

# 面向柔性装配的全向移动技术

姚利明,杨森元,张亮亮

(中国航空制造技术研究院,北京 100024)

**[摘要]** 结合实际需求,设计了一种高可靠的模块化重载全向轮组和全向移动平台,具有结构紧凑、承载大、定位精度高的优势。全向移动平台采用4套集驱动、转向于一体的电动全向轮组,即每个轮组由两台电机分别进行行走和转向驱动。对其进行了全向移动功能、负载能力、运动精度以及刹车距离等试验。试验结果表明:全向移动平台各项功能指标达到了预期的设计目标,与工业机器人系统较好地完成了全向移动平台在柔性装配中的任务。

**关键词:** 全向轮组;全向移动平台;工业机器人;柔性装配

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2017.23/24.064



姚利明

工程师,研究方向为机器人技术、非标自动化设计。

数字化柔性装配对提高装配质量和装配效率,降低制造和装配成本,缩短研制周期有着十分重要的意义,是飞机数字化制造的一个重要环节<sup>[1]</sup>。而工业机器人具有良好的作业柔性和扩展性,随着智能制造的普及,工业机器人越来越广泛地应用于数字化柔性装配系统,通过快速重构能够形成适应新环境、新任务的机器人系统。

航空航天大尺度产品具有不便

移动的特点,在制造装配过程中通常采用固定、专用基座工业机器人,导致其工作效率低、柔性差,因此移动式工业机器人成为新途径。将工业机器人安装在移动平台上,使其围绕产品移动作业,能够有效提高装备柔性,解决航空航天大尺度产品不移动的问题<sup>[2]</sup>。与传统工业机器人相比,同一台移动式工业机器人可以在多个工位上完成相同的作业任务,而不需要移动产品,显著提高了工业机器人的利用率。

除此之外,航空航天产品的运输是产品制造装配过程中的一个重要环节,而移动平台本身作为一种半自主机器人,在航空航天制造过程的工序流转和总装对接中发挥着重要作用。移动平台已成为航空航天制造领域重载运输平台的新趋势,可以替代大尺度产品装配过程中使用的各种导轨、气垫和专用运输架车。F-35生产过程中使用了6台电池驱动的移动平台,在各自动化机床间转运前机身和机翼部件,以完成钻孔、铣削和蒙皮对接等操作<sup>[3]</sup>。成飞公司研制了一种飞机大部件全向移动平台,以满足大尺度产品的运输作业要求<sup>[4]</sup>。

移动平台技术是数字化柔性装配关键技术之一。相比轨道、天车、起重机等传统起重运输设备,气垫技术使飞机的柔性生产成为可能<sup>[5]</sup>。与导轨式、气垫式移动平台相比,轮式移动平台具有灵活性好,不受使用场地限制等优势,对厂房基建、气源供应等无严格要求,能够节省外部设备的投入和维护费用。而轮式移动平台的典型代表 Mecanum 轮式全向平台的应用受到其承载小、运动精度低的限制,此类移动平台广泛应用在足球机器人、清洁机器人等服务机器人中<sup>[6]</sup>。因此,本文设计了一种新型全向移动平台,具有承载大、直线性好、作业空间小的优势,能够广泛应用于航空航天等领域。

## 全向移动平台

全向移动技术是从移动机器人领域发展起来的一种新型车辆移动技术,为机器人提供前后、左右和自旋3个自由度的平面运动,提高移动机器人的灵活性和可达性,解决传统应用中位置调整能力较弱和定位不准确的问题。应用于航空航天领域的移动平台通常需满足以下技术要

求:

- (1) 全向移动功能,包括任意方向平移和原地回转,作业空间小;
- (2) 承载能力大,能够满足大部件的转运及作业工况下的稳定支撑;
- (3) 定位精度高,位置分辨率优于  $\pm 1\text{mm}$ ;
- (4) 动力、控制、执行等系统集成度高,结构紧凑;
- (5) 拓展性好,可承载多种产品;
- (6) 操控简便,自动化程度高。

图1所示为新型轮式全向移动平台,具有满足上述技术要求的能力。移动平台主要由平台台体、全向轮组、电控系统、蓄电池组、收纳柜等组成。全向移动平台采用4套全向轮组,每套轮组均为电动万向轮,分别由两台伺服电机驱动行走和转向,可以实现无级调速。移动平台转向采用差速设计,以减小转弯半径,并可实现原地回转。

