

一阶伪线性系统的模型参考输出跟踪控制

许 刚, 段广仁[†]

(哈尔滨工业大学 控制理论与制导技术研究中心, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对伪线性系统的模型参考输出跟踪问题, 设计伪线性系统的模型参考跟踪策略. 控制器分为两部分, 其一为反馈镇定控制器, 保证闭环系统是渐近稳定的; 另一为前馈补偿控制器, 通过求解基于控制器存在条件建立的方程组得到控制器的参量矩阵, 使得闭环系统的输出渐近跟踪参考系统的输出, 且当系统中存在时变系数时方法仍是有效的, 控制器中保有部分自由度可以进一步利用, 以提高具体控制任务所需的系统性能. 数值仿真验证了所提出方法的有效性.

关键词: 伪线性系统; 模型参考跟踪; 特征结构配置; 输出反馈; 自由度

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Model reference output tracking control for first-order quasi-linear systems

XU Gang, DUAN Guang-ren[†]

(Center for Control Theory and Guidance Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The model reference control strategy is designed for the model reference control problem of quasi-linear systems. The quasi-linear model reference controller consists of two parts, the feedback stabilization controller guarantees that the closed-loop system is asymptotically stable, the feed-forward compensator controller ensures that the output of the closed-loop system can asymptotically track the output of reference model, the parameter matrices of controller are solved by the existence condition of the controller, what is more, the strategy is still effective when there are time-varying parameters in the open-loop system model and reference model, and degree of freedom in controller can be used to improve the system performance that control task needs. The simulation demonstrates the effectiveness of the proposed scheme.

Keywords: quasi-linear system; model reference track; eigenstructure assignment; output feedback; degree of freedom

0 引 言

伪线性系统本质上是非线性系统, 可以改写成线性系统的系数矩阵形式, 而系数矩阵中包含有系统状态变量. 在航天器控制领域, 很多控制问题的系统模型是伪线性的, 如描述航天器相对运动的视线坐标系模型, 其可以写为系数矩阵中含有状态变量的状态空间形式. 很多航天器控制任务可归结为伪线性系统的模型参考跟踪问题, 如空间机器人控制^[1]、航天器姿轨联合控制^[2-3]、空间拦截^[4]、卫星姿态控制^[5]等.

针对线性系统的模型参考跟踪控制方法的研究, 已经有了许多研究成果^[6-12], 然而, 关于非线性系统模型参考跟踪控制方法的研究成果较少. 文献[13]

提出了基于观测器的非线性分布参数系统的模型参考跟踪控制器; 文献[14]和文献[15]研究了广义非线性系统的模型参考跟踪控制问题, 针对系统中的线性部分和非线性部分分别设计控制器, 使得闭环系统的状态能够渐近跟踪参考模型的状态.

伪线性系统本质上是非线性系统, 基于线性系统的模型参考跟踪方法无法应用, 对此, 本文提出伪线性系统框架下的模型参考输出跟踪策略, 且系统模型与参考系统模型均为伪线性的. 所提出的控制器包含两部分, 其一是基于参数化方法提出的反馈镇定控制器, 保证在控制器作用下的闭环系统是渐近稳定的; 另一是前馈补偿控制器, 使得闭环系统的输出能

收稿日期: 2016-08-27; 修回日期: 2016-11-29.

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(61690210, 61690212); 国家自然科学基金委重点项目(61333003); 机器人技术与系统国家重点实验室(哈尔滨工业大学)自主研究课题(SKLR201502B).

作者简介: 许刚(1986—), 男, 博士, 从事航天器姿轨联合控制、伪线性系统参数化控制的研究; 段广仁(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事鲁棒控制理论、参数化方法、伪线性系统控制理论等研究.

[†]通讯作者. E-mail: g.r.duan@hit.edu.cn

够渐近跟踪参考模型的输出,且当系统中存在时变参数时,方法仍是有效的.最后给出两组数值仿真,验证了所提出方法的有效性.

