对线性系统状态转移矩阵的讨论

Discussion on State Transition Matrix of Linear Systems

张正强　张立华　王化建

(曲阜师范大学电气信息与自动化学院,山东 日照 276826)

摘　要:状态转移矩阵是现代控制理论的重要概念,在线性控制系统的运动分析中起着重要的作用。分别对连续时间线性时变系统、离散时间线性定常系统以及离散时间线性时变系统的状态转移矩阵进行了研究。根据常微分方程和差分方程解的唯一性,得到了判断矩阵函数是某一线性系统状态转移矩阵的充分条件,并求出了其对应的系统矩阵。实践证明了结论的正确性。

关键词:现代控制理论　线性时变系统　状态转移矩阵　离散时间　常微分

中图分类号:TP273　　**文献标志码**:A

Abstract: The state transition matrix is an important concept in modern control theory, and it plays a critical role in motion analysis for linear control systems. The state transition matrixes of continuous time linear time varying system, discrete time linear constant system, and discrete time linear time varying system are studied respectively. By using the uniqueness of solutions of ordinary differential equation and difference equation, sufficient condition for judging a matrix function to become the state transition matrix of certain linear system is obtained; and corresponding system matrixes are resolved. The practice proves that the conclusion is correct.

Keywords: Modern control theory　Linear time varying system　State transition matrix　Discrete time　Ordinary differential

0　引言

状态转移矩阵是现代控制理论的重要概念,在线性控制系统的运动分析中起着重要的作用。文献[1-8]对线性系统的状态转移矩阵(包括连续时间线性定常系统、连续时间线性时变系统、离散时间线性定常系统、离散时间线性时变系统)进行了详细而深入的介绍。值得指出的是,以往的文献都是在系统矩阵已知的前提下,讨论状态转移矩阵的性质、求解。然而,给定一个矩阵函数,如何判断它是某一线性系统的状态转移矩阵,如果是状态转移矩阵,如何求取其对应的系统矩阵,这是我们必须解决的问题。

通常情况下,判断矩阵函数是某一连续时间线性时不变系统的状态转移矩阵的充要条件会在之前的工作中给出。

本文对连续时间线性时变系统、离散时间线性定常系统、离散时间线性时变系统的状态转移矩阵进行了进一步的研究。根据常微分方程和差分方程解的唯一性,得到了判断矩阵函数是某一线性系统状态转移矩阵的充分条件,并求出了其对应的系统矩阵。

曲阜师范大学科研基金资助项目(编号:XJ0626)。

修改稿收到日期:2008-12-09。

第一作者张正强,男,1978年生,2003年毕业于曲阜师范大学自动化研究所,获硕士学位;主要从事非线性系统控制方面的研究。

1　预备知识

考虑连续时间线性时变系统、离散时间线性定常系统和时变系统,它们的齐次状态方程分别为:

$$\dot{x}=\boldsymbol{A}(t)x \qquad x(t_0)=x_0 \qquad t\geqslant t_0 \tag{1}$$

$$x(k+1)=\boldsymbol{G}x(k)$$
$$x(k_0)=x_0 \qquad (k=k_0,k_0+1,k_0+2,\cdots) \tag{2}$$

$$x(k+1)=\boldsymbol{G}(k)x(k)$$
$$x(k_0)=x_0 \qquad (k=k_0,k_0+1,k_0+2,\cdots) \tag{3}$$

式中:x 为 n 维状态;$\boldsymbol{A}(t)$、$\boldsymbol{G}$、$\boldsymbol{G}(k)$ 为 $n\times n$ 系统矩阵。

系统(1)~(3)的解分别为[1-5]:

$$x(t)=\boldsymbol{\Phi}(t,t_0)x_0$$

$$x(k)=\boldsymbol{\Phi}(k-k_0)x_0=\boldsymbol{G}^{k-k_0}x_0$$

$$x(k)=\boldsymbol{\Phi}(k,k_0)x_0$$

式中:$\boldsymbol{\Phi}(t,t_0)$、$\boldsymbol{\Phi}(k-k_0)$、$\boldsymbol{\Phi}(k,k_0)$ 分别为系统(1)~(3)的状态转移矩阵。对于离散定常系统,$\boldsymbol{\Phi}(k-k_0)$ 与初始时刻无关,一般地,取 $k_0=0$,则 $\boldsymbol{\Phi}(k-k_0)$ 变为 $\boldsymbol{\Phi}(k)$。

