

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.05.008

4 足机器人多步态规划与仿真

宋旺达, 倪受东, 马冬

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏南京 211816)

摘要:为了实现一种前膝后肘式4足机器人多步态稳定行走,课题组采用D-H法对机器人进行运动学建模,求解了其运动学正解和逆解。规划了不同步态的足端轨迹和质心位置,分析了静步态和动步态下支撑相和摆动相切换序列,通过平滑关节角过渡的方法使机器人从静步态过渡到动步态。将MATLAB中规划好的关节轨迹作为ADAMS驱动输入,实现了3种步态下的连续仿真。分析了平地行走步态、越障步态和对角小跑步态下机器人运动特性。结果表明规划的3种步态有效可行,静步态和动步态衔接平滑,为驱动元件选型和步态参数优化提供了参考。

关键词:4足机器人;步态规划;D-H模型;静步态;动步态;MATLAB

中图分类号:TP242;TH113

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2020)05-0043-06

Gait Planning and Simulation of Quadruped Robot

SONG Wangda, NI Shoudong, MA Dong

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: In order to achieve a steady walking in various ways for a quadruped robot with a front knee and back elbow, the D-H method was used to model the robot kinematics, and the forward and inverse kinematic solutions were solved. The several foot trajectory and centroid position were planned, the switching sequence of standing phase and swing phase under static gait and dynamic gait were analyzed. The robot gait transition from static to dynamic was realized by a smoothing joint angle transition equation. The planned joint trajectory in MATLAB was used as the ADAMS driving input to realize continuous simulation under three gaits. The motion characteristics of the robot gait in the flat walking, obstacle crossing and trotting were analyzed. The results show that the three generated gaits are effective and feasible, and the static gait and dynamic gait are smoothly connected, which provides a basis for the selection of driving components and optimization of gait parameters.

Keywords: quadruped robot; gait planning; D-H model; static gait; dynamic gait; MATLAB

移动式机器人是近些年比较活跃的研究领域,其中足式行走机器人因其良好的环境适应性、抗干扰性越来越受到科研人员的重视。最具代表性的为波士顿动力公司研发的BigDog系列4足机器人,其机身搭载了运动控制系统,可以检测机身姿态及地形环境,通过调整机身质心等参数获得稳定的姿态,并结合实时的运动规划,能够在复杂的非结构环境行走^[1]。

运动学分析、步态规划是机器人合理、平稳运动的前提,结合计算机仿真技术,能有效验证运动学建模及步态规划合理性^[2-5],Atique等^[6]通过对一种8自由

度4足机器人的DH运动学建模和逆运动学求解,开发了一种带有避障功能的4足样机。Alain等^[7]通过运动学分析一种4足机器人结构的奇异点,在实际步态规划时避免了奇异点参数。Park等^[8]提出了一种带有冗余自由度的四足机器人静步态行走条件下的质心轨迹规划算法,可以通过最小的移动使质心落在稳定区域。

国内学者也相继投入了大量研究,罗红艳等^[9]规划了平地行走步态和对角小跑步态,以及2种步态之间的切换。邢伯阳等^[10]通过实时规划零力矩点(zero

收稿日期:2020-05-10;修回日期:2020-07-20

基金项目:产学研联合创新资金一前瞻性联合研究项目:人机共融型机器人力控制关键技术研究(BY2016005-05)。

第一作者简介:宋旺达(1994),男,江苏盐城人,硕士,主要研究方向为机器人技术。E-mail:401719199@qq.com

moment point, ZMP) 的方式提高了机器人行进过程中的稳定性和自适应性, 在步态规划中通过调整侧摆使质心投影始终在目标范围内。徐海东等^[11]通过调节中枢模式发生器(central pattern generators, CPG) 中的参数, 实现不同步态的平滑切换, 并通过 MATLAB 和 ADAMS 联合仿真验证了有效性。韩宝玲等^[12]提出了通过优化步高和步长参数的方法提高了 4 足机器人的行走稳定性。

