

管道机器设计说明

浙江大学 2020 年科研训练研究报告（A）

项目编号：	X20200352
项目名称：	能适应弯道和垂直爬行的管道机器人研究
项目负责人：	张文博 (3180103098) 1792330061@qq.com
项目成员：	王一帆 (3180104461)
	卢成宇 (3180104328)
指导老师：	王宣银

目录

1. 管道机器人结构设计	3
1.1 移动方式的选择	3
1.2 变径方式的选择	3
1.3 管道机器人 SolidWorks 模型建立	4
2. 管道机器人运动学分析	5
2.1 管道机器人作业姿态角对封闭力的影响	5
2.2 弹簧预紧力的计算	6
2.3 机器人在水平弯管中的通过性分析:	6
2.4 机器人变径机构动力学分析	11
2.5 管道机器人行走阻力分析	11
3. 设计总结	12

1. 管道机器人结构设计

1.1 移动方式的选择

管道机器人的移动方式主要有滚动移动式，履带式，足脚移动式，蠕动移动式，活塞移动式，螺旋移动式等，现对不同方式进行比较并分析各自优缺点。

1) 滚动移动式

动力来源于驱动轮与管壁间的摩擦力，取决于驱动轮与管壁之间的正压力，为了获得更大的驱动力，一般采用弹簧力、液压或气动力、磁力、重力等将驱动轮紧压在管壁上。

优点：结构简单，行走连续平稳，速度快，行走效率高，易于控制等。

缺点：着力面积小，维持一定的附着力较困难。越障能力有限。

2) 履带式

优点：附着性能好，越障能力好，并能输出较大的拖动力。

缺点：不已小型化，结构复杂，转向性能不如轮式载体，稳定性差应用较少。

3) 足脚移动式

优点：对粗糙路面适应性能好，越障能力极强，可适应不同管径的变化。

缺点：结构与控制复杂，行走速度慢。

4) 蠕动移动式

通过伸缩（蠕动）实现，首先尾部支撑，身体伸长带动头部向前运动，然后头部支撑，身体收缩带动尾部向前移动，如此循环。

缺点：移动速度慢且波动大，平稳性差。

5) 活塞移动式

依靠首尾两端管内流体形成的压差为驱动力，随着管内流体的流动向前运动，类似于活塞在气缸内的运动。

缺点 越障能力与拐弯能力弱。

6) 螺旋移动式

优点：具有一定的越障能力，可适应不同管径变化，可在垂直管道中行进。

缺点：结构复杂，移动速度慢，驱动力要求高。

针对上面各种移动方式，本项目选择了压壁式履带移动，具有很好的垂直移动性和变径适应性，移动稳定性和驱动能力也较好。

1.2 变径方式的选择

管道机器人变径方式主要有蜗轮蜗杆调节，滚珠丝杠螺母调节，放大机构调节，弹簧调节等，现对不同方式进行对比分析。

1) 蜗轮蜗杆调节

蜗杆驱动蜗轮传动，连杆 AB 的一端和蜗轮刚性固定铰接，另一端和车轴铰接。其驱动力

$$T = -3NL\cos\beta * \frac{i_1}{i_2}$$

所需驱动力较大。

2) 滚珠丝杠螺母调节

压紧力调节电机驱动滚珠丝杠转动，滚珠丝杠的传动将带动丝杠螺母沿轴线方向在滚丝杠上回来移动，从而带动推杆运动，连杆绕支点转动使车轮撑开或收缩。所需驱动力小，结构简单，但是轴向不紧凑。

3) 放大机构调节

在连杆上作用一定大小与方向的力，使放大机构升起或落下。

4) 弹簧调节:

被动调节, 变径范围小, 但不需要动力源。

对于变径方式的选择, 本项目选择了滚珠丝杠螺母的调节方式。

1.3 管道机器人 SolidWorks 模型建立

管道机器人设计管道直径范围为 260~320mm。需要设计的主要结构有履带轮模型设计, 滚珠丝杠调节副, 支撑结构等。对各个部件使用 SolidWorks 进行建模设计。

