



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109116733 A

(43)申请公布日 2019.01.01

(21)申请号 201810926771.1

(22)申请日 2018.08.15

(71)申请人 上海理工大学

地址 200093 上海市杨浦区军工路516号

(72)发明人 王亚刚 刘阳 赵鑫 张迁

(74)专利代理机构 上海德昭知识产权代理有限公司 31204

代理人 郁旦蓉

(51)Int.Cl.

G05B 13/04(2006.01)

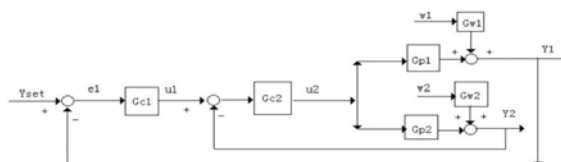
权利要求书3页 说明书7页 附图1页

(54)发明名称

一种基于最小信息熵的并行串级控制系统的评价方法

(57)摘要

本发明所要解决的问题是提供一种基于最小信息熵的并行串级控制系统的评价方法,该方法是用于评估并行串级控制系统的性能,本发明是基于并行串级控制系统的评价方法存在以上问题而产生的,目的在于利用最小信息熵基准评估并行串级控制系统的性能。最小信息熵指标不仅能正确反映高斯扰动时的并行串级控制系统的性能,也能很好的反应非高斯扰动时的并行串级控制系统的性能。通过与最小方差和带遗忘因子的最小方差的评估结果相比,最小信息熵指标能够更加有效地反应并行串级控制系统的性能。弥补了现有的并行串级控制系统的评价方法的缺点,避免了评价并行串级控制系统的方法的局限性。



1. 一种基于最小信息熵的并行串级控制系统的评价方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一,根据并行串级控制系统,共有两个回路,输入信号为 Y_{set} ,总输出值 $Y_{1,2}$ 见下式

(1)

$$Y_{1,2} = Y_1 + Y_2 \quad (1)$$

Y_1 为主回路的输出值, Y_2 为二回路的输出值;

步骤二,假设输入信号 $Y_{set} = 0$,则主回路的输出值 Y_1 和二回路的输出值 Y_2 分别见下式

(2) 和 (3)

$$Y_1 = \frac{(1+G_{p2}G_{c2})G_{w1}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{c2}G_{p1}G_{c1}}w_1 - \frac{G_{p1}G_{c2}G_{w2}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{c2}G_{p1}G_{c1}}w_2 \quad (2)$$

$$Y_2 = \frac{-G_{p2}G_{c2}G_{c1}G_{w1}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{c2}G_{p1}G_{c1}}w_1 + \frac{(1+G_{p1}G_{c2}G_{c1})G_{w2}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{c2}G_{p1}G_{c1}}w_2 \quad (3)$$

G_{p1} 和 G_{p2} 分别代表主回路和二回路的过程模型。 G_{c1} 和 G_{c2} 分别是主回路和二回路的控制器, G_{w1} 和 G_{w2} 分别为主回路和二回路的扰动模型。 w_1 和 w_2 为加在主回路和二回路的噪声序列且 w_1 和 w_2 相互独立;

步骤三,通过丢番图方程将 G_{w1} 和 G_{w2} 分别分解见下式 (4) 和 (5) 并将 G_{p1} 和 G_{p2} 先离散再进行Z变换得到下式 (6) 和 (7)

$$G_{w1} = Q_1 + R_1 z^{-d_1} = Q_3 + R_3 z^{-d_2} \quad (4)$$

$$G_{w2} = Q_2 + R_2 z^{-d_1} = Q_4 + R_4 z^{-d_2} \quad (5)$$

$$G_{p1} = G_{p1}^* z^{-d_1} \quad (6)$$

$$G_{p2} = G_{p2}^* z^{-d_2} \quad (7)$$

d_1 为主回路的时间延迟, d_2 为二回路的时间延迟, z 为单位时间因子, Q_1 和 Q_2 是 (d_1-1) 的多项式, Q_3 和 Q_4 是 (d_2-1) 的多项式, $R_1 \sim R_4$ 是合适的传递函数, Q_1 和 Q_4 可表示为 $Q_1 = f_0 + f_1 z^{-1} + \dots + f_{d_1-1} z^{-(d_1-1)}$, $f_0, f_1, \dots, f_{d_1-1}$ 为 Q_1 多项式的系数, $Q_4 = q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{d_2-1} z^{-(d_2-1)}$, $q_0, q_1, \dots, q_{d_2-1}$ 为 Q_4 多项式的系数;