课题组根据一种前膝后肘式 4 足机器人的结构, 基于 DH 坐标建立机器人的运动学模型, 结合腿部的工作空间, 规划了 4 足机器人平地行走、越障和对角小跑步态, 通过平滑过渡关节角的方法, 实现静步态结束后过渡到对角小跑步态。以运动学逆解得到的各关节角作为 ADAMS 动力学仿真输入, 实现多种步态的连续仿真, 验证了步态规划有效可行。分析了不同步态参数时机器人质心位移与关节力矩的特性, 为机器人驱动元件选型及步态参数优化提供了依据。

1 运动学建模

课题组设计的一种前膝后肘式 4 足机器人结构如图 1 所示, 单腿有 1 个侧摆运动、2 个俯仰运动, 4 条腿对称分布, 整机共有 12 个自由度, 机身质量为 150 kg。

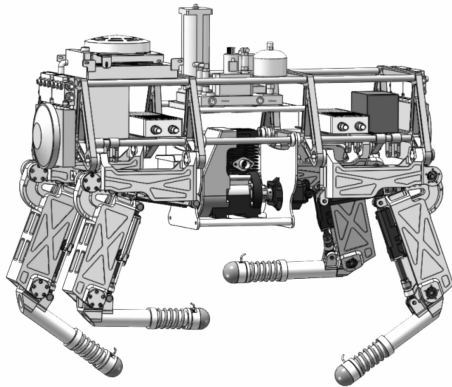


图 1 4 足机器人结构

Figure 1 Structure of quadruped robot

单腿连杆 L_1, L_2 和 L_3 长度分别为 64, 355 和 383 mm, 图 2 所示为建立的 D-H 坐标系, 其单腿为 RPP 型连杆结构, 其连杆 DH 参数如表 1 所示。

表 1 单腿连杆 DH 参数

Table 1 DH parameters of single leg linkage

i	$\alpha_i / (^\circ)$	a_i / mm	d_i / mm	$\theta_i / (^\circ)$
1	90	L_1	0	θ_1
2	0	L_2	0	θ_2
3	0	L_3	0	θ_3

求得 4 足机器人单腿运动学正解:

$$\left. \begin{aligned} p_x &= c_1(L_3 c_{23} + L_2 c_2 + L_1); \\ p_y &= s_1(L_3 c_{23} + L_2 c_2 + L_1); \\ p_z &= L_3 c_{23} + L_2 c_2. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

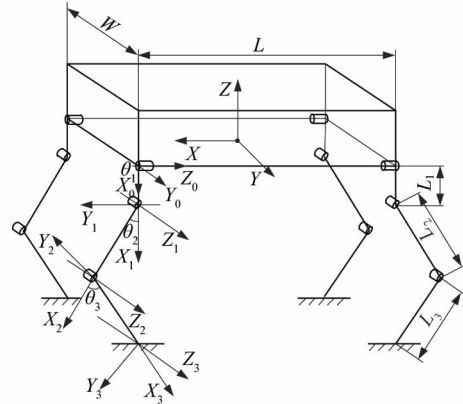


图 2 4 足机器人 DH 坐标系

Figure 2 DH coordinate of quadruped robot

运动学逆解是实现步态规划的基础, 根据求得各关节角作为机器人的位置驱动。这里运用解析法求机器人运动学逆解^[13], 经过一系列矩阵运算和变量代换得到的逆运动学结果如下:

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \arctan \left(\frac{p_y}{p_x} \right); \\ \theta_2 &= \arccos \left(\frac{L_3 s_3}{\sqrt{(c_1 p_x + s_1 p_y - L_1)^2 + p_z^2}} \right) - \\ &\quad \arccos \left(\frac{p_z}{\sqrt{(c_1 p_x + s_1 p_y - L_1)^2 + p_z^2}} \right); \\ \theta_3 &= -\arccos \left[\frac{(c_1 p_x + s_1 p_y - L_1)^2 + p_z^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2 L_3} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

