

## 面向生态园林作业的单向电机驱动修枝装备设计与性能

于少轩<sup>1</sup>, 马婧尧<sup>2</sup>, 孟兆新<sup>1</sup>, 栗欣<sup>3\*</sup>

(1. 东北林业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150040; 2. 黑龙江八一农垦大学 信息与电气工程学院, 黑龙江 大庆 163000;  
3. 哈尔滨学院 地理与旅游学院, 哈尔滨 150086)

**摘要:** 随着生态园林养护需求的增加, 修枝作业装备在效率、稳定性与环保性上面临新的挑战。为此, 设计一种基于单向电机驱动的高效修枝装备。该设计通过优化传动系统并采用定制丝杠螺母结构, 实现电机单向旋转即可完成剪切与复位动作, 避免传统修枝机械对电机反转的依赖。采用有限元分析对剪切部件和传动系统进行静力学与动力学验证, 确保其强度和刚度满足长期作业需求。结果表明, 电机-丝杠在最不利静力工况下的需求推力上限约为 650 N (设计基准); 在所设定的动力学仿真工况下峰值推力约为 380 N, 满足剪切与复位需求并具备裕量; 通过一系列剪切试验, 评估该装备在不同树枝直径下的工作性能。该装备在效率和能耗方面均优于传统手工工具和常见电动修枝机, 具有良好的连续作业能力和节能特性, 能够适用于生态园林养护场景, 满足生态园林作业的高效需求。

**关键词:** 生态园林; 单向电机驱动; 修枝装备; 有限元分析; 运动学解算

**中图分类号:** S776

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7525/j.issn.1006-8023.2026.01.017

## Design and Performance Investigation of a Unidirectional Motor-Driven Pruner for Ecological Gardens

YU Shaoxuan<sup>1</sup>, MA Jingyao<sup>2</sup>, MENG Zhaoxin<sup>1</sup>, LI Xin<sup>3\*</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. College of Information and Electrical Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163000, China; 3. School of Geography and Tourism, Harbin University, Harbin 150086, China)

**Abstract:** With increasing demand for ecological garden maintenance, pruning equipment faces challenges in efficiency, stability, and environmental performance. This study presents a high-efficiency pruning device driven by a unidirectional motor. By optimizing the transmission system and employing a customized lead screw-nut structure, the motor can complete both cutting and resetting with a single-direction rotation, avoiding the need for motor reversal in conventional devices. Finite element analysis verified the static and dynamic performance of the cutting components and transmission system, ensuring sufficient strength and stiffness for long-term operation. Calculations indicated an upper-bound required thrust of approximately 650 N (design baseline) for the motor-lead screw under the worst-case static condition. Under the specified dynamic simulation condition, the peak thrust was about 380 N, meeting the cutting and reset requirements with sufficient margin. Through a series of cutting experiments, the working performance of the equipment under different branch diameters was evaluated. Results demonstrated that the device outperforms traditional manual tools and standard electric pruners in efficiency and energy consumption, with strong continuous operation and energy-saving characteristics. The equipment is well-suited for ecological garden maintenance, meeting the high-efficiency requirements of ecological garden operations.

**Keywords:** Ecological gardens; unidirectional motor-driven; pruning equipment; finite element analysis; kinematic calculation

收稿日期: 2025-09-23

基金项目: 黑龙江省高等教育教学改革研究重点委托项目(SJGZ20220135)。

第一作者简介: 于少轩, 博士研究生。研究方向为智能装备。E-mail: yshaoxuan2025@163.com

\*通信作者: 栗欣, 硕士, 讲师。研究方向为智能装备与生态经济。E-mail: 466724364@qq.com

引文格式: 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 S X, MA J Y, MENG Z X, et al. Design and performance investigation of a unidirectional motor-driven pruner for ecological gardens[J]. Forest Engineering, 2026, 42(1): 184-195.

## 0 引言

生态园林作为城市绿色空间的重要组成部分,在改善环境质量、调节城市气候、优化景观格局和提升居民生活品质方面发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。随着城市化进程的加快和生态文明建设的深入推进,生态园林的建设与养护规模持续扩大,相应的抚育与造型修剪任务日益繁重。修枝作业需求的不断增长,使养护管理在精细化程度、连续作业能力、操作安全性以及绿色低碳特性等方面面临更高要求<sup>[2]</sup>。而修枝装备的性能水平直接影响生态园林的生态、景观与社会效益<sup>[3]</sup>。

目前,园林修剪作业主要包括人工修剪和机械修剪 2 种方式<sup>[4]</sup>。人工修剪依靠修枝剪、手锯等工具完成,虽然灵活性强、修剪精细,但劳动强度大、效率低,难以适应大规模园林养护需求<sup>[5]</sup>。机械修剪通过动力驱动的修枝装备实现,具有效率高、劳动强度低的优势,已逐渐成为园林修枝的发展方向<sup>[6]</sup>。其中,液压驱动设备功率大、适应性强,但存在体积笨重、能耗高、维护复杂等问题;相比之下,电动修枝装备因结构紧凑、绿色环保、操作简便,更适合应用于生态园林等对景观效果和环保要求较高的场景,因此成为研究重点。

在研究现状方面,果树修剪机械化研究起步较早。陈建章<sup>[7]</sup>系统梳理了枝条修剪机械化与自动化的发展历程,指出机械化是降低劳动强度、提高效率的必然趋势;王征等<sup>[8]</sup>提出应重点发展轻量化、智能化装备以满足林果业生产需求。随着研究深入,国内外学者逐渐将关注点扩展到园林绿化作业。吴金龙等<sup>[9]</sup>调查了小型修剪机的应用情况,认为其便携性较好,但在复杂环境下效率不足。黄金永等<sup>[10]</sup>设计了液压驱动的绿色篱修剪机械手,并通过运动学建模与试验验证了其修剪