步骤四,将式 (4)、(5)、(6) 和 (7) 分别代入到式 (2) 和 (3) 得到下式 (8) 和 (9)

$$Y_1 = Q_1 w_1 + z^{-d_1} \left[\frac{R_1(1+G_{p2}G_{c2}) - Q_1 G_{p1}^* G_{c2} G_{c1}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{p1}G_{c2}G_{c1}} w_1 + \frac{-Q_2 G_{p1}^* G_{c2} - R_2 G_{p1} G_{c2}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{p1}G_{c2}G_{c1}} w_2 \right] \quad (8)$$

$$Y_2 = Q_4 w_2 + z^{-d_2} \left[\frac{-Q_3 G_{p2}^* G_{c2} G_{c1} - R_3 G_{p2} G_{c2} G_{c1}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{p1}G_{c2}G_{c1}} w_1 + \frac{R_4(1+G_{p1}G_{c2}G_{c1}) - Q_4 G_{p2}^* G_{c2}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{p1}G_{c2}G_{c1}} w_2 \right] \quad (9)$$

步骤五,将 (8) 和 (9) 简化得到下式 (10) 和 (11)

$$Y_1 = Q_1 w_1 + z^{-d_1} (H_1 w_1 + H_2 w_2) \quad (10)$$

$$Y_2 = Q_4 w_2 + z^{-d_2} (H_3 w_1 + H_4 w_2) \quad (11)$$

$$\text{其中, } H_1 = \frac{R_1(1+G_{p2}G_{c2}) - Q_1 G_{p1}^* G_{c2} G_{c1}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{p1}G_{c2}G_{c1}}, \quad H_2 = \frac{-Q_2 G_{p1}^* G_{c2} - R_2 G_{p1} G_{c2}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{p1}G_{c2}G_{c1}}$$

其次,根据所述引理2,得到

$$H_{\alpha}(Q_{1W_1}, (z^{-d_1}H_{1W_1}+z^{-d_2}H_{3W_1})) = H_{\alpha}((z^{-d_1}H_{1W_1}+z^{-d_2}H_{3W_1}) | Q_{1W_1}) + H_{\alpha}(Q_{1W_1}) \quad (14b)$$

$$H_{\alpha}(Q_{4W_2}, (z^{-d_1}H_{2W_2}+z^{-d_2}H_{4W_2})) = H_{\alpha}((z^{-d_1}H_{2W_2}+z^{-d_2}H_{4W_2}) | Q_{4W_2}) + H_{\alpha}(Q_{4W_2}) \quad (14c),$$

再次,根据所述引理3以及式(14b)、(14c),得到

$$H_{\alpha}(Q_{1W_1}, (z^{-d_1}H_{1W_1}+z^{-d_2}H_{3W_1})) \geq H_{\alpha}(Q_{1W_1}) \quad (14d)$$

$$H_{\alpha}(Q_{4W_2}, (z^{-d_1}H_{2W_2}+z^{-d_2}H_{4W_2})) \geq H_{\alpha}(Q_{4W_2}) \quad (14d),$$

最后,将式(14d)和(14d)代入式(14a)中得到式(14)。

一种基于最小信息熵的并行串级控制系统的评价方法

技术领域

[0001] 本发明涉及并行串级控制系统,具体涉及一种基于最小信息熵的并行串级控制系统的评价方法。

背景技术

[0002] 对于串级控制回路有两种形式,一种是经典串级控制系统,另一种比较特殊为并行串级控制系统。

[0003] 对于经典的串级控制系统,BS Ko研究了基于最小方差准则的串级控制系统性能评估,王海波等将广义最小方差准则应用到串级控制系统性能评估,王亚斌,孙京浩等研究了基于方差分解的一类非线性串级控制系统的性能评估。随后,Jianwen Guo将最小方差和广义最小方差基准运用到并行串级控制系统中。之后很少有学者做深入研究,只有一些并行串级控制系统的应用。

[0004] 但是,过去对性能评估方法的研究都是假设扰动或噪声是服从高斯分布的,而在大多数的实际工业过程中都很难满足这个要求。

发明内容

[0005] 本发明所要解决的问题是提供一种基于最小信息熵的并行串级控制系统的评价方法,该方法是用于评估并行串级控制系统的性能,本发明是基于并行串级控制系统的评价方法存在以上问题而产生的,目的在于利用最小信息熵基准评估并行串级控制系统的性能。利用此种方法可以更加有效地评价并行串级控制系统的性能。

[0006] 本发明提供了一种基于最小信息熵的并行串级控制系统的评价方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0007] 步骤一,根据并行串级控制系统,共有两个回路,输入信号为 Y_{set} ,总输出值 $Y_{1,2}$ 见下式(1)

$$[0008] \quad Y_{1,2} = Y_1 + Y_2 \quad (1)$$

[0009] Y_1 为主回路的输出值, Y_2 为二回路的输出值;

