

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2015.0522

## 基于解耦线性化的变刚度关节动态刚度辨识

尹 鹏, 李满天, 查富生, 王鹏飞, 孙立宁

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 为了能够利用变刚度关节实现对机器人动态特性的调整, 需要对关节的动态刚度进行有效的辨识和控制. 本文首先根据机器人变刚度关节的结构特点建立了简化模型, 并对其刚度输出特性表达做出假设; 然后对模型中的力矩相关参数进行解耦, 消除了关节刚度调节参数对力矩的影响, 获取与刚度辨识相关的归一化力矩; 利用泰勒展开对归一化力矩进行线性化处理, 采用卡尔曼滤波器进行了系数优化, 并进一步实现了对关节动态刚度的辨识. 仿真中该刚度在线辨识方法可以将辨识误差控制在  $\pm 2\%$  以内, 在实现动态刚度辨识的基础上研究了基于前馈的刚度闭环控制方法, 通过仿真实验验证了该方法对于机器人关节刚度闭环控制是有效的.

**关键词:** 变刚度; 柔性关节; 动态刚度辨识; 解耦

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2015)-05-0522-07

### Dynamic Stiffness Identification of Adjustable Stiffness Joint Based on Decoupling and Linearization

YIN Peng, LI Mantian, ZHA Fusheng, WANG Pengfei, SUN Lining

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In order to take advantage of adjustable stiffness joint to adjust robot's dynamic feature, it is necessary to effectively identify and control the dynamic stiffness of the joint. Firstly, a simplified model is derived based on the structure features of robotic adjustable stiffness joint, and the assumption of stiffness output form is made. Then the torque related parameters in the model are decoupled, to eliminate the effect of adjusting parameter of joint stiffness on the torque, and thus the unified torque expression for stiffness identification is acquired. Linearization of the unified torque expression is then carried out by utilizing Taylor expansion, and Kalman filter is applied to optimizing the factors of the expansion. Based on this, the joint dynamic stiffness identification is achieved. It is proved the identification error is controlled within  $\pm 2\%$  by the dynamic stiffness online identification method in simulation. Based on the result of dynamic stiffness identification, feedforward based joint stiffness closed-loop control method is then studied. Simulation experiments show that the method is effective for robotic joint stiffness closed-loop control.

**Keywords:** adjustable stiffness; compliant joint; dynamic stiffness identification; decoupling

## 1 引言 (Introduction)

足式机器人具备全方位移动能力, 地形适应性强, 在野外环境中开展作业任务时具有独特优势, 因而高性能足式机器人成为移动机器人领域的研究热点之一. 为了使足式机器人具有更广泛的地形适应能力、高稳定性能, 减少与地面的冲击力以保护机器人本体, 在足式机器人中引入了可变刚度柔性关节<sup>[1]</sup>. 目前有研究者设计了多款变刚度柔性关节, 例如: vsaUT-II<sup>[2]</sup>、AwAS<sup>[3]</sup>、VSA<sup>[4]</sup>等. 但是现今变刚度柔性关节在足式机器人中还基本没有得到实际应用, 其中一个关键的问题就是缺乏有效的

关节动态刚度辨识方法, 因而难以对关节刚度进行有效地调节控制.

关节刚度是一个不能直接测量的物理量, 通常定义为力矩对变形角的导数 (或偏导数), 当刚度值恒定时, 力矩关于变形角呈线性关系. 对于变刚度关节, 由于关节本身的刚度非线性特质以及刚度调整造成的刚度变化, 关节柔性力矩 (变刚度柔性关节柔性环节两端的力矩) 与变形角的关系比较复杂, 是一个非线性系统. 在工程上, 采集的关节运动的信号中不可避免地会夹杂有高频噪声, 如果采用微分的方法, 其测量噪声会严重影响刚度的计算

精度; 并且关节变形角处于震荡变化中, 正常运行中变形角不可避免地会有数值为 0 或接近于 0 值的时刻, 当分母为 0 或接近于 0 值时, 微分运算失效, 因而用微分求关节刚度的方法是不可行的, 需要采用其他方法获得关节的刚度.

很多研究者引入了系统辨识的方法来求关节的动态刚度值, 变刚度关节的非线性特性给刚度辨识问题带来了一定困难. 变刚度柔性关节的刚度调节功能通常是由一个专门的电机驱动相应的刚度调节机构, 通过改变柔性体的结构或力臂 (称为刚度调节参数) 来实现的. 在关节正常运行过程中, 关节刚度调节参数通常处在动态变化过程中, 且与关节变形角之间存在一定的耦合. 关节的非线性和参数耦合特性给关节刚度辨识问题带来了很大的挑战.

