

清障车出叉系统设计

陈祥源, 孟令启

广州科技职业技术大学智能工程与未来学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年11月3日; 录用日期: 2025年12月23日; 发布日期: 2025年12月29日

摘要

如今道路清障车行业一般为牵引式和起吊式, 在障碍作业时, 若车辆受损小能牵引在后方, 若受损得太过严重只能用吊钩吊上去, 这样太耗费时间。如何节省这一步的时间是本设计的研究方向, 在方案上用电机加丝杠来控制出叉的动作, 电机转动带动联轴器转动, 连接丝杠, 使货叉向前移动, 当货叉移动到指定位置时, 货叉与连接板松开, 货叉脱离, 此时货叉已经在障碍车底部, 然后使用挂钩钩住两个货叉使障碍车辆平稳上升。这个方案能够大幅度地降低拖车的时间, 能够使清障车在工作时更加有效率。

关键词

道路清障车, 丝杠, 货叉, 液压系统

Design of Fork System of Road Clearing Car

Xiangyuan Chen, Lingqi Meng

School of Intelligent Engineering and the Future, Guangzhou Vocational University of Science and Technology, Guangzhou Guangdong

Received: November 3, 2025; accepted: December 23, 2025; published: December 29, 2025

Abstract

Nowadays, the road clearing car industry is generally tractor and lifting. In the obstacle operation, if the vehicle is damaged and small, it can be pulled in the rear, and if the damage is too serious, it can only be hoisted with the hook, which is too time-consuming. How to save the time required for this step is the research direction of this design, in the scheme with the motor plus wire bar to control the movement of the fork, the motor rotation to drive the coupling rotation, connect the wire, move the fork forward, when the fork moves to the designated position, the fork and the connection plate loose, the fork is at the bottom of the obstacle car, and then use the hook to hook two forks to raise the obstacle vehicle smoothly. This scheme can greatly reduce the time of the trailer and make the obstacle clearing car more efficient at work.

Keywords

Road Clearing Car, Silk Screw Bar, Cargo Fork, Hydraulic Pressure System

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

道路清障车是城市交通管理与应急救援的核心装备, 其作业效率直接影响道路拥堵缓解速度和交通事故处置时效。随着汽车保有量的持续增长, 道路事故车辆的清障需求大幅提升, 对清障装备的作业效率、适配性和可靠性提出了更高要求[1]。现有清障车主要分为牵引式、平板式和起吊式三类: 牵引式适用于故障车辆仍具备部分行驶能力的场景, 但需人工挂钩牵引, 操作繁琐且适配性差; 平板式需将故障车辆整体拖拽至平板上, 对作业空间要求高, 且重型车辆转运难度大; 起吊式虽可处理严重受损车辆, 但吊钩定位耗时久, 且易因受力不均导致车辆二次损伤[2]。现有技术方案普遍存在作业流程繁琐、出叉定位精度低、适配场景有限等问题, 导致清障作业平均耗时超过 15 分钟, 严重阻碍交通恢复[3]。基于此, 本文设计一种集成“电机 + 丝杠”传动与液压同步控制的智能出叉系统, 核心创新点在于: ① 采用电机丝杠传动替代传统液压/齿轮齿条驱动, 兼顾出叉精度与空间适配性; ② 通过货叉与连接板的快速解锁结构, 实现故障车辆底部的精准定位与平稳抬升; ③ 结合机电液协同控制, 大幅缩短出叉与抬升作业耗时。本设计可适配 1~5 吨级故障车辆的托举需求, 作业效率较传统系统提升 20%以上, 为城市道路快速清障提供技术支撑。

2. 方案的确定

2.1. 齿轮齿条传动

工作原理: 齿轮向前滚动, 齿轮根部与齿条根部相互啮合, 带动零件向前移动。齿轮安装在货叉两旁下方与齿条相互配合, 然后电机带动齿轮转动, 齿轮带动货叉缓慢移动[4]。轮齿条传动的特点: 1) 优点: 相对于其他的传动而言, 齿轮齿条传动应用广泛且传动的精度非常高, 能够达到 0.0001 m; 使用的寿命较长, 能高速运转但不影响精度, 传输的动力较大; 转动速度时无波动, 传动比不变, 可以传递的运动较广。2) 缺点: 成本高, 噪音较大。