[0010] 步骤二,假设输入信号 $Y_{set} = 0$,则主回路的输出值 Y_1 和二回路的输出值 Y_2 分别见下式(2)和(3)

$$[0011] \quad Y_1 = \frac{(1 + G_{p2}G_{c2})G_{w1}}{1 + G_{p2}G_{c2} + G_{c2}G_{p1}G_{c1}} w_1 - \frac{G_{p1}G_{c2}G_{w2}}{1 + G_{p2}G_{c2} + G_{c2}G_{p1}G_{c1}} w_2 \quad (2)$$

$$[0012] \quad Y_2 = \frac{-G_{p2}G_{c2}G_{c1}G_{w1}}{1 + G_{p2}G_{c2} + G_{c2}G_{p1}G_{c1}} w_1 + \frac{(1 + G_{p1}G_{c2}G_{c1})G_{w2}}{1 + G_{p2}G_{c2} + G_{c2}G_{p1}G_{c1}} w_2 \quad (3)$$

[0013] G_{p1} 和 G_{p2} 分别代表主回路和二回路的过程模型。 G_{c1} 和 G_{c2} 分别是主回路和二回路的控制器, G_{w1} 和 G_{w2} 分别为主回路和二回路的扰动模型。 w_1 和 w_2 为加在主回路和二回路的噪声序列且 w_1 和 w_2 相互独立;

[0014] 步骤三,通过丢番图方程将 G_{w1} 和 G_{w2} 分别分解见下式(4)和(5)并将 G_{p1} 和 G_{p2} 先离散

再进行Z变换得到下式 (6) 和 (7)

$$[0015] \quad G_{w1} = Q_1 + R_1 Z^{-d_1} = Q_3 + R_3 Z^{-d_2} \quad (4)$$

$$[0016] \quad G_{w2} = Q_2 + R_2 Z^{-d_1} = Q_4 + R_4 Z^{-d_2} \quad (5)$$

$$[0017] \quad G_{p1} = G_{p1}^* * z^{-d_1} \quad (6)$$

$$[0018] \quad G_{p2} = G_{p2}^* * z^{-d_2} \quad (7)$$

[0019] d_1 为主回路的时间延迟, d_2 为二回路的时间延迟, z 为单位时间因子, Q_1 和 Q_2 是 (d_1-1) 的多项式, Q_3 和 Q_4 是 (d_2-1) 的多项式, $R_1 \sim R_4$ 是合适的传递函数, Q_1 和 Q_2 可表示为 $Q_1 = f_0 + f_1 z^{-1} + \dots + f_{d_1-1} z^{-(d_1-1)}$, $f_0, f_1, \dots, f_{d_1-1}$ 为 Q_1 多项式的系数, $Q_4 = q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{d_2-1} z^{-(d_2-1)}$, $q_0, q_1, \dots, q_{d_2-1}$ 为 Q_2 多项式的系数;

[0020] 步骤四,将式(4)、(5)、(6)和(7)分别代入到式(2)和(3)得到下式(8)和(9)

$$[0021] \quad Y_1 = Q_1 w_1 + z^{-d_1} \left[\frac{R_1(1 + G_{p2} G_{c2}) - Q_1 G_{p1}^* G_{c2} G_{c1}}{1 + G_{p2} G_{c2} + G_{p1} G_{c2} G_{c1}} w_1 + \frac{-Q_2 G_{p1}^* G_{c2} - R_2 G_{p1} G_{c2}}{1 + G_{p2} G_{c2} + G_{p1} G_{c2} G_{c1}} w_2 \right] \quad (8)$$

$$[0022] \quad Y_2 = Q_4 w_2 + z^{-d_2} \left[\frac{-Q_3 G_{p2}^* G_{c2} G_{c1} - R_3 G_{p2} G_{c2} G_{c1}}{1 + G_{p2} G_{c2} + G_{p1} G_{c2} G_{c1}} w_1 + \frac{R_4(1 + G_{p1} G_{c2} G_{c1}) - Q_4 G_{p2}^* G_{c2}}{1 + G_{p2} G_{c2} + G_{p1} G_{c2} G_{c1}} w_2 \right] \quad (9)$$

[0023] 步骤五,将(8)和(9)简化得到下式(10)和(11)

$$[0024] \quad Y_1 = Q_1 w_1 + z^{-d_1} (H_1 w_1 + H_2 w_2) \quad (10)$$

$$[0025] \quad Y_2 = Q_4 w_2 + z^{-d_2} (H_3 w_1 + H_4 w_2) \quad (11)$$

$$[0026] \quad \text{其中, } H_1 = \frac{R_1(1 + G_{p2} G_{c2}) - Q_1 G_{p1}^* G_{c2} G_{c1}}{1 + G_{p2} G_{c2} + G_{p1} G_{c2} G_{c1}}, \quad H_2 = \frac{-Q_2 G_{p1}^* G_{c2} - R_2 G_{p1} G_{c2}}{1 + G_{p2} G_{c2} + G_{p1} G_{c2} G_{c1}}$$

$$[0027] \quad H_3 = \frac{-Q_3 G_{p2}^* G_{c2} G_{c1} - R_3 G_{p2} G_{c2} G_{c1}}{1 + G_{p2} G_{c2} + G_{p1} G_{c2} G_{c1}}, \quad H_4 = \frac{R_4(1 + G_{p1} G_{c2} G_{c1}) - Q_4 G_{p2}^* G_{c2}}{1 + G_{p2} G_{c2} + G_{p1} G_{c2} G_{c1}};$$

