

文章编号:1673-0062(2017)03-0045-05

双履带式巡检机器人翻越圆边凸台的滑移稳定性分析

刘昌福^{1,2}, 邹树梁^{2*}, 王湘江^{1,2}, 赵芳^{1,2}, 刘君琰^{1,2}

(1.南华大学机械工程学院,湖南衡阳421001;2.南华大学核设施应急安全作业技术与装备湖南省重点实验室,湖南衡阳421001)

摘要:重点针对工厂的圆边凸台障碍,规划了双履带式巡检机器人翻越圆边凸台的越障动作.将机器人翻越障碍过程视为准静态过程,从静力学角度建立了三个关键阶段的稳定性分析模型,并通过数值模拟仿真分析,得到了机器人翻越过程中的等效支撑力和等效摩擦力与机器人角度之间的关系,为双履带式巡检机器人翻越圆边凸台提供了稳定性分析依据.

关键词:双履带式巡检机器人;圆边凸台;越障动作;滑移稳定性

中图分类号:TP242.2 **文献标志码:**A

Analysis of Slippage Stability for Double-track-inspection Robot Climbing the Round Edge Convex Platform

LIU Chang-fu^{1,2}, ZOU Shu-liang^{2*}, WANG Xiang-jiang^{1,2},
ZHAO Fang^{1,2}, LIU Jun-yan^{1,2}

(1.School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2.Hunan Provincial Key Laboratory of Emergency Safety Technology and Equipment for Nuclear Facilities Hunan, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: This paper focuses on the obstacle of the round edge convex platform in the factory, and plan the obstacle movement of the double-track-inspection robot over the round edge convex platform. The process of the robot through the obstacle is regarded as quasi-static process. From the perspective of static mechanics, three key stages of stability analysis model are established. Through numerical simulation, it obtained a relation between equivalent support force, equivalent friction force and the elevation angle of robot, and a theoretical basis for slippage stability of Double-track-inspection robot climbing the round-edge step is provided.

key words: Double-track inspection robot; the Round edge convex platform; obstacle posture; slippage stability

收稿日期:2017-06-09

基金项目:核设施退役和核泄漏安全处理技术及装备研发(02072012KIT01)

作者简介:刘昌福(1993-),男,硕士研究生,主要从事机械工程方向的研究.E-mail:875377614@qq.com.* 通讯作者:
邹树梁,E-mail:zousl2013@126.com

0 引言

履带式移动机器人具有良好的机动性和越障通过性,因此,被广泛运用于应急救援、安全巡检、战场侦察以及行星探测等等各种复杂的作业环境下^[1-4].面对复杂的作业环境,机器人的越障稳定性必须得到充分的考虑.近年来,已有不少学者对履带式机器人的越障稳定性进行了研究.朱岩等结合机器人越障的几何条件、不打滑稳定性等分析了履带机器人跨越凸台和沟壑的越障性能^[4];李楠等对机器人翻越楼梯的基本过程进行阶段划分,并进行运动学和准静态力学分析^[5];饶伟等人对机器人爬楼梯过程进行了一点、两点和三点接触时的稳定性分析^[6-7];这些学者对机器人越障稳定性的研究大都是针对在坡、凸台、沟壑和楼梯这几种典型障碍.对于某些非结构化的工厂,凸台障碍并非直角边,因此,针对圆边凸台,研究履带式机器人翻越圆边凸台的越障稳定性也同样具有重大意义.

本文重点针对工厂的圆边凸台障碍,规划了双履带式巡检机器人翻越圆边凸台的越障动作,将其划分为四个越障阶段:机器人最初接触圆边凸台阶段、机器人机体处履带支撑阶段、机器人绕圆边凸台翻转阶段、机器人顺利翻越圆边凸台.将机器人翻越障碍过程视为准静态过程,从静力学角度建立了三个关键阶段的稳定性分析模型,并通过数值模拟仿真分析,得到了机器人翻越过程中的等效支撑力和等效摩擦力与机器人角度之间的关系,为双履带式巡检机器人翻越圆边凸台提供了稳定性分析依据.

