

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.12.016

前列腺针刺机器人的动力学建模与仿真研究*

王富刚, 时运来*, 张 军, 付少蕾, 吴文博

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要:针对六自由度前列腺针刺机器人动力学问题,以设计加工的一款新型串联前列腺针刺机器人为对象,对前列腺针刺手术机器人的穿刺过程进行了研究。首次采用了 RCM 调姿和针刺单位作动的定义,在把单位作动等效成挠动的情况下,建立了机器人等效动力学模型;用拉格朗日方法求得了机器人动力学方程,并利用 ADAMS 和 Matlab 软件进行了动力学仿真分析与方程验证,得到了针尖点的运动曲线和各关节的动力学特性曲线。研究表明:机器人各关节动力学方程解析曲线与仿真曲线相关系数分别对应为 0.4、0.75、0.50、0.74 和 0.74,吻合程度良好;并以此为基础,对机器人的动力元件进行了选型与校核。

关键词:前列腺针刺机器人;远程运动中心;等效动力学模型;拉格朗日方法

中图分类号:TP122;TP242

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)12-1314-06

Dynamics modeling and simulation of prostate needle-insertion robot

WANG Fu-gang, SHI Yun-lai, ZHANG Jun, FU Shao-lei, WU Wen-bo

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University
of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the dynamics problem of 6-dof prostate needle-insertion robot, a new type of serial prostate needle-insertion robot was designed and processed as the research object, in view of puncture process of prostate needle-insertion surgical robot, the definition of remote center of motion (RCM) posture adjustment and acupuncture unit actuation were adopted simultaneously for the first time. The unit actuation was equivalent into torsion, while the robot equivalent dynamic model was established. The dynamic equation of the robot was obtained by Lagrange method, and the dynamic simulation analysis and equation validation was carried out by ADAMS and Matlab software, and the motion curve of the tip and the dynamic characteristic curve of each joint were obtained. The results indicate that the correlation coefficients between the analytical curve and the simulation curve of the dynamic equation of each joint are 0.4, 0.75, 0.5, 0.74 and 0.74 respectively, which are in good agreement. On this basis, the model selection and verification of the robot's power components are carried out.

Key words: prostate needle-insertion robot; remote center of motion (RCM); equivalent dynamic model; Lagrange method

0 引 言

随着机器人技术的快速发展,医疗机器人已逐渐在各个诊疗阶段得到了广泛应用^[1]。目前,手术机器人已成为了国内外学者们研究的热点^[2-3]。机器人动力学模型直接关系到机器人控制、动态特性和动力学优化等。医疗机器人动力学性能的好坏对于手术操作

的灵活性、精确性和安全性的保障至关重要^[4]。

国内外对于机器人动力学已开展了广泛研究,常用的动力学建模方法有牛顿-欧拉法、拉格朗日法和凯恩法。在机器人建模时,随着自由度数 n 的增加,所建立的动力学方程往往会变得十分复杂^[5-7],为此, Angeles 等^[8-9]首次利用自然正交补方法对有约束的串行机器人进行了系统化的动力学建模,并得到了一系列

收稿日期:2019-04-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275235,51975282)

作者简介:王富刚(1994-),男,甘肃会宁人,硕士研究生,主要从事电作动技术及应用方面的研究. E-mail: 969864509@qq.com

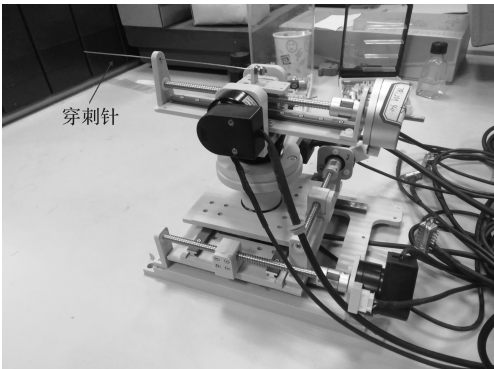
通信联系人:时运来,男,副教授,硕士生导师. E-mail: shiyunlai950438@nuaa.edu.cn

