

含间隙并联腿步行机器人的固有频率分析

苏成志^{1,3} 孙健² 王京华² 刘道学² 陈明颖⁴ 韩方元²

(1 长春理工大学重庆研究院, 重庆 401147)

(2 长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022)

(3 长春理工大学人工智能研究院, 吉林 长春 130022)

(4 黑龙江东方学院机电工程学部, 黑龙江 哈尔滨 150066)

摘要 针对步行机器人运行中出现振动与关节异响这一现象,采用动力学方法模拟运动副间隙模型的接触状态,分析了含间隙步行机器人的固有频率,避免了计算模态分析方法在仿真分析时会忽略非线性因素的问题。通过瞬态动力学仿真,计算出含间隙步行机器人的位移响应,再经过傅里叶变换,得到频率响应曲线,曲线峰值对应频率即为含间隙步行机器人的固有频率。仿真结果表明,关节间隙的存在会降低步行机器人的各阶固有频率,但间隙不会影响模态振型,1阶振型均为平台与支腿沿 X 轴的摇摆振动,2阶振型与1阶振型正交,3阶振型均为平台与支腿沿 Z 轴的扭转振动。

关键词 间隙 步行机器人 固有频率 瞬态动力学分析

Natural Frequency Analysis of a Parallel Legged Walking Robot with Clearance

Su Chengzhi^{1,3} Sun Jian² Wang Jinghua² Liu Daoxue² Chen Mingying⁴ Han Fangyuan²

(1 Changchun University of Science and Technology Chongqing Research Institute, Chongqing 401147, China)

(2 College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(3 Artificial Intelligence Research Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(4 Mechanical and Electrical Engineering Department, East University of Heilongjiang, Harbin 150066, China)

Abstract Aiming at the phenomenon of vibration and abnormal joint response in the operation of walking robot, the dynamics method is adopted to simulate the contact state of the clearance model of the moving pair, and the natural frequency of the walking robot with clearance is analyzed, avoiding the problem that the nonlinear factors are ignored in the simulation analysis of the computational modal analysis method. With the help of transient dynamics simulation, the displacement response of the walking robot with clearance is calculated, and then through the Fourier transform, the frequency response curve is obtained, the corresponding frequency of the curve peak is the natural frequency of the walking robot with clearance. The existence of joint clearance can reduce the natural frequencies of the walking robot, but the clearance does not affect the mode shapes. The first-order mode is the sway vibration of the platform and the support leg along the X -axis, the second-order mode is orthogonal to the first-order mode, and the third-order mode is the torsional vibration of the platform and the support leg along the Z -axis.

Key words Clearance Walking robot Natural frequency Transient dynamics analysis

0 引言

目前,将并联机构应用于步行机器人的腿部机构是机器人领域的研究热点之一。由于并联机构的结构复杂且强耦合,使得生产和装配时产生的运动副间隙对并联机构性能的影响相对串联结构更加明显^[1]。分析结构的模态在工程应用中发挥着重要的作

用,如避免结构发生共振^[2]。关节间隙会使得机构连接刚度降低,并且间隙对系统模态性能的影响已经有了不少定性的认识,即间隙会导致结构的固有频率由高变低^[3],且随间隙值的增大,振动频率下降,但振幅增大^[4];高频段振动的能力由强变弱;对于低频段的影响则较为复杂,复杂结构需要具体结构具

体分析^[5]。

结构的固有频率分析方法主要有两种,即试验模态分析与计算模态分析。试验模态分析主要依靠激振器对机构进行扫频或基于锤击法进行模态实验^[6];计算模态分析主要是采用有限元计算的方法进行。其中,计算模态分析方法因不需要实物即可得到固有频率而备受关注,并且考虑非线性因素的计算模态分析也是当前的研究重点。

针对含间隙结构的计算模态分析,部分学者通过有限元分析软件直接对结构进行了模态分析^[7-8]。但模态分析的理论是基于线性定常系统的^[9],采用有限元分析软件直接对含间隙结构模态分析时,对于间隙以及接触都会进行线性化处理,得到的分析值在原理上就会有较大的误差。针对以上问题, Song、Kim 等提出将非线性结构间隙由分段双线性连接刚度表示,并基于模态综合法与恢复力曲面法对典型折叠舵面结构进行了分析^[10-11]。在此基础上,王强等将等效连接刚度与间隙值进行组合,得到了不同关节间隙下的非线性连接刚度,并得到了与之对应的固有频率^[12]。但此类方法多运用于低自由度简单结构,若关节连接件过多则导致计算速度大幅下降;并且针对各关节分段双线性连接刚度与对应间隙值的配合并不完全适用,导致得到的机构固有频率存在一定偏差。

针对计算模态分析中出现的问题,部分学者采用一般用于解决瞬时动态问题的显式动力学算法来模拟结构的频率^[13]^[35-36]。通过时间历程分析,得到时域上的加速度响应;再经过傅里叶变换,得到频域内的加速度响应;根据频响曲线峰值来确定结构固有频率。该方法允许各类非线性特征,特别适用于含大间隙结构的固有频率分析,并且时间历程分析较为成熟,对于复杂结构的适用性强。

