

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.08.006

# 绳驱动机械臂动力学建模及 ADAMS 仿真研究\*

田 波<sup>1</sup>, 王尧尧<sup>1\*</sup>, 朱康武<sup>2</sup>, 陈 柏<sup>1</sup>, 吴洪涛<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 上海市航空控制技术研究, 上海 201109)

**摘要:**针对绳的引入造成绳驱动机械臂动力学建模较难获取的问题,考虑绳的单向受力性,研究了绳对机械臂动力学模型的影响、绳子对所有经过的连杆之间的受力情况、预紧力对连杆受力及驱动力矩的影响等方面。在传统刚性机械臂动力学模型基础上进行了归纳,分析了绳子引入对机械臂受力造成的影响;基于递推形式的牛顿欧拉公式得到了完整的绳驱动机械臂动力学模型,并在此基础上分析了施加预紧力对连杆受力及驱动力矩造成的影响;利用 ADAMS 对三自由度串联绳驱动机械臂进行了仿真。仿真结果表明:理论驱动力矩与仿真力矩基本吻合,说明所建串联绳驱动机械臂动力学模型是正确的;预紧力的施加只会影响各连杆之间的相互作用力,不会改变驱动连杆所需的驱动力矩。

**关键词:**绳驱动;机械臂;动力学模型;牛顿欧拉公式;ADAMS 仿真

中图分类号:TH122;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)08-0803-06

## Dynamics modeling and ADAMS simulation of cable-driven manipulator

TIAN Bo<sup>1</sup>, WANG Yao-yao<sup>1</sup>, ZHU Kang-wu<sup>2</sup>, CHEN Bai<sup>1</sup>, WU Hong-tao<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of difficult to build the dynamics model of cable-driven manipulator because of importing of cable. Single way force of cable was taken into account. Cable-driven manipulator was researched on influence of cable on dynamics model, force between cable and linkages, change of force and driving torque caused by preload. Complete dynamics model of cable-driven manipulator was acquired on the basic of generalization of traditional rigid manipulator dynamics model, influences on manipulator by cable was analyzed, iteration Newton-Euler method was used. The influence that caused by exerting preload on linkages was analyzed on the base of dynamics model. Dynamics simulation of 3 DOF cable-driven manipulator was achieved through ADAMS. The simulation results indicate that simulation torque are accordance with calculated basically, which show the correctness of dynamics model. Forces between cable and linkages will change, however, driving torque keep unchanged when preload is exerted.

**Key words:** cable-driven; manipulator; dynamics model; Newton-Eular method; ADAMS simulation

## 0 引言

近年来,机器人技术得到飞速发展。由于自身惯量较大、所需驱动功率较高等一系列局限,传统刚性机械臂的应用范围大大缩减<sup>[1-2]</sup>。为了克服这些缺陷,绳驱动机械臂被提出。绳驱动机械臂以其较高的负载自

重比、驱动功率,末端执行器速度快和工作空间大等优点,受到众多领域的青睐<sup>[3-4]</sup>。传统刚性机械臂的动力学模型可以通过拉格朗日或者牛顿-欧拉方法方便地得到,而绳驱动机械臂由于绳的引入导致连杆之间受力更加复杂,其动力学模型较难获得。

为了在有限的空间进行相对灵活的运动,KIM C

收稿日期:2019-01-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51705243, 51805317, 51575256);江苏省自然科学基金资助项目(BK20170789)

作者简介:田波(1991-),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事绳驱动机械臂方面的研究。E-mail:inter1245@163.com