目前关节动态刚度辨识方法主要有: 两步鲁棒辨识方法<sup>[5]</sup>、基于模型的模糊辨识方法<sup>[6]</sup>, 针对系统的非线性特性这些方法通常采用现代辨识方法, 但是现代辨识方法通常辨识精度相对较低, 此外算法还存在计算量大、收敛速度慢等缺点, 不适用于在线快速辨识. 在刚度辨识时没有很好地解决关节参数的耦合问题, 提出的方法仅适用于特定的系统.

针对关节的非线性和参数耦合问题, 为了提高刚度辨识的精度和计算速度, 对非线性系统线性化后使用经典辨识方法求取关节动态刚度. 由于关节内部参数耦合作用, 导致对系统线性化时存在一定困难, 因而考虑在线性化之前先对参数进行解耦. 基于此, 本文提出了一种对关节进行参数解耦和线性化的动态刚度辨识方法. 此外, 提出的关节动态刚度辨识方法在线辨识出的关节刚度值引入关节刚度控制系统, 构成闭环的刚度控制系统, 实现了刚度的有效控制.

本文针对足式机器人中变刚度柔性关节的刚度辨识和控制展开研究. 建立了简化模型, 得到刚度计算一般表达, 研究了基于参数解耦以及力矩表达线性化处理的刚度在线辨识方法. 基于该辨识结果, 本文进一步讨论了前馈处理在刚度闭环控制中的应用, 并通过仿真实验验证了其有效性.

## 2 基于卡尔曼滤波算法的刚度辨识 (Stiffness identification based on Kalman filter)

### 2.1 问题简述

可变刚度柔性关节通常由输出刚度可调的柔性环节与刚性传动环节串联而成, 因而可以将变刚度

柔性关节简化为绕机体中心转动的刚性输入轴、刚性输出轴和联接两者的刚度可调柔性环节三个部分<sup>[7]</sup>, 如图 1 所示. 定义  $\theta$ 、 $q$ 、 $\phi$  分别为输入端、输出端的转角和两者角度差 (关节柔性变形角),  $M_1$ 、 $M_2$  分别为输入和输出端转动惯量,  $C_1$ 、 $C_2$  分别为输入和输出端的阻尼系数,  $d$  为关节刚度调节参数,  $\tau_d$ 、 $\tau_e$ 、 $\tau_f(\phi, d)$  分别为输入端驱动力矩、输出端阻力矩和柔性环节两端柔性力矩.

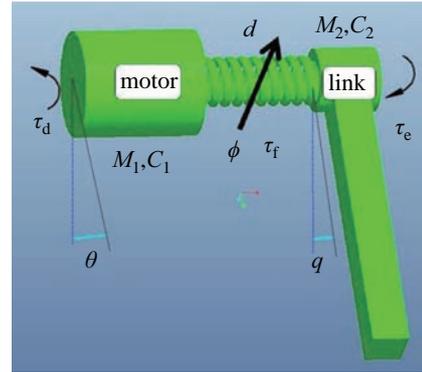


图 1 变刚度柔性关节简化模型

Fig.1 Simplified model of the compliant joint with adjustable stiffness

由动量矩定理可得出变刚度柔性关节的动力学模型:

$$\begin{cases} M_1 \ddot{\theta} + C_1 \dot{\theta} + \tau_f(\phi, d) = \tau_d \\ M_2 \ddot{q} + C_2 \dot{q} - \tau_f(\phi, d) = -\tau_e \\ \phi = \theta - q \end{cases} \quad (1)$$

考虑到实际的物理系统中当变形角方向改变时力矩的方向也随之改变, 定义弹簧柔性力矩为关于变形角的奇函数:

$$\tau_f(-\theta, d) = -\tau_f(\theta, d) \quad (2)$$

其中,  $\tau_f(\phi, d)$  为等效弹簧两端的力矩值, 由于关节刚度是变化的, 为了区别通常的定刚度值, 引入  $\sigma(\phi, d)$  作为对应变形角为  $\phi$  和刚度调节参数为  $d$  时的动态刚度值, 定义柔性力矩  $\tau_f(\phi, d)$  对变形角  $\phi$  的偏导数为关节动态刚度<sup>[8]</sup>:

$$\sigma(\phi, d) = \frac{\partial \tau_f(\phi, d)}{\partial \phi} \quad (3)$$

式 (3) 定义的刚度值是关节力矩对变形角的微分, 考虑到关节柔性部分的力矩和变形角的实际值工程上很难得到, 测量值通常都带有干扰噪声和偏差, 而微分会放大噪声, 这降低了辨识刚度值的精度; 此外, 变形角基本保持不变, 即变形角的变化率接近于 0 的时候, 式 (3) 的分母接近于 0, 此时公

式(3)将失效. 因此, 不能直接应用微分求解关节刚度, 所以解决动态刚度的辨识问题的重点就在于找到可以避免对变形角进行直接微分运算的辨识方法.

