doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.10.045

轮式并联调姿机器人冗余控制策略研究

刘　毅　丰宗强　刘　洋　常嘉琦　赵永生　姚建涛
（燕山大学河北省并联机器人与机电系统实验室，秦皇岛 066004）

摘要：针对大型精密复杂零部件的集成装配，提出一种将全域全向运动与调姿微运动融合于一体的轮式并联调姿机器人。通过共享部分自由度方式将全向运动特征融合于并联机构，解决大范围任意方向移动与小空间内精密调姿高效连续操作的问题；针对轮式并联调姿装备的定平台开放特性与冗余特征，设计基于力位混合的单分支与整体冗余控制策略，选取并优化轮式并联调姿机构的主动输入方式，基于螺旋理论对位置控制轴的选取合理性进行分析，评估 2 种控制方式在不同的末端姿态域内的性能，得到设备在不同目标姿态时力位混合控制主动输入选取策略。基于 ADAMS 与 Simulink 软件搭建环境一致性良好，可控制较强的机电一体化模型，验证轮式并联调姿装备采用力位混合控制策略可行性与设备调姿精度。工程样机实验结果验证了所提出的冗余控制策略能够实现轮式并联调姿机器人功能，保证了调姿精度，为开发具有高可靠性、大尺度、重载荷、高精度同时兼具高精度全向运动和精密调姿功能的高效连续作业特征的 6 自由度并联调姿、对位、装配智能机器人奠定了理论与实践基础。

关键词：轮式并联机器人；冗余驱动；力位混合控制；控制策略
中图分类号：TP2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2022)10-0423-13　　**OSID**：

Investigation on Wheeled Parallel Pose-tuning Robot Redundant Control Strategy

LIU Yi　FENG Zongqiang　LIU Yang　CHANG Jiaqi　ZHAO Yongsheng　YAO Jiantao
(*Laboratory of Parallel Robotics and Mechatronic Systems in Hebei Province*, *Yanshan University*, *Qinhuangdao* 066004, *China*)

Abstract: For the integrated assembly of large precision and complex parts, a wheeled parallel gesturing robot that integrated omnidirectional motion and gesturing micro-motion was proposed. The omnidirectional motion features were integrated into the parallel mechanism by sharing some degrees of freedom, which solved the problems of large range of arbitrary directional movement and efficient continuous operation of precision posture in small space. Based on the spiral theory, the reasonableness of the position control axis selection was analyzed, and the performance of the two control methods in different end attitude domains was evaluated to obtain the force-position hybrid control active input selection strategy for different target attitudes of the device. Based on ADAMS and Simulink software, a mechatronic model with good environmental consistency and strong control can be built to verify the feasibility and accuracy of wheeled parallel attitude adjustment equipment by using force-position hybrid control strategy. The experimental results of the engineering prototype verified that the proposed redundant control strategy can realize the functions of wheeled parallel posture robot and ensure the posture accuracy, and laid the theoretical and practical foundation for the development of a 6-degree of freedom parallel posture, alignment and assembly intelligent robot with high reliability, large scale, heavy load, high accuracy, and high precision omnidirectional motion and precision posture functions.

Key words: wheeled parallel robot; redundant drive; force-position hybrid control; control strategy

0　引言

大部件之间的高精密对接与装配生产过程中目标质量大、变化范围大、覆盖范围广、给定作业操作空间有限，总装地点与大部件分散，需要大范围搬运转移、高效连续操作，开发一类自动或智能精密调姿机器

收稿日期：2022－05－31　修回日期：2022－08－09
基金项目：国家自然科学基金项目(U2037202、52075466)
作者简介：刘毅(1991—)，男，博士生，主要从事机器人理论及应用技术和自动化调姿装配装备研究，E-mail：liuyi415@stumail.ysu.edu.cn
通信作者：姚建涛(1980—)，男，教授，博士生导师，主要从事柔性机器人系统和并联机器人机构学理论研究，E-mail：jtyao@ysu.edu.cn

人是实现操作与装配智能化的关键及发展趋势。

6 自由度工业机器人操作臂,工作空间大、动作灵活、操作与避障能力强,但承载能力低、结构变形大、累积误差大、整体机动性[1-5]有限。于荣荣等[6]提出一种基于全向移动平台和 3-RPS 并联调姿机构的移动并联式六自由度调姿方法。张春燕等[7]提出一种含折展平台的多模式移动并联机构。Stewart 并联机构在导弹舱段水平对接[8]、卫星舱段水平对接[9-10]、飞行模拟器、力和力矩传感器等方面均有广泛应用。具有承载能力大、刚度大、精度高、动力学性能好等优点。但是,机构的高耦合性导致运动控制系统复杂、调姿工作空间较小,机构动平台、各支链与定平台构成的封闭结构是固化的,不能在随机位置使用[11]。基于 POGO 柱的多冗余驱动分布式 6 自由度并联调姿机构[12],大部件为动平台、POGO 柱为支链、车间地面为定平台,在指定位置封闭构成调姿机构[13-16]。典型构型 3-PPPS、4-PPPS、n-PPPS,支链腿数量和位置不受限制,承载力大、精度较高、稳定、可靠。但是,调姿机构属于松散封闭结构,存在地面误差及运动轴平行度误差的影响,调姿柔性及工作空间受限。美国雷神公司的直线导轨式 6 自由度数控对接平台[17],用于导弹部段的调姿、对接安装,通过导轨和并联机构实现平移、调姿、对位装配功能,全向自动转场车和自动吊装系统相对于调姿机构均为独立结构与操控系统。四足机器人和六足机器人[18]属于并联定平台开放式机器人,它们主要针对各种极限环境下,完成搬运、搜索、探测和救援等任务。突出体现运动特性、避障、越障能力即复杂地面的适应性和通过性,位置与姿态精度不特别要求。轮足式机器人融合了轮式的快速移动性和足式机器人的高机动性特点[19-27]。清华大学研发了一种轮单元式变结构机器人[28-29],在臂关节处装有驱动轮,膝关节处装有离合器,利用离合器进行轮式运动与足式运动的模式切换。串联结构的轮足机器人在一些重负载、高精度的使用条件下体现出了不足,并联机构式轮足机器人应运而生。刘冬琛等[30]开发了一种并联六自由度结构的电动四轮足机器人。多足机器人的动平台均具有 6 自由度姿态变化特征,但与调姿机构设计的出发点不同,多足机器人的调姿是保证其良好的运动特性及复杂地面环境适应性和通过性,针对高刚度、大承载、高精度等性能没有严格的指标要求,不适合用于精密调姿对接工况。

本文提出一种将全域全向运动与调姿微运动融合于一体的轮式并联调姿机器人,通过共享部分自由度方式将全向运动特征融合于并联机构构型中,具有承载能力强、环境适应性强等特点,可以大范围任意方向移动与小空间内六自由度精密调姿高效连续调姿。首先,分析轮式并联调姿机器人的自由度,并求解其运动学反解。其次,提出轮式并联调姿装备冗余控制策略,选取并优化轮式并联调姿机构的主动输入方式,基于螺旋理论对位置控制轴的选取合理性进行分析与评估。基于机电一体化仿真模型与工程样机实验,验证轮式并联调姿装备采用力位混合控制策略的可行性与设备的调姿精度。

1 移动调姿平台设计

轮式并联调姿机器人将轮式运动和并联驱动结合起来,设计一种全新驱动形式的具有大范围移动特性与高精度调姿运动的移动调姿机器人,如图 1 所示。

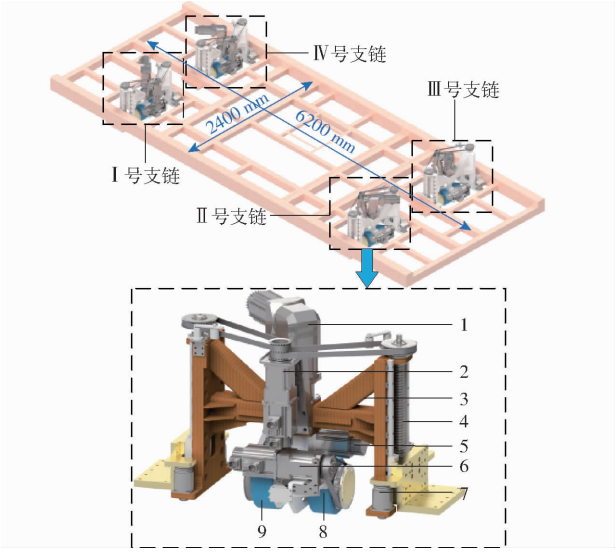


图 1 轮式并联调姿机器人结构图

Fig. 1 Structure of wheeled parallel posture-adjusting robot

1. R_Z伺服电机减速器 2. P_Z伺服电机减速器 3. H 形架 4. P_Z丝杠导轨 5. 轮 1 伺服电机减速器 6. 轮 2 伺服电机减速器 7. 减震弹簧 8. 轮 2 9. 轮 1

轮式并联调姿装备控制系统采用基于 EtherCAT 工业以太网总线的伺服控制系统,由工控机、控制器、伺服驱动器、伺服电机等组成。工控机通过 EtherNet 以太网向控制器发送运动指令,控制器接收到指令后对指令进行分析,根据指令运动模式与状态,通过反解程序计算出伺服电机运动脉冲数,同时经过 EtherCAT 网络将脉冲数发送至伺服驱动器端,伺服驱动器驱动伺服电机运动,完成机器人各分支的运动控制。控制系统与硬件组成如图 2、3 所示。