本文中分析了以上方法的优缺点,针对步行机器人振动时关节异响这一现象,采用动力学方法模拟振动中的接触过程,从而避免了模态分析时忽略非线性行为的问题。首先,介绍了并联腿步行机器人并对机器人模型简化;在此基础上,确定机器人间隙模型为二状态模型,建立了有限元模型;然后,通过瞬态动力学仿真,得到含间隙模型受激励后的位移响应,经过傅里叶变换,得到频率响应,进而得到含间隙模型的固有频率;再通过模态仿真,得到理想模型的前3阶模态振型。最后,根据仿真结果,分析了关节间隙对机器人固有频率与模态振型的影响。

1 机构所选取固有频率的说明

机器人在行走过程中,随着原动件的变化,其固有频率是始终变化的。为了探讨关节间隙对固有频率的影响,通过选定机器人行走过程中某一特定位姿,来分析关节间隙在该位姿下对固有频率的影响。

通过建立其动力学模型,并根据振动理论得到其固有频率方程。本文中采用 KANE 方法建立机器人动力学模型,机器人腿部几何模型如图1所示,支链几何模型如图2所示。

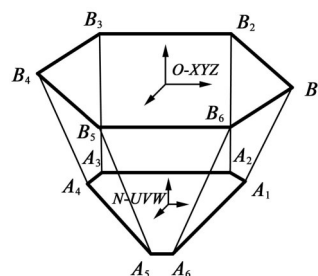


图1 机器人腿部几何模型

Fig. 1 Geometric model of robot leg

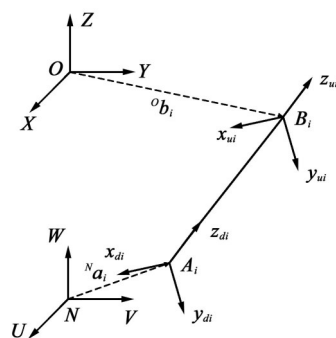


图2 机器人支链几何模型

Fig. 2 Geometric model of robot branch chain

图2中,基础坐标系 $O-XYZ$ 位于机器人机体质心处,运动坐标系 $N-UVW$ 位于足弓质心处。点 A_i 为活塞上的参考坐标系 $A_i=x_{di}y_{di}z_{di}$ 的原点,点 B_i 为缸体上的参考坐标系 $B_i=x_{ui}y_{ui}z_{ui}$ 的原点。连杆与机体和足弓的铰点分别为 A_i 与 B_i ; A_i 点在运动坐标系 $N-UVW$ 中的位置矢量记为 ${}^N a_i$,变换到基坐标系 $O-XYZ$ 的位置矢量记为 ${}^O a_i$; B_i 点在基坐标系 $O-XYZ$ 中的位置矢量记为 ${}^O b_i$ 。令足弓质心位置为 X ,速度为 $\dot{X}$,选取 $\dot{X}$ 为广义速度,其在基础坐标系 $O-XYZ$ 下的分量为 v_x 、 v_y 、 v_z , ω_x 、 ω_y 和 ω_z 为广义速率。为简化说明,文中不再给出具体推导过程,机器人足弓、活塞和缸体的速度与加速度分别为

$$\begin{cases} v_A = \dot{p}_i + \omega r_A \\ v_{di} = s_i(\omega c_i + \dot{p}_i)s_i + \frac{s_i(\omega c_i + \dot{p}_i)r_{di}}{L_i} \\ v_{ui} = s_i(\omega c_i + \dot{p}_i)r_{ui}/L_i \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} a_A = \ddot{p}_i + \omega(\omega r_A) + \varepsilon r_A \\ a_{di} = \ddot{L}_i s_i + \varepsilon_{Li} r_{di} + \omega_{Li}(\omega_{Li} r_{di}) + 2\dot{L}_i \omega_{Li} \\ a_{ui} = \varepsilon_{Li} r_{ui} + \omega_{Li}(\omega_{Li} r_{ui}) \end{cases} \quad (2)$$

以缸体速度为例,提取式(1)中的叉积反对称矩阵后,可改写为

$$v_{ui} = s_i [I \quad \tilde{c}_i^T] \begin{bmatrix} \dot{p}_i \\ \omega \end{bmatrix} r_{ui}/L_i \quad (3)$$

上式的矩阵可简写为

$$\begin{cases} J_X = [I \quad \tilde{c}_i^T] \\ \dot{X} = [\dot{p}_i \quad \omega]^T \end{cases}$$

则缸体速度可以改写为

$$v_{ui} = s_i J_X \dot{X} r_{ui}/L_i = s_i \tilde{r}_{ui}/L_i J_X \dot{X} \quad (4)$$

$$v_{ui} = J_{v,ui} \dot{X}$$

缸体速度相对于广义速率的偏速度为

$$v_{ui,\dot{X}} = J_{v,ui} \quad (5)$$

同理,可得足弓速度和角速度、活塞速度和角速度相对于广义速率的偏速度为

$$\begin{cases} v_{A,\dot{X}} = J_{v,A} \\ v_{di,\dot{X}} = J_{v,di} \end{cases} \quad (6)$$

连杆角速度相对于广义速率的偏角速度为

$$\omega_{Li,\dot{X}} = J_{\omega,Li} \quad (7)$$

根据KANE方法,广义主动力为构件重力以及驱动力与偏速度之积,广义惯性力为构件惯性力与偏速度或偏角速度之积。

广义主动力为

$$F_{\dot{X}} = \sum_{i=1}^6 (m_u g v_{ui,\dot{X}} + m_d g v_{di,\dot{X}}) + m_A g v_{A,\dot{X}} + \sum_{i=1}^6 F_i (v_{\dot{X}})_{\dot{X}} \quad (8)$$

