

全方位步行车辆 ARPSV 的位形分析 及其三维图形仿真研究

高峰 陈秉聪 杨红旗

(吉林工业大学, 长春)

摘要 本文介绍了一种新型全方位步行车辆——ARPSV 的结构及运动原理; 提出了一些有关描述腿呈圆周对称布置类型的全方位步行机的运动及步态的补充定义; 作者进行了 ARPSV 的位形分析和三维计算机图形仿真研究。

关键词: 步行车辆, 全方位, 仿真, 步行机。

1 全方位步行车辆——ARPSV(All Round Position Steering of Walking Vehicle)的结构分析

1.1 ARPSV 的总体结构简介

图 1 所示为新型全方位步行车辆——ARPSV 的总体结构简图。ARPSV 主要由车身(1)、机架(11)、腿机构(22)、竖直运动导轨(10)、旋转式水平运动导轨(16)和转向传动装置六部分组成。它的六条腿对称均布在机架(11)的周壁上; 这是由其全方位运动特性决定的。

1.2 ARPSV 的腿机构介绍

全方位步行车辆 ARPSV 的腿机构是一种三维简单式缩放机构⁽¹⁾。它由连杆(20)、(25)、(24)、(23)和足(14)组成(如图 1)。R、Q 是其输入运动的两个引导点, P 为随动点以球铰与足相连。由 R 点输入的运动, P 点响应以经过放大的方向转过 180° 的相似运动, 放大倍数 $N = RQ / QP$; 由 Q 点输入的运动, P 点响应以经过放大(N+1)倍方向相同的相似运动。P 点的合运动是其对 R 点和 Q 点运动响应的线性迭加。在 ARPSV 中腿机构的 R 点输入水平方向的运动, Q 点输入水平方向的运动, Q 点输入垂直方向的运动。

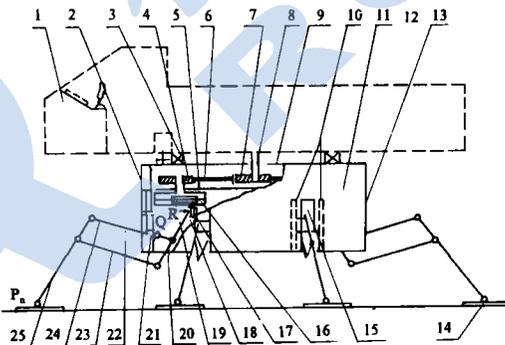


图 1 ARPSV 腿机构

1.3 导轨系统简介

对于重载的步行车辆, 设计一合理的导轨系统用于腿机构的运动和动力输入是必要的。ARPSV 的腿机构竖直运动导轨固定在其机架的侧壁上; 水平运动导轨是一组可旋转导轨, 其中心有一根竖轴装在机架的下支承板上, 可在转向传动装置的驱动下转动。

1.4 腿与导轨的连接

为保证 ARPSV 的腿机构在运动中始终保持良好的受力状态, 要求整个腿机构平面在运动的任何位置与机架的上下支承板垂直。因此腿机构中 R 点和 Q 点分别与水平导轨中滑块(17)和竖直导轨中的滑块(21)用万向接头连接, 并分别限制它们绕平行腿机构平面且垂直竖直导轨的轴转动的自由度。

1.5 转向传动装置介绍

转向传动装置是一个偏心轮连杆机构, 各偏心轮具有相同的偏心矩。当与车身中心轴(8)相连的中心偏心轮转动时, 各与旋转导轨转轴固连的卫星偏心轮也同步转动。这样, 转向传动装置保证车身与各腿水平旋转导轨同步传动, 并保证各水平旋转导轨的方向一致。

1.6 ARPSV 的作动系统

竖直导轨和水平导轨中滑块的运动都采用简单的直线作动器驱动, 如油缸、滚珠丝杠等。具体采用哪一种传动方式可根据用途和实际条件定。ARPSV 采用的是全液压传动, 这比较适合车辆的重载要求。

2 ARPSV 的全方位运动特性描述

2.1 补充定义和说明

多腿步行机($2m > 4$)腿的布置方式一般可以分为按前进方向左右对称布置和前后对称布置两种⁽²⁾, 其运动也常分为纵向运动和横(或侧)向运动。近年来又出现了一些全方位步行机, 如美国的 ODEXI 步行机⁽³⁾和本文介绍的 ARPSV 步行车辆, 它们在结构上无方向性, 腿多采用中心对称周向均布的方式, 其运动也无纵向和横向之分。这类全方位步行机在其运动特性描述上也与前者有较大差别。为便于对这类全方位步行机进行运动学及步态分析, 有必要增加下列补充定义:

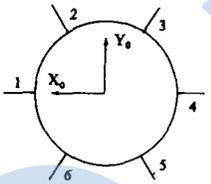


图 2 ARPSV 腿的序号

腿($i < m$)与第($i+m$)腿的相位差为半个步态周期。

$$\varphi_i - \varphi_{i+m} = \pm \frac{T}{2}$$

其中 φ_i 为第 i 腿落后于第 1 腿的时间相, T 为步态循环周期, 限于篇幅, 本文关于步行机步态和运动状态描述的其他有关定义, 请参阅文献[2,4]。

补充定义 3: 规则对称步态; 对具有 $2m$ 腿中心对称周向均布的步行机, 满足下列条件:

$$\varphi_{i+m} = \begin{cases} \varphi_i + \frac{1}{2} & \varphi_i < \frac{1}{2} \\ \varphi_i - \frac{1}{2} & \varphi_i \geq \frac{1}{2} \end{cases} \quad (i \leq m)$$

的步态为规则对称步态。

补充定义 4: 广义三角步态; 对具有六足腿中心对称周向均布的步行机, 具有性质:

$$\varphi_{2i} = \frac{1}{2}; \quad \varphi_{2i-1} = 0; \quad i \leq 3; \quad \frac{1}{2} \leq \beta < 1$$

的规则对称步态为广义三角步态。其中 β 为负荷因数⁽³⁾。

2.2 ARPSV 的广义三角步态运动特性描述

(1) 稳定裕量公式

图 3 为 ARPSV 的对步距归一化坐标系及平面模型图。

补充定义 1: 对于 $2m$ 腿中心对称周向均布的步行机, 腿的序号排列如下: 当任一腿被定为序号 1, 则其他腿按顺时针方向排序。

根据补充定义 1, ARPSV 腿的序号如图 2 所示。

补充定义 2: 对称步态。对于具有 $2m$ 腿中心对称周向均布的步行机, 对称步态指第 i

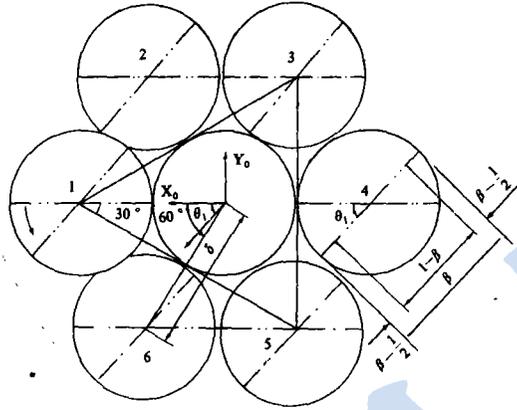


图3 ARPSV的归一化坐标系及平面模型图

由图3容易推导出ARPSV在广义三角步态下的归一化运动方向上的稳定裕量计算公式为:

$$SML^* = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{\delta}{\cos(60^\circ + \theta)} + \beta - 1 \right) & -90^\circ \leq \theta < -30^\circ \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\delta}{\cos\theta} + \beta - 1 \right) & -30^\circ \leq \theta < 30^\circ \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\delta}{\cos(60^\circ - \theta)} + \beta - 1 \right) & 30^\circ \leq \theta < 90^\circ \end{cases}$$

实际的运动方向上的稳定裕量计算公式:

$$SML = \lambda \cdot SML^*$$

其中 λ 为步距,它等于一个步态周期内机体重心移动的距离。

ARPSV广义三角步态下的归一化一般稳定裕量计算公式:

$$SMG^* = SML^* \Big|_{\theta=0} = \frac{1}{2} (\delta + \beta - 1)$$

实际的一般稳定裕量计算公式为:

$$SMG = \lambda \cdot SMG^* = \frac{\lambda}{2} [\delta + \beta - 1]$$

显然,ARPSV在广义三角步态下的静稳定性与其足可达区域中心与车体重心在支撑模式上投影距离参数 δ 有关,当 $\delta > 1 - \beta$,ARPSV可在广义三角步态下保持其车体的运动静稳定性。

(2) ARPSV的转向运动特性描述

ARPSV全方位步行车辆的转向可简单地通过转向传动装置控制步行车辆的车身与各腿水平运动导轨同步转动来实现,它有几个值得注意的运动特性:

其机架在转向过程中做平动,腿的方位不变。

由于水平运动导轨在旋转时两端点的切向速度方向相反,因而在ARPSV连续转向过程中换步时会产生速度干涉现象的,为避免产生运动冲击,应该在只有一组腿处于支撑相的时间内完成转向,或分几次来完成;即在 $(1-\beta)T$ 时间内转过角度 φ ,此时车身的平均转向角速度为:

$$\omega_{\text{平均}} = \varphi / (1 - \beta)T$$

设车身的切向速度 u ,步距为 λ ,可以得出此时车身转向角速度与其切向速度的关系为:

$$\begin{aligned} \lambda &= uT \\ \therefore T &= \lambda / u \end{aligned}$$

$$\therefore \omega_{\text{平均}} = \frac{\varphi \cdot u}{(1-\beta)\lambda}$$

或

$$\varphi = \frac{(1-\beta)\lambda\omega_{\text{平均}}}{u}$$

由此得出: 车身在转向时切向速度越小, 其在一步行程内所能转过的角度越大, 当 $u=0$ 时, ARPSV 可以不换腿转过任何角度。

(3) ARPSV 的全方位行走

由上节可知, ARPSV 可很方便地改变其运动方向。ARPSV 改变其行走方向, 只要将所有旋转导轨方向改变到将要前进的方向即可, 无论是直线行走还是转弯, 其步态及所有运动状态都不变, 而不分纵向行走和横向行走, 更不存在由向横向行走变为纵向行走的过渡问题, 因而 ARPSV 是一辆名符其实的全方位步行机。

3 ARPSV 的机构位形分析

空间机构的运动分析关键是对机构进行位形分析, 速度和加速度分析可在位形之后基于向量和回转变换张量的微分基本知识而较容易求得, 所以空间机构的位形分析主要集中在对机构的位形分析上。

可以利用 ARPSV 结构上的对称性方便地只对其一部分进行分析, 而后由对称性建立总体的运动方程。在由采用 D-H 方法建立的各构件的坐标系中, 利用回转变换张量方法建立机构的位形方程。

3.1 位形方程

在对 ARPSV 进行位形分析时, 假设:

(1) 机架在运动中只做平动, 机架上设一连体坐标系, 其原点在机架的中心, 而各坐标轴分别与地面参考系对应轴方向相同; 其原点在地面参考系中的位置矢量为 P_0 。

(2) ARPSV 在运动中支撑相足地面接触无相对滑动。

(3) ARPSV 在运动中除有必要其重心在地面参考系中的高度位置不变。

根据以上假设, ARPSV 的第 m 构件的位形方程为:

$$E_m = [j_m, j_m, k_m] = [i_m^0, j_m^0, k_m^0] \\ = E_{01} E_{12} \cdots E_{(m-1)m}$$

其中 $E_{n(n+1)} = e^{k\theta_{n+1}} \cdot e^{i\alpha_{n+1}}$

$$e^{k\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$e^{i\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$P_m = P_0 + P^0 = P_0 + (P_1^0 + P_2^0 \cdots + P_m^0)$$

在位置方程中下标为构件号, 上标 0 表示机架连体系中的矢量。

3.2 结构参数、关节变量、广义坐标

ARPSV 的腿机构具有三个自由度, 因此有三个广义坐标, 它们分别为 Q 点在竖直导轨中的位置 s_1 , R 点在水平旋转导轨中的位置 s_6 和水平旋转导轨转轴上坐标系 X 轴与机架坐标系 X 轴的夹角 θ_1 。

有关 ARPSV 的结构参数、关节变量及广义坐标如表 1 所示。

表1 ARPSV 全方位步行车辆的结构参数、关节变量和广义坐标

| i | $\theta_i(\text{rad})$ | (rad) | $s_i(\text{mm})$ | $h_i(\text{mm})$ |
|-----|-----------------------------|----------|--------------------|------------------|
| 1 | $\theta_1(\text{广义坐标})$ | π | $s_1(\text{广义坐标})$ | 180 |
| 2 | θ_2 | $-\pi/2$ | 0 | 0 |
| 3 | θ_3 | 0 | 0 | 198.20809 |
| 4 | θ_4 | 0 | 0 | 270 |
| 5 | θ_5 | $\pi/2$ | 0 | 0 |
| 6 | θ_6 | $\pi/2$ | $s_6(\text{广义坐标})$ | 0 |
| 7 | θ_7 | 0 | 150 | 0 |
| 8 | $\theta_8 = \pi - \theta_3$ | 0 | 0 | 436.79191 |
| 9 | $\theta_9 = \theta_4$ | 0 | 0 | 170 |
| 10 | $\theta_{10} = \theta_4$ | 0 | 0 | 595 |
| 11 | $\theta_{11} = \theta_4$ | 0 | 0 | 635 |