2 步态规划

在平地行走步态下, 单腿摆动相时间周期相同, 4 条单腿支撑相和摆动相切换有序进行。足端轨迹规划采用复合摆线的方式, 摆动相切换到支撑相时轨迹平滑, 接触点速度和加速度为零, 能够有效减少足端与地面接触时的冲击, 避免了机器人产生滑动以及机身失稳。足端轨迹的复合摆线方程为:

$$\left. \begin{aligned} x &= \lambda \left[\frac{t}{T_{sw}} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(2\pi \frac{t}{T_{sw}} \right) \right]; \\ y &= h \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \left(2\pi \frac{t}{T_{sw}} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: λ 为步幅; h 为轨迹高度; T_{sw} 为单腿的摆动相周期。

静态稳定判定条件是在机器人运动过程的任意时刻,机器人质心投影在支撑脚踏足点形成的多边形内。静态稳定裕度为质心的位置与支撑多边形边最短的距离,对于4足机器人平地行走步态,有3个支撑落足点,其静态稳定裕度^[14-15]为:

$$m = \min \{m_1, m_2, m_3\}。 \quad (4)$$

在静态步态质心位置规划时,稳定裕度越大越有利于机器人的平稳运动。如图3所示,在摆动相从左腿切换到右腿时,机器人质心在地面投影位置从 G_0 调整到 G_1 , s 表示质心位置变化在 Y 方向上的距离, L, W 分别表示初始姿态落足点的长度和宽度, m_1, m_2 和 m_3 分别表示质心在支撑相的边界的投影距离, l 和 h 分别表示步长和步高。平地行走步态下摆动相与支撑相交替,支撑相为机器人提供动力,推动机器人行进。为了提高稳定性和减少调整姿态的时间,质心位置在 $T/2$ 时调整一次。

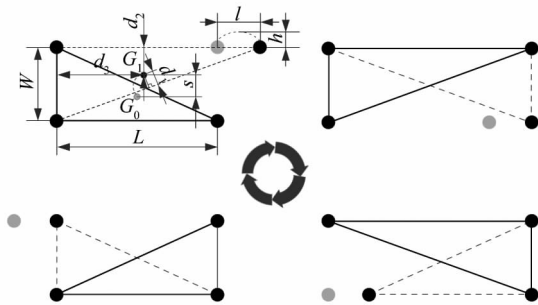


图3 质心位置和步态规划时序图
Figure 3 Sequence diagram of centroid position and gait planning

在越障时,依然采用静步态行走方式,在越障时摆动相持续时间较长,即机身先运动到规划好的位置,然后抬高腿部,使单腿工作空间避开障碍物,实现越障。同时调整质心位置以保障整体机身的平稳性,使4条腿连续越过障碍物。足端的轨迹点采用5次多项式插值的方法,分3段轨迹越过障碍。第一段多项式插值末端点选择为障碍物的正上方,并作为下一段的起点。已知一端轨迹的始末位置、始末时间,并且始末速度、

加速度为零,则可以得到下式:

$$\left. \begin{aligned} S_0 &= at_0^5 + bt_0^4 + ct_0^3 + dt_0^2 + et_0 + f; \\ 0 &= 5at_0^4 + 4bt_0^3 + 3ct_0^2 + 2dt_0 + e; \\ 0 &= 20at_0^3 + 12bt_0^2 + 6ct_0 + 2d; \\ S_1 &= at_1^5 + bt_1^4 + ct_1^3 + dt_1^2 + et_1 + f; \\ 0 &= 5at_1^4 + 4bt_1^3 + 3ct_1^2 + 2dt_1 + e; \\ 0 &= 20at_1^3 + 12bt_1^2 + 6ct_1 + 2d. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: S_0 初始位置; S_1 为终点位置; t_0 为初始时间; t_1 为结束时间; a, b, c, d, e 和 f 为5次多项式系数。