广义惯性力为

$$\begin{aligned} F_{\dot{X}}^* = & - \sum_{i=1}^6 [(m_u a_{ui} v_{ui,\dot{X}} + m_d a_{di} v_{di,\dot{X}})] - \\ & \sum_{i=1}^6 (I_{ui} \varepsilon_{Li} + \omega_{Li} I_{ui} \omega_{Li}) \omega_{Li,\dot{X}} - \\ & \sum_{i=1}^6 (I_{di} \varepsilon_{Li} + \omega_{Li} I_{di} \omega_{Li}) \omega_{Li,\dot{X}} - \\ & (I_A \varepsilon_A + \omega I_A \omega) \omega_{\dot{X}} - m_A a_A v_{A,\dot{X}} \end{aligned} \quad (9)$$

由KANE方法可知,机构广义主动力与广义惯性力之和为0,机器人动力学方程简化后为

$$J^T \tau = M \ddot{X} + C \dot{X} + K X \quad (10)$$

式中,系数矩阵的表示为

$$\begin{aligned} M = & -m_A J_{v,A} J_{v,A}^T - I_A - \sum_{i=1}^6 (m_u J_{v,ui} J_{v,ui}^T) - \\ & \sum_{i=1}^6 (m_d J_{v,di} J_{v,di}^T + I_{ui} J_{\omega,Li} J_{\omega,Li}^T) - \sum_{i=1}^6 (I_{di} J_{\omega,Li} J_{\omega,Li}^T) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} C = & -m_A \dot{J}_{v,A} J_{v,A}^T - \sum_{i=1}^6 (m_u \dot{J}_{v,ui} J_{v,ui}^T) - \sum_{i=1}^6 (m_d \dot{J}_{v,di} J_{v,di}^T + \\ & I_{ui} \dot{J}_{\omega,Li} J_{\omega,Li}^T) - \sum_{i=1}^6 (I_{di} \dot{J}_{\omega,Li} J_{\omega,Li}^T) - \tilde{\omega} I_X \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} K = & m_A g J_{v,A}^T + \sum_{i=1}^6 (m_u g J_{v,ui}^T + m_d g J_{v,di}^T) - \\ & \sum_{i=1}^6 (I_{ui} \tilde{J}_{\omega,Li} I_{ui} J_{\omega,Li} J_{\omega,Li}^T) + \sum_{i=1}^6 (I_{di} \tilde{J}_{\omega,Li} I_{di} J_{\omega,Li} J_{\omega,Li}^T) \end{aligned} \quad (13)$$

由式(10)可以得到机构的无阻尼弹性振动固有频率和振动方程式为

$$M \ddot{X} + K X = 0 \quad (14)$$

其对应的机构特征矩阵表达式为

$$(K - \omega^2 M) A = 0 \quad (15)$$

式中, ω 、 A 分别为机构的固有频率与振型; $\ddot{X}$ 、 X 分别为广义速度的导数与广义位置坐标; M 、 K 分别为6×6的等效质量与等效刚度矩阵。 M 矩阵与 K 矩阵同时受到机器人位姿的影响,即机器人位姿变化时,机器人的固有频率同时变化。

为研究关节间隙对机器人固有频率的影响,采用固定位姿消除机器人位姿变化对固有频率的影响,其位姿为机器人在其工作空间内最低1阶固有频率所对应的位姿。

由文献[14]可知,并联机器人在其工作空间内的最低1阶固有频率有3种路径搜索分析方法:①沿水平面内某一圆周分析;②针对工作空间内不同水平截面分析;③针对整个工作空间分析。

根据方法①可知,在同一水平面内,机构固有频率随着姿态调整角度存在一个最小值。

根据方法②可知,选取不同水平界面,机器人均能表现出相同的变化趋势,即机器人在水平截面内的位置,远离中心点位置时,固有频率越来越小。

根据方法③可知,选取机器人在工作空间Z轴方向的水平截面,当Z轴坐标的绝对值越大,则固有频率越低,即固有频率随着机器人接近其Z轴工作空间边界而越来越小。

根据以上分析方法及结果可知,当并联机器人在其工作空间内,动平台越接近其工作空间的边缘,则1阶固有频率越低。结合并联腿步行机器人运行方式,根据并联腿步行机器人步态规划中的位姿,以接近工作空间边缘的位姿所对应的结构进行固有频率分析。

2 含间隙步行机器人的有限元模型

2.1 并联腿步行机器人

本文中基于并联机器人承载能力强、结构紧凑稳定且刚度大等优点,提出一款行走机构为并联机

构的步行机器人，如图3所示。

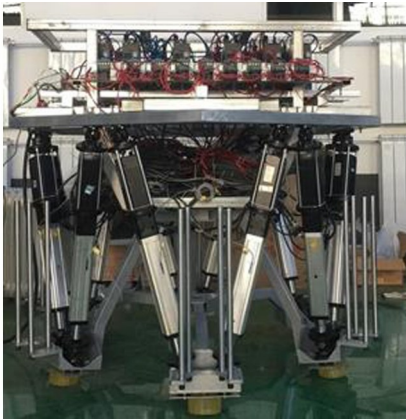


图3 并联腿步行机器人

Fig. 3 Parallel legged walking robot

该机器人行走机构由两个6-UPS机构组成，且公用同一定平台。动平台采用“Y”字弓形结构作为机器人的足。每个足端上有两个球铰连接伺服电动缸，伺服电动缸的另一端通过虎克铰连接定平台。