2 运动学分析

2.1 自由度分析

轮式并联调姿装备由 4-PSPR 机构组成,4 个

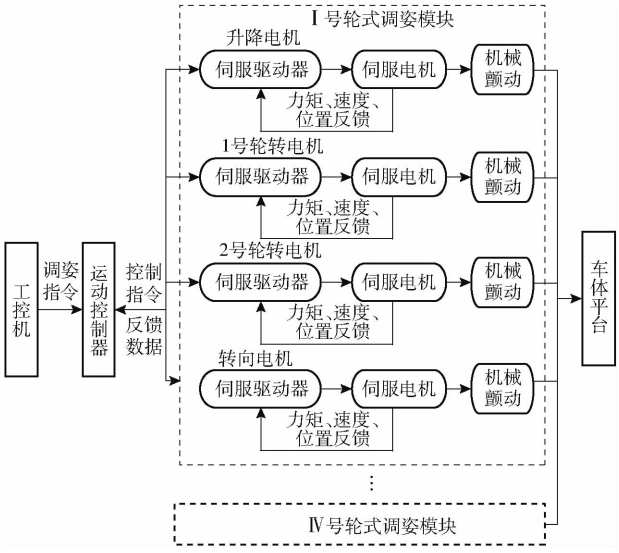


图 2　控制系统组成

Fig. 2　Outline of control system

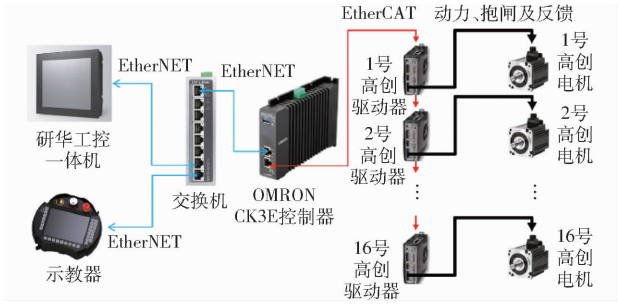


图 3　控制系统结构图

Fig. 3　Control system structure diagram

分支均匀分布在车平台四角，在工作时相互独立。对轮式并联调姿机器人的单分支进行分析，单分支由 $R_i(Z)$、$P_i(Z)$、$R_i(Y)$、$P_{i1}(X,Y)$、$P_{i2}(X,Y)$5 个运动副组成。将单分支固连坐标系建立在 RZ 轴与横梁交点处，其中，每个分支含有 4 个驱动，分别放置在运动副 $R_i(Z)$、$P_i(Z)$、$P_{i1}(X,Y)$、$P_{i2}(X,Y)$上。显然，当运动副 $P_{i1}(X,Y)$、$P_{i2}(X,Y)$相反方向运动时，单分支同样可产生绕 Z 轴的转动自由度。由此可见，单分支存在局部的冗余自由度。分析可知，$P_{i1}(X,Y)$、$P_{i2}(X,Y)$两运动副可简化为 $R_i(X)$、$P_i(X,Y)$、$R_i(Z)$3 个运动副，从而得到单分支简化模型，如图 4 所示。

将坐标系原点建立在轮式并联调姿装备底面几何中心处。如图 4 中设置 3 处控制点，分别为 A_i、B_i、C_i。以Ⅰ号单元($i=1$)为例，设 A_1、B_1、C_1在世界坐标系下的坐标为 $A_1=(a_1,b_1,0)$；$B_1=(c_1,d_1,0)$；$C_1=(e_1,f_1,0)$。由螺旋定理，刚体瞬时转动，可用角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 乘以转轴的单位线矢表示，即 $\$=\boldsymbol{\omega}(\boldsymbol{S};\boldsymbol{S}_0)=\boldsymbol{\omega}(\boldsymbol{S};\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{S})$，刚体瞬时移动可看成特殊的转动，即 $\$=(0;\boldsymbol{v})$，其中 $\$$、$\boldsymbol{v}$ 为瞬时移动的速度矢量。建立其单分支的运动螺旋系

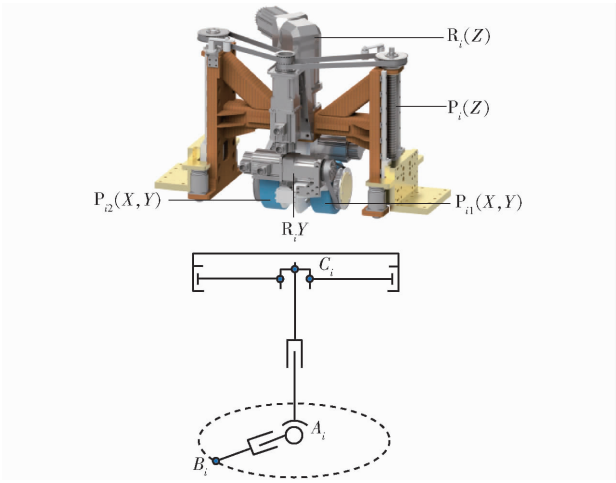


图 4　单分支简化模型

Fig. 4　Single branch simplified model

$$\begin{cases}\$_{P_{1(X,Y)}}=(0,0,0;c_1-a_1,d_1-b_1,0)\\ \$_{R_{1X}}=(1,0,0;0,0,b_1)\\ \$_{R_{1Y}}=(0,1,0;0,0,-a_1)\\ \$_{R_{1Z1}}=(0,0,1;-b_1,a_1,0)\\ \$_{P_{1Z}}=(0,0,0;e_1-a_1,f_1-b_1,g_1)\\ \$_{R_{1Z2}}=(e_1-a_1,f_1-b_1,g_1;-b_1g_1,a_1g_1,b_1e_1-a_1f_1)\end{cases}\tag{1}$$

由式(1)可知，单个支链机构反螺旋为

$$\$_1^r=(0,0,0;0,0,0)\tag{2}$$

即单分支在一般形式下不受到任何的力或力偶，其自由度为 6。

如图 5 所示，当单分支螺旋系中 $c_1=a_1$时，其分支反螺旋 $\$_1^r$ 为

$$\$_1^r=(1,0,0;0,0,b_1)\tag{3}$$

该反螺旋限制了分支延 X 轴方向的运动。此时单分支自由度为 5。

当 $b_1=d_1$时，其分支反螺旋为

$$\$_1^r=(0,1,0;0,0,-a_1)\tag{4}$$

该反螺旋限制了分支延 Z 轴方向的运动。此时单分支自由度也为 5。

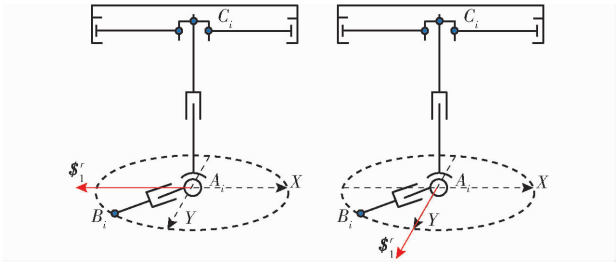


图 5　X 轴单分支反螺旋和 Y 轴单分支螺旋

Fig. 5　X-axis single-branch counter spiral and Y-axis single-branch spiral

根据以上所述单分支自由度，采用同样方式分

析剩余 3 条分支,可得到同样的反螺旋

$$\begin{cases} \$_2^r = (0,0,0;0,0,0) \\ \$_3^r = (0,0,0;0,0,0) \\ \$_4^r = (0,0,0;0,0,0) \end{cases} \tag{5}$$

分析其整体机构反螺旋为

$$\$^r = (0,0,0;0,0,0) \tag{6}$$

即在一般形式下,任意分支对动平台不存在约束力或约束力偶,整体机构自由度为 6。

同时,当 $a_i = c_i$时,其机构反螺旋系为沿 X 轴方向的约束力

$$\begin{cases} \$_1^r = (1,0,0;0,0,b_1) \\ \$_2^r = (1,0,0;0,0,b_2) \\ \$_3^r = (1,0,0;0,0,b_3) \\ \$_4^r = (1,0,0;0,0,b_4) \end{cases} \tag{7}$$

机构反螺旋系限制了平台 2 个自由度,即沿 X 轴移动和绕 Z 轴转动,此时机构自由度为 4。当$b_i = d_i$时,其机构反螺旋系限制了平台 PY 与 RZ 自由度,机构自由度也为 4。

综上分析可知,平台具有空间六自由度运动调姿能力,可实现平面内全域全向运动与空间内调姿微运动。轮式并联调姿装备自由度为 6,其输入驱动数目为 16,造成了机构整体驱动冗余。

2.2 运动学反解

图 6 为轮式并联调姿装备的坐标系简图,其中 $OXYZ$ 为定坐标系,固定在定平台几何中心处。$PXYZ$ 为动坐标系,固定在舱外平台车与分支连接处所形成的长方形几何中心处。Z_i、l_{iX}、l_{iY}为分支输入量。

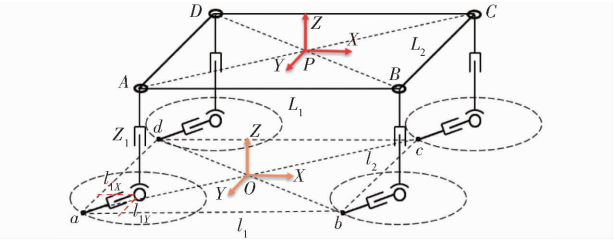


图 6 坐标系简图

Fig. 6 Coordinate system sketch

并联调姿机构的位姿用六维向量表示为 $\boldsymbol{U} = (p_x, p_y, p_z, \alpha, \beta, \gamma)$,其中,$p_x$、$p_y$、$p_z$分别表示动点 P 在定坐标系 $OXYZ$ 中的 X、Y、Z 轴方向上的位置,α、β、γ 分别表示动坐标系 $PXYZ$ 相对于定坐标系 $OXYZ$ 的 RPY 转角组合。

