

美国工业机器人初创期的技术创新

李欣, 仪德刚

(内蒙古师范大学 科学技术史研究院, 呼和浩特 010022)

摘要:工业机器人于20世纪50年代末诞生在美国。通过梳理美国工业机器人初创期(1959—1975)的技术创新,发现从实验室研究阶段中的技术突破,到推向市场阶段中的技术优化,美国一直占据机器人技术的制高点,但针对技术的产业化,政府与企业没有采取积极的政策措施,导致工业机器人在市场应用中处于劣势。以史为鉴,我国工业机器人的超高速发展需要经验和教训。

关键词:工业机器人;美国;初创期;技术创新

中图分类号:T09 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2017)10-0138-06

机器人技术在当今世界经济、军事、国防等方面显得愈发重要,成为各个国家发展不可缺少的高新技术之一。现代机器人主要分为两大类——军用机器人与民用机器人,工业机器人是民用机器人的一种。世界上最早的工业机器人^[1]于20世纪50年代末诞生在美国,它们的出现标志着现代机器人的正式诞生。其后,美国注重工业机器人的基础研究,技术创新日新月异,成为世界上主要的机器人技术输出国,但未能其在工业生产中的大量应用。相反,日本更加关注工业机器人技术的实际应用,虽然从美国引入工业机器人的时间较晚(1967年),但是在政府与企业的双重推动下,工业机器人很快从摇篮期进入成熟期,在其国内市场上进行大量的安装,成为世界上机器人产业发展最快的国家。苏联从20世纪60年代末开始发展工业机器人,1971年开始使用本国制造的第一批工业机器人,到1975年已经设计和研制出30多种工业机器人。^[2]欧洲各国的发展情况与美国相似,在机器人发展之初未给予足够重视,20世纪70年代中期看到日本的成功才开始注重机器人技术的发展。这一时期,相对日本机器人产业的发展,美国依然处于基础技术的研发阶段,未能实现工业机器人的大量应用。

20世纪70年代,中国开始工业机器人的研发工作,十多年后中国第一台工业机器人研制成功。十多年来,中国工业机器人投资生产日新月异、举世瞩目。

很多学者也开始广泛关注工业机器人在美国、日本、德国、苏联、欧洲等国的发展历程、技术特点与趋势、产业政策及市场动向,但鲜见从细节上考察美国工业机器人初创期发展情况的研究。本文以梳理1959—1975年美国工业机器人的技术创新路线,从政府政策、企业态度等角度探究影响美国工业机器人发展的社会因素,以期为我国机器人战略发展布局提供经验教训。

1 实验研发阶段中的技术创新

美国工业机器人诞生后(1959—1970年),它主要停留在大学和科研机构的实验室中,处于基础研发阶段,在理论研究和制造技术方面都有了相当的进展。20世纪60年代初,学界掀起了一股机器人浪潮,作为基础研究主体的各大高校——美国麻省理工学院、斯坦福大学等陆续成立实验研究所,展开机器人领域极为广泛的研究。到20世纪60年代末,美国就完成了第一代示教再现型机器人、第二代感知型机器人到第三代智能型机器人^[3]的技术创新历程。

1.1 第一代示教再现型机器人

世界上第一台工业机器人于1959年诞生在美国。1946年,美国工程师乔治·德沃尔(George Devol)发明了磁性存储过程控制器,从而开辟了工业设备普遍使用编程控制的年代。1959年德沃尔与“机器人之父”约瑟夫·恩格伯格(Joseph F. Engelberger)制造出世界上第一台工业机器人,命名为

收稿日期:2017-05-09

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20131502110001)。

作者简介:李欣(1992—),女,河北邢台人,内蒙古师范大学科学技术史研究院,硕士研究生,研究方向:科技政策;仪德刚(1971—),男,内蒙古赤峰人,内蒙古师范大学,教授,博士,研究方向:科技战略和技术史。

