

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.11.010

含防扭结构的 VR 动感椅平台运动分析和仿真

谢 巍¹, 秦宝荣¹, 曾 健¹, 王郑兴²

(1. 浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014;

2. 浙江恒林椅业股份有限公司, 浙江 安吉 313300)

摘要:针对 3-RPS 平台电动缸运动过程中受扭矩过大现象,设计了一种应用于虚拟现实技术中的具有防扭结构的新型三自由度并联平台,对其运动学和防扭性能进行了研究。在 SolidWorks 中建立了防扭结构并联平台模型,并对其进行了运动学逆解和正解分析,联合 ADAMS 和 Matlab 软件对逆解算法进行了验证,在逆解算法的基础上,采用反解迭代的杆长逼近法近似求解了位置正解。应用 ADAMS 对具有防扭结构平台和 3-RPS 平台电动缸的防扭性能进行了动力学仿真,对比分析了两种结构下电动缸在运动过程中所受扭矩。研究表明:具有防扭结构的运动平台的电动缸受扭矩明显减小,为平台结构设计提供了实用依据。

关键词:防扭结构;运动学;ADAMS;3-RPS 并联平台;仿真

中图分类号:TP242;TH113

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)11-1344-05

Motion analysis and simulation of VR dynamic chair with anti-twist structure

XIE Wei¹, QING Bao-rong¹, ZENG Jian¹, WANG Zheng-xing²

(1. Key Laboratory of E&M, Ministry of Education&Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology,

Hangzhou 310014, China; 2. Zhejiang Henglin Chair Industry Co. Ltd., Anji 313300, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon of excessive torque during the motion of electric cylinder on 3-RPS platform, a new type of three degree of freedom parallel platform with anti-twist structure was designed, which is applied to the virtual reality technology. Its kinematics and anti-twist performance were studied. The model of Anti-Twist structure parallel platform in SolidWorks was built, and its inverse kinematics and positive solution was analyzed, combining with ADAMS and MATLAB software to verify the correctness of inverse solution algorithm. Based on inverse solution algorithm, by using inverse solution iteration method to approaching position positive solution, the anti-twist performance of electric cylinder with anti-torsion structure and 3-RPS platform was simulated by using ADAMS. The two kinds of electric cylinder of three degrees freedom of platform in the motion process of the torque were compared and analyzed. The research results show that the torque of electric cylinder with anti-twist structure is significantly reduced. Provides a practical basis for the platform structural design.

Key words: anti-twist structure; kinematics; ADAMS; 3-RPS parallel platform; simulation

0 引言

VR 动感椅运动平台原型为三自由度并联运动机构,由六自由度 Stewart 机构衍生而来^[1]。本研究设计的一种新型的具有防扭结构的三自由度并联运动平台,应用于虚拟现实技术中的动感椅结构中。基于

VR 技术的动感椅配备有 360°全景眼镜,结合相应的虚拟动画软件,动感椅根据影片中的动作进行相应的运动响应,从而能让体验者能感受到影片中如上下坡、加减速、转弯、颠簸等运动状态,让人体验到身临其境的动感特效。

对于并联运动平台,学者们关于六自由度并联及

收稿日期:2016-05-26

作者简介:谢 巍(1991-),男,湖南永州人,硕士研究生,主要从事机械设计及理论方面的研究。E-mail:xw392341761@163.com

其他结构形式的并联平台运动学研究的较多,对于动感椅结构中三自由度平台运动学研究的较少^[2]。三自由度并联运动平台大多采用电动缸作为执行机构,电动缸的价格会很大程度影响平台的造价^[3]。3-RPS 平台在高频率的运动过程中,动平台的重心偏移误差较大^[4],出现高频的扭转,传统的 3-RPS 结构完全依靠电动缸来承载 3 个方向的扭矩,容易发生疲劳破坏,平台的可维护性差。因此设计具有防扭结构的三自由度运动平台很有必要。

同时,本研究对设计的防扭结构三自由度平台的运动学进行研究,对于并联平台正解容易反解困难的特点^[5],通过建立并联平台的机构模型,求解其位姿反解并对位置正解方法进行分析。

