

用于机械臂运动控制的非线性自适应控制方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及机械臂运动控制领域，具体而言，涉及一种用于机械臂运动控制的非线性自适应控制方法及系统。

背景技术

[0002] 随着智能化科技的不断发展，人们的生活、工作、学习之中越来越多地用到了智能化设备，使用智能化科技手段，提高了人们的生活质量，增加了人们学习和工作的效率。在机械臂运动控制领域，其机械臂系统本质上是非线性，时变和不确定系统，控制系统的设计需要采用非线性且自适应控制算法。

[0003] 目前所有机械臂运动控制系统算法均采用传统的 PID 控制算法。PID 控制算法是一种基于线性系统的控制算法，利用 PID 算法来控制非线性机械臂的运动时，遇到的问题就是如何整定 PID 的比例、积分和微分参数。由于机械臂系统的非线性，时变和不确定性，对机械臂以及它的负载和外部干扰的非线性模型或线性化模型的离线或在线辨识是必需的。得到的机械臂以及负载和外部干扰模型用来实时或分段整定 PID 参数。传统的 PID 算法在整个控制过程中其参数是常数。而在实际运用中，整个被控系统是无法提前预测的，特别是通用性机械臂的运动与所处环境无法预知，从而固定的 PID 参数无法使系统得到高性能的控制效果。利用模型辨识虽然能够达到较为可观的控制性能，但模型辨识特别是在线模型辨识极大地增加了系统的复杂程度，而且模型辨识不能保证能得到正确的模型和模型参数，这样的自适应控制系统很难得到工业认证。同样其它自适应或智能控制方法包括模糊控制，滑模控制，基于神经网络控制，模型参考自适应等也同样有不能保证算法稳定和在任何工况负载干扰环境下稳定工作的问题。

[0004] 针对上述的问题，目前尚未提出有效的解决方案。

发明内容

[0005] 因此，本发明的目的在于提供一种用于机械臂运动控制的非线性自适应控制方法及系统。本发明无需控制器参数整定所需的机械臂运动负载模型和外扰模型，从而解决了现有机械臂运动控制技术中运动负载模型辨识的困难和控制器时变参数整定的技术问题。在现有技术还不能有效解决所述困难和问题的现实情况下，本发明提供了一种非常简单有效且高性能的机械臂运动控制方法。

[0006] 为了实现上述目的，本发明的一种用于机械臂运动控制的机械臂运动控制方法包括

以下步骤：利用拉格朗日动力学建模法建立对应具有 n 个连杆机械臂的完整非线性动力学模型；获取机械臂关节转角 q 量测数据；利用数字微分法计算机械臂关节转角 q 的二阶时间导数 d^2q/dt^2 ；根据机械臂运动要求给出机械臂关节转角理想值 q_d ；将机械臂关节转角理想值 q_d 与量测值 q 的差值输入至运动控制器；运动控制器的输出与二阶时间导数 d^2q/dt^2 同时输入至增量型非线性逆动力学控制器；增量型非线性逆动力学控制器的输出的控制指令输入至驱动机械臂的伺服电机驱动器。

[0007] 所述增量型非线性逆动力学控制器描述如下：

$$\Delta u = M(q) \left[v - \left(\frac{d^2 q}{dt^2} \right)_k \right]$$

式中 Δu 为增量型非线性逆动力学控制器的输出指令； q 为机械臂关节转角； $M(q)$ 为机械臂模型的惯性矩阵； $\left(\frac{d^2 q}{dt^2} \right)_k$ 为由机械臂关节转角 q 计算得到的机械臂关节角加速度； v 为增量型非线性逆动力学控制器的虚拟控制量。

[0008] 增量型非线性逆动力学控制器的虚拟控制量为：

$$v = -K_p e - K_I \int e dt - K_D \frac{de}{dt}$$

式中 $e = q - q_d$ 为机械臂关节转角与要求的机械臂关节转角差； K_p 为运动控制器比例参数； K_I 运动控制器积分参数； K_D 运动控制器微分参数。

[0009] 本发明还公开了一种用于机械臂运动控制的非线性自适应控制系统，包含处理器和存储器；所述存储器中存储有计算机可读指令，所述处理器用于运行所述计算机可读指令，其中，所述计算机可读指令运行时执行上述用于机械臂运动控制的非线性自适应控制方法。