“Unimate(尤尼梅特) #001”,意思是“万能自动”,并在1961年为其申请了专利(No. 2998237)——数字可编程操作机械臂(Programmed Article Transfer)^[4]。Unimate #001 重达1 225 千克(2 700 磅)^[5],是一台五个关节串联、电动液压驱动的机器人,手臂由一台计算机控制,重达两吨,在基座上有一个大机械臂,大臂可绕轴在基座上转动,大臂上又伸出一个机械臂,它相对大臂可以伸出或缩回。小臂顶端有一个腕子,可绕小臂转动,进行俯仰和侧摇。腕子前头是手,即操作器。这个机器人的功能和人手臂功能相似,并且它的精准率可达0.002 54 毫米。德沃尔将数控机床的伺服轴与遥控操作器的连杆机构连接在一起,预先设定的机械手动作经编程输入后,采用磁性存储过程控制器,能够完成180个工作步骤的记忆。然后利用人手对机器人进行动作示教,在示教过程中,机器人可依次通过工作任务的各个位置,这些位置序列全部记录在存储器内能够实现对于动作的记录。在任务的执行过程中,机器人的各个关节在伺服驱动下依次再现上述位置,从而实行点到点的反馈控制。

Unimate 机器人标志着第一代机器人——示教再现型机器人的诞生,因为这种机器人可以根据操作员所编的程序完成一些简单的重复性操作,因此它们又被称为可编程机器人。同年,“工业机器人”(Industrial Robot)一词由美国“金属市场报(American Metal Market, AMM)”提出,从此开创了工业机器人的历史,也开启了现代机器人时代。

1.2 第二代感知型机器人

第二代感知型机器人在1961年诞生于麻省理工学院人工智能实验室(MIT AI Lab),海因里希·阿诺德·厄恩斯特(Heinrich Arnold Ernst)研制出第一台带有触觉传感器的机器人——MH-1 型机械臂。MH-1 是由TX-0 计算机操作的致敏伺服操作手臂,主要用于搬运放射性材料。通常,人类扮演的角色是在计算机和物理世界之间的一个翻译站,而在MH-1 的系统中,TX-0 计算机取代了人类的角色,能够自己执行人类分配给它的任务——即感知世界,并且在被指定目标后确定合理的行动方案。简单的来说机械手系统是把一个配有接触传感器的遥控操纵器与TX-0 计算机连接起来,这样它的从动部分可以在无需操作员帮助的情况下“感觉”到任务目标,在分析所感知的信息后控制机械手完成任务。^[6]感知型机器人能够通过传感器获取作业环境和对象的相关信息,进行实时加工处理,识别分类,做出正确判断和选择,形

成一定自适应能力操作,因此又称为“自适应机器人”。^[3]将传感器用于机器人是一大技术进步,能够大大提高机器人的可操作性和灵活性,成为机器人技术的研发热点。

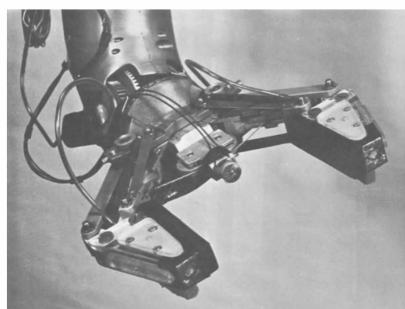


图1 MH-1 机械手(Stanford Arm)^[6]

1963年,加利福尼亚州兰乔洛斯阿米戈斯医院(Rancho Los Amigos Hospital)的研究人员为残疾人开发出一种工具——兰乔机械臂(Rancho Arm)。它是一种假肢臂,舌头控制开关,具有六自由度,理论上具有与人类的手臂相同的灵活性。然而,兰乔臂没有与计算机连接,其准确性非常差,仅仅能够移动,操作任务几乎不能完成。同年,斯坦福大学(Stanford University)购买兰乔臂,将它连接上计算机继续研究,但没有取得成果性胜利。虽然兰乔机械臂在机器人的研发历史上不是一个成功的案例,但不可否认,它的出现拓展了机器人的应用领域。