性能。夏长高等<sup>[11]</sup>提出改进路径规划算法,提高了绿篱修剪机械手的轨迹精度。李怡哲等<sup>[12]</sup>、韦锦等<sup>[13]</sup>利用运动学与仿真分析,验证了多自由度绿篱修剪机械手的可行性。在装备性能优化方面,赵月等<sup>[14]</sup>通过动力学参数辨识与补偿提升了机械臂的作业稳定性;沈小滨等<sup>[15]</sup>结合动力学与仿真设计了多功能修剪机械手,验证了复杂造型修剪的可行性;张超等<sup>[16]</sup>优化修剪机器人结构并引入传感器,实现自主避障与自适应转向;于长波等<sup>[17]</sup>将信息技术应用于自动修剪机智能监控系统,有效提高了作业效率与质量。

总体来看,现有修枝装备在推广应用仍存在结构复杂、体积庞大和能耗高等不足,难以满足生态园林空间受限、环保要求高的作业需求。电动修枝机具虽轻便与环保优势,但在功率输出与切割效率方面仍有提升空间。因此,亟需研发兼具轻量化、节能性与高效性的修枝装备。基于此,提出一种单向电机驱动的高效修枝装备,重点在结构轻量化、传动优化与驱动方式创新,旨在提升修枝作业的效率与安全性,为生态园林养护提供高效、绿色的装备方案。

## 1 单向电机驱动修枝装备总体方案设计

为提升修枝装备在生态园林中的剪切性能,设计一种集剪切、传动与驱动于一体的单向电机驱动修枝装置。设备支持 2~4 m 高空手持操作,结构轻量化,采用高切削力传动系统以降低电机负荷。针对传统丝杠依赖电机反转的局限,本设计通过增大螺距并设置往复沟槽,实现单向旋转驱动下的剪切与复位功能。整机结构参数为长度 208 mm、宽度 115 mm、高度 1 680 mm,电机距底端 660 mm,刀轴与电机轴心垂直距离 435 mm,丝杠轴径 35 mm,长杆直径 30 mm,设备总质量约 2.1 kg。

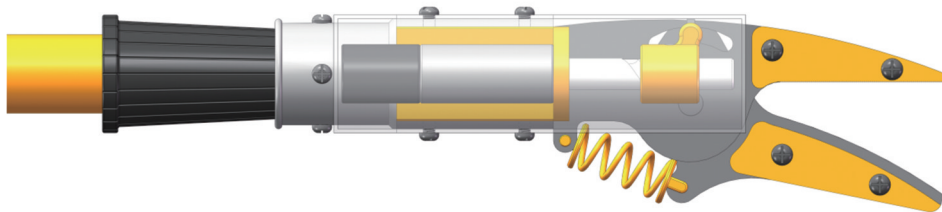


图1 总体结构模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the overall structural model

### 1.1 丝杠螺母结构设计

常规丝杠传动依靠电机正反转推动螺母往复<sup>[18]</sup>,无法满足本装备单向驱动自动复位的要求。为此,将电机输出轴制成大螺距丝杠,并在螺纹两端开有垂直

导槽,螺母运动至行程末端时脱离螺纹沿槽滑动,实现电机单向旋转即可往复剪切,如图2所示。螺母采用滚珠式结构,具有运转平稳、启动无抖动、高定位精度、寿命长和故障率低等优点。

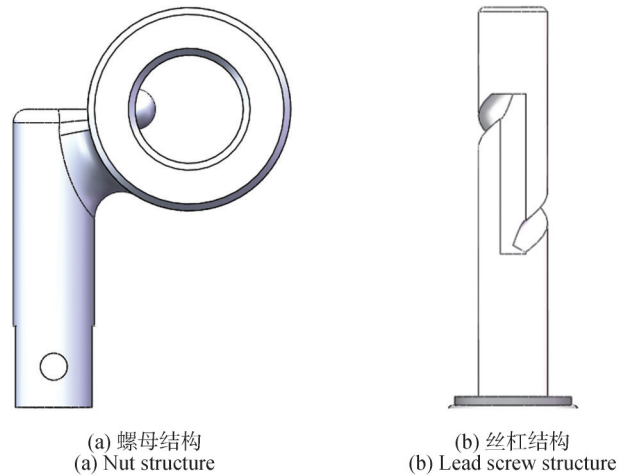


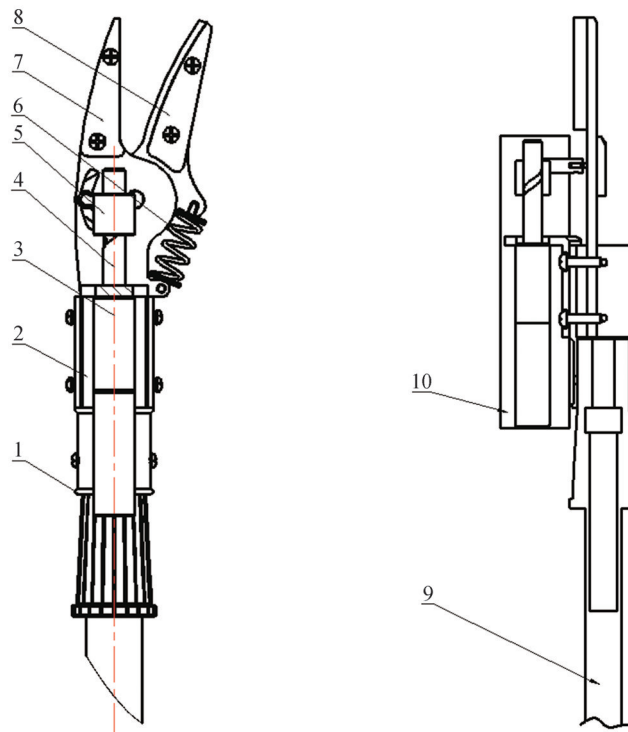
图2 丝杠螺母结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the lead screw-nut structure

## 1.2 修剪结构设计及工作过程

本装备由锂电池供电,操作者在树下通过开关控制剪切过程,如图3所示。作业时,将长杆举起使定刀刃(7)和动刀刃(8)张开并卡住待剪枝条的基部。初始状态下螺母套筒(5)位于丝杠(4)顶端,剪刀处于张开状态。按下开关,电机(3)驱动丝杠旋转,螺母套筒沿

丝杠下移,拉动动刀刃闭合剪切枝条,同时复位弹簧(6)被拉伸储能。剪切完成后松开开关,电机停止,在弹簧作用下螺母套筒沿丝杠竖直槽上滑回到顶端初始位置,刀刃重新张开,完成一次剪切循环。再次按下开关即可进行下一次剪切。



1. 连接把手; 2. 电机支架; 3. 减速电机; 4. 丝杠; 5. 螺母套筒; 6. 复位弹簧; 7. 定刀刃; 8. 动刀刃; 9. 长杆; 10. 电机外壳。

1. Handle connection; 2. Motor bracket; 3. Gear motor; 4. Lead screw; 5. Nut sleeve; 6. Return spring; 7. Fixed blade; 8. Moving blade; 9. Long rod; 10. Motor housing.