此外, 变刚度柔性关节的柔性力矩通常可以写为如下形式:

$$\tau_f(\phi, d) = K \cdot h(d) \cdot g(\phi) \quad (4)$$

式中  $h(d)$  (无量纲) 为关节刚度调节参数  $d$  对关节柔性力矩的作用函数,  $h(1) = 1$ ;  $g(\phi)$  (无量纲) 为关节变形角  $\phi$  对关节柔性力矩的作用函数,  $g(1) = 1$ ;  $K$  (N·m) 为关节柔性力矩关系式的常量系数, 以上参数均由关节的实际结构决定.

## 2.2 柔性关节的参数解耦方法

变刚度柔性关节在正常运行过程中需要根据需要对关节刚度进行实时调节, 因而刚度调节参数是处在变化过程中的. 同时由于关节内柔性环节的存在, 关节的变形角也处在动态变化中. 由式(4)关节柔性力矩的表达式可知, 柔性力矩  $\tau_f(\phi, d)$  是关于变形角  $\phi$  和刚度调节参数  $d$  的二元函数.

当刚度调节参数为某个定值时, 柔性力矩称为关于变形角  $\phi$  的一元函数  $\tau_f(\phi)$ , 此时可以将柔性力矩进行泰勒级数展开得到关于变形角  $\phi$  的线性表达式:

$$\tau_f(\phi) = a_0 + a_1\phi + a_2\phi^2 + \dots + a_k\phi^k + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} a_k\phi^k \quad (5)$$

在式中  $a_k$  为与变形角无关的系数,  $k = 1, 2, 3, \dots$ . 但是当刚度调节参数变化时, 二元的柔性力矩  $\tau_f(\phi, d)$  就难以直接展开为  $\phi$  的线性形式, 如果刚度调节参数作用函数  $h(d)$  已知, 则可以对参数进行解耦, 即从  $\tau_f(\phi, d)$  中除去  $h(d)$ , 可以得到一个与  $d$  无关的一元函数, 文中将该函数称为归一化力矩, 用  $\tau(\phi)$  表示. 可以通过对函数  $\tau(\phi)$  进行泰勒级数展开完成线性化.

首先研究通过曲线拟合的方法获得刚度调节参数作用函数  $h(d)$  的近似函数关系式. 在研究过程中使用控制变量法, 将  $d$  和  $\phi$  两个参数中的一个进行固定, 另外一个作为变量. 由于关节中柔性环节的存在, 关节变形角  $\phi$  是处在动态变化中的, 很难稳定控制在某个定值;  $d$  是由传动机构直接控制的, 容易实现定值精确控制. 因而考虑首先将  $d$  作为固定值, 研究变形角作用函数  $g(\phi)$  的拟合; 然后再把  $d$  视为系统的变量, 由于此时  $g(\phi)$  已知, 可以从  $\tau_f(\phi, d)$  中除去相应的  $g(\phi)$ , 从而得到  $h(d)$  的数值,

根据  $h(d)$  和  $d$  的数值对应关系可以得到  $h(d)$  的拟合多项式, 具体拟合过程如下:

(1) 求解常数  $K$

由式(4)关节柔性力矩的性质:  $h(1) = 1$ ,  $g(1) = 1$ , 则有:

$$\tau_f(1, 1) = K \cdot h(1) \cdot g(1) = K \quad (6)$$

(2) 求变形角作用函数  $g(\phi)$

将关节刚度调节参数设定为:  $d = 1$ , 则  $h(1) = 1$ , 采集柔性力矩的数值, 将  $h(d)$  代入可得  $g(\phi)$  数值:

$$g(\phi) = \tau_f(\phi, 1)/K/h(1) = \tau_f(\phi, 1)/K \quad (7)$$

根据  $\phi$  和  $g(\phi)$  的数值对应关系, 使用最小二乘多项式拟合的方法可以得到  $g(\phi)$  的拟合多项式  $\hat{g}(\phi)$ :

$$\hat{g}(\phi) = \sum_{k=1}^n a_k \cdot \phi^k \quad (8)$$

上式中  $n$  为拟合多项式的次数;  $a_k$  为拟合多项式的系数,  $k = 1, 2, \dots, n$ .

(3) 求刚度调节参数作用函数  $h(d)$

放开对  $d$  的限制, 让  $d$  随时间变化, 采集相应时刻  $\tau_f(\phi, d)$  与  $\phi$ 、 $d$  的数值, 则可以求得各采样时刻的  $h(d)$  数值:

$$h(d) = \tau_f(\phi, d)/K/g(\phi) \quad (9)$$

根据  $d$  和  $h(d)$  的数值对应关系, 使用最小二乘多项式拟合的方法可以得到  $h(d)$  的拟合多项式  $\hat{h}(d)$ :

$$\hat{h}(d) = \sum_{k=1}^m b_k \cdot d^k \quad (10)$$

式中  $m$  为拟合多项式的次数;  $a_k$  为拟合多项式的系数,  $k = 1, 2, \dots, n$ .