[0028] 步骤六,确定总输出值 $Y_{1,2}$,将式(10)和(11)代入式(1)中得到总输出值 $Y_{1,2}$ 的计算公式见下式(12)

$$[0029] \quad Y_{1,2} = Q_1 w_1 + z^{-d_1} (H_1 w_1 + H_2 w_2) + Q_4 w_2 + z^{-d_2} (H_3 w_1 + H_4 w_2) \quad (12);$$

[0030] 步骤七,通过一个含有连续变量 α 的Renyi熵 $H_\alpha(X)$ 来描述并行串级控制系统的特性,定义并行串级控制系统的的核心信息熵基准性能指标 η_{me} 下式(13)

$$[0031] \quad \eta_{me} = \frac{H_\alpha(Y_{1,2})_{me}}{H_\alpha(Y_{1,2})_{act}} \quad (13)$$

[0032] 其中, $H_\alpha(X) = \frac{1}{1-\alpha} \ln \sum_{i=1}^n p_i^\alpha$, X 为数量有限的离散随机变量,离散随机变量 $X =$

$\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $H_\alpha(Y_{1,2})_{me}$ 为并行串级控制系统的核心信息熵, $H_\alpha(Y_{1,2})_{act}$ 为并行串级控制系统的实际信息熵;

[0033] 步骤八,将 $Y_{1,2}$ 代入 $H_\alpha(X)$ 中的 X 并根据Renyi熵的部分引理得到下式(14)

$$[0034] \quad H_\alpha(Y_{1,2}) \geq H_\alpha(Q_1 w_1) + H_\alpha(Q_4 w_2) \quad (14)$$

[0035] Renyi熵的部分引理如下:

[0036] 引理1:如果 X 是随机变量,且 $\forall m \in R, m \neq 0$,那么 $H_\alpha(mX) = H_\alpha(X)$,

[0037] 引理2:对于两个随机变量 X, Y ,那么 $H_\alpha(X, Y) = H_\alpha(X|Y) + H_\alpha(Y) = H_\alpha(Y|X) + H_\alpha(X)$,如果 X, Y 相互独立,则 $H_\alpha(X, Y) = H_\alpha(X) + H_\alpha(Y)$,

[0038]

[0039] 引理3:对于给定的离散变量 X ,定义在常见的概率空间中,存在 $H_\alpha(X) \geq 0$;

[0040] 步骤九,根据式(14)确定Renyi熵的最小值 $H_\alpha(Y_{1,2})_{me}$ 见下式(15)

[0041] $H_\alpha(Y_{1,2})_{me} = H_\alpha(Q_{1W1}) + H_\alpha(Q_{4W2})$ (15);

[0042] 步骤十,将式(15)代入到式(13)即可得到 η_{me} 。

[0043] 本发明提供的基于最小信息熵的并行串级控制系统的评价方法,还可以具有这样的特征:其中,在步骤二中,式(2)和(3)根据梅森公式变形得到。

[0044] 本发明提供的基于最小信息熵的并行串级控制系统的评价方法,还可以具有这样的特征:其中,步骤七中的实际信息熵 $H_\alpha(Y_{1,2})_{act}$,通过以下过程实现:首先,把实际输出值分成不同的值域,其次,计算实际输出值在该实际输出值对应的值域中的相对频率,最后,

将相对频率代入公式 $H_\alpha(X) = \frac{1}{1-\alpha} \ln \sum_{i=1}^n p_i^\alpha$ 计算得到。

[0045] 本发明提供的基于最小信息熵的并行串级控制系统的评价方法,还可以具有这样的特征:其中,步骤九通过以下过程实现:

[0046] 首先,根据引理2以及式(12),则

[0047] $H_\alpha(Y_{1,2}) = H_\alpha(Q_{1W1}, (z^{-d1}H_{1W1} + z^{-d2}H_{3W1})) + H_\alpha(Q_{4W2}, (z^{-d1}H_{2W2} + z^{-d2}H_{4W2}))$ (14a),

[0048] 其次,根据引理2,得到

[0049] $H_\alpha(Q_{1W1}, (z^{-d1}H_{1W1} + z^{-d2}H_{3W1})) = H_\alpha((z^{-d1}H_{1W1} + z^{-d2}H_{3W1}) | Q_{1W1}) + H_\alpha(Q_{1W1})$ (14b)

[0050] $H_\alpha(Q_{4W2}, (z^{-d1}H_{2W2} + z^{-d2}H_{4W2})) = H_\alpha((z^{-d1}H_{2W2} + z^{-d2}H_{4W2}) | Q_{4W2}) + H_\alpha(Q_{4W2})$ (14c),