1 机器人翻越圆边凸台过程分析

1.1 翻越圆边凸台过程中的接触作用力分析

如图1所示,根据机器人履带与圆边凸台接触的方式分为两种情况:履带与圆边凸台接触、履带棱与圆边凸台接触.

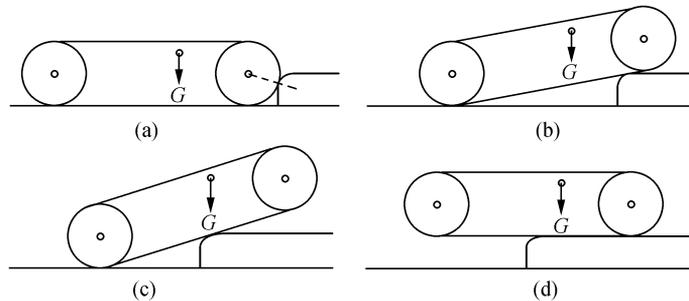


图2 机器人翻越圆边凸台运动规划
Fig.2 The moving posture of robot climbing the round edge convex platform

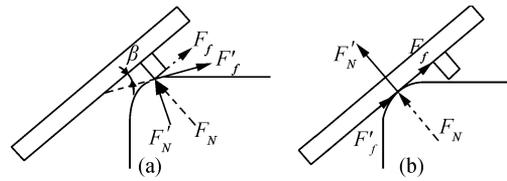


图1 履带与圆边凸台接触作用力分析
Fig.1 Force analysis between track and the round edge convex platform

为方便机器人运动过程的受力分析,将履带与圆边凸台接触的真实支撑力 $F_{N'}$ 和真实摩擦力 $F_{f'}$ 分别用垂直于履带板的等效支撑力 F_N 和平行于履带板的等效摩擦力 F_f 表示, β 表示接触点处的切线与履带之间的夹角, μ_s 表示履带与圆边凸台之间的静摩擦因素.

(a)当履带接触圆边凸台时,保证履带不打滑的充分必要条件为:

$$-\mu_s \leq \frac{F_f}{F_N} \leq \mu_s \quad (1)$$

(b)当履带棱接触圆边凸台时,保证履带不打滑的充分必要条件为:

$$-\mu_s \leq \frac{F_{f'}}{F_{N'}} = \frac{F_f \cos \beta - F_N \sin \beta}{F_f \sin \beta + F_N \cos \beta} \leq \mu_s \quad (2)$$

式中: $F_N > 0$, $F_f > -F_N \cot \beta$.

设 $\mu = \frac{F_f}{F_N}$, 则:

$$\mu_{\max} = \begin{cases} \frac{\sin \beta + \mu_s \cos \beta}{\cos \beta - \mu_s \sin \beta}, & \mu_s < \cot \beta \\ +\infty, & \mu_s > \cot \beta \end{cases} \quad (3)$$

1.2 翻越圆边凸台运动过程规划

机器人翻越圆边凸台的运动过程如图2所示,根据机器人翻越圆边凸台步骤,将机器人翻越圆边凸台过程分为四个阶段:机器人最初接触圆边凸台阶段(a);机器人机体处履带支撑阶段(b);机器人绕圆边凸台翻转阶段(c);机器人顺利翻越圆边凸台(d).

1.3 机器人翻越圆边凸台稳定性分析

机器人翻越圆边凸台的主要外力来源于机器人与地面、圆边凸台接触产生的附着力。因此,保证机器人与翻越圆边凸台接触处不发生打滑现象,有利于提高机器人翻越圆边凸台的稳定性。机器人引导轮最初接触圆边凸台时,机器人与圆角边缘之间的附着力为引导轮抬升提供主要外力;同时,引导轮攀上圆边凸台后,机器人机体处履带与圆边凸台接触处是否有足够的附着力是保证机器人继续翻越圆边凸台的关键因素;机器人在绕圆角边缘发生翻转时,与圆角边缘的附着力决定机器人能否顺利完成翻转。

1) 机器人最初接触圆边凸台阶段

机器人在翻越圆边凸台过程中,为保证引导轮顺利抬升攀上圆边凸台,应保证圆边凸台圆心 O_3 离地高度 H 不超过引导轮半径 R ;将机器人引导轮刚离开地面瞬间视为攀越圆边凸台的一个关键姿态,此姿态的受力分析如图 3 所示。