图3 单向电机驱动修枝装备二维结构示意图

Fig. 3 2D Structural schematic diagram of the pruning equipment driven by a unidirectional motor

### 1.3 电机计算及选用

依据经验估算剪切直径 30 mm 枝条约需 380 N 的剪切力。为此,对动刀刃进行受力分析,考虑剪切阻力、弹簧拉力、摩擦力和重力等因素,确定剪切过程中阻力矩最大的瞬间为动刀刃完全闭合时(枝条顶紧刀刃刃口)。据此在设计中选用初拉力约 2 N 的拉伸弹簧,弹簧刚度适中以保证刀刃剪断后能迅速复位且不致使电机负荷过大。忽略摩擦损耗,电机丝杠输出推

力约等于剪切阻力,计算得到所需推力约 650 N。应用丝杠传动公式(效率取 0.9),并考虑摩擦、惯量与几何非线性等原因反推所需电机扭矩区间为 2.8~3.2 N·m。假设单次剪切过程约 3 s(电机转速 $\approx$ 180 r/min),对应机械功率约 32 W。综合传动效率裕量和摩擦损失,最终选用一台额定功率 60 W、额定转速 2 000 r/min(空载约 3 000 r/min)的直流减速电机作为驱动,型号 57BL55S06,其主要参数见表 1。

表 1 电机参数

Tab. 1 Motor parameter list

型号 Model	额定电压/V Rated voltage	额定功率/W Rated power	额定转矩/(N·m) Rated torque	额定转速/(r·min <sup>-1</sup> ) Rated speed	空载转速/(r·min <sup>-1</sup> ) No-load speed	额定电流/A Rated current	空载电流/A No-load current
57BL55S06	24	60	3.18	2 000	3 000	3.3	0.3

## 2 有限元分析

### 2.1 关键部件静力学强度校核

为验证修枝装备在长期使用中的安全性与可靠

性,对剪刀刃与螺母套筒 2 个关键受力部件开展有限元静力学分析<sup>[19]</sup>。剪刀刃材料为 45#钢,螺母套筒材料为 Q235A,其主要力学参数汇总见表 2。

表 2 关键部件材料参数汇总

Tab. 2 Summary of material parameters for key components

部件 Part	材料属性 Material properties	弹性模量 E/GPa Elastic modulus	泊松比 $\mu$ Poisson's ratio	密度 $\rho$ /(kg·m <sup>-3</sup> ) Density	屈服强度 $\delta_y$ /MPa Yield strength	备注 Notes
剪刀刃 Scissor blade	45#钢	206	0.269	7 850	355	刃厚 3 mm
螺母套筒 Nut sleeve	Q235A	210	0.288	7 850	235	与机架焊接

加载与约束按工作最不利工况设置,在剪刀刃前刀口处施加 400 N 剪切载荷(较实际需求 380 N 留有裕量),后部与手柄连接端固支约束;螺母套筒按剪切力传递路径施加载荷并约束连接端。两部件的应力、应变与变形云图分别如图 4 和图 5 所示。

通过仿真云图可知,剪刀刃最大等效应力 22.068 MPa(位于前刀口接触区),约为 45#钢屈服强度 355 MPa 的 6.2%;最大等效应变 0.000 113 71;最大变形 0.001 298 70 mm(发生于刀尖端)。在取安全系数  $n=2$ 、许用应力约 177.5 MPa 的条件下,以上指标均显著低于许用值。螺母套筒(Q235A):最大等效应力 65.648 MPa(位于与支架焊缝处),约为 Q235A 屈服强度 235 MPa 的 28%;最大等效应变 0.000 417 79;最大变形 0.016 653 0 mm(位于与动刀连接前端),满足设计允许变形限。

### 2.2 动力学分析

为评估剪切全过程的运动与受力特性,采用 Adams 对样机进行动力学仿真,剪切对象设为直径 30 mm 的枝条,如图 6 所示<sup>[20]</sup>。仿真记录动刀刃位移与角速度、复位弹簧拉力与形变,以及系统推力/力矩随时间变化。

图 7 给出设备在剪切周期内的典型动态响应。动刀刃的位移-时间曲线覆盖自张开至闭合并进入稳态的全周期响应,复位段末期存在低幅值的瞬态振荡并快速衰减,为弹簧-铰接系统的典型二阶响应特征;角速度-时间曲线显示刀刃在起始阶段平稳加速,并在切入/切断阶段出现显著升高,体现快速剪切特性。弹簧拉力-时间曲线随剪切进程单调上升,剪断后逐步回落至初始水平;形变量-时间曲线呈相同趋势,表明储能与释能过程稳定可控。综合上述曲线可知,装置