[0010] 在本发明实施例中，利用机械臂关节转角的 2 阶时间导数（机械臂关节的角加速度）来替代所需机械臂系统以及负载和外部干扰模型，进而在逆动力学控制中无需系统以及负载和外部干扰模型，从而解决了现有机械臂运动控制技术中机械臂系统以及负载和外部干扰模型辨识的困难和控制器时变参数整定的技术问题。

[0011] 根据本发明实施例的另一方面，还提供了一种用于机械臂运动控制的非线性自适应控制系统，包含处理器和存储器；所述存储器中存储有计算机可读指令，所述处理器用于运行所述计算机可读指令，其中，所述计算机可读指令运行时执行用于机械臂运动控制的非线性自适应控制方法。

附图说明

[0012] 此处所说明的附图用来提供对本发明的进一步理解，构成本申请的一部分，本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明，并不构成对本发明的不当限定。在附图中：

图 1 是根据本发明实施例的用于机械臂运动控制的非线性自适应控制方法的流程图。

[0013] 图 2 是根据本发明实施例的用于机械臂运动控制的非线性自适应控制系统的结构框图。

具体实施方式

[0014] 为了使本技术领域的人员更好地理解本发明方案，下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明一部分的实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都应当属于本发明保护的范围。

[0015] 需要说明的是，本发明的说明书和权利要求书及上述附图中的术语“第一”、“第二”等是用于区别类似的对象，而不必用于描述特定的顺序或先后次序。应该理解这样使用的数据在适当情况下可以互换，以便这里描述的本发明的实施例能够以除了在这里图示或描述的那些以外的顺序实施。此外，术语“包括”和“具有”以及他们的任何变形，意图在于覆盖不排他的包含，例如，包含了一系列步骤或单元的过程、方法、系统、产品或设备不必限于清楚地列出的那些步骤或单元，而是可包括没有清楚地列出的或对于这些过程、方法、产品或设备固有的其它步骤或单元。

[0016] 根据本发明实施例，提供了一种用于机械臂运动控制的非线性自适应控制方法，需要说明的是，在附图的流程图示出的步骤可以在诸如一组计算机可执行指令的计算机系统中执行，并且，虽然在流程图中示出了逻辑顺序，但是在某些情况下，可以以不同于此处的顺序执行所示出或描述的步骤。

[0017] 图 1 是根据本发明实施例的用于机械臂运动控制的非线性自适应控制方法的流程图，如图 1 所示，该方法包括如下步骤：

步骤 S100，获取机械臂关节转角 q 量测数据；

步骤 S200, 利用数字微分法计算机械臂关节转角 q 的二阶时间导数 d^2q/dt^2 ;

步骤 S300, 将机械臂关节转角理想值 q_d 与量测值 q 的差值输入至运动控制器;

步骤 S400, 运动控制器的输出与二阶时间导数 d^2q/dt^2 同时输入至增量型非线性逆动力学控制器;

步骤 S500, 增量型非线性逆动力学控制器的输出输入至驱动机械臂的伺服电机驱动器;

步骤 S600 计算增量型逆动力学控制的增量输出;

步骤 S700 计算运动控制器。

[0018] 这种机械臂运动控制方法包括以下步骤: 利用拉格朗日动力学建模法建立对应具有 n 个连杆机械臂的完整非线性动力学模型; 获取机械臂关节转角 q 量测数据; 利用数字微分法计算机械臂关节转角 q 的二阶时间导数 d^2q/dt^2 ; 根据机械臂运动要求给出机械臂关节转角理想值 q_d ; 将机械臂关节转角理想值 q_d 与量测值 q 的差值输入至运动控制器; 运动控制器的输出与二阶时间导数 d^2q/dt^2 同时输入至增量型非线性逆动力学控制器; 增量型非线性逆动力学控制器的输出的控制指令输入至驱动机械臂的伺服电机驱动器。