[0051] 再次,根据引理3以及式(14b)、(14c),得到

[0052] $H_\alpha(Q_{1W1}, (z^{-d1}H_{1W1} + z^{-d2}H_{3W1})) \geq H_\alpha(Q_{1W1})$ (14d)

[0053] $H_\alpha(Q_{4W2}, (z^{-d1}H_{2W2} + z^{-d2}H_{4W2})) \geq H_\alpha(Q_{4W2})$ (14d),

[0054] 最后,将式(14d)和(14d)代入式(14a)中得到式(14)。

[0055] 发明的作用与效果

[0056] 本发明提供了一种基于最小信息熵的并行串级控制系统的评价方法,利用最小信息熵基准评估并行串级控制系统的性能。最小信息熵指标不仅能正确反映高斯扰动时的并行串级控制系统的性能,也能很好的反应非高斯扰动时的并行串级控制系统的性能。通过与最小方差和带遗忘因子的最小方差的评估结果相比,最小信息熵指标能够更加有效地反应并行串级控制系统的性能。弥补了现有的并行串级控制系统的评价方法的缺点,避免了并行串级控制系统的评价方法的局限性。

附图说明

[0057] 图1是本发明的实施例中基于最小信息熵的并行串级控制系统的评价方法的并行串级控制系统的结构图;

[0058] 图2是本发明的实施例中高斯噪声下的输出图;以及

[0059] 图3是本发明的实施例中 β 分布下的输出图。

具体实施方式

[0060] 为了使本发明实现的技术手段、创作特征、达成目的与功效易于明白了解,以下实施例结合附图对本发明作具体阐述。

[0061] 如图1所示,本实施例中的基于最小信息熵的并行串级控制系统的评价方法包括以下步骤:

[0062] 步骤一,根据并行串级控制系统,共有两个回路,输入信号为 Y_{set} ,总输出值 $Y_{1,2}$ 见下式(1)

$$[0063] \quad Y_{1,2} = Y_1 + Y_2 \quad (1)$$

[0064] Y_1 为主回路的输出值, Y_2 为二回路的输出值;

[0065] 步骤二,假设输入信号 $Y_{set} = 0$,则主回路的输出值 Y_1 和二回路的输出值 Y_2 分别根据梅森公式变形得到下式(2)和(3)

$$[0066] \quad Y_1 = \frac{(1+G_{p2}G_{c2})G_{w1}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{c2}G_{p1}G_{c1}} w_1 - \frac{G_{p1}G_{c2}G_{w2}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{c2}G_{p1}G_{c1}} w_2 \quad (2)$$

$$[0067] \quad Y_2 = \frac{-G_{p2}G_{c2}G_{c1}G_{w1}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{c2}G_{p1}G_{c1}} w_1 + \frac{(1+G_{p1}G_{c2}G_{c1})G_{w2}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{c2}G_{p1}G_{c1}} w_2 \quad (3)$$

[0068] G_{p1} 和 G_{p2} 分别代表主回路和二回路的过程模型。 G_{c1} 和 G_{c2} 分别是主回路和二回路的控制器, G_{w1} 和 G_{w2} 分别为主回路和二回路的扰动模型。 w_1 和 w_2 为加在主回路和二回路的噪声序列且 w_1 和 w_2 相互独立;

[0069] 步骤三,通过丢番图方程将 G_{w1} 和 G_{w2} 分别分解见下式(4)和(5)并将 G_{p1} 和 G_{p2} 先离散再进行Z变换得到下式(6)和(7)

$$[0070] \quad G_{w1} = Q_1 + R_1 z^{-d_1} = Q_3 + R_3 z^{-d_2} \quad (4)$$

$$[0071] \quad G_{w2} = Q_2 + R_2 z^{-d_1} = Q_4 + R_4 z^{-d_2} \quad (5)$$

$$[0072] \quad G_{p1} = G_{p1}^* * z^{-d_1} \quad (6)$$

$$[0073] \quad G_{p2} = G_{p2}^* * z^{-d_2} \quad (7)$$

[0074] d_1 为主回路的时间因子, d_2 为二回路的时间因子, z 为单位时间因子, Q_1 和 Q_2 是 (d_1-1) 的多项式, Q_3 和 Q_4 是 (d_2-1) 的多项式, $R_1 \sim R_4$ 是合适的传递函数, Q_1 和 Q_4 可表示为
 $Q_1 = f_0 + f_1 z^{-1} + \dots + f_{d_1-1} z^{-(d_1-1)}$, $f_0, f_1, \dots, f_{d_1-1}$ 为 Q_1 多项式的系数,

$Q_4 = q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{d_2-1} z^{-(d_2-1)}$, $q_0, q_1, \dots, q_{d_2-1}$ 为 Q_4 多项式的系数;