将 x, y, z 方向上的插值点合成,得到单腿空间越障轨迹。

在对角小跑步态下,为了实现机器人快速稳定的直线运动,对角腿交替摆动,且髋关节需保持初始角度,如图4所示,规划的质心轨迹在对角支撑相的移动下沿直线移动,且移动距离与摆动相步长相同。

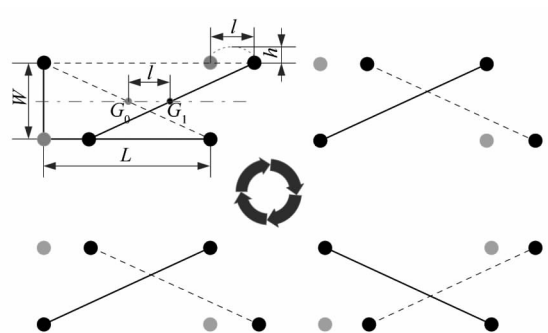


图4 质心位置和步态规划时序图
Figure 4 Sequence diagram of centroid position and gait planning

根据支撑相周期 T_{st} 和摆动相周期 T_{sw} 在1个步态周期 T 中所占的时间分为静态步态和动态步态,其中支撑相和摆动相有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} T_{st} &= \beta T; \\ T_{sw} &= (1 - \beta) T. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

当 $0 < \beta < 0.75$ 时,机器人步态为动态; $0.75 < \beta < 1.00$ 时为静态步态。表2所示为各阶段下步态参数。

表2 不同阶段的步态参数

Table 2 Gait parameters at different stages

步态	初始落足长度 L/mm	初始落足宽度 W/mm	步长 l/mm	步高 h/mm	质心偏移 s/mm	占空比 β	步态周期 T/s
平地行走	1 000	500	250	50	333	5/6	6
越障	1 200	500	200	330	333	4/5	15
对角小跑	1 000	500	56	30	0	1/2	2

3 步态平滑过渡

在越障步态结束后机体姿态需向对角小跑步态的初始姿态调整,直接采用关节角线性过渡会使质心在 x, y, z 方向上变化产生加速度,导致机身不稳定。这里采用复合曲线插值法,对 12 个关节角分别进行关节空间的轨迹规划,实现机器人由静步态向动步态的平稳切换。初始关节角和目标关节角有如下关系:

$$q_i = At + B\sin(\omega t + \varphi) + C + q_{i_0} \quad (7)$$

式中: A, B, C 为常量,可结合实际关节角求得。

设定从越障步态结束到对角小跑初始姿态调整完成所花费时间 t_1 为 2 s, t_0 和 t_1 时刻对应初始位置 q_{i_0} 和末端位置 q_{i_1} , 并且其末端位置关节速度和加速度为零, 则可以得到如下约束条件:

$$\left. \begin{aligned} AC\sin \varphi + k &= 0; \\ 2AB + AC\sin(2\omega + \varphi) + k + q_{i_0} &= q_{i_1}; \\ AB + AC\omega\cos(2\omega + \varphi) &= 0; \\ -AC\omega^2\sin \varphi &= 0; \\ -AC\omega^2\sin(2\omega + \varphi) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

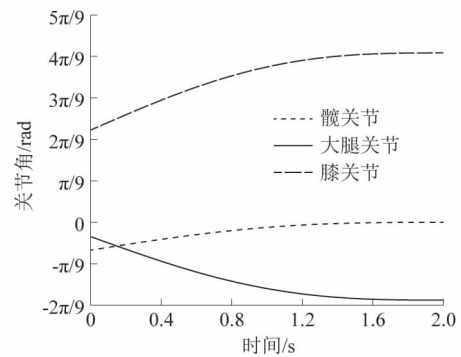
则各关节的平滑过渡曲线为

$$q_i = \frac{q_{i_1} - q_{i_0}}{2}t - \frac{q_{i_1} - q_{i_0}}{\pi}\sin\frac{\pi t}{2} + q_{i_0} \quad (9)$$