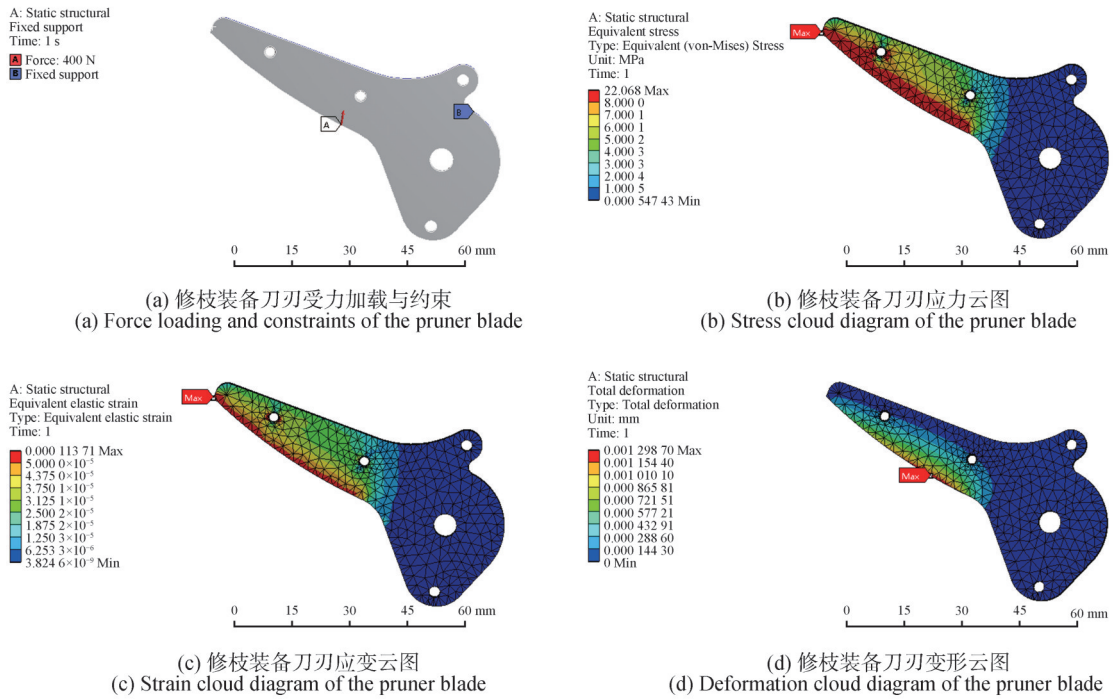


图4 剪刀刃部位云图分析  
Fig. 4 Cloud map analysis of the scissor blade section

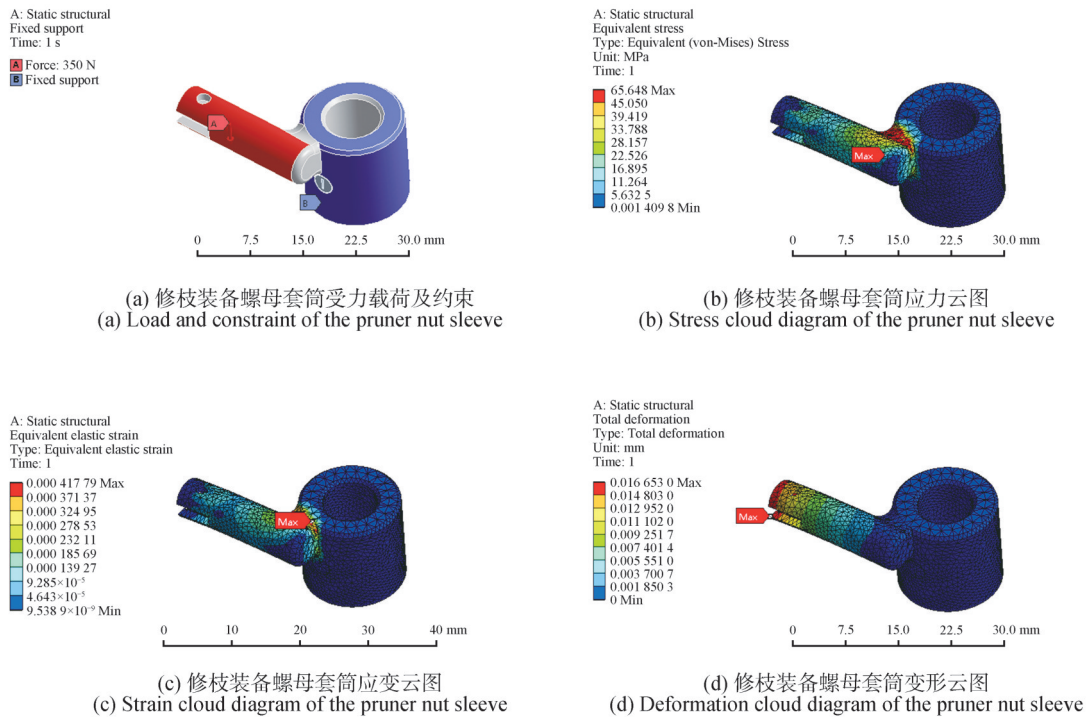


图5 螺母套筒部位云图分析  
Fig. 5 Cloud map analysis of the nut sleeve section

在单向驱动下实现了平滑闭合与快速复位,整体力学行为与预期动作节律一致。

图8给出基于既定设计参数与边界条件的Adams动力学仿真结果。由图8可见,电机侧推力在动刀刃

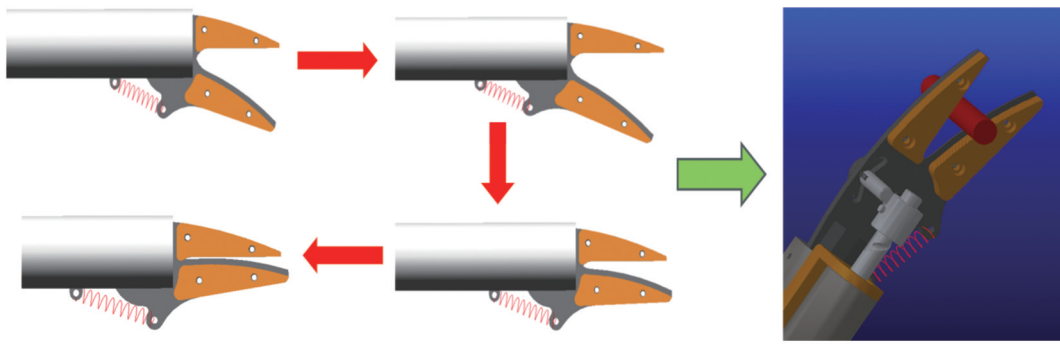


图 6 单向电机驱动修枝装备剪切示意图

Fig. 6 Cutting schematic diagram of the pruning equipment driven by a unidirectional motor

