DOI :[illegible]
2007年 6月 北京航空航天大学学报 June 2007
第33卷 第6期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol 33 No.6

四足步行机的对角小跑步态及能耗仿真分析

高 峰 雷静桃 徐国艳

(北京航空航天大学 汽车工程系，北京 100083)

摘 要：步行机需自身携带能量如电池实现步行及探测任务，研究其能量消耗有重要的意义.步行机的行走步态与能量消耗密切相关，采用对角小跑步态，分析能量消耗与相关影响参数间的关系.介绍了四足步行机的对角小跑步态及多链串并联复合机构的特点，建立步行机的运动学方程及拉格朗日动力学方程.采用虚拟样机技术建立系统的考虑足与地面接触的三维仿真模型，进行完整对角小跑步态周期中的能量消耗分析，获得步行机的动态特性.以移动能耗率为评价指标，分别仿真分析3种步距及3种接触材料的能量消耗，研究步距、接触刚度和摩擦系数对步行机能量消耗的影响，建立移动能耗率与步行机步行速度间的关系曲线，为物理样机的设计提供依据.

关 键 词：步行机；对角小跑步态；能量消耗；虚拟样机

中图分类号：TP 242

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)06-0719-04

Trot gait and energy consumption simulation of a quadruped robot

Gao Feng Lei Jingtao Xu Guoyan

(Dept. of Automobile Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Walking robot carries its own energy source such as battery to walk and finish exploring task, so the research of energy consumption is of great significance. The gait of walking robot has close relationship with energy consumption. Trot gait was adopted to analyze the relationship between energy consumption and relevant influence factors. The characteristics of trot gait and multi-loop serial and parallel mechanism were presented, and Denavit-Hartenberg coordinate method was adopted to express the kinematics equation and Lagrange dynamics equation of quadruped walking robot; then the virtual prototyping technology was used to establish the 3D simulation model considering contact between foots and ground, by which the energy consumption analysis of whole gait cycle and dynamic characteristics were calculated. By using the rate of energy consumption to evaluate energy efficiency of walking robot, the energy consumption during walking was analyzed with different walking stroke and different contact material, and the relationship between the rate of energy consumption and walking velocity was presented. The results can provide basis for the design of the physical prototyping.

Key words: walking robot; trot gait; energy consumption; virtual prototyping

多足步行机的研究是从动物运动的较高速度和不规则地面的高通过性方面受到启发，通过观察、研究各种动物的行走方式，应用仿生学来模拟动物实现步行.步行机的能量效率问题是一个关键问题，因为具有实用要求的步行机必须自身携带动力源，如电池，且只能用其有限的能量来完成步行及操作任务.分析影响步行机能量消耗的因素，设计能量消耗少的步行机具有重要的意义.

步行机的能量消耗的影响因素很多，主要有本身结构参数和步态参数等，针对步行机的能量消耗国外学者有一些研究，R. Kurazume[1]进行了多足步行机能量效率的实验研究，M. F. Silva[2]分

收稿日期：2006-07-14

作者简介：高 峰(1955—)，男，河南洛阳人，教授，gaof@buaa.edu.cn.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

析了多足系统的功率消耗和移动参数的关系.这些研究集中于步行机自身运动的能量消耗问题,分析了各关节运动所需的驱动功率,忽略了步行机在步行中腿与地面间的相互作用.

四足步行机的对角小跑步态相对于爬行步态速度较高,本文以对角小跑步态为例,在分析其运动学和拉格朗日动力学数学模型的基础上,建立了系统考虑接触的三维仿真模型,研究步行机的步距及足与地面的接触情况对能量消耗的影响,获得步行机在步态周期中的动态特性及移动能耗率与步距和不同接触参数间的关系,研究步距、接触刚度和摩擦系数对步行机能量消耗的影响.

1 四足步行机的对角小跑步态

步态的研究最初由动物学家进行,McGhee[3]比较系统地给出了关于步态的一系列描述方法,为步态的研究分析奠定了较为完整的数学基础.步行机的步态是指腿机构的运动方式,各腿协调运动的规律,即各腿的抬腿和落腿的顺序,步态能描述和决定步行机的运动速度、方向和机动性.

动物经过长期的进化和选择,逐渐形成了最适宜环境的步态,其理由与步行的稳定性、最少的能量消耗、步行速度与机动性有必然的联系.四足动物的常用步态有:对角小跑、爬行、跳跃等,其中对角小跑是速度较快且较稳定的步态.

