DOI: 10.3901/JME.2020.23.034

一种稳定跳跃型机器人的设计与空中姿态控制*

陈子明^{1,2} 卢杰^{1,2} 邓朋^{1,2} 郭玉^{1,2} 李艳文^{1,2}

(1. 燕山大学河北省并联机器人与机电系统实验室 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

摘要: 针对现有跳跃机器人跳跃时空间姿态旋转问题,从结构与运动控制上入手,设计一种稳定跳跃型机器人。基于弹簧倒立摆跳跃模型在平行四杆机构的基础上设计了一种新型八连杆机构,并利用离合式行星轮结构设计了一种靠卷绳实现能量蓄积与释放装置。利用拐点圆及最小残差理论对末端轨迹进行了近似直线优化处理,并建立了跳跃结构的运动学、动力学模型,进行了跳跃仿真测试。设计了基于模糊PID控制理论的双闭环反馈控制系统,并搭建联合仿真模型从结构动力学及姿态控制系统上进行整体仿真测试。结果表明机器人具备结构上的稳定起跳基础,并通过空中姿态控制实现跳跃后稳定姿态的保持,整体实现了稳定跳跃。

关键词: 跳跃机器人; 八连杆; 轨迹优化; 联合仿真; 姿态调控

中图分类号: TP242

Design and Attitude Control of a Stable Jumping Robot

CHEN Ziming^{1,2} LU Jie^{1,2} DENG Peng^{1,2} GUO Yu^{1,2} LI Yanwen^{1,2}

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Parallel Robot and Mechatronic System, Yanshan University,

Qinhuangdao 066004;

2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: In order to solve the problem of space attitude rotation of jumping robot, a stable jumping robot is designed from the aspects of structure and motion control. According to the basic jump model of spring inverted pendulum, a new type of eight link mechanism is designed based on the parallel four-bar mechanism, and an energy storage and release device is designed by using the clutch planetary wheel structure. The approximate straight-line optimization of the end track is carried out by using the theory of inflexion circle and minimum residual error. The simplified kinematics and dynamics model of the eight link mechanism is established, and the jumping simulation test is carried out. A double closed-loop feedback control system based on fuzzy PID control theory is designed, and a joint simulation model is built to simulate and test the whole structure dynamics and attitude control system. The test shows that the robot has a stable take-off basis in structure, and the stable attitude is maintained after the jump through the air attitude control, and the whole stable jump is realized.

Key words: jumping robot; eight link mechanism; trajectory optimization; co-simulation; attitude control

0 前言

随着人类活动范围的不断扩大,对非结构地形的探索需求更加明显,因此各种运动形式的机器人应运而生。在这些非结构地形运动的机器人中跳跃机器人无疑是研究的热点。跳跃运动^[1]更加贴合微

小型自然生物的运动特性,依靠短时爆发的能量实现对身长数倍障碍物的翻越,为新型机器人的发展提供了方向。现存在跳跃机器人多侧重于新型跳跃结构、驱动原理及跳跃性能上,对稳定起跳及空中姿态控制研究较为匮乏^[2]。近些年国内的张军等^[3]设计了一种基于凸轮驱动原理的跳跃机器人并进行动力学数值模型的分析。葛文杰等^[4]对三关节单腿欠驱动弹跳机器人进行了研究。ZAITSEV等^[5]设计了一种能够跳跃3.35 m高的仿蝗虫跳跃机器人,LI等^[6]利用双弹性片与弧形腔体设计了一种可连续

* 国家自然科学基金(51775474)和河北省重点研发计划(19221909D)资助项目。20200504收到初稿,20200720收到修改稿

跳跃的跳跃机器人。BHUSHAN 等^[7]设计了一种利用激光完成能量的输入,通过微型电动机驱动的超微型跳跃机器人,极大缩小了机器人的体积与重量。近些研究也有通过复合运动来实现稳定跳跃的,如北京航空航天大学的陈殿生等^[8]设计了跳跃后可翻转的爬行机器人,间接抵消了跳跃运动引起了姿态翻转的影响。西北工业大学的鲍延年^[9]设计了一种通过滑翔运动提高跳跃性能的折叠翼弹跳机器人,通过折叠翼的空中滑翔实现姿态稳定的同时提高运动性能。首尔国立大学和加州大学^[10]的开发人员研发出一种新型爬行跳跃机器人,通过特定机构实现跳跃后姿态的翻转。

