

4GXJ-2型电动割胶刀的传动结构与运动仿真分析

陈娃容^{1,2},肖苏伟^{1,2},贾倩^{1,2},邓祥丰^{1,2},黄敞^{1,2},郑勇^{1,2}

(1. 中国热带农业科学院橡胶研究所,海南海口 571101;
2. 国家重要热带作物工程技术研究中心机械分中心,海南海口 571101)

摘要:采用 SolidWorks 软件建立了 4GXJ-2 型电动割胶刀的传动机构模型,通过 ADAMS 软件对模型进行运动仿真和验证,使用 SolidWorks 软件中的 simulation 插件,对传动机构的关键部件强度进行有限元分析,结果表明:在扭矩分别为 0.2 N·m、0.22 N·m、0.25 N·m 的条件下,传动机构的运动曲线变化平稳且具有周期性,关键部件产生的最大应力为 5.147 GPa,远小于材料的屈服强度 220.6 TPa,而在形变方面没有明显变化。在样机与传统胶刀进行田间切割对比测试中,样机不仅可实现不撕老胶线割胶,提升割胶效率,而且在橡胶树的割面、耗皮、排胶等方面均具有接近于传统胶刀的割胶效果。

关键词:4GXJ-2 型;电动割胶刀;传动结构;运动仿真

中图分类号:TH113.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5322(2021)04-0024-08

橡胶树是大戟科橡胶树属植物,广泛分布在亚洲、非洲、大洋洲、拉丁美洲等大洲的 40 多个国家和地区,具有很大的生态价值与经济价值,是热带地区重要的经济收入组成部分^[1]。我国是世界上最大的天然橡胶消费国,也是第四大生产国。目前,我国橡胶树种植面积超过 114.7 万 ha (1720 万亩),开割面积达 86.7 万 ha (1300 万亩^[2]),全国约有 133 万名天然橡胶从业人员,平均每公顷产量为 1260 kg (每亩产量为 84 kg);割胶方式仍旧以传统割胶刀为主,劳动成本约占天然橡胶产业生产成本的 60% 以上^[3-4]。

几十年来,低下的割胶效率、较高的劳动成本成为制约橡胶产业发展的“痛点”,机械化采胶成为必然趋势^[5-7]。本文结合橡胶树的生长特性和天然橡胶收割对农机农艺的要求,设计了适用于田间割胶作业的 4GXJ-2 型电动割胶刀的传动机构,并对其进行运动仿真和强度校核;最后根据仿真验证的结果,试制了该传动机构的样机,并进行了试验验证,为后期天然橡胶机械化收割

装备动力机构的设计提供了技术和理论参考。

1 传动机构设计与工作原理

1.1 割胶的技术规程与制度要求

割胶是指采用特制的工具,从橡胶树树干割口处切割树皮,使胶乳从割口处流出以获取橡胶的操作^[8]。割胶后形成一段近似圆柱螺旋线的割线,割线倾斜度即为螺旋升角。阳刀割胶时,其倾斜度为 25°~30°;阴刀割胶时,倾斜度为 40°~45°^[9]。阳刀割胶时的橡胶树如图 1 所示。

割胶操作过程中需保证沿树干径向的割胶深度和沿树干轴向的树皮消耗量(简称耗皮量)2 个指标均在合适范围内。割胶深度是指割胶时割去树皮的内切口与形成层的距离,常规割胶时为 1.2~1.8 mm;耗皮量是指每刀切割下树皮的厚度,不同割制对应的耗皮厚度会有细微差异,但一般都在 1.0 mm 左右。

1.2 电动割胶刀的外观设计与建模

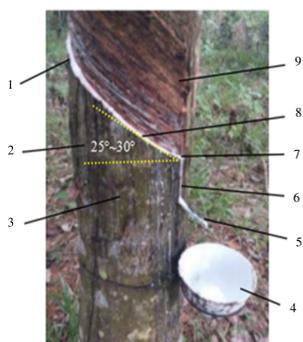
按照传统割胶刀的技术规程要求,通过 Solid-

收稿日期:2021-03-30

基金项目:国家重点研发计划资助(2020YFD1000600);中国热带农业科学院基本科研业务费专项资金(1630022020004);海南省重点研发计划(ZDYF2019026)。