以往对四足步行机的研究大多采用爬行步态,但爬行步态速度低,属于静态稳定步态.对角小跑步态属于动态稳定步态,如图 1所示.对角小跑步态一个步态周期的腿机构的运动规律为:4条腿分成 2组,位于对角线上的 2条腿为一组,这 2条腿同时抬起、摆动、落地、支撑.腿在空中的抬起、摆动、落地 3个过程,称为摆动相,腿在地面上称为支撑相.用占地系数 β来描述步态,占地系数是在一个步态周期中处于支撑相的时间段 T_s与整个步态周期 T之比值,即 $\beta=T_s/T$.当 $\beta=0.5$时,在一个步态周期中每条腿处于摆动相和支撑相的时间相等.步行机的动态稳定性分析,通常采用零力矩点(ZMP)方法来评价其稳定性并建立控制算法.ZMP是指步行机的重力和惯性力的合力在地面上的投影点,在该点合力矩为 0.当 ZMP位于稳定区域外时,导致步行机倾倒.为了保证步行机稳定步行,需控制零力矩点沿着期望的轨迹,四足步行机采用对角小跑步态的 ZMP位于两支撑足的连线上.

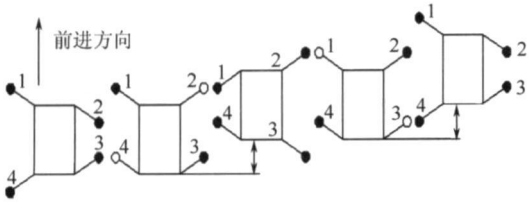

图 1 四足步行机对角小跑步态图解

2 运动学与动力学分析

2.1 运动学方程建立

四足步行机由机体和 4条腿组成,每条腿结构相同,有 3个转动关节,即每条腿有 3个自由度.四足步行机具有并联机构的特性,是开和闭运动链相结合的多链机构.采用对角小跑步态步行时,当位于对角线上的 2条腿处于摆动相时,这 2条腿与机体构成具有两开链的串联机构,即机体可看作机架,腿可看作串联操作臂.每条腿是一个单开链,可记为:2-SOC{-R⊥ R// R-3R}.当腿处于支撑相时,两条腿、机体和地面构成一个具有两封闭环的并联机构,地面可作为并联机构的机架,机体可作为并联机构的工作平台.步行机的行走过程,腿处于摆动相和支撑相交替状态,步行机即为并联机构及串联开链机构间的不断变化的复合型多链机构.

以摆动相为例,进行运动学分析,建立步行机的单腿 D-H坐标系,如图 2所示,将机体坐标系作为参考坐标系,步行机的运动学方程即建立足端 F点相对于机体坐标系的空间位姿,以关节转角 θ_i($i=1,2,3$)为独立变量.

建立机体坐标系 $Oxyz$,坐标原点 O在机体质心,z轴与重力方向相反,x轴正向为机体前进方向,由右手规则确定 y轴方向.腿机构连杆坐标系 $O_i x_i y_i z_i$($i=0,1,2$)由 D-H法[4]确定.由运动学正解得

$$T_3^0 = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \tag{1}$$

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} c_1c_{23} & -c_1s_{23} & s_1 & c_1(l_1+l_2c_2+l_3c_{23}) \\ s_1c_{23} & -s_1s_{23} & -c_1 & s_1(l_1+l_2c_2+l_3c_{23}) \\ s_{23} & c_{23} & 0 & l_2s_2+l_3s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

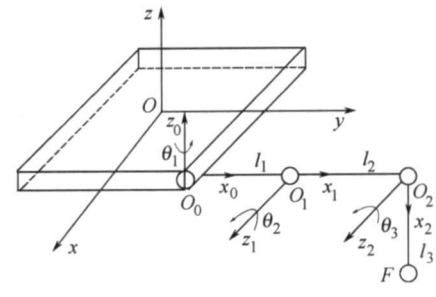

图 2 步行机的单腿 D-H坐标系

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中　$s_i = \sin\theta_i$　　$s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$

$c_i = \cos\theta_i$　　$c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$

$i, j = 1, 2, 3$

根据运动学方程式(2),由运动学逆解,可建立各关节转角 θ_i($i=1, 2, 3$)与足端坐标 $F(x, y, z)$间的关系.足端坐标 $F(x, y, z)$可采用高次多项式在直角坐标空间中进行足端轨迹规划得到,控制系统对 θ_i($i=1, 2, 3$)进行控制,即可实现步行机预期的运动.

2.2 步行机的动力学模型

步行机动态性能由动力学方程描述,它建立步行机的各关节驱动力矩与运动参数(关节位移、速度和加速度)间的关系.

机械系统的拉格朗日动力学方程一般形式为

$$\tau_i = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} + \frac{\partial E_p}{\partial q_i}$$

$$i = 1, 2, \cdots, n \qquad (3)$$

四足步行机的动力学方程为

$$\tau = H\ddot{\theta} + h + G \qquad (4)$$

式中,τ表示关节驱动力矩;θ表示关节广义坐标;H表示作用在机器人上的惯性力分量;h表示离心力(哥氏力)分量;G表示重力分量.