全向移动平台采用4个电动全向轮组,轮组的驱动和转向均由直流伺服电机提供动力,供电采用免维护的铅酸蓄电池。控制4个全向轮组的旋转角度,全向移动平台具有多种行走模式,进而实现全向移动平台的全向移动功能。通过不同的行走模式控制使平台具有直行、横行、转弯及原地回转等功能,其典型运行模式如图2所示。

全向移动平台能够配置光学或电磁自动导引系统,沿设定路线自动循迹行驶,将产品从起始点运送到指定地点。此外,全向移动平台还可借助 iGPS 导航,转运产品并将产品安放在目标位置。移动平台的自动循迹及 iGPS 导航功能使其能够集成在数字化柔性装配系统中。表1所示为全向移动平台的主要功能参数。

## 全向轮组

### 1 轮组构成

全向移动平台实现全向移动功能的关键在于全向轮组的设计。目

前全向移动技术的实现主要采用全向轮行走技术,可以实现全向移动的全向轮有很多种,常见的有 Mecanum 轮、正交轮和球形轮等。目前对全向轮组的研究与应用更多地集中在 Mecanum 轮,但是目前 Mecanum 轮的应用受到承载低、定位精度差等限制。

为此,设计了一种新型模块化重载全向驱动轮组。根据航空航天产

品特性,全向轮组采用全电动驱动控制方式。图3为全向轮组结构示意图,主要由安装基座、回转式减速器、转向电机、转向减速机、行走电机、行走减速机、支撑轮等构成。为有效避免室内运行时轮组对地面的磨损,支撑轮通常采用聚氨酯轮。

行走电机与行走行星减速机并行布置,通过1:1同步带轮传递动力,此设计可使轮组结构紧凑,减小

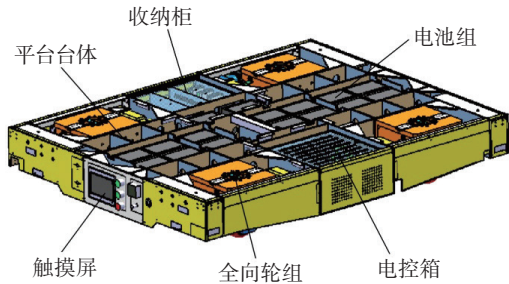


图1 全向移动平台结构示意图

Fig.1 Structure diagram of omni-directional vehicle

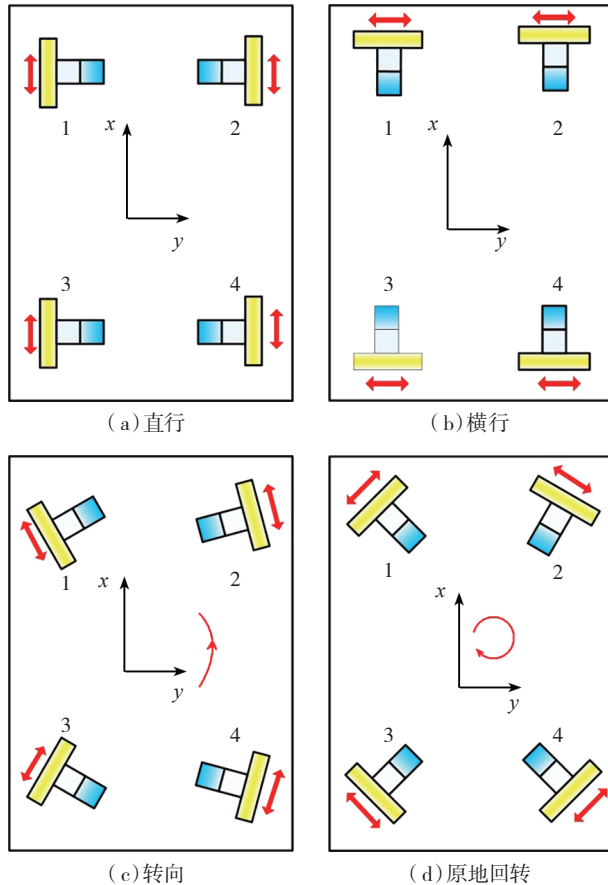


图2 典型运行模式

Fig.2 Typical moving mode

全向轮组回转半径;同步带轮设计有张紧装置,方便进行安装和调节。转向电机与转向减速机、回转式减速器采用串连布置,节省安装空间。在全向轮组旋转运动的两个极限位置处安装有限位开关,防止运动超限,保障产品安全。