机器人足端的球铰受力变化频繁，并且离地较近，因此磨损较为严重，使得关节间隙增大。进而导致机器人在行走时产生振动。

2.2 模型简化与材料属性

本文中提出的步行机器人几何结构较为复杂，倒圆角与螺纹等细小特征对机构整体的刚度和模态性能影响不大，但在划分网格与仿真计算时增加计算机器负担，则对零件中的细小特征进行删除与简化。

简化过程主要包括：①将伺服电机等效为均质刚体；②简化万向节模型，保留万向节叉与十字轴，去除滚针轴承、油封及套筒；③去除机器人腿部安装传感器的结构件。由于机器人关节较多，对所有配合关系及传动均做简化处理。建立两组三维模型，一组为理想模型，另一组为含间隙模型，关节间隙大小为0.4 mm。

所有构件材料类型与构件尺寸均按照机器人实体所用材料与尺寸，步行机器人构件选材如表1所示。

表1 构件选材及材质属性

Tab. 1 Component selection and material properties

构件名称	材质	弹性模量/MPa	泊松比 μ	密度/(kg/m ³)
机架	45#	2.0×10^5	0.269	7 890
缸体	AL6061	6.9×10^4	0.33	2 700
活塞杆	GCr15	2.19×10^5	0.3	7 830
万向节	40Cr	2.06×10^5	0.3	7 850
足支	SUS304	1.94×10^5	0.247	7 930

机器人去除顶部伺服系统的几何尺寸为1 500 mm×1 500 mm×1 700 mm；机器人机架由6根相同矩形管组成，壁厚为3 mm，几何尺寸为620 mm×60 mm×40 mm；“Y”形足弓由异形方管组成，壁厚为4 mm，

上足弓单条方管尺寸为746 mm×40 mm×40 mm，下足弓单条方管尺寸为582 mm×40 mm×40 mm；缸体的几何尺寸为733 mm×64 mm×64 mm；活塞直径为36 mm，长度为450 mm；万向节中十字轴的直径为11 mm，万向节孔轴间隙为0.4 mm。

2.3 确定间隙模型

目前，运动副间隙模型分为3种：①连续接触模型^[15]，即运动副始终处于连续接触状态；②二状态模型^[16]，即运动副状态处于接触与自由两种状态；③三状态模型^[17]，即运动副状态处于接触、自由和碰撞3种状态。连续接触模型计算简单，但与实验结果差距较大。三状态模型与实验结果差距较小，且能较为贴近实际情况，但模型计算难度大，且碰撞时间难以得到，导致无法直接计算出运动副的冲击力。机器人运动时，关节间隙内的碰撞为低速碰撞，关节均视为刚体，碰撞时不发生渗透现象，综上分析，间隙模型采用二状态模型。

2.4 确定接触类型

对于机器人的理想模型，由于不存在间隙，运动副始终接触。机器人受到激励时，存在一定形变，则运动副切向存在一定滑动，但法向不会分离。其他机构连接方式采用焊接工艺或螺栓连接，不存在分离与滑动。

对于机器人的含间隙模型，由于存在间隙，并且运动副间隙模型为二状态模型，所以，运动副仅有接触与自由两种状态。此时，运动副不仅存在切向滑动，还存在运动副法向分离，但不存在相互渗透。

2.5 网格划分

由于机器人机体对称且简化后的构件均比较规则，除关节以外的构件均选取默认网格对机器人进行网格划分。对于万向节部分，为保证仿真收敛，设定较小网格，并且需要保证孔轴配合处的网格连接。最终将机器人划分为252 887个节点与102 959个单元，平均质量为0.725。平均质量大于0.7，有助于获得更准确的有限元分析结果^[18]，网格划分结果如图4所示。

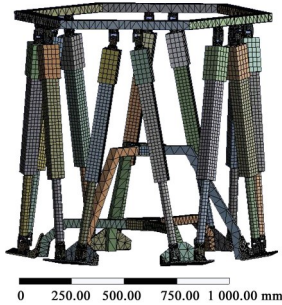


图4 网格划分效果图

Fig. 4 Grid division renderings

3 固有频率与振型分析

3.1 瞬态动力学仿真

瞬态动力学分析是用于确定承受任意的、随时间变化载荷结构的动力学响应的一种方法，其优点是允许包括各种类型的非线性因素，如大变形、接触、塑性等。通过瞬态动力学分析得到机器人在时域内的位移响应；经过傅里叶变换得到频域内的频响函数曲线；根据峰值对应的频率确定机器人的固有频率，其在原理上与实验模态得到的固有频率更为接近。