当  $h(d)$  已知时, 可以从  $\tau_f(\phi, d)$  中除去  $h(d)$ , 得到归一化力矩  $\tau(\phi)$ :

$$\tau(\phi) = \tau_f(\phi, d)/h(d) \quad (11)$$

## 2.3 柔性关节的线性化

$\tau(\phi)$  不受  $d$  变化影响, 是关于变形角的一元函数, 此时对  $\tau(\phi)$  进行泰勒展开:

$$\begin{aligned} \tau(\phi) &= a_1\phi + a_3\phi^3 + \dots + a_{2k-1}\phi^{2k-1} + \dots \\ &\approx a_1\phi + a_3\phi^3 + \dots + a_{2n-1}\phi^{2n-1} = \sum_{k=1}^n a_{2k-1}\phi^{2k-1} \end{aligned} \quad (12)$$

此时如果将  $\phi$  的各阶幂  $\phi^{2k-1}$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ) 作为状态变量, 多项式的各项系数  $a_{2k-1}$  ( $k =$

1, 2, 3, \dots) 为与  $\phi$  无关的待辨识参数, 则式 (12) 右端表示的系统就是线性的. 通过对柔性力矩  $\tau(\phi, d)$  进行解耦转化为与关节刚度调节参数无关的归一化力矩  $\tau(\phi)$ , 然后再对  $\tau(\phi)$  进行泰勒展开就解决了关节动态刚度辨识问题中的柔性力矩泰勒展开问题, 从而可以应用经典的线性系统辨识方法进行参数辨识.

为了方便表达和公式推导, 考虑将式 (12) 写为矩阵形式, 令:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\alpha} = [a_1 \ a_3 \ \cdots \ a_{2n-1}]^T \\ f_h(\phi) = \phi^{2h-1}, \quad h = 1, 2, \dots, n \\ \mathbf{f} = [f_1 \ f_2 \ \cdots \ f_n] \end{cases} \quad (13)$$

将式 (13) 代入式 (12) 可得泰勒展开式的矩阵形式:

$$\tau(\phi) = \mathbf{f}(\phi) \cdot \boldsymbol{\alpha} \quad (14)$$

通过以上推导将非线性的柔性力矩进行了参数解耦, 继而得到了其线性表达式. 最终完成柔性力矩的线性化还需要确定泰勒展开项的最优系数.

对于线性系统的辨识问题, 最常用的是递推最小二乘辨识方法<sup>[9]</sup>. 最小二乘算法存在“数据饱和”的问题, 使得泰勒展开的系数估计不能很好地跟随实际值, 从而导致基于泰勒展开的刚度估计值产生较大误差. 针对该问题, 本文引入卡尔曼滤波算法进行泰勒展开项的系数最优估计.

卡尔曼滤波算法的一般计算公式为<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{\alpha}}_{k+1} = \hat{\boldsymbol{\alpha}}_k + K_{k+1}[\boldsymbol{\tau}(k+1) - \mathbf{f}(k+1)\hat{\boldsymbol{\alpha}}_k] \\ K_{k+1} = \mathbf{P}_k \mathbf{f}^T(k+1)[\mathbf{R}_v + \mathbf{f}(k+1)\mathbf{P}_k \mathbf{f}^T(k+1)]^{-1} \\ \mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_k - K_{k+1} \mathbf{f}(k+1) \mathbf{P}_k + \mathbf{R}_w \end{cases} \quad (15)$$

式中  $\mathbf{R}_w$  和  $\mathbf{R}_v$  分别为过程噪声  $\mathbf{w}(k)$  和观测噪声  $\mathbf{v}(k)$  的协方差阵, 即有:

$$\mathbf{R}_w = E[\mathbf{w}(k) \mathbf{w}^T(k)], \quad \mathbf{R}_v = E[\mathbf{v}(k) \mathbf{v}^T(k)]$$

