[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.04.008

基于 RecurDyn 的 4 旋翼摆臂式清洗机器人设计

芦红利,闫 娟

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院,上海 201600)

摘 要:针对爬壁机器人越障过程产生的控制复杂和过程运动不连续的问题,课题组通过引入柔性关节,在机器人本体 上设计了摆臂越障机构及旋翼推力系统,并从运动学角度分析机器人攀爬障碍物时的运动机理,以及建立了机器人壁面 攀爬的运动学模型,计算出机器人在不发生失效形式下,旋翼电机理论输出转矩,绘制了旋翼电机输出转矩和壁面角度 变化的关系图,并利用 RecurDyn 软件对爬壁机器人越障过程进行运动学仿真,绘制出机器人重心高度的变化和时间关 系图。结果表明:机器人旋翼推力机构的吸附性能良好,机器人能够平稳地在壁面完成爬行和越障。

关 键 词:爬壁机器人;柔性关节;摆臂越障机构;旋翼推力系统;RecurDyn 软件

中图分类号:TP242;TH39 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2021)04-0039-05

Design of Four-Rotor Swing Arm Cleaning Robot Based on RecurDyn

LU Hongli, YAN Juan

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

Abstract: Aiming at the problem of the complex control and the discontinuity movement of the climbing robot obstaclenavigation process, the swing arm obstacle surmounting mechanism and the rotor thrust system was designed on the robot by introducing the flexible joint. The kinematics model of the robot was established by analyzing the motion mechanism of robot climbing obstacles from the aspect of the kinematics. The theoretical output torque of the rotor motor without failure was calculated and the relation diagram between the rotor motor output torque and the change of wall angle was drawn. Using the RecurDyn software, the kinematics simulation of the wall-climbing robot obstacle-navigation process was carried out, and the change and time relation diagram of robot center of gravity height was plotted. The result shows that the robot rotor thrust mechanism has good adsorption performance, and the robot can climb obstacles steadily on the wall. **Keywords:** wall-climbing robot; flexible joint; swing arm obstacle surmounting mechanism; rotor thrust system; RecurDyn

爬壁机器人作为极限作业机器人中的一个重要结构分支,在桥梁检测、高楼建筑的外墙清洗等领域具有 广阔的应用前景^[1]。工作中,爬壁机器人在安全吸附 的情况下,实现快速、平稳地移动,而且要对凸起、凹坑 和交叉面等复杂的壁面情况做出即时、有效的应对,也 是当今爬壁机器人研究领域的热点之一^[23]。

国内外关于爬壁机器人如何进行高效越障和吸附 做了长期的研究^[45],杨春等^[6]针对如何越过壁面障 碍物,设计了串联式轮足复合式爬壁机器人,通过机器 人的2足交替抬起实现对障碍物的跨越,但该机器人 越障效率低,越障控制复杂;董寒等^[7]研制的十字框 架爬壁机器人,通过固定在框架上的真空吸盘交替吸 附壁面进行移动,其运动缓慢且无法跨过较高的障碍; 冯伟博等^[8]研究了仿尺蠖爬壁机器人,该机器人具备 越障能力,但因为双足跨越式的越障方式,越障和移动 速度较慢。采用吸盘方式的 BPIPED 式关节机器人, 可以完成空间内的移动和越障,但吸盘负载能力有限, 无法提供稳定的作业平台;潘雷等^[9]提出依靠真空泵 产生负压完成吸附的功能,但是当吸附壁面环境复杂, 壁面凹凸不平时,吸附的稳定性大大下降;陈月强^[10] 设计的磁吸附履带式攀爬机器人,可以实现吸附和移 动功能,但是由于磁吸附使用环境限制,在越障方面的 能力较差。

针对目前爬壁机器人在越障方面控制复杂、运动

收稿日期:2020-11-14;修回日期:2021-05-25

第一作者简介:芦红利(1995),男,山西临汾人,硕士,主要研究方向精密检测与装备自动化。E-mail:1534815331@ qq. com

不连续的问题^[11],基于地面摆臂式机器人攀爬障碍物 原理,课题组设计了一种基于旋翼的摆臂式爬壁机器 人,对机器人越障过程进行运动学分析,研究了旋翼电 机输出转矩和壁面角度变化的关系,仿真实验对所设 计的机器人越障性能进行验证和分析,为爬壁机器人 实际开发应用和控制系统的设计提供了参考依据。