在 Ansys 仿真软件中设置 5 个载荷步：①对机器人无约束足端的 X 轴与 Y 轴同时施加 10 N 的压力，此设置的目的是防止直接加大载荷导致仿真不收敛^{[13]37-38}；②对无约束足端 X 轴与 Y 轴施加载荷，对机器人机架 Z 轴施加正压力载荷，载荷大小分别为：0 N、1 000 N、2 000 N；③锁定载荷力为 200 N，使得载荷力保持 0.2 s；④消除载荷；⑤锁定载荷力为 0，载荷步的初始子步为 10，最小子步为 5，最大子步为 50，载荷与其时间步设置如表 2 所示。

表 2 载荷与时间步设置表

Tab. 2 Load and time step setting table

时间/s	0	0.1	0.2	0.4	0.41	1.5
载荷/N	0	10	200	200	0	0

图 5 与图 6 所示分别为理想模型含间隙模型的载荷作用点随时间的位移响应曲线，图 7 与图 8 所示分别为理想模型与含间隙模型激振位置的频率响应曲线。

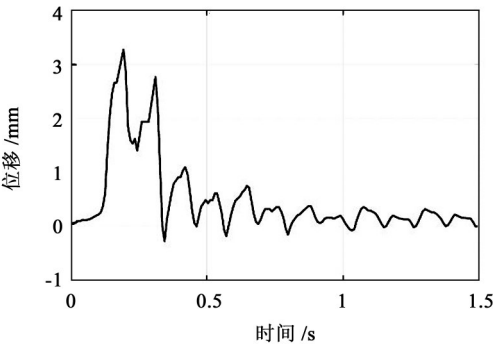


图 5 理想模型激振位置的位移响应曲线

Fig. 5 Displacement response curve of ideal model excitation position

频响曲线的峰值对应的频率代表机器人结构的固有频率。由图 7 中可以看出，频响曲线有 4 个峰值，峰值所在频率对应机器人理想模型前 4 阶的固有频率。一般情况下，低阶模态对机械结构的损伤影响较大，只提取前 3 阶固有频率，理想模型与 3 种状态下的含间隙模型对应的前 3 阶固有频率数值如表 3 所示。从表 3 中可以得出，含有间隙的模型固有频率会明显下降。

表 3 两种模型前 3 阶固有频率

Tab. 3 First three natural frequencies of the two models

	1 阶固有频率/Hz	2 阶固有频率/Hz	3 阶固有频率/Hz
理想模型	4.719	5.169	10.56
含间隙模型无负载	2.487	3.345	4.717
含间隙模型 1 000 N	3.002	3.431	5.323
含间隙模型 2 000 N	3.537	—	6.003

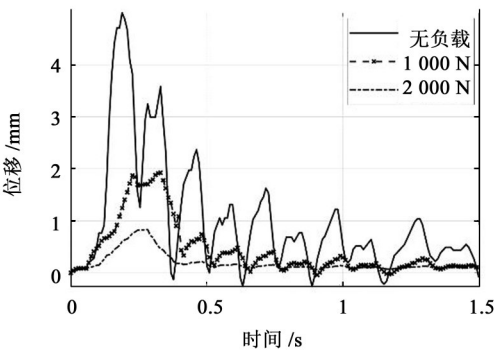


图 6 3 种状态下含间隙模型激振位置的位移响应曲线

Fig. 6 Displacement response curves of the excitation positions of the clearance model under the three states

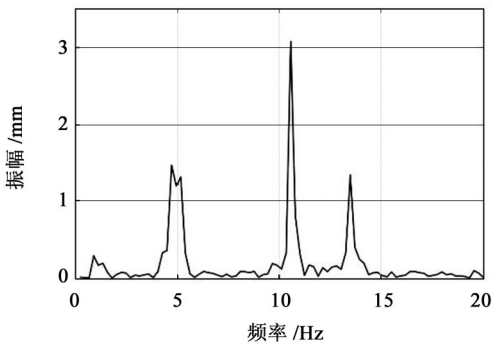


图 7 理想模型激振位置的频率响应曲线

Fig. 7 Frequency response curve of ideal model excitation position

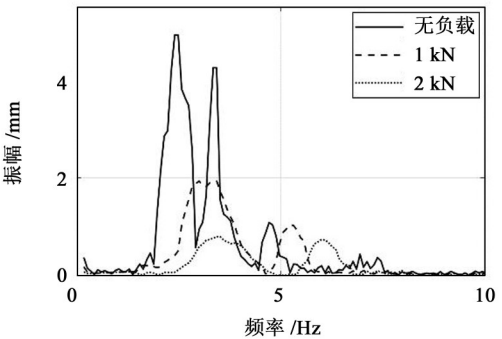


图 8 3 种状态下含间隙模型激振位置的频率响应曲线

Fig. 8 Frequency response curves of the excitation positions of the clearance model under the three states

3.2 模态仿真

为获得机器人固有频率对应的模态振型，对机器人结构进行模态仿真。选用 Workbench 对机器人理想模型进行仿真计算，得到机器人前 3 阶模态振型与固有频率，仿真结果如表 4 所示。

表4 模态仿真结果

Tab. 4 Modal simulation results

	1阶	2阶	3阶
固有频率/Hz	6.743	6.747	12.809
模态振型	沿X轴方向摇摆	沿Y轴方向摇摆	绕Z轴扭转

机器人的模态特征表现为：机器人足端与电动缸铰接处形变明显，机器人机架在XY面有弯曲，致使

机器人出现振动现象。具体的模态振型如图9所示。

机器人1阶与2阶振型表现为机器人平台在XOY面内都有弯曲与摇摆振动。不同的是，1阶振型时，足支架在XOY面沿X轴方向的摇摆振动；2阶振型时，足支架在XOY面沿Y轴方向的摇摆振动；3阶振型表现为机器人平台与足支架绕Z轴的扭转振动。

