

橡胶履带轮履带周长建模与试验

吕凯¹ 穆希辉¹ 郭浩亮¹ 薛文斌² 汪志远² 许林³

(1. 军械技术研究所, 石家庄 050003; 2. 军事交通学院国家应急交通运输装备工程技术研究中心, 天津 300161;
3. 泸州长起特种起重设备有限公司, 泸州 646000)

摘要: 橡胶履带轮用于更换轮式车辆的轮胎,以提高其越野性能。为避免脱带和履带过度拉伸,使履带周长与轮系相匹配,提出了一种基于轮系中各轮相对位置变化的橡胶履带周长建模方法。在多种地形条件下,使用多相机视频测量系统对轮系中各轮上标记点进行追踪,利用采集到的标记点坐标重构各轮轴线,并进一步采用该方法重建履带周长。在平整钢板上的试验结果表明,由于履带弯曲刚度不均匀,构建的履带平均周长为 3 791.62 mm,标准差为 3.51 mm,比履带实际周长 3 812 mm 略小,且略有波动。根据在多种地形条件下的测量结果构建的履带周长,其标准差与平整钢板上一致,均为 3.5 mm 左右。平均值在 3 787.78 ~ 3 794.75 mm 之间,基本与平整钢板上的履带平均周长一致。因此,橡胶履带周长建模方法能够在多种地形条件下评估履带周长,为履带轮设计提供依据。

关键词: 履带车辆; 橡胶履带轮; 履带周长; 数学模型; 视频测量

中图分类号: U469.6⁺94 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)11-0329-12

Modeling and Testing on Track Perimeter of Conversion Rubber Track Assembly

Lv Kai¹ Mu Xihui¹ Guo Haoliang¹ Xue Wenbin² Wang Zhiyuan² Xu Lin³

(1. *Research Institute of Ordnance Technological, Shijiazhuang 050003, China*
2. *National Emergency Transportation Equipment Engineering Research Center, Military Transportation University, Tianjin 300161, China* 3. *Luzhou Changqi Special Hoisting Equipment Co., Ltd., Luzhou 646000, China*)

Abstract: Conversion rubber track assembly is used for the replacement of the wheeled vehicle tire to reduce the vehicle's ground pressure and improve its off-road performance. It is composed of a wheel system and a rubber track. In order to avoid de-tracking and excessive tension of the track and make the track perimeter match the wheel system, a modeling method of rubber track perimeter is developed which is based on variations in relative location of each wheel of the wheel system. In this method, the track perimeter is divided into two kinds of segments, circular arc segment that is in contact with wheels and deformation segment which does not contact with wheels. If a deformation segment does not contact with the raised obstacle, then it is a straight line, otherwise it is a circular arc. The effect of the roller wheel swing on the perimeter of the track is studied and the matching tensioning device is designed to maintain the track perimeter constant while roller wheels swing. Under multi-terrain conditions, multi-camera videogrammetric system is used to track feature points on each wheel of the wheel system and coordinates of feature points are collected to reconstruct the axis of each wheel, and then the track perimeter is modelled. Experimental results on a flat steel plate show that because of the uneven track bending stiffness, the modelled average perimeter of the track is 3 791.62 mm with standard deviation of 3.51 mm, which is slightly smaller than the actual perimeter 3 812 mm of the track. Experimental results under multi-terrain conditions are consistent with those on a flat steel plate, the standard deviations are all

about 3.5 mm and the average perimeters of the track are all in the range of 3 787.78 mm to 3 794.75 mm. Therefore, this modeling method of rubber track perimeter is effective, robust, free from the impact of terrain, and it also provides the basis for the design and assessment of the rubber track assembly.

Key words: tracked vehicle; conversion rubber track assembly; track perimeter; mathematic model; videogrammetry

引言

橡胶履带轮能在不改装轮式车辆的条件下,与轮胎互换,提升车辆的越野能力。该项技术已广泛使用在北美、欧洲等地区的农用车辆和工程车辆上。其代表公司有美国 Goodyear、Matracks、CaseIH,加拿大 Soucy、Camso,日本 Bridgestone,英国 Versatracks 等。

橡胶履带轮一般使用三角形构型,驱动轮处于三角形的顶点上,与橡胶履带的驱动角相啮合驱动履带;框架维持履带轮的结构;导向轮处于三角形底部的一端或者两端;负重轮处于三角形的底部,铰接安装在相关组件上,这些组件与负重轮构成负重轮系,负重轮系安装在框架上。除橡胶履带外履带轮的其他组件组成轮系。

为提高平顺性和牵引性能,轮系中的负重轮会随着地形变化而摆动,这会使履带周长发生变化。由于履带松弛会诱发脱带^[1],绷紧又会增加履带张紧力,加剧履带轮组件的磨损^[2]。因此,履带周长应当尽可能不变,以维持履带张紧力恒定,并提高橡胶履带的使用寿命。准确评估橡胶履带轮在多种地形上行驶时履带周长的变化,是解决上述问题的关键。为此,本文提出橡胶履带周长建模方法,并分析该方法中的障碍不确定性对履带周长建模的影响。进一步使用该方法匹配张紧装置相关参数和负重轮的摆动幅度,以使轮系能够保持履带周长不变。最后采用多相机视频测量系统,对比平整钢板和多种地形上行驶时履带周长的测量重建结果,以验证橡胶履带周长建模方法的正确性。

1 橡胶履带周长建模与评估方法

橡胶履带接地部分可分为接触部分和变形部分。接触部分与负重轮的外表面贴合,变形部分在地形作用下产生变形。在软地形上,如橡胶履带为完全刚性,则橡胶履带的接地部分应为直线^[3-4],若为完全柔性,则接触部分为包络负重轮的圆弧,而变形部分为负重轮的水平切线^[5]。但事实上,橡胶履带是有限刚度的,因此变形部分应为曲线,且与相邻的接触部分相切^[6-7]。确定变形部分曲线形状的方法主要有两种:将履带离散为多个单元,并考虑土壤

压力和沉降的关系、土壤与履带之间的剪切力以及履带张紧力和伸长率等要素,综合上述要素的力学分析结果可得到较为贴合实际的曲线形状^[8-10];考虑土壤压力和沉降关系时将变形部分简单等效为圆弧^[11-13]。但以上方法并不适用于在橡胶履带轮方案设计中分析履带周长变化:上述方法采用的地形参数单一,而履带轮的工作地形多种多样,且不一定为均质土壤,即便是在同一地域内,土壤参数还受到气候条件的影响;上述方法均未考虑负重轮摆动,且难以构建出足够复杂的地形条件^[14],以实现负重轮在其摆动范围内的充分摆动。因此,本文提出一种履带周长变化的评估方法,该方法认为履带周长变化与负重轮上下摆动相关,而负重轮上下摆动与地形相关。

在装配后,橡胶履带具有一定的预张紧力,同时其许用伸长率一般在 1% 以下,因而邻近负重轮之间若不存在障碍,则该变形部分的曲率很小,可近似为直线。若邻近负重轮之间存在凸起障碍,则变形部分会产生较大曲率,同时引起邻近负重轮摆动,此时的变形以圆弧来模拟,并通过与邻近的接触部分相切的条件确定其半径。

此外,橡胶履带轮由于采用三角形的紧凑结构,不同于整体式橡胶履带系统和其它四轮一带系统。传统的四轮一带系统上部履带,即在托轮两侧的履带,由于跨度大,且水平延伸,受重力影响大,其形状需要使用悬链方程^[15-16]或二次多项式^[17-18]等方法来近似。而橡胶履带轮上部履带,即驱动轮两侧和导向轮两侧的履带,均为向下延伸,跨度小,且橡胶履带的质量小,在张紧力作用下,驱动轮两侧和导向轮两侧的橡胶履带均为直线形状。

基于上述原则,还需判断橡胶履带接地部分是否遇到凸起障碍以及该障碍所处位置。以相邻的左、中、右 3 个负重轮为例说明:当中部负重轮外圆周部分或者全部处于左右负重轮下部公切线的下方时,此时中部负重轮下陷,左右负重轮与其之间的两个变形部分均能以直线段近似,且两线段无交点,如图 1a 所示;当中部负重轮外圆周均处于左右负重轮下部公切线的上方时,若仍将两个变形部分以线段表示,则两线段在中部负重轮下方出现交叉。此时