通信联系人:王尧尧,男,工学博士,讲师,硕士生导师。E-mail:yywang\_cmee@nuaa.edu.cn

Y 等人<sup>[5]</sup>用绳系统来驱动外科手术机械臂的末端执行器,在考虑了绳驱动的复杂耦合基础上,建立了它的动力学模型,但该外科手术机械臂是由多种方式结合驱动,且绳驱动仅在末端关节体现;巴黎大学 LAU D 等人<sup>[6]</sup>在考虑连杆之间相互作用力与力矩的基础上,研究了绳驱动多连杆机械臂逆动力学问题,通过仿真发现 8 绳 2 连杆和 76 绳 8 连杆机械臂分别与传统的二连杆和八连杆机械臂结果吻合,从而证明了逆动力学分析的有效性;徐伟等人<sup>[7]</sup>设计出了一款 7 自由度冗余绳驱动串联机械臂,并对其运动学进行了分析及仿真,但是对串联绳驱动机械臂动力学部分未进行深入研究;陈伟海等人<sup>[8]</sup>利用牛顿欧拉公式的递推形式,建立了 7 自由度绳驱动并联机械手的动力学模型,并在保证动态预紧力最小的概况下,求解了除各绳驱动力;仇原鹰等人<sup>[9]</sup>基于有限元思想,根据悬链线方程建立了绳索的动力学模型,并求得了绳索张力方差最小的唯一绳索张力优化解。

本研究将通过逐个分析连杆与绳之间的受力情况,用牛顿欧拉方法得到串联绳驱动机械臂动力学模型,并在此基础上分析添加预紧力对绳驱动机械臂受力情况带来的影响,最后在 ADAMS 中进行仿真验证所建动力学模型的正确性。

## 1 动力学建模

本研究采用牛顿—欧拉方法对绳驱动机械臂进行建模。牛顿欧拉迭代动力学算法由两部分组成:

(1)由第 1 连杆向第  $n$  连杆递推逐步计算连杆的速度和加速度;

(2)由第  $n$  连杆向第 1 连杆递推逐步计算连杆之间相互作用力和力矩以及关节驱动力矩<sup>[10-12]</sup>。

为了计算模型中绳对杆件的影响,需要忽略一些次要因素,特作以下假设:

(1)假设机械臂各个杆件均为刚性,即不计杆件在受力情况下的伸长和弯曲;

(2)不计绳的质量及受力情况下的伸长,即视绳为刚性体;

(3)忽略各关节处绳的摩擦。

### 1.1 动力学方程推导

外推计算速度及加速度为:

$${}^{i+1}w_{i+1} = {}_i^{i+1}R^i w_i + \theta_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (1)$$

式中:  ${}^{i+1}w_{i+1}$ —第  $i+1$  杆在第  $i+1$  坐标系中的角速度;  ${}_i^{i+1}R$ —坐标系  $i$  到坐标系  $i+1$  的转换矩阵;  $w_i$ —第  $i$  杆在第  $i$  坐标系中的角速度;  $\theta_{i+1}$ —第  $i+1$  杆角度的

导数;  ${}^{i+1}Z_{i+1}$ —坐标系  $i+1$  中  $Z$  轴的单位方向向量。

$${}^{i+1}\dot{w}_{i+1} = {}_i^{i+1}R^i \dot{w}_i + {}_i^{i+1}R^i w_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (2)$$

式中:  ${}^{i+1}\dot{w}_{i+1}$ —第  $i+1$  杆在  $i+1$  坐标系中角速度;  $\dot{w}_i$ —第  $i$  杆在第  $i$  坐标系中角加速度;  $\dot{\theta}_{i+1}$ —第  $i+1$  杆角度的二阶导数。

$${}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}_i^{i+1}R^i (\dot{w}_i \times {}^i P_{i+1} + w_i \times (w_i \times {}^i P_{i+1}) + \dot{v}_i) \quad (3)$$

式中:  ${}^{i+1}\dot{v}_{i+1}$ —第  $i+1$  连杆原点在坐标系  $i+1$  中的线加速度;  ${}^i P_{i+1}$ —坐标系  $i+1$  的原点在坐标系  $i$  中的位置向量;  ${}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}}$ —第  $i+1$  连杆质心在坐标系  $i+1$  中的线加速度;  $\dot{v}_i$ —第  $i$  连杆原点在第  $i$  坐标系中线加速度。

$${}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} = {}^{i+1}\dot{w}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}} + {}^{i+1}w_{i+1} \times (w_i \times {}^i P_{C_{i+1}}) + {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} \quad (4)$$