1 问题阐述

给出一般形式的一阶伪线性动力学系统如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x)x + Bu, \\ y = C(x)x. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x \in R^n, y \in R^m, u \in R^r, A \in R^{n \times p}, B \in R^{n \times r}, C \in R^{m \times n}$ 是关于伪线性系统状态 x 的系数矩阵.

参考跟踪模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_r = A_r(x_r)x_r, \\ y_r = C_r(x_r)x_r. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $x_r \in R^p, y_r \in R^m, A_r \in R^{m \times p}$ 和 $C_r \in R^{m \times p}$ 是关于参考模型状态 x_r 的系数矩阵.

为一阶伪线性动力学系统选取如下的控制器:

$$u = K(y)y + K_r(x_r)x_r. \quad (3)$$

其中: $K(y) \in R^{r \times m}$ 是输出反馈镇定控制器, $K_r(x_r) \in R^{r \times p}$ 是前馈补偿控制器.将模型参考输出跟踪控制器代入系统(1)中,得到

$$\begin{cases} \dot{x} = A_{cs}x + BK_r(x_r)x_r, \\ y = C(x)x. \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$A_{cs}(x) = A(x) + BK(y). \quad (5)$$

输出反馈镇定控制器 $K(y)$ 能够保证闭环系统 $\dot{x} = A_{cs}(x)$ 是渐近稳定的.控制器的设计目的是令闭环系统(4)的输出渐近跟踪参考模型的输出,从而一阶伪线性动力学系统的模型参考输出跟踪问题可以归结如下.

问题1 给定一阶伪线性系统(1)和参考模型(2),求解输出反馈镇定控制器 $K(y) \in R^{r \times m}$ 和前馈补偿控制器 $K_r(x_r) \in R^{r \times p}$ 使得下式成立:

$$\lim_{t \rightarrow 0} [y - y_r] = 0. \quad (6)$$

2 控制器设计

2.1 控制器存在的条件

为求解问题1,首先给出下面的定理.

定理1 给定一阶伪线性动力学系统(1)和参考模型(2),如果系统(1)是可稳的,且有矩阵 $\gamma(x) \in R^{n \times n}$ 和 $\eta(x) \in R^{n \times n}$ 满足

$$\begin{cases} A(x)\gamma(x, x_r) - \gamma(x, x_r)A_r(x_r) + \\ B\eta(x, x_r) = \dot{\gamma}(x, x_r), \\ C(x)\gamma(x, x_r) - C_r(x_r) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

则任意的反馈镇定控制器 $K(x)$ 和前馈补偿控制器

$$K_r(x, x_r) = \eta(x, x_r) - K(x)C(x)\gamma(x, x_r) \quad (8)$$

可以使式(6)成立.

证明 令

$$\begin{cases} \delta x = x - \gamma(x, x_r)x_r, \\ \delta u = u - \eta(x, x_r)x_r, \\ \delta y = y - y_r. \end{cases} \quad (9)$$

则可以得到

$$\begin{aligned} \delta \dot{x} &= \dot{x} - \dot{\gamma}(x, x_r)x_r - \gamma(x, x_r)\dot{x}_r = \\ &A(x)x + Bu(x, x_r) - \\ &\dot{\gamma}(x, x_r)x_r - \gamma(x, x_r)A_r(x_r)x_r = \\ &A(x)\delta x + B\delta u(x, x_r) - \\ &\begin{bmatrix} A(x)\gamma(x, x_r) + B\eta(x, x_r) \\ -\dot{\gamma}(x, x_r) - \gamma(x, x_r)A_r(x_r) \end{bmatrix} x_r, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \delta y &= y - y_r = Cx - C_r x_r = \\ &C\delta x - (C_r - C\gamma(x, x_r))x_r. \end{aligned} \quad (11)$$

当下面的方程组成立时:

$$\begin{cases} A(x)\gamma(x, x_r) + B\eta(x, x_r) - \\ \dot{\gamma}(x, x_r) - \gamma(x, x_r)A_r = 0, \\ C(x)\gamma(x, x_r) - C_r(x_r) = 0, \end{cases} \quad (12)$$

