

# 奔跑四足机器人腿结构设计与分析

马宗利,刘永超,朱彦防,王建明

( 山东大学 高效洁净机械制造教育部重点实验室,山东 济南 250061 )

**摘 要:** 针对四足机器人奔跑运动对腿结构高缓冲性能的要求,基于动物狗前腿的骨骼-肌肉生物力学特性,设计了一种奔跑四足机器人的腿结构。该腿结构有3个关节,具有3个自由度,髋关节、膝关节具有主动的俯仰自由度,踝关节具有被动的俯仰自由度。对该腿结构进行了动力学分析和刚度特性分析,并对机器人进行了 bound 步态的仿真。仿真结果表明,该腿结构能够实现四足机器人快速、稳定地奔跑,关节驱动力矩较小,验证了该腿结构实现四足机器人 bound 步态奔跑的可行性和合理性。

**关 键 词:** 四足机器人;奔跑;腿结构;动力学分析;仿真

中图分类号: TP 242

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)09-1305-06

## Design and Analysis of Running Quadruped Robots' Leg Structure

MA Zong-li, LIU Yong-chao, ZHU Yan-fang, WANG Jian-ming

( Key Laboratory of High-Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China. Corresponding author: WANG Jian-ming, E-mail: zlm03@126.com )

**Abstract:** In order to meet the requirements of quadruped robots' leg structure with high cushion performance in running movements, a leg structure of running quadruped robots was designed, which was based on the bone-muscle biomechanical properties of dog forelegs. The leg structure has three joints and three DOFs. The hip joint and knee joint have active pitching-DOF, and the ankle joint has passive pitching-DOF. The dynamics and stiffness characteristics of the leg structure were analyzed, and the simulation of bound gait was done. The simulation results showed that a quadruped robot with this leg structure can run rapidly and stably while the joint drive torque is low. It was proven that this leg structure has the feasibility and rationality of making quadruped robots run in bound gait.

**Key words:** quadruped robot; running; leg structure; dynamics analysis; simulation

四足机器人以其高负载能力、高稳定性和良好的环境适应性等特点备受各国学者青睐,发展前景十分广阔。高速、高承载、低能耗、可野外工作的四足机器人是研究的热点<sup>[1]</sup>。目前国外典型的四足机器人代表是波士顿动力公司研发的 Bigdog<sup>[2-3]</sup>和 Cheetah<sup>[4-6]</sup>四足机器人。BigDog 采用高功率密度的液压驱动,依靠陀螺仪和加速度传感器等协助机载计算机规划机器人的每一步运动,随时调整机器人步伐和姿态以维持机器人身体的平衡。负载能力可达 150 kg,平地行走速度可达 7 km/h,也可在山坡上和雪地上行走<sup>[7]</sup>。

Cheetah 四足机器人在实验室平缓地面的奔跑速度可以达到 46 km/h。

国内的哈尔滨工业大学、山东大学、国防科技大学和北京理工大学等也在研究液压四足机器人,但大多在适应复杂地形、越障和行走速度方面还需要进一步提高。为了提高四足机器人的奔跑性能,本文设计了一种新型四足腿结构,对其进行动力学分析和刚度分析,并对这种新型奔跑四足机器人进行仿真分析。仿真结果验证了新型四足腿结构设计的合理性和有效性。

# 1 四足机器人腿结构设计

## 1.1 生物狗前腿骨骼 – 肌肉特性分析

生物狗的前腿肌肉骨骼生理解剖简图如图 1 所示<sup>[8]</sup>.

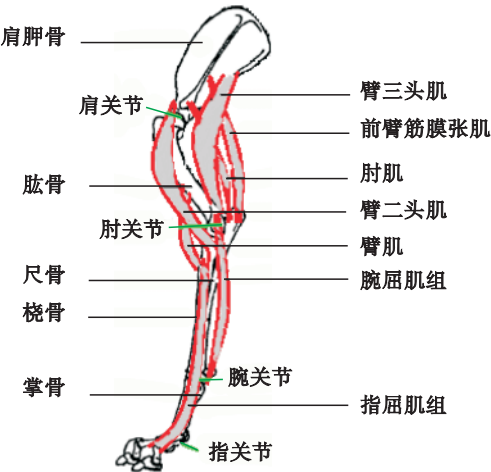


图 1 生物狗的前腿生理解剖简图  
Fig. 1 Schematic diagram of physiological anatomy for dog forelegs

狗的前腿主要由肩胛骨、肱骨、尺骨、桡骨和掌骨等组成. 狗的前腿关节主要包括肩关节、肘关节、腕关节和指关节. 作用于肘关节的肌肉有臂三头肌、前臂筋膜张肌、肘肌、臂二头肌和臂肌, 作用于腕关节的肌肉有腕屈肌组, 作用于指关节的肌肉主要有指屈肌组.

