

# 四足机器人新型节能腿的设计与分析

马宗利, 朱彦防, 刘永超, 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:** 分析了生物狗后腿的结构特点, 提出了一种大腿和小腿呈一体化的柔性节能腿结构, 只需在髋关节处施加驱动即可实现四足机器人小跑(trot)步态. 对提出的模型进行了动力学分析并通过 ADAMS 仿真平台进行了仿真. 仿真结果表明, 此种结构的四足机器人可以实现稳定快速的 trot 步态, 相对于普通髋关节和膝关节同时驱动的四足机器人, 该模型的髋关节驱动力矩和驱动功率明显减小, 足端接触力明显降低, 能耗降低明显, 缓冲性能好, 证明了四足机器人新型腿结构设计的合理性.

**关 键 词:** 四足机器人; 仿生; 节能腿; 动力学分析; 仿真

**中图分类号:** TP 242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)04-0543-06

## Design and Analysis of New Energy-Efficient Legs for Quadruped Robots

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

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

**Abstract:** The physiological characteristics of dog hind leg were analyzed, a flexible leg structure made of thigh and shank for integrative structure was presented. Only exerting drive in hip joint, the quadruped robot can realize trot gait. The model was analyzed dynamically and simulated by the ADAMS. The results showed that the quadruped robot with this structure can move stably and rapidly in trot gait. Compared with other quadruped robots which need drive in hip and knee joint simultaneously, we can reduce the drive torque and drive power of hip joint, foot contact force, and energy consumption. The cushioning property of this model is excellent. This leg structure of the quadruped robot is shown to be reasonable.

**Key words:** quadruped robot; bio-inspired; energy-efficient leg; dynamics analysis; simulation

四足机器人对复杂地形有良好适应性, 具有稳定性好和承载能力强等优点, 是近年研究的热点之一. 美国波士顿动力学公司研究出的 Bigdog 具有很好的运动性能, 被誉为世界上最先进的四足机器人<sup>[1-2]</sup>. 2012 年山东大学机器人研究中心研发的 ScalF 液压驱动四足仿生机器人<sup>[3]</sup>是国内比较先进的四足机器人.

四足机器人的腿结构, 对四足机器人的运动性能具有决定作用. 许多学者基于仿生原理, 研制的四足机器人的腿结构由大腿和小腿构成, 髋关节具有侧摆和俯仰 2 个自由度, 膝关节有 1 个俯仰自由度. 近年, 许多学者常用小腿上加弹簧的结

构, 代替刚性腿结构, 如美国的 Bigdog 四足机器人和中国山东大学的 ScalF 四足机器人. 尽管地面冲击减小, 振动缓冲, 但行走控制时, 还是需要同时对髋关节和膝关节进行控制, 控制较复杂, 耗能较高. 另外一些学者提出利用丝杠螺母驱动弹簧模组的腿结构或连杆式的腿结构, 这些结构较复杂, 导致驱动复杂, 控制复杂, 耗能高, 应用效果一般<sup>[4-7]</sup>.

四足动物的腿肌肉、肌腱、软骨等在缓冲冲击和存储能量方面作用很大. 本文基于仿生狗的后腿生物特征, 考虑控制简单和节能, 提出一种简单又可行的新型腿结构, 进行了动力学分析和仿真

收稿日期: 2014-08-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375267).

作者简介: 马宗利(1967-), 男, 山东青岛人, 山东大学副教授; 王建明(1962-), 男, 山东济南人, 山东大学教授.

实验验证. 仿真结果表明, 新型腿结构降低了驱动力矩和功率, 减小地面冲击, 使振动缓冲, 节能效果较好.

## 1 膝部和小腿均有一定弹性的四足机器人节能腿的设计

### 1.1 生物狗的后腿生理解剖分析

图 1 为生物狗的后腿生理解剖简图<sup>[8]</sup>.

