

# 排水管道机器人液压驱动系统设计

徐家伟

武汉纺织大学 机械工程与自动化学院 湖北武汉 430200

**摘要:** 针对排水管道机器人作业环境复杂、恶劣的情况, 结合具体情形和机器人设计指标, 分析了机器人在移动时所受的阻力, 提出采用液压系统对机器人进行驱动的设计方案, 给出了液压系统原理图, 并对部分关键液压元件进行选型计算, 对液压驱动的管道机器人设计具有一定的参考意义。

**关键词:** 排水管道; 机器人; 液压系统

## 引言

排水管道内部有碎石、淤泥以及生活垃圾等障碍物<sup>[1]</sup>, 机器人容易陷入其中, 因此本文选择了履带作为机器人的移动方式, 履带机器人在管道内运行平稳及清淤机构的正常工作都需要强大的动力支持。液压系统能够为管道作业机器人提供足够大的扭矩和力量传输; 在恶劣环境下液压系统仍有很强的工作能力以及良好的防水性能, 可以保证管道机器人在有水环境下作业时不受影响。因此, 本文采用液压系统对管道机器人进行驱动, 旨在为排水管道机器人驱动系统设计提供一定的参考。

## 一、排水管道机器人主要设计指标

表1 机器人主要设计指标

项目	主要参数
适应管径大小范围	800mm ~ 1500mm
地面行走速度	≥ 0.2m/s
水下行走速度	≥ 0.12m/s
爬坡能力	≥ 25°
清淤能力	行进中搅动沉积淤泥
机器人设计重量	40kg

## 二、机器人所需牵引力计算

机器人在管道中运动时, 履带底盘需要克服机器人在前进、翻越障碍物过程中产生的各种阻力。需要克服接触地面产生的滚动摩擦阻力 $F_f$ 、来自空气的阻力 $F_a$ 、爬坡或者翻越障碍物时机器人重力沿着倾斜方向的分力, 即机器人倾斜阻力 $F_p$ ; 机器人在加速移动时则需要克服加速产生的阻力 $F_j$ ; 同时, 论文设计的排水管道作业机器人尾部会受到液压油管及通讯线缆的拉力以及管线与管道摩擦产生的阻力 $F_L$ 。最终, 机器人履带底盘在移动

时应克服的全部阻力如下:

$$\sum F_{\text{阻}} = F_f + F_a + F_p + F_j + F_L \quad \#(1)$$

根据表1可知, 机器人的移动速度较低, 仅为0.2~1.0m/s, 因此在计算时忽略空气阻力和加速阻力, 故最终总阻力为:

$$F_{\text{阻}} = F_f + F_p + F_L \quad \#(2)$$

(1) 滚动阻力 $F_f$

$$F_f = fG \cos \alpha \quad \#(3)$$

式中:  $f$ ——机器人滚动阻力系数, 这里取0.10;

$G$ ——机器人自身重量, N;

$\alpha$ ——爬坡坡度, 这里取 $\alpha$ 为30°。

(2) 爬坡阻力 $F_p$

$$F_p = G \sin \alpha \quad \#(4)$$

(3) 管线阻力 $F_L$

采用液压驱动的管道机器人需要通过油管来传递动力, 油管在重力作用下会与管道和淤泥摩擦产生阻力, 因此将油管和通讯线缆简化为一个整体, 并取管线上一小单元段进行分析, 排水管道和简化管线的半径大小分别用 $R$ 和 $r$ 表示<sup>[2]</sup>。管线与淤泥的摩擦系数设为 $\mu$ ,  $F_l$ 和 $F_r$ 分别表示管线左右两侧受到的拉力, 受到的拉力增量用 $dF$ 表示。

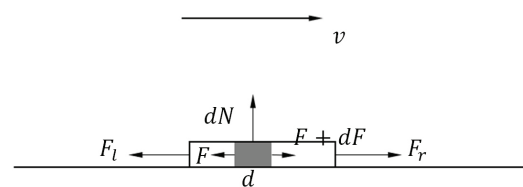


图1 管线受力分析简图

如图1所示, 取管线上一小段 $d$ 进行分析, 排水管

道内污水对管线带来的压力表示为:

$$F + \mu dN + \rho dL \sin \theta = F + dF \#(5)$$

式中:  $\rho$ ——单位长度管线的重量, kg/m;