式中:  ${}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}}$ —第  $i+1$  杆质心在坐标系  $i+1$  中的线速度;  ${}^{i+1}P_{C_{i+1}}$ —坐标系  $i+1$  中第  $i+1$  杆质心的位置向量。

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1} {}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} \quad (5)$$

式中:  ${}^{i+1}F_{i+1}$ —第  $i+1$  坐标系中第  $i+1$  连杆运动所需合力;  $m_{i+1}$ —第  $i+1$  连杆质量。

$${}^{i+1}N_{i+1} = {}^{C_{i+1}}I_{i+1} {}^{i+1}\dot{w}_{i+1} + {}^{i+1}w_{i+1} \times {}^{C_{i+1}}I_{i+1} {}^{i+1}w_{i+1} \quad (6)$$

式中:  ${}^{C_{i+1}}I_{i+1}$ —杆件  $i+1$  相对其质心的惯量矩阵。

在向外递推计算连杆速度加速度方面,传统刚性机械臂与绳驱动机械臂是一样的。

在向内递推计算相互作用力和力矩以及关节驱动力矩方面,本研究采用对单个杆件进行分析的方法,截取第  $i$  连杆进行受力分析,结果如图 1 所示。

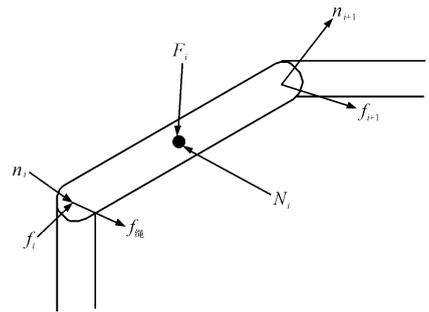


图 1 单个连杆受力分析示意图

由图 1 可以看出:

第  $i$  根杆除了受到第  $i-1$  和  $i+1$  根杆对它的作用力( $f_i, f_{i+1}$ )和力矩( $n_i, n_{i+1}$ )以外还要受到绳子对它的力。这里绳子给第  $i$  根杆的力是由  $n-i+1$  部分组成的,它们分别是第  $i$  到第  $n$  根杆的驱动绳经过第  $i$  根杆给它的作用力。

这里暂不考虑重力对杆件的影响,将所有作用在第  $i$  根杆上的力相加,可得到力的平衡方程:

$${}^i F_i = {}^i f_i - {}_{i+1}^i R^{i+1} f_{i+1} + \sum_{k=i}^n {}^i f_{k,绳} \quad (7)$$

式中:  ${}^i f_{k,绳}$ —第  $k$  杆件的驱动绳经过第  $i$  根杆对其施加的力。

为使之能更直观看出其递推性质,对式(7)作相应变形,即:

$${}^i f_i = {}^i F_i + {}_{i+1}^i R^{i+1} f_{i+1} - \sum_{k=i}^n {}^i f_{k,绳} \quad (8)$$

接下来考虑作用在  $i$  杆上的力矩。由于传统刚性机械臂与绳驱动机械臂的不同在于传统刚性机械臂驱动电机一般安装于前一关节上,对此造成的影响是第  $i+1$  关节的驱动力矩会有一个大小相等方向相反的力矩作用在第  $i$  关节上。绳驱动机械臂的驱动装置一般安装在底座上,第  $i+1$  关节驱动力矩并不会直接对第  $i$  根连杆产生直接的“反力矩”作用,故在图1中,相对应的表现为  $n_{i+1} = 0$ 。

在上述分析的基础上,本文将所有作用在第  $i$  根杆上的力矩相加,并令它们的和为零,即可得到力矩平衡方程:

$${}^i N_i = {}^i n_i + (-{}^i P_{c,i}) \times {}^i f_i + ({}^i P_{i+1} - {}^i P_{c,i}) \times (-{}^i f_{i+1}) + \sum_{k=i+1}^n {}^i n_{k,绳} \quad (9)$$

这里要特别说明,计算力矩的时候,上式最后一项只计算了第  $i+1$  到第  $n$  根连杆驱动绳对  $i$  杆的力矩,这是因为第  $i$  连杆驱动绳就是为连杆  $i$  提供驱动力矩的,这里用  ${}^i n_i$  来表示。

