状态,如图3所示,曲线1是无对象输入饱和时,对象的输入曲线,曲线2是含有对象输入饱和但未进行补偿时对象的输入曲线。可以看出,在含有对象输入饱和现象时,当控制器输出大于对象的饱和范围,对象输入等于输入饱和值,而当控制器输出在对象饱和范围内时,对象输入等于控制器输出。

[0030] 在对控制器输出进行补偿时,可以看出,在理想补偿状态,一旦由输入饱和现象引起的控制器输出缺失被补偿足够,控制器输出就与无输入饱和时的控制器输出相同(如曲线3)。而欠补偿状态,其补偿的控制器输出小于由饱和现象引起的输出缺失(如曲线4),过补偿状态则反之(如曲线5)。一般来讲,如果不采用多控制器进行切换控制,想要达到理想补偿状态时不可能实现的,但多控制器切换控制设计复杂,工程实现困难,且还会出现其他不可预料事故,故很少采用。在本发明中,将补偿器整定为欠补偿状态或过补偿状态。

[0031] 如果系统被补偿处于过补偿状态,能够加快系统的输出响应,但是如果补偿过多,系统响应有可能出现震荡,这是不允许的。导致过补偿状态时出现系统响应震荡的主要原因是补偿器的补偿作用过多,所以在设计补偿器的过程中一定要注意补偿器的设计,否则将对系统产生不利的影响。

[0032] 关于抗饱和和内模控制器的设计,传统的方法是设法找到参数使得实际对象的输出 y 与无饱和现象的输出 y' 尽可能的接近。但本发明并不采用该方法,而是采用IAE指标或者ISE指标进行补偿器设计。这样做不仅能够补偿由输入饱和带来的控制质量的下降,同时,当对象模型与实际对象出现偏差时,补偿器也能对该偏差进行补偿,使得对象输出有更良好的响应。IAE指标和ISE指标分别为:

$$[0033] \quad IAE = \int_{t=0}^{t=t_f} |r(t) - y(t)| dt$$

$$[0034] \quad ISE = \int_{t=0}^{t=t_f} (r(t) - y(t))^2 dt$$

[0035] 其中, t 表示时刻, t_f 表示终止时刻, $r(t)$ 表示 t 时刻设定值, $y(t)$ 表示 t 时刻对象的输出值。

[0036] 由于在控制回路中有饱和环节的存在,所以优化这些目标函数是一个非凸优化问题,故采用智能优化算法进行补偿器整定。采用智能优化算法的另一个优点是如果对于过程性能指标还有一些其他的要求和限制,如对过程输出的超调量有限制,可以通过改造目

标函数使补偿器在被设计时能满足这些要求。

[0037] 本发明中可以但不限于采用的智能优化算法有粒子群算法(PSO)、遗传算法(GA)、人工鱼群算法(AFSA)和布谷鸟算法(CS)等。

[0038] 总结上述内容,下面对本发明中的抗饱和和内模控制器设计方法进行统一的阐述:

[0039] 第一步,确定被控对象及其模型,按照内模控制系统设计理论,设计内模控制器。如果被控对象 G_p 的模型为 G_m ,则将模型分解为最小相位部分 G_{m-} 和非最小相位部分 G_{m+} ,其中, $G_{m+}(0) = 1$ 。然后,引入滤波器 f ,设计内模控制器为 $Q = G_{m-}^{-1} f$ 。

[0040] 第二步,设计完内模控制器后,观察控制器的输出是否超出对象输入饱和范围。如果未超出对象输入饱和范围,则不需要进行补偿器设计;如果超出对象输入饱和范围,则在原有的内模控制结构上,分别引入三个静态补偿回路,分别有补偿器 K_1, K_2 和 K_3 。

[0041] 第三步,利用任意一种智能优化算法,设计得到静态补偿器 K_1, K_2 和 K_3 的参数,构成抗饱和和内模控制器结构。智能优化算法的初始值可任意给定。