不含约束力的 Euler-Lagrange 方程;近年来,黄玉钊^[10]提出了机器人等效串联模型,并基于自然正交补理论对真空机器人进行了动力学建模;南京航空航天大学申浩宇^[11]基于该方法提出了高效率反向动力学建模方法;郭杰等^[12]通过对各个模块分别建模,求取了并联结构机器人的动力学方程。

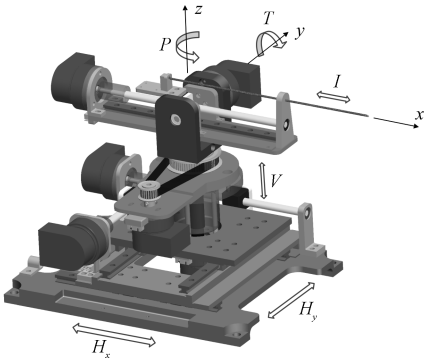
本文以面向核磁环境下应用的六自由度串联针刺机器人作为研究对象,对其拓扑结构进行设计。

1 机构原理

本研究所设计的前列腺针刺机器人三维结构图如图 1 所示。



(a) 机器人实物



(b) 前列腺针刺机器人3D模型

图 1 机器人三维结构图

图 1 中,机器人结构主要由笛卡尔模块、偏转模块、针刺模块 3 部分组成(可实现 6 个自由度的运动):(1) x 方向的水平平移(H_x);(2) y 方向的水平平移(H_y);(3)垂直方向的位移(V);(4)旋转运动(P);(5)俯仰运动(T);(6)针刺运动(I)。

笛卡尔模块的运动采用丝杆螺母的形式传动,主要实现工作空间任意一点的定位;偏转模块主要实现穿刺针的水平偏转运动(P),通过皮带轮传动;针刺模块包含一个 U 型支座,其俯仰运动(T)由超声电机直接驱动。

在进行前列腺针刺手术时,针刺目标点会因软组

织受挤压而发生位置上的改变。由此,在核磁共振图像导航下,所设计的机器人要能根据目标点的变化相应地调整针体位移与姿态。在前列腺针刺手术之前,笔者对穿刺点到靶点的路径进行轨迹规划,分为 i 份,每一份作为一个针刺单位。引入远程运动中心(RCM)概念^[13],将节点称之为 RCM 点,在 RCM 点穿刺针需要调整姿态,即 RCM 调姿;使其与轨迹曲线在该点的切线相同,然后控制穿刺针作动直至下一个 RCM 点,即单位作动。

RCM 调姿与单位作动如图 2 所示。

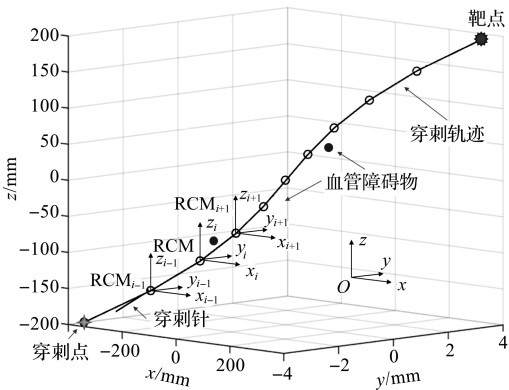


图 2 RCM 调姿与单位作动

按图 2 所示步骤不断重复该过程,可以完成前列腺针刺过程中,针尖点到达靶点完成粒子放置的手术要求。

2 动力学研究方法与等效模型

为避免手术操作工程中的误操作,笔者所设计的机器人结构采用串联形式;同时,为达到工作空间大,各关节单独控制和易于运动解耦之目的,本研究采用拉格朗日法对机器人建立动力学方程。

多关节串联机器人存在复杂的耦合关系和严重的非线性关系。随着关节数的增加,拉格朗日法方程越来越复杂,运算量越来越大^[14]。为了简化方程,本研究建立机器人等效动力学等效模型,如图 3 所示。