将式(8)代入式(9),进行化简可得到:

$${}^i n_i = {}^i N_i + {}^i P_{c,i} \times {}^i F_i + {}^i P_{i+1} \times {}_{i+1}^i R^{i+1} f_{i+1} - \sum_{k=i+1}^n {}^i n_{k,绳} \quad (10)$$

为了求得连杆驱动力矩,需要求得力矩  ${}^i n_i$  在  $Z$  轴方向的分量,即:

$$\tau_i = {}^i n_i \cdot {}^i Z_i \quad (11)$$

式(8,10,11)共同组成了绳驱动机械臂。由外向内逐步递推,可求解各个连杆相互间作用力、力矩和连杆驱动力矩的过程。

以上分析是基于不考虑重力的情况下的,如果考虑重力,只需令  ${}^0 v_0 = G$ ,其中,  $G$  与重力加速度矢量大小相等方向相反。至此,完成绳驱动机械臂动力学建模过程。

### 1.2 绳受力情况分析

式(8,10)中,除了关于绳子部分的力未知外其他的部分都能够求得,以下将对绳子给与连杆的力进行单独分析。

绳子对连杆的受力情况可以分为两类:

- (1) 绳子作为驱动绳与驱动轮之间的受力分析;
- (2) 绳子经过转向轮时对连杆的力的作用。

绳子对连杆的力的作用是随着所设计绳驱动机械臂的走线形式而发生改变的,本研究采用平行走线的方式进行分析,每一个驱动轮都需要两根绳来分别驱动杆件顺时针和逆时针转动,绳的两端分别固定在驱动电机的转轮和驱动轮上。

对这两根绳进行受力分析,结果如图2所示。

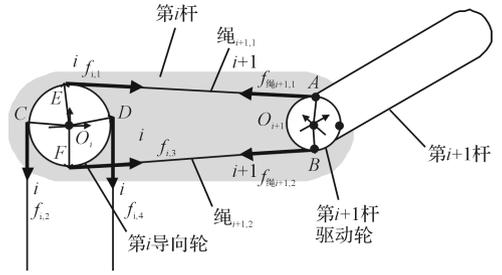


图2 绳子对连杆受力分析图

在图2中,将这两根绳合称为第  $i+1$  驱动绳,分别记作绳  ${}_{i+1,1}$  和绳  ${}_{i+1,2}$ 。

首先考虑第  $i+1$  驱动绳对第  $i+1$  连杆的力。由图2受力分析图可见,它对  $i+1$  连杆有两个力的作用分别为  ${}^{i+1} f_{绳_{i+1,1}}$  和  ${}^{i+1} f_{绳_{i+1,2}}$ ,并且它们提供第  $i+1$  连杆的驱动力矩,即:

$${}^{i+1} n_{i+1} = O_{i+1} A \times {}^{i+1} f_{绳_{i+1,1}} + O_{i+1} B \times {}^{i+1} f_{绳_{i+1,2}} \quad (12)$$

其方向分别沿着驱动轮  $O_{i+1}$  和导向轮  $O_i$  的公切线并指向  $O_i$  轮方向。

再考虑第  $i+1$  驱动绳对第  $i$  连杆的力。

由图2受力分析可见,它对  $i$  连杆有4个力作用分别为:  ${}^i f_{i,1}$ ,  ${}^i f_{i,2}$  和  ${}^i f_{i,3}$ ,  ${}^i f_{i,4}$ 。其中  ${}^i f_{i,1}$ ,  ${}^i f_{i,2}$  大小相等均等于方向沿着绳的方向,  ${}^i f_{i,3}$ ,  ${}^i f_{i,4}$  大小相等均等于方向沿着绳的方向,并且对连杆  $i$  的力矩为:

$${}^{i+1} n_{i+1} = O_i C \times {}^i f_{i,2} + O_i E \times {}^i f_{i,1} + O_i D \times {}^i f_{i,3} + O_i F \times {}^i f_{i,4} \quad (13)$$