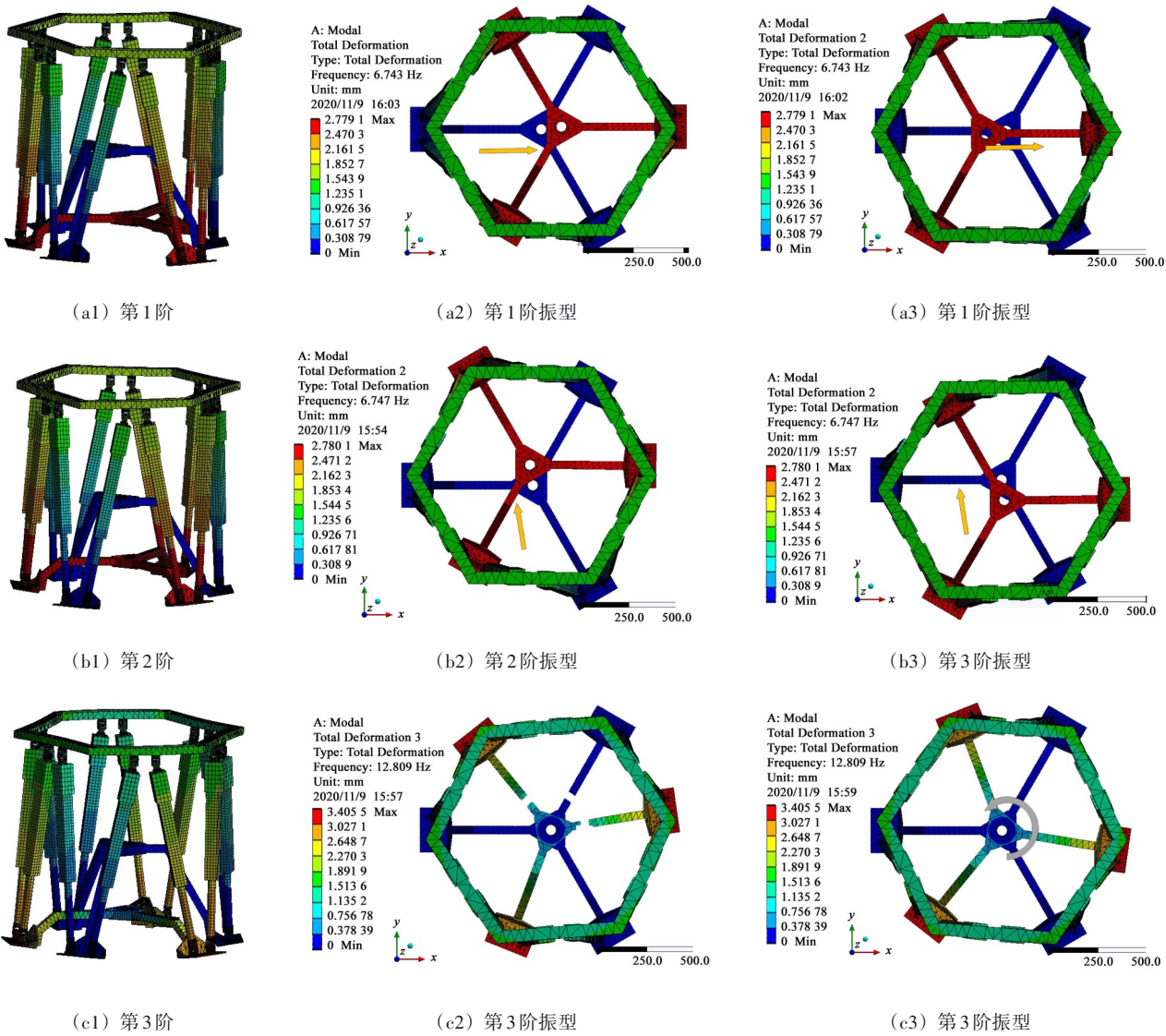


图9 机器人前3阶模态振型图

Fig. 9 Diagram of the first three modes of the robot

3.3 仿真结果分析

在瞬态动力学仿真中，理想模型与无负载含间隙模型的前3阶固有频率分别为4.719 Hz、5.169 Hz、10.56 Hz与2.487 Hz、3.345 Hz、4.717 Hz。说明由于间隙的存在导致一部分构件并没有被完全约束，产生了局部自由度，降低了机器人的整体刚度，进而降低了整体结构的固有频率。

并且，当给含间隙模型分别施加1 000 N与

2 000 N的稳态负载时，含间隙模型的1阶固有频率会由无负载时的2.487 Hz分别提升至3.002 Hz与3.537 Hz，3阶固有频率会由4.717 Hz分别提升至5.323 Hz与6.003 Hz。固有频率会随着载荷的增大而增大，说明在大间隙情况下，载荷越大，孔、轴越能充分接触，即会保持较长的接触状态，导致接触刚度大，使得整体固有频率相对低载荷较高。反之，载荷越小，固有频率相对大载荷时的固有频率越低。