1) 履带轮模型设计: 设计模型如图 1 所示。

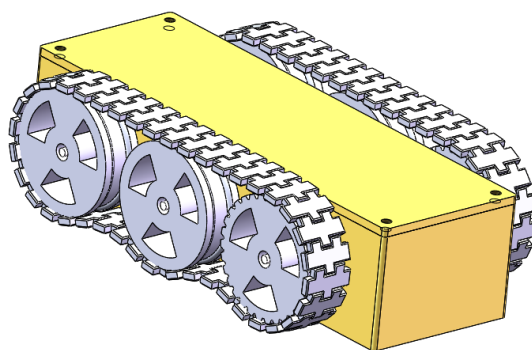


图 1 履带轮设计模型

2) 滚珠丝杠调节副设计: 设计模型如图 2 所示。

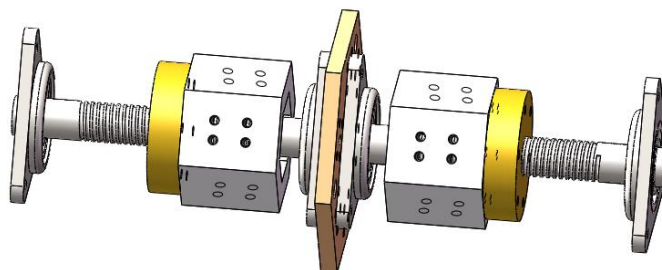


图 2 滚珠丝杠调节副设计

3) 支撑结构设计: 支撑结构设计如图 3 所示。

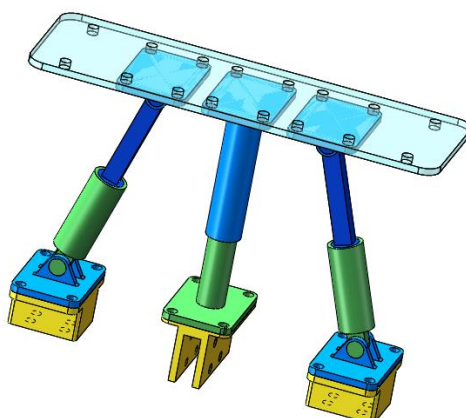


图 3 支承结构设计

两条支撑臂与丝杠轴线构成等腰梯形形。为了保证稳定性, 在丝杠中间设计支撑臂, 从而保证履带轮始终与丝杠平行, 更好的实现压壁前进。另外在支撑臂之间使用弹簧导杆结构, 起到减震与微调工作直径的作用。