式(10)和(11)化为

$$\begin{cases} \delta \dot{x} = A(x)\delta x + B\delta u(x, x_r), \\ \delta y = C\delta x. \end{cases} \quad (13)$$

可以看出,式(13)与(1)具有相同的结构.因为输出反馈镇定控制器

$$u = K(x)C(x)x \quad (14)$$

可以镇定系统(1),所以与式(14)相同结构的输出反馈控制器

$$\delta u = K(x)C(x)\delta x \quad (15)$$

可以镇定系统(13),即问题1中的式(6)成立.将式(9)代入(15)可以得到

$$u = K(x)C(x)x + [\eta(x, x_r) - K(x)C(x)\gamma(x, x_r)]x_r, \quad (16)$$

$$K_r(x, x_r) = \eta(x, x_r) - K(x)C(x)\gamma(x, x_r). \quad (17)$$

定理1成立. $\square$

注1 当开环系统(1)和参考系统(2)中的系数矩阵包含有时变参数时,依照定理1的证明思路仍然可以得到相同的结果,相应的系数矩阵中则包含有时变参数,控制器结构与定理1中相同,即本文中提出的

伪线性系统模型参考跟踪策略适用于伪线性时变系统的控制器设计.

2.2 前馈补偿控制器求解

基于矩阵分析中的广义逆理论^[16],方程组(8)有解的条件为

$$\begin{cases} BB^+(\dot{\gamma} - A\gamma + \gamma A_r) = \dot{\gamma} - A\gamma + \gamma A_r, \\ CC^+C_r = C_r. \end{cases} \quad (18)$$

其中 B^+ 和 C^+ 分别是矩阵 B 和 C 的广义逆矩阵,即

$$\begin{cases} BB^+B = B, \\ B^+BB^+ = B^+, \\ (BB^+)^H = BB^+, \\ (B^+B)^H = B^+B; \\ CC^+C = C, \\ C^+CC^+ = C^+, \\ (CC^+)^H = CC^+, \\ (C^+C)^H = C^+C. \end{cases} \quad (19)$$

当式(18)成立时,可以得到式(8)的解为

$$\begin{cases} \eta = B^+[\dot{\gamma} + \gamma A_r - A\gamma] + [I_r - B^+B]Y_h, \\ \gamma = C^+C_r + [I_n - C^+C]Y_g, \end{cases} \quad (20)$$

其中 Y_h 和 Y_g 是恰当维数的任意矩阵.特别地,当矩阵 B 和 C 是非奇异矩阵时,式(8)的解简化为

$$\begin{cases} \eta = B^{-1}[\dot{\gamma} + \gamma A_r - A\gamma], \\ \gamma = C^{-1}C_r. \end{cases} \quad (21)$$

2.3 输出反馈镇定控制器设计

记

$$F = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_{2n}), \quad (22)$$

其中 $s_i (i = 1, 2, \dots, 2n)$ 是具有负实部的复数.输出反馈镇定控制器的设计问题可以归结如下.

问题2 给定系统(1)和对角矩阵 $F \in R^{n \times n}$,求取矩阵 $T(x)$, $V(x) \in R^{n \times n}$ 和反馈镇定控制器 $K(x) \in R^{r \times m}$ 使

$$T^T V = I_n \quad (23)$$

和

$$T^T A_{cs} V = F \quad (24)$$

成立.

矩阵 A_{cs} 和矩阵 F 是一对常系数相似矩阵,所以当矩阵 F 的特征值均具有负实部时,可以确保闭环系统是渐近稳定的.