这些负重轮之间出现了凸起障碍。假设障碍处于左右较高位置的负重轮与中部负重轮之间,则该对负重轮之间履带的变形部分近似为圆弧,如图 1b 所示。但若该圆弧的半径小于橡胶履带的最小弯曲半径,则可认为障碍处于另一侧,如图 1c 所示,若另一侧的圆弧曲率也不满足条件,则负重轮摆动位置是不合理的。显然,障碍定位尚有不确定性,有必要分析和评估障碍位置对履带周长的影响。

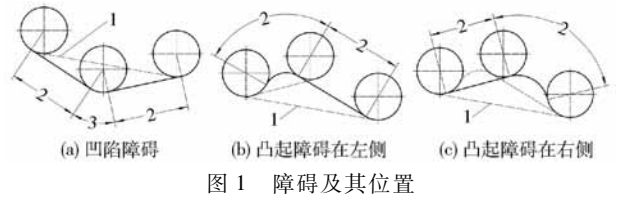


图 1 障碍及其位置

1. 下部公切线 2. 变形部分 3. 接触部分

设轮系中的两个相邻轮子为 w_1 、 w_2 ,其轮心位置分别为 (x_1, z_1) 和 (x_2, z_2) , A 和 B 分别为变形部分与两轮的切点。当变形部分为直线段时,如图 2 所示。

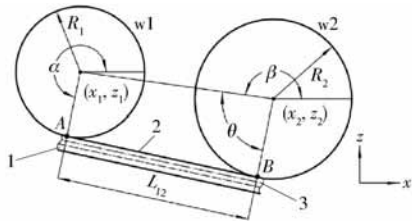


图 2 橡胶履带直线变形部分示意图

Fig. 2 Straight-line deformation segment of rubber track

1. 橡胶履带 2. 履带内表面 3. 履带中性层

此时

$$L_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 - (R_1 - R_2)^2} \tag{1}$$

$$\beta = -\text{ilg} \left(\frac{(x_1 - x_2) + (z_1 - z_2) i}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) \tag{2}$$

$$\theta = \frac{R_2 - R_1}{|R_1 - R_2|} \arcsin \left(\frac{L_{12}}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) \tag{3}$$

$$\alpha = \beta + \theta \tag{4}$$

式中 L_{12} ——两轮之间橡胶履带变形部分的中性层长度

α —— A 点在 w_1 圆周上相对于 x 轴的角度

β ——两轮连线相对于 x 轴的角度

θ —— B 点与点 (x_2, z_2) 连线相对于两轮轮心连线的角度

当相邻的 3 个轮子 w_1 、 w_2 、 w_3 之间出现障碍时,如图 3 所示,图中 α_1 、 α_2 、 α_3 与 α 的描述类似,均为各轮上切点与轮心连线相对 x 轴的角度。 L_{12} 为

w_1 和 w_2 之间的橡胶履带变形部分的长度, L_{23} 为 w_2 和 w_3 之间的橡胶履带变形部分的长度, L_{34} 为 w_3 和 w_4 之间的橡胶履带变形部分的长度, L_3 为履带与轮子 w_3 接触部分的长度,以上长度均从履带中性层位置测量。

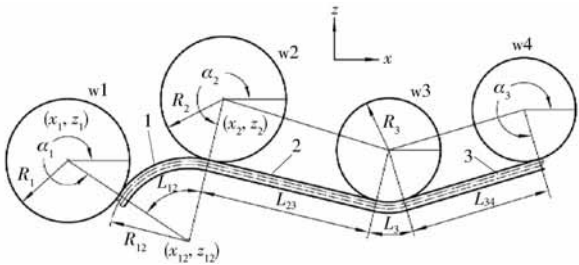


图 3 橡胶履带变形示意图

Fig. 3 Deformation of rubber track

1. 橡胶履带 2. 履带内表面 3. 履带中性层

其中, α_2 和 α_3 可通过式(1)~(4)算出。橡胶履带圆弧变形部分的圆心位置 (x_{12}, z_{12}) 满足

$$\begin{cases} \sqrt{(x_{12} - x_1)^2 + (z_{12} - z_1)^2} - R_1 = \\ \sqrt{(x_{12} - x_2)^2 + (z_{12} - z_2)^2} - R_2 \\ -\text{ilg} \left(\frac{(x_{12} - x_2) + (z_{12} - z_2) i}{\sqrt{(x_{12} - x_2)^2 + (z_{12} - z_2)^2}} \right) = \alpha_2 \end{cases} \tag{5}$$

根据式(5)求得圆弧变形部分的圆心位置后,可求得圆弧变形部分的半径为

$$R_{12} = \sqrt{(x_{12} - x_1)^2 + (z_{12} - z_1)^2} - R_1 - \delta \tag{6}$$

式中 δ ——履带中性层至履带内表面的距离
轮子 w_1 和 w_2 之间的圆弧变形部分的长度为

$$L_{12} = R_{12}(\alpha_2 - \alpha_1) \tag{7}$$

其中 $\alpha_1 = -\text{ilg} \left(\frac{(x_{12} - x_1) + (z_{12} - z_1) i}{\sqrt{(x_{12} - x_1)^2 + (z_{12} - z_1)^2}} \right)$ \tag{8}

轮子 w_3 接触部分的长度为

$$L_3 = (R_3 + \delta)(\alpha_3 - \alpha_2) \tag{9}$$

通过上述建模,橡胶履带的周长 L 将由环绕驱动轮、导向轮、负重轮的圆弧和各轮之间的直线段或者圆弧组成。根据各轮半径、轮心位置以及履带中性层和履带内表面之间的距离 δ 即可求得橡胶履带的周长 L 。

2 障碍位置不确定性评估

2.1 模型建立

某橡胶履带轮如图 4a 所示,包含左右两侧负重轮组和中部负重轮组,其中两侧的负重轮组各有两排负重轮,并成对使用摆臂悬架,中部负重轮组通过摇臂铰接在框架上,导向轮通过张紧臂铰接在框架上。油缸一端和摇臂共点铰接在框架上,另一端和张紧臂铰接。张紧臂、导向轮和张紧油缸构成张紧

装置。由于橡胶履带宽度方向的变形不影响橡胶履带的周长^[19-20],则将履带轮简化为二维模型,其与坐标系如图 4b 所示,其中坐标系固定在框架上。橡胶履带轮在水平地面静止状态下,已知参数如表 1。

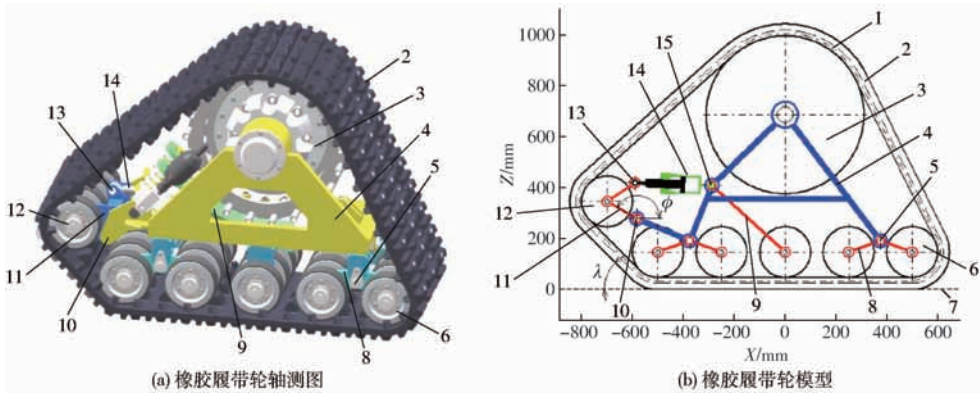


图 4 橡胶履带轮及其模型

Fig.4 Rubber track assembly and its modeling

1. 橡胶履带中性层 2. 橡胶履带 3. 驱动轮 4. 框架 5. 摆臂悬架铰接点 6. 负重轮 7. 地面 8. 摆臂悬架 9. 摇臂 10. 张紧臂铰接点 11. 张紧臂 12. 导向轮 13. 油缸与张紧臂铰接点 14. 张紧油缸 15. 摇臂与框架铰接点(油缸与框架铰接点)

