

气动弹跳腿垂直方向稳定跳跃研究

李哲, 苏兴旺, 阎宏伟, 孙志超, 赵三猛, 武金合

(哈尔滨工业大学(威海)机械工程系, 山东 威海 264209)

摘要: 对气动弹跳腿的运动过程进行了理论分析和仿真研究, 提出触地阶段利用气缸上下腔压力差将弹跳腿带离地面的控制策略, 减小了能量损耗. 提出腾空阶段基于能量调节的控制策略, 增强了腿部系统的稳定性. 分析了气动弹跳腿腾空阶段设定气缸活塞位置对其跳跃高度和机身质心的影响, 丰富了跳跃高度的调节方式. 设计了气动弹跳腿垂直跳跃试验台, 验证了仿真结果的正确性.

关键词: 气动弹跳腿; 稳定跳跃; 跳跃机器人

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2013)-03-0306-07

Stable Hopping of a Pneumatically Actuated Leg in Vertical Direction

LI Zhe, SU Xingwang, YAN Hongwei, SUN Zhichao, ZHAO Sanmeng, WU Jinhe

(Department of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: Theoretical analysis and simulation are carried out to analyze the motion of a pneumatically actuated leg. A control strategy using pressure difference between upper and lower cylinder chambers to make the leg get off ground in touch-ground period is proposed, which can minimize the energy loss. An energy regulation based control strategy used in flight period is proposed to enhance the stability of the leg system. Influences on the hopping height and center of mass are analyzed when the position of the cylinder piston is changed during flight period, which enriches the methods of hopping height regulation. Test-bed for the pneumatically actuated leg is constructed, and the experimental results match well with the simulation results.

Keywords: pneumatically actuated leg; stable hopping; hopping robot

1 引言 (Introduction)

气动弹跳腿具有结构简单、质能比大的特点, 并且单足跳跃和多足跳跃之间的控制算法具有很强的通用性^[1], 在跳跃机器人^[2-6]领域得到广泛的关注.

气动弹跳腿的跳跃性能主要受其能量补充方式、离地起跳方式以及腾空阶段活塞位置和压力调节的影响^[1]. MIT 机器人腿实验室的 Raibert 等人在触地阶段对气缸上腔充入高压气体实现能量补充, 通过活塞杆和机身的碰撞实现离地起跳; 腾空阶段控制上腔气体压力至某一设定值. Naik^[4]、赵明国^[6]等人也在此基础上成功实现了单足机器人的控制.

上述控制中, 离地起跳时刻会发生活塞与气缸端盖的碰撞, 产生能量损失和降低系统稳定性, 同时未对腾空阶段活塞相对于气缸的位置进行控制分析. 本文对触地阶段, 提出利用气缸上下腔压力差

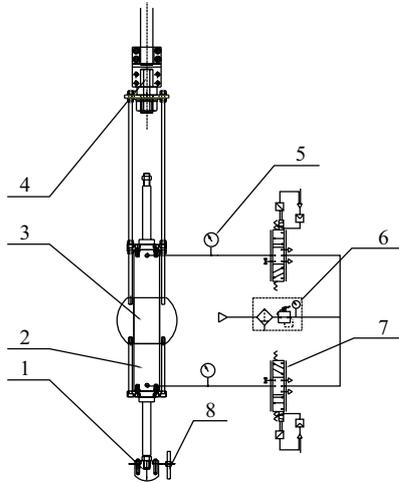
将弹跳腿活塞杆带离地面的控制策略, 对腾空阶段提出基于能量的控制算法, 实现气体压力及活塞位置的控制, 仿真和实验表明了算法的有效性.

2 气动弹跳腿模型 (Model of the pneumatically actuated leg)

2.1 气动弹跳腿系统组成

气动弹跳腿跳跃平台主要包括机械系统、气动系统、控制系统, 如图 1 所示. 机械部分主要由机身、足部和垂直导向机构等构成. 垂直导向机构通过一根光轴与机身相连, 使弹跳腿只具有竖直方向上的移动自由度和绕竖直方向的转动自由度. 通过配重增大机身与腿部的质量比, 减小跳跃过程中的能量损耗. 气动伺服系统主要由气缸、比例阀、压力传感器等构成. 气缸内部集成位移传感器, 能更精确地测量活塞位置, 同时采用伺服比例阀可以

控制阀口的截面积和充放气时间. 控制部分采用 C8051F120 高速度控制板, 通过检测接近开关的信号分析弹跳腿的运动状态, 通过检测压力信号以及位移信号, 对比例阀输出合适的电压信号, 最终实现弹跳腿的跳跃控制.