1 防扭结构三自由度平台模型

防扭结构三自由度平台的结构模型如图 1 所示。

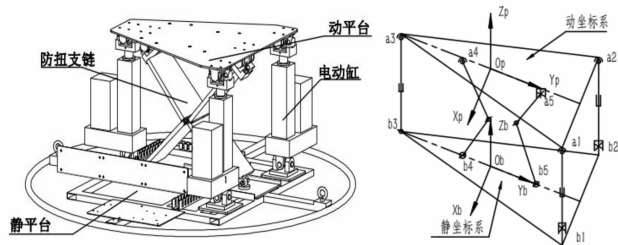


图 1 防扭三自由度并联平台模型及简图

所述的并联机构由动平台、静平台、三条竖直的驱动支链和两条防扭支链组成。其中 a1、a2 驱动支链电动杆与动平台用球铰连接,电缸底端用十字铰链与静平台连接。a3 支链电动杆与动平台用球铰连接,电缸的底端用销轴与固定在静平台上的后叉铰座连接。由于动平台在运动过程中进行高频的绕 Y_p 及 X_p 轴翻转,将会对电动缸及与电动缸连接的铰座产生沿 X 、 Y 、 Z 轴的高频的扭转力。由于动感座椅尺寸的限制,本研究只在过三角平台顶点并垂直于底边的线上加入两条防扭支链并将 1、2 号电缸与静平台连接改为十字铰,这样解除了 1、2 号电缸沿 Y 轴方向的旋转约束,由支链来承载 1、2 号电缸受的扭转力。防扭支链由两块防扭板用铰链连接而成,a4、a5 支链与动平台间分别用球铰和十字铰链相连接,b4、b5 支链用销轴副与静平台连接。

2 防扭结构平台运动学分析

含防扭结构的三自由度运动平台是一个多变量和非线性的复杂系统,其运动学分析是平台结构设计和运动特性研究的基础,同时控制平台运动的参数也与

平台的运动学算法有关联。

2.1 三自由度运动平台位置反解

含防扭结构的三自由度运动平台运动学位姿反解,就是在动平台运动情况已知的状况下,反解各个驱动杆的伸长量的过程。

2.1.1 坐标系的建立

为了描述上平台相对固定平台的运动情况,如图 1 所示,本研究在静平台的中心处建立坐标系 $\{g\}$: $O_g - X_g Y_g Z_g$,在动平台的中心处建立坐标系 $\{p\}$: $O_p - X_p Y_p Z_p$ 。三自由度运动平台的位姿由动平台中心点 $Q = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$ 确定。其中 $T = [x, y, z]^T$ 代表的是动平台中心点相对于静平台坐标系的位移,参数 φ 、 θ 、 ψ 分别表示绕 X 、 Y 、 Z 轴的旋转角。平台的运动的位姿采用欧拉角进行描述,关于欧拉变换理论,在很多论文中都有涉及^[6-7],这里将不再赘述。

2.1.2 防扭结构平台运动学反解

各条驱动链、防扭臂与上平台铰接点相对于动作坐标系的坐标可以用矩阵表示为 α_i^p ($i = 1, 2, 3$) 和 α_{i+3}^p ($i = 1, 2$),用坐标矩阵表示为 A_1^p, A_2^p 。驱动支链、防扭臂与下平台铰接点相对于静坐标系的坐标可表示为 b_i ($i = 1, 2, 3$), b_{i+3} ($i = 1, 2$),用坐标矩阵表示为 B_1, B_2 。即:

$$A_1^p = [a_1^p, a_2^p, a_3^p], A_2^p = [a_4^p, a_5^p] \quad (1)$$

$$B_1 = [b_1, b_2, b_3], B_2 = [b_4, b_5] \quad (2)$$

通过坐标变换,可以得到上平台铰点在静坐标系 g 中的坐标矩阵如下:

$$A_1 = R \cdot [a_1^p, a_2^p, a_3^p] + T = [a_1, a_2, a_3] \quad (3)$$

$$A_2 = R \cdot A_2^p = R \cdot [a_4^p, a_5^p] + T = [a_4, a_5] \quad (4)$$

式中: a_i^p —上铰点 a_i 在静系中的坐标矩阵, $a_i^p = [x_i^p, y_i^p, z_i^p]^T$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$); a_i —上铰点 a_i 在动系中的坐标矩阵, $a_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$); R —坐标旋转矩阵,且:

$$R = R_x R_y R_z =$$

$$\begin{bmatrix} c\theta c\psi & -c\varphi s\psi & s\theta \\ s\varphi s\theta c\psi + c\varphi s\psi & -s\varphi s\theta s\psi + c\varphi c\psi & -s\varphi c\theta \\ -c\varphi s\theta c\psi + s\varphi s\psi & c\varphi s\theta s\psi + s\varphi c\psi & c\varphi c\theta \end{bmatrix},$$

其中: $s\theta = \sin\theta$, $c\theta = \cos\theta$ 以下相同; T —动坐标系坐标原点平移矩阵 $[x, y, z]^T$ 。

因两个防扭臂约束,上铰点 α_4^p, α_5^p 只能在一个平面内运动,因此:

$$a_{4x} = 0, a_{5x} = 0 \quad (5)$$

由以上公式可求得:

$$\psi = 0, x = 0, y = -l_{a5-o_p} \sin\varphi \sin\theta \quad (6)$$

式中: l_{a5-o_p} —防扭臂上铰点到上平台中心的距离。

若动平台参数 $Q = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$ 中 $[\varphi, \theta, z]^T$ 给定, 则根据上述约束方程可求得 $[\psi, x, y]^T$ 。那么确定运动平台位姿的 6 个参数均已知, 因此变换矩阵 R 也可求得。

根据空间矢量关系, 3 根电动杆长度矢量 $l_i (i = 1, 2, 3)$ 可用下式表示:

$$l_i = T + R \cdot a_i^p - b_i \quad (7)$$

式中: R — 旋转变换矩阵; a_i^p — 下铰点在惯性坐标系中的矢径; b_i — 上铰点在惯性坐标系中的矢径。

则每个电动杆的动作长度表示为:

$$l_i^2 = l_i^T \cdot l_i (i = 1, 2, 3) \quad (8)$$

若各个电动杆初始状态长度为 l_0 , 则电动杆的驱动位移量为:

$$\Delta l_i = l_i - l_0 (i = 1, 2, 3) \quad (9)$$

至此, 运动平台位姿反解过程完成。

2.1.3 运动学反解算法的验证

逆解算法与控制系统能否根据视频获取的数据正确转化为伺服电机驱动信号相关联。本研究可以借助 Matlab 和 ADAMS 软件对算法进行验证^[8]。笔者通过将 SolidWorks 中建好的模型导入到 ADAMS 中, 添加质量信息、运动副等^[9], 对平台中心点添加驱动量 $[\varphi, \theta, z]^T$ 运行后, 软件会自动分析出结果。为简便起见, 在 ADAMS 中添加如下驱动:

φ : step(time, 0, 0, 4, 0) + step(time, 4, 0, 6, pi/12) + step(time, 6, 0, 8, -pi/12)

θ : step(time, 0, 0, 6, 0) + step(time, 8, 0, 10, pi/12) + step(time, 10, 0, 12, -pi/12)

Z : step(time, 0, 0, 4, 0.075)

运行仿真后, 可得到 3 根电动杆的运动曲线如图 2 所示。本研究将平台运动学逆解算法在 Matlab 中运算, 给定运动平台结构尺寸等相关数据以及输入 ADAMS 中相同的输入量 $[\varphi, \theta, z]^T$, 同样可以得到 3 根电动杆的伸长曲线, 如图 3 所示。