4) 总体结构设计建模：完成各个部件的设计建模后，将其装配起来，完成整个垂直管道机器人的设计建模，如图 4 所示。

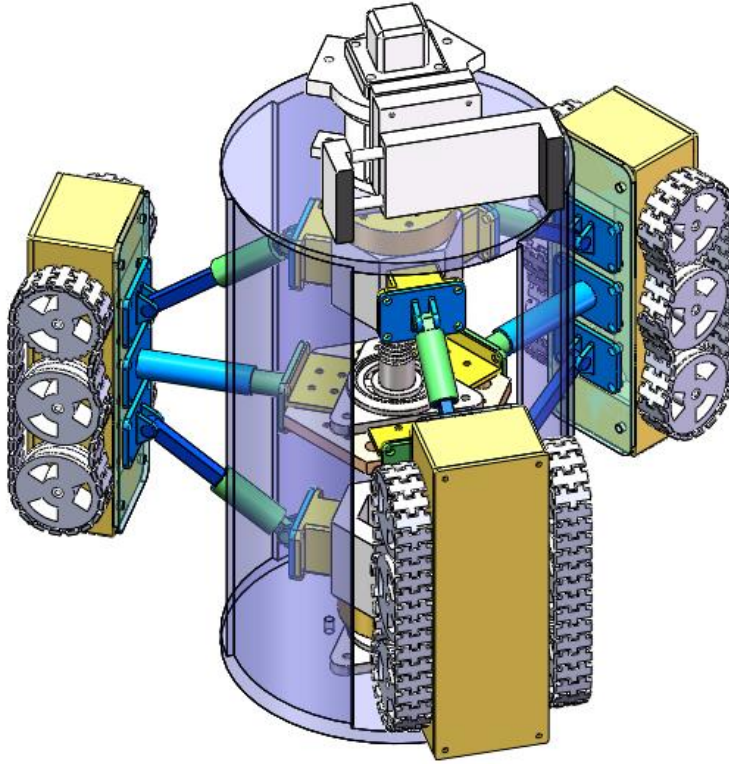


图 4 管道机器人总体结构

2. 管道机器人运动学分析

2.1 管道机器人作业姿态角对封闭力的影响

管道机器人在管道工作时，牵引力会受到自身重力和管道内壁正压力的影响，机器人姿态角不同会造成三个履带足所受封闭力在机器人自重影响下会有不同。

如图 5 所示。忽略重力对中心轴线的影晌，定义上面履带足为履带足 1，下面依次为履带足 2 和履带足 3，受到的正压力分别为 N_1 , N_2 , N_3 ；

则在水平管道中的驱动力 $F = \sum_{i=1}^3 \mu N_i$

则 $\mu(N_1 + N_2 + N_3) = F$

$$-N_1 \cos \beta - N_3 \cos(120^\circ + \beta) - N_2 \cos(120^\circ - \beta) = G$$

$$N_1 \sin \beta + N_3 \sin(120^\circ + \beta) - N_2 \sin(120^\circ - \beta) = 0$$

当机器人所需牵引力、机器人重力、摩擦因数以及姿态角确定，各个履带轮的受力情况就可以计算得到。

对于倾斜管道（倾斜角为 α ）进行分析，则驱动力为 $F = \sum_{i=1}^3 \mu N_i - G \sin \alpha$

则 $\mu(N_1 + N_2 + N_3) = F + G \sin \alpha$

$$-N_1 \cos \beta - N_3 \cos(120^\circ + \beta) - N_2 \cos(120^\circ - \beta) = G \cos \alpha$$

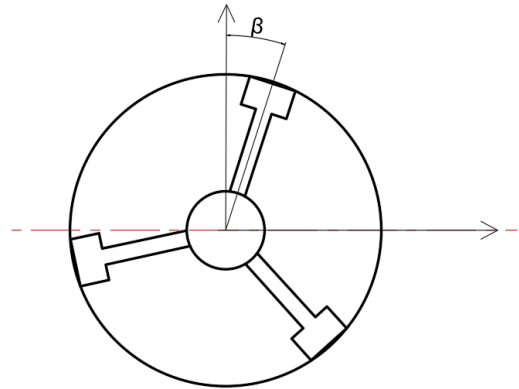


图 5 管道机器人作业姿态角

$$N_1 \sin \beta + N_3 \sin(120^\circ + \beta) - N_2 \sin(120^\circ - \beta) = 0$$