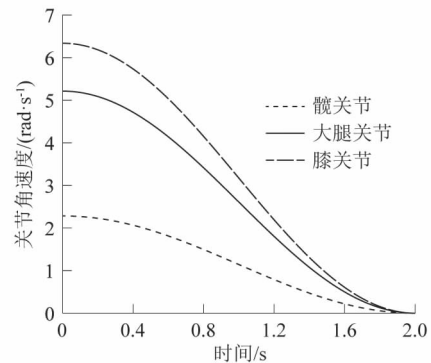
这里取左前腿为例,在越障步态结束后,其 D-H 坐标系下的各关节角为 $[q_1 \quad q_2 \quad q_3] = [-13.4 \quad -6.90 \quad 44.5]$, 需要平稳切换到 $[q_1^* \quad q_2^* \quad q_3^*] = [0 \quad -37.5 \quad 81.7]$, 其关节角位置、速度和角加速度如图 5 所示。从图中可以看出,调整阶段关节角连续平滑,始末角加速度为零,可实现机器人姿态平稳调整。

4 仿真分析

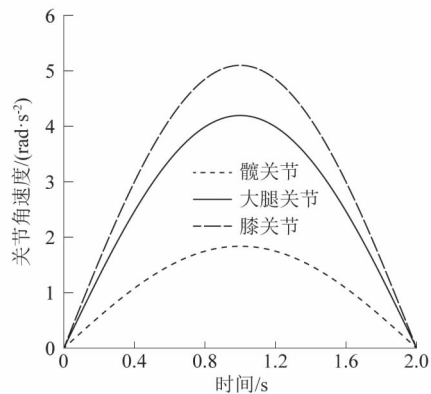
在 MATLAB 中规划好质心轨迹和足端轨迹,将逆运动学计算得到的关节角导入 ADAMS 软件中,作为运动控制驱动,并设置好约束、驱动函数以及接触力等参数进行机器人的动力学仿真。仿真时间共有 146 s, 图 6 所示为截取的每个步态的 4 帧仿真画面,在 0 ~ 60 s 内为平地行走步态,60 ~ 120 s 内为越障步态,120 ~ 146 s 内为对角小跑步态。3 种步态下,足端与地面接触良好,总体行走平稳。这里取左前腿为例,单腿各关节角如图 7 所示,可以看出,单腿各关节角度轨迹平滑,在越障阶段单腿抬高,关节角范围合理。在对角小跑阶段,步长、步高和周期都有所减小,反应在关节角上为幅值减少,频率增大,整体摆动迅速,满足步态要求。总体髋关节角度范围为 $[43^\circ, 102^\circ]$, 大腿关节角度范围为 $[78^\circ, 146^\circ]$, 膝关节角度为 $[104^\circ, 178^\circ]$ 。关节角的运动范围为驱动元件选型提供了依据。



(a) 关节位置曲线



(b) 关节速度曲线



(c) 关节加速度曲线

图 5 关节角平滑过渡曲线

Figure 5 Smooth transition curve of joint angle

在 ADAMS 后处理模块可查看机体质心在 x, y, z 方向上的位移。如图 8 所示, x 方向反应机器人行走位移,在平地行走和越障步态下机器人行走速度平缓,约为 0.12 km/h,无明显向后位移,说明足端触地无打滑现象。在对角小跑步态下移动速度为 0.80 km/h,比规划的速度要小,从质心 x 方向位移的上下浮动可以看出,机器人的移动速度越快,足端打滑的现象越明显,减短了实际有效位移。因此,机器人在真实环境下对角小跑时,应选用摩擦因数大的足端材料和合适的路面环境。