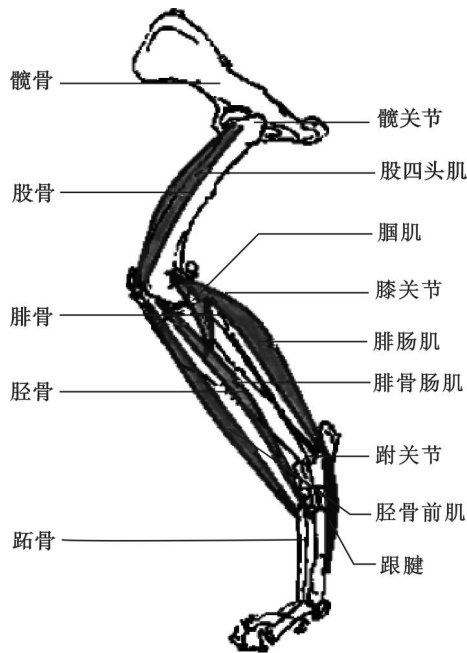


图 1 生物狗的后腿生理解剖简图

Fig. 1 Schematic diagram of physiological anatomy for dog hind leg

狗的后腿主要包括髌骨、股骨、胫骨、腓骨和跗骨. 有三个关节: 髋关节、膝关节和跗关节. 位于髋关节和膝关节之间的股骨是大腿的主要支撑骨, 位于膝关节和跗关节之间的胫骨是小腿的主要支撑骨.

作用于膝关节的肌肉有股四头肌和腓肌, 作用于跗关节的肌肉有腓肠肌、胫骨前肌和腓骨长肌. 这些肌肉的伸屈, 控制膝关节和跗关节的运动. 跟腱的近端是腓肠肌肌腹, 远端止于跟骨后下方. 跟腱主要由胶原纤维构成, 这些纤维大都呈规则的平行排列, 许多纤维组成粗大的纤维束, 并彼此扭绕呈绳状, 以保证跟腱的牢固性.

狗行走时的落地缓冲机理: 后腿的足落地缓冲时, 膝关节肌肉、跗关节肌肉和跟腱被迫拉长, 主要作退让性工作, 缓冲地面反作用, 将大量的机械能转换为肌肉或腱的弹性势能储存起来, 作为继续前进的动力储备. 四足动物的腿肌肉、肌腱、

软骨等在缓冲冲击和存储能量方面作用很大.

### 1.2 简化仿生模型

基于生物狗的后腿肌肉和腱的缓冲机理, 新型腿结构由大腿和小腿构成, 大腿上端的髋关节具有俯仰和侧摆两个自由度. 大腿是刚性的, 小腿由有一定弹性的钢板制成, 大腿小腿衔接处使用圆弧光滑过渡以类似膝关节. 结构简化后模型示意图如图 2 所示. 为了防止侧弯, 腿部采用宽 30 mm 的钢板. 大腿部分钢板厚 3.5 mm, 小腿部分钢板厚 1.6 mm, 制成一体化的腿, 大腿小腿衔接处圆弧钢板厚 1.6 mm; 在足部末端稍有弯曲以提供稳定支撑.

单腿抬起时的示意图如图 3 所示, 单腿完全着地时的示意图如图 4 所示. 机器人行走时, 只控制髋关节的摆动, 大腿和小腿的交接处因由弹性会发生变形, 这种变形类似于膝关节的摆动, 小腿着地后也会有一定弯曲, 因而具有弹性, 可减小地面冲击, 使振动缓冲, 节能效果好.

