·农林智能装备与技术 Intelligent Equipment and Technology for Agriculture and Forestry·

用于生态园林树木修剪的仿生爬树机器人设计

刘志军[1]，白占清[2]，齐鹏[1*]
（1. 哈尔滨职业技术大学 新能源汽车学院，哈尔滨 150081；2. 中国铁路青藏集团有限公司西宁供电段，西宁 810000）

摘　要：针对生态园林树木高位修剪机械化程度低、人工登高作业安全风险高等问题，设计一种仿生爬树机器人。该机器人借鉴灵长类动物交替攀爬行为和电工脚扣抱杆自锁原理，提出“双卡环夹持—螺旋丝杠伸缩—链锯修枝”的总体方案，以实现树干夹持、蠕动式攀爬和侧枝修剪作业。采用三维计算机辅助设计软件UG（unigraphics NX）建立机器人三维模型，利用机械系统自动动力学分析软件（automatic dynamic analysis of mechanical systems，ADAMS）对攀爬过程中的位移、卡环接触力和驱动电机输出响应进行动力学仿真，并基于ANSYS协同仿真工作台（ANSYS workbench）对抱树卡环、丝杠及连接部位进行有限元可靠性分析；同时搭建可编程逻辑控制器（programmable logic controller，PLC）与上位机相结合的分层控制系统，搭载压力反馈模块，实现卡环夹紧状态检测和攀爬动作协调控制。仿真与分析结果显示，机器人可按预定步态完成连续蠕动式爬升，单个攀爬周期爬升距离约150 mm，攀爬过程中未出现明显整体下滑；稳定阶段抱树卡环与树干之间的接触力约960 N，可满足竖直攀爬和驻停自锁要求。有限元分析中，抱树卡环最大应力约46 MPa，低于Q235钢屈服强度235 MPa，安全系数为5.08，关键承载结构未出现明显过量变形。控制系统能够协调3台步进电机完成卡环开合与丝杠伸缩动作，并保证攀爬与返回过程中至少一组卡环保持夹紧状态。该机器人结构方案可行，能够按照预定步态完成蠕动式攀爬动作，关键部件强度满足要求，可为生态园林树木修剪装备的小型化与自动化设计提供参考。

关键词：生态园林；树木修剪；仿生爬树机器人；自锁夹持；蠕动式攀爬；动力学仿真；有限元分析；PLC控制
中图分类号：S777　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.7525/j.issn.1006-8023.2026.05.018

Design of a Bionic Tree-Climbing Robot for Tree Pruning in Ecological Landscapes

LIU Zhijun[1], BAI Zhanqing[2], QI Peng[1*]
(1. College of New Energy Vehicles, Harbin University of Vocational Technical, Harbin 150081, China; 2. Xining Power Supply Section, China Railway Qinghai-Tibet Group Co., Ltd., Xining 810000, China)

Abstract: To address the low level of mechanization and the high safety risks associated with manual high-elevation pruning of trees in ecological landscapes, a bionic tree-climbing robot was designed. Inspired by the alternating climbing behavior of primates and the self-locking principle of electrician's pole-climbing devices, an overall configuration integrating dual-ring clamping, lead-screw-driven extension, and chain-saw pruning was proposed to achieve trunk gripping, inchworm-type climbing, and lateral branch pruning. A three-dimensional model of the robot was developed using unigraphics NX (UG). The displacement, clamp contact force, and drive-motor output responses during the climbing process were investigated through dynamic simulations using the automatic dynamic analysis of mechanical systems (ADAMS). Finite element reliability analyses of the tree-holding clamp, lead screw, and connecting components were conducted using ANSYS workbench. In addition, a hierarchical control system integrating a programmable logic controller (PLC) and a host computer was established. A pressure-feedback module was incorporated to detect the clamp tightening state and coordinate the climbing motions. The simulation and analysis results showed that the robot could continu-

收稿日期：2026-04-30
基金项目：黑龙江省自然科学基金项目(LH2023F005)。
第一作者简介：刘志军，博士，副教授。研究方向为机器人工程与智能装备技术。E-mail：352387407@qq.com
***通信作者：**齐鹏，博士，讲师。研究方向为智能制造。E-mail：qipeng0325@163.com
引文格式：刘志军，白占清，齐鹏. 用于生态园林树木修剪的仿生爬树机器人设计[J]. 森林工程，2026，42(5)：1081-1094.
Liu Zhijun, Bai Zhanqing, Qi Peng. Design of a bionic tree-climbing robot for tree pruning in ecological landscapes[J]. Forest Engineering, 2026, 42(5): 1081-1094.

ously climb according to the predefined inchworm-type gait, with a climbing distance of approximately 150 mm per cycle and no evident overall downward slippage during operation. During the stable climbing stage, the contact force between the tree-holding clamp and the tree trunk was approximately 960 N, satisfying the requirements for vertical climbing, stationary holding, and self-locking. Finite element analysis indicated that the maximum stress of the tree-holding clamp was approximately 46 MPa, which was lower than the yield strength of Q235 steel of 235 MPa, corresponding to a safety factor of 5.08. No excessive deformation was observed in the key load-bearing components. The control system coordinated three stepper motors to complete the opening and closing of the clamps and the extension and retraction of the lead screw, while ensuring that at least one set of clamps remained engaged during both climbing and descending operations. The proposed robot has a feasible structural configuration, can perform inchworm-type climbing according to the predefined gait, and meets the strength requirements of its key components. The design provides a reference for the miniaturization and automation of tree-pruning equipment used in ecological landscapes.

Keywords: Ecological landscape; tree pruning; bionic tree-climbing robot; self-locking clamping; inchworm-type climbing; dynamic simulation; finite element analysis; PLC control

0 引言

树木修剪是生态园林养护、人工林抚育和经济林管理中的重要作业环节,对调控树体生长、改善树冠通风透光条件、降低枯死枝及病虫害安全隐患、提升景观质量和林木培育质量具有重要作用。当前,生态园林树木及林木修枝作业仍较多依赖人工攀爬、登高平台、手持高枝锯或油锯完成,存在劳动强度大、作业效率受人工经验影响明显和高空作业风险高等问题。因此,发展能够适应树干环境并完成高位枝条修剪的专用化装备,对提高树木修剪作业安全性和机械化水平具有重要意义。

近年来,国内学者围绕树木修剪装备、林木作业智能装备和爬树式修枝机器人开展了较多研究。于少轩等[1]设计了面向生态园林作业的单向电机驱动修枝装备,并对其作业性能进行了分析;刘玉童等[2]研制了林木胸径持续测量装置,为树干径级识别和变径树干作业装备设计提供了参考;崔浩等[3]基于深度视觉开展核桃树干振动机构设计与仿真研究,体现了树干径级感知、动力学仿真和装备自适应调节在林果作业装备中的应用价值;周志标等[4]开展了立木攀爬修枝机器人设计与试验,为爬树式修枝装备结构设计和定点修枝作业提供了借鉴;张琦等[5]针对绿篱修剪机械臂提出了基于多目标优化的轨迹规划方法,对提高修剪执行机构运动稳定性具有参考意义。

在林木修枝装备方面,韩立志等[6]对桉树速生林机械修枝现状进行了分析,指出机械修枝装备对降低人工劳动强度、提高作业安全性具有重要意义;韩立志等[7]提出了一种桉树爬树修枝机结构方案;郑贤等[8]设计并测试了桉树爬树修枝机,验证了爬树式修枝装备在林木修枝作业中的应用可行性。此外,路侧绿篱修剪机器人和园林修剪机器人臂端刀具研究,为修剪执行机构设计和装备工程化应用提供了参考[9-10];果树修剪机器人路径规划、剪枝机器人控制系统及视觉感知系统研究,则为树木修剪机器人在运动控制和环境感知方面提供了借鉴[11-13]。

从现有研究看,树木修剪装备主要包括地面移动平台式、机械臂式、高枝杆锯式和爬树式等类型。其中,地面平台和机械臂式装备适合低位或规则树形作业,但在高位侧枝、树干遮挡、树冠空间复杂和非结构化园林环境中,仍存在作业范围受限、机构尺寸较大和整机通过性不足等问题。高枝杆锯结构相对简单,能够扩大人工修剪范围,但仍需人工持握和定位,难以从根本上降低劳动强度和高空作业风险[14]。相比之下,爬树机器人可沿树干自主攀爬,将修剪执行机构送达目标高度,具有减轻人工登高负担和提高高位枝条修剪安全性的潜力。相关研究表明,夹持方式、运动步态、整机自锁能力和作业机构协同是影响爬树机器人工程应用效果的关键因素[15-17]。