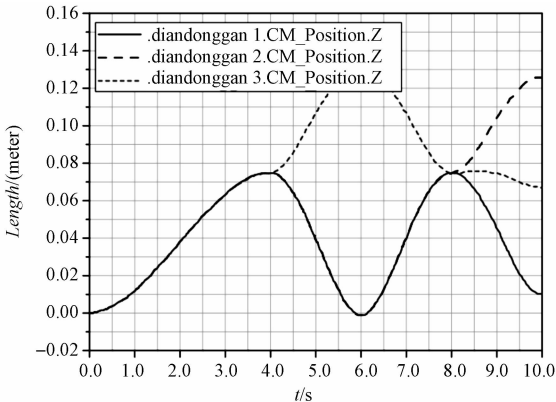


图 2 ADAMS 中长度变化

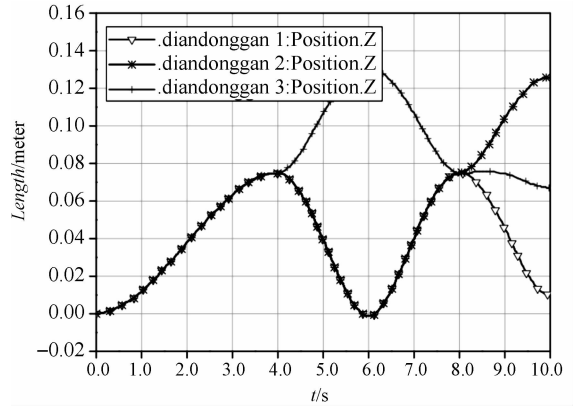


图 3 Matlab 中长度变化

由图 2 和图 3 可知, 在 ADAMS 中运行后得到了电动缸的运动曲线, 验证了模型的正确性。同时本研究以 ADAMS 中的运行结果为标准, 将逆解算法在 Matlab 中运行, 得到 3 根电动杆的运动曲线与 ADAMS 中基本相同, 验证了逆解算法的正确性, 为结构的动力学分析和控制系统研究奠定了基础。

2.2 三自由度运动平台位置正解

位姿正解就是在电动缸伸长的情况下求解平台位姿响应的过程。上述求得了位置反解, 利用位置反解迭代的杆长逼近法近似求解位置正解^[10-11]。

假定动平台初始位置 $(x_0, y_0, z_0, \varphi_0, \theta_0, \psi_0)$, 杆长为 $l_i^{(1)}$, 要求位姿对应的杆长的杆长为 l_i , 电动缸运动绝对伸长量为:

$$\Delta l_i^{(1)} = l_i - l_i^{(1)} \quad (10)$$

由式(7)可知, l_i 是动平台位变量的函数:

$$l_i = l_i(x, y, z, \varphi, \theta, \psi) \quad (11)$$

因此, 杆长与上平台中心点的速度有如下关系:

$$\begin{bmatrix} l'_1 \\ l'_2 \\ l'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial l_1}{\partial x} & \frac{\partial l_1}{\partial y} & \frac{\partial l_1}{\partial z} & \frac{\partial l_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial l_1}{\partial \theta} & \frac{\partial l_1}{\partial \psi} \\ \frac{\partial l_2}{\partial x} & \frac{\partial l_2}{\partial y} & \frac{\partial l_2}{\partial z} & \frac{\partial l_2}{\partial \varphi} & \frac{\partial l_2}{\partial \theta} & \frac{\partial l_2}{\partial \psi} \\ \frac{\partial l_3}{\partial x} & \frac{\partial l_3}{\partial y} & \frac{\partial l_3}{\partial z} & \frac{\partial l_3}{\partial \varphi} & \frac{\partial l_3}{\partial \theta} & \frac{\partial l_3}{\partial \psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \varphi' \\ \theta' \\ \psi' \end{bmatrix} \quad (12)$$

由式(8,9)可得:

$$\frac{\partial l_i}{\partial x} = \frac{l_{ix}}{l_i}, \frac{\partial l_i}{\partial y} = \frac{l_{iy}}{l_i}, \frac{\partial l_i}{\partial z} = \frac{l_{iz}}{l_i} \quad (13)$$

式中: l_{ix}, l_{iy}, l_{iz} — l_i 在静坐标系中的投影。

将上式两边同时乘以 dt , 用 $\Delta l_i^{(1)}$ 表示驱动杆杆长的增量, 动平台的位姿增量用 $(\Delta x^{(1)}, \Delta y^{(1)}, \Delta z^{(1)}, \Delta \varphi^{(1)}, \Delta \theta^{(1)}, \Delta \psi^{(1)})$ 表示, 于是有:

$$\begin{bmatrix} \Delta l_1^{(1)} \\ \Delta l_2^{(1)} \\ \Delta l_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial l_1}{\partial x} & \frac{\partial l_1}{\partial y} & \frac{\partial l_1}{\partial z} & \frac{\partial l_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial l_1}{\partial \theta} & \frac{\partial l_1}{\partial \psi} \\ \frac{\partial l_2}{\partial x} & \frac{\partial l_2}{\partial y} & \frac{\partial l_2}{\partial z} & \frac{\partial l_2}{\partial \varphi} & \frac{\partial l_2}{\partial \theta} & \frac{\partial l_2}{\partial \psi} \\ \frac{\partial l_3}{\partial x} & \frac{\partial l_3}{\partial y} & \frac{\partial l_3}{\partial z} & \frac{\partial l_3}{\partial \varphi} & \frac{\partial l_3}{\partial \theta} & \frac{\partial l_3}{\partial \psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x^{(1)} \\ \Delta y^{(1)} \\ \Delta z^{(1)} \\ \Delta \varphi^{(1)} \\ \Delta \theta^{(1)} \\ \Delta \psi^{(1)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:右上标—第一次修正,因此由 $\Delta l_i^{(1)}$ 可求得第一次位姿修正增量 $(\Delta x^{(1)}, \Delta y^{(1)}, \Delta z^{(1)}, \Delta \varphi^{(1)}, \Delta \theta^{(1)}, \Delta \psi^{(1)})$,于是得第一次修正后的动平台位姿分量:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + \Delta x^{(1)}, y_1 = y_0 + \Delta y^{(1)}, z_1 = z_0 + \Delta z^{(1)} \\ \varphi_1 &= \varphi_0 + \Delta \varphi^{(1)}, \theta_1 = \theta_0 + \Delta \theta^{(1)}, \psi_1 = \psi_0 + \Delta \psi^{(1)} \end{aligned} \quad (15)$$
$$(16)$$

再由修正后的位姿 $(x_1, y_1, z_1, \varphi_1, \theta_1, \psi_1)$ 通过上述过程求出新的杆长 $l_i^{(2)}$,同时可得到第二次偏差及修正量 $\Delta l_i^{(2)} = l_i - l_i^{(2)}$,将 $\Delta l_i^{(2)}$ 代入到上式中,于是得到第二次修正后的平台的位姿 $(x_2, y_2, z_2, \varphi_2, \theta_2, \psi_2)$,重复上述过程,于是在不断的位姿修正后会得到一系列逐次逼近给定杆长的新杆长,当得到的新杆长的长度与给定杆长的长度的差值为 $\max|\Delta l_i^n|$ 小于允许偏差 ε 时,而此时新杆长对应的位姿就可以认为是要求解的实际位姿。

3 运动平台的动力学仿真分析

3.1 含防扭臂结构的运动平台动力学分析

动力学分析是在机构运动已知的情况下,对模型施加载荷,分析其各部件在给定载荷下的动态特性。本研究在上述防扭结构运动平台理论分析正确的基础上,使用上述 ADAMS 中验证逆解算法的模型,在平台中心处施加沿 Z 轴负方向的 2 500 N 的载荷,并删去平台中心点驱动,设置重力加速度,在 3 根电缸的移动副上添加极限工况下的测试函数。运行仿真,得到 3 根电动杆的位移和驱动力曲线如图 4、图 5 所示,电动缸的最大伸长及平均推力值如表 1 所示。