为了给出判断矩阵函数是某一线性系统状态转移矩阵的充分条件,需要用到下面的引理。

引理1　状态转移矩阵 $\boldsymbol{\Phi}(t,t_0)$ 是下列矩阵微分方程初值问题的解,且解是唯一的[2-5]:

$$\dot{\boldsymbol{\Phi}}(t,t_0)=\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{\Phi}(t,t_0) \quad \boldsymbol{\Phi}(t_0,t_0)=\boldsymbol{I} \quad t\geqslant t_0 \tag{4}$$

引理2　状态转移矩阵 $\boldsymbol{\Phi}(k)$ 是下列矩阵差分方程初值问题的解[2-5]:

$$\boldsymbol{\Phi}(k+1)=\boldsymbol{G}\boldsymbol{\Phi}(k)\quad \boldsymbol{\Phi}(0)=\boldsymbol{I}\quad k\geqslant 0 \tag{5}$$

引理3　状态转移矩阵 $\boldsymbol{\Phi}(k,k_0)$ 是下列矩阵差分方程初值问题的解[2-5]：

$$\boldsymbol{\Phi}(k+1,k_0)=\boldsymbol{G}(k)\boldsymbol{\Phi}(k,k_0)\quad \boldsymbol{\Phi}(k_0,k_0)=\boldsymbol{I}\quad k\geqslant k_0 \tag{6}$$

2　状态转移矩阵的判定

2.1　判定结果

定理1　任意 n 阶关于 t,t_0 的矩阵函数 $\boldsymbol{\Psi}(t,t_0)$，若对任意 $t\geqslant t_0$，$\boldsymbol{\Psi}(t,t_0)$ 关于 t 可导，$\boldsymbol{\Psi}(t,t_0)$ 是可逆矩阵，$\boldsymbol{\Psi}(t_0,t_0)=\boldsymbol{I}$，并且 $[\dot{\boldsymbol{\Psi}}(t,t_0)]$ 只与 t 有关，则 $\boldsymbol{\Psi}(t,t_0)$ 是某一连续时间线性时变系统的状态转移矩阵，且与之对应的系统矩阵为 $[\dot{\boldsymbol{\Psi}}(t,t_0)]\boldsymbol{\Psi}^{-1}(t,t_0)$，$t_0$ 为系统的初始时刻（这里对 t 的导数是指二元函数 $\boldsymbol{\Psi}(t,t_0)$ 对 t 的偏导数）。

令 $\boldsymbol{A}(t)=[\dot{\boldsymbol{\Psi}}(t,t_0)]\boldsymbol{\Psi}^{-1}(t,t_0)$，由定理条件知 $\boldsymbol{A}(t)$ 是关于 t 的矩阵，与 t_0 无关，即：

$$\dot{\boldsymbol{\Psi}}(t,t_0)=\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{\Psi}(t,t_0)\quad \boldsymbol{\Psi}(t_0,t_0)=\boldsymbol{I} \tag{7}$$

根据式(4)、式(7)，由引理1得 $\boldsymbol{\Psi}(t,t_0)=\boldsymbol{\Phi}(t,t_0)$，故 $\boldsymbol{\Psi}(t,t_0)$ 是某一连续时间线性时变系统的状态转移矩阵，$\boldsymbol{A}(t)$ 是与之对应的系统矩阵。

定理2　任意 n 阶关于 k 的矩阵函数 $\boldsymbol{\Psi}(k)$，若对任意 $k\geqslant 0$，$\boldsymbol{\Psi}(k)$ 可逆，$\boldsymbol{\Psi}(0)=\boldsymbol{I}$，并且 $\boldsymbol{\Psi}(k+1)\boldsymbol{\Psi}^{-1}(k)$ 是常数矩阵，则 $\boldsymbol{\Psi}(k)$ 是某一离散时间线性定常系统的状态转移矩阵，且与之对应的系统矩阵为 $\boldsymbol{\Psi}(k+1)\boldsymbol{\Psi}^{-1}(k)$。