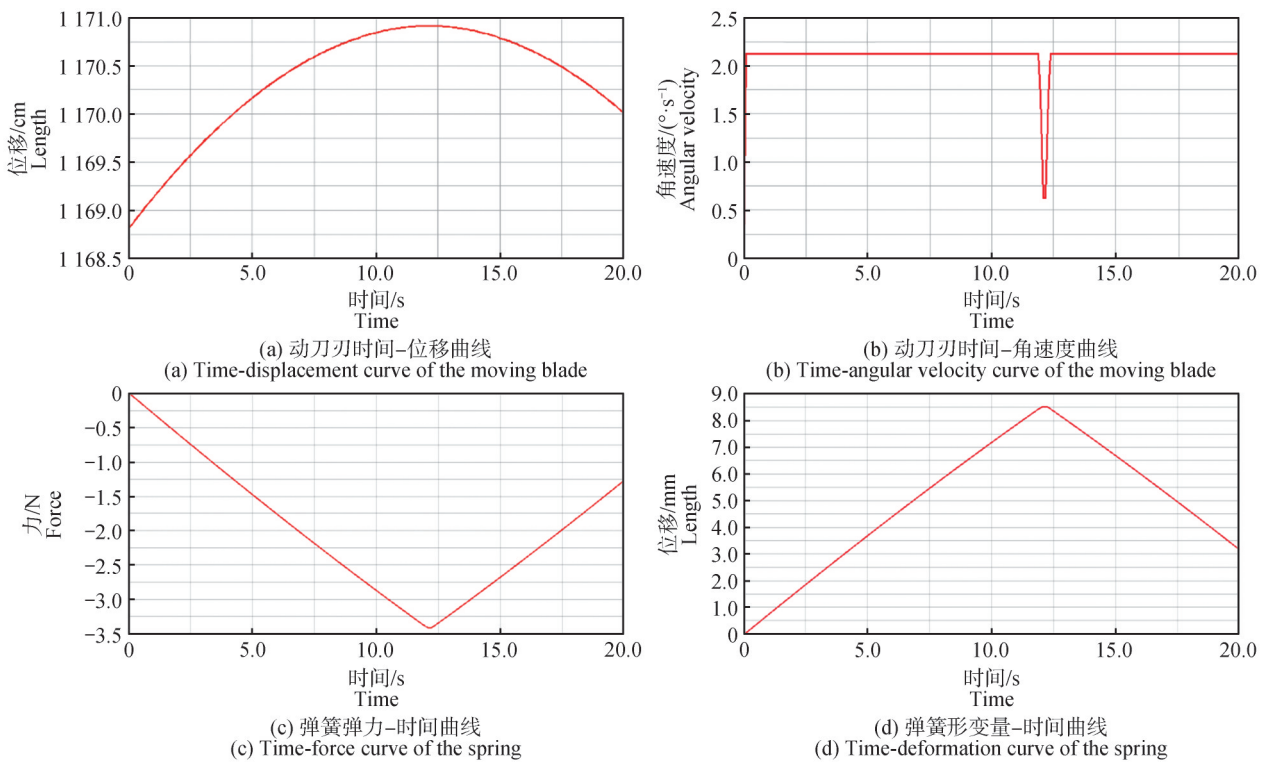


图 7 单向电机驱动修枝装备动态特性仿真

Fig. 7 Dynamic characteristic simulation of the pruning equipment driven by a unidirectional motor

闭合瞬间达到峰值,约 380 N,与电机-丝杠选型相匹配。仿真与计算均未计入摩擦损耗;误差主要源于理论模型中忽略重力以及仿真中剪切力作用方向与理论假设存在轻微夹角,但偏差处于可接受范围内,不影响结论判定。此外,切削直径约 30 mm 枝条的力矩曲线显示其峰值与前述电机选型计算一致,表明传动—驱动容量满足工况需求。

### 3 剪切能力试验

#### 3.1 试验对象与设备

基于单向电机驱动修枝装备样机,选取直径为 10、

15、20、25、30 mm 的松枝各 5 个,共 25 个样本进行剪切试验。电机回路串接多功能测试仪,多功能测试仪的型号见表 3,配合 PM525BN 数据采集卡实时记录电压、电流等参数,数据经 USB 接入上位机软件完成采集与存储。

试验平台及测量布置如图 9 所示,修枝装备主要结构如图 10 所示。

#### 3.2 试验结果与分析

为评估样机在不同工况下的作业性能,分别对直径为 10、15、20、25、30 mm 的松枝(各 5 个样本)进行剪切测试,并记录电压、电流、功率和单次剪切时间等指标(见表 4—表 9)。

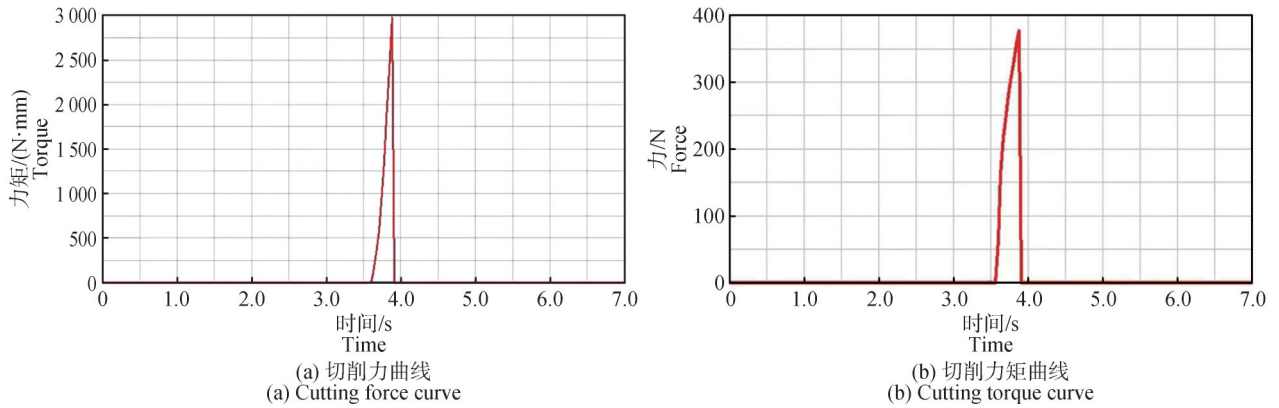


图8 单向电机驱动修枝装备力学仿真

Fig. 8 Mechanical simulation of the pruning equipment driven by a unidirectional motor