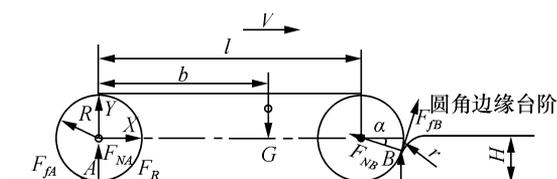


图 3 引导轮与圆边凸台最初接触时的受力分析

Fig.3 Force analysis at guide wheel contact the round edge convex platform primitively

机器人在前行过程中,假定横向没有滑移,则履带和地面之间产生的有效牵引力^[8]:

$$F_{fA} = \mu_x F_{NA} [1 - \exp(-K_s)] \quad (4)$$

式中: μ_x —履带与地面的纵向摩擦系数;

K_s —滑移系数,可通过拖动试验得到,一般室内地面取 $K_s = 0.6$ 。

忽略机器人前进过程中受到的内部阻力,则机器人受到的阻力主要是与地面接触外部滚动摩擦力^[9],于是机器人的前行阻力 F_R 可表示为:

$$F_R = \mu_\tau F_{NA} \quad (5)$$

式中: μ_τ —前行方向上的行驶阻力系数,本文取 $\mu_\tau = 0.026$;

根据图 3 所示的受力分析,由力和力矩的平衡原理,可以得到:

$$\begin{cases} F_{NA} = \frac{Gb + G(l + R\cos \alpha)}{(l + R\cos \alpha) - (R + R\sin \alpha)} \\ F_{fB} = \frac{G - F_{NA}(1 + P\tan \alpha)}{\cos \alpha - \sin \alpha \tan \alpha} \\ F_{NB} = \frac{F_{NA}P + F_{fB}\sin \alpha}{\cos \alpha} \end{cases} \quad (6)$$

式中: F_{fA} 、 F_{fB} —履带机器人受到的等效牵引力;
 F_{NA} 、 F_{NB} —履带机器人受到的等效支撑力;
 F_R —履带机器人受到的外部阻力;
 α —引导轮与圆边凸台接触点的半径相对 X 方向的偏转角。

为保证引导轮成功升上圆边凸台,应保证机器人在 B 点不发生滑移现象,因此可以得到机器人最初接触圆边凸台阶段下的稳定性条件:

$$\{F_{NA} > 0\} \cap \{F_{NB} > 0\} \cap \{F_{fB} > 0\} \cap \{0 < F_{fB}/F_{NB} < \mu_{\max}\} \quad (7)$$

2) 机器人机体处履带支撑阶段

机器人引导轮顺利爬上圆边凸台后,机器人处于机体处履带与圆边凸台接触,此状态下的受力情况如图 4 所示。

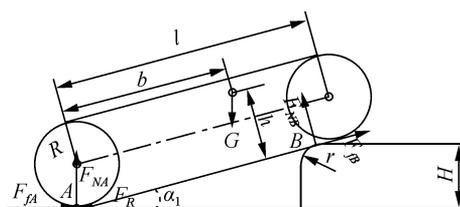


图 4 机体支撑阶段受力分析

Fig.4 Force analysis at step of supporting in track of robot body

根据图 4 所示的受力分析,由力和力矩的平衡原理,可以得到:

$$\begin{cases} F_{NA} = \frac{GQ - G(b\cos \alpha_1 - (h - R)\sin \alpha_1)}{Q - P(H - r + r\cos \alpha_1)} \\ F_{fB} = (G - F_{NA}) \sin \alpha_1 - F_{NA}P\cos \alpha_1 \\ F_{NB} = F_{NA}P\sin \alpha_1 - (F_{NA} - G)\cos \alpha_1 \\ Q = \frac{H - r + r\cos \alpha_1 - R + R\cos \alpha_1}{\tan \alpha_1} + \sin \alpha_1 \end{cases} \quad (8)$$

$$P = \mu_x (1 - \exp(-K_s)) - \mu_\tau$$

式中: F_{fA} 、 F_{fB} —履带机器人受到的等效牵引力;
 F_{NA} 、 F_{NB} —履带机器人受到的等效支撑力;
 F_R —履带机器人受到的外部阻力;
 Q —履带与圆边凸台接触点到 A 的水平方向上的距离;

α_1 —机器人的仰角.