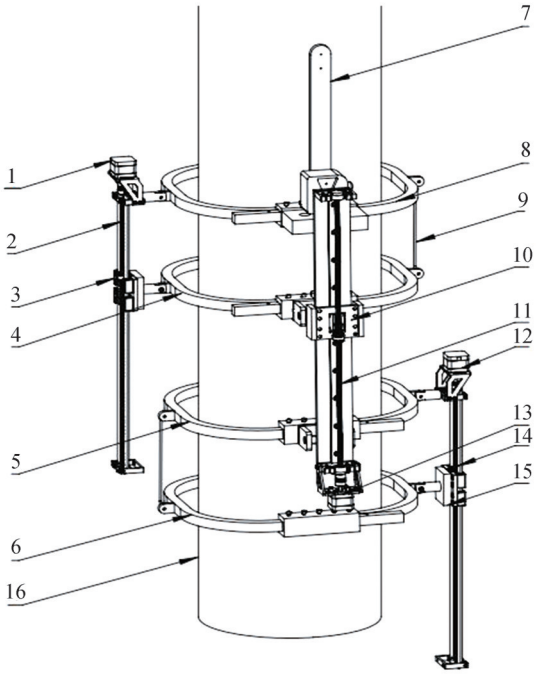
然而,生态园林树木具有树干直径变化较大、树皮表面粗糙、枝干分布不规则和作业空间受限等特点,对爬树修剪机器人的夹持适应性、攀爬稳定性和安全可靠性提出了较高要求。现有爬树式修枝装备在变径树干适应、夹持自锁、攀爬机构与修枝机构一体化以及夹持反馈控制等方面仍有进一步优化空间。特别是在机器人攀爬和驻停过程中,若夹持力不足,容易发生滑移;若夹持力过大,则可能导致机构过载或树皮损伤。因此,有必要开展面向生态园林场景的仿生爬树修剪机器人结构设计与仿真分析。

针对上述问题,本研究面向生态园林树木高位修剪作业需求,设计一种仿生爬树机器人,并围绕其总体结构、攀爬运动特性、夹持可靠性、关键部件强度及压力反馈控制方法开展研究。通过建立机器人三维模型,分析其攀爬步态和卡环接触力变化规律,并对关键

承载部件进行有限元强度校核;同时结合压力反馈控制思路,提高机器人夹紧、攀爬和驻停过程的安全性,以期为小型化、自动化树木修剪装备设计提供参考[18]。

1　仿生爬树机器人总体方案设计

针对生态园林及林木抚育中树木修剪作业劳动强度大、安全风险高、装备适应性不足等问题,本研究借鉴灵长类动物攀爬树木和电工脚扣抱杆作业原理,设计了一种仿生爬树修枝机器人。机器人整机可划分为5个功能模块:①抱树卡环机构,由上、下两组抱树卡环、卡环连接杆、铰接件及卡环调节丝杠组成,用于完成树干夹持、松开与驻停自锁;②伸缩攀爬机构,由中部伸缩丝杠、螺母副和两端万向节组成,用于改变上下卡环组之间的轴向距离;③修枝机构,由链板式链锯、安装支架及进给/摆动调节组件组成,用于机器人驻停后的侧枝切割;④动力系统,由汽油发动机、步进电机、减速机构及蓄电池组成,分别为修枝和攀爬动作提供动力;⑤控制系统,由上位机、可编程逻辑控制器(programmable logic controller,PLC)、压力传感器、步进电机驱动器及电源模块组成,用于实现夹紧力反馈和攀爬时序控制。机器人适用于直径24~36 cm的树木,能够满足常见生态园林树木修剪作业需求。机器人整体结构见图1。



1. 上卡环调节电机;2. 上卡环调节丝杠;3. 上卡环调节螺母副;4. 抱树卡环二;5. 抱树卡环三;6. 抱树卡环四;7. 小型链板式链锯;8. 抱树卡环一;9. 卡环连接杆;10. 万向节;11. 中部伸缩丝杠;12. 下卡环调节电机;13. 中部伸缩电机;14. 下卡环调节丝杠;15. 下卡环调节螺母副;16. 树干。

1. upper clamp adjustment motor; 2. upper clamp adjustment lead screw; 3. upper clamp adjustment nut pair; 4. tree-holding clamp 2; 5. tree-holding clamp 3; 6. tree-holding clamp 4; 7. miniature chain saw; 8. tree-holding clamp 1; 9. clamp connecting rod; 10. universal joint; 11. central telescopic lead screw; 12. lower clamp adjustment motor; 13. central telescopic motor; 14. lower clamp adjustment lead screw; 15. lower clamp adjustment nut pair; 16. tree trunk.

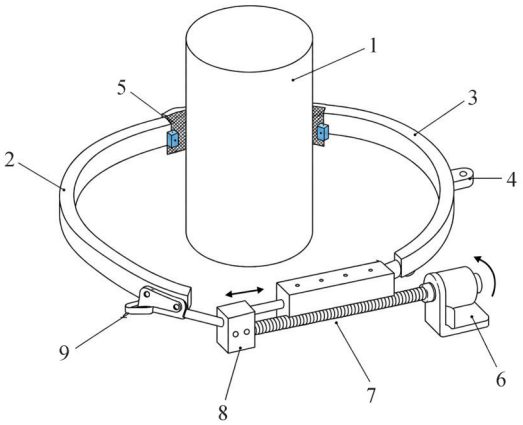
图1　爬树机器人整体结构

Fig. 1　Overall structure of the tree-climbing robot

机器人工作时,上、下两组抱树卡环分别环抱于树干外侧,并通过卡环连接杆形成相对稳定的夹持框架;每组卡环的一端均与调节丝杠螺母副连接,另一端通过铰接连杆约束其对称开合。中部伸缩丝杠布置于上下卡环组之间,两端通过万向节分别与上、下卡环框架连接,使丝杠伸缩时能够补偿树干表面不规则或机体姿态变化引起的角度偏差。工作时,上、下卡环组交替处于“支撑夹紧”和“松开移动”状态:当下卡环组夹紧时,上卡环组松开并由中部伸缩丝杠伸长带动上移;当上卡环组重新夹紧后,下卡环组松开,并由中部伸缩丝杠回缩带动下部机体上移。通过该循环,机器人沿树干方向实现蠕动式攀爬。

1.1 抱树卡环机构设计

抱树卡环机构是机器人实现稳定攀爬的关键部件，其夹持性能直接影响整机的安全性和可靠性。考虑树皮表面粗糙、树干直径变化及高空驻停安全性，本研究采用机械式抱树卡环作为夹持机构。抱树卡环由左右两臂组成，采用可拆卸式设计。两臂合拢呈环状，一端以螺栓连接固定，另一端分别与丝杠螺母副和连接杆铰接。丝杠推动卡环张开或收拢，配合另一侧铰接连杆保持对称，使卡环直径可调，以适应不同粗细的树干。卡环抱紧直径范围为24~36 cm，可适应较大范围的树干直径变化。抱树卡环结构见图2。



1. 树干；2. 左抱树臂；3. 右抱树臂；4. 固定铰接端；5. 压力传感器；6. 卡环调节电机；7. 卡环调节丝杠；8. 螺母副；9. 铰接连杆。

1. Tree trunk; 2. Left clamping arm; 3. Right clamping arm; 4. Fixed hinge end; 5. Pressure sensor; 6. Clamp adjustment motor; 7. Clamp lead screw; 8. Nut pair; 9. Articulated linkage.

图2 机器人抱树卡环

Fig. 2 Tree-holding clamp of the robot

攀爬过程中，抱树卡环的张合由卡环调节电机、卡环调节丝杠和螺母副共同实现。电机带动卡环调节丝杠旋转时，螺母副沿丝杠轴向移动，并通过铰接连杆将直线位移转化为左右抱树臂绕铰接点的转动。当螺母副向内移动时，左右抱树臂逐渐收拢并压紧树干；当螺母副反向移动时，左右抱树臂张开，卡环与树干脱离或减小接触压力。压力传感器布置在卡环内侧受力位置，用于检测卡环与树干之间的接触压力。当检测压力达到设定阈值时，PLC控制对应卡环调节电机停止；当压力低于阈值时，电机继续收紧；当压力超过上限时，电机反向微调，以避免夹持过大造成机构过载或树皮损伤。

1.2 攀爬驱动机构设计

攀爬驱动机构以螺旋丝杠作为主要执行部件，丝杠两端分别通过万向节与上下卡环机构连接。该连接方式能够在丝杠伸缩过程中补偿机体角度变化，降低因树干表面不规则或机体姿态变化引起的附加约束，提高机构运动的协调性。本研究选用直径8 mm、长度约800 mm的螺旋丝杠作为伸缩驱动件，由步进电机经减速机构驱动，实现机器人上、下机体之间的相对位移。