表3 多功能测试仪的型号及其可测量的参数

Tab. 3 Model of the multifunction tester and its measurable parameters

设备名称 Equipment name	型号 Model	电压测量范围/V Voltage measurement range	电流测量范围/A Current measurement range	时间测量范围/h Time measurement range	功率测量范围/W Power measurement range	容量测量范围/Ah Capacity measurement range
多功能测试仪 Multifunction tester	OLED/DC 100V/20A	DC 0~99.9	DC 0~20	0~99.983 3	0~999	0~999



图9 试验模型搭建

Fig. 9 Experimental setup construction

表4 直径为10 mm 树枝剪切试验数据

Tab. 4 Cutting test data for 10 mm diameter branches

样本编号 Sample ID	电压/V Voltage	电流/A Current	功率/W Power	容量/mAh Capacity	时间/s Time
1	24	0.7	17	0.6	2.5
2	24	0.7	17	0.6	2.4
3	24	0.9	22	0.6	2.6
4	24	0.8	19	0.6	2.5
5	24	0.9	22	0.6	2.5
平均值 Average	24	0.8	19	0.6	2.5

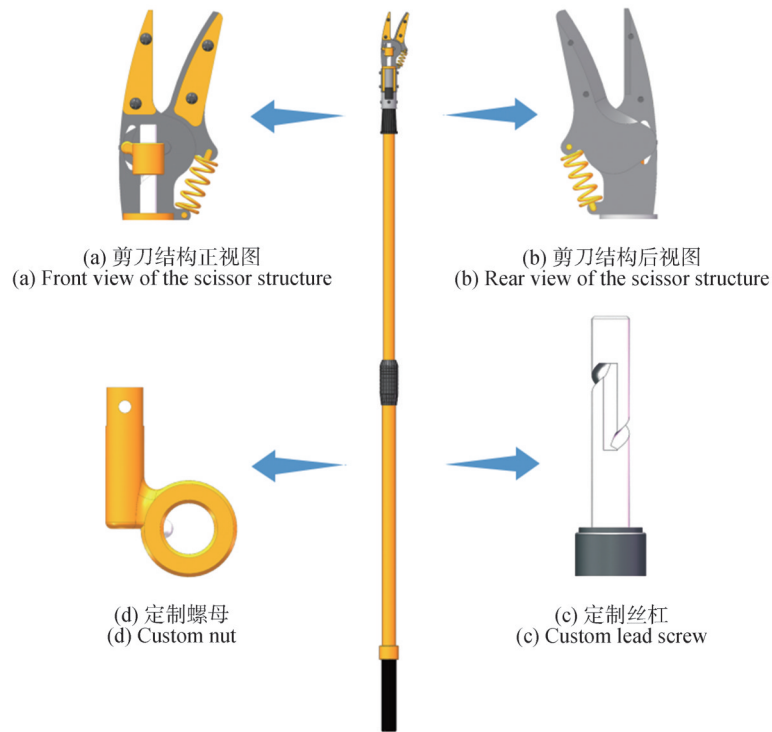


图 10 单向电机驱动修枝装备主要结构示意图

Fig. 10 Main structural schematic of the pruning equipment driven by a unidirectional motor

表 5 直径为 15 mm 树枝剪切试验数据

Tab. 5 Cutting test data for 15 mm diameter branches

样本编号 Sample ID	电压/V Voltage	电流/A Current	功率/W Power	容量/mAh Capacity	时间/s Time
1	24	1.0	24	0.7	2.5
2	24	1.1	26	0.7	2.4
3	24	1.1	26	0.7	2.6
4	24	1.0	24	0.7	2.4
5	24	0.9	22	0.7	2.6
平均值 Average	24	1.0	24	0.7	2.5

表 6 直径为 20 mm 树枝剪切试验数据

Tab. 6 Cutting test data for 20 mm diameter branches

样本编号 Sample ID	电压/V Voltage	电流/A Current	功率/W Power	容量/mAh Capacity	时间/s Time
1	24	1.1	26	0.9	2.6
2	24	1.2	29	0.9	2.4
3	24	1.2	29	0.9	2.6
4	24	1.3	31	0.9	2.5
5	24	1.3	31	0.9	2.6
平均值 Average	24	1.2	29	0.9	2.6

表7 直径为25 mm树枝剪切试验数据

Tab. 7 Cutting test data for 25 mm diameter branches

样本编号 Sample ID	电压/V Voltage	电流/A Current	功率/W Power	容量/mAh Capacity	时间/s Time
1	24	1.5	36	1.2	2.8
2	24	1.4	34	1.2	2.7
3	24	1.6	38	1.2	2.9
4	24	1.5	36	1.2	2.8
5	24	1.5	36	1.2	2.8
平均值 Average	24	1.5	36	1.2	2.8

表8 直径为30 mm树枝剪切试验数据

Tab. 8 Cutting test data for 30 mm diameter branches

样本编号 Sample ID	电压/V Voltage	电流/A Current	功率/W Power	容量/mAh Capacity	时间/s Time
1	24	1.8	43	1.4	2.9
2	24	1.7	41	1.4	2.9
3	24	1.7	41	1.4	2.8
4	24	1.8	43	1.4	2.7
5	24	1.9	46	1.4	2.8
平均值 Average	24	1.8	43	1.4	2.8

表9 不同直径剪切试验平均值统计

Tab. 9 Average values of cutting tests for branches of different diameters

直径/mm Diameter	电压/V Voltage	电流/A Current	功率/W Power	容量/mAh Capacity	时间/s Time
10	24	0.8	19	0.6	2.5
15	24	1.0	24	0.7	2.5
20	24	1.2	29	0.9	2.6
25	24	1.5	36	1.2	2.8
30	24	1.8	43	1.4	2.8
平均值 Average	24	1.3	30	1.0	2.6

