

文章编号:1000-8055(2009)10-2302-06

# 轮履复合式军用地面探测车运动学建模及分析

尚伟燕, 李舜酩, 鲍庆勇, 张德满

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

**摘 要:** 为更好的对军用探测车运动过程进行控制,提出了轮履复合式探测车运动学模型的构建方法.通过对轮履复合式移动系统结构进行分析,首先建立了探测车三维运动学模型,并推出了其运动方程;其次建立了探测车车体速度与车轮速度之间的雅可比矩阵,利用最小二乘法对车体速度进行求解,提供了获得探测车越障过程中位置和方位的方法.最后对探测车行进过程进行了运动仿真,数值仿真分析验证了运动学模型的正确性及轮履复合式移动系统的运动特性.

**关 键 词:** 探测车; 运动学模型; 运动方程; 最小二乘法; 数值仿真

**中图分类号:** TP24

**文献标识码:** A

## Kinematics modeling and analysis of a military exploration vehicle with wheel-tracks

SHANG Wei-yan, LI Shun-ming, BAO Qing-yong, ZHANG De-man

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to make the locomotion of the exploration vehicle more controllable, a new method was presented to establish the kinematics model of the wheel-tracked exploration vehicle. By analyzing the structure of the moving system, the kinematics model of exploration vehicle was set up and kinematics equations were deduced. Then the velocity Jacobian matrix between the bodywork and the wheels was established, and least squares method was used to compute the bodywork's velocity to estimate the position and orientation of the exploration vehicle. At last, numerical simulation was made to prove the kinematics characteristics of the exploration vehicle, whilst the adaptability and capability of obstacle surmounting was validated.

**Key words:** exploration vehicle; kinematics model; kinematics equations; least square method; numerical simulation

军用地面探测车是一种在地面上运动,以自动车辆为载体,加装各种测量仪器和武器系统的无人作战武器<sup>[1]</sup>.地面军用探测车可分为自主车辆和半自主车辆.自主车辆能依靠自身的智能自主导航,躲避障碍物,独立完成各种探测任务;半自主车辆可在人的监视下自主行驶,在其遇到困

难时操作人员可以对其进行遥控干预.

军用地面探测车多用于执行野外军事探测任务,其工作路面状况较差,多为碎石路或是乡间土路.为顺利完成探测任务,通常情况下要求探测车的移动系统具有灵活避障、越障、爬坡和较好被动适应地形的能力.虽然导航和控制技术可使探测

**收稿日期:** 2009-02-04; **修订日期:** 2009-06-18

**基金项目:** 江苏省自然科学基金(BK2007197); 江苏省普通高校研究生科研创新计划(CX08B\_044Z)

**作者简介:** 尚伟燕(1978-),女,山东烟台人,博士生,研究方向:特种车辆设计与仿真.

**通讯作者:** 李舜酩(1962-),男,山东青州人,教授、博士生导师,博士,研究方向:车辆结构设计、智能检测与控制,结构的噪声分析与控制等.

车的避障能力得以加强,但提高探测车移动系统性能也是探测车研制中至关重要的环节<sup>[2]</sup>.

在对各种不同结构的移动系统进行分析的基础上,我们融合轮式及履带式越障移动系统的优点,设计出轮履复合式越障移动系统.轮履复合式移动系统在与地面连续接触的运动过程中,车体位姿随地面的起伏状况不定.因此,需要对该多体移动系统空间三维运动情况进行分析,并研究轮履复合式探测车的复杂运动特性,从而为探测车结构设计及运动控制提供理论指导.

## 1 轮履复合式探测车结构

轮履复合式探测车主要包括:摇臂悬架、差速平衡机构、后轮及前履带轮.其中前履带轮与摇臂悬架铰接并在二者之间安装阻尼弹簧.其结构简图如图 1 所示.