[0019] 所述增量型非线性逆动力学控制器描述如下:

$$\Delta u = M(q) \left[v - \left(\frac{d^2 q}{dt^2} \right)_k \right]$$

式中 Δu 为增量型非线性逆动力学控制器的输出指令; q 为机械臂关节转角; $M(q)$ 为机械臂模型的惯性矩阵; $\left(\frac{d^2 q}{dt^2} \right)_k$ 为由机械臂关节转角 q 计算得到的机械臂关节角加速度; v 为增量型非线性逆动力学控制器的虚拟控制量。

[0020] 增量型非线性逆动力学控制器的虚拟控制量为:

$$v = -K_p e - K_i \int e dt - K_D \frac{de}{dt}$$

式中 $e = q - q_d$ 为机械臂关节转角与要求的机械臂关节转角差； K_p 为运动控制器比例参数；

K_i 运动控制器积分参数； K_D 运动控制器微分参数

此增量型逆动力学控制方法是根据下述原理得到。

[0021] 利用拉格朗日动力学建模法建立的机械臂模型

$$M(q) \frac{d^2 q}{dt^2} + C\left(q, \frac{dq}{dt}\right) + C_v \frac{dq}{dt} + G(q) + F = \Gamma \quad (1)$$

式中 q 为机械臂关节转角； $\frac{dq}{dt}$ 为机械臂关节角速度； $\frac{d^2 q}{dt^2}$ 为机械臂关节角加速度； $M(q)$ 为机

械臂系统惯性矩阵； $C\left(q, \frac{dq}{dt}\right)$ 为系统的哥氏力和离心力向量； C_v 为关节黏性摩擦系数矩阵；

$G(q)$ 为重力向量； F 为外部干扰向量； Γ 为控制力矩向量。

[0022] 式 (1) 也可以写成

$$\frac{d^2 q}{dt^2} = M^{-1}(q)\Gamma - M^{-1}(q)C\left(q, \frac{dq}{dt}\right) - M^{-1}(q)C_v \frac{dq}{dt} - M^{-1}(q)G(q) - M^{-1}(q)F \quad (2)$$

简化式 (2) 写成

$$\frac{d^2 q}{dt^2} = f\left(q, \frac{dq}{dt}, u\right) \quad (3)$$

其中

$$f\left(q, \frac{dq}{dt}, u\right) = M^{-1}(q)\Gamma - M^{-1}(q)C\left(q, \frac{dq}{dt}\right) - M^{-1}(q)C_v \frac{dq}{dt} - M^{-1}(q)G(q) - M^{-1}(q)F \quad (4)$$

$$u = \Gamma \quad (5)$$

对式 (4) 做向量级数在采样时间点展开

$$\frac{d^2 q}{dt^2} = f_k\left(q, \frac{dq}{dt}, u\right) + \frac{\partial f\left(q, \frac{dq}{dt}, u\right)}{\partial q}(q_k - q_{k-1}) + \frac{\partial f\left(q, \frac{dq}{dt}, u\right)}{\partial \frac{dq}{dt}}\left(\frac{dq}{dt}_k - \frac{dq}{dt}_{k-1}\right) + \frac{\partial f\left(q, \frac{dq}{dt}, u\right)}{\partial u}(u_k - u_{k-1}) \quad (6)$$

根据各变量的时间变化特性，在现有采样时间的条件下得到

$$\Delta u = (u_k - u_{k-1}) = \left[\frac{\partial f(q, \frac{dq}{dt}, u)}{\partial u} \right]^{-1} \left[v - \left(\frac{d^2 q}{dt^2} \right)_k \right] \quad (7)$$

其中

$$\Delta u = (u_k - u_{k-1}) \quad (8)$$

$$\left(\frac{d^2 q}{dt^2} \right)_k = f_k \left(q, \frac{dq}{dt}, u \right) \quad (9)$$

$$\left[\frac{\partial f(q, \frac{dq}{dt}, u)}{\partial u} \right]^{-1} = M(q) \quad (10)$$