作者简介:陈娃容(1984—),女,海南海口人,助理研究员,主要方向为农业机械化工程。

通信作者:郑勇(1984—),男,湖南永州人,副研究员,硕士,主要方向为农业机械化。



1—割线;2—割线倾斜度;3—待割面;4—胶碗;
5—胶舌;6—水线;7—胶乳;8—割口;9—已割面。

图1 开割后的橡胶树

Fig 1 Rubber tree after cutting

Works 软件对电动割胶刀的三维模型结构进行相关的参数化设计,使其在割胶方式、割胶技巧、胶工使用习惯等方面相互对应,以此来满足相应的割胶制度、胶水产量、耗皮厚度等效果要求。电动割胶刀的三维实体模型如图2所示,打开启动开关,在人手的辅助下接触橡胶树表面,由机械传动的方式实现刀片对橡胶树树皮的切割,而不再单纯地依靠人工控制割胶刀的切割轨迹来完成作业。相比传统的割胶方式,电动割胶刀降低了胶工的劳动强度,缩短了割胶培训与割胶作业

的时间,但割胶效果与传统胶刀差别不大,一定程度上保证了割胶的质量,降低了对割胶产量的影响。

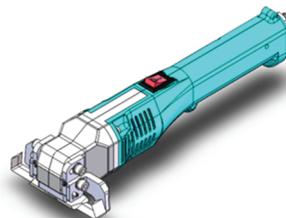
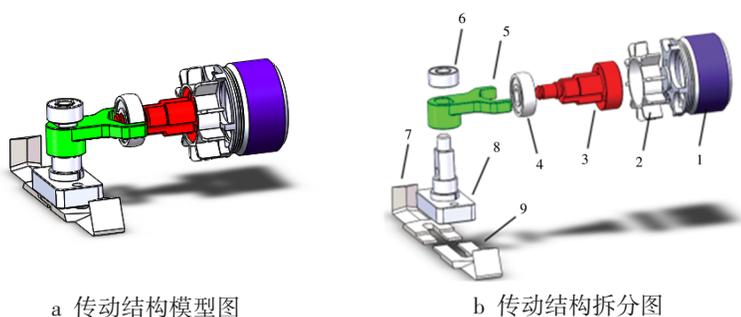


图2 电动割胶刀的三维实体模型

Fig 2 The three-dimensional solid model of the electric rubber tapping knife

1.3 电动割胶刀传动结构设计与工作原理

电动割胶刀的工作原理是将电机的旋转运动转换成刀片的往复运动。电动割胶刀的传动结构如图3所示,电源为4 000 mA的外接式电池。图3中,偏心轴在无刷电机旋转的带动下作高速运动,轴外套的滚动轴承与传动叉相切。在偏心距作用下滚动轴承作偏心圆周运动,并通过与传动叉的接触将其转换成平面的偏摆运动;由于传动叉与刀座为固定连接,进而形成刀片以刀座中心为固定点,实现一定角度的往复运动,从而达到结构设计上的切割偏摆运动效果。



1—无刷电机;2—散热叶片;3—偏心轴;4—滚动轴承;5—传动叉;6—限位圈;7—右刀片;
8—刀座;9—左刀片。

图3 电动割胶刀的传动结构三维图

Fig 3 Three-dimensional diagram of the transmission structure of the electric rubber tapping knife

1.4 刀片切割树皮的碰撞分析

割胶时,电动割胶刀刀片与橡胶树树皮的接触碰撞过程如图4所示。根据电动割胶刀的操作规范,通过对割胶时刀片与割线表面的割痕、刀片的空间运动轨迹等方面的观察,能够分析出割胶时刀片和橡胶树树皮割线面的接触碰撞属于

低速碰撞,且为碰撞过程连续、接触形态为点与点的小变形碰撞。因此,可以运用Hertz接触理论^[10]将刀片和橡胶树树皮割线面的碰撞接触简化为发生在一个局部接触区域内的弹簧阻尼系统,碰撞过程分为压缩与弹性恢复两个阶段。