当机器人所需牵引力、机器人重力、摩擦因数以及姿态角确定，各个履带轮的受力情况也可以计算得到。

对于竖直管道，即 $\alpha = 90^\circ$ 时，驱动力 $F = \sum_{i=1}^3 \mu N_i - G$

则
$$N = \frac{F+G}{3}$$

2.2 弹簧预紧力的计算

为保证管道机器人在管道中正常的行走，并保持机构的稳定性，需要在机器人变径机构支撑杆系上的弹簧添加预紧力。受力分析如图 6 所示。

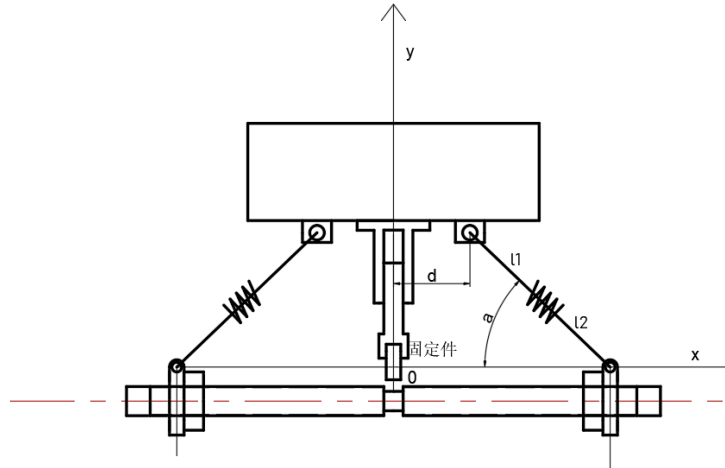


图 6 弹簧预紧力受力分析

对支撑杆系的结构有：

$$(L_1 + L_2 + x) \cos \alpha + d = \frac{L}{2}$$

$$(L_1 + L_2 + x) \sin \alpha = y$$

d 为常数， L 为两个螺母间距，对式进行变分得到：

$$-(L_1 + L_2 + x) \sin \alpha \Delta \alpha + \Delta x \cos \alpha = 0$$

$$(L_1 + L_2 + x) \cos \alpha \Delta \alpha + \Delta x \sin \alpha = \Delta y$$

由虚位移原理可知，在弹簧预紧力和管壁对履带轮支撑力作用下移动微小位移，弹簧预紧力和支撑力、套筒摩擦力所做的虚功和为 0，即

$$F \Delta x + (N - f) \Delta y = 0$$

联立得：

$$F = \frac{(N-f)(\cos^2 \alpha + \sin \alpha \cos \alpha)}{\sin \alpha}$$

$$N = \frac{F \sin \alpha}{(\cos^2 \alpha + \sin \alpha \cos \alpha)} + f$$

力放大与管道变径机构的尺寸参数有关。

2.3 机器人在水平弯管中的通过性分析：

1) 管道机器人在弯管处的几何约束分析

需要对管道机器人的结构尺寸和大曲率弯道的半径与曲率半径之间的关系进行分析研究，最复杂的情况就是在垂直弯道中进行爬行，故研究管道机器人让其在 90° 弯管中通行，就可以

使其在其他转弯角度的弯曲管道中顺利通过。

将管道机器人简化为一个圆柱体，设管道机器人的长度为 L ，直径为 d ，弯管直径为 D ，弯管的曲率半径为 R ，取弯管旋转角度为 α ，若管道机器人在直管道部分卡死，如下两种情况：

①在直道部分卡死，如图 7 所示。

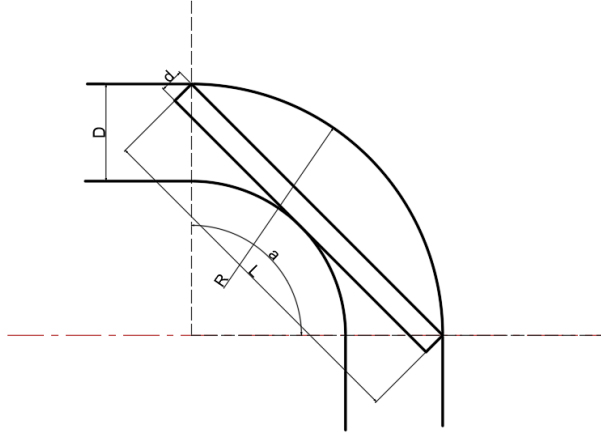


图 7 管道机器人在直道部分卡死

此时管道满足 $0 < d < R \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - (R - D)$

即管道机器人能通过正常弯道的极限尺寸为 $L = \frac{2(R - (R - D + d) \cos(\frac{\alpha}{2}))}{\sin(\frac{\alpha}{2})}$

②在弯道部分卡死，如图 8 所示。

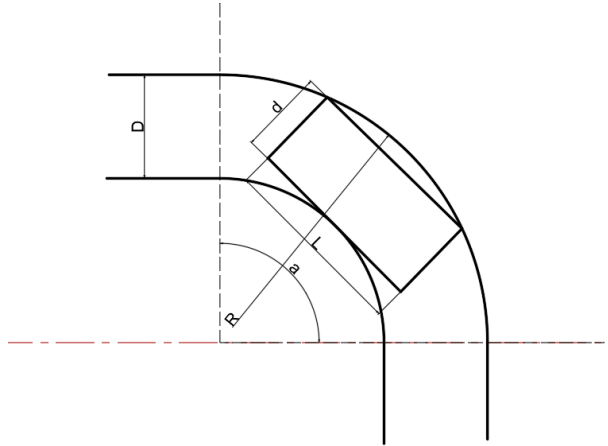


图 8 管道机器人在弯道部分卡死

此时管道满足 $R \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - (R - D) < d < D$