图 3 中,5 个关节主要完成机器人定位与 RCM 调姿,针刺关节记为关节 6,主要完成针刺单位作动。由于它独立于其他关节运作,对动力学模型的影响非常小,可以将其视为扰动项^[15]而忽略不计。

针刺机器人的动能可以表达为:

$$K = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 \tag{1}$$

给出关节 1 的位移,可以求得关节 1 动能,即:

$$K_1 = \frac{1}{2}m_1\dot{x}_1^2 \tag{2}$$

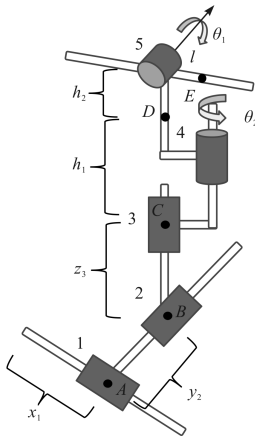


图 3 机器人动力学等效模型

1,2,3,4,5—各个关节;A,B,C,D,E—关节各个构件的质心
给出关节 2 质心坐标,可以求得关节 2 动能,即:

$$\begin{cases} x_B = x_1 \\ y_B = y_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_B = \dot{x}_1 \\ \dot{y}_B = \dot{y}_2 \end{cases} \Rightarrow v_B^2 = \dot{x}_1^2 + \dot{y}_2^2$$

$$K_2 = \frac{1}{2}m_2v_B^2 = \frac{1}{2}m_2\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}_2^2 \quad (3)$$

给出关节 3 质心坐标,可以求得关节 3 的动能,即:

$$\begin{cases} x_C = x_1 \\ y_C = y_2 \\ z_C = z_3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_C = \dot{x}_1 \\ \dot{y}_C = \dot{y}_2 \\ \dot{z}_C = \dot{z}_3 \end{cases} \Rightarrow v_C^2 = \dot{x}_1^2 + \dot{y}_2^2 + \dot{z}_3^2$$

$$K_3 = \frac{1}{2}m_3\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}m_3\dot{y}_2^2 + \frac{1}{2}m_3\dot{z}_3^2 \quad (4)$$

为了缩小方程的复杂程度,令关节 4 的质心 D 在中心轴上,则 $I_4 = 0$ 。根据关节 4 质心坐标,求其动能,即:

$$\begin{cases} x_D = x_1 \\ y_D = y_2 \\ z_D = z_3 + h_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_D = \dot{x}_1 \\ \dot{y}_D = \dot{y}_2 \\ \dot{z}_D = \dot{z}_3 \end{cases} \Rightarrow v_D^2 = \dot{x}_1^2 + \dot{y}_2^2 + \dot{z}_3^2$$

$$K_4 = \frac{1}{2}m_4\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}m_4\dot{y}_2^2 + \frac{1}{2}m_4\dot{z}_3^2 \quad (5)$$

下面计算构件 E 的动能。为了减少计算量,假设其转动惯量为 I_E ,则:

$$\begin{cases} x_E = x_1 + lC_1 \\ y_E = y_2 + lS_1 \\ z_E = z_3 + h_1 + h_2lS_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_E = \dot{x}_1 - lS_1\dot{\theta}_1 \\ \dot{y}_E = \dot{y}_2 + lC_1\dot{\theta}_1 \\ \dot{z}_E = \dot{z}_3 + lC_2\dot{\theta}_2 \end{cases}$$

关节 5 质心的速度平方为:

$$v_E^2 = \dot{x}_1^2 + \dot{y}_2^2 + \dot{z}_3^2 = (\dot{x}_1 - lS_1\dot{\theta}_1)^2 + (\dot{y}_2 + lC_1\dot{\theta}_1)^2 + (\dot{z}_3 + lC_2\dot{\theta}_2)^2$$

$$K_5 = \frac{1}{2}m_5v_E^2 + \frac{1}{2}I_E\dot{\theta}_2^2 \quad (6)$$

可以解得整体的动能为:

$$K = \frac{1}{2}(m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5)\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}(m_2 + m_3 + m_4 + m_5)\dot{y}_2^2 + \frac{1}{2}(m_3 + m_4 + m_5)\dot{z}_3^2 - lm_5S_1\dot{\theta}_1\dot{x}_1 + lm_5C_1\dot{\theta}_1\dot{y}_2 + lm_5C_2\dot{\theta}_2\dot{z}_3 + \frac{1}{2}m_5l^2\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_5l^2C_2^2\dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2}I_E\dot{\theta}_2^2 \quad (7)$$