步行机在硬质地表步行时,步行机的足落下与地面间发生接触,足端与地面间因接触变形而产生接触碰撞力,并伴随能量的损失.根据 Nikravesh[5]提出的赫兹接触理论,接触力由 2部分组成:①由于 2个构件之间的相互切入而产生的弹性力;②由相对速度产生的阻尼力.考虑步行机与地面的接触建立模型,研究不同接触刚度及摩擦对步行机能量消耗的影响[6-7].

$$Q = k\delta^n + \mu\delta^n\dot{\delta} \qquad (5)$$

式中,k表示刚度系数,取决于两接触物体材料的特性和半径;δ表示接触点变形深度;n表示变形指数;μ表示滞后阻尼系数;$\dot{\delta}$表示接触点的法向相对速度.同时考虑接触摩擦,根据库仑摩擦力,摩擦系数随接触的滑移速度的变化,需根据足底与地面的材料不同确定不同的静摩擦系数 μ_s 和动摩擦系数 μ_d.正是由于足底有足够的摩擦力,才使得腿处于支撑相时足与地面无相对滑动,保证步行机能稳定步行.将接触力施加到步行机系统,动力学方程可表示为[8]

$$\tau = H\ddot{\theta} + h + G + f \qquad (6)$$

式中,f指作用于系统末端的作用力,通过雅可比矩阵的转置传递到关节,$f = J^T(\theta)F$,其中,$F = [Q \quad \mu_s Q \quad \mu_d Q]^T$.

3 移动能耗率 ε

步行机步行所消耗的总能量为驱动各关节所需能量之和,用 ε来评价单位重量的步行机移动单位距离所消耗的总能量[9].

在步行机的移动步态性能评价方面,除了稳定性,能量消耗也是一个重要指标,通过前面的运动学和动力学分析,可以容易地得到各关节的驱动力矩和角速度,为能量消耗分析奠定了基础.步行机的能量消耗与步行机的总质量、步行速度、足端轨迹等有关.步行机的设计应使实现步行所需要的能量消耗较少.从拉格朗日动力学方程知,关节的驱动力矩 τ_i($i=1, 2, 3$)与各关节的角加速度、角速度及模型的结构参数有关.步行机的结构参数越小,消耗的能量无疑越少,故在满足需要的条件下,尽可能设计结构尺寸小重量轻的步行机以降低能量消耗.设在 t时刻驱动关节 i的力矩为 $\tau_i(t)$,转动角速度为 $\omega_i(t)$,则该关节消耗的驱动功率 $P_i(t)$为

$$P_i(t) = \tau_i(t) \cdot \omega_i(t) = \tau_i(t) \cdot \dot{\theta}_i(t) \qquad (7)$$

式中,$\dot{\theta}_i$表示关节 i的角速度.四足步行机 m个关节在一个步态周期中消耗的总能量为

$$E = \sum_{i=1}^{m} E_i = \sum_{i=1}^{m} \int_0^T |P_i(t)|\,dt \qquad (8)$$

用 ε作为步行机的移动能效率评价指标,ε值越小,表明移动能效率越高.

$$\varepsilon = \frac{E}{mgS} \qquad (9)$$

式中,E表示一个步态周期中消耗的总能量;m表示步行机总质量;g表示重力加速度;S表示一个步态周期机体移动距离,简称步距,和机体长度相等.步行机的步行速度为 S与 T之比:

$$v = S/T \qquad (10)$$

设定一步距,建立模型,通过改变步态周期,仿真分析得到一条 ε随 v的变化曲线;改变步距重新建立模型,得到若干条这样的曲线,对比分析.

4 虚拟样机模型建立及仿真分析

4.1 建立的步行机模型及简化条件

建立模型的简化条件为:①机体及各腿节均为均质刚体;②忽略关节摩擦力.

四足步行机的三维实体模型包括机体、四条腿和地面共 18个运动件,步行机三维模型的机体尺寸:长、宽和高为 S×200 mm×40 mm,腿长为 120 mm,每条腿由 3个转动关节相连接,腿与机体

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

间、各腿节间用铰接副约束，踝关节处为球铰副约束，足与地面间为接触副.

4.2 模型检验及仿真结果

仿真分析前对样机模型进行检验，排除建模中隐含的错误，模型检验的内容包括：①检查不恰当的连接、没有约束的构件、样机的自由度等；②进行装配检查，检查所有的约束是否被破坏或者被错误定义，有助于纠正错误的约束；③进行动力学仿真前，先进行静态分析，排除系统在启动状态下的一些瞬态响应.

