

# 工业机器人的技术发展及其应用

骆敏舟<sup>1</sup>, 方健<sup>2</sup>, 赵江海<sup>1</sup>

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院先进制造技术研究所, 江苏 常州 213164;

2. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027)

**摘要:**介绍了工业机器人的发展史,指出了机器人产业将是未来十年国内装备制造业中成长性最快的行业。同时介绍了工业机器人的分类和主要的应用领域,分析了工业机器人未来市场巨大需求的深层次原因,论述了工业机器人处于爆发式增长的必然性。在机器人研究方面,对我国工业机器人发展中亟待解决的问题进行了探讨,重点是工业机器人关键技术和基础零部件制造工艺。提出了工业机器人的发展方向和下一代工业机器人的基本构想,预测了下一代工业机器人的发展途径和发展的关键。

**关键词:**工业机器人; 市场需求; 关键技术; 存在问题; 下一代工业机器人

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2014)06-0001-04

## The Development and the Application of the Industrial Robot Technology

LUO Min-zhou<sup>1</sup>, FANG Jian<sup>2</sup>, ZHAO Jiang-hai<sup>1</sup>

(1. Institute of Advanced Manufacturing Technology, Changzhou 213164, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** We first present the development history of the industrial robot simply. Based on the developing trends of the industrial robot in the next decade, we also indicate that the robot industry will become the fastest growing industry in the equipment manufacturing industry. In addition, the reason of the huge demand of the robot in the industrial market is also analyzed. Besides, the deeply reason that the industrial robot will inevitably become an explosive growth is discussed directly. Based on these descriptions, the classification and its application of the industrial robot are also introduced clearly. Subsequently, the serious problems which restrict our country's robot development are depicted from the view of the robot key technology and basic components. Conclusively, the trends of the industrial robot development and the structure of the next generation of robots are also proposed at the end of this paper and the development path and the development core are also predicted at the end of this paper.

**Keywords:** industrial robot; demand of the market; key technology; existence problem; next generation of industrial robot

## 0 引言

工业机器人涉及到机械、电子、控制、计算机、人工智能、传感器、通讯与网络等多个学科和领域,是多种高新技术发展成果的综合集成。因此它的发展与上述学科发展密切相关。工业机器人在制造业的应用范围越来越广阔,其标准化、模块化、网络化和智能化的程度也越来越高,功能越来越强,并向着成套技术和装备的方向发展<sup>[1-2]</sup>。

## 1 机器人发展状况

### 1) 国外发展概况

日本具有国际上最先进的机器人技术,就全世界范围来看,全球工业机器人约有4成在日本。不论在技术方面,还是在市场规模方面,日本可以称得上是“机器人大国”。日本在2004年5月发布的“新产业发展战略”中所指出的7个产业领域,机器人产业也是其中之一,同时在进一步实施“新产业发展战略”的“新经济成长战略”报告中,也把机器人放在使日本成为“世界技术创新中心”的支柱地位上,并在近两年开始重新审视机器人产业政策<sup>[3]</sup>。

美国是机器人的诞生地,早在1962年就研制出世界上第一台工业机器人,比起号称机器人王国的日本起步至少要早五、六年。经过40多年的发展,美国现已成为世界上的机器人强国之一,基础雄厚,技术先进。据统计,截止到2009年底,美国运行工业机器人大约有19.4万台。目

**作者简介:** 骆敏舟(1973-)男,安徽肥东人,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域:仿生与智能机器人、机电一体化。江苏省机器人与智能装备产业技术创新战略联盟理事长,《International Journal Of Information Acquisition》杂志编委,中国人工智能学会智能机器人专业委员会委员、中国自动化学会智能机器人专业委员会委员,国家自然科学基金委员会网评专家、国家发改委机器人领域评审专家,《ROBOTICA》、《中国机械工程》、《机器人》、《北京化工大学学报》、《传感技术学报》、《中国激光》等期刊评审专家。获得全国五一劳动奖章、安徽省科技进步三等奖、中国产学研合作促进奖等。近五年主持参加多项国家科技计划、国家自然科学基金、中科院、省市各级项目;共发表论文128篇,其中SCI收录14篇,EI收录36篇;申请或获得发明专利37项;软件登记8项。在spring出版社合作出版《Grasping in robotics》英文专著等。