1. 气动弹跳腿足部 2. 气缸 3. 配重 4. 垂直导向机构
5. 压力传感器 6. 过滤减压阀 7. 比例流量阀 8. 接近开关

图 1 气动弹跳腿原理图

Fig.1 Schematic diagram of the pneumatically actuated leg

2.2 气动弹跳腿的数学模型

气动弹跳腿的跳跃过程由触地阶段和腾空阶段构成^[1,6], 触地阶段包括缓冲压缩阶段、起跳加压阶段、起跳恢复阶段, 如图 2 所示.

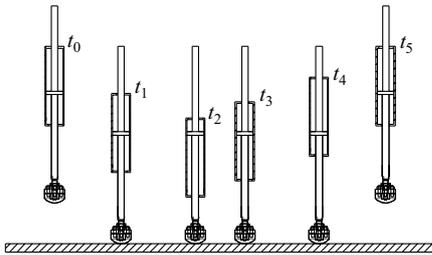


图 2 气动弹跳腿跳跃过程示意图

Fig.2 Hopping cycle of the pneumatically actuated leg

缓冲压缩阶段 ($t_1 \sim t_2$) 指气缸上腔封闭, 气缸上腔气压升高, 内能增加, 吸收机身机械能; 起跳加压阶段 ($t_2 \sim t_3$) 指气缸上腔充入高压气体, 机身在气缸上下腔压力差形成的推动力下向上运动; 起跳恢复阶段 ($t_3 \sim t_4$) 指封闭气缸上下腔, 机身在惯性和上下腔气体压力差下继续向上运动, 直至气动弹跳腿足部离开地面. 腾空阶段 ($t_0 \sim t_1, t_4 \sim t_5$) 指弹跳腿足底跳离地面至返回与地面接触, 此阶段弹跳腿仅受重力作用, 完成近似垂直上抛的运动.

气动弹跳腿垂直跳跃所涉及理论具有多样性和复杂性, 根据弹跳腿在运动过程中涉及到的运动学

和热力学理论, 需分别建立机身和活塞杆的动力学方程、能量方程, 气缸动力学方程、能量方程、流量方程、温度方程及摩擦力方程, 图 3 为其模型简图.

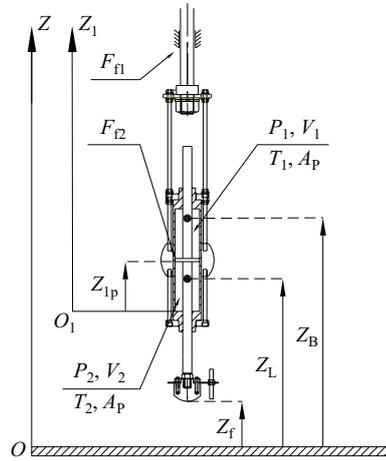


图 3 气动弹跳腿模型简图

Fig.3 A simplified model of the pneumatically actuated leg

2.2.1 触地阶段的数学模型

采用绝热过程建模, 得到气动弹跳腿在起跳加压阶段的动力学方程和气体压力方程分别为

$$\begin{cases} m_B \ddot{z}_B = (p_1 - p_2)A_p - F_{f1} + F_{f2} - m_B g \\ m_L \ddot{z}_L = 0 \\ m_L \ddot{z}_f = 0 \\ m_B \ddot{z}_{1p} = (p_2 - p_1)A_p + F_{f1} - F_{f2} + m_B g \\ \dot{p}_1 = \frac{kRT_1 q_{m1}}{A_p(s - z_{1p} + z_{10})} + \frac{kp_1 \dot{z}_{1p}}{s - z_{1p} + z_{10}} \\ \dot{p}_2 = \frac{kRT_2 q_{m2}}{A_p(z_{1p} + z_{20})} - \frac{kp_2 \dot{z}_{1p}}{z_{1p} + z_{20}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{p}_1 = \frac{kRT_1 q_{m1}}{A_p(s - z_{1p} + z_{10})} + \frac{kp_1 \dot{z}_{1p}}{s - z_{1p} + z_{10}} \\ \dot{p}_2 = \frac{kRT_2 q_{m2}}{A_p(z_{1p} + z_{20})} - \frac{kp_2 \dot{z}_{1p}}{z_{1p} + z_{20}} \end{cases} \quad (2)$$

其中, m_B, m_L 分别为气动弹跳腿机身和腿部活塞杆的质量, p_1, p_2 分别为气缸上下腔气体的绝对压力, A_p 为活塞的有效截面积, F_{f1} 为弹跳腿机身与垂直导向单元的摩擦力, F_{f2} 为弹跳腿活塞杆与气缸缸筒的摩擦力, s 为气缸的行程, k 为绝热指数, T_1, T_2 分别为上下腔气体的绝对温度, q_{m1}, q_{m2} 分别为进出上下腔的气体的质量流量, 正值表示气体流入气缸, 负值表示气体流出气缸, z_{10}, z_{20} 分别表示气缸上下腔的余隙当量.