机器人上升过程可分为6个基本步骤，见图3。图3中实线表示夹紧状态，虚线表示松开状态，箭头表示运动方向。任一动作至少有一组卡环处于夹紧状态，从而避免机器人在卡环切换过程中发生整体下滑。①初始状态下，上、下两组卡环均夹紧树干，伸缩丝杠处于收缩状态；②随后上卡环组松开，下卡环组保持夹紧；③伸缩丝杠伸长并推动上半部分上移；④上卡环组到达预定位置后重新夹紧树干；⑤之后下卡环组松开，上卡环组保持夹紧，伸缩丝杠回缩并带动下半部分上移；⑥最后下卡环组重新夹紧，机器人完成一个攀爬周期。通过上述动作循环，机器人即可实现沿树干方向的连续爬升。

1.3 修枝机构设计

修枝机构采用小型链板式链锯，并通过导轨弹簧式浮动支架安装于抱树卡环一侧。该结构使链锯能够随机器人爬升和卡环摆动接近侧枝，链锯由1E48F型小型汽油发动机驱动，有效切割伸出距离约20 cm，导板宽度约5.2 cm，可用于切割根部直径不大于60 mm的侧枝。该浮动安装方式可使锯头在一定范围内保持与树干的相对距离，并允许侧向微动，以减小修枝过程中的冲击载荷。

1.4 动力系统及电机选型

动力系统是机器人完成攀爬和修枝作业的基础。根据机器人作业特点，采用“汽油发动机+步进电机+蓄电池”的复合动力方案。其中，汽油发动机主要为修枝链锯提供切割动力，步进电机分别驱动上下抱树卡环调节机构和中部伸缩丝杠机构，蓄电池为控制系统、传感器及电机驱动模块供电。

根据机器人爬升和修枝过程中的功率需求，机器人垂直攀爬需克服自重、摩擦阻力及机构传动损耗，同时链锯切割侧枝也需要一定功率储备。综合考虑传动效率和负载波动，整机动力系统需具备不低于1.5 kW的输出能力。本研究选用1E48F型小型汽油发动机作为主动力源，其最大输出功率为2.2 kW，额定转速为7 500 r/min，可满足机器人攀爬和修枝作业的功率需求。

为实现卡环夹紧和丝杠伸缩的精确控制，机器人选用两相混合式步进电机作为执行电机。步进电机具

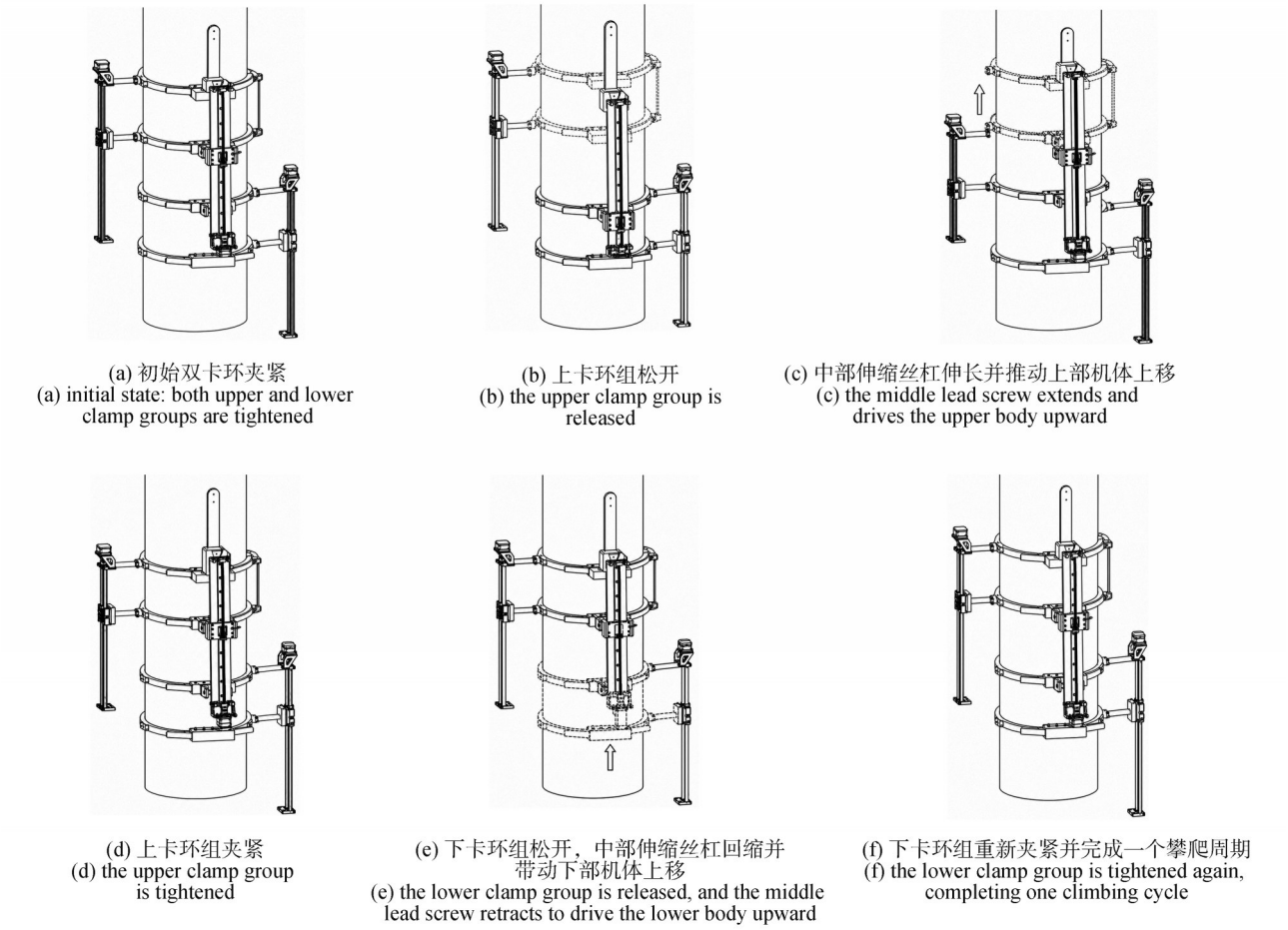


图 3　机器人蠕动式攀爬步态示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the inchworm-type climbing gait of the robot

有控制精度较高、响应速度快和易于实现正反转控制等特点,适用于卡环张紧、松开和丝杠伸缩等间歇式动作。为提高输出扭矩并降低丝杠转速,在电机与丝杠之间设置减速机构。采用50∶1行星减速器与3∶1齿轮传动组合后,总减速比约为150∶1,可为卡环夹紧和机体伸缩提供足够的驱动力矩。

2　动力学仿真分析

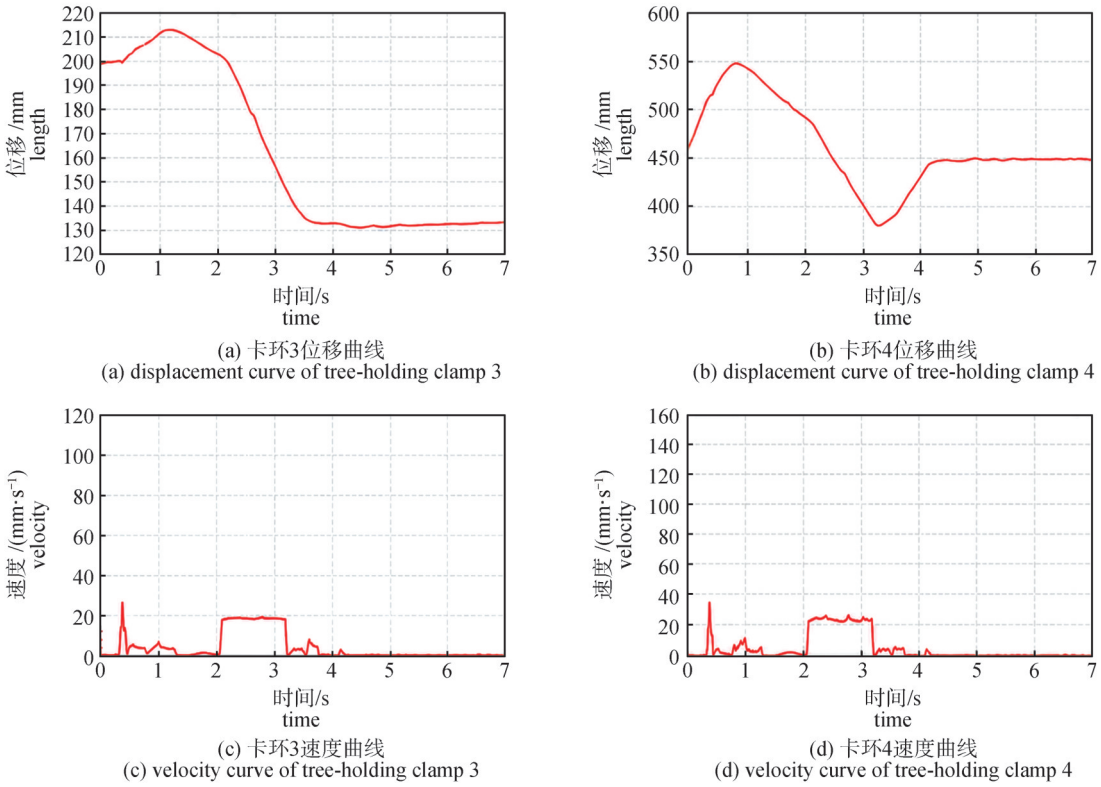
为验证仿生爬树机器人在竖直树干上的攀爬可行性与运动稳定性,本研究基于三维计算机辅助设计软件UG(unigraphics NX)建立机器人三维模型,并导入机械系统自动动力学分析软件(automatic dynamic analysis of mechanical systems,ADAMS)中进行动力学仿真。仿真中将树干设置为竖直圆柱体,机器人上、下抱树卡环与树干之间建立接触关系,并分别对卡环调节丝杠和中部伸缩丝杠施加驱动。通过提取抱树卡环位移、速度、卡环与树干接触力及驱动电机输出响应,分析机器人蠕动式爬升过程的稳定性和自锁可靠性。