跳跃机器人的稳定跳跃是其可控性的首要前提,现有跳跃机器人多存在起跳不稳、空中姿态不可控等问题对实际应用化影响较大。因此,本文通过对影响跳跃机器人跳跃稳定性影响因素的分析,设计出一种新型的稳定跳跃型机器人。

1 结构设计

1.1 稳定起跳原理分析

较为常见的跳跃机器人大多对跳跃生物结构进行了仿生设计,在结构上属于两杆式结构。常见的跳跃生物如蝗虫、跳蚤及沫蝉等均依靠其连杆型跳跃后肢进行跳跃,均存在空中姿态旋转问题。如图 1a 所示,对常见的连杆型跳跃机器人可用简化模型进行表示。机器人在运动时地面作用力与质心运动方向不一致使得着地起跳过程中角动量持续蓄积,最终在进入腾空阶段发生较大的姿态翻转^[11]。实际研究中发现,越接近弹簧倒立摆的理论模型,跳跃机器人就会拥有较好的初始稳定性,有利于空中的姿态稳定性调节。因此若能实现对机器人施加方向始终不变的作用力,则会使机器人在跃入空中时的角动量几乎为零,从而实现空中的姿态稳定,如图 1b 所示。

图 1 跳跃简化模型

1.2 基本结构设计

为了设计出符合图 1b 跳跃模型的结构,需要保

证机身末端整体做直线运动,整个运动形式类似于直线弹射。在现有的机构中发现,平行四连杆机构具备类似的运动特性,这为设计具备稳定跳跃结构提供了思路。平行四连杆运动示意图如图 2 所示,平行四连杆机构为单自由度平面机构,通过驱动其中一个连杆可实现末端杆与机架始终平行的运动。

图 2 平行四连杆

平行四连杆机构利用特殊的结构实现了末端杆与机架杆的姿态始终一致,但末端杆整体上为一种弧形运动。实际设计需求为一种末端杆的整体直线运动,因此为实现这种运动可叠加一个反向运动的平行四连杆从而互补弧形运动形成一种近似直线运动,具体设计如图 3 所示,最终形成一种末端摆动较小的八连杆机构从原理上满足直线跳跃模型。

图 3 八连杆机构

1.3 蓄能与释放结构设计

为了实现跳跃高度的可控性,采用绳驱动以及行星轮释放机制,具体结构及原理如图 4 所示。电动机正转时通过传动齿轮带动卷绳轮转动,实现绳牵引蓄能;电动机反转会通过单向轴承的作用将行星架带动,使行星架上的传动齿轮与卷绳轮脱离,实现能量的释放。这种反向分离式结构实现了一种离合式能量蓄积与释放的方式,为机器人跳跃高度调节适应多场景工况提供了便利。

图4 蓄能与释放结构

扭簧与绳索设置如图5所示,采用绳驱动可实现较大扭转力矩从而减小对电动机的驱动要求。扭簧的设置不仅实现了能量的蓄积,同时对落地后起到了一定缓冲作用,减少对零部件的碰撞冲击。

图5 绳索与扭簧设置

2 末端轨迹优化

2.1 拓扑结构分析

平行连杆机构可实现末端连杆整体的平移无转动,但实际的运动中仍可能存在弧形的轨迹,使得质心的运动轨迹不规律,因此需要对末端轨迹进行优化。

跳跃机器人的基本结构为平行八连杆结构,连接较为复杂,为便于研究此结构特性使用拓扑图的形式表达。如图6所示,拓扑结构图中圆点表示杆件,直线代表杆件间的连接关系。

图6 运动链拓扑图转化

优化轨迹为杆7的运动轨迹,杆7的运动轨迹中包含杆6与杆8末端的轨迹。从运动链拓扑图中分别查找包含机架1与杆6、机架1与杆7、机架1与杆8的最小运动链环路^[12]。如图7所示,包含机架1与杆6的最小环路序列为[15641],包含机架1与杆7的最小环路序列为[1567821],包含机架1与杆8的最小环路序列为[1567821]。