即管道机器人能通过管道的极限尺寸为 $L = 2\sqrt{R^2 - (R - D + d)^2}$

2) 转弯原理

此管道机器人采用了各个履带足各自驱动的方式行走，所以在其平面转弯时运用的原理就是差动机器人行走的原理，通过速度差来实现。

若已知目标机器人运动速度 v ，机器人中心到内管壁的距离为 d ，两侧履带轮间距为 h ，

弯道半径 R ，则由相似三角形得到左侧履带轮 v_1 ，右侧履带轮 v_2 满足：

$$v_1 = v \cdot \frac{R - \frac{h}{2}}{R - \frac{h}{2} + d}$$

$$v_2 = v \cdot \frac{R + \frac{h}{2}}{R - \frac{h}{2} + d}$$

3) 弯道处的运动分析

管道机器人过弯分为过度阶段与旋转阶段，现对这两个阶段进行运动分析。

①过渡阶段：管道机器人在垂直弯管中行走时，机器人的一端由直管道进入弯曲管道开始到管道机器人另一端完全进入弯曲管道、管道机器人一端从弯曲管道进入直管道到机器人另一端完全进入直管道这两个阶段称为过渡阶段。图 9 为管道机器人在弯管中行走时其中一组履带足在过渡阶段的运动分析简图。图中

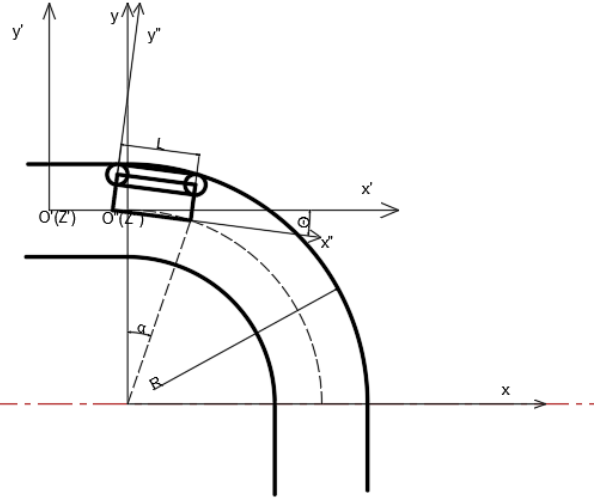


图 9 管道机器人过弯过渡阶段

坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 是过渡坐标系，

$O''-X''Y''Z''$ 是建立在管道机器人上的机器人坐标系(也叫动坐标系)，

坐标系 $O''-X''Y''Z''$ 是由过渡坐标系，

$O'-X'Y'Z'$ 旋转 θ 变换而成。 L 是履带足前后带轮中心距， R 为管道的曲率半径，角 α 为旋转角(又叫入弯角)。

图 10 是管道机器人在弯道中行走时的姿态，姿态角为 β 。

机器人在过渡段做平面运动，则管道机器人履带足前后带轮在管道内壁上的接触位置在机器人坐标系中可表示为

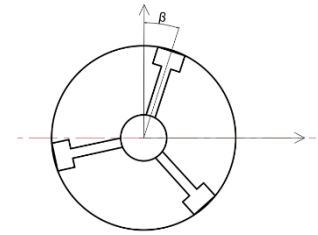


图 10 机器人弯道姿态

$$F''_W = \begin{bmatrix} L & L & L \\ 0.5D\sin\beta & 0.5D\sin(120^\circ + \beta) & 0.5D\sin(240^\circ + \beta) \\ 0.5D\cos\beta & 0.5D\cos(120^\circ + \beta) & 0.5D\cos(240^\circ + \beta) \end{bmatrix}$$

$$R''_W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0.5D\sin\beta & 0.5D\sin(120^\circ + \beta) & 0.5D\sin(240^\circ + \beta) \\ 0.5D\cos\beta & 0.5D\cos(120^\circ + \beta) & 0.5D\cos(240^\circ + \beta) \end{bmatrix}$$

矩阵 F''_W 的第一列到第三列分别表示管道机器人三个履带足前带轮与管道内壁的接触位置的点坐标(x'' , y'' , z'')。

坐标系 $O-XYZ$ 是管道坐标系(又叫固定坐标系)，其可以由机器人坐标系通过平移和旋转得到。下边矩阵用 $c()$ 表示 $\cos()$ ；用 $s()$ 表示 $\sin()$ 表示 过渡阶段平移向量为：

$$Trans = \begin{bmatrix} R\alpha - L & R\alpha - L & R\alpha - L \\ R & R & R \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