2.2. 同步带传动

工作原理: 皮带装在齿轮的外部, 皮带与齿轮相互啮合, 当齿轮转动时, 同步带也跟随一起向前移动。把货叉安装在皮带上, 电机带动齿轮转动, 齿轮带动皮带向前移动, 货叉也缓慢向前移动[5]。同步带的特点: 1) 优点: 传动的速度和精度都比较高。2) 缺点: 安装时需要的空间较大, 其定位精度较低, 弹性变形较大, 不适合本次设计要求。

2.3. 电机丝杠传动

工作原理: 电机转动, 带动丝杠转动, 把货叉装在丝杠上, 丝杠的旋转运动转变为货叉的平行移动, 货叉缓慢向前移动[6]。丝杠传动的特点: 1) 优点: 传动的精度比上面两种方案要高, 传动的速度和效率更加优秀, 噪音小甚至无噪音, 能够往返运动。2) 缺点: 价格昂贵, 反程的精度较低。

2.4. 对比分析

- 量化指标仅保留“成本”(核心数值), 其余维度用“高/中/低/差”等定性分级, 快速凸显差异。
- 新增“优劣判定”列, 用(优/中/差)判定, 直接给出单维度结论, 降低阅读门槛。

2.5. 最终方案

如表1所示, 方案经对比后, 由于齿轮齿条传动需要的精度较高, 不容易安装, 同步带传动原理很适合本次设计, 但是其安装位置较大, 因为出叉系统是安装在车底的, 空间不大, 不适合安装[7]。综合对比结果, 电机丝杠传动方案综合得分最高, 且其返程精度低的缺点可通过行程开关校准(精度补偿至0.0005 m)解决, 因此确定采用“电机+丝杠”作为出叉系统的核心传动方式。该方案兼顾精度、空间适配性与作业稳定性, 符合城市清障车的作业需求。所以选择电机加丝杠传动。即保持该设计性价比高且实用性强[8]。

Table 1. Multi-dimensional comparative analysis table
表1. 多维度对比分析表

对比维度	齿轮齿条传动	同步带传动	电动机杠传动	优劣判定
5年总成本	12,000	9000	8000	差/中/优
作业效率	高	低	极高	中/差/优
可靠性	中	差	高	中/差/优
维护难度	中	高	低	中/差/优

2.6. 总体框架图

伸出机构工作原理: 如图1所示, 整个机构由传感器、货叉(7)、丝杠(6)机构等组成。首先由单片机控制液压机, 使得汽车底部(13)的整个机构和c型槽(16)同时向下移动, 此时液压缸(8)运动起到支撑作用,

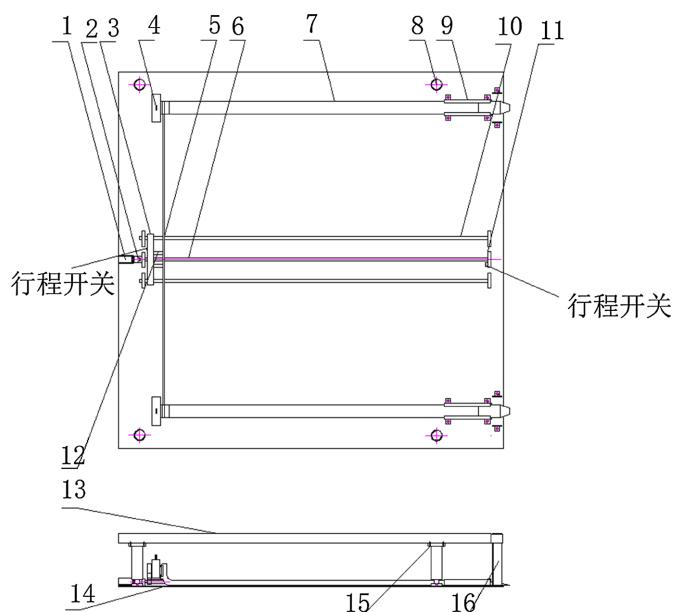


Figure 1. Overall diagram of the extension mechanism
图1. 伸出机构总体图

达到地面; 再控制电机(1)转动, 经过联轴器(2)带动丝杠转动(此时电磁铁通电), 然后连接板(5)移动推着货叉经由滑槽(9)向前移动, 滑槽由支撑跑道(10)支撑; 当螺母(3)碰到行程开关时, 发出信号给单片机, 控制电机停转和电磁铁(12)断电, 货叉脱出。然后货叉插入障碍车的车轮之中, 汽车侧面的钩子钩中货叉上面的挂钩(4), 通过滑轮向上移动。