气动弹跳腿在运动过程中, 机身与垂直导向单元, 气缸活塞与缸筒会发生摩擦, 其摩擦力方程为

$$F_{f1} = \begin{cases} F_{sf1}, & \dot{z}_B = 0 \\ F_{df1} \operatorname{sgn}(\dot{z}_B) + \eta_1 \dot{z}_B, & \dot{z}_B \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$F_{f2} = \begin{cases} F_{sf2}, & \dot{z}_{1p} = 0 \\ F_{df2} \operatorname{sgn}(\dot{z}_{1p}) + \eta_2 \dot{z}_{1p}, & \dot{z}_{1p} \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, F_{sf1} 、 F_{df1} 、 η_1 分别为弹跳腿机身与垂直导向单元的静摩擦力、库仑摩擦力和阻尼系数, F_{sf2} 、 F_{df2} 、 η_2 分别为弹跳腿活塞杆与气缸缸筒的静摩擦力、库仑摩擦力和阻尼系数, sgn 为符号函数.

比例流量阀的数学模型^[7-11]为

$$\begin{cases} \dot{x}_v = \frac{k_v(u - u_0) - x_v}{\tau_v} \\ q_m = C_d \omega x_v p_u \frac{\Phi}{\sqrt{T_u}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\Phi = \begin{cases} \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, & \frac{p_d}{p_u} \leq b \\ \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)} \left[\left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, & b < \frac{p_d}{p_u} \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

其中, b 为临界压力比, p_u 、 p_d 为上下游气体的绝对压力, T_u 为上游气体的绝对温度, R 为气体常数, ω 为比例阀截面积梯度, x_v 为比例阀阀芯位移, k_v 为单位电压阀芯位移量, C_d 为流量系数, u 为比例阀的信号电压, u_0 为比例阀中封时的信号电压.

气动弹跳腿在缓冲压缩阶段, 气缸上腔封闭, 下腔与大气相通, 弹跳腿动力学方程不变, 其压力方程变为

$$\begin{cases} \dot{p}_1 = \frac{kp_1 \dot{z}_{1p}}{s - z_{1p} + z_{10}} \\ \dot{p}_2 = \frac{kRT_2 q_{m2}}{A_p(z_{1p} + z_{20})} - \frac{kp_2 \dot{z}_{1p}}{z_{1p} + z_{20}} \end{cases} \quad (7)$$

气动弹跳腿在起跳恢复阶段, 气缸上下腔同时封闭, 气体流量为 0, 弹跳腿的动力学方程不变, 其压力方程变为

$$\begin{cases} \dot{p}_1 = \frac{kp_1 \dot{z}_{1p}}{s - z_{1p} + z_{10}} \\ \dot{p}_2 = -\frac{kp_2 \dot{z}_{1p}}{z_{1p} + z_{20}} \end{cases} \quad (8)$$

2.2.2 腾空阶段的数学模型

气动弹跳腿在腾空阶段需要对气缸上下腔压力和活塞位置进行调节, 其上下腔气体压力方程与起跳加压阶段相同, 动力学方程变为

$$\begin{cases} m_B \ddot{z}_B = (p_1 - p_2)A_p - F_{f1} + F_{f2} - m_B g \\ m_L \ddot{z}_L = (p_2 - p_1)A_p - F_{f2} - m_L g \\ m_L \ddot{z}_f = (p_2 - p_1)A_p - F_{f2} - m_L g \\ \frac{m_B m_L}{m_B + m_L} \ddot{z}_{1p} = (p_2 - p_1)A_p - F_{f2} + \frac{m_L F_{f1}}{m_B + m_L} \end{cases} \quad (9)$$

2.3 气动弹跳腿的控制策略

针对弹跳腿跳跃过程中的能量损耗, 以及腾空

阶段的调节方式, 本文提出一种新的控制方法, 其控制过程时序如图 4 所示. 其中比例阀信号电压中的虚线表示的是比例阀的中封电压 5V. 在弹跳腿运动到最高点和最低点时机身速度的方向会发生变化, 其上升沿所处时刻确定为充气加压的起始时刻 t_2 , 此时气动弹跳腿机身处于最低点. 光电接近开关用于区分气动弹跳腿运动过程中的腾空阶段与触地阶段, 充气加压时间用于位于控制系统内部的定时器 1 控制.