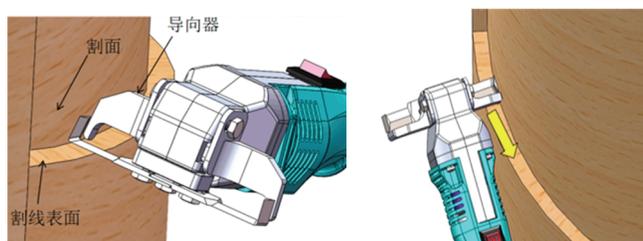


图 4 电动割胶刀割胶示意图

Fig 4 Schematic flow of rubber tapping with electric rubber tapping knife

由广义 Hertz 公式,物体碰撞力^[11]有如下形式:

$$F = k\delta^n + \lambda\delta^n \times \frac{d\delta}{dt} \quad (1)$$

式中: $n=1.5$,为公式固有序数值; δ 为物体碰撞时的相对压入变形量,mm; $\frac{d\delta}{dt}$ 为相对压入速度,mm/s; λ 为阻尼系数, $N/(mm \cdot s^{-1})$; k 为 Hertz 刚度,且 $k = \frac{4}{3\pi(\sigma_1 + \sigma_2)} r^{1/2}$, $\sigma_i = \frac{1 - \nu_i}{\pi E_i}$, $i = 1, 2$ (E_1, E_2 分别为刀片与橡胶树树皮的弹性模量, N/mm^2 ; ν_1, ν_2 分别为刀片与橡胶树树皮的泊松比; σ_1, σ_2 分别为刀片与橡胶树树皮产生的应力, MPa; 等效曲率半径 $r=r_1$, r_1 为刀片与橡胶树树皮接触点处的曲率半径, mm)。

由 Hunt 假设^[12]可知,刀片和橡胶树树皮在碰撞期间产生的能量被阻尼所耗散,碰撞过程损耗的能量等于图 5 所示滞后环积分所得的能量损失。

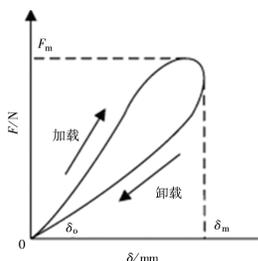


图 5 Hertz 接触力滞后环曲线

Fig 5 Hertz contact force hysteresis loop curve

设刀片和橡胶树树皮碰撞前的瞬间速度分别为 v_1, v_2 , 于是得到滞后阻尼系数 λ 和恢复系数 e 之间的关系为

$$\lambda = \frac{3}{4} \times \frac{k(1 - e^2)}{v_1 - v_2} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),化简得到刀片对橡胶树树皮的碰撞力为:

$$F = k\delta^n \left(1 + \frac{3}{4} \times \frac{1 - e^2}{v_1 - v_2} \times \frac{d\delta}{dt} \right) \quad (3)$$

2 电动割胶刀的运动特征仿真分析

2.1 参数设计与仿真模型建立

为了直观了解电动割胶刀的运动过程,需要利用 ADAMS 软件对其进行运动学仿真。仿真前,根据电动割胶刀的运动方式,首先对其传动机构模型添加对应的约束条件,然后将添加了约束条件的三维模型在 SolidWorks 中进行模型简化,以减少计算机的运算负荷并节约模拟时间。仿真时,将简化后的模型保存为 x_t 格式的通用文件,再导入到 ADAMS 软件中进行运动学分析,同时将传动机构的零件材料属性均选取为普通碳钢材质。

添加了约束条件的电动割胶刀传动机构三维模型如图 6 所示,具体的关键铰接点约束命名如表 1 所示。

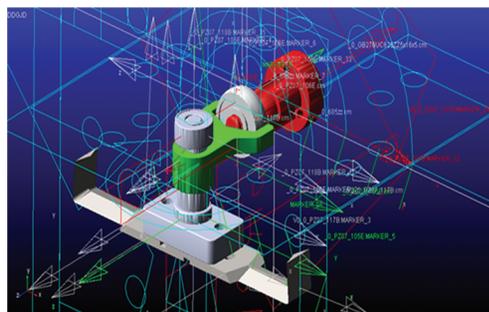


图 6 电动割胶刀传动机构的约束模型

Fig 6 The restraint model of the transmission structure of the electric rubber tapping knife