令 $\boldsymbol{G}=\boldsymbol{\Psi}(k+1)\boldsymbol{\Psi}^{-1}(k)$，由定理条件知 $\boldsymbol{G}$ 是常数矩阵，即：

$$\boldsymbol{\Psi}(k+1)=\boldsymbol{G}\boldsymbol{\Psi}(k)\quad \boldsymbol{\Psi}(0)=\boldsymbol{I} \tag{8}$$

与连续时间线性时不变系统的情况类似，注意到状态转移矩阵 $\boldsymbol{\Phi}(k)$ 即矩阵方程(5)的解是唯一的，故 $\boldsymbol{\Psi}(k)$ 是某一离散时间线性时不变系统的状态转移矩阵，$\boldsymbol{G}$ 是与之对应的系统矩阵。

定理3　任意 n 阶关于 k,k_0 的矩阵函数 $\boldsymbol{\Psi}(k,k_0)$，若对任意 $k\geqslant k_0$，$\boldsymbol{\Psi}(k,k_0)$ 可逆，$[\boldsymbol{\Psi}(k+1,k_0)]\times\boldsymbol{\Psi}^{-1}(k,k_0)$ 只与 k 有关，并且 $\boldsymbol{\Psi}(k_0,k_0)=\boldsymbol{I}$，则 $\boldsymbol{\Psi}(k,k_0)$ 是某一离散时间线性时变系统的状态转移矩阵，且与之对应的系统矩阵为 $[\boldsymbol{\Psi}(k+1,k_0)]\boldsymbol{\Psi}^{-1}(k,k_0)$，$k_0$ 为系统的初始时刻。

令 $\boldsymbol{G}(k)=[\boldsymbol{\Psi}(k+1,k_0)]\boldsymbol{\Psi}^{-1}(k,k_0)$，由定理条件可知 $\boldsymbol{G}(k)$ 是关于 k 的矩阵，与 k_0 无关，即：

$$\boldsymbol{\Psi}(k+1,k_0)=\boldsymbol{G}(k)\boldsymbol{\Psi}(k,k_0)\quad \boldsymbol{\Psi}(k_0,k_0)=\boldsymbol{I} \tag{9}$$

2.2　讨论

定理1～3给出了判定矩阵函数是某一线性系统状态转移矩阵的充分条件，也给出了计算其对应的系统矩阵的公式。由状态转移矩阵的性质可知[1-5]，对连续系统，定理1的条件也是必要的；但对于离散系统，由于状态转移矩阵不能保证必为非奇异[2]，所以定理2和定理3的条件不是必要的。但对于连续时间线性系统的时间离散化系统，无论其为时不变或时变系统，状态转移矩阵必为非奇异[2]，此时定理2和定理3的条件是充分必要的。

定理1～3给出的条件是非常容易验证的，可使用比较流行的 Matlab 工具进行验证，因而这些充分条件是有效的。

2.3　举例

例1　判断下列矩阵 $\boldsymbol{\Psi}(t,t_0)$ 是否是某一连续时间线性时变系统的状态转移矩阵，如果是，求与之对应的系统矩阵 $\boldsymbol{A}(t)$。

$$\boldsymbol{\Psi}(t,t_0)=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0.5t^2-0.5t_0^2 & 1\end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{\Psi}(t,t_0)=\begin{bmatrix}t-t_0+1 & 0\\ 0.5t^2-0.5t_0^2 & 1\end{bmatrix} \tag{11}$$

式(10)中，对任意 $t\geqslant t_0$，$\boldsymbol{\Psi}(t,t_0)$ 对 t 可导、可逆，$\boldsymbol{\Psi}(t_0,t_0)=\boldsymbol{I}$，且用 Matlab 计算得：

$$[\dot{\boldsymbol{\Psi}}(t,t_0)]\boldsymbol{\Psi}^{-1}(t,t_0)=\begin{bmatrix}0 & 0\\ t & 0\end{bmatrix} \tag{12}$$