前,美国工业机器人供应商有 Adept Technology、American Robot、Emerson Industrial Automation 等公司。

德国引进机器人的时间比英国和瑞典大约晚了五、六年,但战争所导致的劳动力短缺,国民的技术水平较高等社会环境,却为工业机器人的发展、应用提供了有利条件。此外,20世纪70年代中后期,德国政府采用的积极行政手段也为工业机器人的推广开辟了道路。如在“改善劳动条件计划”中规定,对于一些危险、有毒、有害的工作岗位,必须由机器人来代替。这个计划为机器人的应用开拓了广泛的市场,并推动了工业机器人技术的发展。据统计,截止到2009年底,德国运行的工业机器人为14.58万台。目前,德国工业机器人供应商有 KUKA、CLOOS 等<sup>[4]</sup>。

国际上一些大的工业机器人制造厂家,品牌主要分成两大体系,以日本为代表的日韩系,以德国为代表的欧系,其中 ABB、安川、发那科三大品牌占据了全球51%的市场,KUKA、OTC、川崎、松下等几大品牌占市场份额的40%以上。

## 2) 国内发展概况

我国的工业机器人研究开发工作始于20世纪70年代初,到现在已经历了30年的历程。前10年处于研究单位自行开展研究的状态,发展比较缓慢。1985年后开始列入国家有关计划,发展比较快。特别是在“七·五”、“八·五”、“九·五”机器人技术国家攻关、“863”高技术发展计划的重点支持下,我国的机器人技术取得了重大发展。

我国近几年工业机器人自动化生产线不断出现,并给用户带来显著效益。机器人自动化生产线装备的市场刚刚起步,而国内装备制造企业正处于由传统装备向先进制造装备转型的时期,这就给机器人自动化生产线研究开发者带来巨大商机。目前正在逐步建立上海、沈阳、北京、昆山、唐山、成都、徐州等工业机器人产业基地,开发出一批有市场前景的、具有自主知识产权的工业机器人及其自动化生产线产品。

## 2 工业机器人发展趋势和特点

工业机器人的发展趋势是向“高速、高精、重载、轻量化和智能化”方向发展。JSME2008年度日本机械学会从技术重要性不断增强的工业机器人领域的角度,对机器人的平均功率比密度、精度、智能化水平等关键参数进行了分析与预测(-2030年)。在对绝对准确有要求的机器人设计中,经过不断改进,绝对精度可能会接近重复定位精度。通过材料技术的进步,减轻驱动器质量,提高刚度,提高伺服电机和驱动器的平均功率比密度。因此,工业机器人技术有如下特点:

1) 工业机器人集精密化、柔性化、智能化、软件应用开发等先进制造技术于一体,通过对过程实施检测、控制、优化、调度、管理和决策,实现增加产量、提高品质、降低成本、减少资源消耗和环境污染,是工业自动化水平的最高体现。

2) 机器人与自动化成套装备具备精细制造、精

细加工以及柔性生产等技术特点,是继动力机械、计算机之后,出现的全面延伸人的体力和智力的新一代生产工具,是实现生产数字化、自动化、网络化以及智能化的重要手段。

3) 机器人与自动化成套装备是生产过程的关键设备,可用于制造、安装、检测、物流等生产环节,并广泛应用于汽车整车及汽车零部件、工程机械、轨道交通、低压电器、电力、IC 装备、军工、烟草、金融、医药、冶金及印刷出版等众多行业,应用领域非常广泛<sup>[5-6]</sup>。

4) 机器人与自动化成套技术,融合了多项学科,涉及多项技术领域,包括工业机器人控制技术、机器人构建有限元分析、激光加工技术、智能测量、建模加工一体化、工厂自动化以及精细物流等先进制造技术,技术综合性强。

## 3 国内外市场需求分析

据 IFR 统计,2008 年全球新安装工业机器人达 11.3 万套,销售额 62 亿美元,增长 7% 左右,市场容量约为 190 亿美元。2008 年和 2009 年由于金融危机的影响,工业机器人需要量有所下滑。2010 年工业机器人有了强劲的增长,增长额达到 27%,达到 7.6 万套。2011 年和 2013 年将有 10% 的增长,预计 2014 年达到 10 万套。