过渡阶段旋转矩阵为

$$R(Z'', \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

所以管道机器人履带足前后带轮在管道内壁上的接触位置在管道坐标系下为

$$F_W = Trans + R(Z'', \theta)F_W''$$

$$R_W = Trans + R(Z'', \theta)R_W''$$

得

$$F_W = \begin{bmatrix} x_{f1} & x_{f2} & x_{f3} \\ y_{f1} & y_{f2} & y_{f3} \\ 0.5D\cos\beta & 0.5D\cos(120^\circ + \beta) & 0.5D\cos(240^\circ + \beta) \end{bmatrix}$$

$$x_{f1} = R\alpha - L + L\cos\theta + 0.5D\sin\beta\sin\theta$$

$$y_{f1} = R - L\sin\theta + 0.5D\sin\beta\cos\theta$$

$$x_{f2} = R\alpha - L + L\cos\theta + 0.5D\sin(120^\circ + \beta)\sin\theta$$

$$y_{f2} = R - L\sin\theta + 0.5D\sin(120^\circ + \beta)\cos\theta$$

$$x_{f3} = R\alpha - L + L\cos\theta + 0.5D\sin(240^\circ + \beta)\sin\theta$$

$$y_{f3} = R - L\sin\theta + 0.5D\sin(240^\circ + \beta)\cos\theta$$

$$R_W = \begin{bmatrix} x_{f1} & x_{f2} & x_{f3} \\ y_{f1} & y_{f2} & y_{f3} \\ 0.5D\cos\beta & 0.5D\cos(120^\circ + \beta) & 0.5D\cos(240^\circ + \beta) \end{bmatrix}$$

$$x_{f1} = R\alpha - L + 0.5D\sin\beta\sin\theta$$

$$y_{f1} = R + 0.5D\sin\beta\cos\theta$$

$$x_{f2} = R\alpha - L + 0.5D\sin(120^\circ + \beta)\sin\theta$$

$$y_{f2} = R + 0.5D\sin(120^\circ + \beta)\cos\theta$$

$$x_{f3} = R\alpha - L + 0.5D\sin(240^\circ + \beta)\sin\theta$$

$$y_{f3} = R + 0.5D\sin(240^\circ + \beta)\cos\theta$$

过渡段的旋转角 α 与 R 、 L 有关，角 θ 由旋转角 α 决定，所以：

$$\alpha = 0 \sim 2 \sin^{-1} \frac{L}{2R}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{R}{L - R\alpha} - \cos^{-1} \frac{L^2 + (L - R\alpha)^2}{2L\sqrt{(R^2 + (L - R\alpha)^2)}}$$

②旋转阶段：机器人完全进入弯曲管道开始到机器人一段开始进入直道止。现对管道机器人在弯管旋转阶段行走时行走机构的一组履带足进行分析。

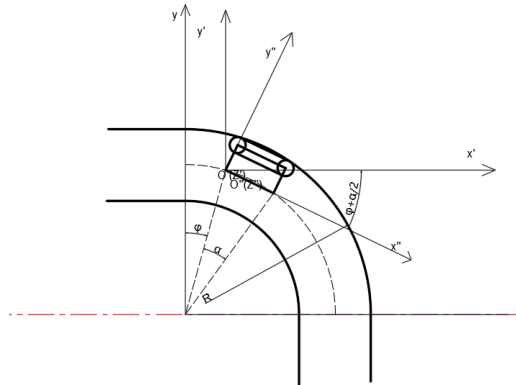


图 11 机器人过弯旋转阶段

如图 11 所示，机器人坐标系由过渡坐标系旋转 $(-\varphi-\alpha/2)$ 而成。在旋转阶段管道机器人是绕曲率中心轴 OZ 做旋转运动，履带足前后带轮的运动轨迹相同，所以：

$$F_W = R_W = Trans + R(Z'', \varphi + \alpha/2)F_W''$$

旋转阶段的平移矩阵为

$$Trans = \begin{bmatrix} R \sin \varphi & R \sin \varphi & R \sin \varphi L \\ R \cos \varphi & R \cos \varphi & R \cos \varphi \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

旋转阶段的旋转方程

$$R(Z'', \varphi + \alpha/2) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi + \frac{\alpha}{2}) & \sin(\varphi + \frac{\alpha}{2}) & 0 \\ -\sin(\varphi + \frac{\alpha}{2}) & \cos(\varphi + \frac{\alpha}{2}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