为了求解问题2,给出如下的右互质分解(RCF)

方程组^[17]:

$$\begin{cases} [sI - A(x)]^{-1}B = N(x, s)D^{-1}(x, s), \\ C(x)[sI - A(x)]^{-1} = L^{-1}(x, s)M(x, s). \end{cases} \quad (25)$$

其中

$$\begin{cases} N(x, s) = N_0(x) + N_1(x)s + \dots + N_\tau(x)s^\tau, \\ D(x, s) = D_0(x) + D_1(x)s + \dots + D_\tau(x)s^\tau, \\ L(x, s) = L_0(x) + L_1(x)s + \dots + L_\tau(x)s^\tau, \\ M(x, s) = M_0(x) + M_1(x)s + \dots + M_\tau(x)s^\tau. \end{cases} \quad (26)$$

RCF方程组(25)的解是

$$\begin{cases} N(x, s) = \text{adj}(sI - A(x))B, \\ D(x, s) = \det(sI - A(x))I_n, \\ L(x, s) = C(x)\text{adj}(sI - A(x)), \\ M(x, s) = \det(sI - A(x))I_n. \end{cases} \quad (27)$$

利用上述的RCF方程组,下面的引理给出参数化形式的输出反馈镇定控制器的求解方法,相关理论可以参见文献[16].

引理1 给出满足式(27)的矩阵 $N(x, s)$, $D(x, s)$, $L(x, s)$ 和 $M(x, s)$,有:

1) 当且仅当存在向量 $z_i \in R^r$, $g_i \in R^m$, $i = 1, 2, \dots, n$,满足

$$g_i^T M(x, s_i) N(x, s_j) z_j = \delta_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (28)$$

时,问题2有解.

2) 当式(28)成立时,所有的左右特征向量矩阵 T 和 V 如下:

$$\begin{cases} T_i(\{s_k, g_k\}) = M(x, s_i)g_i, \\ V_i(\{s_k, z_k\}) = N(x, s_i)z_i, \\ i = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (29)$$

从而得到参数化的输出反馈增益矩阵

$$K(x) = W_c(CV)^T[(CV)(CV)^T]^{-1}, \quad (30)$$

或可以写为

$$K(x) = [(T^T B)^T (T^T B)]^{-1} (T^T B)^T W_b. \quad (31)$$

其中

$$\begin{cases} W_{bi}(\{s_k, g_k\}) = L(x, s_i)g_i, \\ W_{ci}(\{s_k, z_k\}) = D(x, s_i)z_i, \\ i = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (32)$$

注2 本文给出的矩阵 F 是对角阵,但其可以为约当型或任意矩阵,相应的解也与 F 为对角阵式不同,具体的理论和结果可以参阅文献[18-19].

注3 在提出的伪线性系统模型参考跟踪控制

策略中,反馈镇定控制器的设计方法不是唯一的,从定理1的证明过程中也可以得知,任意的可以镇定系统(1)的控制器都适用于本文提出的模型参考跟踪方法.本文给出的反馈镇定控制器的优势是可以使得镇定控制器作用下的闭环系统是线性系统,且有额外的自由度可以利用以提高具体任务所需的特定性能.

2.4 控制器优化

由2.3节中的引理1可知,当系统(1)给定时,其输出反馈增益矩阵和前馈补偿增益矩阵可以由系统的极点和自由参量 $s_i, z_i Y_h$ 和 Y_g 唯一确定,上述变量给出了控制律 u 的全部自由度.可以通过在一定范围内优化这些参数使得系统满足相应的性能,从而控制器的优化问题可以转化为由不同的性能指标决定的非线性规划问题.本文给出两个常见的性能指标作为范例.

2.4.1 特征值灵敏度指标

闭环系统的特征值灵敏度与系统的鲁棒稳定性直接相关.在控制器设计中,利用额外的自由度来极小化闭环系统特征值灵敏度,可以提高系统的鲁棒稳定性能,相应的性能指标为

$$J_1 = \|V\| \|V^{-1}\|. \quad (33)$$

2.4.2 跟踪性能指标

在模型参考跟踪控制器设计过程中,系统的跟踪性能是需要被考虑的重要指标.在航天器控制任务中,如航天器绕飞、悬停、规避等,控制器的跟踪性能决定了任务完成的快速性和安全性,为了保证航天器控制任务的完成,应当最小化跟踪误差,相应的性能指标为

$$J_2 = \sum_{k=1}^N \|y(k) - y_r(k)\|. \quad (34)$$

多目标优化可以同时考虑多个性能指标,综合提高系统性能,可以根据具体控制任务需求建立如下的混合性能指标:

$$J_m = \alpha J_1 + \beta J_2, \quad (35)$$

其中 α 和 β 为相应指标的权重系数.在优化过程中可以通过调整权重系数以达到所需的系统总综合性能.