分别取 S为 200 mm，320 mm 和 400 mm，建立3种不同机体长度的模型，进行一系列仿真.仿真结果为 ε随 v的变化规律，如图 3所示.结果表明：① ε随 S增大而减小；②对于固定的 S，ε随步行速度提高而增大，也即在相同步行速度条件下，在步行能效率方面腿机构采用大步距慢摆动优于小步距快摆动.

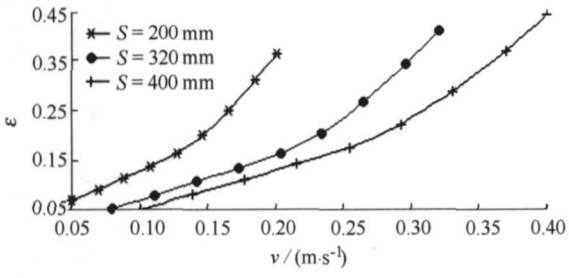

图 3 不同 S下 ε和 v间的关系曲线

在进行不同接触材料对 ε的影响仿真中，模型步距为 S=320 mm.如图 4所示，表示 ε随步行速度 v的变化曲线，3对不同接触材料的特性 k，μ_s，μ_d 参数值及仿真结果.结果表明：随着材料的接触刚度和摩擦系数增大，ε增大.由于足与地面的接触冲击，反映到关节，使得驱动力矩增大，从而引起关节驱动功率消耗增大.为了减小步行中的能量消耗，在进行步行机设计时，考虑采用低冲击的足端轨迹规划和摩擦系数较小的足底材料，提高 ε.

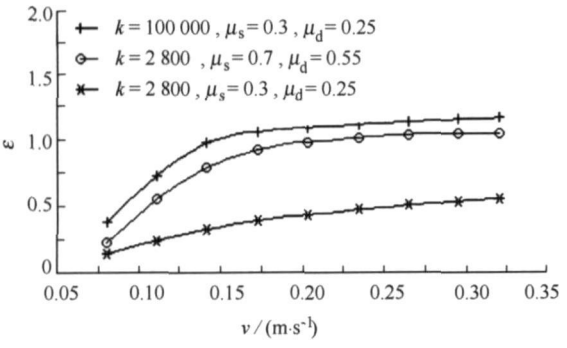

图 4 不同接触材料条件下 ε和 v间的关系曲线

5 结束语

利用多刚体系统动力学方法建立考虑步行足与地面接触的虚拟样机模型，进行动力学仿真分析，获得步行机的运动学和动力学信息.提出将移动能耗率作为步行机的移动能效率评价指标，通过一系列仿真试验，在不同步距、不同接触材料特性条件下，建立移动能耗率与步行机步行速度间的关系.仿真结果表明：移动能耗率随步距增大而减小，对于固定的步距，移动能耗率随步行速度提高而增大；在同一步行速度条件下，采用大步距慢速摆腿比小步距快速摆腿更节省能量.

在进行足端轨迹规划和选用足端接触材料方面要考虑其对能量消耗的影响，摩擦系数小可以降低能量消耗，同时也要考虑，摩擦系数太小会引起步行中滑移.在满足不产生滑移现象的前提下，尽量减小摩擦，从而减少能量消耗.

参考文献 (References)

[1] Kurazume R, Byong-won A, Ohta K, et al. Experimental study on energy efficiency for quadruped walking vehicles[C]//IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, Nevada: IEEE Press, 2003, 1(1): 613－618

[2] Silva M F, Machado J A T, Lopes A M. Performance analysis of multi-legged systems[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington DC: IEEE Press, 2002, 3: 2234－2239

[3] McGhee R B. Some finite state aspects of legged locomotion[J]. Mathematical Biosciences, 1968, 2: 67－84

[4] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京：清华大学出版社，2000
Cai Zixing. Robotics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000(in Chinese)

[5] Nikravesh P E, Pereira M S. Impact dynamics of multi-body systems with frictional contact using joint coordinates and canonical equations of motion[J]. Non-linear Dynamic, 1996, 9: 53－71

[6] Takemura H, Deguchi M, Ueda J, et al. Slip-adaptive walk of quadruped robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 53: 124－141

[7] Takemura H, Ueda J, Matsumoto Y, et al. The influence of friction on gait and energy efficiency of the walking robot based on rhythmic control[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines. Kyoto: [s. n.], 2003

[8] Guihard M, Gorce P. A new controller adapted to constrained pneumatic multichain structures[J]. Automatica, 2000, 36: 1321－1327

[9] 倉爪，米田，広瀬. 4足歩行機械の3D揺動歩容[J]. 日本ロボット学会誌，2001, 19(5): 632－637

(责任编辑：张 嵘)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net