狗在行走或奔跑的过程中, 前腿的足落地时, 肘关节肌肉、腕关节肌肉和指关节肌肉被迫拉长, 缓冲地面反作用, 减小落地冲击, 同时存储能量以利于下一步行走或奔跑.

## 1.2 四足机器人腿结构

四足仿生机器人模型见图 2.4 条腿采用完全相同的关节配置形式<sup>[9]</sup>, 并以液压缸为驱动元件.

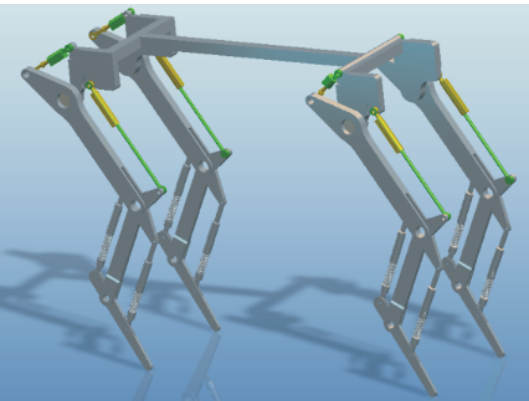


图 2 四足机器人模型  
Fig. 2 The model of quadruped robot

机器人的单腿结构模型如图 3 所示, 该腿结构有 3 个关节, 具有 3 个自由度. 髋关节、膝关节具有主动的俯仰自由度, 踝关节具有被动的俯仰自由度. 它由大腿  $AB$ 、小腿  $CBG$ 、跖骨杆  $FCD$ 、弹簧  $EF$  和弹簧  $GH$  以及各肢体间的髋关节  $A$ 、膝关节  $B$ 、踝关节  $C$  组成. 大腿的上端通过旋转副与躯体相连构成髋关节  $A$ , 大腿的下端通过旋转副与小腿的上端相连构成膝关节  $B$ , 小腿的下端与跖骨杆铰接在一起构成踝关节  $C$ , 跖骨杆的下端  $D$  则为接触地面的足端. 弹簧  $EF$  的一端连接大腿, 另一端连接跖骨杆; 弹簧  $GH$  的一端连接小腿的伸出端, 另一端连接跖骨杆. 奔跑时, 在足端冲击载荷的作用下, 弹簧  $EF$  被拉伸, 同时弹簧  $GH$  被压缩, 从而实现了对地面冲击能量的吸收.

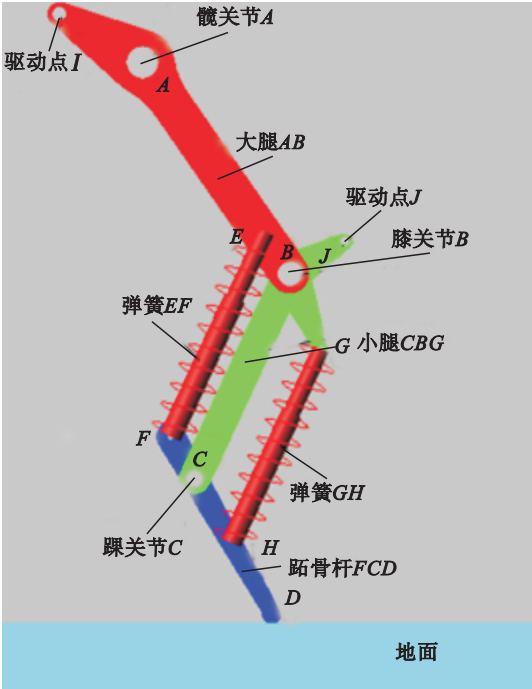


图 3 单腿结构模型  
Fig. 3 Single leg structure model

图 4 为机器人单腿的结构示意图. 各尺寸如下:  
 $\overline{AB} = l_1 = 320 \text{ mm}$   $\overline{BC} = l_2 = 280 \text{ mm}$  ,  
 $\overline{CD} = l_3 = 200 \text{ mm}$   $\overline{FC} = \overline{EB} = l_4 = 60 \text{ mm}$  ,  
 $\overline{CH} = \overline{BG} = l_5 = 90 \text{ mm}$  ,  $\angle CBG = \alpha = 60^\circ$ .  
其中  $\vartheta_1$  是大腿与水平面间的夹角;  $\vartheta_2$  是大腿延长线与小腿间的夹角;  $\vartheta_3$  是小腿延长线与跖骨杆间的夹角.