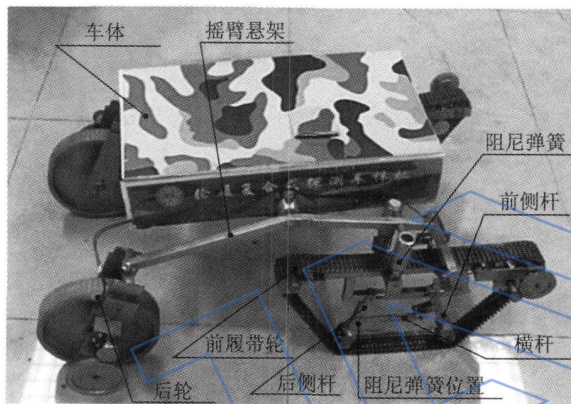


图 1 轮履复合式探测车样机

Fig. 1 Prototype of wheel tracked exploration vehicle

前履带轮结构中由两个承重轮支承履带轮悬架实现承重.为使探测车行进过程中两个承重轮上承担载荷比较接近且保证履带处于张紧状态,在两承重轮支承连杆及履带轮悬架之间设计平行四边形机构.该机构使两承重轮在前侧杆与后侧杆的带动下发生运动关联,能够调整车体处于水平状态,并提高履带轮结构被动适应地形的能力.两承重轮支承连杆与前履带轮悬架之间安装扭转弹簧,可控制前侧杆与后侧杆的旋转角度范围,调整越障过程中承重轮的姿态.移动系统的左右两侧摇臂与差速平衡机构中心锥齿轮轴外端固定联接,并通过轴承支承于车体上,差速平衡机构前后行星齿轮轴分别通过轴承支撑于车体及差速器箱体上<sup>[3]</sup>.在差速平衡机构的作用下,左右摇臂的转角得到线性平均,并转化为主车体的摆角输出,能够有效地减小主车体因地形变化所受到的扰动.该轮履复合式探测车移动系统集中了轮式移动系

统与履带式移动系统的优点.

## 2 轮履复合式探测车运动学分析

探测车在非结构化的三维环境中移动时,必须要时刻自主地发现障碍物,避免碰撞,保证自身安全和寻找最优路径.这就要求探测车能够估计自身的实际位置和方位、控制自己跟随路径规划器所规划的路径.因此,为便于导航和跟踪控制,需要建立轮履复合式探测车三维运动学模型,由传感器感知的运动信息求解探测车质心的运动状态,确定出车体位置和方位的变化.

### 2.1 探测车三维运动学模型

轮履复合式探测车在复杂环境的运动行为是移动多体系统与障碍地形交互作用下的复杂运动.前履带承重轮和后轮的运动状态将影响履带轮悬架、摇臂悬架等机构的运动状态,从而使车体的位置和方位发生变化.因此,探测车既不同于一般固定机座的多关节机器人,也不同于单一构型的普通机器人,其运动特性比较复杂.基于以上特点,我们结合 Denavit-Hartenberg 规则和 Sheth-Uicker 方法构建轮履复合式探测车运动学坐标系<sup>[4-7]</sup>.

为了便于建模,做出以下简化及假设:①由于前履带轮悬架的位置姿态主要受前后承重轮位姿影响,因而可以将履带厚度忽略不计,建模过程中认为承重轮与地面直接接触;②承重轮及后轮与地面之间均近似为点接触;③后轮、承重轮相对于地面做纯滚动.

探测车左右两侧对称,结构相同,基于前述的运动建模假设,在越障过程中仅对一侧建立图 2 所示的坐标系.

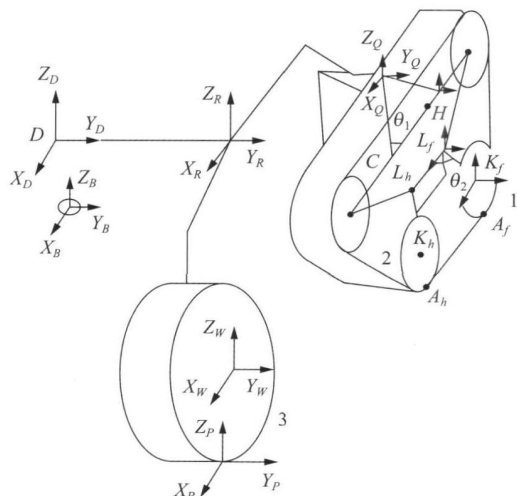


图 2 轮履复合式探测车的运动学模型

Fig. 2 Kinematics modeling of wheel tracked exploration vehicle

各坐标系描述如下:

$G$  ——地面坐标系;

$B$  ——探测车坐标系;