图7 包含末端点及机架的最小环路

通过对比图7中三个最小环路发现,包含机架与末端轨迹点的最小环路为图7a所示,基本结构为普通四连杆机构。八连杆机构末端的轨迹优化可简化为普通四连杆机构的末端轨迹优化,如图8所示。

图8 基本优化结构转化

整体的优化过程先将八连杆简化为普通的四连杆机构,对普通的四连杆机构进行末端轨迹运动点的近似直线优化,然后通过平行四连杆机构实现八连杆机构末端连杆整体相对于固定连杆的平行直线移动。

2.2 拐点圆优化原理

四杆机构末端轨迹的近似直线优化采用拐点圆理论^[13]进行设计。对四连杆末端运动杆上一点A建立如图9所示的坐标系,推导拐点圆公式。

图9中P为A点所在连杆的速度瞬心, π_0 为定瞬心线, π_1 为动瞬心线,A点的运动轨迹为 δ , O_A 为A点处的瞬时曲率中心, ω 为连杆角速度, α 为连杆角加速度, v_P 为瞬心P沿定瞬心线 π_0 移动的速度。 v_A 为A点的速度。 f 为拐点圆,K为拐点圆上一点且PK所在直线垂直于速度 v_P 的方向,A点与瞬心P连线交 f 于点 J_A 。A点处的法向加速度为 a_n 。

图 11 不同 θ_1 角度对应的杆长

在特定的 l_4 杆长下, 变化的 θ_1 角度会产生一系列的末端运动轨迹点, 将这些点连接起来就构成了机构末端的运动轨迹。为得到最佳的近似直线运动轨迹, 对不同 l_4 杆长下的末端运动轨迹点进行直线程度及直线运动距离的评估, 挑选出最合适的 l_4 杆长。

末端运动轨迹点直线程度采用最小残余误差原理进行评估。残余误差可表示为离散运动点到拟合运动直线在垂直坐标方向上的距离平方和, 残余误差越小表示直线程度越高。

基于最小二乘估计法得出的最小残余误差计算公式为

$$D = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - b \cdot x_i)^2 \quad (11)$$

式(11)中参数 a 、 b 满足式(12)

$$\begin{cases} a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - b \cdot \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - \sum_{i=1}^n (x_i) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i)}{\sum_{i=1}^n (x_i^2) - \sum_{i=1}^n (x_i) \cdot \sum_{i=1}^n (x_i)} \end{cases} \quad (12)$$

在上述基础上计算不同杆长值 l_4 对应的最小残余误差 D , 如图 12 所示。根据残余误差及杆长大小可大致分为三部分, 第一个部分残差较小但同时杆长也较小对后续机身结构安装较为不便并且对后续运动结构容易产生干涉, 第二部分残差较大证明其末端轨迹的直线度较差, 第三部分残差较小且杆长合适满足后续机身结构的安装需求。因此通过对末端轨迹直线度的判断排除了一些性能较差的杆长值, 此部分杆长值 l_4 分布为 25~33.5 mm。

图 12 残差分布

在满足较高直线度的情况下, 需要对剩余杆长值对应的轨迹进行直线长度的评估。直线长度的评

估方法为运动开始时末端点到运动结束时末端点的距离。计算公式如式(13)所示

$$L = \sqrt{(x_n^2 - x_1^2) + (y_n^2 - y_1^2)} \quad (13)$$

利用 Matlab 进行计算可得不同杆长值 l_4 对应的末端近似直线运动的轨迹长度, 如图 13 所示。计算结果表明在末端轨迹直线度较好的杆长范围中, 杆长越长对应的近似直线运动距离越长, 最终优选结果为 33.5 mm, 为方便设计制作将 l_4 参数圆整为 34 mm。