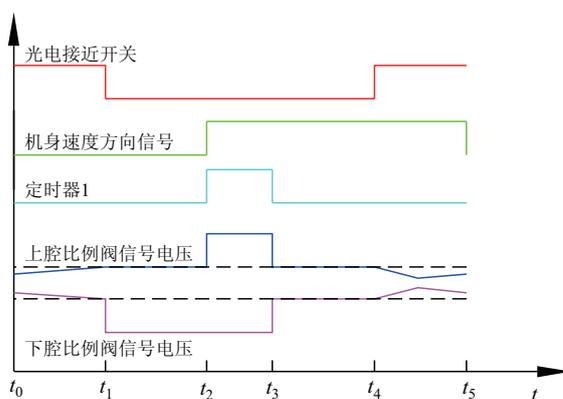


图 4 气动弹跳腿控制时序示意图

Fig.4 Control timing diagrams of the pneumatically actuated leg

2.3.1 触地阶段的控制策略与离地方式

气动弹跳腿在触地阶段划分为 3 个子阶段, 每个子阶段的控制方法为

$$\begin{cases} \begin{cases} u_1 = 5V, \\ u_2 = (0 \sim 5)V, \end{cases} & t \in (t_1, t_2) \\ \begin{cases} u_1 = (5 \sim 10)V, \\ u_2 = (0 \sim 5)V, \end{cases} & t \in (t_2, t_3) \\ \begin{cases} u_1 = 5V, \\ u_2 = 5V, \end{cases} & t \in (t_3, t_4) \end{cases} \quad (10)$$

其中, u_1, u_2 分别表示控制上下腔比例阀的信号电压, 5V ~ 10V 表示充气状态, 0 ~ 5V 表示排气状态, 5V 表示比例阀处于中封位置.

起跳恢复阶段, 机身具有先加速后减速的竖直向上的运动, 气缸上腔压力迅速减小, 下腔压力迅速增大, 当弹跳腿活塞杆受到的向上的推力等于活塞杆受到的向下的压力的时候, 机身带动弹跳腿足部离开地面, 避免了机身与弹跳腿活塞杆的碰撞.

$$\begin{cases} p_2 A_p + |F_{f2}| = p_1 A_p + m_L g \\ \dot{z}_B > 0 \end{cases} \quad (11)$$

2.3.2 腾空阶段的控制策略

通过引入能量控制的概念, 实现在腾空阶段对气动弹跳腿的上下腔压力以及活塞位置进行同时调节. 气缸在运动过程中, 假设气体热力过程为准静态过程, 可以得到任意时刻气缸内气体的内能^[8].

$$\begin{cases} E_1 = \frac{p_1 V_1}{k-1} = \frac{p_1 A_p (s - z_{1p} + z_{10})}{k-1} \\ E_2 = \frac{p_2 V_2}{k-1} = \frac{p_2 A_p (z_{1p} + z_{20})}{k-1} \end{cases} \quad (12)$$

其中 E_1, E_2 分别为上下腔气体的内能, V_1, V_2 为上下腔气体的体积.

气体内能的控制目标为

$$\begin{cases} E_{1d} = \frac{p_{1d} V_{1d}}{k-1} = \frac{p_{1d} A_p (s - z_{1pd} + z_{10})}{k-1} \\ E_{2d} = \frac{p_{2d} V_{2d}}{k-1} = \frac{p_{2d} A_p (z_{1pd} + z_{20})}{k-1} \end{cases} \quad (13)$$

其中 E_{1d}, E_{2d} 为上下腔气体内能的期望值, p_{1d}, p_{2d} 为上下腔气体压力的期望值, z_{1pd} 为活塞位置的期望值.

腾空阶段气缸活塞相对于缸筒静止时, 其上下腔气体压力相差很小, 因此在设定上下腔内能的控制目标时, 需要满足

$$p_{1d} = p_{2d} \quad (14)$$

能量控制策略采用的控制方法是通用的 PD 控制, 由于上下腔的控制方程类似, 下面只列出上腔的控制方式, 下腔的控制方程不再赘述.

$$\begin{cases} e_1(i) = E_{1d} - E_1(i) \\ u_1(i) = u_0 + K_{p1} e_1(i) + K_{d1} \frac{e_1(i) - e_1(i-1)}{T} \end{cases} \quad (15)$$

其中, K_{p1} 为比例环节放大系数, K_{d1} 为积分环节放大系数, T 为采样周期.