$\bar{B}$  ——与探测车坐标系瞬时重合的坐标系;

$D$  ——差速齿轮坐标系;

$R$  ——摇臂悬架坐标系;

$H$  ——固联于前履带轮悬架上的坐标系,坐标原点位于摇臂悬架与前履带轮悬架铰接点处;

$C$  ——为弹簧阻尼与悬架的铰接点坐标系,坐标原点位于悬架上;

$L_f$  ——固联于前履带轮悬架上的坐标系,坐标原点位于前侧杆与前轮悬架的铰接处;

$L_h$  ——固联于前履带轮悬架上的坐标系,坐标原点位于后侧杆与前轮悬架的铰接处;

$K_f$  ——固联于前侧杆上的坐标系,坐标原点位于前承重轮与前侧杆铰接处;

$K_h$  ——固联于后侧杆上的坐标系,坐标原点位于后承重轮与后侧杆铰接处;

$A_f$  ——为前承重轮与地面(即履带)接触点坐标系,位于承重轮上;

$A_h$  ——为后承重轮与地面(即履带)接触点坐标系,位于承重轮上;

$\bar{A}_f$  ——为前承重轮与地面(即履带)的瞬时重合坐标系;

$\bar{A}_h$  ——为后承重轮与地面(即履带)的瞬时重合坐标系;

$W$  ——为固联于摇臂悬架的坐标系,坐标原点位于后轮与摇臂悬架铰接处;

$P$  ——为后轮与地面接触点坐标系,坐标原点位于后轮上;

$\bar{P}$  ——为后轮与地面的瞬时重合坐标系。

将只包含常数项的矩阵标记为  $T$ ,将包含变

量项的矩阵标记为  $\Omega$ ,对探测车的参考坐标系到前履带承重轮、后轮的运动链条分别进行分析,形成图 3 所示的坐标系转换链。

2.2 探测车运动学方程

为了估算探测车的位置和方向,我们通过坐标的矩阵变换引入车轮的雅可比矩阵,从而由各个车轮的速度矢量计算出车体的速度矢量。根据图 3,对探测车参考坐标系到右后轮的运动链条进行分析,从  $B$  到  $\bar{B}$  的矩阵表达式为

$$\bar{\Omega}_B^B = T_B^{G^{-1}} T_{P_1}^G \bar{\Omega}_{P_1}^{P_1} T_{P_1}^{W_1^{-1}} \Omega_{W_1}^{R_1^{-1}} T_{R_1}^{D_1^{-1}} \Omega_{D_1}^{B^{-1}} \quad (1)$$

求得:

$$\begin{aligned} \bar{\Omega}_B^B = & \Omega_{D_1}^B T_{R_1}^{D_1} \Omega_{W_1}^{R_1} T_{P_1}^{W_1} \bar{\Omega}_{P_1}^{P_1} T_{P_1}^{W_1^{-1}} \Omega_{W_1}^{R_1^{-1}} \cdot \\ & T_{R_1}^{D_1^{-1}} \Omega_{D_1}^{B^{-1}} + \Omega_{D_1}^B T_{R_1}^{D_1} \Omega_{W_1}^{R_1} \Omega_{W_1}^{R_1^{-1}} \cdot \\ & T_{R_1}^{D_1^{-1}} \Omega_{D_1}^{B^{-1}} + \Omega_{D_1}^B \Omega_{D_1}^{B^{-1}} \end{aligned} \quad (2)$$

根据相邻坐标之间的位置及运动关系我们可以依次得到相应的各个坐标变换矩阵。探测车坐标系与探测车瞬时重合坐标系间的矩阵变换为单位矩阵,但它们关于时间的一阶导数不是单位矩

阵,而是  $\bar{\Omega}_B^B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\omega_B^B & \bar{v}_{BX}^B \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_B^B & 0 & 0 & \bar{v}_{BZ}^B \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

求得各坐标变换矩阵和速度矩阵并分别代入式(2)得到

$$\bar{\Omega}_B^B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{\omega_1} - \omega_3 & C \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\omega_1} + \omega_3 & 0 & 0 & D \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