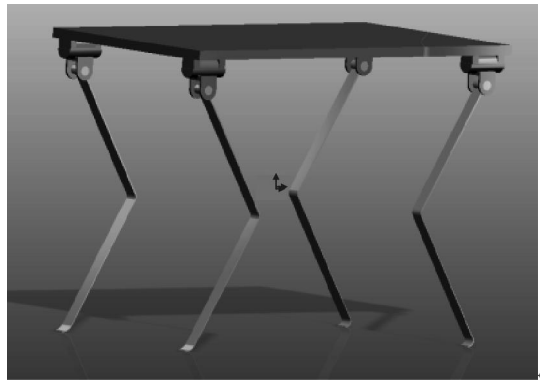


图 2 样机三维模型图

Fig. 2 3D model of quadruped robot

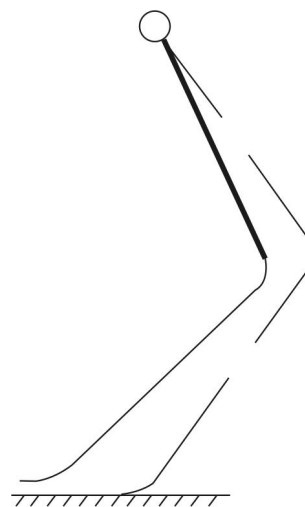


图 3 单腿抬起时的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single leg leaving ground

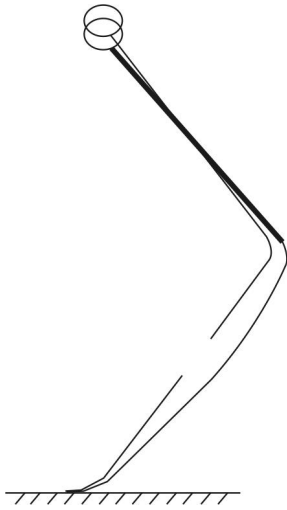


图4 单腿完全着地时的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of single leg fully touching ground

## 2 动力学模型与分析

以图2中的前腿为例,简化的机构模型如图5所示,由杆件、扭簧、弹簧构成.由于大腿钢板比较厚,故可简化为刚体;小腿和大腿衔接处可以看成一扭转弹簧,小腿钢板比较薄,在运动过程中有变形,可以简化为一刚度较大的弹簧<sup>[9]</sup>.

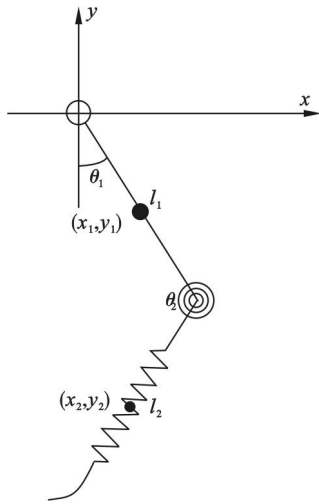


图5 一体化腿柔性机构模型

Fig. 5 Flexible leg structure model with thigh and shin for integrative structure

设大腿长为  $l_1$ , 质量为  $m_1$ , 质心坐标为  $(x_1, y_1)$ , 与竖直方向夹角为  $\theta_1$ ; 小腿长  $l_2$ , 质量为  $m_2$ , 质心坐标为  $(x_2, y_2)$ , 大腿和小腿之间的夹角为  $\theta_2$ , 大腿和小腿之间的初始夹角为  $\theta_{20}$ , 小腿初始长度为  $l_{20}$ . 扭簧的刚度为  $k_t$ , 小腿弹簧的刚度为  $k_s$ .

动能为

$$l_1: K_1 = \frac{1}{2} m_1 a_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2; \quad (1)$$

$l_2$ :

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 = \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2. \quad (2)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= l_1 \sin \theta_1 - a_2 \sin \theta_2; \\ y_2 &= -l_1 \cos \theta_1 - a_2 \cos \theta_2; \\ \dot{x}_2 &= l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - a_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2; \\ \dot{y}_2 &= l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 + a_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + a_2^2 \dot{\theta}_2^2 - 2l_1 a_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 + \theta_2). \quad (4)$$

势能为

$$l_1: P_1 = m_1 g y_1 = -m_1 g a_1 \cos \theta_1; \quad (5)$$

$$l_2: P_2 = m_2 g y_2 = -m_2 g (l_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos \theta_2). \quad (6)$$

扭簧:

$$P_3 = \frac{1}{2} k_t (\theta_2 - \theta_{20})^2. \quad (7)$$

小腿弹簧:

$$P_4 = \frac{1}{2} k_s (l_2 - l_{20})^2. \quad (8)$$

总动能为

$$K = K_1 + K_2 = \frac{1}{2} m_1 a_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2. \quad (9)$$