为保证机器人机体处履带接触圆边凸台不发生滑移现象,则需满足如下条件:

$$\{F_{NA} > 0\} \cap \{F_{NB} > 0\} \cap \{F_{fB} > 0\} \cap \{0 < F_{fB}/F_{NB} < \mu_{\max}\} \quad (9)$$

3) 机器人绕圆角边缘翻转阶段

机器人成功将引导轮抬升到圆边凸台后,继续前行到达机器人发生翻转的临界位置;机器人重心与履带-圆边凸台接触点处于同一竖直线,并且机器人恰好脱离地面,如图5所示.

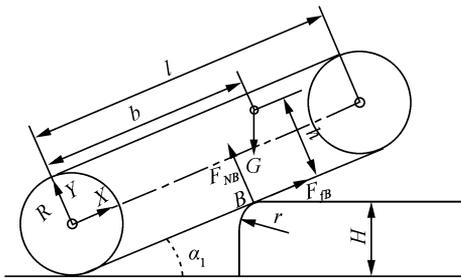


图5 机器人发生翻转的临界状态
Fig.5 Critical state of robot flipping

机器人处于临界姿态的几何关系,关系机器人是否绕圆角边缘发生翻转,决定着机器人翻越台阶的极限高度.根据图5所示的临界姿态下的几何关系可以得到:

$$H = R + b \sin \alpha + (h - R) \cos \alpha - \frac{h}{\cos \alpha} + r - r \cos \alpha \quad (10)$$

式中: H —圆边凸台的高度;

r —圆边凸台圆角边半径;

α_1 —机器人仰角;

为保证机器人在此状态下不发生打滑,根据受力平衡条件,可以得到:

$$\begin{cases} F_{NB} = G \cos \alpha_1 \\ F_{fB} = G \sin \alpha_1 \end{cases} \quad (11)$$

则可知不打滑的稳定性条件为:

$$\{F_{NB} > 0\} \cap \{F_{fB} > 0\} \cap \{0 < F_{fB}/F_{NB} < \mu_{\max}\} \quad (12)$$

2 仿真分析

已研制的机器人基本参数如表1所示.

当台阶边缘半径 $r = 30 \text{ mm}$, $H = 70 \text{ mm}$ 的钢质台阶,查手册可得到 $\mu_s = 0.75$ [10],根据履带与圆边凸台接触的交互作用力关系,可以计算得出

$\mu_{\max} = 1.61$.因此,各阶段变化曲线如图6~图9所示.

表1 机器人主要参数

Table 1 The main parameters of robot

参数	数值	参数	数值
两轮中心距 l/mm	365	重心距引导轮 O_1 距离 a/mm	208
轮半径 R/mm	117.5	中心距驱动轮 O_2 距离 b/mm	157
整机重心高度 h/mm	122	整机重量 G/kg	59
履带棱间距 c/mm	22	履带棱高 h_1/mm	15

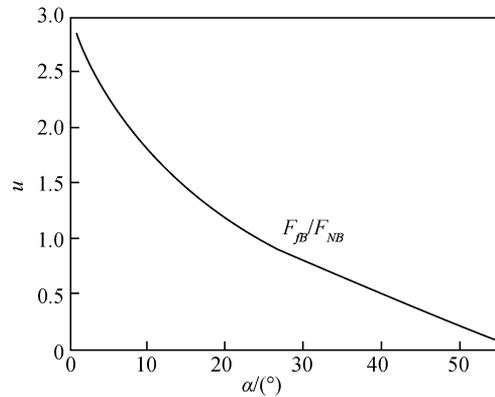
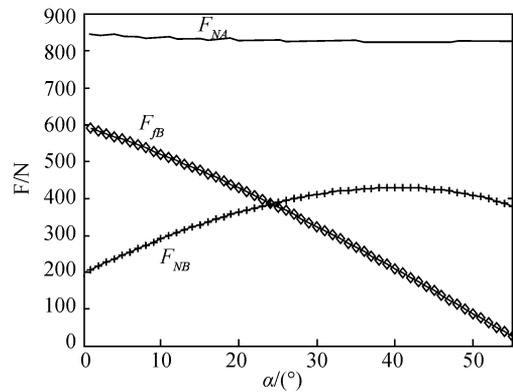