2.2 传动机构的运动仿真与结果分析

为了仔细观察电动割胶刀传动机构的运动特征,将仿真时间和步数进行适当地延长,通过测量传动机构各零件之间的实时运动特征,输出相关物理量的变化曲线。具体地说,仿真时在 ADAMS 软件的菜单界面将运行参数设置为时间

表1 传动结构各零件间在ADAMS软件中的约束关系
Table 1 The constraint relationship between the various parts of the transmission structure in the ADAMS software

零件一	零件二	约束类型
左刀片	右刀片	固定副
左刀片	刀座	固定副
右刀片	刀座	固定副
刀座	传动叉	固定副
刀座	限位圈	固定副
限位圈	地面	固定副
传动叉	滚动轴承	线接触
滚动轴承	偏心轴	旋转副
偏心轴	大地	旋转副

$t=20\text{ s}$ 、步长 $S=2\ 000$,得到割胶刀片的运动轨迹如图7所示。

图8为电动割胶刀传动叉与刀片质心的位移运动幅值。由图8可知,电动割胶刀传动叉与刀片质心的位移运动曲线平稳光滑,具有周期性、

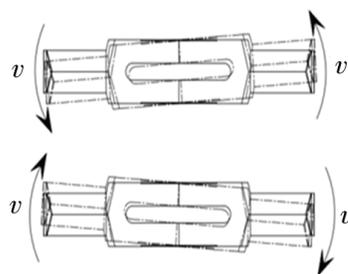


图7 切割刀片的平面运动轨迹

Fig 7 Plane motion trajectory of the cutting blade

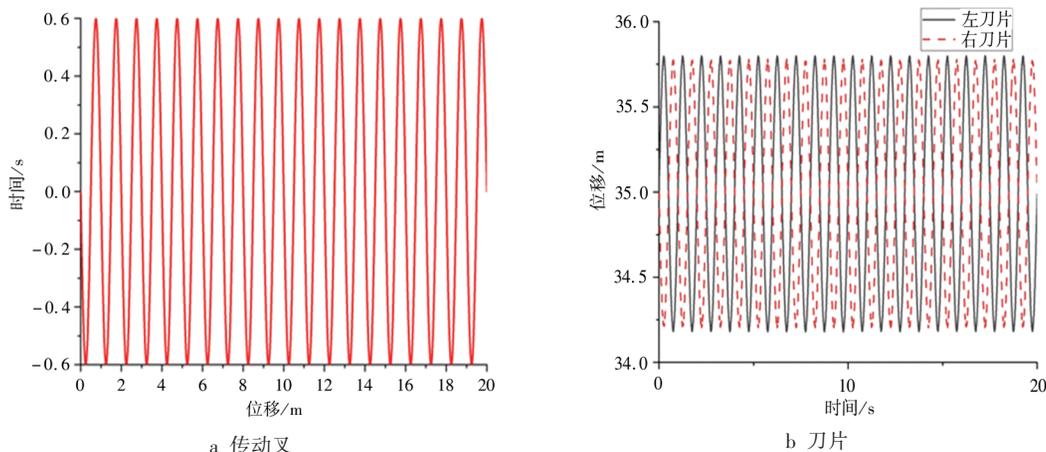


图8 传动叉与刀片质心的位移运动幅值

Fig 8 The displacement movement amplitude of the center of mass of the transmission fork and the blade

对称性的变化,说明电动割胶刀的传动机构工作时运行稳定,零件之间的配合没有干涉,从而实现了刀片有规律的偏摆,有利于切割面的平滑性和割线的流畅性,保障了切割作业的顺利进行。