[0075] 步骤四,将式(4)、(5)、(6)和(7)分别代入到式(2)和(3)得到下式(8)和(9)

$$[0076] \quad Y_1 = Q_1 w_1 + z^{-d_1} \left[\frac{R_1(1+G_{p2}G_{c2}) - Q_1 G_{p1}^* G_{c2} G_{c1}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{p1}G_{c2}G_{c1}} w_1 + \frac{-Q_2 G_{p1}^* G_{c2} - R_2 G_{p1} G_{c2}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{p1}G_{c2}G_{c1}} w_2 \right] \quad (8)$$

$$[0077] \quad Y_2 = Q_4 w_2 + z^{-d_2} \left[\frac{-Q_3 G_{p2}^* G_{c2} G_{c1} - R_3 G_{p2} G_{c2} G_{c1}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{p1}G_{c2}G_{c1}} w_1 + \frac{R_4(1+G_{p1}G_{c2}G_{c1}) - Q_4 G_{p2}^* G_{c2}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{p1}G_{c2}G_{c1}} w_2 \right] \quad (9)$$

[0078] 步骤五,将(8)和(9)简化得到下式(10)和(11)

$$[0079] \quad Y_1 = Q_1 w_1 + z^{-d_1} (H_1 w_1 + H_2 w_2) \quad (10)$$

$$[0080] \quad Y_2 = Q_4 w_2 + z^{-d_2} (H_3 w_1 + H_4 w_2) \quad (11)$$

$$[0081] \quad \text{其中, } H_1 = \frac{R_1(1+G_{p2}G_{c2})-Q_1G_{p1}^*G_{c2}G_{c1}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{p1}G_{c2}G_{c1}} \quad H_2 = \frac{-Q_2G_{p1}^*G_{c2}-R_2G_{p1}G_{c2}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{p1}G_{c2}G_{c1}}$$

$$[0082] \quad H_3 = \frac{-Q_3G_{p2}^*G_{c2}G_{c1}-R_3G_{p2}G_{c2}G_{c1}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{p1}G_{c2}G_{c1}} \quad H_4 = \frac{R_4(1+G_{p1}G_{c2}G_{c1})-Q_4G_{p2}^*G_{c2}}{1+G_{p2}G_{c2}+G_{p1}G_{c2}G_{c1}}$$

[0083] 步骤六,确定总输出值 $Y_{1,2}$,将式(10)和(11)代入式(1)中得到总输出值 $Y_{1,2}$ 的计算公式见下式(12)

$$[0084] \quad Y_{1,2} = Q_1W_1 + z^{-d1}(H_1W_1 + H_2W_2) + Q_4W_2 + z^{-d2}(H_3W_1 + H_4W_2) \quad (12);$$

[0085] 步骤七,通过一个含有连续变量 α 的Renyi熵 $H_\alpha(X)$ 来描述并行串级控制系统的特性,定义并行串级控制系统的 α 阶最小信息熵基准性能指标 η_{me} 下式(13)

$$[0086] \quad \eta_{me} = \frac{H_\alpha(Y_{1,2})_{me}}{H_\alpha(Y_{1,2})_{act}} \quad (13)$$

[0087] 其中, $H_\alpha(X) = \frac{1}{1-\alpha} \ln \sum_{i=1}^n p_i^\alpha$, X 为数量有限的离散随机变量,离散随机变量 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $H_\alpha(Y_{1,2})_{me}$ 为并行串级控制系统的 α 阶最小信息熵, $H_\alpha(Y_{1,2})_{act}$ 为并行串级控制系统的实际信息熵,可通过以下过程实现:

[0088] 首先,把实际输出值分成不同的值域,其次,计算实际输出值在该实际输出值对应的值域中的相对频率,最后,将相对频率代入公式 $H_\alpha(X) = \frac{1}{1-\alpha} \ln \sum_{i=1}^n p_i^\alpha$ 计算得到。

[0089] 步骤八,将 $Y_{1,2}$ 代入 $H_\alpha(X)$ 中的 X 并列Renyi熵的如下引理:

[0090] 引理1:如果 X 是随机变量,且 $\forall m \in R, m \neq 0$,那么 $H_\alpha(mX) = H_\alpha(X)$ 。

[0091] 引理2:对于两个随机变量 X, Y ,那么 $H_\alpha(X, Y) = H_\alpha(X|Y) + H_\alpha(Y) = H_\alpha(Y|X) + H_\alpha(X)$,如果 X, Y 相互独立,则 $H_\alpha(X, Y) = H_\alpha(X) + H_\alpha(Y)$ 。

[0092] 引理3:对于给定的离散变量 X ,定义在常见的概率空间中,存在 $H_\alpha(X) \geq 0$ 。

[0093] 首先,根据引理2以及式(12),则

$$[0094] \quad H_\alpha(Y_{1,2}) = H_\alpha(Q_1W_1, (z^{-d1}H_1W_1 + z^{-d2}H_3W_1)) + H_\alpha(Q_4W_2, (z^{-d1}H_2W_2 + z^{-d2}H_4W_2)) \quad (14a),$$