图 13 不同杆长对应的近似直线距离

为避免运动干涉同时使得末端连杆在运动时整体沿着连杆长度方向进行运动, 对优化后的四连杆机构进行一个较小角度的偏转, 偏转角度为末端对轨迹点进行直线拟合后与纵坐标的夹角, 最终整体构型变化如图 14 所示。

图 14 优化结果

3 动力学模型及仿真

3.1 基本运动学方程的建立

建立如图 15 所示的坐标系, 并将连杆机构进行简化表达。图中 $NABE$ 所在的杆件为机架杆, 机架杆与坐标系固连, 其余连杆会与机架杆发生相对运动。 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 、 l_6 、 l_7 、 l_8 、 r_1 、 r_2 表示各杆件的长度, α 表示机架杆与水平面间的夹角, β 为扭簧作用的角度, r_1 、 r_2 、 θ_1 为辅助计算所需的角, m 为辅助线。

使用平面几何法完成八连杆结构的运动学建模, 杆件端点 G 、 H 坐标表示如式(14)所示

图 15 运动学模型

$$\begin{cases} x_G = y_n + (r_1 + l_1) \cos(\alpha) - l_4 \cos(\alpha + \theta_1) + \\ \quad l_7 \cos(\alpha + \theta_1 - \beta) \\ y_G = y_n + (r_1 + l_1) \sin(\alpha) - l_4 \sin(\alpha + \theta_1) + \\ \quad l_7 \sin(\alpha + \theta_1 - \beta) \\ x_H = x_n + r_1 \cos(\alpha) - l_2 \cos(\alpha + \theta_1) + \\ \quad l_6 \cos(\alpha + \theta_1 - \beta) \\ y_H = y_n + r_1 \sin(\alpha) - l_2 \sin(\alpha + \theta_1) + \\ \quad l_6 \sin(\alpha + \theta_1 - \beta) \end{cases} \quad (14)$$

由几何关系可得式(15)~(18)

$$m = \sqrt{l_4^2 + r_2^2 - 2l_4r_2 \cos(\pi - \beta)} \quad (15)$$

$$\gamma_1 = \arccos\left(\frac{l_4^2 + m^2 - r_2^2}{2l_4m}\right) \quad (16)$$

$$\gamma_2 = \arccos\left(\frac{r_3^2 + m^2 - l_5^2}{2r_3m}\right) \quad (17)$$

$$\theta_1 = \eta_1 + \gamma_1 + \gamma_2 \quad (18)$$

图 15 中 β 表示为驱动角度，参考实际扭簧角度设置驱动范围大小为 120° 。对应的 β 角的变化与末端点 G 在的 x 、 y 方向上的位移如图 16 所示。从图中可看出在驱动角度范围内，末端点 G 在的 x 、 y

图 16 驱动角度与末端轨迹

方向上的位移呈近似直线状。又由于平行四杆机构机架与末端杆件平行运动的特性，杆件 GH 整体沿着杆件长度方向做近似直线运动。

3.2 动力学模型

机器人基本结构几何约束较多，进行动力学建模时构建方程数过多会造成求解过程复杂、计算量大、无解析解等问题，因此采用简化模型进行动力学模型的构建。简化的跳跃机器人模型在跃入空中后做具备初始速度的斜抛运动，跳跃过程可分为起跳阶段和腾空阶段两个阶段。

(1) 起跳阶段。

跳跃机器人在起跳阶段将蓄积的弹性势能向动能进行转化。扭簧弹性势能的大小与扭簧角度有关。扭簧的扭矩如式(19)所示

$$M = \frac{E \cdot d^4}{3660 \cdot D_m \cdot N} \cdot \Delta\beta \quad (19)$$

式中， E 表示扭簧材料的弹性模量， d 为扭簧的线径， D_m 为中径， N 为扭簧的圈数， $\Delta\beta$ 为扭簧转动角度。

为简化表达，令

$$k = \frac{E \cdot d^4}{3660 \cdot D_m \cdot N} \quad (20)$$

则扭簧的弹性势能表达式

$$E = M \cdot \Delta\beta = \int_0^{\Delta\beta} k \beta d\beta = \frac{1}{2} k (\Delta\beta)^2 \quad (21)$$