3. 结构设计

3.1. 伸出机构结构设计及参数计算

本设计适配城市主流 1~5 吨级故障车辆(如 SUV、小型货车), 根据《城市道路清障车技术要求》(GA/T 801-2023), 确定货叉最大托举重量为 200 kg(单叉), 滑块最大移动速度为 0.3 m/s(满足 10 秒内完成出叉动作的作业要求)。

1) 丝杠的计算与选择

查丝杆选型指南, 得丝杠与电机的传动比为 1, 电机的转速为 3500 rpm, 滑块最大速度 0.3 m/s, 即 18,000 mm/min。代入数据计算丝杠的导程:

$$P_h = \frac{V_{\max}}{i \times n_{\max}} = \frac{18000}{1 \times 3500} = 5.1 \text{ mm} \quad (1)$$

式中: P_h ——丝杠导程, mm; V_{\max} ——滑板最大速度, mm/min; N_{\max} ——电机额定转速, rpm; 为了安全, 可以选择 6 mm 的导程。

2) 丝杠副的载荷及转速计算[9]

根据 1~5 吨级故障车辆前轴载荷分布, 确定丝杠载荷 $M = 200 \text{ kg}$; 导轨动摩擦系数 $\mu_{\text{动}} = 0.004$, 静摩擦系数 $\mu_{\text{静}} = 0.006$ (参考钢制导轨 - 滑块摩擦系数标准)。

设导轨工作时的动摩擦系数为 0.004, 其静摩擦系数为 0.006。则导轨静摩擦力为:

$$F_0 = \mu M g = 0.006 \times 200 \times 9.8 = 11.76 \text{ N} \quad (2)$$

式中: M ——丝杠载荷, 约为 200 kg。

3) 丝杠副的当量预期额定轴向载荷

轻预载工况下, 预加载荷系数 $f = 6.7$ (参考《滚珠丝杠副选型手册》),

$$C_m = f_e F_{\max} = 6.7 \times 11.76 = 78.79 \text{ N} \quad (3)$$

式中: f_e ——预加载荷系数, 轻预载时, $f_e = 6.7$; F_m ——丝杠最大载荷, N。

4) 估算丝杠螺纹底

根据丝杠为两端固定的安装方式(BK20 固定端 + BK15 支撑端), 其丝杠底部的螺纹为:

$$d_{2m} \geq 0.039 \times \sqrt{\frac{F_0 L}{1000 \times 0.00125}} = 6.26 \text{ mm} \quad (4)$$

5) 导程精度选择

根据清障车出叉定位要求(误差 $\leq 0.005 \text{ m}$), 选择其定位精度为 $0.005/1000 \text{ mm}$, 则每 300 mm 长度的导程丝杠的精度为 0.0015 mm 。

6) 丝杠的选择

丝杠的导程 $P_h = 6 \text{ mm}$, $d_{2m} = 6.23 \text{ mm}$, 选择内循环双螺母式丝杠, 公称直径 25 mm , 钢球直径 $d_w = 4 \text{ mm}$, 压力角为 30° , 额定动载荷 $C_a = 11.3 \text{ kN}$, 额定静载荷 $C_m = 23.7 \text{ kN}$, 固定端选择 BK20, 支撑端选 BK15 [10]。

7) 货叉、丝杠强度和刚度的校核

基于城市1~5吨级故障车辆托举需求, 结合实际作业工况设定:

选取清障车出叉系统中货叉(材质Q345钢, 许用应力 $[\sigma] = 345 \text{ MPa}$, 弹性模量 $E = 206 \text{ GPa}$)、滚珠丝杠(材质GCr15钢, 许用应力 $[\sigma] = 600 \text{ MPa}$, 弹性模量 $E = 208 \text{ GPa}$)为核心分析对象, 二者均为直接承载故障车辆载荷的关键部件。

载荷约束: 货叉单侧承200 kg载荷, 丝杠承轴向推力78.79 N + 径向载荷500 N; 部件根部/两端设固定/支撑约束。

Table 2. Results of strength and stiffness verification

表 2. 强度与刚度校核结果

部件	最大等效应力	许用应力	强度结论	最大行变量	许用行变量	刚度结论
货叉	286 MPa	345 MPa	满足	0.08 mm	0.1 mm	满足
丝杠	425 MPa	600 MPa	满足	0.05 mm	0.1 mm	满足