表 1 电动缸最大伸长及平均推力

仿真结果	电动缸 1	电动缸 2	电动缸 3
最大伸长/mm	120	90	140
平均推力/N	786	786	957

防扭平台 3 根电动缸扭矩时间变化曲线如图 6 所示。从图 4 可知,在 2 s~4 s 及 8 s~10 s 内 3 根电动

缸的伸长长度差值较大,3 号电动缸在 3 s 时出现最大扭矩,约为 3.6 Nm,9.2 s 时扭矩约为 2.75 Nm。1、2 号电动缸所受的扭矩近似为零。

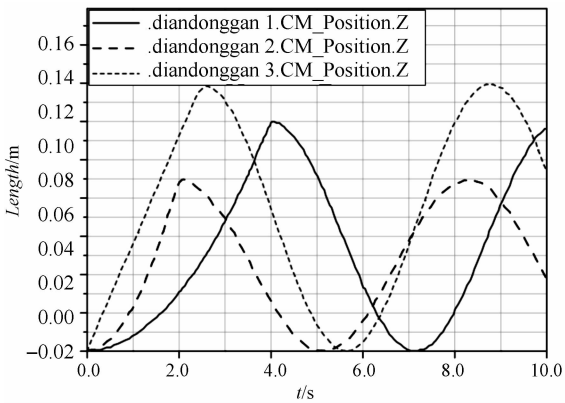


图 4 长度-时间曲线

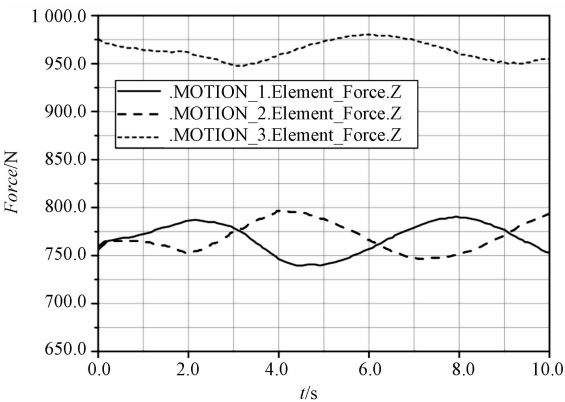


图 5 力-时间曲线

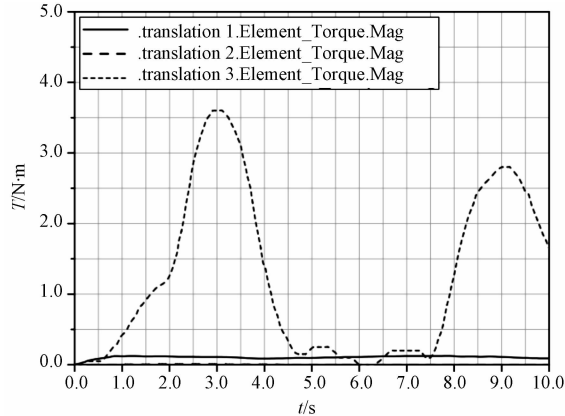


图 6 含防扭结构平台电动缸扭矩-时间曲线

3.2 3-RPS 运动平台动力学分析

传统 3-RPS 并联平台由 3 条相同的 RPS 驱动支链组成,每条驱动支链的电动杆通过球铰与上端的动平台连接,电动缸与静平台用销轴副连接。模型图如图 7 所示。以图 1 为参考,其中 b_1 、 b_2 销轴副轴线与 Y 轴平行, b_3 销轴副轴线与 X 轴平行。

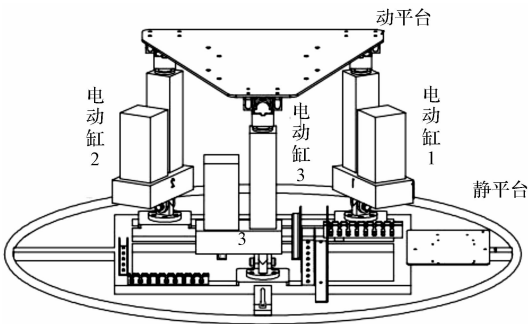


图 7 传统 3-RPS 模型图

笔者在 ADAMS 中进行相应设置,并与防扭平台添加相同的驱动函数和载荷,可得到 3-RPS 平台电动缸扭矩变化曲线如图 8 所示。

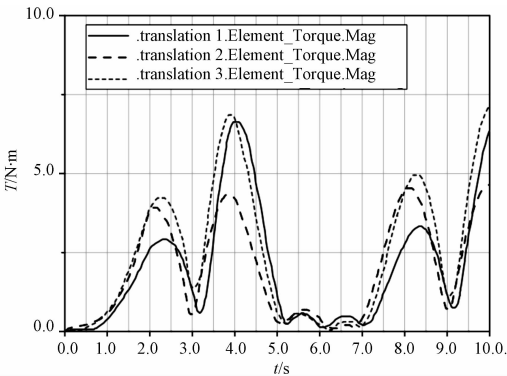


图 8 3-RPS 电动缸扭矩-时间曲线

由图 8 可知,3-RPS 结构在相同的运动情况下,3 根电动缸均承受较大的扭矩。1 号和 3 号电动缸最大扭矩出现在 4 s 和 10 s 时,分别为 6.9 N·m 和 7.2 N·m,2 号电动缸所受最大扭矩约为 4.7 N·m,最大扭矩同样也出现在伸长长度差值较大的时刻。