下面计算整体的势能。以底座为零势能面,则整体的势能可以表示为:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \quad (8)$$

其中:

$$P_1 = 0, P_2 = 0, P_3 = m_3gz_3;$$

$$P_4 = m_4g(z_3 + h_1);$$

$$P_5 = mg(h_1 + h_2 + z_3 + lS_2)。$$

化简可得:

$$P = (m_3 + m_4 + m_5)gz_3 + (m_3 + m_4)gh_1 + m_5gh_2 + lm_5gS_2 \quad (9)$$

将式(7,9)代入到拉格朗日方程中,可以得到:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5)\ddot{x}_1 - lm_5S_1\ddot{\theta}_1 - lm_5C_1(\dot{\theta}_1)^2 \\ (m_2 + m_3 + m_4 + m_5)\ddot{y}_2 + lm_5C_1\ddot{\theta}_2 - lm_5S_1(\dot{\theta}_1)^2 \\ (m_3 + m_4 + m_5)\ddot{z}_3 + lm_5C_2\ddot{\theta}_2 - lm_5S_2(\dot{\theta}_2)^2 + (m_3 + m_4 + m_5)g - lm_5S_1\ddot{x}_1 + lm_5C_1\ddot{y}_2 + m_5l^2\ddot{\theta}_1 \\ lm_5C_2\ddot{z}_3 + m_5l^2C_1^2\ddot{\theta}_2 - m_5l^2S_2C_2\ddot{\theta}_2 + I_E\ddot{\theta}_2 + lm_5gC_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

为使其物理意义更加明确,可改写为:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ T_4 \\ F_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 & 0 & 0 & -lm_5S_1 & 0 \\ 0 & m_2 + m_3 + m_4 + m_5 & 0 & 0 & lm_5C_1 \\ 0 & 0 & m_3 + m_4 + m_5 & 0 & lm_5C_2 \\ -lm_5S_1 & lm_5C_1 & 0 & m_5l^2 & 0 \\ 0 & 0 & lm_5C_2 & 0 & I_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{z}_3 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -lm_5C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -lm_5S_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -lm_5S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -m_5l^2S_2C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{z}_3 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5l^2C_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (m_3 + m_4 + m_5)g \\ 0 \\ lm_5gC_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: m_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$)—各个模块的质量; x_1, y_2, z_3 , θ_1, θ_2 —各个关节的位移; $S_1 = \sin(\theta_1)$; $C_1 = \cos(\theta_1)$ 。

在上式中,二阶导数的变量与连杆的加速度有关,一阶导数的平方项为向心加速度项,一阶导数乘积项表示科式加速度项。科式加速度产生的原因是各模块之间耦合的结果。至此,本文通过建立等效动力学模型,求得了运动学方程。

各个模块的质量及其惯量可以从 ADAMS 软件中求得。

3 动力学仿真分析与驱动器选型

3.1 动力学仿真验证及结果分析

本研究采用 Pro/E 软件对针刺机器人进行三维建模,并将该三维模型转化为 parasolid 格式,导入 ADAMS。由于针刺机器人每次施针要完成的动作主要为:透皮、进针、施加手法、起针 4 个阶段,为了契合仿真过程,本文采用单位阶跃函数 step 函数来描述机器人虚拟样机 1~6 关节的驱动。初步假设机器人在 15 s 内的从穿刺点到达靶点,步长为 500,根据各个关节的运动顺序,给定允许范围内的任意速度,各关节驱动函数设为:

A: STEP (TIME, 0, 0, 5, 15) + STEP (TIME, 5, 0, 8, -4) + STEP (TIME, 10, 0, 13, -4);