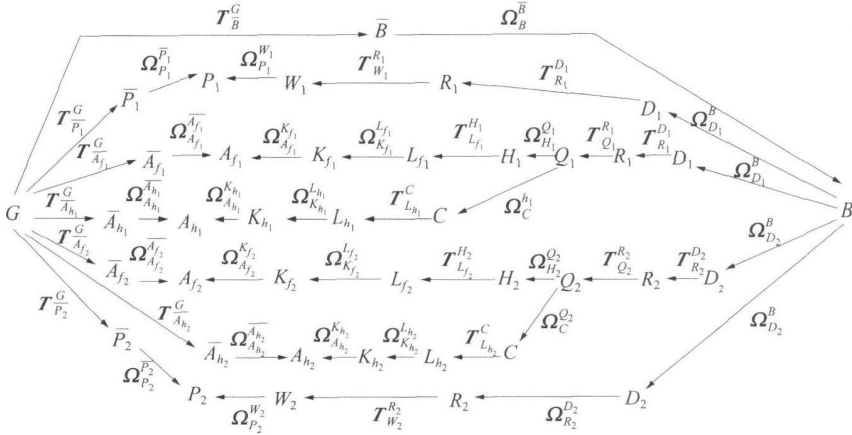


图 3 轮履复合式探测车矩阵变换关系图

Fig. 3 Transformation relationships of wheel tracked exploration vehicle

式(3)中  $\omega_{13}$  为右后轮 3 转过的角度,  $\phi_{13} = \omega_{13}$ ,  $\phi_1$  代表右侧摇臂转向架的转角,  $\phi_1 = \omega_1$ . 其中

$$C = (L_{D_1 Z}^B + \sin \phi_1 L_{W_1 X}^{R_1} + \cos \phi_1 L_{W_1 X}^{R_1} + \sin \phi_1 L_{P_1 X}^{W_1} + \cos \phi_1 L_{P_1 Z}^{W_1}) \omega_{13} + \cos \phi_1 \bar{v}_{P_1 X} - \sin \phi_1 \bar{v}_{P_1 Z}$$

$$D = \sin \phi_1 \bar{v}_{P_1 X} - \cos \phi_1 \bar{v}_{P_1 Z} + (-\cos \phi_1 L_{W_1 X}^{R_1} + \sin \phi_1 L_{W_1 X}^{R_1} - \cos \phi_1 L_{P_1 X}^{W_1} + \sin \phi_1 L_{P_1 Z}^{W_1}) \omega_{13}$$

$\bar{v}_{P_1 X}$  和  $\bar{v}_{P_1 Z}$  分别代表右后轮越障过程中与地面接触点在  $X$  轴及  $Z$  轴的分速度,  $\bar{v}_{P_1 Z}$  和  $\omega_{13}$  可以分别通过传感器测得, 因此轮履复合式探测车直线正向越障车体运动与右后轮运动之间的关系表达为式(4)

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_{BX}^B \\ \bar{v}_{BZ}^B \\ \bar{\omega}_B^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_{13} & -\sin \phi_{13} & M \\ -\sin \phi_{13} & -\cos \phi_{13} & N \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{v}_{P_1 X} \\ \bar{v}_{P_1 Z} \\ \omega_{13} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{\omega_{13}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$M = L_{D_1 Z}^B + \sin \phi_{13} L_{W_1 X}^{R_1} + \cos \phi_{13} L_{W_1 X}^{R_1} + \sin \phi_{13} L_{P_1 X}^{W_1} + \cos \phi_{13} L_{P_1 Z}^{W_1}$$

$$N = -\cos \phi_{13} L_{W_1 X}^{R_1} + \sin \phi_{13} L_{W_1 X}^{R_1} - \cos \phi_{13} L_{P_1 X}^{W_1} + \sin \phi_{13} L_{P_1 Z}^{W_1}$$