目前我国市场上机器人完全国产化的仅为 30%,其余皆为从日本、美国、瑞典、德国、意大利等 20 多个国家引进。因此,工业机器人市场是一个有巨大需求的市场,国内的工业机器人需求很大! ABB、KUKA、安川、FANUC、川崎重工等,以及与机器人有关的元器件、部件公司,都看准了中国这个市场,进军中国。国际机器人联合会(IRF)认为我国是工业机器人市场增长最快的国家之一。从工业机器人技术发展前景来看,工业机器人技术日趋成熟,已成为一种标准设备而得到工业界广泛应用,从而也形成了一批在国际上较有影响力的、知名工业机器人公司。如德国的 KUKA、瑞典的 ABB、日本的安川等。据联合国欧洲经济委员会和国际机器人联合会的统计,2006 年至 2010 年,世界机器人市场年增长率平均在 20% 左右,2010 年达到创纪录的 35%,2010 年全球机器人实际安装量达到 240 万台。

从工业机器人应用前景来看,机器人在制造业中得到了广泛的应用。如在毛坯制造、机械加工、焊接、热处理、表面涂覆、上下料、装配、检测及仓库堆垛等作业中,机器人都已逐步取代了人工作业。工业机器人技术的研究、发展与应用,有力地推动了世界工业技术的进步。例如焊接机器人在高质、高效的焊接生产中,发挥了极其重要的作用。特别是近年来,我国在焊缝跟踪、智能控制、信息传感、周边设备、离线编程与仿真技术、机器人弧焊电源与焊接工艺方法等方面进行了大量的研究与应用,取得了许多优秀的成果;又例如装配机器人在自动装配生产线,减轻工人的劳动强度,代替工人在严酷的环境中作业,产生了巨大的效益<sup>[7]</sup>。

我国正处于工业化过程中,生产手段必然要经历机械化、自动化、智能化、信息化的变革,工业制成品也将经历

数量、品质、柔性低成本的发展阶段,目前制造业普遍需要技术和设备升级改造,以增强竞争力,提高经济效益,因此,我国机器人产业的发展空间很大,市场前景美好。2010年全年我国进口工业机器人迈向一个新台阶,进口数量突破两万台,合计约6亿美元。在我国,工业机器人的真正使用到现在已经30多年,已基本实现了试验、引进到自主开发的转变,促进了我国制造业的发展。随着我国门户的逐渐开放,国内的工业机器人产业将面对越来越大的竞争与冲击,因此,把握我国工业机器人研究的相关进展十分重要<sup>[8]</sup>。

近几年,我国工业机器人及含工业机器人的自动化生产线和工程项目、相关产品的年产销额已近5亿元。现有机器人研究开发和应用工程单位200多家,其中从事工业机器人研究和应用的有75家,共开发生产各类工业机器人约3000多台,90%以上用于生产,引进工业机器人做应用工程的约1000多台<sup>[9]</sup>。我国工业机器人经过20多年的发展已在产业化的道路上迈开了步伐。

## 4 工业机器人核心部件研制的关键技术分析

一般的工业机器人由机械本体、控制系统、驱动与传动、传感器组件等几个基本部分组成。机器人的传动系统、控制系统和人机交互系统对其性能起着决定性作用,其核心部分主要体现在以下3个方面,高精度RV减速机、高性能交直流伺服电机和驱动器、稳定的实时操作系统。目前这些核心部件的研制关键技术在国内仍然没有具体掌握。

### a) 高精度减速机

高精度机器人关节减速器产品主要依赖进口,目前75%的市场被Nabtesco和Harmonic Drive公司垄断。近年来国内部分厂商和院校开始致力高精度摆线针轮减速机的国产化和产业化研究,在谐波减速机方面,国内已有可替代产品,但是相应产品在输入转速、扭转强度、传动精度和效率方面与日本产品还存在不小的差距,工业机器人的成熟应用还刚刚起步。高精度减速机研制的主要关键技术有:

#### 1) 材料成型控制技术

RV减速机的减速齿轮应具有高耐磨性以及高刚性才能保证其高精度,因此,对生产RV减速机的基本部件的材料具有很高的要求,尤其是体现在对材料化学元素、含量、金相组织控制,以及超常热处理工艺方面。

#### 2) 特殊部件的加工技术

非标特殊轴承是RV减速器的复杂精密机构之一,要求轴承具有特殊的结构。其间隙需根据减速器零部件加工尺寸动态调整。这就要求特殊部件具有特殊的加工技术。如,为了结构紧凑,薄壁角接触球轴承精度要求较高。根据精密传动要求,加预紧力后轴承的游隙为零。