1 机械系统设计

机械系统的三维模型如图1所示,由推力机构、摆 臂机构、行走机构、车体等组成。为了实现机器人越障 及多变化姿态,2个摆臂均可进行360°旋转。机器人 主要由7个电机驱动,其中4个驱动旋翼叶片,2个驱 动机器人的左右主履带,1个驱动左前摆臂机构和右 前摆臂机构的共同运动。机器人上层布置的旋翼提供 机器人向上行进和越障过程中所需要的吸附力,同时, 2个摆臂机构通过套筒轴连接,使得2个摆臂机构的 旋转运动和2个主履带系统旋转运动互不干涉,从而 实现机器人在行进过程中对自身的姿态进行调整。





爬壁机器人前端与牵引绳索连接,通过外接电缆 来提供机器人所需的电力,使得机器人运行更加平稳 具有更大的承载能力,机器人可根据实际需求,扩展相 应的模块,如激光测距仪、摄像头、红外线热成像仪、清 洗模块和机械手等,以满足不同环境下,勘察、清洗墙 壁、救援和反恐等不同工作的需求,机器人基本参数如 表1所示。

表1 爬壁机器人结构参数

Table 1 Structural parameters of wall-climbing robot

部件	长/mm	宽/mm	质量/kg	转动惯量/(kg・m ²)
车体	400		12	0.001 5
摆臂机构	195		3	0.000 3
机器人		250		0.7800

2 爬壁越障性能分析

2.1 机器人的质心分布

如图 2 所示,以机器人的履带后轮轴心为原点,建 立坐标系 xO_1y ,前后履带轮轴心 O_1 和 O_2 的距离为 l_0 ,主车体质心 G_1 坐标为 (l_1,h_1) ,机器人主车体的质 量为 m_1 ,越过障碍物时,需要 2 摆臂同步旋转,设 2 个 摆臂的质量为 m_2 ,摆臂质心为 G_2 ,并处于 2 摆臂的中 心线 O_2O_3 上,履带前带轮轴心距摆臂质心 G_2 的长度 为 l_2 ,假设摆臂的 2 个履带轮轴心的距离为 l_3 ,2 摆臂 与壁面的夹角均为 θ ,且 $\theta \in [0,2\pi]$,假设机器人的宽 度为 b,主履带的带轮的半径为 R,摆臂履带轮的半径 为 r,都包含履带的宽度,则机器人质心 $G(x_c,y_c)$ 的坐 标为:

$$x_{c} = \frac{m_{1}l_{1} + m_{2}l_{0}}{m_{1} + m_{2}} + \frac{m_{2}l_{2}}{m_{1} + m_{2}}\cos\theta;$$

$$y_{c} = \frac{m_{1}h_{1}}{m_{1} + m_{2}} + \frac{m_{2}l_{2}}{m_{1} + m_{2}}\sin\theta_{\circ}$$

$$(1)$$

机器人的质心满足以下的关系式:

$$(x_{c} - \frac{m_{1}l_{1} + m_{2}l_{0}}{m_{1} + m_{2}})^{2} + (y_{c} - \frac{m_{1}h_{1}}{m_{1} + m_{2}})^{2} = (\frac{m_{2}l_{2}}{m_{1} + m_{2}})^{2} \circ$$
(2)

行走机器人质心的变化与摆臂的摆角 θ 的变化相关,质心的运动轨迹是以($\frac{m_1l_1 + m_2l_0}{m_1 + m_2}, \frac{m_1h_1}{m_1 + m_2}$)为圆 心, $r_0 = \frac{m_2l_2}{m_1 + m_2}$ 为半径的圆。







2.2 机器人越障能力分析

爬壁机器人攀爬障碍物的过程如图 3 所示。当前 方有障碍物出现,摆臂机构的电机驱动机器人双摆臂 逆时针旋转,使得摆臂前端高于障碍物;然后在履带的 驱动下,行走机构的主履带搭靠在障碍物的外角线上, 在行走机构电机推动下,机器人继续向前移动,摆臂机



图 3 机器人攀爬障碍物过程 Figure 3 Process of robot climbing obstacles

图 4 为机器人质心恰好跨越障碍物时外角线的状态。当机器人质心为机器人质心轨迹与障碍物外角线的垂线相切的切点时,最有利于机器人攀越障碍物。 当机器人的双摆臂处于水平状态时,机器人攀爬的障碍物高度为最大值。此时,机器人的仰角 α 和双摆臂 的摆臂角度 θ 关系为 $\alpha + \theta = 2\pi$ 。

$$H(l,h,\alpha) = R + l\sin\alpha + h\cos\alpha - \frac{h+R}{\cos\alpha}$$
(3)