同时,根据文献[13]³⁹可知,随着负载的增大,接触会趋于稳态,使得固有频率的增大会趋于一个稳定值,并且稳定值接近无间隙结构固有频率的数值。而在本文中,机器人仅有一条腿进行约束,另一条腿自由,使得另一条腿的接触刚度较小,整体固有频率较低。随着负载的增加,最终的稳定值3.537 Hz与无间隙结构的数值4.719 Hz相差较大,使得机器人无法通过增加负载而进一步提高自身的固有频率。

此外,载荷的大小在影响固有频率大小的同时,可能会使得某阶的固有频率不明显。由图8中可知,在2 000 N的载荷下,前两阶仅有1个单峰。可能的原因有载荷导致2阶固有频率不明显,也可能由于机器人结构中心对称,前两阶模态为重根模态,即前两阶固有频率相同。

在模态仿真中,理想模型的前3阶模态振型与实际机器人振型基本相似,说明关节间隙并不会影响模态振型。机器人采用中心对称结构,前两阶固有频率几乎相等,且模态振型正交,故前两阶为重根模态。另外,图9中的(a1)、(b1)和(c1)显示关节间隙处出现滑移,且机器人机架出现弯曲振动,使得机器人振动的幅值增大。

3.4 振动处理方法分析

目前,处理含有间隙机构的机械振动的方法有3种^[19]:①通过更换更高精度零件实现减小间隙,提高固有频率;部分机械结构可以增加配重或负载,使得含间隙机构的接触更加稳定,进而提高固有频率;②通过优化控制器抑制机械振动;③采用数字滤波器直接消除机械振动峰值。以上3种方法中,方法②需要对现有的控制器进行改造,虽然可以从整体上达到较好的控制效果,但控制器设计过程较复杂。方法①与方法③最直接,但方法①需要更换高精度零件使得成本上涨,花费的时间成本相对较多。在方法③中,应用数字滤波器来抑制机械振动是工程上较为常用的方法,其方法相对简单且容易实现。本文中通过Matlab仿真,对所产生的信号采用陷波滤波器进行处理,如图10所示,经过陷波滤波器滤波后,振幅有所下降。

机器人采用的ASDA-A2伺服驱动器中内置两组低频抑振滤波器,通过修改驱动器抑振频率后发现:相对于之前采用模态分析得到的固有频率作为抑振频率,采用瞬态分析得到的结果作为抑振频率,能够使得机器人受到外部激励后振动逐渐减小最终消失,而不是振动幅度越来越大,但无法抑制在行走过程中的振动。

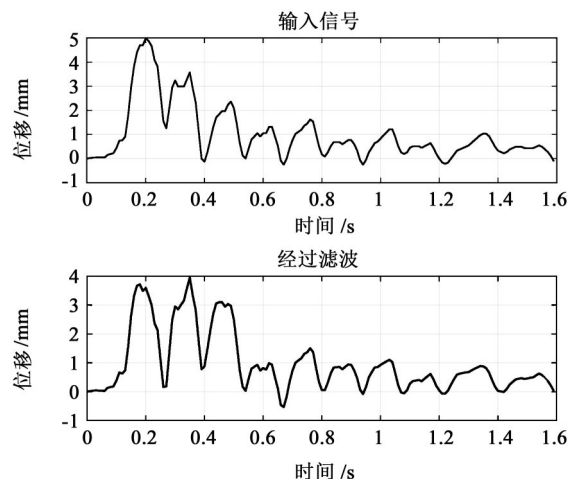


图10 经过滤波后的位移曲线变化图

Fig. 10 After filtering the displacement curve changes

4 结论

针对含间隙并联腿步行机器人发生振动,进行了机器人结构的固有频率与振型分析。分别采用两种方法,先对机器人理想模型进行模态分析及瞬态动力学分析,再对机器人含间隙模型进行瞬态动力学分析,结论如下:

(1) 机器人关节间隙的存在导致机器人关节处产生局部自由度,降低了机器人整体刚度,进而使得机器人整体固有频率下降。

(2) 当给机器人竖直方向施加稳态载荷时,可以增加机器人的接触刚度,使得机器人整体固有频率上升。瞬态动力学仿真时,负载可能会使得某一阶固有频率不明显,但也可能是重根模态导致,需要具体结构具体分析。

(3) 采用数字滤波器的方法能够减小机器人因含有间隙产生的振动,当伺服驱动器采用模态分析所得固有频率作为抑振频率时,机器人振动无变化。采用瞬态分析所得固有频率时,机器人外部激励消失时,振动能缓慢较小直至消失。

参 考 文 献

- [1] 赵德胜,袁立行,吴荣军.考虑摩擦的含S副间隙6-SPS机构动力学分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2017,45(6):79-84.
ZHAO Desheng, YUAN Lixing, WU Rongjun. Dynamic analysis of 6-SPS mechanism with S pair clearance considering friction [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(6): 79-84.
- [2] 李艳清,江俊.含间隙弹簧振动系统的非线性模态特性[J].动力学与控制学报,2015,13(1):28-36.
LI Yanqing, JIANG Jun. Nonlinear modal characteristics of spring vi-