2.1　抱树卡环位移和速度分析

机器人攀爬过程中,上、下两组抱树卡环交替完成“夹紧—松开—移动—再夹紧”的动作。由于抱树卡环1、卡环2与抱树卡环3、卡环4结构和运动规律相似,所以本研究提取了下卡环组卡环3和卡环4的竖直方向位移和速度曲线。位移以ADAMS全局坐标系下Z向位移为基准,并以各测点初始位置归一化,反映卡环组在攀爬过程中的相对运动变化。图4给出了下卡环组卡环3和卡环4的位移及速度曲线,卡环3和卡环4通过连接件组成下卡环组,其竖直方向位移趋势基本一致,局部差异主要由卡环开合转动和测点位置不同引起,不影响下卡环组整体随丝杠回缩上移的运动规律。速度曲线显示的瞬态变化与步态切换阶段对应,体现了卡环夹持与释放动作的动态特性。

2.2　机器人爬升轨迹分析

图5展示了机器人在单周期蠕动式攀爬过程中,中部伸缩丝杠相对伸缩行程和整机质心累计高度的变化情况。图5(a)显示中部伸缩丝杠的相对伸缩行程,



(a) 卡环3位移曲线
(a) displacement curve of tree-holding clamp 3

(b) 卡环4位移曲线
(b) displacement curve of tree-holding clamp 4

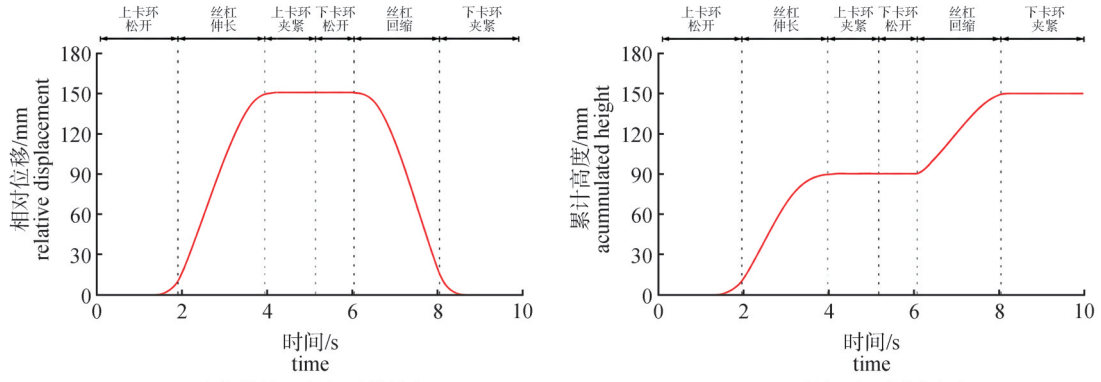
(c) 卡环3速度曲线
(c) velocity curve of tree-holding clamp 3

(d) 卡环4速度曲线
(d) velocity curve of tree-holding clamp 4

图4 抱树卡环位移和速度分析曲线

Fig. 4 Displacement and velocity curves of the tree-holding clamps

反映丝杠在一个完整攀爬周期内的伸长与回缩动作：0~2 s阶段，机器人处于初始夹紧及上卡环组松开准备阶段，中部伸缩丝杠保持静止，其相对位移基本不变；2~4 s阶段，上卡环组完全松开后，中部伸缩丝杠开始伸长，并推动上部机体上移；4~5 s阶段，上卡环组重新夹紧，中部伸缩丝杠停止动作；5~6 s阶段，下卡环组松开，中部伸缩丝杠仍保持静止；6~8 s阶段，下卡环组完全松开后，中部伸缩丝杠回缩，并带动下部机体上移；8 s以后，下卡环组重新夹紧，完成一个攀爬周期。图5(b)显示整机质心累计高度变化，反映机器人整体沿树干方向的爬升效果，整机质心高度呈阶梯式上升趋势，未出现明显整体下滑，单周期累计爬升高度约为150 mm。整体来看，机器人在上、下卡环交替夹紧约束下，能够按照预定步态完成蠕动式爬升动作。



(a) 中部伸缩丝杠相对伸缩行程
(a) relative displacement of central telescopic lead screw

(b) 整机质心累计高度
(b) cumulative height of the robot's center of mass

图5 单周期攀爬位移响应

Fig. 5 Displacement response during one climbing cycle

2.3　抱树卡环夹紧力分析

图 6 为按攀爬步态提取的卡环接触力曲线。初始阶段上、下卡环均设置预紧夹持力,以保证机器人处于稳定驻停状态。在上卡环组松开并上移阶段,下卡环组接触力保持在较高水平,承担机器人自重和运动扰动;当上卡环组重新夹紧后,下卡环组接触力下降并进入移动阶段。由此可见,卡环接触力随“夹紧—松开—移动—再夹紧”的步态呈周期性变化,且任一时刻至少有一组卡环保持有效夹紧,从而满足防滑移要求。

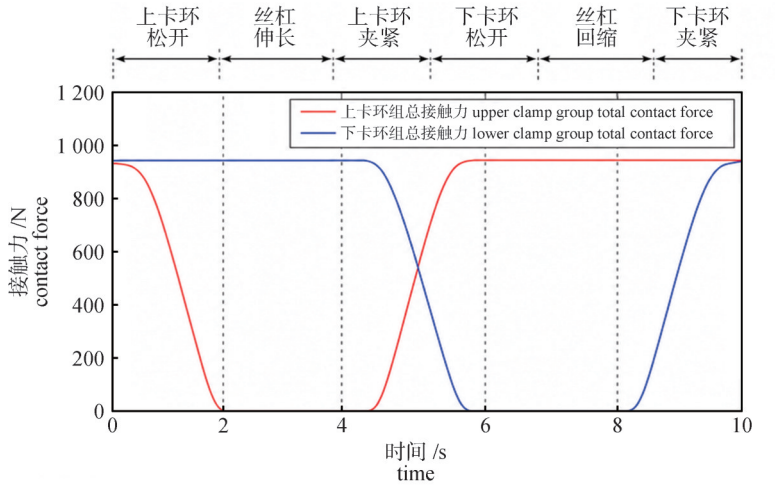
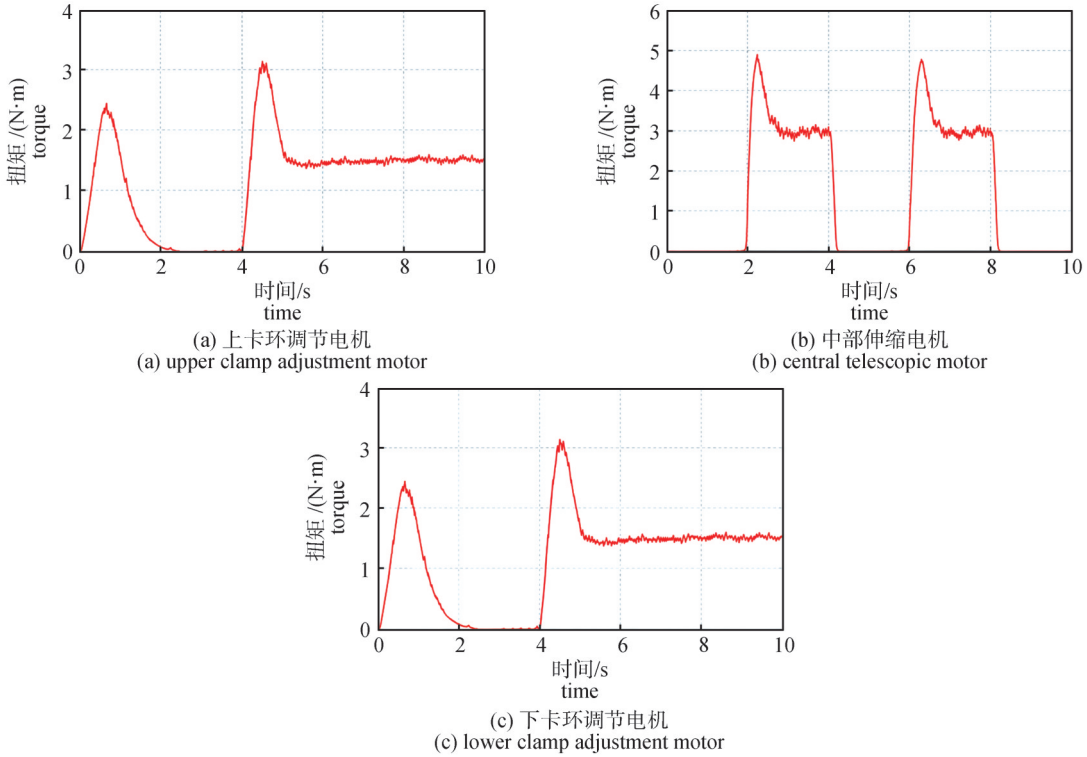