总势能为

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = -m_1 g a_1 \cos \theta_1 - m_2 g (l_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos \theta_2) + \frac{1}{2} k_t (\theta_2 - \theta_{20})^2 + \frac{1}{2} k_s (l_2 - l_{20})^2. \quad (10)$$

拉格朗日算子为

$$L = K - P = \frac{1}{2} m_1 a_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 + m_1 g a_1 \cos \theta_1 + m_2 g (l_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos \theta_2) - \frac{1}{2} k_t (\theta_2 - \theta_{20})^2 - \frac{1}{2} k_s (l_2 - l_{20})^2.$$

拉格朗日动力学方程为<sup>[10]</sup>

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} - \frac{\partial L}{\partial \theta_i}.$$

对拉格朗日算子  $L$  求偏导和导数为

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \theta_1} &= m_2 l_1 a_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - m_1 g a_1 \sin \theta_1 - m_2 g l_1 \sin \theta_1, \\ \frac{\partial L}{\partial \theta_1} &= I_1 \dot{\theta}_1 + m_1 a_1^2 \dot{\theta}_1 + m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1 - m_2 l_1 a_2 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 + \theta_2), \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = I_1 \ddot{\theta}_1 + m_1 a_1^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1^2 \ddot{\theta}_1 -$$
$$m_2 l_1 a_2 \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 + \theta_2),$$
$$\tau_1 = \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right] - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = I_1 \ddot{\theta}_1 + m_1 a_1^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1^2 \ddot{\theta}_1 -$$
$$m_2 l_1 a_2 \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - m_2 l_1 a_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - m_1 g a_1 \sin \theta_1 - m_2 g l_1 \sin \theta_1. \quad (11)$$

因为  $\theta_2$  为被动自由度,故  $\theta_2$  处不存在驱动力矩  $\tau_2$ .

3 能耗分析

不考虑损失等其他因素,髋关节和膝关节均需施加驱动的腿结构模型(简称“传统模型”)在一个周期所消耗的能量可以表示为<sup>[11]</sup>

$$E = E_1 + E_2 = \int_0^T p_1 dt + \int_0^T p_2 dt. \quad (12)$$

式中, $p_1, p_2$  分别表示髋、膝关节驱动功率.

根据式(11),一体化节能腿机器人单腿一个运动周期内所消耗的能量为

$$E = \int_0^T p_1 dt = \int_0^T \tau_1 \omega_1 dt = \int_0^T \tau_1 \dot{\theta}_1 dt. \quad (13)$$

式中: $p_1$  为髋关节驱动功率; $\tau_1$  为髋关节驱动力矩; $\omega_1, \dot{\theta}_1$  为髋关节转动角速度; $\theta_1$  为髋关节转角.由式(13)可知:髋关节驱动力矩越大,能耗越大.

4 仿 真

利用 ADAMS 仿真软件<sup>[12]</sup>,对所建立的节能腿机器人模型进行仿真分析<sup>[13]</sup>,并与传统模型进行对比,两种模型的物理尺寸基本一致,如表 1 所示.仿真发现同等质量情况下,一体化节能腿模型的运动能耗大大下降,足端与地面的接触力明显降低,对地面冲击明显减小.

表 1 两种模型物理信息对照

Table 1 Comparison of physical information of two models

变量	一体化腿模型	传统模型
躯干尺寸/mm	800×500	800×500
大腿长/mm	290	290
小腿长/mm	295	290
大腿小腿初始夹角/(°)	120	120
腿的材料	45 钢	45 钢
总质量(包括载重)/kg	66	66

4.1 机器人 trot 行走质心速度

一体化腿机器人模型只在髋关节施加驱动,

与传统模型相比,其质心速度如图 6 所示.