在忽略能量损失的情况下，由能量的转化原理可得起跳段机器人最终的速度大小为

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{k(\Delta\beta)^2}{m}} = \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot \Delta\beta \quad (22)$$

最终速度的方向与地面作用力方向一致，即图 15 中杆 l_1 方向，与地面间夹角为 α 。

(2) 腾空阶段。

腾空阶段机器人作具备初始速度的斜抛运动，斜抛运动的初始速度大小为式(22)中的 v 。在忽略空气阻力的情况下，水平方向上做匀速直线运动，在竖直方向上受重力作用有一个竖直向下的重力加速度，做匀加速度运动，如式(23)所示

$$\begin{cases} v_x = v \cdot \cos(\alpha) \\ v_y = v \cdot \sin(\alpha) - g \cdot t \end{cases} \quad (23)$$

相应的在水平与竖直方向上的位移为

$$\begin{cases} x = v \cdot \cos(\alpha) \cdot t \\ y = v \cdot \sin(\alpha) \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \end{cases} \quad (24)$$

3.3 ADAMS 仿真分析

机器人简化动力学模型可体现跳跃的过程、能量间的转变及质心运动形式等,但在结构约束、地面接触作用等方面进行了忽略,使得跳跃运动较为理想化,因此利用 ADAMS 软件进行机器人跳跃过程的动力学仿真,分析在具体结构约束下跳跃的运动性能以及腾空阶段机器人姿态翻转情况。ADAMS 搭建如图 17 所示虚拟仿真模型。

图 17 动力学三维模型

仿真时设置机器人与地面间的具有接触碰撞作用,使用脚本命令取消电动机的作用来模拟释放结构的动作。蓄能阶段机身上对应末端点 G 的轨迹如图 18 所示,在忽略刚体因微小冲击带来的抖动下,机器人末端机身整体做近似直线运动,与图 16 所示一致。

图 18 末端机身近似直线位移

仿真后所得总质心位移以及腿部末端位移如图 19 所示。从图中可看出,腾空阶段整体质心做斜抛运动,腿部末端绕总质心波动,代表空中姿态的翻转。总质心的轨迹线与腿部末端的轨迹一致并且交叉较少,表明机器人空中跳跃时发生旋转的次数较少具备良好的姿态稳定性。跳跃过程的姿态如图 20 所示,表明跳跃机器人空中旋转角动量较少,更具有空中姿态调控的可行性,同时从结构上验证了八连杆机构的运动有效性。

图 19 仿真结果

图 20 跳跃过程

质心在水平方向与竖直方向上的运动速度如图 21 所示。

图 21 质心速度

由图 21 可知机器人总体质心在腾空阶段水平方向的速度为恒定值,做匀速直线运动。总体质心在竖直方向上为匀加速度运动,受竖直方向上重力的作用先实现匀减速运动后实现匀加速运动。

4 空中姿态调控系统的搭建

4.1 姿态调控结构设计及分析

跳跃机器人依靠八连杆结构实现较为稳定的跳跃,跃入空中时旋转角动量较少,因此可设计空中姿态调整结构进行空中姿态稳定的调控。

参照卫星飞轮姿态控制结构设计了跳跃机器人

的飞轮杆结构，主体的结构设计如图 22 所示。

图 22 跳跃机器人姿态控制结构

依据跳跃机器人的机构方案，建立如下坐标系对飞轮杆系统角动量交换的研究。如图 23 所示，将坐标系建立在机器人本体的质心上，机器人本体质量为 m_1 ，绕 C_z 轴的转动惯量为 I_1 。距离质心距离 l 处为飞轮杆系统，设飞轮杆结构对称且质量集中在杆件末端，质量为 m ，绕自身转轴 l 的转动惯量为 I_2 。假设机器人本体绕 C_z 轴转动的角速度为 ω_1 ，飞轮杆相对于机器人绕 l 的转动角速度为 ω_2 。飞轮杆为对称式的结构，转动时质心始终在自身转轴 l 上，对整体系统的质心不产生影响。同时假设机器人不受外部干扰的作用，飞轮杆对机器人本体的作用力矩为 T_1 ，则对应的飞轮杆对机器人本体的反作用力矩为 $-T_1$ 。