对探测车参考坐标系到右侧前履带轮承重轮 1 的运动链条进行分析, 可求得探测车车体运动与前履带承重轮 1 运动之间的关系

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_{BX}^B \\ \bar{v}_{BZ}^B \\ \bar{\omega}_B^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ F \\ -\frac{1}{\omega_{11}} - \frac{1}{\omega_{01}} - \frac{1}{\omega_{02}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\psi_1 + \theta_1 + \theta_2) & -\sin(\psi_1 + \theta_1 + \theta_2) & G \\ \sin(\psi_1 + \theta_1 + \theta_2) & -\cos(\psi_1 + \theta_1 + \theta_2) & H \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{v}_{A_{f1} X}^{A_{f1}} \\ \bar{v}_{A_{f1} Z}^{A_{f1}} \\ \omega_{12} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中  $\bar{v}_{A_{f1} X}^{A_{f1}}$  和  $\bar{v}_{A_{f1} Z}^{A_{f1}}$  分别代表右侧前履带轮承重轮 1 越障过程中与地面接触点在  $X$  轴及  $Z$  轴方向的分速度,  $\psi_1$  代表承重轮 1 的转角,  $\theta_1$  代表右摇

臂转向架与前履带轮悬架之间的转角,  $\theta_2$  代表右侧履带轮前侧杆相对于履带轮悬架的转角(如图 2 所示).  $\psi_1 = \omega_1$ ,  $\theta_1 = \omega_{01}$ ,  $\theta_2 = \omega_{02}$ ,  $E, F, G$  和  $H$  是分别与车体参数及可测得传感量有关的关系式. 探测车行走系统关于车体左右对称, 并且前履带轮的后承重轮与车体间的运动关系与式(5)类似, 由于篇幅原因此处省略. 因此, 可将探测车每个轮子的运动与车体运动之间的关系表述为

$$\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{J}_i \cdot \dot{\mathbf{q}}_i \quad (i = 1, \cdots, 6)$$

其中  $\dot{\mathbf{u}}$  为车体位置方向矢量,  $\mathbf{J}_i$  是轮  $i$  的雅可比矩阵,  $\dot{\mathbf{q}}_i$  为后轮及前履带轮承重轮的转速.

### 2.3 探测车位置方向的估计

合并探测车所有运动学方程组成其复合运动方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \cdots \\ \mathbf{I}_6 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{J}_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 & \mathbf{J}_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_1 \\ \dot{\mathbf{q}}_2 \\ \cdots \\ \dot{\mathbf{q}}_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{q}}_1 \\ \Delta \dot{\mathbf{q}}_2 \\ \cdots \\ \Delta \dot{\mathbf{q}}_6 \end{bmatrix} \quad (6)$$

即

$$\mathbf{A}_0 \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{B}_0 \dot{\mathbf{q}} + \Delta \dot{\mathbf{q}}$$

其中  $\mathbf{I}_i (i = 1, \cdots, 6)$  是  $3 \times 3$  单位矩阵,  $\mathbf{B}_0$  是  $18 \times 18$  的区域对角矩阵,  $\mathbf{B}_0$  中与转角有关的量  $\phi_{13}$ ,  $\psi_1$ ,  $\theta_1$  和  $\theta_2$  等均可以通过传感器测得,  $L_{D_1 Z}^B$ ,  $L_{A_{f1} Z}^{K_{f1}}$ ,  $L_{D_1 Z}^B, \cdots, L_{C_{f1} Z}^{H_1}$  等均为与车体结构尺寸有关的常量.  $\dot{\mathbf{q}}$  是  $18 \times 1$  的可传感量矩阵.

采用最小二乘法求解探测车复合运动方程, 求得

$$\dot{\mathbf{p}} = (\mathbf{A}_0^T \mathbf{A}_0)^{-1} \mathbf{A}_0^T (\mathbf{B}_0 \dot{\mathbf{q}} + \Delta \dot{\mathbf{q}})$$

其中

$$\mathbf{A}_0 = \begin{cases} -\mathbf{I} & \mathbf{A}_0 = \text{null} \\ \mathbf{A}_0 (\mathbf{A}_0^T \mathbf{A}_0)^{-1} \mathbf{A}_0^T - \mathbf{I} & \text{其余} \end{cases}$$

对于超静定方程(5), 最终求得的探测车车体运动速度是否是精确解取决于最小二乘法残差项  $\Delta(\mathbf{A}_0) \mathbf{B}_0 \dot{\mathbf{q}} = [\mathbf{A}_0 (\mathbf{A}_0^T \mathbf{A}_0)^{-1} \mathbf{A}_0^T - \mathbf{I}] (\mathbf{B}_0 \dot{\mathbf{q}} + \Delta \dot{\mathbf{q}})$  是否为零. 若求得残差项为零, 方程具有唯一解; 当残差项不为零, 只能获得方程近似解.