2.5 算法步骤

由2.1节至2.3节中的结果可得求解系统(1)的伪线性系统模型参考跟踪控制律的算法如下.

Step 1: 求解参数化形式的输出反馈正定控制器 K . 选定矩阵 F 以保证其所有的特征值都具有负实部,然后基于引理1求解输出反馈正定控制器 K 的参数化解.

Step 2: 求解参数化形式的前馈补偿控制器 K_r . 基于定理1中的控制器存在条件,求解式(20)和(21)中的 γ 和 η ,若控制器的可解性方程(8)无解,则算法终止.

Step 3: 建立性能指标.根据控制器设计任务的具体需求建立相应的优化指标,如

$$\begin{aligned} \min J_m(\gamma, \eta, F, T, V), \\ \text{s.t. 式(19)和(29)}. \end{aligned}$$

Step 4: 求解自由参数.利用优化工具求解相应的非线性规划问题,得到自由参数 γ, η, F, T 和 V .

Step 5: 求解控制器 u .将Step4中的自由参数 γ, η, F, T 和 V 代入参数化形式的控制器 K_r 和 K 中,得到最终的伪线性系统模型参考输出跟踪控制器 u .

3 算法仿真

本节给出两组仿真以验证所提出的伪线性系统模型参考输出跟踪控制律的有效性.

记

$$\begin{aligned} x &= [x_1 \ x_2 \ x_3]^T, \\ x_r &= [x_{r1} \ x_{r2} \ x_{r3}]^T. \end{aligned}$$

仿真图中有3组仿真曲线进行对比,分别是参考模型状态、闭环系统状态和无前馈补偿控制器的系统状态,相应的模型如下.

参考模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_r = A_r(x_r)x_r, \\ y_r = C_r(x_r)x_r; \end{cases}$$

闭环系统模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x)x + B(K(y)y + K_r(x_r)x_r), \\ y = C(x)x; \end{cases}$$

无前馈补偿控制器的系统为

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x)x + BK(y)y, \\ y = C(x)x. \end{cases}$$

3.1 仿真算例1

下面给出第1个仿真算例.给出如下的一阶伪线性系统系数矩阵:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 2 & x_1 x_2 & 3x_3 \\ 1 & 1 & x_2^2 x_1 x_3 \\ -1 - x_1 & 3 & 0 \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C = I_3. \end{aligned}$$

一阶伪线性参考模型的系数矩阵为

$$A_r = \begin{bmatrix} -1.5 & 0.0001x_{r3} & 0 \\ 0 & -0.23 & 1 \\ -0.07x_{r1} & -0.24 & -0.2 \end{bmatrix},$$

$$C_r = I_3.$$

自由参量矩阵选取为

$$F = \text{diag}(-0.25, -0.28, -0.3),$$

$$Z = I_3.$$

其中:矩阵 F 满足具有负实部的条件,且由于数值仿真中未涉及目标优化问题,矩阵 Z 选取为单位阵.

仿真结果如图1~图3所示.其中:实线代表参考模型的输出曲线,点划线代表模型参考跟踪控制器作用下的闭环系统输出,虚线为仅在输出反馈控制器作用下,即没有前馈补偿控制器作用下的输出曲线.