1.3 第三代智能型机器人

20世纪60年代中期,人工智能学界开始对机器人感兴趣。他们发现机器人的出现与发展为人工智能带来了新的生机,提供了一个很好的试验和应用场所,是人工智能可取得重大进展的潜在领域^[7]。这一认识,很快引起许多国家的科学界、产业界和政府有关部门的赞同,带来了第三代智能机器人的发展契机。

1965年约翰·霍普金斯大学(Johns Hopkins University)应用物理实验室(Applied Physics Laboratory, APL),莱昂纳德·舍尔(Leonard Scheer)^[8]在移动机器人方面的研究取得巨大进步。这一移动机器人名为“Beast”,没有与计算机相连。它能够通过声纳系统、光电管等装置在实验室白色的走廊中移动,根据环境校正自己的位置,避开障碍物,当其电池电量低时能够寻求具有特殊电池光学器件的黑色墙壁插座,通过其特殊的充电臂来插入为自己充电。Beast的“大脑”由数百个晶体管制成,通过创建逻辑门来实现布尔逻辑,它会在特定传感器被激活时告诉

机器人做什么。Beast 具有初步智能和自行生存能力,是早期人工智能在机器人身上的尝试。

1966 年,美国斯坦福研究所(Stanford Research Institute, SRI)在斯里兰卡成立人工智能中心(Artificial Intelligence Center, AIC),当年, AIC 的尼尔斯·约翰·尼尔森(Nils John Nilsson)和查尔斯·罗森(Charles Rosen)等人提出闻名于世的“夏克”(shakey)移动机器人计划。与此同时,国防高级研究计划局(the Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)前身——高级研究计划署(the Advanced Research Projects Agency, ARPA)对使用机器人和人工智能进行军事侦查感兴趣,国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)和海军办公室(Office of Naval Research, ONR)对该项目进行资助。该计划时间表为期 6 年,但在 1969 年,他们就完成了第一台完整的机器人系统——夏克移动机器人。它是人工智能的一个早期试验品,身高约为 183 厘米,底部是一个电动平台(包含驱动杆,推杆和碰撞传感器),上面是电子元件盒,然后是“头”(包括黑白电视摄像机,麦克风和旋转棱镜测距仪,还有顶部的无线电天线),这种安排仅仅是为了实用,但是很不稳定,因此取名为“shakey”。^[9]夏克机器人是人工智能发展史上的一个重要里程碑,是第一个完全自主行为的机器人,这表示美国机器人技术进入智能机器人的研发阶段。相较于第一代和第二代机器人,智能机器人具有灵活的思维功能和较强的自适应能力。

1968 年,斯坦福人工智能实验室(Stanford Artificial Intelligence Laboratory, SAIL)的创始人之一约翰·麦卡锡(John McCarthy)在高级研究计划署(ARPA)的资助下开始一项手眼项目(Hand-Eye Project),目的是研制带有手、眼、耳的机器人系统。作为人工智能先驱之一的麦卡锡成功的将人工智能技术与机器人技术结合在一起^[10],设计出带有摄像机和麦克风的机器人,它能够根据人的指令发现并抓取积木。在麦卡锡的鼓励下, SAIL 中其他人积极进行机器人研究^[11],这开启了早期机器视觉和语音识别技术的研发。

机械系学生维克多·沙因曼(Victor Scheinman)受到麦卡锡的启发,1969 年设计完成一个全电动六轴关节机械臂——斯坦福机械臂(Stanford Arm)。斯坦福臂在校园内完成,可以在计算机控制下准确灵巧的伸展,进行较为精确复杂的工作,如装配部件和电弧焊接等,^[12]是第一个能够以随机、连续的模式组装零部件的轻量级可编程机械臂(相较以前

重型,液压,一次性使用的机器)。1973 年,沙因曼创立了 Vicarm 公司开始生产机器人手臂,并把自己的设计卖给了 Unimation 公司,后者与通用汽车(General Motors, GM)公司合作开发,在 1978 年研制出可编程通用操作臂(Programmable Universal Manipulation Arm, PUMA)。作为 PUMA 的原型,斯坦福机械臂是装配线机器人的起点,创造了今天的“机器人工厂”,成为工业自动化不可或缺的一员。