对于轮式并联调姿装备,其动平台点 A、B、C、D 称为动平台控制点 I,其定平台点 a、b、c、d 称为定平台控制点 i;将点 I 在 $PXYZ$ 下的坐标表示为 $\boldsymbol{l}_{PI}$,将点 i 在 $OXYZ$ 下的坐标表示为 $\boldsymbol{l}_{oi}$。

记点 i 在动坐标系下的位置向量为 $\boldsymbol{l}_{Pi}$,点 I 在定坐标系下的位置向量为 $\boldsymbol{l}_{OI}$,定平台控制点到动平台控制点位置向量为 $\boldsymbol{l}_{iI}$。构造以 i、I、球铰中心为顶点的三角形,可得

$$\begin{cases} \boldsymbol{l}_{OI} = \boldsymbol{R}\boldsymbol{l}_{PI} + \begin{bmatrix} P_X \\ P_Y \\ P_Z \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{l}_{OI} - \boldsymbol{l}_{Oi} = \boldsymbol{l}_{iI} \\ \boldsymbol{l}_{iI} = l_{iX} + l_{iY} + \boldsymbol{R}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_i \end{bmatrix} \end{cases} \tag{8}$$

其中

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\beta & c\alpha s\beta c\gamma - s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix}$$

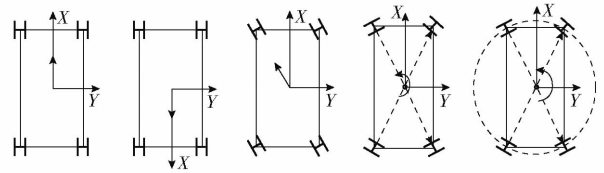
求解式(8)可得到机构反解值 Z_i、l_{iX}、l_{iY}。

将 l_{iX}、l_{iY}转换至柱面坐标系下坐标为

$$\begin{cases} \theta_i = \operatorname{atan}(l_{iX}, l_{iY}) \\ r_i = \sqrt{l_{iX}^2 + l_{iY}^2} \end{cases} \tag{9}$$

由于定点始终位于定平面,所以柱面坐标系下 Z_i始终等于 0。由式(9)可知,转向电机转动驱动量为 θ_i,轮转电机驱动量为 r_i。

图 7a ~7d 为行走驱动原理模型,图 7e 为调姿驱动原理模型。



(a) 前导驱动 (b) 后导驱动 (c) 全向运动 (d) 回转运动 (e) 调姿模式

图 7 坐标系简图

Fig. 7 Coordinate system sketch

多轴联动冗余驱动调姿机构的运动状态及对应各个支单元电机驱动情况如表 1 所示。

表 1 系统电机驱动分析

Tab. 1 System motor drive analysis

运动类型	1 号单元	2 号单元	3 号单元	4 号单元
X 移动	转向至 X 向、驱动轮转	转向至 X 向、驱动轮转	转向至 X 向、驱动轮转	转向至 X 向、驱动轮转
Y 移动	转向至 Y 向、驱动轮转	转向至 Y 向、驱动轮转	转向至 Y 向、驱动轮转	转向至 Y 向、驱动轮转
Z 移动	驱动 Z 向	驱动 Z 向	驱动 Z 向	驱动 Z 向
X 横滚	驱动 Z 向 负向调节	驱动 Z 向 正向调节	驱动 Z 向 负向调节	驱动 Z 向 正向调节
Y 俯仰	驱动 Z 向 负向调节	驱动 Z 向 负向调节	驱动 Z 向 正向调节	驱动 Z 向 正向调节
Z 偏航	驱动转向和轮转	驱动转向和轮转	驱动转向和轮转	驱动转向和轮转

3　冗余驱动策略分析

3.1　单腿转向控制实现

轮式并联调姿装备单腿是实现设备移动、转向、调姿的基本控制单元，如图 8 所示，单分支存在局部冗余自由度。力位混合控制方式可以很好的解决这一冗余问题。通过对电机 R_Z 进行位置控制，保证单元转向的运动精度，同时对两个轮转电机进行力矩控制，辅助 R_Z 运动。控制策略对设备的运动协调性提出了很大的挑战。取 1 号轮与 2 号轮中心点 j、k 作为控制点计算轮转速度阈值，通过伺服电机 R_Z 的位置跟踪误差反馈对轮转电机力矩实时控制。

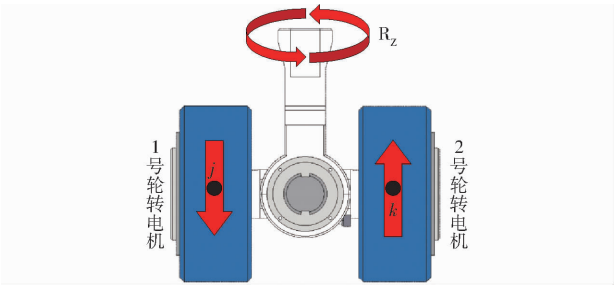


图 8　机构传递简图

Fig. 8　Institutional transfer sketch

轮式并联调姿机构在转向时采用力位混合的控制方式。转向电机采用位置控制模式，保证旋转的精度；双轮转电机采用力矩控制模式，以减小位置电机跟随误差为目标，辅助转向。以轮转电机与地面接触面的中点为控制点，则单分支转向策略轮转电机力矩输出满足

$$T_{LZEXP}=\begin{cases}K_p F_{Error_{ZX}}+Dir_{ZX}T_{Damp} & (T_{LZEXP}\leqslant T_{Limit})\\ T_{Limit} & (T_{LZEXP}>T_{Limit})\end{cases} \tag{10}$$

式中　$F_{Error_{ZX}}$——转向伺服电机跟随误差

T_{LZEXP}——轮转电机期望力矩

T_{Damp}——轮转电机预紧力矩

K_p——转向电机跟随误差与轮转电机输出力矩比例系数

Dir_{ZX}——转向电机运动方向标志

T_{Limit}——轮转电机输出力矩阈值

由式(10)可知，轮转电机输出力矩与转向电机跟随误差呈线性关系，转向电机跟随误差越大，则轮转电机所需要的辅助转向力矩越大。考虑到机构可能因所施加力矩造成的振荡现象，以及瞬时力矩变化过大导致传动带损伤，增加了轮转电机的预紧力矩 T_{Damp}，且所施加预紧力矩 T_{Damp} 方向应与转向电机方向保持一致。Dir_{ZX} 与转向电机运动方向匹配如表 2 所示，可有效降低运动时调姿平台震动。

表 2　轮转电机与转向电机转向匹配

Tab. 2　Rotating motor and steering motor steering match

转向电机转向	1 号轮转电机 Dir_{ZX}	2 号轮转电机转向 Dir_{ZX}
正转	1	-1
反转	-1	1

3.2　位置控制轴选取与优化

从并联机构运动的角度分析，调姿内力产生的原因是并联机构在冗余驱动下受到过度约束，通过将部分轴设定为位置控制轴，作为主动输入轴，实现轮式并联调姿机构所需的运动，部分轴设定为力矩控制，实现被动的柔顺控制。如图 9 所示，各分支十字轴铰点所组成平面定义为并联机构定平台，将车架定义为并联机构动平台。

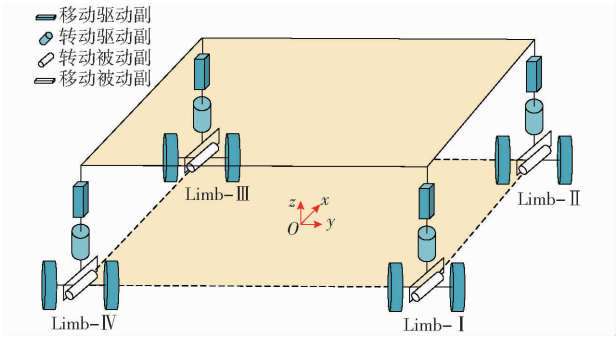


图 9　驱动布置示意图

Fig. 9　Drive arrangement diagram

由于轮式并联调姿装备负载较大，将 4 个分支的电机 P_Z 设置为位置控制模式，以提高负载稳定性。由单分支冗余驱动控制策略所述，每个分支电机 R_Z 用于保证转向时的位置精度，设置为位置控制模式。刚化上述螺旋，则轮式并联机构一般形式下运动副螺旋为

$$\begin{cases}\$_{P_{i(X,Y)}}=(0,0,0;c_i-a_i,d_i-b_i,0)\\ \$_{R_{iX}}=(1,0,0;0,0,b_i)\\ \$_{R_{iY}}=(0,1,0;0,0,-a_i)\\ \$_{R_{iZ1}}=(0,0,1;-b_i,a_i,0)\end{cases}\quad(i=1,2,3,4) \tag{11}$$

由式(11)可知，其分支反螺旋为

$$\$_i^r=(0,0,1;-b_i,a_i,0) \tag{12}$$

分支反螺旋限制了机构 P_Z、R_X、R_Y 3 个自由度，剩余的 R_Z、P_X、P_Y 3 个自由度需要再增加 3 个 X 轴或 Y 轴作为位置控制轴约束。由于轮式结构 X、Y 向的耦合性，除在奇异位置下，当 X 轴处于位置控制时，Y 轴也处于位置控制模式。由于空间中 3 个点即可确定一个平面，所以拟选择Ⅰ号单元的轮转双电机与Ⅱ号单元轮转双电机组合，或Ⅰ号单元的轮转双电机与Ⅲ号单元轮转双电机组合为位置控制模式来约束剩余自由度。当选择Ⅰ号单元与Ⅲ号单