由表4—表9可知,在供电电压基本稳定于24 V的条件下,随着直径由10 mm增至30 mm,工作电流由约0.8 A增至1.8 A、对应功率由约19 W升至43 W;单次剪切时间仅由约2.5 s增至2.8 s,显示能耗近似随直径线性增加,而剪切时耗变化不显著。

同时为刻画变量间关系,将直径与电流作为自变量、剪切时间为因变量开展二次多项式逐步回归,直径( $X_1$ )和电流( $X_2$ )分别取自变量,时间( $Y$ )取因变量,见表10—表12。

表10 回归分析用数据集(按直径水平的平均值)

Tab. 10 Dataset for regression (averaged by branch diameter)

试验组数 Test group	直径 $X_1$ /mm Diameter	电流 $X_2$ /A Current	时间 $Y$ /s Time
1	10	0.8	2.5
2	15	1.0	2.5
3	20	1.2	2.6
4	15	1.5	2.8
5	30	1.8	2.8

表 11 用二次多项式逐步回归法处理的数据结果

Tab. 11 Data results processed using stepwise regression with a quadratic polynomial

因素 Factor	偏相关 Partial correlation	t-检验 t-test	显著水平 P Significance level
$X_1$	-0.994 4	0.511 3	0.018 2
$X_2$	0.989 2	0.632 7	0.015 1
$X_1 \times X_2$	-0.985 2	0.555 4	0.017 0

表 12 回归预测效果

Tab. 12 Regression prediction results

样本 Sample	观测值 Observed value	拟合值 Fitted value	拟合误差 Fitting error
1	2.5	2.468 2	0.031 8
2	2.5	2.563 6	-0.063 6
3	2.6	2.589 4	0.010 6
4	2.8	2.757 6	0.042 4
5	2.8	2.821 2	-0.021 2

通过方差分析,显著水平  $P=0.0182 < 0.05$ , 剩余标准差  $S=0.0097$ , 相关系数  $R=0.919302$ 。从以上数据能够得出,测试结果与回归方程预测值严重差异的概率小于 5%, 两因素及其交互项均达显著水平, 表明大直径主要通过提高电机负荷而对时耗产生轻微影响。

近线性上升趋势, 平均实际切断用时约 2.60 s, 每个工作循环(含复位与操作间隔)约 5 s。配用 2 000 mAh 锂电池时, 理论可完成约 2 000 次剪切, 性能优于高枝电圆锯, 见表 13, 满足日常养护作业的续航需求。综合上述结果, 本装备在较宽工况范围内保持较短剪切时耗与显著效率优势, 同时具备良好的能效与续航表现。

图 11 为随直径增大的电流和单次剪切耗电量的

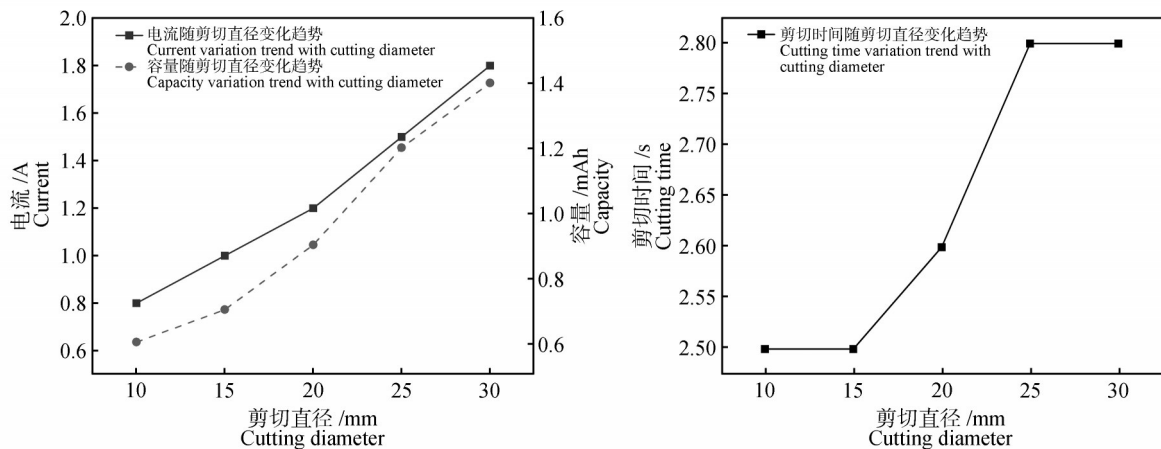


图 11 设备参数变化趋势

Fig. 11 Trend chart of equipment parameter variations

表 13 试验数据

Tab. 13 Experimental data

设备 Equipment	单次切削时间/s Single cutting time	电量耗尽切削次数 Number of cuts per full charge
手动高枝修枝器 Manual pole pruner	6.3	—
高枝电圆锯 Pole-mounted electric circular saw	3.2	512
单向电机驱动修枝装备 Pruning equipment driven by a unidirectional motor	2.7	2 000

## 4 结论

1) 本研究提出单向电机驱动修枝装备的设计,通过创新设计避免传统修枝机械依赖电机反转的问题,经过优化传动系统,提高设备的工作效率和稳定性。该设计显著简化动力传递机制,减少电机负担,并提升设备的可靠性。

2) 通过有限元分析,对关键部件如剪刀刃和螺母套筒进行静力学与动力学分析。结果表明,设计满足长期使用中的强度和刚度要求,确保修枝装备的可靠性与安全性。

3) 依据 650 N 静力计算上限完成容量校核,所测工况的动力学仿真峰值推力约 380 N,与电机-丝杠选型相匹配,体现出合理的设计冗余。

4) 剪切试验验证了该装备在不同直径树枝上的剪切性能,试验数据显示该修枝装备在工作效率和能效方面均优于传统手动工具及其他电动修枝设备,能够有效满足城市生态园林抚育作业的高效要求。