$L$ ——管线总长度。

排水管道中堆积的淤泥对管线产生的压力为:

$$dN = \rho dL \cos \theta \#(6)$$

则单元管线的平衡方程可表示为:

$$\rho(\mu \cos \theta + \sin \theta)dL = dF \#(7)$$

最终可得到:

$$F_r = F_i + \rho(\mu \cos \theta + \sin \theta)L \#(8)$$

因此管线在淤泥中运动时产生的阻力为:

$$F_L = F_r = F_i + \rho(\mu \cos \theta + \sin \theta)L \#(9)$$

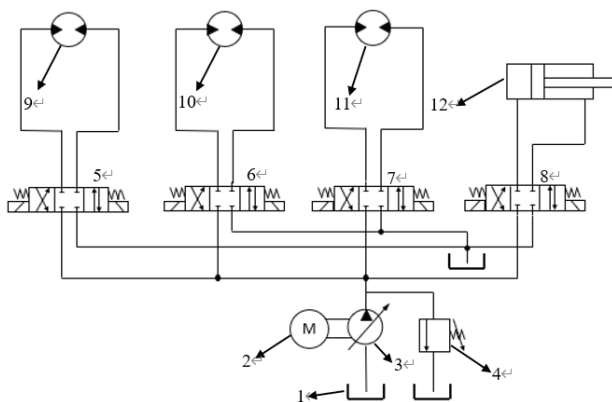
已知在管道入口处  $F_i=0$ , 管线的近似密度约为  $\rho=3\text{kg/m}$ , 滑动摩擦系数  $\mu=0.20$ , 查阅资料可知市政排水管道检查井之间的距离不超过50m, 因此取管线的最大长度为50m。将上述数值代入式(9), 排水管道机器人设计指标中极限爬坡角度为  $30^\circ$ , 此时机器人受到的最大管线阻力经计算为100.98N。

由于排水管道机器人在  $30^\circ$  坡度运动时需克服的阻力最大, 因此排水管道作业机器人产生的牵引力需满足:

$$F_r \geq F_{\text{阻max}} = (f \cos \alpha_{\text{max}} + \sin \alpha_{\text{max}})G + \rho(\mu \cos 30^\circ + \sin 30^\circ)L \#(10)$$

将上述数据带入可得:  $F_r=445.9\text{N}$

### 三、液压系统方案设计



1-液压油箱, 2-液压泵马达, 3-液压泵, 4-溢流阀, 5、6、7、8-三位四通换向阀, 9-左驱动马达, 10-右驱动马达, 11-清淤机构搅拌马达, 12-液压缸

图2 液压系统原理图

液压系统的原理图如图2所示, 机器人左右履带轮通过相同型号的两个液压马达进行驱动, 使用两个三位

四通电磁阀分别控制左右两个液压马达正反转, 从而实现管道机器人的前进、后退以及转向; 清淤机构利用液压缸的伸缩特性控制其抬起与落下, 采用液压马达控制清淤机构前方的搅拌杆转动清淤; 为了稳定系统的压力, 增加溢流阀; 通过调节变量泵改变液压管路中的流量实现速度的改变。

### 四、液压系统的计算和主要元部件选型

#### 1. 液压马达选型计算

排水管道机器人采用两个液压马达进行驱动, 为了系统的稳定运行, 取机器人整机行驶阻力的60%作为单边驱动的行阻力<sup>[3]</sup>, 也就是说单边所需牵引力为:

$$F_{is} = 0.6 \times F_{\text{阻max}} \#(11)$$

从上文可知机器人的最大阻力为445.9N, 此时单个液压马达的输出扭矩为:

$$M_{\text{max}} = \frac{F_{is} r_d}{\eta_k \eta_M} = 29.65\text{N}\cdot\text{m} \#(12)$$

式中:  $\eta_k$ ——履带驱动段效率, 取0.95;

$r_d$ ——履带驱动轮半径, 为0.1m。

液压马达排量的计算公式如下:

$$V_m = \frac{2\pi M_{\text{max}}}{\Delta p \eta_{mm}} \#(13)$$

式中:  $\Delta p$ ——液压马达进出口压力差, 取5MPa;

