

加前馈补偿的工业机器人自适应控制

辛毅 程勉 高为炳

(北京系统工程研究所)

(北京航空航天大学)

关键词——机器人, 自适应控制.

工业机器人的控制是一个复杂的非线性控制问题. 本文针对由 Lagrange-Euler 方程描述的工业机器人动力学模型, 提出了两种加前馈补偿的自适应控制方法, 并从理论上证明了系统的渐近稳定性.

考虑自由度为 n 的工业机器人, 由 Lagrange-Euler 方程知其动力学方程为

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{d}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{u}. \quad (1)$$

其中 $\mathbf{q} \in R^n$ 为广义坐标向量; $\mathbf{u} \in R^n$ 为广义控制向量; $M(\cdot) \in R^{n \times n}$ 为惯性矩阵; $\mathbf{d}(\cdot, \cdot) \in R^n$ 为哥氏力与向心力向量; $\mathbf{g}(\cdot) \in R^n$ 为重力向量, 一般 $M(\cdot)$ 非奇异.

设与(1)式并联的参考模型为

$$\ddot{\mathbf{q}}_m = A_{1m}\mathbf{q}_m + A_{2m}\dot{\mathbf{q}}_m + B_{2m}\mathbf{r}. \quad (2)$$

其中 $\mathbf{q}_m \in R^n$; $\mathbf{r} \in R^n$ 为参考输入; $A_{1m}, A_{2m}, B_{2m} \in R^{n \times n}$ 均为定常矩阵, 且 B_{2m} 非奇异.

控制方案 I

$$\mathbf{u} = F_1(t)\mathbf{q} + F_2(t)\dot{\mathbf{q}} + F_3(t)\mathbf{r} + F_4(t)\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - [F_4(t) + I_n]\mathbf{f}(\mathbf{q}^d, \dot{\mathbf{q}}^d). \quad (3)$$

控制方案 II

$$\mathbf{u} = F_1(t)\mathbf{q} + F_2(t)\dot{\mathbf{q}} + F_3(t)\mathbf{r} - \mathbf{f}(\mathbf{q}^d, \dot{\mathbf{q}}^d). \quad (4)$$

其中 $\mathbf{q}^d \in R^n$ 为理想的广义坐标运动轨迹; I_n 为 n 阶单位阵; $F_i(\cdot) \in R^{n \times n}$ 为可调增益矩阵, ($i = 1, 2, 3, 4$). $\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = -[\mathbf{d}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q})]$. 记 $\mathbf{e}_1 = \mathbf{q}_m - \mathbf{q}$, $\mathbf{e}_2 = \dot{\mathbf{q}}_m - \dot{\mathbf{q}}$.

定义 1. 对任意的有界初始条件, 如果存在有界的 $F_i(t)$ ($i = 1, 2, 3, 4$), 使得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}_1(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}_2(t) = 0,$$

则称并联模型参考自适应系统(1), (2), (3)或(4)在 e 空间中是自适应渐近稳定的. 则有

定理 1. 并联模型参考自适应控制系统(1)–(3)是自适应渐近稳定的, 如果

$$\dot{F}_3(t) = -F_3(t)B_{2m}^{-1}H_3[P_{12}\mathbf{e}_1 + P_{22}\mathbf{e}_2]\mathbf{r}^T, \quad (5)$$

$$\dot{F}_1(t) = -F_3(t)B_{2m}^{-1}H_1[P_{12}\mathbf{e}_1 + P_{22}\mathbf{e}_2]\mathbf{q}^T, \quad (6)$$

$$\dot{F}_2(t) = -F_3(t)B_{2m}^{-1}H_2[P_{12}\mathbf{e}_1 + P_{22}\mathbf{e}_2]\dot{\mathbf{q}}^T, \quad (7)$$

$$\dot{F}_4(t) = -F_3(t)B_{2m}^{-1}H_4[P_{12}\mathbf{e}_1 + P_{22}\mathbf{e}_2]\Delta\mathbf{f}^T, \quad (8)$$

其中 $H_i \in R^{n \times n} (i=1,2,3,4)$ 均为任意的正定矩阵, $P_{ij} \in R^{n \times n}, (i,j=1,2)$, $P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12} & P_{22} \end{bmatrix}$

$\Delta f = f(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - f(\mathbf{q}^d, \dot{\mathbf{q}}^d)$, $P, Q \in R^{2n \times 2n}$ 均为对称正定矩阵, 满足

$$\begin{bmatrix} O_n & I_n \\ A_{1m} & A_{2m} \end{bmatrix}^T P + P \begin{bmatrix} O_n & I_n \\ A_{1m} & A_{2m} \end{bmatrix} = -Q, \quad (9)$$

其中 O_n 为 n 阶零方阵.

定理 2. 并联模型参考自适应控制系统 (1), (2), (4) 是自适应渐近稳定的, 如果 $F_1(t)$, $F_2(t)$, $F_3(t)$ 的自适应律分别为 (5)–(7), P, Q 满足方程 (9), 且有

$$\frac{\|M^{-1}(\mathbf{q})\Delta f\|}{\left\| \begin{bmatrix} \mathbf{q} - \mathbf{q}^d \\ \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}^d \end{bmatrix} \right\|} \leq \mu = \frac{\min \lambda(Q)}{\max \lambda(P)}. \quad (10)$$

其中 $\|\cdot\|$ 表示欧氏范数, $\lambda(\cdot)$ 表示特征值, 其余记号同定理 1.

ADAPTIVE CONTROL FOR ROBOT MANIPULATORS WITH FEEDFORWARD COMPENSATION

XIN YI

(Beijing Institute of System Engineering)

CHEN MIAN, GAO WEIBIN

(University of Beijing Aeronautics and Astronautics)

Key words——Robot manipulators; adaptive control.