综合考虑该设计的工作效率、能效及机械可靠性,本研究提出的修枝装备具有较高的市场应用潜力,并为未来高效城市生态园林作业设备的设计提供新的技术路径和创新思路。

## 参 考 文 献

- [1] 米艳红. 林业技术在生态园林绿化中的平台设计分析[J]. 现代园艺, 2016(24): 138-139.  
MI Y H. Analysis on the platform design of forestry technology in ecological landscaping [J]. Contemporary Horticulture, 2016(24): 138-139.
- [2] 彭继娅. “两山”理论下精细化理念在园林绿化养护领域中的运用[J]. 中国林业产业, 2024(6): 124-126.  
PENG J Y. Application of the refined management concept in landscape maintenance under the “Two Mountains” theory [J]. China Forestry Industry, 2024(6): 124-126.
- [3] 陈翠. 现代农机在大型生态旅游区园林作业中的应用[J]. 农机化研究, 2019, 41(11): 239-243.  
CHEN C. Application of modern agricultural machinery equipment in landscape operation of large ecological tourist area [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(11): 239-243.
- [4] 马静, 梁堃. 果树枝条修剪机械化及自动化研究进展[J]. 广东蚕业, 2020, 54(9): 84-86.  
MA J, LIANG K. Research progress on mechanization and automation of fruit tree branch pruning [J]. Guangdong Canye, 2020, 54(9): 84-86.
- [5] 吴良军, 段洁利, 郭海龙, 等. 果园电动修剪机剪切功耗影响因素的试验研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(6): 39-43.  
WU L J, DUAN J L, GUO H L, et al. Experimental investigation on factors influencing shear power consumption of electric pruner in orchard [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2020, 58(6): 39-43.
- [6] 许鹏. 自动化修剪整形技术在果树枝条修剪中的应用探讨[J]. 河北农机, 2025(4): 66-68.  
XU P. Discussion on the application of automated pruning and shaping technology in fruit tree branch pruning [J]. Hebei Agricultural Machinery, 2025(4): 66-68.
- [7] 陈建章. 果树枝条修剪机械化及自动化研究进展[J]. 产业与科技论坛, 2022, 21(17): 49-50.  
CHEN J Z. Research progress on mechanization and automation of fruit tree branch pruning [J]. Industry and Technology Forum, 2022, 21(17): 49-50.
- [8] 王征, 宋月鹏, 柳洪洁, 等. 我国林果树木修枝机械的研究现状及其发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(3): 126-130.  
WANG Z, SONG Y P, LIU H J, et al. Research status and development trend of forest-fruits pruning machine in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(3): 126-130.
- [9] 吴金龙, 孟凡召. 浅谈小型绿化修剪机的现状及发展趋势[J]. 南方农机, 2019, 50(15): 16-17.  
WU J L, MENG F Z. A brief discussion on the current status and development trend of small-scale greenery pruning machines [J]. South Agricultural Machinery, 2019, 50(15): 16-17.
- [10] 黄金永, 郑晓峰, 娄岳海, 等. 果园绿篱修剪机械手的设计与研究[J]. 机电工程, 2024, 41(8): 1508-1516.  
HUANG J Y, ZHENG X F, LOU Y H, et al. Design and research of orchard hedge trimmer manipulator [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2024, 41(8): 1508-1516.
- [11] 夏长高, 许秋月, 韩江义. 果园绿篱修剪机械手路径规划算法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(1): 132-139.  
XIA C G, XU Q Y, HAN J Y. Research on the path planning algorithm of an orchard hedge pruning manipulator [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(1): 132-139.
- [12] 李怡哲, 韦锦, 沈小滨, 等. 绿篱修剪机械手的运动学分析与 MATLAB 仿真[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(5): 1135-1142.  
LI Y Z, WEI J, SHEN X B, et al. Kinematic analysis and MATLAB simulation of the hedge trimmer manipulator [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edi-

- tion), 2020, 45(5): 1135-1142.
- [13] 韦锦, 蒙艳玫, 董振, 等. 绿篱苗木修剪机械手运动学分析及仿真[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2015, 40(3): 622-628.  
WEI J, MENG Y M, DONG Z, et al. Kinematic simulation and analysis of hedge trimmer manipulator[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2015, 40(3): 622-628.
- [14] 赵月, 刘亚秋, 徐妍, 等. 林木果球采收机械臂动力学参数辨识及补偿[J]. 森林工程, 2023, 39(3): 150-160, 171.  
ZHAO Y, LIU Y Q, XU Y, et al. Dynamic parameter identification and compensation of forest fruit ball harvesting manipulator[J]. Forest Engineering, 2023, 39(3): 150-160, 171.
- [15] 沈小滨, 唐竞, 许恩永, 等. 园林修剪机械手运动学与动力学仿真分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(2): 384-393.  
SHEN X B, TANG J, XU E Y, et al. Kinematics and dynamics simulation analysis of gardens trimmer manipulator[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2021, 46(2): 384-393.
- [16] 张超, 张建林. 基于园林的修剪机器人结构优化研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(1): 90-94.  
ZHANG C, ZHANG J L. Research on structure optimization of pruning robot based on garden[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(1): 90-94.
- [17] 于长波, 孙春义. 基于信息技术的自动修剪机智能监控系统研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(6): 204-208.  
YU C B, SUN C Y. Research on intelligent monitoring system of automatic trimmer based on information technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(6): 204-208.
- [18] 卜庆伟, 米洁, 张胜伦, 等. 螺母丝杠机构的静力学仿真及可靠性分析[J]. 机械设计与制造工程, 2023, 52(7): 68-73.  
BU Q W, MI J, ZHANG S L, et al. Analysis on the statics simulation and reliability of nut screw mechanism[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2023, 52(7): 68-73.
- [19] 陈光宇, 翁直威, 张松. 考虑尺寸误差与径向载荷的双螺母滚珠丝杠静刚度分析[J]. 中国机械工程, 2023, 34(24): 2952-2962.  
CHEN G Y, WENG Z W, ZHANG S. Static stiffness analysis of double-nut ball screws considering dimensional errors and radial loads[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(24): 2952-2962.
- [20] YIN H, MENG Z X, ZHANG Y, et al. Based on MATLAB and Adams new pruning cutting edge shape and shear force simulation[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 175: 03065.