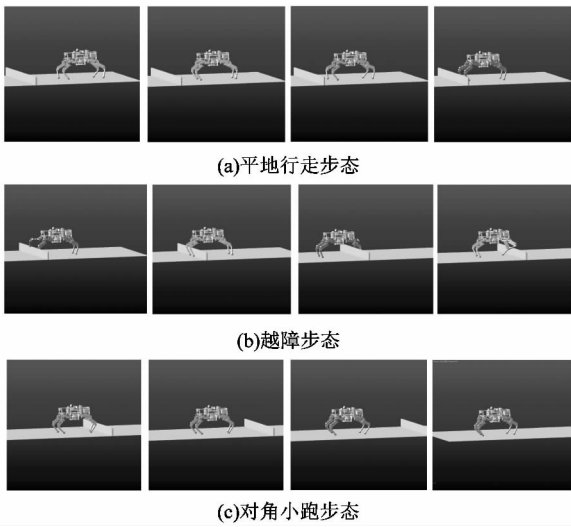


图6 仿真交互界面

Figure 6 Simulation interface

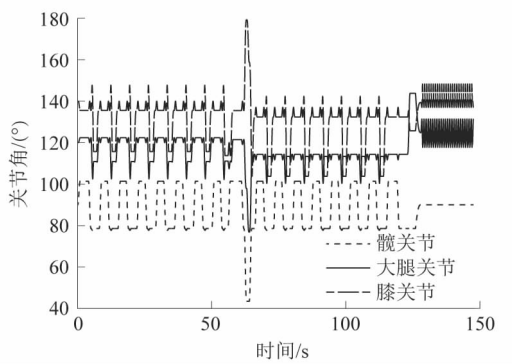


图7 左前腿各关节角

Figure 7 Joint angles of single leg

质心在 y 方向的位移反应机器人的侧向偏摆距离,在 2 种静步态下,偏摆最大值约为 330 mm,与规划的距离一致。同时可以看出在越障姿态调整和静动步态过渡阶段,曲线平滑,与实际姿态平稳切换相符。在对角小跑步态下, y 方向的位移幅值虽然有所减少,但与规划的质心直线运动不符,说明机器人在对角小跑步态下,支撑相对角切换导致机器人的质心反复横移,且机器人运动逐渐偏离了直线。分析产生这种现象的原因是由于机器人模型的质心位置未处于机身对称中线上,因此在实际工作中,需调整机器人质心位置和优化关键步态参数以实现机器人的稳定对角小跑步态。

质心 z 方向的位移反应机身距离地面的高度变化,在直立的初始姿态下,机器人的质心高度为 0.702 m,平地行走步态下前后落足点长度 L 为 1 m,随着侧摆运动,质心高度可下降到 0.688 m,越障步态下前后落足点长度为 1.2 m,机器人直立高度减少到 0.705

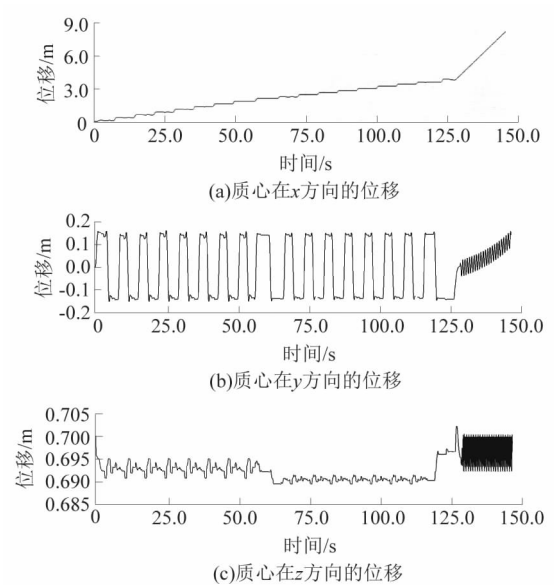


图8 质心在3个方向的位移

Figure 8 Displacement of centroid in three directions

m,并且在侧摆运动下,质心位置下降到 0.687m。在越障步态结束后,机器人平缓调整至初始姿态高度。可以看出在对角小跑步态阶段,机器人运动高度大于支撑相触地时整机高度,约超出 0.03 m,说明机器人在对角小跑步态下,支撑相和摆动相切换时有腾空状态。因此,在真实环境下,机器人运动控制需考虑腾空状态对机身平稳性的影响。