表 1 橡胶履带轮主要参数

mm			
参数	数值	参数	数值
驱动轮半径	310.0	驱动轮轮心坐标	(0, 687.0)
导向轮半径	100.0	导向轮轮心坐标	(-699.5, 346.5)
负重轮半径	100.0	中部负重轮轮心坐标	(0, 147.0)
负重轮间距	50.0	张紧臂铰接点坐标	(-582.5, 279.0)
负重轮轮心高度	147.0	左侧摆臂悬架铰接点坐标	(-375.0, 192.0)
履带厚度	47.0	右侧摆臂悬架铰接点坐标	(375.0, 192.0)
履带中性层与履带内表面距离	11.0	油缸与张紧臂铰接点坐标	(-590.0, 419.0)
		摇臂铰接点(油缸铰接点)坐标	(-287.5, 409.0)

2.2 负重轮摆动和障碍定位对履带周长的影响

该履带轮模型在履带接地部分上分布有 5 组负重轮,分别记为 rw1、rw2、rw3、rw4、rw5。按照前述分析,rw1 至 rw3、rw2 至 rw4、rw3 至 rw5 均为相邻的负重轮组。

负重轮的摆动范围定义为负重轮摆动时轮心的最低位置至最高位置,两者的高度差为负重轮摆动幅度 R_A 。

- 履带轮的结构需满足以下条件:
- (1) 不干涉条件:避免履带轮的各轮(导向轮、驱动轮和负重轮)的运动干涉,减少行进中碎屑对各轮刮擦的可能性,要求各轮在运动时的最小距离不小于 10 mm。
 - (2) 履带弯曲条件:根据同类产品设计,履带的

图中 ϕ 为张紧臂的摆角, λ 为履带轮的接近角。在图 5b 所示的履带轮静止状态下,初始的摆角 ϕ_{INI} 为 150.02° ,初始的接近角 λ_{INI} 为 45.00° ,履带初始周长 L_{INI} 为 3 820.30 mm。

最小弯曲半径可保证在 80 mm 以上。

在表 1 所决定的履带轮参数条件下,有 2 个因素影响到履带接地长度:在摆动范围内的各个负重轮位置的组合;障碍定位,即如何在 3 组相邻的负重轮组下方布置障碍的位置。为研究这两个因素对履带周长的影响,首先设定导向轮轮心位置不变,即导向轮在轮心位置铰接在框架上;其次设定所有负重轮的摆动范围相同。为了避免干涉和履带过度弯曲,经计算检验, R_A 的最大值为 70 mm,记为 R_{Amax} 。

在相同的负重轮位置组合下,不同的障碍布置会影响履带周长,并使履带周长出现最小值 L'_{min} 和最大值 L'_{max} 。随着负重轮位置的变化, L'_{min} 和 L'_{max} 亦随之改变。由负重轮摆动引起的履带周长变化量是 L_{vrs} ,定义为

$$L_{vrs} = \frac{L'_{max} + L'_{min}}{2} - L_{MIN}$$
 (10)

式中 L_{MIN} ——在负重轮摆动过程中, L'_{min} 和 L'_{max} 平均值的最小值

障碍定位对履带周长变化的影响系数是 E_A ,定义为

$$E_A = \frac{L'_{max} - L'_{min}}{L_{vrs}} \times 100\%$$
 (11)

在设定 R_A 条件下,随着负重轮位置组合的变化, $L'_{max} - L'_{min} / E_A$ 亦发生变化。 $L'_{max} - L'_{min}$ 的最大值、最小值以及 E_A 的最大值、最小值随 R_A 变化分别如图 5 和图 6 所示。

通过分析,在满足不干涉条件下,负重轮摆动对履带周长的影响要比障碍定位对履带周长影响大一

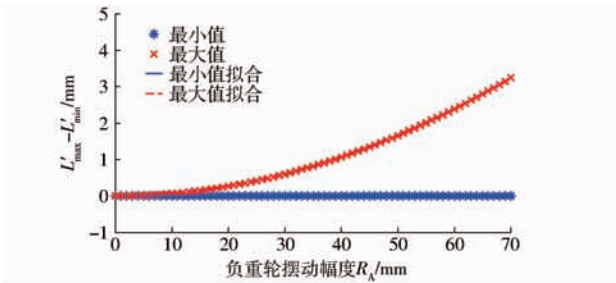


图 5 $L'_{\max} - L'_{\min}$ 的最大值和最小值变化曲线

Fig. 5 Variation curves of maximum and minimum values of difference between $L'_{\max}$ and $L'_{\min}$

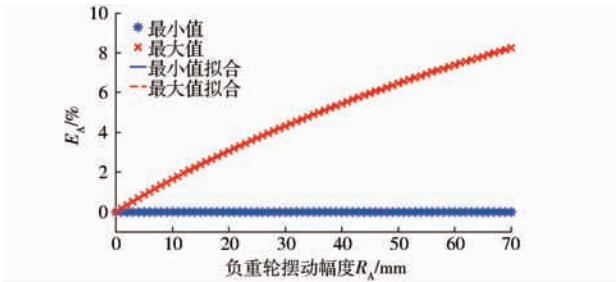


图 6 E_A 的最大值和最小值变化曲线

Fig. 6 Variation curves of maximum and minimum values of E_A

个数量级。且障碍定位造成的履带周长的波动小于 3.3 mm, 小于履带周长的 0.1%。因此负重轮相对位置的变化对履带周长的影响具有决定性, 可以忽略障碍位置差别。障碍位置优先布置在 rw1 和 rw2 以及 rw3 和 rw4 之间。

3 轮系张紧能力分析

基于上述分析, 当导向轮固定时, 随着 R_A 的增加, 履带的最大周长 $L_{\max}$ 越来越大, 而最小周长 $L_{\min}$ 越来越小, 如图 7 所示。即随着 R_A 的增加, 履带轮脱带风险会增加, 履带拉伸也越来越严重。因此需匹配张紧装置的相关参数, 以维持履带周长不变。

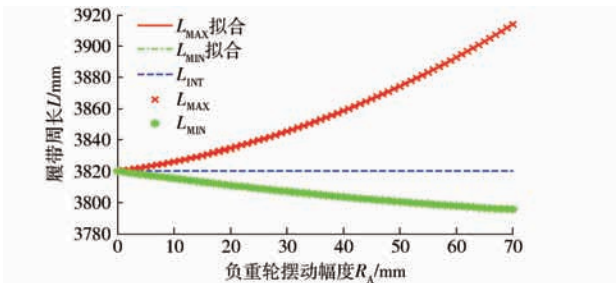


图 7 不同负重轮摆动幅度时的履带周长变化曲线

Fig. 7 Variation curves of track perimeter at different roller wheel swing amplitudes

轮系的张紧能力定义为张紧装置能够维持履带长度不变的负重轮摆动幅度。张紧过程中导向轮的摆动同样需满足不干涉条件。此外, 履带轮接近角

会随着导向轮位置的改变而改变, 较大的接近角便于履带轮越障, 但过大的接近角会使履带轮越障爬升时动力不足, 根据配套车辆性能, 设定履带轮的接近角 λ 在 $20^\circ \sim 60^\circ$ 之间。

将履带的长度分为两部分 (如图 8): 履带由 rw1 下方 P_1 点逆时针环绕经过 rw2、rw3、rw4 和 rw5 至驱动轮上方 P_2 点的长度, 记为 L_{RS} ; 履带由驱动轮逆时针绕至 rw1 的长度, 记为 L_{SR} 。 P_1 和 P_2 均在履带中性层上, 其中 P_1 与 rw1 轮心连线与 z 轴夹角为 20° , 和 λ 的最小值相等以便于计算, P_2 与驱动轮的轮心连线与 z 轴平行。可知, 决定 L_{RS} 变化的为 rw1、rw3、rw5 轮心的 z 坐标, 决定 L_{SR} 变化的为 导向轮的摆角 ϕ 和 rw1 轮心的 z 坐标。在张紧装置能够维持履带周长不变时, L_{RS} 与 L_{SR} 之和为 L_{INT} 。当 rw1 轮心的 z 坐标确定时, 有

$$L_{SR} = L_{INT} - L_{RS} = f(\phi) \quad (12)$$

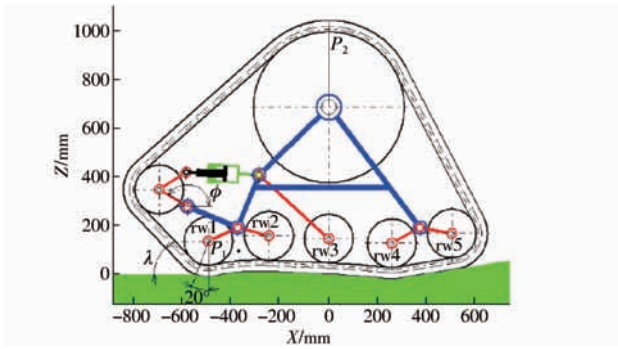


图 8 履带周长分割示意图

Fig. 8 Division of track perimeter

张紧装置的张紧能力分析过程如下:

(1) 构建 L_{RS} 的数据集。首先, 根据 $R_{A\max}$, 将 rw1、rw3 和 rw5 摆动范围均匀离散为 N_1 个 z 坐标, 其间隔 $Z_{P1} = R_{A\max} / (N_1 - 1)$, 并求解各轮相应的轮心位置; 其次, 依次选取 rw1、rw3 和 rw5 的某一轮心位置, 组合后求得相应的 L_{RS} ; 然后, 将各个负重轮轮心位置的组合, 及其相应的 L_{RS} 依次存储, 构建成数据集。

(2) 求解张紧臂摆角 ϕ 的可选范围。首先, 根据设定的 R_A , 将 rw1 的摆动范围均匀离散为 N_2 个轮心位置, 间隔为 $Z_{P2} = R_A / (N_2 - 1)$, 离散位置的 z 坐标由低至高记为 Z_r ; 其次, 依次求取 rw1 的 N_2 个轮心位置时, ϕ 的可选范围为 ϕ_r , 张紧臂在该范围内摆动时, 满足不干涉条件并使履带轮接近角合理。

(3) 求解 N_2 个 rw1 轮心位置上, L_{RS} 的最小值 $L_{RS\min}$ 和最大值 $L_{RS\max}$ 。首先, 根据设定的 R_A , 将 rw3 和 rw5 均匀离散为 N_3 个轮心位置, 间隔为 $Z_{P3} = R_A / (N_3 - 1)$; 其次, 利用 L_{RS} 数据集、rw3 和 rw5 的 N_3 个轮心位置, 使用插值方法依次估计出 rw1 的 N_2 个

心位置时的 L_{RSmin} 和 L_{RSmax} 。

(4) 求解可行的张紧臂摆角,并检验。对 N_2 个 $rw1$ 轮心位置的每一个,在其相应的 L_{RSmin} 和 L_{RSmax} 上,利用式(12)求解的 $f(\phi)$,检验在其对应的张紧臂摆角范围 ϕ_r 内,是否存在维持履带周长不变的张紧臂摆角 ϕ_{RSmax} 和 ϕ_{RSmin} 。若不存在,则张紧装置不能满足张紧需要。若存在,则进一步求解 λ 的极值 λ_{RSmax} 和 λ_{RSmin} 。

以 $R_A = 45\text{ mm}$ 为例进行说明,取 $Z_{P1} = 0.5\text{ mm}$, $Z_{P2} = 0.5\text{ mm}$, $Z_{P3} = 0.1\text{ mm}$ 。此时,对应 $rw1$ 的离散坐标 Z_F ,张紧臂摆角的可选范围如图 9 所示。

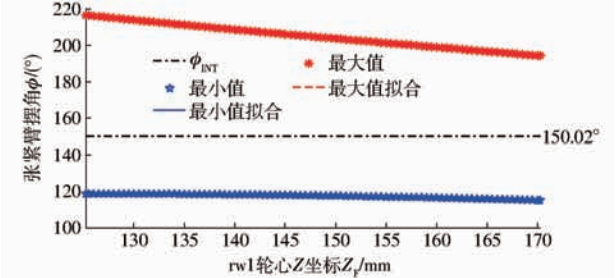


图 9 张紧臂摆角的可选范围

Fig. 9 Optional range of swing angle of tension arm

对 $rw1$ 的 N_2 个轮心位置,依次求解 L_{RS} 的最小值 L_{RSmin} 和最大值 L_{RSmax} ,如图 10 所示。

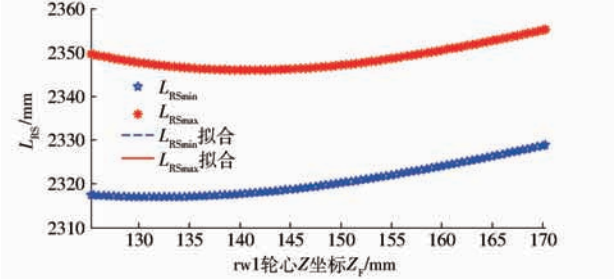
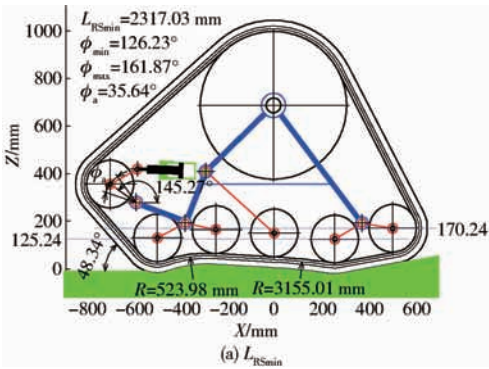


图 10 Z_F 对应的 L_{RSmin} 和 L_{RSmax}

Fig. 10 L_{RSmin} and L_{RSmax} corresponding to Z_F

然后,针对 Z_F 对应的 R_{SLmin} 和 R_{SLmax} 形成范围,依次求解 ϕ_{RSmax} 和 ϕ_{RSmin} ,以及 λ_{RSmax} 和 λ_{RSmin} 。求解



结果分别如图 11 和图 12 所示。可见 ϕ_{RSmax} 和 ϕ_{RSmin} 均在其相应的 ϕ_r 内。张紧臂的摆角位置形成了一个连续的角度范围,其中最小值 ϕ_{min} 为 126.23° ,最大值 ϕ_{max} 为 161.87° 。同样 λ 的最小值 λ_{min} 为 36.36° ,最大值 λ_{max} 为 56.71° 。图 13 为张紧时履带轮的形态,其中 $\phi_a = \phi_{max} - \phi_{min}$ 为张紧臂的摆动幅度。图 13 所示的各轮轮心位置和履带周长如表 2 所示。

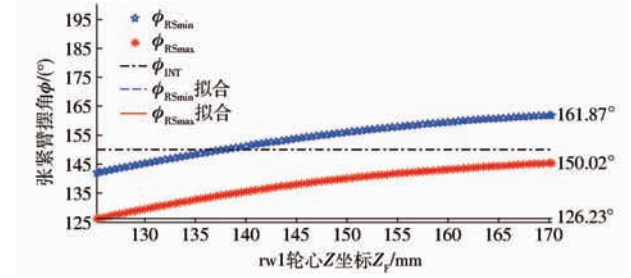


图 11 张紧臂摆角位置求解结果

Fig. 11 Solution of swing angle location of tension arm

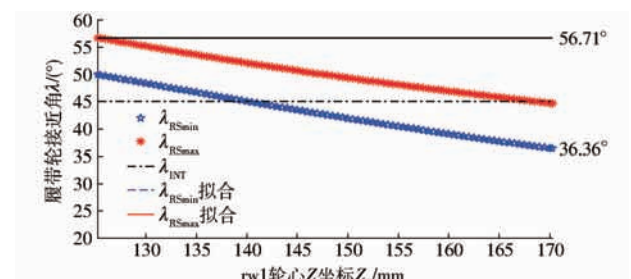


图 12 履带轮接近角求解结果

Fig. 12 Solution of entry angle of track assembly

用上述方法对张紧装置在 R_A 为 $0 \sim 70\text{ mm}$ 时进行分析,得到 ϕ_{min} 和 ϕ_{max} 的变化如图 14 所示, λ_{min} 和 λ_{max} 的变化如图 15 所示。在 R_A 大于 55 mm 时,张紧装置会使履带轮接近角过大。故现有的张紧装置可满足负重轮摆动幅度 55 mm 以下时履带张紧需要。