- bration system with clearance[J]. Journal of Dynamics and Control, 2015, 13(1): 28-36.
- [3] 林炜彦, 刘文光, 颜龙, 等. 螺栓与孔间隙对单搭单螺栓连接板模态频率的影响[J]. 工程设计学报, 2017, 24(4): 418-424.
LIN Weiyan, LIU Wenguang, YAN Long, et al. Effect of bolt and hole clearance on modal frequency of single-lap single-bolt connecting plate[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2017, 24(4): 418-424.
- [4] 王旭鹏, 刘更, 马尚君, 等. 含间隙铰链空间对称展开机构动态特性研究[J]. 机械传动, 2019, 43(8): 12-17.
WANG Xupeng, LIU Geng, MA Shangjun, et al. Research on dynamic characteristics of spatially symmetric unfolding mechanism with clearance hinges[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(8): 12-17.
- [5] 肖世富, 陈滨, 杜强, 等. 一类含间隙结构振动特性分析[J]. 动力学与控制学报, 2003(1): 35-40.
XIAO Shifu, CHEN Bin, DU Qiang, et al. Analysis of vibration characteristics of a class of structures with clearance[J]. Journal of Dynamics and Control, 2003(1): 35-40.
- [6] 李智芳, 李晓东, 刘凡. 具有间隙非线性影响的外挂物的模态试验研究[J]. 化工管理, 2017(18): 37-38.
LI Zhilao, LI Xiaodong, LIU Fan. Modal experimental study on plug-ins with nonlinear effect of clearance[J]. Chemical Industry Management, 2017(18): 37-38.
- [7] 唐俊杰, 晏紫琦, 蔡敢为, 等. 含间隙可控式码垛机器人强度与模态分析[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(4): 11-14.
TANG Junjie, YAN Ziqi, CAI Ganwei, et al. Strength and modal analysis of a pallet-stacking robot with clearance control[J]. Mechanical Design and Research, 2019, 35(4): 11-14.
- [8] 张梁, 张方, 秦远田, 等. 双立柱式堆垛机碰撞振动与仿真分析[J]. 振动. 测试与诊断, 2018, 38(6): 1143-1147.
ZHANG Liang, ZHANG Fang, QIN Yuantian, et al. Impact vibration and simulation analysis of double column piler[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6): 1143-1147.
- [9] 张力. 模态分析与实验[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 10-11.
ZHANG Li. Modal analysis and experiments[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 10-11.
- [10] SUNG J, BAE D K, KIM W H, et al. Nonlinear aeroelastic analysis of a deployable missile control fin[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2004, 41(2): 264-271.
- [11] KIM D K, BAE J S, LEE I, et al. Dynamic model establishment of a deployable missile control fin with nonlinear hinge[J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 2005, 42(1): 66-77.
- [12] 王强, 马志赛, 张欣, 等. 基于模态综合法的含间隙折叠舵面动态特性分析[J]. 航空学报, 2020, 41(5): 202-210.
WANG Qiang, MA Zhisai, ZHANG Xin, et al. Analysis of dynamic characteristics of a folded rudder with clearance based on modal synthesis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(5): 202-210.
- [13] 潘浩, 王慧, 吴洋洲. 常平座轴承与十字轴间隙对整机固有频率的影响分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(2): 35-39.
PAN Hao, WANG Hui, Wu Yangzhou. Analysis on the influence of the clearance between the normal seat bearing and the cross-shaft on the natural frequency of the whole machine[J]. Missiles and Space Vehicles, 2017(2): 35-39.
- [14] 段学超, 仇原鹰, 段宝岩. 大射电望远镜精调 Stewart 平台并联机器人伺服带宽分析[J]. 中国机械工程, 2005(3): 59-62.
DAUN Xuechao, QIU Yuanying, DUAN Baoyan. Analysis of servo bandwidth of Stewart platform parallel robot with fine adjustment for large radio telescope[J]. China Mechanical Engineering, 2005(3): 59-62.
- [15] TSAI M J, LAI T H. Kinematic sensitivity analysis of linkage with joint clearance based on transmission quality[J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(11): 1189-1206.
- [16] DUBOWSKY S, NORRIS M, ALONI E, et al. An analytical and experimental study of the prediction of impacts in planar mechanical systems with clearances[J]. Journal of Mechanism, Transmissions, and Automation in Design, 1984, 10(4): 444-451.
- [17] TOWNSEND M A, MANSOUR W M. A pendulating model for mechanisms with clearances in the revolute[J]. Journal of Engineering for Industry, 1975, 97(1): 354-358.
- [18] LI J, WANG Y, ZHANG K, et al. Design and analysis of demolition robot arm based on finite element method[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(6): 1-9.
- [19] 张士涛, 张葆, 李贤涛, 等. 基于结构滤波器的伺服系统谐振抑制[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1811-1818.
ZHANG Shitao, ZHANG Bao, LI Xiantao, et al. Resonance suppression of servo system based on structured filter[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(8): 1811-1818.

收稿日期: 2021-01-01 修回日期: 2021-03-10

基金项目: 国防基础科研计划资助(JCKY2019411B001)

露泉创新基金(LQ2020-01)

作者简介: 苏成志(1977—), 男, 吉林桦甸人, 博士, 教授; 研究方向为智能机器人及装备。

通信作者: 王京华(1980—), 男, 吉林榆树人, 博士, 讲师; 研究方向为移动机器人与智能控制。