可见,与传统刚机械臂相比,除了  $i+1$  驱动绳本身施加在第  $i$  连杆上的力以外,它还通过改变  $f_{i+1}$  来影响第  $i$  连杆的受力情况。

### 1.3 预紧力对连杆受力的影响

由于绳的柔性,在绳驱动机械臂设计过程中需要考虑到机械臂工作过程或者装配是否会引起绳的松弛,研究人员要设计张紧机构以及施加预紧力,使绳驱动机械臂达到较好的控制效果。

这里将分析第  $i+1$  连杆和第  $i$  连杆在添加预紧力以后,绳子和连杆的受力情况。

第  $i$  及第  $i+1$  连杆受力分析如图 3 所示。

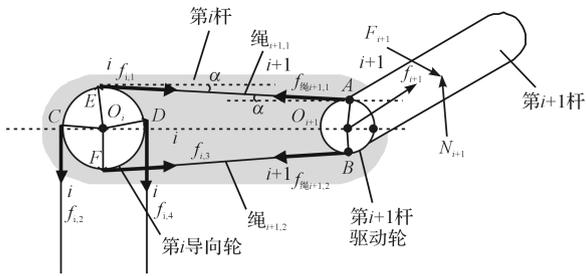


图 3 施加预紧力后连杆受力分析图

由于绳子是第  $i+1$  驱动轮和第  $i$  导向轮的公切线,易知绳子与两轮中心连线夹角是相等的。如果只考虑预紧力,那么有:

$$|{}^{i+1}f_{绳_{i+1,1}}| = |{}^{i+1}f_{绳_{i+1,2}}| \quad (14)$$

其方向如图 3 所示。根据式(3)可知:

$${}^{i+1}f'_{i+1} = {}^{i+1}f_{i+1} - {}^{i+1}f_{绳_{i+1,1}} - {}^{i+1}f_{绳_{i+1,2}} \quad (15)$$

式中:  ${}^{i+1}f'_{i+1}$ —添加预紧力以后第  $i$  根连杆对第  $i+1$  连杆的作用力。

由上式可见,预紧力改变了第  $i$  根连杆对第  $i+1$  连杆的作用力。

根据式(10)可知:

$${}^{i+1}n'_{i+1} = {}^{i+1}n_{i+1} + {}^{i+1}f_{绳_{i+1,1}} \times O_{i+1}A + {}^{i+1}f_{绳_{i+1,2}} \times O_{i+1}B \quad (16)$$

式中:  ${}^{i+1}n'_{i+1}$ —添加预紧力后  $i+1$  连杆的驱动力矩。

由于  $O_{i+1}A$ 、 $O_{i+1}B$  和  ${}^{i+1}f_{绳_{i+1,1}}$ 、 ${}^{i+1}f_{绳_{i+1,2}}$  分别关于第  $i+1$  驱动轮和第  $i$  导向轮中心连线对称,可以得到:  ${}^{i+1}f_{绳_{i+1,1}} \times O_{i+1}A + {}^{i+1}f_{绳_{i+1,2}} \times O_{i+1}B = 0$ ,即:

$${}^{i+1}n'_{i+1} = {}^{i+1}n_{i+1} \quad (17)$$

可见,施加预紧力对第  $i+1$  杆的驱动力矩是没有影响的。

再考虑预紧力对第  $i$  杆的影响。由式(8,13)可得:

$$\begin{aligned} f'_i = & F_i + {}^iR^{i+1}({}^{i+1}f_{i+1} - {}^{i+1}f_{绳_{i+1,1}} - {}^{i+1}f_{绳_{i+1,2}}) - \sum_{k=i}^n f_{k,绳} = \\ & F_i + {}^iR^{i+1}({}^{i+1}f_{i+1} - {}^{i+1}f_{绳_{i+1,1}} - {}^{i+1}f_{绳_{i+1,2}}) - \\ & (f_{i,1} + f_{i,2} + f_{i,3} + f_{i,4}) \end{aligned} \quad (18)$$