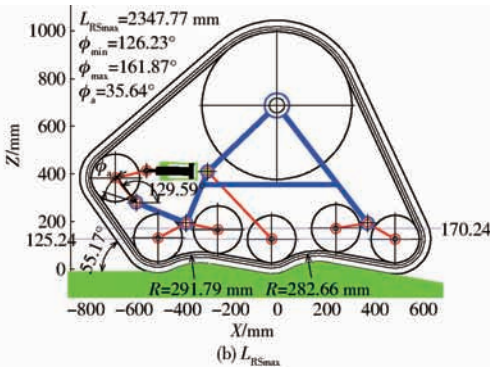


图 13 张紧装置张紧时履带轮的形态

Fig. 13 Configurations of track assembly while tensioning device tensions track

表 2 履带轮参数
Tab.2 Parameters of track assembly mm

参数	L_{RSmin}	L_{RSmax}
驱动轮轮心坐标	(0.00, 687.00)	(0.00, 687.00)
导向轮轮心坐标	(-693.51, 355.95)	(-668.59, 383.09)
rw1 轮心坐标	(-492.50, 130.00)	(-492.50, 130.00)
rw2 轮心坐标	(-244.94, 164.88)	(-244.94, 164.88)
rw3 轮心坐标	(3.09, 150.44)	(-21.46, 125.24)
rw4 轮心坐标	(260.14, 125.24)	(243.94, 170.24)
rw5 轮心坐标	(506.06, 170.24)	(489.86, 125.24)
履带周长	3 820.30	3 820.30

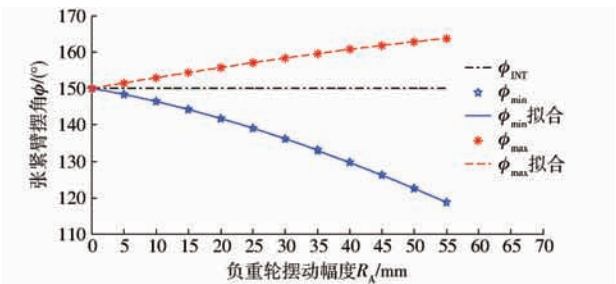


图 14 张紧臂摆角与负重轮摆动幅度的关系曲线
Fig. 14 Relationship curves between swing angle of tension arm and swing amplitude of roller wheels

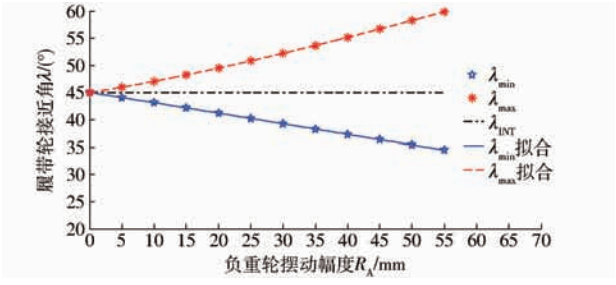


图 15 履带轮接近角与负重轮摆动幅度关系曲线
Fig. 15 Relationship curves between entry angle of track assembly and swing amplitude of roller wheels

4 试验

4.1 试验系统

将制造的 4 个橡胶履带轮配套某叉装车使用。为提高履带轮行驶平顺性,负重轮轴和导向轮轴均通过橡胶球铰分别与摆臂悬架和张紧臂连接。

选择车辆左前方履带轮为试验对象,该履带轮的履带出厂检验的周长为 3 812 mm,略小于设计周长 3 820 mm,符合 GB/T 20786—2006《橡胶履带》的履带周长公差要求。车辆行驶时,采用多相机视频测量系统(图 16),对履带轮上的编码点和非编码点进行采集,并将各点的坐标在同一坐标系上输出。其中框架和驱动轮上为编码标记点,导向轮和负重轮上为非编码标记点。编码标记点与非编码标记点不同之处在于前者在视频测量系统中有唯一已知的身份信息,便于识别。履带轮的结构和标记点的分布如图 17 所示。

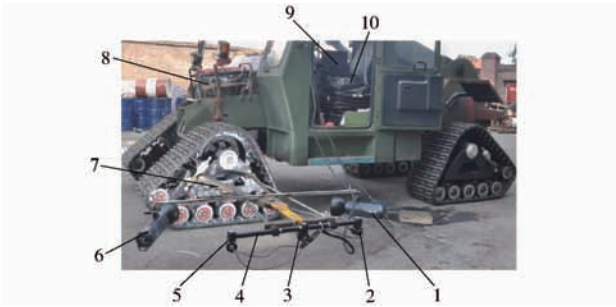


图 16 多相机视频测量系统及相关附件
Fig. 16 Multi-camera videogrammetric system and its attachments

1、6. LED 照明灯 2、3、5. CCD 传感器 4. 相机横梁 7. 支撑架
8. 小型汽油发电机 9. 计算机 10. 控制箱



图 17 橡胶履带轮上标记点的分布
Fig. 17 Distribution of feature points on rubber track assembly

1. 编码标记点 2. 非编码标记点

多相机视频测量系统主要包括 3 个 CCD 传感器、相机横梁、2 个 LED 照明灯、计算机和控制箱等。CCD 传感器安装在相机横梁上,相机横梁、LED 灯安装在支撑架上,计算机和控制箱放置在驾驶室内。LED 灯用于增加履带轮测试部分亮度,以便测量系统识别标记点。支撑架与框架固连,小型汽油发电机放置并固定在车架上,为测量系统提供电力。视频测量系统中两侧的 CCD 传感器构成双目立体视觉测量系统,中间 CCD 传感器实时拍摄框架上编码点,通过编码点实时定位 CCD 传感器空间坐标,进而消除支撑架末端振动对测量的影响,保证测量系统的坐标系固连在框架上。多相机视频测量对标记点坐标的采集方法见文献[21—23]。

当履带轮在水平地面静止时,框架外表面与各轮的轴线垂直。框架上的编码点作为公共点,用于构建同一的坐标系。驱动轮、导向轮和负重轮上标记点用于确定各轮的轴线。将框架上编码点拟合为平面,并将其平移至各轮的中部成为 $X-Z$ 平面。各轮轴线与该平面的交点为轮心。利用前述的履带周长建模方法,可构建出履带轮的平面形态,计算出履带周长,进而对履带周长建模方法进行验证。

4.2 各轮轴线定位与重现

4.2.1 驱动轮的轴线定位

履带轮在平整钢板上行驶,视频测量系统采集驱动轮编码点的坐标,如图 18 所示。

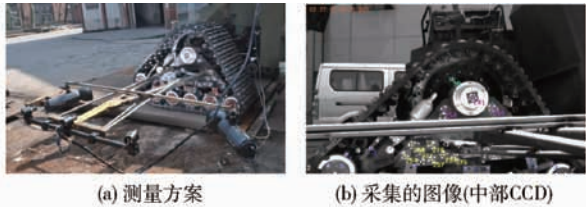


图 18 驱动轮上编码点的测量

Fig. 18 Measurement of coded feature points on drive wheel

将编码点坐标使用最小二乘法拟合为平面,并在该平面上进一步拟合为圆弧,得到该编码点的转轴,如图 19a 所示。为提高测量的精度,使用驱动轮

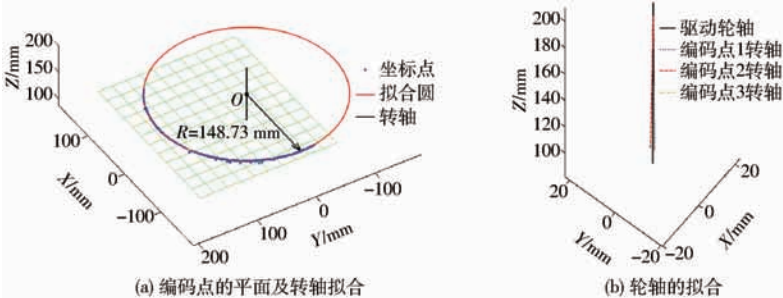


图 19 驱动轮上编码点转轴拟合

Fig. 19 Axis fitting of coded feature points on drive wheel

标记点接近轮中心,其余 4 个在轮子的边缘。定位测量过程为:首先放松张紧装置,使被测导向轮或负重轮周围履带松弛,不与该轮接触;然后,使履带轮其他组件固定不动,使用绳子缠绕被测导向轮或负重轮后匀速拉动,使该轮绕固定轴匀速缓慢转动,便于视频测量系统将轮上标记点全部识别和追踪到,如图 20 所示。