构件 1、2、3、4、5、6、7 组成一闭环系统，该闭环系统的位形方程为：

$$\begin{aligned}
 [I] &= E^{k\theta_1} E^{i\alpha_1} E^{k\theta_2} E^{i\alpha_2} E^{-k\theta_2} E^{i\alpha_2} E^{k\theta_4} E^{i\alpha_4} E^{k\theta_5} E^{i\alpha_5} E^{k\theta_6} E^{i\alpha_6} E^{k\theta_7} E^{i\alpha_7} \\
 &= E^{-k\theta_1} E^{i\alpha_1} E^{-k\theta_2} E^{-i\alpha_2} E^{k(\theta_4 - \theta_3 - \theta_5)} E^{i\alpha/2} E^{k\theta_6} E^{i\alpha} \\
 P^0 &= i_1 h_1 + s_1 k_1 + i_3 h_3 + i_4 h_4 - k_5 s_5 - k_6 s_6 + k_7 s_7 = 0
 \end{aligned}$$

求解得到各关节变量与广义坐标的关系式(求解过程略)：

$$\begin{aligned}
 \theta_2 &= \pi - \arctan[s_6 \cdot \cos\theta_1 / (h_1 + s_6 \cdot \sin\theta_1)] \\
 \theta_3 &= 2\arctan[d_2 - \sqrt{d_2^2 + d_1^2 - d_5^2} / (d_5 - d_1)] \\
 \theta_4 &= \arccos[(d_1^2 + d_2^2 - h_3^2 - h_4^2) / 2h_3 h_4] \\
 \theta_5 &= \theta_4 - \theta_3 \\
 \theta_6 &= \theta_2 - \theta_1
 \end{aligned}$$

其中 $d_1 = \sqrt{h_1^2 + 2h_1 s_6 \sin\theta_1 + s_6^2}$ ； $d_2 = s_1 - s_7$ ； $d_3 = h_3 + h_4 \cos\theta_4$ ； $d_4 = h_4 \sin\theta_4$ ； $d_5 = (h_4^2 + h_3^2 - d_1^2 - d_2^2) / 2h_3$ 。

将广义坐标、关节变量的值代入位形方程即可求得各构件的位置和姿态。

将广义坐标、关节变量、位置方程对时间进行一次和二次微分可求得步行车辆各构件上任一点的速度、加速度。部分分析完全基于和回转变换张量的微分的基本知识，并不需要作特殊的数学处理。由于这部分工作较繁琐，限于篇幅在此不仔细讨论。

4 ARPSV 的三维图形仿真与步态研究

图形仿真方法充分利用了计算机的高速运算和数据处理能力，直接将运算结果用图形方式在屏幕上直观地表现出来，发挥了人们的形象判断能力，使人们从抽象、繁琐的数字、符号中解脱出来。采用三维图形仿真方法对 ARPSV 进行了运动学及步态研究取得了良好的效果。对 ARPSV 的三维图形仿真内容包括：

(1) 利用位形分析的结果和计算机作图方法在屏幕上构造反映实际结构的三维图形，改变结构参数进行机构优化；

(2) 模拟地面环境；

(3) 根据步态分析结果，给出广义坐标 s_1 、 θ_1 、 s_6 随时间的变化规律，使屏幕上的 ARPSV

在所模拟的地面环境中行走；

(4) 用键盘或操纵杆操纵屏幕上 ARPSV 的运动，模拟步行车辆的各种监控及操纵方法。

图 4 给出的是 ARPSV 采用广义三角步态的三维图形仿真的程序框图。实际程序是用 C 语言编写的，该程序使 ARPSV 的三维仿真图形具有连续“动画”效果，并可根据需要改变三维图形的视角；全面反映 ARPSV 的结构、位形、步态、稳定性、转向灵活性及全方位运动能力。