元的轮转电机为位置控制模式时,刚化所选运动副,得出新的反螺旋系为

$$\begin{cases} \$_1^{r1}=(0,0,1;-b_1,a_1,0) \\ \$_2^{r1}=(0,0,1;-b_2,a_2,0) \\ \$_3^{r1}=(0,0,1;-b_3,a_3,0) \\ \$_4^{r1}=(0,0,1;-b_4,a_4,0) \\ \$_1^{r2}=(1,0,0;0,0,a_1) \\ \$_1^{r3}=(0,1,0;0,0,-b_1) \\ \$_3^{r2}=(1,0,0;0,0,a_3) \\ \$_3^{r3}=(0,1,0;0,0,-b_3) \end{cases} \tag{13}$$

由于空间平行线矢最大线性无关数为 3,共面线矢最大线性无关数也为 3,则机构反螺旋 S 可简化为

$$\begin{cases} \$_1^{r1}=(0,0,1;-b_1,a_1,0) \\ \$_2^{r1}=(0,0,1;-b_2,a_2,0) \\ \$_3^{r1}=(0,0,1;-b_3,a_3,0) \\ \$_1^{r2}=(1,0,0;0,0,a_1) \\ \$_1^{r3}=(0,1,0;0,0,-b_1) \\ \$_3^{r2}=(1,0,0;0,0,a_3) \end{cases} \tag{14}$$

对约束螺旋系 S 求行列式为

$$|S|=(a_3-a_1)[(a_3-a_1)(b_1-b_2)+(b_3-b_1)(a_2-a_1)] \tag{15}$$

行列式表达式可看作包含两个向量的点积,即

$$|S|=(a_3-a_1)[(a_3-a_1,b_3-b_1)\cdot(b_1-b_2,a_2-a_1)] \tag{16}$$

式(16)中,$a_1\neq a_3$,同时,所包含的两向量分别为定坐标系下轮式并联调姿装备的对角线向量与其长边的向量,其点积也必不为零。所以 $|S|\neq 0$,即 $\dim(S)=6$,所以选择Ⅰ号单元与Ⅲ号单元的轮转电机为位置控制模式能够满足 6 自由度调姿,选择合理。

同理,当选择Ⅰ号单元与Ⅱ号单元轮转电机作为位置控制轴时,刚化所选运动副,其机构反螺旋为

$$\begin{cases} \$_1^{r1}=(0,0,1;-b_1,a_1,0) \\ \$_2^{r1}=(0,0,1;-b_2,a_2,0) \\ \$_3^{r1}=(0,0,1;-b_3,a_3,0) \\ \$_4^{r1}=(0,0,1;-b_4,a_4,0) \\ \$_1^{r2}=(1,0,0;0,0,a_1) \\ \$_1^{r3}=(0,1,0;0,0,-b_1) \\ \$_2^{r2}=(1,0,0;0,0,a_2) \\ \$_2^{r3}=(0,1,0;0,0,-b_2) \end{cases} \tag{17}$$

上述机构反螺旋系 S'可简化为

$$\begin{cases} \$_1^{r1}=(0,0,1;-b_1,a_1,0) \\ \$_2^{r1}=(0,0,1;-b_2,a_2,0) \\ \$_3^{r1}=(0,0,1;-b_3,a_3,0) \\ \$_1^{r2}=(1,0,0;0,0,a_1) \\ \$_1^{r3}=(0,1,0;0,0,-b_1) \\ \$_2^{r2}=(1,0,0;0,0,a_2) \end{cases} \tag{18}$$

对约束螺旋系 S'求行列式,即

$$|S'|=(a_2-a_1)[(a_3-a_1,b_3-b_1)\cdot(b_1-b_2,a_2-a_1)] \tag{19}$$

式(19)中,$a_1\neq a_2$,同时,所包含的两向量同样分别为定坐标系下轮式并联调姿装备的对角线向量与其长边的向量,其点积也必不为零。所以 $|S'|\neq 0$,即 $\dim(S')=6$,所以选择Ⅰ号单元与Ⅱ号单元的轮转电机为位置控制模式同样能够满足 6 自由度调姿,选择合理。

综上所述,选择Ⅰ号单元与Ⅲ号单元的轮转电机为位置控制模式和选择Ⅰ号单元与Ⅱ号单元的轮转电机为位置控制模式均为合理的输入选取方式。对不同的输入组合作用下,机构的运动性能存在的差异进行分析对比,从而得出主动输入驱动的最佳组合。

由机构反解,已知机构轮式并联调姿装备的输入输出关系,并摘取其中作为位置控制的轴

$$\begin{cases} l_{a(x,y)}=f_{a(x,y)}(\alpha,\beta,\gamma,P_X,P_Y) \\ l_{az}=f_{az}(\beta,\gamma,P_Z) \\ l_{bz}=f_{bz}(\beta,\gamma,P_Z) \\ l_{c(x,y)}=f_{c(x,y)}(\alpha,\beta,\gamma,P_X,P_Y) \\ l_{cz}=f_{cz}(\beta,\gamma,P_Z) \\ l_{dz}=f_{dz}(\beta,\gamma,P_Z) \end{cases} \tag{20}$$

式(20)两边分别对时间求导可得

$$\begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{l}_{a(x,y)} \\ \dot{l}_{az} \\ \dot{l}_{bz} \\ \dot{l}_{c(x,y)} \\ \dot{l}_{cz} \\ \dot{l}_{dz} \end{bmatrix} = \boldsymbol{J} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \tag{21}$$

则可求得轮式并联调姿装备的速度雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}$。该雅可比矩阵反映机构主动输入量对末端姿态的影响。

在对轮式并联调姿装备的速度雅可比进行分析之后,将式(21)两边同时乘以 $\boldsymbol{J}^{-1}$,可得

$$\boldsymbol{J}^{-1}\begin{bmatrix}\dot{l}_{a(x,y)}\\ \dot{l}_{az}\\ \dot{l}_{bz}\\ \dot{l}_{c(x,y)}\\ \dot{l}_{cz}\\ \dot{l}_{dz}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{X}\\ \dot{Y}\\ \dot{Z}\\ \dot{\alpha}\\ \dot{\beta}\\ \dot{\gamma}\end{bmatrix} \tag{22}$$

令驱动向量为 $\boldsymbol{X}$，末端位姿向量为 $\boldsymbol{B}$，则有

$$\boldsymbol{J}^{-1}\boldsymbol{X}=\boldsymbol{B} \tag{23}$$

对于不同主动输入选取的组合下，$\boldsymbol{J}^{-1}$也不同，根据矩阵的条件数定理，如果 $\boldsymbol{J}^{-1}$的条件数大，末端位姿 $\boldsymbol{B}$ 的微小改变就能引起驱动向量 $\boldsymbol{X}$ 较大的改变。如果 $\boldsymbol{J}^{-1}$的条件数小，末端位姿 $\boldsymbol{B}$ 有微小的改变，驱动向量 $\boldsymbol{X}$ 的改变也很微小，稳定性好。它也可以表示机构在末端位姿不发生变化的条件下，雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}^{-1}$有微小改变时，机构驱动的变化情况。

因此，计算机构雅可比矩阵在不同位姿下的矩阵条件数 cond($\boldsymbol{J}^{-1}$)，条件数越小，证明机构末端对固定参数扰动的抗干扰能力越强。机构运动学性能越优。

由于 Matlab 实际计算所得条件数过大，因此求取雅可比矩阵条件数的倒数 1/cond($\boldsymbol{J}^{-1}$)。使用 Matlab 分别计算在 $-2°\leqslant\alpha\leqslant2°$且 $-2°\leqslant\beta\leqslant2°$的末端姿态内，当 $\alpha>0$、$\beta>0$ 时；$\alpha<0$、$\beta>0$ 时；$\alpha<0$、$\beta<0$ 时；$\alpha>0$、$\beta<0$ 时条件数。将结果绘制如图 10 所示。由于条件数越小越好，则条件数的倒数 1/cond($\boldsymbol{J}^{-1}$)越大越优。

如图 10 所示，绿色代表选择Ⅰ、Ⅲ号单元作为主动控制时在所计算空间内条件数曲面，红色代表选择Ⅰ、Ⅱ号单元作为主动控制时在所计算空间内条件数曲面。当 $\beta>0$、$\alpha>0$ 时，选择Ⅰ、Ⅲ号单元作为主动控制的运动学性能更好；当 $\beta<0$、$\alpha>0$ 时，选择Ⅰ、Ⅱ号单元作为主动控制的运动学性能更好；当 $\beta<0$、$\alpha<0$ 时，选择Ⅰ、Ⅲ号单元作为主动控制的运动学性能更好；当 $\beta>0$、$\alpha<0$ 时，选择Ⅰ、Ⅱ号单元作为主动控制的运动学性能更好。