B: STEP (TIME, 0, 0, 5, 15) + STEP (TIME, 5, 0, 8, -4) + STEP (TIME, 10, 0, 13, -4);

C: -STEP (TIME, 0, 0, 5, 4) - STEP (TIME, 5, 0, 8, -3) - STEP (TIME, 10, 0, 13, -2);

D: STEP (TIME, 5, 0, 8, 7d) + STEP (TIME, 10, 0, 13, 2d);

E: -STEP (TIME, 5, 0, 8, 5d) - STEP (TIME, 10, 0, 13, 2d);

F: STEP (TIME, 8, 0, 10, -6) + STEP (TIME, 13, 0, 15, -18)

仿真分为 0 s ~ 5 s, 5 s ~ 8 s, 8 s ~ 10 s, 10 s ~ 13 s, 13 s ~ 15 s 这 5 个阶段进行。位于笛卡尔模块上的关

节 1、关节 2、关节 3 在第一个阶段 (0 s ~ 5 s) 完成空间粗定位,在这个过程中其他关节保持不动;然后关节 1、关节 2、关节 3、关节 4、关节 5 在第二阶段 (5 s ~ 8 s) 同时运动完成空间 RCM 调姿;接着关节 5 在第三阶段 (8 s ~ 10 s) 进行单位作动;然后关节 1、关节 2、关节 3、关节 4、关节 5 第四阶段 (10 s ~ 13 s) 继续空间 RCM 调姿为下一步针刺做准备,关节 5 第五阶段 (13 s ~ 15 s) 完成下一步针刺。

本研究在针尖末端点添加标记点,测量针尖点的运动特性曲线,如图 4 所示。

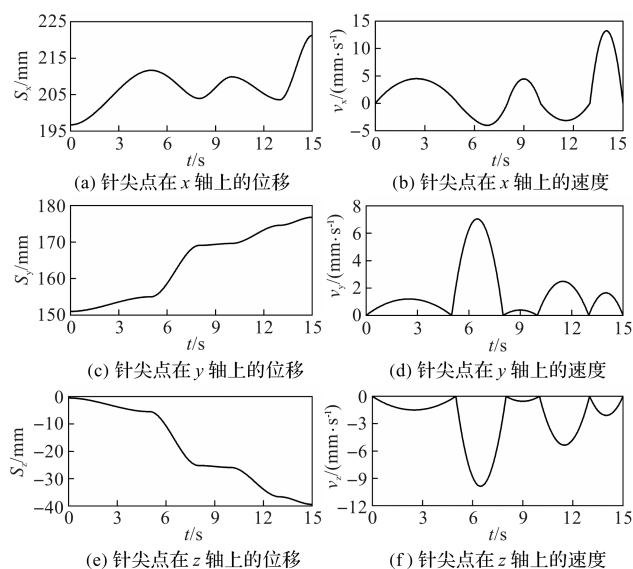


图 4 针尖点的运动特性曲线

由图 4 可知:穿刺针每单位穿刺针先加速再减速,过程中无断点,针尖点的运动特性良好。

文献[16]介绍了外径 1.27 mm,长为 152.4 mm 的斜尖针刺入牛肝时的穿刺力变化曲线,该针与常用的 18 G (外径 1.20 mm) 穿刺针近似,穿刺针在刺入软组织时,穿刺力随着深度的增加而发生变化,其最大力约为 2.5 N。