由于比例阀的控制信号电压范围为 $0 \sim 10V$, 对控制信号电压进行修正得

$$u_1 = \begin{cases} 10V, & u_1 \geq 10V \\ u_1, & 0 < u_1 < 10V \\ 0, & u_1 \leq 0 \end{cases} \quad (16)$$

2.3.3 腾空阶段能量控制策略可行性研究

气动弹跳腿在腾空阶段, 由于活塞杆受到较大的摩擦阻尼作用, 在短时间内活塞杆相对弹跳腿机身静止, 此时参数 z_{1p} 的一次微分及二次微分值为 0, 即

$$\begin{cases} \dot{z}_{1p} = 0 \\ \ddot{z}_{1p} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

将式 (9) 中的活塞位置的动力学方程代入上式, 并进行化简整理可得

$$\begin{cases} \dot{z}_{1p} = 0 \\ (p_2 - p_1) A_p = F_{f2} - \frac{m_L F_{f1}}{m_B + m_L} \end{cases} \quad (18)$$

将内能的表达式 (12) 代入上式, 对其进行整理变形可得

$$\begin{cases} \dot{z}_{1p} = 0 \\ \frac{E_2(k-1)}{z_{1p} + z_{20}} - \frac{E_1(k-1)}{s - z_{1p} + z_{10}} = F_{f2} - \frac{m_L F_{f1}}{m_B + m_L} \end{cases} \quad (19)$$

当摩擦力 F_{f1}, F_{f2} 及质量比 $m_L/(m_L + m_B)$ 很小的时候, 由式 (18)–式 (19) 可得

$$\begin{cases} p_1 = p_2 \\ z_{1p} = \frac{E_2 s + E_2 z_{10} - E_1 z_{20}}{E_1 + E_2} \end{cases} \quad (20)$$

当活塞相对于气缸缸筒处于静止状态, 且达到内能的控制目标时, 由式 (12)–式 (20) 可得

$$\begin{cases} p_1 = p_2 = p_d \\ z_{1p} = \frac{E_{2d} s + E_{2d} z_{10} - E_{1d} z_{20}}{E_{1d} + E_{2d}} = z_{1pd} \end{cases} \quad (21)$$

由上式可以看出, 通过控制上下腔气体的内能够较精确地同时控制上下腔气体的压力及活塞的位置, 摩擦力越小, 气缸活塞杆相对于机身的质量越小, 控制精度越高.

3 仿真研究 (Simulation analysis)

仿真数据主要通过实际测量、参照产品手册获得. 机械系统的模型参数为: $m_B = 23.535 \text{ kg}$, $m_L = 1.277 \text{ kg}$, $A_p = 1649.34 \text{ mm}^2$, $s = 0.25 \text{ m}$, $F_{sf1} = 10 \text{ N}$, $F_{df1} = 5 \text{ N}$, $\eta_1 = 5 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, $F_{sf2} = 30 \text{ N}$, $F_{df2} = 15 \text{ N}$, $\eta_2 = 50 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, $z_{10} = z_{20} = 0.06 \text{ m}$. 比例阀的模型参数为: $\omega = 12.5664 \text{ mm}^2/\text{mm}$, $k_v = 0.8 \text{ mm/V}$, $\tau_v = 4.8 \times 10^{-3} \text{ s}$, $C_d = 0.1$, $b = 0.23$. 控制系统的主要参数为: $K_{p1} = K_{p2} = 0.035 \text{ V/J}$, $K_{d1} = K_{d2} = 1 \times 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{s/J}$, $T = 1 \times 10^{-3} \text{ s}$, $\delta(t_3 - t_2) = 0.06 \text{ s}$. 气源气体的主要参数为: $T_s = 293.15 \text{ K}$, $p_s = 0.6 \text{ MPa}$, $R = 287.1 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

3.1 气动弹跳腿稳定跳跃研究

图 5 为气动弹跳腿机身质心运动相平面图, 其中腾空阶段的控制目标为 $p_{1d} = p_{2d} = 0.4 \text{ MPa}$, $z_{1pd} = 0.09 \text{ m}$, 仿真时间为 $0 \sim 5 \text{ s}$. 曲线运动方向为逆时针, 且逐渐趋于封闭, 即弹跳腿达到一定高度以后开始周期性地稳定跳跃.