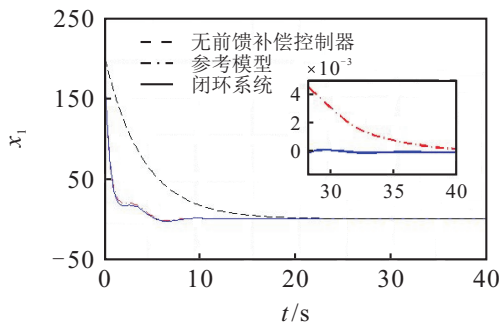


图1 仿真算例1中系统状态 x_1 的曲线

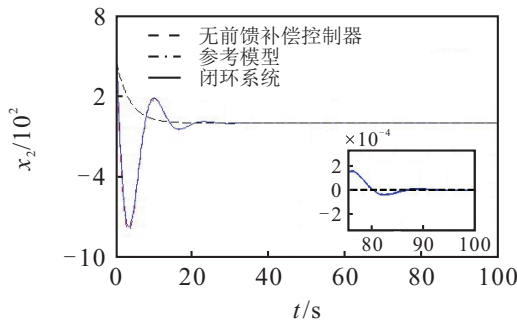


图2 仿真算例1中系统状态 x_2 的曲线

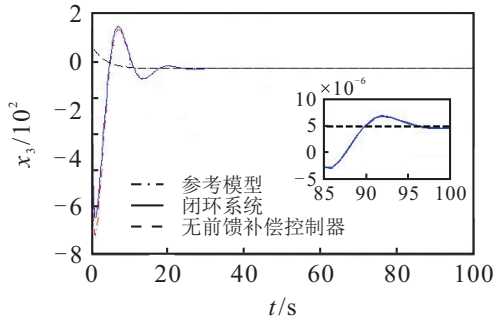


图3 仿真算例1中系统状态 x_3 的曲线

从图1~图3可以看出,系统状态 x_1 、 x_2 、 x_3 在所提出的伪线性系统模型参考输出跟踪控制律的作用下,渐近跟踪了参考模型的输出 x_{r1} 、 x_{r2} 、 x_{r3} ,而虚线所代表的仅在输出反馈镇定控制器作用下的系统是

渐近稳定的,跟踪误差在 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-6} 级别上.

3.2 仿真算例2

给定第2组数值仿真算例的相关系数矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 2 & x_1x_2 & 3x_3 \\ 1 & 1 & x_2^2x_1x_3 \\ -1-x_1 & 3 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

参考模型的系数矩阵为

$$A_r = \begin{bmatrix} -1.5 & 0.0001x_{r3} & 0 & 0 \\ 0 & -0.23x_{r1} & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

控制器中自由参量矩阵的选取与3.1节相同.第2组仿真算例的结果如图4和图5所示.

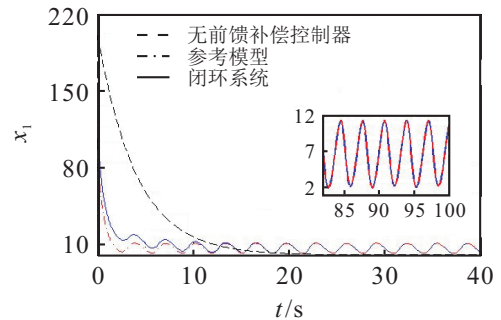


图4 仿真算例2中系统状态 x_1 的曲线

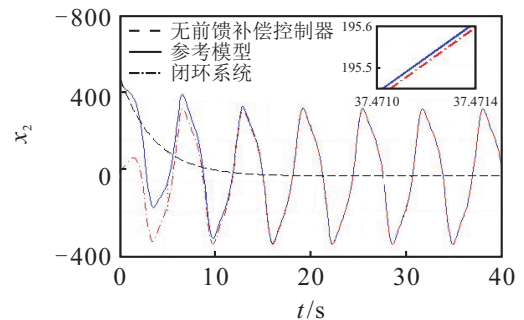


图5 仿真算例2中系统状态 x_2 的曲线

从图4和图5可以看出,与第1组仿真算例相比,不同的是系统的终端状态并不是常值,而是周期变化的,进一步验证本文所提出控制器的有效性.仿真结果表明,伪线性系统模型参考输出控制律是有效的.