为了验证结构强度和驱动性能满足步态的要求,需要对机器人进行动力学仿真分析。图9所示为单腿膝关节的力矩曲线,在单腿处于支撑相时,机器人膝关节力矩

$$T_{\text{knee}} = T_{\text{ground}} - T_{\text{body}} \quad (10)$$

式中: T_{ground} 为足端与地面接触时膝关节的逆时针方向力矩,即受到地面的冲击产生的被动力矩; T_{body} 为膝关节支撑机身质量的顺时针方向力矩,此时力矩为支撑机器人机身所需的主动力矩。

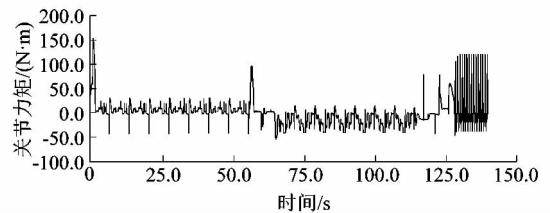


图9 单腿膝关节力矩曲线

Figure 9 Moment curve of single leg knee joint

从图9中可以看出当关节力矩为正时,此时膝关

节与地面冲击产生的力矩大于支撑机身所需的力矩,在平地行走步态阶段,足端所受冲击大于越障阶段,在步态调整阶段会有稍大冲击峰值,此时由于髌关节与地面高度小于规划足端与目标地面的距离而产生冲击。在对角小跑步态阶段,被动冲击产生的转矩达到 $120 \text{ N} \cdot \text{m}$,可以看出步态周期越短,单腿摆动越迅速,与地面产生的冲击越明显。在所有步态中,单腿膝关节力矩在合理的范围内,转矩的突变点均发生在落地阶段,并且数值合理,符合结构设计强度。主动力矩小于 $50 \text{ N} \cdot \text{m}$,满足驱动元件性能。

4 结论

课题组为实现一种前膝后肘 4 足机器人的多步态行走,首先基于 D-H 坐标建立了机器人运动学模型,利用分段 5 次多项式插值规划的足端轨迹连续平滑,逆运动学求解了关节角范围合理。其次在仿真及试验中验证了步态规划合理,机器人运动平稳,实现平地行走、越障和对角小跑步态。仿真得到的关节角度范围和关节转矩为液压作动器的选型提供了依据。最后分析了不同步态下机器人的运动特性,其中足端轨迹和步态参数的优化一直是足式机器人的研究方向。通过动力学仿真及分析,为真实环境下机器人运动步态参数的优化提供了依据。文中的机器人腿部结构、质心位置、足端材料及足端与地面的接触方式等都会影响机器人的运动性能,相关的研究仍需进一步开展。

参考文献:

[1] 丁良宏. BigDog 四足机器人关键技术分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(7): 2.

(上接第 42 页)

最大点集中在传动轴中部,因此中部为振动易破坏部位,是传动轴的薄弱环节。当外界激振频率和表 2 中所述频率接近时,可能产生共振现象,造成零件损坏;可通过调整零件参数优化结构,控制传动轴在安全的固有频率范围内工作来防止共振,提高轴的寿命。

4 结语

课题组运用 UG 三维建模软件对机械手进行了建模,将模型导入 ANSYS Workbench 中,对关键部件机械爪进行了静应力分析,锁定了易变形和易受破坏的部位,得出了机械爪最优设计参数。课题组对传动轴进行了模态分析,求出了传动轴的 6 阶振型和固有频率。本研究为工件夹持机械手的关键部件设计提供了参考,为避免传动轴共振和减少零件损伤提供了依据。

参考文献:

[1] 吕达,贾锐. 自动工业机械手的现状研究及创新发展[J]. 山东工

业技术, 2017(12): 49.