联立得到

$$F_W = R_W = \begin{bmatrix} x_{f1} & x_{f2} & x_{f3} \\ y_{f1} & y_{f2} & y_{f3} \\ 0.5D\cos\beta & 0.5D\cos(120^\circ + \beta) & 0.5D\cos(240^\circ + \beta) \end{bmatrix}$$

$$x_{f1} = R \sin \varphi + 0.5D \sin \beta \sin(\varphi + \frac{\alpha}{2})$$

$$y_{f1} = R \cos \varphi + 0.5D \sin \beta \cos(\varphi + \frac{\alpha}{2})$$

$$x_{f2} = R \sin \varphi + 0.5D \sin(120^\circ + \beta) \sin(\varphi + \frac{\alpha}{2})$$

$$y_{f2} = R \cos \varphi + 0.5D \sin(120^\circ + \beta) \cos(\varphi + \frac{\alpha}{2})$$

$$x_{f3} = R \sin \varphi + 0.5D \sin(240^\circ + \beta) \sin(\varphi + \frac{\alpha}{2})$$

$$y_{f3} = R \cos \varphi + 0.5D \sin(240^\circ + \beta) \cos(\varphi + \frac{\alpha}{2})$$

矩阵中角 $\alpha = \sin^{-1}L/2R$ ，角 φ 是管道机器人在旋转阶段绕弯管曲率中心旋转的旋转角变化范围是： $\varphi=0\sim 90^\circ-\alpha$

管道机器人在旋转阶段三履带足驱动轮行走速度之比与其自身做旋转运动的曲率半径之比相等，即 $n_1:n_2:n_3 = R_1:R_2:R_3$ ，

n_1, n_2, n_3 为管道机器人履带组驱动轮的转速， R_1, R_2, R_3 为管道机器人三个履带足在旋转阶段

的曲率半径 $R_i = \sqrt{x_{fi}^2 + y_{fi}^2}$ ，

取 $L=88\text{mm}$ ， $R=600\text{mm}$ $D=280\text{mm}$ 取 $\beta=0$ 经 MATLAB 计算，绘制出其中一个轮的 x-y 坐标移动曲线如图 12 所示。

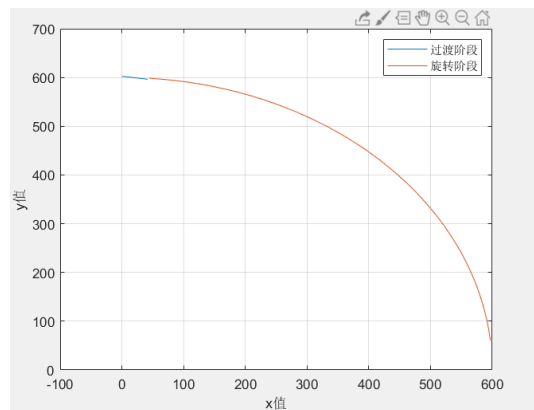


图 12 机器人履带轮移动曲线

2.4 机器人变径机构动力学分析

机器人变径机构简图如图 13 所示。

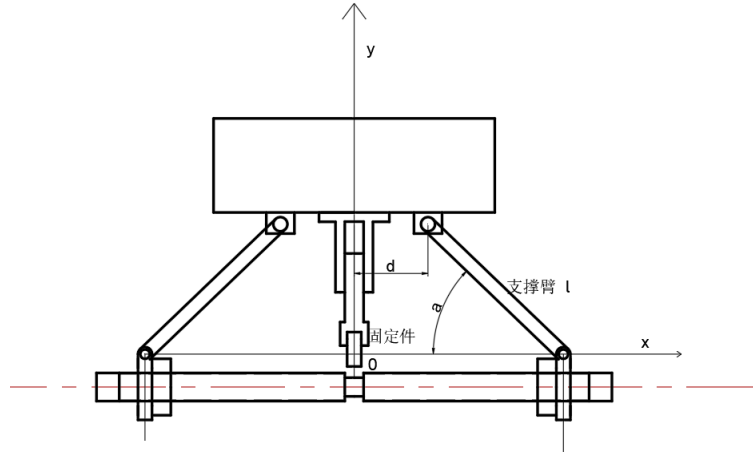


图 13 机器人变径机构简图

以螺杆中间点为原点，建立直角坐标系，支撑臂长 l_1 ，

则履带连接点高度 $y = l_1 \sin a$

螺母连接处 $x = l_1 \cos a + d$ (d 为定值)