图 6　单周期攀爬卡环接触力响应

Fig. 6　Contact force response of clamp groups during one climbing cycle

2.4　机器人驱动电机输出扭矩分析

为验证机器人攀爬过程中各驱动电机的动作协调性,分别提取上卡环调节电机、中部伸缩电机和下卡环调节电机的输出扭矩曲线,结果见图 7。由图 7 可知,上卡环调节电机:在 0~2 s 阶段出现明显扭矩响应,对应上卡环组松开过程;2~4 s 阶段,上卡环组已完全松开,其输出扭矩接近零;4~5 s 阶段,上卡环调节电机再次产生较大扭矩,用于完成上卡环组重



(a) 上卡环调节电机
(a) upper clamp adjustment motor

(b) 中部伸缩电机
(b) central telescopic motor

(c) 下卡环调节电机
(c) lower clamp adjustment motor

图 7　驱动电机输出扭矩曲线

Fig. 7　Output torque curves of the drive motors

新夹紧，随后进入相对稳定的保持状态。中部伸缩电机：主要在2~4 s和6~8 s阶段产生明显输出，分别对应中部伸缩丝杠伸长和回缩过程；而在0~2、4~6、8~10 s阶段，其输出扭矩接近零，说明卡环松开或夹紧过程中中部伸缩丝杠保持静止。下卡环调节电机：在0~5 s阶段保持下卡环组支撑状态，5~6 s阶段输出扭矩逐渐下降，对应下卡环组松开过程；6~8 s阶段下卡环组处于松开状态，其输出扭矩接近零；8~10 s阶段输出扭矩重新升高，完成下卡环组夹紧。整体来看，3台电机的输出扭矩响应与“上卡环松开—丝杠伸长—上卡环夹紧—下卡环松开—丝杠回缩—下卡环夹紧”的蠕动式攀爬步态一致，且在卡环松开或夹紧阶段，中部伸缩电机未出现明显输出，说明丝杠伸缩动作与卡环开合动作之间具有必要的时序间隔，可避免卡环未完全松开时发生伸缩运动而造成机构损伤。各电机输出扭矩整体处于合理范围内，表明驱动系统能够满足机器人卡环调节和丝杠伸缩的动作需求。

3 运动可靠性分析

在动力学仿真中，机器人各部件按刚体处理，未考虑材料弹性变形对夹紧效果的影响。实际工作中，抱树卡环、丝杠及连接部位在自重、夹紧力和驱动力矩作用下会产生一定变形，可能影响机器人与树干之间的夹持稳定性。因此，本研究采用ANSYS协同仿真工作台（ANSYS workbench）对爬树机器人关键承载部件进行有限元分析，以验证其在最大受力工况下的结构强度、刚度及夹紧可靠性。

3.1 工况设置

将UG中建立的机器人三维模型导入ANSYS workbench，并对非关键细节进行简化处理，保留抱树卡环、丝杠、电机座及树干等主要受力部件。卡环和丝杠材料均选用Q235钢，树干按木材材料属性设置。关键部件材料参数见表1。

表1 关键部件材料参数汇总

Tab. 1 Summary of material parameters for key components

部件 component	材料 material	弹性模量/GPa elastic modulus	泊松比 poisson's ratio	密度/(kg·m^{-3}) density	屈服强度/MPa yield strength
卡环、丝杠、电机座 clamp, lead screw, motor base	Q235钢 Q235 steel	210	0.288	7 850	235

由动力学仿真可知，卡环稳定夹紧阶段接触力约为960 N。考虑树干表面不规则、步态切换冲击及机构装配误差等因素，取安全系数1.2，得到有限元等效夹紧载荷为1 152 N，工程计算中取1 200 N。有限元分析中，对卡环与树干建立接触关系，在卡环接触区域施加等效夹紧力，并考虑机器人自重和驱动机构载荷，同时约束树干底部，以模拟机器人夹紧和爬升过程中的实际受力状态。边界条件设置见图8，图中不同颜色仅为有限元软件对不同载荷定义的自动标识，用于区分各载荷作用位置，并不表示载荷类型、大小或方向的差异。蓝色代表固定支撑，红色代表所有的力，黄色代表地球重力。

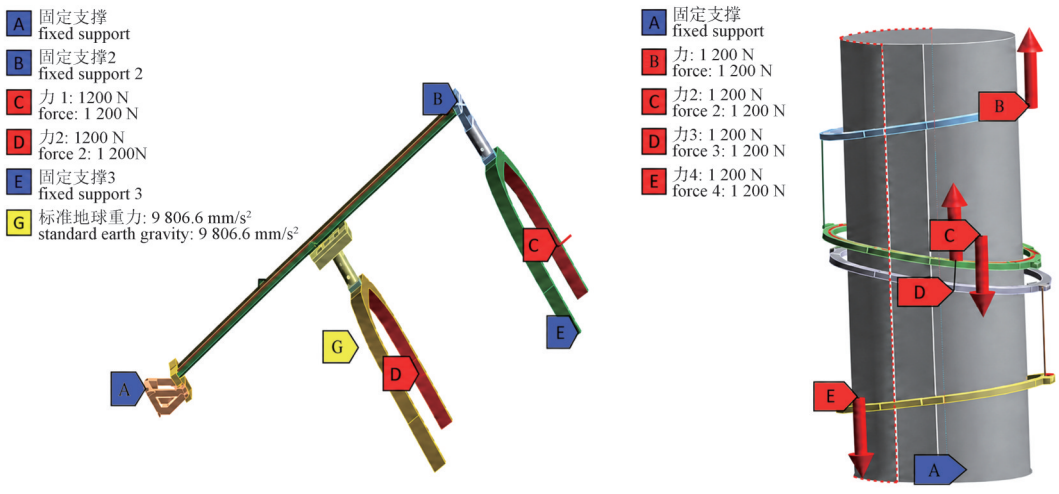
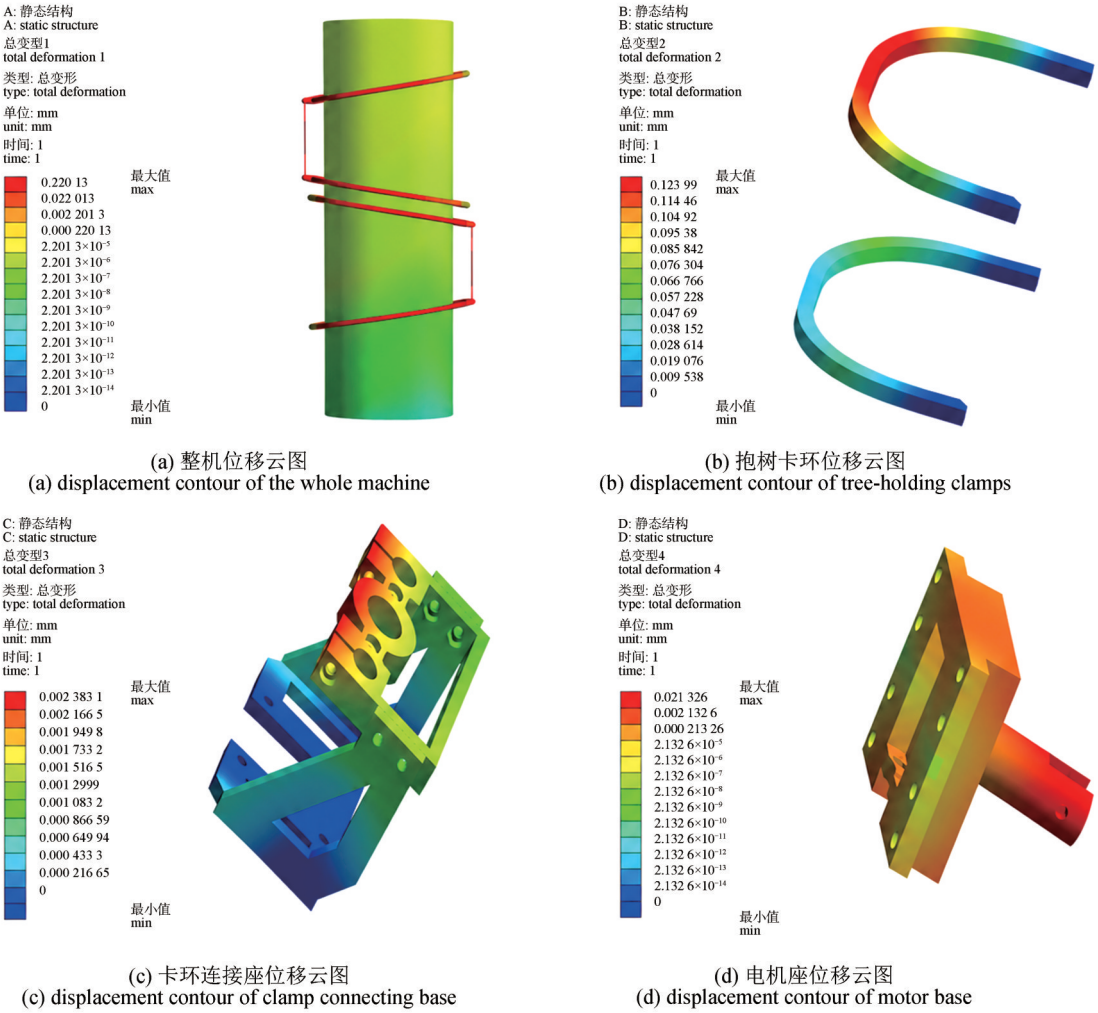