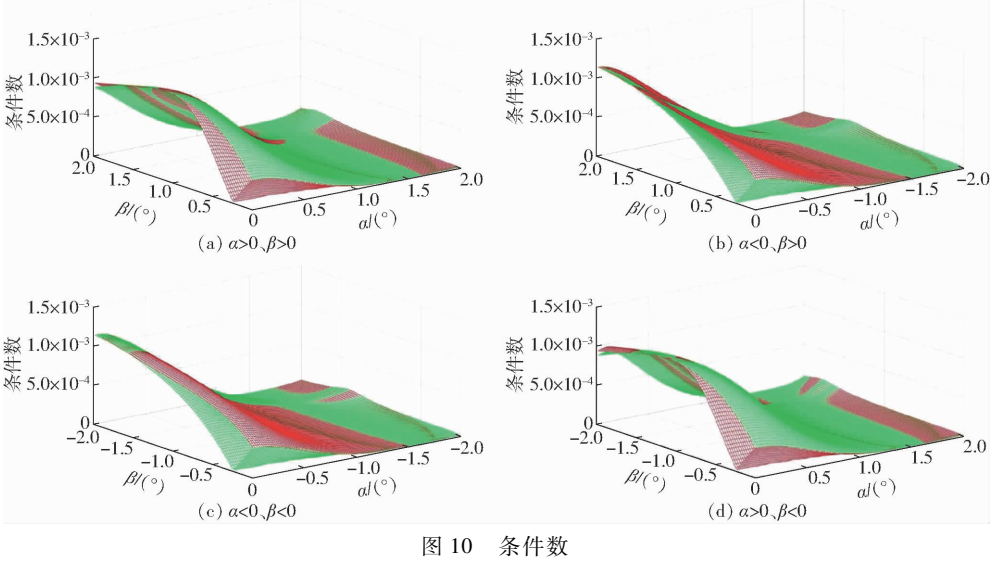


图 10　条件数

Fig. 10　Condition number

经优化后轮式并联调姿装备主动输入优化选取组合如表 3 所示。

表 3　力位混合选取策略

Tab. 3　Force level mixing selection strategy

目标姿态	位置控制	力矩控制
$\alpha>0$、$\beta>0$	Ⅰ、Ⅲ号单元	Ⅱ、Ⅳ号单元
$\alpha<0$、$\beta>0$	Ⅰ、Ⅱ号单元	Ⅲ、Ⅳ号单元
$\alpha<0$、$\beta<0$	Ⅰ、Ⅲ号单元	Ⅱ、Ⅳ号单元
$\alpha>0$、$\beta<0$	Ⅰ、Ⅱ号单元	Ⅲ、Ⅳ号单元

4　仿真与实验

4.1　冗余驱动机电联合仿真

通过 ADAMS 与 Simulink 联合仿真，建立一套可控性良好的仿真平台。ADAMS 中添加真实的物理属性与等效传感器模型，Simulink 中搭建完整的闭环控制模型，验证控制策略与算法可行性。

各分支车轮采用聚氨酯材料，硬度为 90 A 的聚氨酯材料其密度约为 1.25 g/cm^3，杨氏模量约为 60 MPa，泊松比约为 0.47，其与光滑水泥地面的动摩擦因数为 0.02，静摩擦因数为 0.56。将如上参数配置至 ADAMS 模型中。同时，建立轮式并联调姿装备的 ADAMS 物理模型力位混合 Simulink 控制模型。图 11 为 Simulink 模型框图。

以末端姿态(0,1,2)、位置(0,0,1 106)为目标位姿进行轨迹规划，经过多次仿真，确定基于位置反

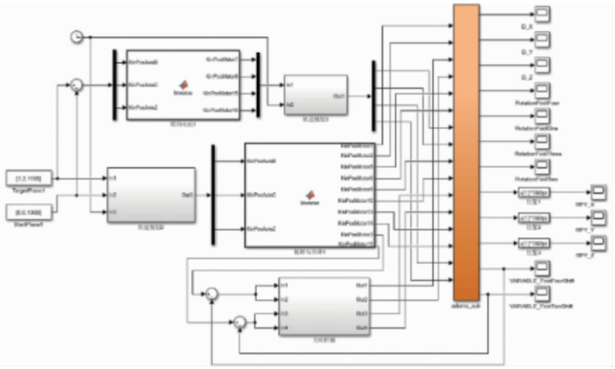


图 11 轮式并联调姿装备 Simulink 控制框图

Fig. 11 Simulink control block diagram of wheeled parallel posture adjustment equipment

馈力矩控制器中 PD 参数分别为:P 为 200,D 为 100。将 Simulink 中仿真时间设置为 200 s,根据控制框图中控制逻辑,当 ADAMS 模型中轮转电机转动至反解所计算的目标位置时,轮转电机与升降电机才允许运动完成调姿。

通过获取 ADAMS 模型中的实时位姿数据绘制 γ 随时间变化曲线如图 12 所示。调姿初始阶段 γ 的变化曲线如图 13 所示,运动过程中 γ 波动幅值小于 0.01°,调姿过程趋于平稳。

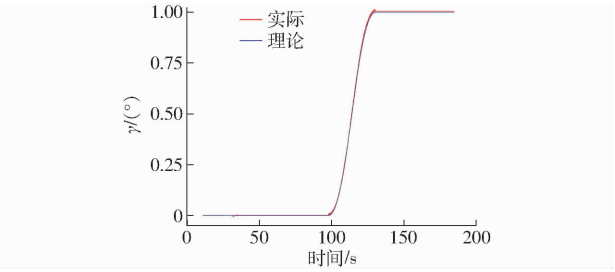


图 12 γ 随时间的变化曲线

Fig. 12 γ versus time curve

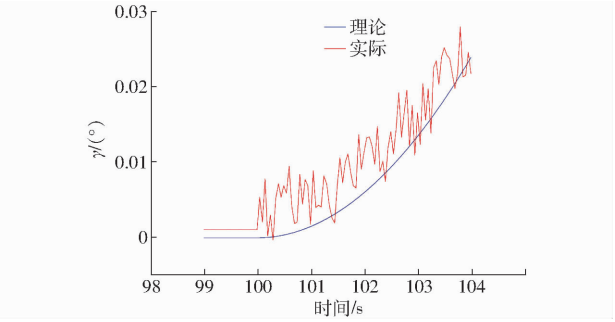


图 13 调姿初始阶段 γ 变化曲线

Fig. 13 Change of γ value at initial stage of tuning

β 随时间变化曲线如图 14 所示,调姿初始阶段 β 的变化曲线如图 15 所示,可以看出运动过程中 β 波动幅值小于 0.01°,调姿过程趋于平稳。

Z 轴位移 D_z 随时间变化曲线如图 16 所示,调姿初始阶段 D_z 变化曲线如图 17 所示。

由 表4可知,γ 姿态误差小于0.1°,β 姿态误差

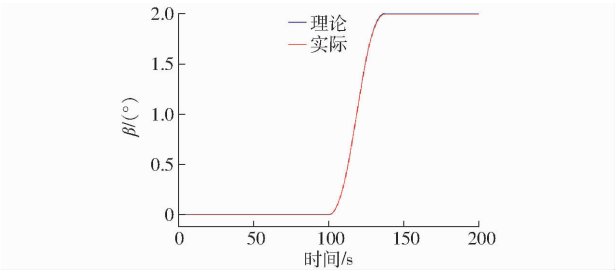


图 14 β 随时间的变化曲线

Fig. 14 β versus time curve

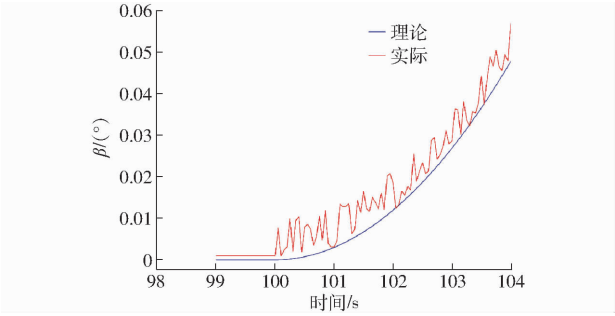


图 15 调姿初始阶段 β 变化曲线

Fig. 15 Change of β value at initial stage of tuning

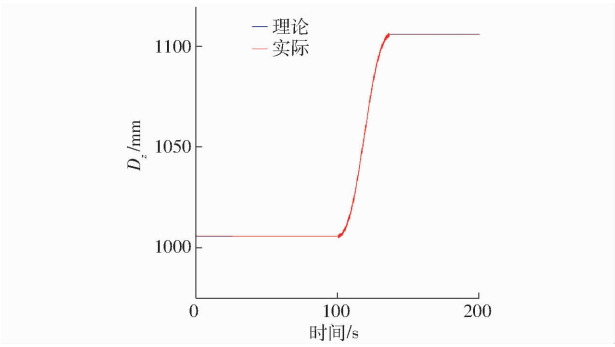


图 16 Z 轴位移随时间变化曲线

Fig. 16 Z-axis displacement versus time curve

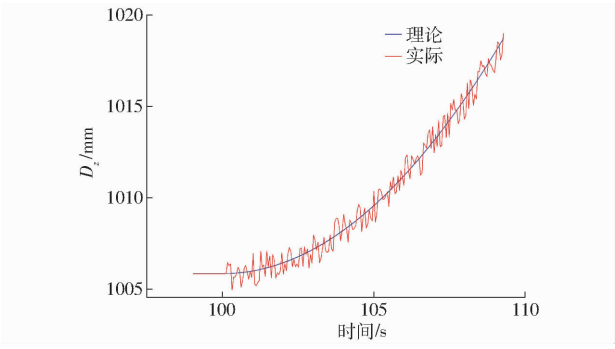


图 17 调姿初始阶段 Z 轴位移变化曲线

Fig. 17 Z-axis displacement change at initial stage of attitude adjustment

表 4 末端位姿对照

Tab. 4 End position comparison

位姿参数	理论初始	实际初始	理论目标	实际目标
γ/(°)	0	0	2	1.993 39
β/(°)	0	0	2	1.941 99
D_z/mm	1 006	1 006	1 106	1 105.981 97