式中  $\mathbf{R}_w$  可以视为是引入的非负的协方差阵<sup>[11]</sup> 对误差修正系数  $K_k$  进行修正, 使  $\mathbf{R}_w$  保持远大于 0, 时刻保持对误差的修正能力, 当  $\mathbf{R}_w = 0$  时, 上式变为普通最小二乘算法. 通常  $\mathbf{R}_w$  是未知的, 需要根据本次估计值与上次估计值误差进行选择. 当本次估计值与上次估计值误差较大时,  $\mathbf{R}_w$  增大, 则算法活性增大, 误差修正能力增强; 但当  $\mathbf{R}_w$  过大时, 算法活性过大, 参数估计也会出现比较大的波动<sup>[12]</sup>. 因此需要人为给  $\mathbf{R}_w$  设定一个上界  $\mathbf{R}_0$ , 即

$$\mathbf{R}_w \leq \mathbf{R}_0.$$

$$\mathbf{R}_w(k) = \begin{cases} \mathbf{k}_0 \hat{\mathbf{w}}(k) \hat{\mathbf{w}}^T(k), & \|\hat{\mathbf{w}}(k)\|^2 < c \\ \mathbf{k}_0 c, & \|\hat{\mathbf{w}}(k)\|^2 \geq c \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\hat{\mathbf{w}}(k) = \hat{\boldsymbol{\alpha}}(k) - \hat{\boldsymbol{\alpha}}(k-1)$ , 称为新息.

由式 (15) 和式 (16) 即可计算出泰勒展开式系数的最优估计值  $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$ . 这样得出的算法既能对时变参数具有较强的跟踪能力, 又能适应时不变系统, 同时避免估计参数出现较大的波动.

#### 2.4 关节动态刚度的计算

在 2.2 和 2.3 节中, 通过先对关节柔性力矩进行解耦然后再进行泰勒展开, 最终得到了线性化的柔性力矩, 在此基础上进一步研究关节动态刚度的辨识问题, 推导出动态刚度辨识计算公式.

将式 (11) 代入式 (3) 可得:

$$\sigma(\phi, d) = \frac{\partial \tau(\phi, d)}{\partial \phi} = h(d) \frac{\partial \tau(\phi)}{\partial \phi} \quad (17)$$

将式 (14) 代入式 (17) 可得关节刚度辨识值  $\hat{\sigma}(\phi, d)$

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}(\phi, d) &= h(d) \frac{\partial}{\partial \phi} (\mathbf{f}(\phi, d) \hat{\boldsymbol{\alpha}}) \\ &= h(d) \sum_{h=1}^n (2h-1) \hat{a}_{2h-1} \phi^{2h-2} \end{aligned} \quad (18)$$

从式 (18) 中可以发现, 辨识关节刚度值时使用的是关节变形角  $\phi$  的乘法和加法运算, 避免了微分方法信号噪声和关节变形角接近 0 时的微分算法失效弊端.

为表示方便, 令:

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{\alpha}} = [\hat{a}_1 \ \hat{a}_3 \ \cdots \ \hat{a}_{2n-1}]^T \\ \dot{f}_h = (2h-1) \phi^{2h-2}, \quad h = 1, 2, \dots, n \\ \dot{\mathbf{f}} = [\dot{f}_1 \ \dot{f}_2 \ \cdots \ \dot{f}_n] \end{cases} \quad (19)$$

将式 (19) 代入式 (18) 可得关节刚度辨识的最终计算公式的矩阵形式:

$$\hat{\sigma}(\phi, d) = \dot{\mathbf{f}} \times \hat{\boldsymbol{\alpha}} \times h(d) \quad (20)$$

### 3 柔性关节的刚度控制方法 (Stiffness control method of the compliant joint)

变刚度柔性关节的刚度调节是通过一个辅助的驱动单元带动刚度调节机构来实现的. 变刚度柔性关节的刚度调节机理如图 2 所示, 其中:  $\sigma_r$  和  $\sigma$  分别为关节目标刚度值和关节实际输出刚度值,  $U$  为刚度调节驱动单元的输入信号,  $d$  为关节刚度调整机构的调节参数.



图2 关节刚度控制结构框图

Fig.2 Schematic diagram of joint's stiffness control structure

前文已经研究了变刚度柔性关节的动态刚度辨识方法，设计了利用关节运行参数在线辨识关节刚度值的辨识器，其原理如图3所示，其中： $\tau_d$ 为关节运动驱动力矩， $\theta$ 和 $\dot{\theta}$ 分别为关节输入轴端的角位移和角速度， $q$ 为关节输出轴端的角位移， $\hat{\sigma}$ 为关节刚度辨识值， $d$ 为关节刚度调节参数。刚度辨识器将关节输入端的驱动力矩和刚度调节参数以及关节输出端的关节运动参数作为输入量，通过前面讨论的辨识方法得到关节输出刚度的实时计算。

