

山地果园单轨运输机动力系统优化与能耗控制研究

黄敏江

广东振声科技集团有限公司 广东 梅州 514000

【摘要】：本文针对山地果园单轨运输机在复杂地形下作业能耗高、效率低的问题，从动力系统匹配、传动系统优化、能量回收与管理以及整机轻量化设计四个维度，系统地论述了动力系统节能优化设计的关键要点。通过建立运输机的运行阻力数学模型，进行了驱动电机与传动比的匹配优化分析；对比了不同传动方案的效率；探讨了再生制动技术的应用潜力；并分析了轻量化设计对降低基础能耗的贡献。研究结果以图表和计算公式形式呈现，为低能耗、高效率的山地果园运输装备设计提供了理论依据和实践指导。

【关键词】：单轨运输机；动力系统优化；能耗控制；传动效率；匹配计算

DOI:10.12417/2705-0998.25.19.062

山地果园地形复杂、坡度起伏大，运输作业主要依赖人力或小型机械，效率低下且成本高昂。单轨运输机以其占地面积小、适应性强、转弯半径小等优点，成为解决山地果园“最后一公里”运输难题的有效装备。然而，其动力系统在频繁启停、大坡度爬升等工况下能耗巨大，直接影响了设备的经济性和续航能力。因此，对动力系统进行精细化优化与能耗控制研究，对于提升产品竞争力、推动果园生产机械化具有重要意义。本文旨在从工程设计与系统集成的角度，深入探讨实现高效低耗动力系统的具体路径与方法。

1 动力系统匹配优化：运行阻力分析与驱动参数确定

动力系统优化的首要任务是实现驱动单元（电机）与负载需求的精确匹配，避免“大马拉小车”或动力不足的现象。

1.1 运行阻力数学模型构建

运输机在轨道上运行时的总阻力 $F_{总}$ 主要由坡度阻力 F_i 、滚动阻力 F_f 、加速阻力 F_a 和空气阻力 F_w 构成。在山地低速（ $<5\text{km/h}$ ）工况下，空气阻力可忽略不计。

$$F_{总} = F_i + F_f + F_a$$

其中：

$$\text{坡度阻力: } F_i = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

$$\text{滚动阻力: } F_f = m \cdot g \cdot \mu \cdot \cos(\alpha)$$

$$\text{加速阻力: } F_a = \delta \cdot m \cdot a$$

式中：

m -运输机总质量（含货物）（kg）

g -重力加速度（ 9.8 m/s^2 ）

α -轨道倾斜角（°）

μ -综合滚动阻力系数（与车轮、轨道材质有关，一般取0.02~0.05）

δ -旋转质量换算系数（可取1.05~1.10）

a -运行加速度（ m/s^2 ）

1.2 驱动电机功率与扭矩匹配

驱动轮所需扭矩 T 和功率 P 可由总阻力求得：

$$T = F_{总} \cdot r / (\eta_t \cdot i)$$

$$P = F_{总} \cdot v / \eta_t$$

式中：

r -驱动轮半径（m）

i -传动系统总传动比

η_t -传动系统总效率

v -运行速度（m/s）

设计要点：电机额定功率和扭矩必须覆盖最恶劣工况（如最大爬坡角度+满载启动），但同时要考虑常用工况（如中等坡度、匀速运行）下的高效区间。应选择具有宽高效区的电机，并通过传动比设计，使常用工况点落在电机的高效率区间。

表1 不同坡度下运输机（ $m=500\text{kg}, v=1\text{m/s}$ ）的功率需求估算

坡度 $\alpha(^{\circ})$	坡度阻力 F_i (N)	总阻力 $F_{总}$ (N)	所需功率 $P(\text{kW})$
5°	437	477	0.48
15°	1279	1319	1.32
25°	2081	2121	2.12
35°	2822	2862	2.86