### 3 越障仿真分析

探测车行驶于复杂地面时, 不考虑探测车的质量特性和受力情况, 使用 MATLAB 软件对其进行仿真分析, 根据结构设计中的尺寸要求, 几个

主要车体参数设置如下:  $L_{R_1 Y}^{D_1} = 200 \text{ mm}$ ,  $L_{Q_1 Z}^{R_1} = 150 \text{ mm}$ ,  $L_{f_1 Z}^{H_1} = 150 \text{ mm}$ ,  $L_{A_{f_1 Z}}^{K_{f_1}} = 50 \text{ mm}$ ,  $L_{W_1 Z}^{R_1} = 340 \text{ mm}$ ,  $L_{P_1 Z}^{W_1} = 125 \text{ mm}$ .

假设各轮水平方向输入的速度是  $100 \text{ mm/s}$ , 前承重轮竖直方向的速度  $\dot{v}_{A_{f_1 Z}}^{A_{f_1}}$  随地形起伏作加速或减速运动, 选取其竖直方向输入的运动曲线如图4中实线所示, 后承重轮及后轮竖直方向输入速度分别取  $\dot{v}_{A_{f_1 Z}}^{A_{f_1}}$  的  $0.8$  倍及  $0.6$  倍.

假定运动中右侧履带轮前侧杆相对于履带轮悬架固定, 即转角  $\theta_2$  为零, 最终可求得探测车车体运动近似解, 其曲线如图4中虚线所示. 对比两曲线我们可以看出, 车体质心的运动曲线与前承重轮运动曲线变化较一致, 证明我们所建立运动学模型的正确性. 在探测车实际运动过程中, 我们只要测得后轮及前后承重轮的运动速度即可得到车体质心的运动状况, 从而实时获取越障过程中探测车的位置和方位, 便于精确的导航和控制.

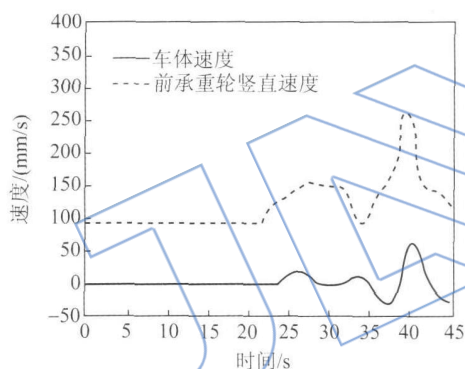


图4 车体竖直方向运动曲线与前承重轮竖直速度曲线

Fig. 4 Velocities of bodywork and the front bearing wheel in direction Z

图5中实线表示车体质心在竖直方向上的位置变化曲线, 虚线表示前履带承重轮在竖直方向上的位置变化曲线. 对比两曲线可以看出, 车体质心的运动曲线较前承重轮运动曲线相对平缓, 说明前履带轮结构及摇臂悬架结构设计对地形起伏起到较好线性平均的作用, 有利于提高探测车地形适应能力.

轮履复合式探测车运动过程中, 由于平行四边形结构中扭转弹簧的作用, 随地形的变化  $\theta_2$  不是固定不变的, 仿真运动中可将  $\theta_2$  与履带轮前承重轮竖直速度变化简化为成正比关系, 假定输入  $\theta_2 = 0.2 \dot{v}_{A_{f_1 Z}}^{A_{f_1}}$ , 通过仿真我们可以得到探测车车

体运动曲线, 如图6所示. 其中虚线代表  $\theta_2 = 0$  时车体速度曲线, 实线代表  $\theta_2 = 0.2 \dot{v}_{A_{f_1 Z}}^{A_{f_1}}$  时探测车运动速度曲线. 对比两条运动曲线可以看出, 在平行四边形结构中设计扭转弹簧后, 车体的运动速度相对平缓, 车体速度最大值降低了近  $8\%$ , 探测车行驶平稳性得到增加.