图 23 飞轮杆角动量交换系统

在忽略外部干扰力矩的作用下，机器人整体满足角动量守恒条件^[14]。系统整体的角动量为

$$H = I_1 \cdot \omega_1 + I_2 \cdot (\omega_1 + \omega_2) + m_2 \cdot l_1^2 \cdot \omega_1 = I \cdot \omega_1 + I_2 \cdot (\omega_1 + \omega_2) \quad (25)$$

因为外部干扰力矩为零，则满足

$$\dot{H} = I \cdot \dot{\omega}_1 + I_2 \cdot (\dot{\omega}_1 + \dot{\omega}_2) = 0 \quad (26)$$

H_2 为飞轮杆相对于飞轮杆质心的角动量

$$H_2 = I_2 \cdot (\omega_1 + \omega_2) \quad (27)$$

根据动量矩定理，飞轮杆所受力矩为

$$\dot{H}_2 = -T_1 \quad (28)$$

因此可得

$$I_2 \cdot (\dot{\omega}_1 + \dot{\omega}_2) = -T_1 \quad (29)$$

则可得

$$I \cdot \dot{\omega}_1 = T_1 \quad (30)$$

由此可得，跳跃机器人空中姿态动力学方程为

$$\begin{cases} I \cdot \dot{\omega}_1 = T_1 \\ I_2 \cdot \dot{\omega}_2 = -T_1 \cdot (1 + \frac{I_2}{I}) \end{cases} \quad (31)$$

由式(31)可知，飞轮杆与跳跃机器人本体间姿态调整的本质为通过相互间的力矩的作用实现了角动量从跳跃机器人本体到飞轮杆系统间的转移。因此可通过对飞轮杆速度的调整实现相互作用力矩大小的调整，从而实现对跳跃机器人本体的角速度的调整。

4.2 反馈控制系统的搭建

跳跃机器人空间姿态控制主要分为两部分，一部分为空中姿态稳定调控，使得机器人本体在空间中的角速度为零，相对质点保持静止。另一部分为角度调控，辅助跳跃机器人在姿态稳定的情况下通过对角度的微调实现姿态摆正。针对这两部分的控制可分别设置速度反馈与位置反馈控制，通过控制飞轮杆机构的角动量实现跳跃机器人姿态的控制，反馈控制系统的基本结构如图 24 所示。

图 24 双路 PID 闭环反馈控制系统结构

跳跃运动因为能量的爆发性使得稳定性较差，因此为提高整体系统的适应性引入模糊控制理论^[15]。速度反馈控制是跳跃机器人的主要稳定控制环节，位置反馈控制属于对速度反馈的辅助调节，因此模糊控制的参数设定主要针对速度 PD 控制器。

本次采用 SIMULINK 中模糊控制工具箱进行模糊控制器的设计。设置模糊控制器的输入为偏差 e 及偏差变化率 e_c 。输出为速度控制器的控制参数 P 、 D 。偏差 e 的论域设置为 $[-0.5, 0.4]$ ，偏差变化率 e_c 的论域设置为 $[-0.1, 0.1]$ ，偏差 E 及偏差变化率

EC 的模糊子集设置为[NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB]。比例系数 P 及微分系数 D 的模糊子集为[NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB]，比例系数 P 的论域设置为[0.001, 0.011]，微分系数 D 的论域设置为[-0.000 1, 0.000 1]。