小于 0.1°，D_z 位置误差小于 0.1 mm。由此可知，轮式并联调姿装备的运动学算法与调姿逻辑具有适用性。

4.2　单分支驱动实验

在控制程序实现中，需要确定每个轮转电机的预紧力，从而防止车体振荡。表5为8个电机预紧力矩。

表 5　各分支轮转电机预紧力矩

Tab. 5　Preload torque of each branch rotating motor

电机	Ⅰ号腿		Ⅱ号腿		Ⅲ号腿		Ⅳ号腿	
	1 号	2 号	1 号	2 号	1 号	2 号	1 号	2 号
预紧力矩/（mN·m）	55	50	68	60	60	60	55	55

由式(10)知，实际转向时，对于转向电机跟随误差与轮转电机输出力矩比例系数 K_p 的确定尤为重要，K_p 越小，则控制作用越不明显，系统的响应也就越慢；反之，K_p 越大，其控制作用越明显，系统的响应也就越快。如图 18 所示，将单分支机构的轮转电机进行编号。

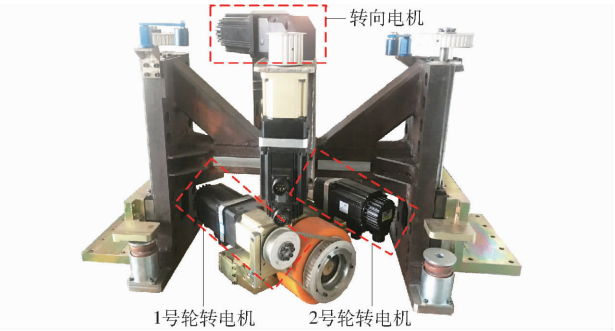


图 18　单分支轮转电机编号

Fig. 18　Single branch rotating motor number

实验中，记录轮转电机的实时输出力矩与转向电机的实时跟随误差，在参数未整定时，轮转电机输出力矩与转向电机跟随误差曲线如图 19a 所示。

由图 19a 可知，转向电机跟随误差在转向后半段出现了正负波动现象，运动停止时跟随误差较大，同时观察到轮转电机力矩输出趋于负值。这是由于单腿转向控制器中增益参数 K_p 过大导致的，当轮转电机力矩远大于辅助转向电机所需力矩时，转向电机实际位置大于理论位置，造成跟随误差变为负值，由于轮转电机输出力矩的方向由转向电机跟随误差决定，输出力矩又变为负值，造成了机构的振荡。经过整定之后，轮转电机输出力矩与转向电机跟随误差曲线如图 19b 所示。

在未进行转向电机跟随误差与轮转电机输出力矩比例系数 K_p 整定之前，轮转电机的输出力矩波动较大，且最大超调量也过大；机构震动过于明显。经过整定后，转向电机跟随误差保持在一个相对稳定的状态，轮转电机力矩也保持在稳定的变化范围之内，不再出现力矩的正负波动，且设备运动较为平稳。

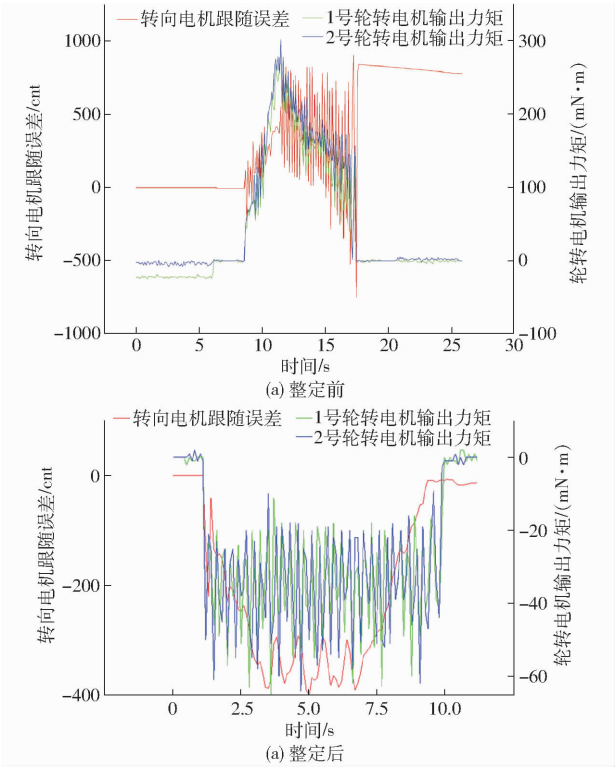


图 19　轮转电机力矩与转向电机跟随误差

Fig. 19　Torque of wheel-turn motor and following error of steering motor

4.3　运动调姿精度实验

基于调姿装备的自身情况，对空载、承载时 X、Y、Z 轴向精度进行了测量，分别如表 6、7 所示。

对设备工作空间内的点进行 3 组调姿实验验证调姿精度。第 1 组：α 由 0°增加至 2°再减少至 −2° 最终回到 0°，β 始终为 0°，α 步长为 0.5°，实验数据如表 8 所示；第 2 组：α 始终为 0°，β 由 0°增加至 2° 再减少至 −2°最终回到 0°，β 步长为 0.5°，实验数据如表 9 所示；第 3 组：α 与 β 由 0°增加至 2°再减少至 −2°最终回到 0°，α 与 β 步长均为 0.5°。通过记录倾角仪实时反馈数据并进行处理，实验数据如表 10 所示，误差分析如图 20 ~ 23 所示。

由表 8 可知，当轮式并联调姿装备以 X 轴以 0.5°为步长进行调姿，其平均误差为 0.001 6°，误差最大值出现在由 0°向 −0.5°调姿时，为 0.004 80°；姿态调整至 2°时，姿态累计误差为 0.001 3°，返回至 0°时累计误差为 0.001°。

由表 9 可知，当 Y 轴以 0.5°为步长进行调姿，其平均误差为 0.002 4°，误差最大值出现在由 0°向 0.5°调姿时，为 0.008°；设备姿态调整至 2°时，姿态

表 6 轴向位移偏差

Tab. 6 Axial displacement deviation mm

X 指令位移	理论位移	测量位移	误差	Y 指令位移	理论位移	测量位移	误差	Z 指令位移	理论位移	测量位移	误差
4	4	3.931	0.069	4	4	3.920	0.080	6	6	5.985	0.015
8	8	7.992	0.008	8	8	7.983	0.017	12	12	12.040	-0.040
12	12	11.962	0.038	12	12	11.957	0.043	18	18	17.981	0.019
16	16	15.994	0.006	16	16	15.903	0.097	24	24	24.020	-0.020
20	20	19.936	0.064	20	20	19.927	0.073	30	30	30.001	-0.001
24	24	24.056	-0.056	24	24	24.046	-0.046	36	36	36.001	-0.001
28	28	27.943	0.057	28	28	27.956	0.044	42	42	42.002	-0.002
32	32	31.962	0.038	32	32	31.953	0.047	48	48	47.991	0.009
36	36	36.014	-0.014	36	36	36.016	-0.016	54	54	54.011	-0.011
40	40	39.964	0.036	40	40	39.974	0.026	60	60	60.052	-0.052
44	44	44.015	-0.015	44	44	44.016	-0.016	66	66	66.062	-0.062
48	48	48.057	-0.057	48	48	48.059	-0.059	72	72	72.052	-0.052
52	52	52.006	-0.006	52	52	52.008	-0.008	78	78	78.002	-0.002
56	56	55.986	0.014	56	56	55.994	0.006	84	84	84.002	-0.002
60	60	60.064	-0.064	60	60	60.084	-0.084	90	90	90.012	-0.012

表 7 Z 轴位移偏差

Tab. 7 Axial-Z displacement deviation mm

Z 轴位置	Z	实际位移	理论位移	位移偏差
0	-830.243 2	0	0	0
5	-825.260 03	4.983 789 556	5	-0.016 210 444
10	-820.214 07	5.046 198 502	5	0.046 198 502
15	-815.213 3	5.002 063 518	5	0.002 063 518
20	-810.250 88	4.962 928 675	5	-0.037 071 325
25	-805.219 48	5.031 918 583	5	0.031 918 583
30	-800.191 83	5.028 038 239	5	0.028 038 239
35	-795.162 39	5.031 662 466	5	0.031 662 466
40	-790.151 5	5.011 183 711	5	0.011 183 711
45	-785.062 35	5.089 604 325	5	0.089 604 325
50	-780.033 56	5.029 361 1	5	0.029 361 1
55	-774.972 4	5.062 449 015	5	0.062 449 015

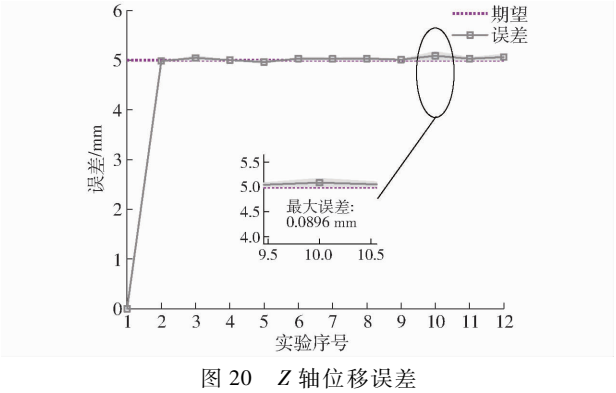


图 20 Z 轴位移误差

Fig. 20 Error analysis of Z-axis

累计误差为 0.003 5°,返回至 0°时累计误差为 0.019°。

由表 10 可知,以 X、Y 轴步长均为 0.5°调姿,其 X 轴平均误差为0.0048°,Y轴平均误差为0.0035°。

表 8 X 轴调姿数据

Tab. 8 X-axis alignment data (°)