图 2 斯坦福机械臂(Stanford Arm)^[13]

从 Unimate 机器人的诞生到 PUMA 机械臂的研制成功,美国工业机器人走过了一个漫长而辉煌的技术革命时期。大学实验室中的科研人员是这一时期促进机器人技术发展的中坚力量,从第一代机器人到第三代机器人,技术的进步为工业机器人在世界各国的发展奠定了坚实的基础。

2 推向市场阶段中技术创新

1971—1975 年,工业机器人逐渐引起了全球范围的注意。但此时工业机器人结构复杂,本体重量大,占地面积多,适用的范围很窄,一般仅能做搬运工作。在推向市场的阶段中,工业机器人还需要更实用的科研成果进入市场。20 世纪 60 年代末信息时代到来,随之而来的技术对于工业机器人的实际应用起着至关重要的作用。

2.1 信息时代的新技术

作为高新技术的集合体,机器人的发展与其他技术有着密切的关系。进入 20 世纪 70 年代后,信息时代的来临带来了一系列技术的成熟,这为工业机器人的技术创新带来新的机遇。

随着晶体管工艺的革新,集成电路技术日趋成熟。1971 年 4 月,德州仪器公司(Texas Instruments, TI)与日本佳能公司共同推出的佳能袖珍计算器(Canon Pocketronic)是最早利用集成电路制造的装置^[14]。同年,微处理器应运而生。11 月,世界上第一款通用型微处理器——“英特尔 4004”由英特尔公司推出,它处理信息字节的速度达到 40 万赫兹,

每秒钟执行 6 万条指令^[15],运行速度足以媲美第一台大型通用电子计算机——埃尼阿克 (Electronic Numerical Integrator and Calculator, ENIAC)^[16]。集成电路的应用使得工业机器人大幅减小体积,在实际生产活动中更加灵活,适用范围更加广泛;通用型微处理器的使用赋予工业机器人更大的精确性和可靠性,为其提供了一个更聪明的“大脑”^[17]。此外,随着计算机的体积愈趋微小,机器人的价格开始随之下降,从相当于雇佣一个工人一年费用的十二倍下降到三点七倍^[18],这一系列技术的成熟为工业机器人向市场推广奠定了基础。

2.2 产业化阶段的技术优化

在广泛采用这些先进技术之后,工业机器人作为一项多学科交叉的高科技慢慢成为很多制造业中不可或缺的组成部分。1973 年,辛辛那提·米拉克龙公司 (Cincinnati Milacron Inc.) 的理查德·豪恩 (Richard Hohn) 制造了第一台商用的由微型计算机控制的工业机器人——明天的工具 (The Tomorrow Tool, T3)。它是六轴电液伺服系统,可以以高达 1.27 米/秒的速度提起 45.4 公斤的重物,位置重复精度为 1.27 毫米。产生初期,T3 主要应用于焊接汽车车身、转移汽车保险杠和装载机床等方面。1975 年,T3 被应用于钻井作业,同年成为航天航空工业中使用的第一台机器人。随着机器人性能的大幅度提升,工业机器人的应用领域越发广泛,从工业逐渐扩展到航空、军事等领域。



图 3 T3 机器人 (The Tomorrow Tool)^[19]

斯坦福车 (the Stanford Cart) 是斯坦福大学人工智能实验室 (SAIL) 开展的一个为期 20 年项目,由国防高级研究计划局 (DARPA)、美国国家科学基金会 (NSF) 以及美国国家航空局 (NASA) 赞助支持。早在 1960 年,美国政府提出在地球上控制月球探测车的问题,斯坦福大学许多研究生进行了不断的探索和改进,最终在汉斯·莫拉维克 (Hans Moravec) 给斯坦福车配备了视觉导航后,它能够自动驾驶。斯坦福