式中:*R* 为主履带的带轮半径; α 为机器人的仰角; θ 为 双摆臂的摆臂角度; *H* 为障碍物高度; *l* 为机器人质心 的横坐标; *h* 为机器人质心的纵坐标。

将 $l = x_c$, $h = y_c$ 代入式(3), 得到此机器人最大攀 爬的障碍物高度 $H_{max}(\theta, \alpha)$ 。

$$H_{\max}(\theta, \alpha) = R + x_c \sin \alpha + y_c \cos \alpha - \frac{y_c + R}{\cos \alpha}$$
(4)



图4 攀爬障碍物时机器人质心 跨越障碍物外角线

Figure 4 Center of mass of robot crosses outer corner of obstacle when climbing obstacles forward

3 爬壁机器人动力学分析

爬壁机器人动力学性能必须满足 2 个条件:①爬 壁机器人能够在壁面完成行进和越障的功能;②爬壁 机器人在行进过程中保证不会发生滑移、机器人本体 反转倾覆等失效形式。

为了实现机器人在壁面平稳运行,如图 5 所示,旋 翼电机的输出转矩 *M_p* 必须克服牵引力产生的转矩 *M_L*,以及推力机构产生的吸附力 *F*₁ 和支持力形成的 转矩 *M_x* 和重力转矩 *M_c* 的作用,即满足下式:



图 5 机器人爬行模型 Figure 5 Robot crawling model

$$M_D + M_L - M_G - M_X = 0_{\circ}$$
 (5)

式中M_D为旋翼电机输出转矩。

壁面存在倾角,绳子拉紧时,机器人本体会产生一 定的角度,因此使得推力机构产生的吸附力不等于所 需要的吸附力。

$$M_L = F_Q l_1 \cos \beta; \tag{6}$$

$$M_G = GH_1 \cos \sigma_{\circ} \tag{7}$$

式中:G 为机器人受到的重力, l_1 为绳索和壁面之前的 距离, β 为牵引力和壁面之间的夹角, H_1 为重心和壁 面之间的竖直距离, σ 为壁面和竖直平面的夹角, F_q 为卷扬机提供的牵引力。

$$N_1 = \frac{F_1 - F_c - F_0 \sin \beta - G \sin \sigma}{2}; \qquad (8)$$

$$M_X = N_1 h_{1\circ} \tag{9}$$

式中: F_c 为反作用力, h_1 为吸附力和支持力之间的距离。

根据式(5)~(9),可得机器人在攀爬过程中所需 旋翼电机输出力矩:

$$M_{D} \ge [F_{1} - F_{c} - F_{Q}\sin\beta - G\sin\sigma]\frac{h_{1}}{2} + GH_{1}\cos\sigma - F_{0}l_{1}\cos\beta_{\circ}$$
(10)

4 越障运动的仿真和越障高度理论值计算

4.1 越障能力计算

机器人攀爬障碍物时机器人的主要参数为: $R = 60 \text{ mm}, r = 30 \text{ mm}, l_0 = 310 \text{ mm}, l_2 = 100 \text{ mm}, l_3 = 170 \text{ mm}, m_1 = 12 \text{ kg}, m_2 = 3 \text{ kg}$ 。以上参数代入式(2)和(4)中,当仰角和摆臂摆角分别在(0°,60°)和(0°,360°)范围取值时,可得 H的最大值 $H_{\text{max}} = 178.6 \text{ mm}_{\odot}$

4.2 机器人仿真测试

为了验证机器人越障高度,针对高度不同的矩形 障碍物进行仿真,探究机器人攀爬障碍物高度最大值。

通过 RecurDyn 进行仿真验证,机器人越障仿真如 图 6 所示,针对 175 mm、180 mm 与 185 mm 的不同高 度障碍物进行分析表明:在通过 175 mm 障碍物后,机 器人能够相对快速恢复到稳定的状态;越过 180 mm 障碍物后,机器人的重心的位移波动持续较大,但最终 还是能够恢复到稳定的状态;当障碍物的高度调整为 185 mm 时,机器人无法进行越障。经过多次仿真实验 确定机器人的最大越障高度为 180 mm。图 7 为机器 人攀越不同高度障碍物的重心高度与时间的关系,实 验表明:机器人旋翼推力机构的吸附性能良好,机器人 能够平稳地在壁面完成爬行和越障的功能。