在相同载荷及驱动情况下,将重新排布含防扭结构平台与 3-RPS 运动平台的动力学仿真结果如表 2 所示。

表 2 两种结构最大扭矩

结构形式	电动缸 1 的扭矩/N · m	电动缸 2 的扭矩/N · m	电动缸 3 的扭矩/N · m
含防扭结构	0	0.2	3.6
不含防扭结构	6.9	4.7	7.2

两者电动缸承受的扭矩差异较大。3-RPS 电缸最大扭矩为 7.2 N · m,3 根电动缸承受的扭矩均较大,而防扭平台中 3 号电动缸最大扭矩为 3.6 N · m,且其他两根电动缸承受扭矩近似为零。这是由于,当防扭平台高频运动,电缸受到外界负载转矩时,由于与电缸

底部相连的为万向铰,减少了电缸与静平台的约束,1、2 号电缸的扭矩将由防扭板来承担,同时 3 号电缸所受的扭矩也有所减少。

4 结束语

本研究在满足设计要求的情况下,对传统的 3-RPS 结构进行了改进,提出了一种新型的具有防扭性能的三自由度运动平台。笔者对三自由度防扭结构运动平台运动学逆解进行了理论分析,用 ADAMS 和 MATLAB 软件验证了逆解算法的正确性,在逆解算法正确的基础上,采用反解迭代的杆长逼近法近似求解位置正解。笔者通过上述运动理论分析,验证了防扭结构平台结构的可行性,并在 ADAMS 中对防扭平台和 3-RPS 结构进行了动力学仿真分析,将两种结构在运动过程中电动缸所受扭矩的结果进行了对比分析,仿真结果表明,含防扭结构的运动平台能有效的减少电动缸在高频运动过程中产生的扭矩,增加了电动缸的疲劳寿命。

参考文献 (References) :

[1] 罗文豹. 一种三自由度运动平台的研究及实现[D]. 武汉:华中科技大学机械工程学院,2011.

[2] 赵铁石,黄真. 欠秩 3-RPS 立方角台机器人位置解. 燕山大学学报. 2000,24(1):4~7.

[3] 严骋,杜忠华,沈磊,夏龙. 三自由度纯转动并联机构的工作空间分析[J]. 机床与液压,2014,42(23):87-90.

[4] 李宝庆,王培俊,等. 含防扭结构的三自由度并联平台运动分析与仿真[J]. 机械设计与制造,2014(11):265-268.

[5] 王建平,彭凯. 基于 ADAMS 的一种新型六自由度并联机构的参数分析与仿真[J]. 机械传动. 2011,35(5):31-35.

[6] 刘显峰. 某型飞行器三自由度运动平台的设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机械工程学院,2010.

[7] 胡波,路懿,许佳音等. 新型过约束并联机构 2RPU + UPU 动力学模型[J]. 机械工程学报,2011,47(11):36-43.

[8] 王智兴,樊文欣等. 基于 Matlab 的工业机器人运动学分析与仿真[J]. 机电工程. 2012,29(1):33-37.

[9] 李增刚,ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京:国防工业出版社,2012.

[10] 韩敬虎,俞经虎. 食品检测咀嚼机器人灵活性分析与运动仿真[J]. 轻工机械,2016,34(2):20-24,29.

[11] 杨宏兵. 6-SPS 并联机器人运动学及工作空间的仿真研究[D]. 合肥:合肥工业大学机械工程学院,2004.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

谢巍,秦宝荣,曾健,等. 含防扭结构的 VR 动感椅平台运动分析和仿真[J]. 机电工程,2016,33(11):1344-1348.

XIE Wei, QING Bao-rong, ZENG Jian, et al. Motion analysis and simulation of VR dynamic chair with anti-twist structure[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(11):1344-1348.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>