图6 引导轮与圆边凸台最初接触阶段
Fig.6 Step at guide wheel contact the round edge convex platform primitively

通过仿真分析可以得到:机器人在与圆边凸台最初接触阶段时,当接触点偏转角 $\alpha \geq 13^\circ$ 时,满足式(7)的稳定性条件.因此在台阶边缘半径 $r = 30 \text{ mm}$, $H = 70 \text{ mm}$ 时,有 $\alpha = 37^\circ$,此时机器人将不发生滑移现象,能顺利将引导轮抬升,攀上台阶;在图8中机器人临界姿态下的几何关系可以得知,当 $H = 70 \text{ mm}$ 时,机器人发生翻转的仰角为: $\alpha_1 = 33^\circ$,

可知,机器人在机体处履带支撑阶段的仰角变化范围为 $15^\circ \sim 33^\circ$; 由图 7 所示的各参数变化值,结合机器人在此阶段的稳定性条件可得:此阶段机器人不发生滑移现象;根据图 9 可知:机器人绕圆角边缘翻转过程中,满足机器人在此阶段不发生滑移现象的稳定性条件为机器人的最大仰角不大于 $\alpha_1 = 57^\circ$,而机器人翻越过程中的最大仰角应在绕圆边凸台翻转的临界状态, $\alpha_{\max} = 37^\circ < 57^\circ$,因此,可以判断机器人翻转阶段不发生滑移。