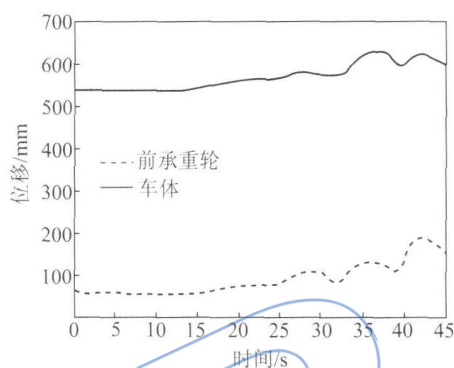


图5 履带承重轮及车体质心在竖直方向上的位置曲线

Fig. 5 Position of bodywork and the front bearing wheel in direction Z

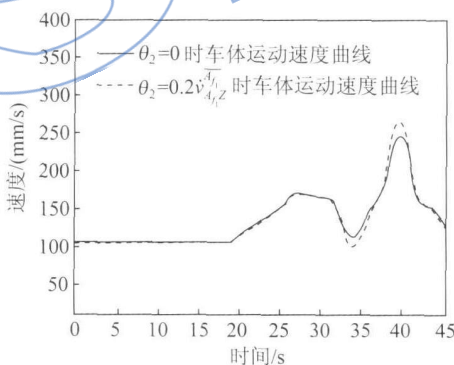


图6 车体运动速度曲线

Fig. 6 Velocities of bodywork

## 4 结 论

本文对轮履复合式移动系统结构进行分析的基础上, 对探测车移动系统进行了运动学建模, 该研究为探测车结构设计及其在非结构化环境下自主导航、运动控制等提供了理论依据. 总结起来, 可以表述为如下几点:

- 1) 将 Denavit Hartenberg 规则和 Sheth Uicker 方法相结合, 构建的空间三维坐标系适用于轮履复合式探测车多体运动系统;
- 2) 将承重轮、后轮的运动作为输入量, 提供了一种求解轮履复合式探测车车体运动的有效方法, 为轮履复合式探测车的导航及运动控制提供

了理论依据;

3) 运动学仿真验证了理论模型的正确性,通过仿真验证了轮履复合式行走机构对地形起伏起到较好线性平均的作用,平行四边形结构中安装扭转弹簧提高了车体运动平稳性。

新型轮履复合式移动系统融合轮式及履带式越障移动系统的优点并且易于控制,在对其结构进行进一步设计改进后可应用于多种探测车完成复杂环境的探测任务。

## 参考文献

- [1] 王海彬,黄永生,姚丹霖. 国外地面军用机器人系统综述[J]. 汽车运用,2005,(11):18-20.  
WANG Haibin, HUANG Yongsheng, YAO Danlin. Summary of military robot systems using on the ground[J]. Application of Automobile,2005,(11):18-20. (in Chinese)
- [2] 王巍,夏玉华,梁斌,等. 月球漫游车关键技术初探[J]. 机器人,2001,23(3):280-282.  
WANG Wei, XIA Yuhua, LIANG Bin, et al. Study on the critical technology for a lunar rover[J]. Robot,2001,23(3):280-282. (in Chinese)
- [3] 尚伟燕,李舜酩,鲍庆勇. 新型探测车复合式移动系统结构设计及运动仿真[J]. 机械科学与技术,2009,28(7):881-885.  
SHANG Weiyan, LI Shunming, BAO Qingyong. Structure design and kinematics modeling of a new compound moving system of an exploration robot[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering,2009,28(7):881-885. (in Chinese)
- [4] Tarokh M, McDermott G, Hayati S, et al. Kinematic modeling of a high mobility Mars rover[C]// Proceeding IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit MI,U. S. A. :IEEE,1999,2:992-998.
- [5] Kim W, Kim D H, Yi B J, et al. Kinematic modeling of mobile robots by transfer method of augmented generalized coordinates[C]// Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul Korea:IEEE,2001,3:2413-2418.
- [6] 邓宗全,胡明,高海波,等. 月球探测车运动学建模[J]. 中国机械工程,2003,22(6):1911-1914.  
DENG Zongquan, HU Ming, GAO Haibo. Kinematics modeling of the lunar rover[J]. China Mechanical Engineering,2003,22(6):1911-1914. (in Chinese)
- [7] 蔡则苏,洪炳熔,吕德生. HIT-1 型月球车的运动学分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(9):1098-1101.  
CAI Zesu, HONG Bingrong, LÜ Desheng. Kinematic analysis of HIT-1 lunar rover[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2003,35(9):1098-1101. (in Chinese)