车是一个移动机器人,系统可靠性适中,但是速度非常缓慢。它通过车载电视摄像机和立体视觉例程来感知周围的物体,每移动一米后,它会停留 10~15 分钟,拍摄一些图片,再由计算机处理接收到的图像绘制成地图,根据地图来重新计算路径^[20],这是一个非常成功的移动机器人利用视觉与周围环境互动的案例。机器视觉是智能机器人重要的组成部分,能够在工业生产中大幅提高工业机器人灵活性和自动化程度。

信息时代给工业机器人带来的技术创新举足轻重。集成电路技术的成熟和通用型微处理器的出现为机器人提供了智慧的“大脑”与轻便的“身体”,大大提高了机器人的可靠性和灵活性,为工业机器人的市场推广奠定了坚实的基础。

3 影响技术创新的因素

工业机器人诞生后的十五年里,其技术发生着日新月异的变化,但它的市场占有率一直没有显著提高。20 世纪 60 年代,只有少数几家大公司生产和使用工业机器人,直到 1969 年,机器人销售额才达 15 000 万美元。Unimation 公司控制着大约 80% 的美国机器人市场,但 1975 年才开始盈利^[10]。相反的,日本在工业机器人产业化方面取得惊人的成果,到了 1973 年,美国反而从日本进口机器人,两年后,日本更是将美国反超,成为世界上最大的机器人用户国。因此,这一时期,影响美国工业机器人技术创新的因素值得我们探究。

3.1 政府行为谨慎

美国政府历来重视基础研究,对应用技术研究支持相对较少。注重基础科学研究的政策思想可以追溯到第二次世界大战时期:1944 年,罗斯福总统在给他的科学顾问万尼瓦尔·布什 (Vannevar Bush) 的一封信中要求其对战后和平时期美国的科学体制提出建议。1945 年 7 月,布什提交的一份名为《科学——无尽的前沿》^[21]的报告回答了总统的问题,他坚信自由市场的优点,特别指明了在军事研究之外,联邦政府应当大力支持基础科学,而应用研究的责任应该让工业界担负^[22]。在这样的政策氛围下,美国机器人的基础研究在世界上一直处于领先地位,在机构学、控制理论、计算机科学、人工智能等方面的研究都超越日本和其他国家,是机器人技术主要的输出国。^[3]对于应用研究,布什认为“政府不应当资助距离应用太近的应用研究”^[22],一方面是怕引起不公平的市场竞争,另一方面他们认为应用技术的研发是企业的责任,政府的角色是监督管理,因此美国政府没有采取

政策,积极扶植机器人技术商业化,造成了科学进步与技术应用严重脱节,使得机器人发展缺乏组织性、统一性。

机器人技术研发费用高昂,多数企业难以独立研发而选择合资研制,但反托拉斯法是企业遇到的一大障碍。对于反托拉斯法的态度,美日两国截然相反,日本政府积极制定机器人发展计划,提供大部分资金,鼓励工业力量合资研制,这样有利于其国内机器人的统一协调发展;而美国公司想要采取这样的研制方式则要冒着被政府起诉的危险,这种起诉常常是由被排挤在合资经营之外的竞争对手所提出来的^[3]。反托拉斯法在美国的盛行造成其国内企业对机器人的投资和研究难上加难。

此外,居高不下的失业率也是一个严重的社会问题。1946 年失业人数为 227 万,1954 年为 357 万,1964 年达 456 万,1974 年后,每年都在 500 万以上。相对的失业率也在逐步上升:四十年代为 4.4%,五十年代为 4.5%,六十年代为 4.8%^[23],七十年代则猛升至 6.65%。严重的失业问题一直困扰着美国政府,对于机器人的出现,他们担心会造成更为严重的失业。因此,政府较为关注工业机器人技术的基础研究,而对于应用开发方面的资助相对较少。

3.2 企业态度消极

从 20 世纪三十年代到五十年代逐渐建立起来的刚性自动化生产技术在工厂中已经非常成熟,其产量高,工时成本低,利润丰厚,在制造加工业中的比重已经占到了 75%,改变这种生产方式,企业家需要大量投资。此外,柔性生产线刚刚诞生,厂商还处于观望的阶段,不能肯定其生产效益。所以,美国工业家固守使用刚性自动化装置,错失良机,没有看到机器人等柔性自动化装置的未来发展前景,这对机器人技术进步是一个很大的障碍。