在 ADAMS 虚拟样机中,通过在针尖点施加同轴线的相反线性增加阻力,忽略摩擦力,可得到机器人各个关节及针刺关节动力学特性曲线,如图 5 所示。

通过 Matlab,将各个关节的位移、速度作为已知量

代入式(11),可以得到各关节动力学方程解析曲线,如图6所示。

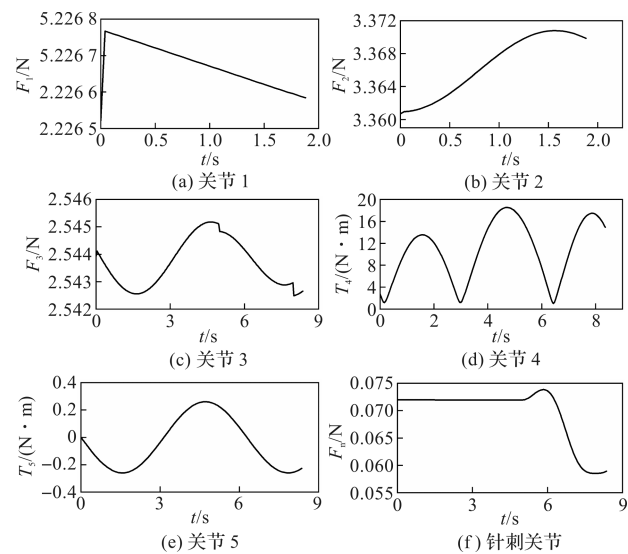


图5 机器人动力学特性曲线

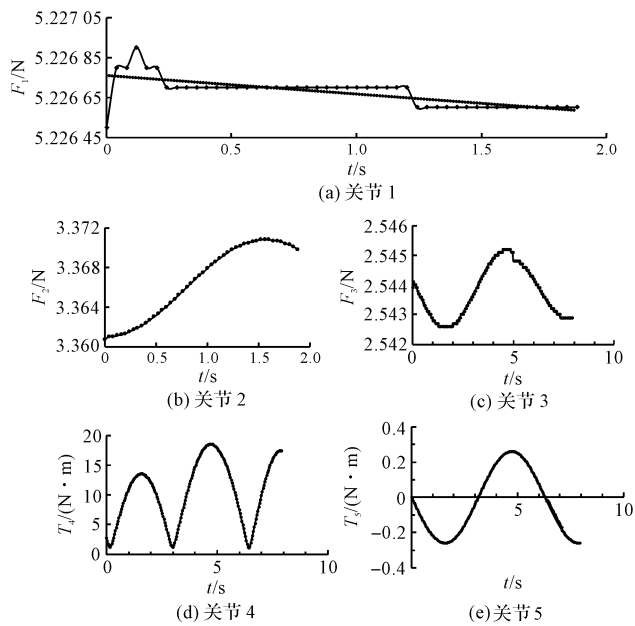


图6 各关节动力学方程解析曲线

相关系数公式如下:

$$r_{xy} = \frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}} \tag{12}$$

式中: $Cov(X,Y)$ — X,Y 的协方差; $D(X),D(Y)$ — X,Y 的方差。

通过计算,各仿真曲线与方程曲线相关系数 r 分别对应为:0.40、0.75、0.50、0.74和0.74。曲线 F_1 的方向由于与施加阻力同轴,使得求解曲线出现跳动,但是总体趋势不变;曲线 F_2 吻合程度比较理想;曲线 F_3 中含有奇点,这是因为取点仿真时未取到该奇点的值;

曲线 $T_4、T_5$ 总体吻合程度良好。综上, $F_2、T_4、T_5$ 相关程度高,吻合程度理想, $F_1、F_3$ 相关程度较低,有些突变和奇点,但总体可控,基本趋势吻合。因此,由各关节曲线吻合度佐证了动力学方程的正确性。

3.2 磁兼容驱动器选择与校核

考虑到机器人工作环境,本研究选择无磁型超声电机作为驱动单元,电机最大输出扭矩0.15 N/m,额定功率1.25 W。本研究选用的丝杆材料为黄铜,传动螺母为PEEK。

以水平方向电机为例,其输出功率为:

$$\lambda = \arctan \frac{S}{\pi d_2} = \arctan \frac{Px}{\pi d_2} \approx 0.053 \tag{13}$$

$$\rho' = \arctan \frac{f}{\cos \frac{\alpha}{2}} \approx 0.181 \tag{14}$$

$$\eta = 0.99 \times \frac{\tan \lambda}{\tan(\lambda \pm \rho')} \approx 0.212 \tag{15}$$