由定理1可知，式(10)中的 $\boldsymbol{\Psi}(t,t_0)$ 是状态转移矩阵，与之对应的系统矩阵即为上式。

式(11)中，对任意 $t\geqslant t_0$，$\boldsymbol{\Psi}(t,t_0)$ 对 t 可导、可逆，$\boldsymbol{\Psi}(t_0,t_0)=\boldsymbol{I}$，但用 Matlab 计算得：

$$[\dot{\boldsymbol{\Psi}}(t,t_0)]\boldsymbol{\Psi}^{-1}(t,t_0)=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{t-t_0+1} & 0\\ \dfrac{t}{t-t_0+1} & 0\end{bmatrix} \tag{13}$$

由于定理1的条件是充分必要的，故 $\boldsymbol{\Psi}(t,t_0)$ 不是某一连续时间线性时变系统的状态转移矩阵。

例2　判断下列矩阵 $\boldsymbol{\Psi}(k)$ 是否是某一离散时间线性定常系统的状态转移矩阵，如果是，求与之对应的系统矩阵 $\boldsymbol{G}$。

$$\boldsymbol{\Psi}(k)=\frac{1}{3}\times\begin{bmatrix}4(-0.2)^k-(-0.8)^k & 5(-0.2)^k-5(-0.8)^k\\ -0.8(-0.2)^k+0.8(-0.8)^k & -(-0.2)^k+4(-0.8)^k\end{bmatrix}$$

对任意 $k\geqslant 0$，$\boldsymbol{\Psi}(k)$ 可逆，$\boldsymbol{\Psi}(0)=\boldsymbol{I}$，且用 Matlab 计算得：

$$\boldsymbol{\Psi}(k+1)\boldsymbol{\Psi}^{-1}(k)=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -\dfrac{4}{25} & -1\end{bmatrix}$$

（下转第13页）

```
START:    MOV  SP,#70H
          SETB EX0
          SETB IT0
          SETB EA
LP:       CALL DISPLAY        //主程序调显示
          JMP  LP             //主程序循环
INT_0:    PUSH ACC            //Out1计数中断子程序
          PUSH PSW
          JB   P3.3,IJ1       //测试Out2转向电平
          CALL DEC_C          //Out2低电平调减法运算
          JMP  IJ2
IJ1:      CALL ADD_C          //Out2高电平调加法运算
IJ2:      POP  PSW
          POP  ACC
          RETI
DISPLAY:  ……                 //显示子程序(略)
          RET
ADD_C:    MOV  A,30H          //双BCD加法子程序
          ADD  A,#01H
          DA   A
          MOV  30H,A
          JNC  ADD_R
          MOV  A,31H
          ADDC A,#00H
          DA   A
          MOV  31H,A
ADD_R:    RET
DEC_C:    MOV  A,30H          //双BCD减法子程序
          ADD  A,#99H
          DA   A
          MOV  30H,A
          ……
DEC_R:    RET
          END
```

3 结束语

开关型与开关型霍尔电路构成的重叠组合(DOC)模型,能够识别磁体的极性;开关型与锁存型霍尔电路构成的平铺组合(DFC)模型,能够识别转向。基于DOC设计的双霍尔旋转编码器,具有零点和顺序点绝对位置输出的特点,能够实现多点位置取样;基于DFC设计的可逆计数传感器,能够直接输出转向和转数信号。这2种组合模型,仅由2个霍尔元件构成,不用信号处理电路支持,直接输出可用信息,电路简单实用,不仅具有霍尔传感器的优点,还拓展了其应用范围。

参考文献

[1] 温殿忠,赵晓锋,张振辉.传感器原理及其应用[M].哈尔滨:黑龙江大学出版社,2008:15-60.

[2] 白韶红.集成霍尔传感器的发展[J].自动化仪表,2003,24(3):1-8.

[3] 匡付华,朱丁才.霍尔传感器A3144在精确位移测量中的应用[J].自动化仪表,2005,26(10):40-41.

[4] 陆江,王立新.BiCMOS霍尔传感器技术及应用原理[J].传感器世界,2008(5):26-30.