[2] 张千伟,张龙. 仿生 4 足机器人结构与运动学分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(5): 74.

[3] 权震华. 4 足机器人步态生成算法研究与仿真[J]. 计算机仿真, 2014, 31(9): 397 - 401.

[4] 殷勇华,卞新高,陆卫丽. 液压驱动 4 足机器人步态规划和运动控制[J]. 机电工程, 2014, 31(7): 839 - 843.

[5] 刘明敏,徐方. 4 足机器人静步态连续行走策略[J]. 机械设计与制造, 2018(7): 263 - 265.

[6] ATIQUE M U, SARKER R I, AHAD A R. Development of an 8DOF quadruped robot and implementation of inverse kinematics using Denavit-Hartenberg convention[J]. Heliyon, 2018, 4(12): e01053.

[7] POTTS A S, DA CRUZ J J. Kinematics analysis of a quadruped robot [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(18): 261 - 266.

[8] PARK H, KWAK B, BAE J. Inverse kinematics analysis and COG trajectory planning algorithms for stable walking of a quadruped robot with redundant DOFs [J]. Journal of Bionic Engineering, 2018, 15(4): 610 - 622.

[9] 罗红艳,魏莉,李彰,等. 仿生四足机器人运动规划与步态转换[J]. 数字制造科学, 2018, 16(1): 9.

[10] 邢伯阳,潘峰,冯肖雪. 智能决策改进的四足机器人 ZMP 爬行步态算法[J/OL]. 计算机工程与应用; 5[2019-09-19].

[11] 徐海东,干苏,任杰,等. 基于 Hopf 振荡器的四足机器人步态 CPG 调节[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(12): 3092 - 3099.

[12] 韩宝玲,朱琛,罗庆生,等. 液压四足机器人关键步态参数优化[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(10): 1056 - 1060.

[13] 李鹏飞,伞红军,陈久朋,等. 基于封闭矢量法和 D-H 法的四足机器人逆运动学分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(4): 163.

[14] 张伏,郑莉敏,王唯,等. 足式机器人稳定性判据[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(2): 150 - 153.

[15] 周卫华. 四轮移动机器人运动各向相异性研究[J]. 机电工程, 2018, 35(6): 658 - 662.

业技术, 2017(12): 49.

[2] 文少波,徐金波. 基于 UG 和 ANSYS 的自行车房车车架分析[J]. 机械工程与自动化, 2019(4): 49 - 54.

[3] 冯亚斌,王飞雷,代海风,等. 基于 ANSYS 的浇口套冷却系统研究[J]. 轻工机械, 2019, 37(6): 77 - 81.

[4] 叶黎杰,金晓怡,谢腾骥. 基于 ANSYS 的抛光工业机器人抛光力研究[J]. 轻工机械, 2019, 37(5): 68 - 71.

[5] 董增雅,高谦,高国华,等. 柔性吞咽机械手的结构与样机试验[J]. 机电工程, 2018, 35(12): 1304 - 1309.

[6] 张驰,廖华丽,周军. 基于单目视觉的工业机器人智能抓取系统设计[J]. 机电工程, 2018, 35(3): 283 - 287.

[7] 王永岩,毕向阳,杜凤兰. 英汉双语有限元法电子教程[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 56.

[8] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 80.

[9] 李帅,王守城,胡秀秀. 基于 ANSYS Workbench 的插销式升降平台插销的分析[J]. 机械与电子, 2019(8): 42.

[10] 陈开源,李柏青,朱秀娟,等. 基于 ANSYS 的转轴模态分析[J]. 机械工程师, 2014(12): 196.