[0095] 其次,根据引理2,得到

$$[0096] \quad H_\alpha(Q_1W_1, (z^{-d1}H_1W_1 + z^{-d2}H_3W_1)) = H_\alpha((z^{-d1}H_1W_1 + z^{-d2}H_3W_1) | Q_1W_1) + H_\alpha(Q_1W_1) \quad (14b)$$

$$[0097] \quad H_\alpha(Q_4W_2, (z^{-d1}H_2W_2 + z^{-d2}H_4W_2)) = H_\alpha((z^{-d1}H_2W_2 + z^{-d2}H_4W_2) | Q_4W_2) + H_\alpha(Q_4W_2) \quad (14c),$$

[0098] 再次,根据引理3以及式(14b)、(14c),得到

$$[0099] \quad H_\alpha(Q_1W_1, (z^{-d1}H_1W_1 + z^{-d2}H_3W_1)) \geq H_\alpha(Q_1W_1) \quad (14d)$$

$$[0100] \quad H_\alpha(Q_4W_2, (z^{-d1}H_2W_2 + z^{-d2}H_4W_2)) \geq H_\alpha(Q_4W_2) \quad (14d),$$

[0101] 最后,将式(14d)和(14d)代入式(14a)中得到下式(14)

$$[0102] \quad H_\alpha(Y_{1,2}) \geq H_\alpha(Q_1W_1) + H_\alpha(Q_4W_2) \quad (14)$$

[0103] 步骤九,根据式(14)确定Renyi熵的最小值 $H_\alpha(Y_{1,2})_{me}$ 见下式(15)

$$[0104] \quad H_\alpha(Y_{1,2})_{me} = H_\alpha(Q_1W_1) + H_\alpha(Q_4W_2) \quad (15);$$

[0105] 步骤十,将式(15)代入到式(13)即可得到 η_{me} 的计算方法。

[0106] 步骤十一,计算并行串级控制系统的 α 阶最小方差指标 η_{mv} 见下式(16)

$$[0107] \quad \eta_{mv} = \frac{\delta_{(Y1, Y2)_{mv}}^2}{\delta_{(Y1, Y2)_{act}}^2} \quad (16)$$

[0108] $\delta_{(Y1, Y2)_{act}}^2$ 为并行串级控制系统的实际方差, $\delta_{(Y1, Y2)_{mv}}^2$ 为并行串级控制系统的最小方差, 已发表文献证明如果 H_2 为 0, 则 G_{w2} 也为 0; 如果 H_3 为 0, 则 G_{w1} 也为 0。但在真实的系统中 G_{w1} 和 G_{w2} 不可能为 0, 所以当 H_1 和 H_4 为 0, H_2 和 H_3 趋于 0 时, 此时方差最小。则理想的最小方差为 $\delta_{(Y1, Y2)_{mv}}^2 = \text{var}(Q_1 w_1 + Q_2 w_2)$ 。

[0109] 为验证为了验证最小信息熵性能评估的有效性, 采用前人研究所发表的文献中的仿真模型, 该仿真模型如下:

$$[0110] \quad Y_1(k) = \frac{1}{1-0.8z^{-1}} u_2(k-5) + \frac{1}{1-0.7z^{-1}} w_1(k) \quad (17a)$$

$$[0111] \quad Y_2(k) = \frac{1}{1-0.4z^{-1}} u_2(k-3) + \frac{1}{1-0.5z^{-1}} w_2(k) \quad (17b)$$

$$[0112] \quad d_1=5, d_2=3 \quad (17c)$$

[0113] 其中, k 为单位时间因子, 主回路和二回路的控制器 G_{c1} 和 G_{c2} 见下式

$$[0114] \quad G_{c1} = \frac{1.344 - 3.1461z^{-1} + 2.4861z^{-2} - 0.6646z^{-3}}{1 - 1.9411z^{-1} + 1.2342z^{-2} - 0.248z^{-3}} \quad (18a)$$

$$[0115] \quad G_{c2} = \frac{0.1219 + 0.1349z^{-1} + 0.0269z^{-2} + 0.0132z^{-3}}{1 + 1.5419z^{-1} + 0.9127z^{-2} + 0.3869z^{-3}} \quad (18b)$$

[0116] 当 $w_1(k)$, $w_2(k)$ 为高斯扰动时, 系统输出 $Y_1(k)$, $Y_2(k)$ 如图 2 所示, 其中 $w_1(k)$, $w_2(k)$ 的均值为 0, 方差分别为 0.7189 和 0.6784。