图9、图10为电动割胶刀传动结构在9 000 r/min、8 000 r/min、7 000 r/min 3种不同转速下的运动状态。其中图9为电动割胶刀不同转速下偏心轴承受的扭矩,图10为传动叉与滚动轴承接触面的接触力变化。

由图9可知,图中某时间段扭矩值突然增大,这是由于电动割胶刀割胶时,在电机的高速旋转下,刀片的高频率摆动会造成强烈的震动幅值产生,引起某处的扭矩值突然增大。

图10中,在设定的仿真时间内,不同转速下的偏心轴使得传动叉与滚动轴承间产生的接触力,呈现出周期性的幅值波动趋势的特征,且在某段

时间内的动态接触力会产生较大的波动。这是由于在传动叉与滚动轴承接触过程中存在着一定的冲击与振动,可能造成滚动轴承与传动叉表面出现划痕;周期性的损伤累积可能会加速零件的疲劳失效,从而产生较大的震动与噪声,最终可能会损坏零件导致电动割胶刀无法正常工作。因此,有必要对传动叉零件进行强度分析,来验证设计的合理性与实用性。

3 传动机构关键部件的强度分析

电动割胶刀在割胶过程中会受到多种不定向载荷的影响,如电机的扭矩、刀片的切割力、滚动轴承的作用力等,传动叉作为传动机构的主要连接部件,不仅负责扭力的传递还承担切割力的反作用负载的影响,因此该零件的结构强度直接影响着电动割胶刀的使用性能。