[0042] 至此,本发明所介绍的基于静态前馈补偿的抗饱和和内模控制器设计方法结束。

附图说明

[0043] 图1基于静态前馈补偿的抗饱和和内模控制结构。

[0044] 图2补偿程度不同时,对象输出的不同状态;其中,曲线1为无输入饱和现象时对象的输出曲线,曲线2为有输入饱和现象时未进行补偿时对象的输出曲线,曲线3为理想补偿状态下对象的输出曲线,曲线4为欠补偿状态下对象的输出曲线,曲线5为过补偿状态下对象的输出曲线。

[0045] 图3补偿程度不同时,对象输入的不同状态;其中,曲线1为无输入饱和现象时对象的输入曲线,曲线2为有输入饱和现象时未进行补偿时对象的输入曲线,曲线3为理想补偿状态下对象的输入曲线,曲线4为欠补偿状态下对象的输入曲线,曲线5为过补偿状态下对象的输入曲线。

[0046] 图4模型匹配时,对象的输出(上)与输入(下);其中曲线1为在本发明介绍的静态前馈补偿抗饱和和内模控制器控制下,曲线2为在无抗饱和补偿的内模控制器控制下,曲线3为无输入饱和对象的输入与输出。

[0047] 图5模型不匹配时,对象的输出(上)与输入(下);其中曲线1为在本发明所介绍的静态前馈补偿抗饱和和内模控制器控制下,曲线2为在无抗饱和补偿的内模控制器控制下,曲线3为无输入饱和对象的输入与输出。

具体实施方式

[0048] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。

[0049] 本例以一阶纯滞后(FOPDT)对象为例,详细地介绍基于静态前馈补偿抗饱和和内模控制器设计方法。被研究的FOPDT对象的传递函数为

$$[0050] \quad G_p(s) = \frac{3}{5s+1} e^{-2s}$$

[0051] 该对象具有输入饱和值 ± 0.5 。

[0052] 步骤一:首先进行基本内模控制器的设计。假设模型与对象的传递函数不存在误

差,即

$$[0053] \quad G_m(s) = G_p(s) = \frac{3}{5s+1} e^{-2s}$$

[0054] 按照已有的内模控制器参数整定方法整定内模控制器。采用的滤波器为一阶滤波器,选取滤波器参数 $\lambda=2$,即内模控制器 $Q(s)$ 被设计为

$$[0055] \quad Q(s) = G_m^{-1} f = \frac{5s+1}{3(2s+1)}$$

[0056] 步骤二:观察控制器输出,判断控制器输出是否超过输入饱和范围。在零初始条件下,控制器输出的最大值为0.833,大于输入饱和值0.5,所以存在输入饱和现象,故需要按照静态前馈补偿抗饱和和内模控制结构设计方法,引入三个静态补偿器 K_1, K_2 和 K_3 。

[0057] 步骤三:采用智能优化算法进行补偿器的设计。本例中,采用一种改进的布谷鸟算法,即群布谷鸟算法(SCS)进行静态补偿器的设计。性能指标采用ISE指标。通过群布谷鸟算法,得到三个静态补偿器为: $K_1=0.2490, K_2=3.0428, K_3=1.5513$ 。上述过程完成了在过程对象与模型匹配时,内模控制器的设计。对象的输入输出曲线如图4所示。

[0058] 从图4中可以看出,本发明所介绍的抗饱和和内模控制器设计方法能有效地改善由对象输入饱和带来的恶劣影响。在对传统的内模控制器加入了补偿器 K_1, K_2 和 K_3 以后,对象跟踪设定值的时间明显变短。这是由于补偿器的加入,使得控制器输出作用在对象饱和阶段的时间变长,加速了对象的输出响应。在本例中,对象的输出处于较小的过补偿状态,这有利于对象的输出响应。

[0059] 如果模型辨识不准确,出现模型摄动,该种控制结构还能很好地工作么?如果该对象的模型与对象的传递函数不匹配时,假设此时的对象模型为

$$[0060] \quad G_m(s) = \frac{4.5}{7.5s+1} e^{-3s}$$

[0061] 步骤一:首先设计基本的内模控制器。仍然选择一阶滤波器,滤波器常数 λ 仍选择为2。此时,内模控制器被设计为

$$[0062] \quad Q(s) = G_m^{-1} f = \frac{7.5s+1}{4.5(2s+1)}$$

[0063] 步骤二:观察控制器输出,判断控制器输出是否超出输入饱和范围。在零初始条件下,控制器输出的最大值明显大于输入饱和值,所以存在输入饱和现象,故需要按照静态前馈补偿抗饱和和内模控制结构设计方法,引入三个静态补偿器 K_1, K_2 和 K_3 。