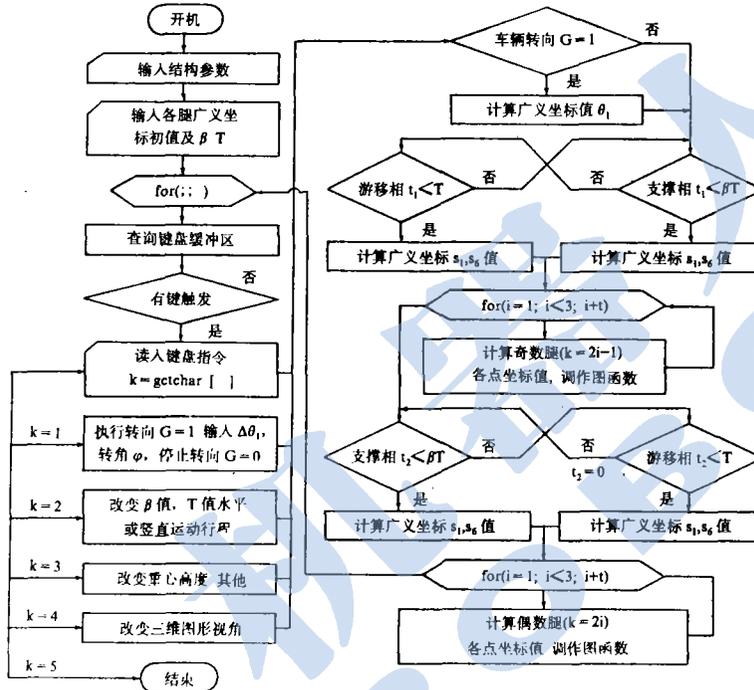


图 4 三维图形仿真程序

5 结论

本文对 ARPSV 进行了结构分析和位形分析，导出了它的位形方程和机构关节变量与广义坐标的关系式。讨论了全方位步行机的运动特性并增加了有关这类步行机步态分析的补充定义。介绍了用三维图形仿真方法对 ARPSV 的研究内容和用 C 语言编制的三维图形仿真程序。

参 考 文 献

- 1 Song S M, Lee J K. Motion study of two-and three-dimensional pantograph mechanisms. Mech, Mach, Theory, 1987; 22(4): 321-331
- 2 钱晋武, 干东英. 六足步行机横向行走最佳步态及其运动特性初探. 机器人, 1988; 2(5): 45-49
- 3 Thomas G, Bartholet. Technology for mobile robotics in nonmanufacturing applications. Presented at the RI/SME Robots West Conference, November, 1984
- 4 McGhee R B, Iswandhi G I. Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1979;(4): 176-182

ANALYSIS OF POSITION-POSTURE AND STUDY ON THREE-DIMENSIONAL GRAPHIC SIMULATION OF AN ALL ROUND POSITION STEERING WALKING VEHICLE "ARPSV"

GAO Feng CHEN Bingchong YANG Hongqi

(Jilin University of Technology, Changchun)

Abstract

The structure and kinematic characteristics of an all round position steering hexapod vehicle "ARPSV" is presented. This is a new kind of walking vehicle with legs installed in circular symmetry. In this paper some additional definitions describing its kinematic characteristics are proposed, with some analysis of its position-posture and study on its three-dimensional computer graphic simulation.

Keywords: walking vehicle, all round position, simulation, legged machine.

机器人冗余控制和离线轨迹规划的研究

丁 汉

(武汉, 华中理工大学 86 级博士研究生; 现工作单位同上)

本学位论文以机器人轨迹规划为主攻方向, 主要研究轨迹规划中的冗余控制和离线规划系统。论文的工作由两部分组成: 第一部分针对冗余度机器人的轨迹规划, 提出了用以改善灵活性、动力学性能以及障碍物躲避的控制算法。第二部分研制了机器人离线轨迹规划系统和超声测距装置。

本文的第一章综述了机器人的冗余控制和离线轨迹规划主要文献的研究成果和发展现状, 在此基础上提出了本文的研究方向, 并阐述了工作的目的和意义。第二章提出了在 Chebyshev 意义下用以产生满足终端运动要求的较低关节速度的机器人形态的控制算法, 使冗余度机器人沿着给定的轨迹具有高的灵活性。第三章提出了评价机器人动力学性能的高性能指标(VPI)、加速性能指标(API)和综合性能指标(CDPI), 据此提出了在加速度水平上, 利用冗余空间极小化关节驱动力矩的最大值的规划方法。第四章利用冗余度使机器人跟踪所希望的轨迹时进行障碍物躲避, 提出了多面体间距离的伪度量函数—— J 函数, 以及基于 J 函数的障碍躲避的规划方法。第五章讨论了在多面体障碍物中机器人无碰撞路径的规划, 无碰撞运动的统一指标为 $\text{conv}(F_i) \cap \text{conv}\{O_j\} = \varphi$, 基于 J 函数机器人 Findpath 问题的解可归结为一种搜索技术。第六章介绍了在 IBM-AT 微机上实现的机器人离线规划系统, 系统的软件包括: 机器人和环境物的三维几何模型的构型, 运动学和动力学的计算, 运动规划, 碰撞检测和图形显示动画; 利用接口电路和通讯模块, 该系统已成功地用于 PT-300V 工业机器人的离线轨迹规划。第七章介绍了超声测距装置的工作原理和硬件框图。该装置已应用于汉 I 型智能教育机器人的障碍物的躲避。最后, 在结束语中对全部工作进行了总结, 提出了本文研究的主要结论。

导师: 杨叔子, 熊有伦