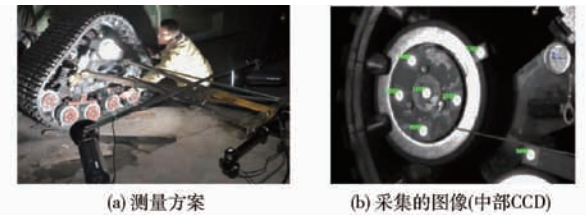


图 20 导向轮上标记点的测量

Fig. 20 Measurement of feature points on pulley

同样,采用最小二乘法对导向轮或者负重轮边缘的 4 个标记点分别拟合平面、拟合圆得到转动轴线,如图 21 所示。

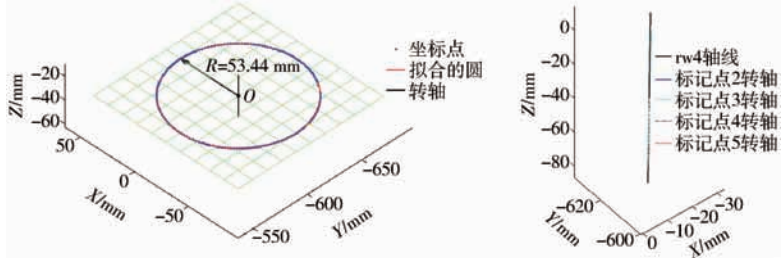


图 21 负重轮(rw4)上标记点转轴拟合

Fig. 21 Axis fitting of feature points on roller wheel rw4

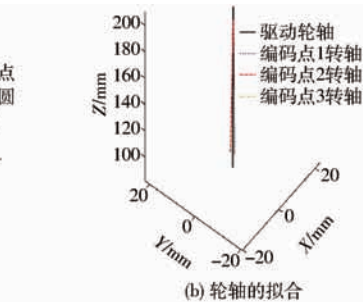
上 3 个编码点,共拟合出 3 个轴线,并用最小二乘法将这 3 个轴线拟合为 1 条直线,该直线即为驱动轮的轴线,如图 19b 所示。

由于驱动轮轴线与框架位置固定,在履带轮行驶时,可通过测量框架上的公共编码点,推知驱动轮的轴线位置。

4.2.2 导向轮和负重轮轴线定位与重现

履带轮行驶时,各轮轴线上的任意点与轮上标记点的距离始终不变。可根据这一性质来分析和重现运动中的导向轮和负重轮的轴线。

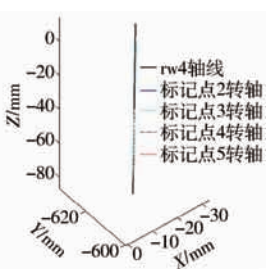
导向轮和负重轮上均有 5 个标记点,其中 1 个



在定位中需要得到各轮上标记点的 2 个位置关系:各个负重轮和导向轮上的 5 个标记点之间的相互距离关系;各个负重轮和导向轮上的 5 个标记点与拟合的轮轴线的距离关系,如对某负重轮,在其拟合得到的轮轴线上任选 2 点,求解该轮 5 个标记点与轮轴线上 2 点的距离。在履带行驶时,虽然各轮相对位置发生变化,但各轮的 2 个位置关系保持不变。据此,重现履带轮各轮轴线步骤为:

- (1)根据框架上编码点的身份信息和坐标,推算出驱动轮的轴线。
- (2)根据各轮上的标记点之间的距离关系,在剩余标记点的坐标中,识别出各负重轮和导向轮上的标记点,要求各轮能识别的标记点不少于 3 个。
- (3)根据某轮识别的标记点的坐标,以及各标记点与轮轴线的距离关系,进行坐标变换,重建该轮轴线上的 2 点,进一步可确定该轮的轴线。

基于上述步骤,根据各轮半径和履带参数,使用



橡胶履带周长建模方法可重现履带轮形态。

4.3 平整铁板上履带长度测量

驱动角和花纹的间隔排列使橡胶履带的弯曲刚度发生变化,这使橡胶履带在各轮上的接触部分并不为理想的圆弧。同时由于弯曲刚度变化,会使导向轮、rw1、rw5 3 组轮子在行驶中出现微幅摆动。

为检测履带弯曲刚度变化对履带周长建模的影响,在平整特厚钢板上对履带长度进行测量,使履带接地部分不接触任何障碍,保持理想的平直形态,如图 22 所示,以排除使用圆弧假设近似履带变形部分对履带周长的影响。

视频测量系统测得的图像结果和重建的履带轮



图 22 平整钢板上履带轮的测量
Fig. 22 Measurement of track assembly on flat steel plate

的形态如图 23 所示,其中图 23b 中轮上的点为分析判断出的各轮上标记点的测量坐标在 $X-Z$ 上的投影,各轮坐标及履带周长如表 3 所示。

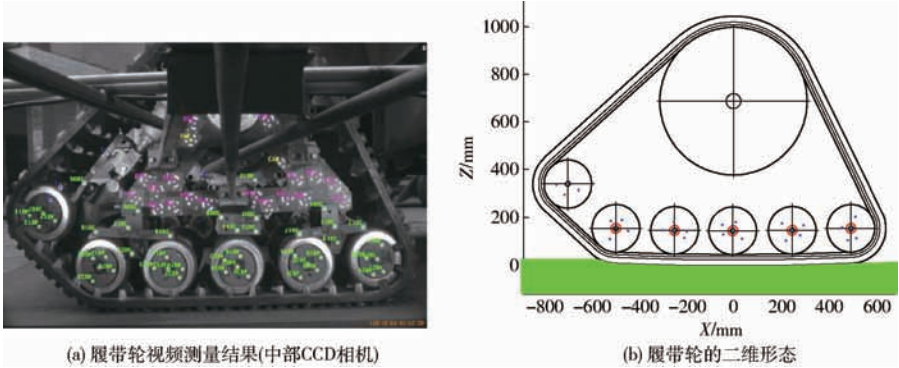


图 23 平整钢板的履带轮图像及形态
Fig. 23 Image and configuration of track assembly on flat steel plate

表 3 平整钢板上履带轮的参数

Tab.3 Parameters of track assembly on flat steel plate

flat steel plate		mm	
参数	数值	参数	数值
驱动轮轮心	(0.00, 687.00)	rw3 轮心	(-3.09, 145.08)
导向轮轮心	(-697.61, 339.47)	rw4 轮心	(247.04, 146.63)
rw1 轮心	(-495.64, 155.16)	rw5 轮心	(494.66, 154.95)
rw2 轮心	(-248.22, 146.43)	履带周长	3 795.99

所得的履带周长 L 的分布如图 24 所示,其中平均值 3 791.62 mm,标准差为 3.51 mm。结果表明:由于弯曲刚度变化,履带平均周长比履带出厂时检验结果约小 20.4 mm,且周长略有波动。但总体上周长稳定,且接近出厂检测长度。

4.4 多地形条件下履带周长试验

车辆分别在水泥地面、沙地、鹅卵石、土壤与鹅卵石混合和泥泞路面 5 种地形上,多次前进和后退,

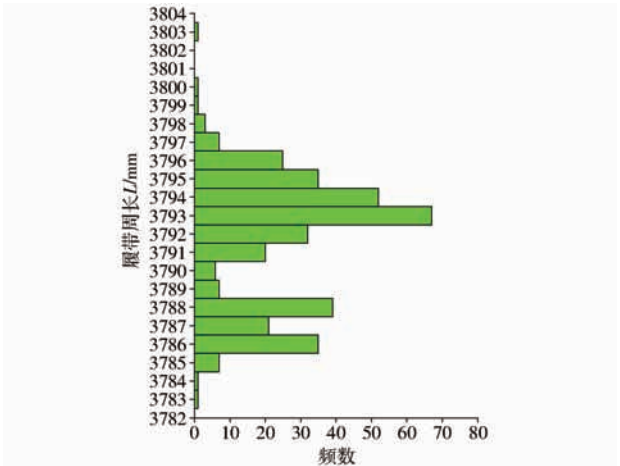


图 24 平整钢板上履带周长的分布
Fig. 24 Distribution of track perimeters on flat steel plate

进行测量,如图 25 所示。测得的履带轮图像如图 26 所示,相应重现的履带轮形态如图 27 所示,图中



图 25 多种地形条件下履带轮的视频测量
Fig. 25 Videogrammetry of track assembly under multi-terrain conditions