图8 边界条件设置

Fig. 8 Boundary condition settings

3.2　仿真结果

图9为机器人关键部件的位移云图。由图9可知,抱树卡环在夹紧树干时最大位移约为0.22 mm,卡环自身最大弹性变形约为0.124 mm;卡环连接座最大位移约为0.002 mm;电机座最大位移约为0.02 mm。各部件变形量均较小,说明机器人关键承载结构具有较好的刚度,能够满足夹紧和爬升过程中的稳定性要求。



(a) 整机位移云图
(a) displacement contour of the whole machine

(b) 抱树卡环位移云图
(b) displacement contour of tree-holding clamps

(c) 卡环连接座位移云图
(c) displacement contour of clamp connecting base

(d) 电机座位移云图
(d) displacement contour of motor base

图9　关键部件位移云图

Fig. 9　Displacement contour of key components

图10为关键部件应力云图和接触状态设置。仿真结果表明,抱树卡环的应力主要集中在根部转动连接区域及卡环与丝杠连接位置,整体应力水平低于Q235钢屈服强度。电机座与卡环连接部位最大应力约为37.87 MPa,也处于材料许用范围内,说明丝杠驱动端及连接结构满足强度要求。

为进一步评价卡环与树干之间的接触可靠性,对接触穿透深度进行分析,结果见图11,由图11可以看出,最大穿透深度为$4.983\ 2\times10^{-13}$ mm,数值极小,说明卡环与树干接触关系稳定,夹紧载荷设置合理。

综合强度校核结果见表2。抱树卡环最大应力为46 MPa,低于Q235钢屈服强度235 MPa,安全系数为5.08,满足结构强度要求。结合位移云图和接触分析结果可知,机器人在最大受力工况下未出现明显过量变形或强度失效,抱树卡环能够保持稳定夹紧状态,满足爬树修枝作业的可靠性要求。

4　控制系统设计

为保证机器人在攀爬、驻停和返回过程中的稳定性,本研究设计了基于“上位机+PLC”的控制系统。系统通过压力传感器检测抱树卡环与树干之间的接

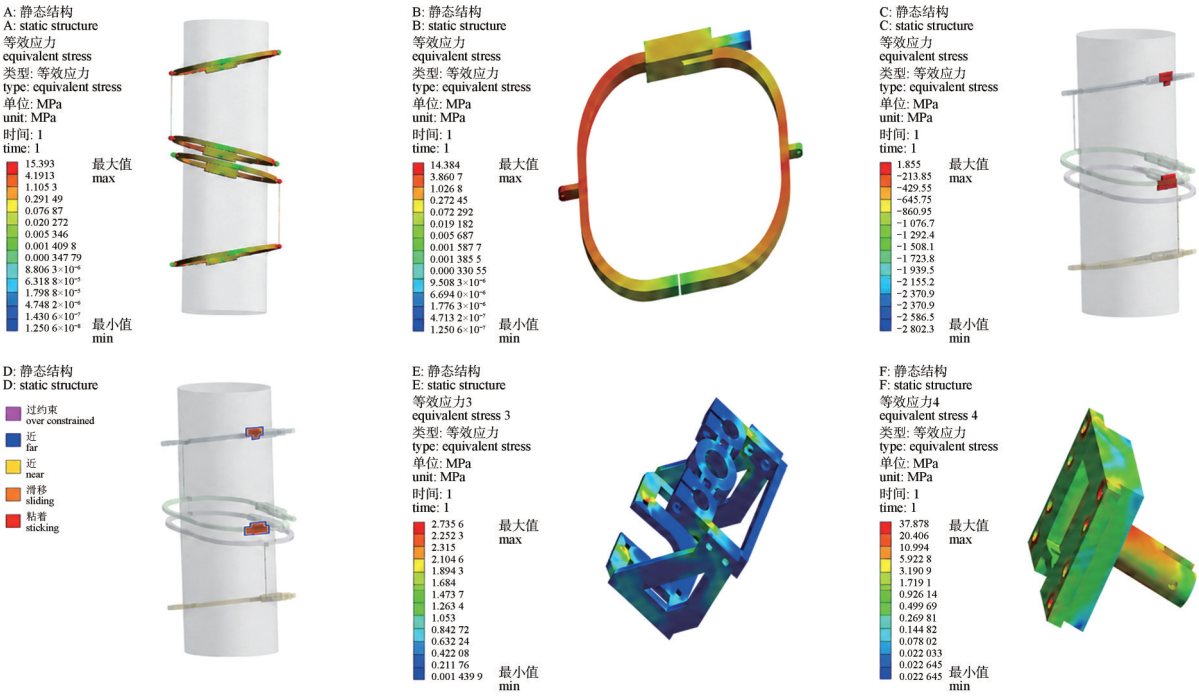


图 10 关键部件应力云图

Fig. 10 Stress contour of key components

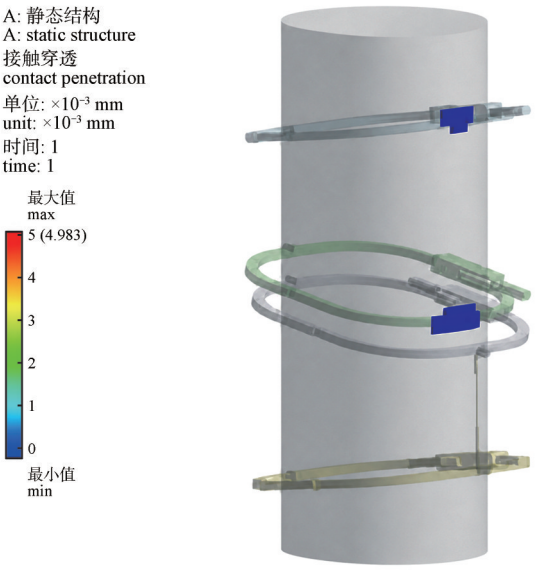


图 11 卡环与树干接触穿透深度

Fig. 11 Contact penetration depth between the clamp and the trunk

触压力，并由 PLC 协调步进电机完成卡环开合和丝杠伸缩动作，实现机器人攀爬过程中的顺序控制与夹紧保护。

4.1 控制系统设计要求

结合机器人作业特点，控制系统需满足以下要求：能够协调上、下抱树卡环及中部伸缩丝杠的动作顺序，控制三台步进电机完成卡环开合和丝杠伸缩；能够实时采集卡环接触压力，并根据压力变化调节卡环夹紧状态，以适应树干直径变化；在攀爬、返回和停止过程中，保证至少一组卡环处于夹紧状态，防止机器人发生滑移；系统结构应简单可靠，便于样机调试和后续功能扩展。

控制系统的输入信号主要包括启动、停止和返回等操作指令，以及上、下卡环压力传感器反馈信号；输出信号主要用于控制三台步进电机驱动器，实现上卡环组、下卡环组和中部伸缩丝杠的动作控制。通过对输入信号进行判断并输出相应控制指令，可实现机器人攀爬过程中的协调控制。