## 2 单腿刚度特性分析

在足端触地的过程中, 弹簧  $EF$  发生拉伸, 弹簧  $GH$  被压缩. 在忽略腿部质量的情况下, 支撑反

力  $Q$  是作用在腿结构上的唯一外力,因此可以将该腿结构等效为支撑反力不通过髌关节的“虚拟弹簧腿”<sup>[10]</sup>,如图 5 所示,进而研究该腿模型的力学性能和刚度性能.根据图 5,可以推导出力学特性模型如式(1)所示.

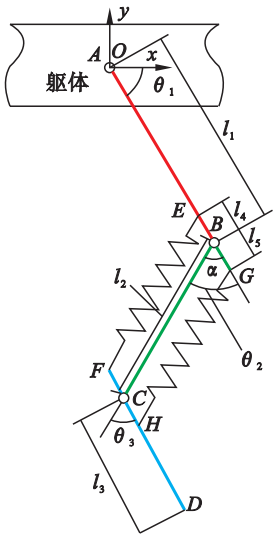


图 4 单腿结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of single leg structure

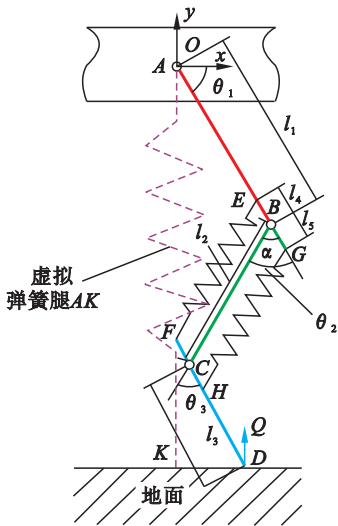


图 5 虚拟弹簧腿

Fig. 5 Virtual spring-leg

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \theta_{10} \quad \theta_2 = \theta_{20} \quad , \\ \Delta l &= \frac{\Delta y}{\cos \beta} \quad , \\ \theta_3 &= \arccos \left[ \frac{(l_{BD0} - \Delta l)^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \right] \quad , \\ M_1 &= -k(l_{EF} - a)l_{EC} \frac{l_4 \sin \angle ECF}{l_{EF}} \quad , \\ M_2 &= k(l_{GH} - a)l_{GC} \frac{l_5 \sin \angle GCH}{l_{GH}} \quad , \\ Q &= \frac{M_1 - M_2}{l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)} \quad . \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $\theta_{10}$   $\theta_{20}$  分别表示  $\theta_1$   $\theta_2$  在自由状态下的初始值; $l_{BD0}$  表示自由状态下  $l_{BD}$  的原长; $\Delta y$  表示虚拟弹簧在竖直方向上的压缩量; $\Delta l$  表示  $l_{BD}$  的变化量; $\beta$  表示  $\Delta l$  与  $\Delta y$  之间的夹角; $k$   $a$  分别为两弹簧的刚度和原长,取  $k = 6 \text{ N/mm}$  , $a = 280 \text{ mm}$  ; $M_1$   $M_2$  分别表示弹簧力  $F_{EF}$   $F_{GH}$  对踝关节的力矩.

根据力矩平衡原理求出足端接触力  $Q$ ,即虚拟弹簧腿的受力.虚拟弹簧腿的刚度为虚拟弹簧腿的受力与其压缩量之比.在髌关节、膝关节角度约束下,该虚拟弹簧腿的刚度特性如图 6 所示.图中曲线的斜率表示虚拟弹簧腿的刚度.从图 6 中可以看出,当  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$  时,虚拟弹簧腿刚度呈线性分布;在  $\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$  和  $\theta_1 = \theta_2 = 70^\circ$  约束下,虚拟弹簧腿的刚度呈非线性分布,即随着虚拟弹簧腿压缩量的增加,曲线的斜率逐渐减小,对应的虚拟弹簧腿刚度也逐渐减小.