相关参数如表 4 所示。其中,在鹅卵石地形倒车行驶时,在鹅卵石滑动造成的冲击和履带拉力作用下,rw5 瞬时跌入坑内,造成 rw4 瞬时脱离履带。由于履带周

长建模中,各轮均不脱离履带,该情形使构建的履带周长明显增加,如图 28 所示,分析中需将该部分结果剔除。各地形上履带周长分布如图 29 和表 5 所示。

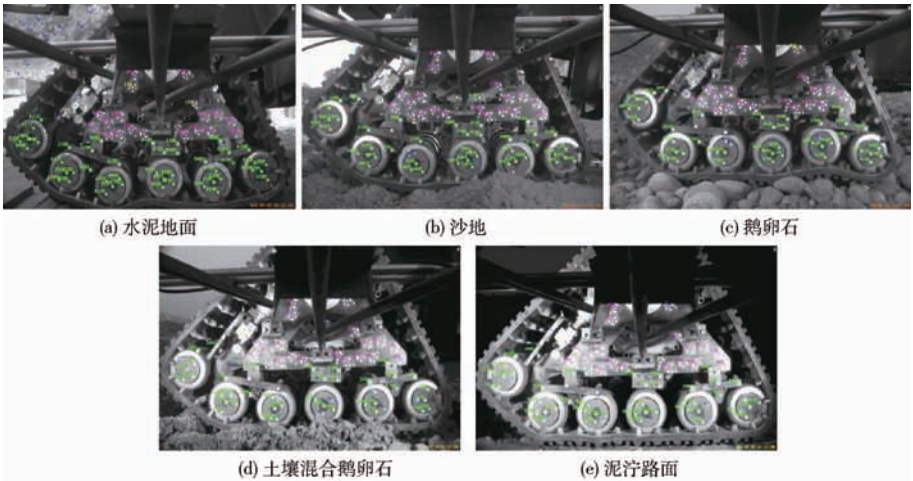


图 26 多种地形条件下履带轮的视频测量图像

Fig. 26 Images of videogrammetry of track assembly under multi-terrain conditions

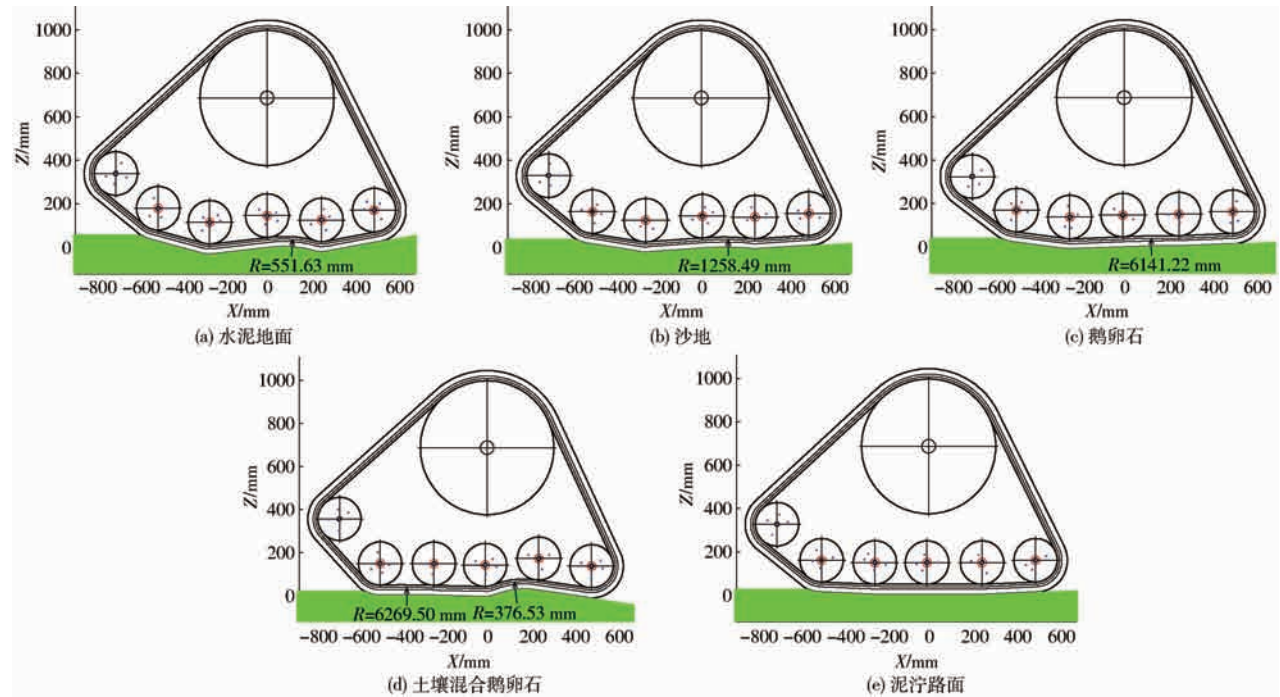


图 27 多种地形条件下重现的履带轮形态

Fig. 27 Reproduced configurations of track assembly under multi-terrain conditions

表 4 各地形上履带轮的参数

	Tab.4 Parameters of track assembly on each terrains					mm
地形条件	水泥路面	沙地	鹅卵石	土壤混合鹅卵石	泥泞路面	
驱动轮轮心	(0.00, 687.00)	(0.00, 687.00)	(0.00, 687.00)	(0.00, 687.00)	(0.00, 687.00)	
导向轮轮心	(-699.89, 339.85)	(-701.63, 330.15)	(-685.50, 357.08)	(-697.63, 324.93)	(-700.43, 327.92)	
rw1 轮心	(-503.93, 180.13)	(-499.64, 164.79)	(-496.71, 150.18)	(-495.07, 170.93)	(-494.74, 162.32)	
rw2 轮心	(-265.36, 116.05)	(-255.54, 125.26)	(-247.50, 149.11)	(-249.81, 138.93)	(-247.97, 151.96)	
rw3 轮心	(0.73, 146.43)	(4.70, 144.06)	(-9.06, 143.43)	(-6.43, 148.25)	(-7.56, 151.39)	
rw4 轮心	(252.36, 126.78)	(245.77, 140.19)	(240.32, 172.90)	(251.04, 152.81)	(246.56, 151.62)	
rw5 轮心	(495.92, 171.76)	(493.41, 156.40)	(485.66, 137.61)	(498.53, 163.23)	(494.20, 162.29)	
履带周长	3 788.19	3 798.19	3 792.64	3 786.70	3 788.50	