4 结论

本文讨论了一阶伪线性系统的模型参考输出跟踪控制器设计问题,给出了具有设计自由度完全参数化形式的控制器.伪线性系统的模型参考输出跟踪

控制器包含两部分,首先通过研究控制器的存在条件得到了求解前馈补偿控制器的方程组,基于矩阵分析中的广义逆理论得到了具有设计自由度的参数化形式的前馈补偿控制器;然后基于伪线性系统的参数化控制器设计理论给出了输出反馈镇定控制器的设计方法.值得注意的是,反馈镇定控制器的设计方法并不是唯一的,其他方法所设计的任意能够镇定开环系统的控制器在本文所提出的模型参考策略中均是有效的.由于两部分控制器中均含有一定自由度,文中还给出了利用自由度提高系统性能的性能指标和相应的优化方式.最后通过两组数值算例验证了所提方法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Rotondo D, Puig V, Nejjari F, et al. A fault-hiding approach for the switching quasi-lpv fault-tolerant control of a four-wheeled omnidirectional mobile robot[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3932-3944.
- [2] Duan G R, Xu G. Direct parametric control approach to robust integrated relative position and attitude control for non-cooperative rendezvous[C]. Proc of the 34th Chinese Control Conf. Hangzhou: IEEE, 2015: 2830-2835.
- [3] Xu G, Duan G R. Quasi-linear model reference tracking controller for spacecraft flying around with constant attitude pointing[C]. Proc of the IEEE Int Conf on Information and Automation. Ningbo: IEEE, 2016: 43-49.
- [4] Duan G R. Non-cooperative rendezvous and interception — A direct parametric control approach[C]. Proc of the Intelligent Control and Automation. 2014: 3497-3504.
- [5] Duan G R. Satellite attitude control — A direct parametric approach[C]. Proc of the Intelligent Control and Automation. Shenyang: IEEE, 2014: 3989-3996.
- [6] Knuppel T, Woittennek F. Control design for quasi-linear hyperbolic systems with an application to the heavy rope[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2015, 60(1): 5-18.
- [7] Gao H, Chen T. Network-based H_∞ output tracking control[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2008, 53(3): 655-667.
- [8] 付艳明, 李伟, 段广仁. 基于T-H方程的卫星轨迹模型参考输出跟踪控制方法[J]. 宇航学报, 2013, 34(3): 496-502.
(Fu Y M, Li W, Duan G R. Satellite trajectory model reference output tracking control based on T-H equation[J]. J of Astronautics, 2013, 34(3): 496-502.)
- [9] Duan G, Tan F, Zhang S, et al. A parametric approach to satellite trajectory tracking control[J]. Aerospace Control & Application, 2008, 34(5): 3-7.
- [10] Henk N, Sergio M. S. On approximate model-reference control of SISO discrete-time nonlinear systems [J]. Automatica, 1998, 34(9): 1261-1266.
- [11] Xing H, Zhong X, Cui W. Feedback control of quasi-linear parabolic distributed parameter systems[J]. Icarus Express Letters, 2013, 7(8): 2491-2496.
- [12] Ambrose H, Qu Z. Model reference robust control for MIMO systems[J]. Int J of Control, 1997, 68(2): 599-624.
- [13] Chang Y T, Chen B S. A fuzzy approach for robust reference-tracking-control design of nonlinear distributed parameter time-delayed systems and its application[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2010, 18(5): 1041-1057.
- [14] Tang H J, Han Z Z, Shang Y H, et al. A design method of model following control for nonlinear descriptor systems and proof of boundedness of internal states[J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(1): 1-8.
- [15] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
(Zhang X D. Matrix analysis and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.)
- [16] Tang H, Okubo S, Zhao B, et al. A design of model following control system for a class of nonlinear descriptor system[C]. Proc of the 23rd Int Conf on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. New Orleans: IEEE, 1997: 295-299.
- [17] Duan G R. Parametric control of quasi-linear systems by output feedback[C]. Int Conf on Control. Korea: IEEE, 2014: 928-934.
- [18] Duan G R. Generalized sylvester equations: Unified parametric solutions[M]. Boca Raton: CRC Press, 2015.

(责任编辑: 齐 霁)