$\eta_{mm}$ ——液压马达的机械效率, 这里取0.9。

代入计算可得到液压马达所需排量为  $V_m=41.378\text{ml/r}$ 。

机器人履带移动底盘在移动时, 假设履带与地面之间无滑转, 则机器人履带底盘的运动速度等于驱动轮的圆周速度, 此时机器人的理论移动速度为:

$$v_i = 2\pi r_d n_m \#(14)$$

实际行驶速度  $v$  为:

$$v = (1-\delta)v_i = 2\pi(1-\delta)r_d n_m \#(15)$$

式中:  $\delta$ ——履带轮相对于地面的滑转率, 这里取  $\delta=10\%$ 。

因此管道机器人以设计指标最大速度  $v_m=1.0\text{m/s}$  行驶时, 液压马达的最大转速为  $n_{mm}=102.73\text{r/min}$ , 此时液压马达的最大流量为:

$$q_m = \frac{n_{mm} V_m}{1000 \eta_{mv}} = \frac{4.47\text{L}}{\text{min}} \#(16)$$

式中:  $\eta_{mv}$ ——液压马达的容积效率, 取0.95。

查阅相关资料, 最终左右驱动马达选择的型号为BMR-63的低速液压马达, 排量为63ml/r, 流量为5L/min 时其扭矩为41N·m, 此时转速为76r/min, 满足最大负载

扭矩要求及行驶速度要求。而清淤机构的搅拌液压马达不需要承受太大的负载，因此选择型号为BMM-50的微型液压马达，流量为5L/min时其扭矩为30N·m，此时转速为130r/min，满足清淤作业时搅拌杆转速需求。

## 2. 液压油缸选型

论文中液压油缸主要用来对清淤机构进行升降控制，需要在两个相反方向上施加推力和拉力，所以选择双作用类型的液压油缸。清淤机构重量经过测量为10kg，因此液压油缸的缩回时的拉力大小需大于机构自身重量，即：

$$F_w > G = 98N \quad \#(17)$$

经过查阅资料，最终选用的液压油缸型号为ROC16×75，该型号液压缸最大工作压力为14MPa，额定工作压力为7MPa，行程为75mm，缸径为16mm，杆径为10mm，最大拉力可达85.7kg，远超清淤机构重量，满足设计要求。

## 3. 液压泵选型

液压泵流量的大小是由液压马达的最大排量所决定的，所以液压泵的流量 $q_b$ 为：

$$q_b = K \sum \cdot q_m \quad \#(18)$$

式中： $K$ ——系统的泄漏系数，这里取1.2；

$\sum \Delta q_m$ ——液压系统中，驱动的液压马达的所需总流量<sup>[4]</sup>。

本文使用一个液压泵驱动三个液压马达，所以液压泵的流量最小应达到：

$$q_b = 1.2 \times 3 \times 4.47L/min = 16.092L/min$$

排量为：

$$V_p = \frac{q_b}{n_p \eta_{pv}} \quad \#(19)$$

式中： $n_p$ ——液压泵的额定转速，rpm；

$\eta_{pv}$ ——液压泵的容积效率，这里取0.95。

将数据代入有： $V_p = 9.14ml/r$ ，最终选用型号为VP-08-20-FA3的液压泵，其额定转速为1800rpm，排量最大为20L/min，满足设计要求。

## 结语

在对管道机器人进行样机制作后，对机器人分别进行了爬坡、不同地面行走、管道内移动、深水移动等测试，机器人都能稳定运行，运动性能达到了设计指标，证明了所设计的排水管道机器人液压驱动系统的可行性，对后续排水管道机器人驱动系统的设计和 optimization 具有一定的参考意义。

## 参考文献

- [1] 王帅. 雨污管道巡检机器人控制系统的研究与实现[D]. 安徽建筑大学, 2023. DOI: 10.27784/d.cnki.gahjz.2023.000564.
- [2] 关强. 可重构式排水管道机器人结构研究与动力学分析[D]. 哈尔滨工程大学, 2018. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2018.000123.
- [3] 吴朋涛. 履带拖拉机液压驱动系统的设计[D]. 西北农林科技大学, 2013.
- [4] 虞雷. 履带式果园作业平台液压系统设计优化[D]. 西北农林科技大学, 2015.