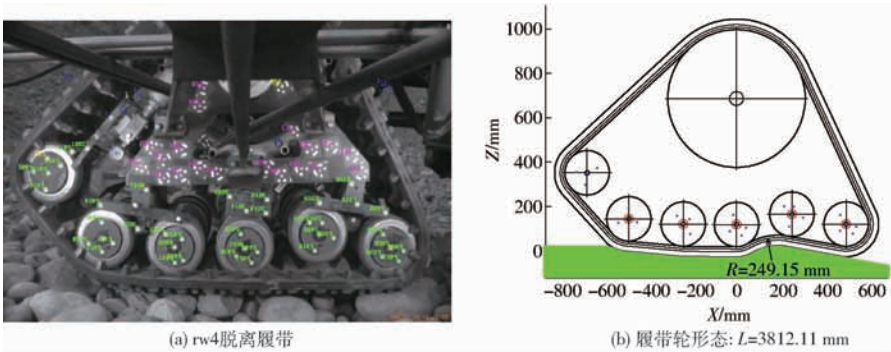


图 28 鹅卵石地形上负重轮瞬时脱离履带

Fig. 28 Roller wheel out of touch with track on cobblestone terrain

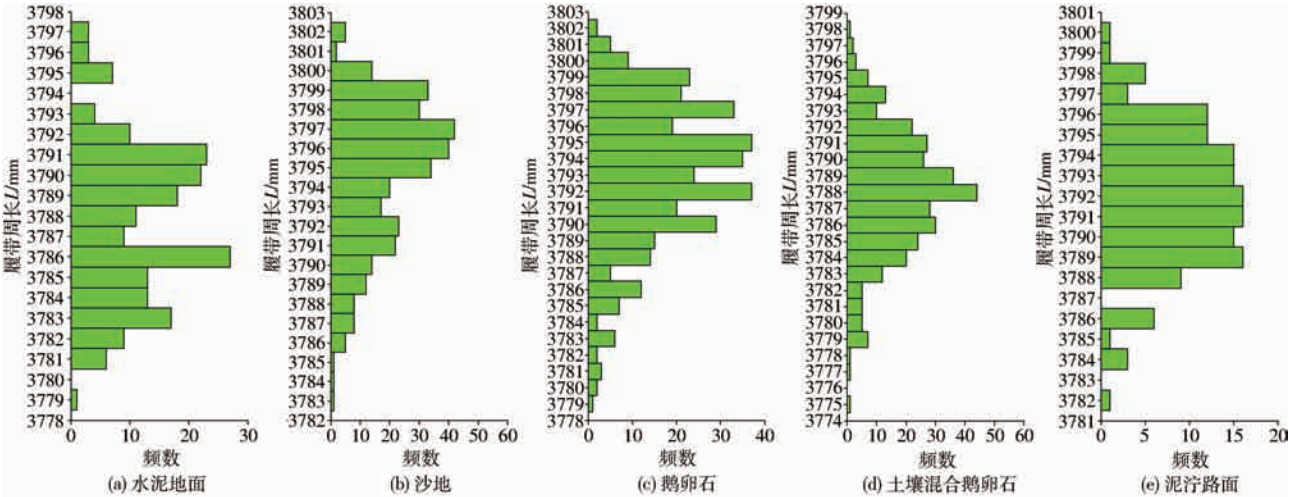


图 29 各地形上履带周长分布

Fig. 29 Distributions of track perimeters under multi-terrain conditions

表 5 各地形条件下履带周长均值及标准差

Tab.5 Averages and standard deviations of track perimeters under multi-terrain conditions

地形条件	水泥路面	沙地	鹅卵石	土壤混合鹅卵石	泥泞路面
周长平均值	3 787.78	3 794.75	3 793.06	3 787.93	3 791.88
周长标准差	3.86	3.78	4.48	3.84	3.35

通过分析,履带轮在各种地形上行驶时,履带周长的标准差与平整钢板上基本一致,履带的平均周长与平整钢板约有 $\pm 3.8\text{ mm}$ 的差别,为履带周长的 0.1%。因此,各地形上履带周长的统计结果与平整钢板一致。

5 结论

(1)提出了一种橡胶履带周长建模方法,该方法将履带周长分解为与各轮相接触的圆弧部分和与各轮不接触的变形部分,变形部分若不接触凸起障碍,则为直线,否则为圆弧。该方法对履带轮下方的地面障碍定位有不确定性。

(2)使用该方法评估了负重轮摆动和障碍定位对履带周长的影响。分析表明,负重轮摆动对履带

周长的影响是障碍定位对履带周长的影响的 10 倍以上,因而负重轮摆动可决定履带周长的变化。随着负重轮摆动加剧,履带轮脱带和履带过度拉伸的风险会逐渐增加。

(3)匹配了负重轮摆动幅度和张紧装置的设计参数。判断出负重轮摆动幅度在 55 mm 以下时,张紧装置能维持履带周长不变,同时使履带轮的接近角在 $20^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间。

(4)为排除使用圆弧假设近似履带变形部分对履带周长的影响,使用多相机视频测量系统,在平整钢板上测量分析了履带周长的变化。测得的履带平均周长为 3 791.62 mm,标准差为 3.51 mm,小于实际长度 3 812 mm,略有波动,这是履带弯曲刚度不均匀造成的。

(5)在水泥路面、沙地、鹅卵石、土壤鹅卵石、泥泞地面等多障碍地形上的视频测量试验结果表明,各地形上履带平均周长在 3 787.78 ~ 3 794.75 mm 之间,履带周长标准差在 3.35 ~ 4.48 mm 之间,均与平整钢板上的试验结果一致。因此,橡胶履带周长建模方法不受地形影响,鲁棒性好,能够为履带轮的轮系设计提供依据。

参 考 文 献

- 1 WONG J Y, HUANG W. Study of detracking risks of track systems [J]. Proc IMech E, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2006, 220(D9): 1235 – 1253.
- 2 NAGORCKA J A, ALLEN L. Suspension system for a tracked vehicle: EP, 1506112[P]. 2005 – 02 – 16.
- 3 RAHMAN A, YAHYA A, MOHIUDDIN A K M. Mobility investigation of a designed and developed segmented rubber track vehicle on Sepang peat terrain in Malaysia[J]. Proc IMech E, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2007, 221(7): 789 – 800.
- 4 RAHMAN A, MOHIUDDIN A K M, HOSSAIN A. Performance measurements of a tracked vehicle system[J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(4): 503 – 512.
- 5 DWYER M J, OKELLO J A, SCARLETT A J. A theoretical and experimental investigation of rubber tracks for agriculture[J]. Journal of Terramechanics, 1993, 30(4): 285 – 298.
- 6 GIGLER J K, WARD M. A simulation model for the prediction of the ground pressure distribution under tracked vehicles[J]. Journal of Terramechanics, 1993, 30(6): 461 – 469.
- 7 OKELLO J A. Prediction and experimental validation of the field tractive performance of a rubber track unit[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1994, 59(3): 163 – 171.
- 8 VANWYK D J, SPOELSTRA J, DEKLERK J H. Mathematical modelling of the interaction between a tracked vehicle and the terrain[J]. Applied Mathematical Modelling, 1996, 20(11): 838 – 846.
- 9 MA Z D, PERKINS N C. A super-element of track-wheel-terrain interaction for dynamic simulation of tracked vehicles[J]. Multibody System Dynamics, 2006, 15(4): 347 – 368.
- 10 PARK W Y, CHANG Y C, Lee S S, et al. Prediction of the tractive performance of a flexible tracked vehicle[J]. Journal of Terramechanics, 2008, 45(1 – 2): 13 – 23.
- 11 OKELLO J A, WATANY M, Crolla D A. A theoretical and experimental investigation of rubber track performance models[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 69(1): 15 – 24.
- 12 DU PLESSIS H L M, YU T. Modelling the traction of a prototype track based on soil-rubber friction and adhesion[J]. Journal of Terramechanics, 2006, 43(4): 487 – 504.
- 13 WANG Weidong, ZHOU Lei, DU Zhijiang, et al. Track-terrain interaction analysis for tracked mobile robot[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2008: 126 – 131.
- 14 CONTRERAS U, LI Guangbu, FOSTER C D, et al. Soil models and vehicle system dynamics[J]. Applied Mechanics Reviews, 2013, 65(4): 040802 – 1 – 040802 – 21.
- 15 MCCULLOUGH M K, HAUG E J. Dynamics of high mobility track vehicles[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1986, 108(2): 189 – 196.
- 16 DHIR A, SANKAR S. Dynamics of off-road tracked vehicles equipped with trailing arm suspension[J]. Proc IMech E, Part D: Journal of Automobile Engineering, 1995, 209(34): 195 – 215.
- 17 DHIR A, SANKAR S. Analytical track models for ride dynamic simulation of tracked vehicles[J]. Journal of Terramechanics, 1994, 31(2): 107 – 138.
- 18 SANDU C, FREEMAN J S. Connectivity algorithm for an extended rubber-band track model[J]. Heavy Vehicle Systems, 2002, 9(4): 333 – 353.
- 19 WONG J Y. Development of high-mobility tracked vehicles for over snow operations[J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(4): 141 – 155.
- 20 WONG J Y, SENATORE C, JAYAKUMAR P, et al. Predicting mobility performance of a small, lightweight track system using the computer-aided method NTVPM[J]. Journal of Terramechanics, 2015, 61: 23 – 32.
- 21 李磊刚,梁晋,唐正宗,等. 飞机结构件运动数据的动态视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1929 – 1938.
LI Leigang, LIANG Jin, TANG Zhengzong, et al. Optical and dynamic measuring system for movement data of aircraft structural parts[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(9): 1929 – 1938. (in Chinese)
- 22 胡浩,梁晋,唐正宗,等. 大视场多像机视频测量系统的全局标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 369 – 378.
HU Hao, LIANG Jin, TANG Zhengzong, et al. Global calibration for multi-camera videogrammetric system with large-scale field-of-view[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 369 – 378. (in Chinese)
- 23 HU Hao, LIANG Jin, XIAO Zhenzhong, et al. A four-cameravideogrammetric systemfor 3-D motion measurement of deformable object[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(5): 800 – 811.