（注：假设 $\mu=0.03, \eta_t=0.85$ ）

根据表1，若最大爬坡度为35°，则电机峰值功率应不低于3kW。但在实际果园中，大于25°的坡段占比可能很小，因此电机长期工作在1-2kW区间。选择一款额定功率1.5kW，峰值功率3.5kW的永磁同步电机，将是能耗与动力性之间的良好平衡。

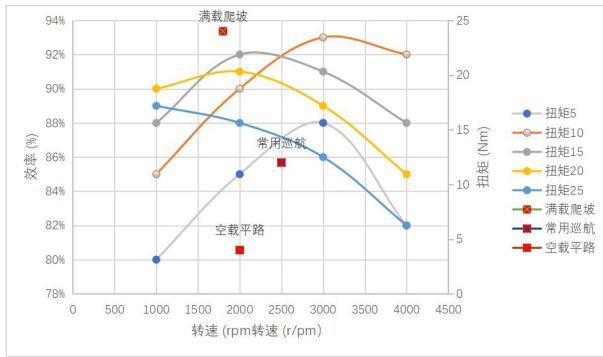


图1 电机效率 Map 图与工况点分布示意图

由图可看出，电机常用巡航工况（转速 2500，扭矩 12）最近接近电机工作高效区。

2 传动系统优化：提升能量传递效率

传动系统是连接电机与驱动轮的纽带，其效率直接影响整机能耗。

2.1 传动方案选择与效率分析

单轨运输机常采用“电机+减速器+链/齿轮”的传动形式。不同传动形式的单级效率差异显著：

行星齿轮减速器：效率高（ $\eta \approx 0.97-0.98$ ），结构紧凑，但成本较高。

蜗轮蜗杆减速器：传动比大，可自锁，但效率低（ $\eta \approx 0.70-0.90$ ），不适合追求低能耗的场景。

链传动：效率中等（ $\eta \approx 0.95-0.97$ ），适合中心距较大的传动，但需考虑张紧和润滑。

总传动效率为各级传动效率的乘积：

$$\eta_t = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \dots$$

设计要点：在满足传动比和结构要求的前提下，应优先选择高效率的传动方案，并尽量减少传动级数。例如，采用一级高效率行星减速器加一级开式齿轮的方案，其总效率可能达到 $0.98 \times 0.96 = 0.94$ ，优于两级蜗轮蜗杆传动的 $0.85 \times 0.85 = 0.72$ 。效率提升 22% 意味着在同等输出功率下，输入能耗可降低超过五分之一。

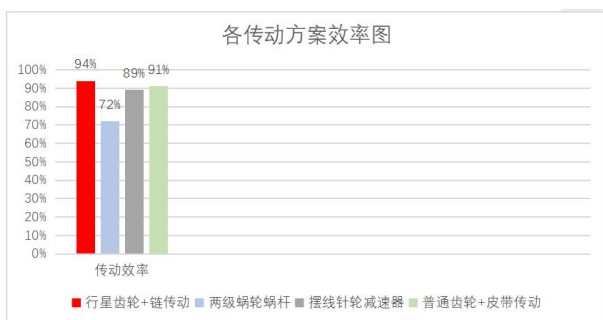


图2 不同传动方案效率对比柱状图

通过对比可知，行星齿轮+链传动的方案，相对其他动力方案效率更高。

3 能耗控制策略：再生制动与智能管理

3.1 再生制动（能量回收）技术应用

当运输机满载下坡或制动时，其势能可以转化为动能。采用具有再生制动功能的电机控制器，可以将这部分动能再转化为电能，回充至蓄电池。

回收的能量 E_{regen} 可近似估算为：

$$E_{\text{regen}} \approx \eta_{\text{regen}} \cdot m \cdot g \cdot \Delta h$$

式中：

η_{regen} - 能量回收系统综合效率（包括电机、控制器、电池充放电效率，通常为 0.5~0.7）

Δh - 下坡高度差（m）

设计要点：再生制动不仅能节约能耗（尤其在长下坡路段效果显著），还能减少机械制动器的磨损，提高系统可靠性。控制策略上，需要设定合理的制动扭矩映射，确保下坡速度稳定且回收效率最高。