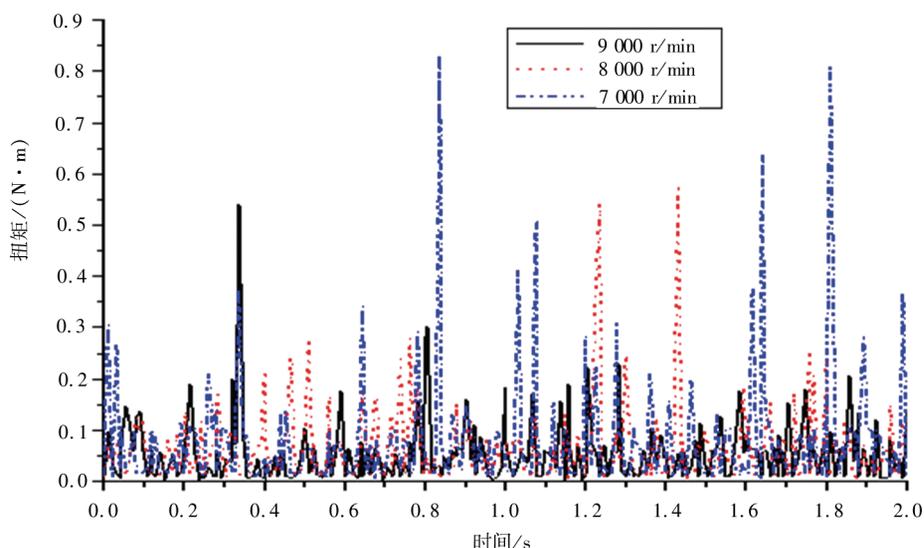


图9 不同转速下偏心轴承承受的扭矩值

Fig 9 Torque values of eccentric bearings at different speeds

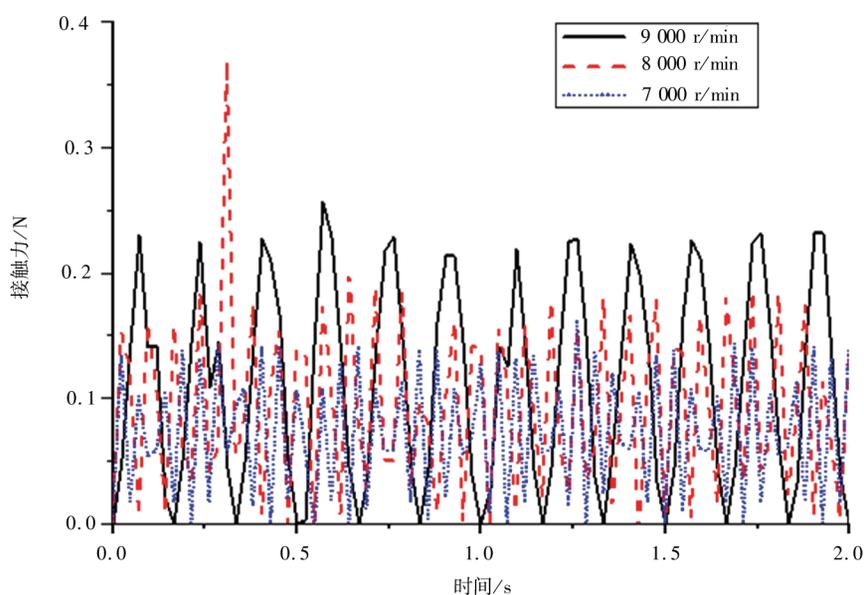


图10 传动叉与滚动轴承接触面的接触力变化

Fig 10 The contact force change between the transmission fork and the contact surface of the rolling bearing

为研究传动叉的结构强度,利用SolidWorks 软件中的 simulation 插件对其进行有限元分析,并通过 ADAMS 软件进行强度分析。在对传动叉进行有限元分析前,依然要对传动叉边界条件施加约束,方式同前面的模型仿真。在传动叉进行有限元分析时首先要进行网格划分,因为网格节点的密度决定了求解时个体单元的计算精度。如果网格划分过于稀疏,会影响分析的准确度,造成计算结果误差较大;而网格划分密度过大,则会增加计算机的运算负荷,延长求解分析的时间。传动叉网格划分如图 11 所示,在软件平台自动生成的默

认网格后,首先检查网格质量并进行调整;然后对传动叉模型主要受力部位的网格密度进行细化,得到实体单元网格 8 922 个,节点数 14 896 个;最后再利用 ADAMS 软件进行运动学分析,得到传动叉的应力云图、位移变形云图如图 12 所示。

由图 12 可知,传动叉运动过程中受到的最大应力、最大位移变形分别为 5. 147 GPa、514. 9 μm 。显然,传动叉运动过程中受到的最大应力远小于材料的屈服强度 220. 6 TPa;最大形变量也比较小,可以忽略不计。因此,传动叉在高速摆动过程中,虽然受到了多种不定载荷的相互影响,但对于材

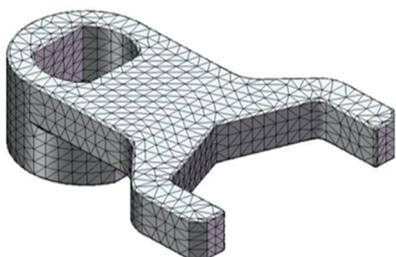


图 11 传动叉网格划分

Fig 11 Meshing of transmission fork

料本身而言,依然能够满足这样的使用条件。

由图 12 还可以看出,传动叉受到的应力和位

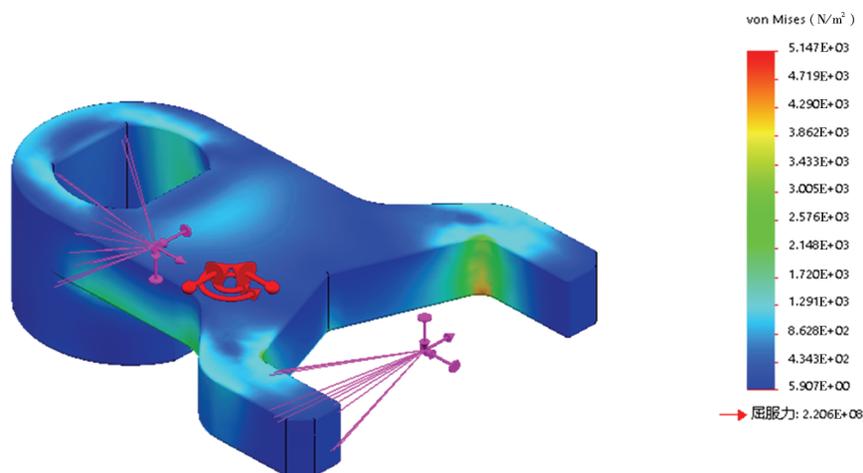
移形变,主要集中在叉头的两端表面或拐角处,而叉尾与中间处受到的影响较小。这是由于叉头两