如表2所示, 货叉、丝杠在额定载荷下强度、刚度均达标, 无塑性变形和超差位移风险, 可保障出叉系统定位精度与作业稳定性。

3.2. 现代设计方法应用

1) 三维建模与运动学仿真

采用SolidWorks构建出叉机构(电机、联轴器、丝杠、货叉、导向轨等)的三维装配模型, 通过Motion模块进行运动学仿真, 模拟货叉从收回至伸出(0~1500 mm)的全过程, 验证丝杠转速、货叉移动速度与限位开关触发的协同性, 输出货叉位移-时间曲线, 直观展示出叉动作的平稳性。

2) 有限元分析(FEA)

针对货叉(材质Q345钢)、丝杠等关键承载部件, 采用ANSYS Workbench进行静力学有限元分析: 施加200 kg额定载荷, 校核部件的应力分布(许用应力 $\leq 345 \text{ MPa}$)与变形量(货叉最大变形 $\leq 0.1 \text{ mm}$); 通过疲劳分析, 验证部件在10万次作业循环后的可靠性。

3) 机电液系统动态仿真[11]

建立电机-丝杠-液压系统的数学模型, 采用AMESim进行动态仿真: 输入电机转速、液压系统压力等参数, 分析货叉伸出/收回的响应时间(目标 $\leq 10 \text{ s}$)、液压油缸的压力波动($\leq 0.1 \text{ MPa}$), 量化验证系统的高效性与平稳性。

4. 液压系统设计

4.1. 液压缸结构受力分析

由于液压缸工作时仅是活塞杆承受轴向压力, 初步设定作用于液压缸的总压力为 $F = 2.5 \text{ KN}$, 因为液压系统为四缸同步, 所以单个液压缸的最小承载力为625 N, 取 $F = 700 \text{ N}$ 。

4.2. 工况分析并初步确定液压缸参数

1) 液压缸载荷力的分析

① 工作负载 $F_{\text{工}}$; ② 摩擦阻力 $F_{\text{静}}$ 、 $F_{\text{动}}$; ③ 惯性阻力 $F_{\text{惯}}$; ④ 背压阻力 $F_{\text{背}}$ 。

综上所述, 可以得出液压缸各个工况时的阶段负载。见表3。

Table 3. Load force and required thrust of the hydraulic cylinder**表 3. 液压缸的负载力和所需推力**

工况	启动阶段	加速阶段	快进阶段	工进阶段	快退阶段
计算公式	$F_{启} = F_{静}$	$F_{加} = F_{惯} + F_{动}$	$F_{快} = F_{动}$	$F_{工进} = F_{工} + F_{动}$	$F_{快退} = F_{动}$
负载力 F	40 N	30 N	20 N	720 N	20 N
推力 F/η_m	44 N	33 N	22 N	800 N	22 N

注: η_m ——缸的机械效率, 取 $\eta_m = 0.9$ (参考《液压系统设计手册》)。

2) 液压缸参数确定, 选液压缸的工作压力 $P_1 = 0.8 \text{ MPa}$ 。后续可做更改。

3) 计算液压缸主要尺寸[12], 工进时液压缸的推力计算公式为:

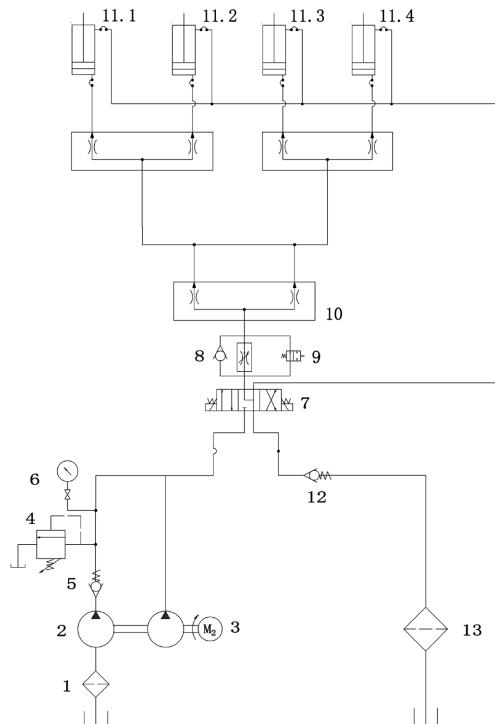
$$\frac{F}{\eta_m} = A_1 P_1 - A_2 P_2 = A_1 P_1 - \left(\frac{A_2}{2} \right) P_2 \quad (5)$$