$$v = -K_p e - K_I \int e dt - K_D \frac{de}{dt} \quad (11)$$

$$e = q - q_d \quad (12)$$

式(7)中的 $\left(\frac{d^2 q}{dt^2} \right)_k$ 为机械臂关节转角的二次时间导数,也是机械臂关节在采样时间 k 的角

加速度。由式(2)可以看出此角加速度包含系统的所有信息,在控制器中利用角加速度来替代控制器所需的系统模型。

[0023] 上述本发明实施例序号仅为了描述,不代表实施例的优劣。

[0024] 在本发明的上述实施例中,对各个实施例的描述都各有侧重,某个实施例中未详述的部分,可以参见其他实施例的相关描述。

[0025] 在本申请所提供的几个实施例中,应该理解到,所揭露的技术内容,可通过其它的方式实现。其中,以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的,例如所述单元的划分,可以为一种逻辑功能划分,实际实现时可以有另外的划分方式,例如多个单元或组件可以结合或者可以集成到另一个系统,或一些特征可以忽略,或不执行。另一点,所显示或讨论的相互之间的耦合或直接耦合或通信连接可以是通过一些接口,单元或模块的间接耦合或通信连接,可以是电性或其它的形式。

[0026] 所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的,作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,即可以位于一个地方,或者也可以分布到多个单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部单元来实现本实施例方案的目的。

[0027] 另外，在本发明各个实施例中的各功能单元可以集成在一个处理单元中，也可以是各个单元单独物理存在，也可以两个或两个以上单元集成在一个单元中。上述集成的单元既可以采用硬件的形式实现，也可以采用软件功能单元的形式实现。

[0028] 所述集成的单元如果以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用，可以存储在一个计算机可读取存储介质中。基于这样的理解，本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的全部或部分可以以软件产品的形式体现出来，该计算机软件产品存储在一个存储介质中，包括若干指令用以使得一台计算机设备（可为个人计算机、服务器或者网络设备等）执行本发明各个实施例所述方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括：U 盘、只读存储器（ROM，Read-OnlyMemory）、随机存取存储器（RAM，Random Access Memory）、移动硬盘、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0029] 以上所述仅是本发明的优选实施方式，应当指出，对于本技术领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明原理的前提下，还可以做出若干改进和润饰，这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

权 利 要 求 书

1. 一种用于机械臂运动控制的非线性自适应控制方法，其特征在于，包括以下步骤：

利用拉格朗日动力学建模法建立对应具有 n 个连杆机械臂的完整非线性动力学模型；

获取机械臂关节转角 q 量测数据；

利用数字微分法计算机械臂关节转角 q 的二阶时间导数 d^2q/dt^2 ；

根据机械臂运动要求给出机械臂关节转角理想值 q_d ；

将机械臂关节转角理想值 q_d 与量测值 q 的差值输入至运动控制器；

运动控制器的输出与二阶时间导数 d^2q/dt^2 同时输入至增量型非线性逆动力学控制器；

增量型非线性逆动力学控制器的输出输入至驱动机械臂的伺服电机驱动器。

2. 如权利要求 1 所述的用于机械臂运动控制的非线性自适应控制方法，其特征在于，所述增量型非线性逆动力学控制器描述如下：

$$\Delta u = M(q) \left[v - \left(\frac{d^2 q}{dt^2} \right)_k \right]$$

式中 Δu 为增量型非线性逆动力学控制器的输出指令； q 为机械臂关节转角； $M(q)$ 为机械臂

模型的惯性矩阵； $\left(\frac{d^2 q}{dt^2} \right)_k$ 为由机械臂关节转角 q 计算得到的机械臂关节角加速度； v 为增量

型非线性逆动力学控制器的虚拟控制量。

3. 如权利要求 2 所述的用于机械臂运动控制的非线性自适应控制方法，其特征在于，增量型非线性逆动力学控制器的虚拟控制量为：

$$v = -K_p e - K_I \int e dt - K_D \frac{de}{dt}$$

式中 $e = q - q_d$ 为机械臂关节转角与要求的机械臂关节转角差； K_p 为运动控制器比例参数；

K_I 运动控制器积分参数； K_D 运动控制器微分参数。

4. 一种用于机械臂运动控制的非线性自适应控制系统，其特征在于：包括处理器和存储器；

所述存储器中存储有计算机可读指令，所述处理器用于运行所述计算机可读指令，其中，所述计算机可读指令运行时执行权利要求 1 至 3 中任意一项所述的用于机械臂运动控制的非线性自适应控制方法。