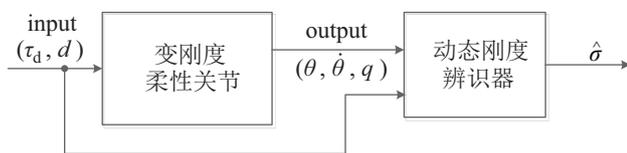


图3 柔性关节在线动态刚度辨识器原理图

Fig.3 Schematic of compliant joint's online dynamic stiffness identification

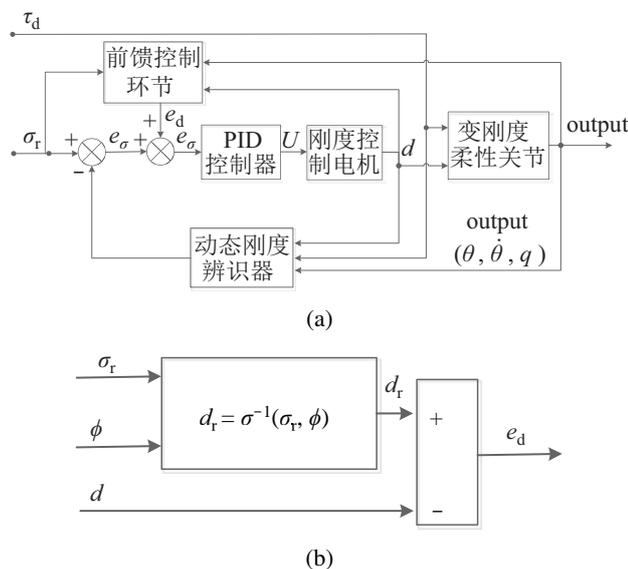


图4 变刚度关节的前馈加反馈闭环刚度控制

Fig.4 Stiffness closed-loop control of the adjustable stiffness joint with feedback and feedforward control

在实现关节刚度准确调节时需要将关节刚度辨识值作为负反馈量引入控制系统构成闭环控制系统。为了减小系统延迟，进一步提高刚度控制精度，本文进一步引入前馈控制环节<sup>[13]</sup>，构成基于前馈加反馈的关节刚度闭环控制系统，该系统的控制流程如图4(a)所示。图4(b)为其中前馈环节的计算框图，其中， $\sigma_r$ 为期望的关节刚度输出，根据变刚

度柔性关节的输出测量值  $\theta$ 、 $q$  可计算出关节弹性变形角度  $\phi = \theta - q$ ，并由此根据  $\sigma_r = \sigma(d_r, \phi)$  计算出此时期望的关节刚度调节参数计算值  $d_r$ 。控制前馈输出为期望控制变量  $d_r$  和实际控制变量  $d$  的差值，如图4(b)所示。

#### 4 刚度辨识和控制实验 (Experiment on stiffness identification and control)

在可变刚度柔性关节的刚度辨识研究方面，如何验证方法的正确性是研究的关键。然而由于在实际系统中其关节的真实刚度无法获得，同时，由于加工误差和材料属性差异等原因，实际的实验装置输出刚度的特性曲线与理论设计之间也存在差异，因此通过实物实验来验证辨识方法的准确性往往不能得到理想的效果。国外相关的研究中通常采用仿真的方式进行验证，本文采用类似的方式开展实验研究。

##### 4.1 关节动态刚度辨识方法仿真

前文中对可变刚度柔性关节的刚度在线辨识方法进行了讨论，需要对方法进行实际验证。但是一方面机器人关节的刚度不可通过测量手段直接得到，另一方面由于在实际的柔性关节系统中会固有许多不确定因素使其偏离设计指标，因此通过建立标准可控的柔性关节系统进行实验验证面临很大的挑战，在现实中不容易找到相应的物理系统来有效地验证所述辨识方法的可行性。因此，对于关节在线辨识方法的验证，通过仿真实验的方法进行。在仿真中会对实际系统中的阻尼、惯量等进行相应的设定，使其接近实际的系统状况，即在仿真环境下建立一个标准参照系统。

根据关节数学模型建立 MATLAB 仿真模型，在 ADAMS 中建立如图1所示的仿真简化模型，并设置相关传感器测量驱动角度  $\theta$ 、关节输出角度  $q$ 、力矩  $\tau_d$  等参量，采用 Simulink 工具箱与 ADAMS 进行联合仿真，仿真步长 1 ms，设定关节参数为： $M_1 = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $M_2 = 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $C_1 = 0.2 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 、 $C_2 = 2 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ ，给定可变刚度柔性关节中的关节力矩关系表达式  $\tau_r(\phi, d) = d(e^\phi - e^{-\phi})/2$ ，关节中的刚度关系式为  $\sigma(\phi, d) = d(e^\phi + e^{-\phi})/2$ ，为了验证解耦线性化动态刚度辨识方法在  $d$  变化时的作用，选取刚度调整呈现正弦变化规律  $d = 3/2 + 0.5 \sin(0.005\pi t - \pi/2)$  的情形进行验证。关节驱动力矩设定为  $\tau_d = \sin(0.05\pi t) \text{ N} \cdot \text{m}$ ，阻力矩设定为  $\tau_e = 0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，仿真时间  $T = 100 \text{ s}$ ，泰勒展开项取  $n = 6$ 。采集关节输入和输出轴角度、关节输入