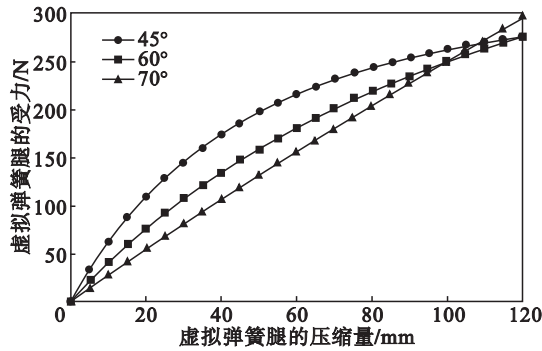


图 6 髌关节、膝关节角度约束下刚度特性

Fig. 6 Stiffness characteristics of the single leg under the constraints of the hip angle and knee angle

### 3 动力学分析

机器人在奔跑的过程中,触地阶段的动力学特性对机器人的整体性能影响很大,因此有必要对机器人在触地阶段的动力学进行分析.取髌关节  $A$  为坐标原点建立坐标系  $Oxy$ (见图 4),在此坐标系下基于 Lagrange 方程推导着地时的动力学方程.

大腿、小腿、跖骨杆的质量分别为  $m_1$   $m_2$  和  $m_3$ ,且以腿末端的点质量表示.弹簧质量忽略不计.

#### 3.1 系统的动能

$$K = K_1 + K_2 + K_3 =$$

$$\frac{1}{2}(m_1 + m_2 + m_3)\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}(m_2 + m_3)\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}m_3l_3^2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + (m_2 + m_3)l_1l_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) +$$

$$m_3 l_1 l_3 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) \chi_{23} + m_3 l_2 l_3 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) \chi_{33} \quad (2)$$

式中:  $K, K_1, K_2, K_3$  分别表示系统总动能、大腿、小腿和跖骨杆的动能;  $c_i$  表示  $\cos \theta_i$ ;  $c_{ij}$  表示  $\cos(\theta_i + \theta_j)$ 。

### 3.2 系统的势能

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 =$$

$$(m_1 + m_2 + m_3)gl_1 s_1 + (m_2 + m_3)gl_2 s_{12} + m_3 gl_3 s_{123} + \frac{1}{2}kl_{EF}(\theta_2 - \theta_3) - a)^2 + \frac{1}{2}kl_{GH}(\theta_3) - a)^2 \quad (3)$$

式中:  $E, E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$  分别表示系统总势能、大腿、小腿、跖骨杆、弹簧  $EF$  和弹簧  $GH$  的势能;  $s_i$  表示  $\sin \theta_i$ ;  $s_{ij}$  表示  $\sin(\theta_i + \theta_j)$ ;  $s_{ijk}$  表示  $\sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ ;

$$l_{EK}(\theta_2, \theta_3) = \left[ l_4^2 + l_{EC}^2 - 2l_4 l_{EC} c \left( \theta_3 + \arcsin \left( \frac{l_4 s_2}{l_{EC}} \right) \right) \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$l_{EC} = (l_2^2 + l_4^2 + 2l_2 l_4 c_2)^{\frac{1}{2}};$$

$$l_{GH}(\theta_3) = \left[ l_5^2 + l_{GC}^2 + 2l_5 l_{GC} c \left( \theta_3 + \arcsin \left( \frac{l_5 \sin \alpha}{l_{GC}} \right) \right) \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$l_{GC} = (l_2^2 + l_5^2 - 2l_2 l_5 \cos \alpha)^{\frac{1}{2}}.$$

### 3.3 系统的动力学方程

系统所受的外力只有重力和足端接触力,将式(2)和式(3)代入 Lagrange 方程(4),

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_i} + \frac{\partial E}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad (i=1, 2, \dots), \quad (4)$$