[5] 邱召运,李述香,范应元,等.霍尔效应传感器的特殊应用[J].电子技术,2009(4):9-10.

[6] 田跃,和文国,李彦林,等.零脉冲高分辨率磁编码器的研制[J].北京科技大学学报:自然科学版,2000,23(3):256-258.

[7] 郝双辉,刘勇,刘杰,等.基于查表原理的单对磁极编码器研制[J].中国机电工程学报,2006,26(19):166-168.

[8] 宁学明,姚恩涛.可判向磁敏电阻转速传感器[J].仪表技术与传感器,2005(12):6-8.

(上接第9页)

由定理2可知,$\boldsymbol{\Psi}(k)$是状态转移矩阵,与之对应的系统矩阵即为上式。

3 结束语

本文对线性系统的状态转移矩阵进行了进一步的讨论,针对连续时间线性时变系统、离散时间线性定常系统和离散时间线性时变系统,分别给出了函数矩阵是某一线性系统状态转移矩阵的充分条件。这些条件是非常容易验证的,因而是有效的,并通过例子说明了结论的正确性。

参考文献

[1] 王高雄,周之铭,朱思铭,等.常微分方程[M].2版.北京:高等教育出版社,1983.

[2] 郑大钟.线性系统理论[M].2版.北京:清华大学出版社,2002.

[3] 刘豹,唐万生.现代控制理论[M].2版.北京:机械工业出版社,2005.

[4] 施颂椒,陈学中,杜秀华.现代控制理论基础[M].北京:高等教育出版社,2007.

[5] 王孝武.现代控制理论基础[M].2版.北京:机械工业出版社,2006.

[6] 白素英.e^{At}四种计算方法的比较[J].数学的实践与认识,2008,38(2):156-158.

[7] 徐进.常系数齐次线性微分方程组基解矩阵的求解[J].江汉大学学报:自然科学版,2005,33(4):17-19.

[8] 黄承绪.矩阵指数函数的一些性质[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2001,25(2):147-149.

对线性系统状态转移矩阵的讨论

作者： 张正强， 张立华， 王化建， Zhang Zhengqiang， Zhang Lihua， Wang Huajian
作者单位： 曲阜师范大学电气信息与自动化学院,山东,日照,276826
刊名： 自动化仪表 ISTIC PKU
英文刊名： PROCESS AUTOMATION INSTRUMENTATION
年，卷(期)： 2009，30(9)

参考文献(8条)

1. 王高雄.周之铭.朱思铭 常微分方程 1983

2. 郑大钟 线性系统理论 2002

3. 刘豹.唐万生 现代控制理论 2005

4. 施颂椒.陈学中.杜秀华 现代控制理论基础 2007

5. 王孝武 现代控制理论基础 2006

6. 白素英 eAt 四种计算方法的比较 2008(2)

7. 徐进 常系数齐次线性微分方程组基解矩阵的求解 2005(4)

8. 黄承绪 矩阵指数函数的一些性质 2001(2)

该论文在吸收国内外先进技术、经验和方法的基础上,进行宏挠性/微刚性操作手系统折动力学建模和振动控制研究.挠性操作手的动力学运动方程为一非常复杂的、高度耦合的、非线性时变微分方程,该方程的建立和求解非常困难,而且在实时控制里将耗费大量的计算时间,故该本基于刚性化假设,来减少建立和求挠性操作手动力学运动方程的难度,挠性操作手的挠性变形引起的误差,通过一激光测量系统测得,并通过操作手控制算法实现补偿.宏挠性/微刚性操作手系统分为两个部分:宏操作手控制块和微操作手控制块.神经网络经过几十年的发展,在机器人控制中已获得了比较广泛的应用.神经网络所具有的任意非线性表示能力,可以通过对系统性能的学习来实现具有最佳组合的PID控制,更适于一些复杂的、耦合的、非线性时变系统的控制.逆动力学控制是机器人控制中最常见的一种控制策略,它是联结古典控制理论和现代控制理论的桥梁.该文宏操作手采用神经网络PID控制算法,通过一个神经网络调整块适当调整PID控制的比例、微分增益参数的大小;微操作手采用逆动力学控制算法,宏操作手的挠性误差变形通过微操作手的快速运动补偿.该控制系统用于宏/微操作手的振动控制,仿真实验结果证明它是有效的,具有比较高的抑振效果.