序号	指令姿态	实际姿态	姿态调整量	调姿误差
1	0~0.5	0.034 3~0.534 8	0.500 5	0.000 5
2	0.5~1.0	0.533 9~1.032 5	0.498 6	-0.001 4
3	1.0~1.5	1.032 3~1.534	0.501 7	0.001 7
4	1.5~2.0	1.534~2.035 6	0.501 6	0.001 6
5	2.0~1.5	2.034 8~1.534 3	-0.500 5	0.000 5
6	1.5~1.0	1.534 1~1.031 9	-0.502 2	0.002 2
7	1.0~0.5	1.032 6~0.533 3	0.499 3	-0.000 7
8	0.5~0	0.533~0.033 1	0.499 9	-0.000 1
9	0~-0.5	0.033 3~-0.471 5	0.504 8	0.004 8
10	-0.5~-1.0	-0.470 7~-0.975 3	0.504 6	0.004 6
11	-1.0~-1.5	-0.975~-1.475 1	0.500 1	0.000 1
12	-1.5~-2.0	-1.474 9~-1.974 9	0.500 0	0
13	-2.0~-1.5	-1.975 7~-1.475	-0.500 7	0.000 7
14	-1.5~-1.0	-1.474 8~-1.975 1	-0.500 3	0.000 3
15	-1.0~-0.5	-0.974 7~-0.471 2	-0.503 5	0.003 5
16	-0.5~0	-0.470 1~0.033 3	-0.503 4	0.003 4

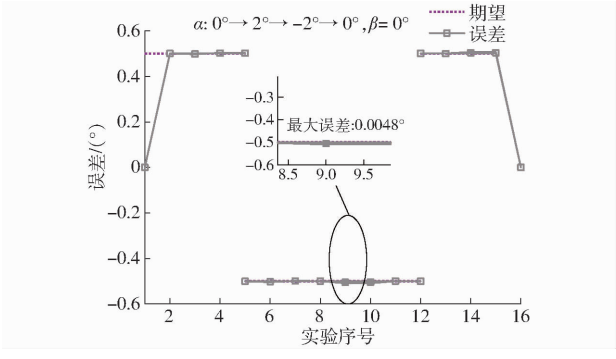


图 21 X 轴调姿误差

Fig. 21 Error analysis of X-axis

表 9　*Y* 轴调姿数据

Tab. 9　*Y*-axis attitude data　　(°)

序号	指令姿态	实际姿态	姿态调整量	调姿误差
1	0 ~ 0.5	-0.177 8 ~ 0.330 2	0.508	0.008
2	0.5 ~ 1.0	0.329 5 ~ 0.828 2	0.498 7	-0.001 3
3	1.0 ~ 1.5	0.828 7 ~ 1.326 7	0.498	-0.002
4	1.5 ~ 2.0	1.327 2 ~ 1.825 7	0.498 5	-0.001 5
5	2.0 ~ 1.5	1.825 8 ~ 1.328 9	-0.496 9	-0.003 1
6	1.5 ~ 1.0	1.328 2 ~ 0.829 7	-0.498 5	-0.001 5
7	1.0 ~ 0.5	0.829 3 ~ 0.332 9	-0.496 4	-0.003 6
8	0.5 ~ 0	0.341 ~ -0.157 2	-0.498 2	-0.001 8
9	0 ~ -0.5	-0.157 8 ~ -0.660 6	-0.502 8	0.002 8
10	-0.5 ~ -1.0	-0.660 2 ~ -1.163 1	-0.502 9	0.002 9
11	-1.0 ~ -1.5	-1.162 8 ~ -1.660 7	-0.497 9	-0.002 1
12	-1.5 ~ -2.0	-1.660 7 ~ -2.158 1	-0.497 4	-0.002 6
13	-2.0 ~ -1.5	-2.158 4 ~ 1.660 3	0.498 1	-0.001 9
14	-1.5 ~ -1.0	-1.660 4 ~ -1.161 2	0.499 2	-0.000 8
15	-1.0 ~ -0.5	-1.162 8 ~ -0.660 7	0.502 1	0.002 1
16	-0.5 ~ 0	-0.659 6 ~ -0.158 5	0.501 1	0.001 1

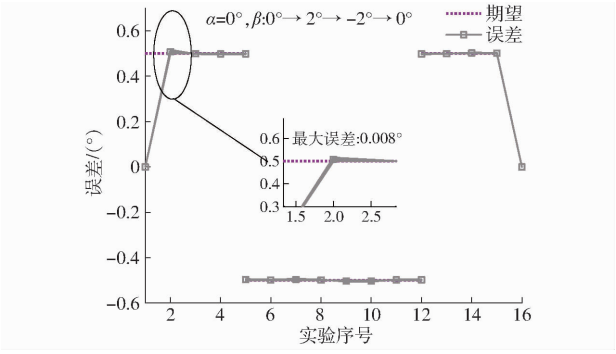


图 22　*Y* 轴联合调姿误差

Fig. 22　Error analysis of *Y*-axis

X 轴误差最大值出现在由 -0.5°向 -1°调姿时为 0.007 2°，*Y* 轴误差最大值出现在由 -0.5°向 0°调姿时，为 0.006 5°；*X* 轴姿态调整至 1°时，姿态累计误差为 0.005 7°，返回至 0°时累计误差为 0.003 1°；*Y* 轴姿态调整至 1°时，姿态累计误差为 0.001 4°，返回至 0°时累计误差为 0.000 4°。

表 10　*X*、*Y* 轴联合调姿数据

Tab. 10　Combined *X* and *Y* axes attitude data　　(°)

序号	指令姿态		实际姿态		姿态调整量		调姿误差	
	X 轴	*Y* 轴	*X* 轴	*Y* 轴	*X* 轴	*Y* 轴	*X* 轴	*Y* 轴
1	0	0	-0.144 8	0.012 9	0	0	0	0
2	0.5	0.5	0.361 6	0.512 5	0.506 4	0.499 6	0.006 4	-0.000 4
3	1	1	0.860 9	1.014 3	0.499 3	0.501 8	-0.000 7	0.001 8
4	0.5	0.5	0.360 9	0.513 1	-0.500 0	-0.501 2	0	0.001 2
5	0	0	-0.143 8	0.011 7	0.504 7	0.501 4	0.004 7	0.001 4
6	-0.5	-0.5	-0.649 8	-0.494 4	0.506 9	0.506	0.006 9	0.006
7	-1	-1	-1.155	-1.000 2	0.507 2	0.505 6	0.007 2	0.005 6
8	-0.5	-0.5	-0.648 6	-0.494 7	0.506 4	0.505 1	0.006 4	0.005 1
9	0	0	-0.141 7	0.012 5	0.506 2	0.506 5	0.006 2	0.006 5

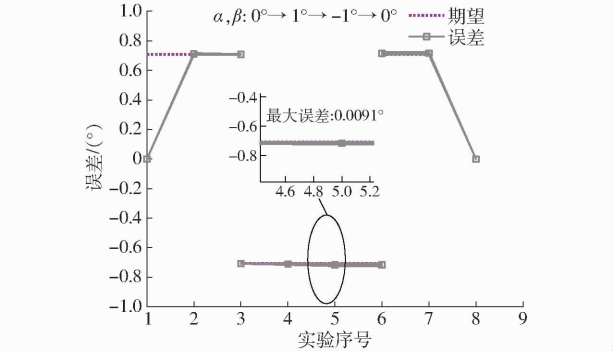


图 23　*X*、*Y* 轴调姿误差

Fig. 23　Error analysis of *X*-axis and *Y*-axis

5　结论

(1)提出了一种基于轮式的超冗余驱动移动调姿单元，并构建轮式并联调姿平台，兼顾大范围全向运动与高精度六自由度调姿运动，适用于大型复杂零部件的集成装配。

(2)针对轮式并联调姿装备单分支冗余驱动特征，从并联机构角度分析，针对轮式并联调姿装备的单分支局部冗余自由度提出了转向电机位置控制保证精度、轮转电机力矩控制辅助转向的控制策略。

(3)针对轮式并联调姿装备整体驱动冗余情况提出了力位置混合控制策略，利用螺旋理论分析位置控制轴选取的合理性。采用Ⅰ、Ⅱ号单元轮转电机作为主动控制或采用Ⅰ、Ⅲ号单元轮转电机作为主动控制均能够实现设备 6 自由度调姿运动，从运动学性能方向评估了 2 种控制方式在不同末端姿态域内的性能，得出了设备在不同目标姿态时的力位置混合控制主动输入选取策略。

(4)建立基于 ADAMS 与 Simulink 软件的机电一体化联合仿真模型，验证了设备调姿逻辑、运动学反解模型的可行性与采用整体冗余控制策略的控制精度。验证了单元转向功能、行走功能、调姿功能与

控制策略的有效性。

(5)单元转向实验以转向电机跟随误差为控制单元的输入,同时引入轮转电机的预紧力矩,对轮转电机的力矩赋值进行了实验,确定了较为合适的比例系数。调姿实验表明,Z 轴位移精度每 5 mm 定位精度在 0.1 mm 内,X、Y 轴调姿精度误差在 0.1°内。

参 考 文 献

[1] 申景金, 郭家桢, MASOUD Kalantari. 基于距离误差的机器人参数辨识模型与冗余性分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 372 - 378.
SHEN Jingjin, GUO Jiazhen, MASOUD Kalantari. Parameter calibration model and redundancy analysis of robot based on distance error[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 372 - 378. (in Chinese)

[2] GAO Guanbin, SUN Guoqing, NA Jing, et al. Structural parameter identification for 6 DOF industrial robots[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 113: 145 - 155.