端与动力原件直接接触且较为狭长,造成应力的作用较为显著;而叉尾与刀座为固定约束,摆动时能够将载荷进行传递;传动叉中部较为宽大,增加了受力的横截面积,能够很好地对载荷进行扩散,从而减小应力对零件的影响。

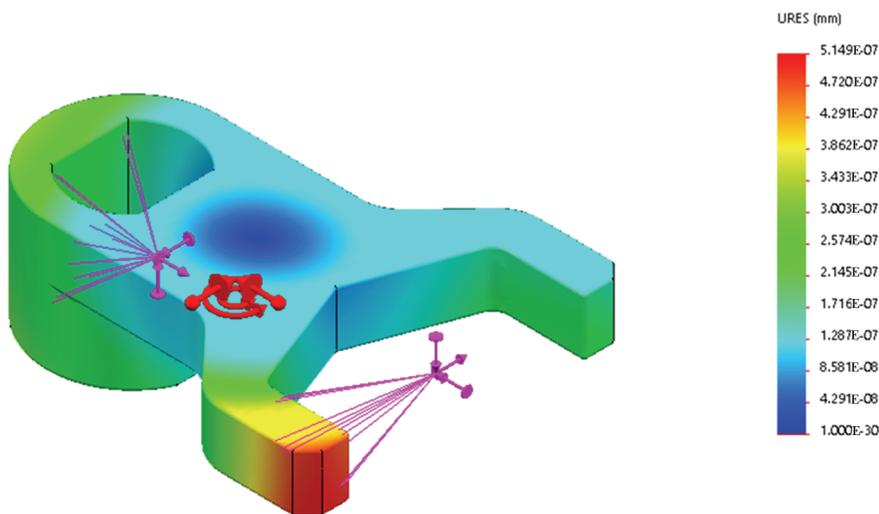
传动叉工作后的表面效果如图 13 所示,传动叉与滚动轴承经过长时间的剧烈摩擦后,滚动轴承与叉体两端接触的内表面只出现小片刮痕,而传动叉整体结构并没有受到明显的损坏,具有较好的强度特征。因此该零件的结构设计满足实用性要求。

4 田间试验

根据仿真结果,试制了 4GXJ-2 型电动胶刀动



a 应力云图



b 位移变形云图

图 12 传动叉的强度分析结果

Fig 12 The strength analysis result of the transmission fork



图 13 传动叉工作后的表面效果

Fig 13 The surface effect of the drive fork after working

力机构样件,并以此样件与传统胶刀在海南省儋州市试验场,选取树龄 10 a 以上、树干直径大于 500 mm、切割树皮为原生皮的橡胶树开展田间切割对比试验,切割效果如图 14、图 15 所示。

由图 14、图 15 可知,电动割胶刀切割的橡胶树皮呈片状,耗皮的厚度和宽度达到毫米级,在排胶的流畅性和割面的平整性等方面均接近于传统胶刀的割胶效果,因此在橡胶树的耗皮和割面方面,电动割胶刀割胶效果接近于传统胶刀。另外,



a 电动割胶刀



b 传统割胶刀

图 14 电动割胶刀与传统割胶刀的切割耗皮对比

Fig 14 Comparison of the cutting skin consumption between the electric rubber tapping knife and the traditional rubber tapping knife



a 电动割胶刀



b 传统割胶刀

图 15 电动割胶刀与传统割胶刀的割切效果对比

Fig 15 Comparison of cutting effect between the electric rubber tapping knife and the traditional rubber tapping knife

在切割老胶线方面,电动胶刀明显优于传统胶刀,割胶时不需要人工撕掉老胶线,能够实现不撕老胶线割胶,提高了切割效率。

5 结论

通过 SolidWorks 软件技术,搭建了电动割胶刀的三维模型;利用 ADAMS 软件和 SolidWorks

simulation 插件,对电动割胶刀的传动机构进行运动仿真分析与关键零件强度校核,结果表明:在设定的参数仿真下,传动机构零件之间不存在相互干涉的现象,运动和受力曲线变化平稳且具有周期性;关键零件的受力符合规定的取值范围,且远低于材料的屈服强度。