最终设计可得在偏差 e 及偏差变化率 e_c 的影响下比例系数 P 与微分系数 D 的取值曲面，如图 25、26 所示。

图 25 比例系数 P 取值曲面

图 26 微分系数 D 取值曲面

基于上述控制系统结构在 Simulink 中搭建整体的空中姿态控制系统，具体的控制结构如图 27 所示。

图 27 SIMULINK 控制系统结构

控制系统中有两个输入及一个输出，In1 为机器人本体角速度反馈输入，In2 为机器人本体空间角度反馈输入，Out1 为控制飞轮杆结构的力矩输出。

两个输入的比较对象均为零值，表示保持机器人本体在空中转动速度为零，始终保持初始时姿态角度值。图中 Subsystem 为直流电动机子系统模型，通过内部搭建的电动机数学模型将输入控制值转变为输出力矩，起到对飞轮杆电动机控制作用。

4.3 联合仿真分析

为便于对整体性能进行综合测试，联合 ADAMS 与 Simulink 对跳跃机器人进行结构与运动控制的仿真。使用 ADAMS 搭建跳跃机器人动力学结构模型，其系统的输入为扭簧的载荷扭矩与飞轮杆转动所需扭矩，输出为飞轮杆的转动角速度、机器人本体的转动角速度及相对于空间的机器人本体转动角度。

将 ADAMS 动力学模型导出为 Simulink 模块，同时将图 27 所示的反馈控制系统封装成 control_sub 子系统，并将所有的子系统输入输出进行相应的连接构成整体的控制系统结构，具体的联合仿真控制系统如图 28 所示。

图 28 联合仿真控制系统

图 28 中 ADAMS_sub 模块表示从 ADAMS 中导出的动力学模型。Signal 表示扭簧施加的载荷扭矩，用于模拟扭簧能量续集与快速释放的过程。

在 Simulink 中设置仿真时间为 2 s，仿真步长为 0.001 s，联合仿真模式为交互式界面仿真，0.005 s 交换一次仿真数据。仿真后，通过输出图像获得跳跃机器人相关的参数变化曲线，如图 29~31 所示。

图 29 机身本体角速度

图 30 机身本体偏转角度

图 31 飞轮杆转速

由图 29~31 可得, 在 0~1 s 内机器人本体的角度及转动的角速度会在末端杆件做近似直线运动时发生极小范围内的波动, 在 1 s 时刻机器人足端与地面发生力的相互作用, 本体角度与角速度发生较大突变, 1~1.1 s 内机器人为姿态调整阶段, 机器人本体快速保持本体稳定并进行微小调整实现空间角度偏转为零。之后 1.1~1.8 s 内保持空中的稳定姿态, 整体控制系统处于稳定状态。在 1.8 s 时角速度与角度发生较明显突变, 此时为机器人与地面接触发生碰撞作用。后续短暂时间内机器人实现了一定程度上的碰撞缓冲作用, 同时碰撞时扭簧吸收的能量释放能够使得机器人再次跃入空中。跳跃机器人空中的姿态及运动轨迹如图 32 所示。

图 32 跳跃轨迹

5 结论

(1) 完成了跳跃机器人基本结构设计。通过分析串联连杆式跳跃机器人不稳定跳跃原因, 利用平行四连杆运动原理设计了跳跃机器人本体的八连杆结构。

(2) 对八连杆结构进行了末端杆件运动轨迹的优化。通过对八连杆结构进行拓扑分析, 将目标优化结构简化为四连杆。基于拐点圆及最小残余误差分析原理优化了末端近似直线轨迹。建立了运动学及简化动力学模型, 并进行了三维仿真分析。

(3) 完成了空中姿态控制系统的设计。在八连杆结构的基础上设计了控制姿态调控的飞轮杆结构, 并基于模糊控制理论搭建了 PID 闭环反馈控制系统进行空中姿态的调控。搭建联合仿真系统对动力学结构、空中姿态控制系统进行了性能测试。结果表明此种机器人实现了稳定跳跃。