[0064] 步骤三:同样借助于群布谷鸟算法,重新设计补偿器,性能指标仍为ISE指标。可获得补偿器参数分别为 $K_1=3.1890, K_2=4.0544, K_3=0.2057$ 。图5给出了该种情况下对象的输出和输入曲线。

[0065] 从图5中可以看出,经过补偿器 K_1, K_2 和 K_3 补偿后的对象输出,过渡过程时间明显小于没有补偿时对象的输出,这说明了该种抗饱和和内模控制结构的有效性。同时,本例中,经过补偿后的对象输出还优于没有输入饱和现象时对象的输出,这是由于补偿器在设计时不仅补偿了对象输入饱和带来的影响,还补偿了模型误差带来的影响。

[0066] 因此可以理解,上述仅仅是对本发明精神的展示,而不是限制。

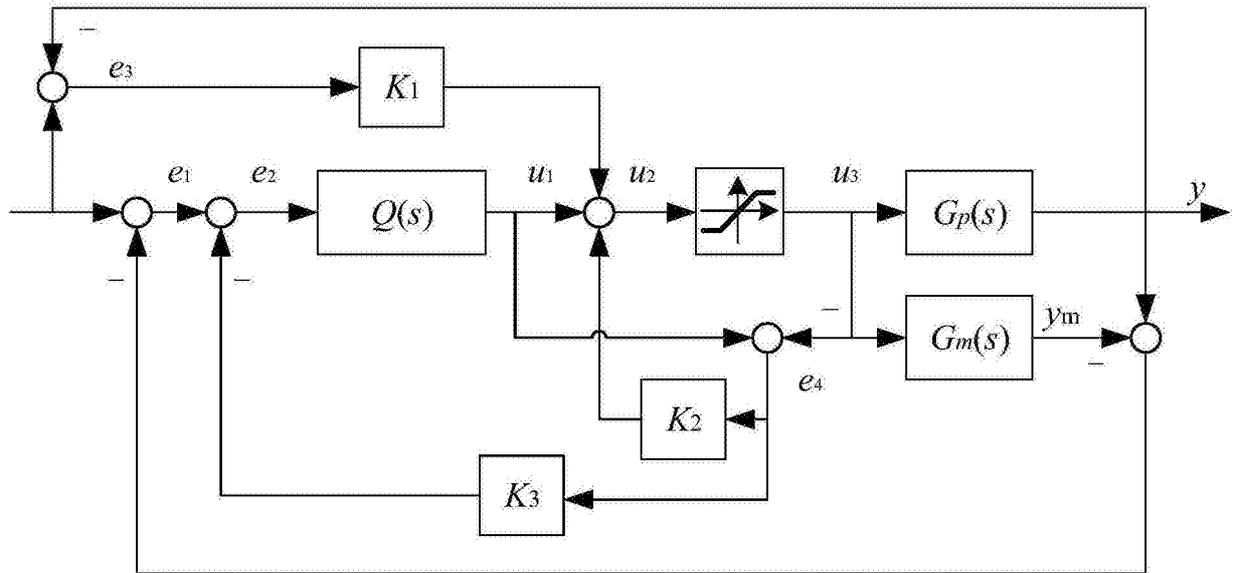


图1