取微分 $\Delta y = l_1 \cos a \Delta a$, $\Delta x = -l_1 \sin a \Delta a$

由虚功原理 $2F \Delta x + 3(N - f) \Delta y = 0$

若 N 为管道机器人在垂直管道攀爬时履带足的正压力， f 为套筒的摩擦力

则得到 $F = 3 \frac{N-f}{2 \tan a}$

若 T 为驱动电机瞬时输出力矩； η 为丝杠螺母传动效率； P 是螺母导程； φ 是丝杠与螺母的相对转角，由

$$2F \cdot \delta S + T \cdot \delta \varphi \cdot \eta = 0$$

$$S = \frac{P \varphi}{2\pi}$$

得到

$$T = \frac{FP}{\pi \eta} = \frac{3(N-f)P}{2\pi \eta \tan a}$$

输出牵引力按 15kg 计算，驱动轮与管道内壁之间的摩擦因数 $\mu=0.5$ ，则

$$N = \frac{F}{3\mu} = 98N$$

滚珠丝杠螺母副的导程 $P = 2mm$ ，滚珠丝杠螺母副的传动效率取 93%；

当机器人支撑臂与支座夹角最小时电机转矩最大，此时 $T = 54N \cdot mm$ ；

考虑到管内情况复杂，在压力较大的情况下仍然可以比较轻松的调整支撑系统高度，依然可以选择 12V 额定功率 10W 的电机。

机构有 $x = l_1 \cos a + d$

求导得 $\dot{x} = -l_1 w \sin a$

其中 W 为连接臂的角速度， \dot{x} 为螺母的线速度。

2.5 管道机器人行走阻力分析

管道机器人直线行走阻力只考虑履带装置运行内阻力和外部行使阻力。履带机构驱动力主要表现为履带与地面之间的摩擦力即附着力。外部行驶阻力主要是履带与地面的滚动阻力，橡胶与铁皮管道间的滚动阻力系数约 0.014。履带装置运行内阻力是由同步带和带轮传动齿轮

之间的摩擦阻力形成，内阻力系数可取 0.03~0.07（对于加工精度高，润滑条件好的可取较低值），本机构取 0.07.则假设机器人净重为 G ，估计垂直直线行走阻力

$$f = 0.014G + 0.07G + G = 1.084G$$

对行走机构所需功率进行计算并选择合适的电机。假设机器人重 15kg，则垂直行走阻力

$$f = 1.084G = 159.35N$$

每只履带足的阻力为 $f_0 = \frac{f}{3} = 53.116N$

带轮直径为 $d = 40mm$ ，可知每只履带足所受的阻力矩为

$$T = f_0 * \frac{d}{2} = 1.062(N \cdot m)$$

假设机器人行走速度为 $4m/min$ ，则电机输出转速为

$$n = \frac{v}{\pi d} = 31.8(rpm)$$

履带足电机输出功率 $P = \frac{Tn}{9550} = 3.41(w)$

由于管道内部可能会遇到凹凸不平等恶劣情况增大阻力，因此增大功率使其能轻松移动，越过小型障碍，因此选择功率为 12V 额定功率为 10w 的电机。

3. 设计总结

本项目完成了管道机器人 SolidWorks 建模，设计的模型采用了滚珠丝攻螺母副与压壁式履带结构。选取的丝杠螺母副结构具有结构简单、驱动力小的特点；压壁式履带传动具有较高的移动效率和垂直移动性。通过运动学分析，设计的机器人结构能实现转弯与垂直爬行，并且能自主适应多种直径管道。

但由于经费原因，没有对机器人的电路结构、传感结构进行进一步的设计制作，仅有机机械结构方面的成果，没有完成实物的制作。没有真正验证理论上的结论。还需要对电路结构即传感控制方面进行进一步的设计完善，做出实物样机。另外对于管道内部越障，仅仅是提出了一个方案，并没有将越障方案运用在设计上。