[0117] 如图 3 所示, 当 $w_1(k)$, $w_2(k)$ 为非高斯扰动时, 本文选择服从 β 分布来进行仿真。其中 $w_1(k)$, $w_2(k)$ 的概率密度函数表示为:

$$[0118] \quad \gamma_w(z, \alpha, \mu) = \begin{cases} [5^{\alpha+\mu+1} \beta(\alpha+1, \mu+1)]^{-1} \times & z \in (-1, 1) \\ (z+1)^\alpha (1-z)^\mu & \text{otherwise} \\ 0 & \end{cases}$$

[0119] 其中对于 $w_1(k)$, α, μ 最优值分别取 9 和 2; 对于 $w_2(k)$, α, μ 最优值分别取 5 和 2。系统输出 $Y_1(k)$, $Y_2(k)$ 如图 3 所示。

[0120] 对于 $w_1(k)$, $w_2(k)$ 为高斯扰动时, $w_1(k)$, $w_2(k)$ 方差已知, 则 η_{mv} 根据式 (16) 计算, 对于 $w_1(k)$, $w_2(k)$ 服从 β 分布, $w_1(k)$, $w_2(k)$ 的分布概率已知, η_{me} 根据式 (15)、(13) 计算, 最后计算结果如下表所示:

[0121] 表 1 并行串级控制系统性能分别基于最小方差性能指标和最小信息指标对比结果

[0122]

系统	η_{mv}	η_{me}
高斯扰动下控制性能	0.946	0.953
β 分布噪声下控制性能	0.523	0.853

[0123] 根据表 1 可以看出对于非高斯噪声分布的系统, 最小方差性能指标不能正确体现

当前控制回路的性能。而最小信息熵指标不仅能正确反映高斯系统控制回路的性能,也能很好的反应非高斯系统控制回路的性能。

[0124] 实施例的作用与效果

[0125] 本实施例提供了一种基于最小信息熵的并行串级控制系统的评价方法,利用最小信息熵基准评估并行串级控制系统的性能。最小信息熵指标不仅能正确反映高斯扰动时的并行串级控制系统的性能,也能很好的反应非高斯扰动时的并行串级控制系统的性能。通过与最小方差和带遗忘因子的最小方差的评估结果相比,最小信息熵指标能够更加有效地反应并行串级控制系统的性能。弥补了现有评价并行串级控制系统的方法的缺点,避免了评价并行串级控制系统的方法的局限性。

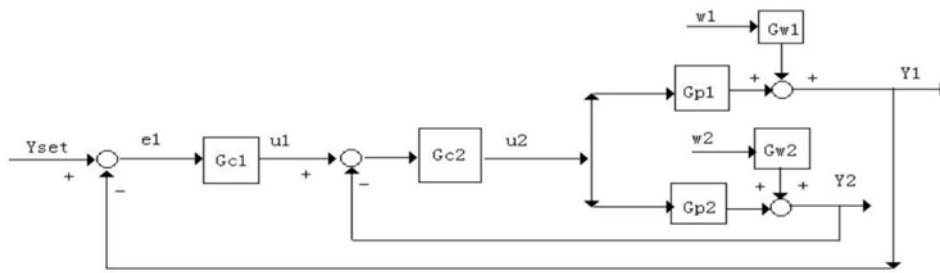


图1

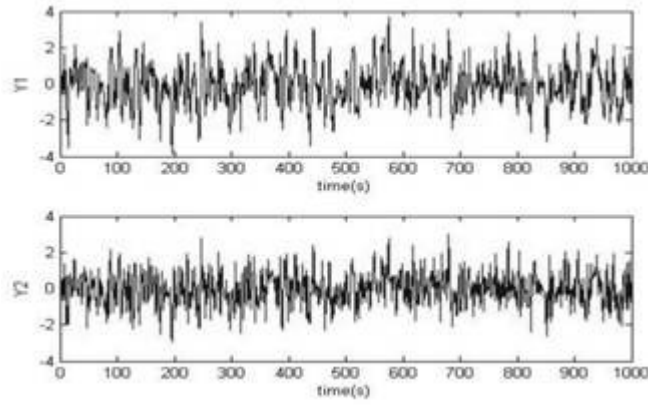


图2

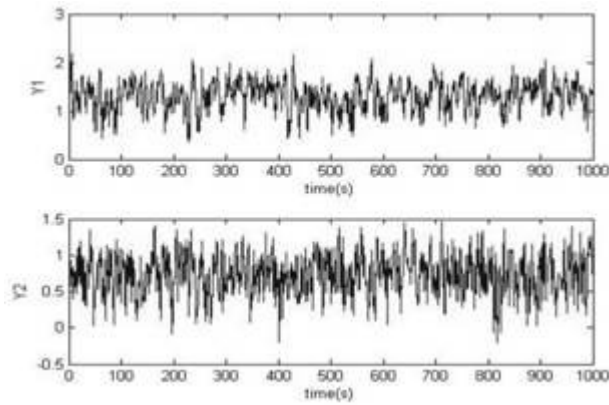


图3