这一时期的机器人销售价格非常昂贵,大部分美国厂商难以承受。虽然一台 Unimation 机器人成本耗资 65 000 美元,但是 Unimation 公司为了打开机器人的市场,将其售价降低到 18 000 美元。尽管如此,售价平均为 12 万到 18 万美元一台的机器人,仍然相当于十多个工人的年工资,惊人的售价使得大多数厂商望而却步,机器人技术难以找到市场和用户,无法得到推广和发展。

美国企业家对机器人技术有很多看法不同于欧洲和日本。首先,美国企业家注重的是短期收益,强调投资回报,时间最好控制在一两年内,而在欧洲及日本这个时间要长得多,正如春晓所说:“美国人考虑

问题是从季度出发的,缺乏长远打算;而欧日制定的却是年度甚至是 10 年计划。”^[24]但是相较其他高科技的开发,机器人技术的研发往往需要更长的周期,产品上市时间慢,资金回笼周期长,因此美国企业家们感兴趣的比较少。其次,欧洲及日本人特别重视产品竞争力及生产率等问题,机器人技术能够改进产品质量,提高产品竞争力,促进生产率增长,为生产商占据更广阔的市场而提供有力的保障。此外,劳动力问题也是造成美国与其他国家对待机器人态度不同的重要因素之一。欧洲人由于人工费用高而对工厂自动化感兴趣,日本除此之外还大量缺乏劳动力,因而迫切需要机器人。而美国不同,它可以从许多发展中国家获取大量廉价劳动力来满足汽车等制造业的需要,对机器人技术并不紧迫。

在初创期这一阶段,美国工业机器人的基础技术研究非常成功,MIT、斯坦福大学、约翰·霍普金斯大学等研究机构的成果举世瞩目,从示教再现型机器人到感知型机器人,再到当下热门的智能机器人,技术创新突飞猛进使美国成为世界上主要的机器人技术输出国。但政府没有把握机会,积极出台政策来大力发展机器人产业,企业家对昂贵而不成熟的机器人缺乏兴趣,导致了机器人仅在实验室中蓬勃发展,实际应用中却举步维艰。

4 余论

美国作为工业机器人的发源地,却被日本反超,其中的原因值得我们深思。在美国工业机器人的初创期,技术创新路线侧重基础研究,应用开发研究相对较少,这导致机器人技术在实验室中如火如荼,在市场应用方面却寸步难行。从第一代示教再现型机器人到第三代智能机器人,快速的技术创新令美国成为世界上最大的机器人技术输出国。但 1967 年日本从美国引入第一台工业机器人后,其国内大力推广应用机器人,政府与企业通力合作,其市场应用量很快超越美国,一跃成为世界上最大的机器人用户国。反观美国政府与企业各自为政,致使机器人应用技术发展缓慢,市场占有率较小。但是,顺应世界科技潮流,美国抓住机器人技术大发展的机遇,进一步提升性能,继续占领机器人技术的制高点。

20 世纪 70 年代,我国开始大力发展机器人技术,对比美日两国机器人的发展路线,我们应吸取经验教训。基础理论是一项技术的核心,市场则是技术发展最有力的催化剂,日本就是成功利用这个催化剂才能弯道超车,后来居上。基础研究与市场技术同时并举,政府要配合出台相应的政策提高科研成果转化

率,产学研的有机结合才能保证机器人技术高效发展。在研究机器人技术的同时,战略发展研究同样重要,如机器人的市场经济评价,机器人发展模式,机器人发展动向,机器人技术路线等研究,为我国机器人健康发展提供战略性指导思想,避免重蹈美国工业机器人发展覆辙。