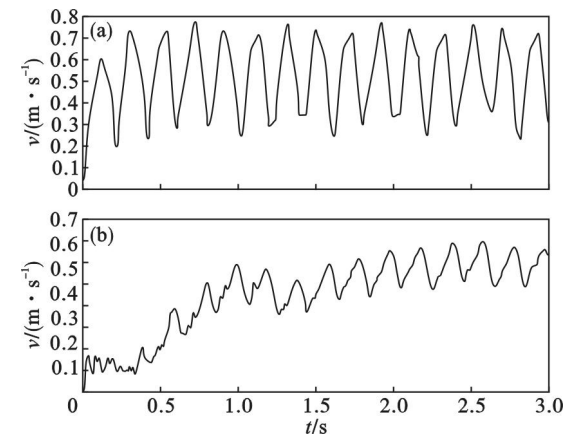


图 6 两种模型的运动速度对比  
Fig. 6 Comparison of moving speed of two models  
(a)—传统模型; (b)—一体化节能腿机器人.

由图 6 可知,传统模型 0.3 s 后即可达到稳定前进,一体化节能腿模型需要约 0.5 s 的时间才可以稳定前进,稳定后的速度均为 0.5 m/s 左右,但稳定后的速度波动较小,能够实现较快的稳定行走.

4.2 能耗对比

髋关节的驱动力矩和驱动功率主要发生在腿的摆动阶段,支撑阶段的驱动力矩很小.两种模型的驱动力矩和驱动功率分别如图 7 和图 8 所示.

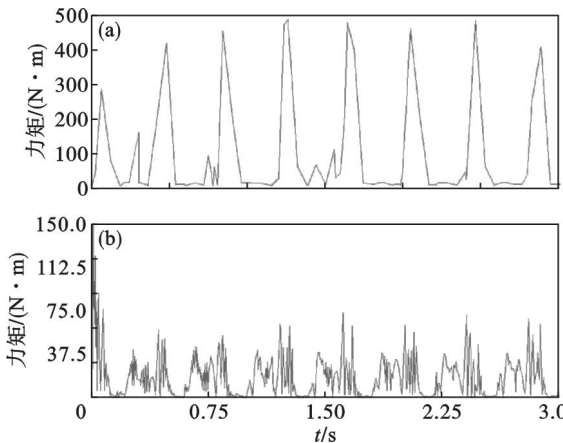


图 7 两种模型的驱动力矩对比  
Fig. 7 Comparison of drive torque of two models  
(a)—传统模型; (b)—一体化节能腿机器人.

由图 7 可知,传统模型的髋关节驱动力矩峰值接近 500 N·m,而节能腿模型驱动力矩峰值不到 75 N·m.可见,节能腿模型驱动力矩大大降低.由图 8 可知,传统模型的髋关节驱动功率峰值基本保持在 150~250 N·m/s 之间,而节能腿模型驱动功率峰值则保持 50~100 N·m/s 之间.显然,节能腿模型相比于传统模型,驱动功率大大降低,