表 2 抱树卡环强度校核结果

Tab. 2 Strength check results of the tree-holding clamp

名称 component	材料 material	最大应力/MPa maximum stress	屈服强度/M payield strength	安全系数 safety factor	合格与否 result
抱树卡环 tree-holding clamp	Q235 钢 Q235 steel	46	235	5.08	合格 qualified

4.2　控制系统硬件组成

控制系统主要由上位机、PLC控制器、扩展模块、压力传感器、步进电机驱动器、步进电机及电源模块组成，系统框图见图12。上位机用于发送启动、停止和返回等指令，并对机器人运行状态进行监测；PLC作为核心控制单元，完成传感器信号采集、逻辑判断和电机控制。

采用PLC作为底层控制器，可提高系统在户外作业环境下的抗干扰能力和运行可靠性；上位机主要承担参数设定、状态显示和人工操作功能，二者配合能够满足样机阶段的控制与调试需求。本研究选用西门子CPU224作为控制器，并配套EM231扩展模块采集压力传感器信号。压力传感器选用DYMH-103电容式压力传感器，安装于抱树卡环内侧受力位置，用于检测卡环与树干之间的接触压力。三台步进电机分别驱动上卡环组、下卡环组和中部伸缩丝杠，电机驱动器根据PLC输出信号控制电机启停及正反转。

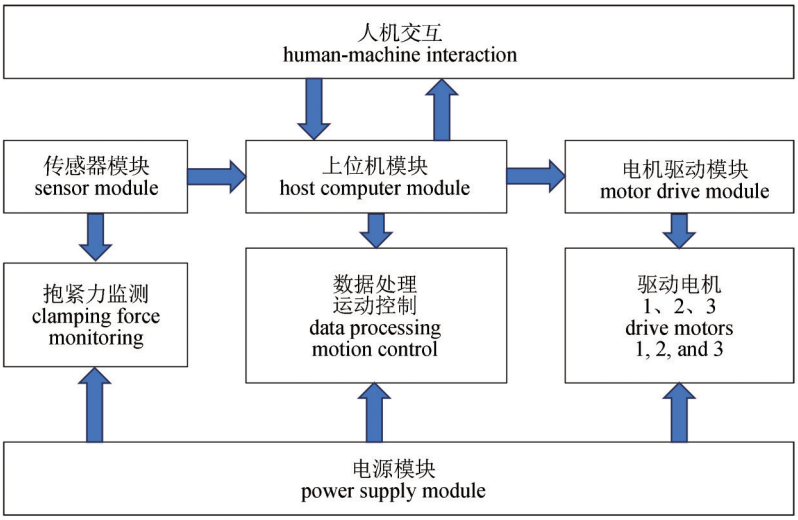


图12　爬树机器人运动控制系统框图

Fig. 12　Block diagram of the robot motion control system

4.3　控制策略与控制流程

控制系统采用压力反馈与顺序互锁相结合的控制方式。PLC根据压力传感器反馈判断卡环夹紧状态，当压力低于设定值时，对应电机继续收紧卡环；当压力达到设定范围时，电机停止运行；当压力超过上限时，电机反向微调，以避免夹紧力过大。

机器人攀爬时，PLC按照预设顺序控制卡环和丝杠动作。每一阶段动作执行前，系统均先判断支撑卡环是否夹紧到位；只有满足夹紧条件后，另一组卡环才允许松开或移动。返回过程按相反顺序执行。该控制方式可避免上、下卡环同时松开，提高机器人攀爬和返回过程的安全性。

为进一步提高运动可靠性，程序中设置卡环互锁条件。当支撑卡环压力未达到设定范围时，系统不允许另一组卡环执行松开动作；当停止或异常信号触发时，PLC优先保持当前支撑卡环夹紧状态，并中断丝杠伸缩动作。该控制逻辑可降低机器人在步态切换过程中的滑移风险。

图13为机器人控制电路图。启动按钮、停止按钮和压力传感器信号作为PLC输入，PLC输出控制信号至三台步进电机驱动器，实现卡环开合、丝杠伸缩和停止保护等功能。图13中，FU表示熔断器，用于电路短路及过电流保护；FR表示热继电器，用于驱动电机过载保护；SB表示控制按钮，用于发送启动、停止及换向指令；SP表示行程开关，用于检测机构运动位置并实现限位控制；KM表示交流接触器，其主触点用于接通或切断电动机主电路，辅助触点用于自锁和互锁；M表示驱动电机。KM1和KM2、KM3和KM4、KM5和KM6分别构成3台驱动电机的正、反转控制回路，通过接触器互锁避免同一电机的正、反转接触器同时接通。各文字符号后的数字为同类元件的编号，用于区分不同控制对象；同一编号在主电路和控制电路中重复出现时，表示同一电气元件的主触点、辅助触点或线圈。

PLC程序采用梯形图编写，攀爬和返回过程分别设置控制程序，见图14。程序根据启动信号、压力反馈信号和动作完成状态切换运行步序，使机器人能够按设定流程完成攀爬、停止和返回动作。图14(a)为攀爬控制程序，图14(b)为返回控制程序。图14中，

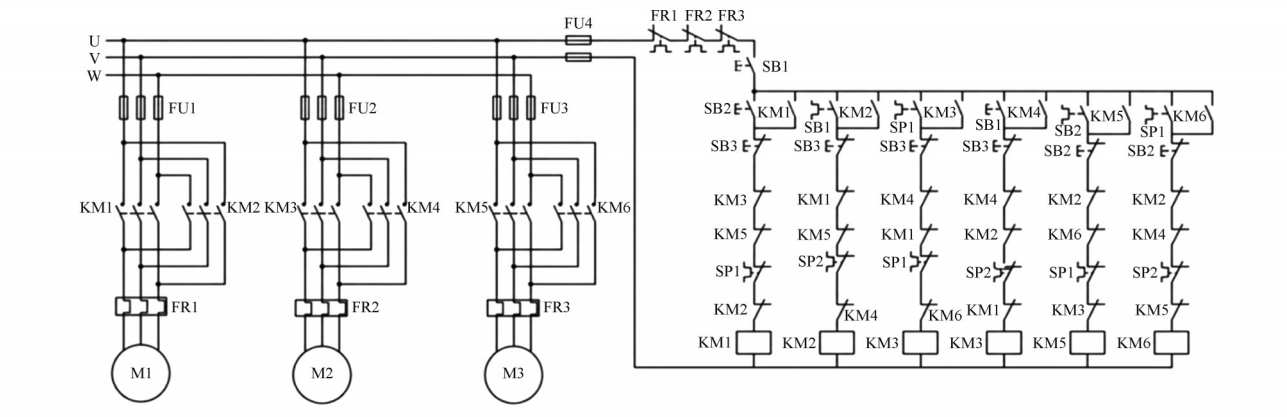
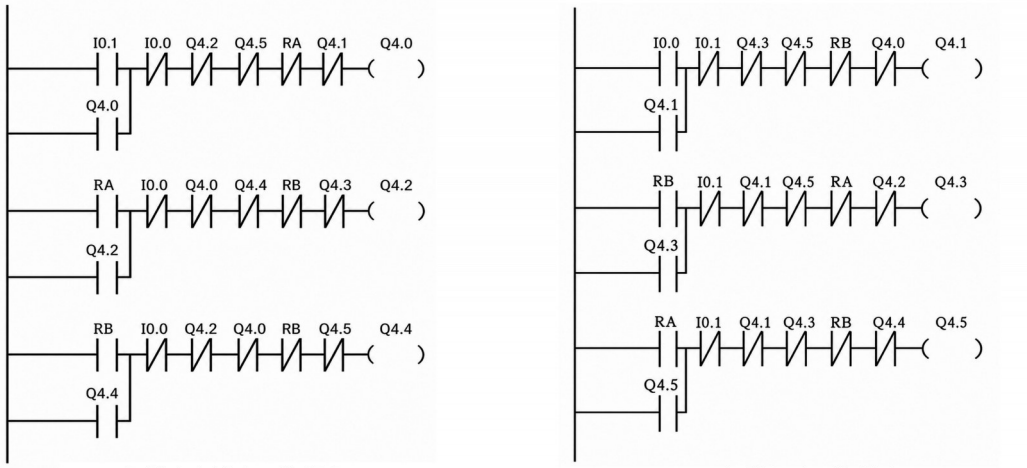