参考文献

- [1] 张关富. 机器人概述[J]. 控制工程, 1985(3): 42—49.
- [2] 中国科学技术情报研究所重庆分所. 国外工业机器人专辑[M]. 重庆: 重庆科学技术文献出版社重庆分所, 1980.
- [3] 郭宇光. 机器人发展的历史、现状、趋势[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989.
- [4] DEVOL GEORGE C. Programmed article transfer[P]. US Patent 2998237, June 13, 1961. US Patent Office, Washington, DC.
- [5] Unimate//The First Industrial Robot[EB/OL]. [2017—02—23]. <https://www.robotics.org/joseph-engelberger/unimate.cfm>.
- [6] ERNST H A. MH-1, a computer-operated mechanical hand [D]. San Francisco: ACM, 1962: 39—51.
- [7] BORTZ A B. Artificial intelligence and the nature of robotics [J]. Robotics Age, 1983, 5(2): 23—30.
- [8] WATSON D P, SCHEIDT D H. Autonomous systems[J]. Johns Hopkins APL technical digest, 2005, 26(4): 368—376.
- [9] NILSSON N J. Shakey the robot[R]. CA: SRI International, 1984: 9—18.
- [10] NILSSON N J. Oral history of John McCarthy[J]. Computer History Museum, 2007: 17.
- [11] NILSSON N J. John McCarthy (1927—2011)[J]. National Academy of Science, 2012: 8.
- [12] FLAMM K. The changing pattern of industrial robot use [M]//RM CYERT, DC MOWERY. The impact of technological change on employment and economic growth. MA: Cambridge, 1988: 267—328.
- [13] Robots and their arms[EB/OL]. [2017—02—23]. <http://infolab.stanford.edu/pub/voy/museum/pictures/display/1-Robot.htm>.
- [14] KILBY JACK S, MERRYMAN JERRY D, VAN TASSEL JAMES H. Miniature electronic calculator[P]. US Patent 3819921, June 25 1974. US Patent Office, Washington, DC.
- [15] VACLAV SMIL. Made in the USA: the rise and retreat of American manufacturing [M]. MA: The MIT Press, 2013: 277.
- [16] The Intel 4004 Microprocessor and the Silicon Gate Technology [EB/OL]. [2017—02—23]. <http://www.intel4004.com/>.
- [17] 多德, 张洪福. 机器人: 新的“钢领”工人[J]. 国外社会科学, 1982(7): 45—46.
- [18] 于尔辰. 美日“钢领工人”之战[J]. 瞭望周刊, 1984(19): 32—33.
- [19] Cincinnati Milacron T3 type robotic arm[EB/OL]. [2017—02—23]. <http://www.computerhistory.org/collection/catalog/102640478>.
- [20] MORAVEC H P. Obstacle avoidance and navigation in the real world by a seeing robot rover[R]. CA: Stanford Univ CA Dept of Computer Science, 1980.
- [21] BUSH V. Science: the Endless Frontier[M]. Arlington: National Science Foundation, 1960.
- [22] 王鸿飞. V. 布什与美国基础科学政策: “这一切是怎么开始的?”[J]. 中国科学基金, 2004, 18(4): 222—225.
- [23] 杜博夫, 邱应觉. 美国的失业问题历史概况[J]. 国际经济评论, 1979(4): 20.
- [24] 春晓. 美国机器人工业近况及展望[J]. 机器人情报, 1993(5): 4—5.

The Technological Innovation of American Industrial Robot in the Start-up Period

LI Xin, YI De-gang

(Institute for the History of Science and Technology, Hohhot 010022, China)

Abstract: Industrial robots were born in the United States in the late 1950s. By combing the technological innovation of American industrial robots (1959—1975) in the Start-up Period, the article finds that from the technical breakthrough in the laboratory research stage to the technical optimization in the market stage, the United States has occupied the commanding point of the robot technology, but for the industrialization of technology, government and enterprises did not take positive policy measures, leading to industrial robots in the market at a disadvantage. History as a mirror, the ultra-high-speed development of industrial robot in our country requires experience and lessons.

Key words: industrial robots; The United States; start-up period; technological innovation