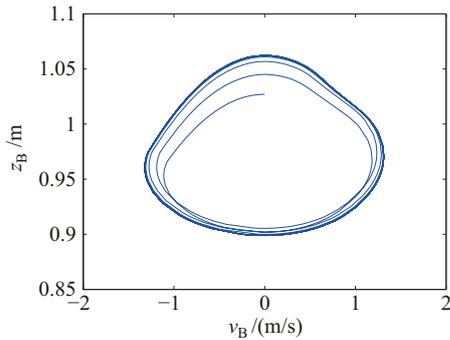


图5 气动弹跳腿机身质心相平面图

Fig.5 Phase trajectories of body mass center in simulation

图6为气动弹跳腿跳跃过程中能量的变化,由于机身相对于弹跳腿足部活塞杆的质量比 $m_B/m_L = 18.43$,因此弹跳腿在腾空阶段活塞杆运动对机身产生的影响较小,图6中机身的机械能未产生波动。

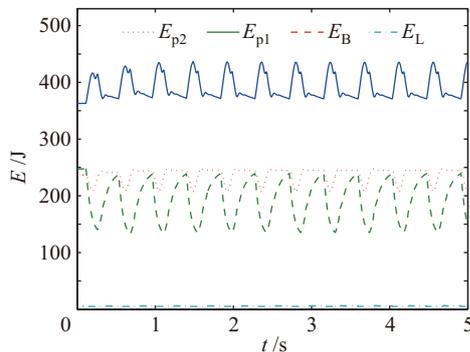


图6 气动弹跳腿能量变化图

Fig.6 Energy changes of the pneumatically actuated leg

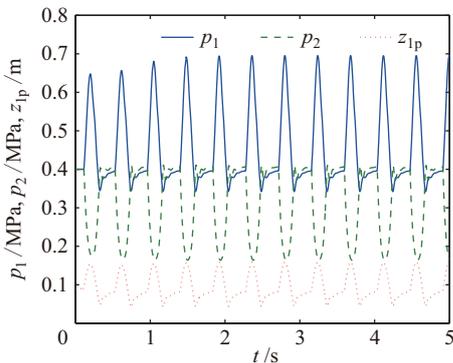


图7 气动弹跳腿运动参数变化图

Fig.7 Changes of dynamic parameters of the pneumatically actuated leg

图7为气动弹跳腿跳跃过程中的气动参数变化曲线.缓冲压缩阶段气缸上腔封闭,机身减小的机械能大部分转化为上腔气体的内能,且气缸上腔容积变小,气体压力增大,上腔气体压力瞬时超过气源气压.腾空阶段,通过PD控制算法对弹跳腿的活塞位置及上下腔气体压力进行调节,控制效果较为理想。

3.2 气动弹跳腿腾空阶段研究

气动弹跳腿在腾空阶段采用PD控制策略实现气体压力和活塞位置的同时控制,引起弹跳腿活塞杆的伸缩.腾空阶段控制的气体压力主要影响缓冲压缩阶段气动弹跳腿机身缓冲的位移,常控制到某一设定值^[1,6],因此设定气体压力的控制目标为 $p_{1d} = p_{2d} = 0.4\text{MPa}$.

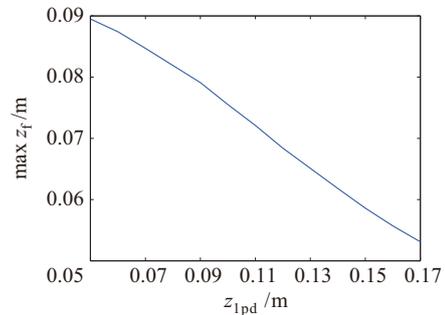


图8 腾空阶段活塞位置对气动弹跳腿跳跃高度的影响

Fig.8 Influence of piston position on hopping height of the pneumatically actuated leg during flight phase

图8为腾空阶段设定活塞位置对气动弹跳腿跳跃高度的影响规律,随着活塞设定位置的增加,气动弹跳腿的跳跃高度逐渐减小.气缸上腔气体体积随着活塞设定位置的增大而减小,缓冲压缩结束时刻 t_2 上腔气体压力较大,根据流量方程(式(5)、(6)),上腔较难在起跳加压阶段充入高压气体,不利于能量的补入,故跳跃高度减小.仿真中多次改变压力控制目标,活塞位置对弹跳腿高度影响规律不变。

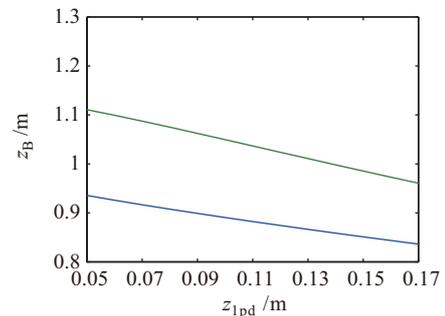


图9 腾空阶段活塞位置对气动弹跳腿机身质心的影响

Fig.9 Influence of piston position on body mass center of the pneumatically actuated leg during flight phase

图9为气动弹跳腿活塞设定位置对机身质心的影响规律,上边的曲线为弹跳腿质心运动过程中达到的最大值,下边的曲线为达到的最小值.随着活塞设定位置的增大,机身质心的运动范围逐渐降低,主要是由于弹跳腿跳跃高度降低,以及活塞设定位置增大降低了弹跳腿机身的整体质心,弹跳腿腿长变短。