由于第  $i$  导向轮仅提供换向作用,而不提供力矩,故有:

$$\begin{aligned} |f_{i,1}| &= |f_{i,2}| = |{}^{i+1}f_{绳_{i+1,1}}| \\ |f_{i,3}| &= |f_{i,4}| = |{}^{i+1}f_{绳_{i+1,2}}| \end{aligned} \quad (19)$$

并且  $f_{i,1}$ 、 $f_{i,3}$  的方向分别与  ${}^{i+1}R^{i+1}f_{绳_{i+1,1}}$ 、 ${}^{i+1}R^{i+1}f_{绳_{i+1,2}}$  相反,故式(18)可化简为:

$$f'_i = F_i + {}^iR^{i+1}f_{i+1} - f_{i,2} - f_{i,4} \quad (20)$$

与式(7)对比可见,预紧力也改变了第  $i-1$  根杆

对第  $i$  根杆之间的作用力。

由式(10,13)可知:

$$\begin{aligned} {}^i n'_i = & {}^i N_i + {}^i P_{c,i} \times F_i + {}^i P_{i+1} \times {}^i R^{i+1} f_{i+1} - \\ & O_i C \times f_{i,2} - O_i D \times f_{i,4} - \\ & O_i E \times f_{i,1} - O_i F \times f_{i,3} \end{aligned} \quad (21)$$

由代数知识可知:

$$\begin{aligned} O_i C \times f_{i,2} + O_i D \times f_{i,4} &= 0 \\ O_i E \times f_{i,1} + O_i F \times f_{i,3} &= 0 \end{aligned} \quad (22)$$

将式(22)代入式(21)可得:

$${}^i n'_i = {}^i n_i \quad (23)$$

可见预紧力不改变第  $i$  杆的驱动力矩,并且上述过程皆可依次往内递推至第一根连杆。

综上所述,预紧力的添加仅仅会改变连杆之间内部作用力,不会改变驱动连杆所需力矩。

## 2 试验及结果分析

本研究首先在 ADAMS 软件中建立绳驱动机械臂的模型,然后设置激励轨迹进行仿真,并将仿真结果与 1.1 节所建立的数学模型结果进行对比。

### 2.1 仿真算例

本研究在 ADAMS 中建立的三自由度绳驱动机械臂的模型,该模型主要由:底座、大臂、小臂和末端关节组成,如图 4 所示。

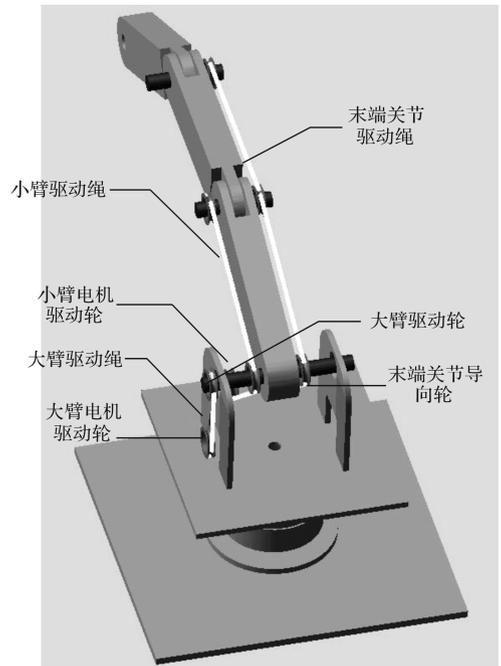


图 4 ADAMS 中三自由度绳驱动机械臂模型

图 4 中,底座上有电机(为了方便观察各轮位置,图中未显示电机),大臂与底座之间通过转动轴 1 来连接,轴 1 上安装有大臂驱动轮、小臂和末端关节导向

轮。大臂与小臂之间通过轴 2 连接,轴 2 上安装有小臂驱动轮和末端关节导向轮。小臂与末端关节通过轴 3 连接,轴 3 上安装有末端关节驱动轮。

所建立的模型中,每根连杆的导向滑轮和驱动轮的半径均为 25 mm。

各连杆详细参数如表 1 所示。

表 1 各连杆质量参数

质量参数	大臂	小臂	末端关节
质量/kg	4.364	3.415	3.767
长度/m	0.3	0.3	0.3
质心位置/m	0.106	0.135	0.150
$I_{xx}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.007 08	0.002 76	0.002 96
$I_{yy}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.050 66	0.033 45	0.041 77
$I_{zz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.047 28	0.033 85	0.042 34