和输出轴角速度、输入轴端驱动力矩和输出端阻力矩等信息。

进行仿真采集关节轴角度值、角速度值以及驱动力矩和阻力矩值。使用本文提出的动态刚度辨识方法进行关节刚度辨识, 辨识结果如图 5 所示。从图中可以得出辨识的动态刚度值在大约 3 s 之后能够很好地吻合实际动态刚度值, 说明提出的动态刚度辨识方法能够较好地适应  $d$  正弦变化时的情况。

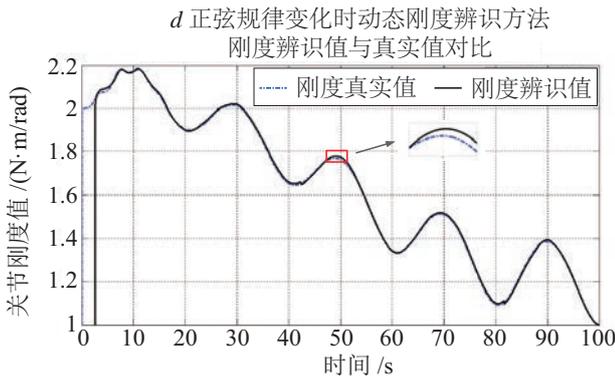


图 5 变刚度关节动态刚度辨识结果

Fig.5 Result of the dynamic stiffness identification of the adjustable stiffness joint

动态刚度辨识方法辨识出的关节刚度值与真实值的误差如图 6 所示, 其中图 6 中上侧图为辨识值与真实值之间的绝对误差放大图, 可以看出辨识误差在大约 3 s 之后稳定在约  $-0.02 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad} \sim 0.04 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$  范围内, 相比真实值  $1 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad} \sim 2.2 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ , 误差是很小的, 误差数量级远小于真实值的数量级, 动态刚度辨识方法对于此时的动态刚度辨识问题是有效的; 图 6 下侧图表示的是辨识值与真实值的相对误差放大图, 可以看出相对误差值在约 3 s 之后稳定在约  $\pm 2\%$  范围内, 辨识方法具有很高的精度, 说明提出的动态刚度辨识方法是有效的。

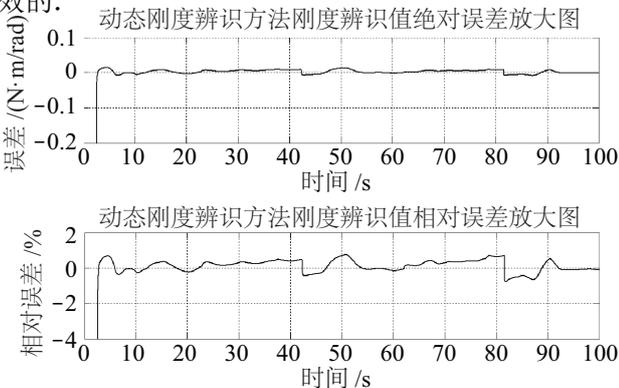


图 6 动态刚度辨识方法辨识绝对误差与相对误差

Fig.6 Absolute error and relative error of the dynamic stiffness identification

### 4.2 关节刚度控制方法仿真

采用 PID 控制器进行关节刚度闭环控制, 较优的参数选为  $K_P = 20$ ,  $K_I = 0.5$  和  $K_D = 0$ , 前馈增益  $K_f$  为 0.7, 此时, 关节刚度的真实值与目标值的对比如图 7 所示, 从图中可以看出此时的刚度真实值曲线与目标值曲线具有更好的重合度, 刚度值曲线比较光滑, 且真实值相对于目标值无明显的滞后。

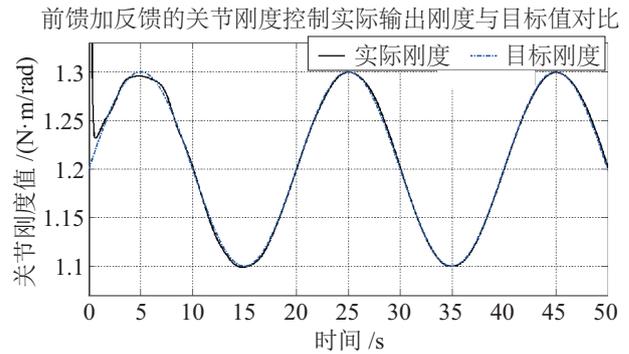


图 7 基于前馈加反馈的刚度控制结果

Fig.7 Result of stiffness control based on feedback-feedforward control

关节刚度值与目标值的相对误差如图 8 所示, 从图中可以看出控制结果的相对误差在  $\pm 1\%$  范围内, 波动范围很小, 控制系统具有较高的精度, 解决了仅有负反馈时的系统滞后和误差较大的问题, 说明前馈加反馈的刚度闭环控制方法是有效的。