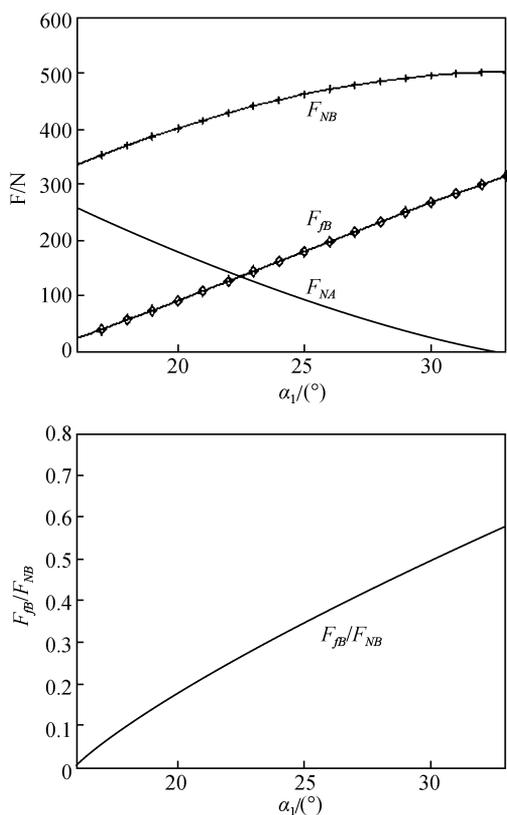


图 7 机体支撑阶段

Fig.7 Step of supporting in track of robot body

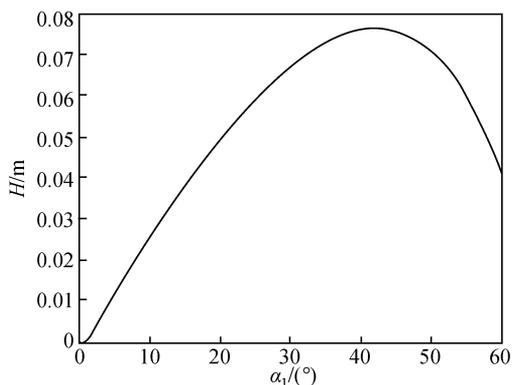


图 8 机器人临界姿态下的几何关系

Fig.8 Geometric relationship of robot under critical gesture

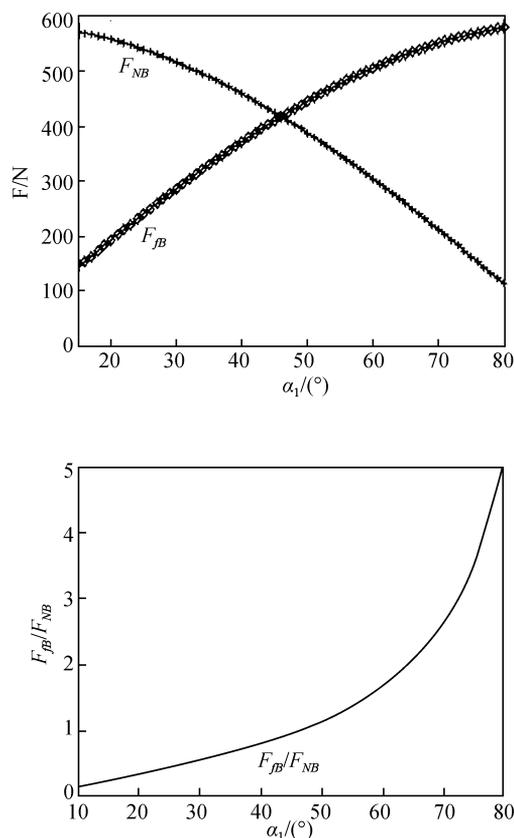


图 9 机器人绕圆边凸台翻转阶段

Fig.9 Step of robot Turn around the round edge convex platform

3 结 论

1) 规划了双履带式巡检机器人翻越圆边凸台的过程,将越障过程分为三个阶段,从静力学角度建立了双履带式巡检机器人的翻越圆边凸台的稳定性分析模型,为机器人翻越圆边凸台提供可行的理论判别依据。

2) 选取台阶边缘半径 $r = 30 \text{ mm}$, $H = 70 \text{ mm}$ 的圆边凸台,对双履带式巡检机器人翻越圆边凸台过程的稳定性进行了仿真分析,得出了双履带式巡检机器人在翻越圆边凸台过程中,各个阶段的等效支撑力和等效摩擦力与机器人角度之间的变化关系。

3) 当圆边凸台结构尺寸为:台阶边缘半径 $r = 30 \text{ mm}$, $H = 70 \text{ mm}$ 时,双履带式巡检机器人满足机器人翻越的稳定性条件,能顺利完成翻越动作。

参考文献:

- [1] 胡燕祝,李雷远,张福琦.地铁站应急处置履带式机器人的设计与实现[J].机床与液压,2016,44(9):25-30.
- [2] 朴春日,颜国正,王志武,等.一种履带式机器人设计及其越障分析[J].现代制造工程,2013(3):24-27.
- [3] 孙鹏,陆怀民.一种轮履复合式森林巡防机器人[J].森林工程,2010,26(1):29-32.
- [4] 朱岩,王明辉,李斌,等.履带可变形机器人越障性能研究[J].机器人,2015,37(6):693-701.
- [5] 李楠,王明辉,马书根,等.基于联合运动规划的可变形履带机器人在线翻越楼梯控制方法[J].机械工程学报,2012,48(1):47-56.
- [6] LIU Y G, LIU G J. Track-stair interaction analysis and online tipover prediction for a self-reconfigurable tracked mobile robot climbing stairs [J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2009, 14(5): 528-538.
- [7] 饶伟,施家栋,王建中.关节式履带机器人爬楼梯动态稳定性分析[J].机械工程学报,2014,50(15):60-67.
- [8] LIU Y G, LIU G J. Kinematics and Interaction Analysis for Tracked Mobile Manipulators [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA USA: IEEE, 2007: 267-272.
- [9] LIU Y G, LIU G J. Track-stair and vehicle manipulator interaction analysis for tracked mobile manipulators climbing stairs [C]// International Conference on Automation Science and Engineering, August, 23-26, 2008. Arlington, USA. Arlington: IEEE, 2008: 157-162.
- [10] 闻邦椿.机械设计手册[M].5版.北京:机械工业出版社:43-6