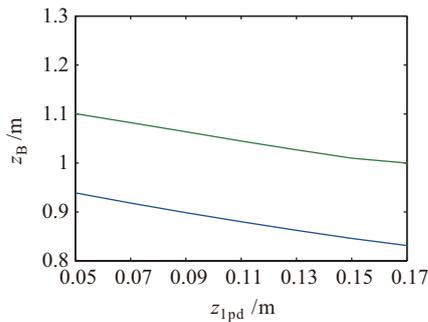


图 10 0.08 m 稳定跳跃高度下活塞位置对气动弹跳腿机身质心运动范围的影响
 Fig.10 Influence of piston position on body mass center of the pneumatically actuated leg at 0.08 m hopping height during flight phase

图 10 为腾空阶段不同的活塞设定位置下, 通过改变起跳加压的时间保证弹跳腿 0.08 m 的稳定跳跃高度的曲线. 在同等跳跃高度下, 活塞设定位置越大, 机身质心运动范围越低.

通过改变腾空阶段活塞的设定位置, 调节气动弹跳腿的跳跃高度, 可以补充通过控制充放气时间来改变其跳跃高度的控制方式^[1]. 通过调节活塞的设定位置, 可以在同等跳跃高度下, 降低弹跳腿机身质心的运动范围, 提高稳定性.

4 试验研究 (Experimental analysis)

4.1 气动弹跳腿试验平台的搭建

在对气动弹跳腿进行了理论研究和仿真模拟之后, 根据气动弹跳腿的性能要求, 搭建了气动弹跳腿试验平台, 通过与仿真研究的结果进行对比分析, 对仿真结果进行试验验证, 如图 11 所示. 其中气源压力为 $p_s = 0.6 \text{ MPa}$, 充气加压时间为 0.05 s, 腾空阶段压力控制目标为 0.4 MPa, 活塞位置控制目标为 0.09 m.



图 11 气动弹跳腿试验平台

Fig.11 Experimental platform of the pneumatically actuated leg

4.2 气动弹跳腿试验

图 12 选取的是弹跳腿稳定跳跃时动态参数值. 从图中可以看出, 气缸上下腔气体压力及活塞位移处于周期性运动状态, 表明弹跳腿处于稳定的周期性跳跃, 且在腾空阶段接近设定的压力和活塞位置控制目标, 误差较小, 表明控制方法的有效性.

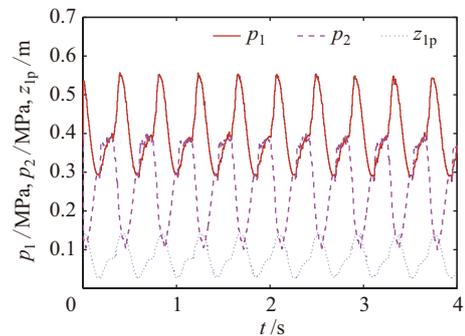


图 12 气动弹跳腿动态参数试验曲线

Fig.12 Experimental curves of dynamic parameters of the pneumatically actuated leg

图 13 中实线为仿真曲线, 虚线为试验曲线. 为了便于对比分析, 仿真曲线与试验曲线触地时刻的时间均设为 0, 且均选取其稳定后的一个跳跃周期. 从图 13 可以看出, 仿真曲线与试验曲线的趋势实现了较好的吻合, 在触地阶段上腔压力高于试验值, 是由于仿真时没有考虑气缸在运动过程中气体的泄漏.

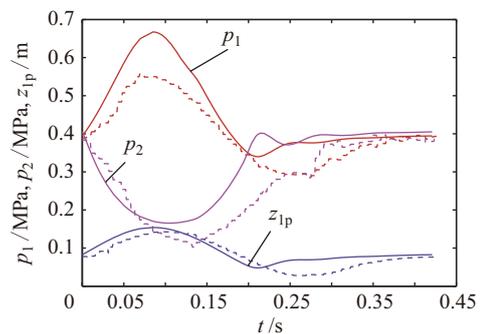


图 13 单个周期内仿真曲线与试验曲线

Fig.13 Experimental and simulation curves in a hopping cycle

5 结论 (Conclusion)

本文提出了基于气缸上下腔压力差实现气动弹跳腿离地跳跃的控制方法, 避免了离地跳跃时活塞杆与机身的碰撞产生的系统震动和能量损失. 提出了基于能量调节来控制气动弹跳腿腾空阶段压力和活塞杆位置的方法, 该方法实现了弹跳腿腾空阶段活塞杆的伸缩 ($t_4 \sim t_5$), 增大了弹跳腿跳跃高度; 实现了同等跳跃高度下机身质心运动范围的调节, 通

降低机身质心运动范围, 增强运动的稳定性; 同时, 对于通过调节充气加压时间来改变弹跳腿跳跃高度的控制方法, 该方法也可以起到补充作用. 未来将在弹跳腿水平及自由跳跃^[1]运动中进行研究应用.