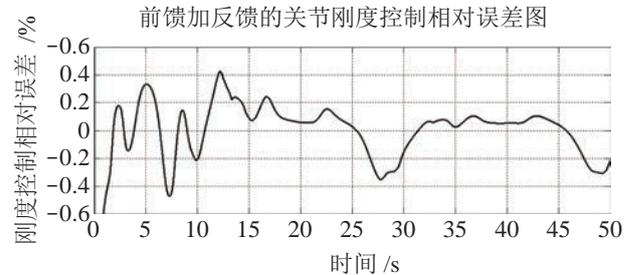


图 8 基于前馈加反馈的刚度控制相对误差

Fig.8 Relative error of the stiffness control based on feedback-feedforward control

### 5 结论 (Conclusion)

本文针对在机器人可变刚度关节控制中所必需的关节刚度在线辨识以及闭环控制问题进行研究, 为足式机器人系统在腿部柔性关节的刚度调节以及多关节刚度协调提供研究基础。

本文对变刚度关节的柔性力矩首先进行解耦, 之后再行线性化, 解决了变刚度关节中关节动态刚度辨识的非线性和参数耦合问题, 并通过卡尔曼滤波的方法对线性化参数进行选择, 得到了具有较高精度的关节动态刚度辨识结果。在仿真实验中

3 s 之后辨识相对误差稳定在约  $\pm 2\%$  范围内。在已有关节动态刚度辨识方法的基础上, 本文利用了前馈加反馈的闭环刚度控制方法, 系统的相对误差在  $\pm 1\%$  范围内。针对实物实验难以验证方法有效性的问题, 本文采用基于虚拟样机标准系统的仿真实验方法, 验证了本文所提出的动态刚度辨识方法和关节刚度控制方法是有效的, 并能保持较高的精度。

后续工作将围绕着如何将本文的辨识方法在实际的机器人可变刚度柔性关节系统中进行应用来展开, 包括根据实际关节的结构特点对刚度辨识方法进行修正, 并针对实际系统进一步完善变控制结构, 实现在实际系统中的应用。

### 参考文献 (References)

- [1] van Ham R. Compliant actuation for biologically inspired bipedal walking robots[D]. Brussel, Belgium: Vrije Universiteit, 2006.
- [2] Grootuis S S, Rusticelli G, Zucchelli A, et al. The variable stiffness actuator vsaUT-II: Mechanical design, modeling, and identification[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(2): 589-597.
- [3] Jafari A, Tsagarakis N G, Vanderborght B, et al. A novel actuator with adjustable stiffness (AwAS) [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 4201-4206.
- [4] Pratt G A, Williamson M M. Series elastic actuators[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 1995: 399-406.
- [5] Flacco F, de Luca A. Residual-based stiffness estimation in robots with flexible transmissions[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 5541-5547.
- [6] Grioli G, Bicchi A. A real-time parametric stiffness observer for VSA devices[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 5535-5540.
- [7] Serio A, Grioli G, Sardellitti I, et al. A decoupled impedance observer for a variable stiffness robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 5548-5553.
- [8] de Luca A, Flacco A, Bicchi A, et al. Nonlinear decoupled motion-stiffness control and collision detection/reaction for the VSA-II variable stiffness device[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 5487-5494.
- [9] 陈恩伟, 陆益民, 刘正士. Taylor展开的线性时变系统参数辨识及误差分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(7): 90-96.  
Chen E W, Lu Y M, Liu Z S. Parameter identification and error analysis of linear time varying system based on Taylor expansion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(7): 90-96.
- [10] Gomez J M. Kalman filtering[M]//van Ham R. Compliant actuation for biologically inspired bipedal walking robots. Hauppauge, USA: Nova Science, 2011.
- [11] Schoukens J, Pintelon R, Rolain Y. Mastering system identification in 100 exercises[M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2012.
- [12] 丁锋, 杨慧中, 纪志成. 时变系统辨识方法及其收敛定理[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2006, 5(1): 115-126.  
Ding F, Yang H Z, Ji Z C. Time varying system identification methods and convergence theories[J]. Journal of Southern Yangtze University: Natural Science Edition, 2006, 5(1): 115-126.
- [13] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 5版. 北京: 科学出版社, 2007: 471-472.  
Hu S S. The principle of automatic control[M]. 5th ed. Beijing: Science Press, 2007: 471-472.

### 作者简介:

- 尹 鹏 (1985-), 男, 博士生. 研究领域: 仿生机器人, 仿生控制.
- 李满天 (1974-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 仿生机器人, 特种机器人等.
- 查富生 (1974-), 男, 博士, 副教授, 研究领域: 仿生机器人与仿生控制等.