图 13 机器人控制电路图

Fig. 13 Control circuit of the robot

I 表示 PLC 输入信号，I0. 0 和 I0. 1 分别表示输入映像寄存器第 0 字节的第 0 位和第 1 位，用于接收机器人攀爬、返回等操作指令，并通过常闭触点实现两种运行模式的互锁；Q 表示 PLC 输出信号，Q4. 0—Q4. 5 分别表示输出映像寄存器第 4 字节的第 0 位至第 5 位。其中，Q4. 0 与 Q4. 1、Q4. 2 与 Q4. 3、Q4. 4 与 Q4. 5 分别构成 3 组方向相反的控制输出，用于控制上卡环调节电机、中部伸缩电机和下卡环调节电机的正、反转，实现卡环夹紧与松开以及丝杠伸长与回缩。字母 I 或 Q 后的小数点前数字表示输入或输出字节地址，小数点后数字表示该字节中的位地址，因此 I0. 1、Q4. 2 等为 PLC 地址编号，并非普通小数。RA 和 RB 表示程序中的辅助继电器或内部状态标志，用于记录压力达到设定值、执行机构动作完成等状态，并作为相邻动作步序切换的条件。梯形图中的常开触点用于在条件成立时接通回路，常闭触点用于互锁和禁止冲突动作，线圈符号表示对应输出被置位；与输出线圈并联的同名常开触点构成自锁回路，使动作信号在启动条件消失后仍能保持。程序通过上述输入判断、状态记忆、自锁及互锁逻辑，依次控制 3 台驱动电机动作，并保证机器人攀爬和返回过程中上、下两组卡环不会同时松开。



(a) 机器人爬树过程梯形图
(a) Ladder diagram of the robot climbing process

(b) 机器人返回梯形图
(b) Ladder diagram of the robot descending process

图 14 机器人梯形图程序

Fig. 14 Ladder program of the robot

5 结论

本研究面向生态园林及林木抚育中的树木修剪作业需求，设计了一种基于双卡环自锁夹持与螺旋丝杠伸缩驱动的仿生爬树机器人，并对其总体结构、动力学性能、运动可靠性和控制系统进行了分析，得到以下结论。

1）提出了一种“双卡环夹持—螺旋丝杠伸缩—链

锯修枝”一体化的仿生爬树机器人总体方案。机器人通过上、下两组抱树卡环交替夹紧树干,并配合中部伸缩丝杠伸缩实现蠕动式爬升,能够适应直径为 24~36 cm 的树木。该结构利用卡环夹紧力、摩擦力和机器人自重形成自锁,可提高机器人在攀爬和驻停过程中的安全性。

2)基于 ADAMS 建立机器人动力学仿真模型,对其爬升过程中的位移、速度和接触力进行分析。仿真结果显示,机器人能够按照预定步态完成单周期蠕动式爬升动作,单个攀爬周期提升距离约为 150 mm,攀爬过程中未出现明显整体下滑;稳定阶段抱树卡环与树干之间的接触力约为 960 N,能够满足机器人竖直爬升和驻停自锁要求。

3)采用 ANSYS Workbench 对机器人关键承载部件进行了有限元可靠性分析。结果表明,抱树卡环最大应力约为 46 MPa,低于 Q235 钢屈服强度 235 MPa,安全系数为 5.08;卡环、丝杠及连接部位变形较小,说明机器人关键结构具有较好的强度和刚度,可满足爬树修枝作业要求。

4)设计了基于“上位机+PLC”的控制系统。该系统通过压力传感器实时检测卡环与树干之间的接触压力,并由 PLC 协调三台步进电机完成卡环开合和丝杠伸缩动作。控制策略能够保证机器人在攀爬和返回过程中至少有一组卡环始终夹紧树干,从而提高机器人运动过程的稳定性和安全性。

综上,本研究所设计的仿生爬树机器人结构方案可行,攀爬运动平稳,关键部件强度满足要求,控制系统能够实现基本攀爬动作协调控制,可为生态园林树木修剪装备的小型化和自动化设计提供参考。

参　考　文　献

[1] 于少轩,马婧尧,孟兆新,等. 面向生态园林作业的单向电机驱动修枝装备设计与性能[J]. 森林工程,2026,42(1):184-195.
Yu Shaoxuan, Ma Jingyao, Meng Zhaoxin, et al. Design and performance investigation of a unidirectional motor-driven pruner for ecological gardens [J]. Forest Engineering, 2026, 42(1): 184-195.

[2] 刘玉童,张海文,黄辉,等. 林木胸径持续测量装置的研制与应用[J]. 森林工程,2026,42(1):151-159.
Liu Yutong, Zhang Haiwen, Huang Hui, et al. Development and application of continuous measurement device for forest tree diameter at breast height [J]. Forest Engineering, 2026, 42(1): 151-159.

[3] 崔浩,杨朔飞. 基于深度视觉的核桃树干振动机构设计与仿真[J]. 森林工程,2026,42(2):317-326.
Cui Hao, Yang Shuofei. Design and simulation of vibration mechanism for walnut tree trunks based on depth vision [J]. Forest Engineering, 2026, 42(2): 317-326.

[4] 周志标,蒙丽雯,郑贤,等. 立木攀爬修枝机器人设计与试验[J]. 农机化研究,2026,48(2):1-10.
Zhou Zhibiao, Meng Liwen, Zheng Xian, et al. Design and experiment of climbing and pruning robot for standing trees [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2026, 48(2): 1-10.

[5] 张琦,罗海风,阚江明. 基于多目标蛾群算法的机械臂最优轨迹规划[J]. 信息与控制,2026,55(1):69-84.
Zhang Qi, Luo Haifeng, Kan Jiangming. Optimal trajectory planning for a manipulator based on multi-objective moth swarm algorithm [J]. Information and Control, 2026, 55(1): 69-84.

[6] 韩立志,羿宏雷,吴志华,等. 桉树速生林机械修枝现状分析及展望[J]. 林业机械与木工设备,2024,52(9):6-14.
Han Lizhi, Yi Honglei, Wu Zhihua, et al. Present situation analysis and prospect of mechanical pruning of eucalyptus fast-growing forest [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2024, 52(9): 6-14.

[7] 韩立志,羿宏雷,付敏,等. 一种桉树爬树修枝机的结构设计[J]. 林业机械与木工设备,2024,52(10):41-44.
Han Lizhi, Yi Honglei, Fu Min, et al. Structural design of a Eucalyptus tree climbing pruning machine [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2024, 52(10): 41-44.

[8] 郑贤,邓毅,李岩舟,等. 桉树爬树修枝机的设计与测试[J]. 林业工程学报,2021,6(2):148-156.
Zheng Xian, Deng Yi, Li Yanzhou, et al. Design and experiment of pruning machine for eucalyptus trees [J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(2): 148-156.

[9] 罗海风,张琦,肖力玮,等. 路侧绿篱修剪机器人的设计与试验评估[J]. 北京林业大学学报,2025,47(5):1-13.
Luo Haifeng, Zhang Qi, Xiao Liwei, et al. Design and experimental evaluation of a roadside hedge trimming robot [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5): 1-13.

[10] 龚宏彬,杨蹈宇,李立君,等. 园林修剪机器人臂端刀具优化设计与稳态分析[J]. 农机化研究,2024,46(8):33-41.
Gong Hongbin, Yang Daoyu, Li Lijun, et al. Optimal design and steady-state analysis of garden trim robot tool [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(8): 33-41.

[11] 方小菊,黄亦其. 跟踪算法下的果树修剪机器人路径规划设计[J]. 农机化研究,2024,46(1):155-158.

Fang Xiaoju, Huang Yiqi. Path planning design of fruit tree pruning robot based on tracking algorithm[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(1): 155-158.

[12] 王君玲,高玉芝,肖春英. 果树剪枝机器人四驱式底盘控制系统设计与实现[J]. 农业装备与车辆工程,2024,62(5):19-22.
Wang Junling, Gao Yuzhi, Xiao Chunying. Design and implementation of a four-wheel drive chassis control system for fruit tree pruning robots[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2024, 62(5): 19-22.

[13] 马保健,蒋焕煜. 休眠期果树修剪机器人视觉感知系统研究现状[J]. 农业工程,2024,14(2):29-33.
Ma Baojian, Jiang Huanyu. Research status on visual perception system of pruning robot for dormant fruit tree[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(2): 29-33.

[14] 张迎,康峰,王亚雄,等. 基于人机工程学的电动高枝杆锯研究[J]. 北京林业大学学报,2021,43(5):147-154.
Zhang Ying, Kang Feng, Wang Yaxiong, et al. Research of electric pole saw based on ergonomics[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(5): 147-154.

[15] Zahid A, Mahmud M S, He L, et al. Technological advancements towards developing a robotic pruner for apple trees: A review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 189: 106383.

[16] Fang G S, Cheng J F. Advances in climbing robots for vertical structures in the past decade: A review[J]. Biomimetics, 2023, 8(1): 47.

[17] Ban Y C, Lyu K, Ba S H, et al. Monkeybot: A climbing and pruning robot for standing trees in fast-growing forests[J]. Actuators, 2022, 11(10): 287.

[18] 姚涛,周增产,张晓文,等. 植物巡察机器人控制系统研制[J]. 农业工程,2025,15(1):69-75.
Yao Tao, Zhou Zengchan, Zhang Xiaowen, et al. Development of control system for plant inspection robot[J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(1): 69-75.