式中: λ —螺旋升角; ρ' —当量摩擦角; S —导程; P —螺距; x —螺纹头数。

丝杆传动效率为:

$$P_{\text{输出}} = 0.212 P_{\text{输入}} \tag{16}$$

最大出力为:

$$F_{\text{max}} = \frac{0.212 \times 1.25}{10} \times 1\,000 = 26.25\text{ N} > 2.5\text{ N} \tag{17}$$

故所选电机符合要求。

4 结束语

本文针对应用于核磁环境下的串联前列腺针刺机器人的动力学问题进行了研究,建立了机器人的动力学等效模型,得到了动力学方程,利用ADAMS和Matlab进行了动力学仿真与分析,得出了机器人按一定函数运动时,各个关节的动力学曲线,并由此对所采用的无磁超声电机进行了选型与校核。

在下一阶段,本研究将通过核磁共振仪实验来验证针刺机器人的协调控制方法。由于机器人动力学在核磁环境中与正常会有较大的差异,在今后的研究中,需要进一步研究动态特性分析与精确位置控制,以实现对机器人较好的动力学控制。

参考文献(References):

[1] 谭 民,王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报,

- 2013,39(7):963-972.
- [2] 王成勇,谢国能,赵丹娜,等. 医疗手术机器人发展概况[J]. 工具技术,2016,50(7):3-12.
- [3] 安超,梁萍. 医用机器人及其精准定位和术中导航及影像辅助技术研究进展[J]. 武警医学,2018(1):86-89.
- [4] KANG H, WEN J T. Robotic assistants aid surgeons during minimally invasive procedures[J]. **IEEE Eng Med Biol Mag**, 2001,20(1):94-104.
- [5] UICKER J J. Dynamic Behavior of spatial linkages: part 1—exact equations of motion, part 2—small oscillations about equilibrium[J]. **Journal of Engineering for Industry**, 1969,91(1):251-265.
- [6] ANGELES J, Ma O. Dynamic simulation of n-axis serial robotic manipulators using a natural orthogonal complement[J]. **The International Journal of Robotics Research**, 1988,7(5):32-47.
- [7] LUH J Y S, WALKER M W, Paul R P C. On-line computational scheme for mechanical manipulators[J]. **J. DYN. SYS. MEAS. & CONTR.**, 1980,102(2):69-76.
- [8] ANGELES J, LEE S K. The formulation of dynamical equations of holonomic mechanical systems using a natural orthogonal complement[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1988,55(1):243.
- [9] ANGELES J. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms[M]//ANGELES J. Fundamentals of robotic mechanical systems: theory, methods, and algorithms. New York:Springer, 2007.
- [10] 黄玉钊,曲道奎,徐方,等. 基于自然正交补的真空机器人动力学建模[J]. 机器人,2012,34(6):730-736.
- [11] 申浩宇,吴洪涛,陈柏. 多自由度串联机器人的高效率反向动力学建模方法[J]. 中国机械工程,2016,27(1):20-24.
- [12] 郭杰,姜杉,冯文浩,等. 基于核磁图像导航的前列腺针刺手术机器人[J]. 机器人,2012,34(4):385-392.
- [13] 李建民. 微创机器人机构设计方法与主从映射策略研究[D]. 天津:天津大学机械工程学院,2012.
- [14] 李庆龄,赵永生. 六自由度工业机器人动力学分析与仿真[J]. 上海电机学院学报,2008,11(4):275-278.
- [15] 周焯. 串联六自由度机器人运动仿真与控制系统仿真研究[D]. 青岛:青岛科技大学机电工程学院,2014.
- [16] ABOLHASSANI N, PATEL R, MOALLEM M. Needle insertion into soft tissue: a survey[J]. **Medical Engineering & Physics**, 2007,29(4):413-431

[编辑:李辉]

本文引用格式:

王富刚,时运来,张军,等. 前列腺针刺机器人的动力学建模与仿真研究[J]. 机电工程,2019,36(12):1314-1319.

WANG Fu-gang, SHI Yun-lai, ZHANG Jun, et al. Dynamics modeling and simulation of prostate needle-insertion robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(12):1314-1319.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>