可求得髋关节、膝关节的驱动力矩分别为

$$\tau_1 = D_{11}\ddot{\theta}_1 + D_{12}\ddot{\theta}_2 + D_{13}\ddot{\theta}_3 + \gamma_{22}\dot{\theta}_2^2 + \gamma_{33}\dot{\theta}_3^2 + \gamma_{12}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \gamma_{13}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + \gamma_{23}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + (m_1 + m_2 + m_3)gl_1 c_1 + (m_2 + m_3)gl_2 c_{12} + m_3 gl_3 c_{123}, \quad (5)$$

$$\tau_2 = D_{21}\ddot{\theta}_1 + D_{22}\ddot{\theta}_2 + D_{23}\ddot{\theta}_3 + \chi_{11}\dot{\theta}_1^2 + \chi_{33}\dot{\theta}_3^2 + \chi_{13}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + \chi_{23}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + (m_2 + m_3)gl_2 c_{12} + m_3 gl_3 c_{123} + k(l_{EF} - a) \frac{\partial l_{EF}}{\partial \theta_2}. \quad (6)$$

其中:

$$D_{11} = (m_1 + m_2 + m_3)l_1^2 + (m_2 + m_3)l_2^2 + m_3 l_3^2 + 2(m_2 + m_3)l_1 l_2 c_2 + 2m_3 l_1 l_3 c_{23} + 2m_3 l_2 l_3 c_3;$$

$$D_{12} = (m_2 + m_3)l_2^2 + m_3 l_3^2 + (m_2 + m_3)l_1 l_2 c_2 + m_3 l_1 l_3 c_{23} + 2m_3 l_2 l_3 c_3;$$

$$D_{13} = m_3 l_3^2 + m_3 l_1 l_3 c_{23} + m_3 l_2 l_3 c_3;$$

$$\gamma_{22} = -[(m_2 + m_3)l_1 l_2 s_2 + m_3 l_1 l_3 s_{23}];$$

$$\gamma_{33} = -(m_3 l_2 l_3 s_3 + m_3 l_1 l_3 s_{23});$$

$$\gamma_{12} = -2[(m_2 + m_3)l_1 l_2 s_2 + m_3 l_1 l_3 s_{23}];$$

$$\gamma_{13} = -2(m_3 l_1 l_3 s_{23} + m_3 l_2 l_3 s_3);$$

$$\gamma_{23} = -2(m_3 l_1 l_3 s_{23} + m_3 l_2 l_3 s_3);$$

$$D_{21} = (m_2 + m_3)l_2^2 + m_3 l_3^2 + (m_2 + m_3)l_1 l_2 c_2 +$$

$$m_3 l_1 l_3 c_{23} + 2m_3 l_2 l_3 c_3;$$

$$D_{22} = (m_2 + m_3)l_2^2 + m_3 l_3^2 + 2m_3 l_2 l_3 c_3;$$

$$D_{23} = m_3 l_3^2 + m_3 l_2 l_3 c_3;$$

$$\chi_{11} = (m_2 + m_3)l_1 l_2 s_2 + m_3 l_1 l_3 s_{23};$$

$$\chi_{33} = -m_3 l_2 l_3 s_3;$$

$$\chi_{13} = \chi_{23} = -2m_3 l_2 l_3 s_3;$$

$$\frac{\partial l_{EF}}{\partial \theta_2} = l_{EF}^{-1} \left( l_2^2 l_4^2 l_{EC}^{-1} s_2 c \angle ECF - l_2 l_4 s_2 + \frac{l_2^2 l_{EC} s_2 + l_2^2 l_4^2 l_{EC}^{-1} s_2^2}{\sqrt{l_{EC}^2 + l_4^2 s_2^2}} \right);$$

$$\angle ECF = \theta_3 + \arcsin \left( \frac{l_4 s_2}{l_{EC}} \right).$$

式中:  $c \angle ECF$  表示  $\cos \angle ECF$ ;  $c_{ijk}$  表示  $\cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ 。

## 4 仿真分析

将图 2 所示的四足机器人三维模型导入 Adams 中建立虚拟样机模型,进行 bound 步态仿真。

四足机器人长 840 mm,宽 324 mm,高 850 mm,整机质量约 35 kg,在 Adams 仿真平台中,实现了在平坦地面的奔跑。

躯体质心在三个方向上的位移如图 7 所示,红色实线、蓝色虚线和粉红色虚线分别表示前进方向( $X$ 方向)、竖直方向( $Y$ 方向)和横向( $Z$ 方向)的位移。可以看出,机器人在 0.5 s 之后平稳运动,竖直方向质心起伏较小,前进 12 m 横向偏移为 0.003 m 横向偏移率约为 0.25%。