根据仿真结果,试制了 4GXJ-2 型电动胶刀

动力机构样件,并在田间试验场与传统胶刀开展了切割对比试验,结果表明:电动割胶刀具有独特的结构设计优势,割胶作业时不需要人工撕掉老胶线,从而更省时、省力;在橡胶树的耗皮和割面方面,电动割胶刀割胶效果接近于传统胶刀。

因此,本文设计的电动割胶刀不仅解决了传统割胶刀割胶时需要先撕老胶线,或者不撕老胶线割胶但部分胶线粘连树干需要二次清理的问题,提升了割胶效率,而且还保持了传统割胶刀的割胶效果。

参考文献:

- [1] 肖苏伟,张以山,曹建华,等.天然橡胶全自动采胶系统技术理论研究[J].中国农机化学报,2020,41(9):143-148.
- [2] 黄华孙.天然橡胶体系分册[M].北京:中国农业出版社,2020.3-4.
- [3] 曹建华,张以山,王玲玲,等.天然橡胶便携式采胶机械研究[J].中国农机化学报,2020,41(8):20-27.
- [4] 刘锐金,杨琳,何长辉.全球天然橡胶产量与价格的动态关系分析[J].南方农业学报,2019,50(10):2359-2367.
- [5] 魏小弟.我国割胶生产技术现状和建议[J].中国热带农业,2010(2):5-7.
- [6] 校现周.对天然橡胶产业面临困境的思考[J].中国热带农业,2016(1):4-5.
- [7] 高宏华,黄云生,校现周,等.浅议机械化采割的紧迫性和可行性[J].中国热带农业,2015(4):10-13.
- [8] 中华人民共和国农业部.橡胶树割胶技术规程:NY/T 1088—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [9] 张春龙,李德程,张顺路,等.基于激光测距的三坐标联动割胶装置设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(3):121-127.
- [10] 运睿德,丁北.考虑多尺度接触状态的新接触模型[J].机械工程学报,2019,55(9):80-89.
- [11] 金栋平,胡海岩.碰撞振动与控制[M].北京:科学出版社,2005:36-39.
- [12] 丁彩红,李署程,吴喜如.自动化铲板的对刀运动分析及其参数设计[J].纺织学报,2020,41(9):143-148

Transmission Structure Design and Motion Simulation Analysis of 4GXJ-2 Electric Rubber Tapping Knife

CHEN Warong^{1,2}, XIAO Suwei^{1,2}, JIA Qian^{1,2}, DENG Xiangfeng^{1,2}, HUANG Chang^{1,2}, ZHENG Yong^{1,2}
 (1. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou Hainan 571101, China;
 2. Machinery Branch Center of National Important Tropical Crops Engineering Technology Research Center,
 Haikou Hainan 571101, China)

Abstract: The transmission mechanism model of the 4GXJ-2 electric rubber tapping knife was established by using SolidWorks software, and the model was simulated and verified by ADAMS software. The simulation plug-in in SolidWorks software was used to perform finite element analysis on the strength of the key components of the transmission mechanism. The results show that: Under the conditions of torques of 0.2 N·m, 0.22 N·m, 0.25 N·m, the movement curve of the transmission mechanism changes smoothly and periodically, and the maximum stress generated by the key components is 5.147×10^3 MPa, which is much smaller than the yield strength of the material 2.206×10^8 MPa, and there is no obvious change in deformation. In the field cutting comparison test between the prototype and the traditional rubber knife, the prototype not only realized the tapping without tearing the old rubber line, and improved the tapping efficiency, but also was close to the traditional rubber knife in terms of surface cutting, bark consumption, and rubber discharge of the rubber tree. The tapping effect.

Keywords: 4GXJ-2 type; electric rubber tapping knife; transmission structure; motion simulation

(责任编辑:李华云)