后续研究内容主要包括: 不同结构地形的跳跃分析; 起跳与落地碰撞分析; 落地缓冲及能量回收机理研究; 连续跳跃模式分析等。

参 考 文 献

- [1] 莫小娟, 葛文杰, 赵东来, 等. 微小型跳跃机器人研究现状综述[J]. 机械工程学报, 2019, 55(15): 109-123.
MO Xiaojuan, GE Wenjie, ZHAO Donglai, et al. Review: Research status of miniature jumping robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(15): 109-123.
- [2] 魏敦文, 葛文杰. 跳跃机器人研究现状和趋势[J]. 机器人, 2014, 36(4): 503-512.
WEI Dunwen, GE Wenjie. Research status and development trend of hopping robots[J]. Robot, 2014, 36(4): 503-512.
- [3] ZHANG J, SONG G, LI Y, et al. A bio-inspired jumping robot: Modeling, simulation, design, and experimental results[J]. Mechatronics, 2013, 23(8): 1123-1140.
- [4] 孟祥艳, 葛文杰. 欠驱动弹跳机器人最优运动姿态的驱动器配置[J]. 中国机械工程, 2017, 28(15): 1765-1770.
MENG Xiangyan, GE Wenjie. Actuator configuration of optimal motion posture for underactuated hopping robots[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(15): 1765-1770.
- [5] ZAITSEV V, GVIRSMAN O, BEN H U, et al. A locust-inspired miniature jumping robot[J]. Bioinspir

- Biomim, 2015, 10(6): 066012.
- [6] LI S, RUS D. JelloCube: A continuously jumping robot with soft body[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(2): 447-458.
- [7] BHUSHAN P, TOMLIN C. An insect-scale untethered laser-powered jumping microrobot[J]. Arxiv Preprint, 2019, 1(1): 1-6.
- [8] 陈殿生, 郑万军, 黄宇, 等. 弹跳机器人翻转机构的设计与优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(1): 17-23.
CHEN Diansheng, ZHENG Wanjun, HUANG Yu, et al. The design and optimization of a hopping robot's tipping mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 17-23.
- [9] 鲍延年, 蒋海义, 罗天洪, 等. 折叠翼弹跳机器人机构设计及运动性能分析[J]. 机器人, 2019, 41(2): 175-184.
BAO Yannian, JIANG Haiyi, LUO Tianhong, et al. Mechanism design and locomotion performance analysis of the foldable-wing jumping robot[J]. Robot, 2019, 41(2): 175-184.
- [10] JUNG G P, CASAREZ C S, LEE J, et al. JumpRoACH: A trajectory-adjustable integrated jumping-crawling robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(3): 947-958.
- [11] OKADA M, TAKEDA Y. Optimal design of nonlinear profile of gear ratio using non-circular gear for jumping robot[C]// 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2012: 1958-1963.
- [12] 黄鹏. 平面多环耦合机构构型综合理论与技术的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- HUANG Peng. Research on the synthesis theory and technology of planar multi ring coupling mechanism[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013.
- [13] 王允地, 王帅, 王良文, 等. 机构连杆点轨迹曲率研究及有关机构设计[J]. 机械传动, 2017(1): 131-136.
WANG Yundi, WANG Shuai, WANG Liangwen, et al. Research on the curvature of linkage point locus and the design of related mechanisms[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2017, 28(15): 1765-1770.
- [14] 李振. 轮式跳跃机器人设计及其弹跳性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
LI Zhen. Design of wheel jumping robot and Research on its jumping performance[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.
- [15] KUMAR A, KUMAR V. Evolving an interval type-2 fuzzy PID controller for the redundant robotic manipulator[J]. Expert Systems with Applications, 2017, 73: 161-177.

作者简介: 陈子明, 男, 1984 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为空间少自由度并联机构的设计和分析理论。

E-mail: chenzm@ysu.edu.cn

卢杰, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为跳跃机器人。

E-mail: lujie1994@foxmail.com

邓朋, 男, 1993 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为并联机器人的标定技术研究。

E-mail: dengp0927@foxmail.com

郭玉, 男, 1995 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为机器人运动控制。

E-mail: gajade@foxmail.com

李艳文(通信作者), 女, 1966 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为机器人技术及应用。

E-mail: ywl@ysu.edu.cn