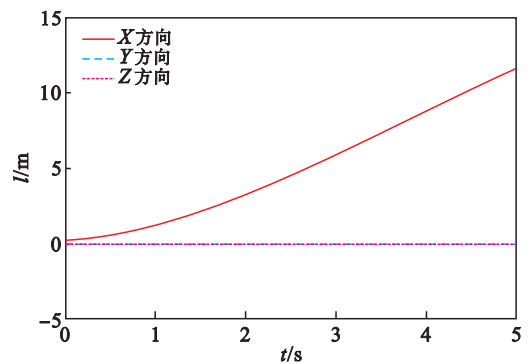


图 7 机器人躯体质心在  $X, Y$  和  $Z$  方向上的位移曲线  
Fig. 7 The displacement curves of body mass center in the  $X, Y$  and  $Z$  directions

机器人前进方向上的速度如图 8 所示,机器人平稳运动后,平均速度基本保持在 2.7 m/s 左右,奔跑速度较快。

图 9 为左后腿髋关节驱动力矩,可以看出髋关节的驱动力矩除个别峰值外,基本保持在 200 N·m 以下,所需的驱动力矩较小。

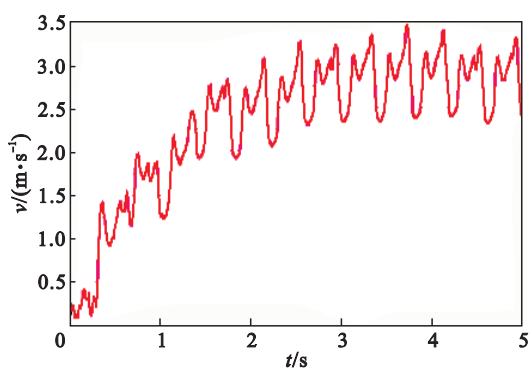


图 8 机器人在前进方向上的速度曲线  
Fig. 8 Speed curve of the quadruped robot in the forward direction

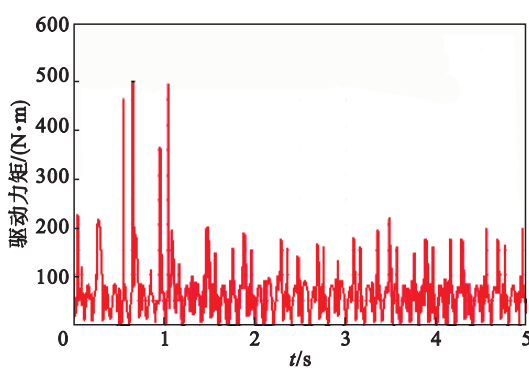


图 9 机器人左后腿髋关节驱动力矩曲线  
Fig. 9 Drive torque of the hip joint for the left rear leg

图 10 为左后腿膝关节驱动力矩,可以看出膝关节的驱动力矩除个别峰值外,保持在 100 N·m 以下,所需的驱动力矩较小,并且膝关节的驱动力矩小于髋关节的驱动力矩。

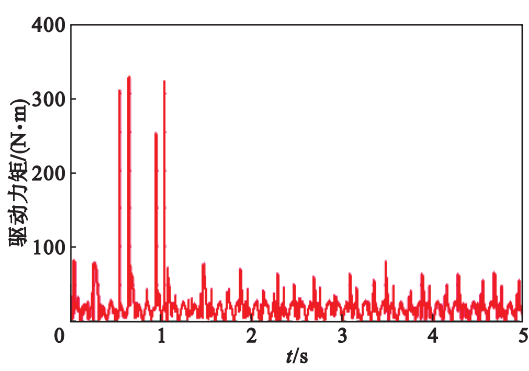


图 10 机器人左后腿膝关节驱动力矩曲线  
Fig. 10 Drive torque of the knee joint for the left rear leg