## 2 测角单元

为了精确控制行走过程中全向轮组的转向,在4个轮组上分别安装角度传感器,反馈全向轮组的转向角度值。

全向轮组的双向旋转运动角度由测角单元测量并反馈,图4所示为测角单元原理及构成。测角单元主要由编码器安装板、编码器和编码器输入轴组成。编码器通过编码器安装板与轮组基座固定,编码器输入轴固定在轮组安装基座上,其轴端与编码器内圈固定。全向轮组旋转时,支撑轮安装座与轮组基座发生相对旋转,支撑轮安装座带动编码器输入轴旋转,编码器输出角度变化,进而实时检测支撑轮当前所处角度。

选用的编码器为轴套安装形式,可有效节约安装空间,并具有良好的抗机械损伤性能,能够承受较高的轴向和径向负载。将测角单元布置在转向单元回转式减速器的内部,结构紧凑,集成度高。

## 3 离合设计

当行走单元故障导致驱动轮无法自行行走的情况下,可松开连接螺钉,卸下离合端盖,通过牵引的方式移动全向移动平台,保证所承载产品的安全。图5为轮组离合设计示意图。

### 电控系统

全向移动平台的主控单元选用高性能可编程逻辑控制器(PLC),用于外设信号处理和移动控制。伺服驱动控制回路的加电、伺服驱动主回路的加电、驱动电机的选择、驱动电机的状态以及外围信号(限位开

表1 全向移动平台性能参数

项目	指标
尺寸/mm	2600×2000×450
额定承载/t	10
速度/(m·min <sup>-1</sup> )	0~15
定位精度/mm	±1
点动精度/mm	1
刹车距离/mm	<20
爬坡能力/(°)	5
续航里程/m	500
操控方式	有线/无线

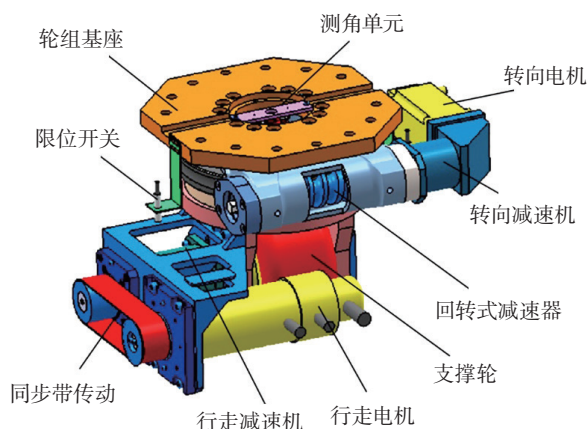


图3 全向轮组结构示意图

Fig.3 Structure diagram of omni-directional wheel

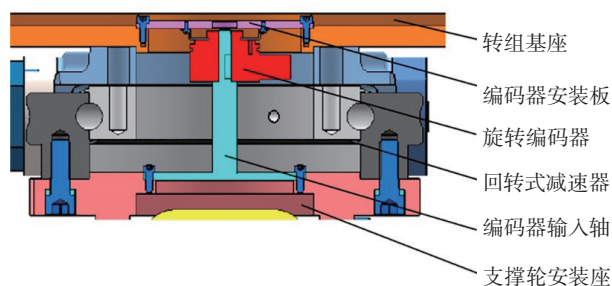


图4 测角单元

Fig.4 Measurement unit of rotation angle

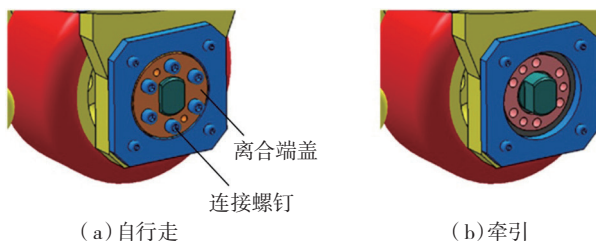


图5 离合设计

Fig.5 Safety design of clutch

关、声光报警信号等)的输入输出等均由 PLC 检测和控制。PLC 还承担接收触摸屏下达的各种命令和任务,根据指令和各传感器的检测信号,完成转运模块的行走控制。同时,PLC 通过各伺服驱动器,控制移动平台完成行走等操作,实现平台的前进、后退、转弯、横移及原地旋转、微动控制等功能,并可根据要求进行无级调速。