对应能耗也应大大降低。

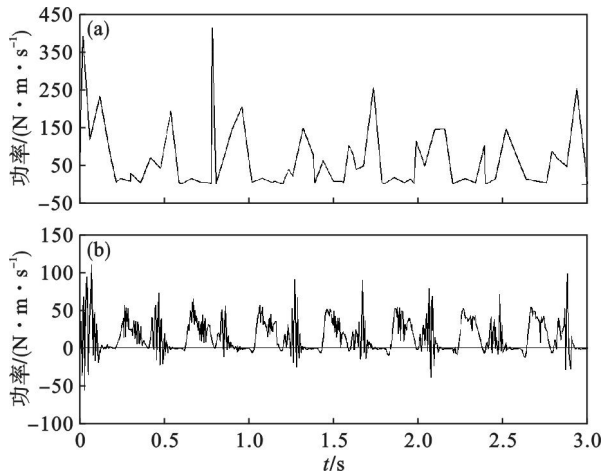


图8 两种模型的髋关节驱动功率对比

Fig. 8 Comparison of drive power of two models

(a)—传统模型; (b)—一体化节能腿机器人。

### 4.3 节能腿的腿部变形分析

图9为两种模型的足端接触力对比,可以看出,传统模型的最大足端接触力约为750 N,而节能腿模型约为450 N。

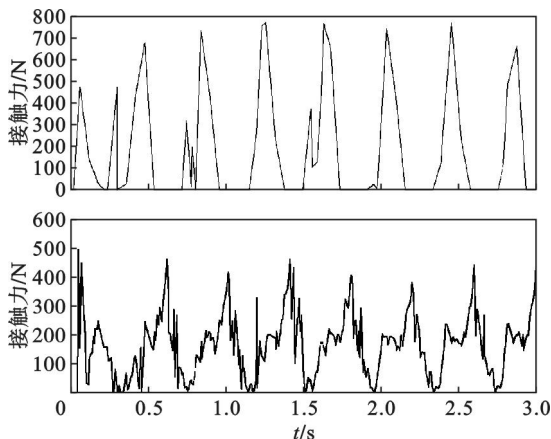


图9 两种模型的足端接触力对比

Fig. 9 Comparison of foot contact force of two models

(a)—传统模型; (b)—一体化节能腿机器人。

运动过程中,小腿相对于大腿,在膝部会有变形,这是节能腿缓冲和蓄能的原因,但此膝部的变形如果过大则会造成较大的质心起伏,增加能量消耗,因此膝部变形不宜太大。大腿小腿的夹角变化情况可以反映膝部变形情况,如图10所示。可以看出一体化节能腿的大腿与小腿间的夹角在 $119^\circ \sim 120.5^\circ$ 变化,变化幅值约为 $1.5^\circ$ ,结合腿长分析,该夹角变化是适宜的,因此膝部变形也是适宜的。

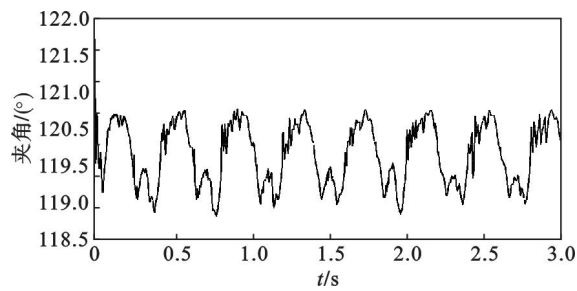


图10 一体化节能腿机器人运动过程中大腿小腿夹角变化

Fig. 10 Angle between thigh and shin for flexible leg structure model when moving

小腿的弯曲同样可以起到缓冲和蓄能作用,足端触地的瞬间,小腿受到接触力的作用而发生变形,此时可将小腿看作悬臂梁,接触力与小腿变形之间的关系如图11所示。由图可知,接触力为450 N时,小腿的最上端的变形量约为8.3 mm,缓冲效果明显。

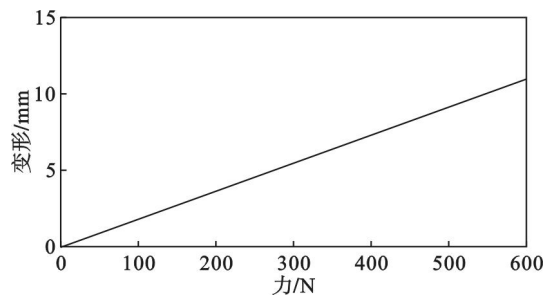


图11 小腿受力与变形曲线

Fig. 11 Curve of force and deformation for shank

## 5 结 论

1) 通过对生物狗后腿的生理特征分析,提出一种大腿小腿一体化的四足机器人新型节能腿结构,膝部及小腿均有弹性以缓冲足端的地面冲击力。

2) 根据新型腿结构,建立了简化的动力学模型,进行了动力学分析,推导出了动力学方程,并进行了能耗分析,髋关节的驱动力矩越大,能耗越大。

3) 利用ADAMS软件对一体化节能腿的四足机器人进行了trot步态的仿真分析,仿真结果表明该种腿结构的四足机器人可以实现快速稳定的trot行走。与传统髋关节和膝关节均需驱动的四足机器人模型进行了仿真对比,以同样的速度trot行走,一体化节能腿的四足机器人能耗大大低于传统模型的能耗,非常有效地缓冲了足端的地面冲击力,验证了新型节能腿结构的合理性。

(下转第553页)