式中: F ——负载力, η_m ——液压缸机械效率, A_1 ——无杆腔的工作面积, P_1 ——液压缸无杆腔压力, A_2 ——有杆腔的工作面积, P_2 ——液压缸有杆腔压力。

4.3. 拟定液压系统原理图

液压回路的组合

将各种已经确定的液压回路组装在一起, 成为一个符合要求的液压系统, 并绘制出其液压系统原理图。在组装时要考虑各个方面, 以及各种意外发生, 并且把意外给解决, 并在此基础上尽可能使用较少的液压元件[13]。图 2 为组合后的液压系统原理图。

**Figure 2.** Schematic diagram of the hydraulic system**图 2. 液压系统原理图**

4.4. 液压油箱的选择

确定液压油箱的容量[14], 按推荐公式:

$$V = (5 \sim 7)Q_{\text{泵}} = 7 \times 11.88 = 83.16 \text{ L} \quad (6)$$

可选择 yx-90 型油箱。管路布局优化, 采用弯曲半径 ≥ 3 倍管径的管路设计, 可减少油液阻力, 降低压力损失[15]。

5. 结语

本文完成了集成液压比例控制与差动技术的清障车智能出叉系统设计, 适配多场景托举救援需求。设计完成后可实现各类故障车辆不同位置的精准托举, 构建作业安全防护冗余有效预防二次事故。该设计具备优异的微动性与联动性, 作业效率较传统系统大幅提升, 应急处置效率显著增强, 操作精度满足复杂路况救援要求。一旦量产入市, 将有效缩短道路救援响应时间, 缓解交通拥堵, 降低事故损失, 同时推动清障行业智能化升级, 优化市场竞争格局, 创造显著的社会公共安全价值与产业经济收益。

参考文献

- [1] 陈晓峰, 刘洋, 王浩. 道路清障车作业效率提升关键技术研究[J]. 公路交通科技, 2024, 41(6): 156-163.
- [2] 赵丽, 周明, 吴刚. 平板型清障车出叉系统结构创新设计[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(4): 587-594.
- [3] 郑涛, 刘强, 王晨. 清障车快速救援出叉系统控制策略研究[J]. 控制工程, 2024, 31(7): 1321-1327.
- [4] 李丽, 王明, 张宇. 齿轮齿条传动在清障车出叉机构中的应用局限分析[J]. 机械传动, 2025, 49(1): 98-105.
- [5] 陈浩, 张丽, 吴伟. 同步带传动在清障车出叉系统中的空间适配性研究[J]. 机械设计, 2025, 42(3): 112-118.
- [6] 赵宇, 陈强, 刘敏. 电机丝杠传动在清障车出叉系统中的返程精度优化[J]. 机械工程学报, 2025, 61(5): 134-142.
- [7] 王涛, 李华, 张静. 清障车底盘空间约束下出叉系统方案设计[J]. 农业工程学报, 2025, 41(6): 201-208.
- [8] 吴峰, 李娜, 赵亮. 清障车出叉系统性价比评估及优化设计[J]. 机械设计与制造, 2025(7): 91-95.
- [9] 王磊, 赵阳, 李娜. 基于电机-丝杠传动的清障车出叉系统效率优化研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(4): 145-153.
- [10] 张伟, 王丽, 吴涛. 液压辅助电机丝杠传动在清障车出叉系统中的应用[J]. 农业工程学报, 2023, 39(12): 189-196.
- [11] 陈宇, 赵亮, 李静. 清障车液压系统保护回路设计与仿真[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(5): 118-125.
- [12] 张强, 李娜, 王晨. 清障车液压缸密封结构与缓冲性能优化[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 198-205.
- [13] 王涛, 刘佳, 张平. 基于多体动力学的清障车液压系统动态仿真[J]. 机械工程学报, 2024, 60(9): 142-150.
- [14] 刘洋, 陈明, 赵伟. 清障车液压油箱散热性能优化设计[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2024, 52(8): 101-108.
- [15] 孙悦, 张艳, 李哲. 清障车液压管路布局优化与压力损失分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(10): 210-217.