图 6 所示为全向移动平台控制系统的控制框图,主要包含:主控单元、驱动单元、遥控单元、人机交互单元、供电单元和循迹单元等。

人机交互单元主要用于行走微动控制、系统参数设定及运行状态、故障信息、通讯状态的显示等,便于操作者实时观察移动平台的运行状况。循迹单元和防碰撞单元作为 PLC 控制的检测单元,实时将所检测的数据传送到 PLC,PLC 通过其内部一系列的相关算法,最后转换为相关的控制指令,不断实时调整驱动单元,实现自动循迹。同时,循迹单元和防碰撞单元的数据经 PLC 实时传送到人机界面上并实时显示出来。

移动平台具有有线操作盒和无线遥控器两种操控方式,操作盒/遥控器上包括操纵杆、运动方式选择按钮及其他各类操作按钮、急停按钮等。操作盒/遥控器具有液晶显示区,具有旋转角度、速度以及故障显示等功能。两种操控方式均采用操纵杆控制移动平台的运动,并具有高低速选择功能。图 7 为行走控制原理图,遥控器发出控制指令给 PLC,PLC 作为控制器单元负责逻辑运算,将计算后的控制值输出给电机控制器,最终由电机执行需要的操作。

全向移动平台安全防护进行了特殊设计,主要为:

- (1)行走电机带有刹车,全向移动平台前后端以及操作盒/遥控器均设置有急停按钮;
- (2)系统设定有声光报警装置,

用于运行状态中各种报警和故障的提示,故障发生时自动停车;

(3)电控和产品分别接地,相互绝缘;

(4)当出现故障时或电池电压过低时,会自动报警,在排除故障后可通电重启;

(5)手操盒液晶显示区有故障显示功能,便于实时监测出现的一些故障;

(6)手操盒/遥控器的速度控制系统有自锁功能,当一段时间未操作时,必须重新按下使能键才能进行操纵杆的操作,防止人为原因造成系统误动作;

(7)配备安全防碰撞单元,用于实时检测周围障碍物与车体的安全

距离,进行报警提示或自动停车。

### 试验与验证

为验证所研制的全向移动平台各项功能指标达到了预期的设计目标,对其进行负载试验,主要包括移动试验、续航试验、刹车试验、定位试验、点动试验。首先在移动平台上加载 1.25 倍额定载荷,即 12.5t 模拟负载,进行以下功能试验:

(1)行走试验。全向移动平台进行前进、后退、平移、原地旋转、加速、减速等功能测试,观察移动过程是否平稳。

(2)续航试验。控制全向移动平台行驶 500m,观察电池电量。

(3)刹车试验。移动平台移动

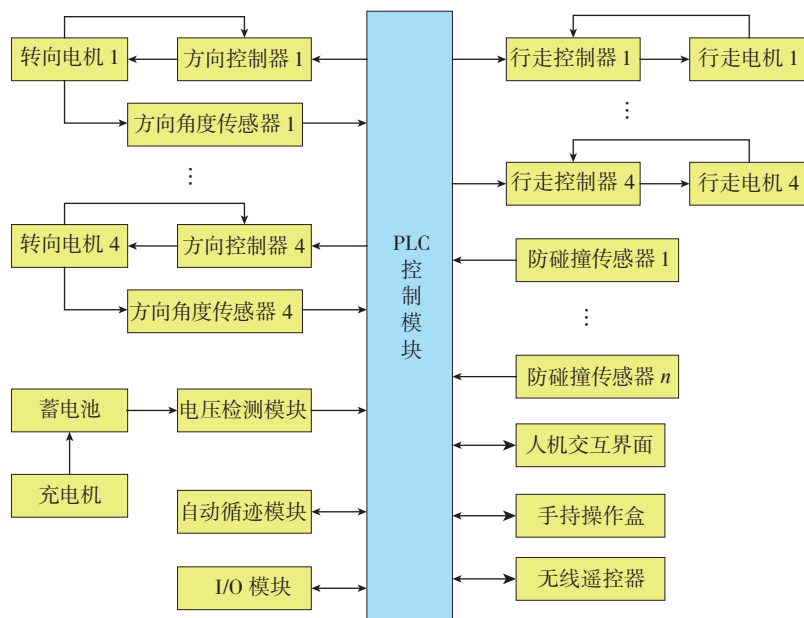


图6 电控系统整体框图

Fig.6 Schematic diagram of control system

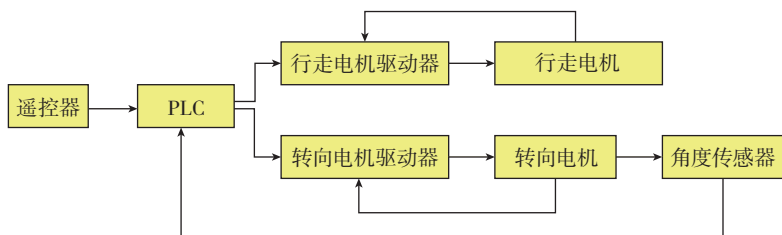


图7 行走控制原理

Fig.7 Control scheme of moving unit

过程中进行刹车试验,测量刹车距离。

(4)定位试验。测量移动平台前端实际位移量与设定位移理论值差值,即定位精度。

(5)点动试验。测量移动平台前端在一次控制指令下行走的最小位移,即点动精度。

图8所示为负载试验,移动平台负载试验所测得的结果如表2所示。

负载试验结果表明,所研制的全向移动平台各项功能参数满足设计要求。

### 应用

传统飞机部件装配平台自动化程度较低,且受到产品装配制造车间空间的限制,已无法适应现代化的飞机生产需求。而全向移动平台具有较高的自动化程度,可充分利用飞机制造车间有限的场地,提高飞机装配制造生产率,缩短飞机的制造周期。图9所示为中国航空制造技术研究院研制的全向移动平台,具有结构紧凑、运行灵活,可靠性高等特点,可以广泛应用于飞机柔性装配及大部件运输领域。

机器人配合各种末端执行器可以实现不同的装配作业,在航空航天产品自动化装配中引入机器人可以提高系统的灵活性和可达性。空客公司、西班牙SERRA公司等相继开发了机器人柔性装配系统,完成制孔、安装紧固件等装配任务<sup>[7]</sup>,国内目前主要用机器人制孔<sup>[8]</sup>,在机器人自动钻铆系统的研究与应用上也取得了较大的进展<sup>[9]</sup>。未来航空航天制造装配工业机器人需要更好地适应单件、小批量生产模式下多变的任务需求、复杂的场地环境<sup>[10]</sup>。全向移动技术与机器人技术相结合,可以有效提高机器人利用率,真正发挥出机器人的优势和特点。图10所示为全向移动平台用于机器人柔性装配系统,与工业机器人系统能够较好地完



(a)行走试验



(b)点动试验

图8 负载试验

Fig.8 Load experiments

表2 负载试验结果

试验项目	试验结果
行走试验	各模式下运行平稳
续航试验	行驶 500m, 蓄电池电量充足
最大速度 / (m·min <sup>-1</sup> )	17
刹车距离 /mm	16
定位精度 /mm	± 1
点动精度 /mm	0.8



图9 全向移动平台实物

Fig.9 Omni-directional vehicle

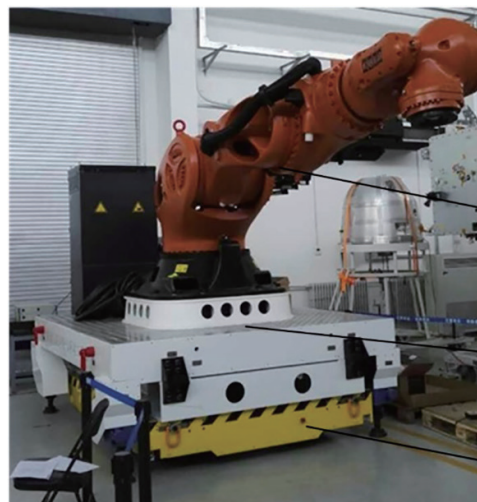


图10 精密装配机器人移动平台

Fig.10 Omni-directional vehicle with an industrial robot for precision assembly

成全向移动平台在柔性装配中的任务。

通过两台或多台全向移动平台的协同作业,能够完成航空航天大尺度产品在装配制造车间内的搬运移动,从而合理、高效地组织飞机部件的调配,达到制造装配利益最大化。

## 后续研制方向

在满足短距离转运的条件下,所研制的全向移动平台在续航能力方面还存在一些不足,后续工作主要集中在系统电源管理、功率分配以及分时全驱等方面对全向移动平台进行优化改进。