6.期刊论文 王莉.王庆林.陈虹.WANG Li.WANG Qing-lin.CHEN Hong 状态空间表达下控制系统的稳态误差 -火力与指挥控制2009,34(6)

经典控制理论对系统稳态误差的讨论从传递函数入手,重点是对系统开环传递函数的研究,当系统的输入是任意函数时,引入动态误差系数方法来研究稳态误差,但是当输入具有高阶导数时,动态误差系数将很难得到.现代控制理论中的状态空间表达下求系统的稳态误差很好地解决了这个问题.利用矩阵之间的运算来表示动态误差系数,并且可以得到任意输入下的稳态误差值,在线性定常系统下的推导结果还可以适用于线性时变系统,具有一定的普遍性.

7.学位论文 刘健 发射车控制系统模型参考自适应控制研究 2007

常规反馈控制系统对于系统内部特性的变化和外部扰动的影响都具有一定的抑制能力，但是常规反馈系统不具备自适应能力。因此，当系统内部特性或外部扰动的变化很大时，系统的性能指标不仅不可能保持最优，而且常常要大幅度下降，甚至会引起系统的不稳定。由此可见，对于对象特性或扰动特性变化范围很大，同时又要经常保持高性能指标的一类控制系统采用自适应控制方法是很有效的。已经成为人们关注的焦点。　　未来几十年内，推动航天技术的快速发展在我国占有十分重要的地位。航天技术的发展将有力地提升我国相关产业链的技术水平；而在航天技术领域，先进控制技术因其对发射车市场竞争力，提高适应环境能力方面有着不可忽视的影响，这就对某多管火箭发射车的控制系统提出了更高的要求。　　由于计算机和自动控制技术的不断发展以及现代战争的不断变化，极大地推动着火箭发射车控制系统的迅速发展，从而出现了新的火箭发射车控制系统，已成为满足行进间射击的火箭发射车战技要求和提高火箭发射车战斗性能的有效手段。本文仅就自适应控制技术在某多管火箭发射车控制系统中的地位与作用、所需解决的技术难题以及发展趋势作一阐述。　　针对某多管火箭发射车控制系统现状，从某多管无控火箭发射车控制系统的组成及特点出发，在工作点附近的线性化建立数学模型，通过对数学模型的分析研究，结合国内外先进控制理论和技术，提出以模型参考自适应控制方法来研究这种典型的非线性时变系统，基于李雅普诺夫稳定理论和波波夫超稳定理论设计全局稳定的模型参考自适应系统，利用可调系统增益参数、信号综合自适应、超稳定理论设计方法等建立不同的控制律，并分析研究这几种方法的特点。制定适应于某多管火箭发射车控制系统的控制方法等方面进行研究。针对计算机应用，带来数字化离散过程中出现的非最小相位问题，提出产生的原因，加以改进措施。以提高自研型号某多管火箭发射车的适应能力和市场竞争力和使某多管火箭发射车实现现代化战争的各种复杂条件的需要。　　本文通过对模型参考自适应控制在火箭发射车控制系统上的研究分析，为火箭发射车控制成功运用现代控制理论，为系统性能的改进和提高奠定基础，而且对提高火箭发射车在多种复杂的战争环境中的发射适应能力，提出一种可行的思路。