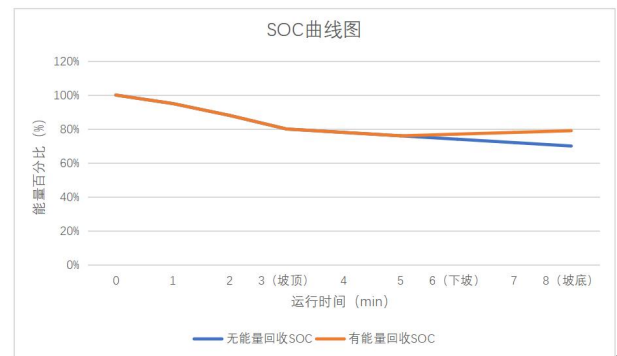


图3 带能量回收与无能量回收的电池 SOC（荷电状态）对比曲线

图表模拟一次“上坡-下坡”循环，显示有能量回收的系统在完成循环后 SOC 下降更少。

3.2 运行速度曲线优化

采用“平滑启停”的速度控制策略，避免急加速和急刹车。通过程序设定一个合理的加速度和减速度曲线，可以有效降低加速阻力 F_a 带来的峰值功耗，从而节约能耗。

4 整机轻量化与低阻设计

根据运行阻力公式，总质量 m 是影响阻力的核心参数之一。因此，轻量化设计是降低基础能耗的根本途径。

结构优化：对车架、载物台等结构件进行拓扑优化或尺寸优化，在保证刚强度和稳定性的前提下去除冗余材料。

材料选择：在关键部位采用高强度钢、铝合金甚至工程塑料，以减轻自重。

低阻力部件：选用低滚动阻力的实心轮胎或高品质轴承，降低 μ 值。

轻量化带来的能耗降低是线性的。若整机质量降低 Δm ，则在坡度 α 上匀速运行的功率降低为：

$$\Delta P = \Delta m \cdot g \cdot (\sin\alpha + \mu\cos\alpha) \cdot v / \eta t$$

表2 轻量化（减重 50kg）对功率需求的影响（以 $\alpha=15^\circ$ 为例）

质量状态	总质量(kg)	所需功率(kW)	功率降低幅度
原设计	500	1.31	-
轻量化后	450	1.18	10%

5 结论

本文系统性地论证了山地果园单轨运输机动力系统实现

低能耗、高效率设计的四大关键方面：

精准匹配是前提：通过建立运行阻力模型，精确计算驱动电机的功率与扭矩需求，确保电机在常用工况下工作于高效区。

高效传动是核心：优先选择高效率的传动方案（如行星齿轮），减少能量在传递过程中的损失。

智能控制是关键：引入再生制动技术和优化速度曲线，主动回收和节约能量。

轻量化是基础：从结构和材料入手降低整机质量，直接减小运行阻力，从源头上控制能耗。

通过以上多维度、系统化的优化与控制，能够显著提升山地果园单轨运输机的能量利用效率，延长其续航时间，降低运行成本，从而更好地服务于现代化山地果园的生产需求。

参考文献：

- [1] 王福杰,宋月鹏,姜凯,等.山地果园蓄电池驱动单轨运输机的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(17):26-34.
- [2] 李震,洪添胜,孙同彪,等.山地果园蓄电池驱动单轨运输机传动系统设计[J].农业工程学报,2017,33(15):49-56.
- [3] 杨洲,陈震,孙志全,等.单轨道山地果园运输机齿条齿形优选与试验[J].农业机械学报,2018,49(04):130-136.
- [4] 朱余清,洪添胜,黄鹏钦,等.山地果园电动单轨运输机控制装置的设计与试验[J].华中农业大学学报,2016,35(02):115-120.
- [5] 牛萌萌,邢洁洁,杨福增,等.山地果园轨道运输机试验台的设计与应用[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(10):133-142.
- [6] 张跃峰.丘陵山地多功能轨道运输平台的设计与试验[D].山西农业大学,2025.