[3] 史晓佳, 张福民, 曲兴华, 等. KUKA 工业机器人位姿测量与在线误差补偿[J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 1 - 7.
SHI Xiaojia, ZHANG Fumin, QU Xinghua, et al. Position and attitude measurement and online errors compensation for KUKA industrial robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8): 1 - 7. (in Chinese)

[4] AHMED J, ILIAN A B. Non-kinematic calibration of a six-axis serial robot using planar constraints[J]. Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 2015, 40: 325 - 333.

[5] AHMED J, ILIAN A B. Kinematic calibration of a six-axis serial robot using distance and sphere constraints[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(1 - 4): 515 - 523.

[6] 于荣荣, 李永亮, 董礼港, 等. 移动并联式六自由度转运调姿方法研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 421 - 426.
YU Rongrong, LI Yongliang, DONG Ligang, et al. Six degrees of freedom transfer and attitude adjustment method of mobile parallel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 421 - 426. (in Chinese)

[7] 张春燕, 平安. 含折展平台的多模式移动并联机构设计与运动特性分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 449 - 458.
ZHANG Chunyan, PING An. Design and kinematic analysis of new multi-mode hilly orchard mobile parallel mechanism with folding platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 449 - 458. (in Chinese)

[8] 温晶晶, 刘承骞, 吴斌, 等. 基于 Stewart 平台的导弹舱段自动对接方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2017, 37(5): 47 - 51,55.
WEN Jingjing, LIU Chengwu, WU Bin, et al. Study on auto-docking method of missile cabins based on Stewart platform[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2017, 37(5): 47 - 51,55. (in Chinese)

[9] 易旺民, 段碧文, 高峰, 等. 大型舱段装配中的水平对接技术[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(9): 2354 - 2360.
YI Wangmin, DUAN Biwen, GAO Feng, et al. Level docking technology in large cabin assembly[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(9): 2354 - 2360. (in Chinese)

[10] 孟少华, 胡瑞钦, 张立建, 等. 一种基于机器人的航天器大型部件自主装配方法[J]. 机器人, 2018, 40(1): 81 - 88,101.
MENG Shaohua, HU Ruiqin, ZHANG Lijian, et al. A method of autonomous assembly of large spacecraft components using robot[J]. Robot, 2018, 40(1): 81 - 88,101. (in Chinese)

[11] 王启明, 张汉祖, 蒋江月, 等. 平面平台型 6 - PSS 并联机构构型选择与参数优化[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 449 - 458.
WANG Qiming, ZHANG Hanzu, JIANG Jiangyue, et al. Configuration selection and parameter optimization of 6 - PSS parallel mechanism with planar platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 449 - 458. (in Chinese)

[12] ZHU Yongguo, HUANG Xiang, LI Shuanggao. A novel six degrees-of-freedom parallel manipulator for aircraft fuselage assemble and its trajectory planning[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2015, 38(7): 928 - 937.

[13] 郭志敏, 蒋君侠, 柯映林. 基于 POGO 柱三点支撑的飞机大部件调姿方法[J]. 航空学报, 2009, 30(7): 1319 - 1324.
GUO Zhimin, JIANG Junxia, KE Yinglin. Posture alignment for large aircraft parts based on three POGO sticks distributed support[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(7): 1319 - 1324. (in Chinese)

[14] 邱宝贵, 蒋君侠, 毕运波, 等. 大型飞机机身调姿与对接试验系统[J]. 航空学报, 2011, 32(5): 908 - 919.
QIU Baogui, JIANG Junxia, BI Yunbo, et al. Posture alignment and joining test system for large aircraft fuselages[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(5): 908 - 919. (in Chinese)

[15] 姜丽萍. 基于模型定义的中机身自动化装配关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
JIANG Liping. Research on key technology for fuselage automatic assembly based on model definition[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astroautics, 2016. (in Chinese)

[16] KIM S, JENS W. Robot-based system for handling of aircraft shell parts[C]// 5th Cats 2014 - Cirp Conference on Assembly Technologies and Systems, 2014.

[17] 马剑锋. 导弹数字化柔性对接系统设计及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
MA Jianfeng. Design and experimental study of digital missile assembly system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)

[18] 尤波, 丁宁, 李佳钰, 等. 载人六足机器人驾驶决策[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(8): 150 - 158,166.
YOU Bo, DING Ning, LI Jiayu, et al. Driving decision of manned hexapod robot[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(8): 150 - 158,166. (in Chinese)

[19] 贾阳，孙泽洲，郑旸，等. 星球车技术发展综述[J]. 深空探测学报(中英文)，2020，7(5)：419－427.
JIA Yang，SUN Zezhou，ZHENG Yang，et al. Overview on development of planetary rover technology[J]. Journal of Deep Space Exploration，2020，7(5)：419－427. (in Chinese)
[20] 刘雨婷. 复合轮足机器人设计与实现[D]. 重庆：西南大学，2021.
LIU Yuting. Design and implementation of compound wheel-footed robot[D]. Chongqing：Southwest University，2021. (in Chinese)
[21] 宋朋. 轮腿式六足机器人机构设计与分析[D]. 秦皇岛：燕山大学，2021.
SONG Peng. Design and analysis of wheel-legged hexapod robot mechanism[D]. Qinhuangdao：Yanshan University，2021. (in Chinese)
[22] GRAND C，BENAMAR F，PLUMET F，et al. Decoupled control of posture and trajectory of the hybrid wheel-legged robot hylos[C]//2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation，2004：5111－5116.
[23] CHOI B J，SREENIVASAN S V. Motion planning of a wheeled mobile robot with slip-free motion capability on a smooth uneven surface[C]//1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation，1998：3727－3732.
[24] 谢哲东，马婧，孟祥雨，等. 轮腿式越障机器人的研究及发展[J]. 机械工程与自动化，2017(1)：219－220.
XIE Zhedong，MA Jing，MENG Xiangyu，et al. Research and development of wheel-legged obstacle-crossing robot[J]. Mechanical Engineering & Automation，2017(1)：219－220. (in Chinese)
[25] BRIAN R W. ATHLETE：an option for mobile lunar landers[C]//2008 IEEE Aerospace Conference，2008：2711－2718.
[26] 牛丽周，丁亮，高海波，等. 软体足式机器人驱动、建模与仿真研究综述[J]. 机械工程学报，2021，57(19)：1－20.
NIU Lizhou，DING Liang，GAO Haibo，et al. Review of actuation，modeling and simulation in soft-legged robot[J]. Journal of Mechanical Engineering，2021，57(19)：1－20. (in Chinese)
[27] SUNSPIRAL V，WHEELER D W，CHAVEZ-CLEMENTE D，et al. Development and field testing of the footfall planning system for the athlete robots[J]. Journal of Field Robotics，2012，29(3)：483－505.
[28] BAILO C P，YEN C J. Open modular architecture controls at GM powertrain-technology and implementation[C]// Open Architecture Control Systems and Standards，1997：52－63.
[29] LU Dongping，DONG Erbao，LIU Chunshan，et al. Design and development of a leg-wheel hybrid robot "HyTRo-Ⅰ"[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems，2013.
[30] 刘冬琛，王军政，汪首坤，等. 一种基于并联 6 自由度结构的电动轮足机器人[J]. 机器人，2019，41(1)：65－74.
LIU Dongchen，WANG Junzheng，WANG Shoukun，et al. An electric wheel-foot robot based on parallel 6－DOF structure[J]. Robot，2019，41(1)：65－74. (in Chinese)

(上接第 411 页)

[11] WILSON J. Guidance of agricultural vehicles-a historical perspective[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2000，25(1－2)：3－9.
[12] CHATEAU T，DEBAIN C，COLLANGE F，et al. Automatic guidance of agricultural vehicles using a laser sensor[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2000，28(3)：243－257.
[13] 刘兆祥，刘刚，籍颖，等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统[J]. 农业机械学报，2010，41(11)：148－152.
LIU Zhaoxiang，LIU Gang，JI Ying，et al. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on self-adapted fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2010，41(11)：148－152. (in Chinese)
[14] O'CONNOR M. Carrier-phase differential GPS for automatic control of land vehicles[D]. Stanford：Stanford University，1997.
[15] 陈军，鸟巢谅，朱忠祥. 拖拉机在牧草地上自动引导行走的控制[J]. 农业机械学报，2005，36(7)：104－107.
CHEN Jun，TORISU Ryo，ZHU Zhongxiang. Study on automatic guidance for tractor on grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2005，36(7)：104－107. (in Chinese)
[16] BELL T. Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2000，25(1/2)：53－66.
[17] BEVLY D，GERDES J，PARKINSON B. A new yaw dynamic model for improved high speed control of a farm tractor[J]. Journal of Dynamic Systems，Measurement and Control，2002，124(4)：659－667.
[18] EATON R，POTA H，KATUPITIYA J. Path tracking control of agricultural tractors with compensation for steering dynamics[C]//IEEE Conference on Decision & Control，2009：7357－7362.
[19] EATON R，KATUPITIYA J，POTA H，et al. Robust sliding mode control of a tractor under the influence of slip[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics，2009：1873－1878.
[20] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control[M]. New York：Springer Science & Business Media，2011.
[21] 钟银，薛梦琦，袁洪良. 智能农机 GNSS/INS 组合导航系统设计[J]. 农业工程学报，2021，37(9)：40－46.
ZHONG Yin，XUE Mengqi，YUAN Hongliang. Design of the GNSS/INS integrated navigation system for intelligent agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE，2021，37(9)：40－46. (in Chinese)
[22] 胡寿松，王执铨，胡维礼. 最优控制理论与系统[M]. 北京：科学出版社，2005.