#### 3) 精密装配技术

由于工业机器人使用的RV减速器的减速比较大,其具有微进给、无侧隙、刚性高、承载较大扭矩的特点,这就要求在实际的产品装配过程中,需要精密的装配技术,结

合先进的现场检测技术,采用专用精密装配夹具,利用成组工艺装配技术,确保RV输出轴侧隙为零,同时具有额定的静刚度。

### b) 电机和高精度伺服驱动器

高精度的伺服电机和驱动器是实现机器人的精密控制的重要保障,由于工业机器人对电机的特性有着特殊的要求,如相同的轴高,最大的功率输出,高负载,瞬间力矩输出响应快速等,这就要求工业机器人应使用专业的电机和驱动器进行驱动。国外的工业机械臂均使用了机器人专用电机,其具有高效节能、可靠性强、噪音低、维护简单、安装方便等特点,同时它体积小,输出扭矩大,力矩变化响应快,如日本安川的机器人专用电机,国内目前还来研制出机器人专用的高性能电机,在高精度伺服电机和驱动器研制过程中,有如下关键技术:

#### 1) 快响应伺服控制技术

目前机器人的电机驱动均具有三环控制,即位置环,速度环和电流环。由于机器人专用电机对力矩变化响应具有快速性的要求,驱动器内环的深度控制是实现快速响应的关键技术,即对电机的电流环直接控制。因此,其关键在电流环的干扰观测和前馈补偿算法的设计。基于综合性能指标优化的预测控制方法,建立电机的内部预测模型,以及内部预测模型的闭环优化策略是实现快速稳定的伺服响应的必经途径。

#### 2) 在线参数自整定技术

在线参数自整定技术是针对工业应用所提出的,目前伺服系统都具有该功能,主要是为了实现机器人系统参数辨识功能,如关节的转动惯量、PID参数自整定等方面,参数自整定技术的关键在于在线优化算法,通过不断的在线参数优化,辨识系统参数,其高级应用在于,通过应用在线惯量辨识算法,使得伺服驱动器可以自动判别工况变化,智能地调节伺服驱动控制器的控制参数,根据不同工况实现了参数的在线智能自适应调整功能。

#### 3) 高过载倍数,高转速电机设计技术

电磁设计上选用特殊极槽配合,避免由于斜槽或斜极对电机性能的削弱;结构上采用特种薄型制动器;转子采用表贴磁钢和分段式结构,外加特殊钢套。结构采用表贴磁钢;采用低损耗矽钢片。完成这一系列的工序,需要具备高品质的磨削技术和自动化加工能力。

### c) 机器人控制系统

工业机器人的控制器开发过程中,最显著的问题是工业机器人的操作系统,工业机器人的运动学控制对系统的实时性具有很高的要求,目前主流的工业机器人都是采用专门定制的运动控制卡,加上实时操作系统,这样既保证了数据的实时传输又能保证运动控制的精确执行,大大提升了整个系统的稳定性,从而提升机器人的性能。

另外的一些机器人产品是采用工业PC搭载高速总线的级伺服控制系统,其控制PC采用的是实时操作系统,如vxworks或者windows+RTX实时扩展平台保证软件运行环境的实时性,通过运动规划和运动控制单元可以实现对总线式伺服驱动器的控制,从而达到对机器人的精确控制。采用实时操作系统来搭建机器人控制系统是一个

很好的解决方案,然而,其代价也是昂贵的,由于实时操作系统的成本高,这很大程度上限制了国内工业机器人产业化发展。

采用通用的操作系统消息处理机制的缺陷是不能满足工业机器人在运行过程中高稳定性和响应快速性的要求,控制系统的上下位机之间进行频繁地通信,实时性必然会跟不上运动控制的要求,从而大大地降低了工业机器人产业化的可能。

## 5 工业机器人发展中存在的问题

目前,我国已经能够生产具有国际先进水平的平面关节型装配机器人、直角坐标机器人、弧焊机器人、点焊机器人、搬运码垛机器人等一系列产品,不少品种已经实现了小批量生产,但仍存在诸多问题。主要表现在:

1) 我国工业机器人基础零部件制造能力有待提高。目前国内生产工业机器人的核心零部件(如高精度伺服电机、谐波减速机,以及实时操作系统)都依赖进口,少量国产的零部件虽然可以用于工业机器人,但是对大负载的工业机器人零部件还是无能为力。

