第15卷 第4期 自动化学报 Vol. 15, No. 4
1989年7月 ACTA AUTOMATICA SINICA July, 1989

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

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

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

设与(1)式并联的参考模型为

$$\ddot{\boldsymbol{q}}_m = A_{1m}\boldsymbol{q}_m + A_{2m}\dot{\boldsymbol{q}}_m + B_{2m}\boldsymbol{r}. \tag{2}$$

其中 $\boldsymbol{q}_m \in R^n$;$\boldsymbol{r} \in R^n$ 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

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

控制方案 II

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

其中 $\boldsymbol{q}^d \in R^n$ 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, $(i = 1,2,3,4)$. $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) = -[\boldsymbol{d}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})]$. 记 $\boldsymbol{e}_1 = \boldsymbol{q}_m - \boldsymbol{q}$, $\boldsymbol{e}_2 = \dot{\boldsymbol{q}}_m - \dot{\boldsymbol{q}}$.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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.