## 参考文献

- [1] 邹方,薛汉杰,周万勇,等.飞机数字化柔性装配关键技术及其发展[J].航空制造技术,2006(9):30-35.
- ZOU Fang, XUE Hanjie, ZHOU Wanyong, et al. Key technology and development of aircraft digital flexible assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(9): 30-35.
- [2] 冯华山,秦现生,王润孝.航空航天制造领域工业机器人发展趋势[J].航空制造技术,2013(19):32-37.
- FENG Huashan, QIN Xiansheng, WANG Runxiao. Developing trend of industrial robot in aerospace manufacturing industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(19): 32-37.
- [3] 任晓华.新型飞机自动化装配技术[J].航空制造技术,2005(12):32-35.
- REN Xiaohua. Automatic assembly technology of new kind aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005(12): 32-35.
- [4] 姚定,余景,黄翔,等.基于全向移动与多点柔性支撑的飞机大部件运输技术[J].南京航空航天大学学报,2012,44(S):73-78.
- YAO Ding, SHE Jing, HUANG Xiang, et al. Large aircraft component transport based on omnidirectional mobile and multi-point supporting[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(S): 73-78.
- [5] 李振华.德国 DELU 气垫技术在新一代飞机工厂的应用[J].航空制造技术,2009(12):104-105.
- LI Zhenhua. Application of DELU air cushion technology in new generation aircraft factory[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(12): 104-105.
- [6] 王一治,常德功. Mecanum 四轮全方位系统的运动性能分析及结构形式优选[J].机械工程学报,2009,45(5):307-310.
- WANG Yizhi, CHANG Degong. Motion performance analysis and layout selection for motion system with four mecanum wheels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 307-310.
- [7] 刘善国.先进飞机装配技术及其发展[J].航空制造技术,2006(10):38-41.
- LIU Shanguo. Advanced technology and development of aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(10): 38-41.
- [8] 杜宝瑞,冯子明,姚艳彬,等.用于飞机部件自动制孔的机器人制孔系统[J].航空制造技术,2010(2):47-50.
- DU Baorui, FENG Ziming, YAO Yanbin, et al. Robot drilling system for automatic drilling of aircraft component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(2): 47-50.
- [9] 高明辉,张杨,张少攀,等.工业机器人自动钻铆集成控制技术[J].航空制造技术,2013(20):74-76.
- GAO Minghui, ZHANG Yang, ZHANG Shaopan, et al. Integrated control technology of automated fastening with industry robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(20): 74-76.
- [10] 秦瑞祥,邹冀华.工业机器人在飞机数字化装配中的应用[J].航空制造技术,2010(23):104-108.
- QIN Ruixiang, ZOU Jihua. Application of industrial robot in aircraft digital assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(23): 104-108.

通讯作者:姚利明, E-mail: bitlmyao@126.com。

## Omni-Directional Vehicle for Flexible Assembly

YAO Liming, YANG Senyuan, ZHANG Liangliang

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

**[ABSTRACT]** Combined with the actual demand, a highly reliable omni-directional wheel and an omni-directional vehicle with advantages of compact, high load-bearing, high positioning accuracy were established. The omni-directional vehicle with four electric omni-directional wheels that moving and turning in one set, that is, moving and rotation of each wheel are driven by two motors respectively. Several main performance indexes of omni-directional vehicle such as omni-directional move function, carrying capacity, kinematic accuracy and emergency reaction ability were experimented. The experiment results showed that the design and development of omni-directional vehicle has achieved the expected targets, and omni-directional vehicle has fulfilled the task with an industrial robot for flexible assembly successfully.

**Keywords:** Omni-directional wheel; Omni-directional vehicle; Industrial robot; Flexible assembly

(责编 大漠)