该模型中,轴均与相邻的连杆固定,故此表 1 中的参数是包含与连杆相连接的轴在内的。惯性张量数据均由重心决定对齐输出坐标系,输出坐标系  $X$  轴沿着杆长方向, $Z$  轴垂直纸面向里,原点在连杆前端处。

给定连杆的运动轨迹为有限项傅里叶级数,其形式为:

$$q_i(t) = q_{i,0} + \sum_{k=1}^N (a_{i,k} \sin(k\omega_f t) + b_{i,k} \cos(k\omega_f t))$$

式中: $t$ —时间; $q_{i,0}$ —初始位置; $\omega_f$ —基频; $N$ —傅里叶级数谐波项数目; $a_{i,k}, b_{i,k}$ —对应项的参数。

本研究所设计的运动轨迹如图 5 所示。

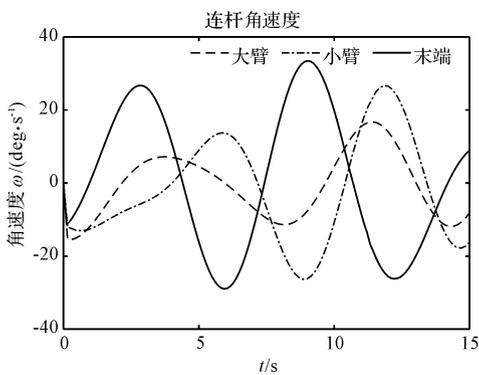


图 5 各连杆角速度

图 5 中,在给定运动轨迹基础上,通过动力学模型可以计算出各关节的驱动力矩。

## 2.2 结果分析

各连杆理论驱动力矩与仿真得到的驱动力矩对比如图 6 所示。

由图 6 可以发现:

3 个关节的仿真驱动力矩和通过动力学模型推导得到的理论力矩十分接近,这说明动力学模型的正确性;推导得到的力矩与仿真力矩差距较大的地方一般

出现在力矩的极值处,原因是在该处一般处于角加速度最大的时候,绳子受到的力矩较大,同时绳还是有少许弹性。

为了能更直观地对结果进行评价,本研究计算两力矩残差的均方根,其结果如表 2 所示。

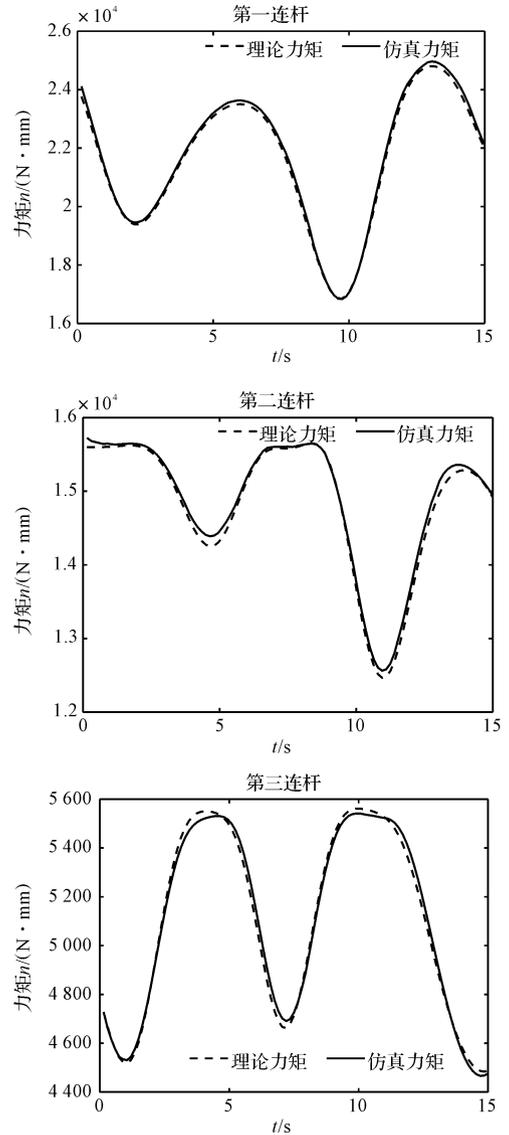


图 6 三连杆理论驱动力矩与仿真力矩对比

表 2 关节力矩残差均方根

连杆	力矩残差均方根/(N·mm)
连杆 1	136.03
连杆 2	82.152
连杆 3	28.172

由表 2 可见:

相对于所测力矩,力矩残差均方根很小,说明预测力矩与仿真力矩很好吻合,验证了绳驱动机械臂动力学模型的正确性;同时,第 3 连杆、第 2 连杆、第 1 连杆误差依次变大,这是由于第 3 连杆受力会影响第 1、第 2 连杆,从而造成误差累积。

### 3 结束语

(1) 本研究在传统刚性机械臂动力学模型基础上,着重分析了绳子引入带给连杆受力变化,利用牛顿-欧拉公式得到了各连杆速度、加速度,及各连杆驱动力矩,建立了串联绳驱动机械臂动力学模型;

(2) 分析了驱动绳对所驱动杆件以及对经过的杆件的作用力,证明了施加预紧力会改变连杆之间的受力情况,不会改变连杆运动所需驱动力矩;

(3) 利用 ADAMS 软件进行了机械臂动力学仿真,并将仿真结果与动力学模型进行了对比,证明了动力学模型的正确性。

#### 参考文献 (References):

[1] 霍 伟. 机器人动力学与控制[M]. 北京:高等教育出版社,2005.

[2] KINSHEEL A, TAHA Z, DEBOUCHAL A, et al. Robust least square estimation of the CRS A465 robot arm's dynamic model parameters[J]. **Journal of Mechanical Engineering Research**, 2012,4(3):89-99.

[3] PHAN S, LIOULEMES A, LUTTERODT C, et al. Guided physical therapy through the use of the barrett WAM robotic arm[C]. 2014 IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE) Proceedings, Richardson: IEEE,2014.

[4] BUTTERFASS J, GREBENSTEIN M, LIU H. DLR-hand II: next generation of a dextrous robot hand[C]. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul: IEEE, 2001.

[5] KIM C Y, LEE M C, WICKER R B, et al. Dynamic modeling of coupled tendon-driven system for surgical robot instrument[J]. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, 2014,15(10):2077-2084.

[6] LAU D, OETOMO D, HALGAMUGE S K. Inverse dynamics of multilink cable-driven manipulators with the consideration of joint interaction forces and moments [J]. **IEEE Transactions on Robotics**, 2015,31(2):479-488.

[7] 徐 伟,陈 柏,李彬彬,等. 7 自由度冗余绳驱动机械臂运动分析及仿真[J]. 机电工程,2017,34(10):1095-1100.

[8] 陈伟海,游贤强,崔 翔,等. 绳驱动拟人臂机器人的动力学建模及张力分析[J]. 北京航空航天大学学报,2013,39(3):335-339.

[9] 苏 宇. 绳牵引并联机器人的力学分析与性能优化[D]. 西安:西安电子科技大学机械电子工程系,2014.

[10] 李 松,朱建柳,金晓临,等. 可变形履带式机器人行走机构设计及运动仿真[J]. 轻工机械,2018,35(1):37-42.

[11] 岳翠萍,刘新乐,冯 巍. 机器人压盖机[J]. 包装与食品机械,2017(5):52-54.

[12] CRAIG J J. Introduction to robotics: mechanics and control [M]. New Jersey: Peason Prentice Hall, 1955

[编辑:方越婷]

#### 本文引用格式:

田 波,王尧尧,朱康武,等. 绳驱动机械臂动力学建模及 ADAMS 仿真研究[J]. 机电工程,2019,36(8):803-808.

TIAN Bo, WANG Yao-yao, ZHU Kang-wu, et al. Dynamics modeling and ADAMS simulation of cable-driven manipulator[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(8):803-808.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>