图6 虚拟样机攀爬障碍物过程







5 结论

课题组为解决现有爬壁机器人在越障方面动作不 连续和越障效率低的问题,研究了柔性摆臂越障机构, 并在机器人的运动过程中,从运动学角度,研究了双履 带摆臂机器人的越障原理。利用摆臂的摆动,使得机 器人的质心越过障碍物的关键边界线。

课题组从运动学角度分析机器人攀爬障碍物时的 运动机理,并建立了机器人壁面攀爬的运动学模型,计 算出机器人在不发生失效形式下旋翼电机理论输出转 矩,并通过仿真实验,验证了机器人的旋翼的吸附性 能,以及攀爬障碍物的能力。在此基础上,课题组设计 了一种基于旋翼的摆臂式爬壁机器人,为爬壁机器人 的实际开发应用和控制系统的设计提供基础。

参考文献:

- [1] ZONG C G, JI Z J, YU H S. Dynamic stability analysis of a tracked mobile robot based on human-robot interaction) [J]. Assembly Automation, 2020, 40(1):143-154.
- [2] Ecovacs Robotics Co. Ltd. Surface cleaning robot and process for manufacturing track thereof: USPTO 20200061884 [P]. 2020-03-16.
- [3] 郭伟灿,郑慕林,凌张伟,等.大型承压设备爬壁机器人磁桥设计和试验研究[J].机电工程,2020,37(5):588-592.
- [4] Pomerleau installs robot to track jobsite progress [J]. Daily Commercial News, 2020, 93 (25):5-7.
- [5] 黄伟,吴士林,程浩.仿生爬壁滑翔机器人样机的设计与实验研究
 [J].机电工程,2019,36(7):761-765.

- [6] 杨春,罗天洪.一种新型爬壁机器人越障过程的运动及动力学分析[J].机械传动,2019,43(9):87-92.
- [7] 董寒,崔登祺,李方兴,高学山.多吸盘框架式爬壁机器人系统的 设计与分析[J].制造业自动化,2016,38(6):59-63.[8] 冯伟 博.仿尺蠖爬壁机器人机构设计与基于 CPG 的步态规划[D].杭 州:中国计量学院,2015:35-43.
- [9] 潘雷,赵言正,钱志源,等.具有双负压吸盘的爬壁机器人吸附特性[J].上海交通大学学报,2005,39(6):873-876.
- [10] 陈月强.磁吸附履带式攀爬钢缆机器人的分析与研究[D].北 京:北京交通大学,2017:21-25.
- [11] Robots track moving objects with sub-centimeter accuracy[J]. NASA Tech Briefs, 2019, 43(11):12 - 15.

(上接第38页)

参考文献:

- [1] 熊有伦.机器人技术基础[M].北京:机械工业出版社,1996:2-3.
- [2] 游文辉,王秀锋,鲁文其,等.工业机械臂的轨迹规划插补系统设计[J].机电工程,2019,36(2):190-196.
- [3] HARTENBURG R S, DENAVIT J, FREUDENSTEIN F. Kinematic synthesis of linkages [J]. Journal of Applied Mechanics, 1965, 32
 (2):477.
- [4] 魏丽君,吴海波,刘海龙,等.基于 D-H 算法的移动机械臂正运动 学研究[J]. 计量与测试技术,2020,47(10):2-4.
- [5] 吕永军,刘峰,郑飋默,等.通用和修正 D-H 法在运动学建模中的应用分析[J].计算机系统应用,2016,25(5):198.
- [6] 刘蕾.一种串联机器人运动学快速求解方法[J].自动化仪表, 2015,36(8):65.
- [7] 王宪伦,安立雄,张海洲.基于运动学参数标定方法的机械臂误差

分析与仿真研究[J]. 机电工程,2019,36(2):109-116.

- [8] 冷舒,吴克,居鹤华.机械臂运动学建模及解算方法综述[J]. 宇航 学报,2019,40(11):1263.
- [9] 黄俊杰,张元亮,丁继斌.机器人技术基础[M].2版.北京:高等 教育出版社,2012:69.
- [10] 蒋新松. 机器人学导论[M]. 沈阳:辽宁科学出版社,1994:96.
- [11] 王海峰, 尹彬, 罗锐捷, 等. 四自由度 SCARA 机器人系统机构设 计及运动学分析[J]. 机电工程, 2019, 36(12):1321-1322.
- [12] 徐达,夏祥,李华,等.基于图解法与蒙特卡洛法的弹药装填机器 人工作空间分析[J].火炮发射与控制学报,2014,35(2):18.
- [13] GUAN Y S, YOKOI K. Reachable space generation of a humanoid robot using the monte carlo method [C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing: IEEE, 2006;1984 – 1989.