2) 我国的工业机器人设计理念不够成熟。国内的机器人生产大部分立足于功能的实现,在稳定性方面的考虑目前和国外还有一定的差距。即国内研制的工业机器人,性能不高。

3) 国内工业机器人市场秩序混乱,伴随我国对工业机器人需求的迅猛增长,多数企业看好工业机器人市场,大量企业蜂拥而上,并且企业实力良莠不齐,势必造成国内工业机器人市场的恶性竞争;全国有近百家从事工业机器人研究生产的高校院所和企业,现行体制造成各家研究过于独立封闭,机器人研究与研发分散,未能形成合力,同一技术重复研究,浪费大量的研发经费和研发时间;多数企业热衷于大而全,一些具有较好的机器人关键部件研发基础的企业纷纷转入机器人整机的生产,难以形成工业机器人研制、生产、制造、销售、集成、服务等有序、细化的产业链。

## 6 下一代工业机器人展望

尽管工业机器人的发展至今技术已经非常成熟,工业机器人技术朝着智能化、重载、高精度、高速、网络化、协同化方向发展。在对绝对准确有要求的机器人设计中,经过不断改进,绝对精度可能会接近重复定位精度。通过材料技术的进步,减轻驱动器质量,提高刚度,提高伺服电机和驱动器的平均功率比密度。由于离线训练技术和促进机器人和人类之间高效信息交换的接口技术的发展,工业机器人的智能化水平得到进一步提高。综上所述,下一代工业机器人技术有如下特点:

1) 工业机器人除采用传统的位置、速度、加速度等传感器外,结合位置、力矩、力、视觉等信息反馈,柔顺控制、力位混合控制、视觉伺服控制等方法在复杂工业作业领域得到应用。

2) 随着工业机器人应用要求的提高,开发类人双臂

的冗余自由度机器人,完成类似于人手臂的一系列动作;研究基于高性能、低成本总线技术的控制和驱动模式,提高控制系统开放性,形成统一的工业机器人在各行业应用的行业应用标准。

3) 工业机器人的智能化、群体协调作业能力也应加强,以满足工业机器人在生产流水线的应用需要。面向机器人和操作员混合作业,以及多机器人协调工作将是机器人的又一发展方向。

4) 工业机器人通过人机交互方式建立模拟仿真环境,研发工业机器人自动/离线编程技术,增强人机交互和二次开发能力,解决机器人示教难的问题,实现以传感器融合、虚拟现实与人机交互为代表的智能化技术在工业机器人上的可靠应用,实现机器人与人的共生共融将是下一代工业机器人重点研究内容。

## 7 结论

目前工业机器人迎来了前所未有的发展机遇,招工难用工难,企业对产品品质和效率提升的要求,促使工业机器人有着巨大的市场和应用前景,但是我国的机器人发展还存在着一系列的问题。这些问题的解决还需要我国企业与科研单位深入合作,解决包括材料、工艺、控制与机械设计在内的一系列问题。通过企业和市场的拉动,真正解决工业机器人核心与应用的核心技术问题,才能使得我国机器人赶上或超越国外的水平。

### 参考文献:

- [1] JETRO. New Possibilities for Japan's Robot Industry [J]. Japan's E-economic Monthly, February 2006, 1: 4.
- [2] 陈春,孙成权.日本第三期科学技术基本计划内容要点[EB/OL]. <http://www.cao.go.jp/cstp/siryo/haihu53/siryo1-1.pdf>.
- [3] Masa Y. M. Trends in Robotics and Governments View for Standardization [EB/OL]. Project Coordinator, Machinery System Technology Development Dept. NEDO, Japan, 2007.
- [4] Torgny B, Present and future robot control development—An industrial perspective [J]. Annual Reviews in Control 2007(31): 69 - 79.
- [5] 梁一新,刘凯.促进我国工业机器人产业化的战略思考[J].现代产业经济,2013: 28-33
- [6] 机器人技术与应用编辑部,我国工业机器人现状与发展[J].机器人技术与应用,2013: 1-6.
- [7] 李瑞峰.中国工业机器人产业化发展战略[J].航空制造技术,2010(09): 32-38.
- [8] 孙英飞,罗爱华.我国工业机器人发展研究[J].科学技术与工程,2012(12): 2912-2918.
- [9] Fang J, Zhao J H, He F, etc, Design and Research of Three-Layers Open Architecture Model for Industrial Robot Software System [C]. Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Takamatsu, Japan, 2013, 104-109.

收稿日期: 2014-12-05