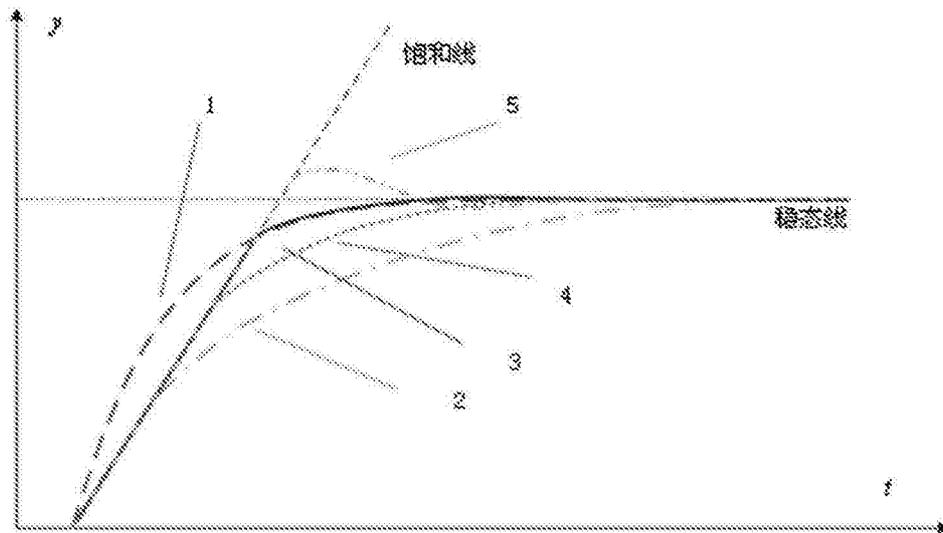


图2

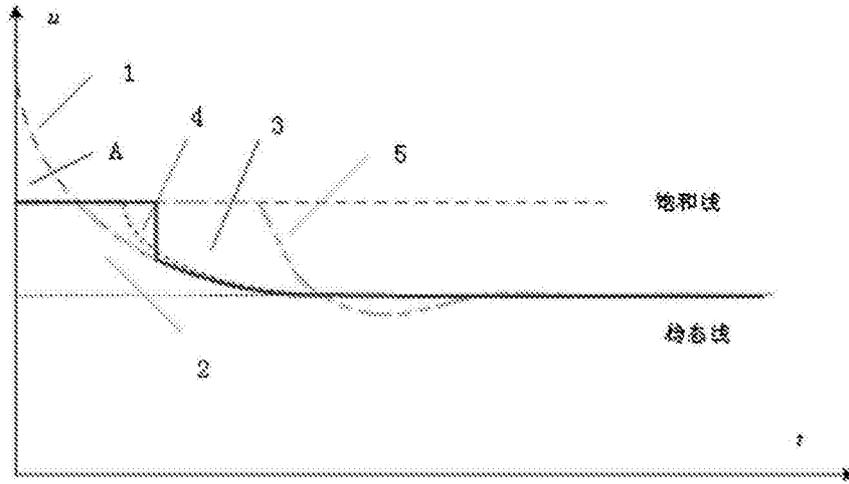


图3

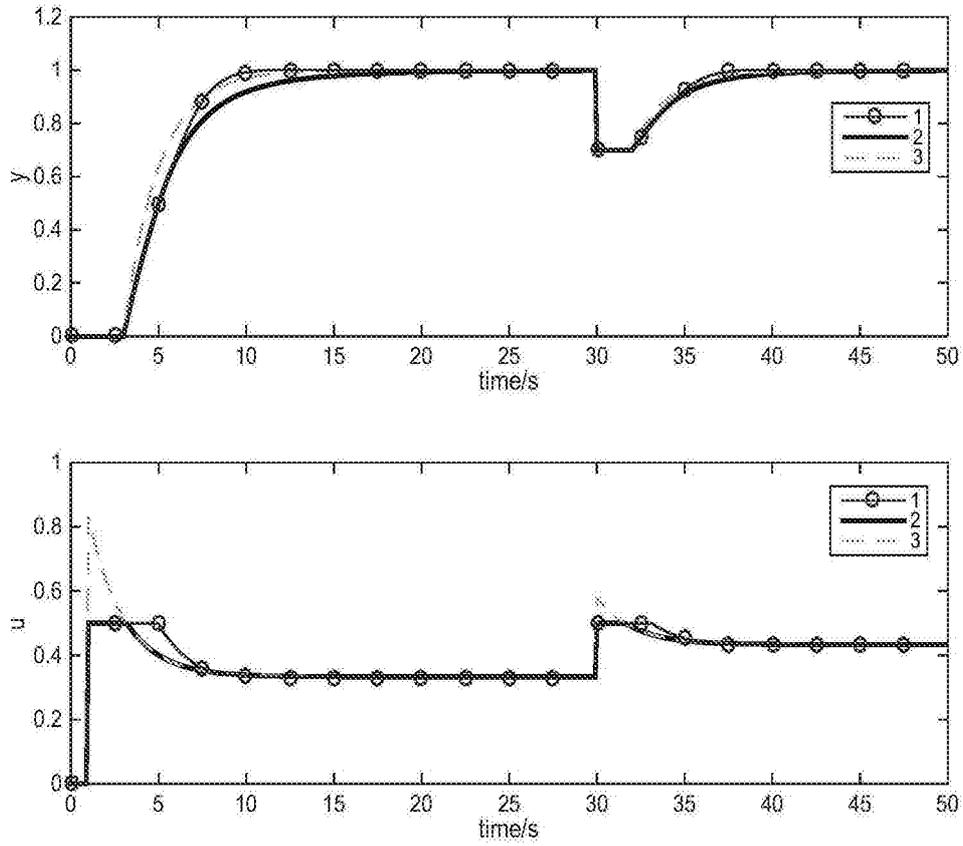


图4

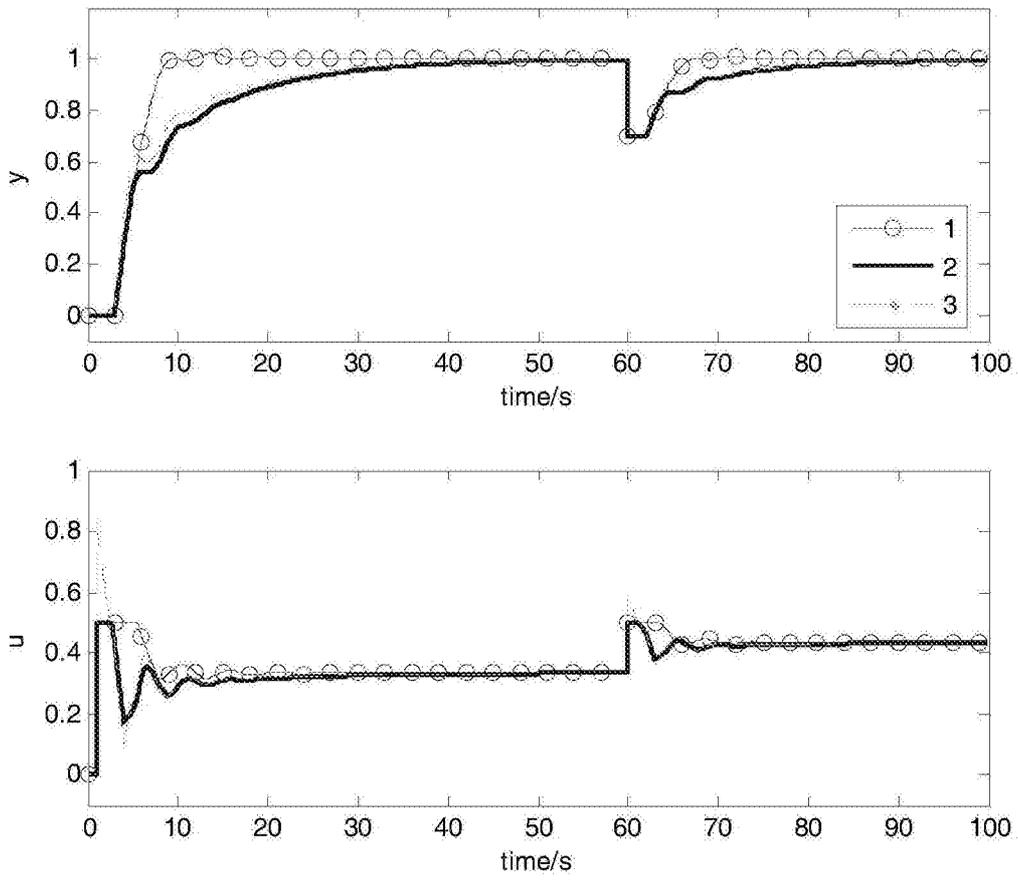


图5