参考文献 (References)

- [1] Raibert M H. Legged robot that balance[M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1986.
- [2] Raibert M H, Chepponis M, Brown Jr H B. Running on four legs as though they were one[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986, 2(2): 70-82.
- [3] Raibert M H, Brown Jr H B, Chepponis M. Experiments in balance with a 3D one-legged hopping machine[J]. International Journal of Robotics Research, 1984, 3(2): 75-92.
- [4] Naik K G, Mehrandehz M. Control of a one-legged hopping robot using an inverse dynamic-based PID controller[C]// Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 770-773.
- [5] Alexander R M. Three uses for springs in legged locomotion[J]. International Journal of Robotics Research, 1990, 9(2): 53-61.
- [6] 赵明国, 裘有斌, 陈向, 等. 单足气动跳跃机器人的基于时间事件控制方法 [J]. 机器人, 2012, 34(5): 525-530.
- Zhao M G, Qiu Y B, Chen X, et al. Control algorithm based on time event for a pneumatic single-legged hopping robot[J]. Robot, 2012, 34(5): 525-530.

- [7] 吴振顺. 气压传动与控制 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999.
- Wu Z S. Pneumatic drive and control[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1999.
- [8] 李建藩. 气压传动系统动力学 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1991.
- Li J F. Dynamics of pneumatic drive system[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1991.
- [9] Karpenko M, Sepeshri N. Design and experimental evaluation of a nonlinear position controller for a pneumatic actuator with friction[C]//American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 5078-5083.
- [10] Richer E, Hurmuzlu Y. A high performance pneumatic force actuator system. Part-I. Nonlinear mathematical model[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2000, 122(3): 416-425.
- [11] Richer E, Hurmuzlu Y. A high performance pneumatic force actuator system. Part-II. Nonlinear controller design[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2000, 122(3): 426-434.

作者简介:

- 李 哲 (1961-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 气动技术基础理论, 仿生机器人技术, 机电一体化装备.
- 苏兴旺 (1987-), 男, 硕士生. 研究领域: 足式机器人, 气动位置伺服技术.

(上接第 305 页)

- [8] van Dorsser W D, Barents R, Wisse B M, et al. Gravity-balanced arm support with energy-free adjustment[J]. Journal of Medical Devices, 2007, 1(2): 151-158.
- [9] Lu Q, Ortega C, Ma O. Passive gravity compensation mechanisms: Technologies and applications[J]. Recent Patents on Engineering, 2011, 5(1): 32-44.
- [10] Ulrich N, Kumar V. Passive mechanical gravity compensation for robot manipulators[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1991: 1536-1541.
- [11] Banala S K, Agrawal S K, Fattah A, et al. Gravity-balancing leg orthosis and its performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(6): 1228-1239.
- [12] Rizk R, Krut S, Dombre E. Design of a 3D gravity balanced orthosis for upper limb[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 2447-2452.
- [13] Agrawal S K, Fattah A. Gravity-balancing of spatial robotic manipulators[J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(12): 1331-1344.
- [14] 杨明远, 孙汉旭, 贾庆轩, 等. 七自由度空间机械臂避障路

径规划方法 [J]. 航天器工程, 2011, 20(4): 65-71.

- Yang M Y, Sun H X, Jia Q X, et al. Research on path planning for 7-DOF space manipulator to avoid obstacle[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(4): 65-71.
- [15] Herder J L. Energy-free systems, theory, conception and design of statically balanced spring mechanisms[D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2001.
- [16] 卢志辉, 孙志扬, 李祥云, 等. 高精度质心测量方法研究 [J]. 兵工学报, 2009, 30(12): 1748-1752.
- Lu Z H, Sun Z Y, Li X Y, et al. Research on high precision measurement of centroid[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(12): 1748-1752.

作者简介:

- 叶 平 (1979-), 男, 讲师, 博士. 研究领域: 空间机器人容错控制, 移动机器人视觉定位.
- 何 雷 (1988-), 男, 硕士生. 研究领域: 空间机器人微重力补偿, 宇航员失重训练.
- 宋 爽 (1989-), 女, 硕士生. 研究领域: 空间机器人微重力补偿, 宇航员抗阻力训练.