8.学位论文 冯增健 开闭环PD型迭代学习控制及其收敛性研究 2005

众所周知,非线性时变系统极为难于控制,即使利用现代控制理论也难以设计适当的控制器.但对于重复跟踪相同轨迹的系统,例如机械手的操作,磁盘驱动系统等,迭代学习控制(ILC)是控制这一类系统简单而有效的方法.迭代学习控制针对具有重复运行性质的被控对象,利用对象以前运行的信息,通过迭代的方式修正控制信号,实现在有限时间区间上的完全跟踪任务.正因为其简单而有效,近年来受到不少研究人员的关注,研究内容包括学习律的构成、收敛性、鲁棒性、初值及学习速度等问题.本文着重分析了迭代学习控制的收敛性.文中首先介绍了迭代学习控制的一些基本知识,包括提出的历史,数学描述以及一些常用迭代学习控制律.其次分别讨论了开环、闭环和开闭环迭代学习律的收敛性,并给出各种不同迭代学习律的仿真实例加以对比;作者还特别给出了一类非线性系统的开闭环PD型迭代学习律收敛的充分条件,并使用线性算子理论加以证明.最后讨论了研究中存在的一些问题和发展方向.

9.学位论文 杨唐文 挠性宏—微操作手系统模糊动态控制研究 1998

该论文在吸收国内外先进技术、经验和方法的基础上,进行宏挠性/微刚性操作手系统的动力学建模和轨迹跟踪控制研究.挠性操作手的动力学运动方程为一非常复杂的、高度耦合的、非线性时变微分方程,该方程的建立和求解非常困难,而且在实时控制里将耗费大量的计算时间,故该文基于刚性化假设,来减少建立和求解挠性操作手动力学运动方程的难度,挠性操作手的挠性变形引起的误差,通过一激光测量系统测得,并通过操作手控制算法实现补偿.宏.微操作手控制系统分为两上部分:宏操作手控制块和微操作手控制块.模糊控制逻辑经过几十年的发展,在机器人控制中已获得了比较广泛的应用.模糊逻辑由于其具有专家智能,减少了对控制对象数学模型的依赖性,更适于一些复杂的、耦合的、非线性时变系统的控制.逆动力学控制是机器人控制中最常见的一种控制策略,它是联结古典控制理论和现代控制理论的桥梁.该文宏操作手采用模糊PD控制算法,通过一模糊调整块适当调整PD控制的比例、微分增益参数的大小;微操作手采用逆动力学控制算法,宏操作手的挠性误差变形通过微操作手的快速运动补偿.该控制系统用于宏/微操作手的轨迹跟踪控制,仿真实验结果证明它是有效的,具有比较高的轨迹跟踪精度.

10.学位论文 王敏 两连杆机械臂迭代学习控制的设计与仿真研究 2008

非线性系统的控制问题一直是控制领域中的热点以及难点问题。众所周知，非线性时变系统极为难于控制，即使利用现代控制理论也难以设计适当的控制器。但对于具有重复运动性质的系统，如机械臂的操作，迭代学习控制(ILC)是解决这一类系统简单而有效的方法，它能提高被控对象的运动轨迹在有限时间区间上沿整个期望轨迹的跟踪精度。　　本文针对两连杆机械臂这一非线性模型，分别对D型、P型和A型三种不同的迭代学习控制方法设计学习律，通过对各自学习律收敛条件的分析，选择合适的学习增益，完成控制器的设计。并在此基础上，对三种学习控制算法的收敛性和对应学习律下系统的鲁棒性进行了仿真分析。旨在研究三种不同迭代学习控制算法的性能及其在两连杆机械臂系统中的应用。　　从仿真结果中可以看出，D型迭代学习控制和A型数据采样迭代学习控制很好的满足了收敛性和跟踪精度的要求，且收敛速度较快，在存在初始偏差、动态扰动和输出测量噪声的情况下，也具有较好的鲁棒性，进而验证了其算法的有效性。与这两种迭代学习控制相比，P型迭代学习控制的收敛条件更加严苛，收敛性和鲁棒性较差，而且收敛速度比以上两种控制方法要慢得多。　　考虑到两连杆机械臂的实际执行过程，D型迭代学习控制并不能达到仿真结果中的效果。原因在于，从学习律的构成来看，D型学习律利用的是前一次输出误差信号的导数信号来构造学习律，因此很容易引入噪声，从而降低其有效性；而P型和A型迭代学习控制在学习律的构造上不存在求导的问题，能有效抑制噪声。但A型迭代学习控制的性能比D型和P型学习控制要好得多，因为它兼备了D型学习控制的超前特性和P型学习控制易于执行的特性。