图 11 为左后腿足端接触力,峰值基本保持在 400 N 左右,最大不超过 600 N。机器人模型质量为 35 kg,因此,冲击力较小。

通过以上分析可以看出,四足机器人可以实现稳定的 bound 步态运动,速度较高且所需驱动力矩较小、接触力较小、运动效率较高,证明了该

腿结构应用于奔跑运动是可行的,也是合理的。

在未来工作中,将会在实物四足机器人上进行实验研究。

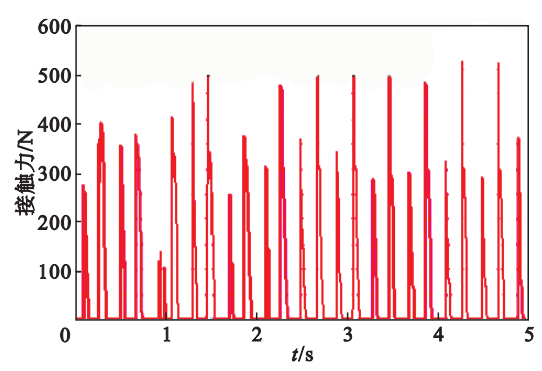


图 11 机器人左后腿足端接触力曲线  
Fig. 11 Foot contact force curve of the left rear leg

## 5 结 论

1) 通过对动物狗前腿的生理特征分析,设计了一种适用于奔跑运动的仿生四足机器人的新型腿结构。该腿结构有 3 个关节,具有 3 个自由度,髋关节、膝关节具有主动的俯仰自由度,踝关节具有被动的俯仰自由度。

2) 根据新型腿结构,建立了动力学模型,进行了动力学分析,推导出了动力学方程,并进行了刚度特性分析,得出了在髋关节、膝关节角度约束下的虚拟弹簧腿刚度特性。

3) 利用 Adams 软件对本文设计的仿生奔跑四足机器人进行了 bound 步态的仿真。仿真结果验证了该腿结构能够实现四足机器人以 bound 步态稳定、快速地奔跑,说明该腿结构设计是可行的。

### 参考文献：

[ 1 ] Elena G ,Mariaa J. The evolution of robotics research[ J ]. *Robotics and Automation* 2007 ,14( 1 ) :90 - 102.

[ 2 ] Raibert M ,Blankespoor K ,Nelson G ,et al. Bigdog , the rough-terrain quadruped robot [ C ]//The 17th World Congress ,International Federation of Automatic Control. Netherlands :Elsevier 2008 :22 - 25.

[ 3 ] Lee D V ,Biewener A A. Bigdog-inspired studies in the locomotion of goats and dogs [ J ]. *Integrative and Comparative Biology* 2011 ,51( 1 ) :190 - 202.

[ 4 ] Lewis M A ,Bunting M R ,Salemi B ,et al. Toward ultra high speed locomotors :design and test of a cheetah robot hind limb[ C ]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway :IEEE 2011 :1990 - 1996.

[ 5 ] Sprowitz A ,Tuleu A ,Vespignani M ,et al. Towards dynamic trot gait locomotion :design ,control ,and experiments with cheetah-cub ,a compliant quadruped robot[ J ]. *International*

*Journal of Robotics Research* 2013 ,32( 8 ) 932 –950.

[ 6 ] Wang X ,Li M T ,Wang P F ,et al. Bio-inspired controller for a robot cheetah with a neural mechanism controlling leg muscles[ J ]. *Journal of Bionic Engineering* ,2012 ,9( 3 ) : 282 –293.

[ 7 ] 丁良宏 ,王润孝 ,冯华山 ,等. 浅析 BigDog 四足机器人[ J ]. 中国机械工程 2012 23( 5 ) 505 –514.  
( Ding Liang-hong ,Wang Run-xiao ,Feng Hua-shan ,et al. Brief analysis of a BigDog quadruped robot[ J ]. *China Mechanical Engineerring* 2012 23( 5 ) 505 –514. )

[ 8 ] 安铁洙. 犬解剖学[ M ]. 长春 :吉林科学技术出版社 2003.  
( An Tie-zhu. Canine anatomy[ M ]. Changchun :Jilin Science and Technology Press 2003. )

[ 9 ] Meek S ,Jongwon K ,Anderson M. Stability of a trotting quadruped robot with passive ,underactuated legs[ C ]// International Conference on Robotics and Automation. Piscataway :IEEE 2008 347 –510.

[ 10 ] 张雪峰 ,秦现生 ,冯华山 ,等. 面向奔跑运动的刚 –柔复合四足机器人单腿设计与实验研究[ J ]. 机器人 ,2013 ,35 ( 5 ) 582 –588.  
( Zhang Xue-feng ,Qin Xian-sheng ,Feng Hua-shan ,et al. Design and experiment study on a quadruped robot single leg with composite rigid-flexible configuration for gallop gait [ J ]. *Robot* 2013 ,35( 5 ) 582 –588. )