



北京市科学技术委员会
科普专项资助

北京市科学技术委员会
科普专项经费资助



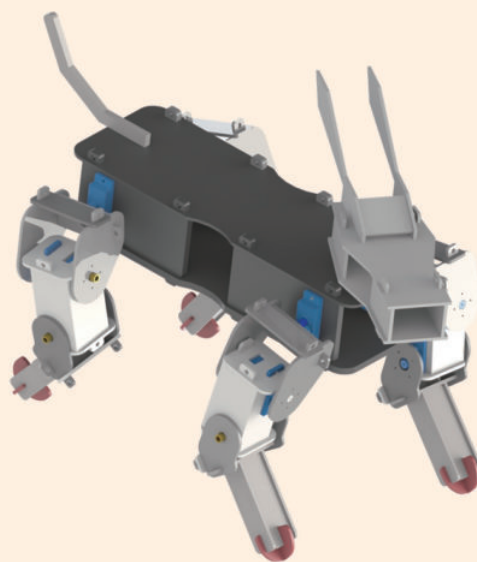
我的机器人创客教育系列

仿狗机器人的 设计与制作

罗庆生 罗 霄 王新达 编著



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



我的机器人创客教育系列

仿狗机器人的设计与制作

罗庆生 罗 霄 王新达 ●编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

仿狗机器人的设计与制作/罗庆生, 罗霄, 王新达编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2019. 7

(我的机器人创客教育系列)

ISBN 978 - 7 - 5682 - 7265 - 0

I. ①仿… II. ①罗… ②罗… ③王… III. ①仿生机器人 - 设计 - 青少年读物②仿生机器人 - 制作 - 青少年读物 IV. ①TP242 - 49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 143115 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 12.25

字 数 / 232 千字

版 次 / 2019 年 7 月第 1 版 2019 年 7 月第 1 次印刷

定 价 / 52.00 元

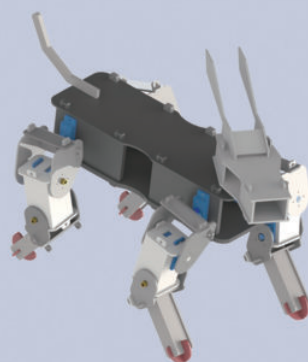
责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 张慧峰

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换



序 言

青少年是祖国的未来，科学的希望。以我国广大青少年为对象，开展规范性、系统性、引领性、全局性的科技创新教育与实践活动，让广大青少年通过这些活动，将理论研究与实际应用结合，将动脑探索与动手实践结合，将课堂教学与社会体验结合，将知识传承与科技创新结合，使广大青少年能有效提升创新兴趣，熟悉创新方法，掌握创新技能，增长创新能力，成为我国新时代的科技创新后备人才，意义重大，影响深远。

在形形色色的青少年科技创新教育与实践活动中，机器人科普教育、科研探索、科技竞赛别具特色，作用显著。这是因为机器人是多学科、多专业、多技术的综合产物，融合了当今世界多种先进理念与高新技术。通过机器人科普教育、科研探索、科技竞赛，可以使广大青少年在机械技术、电子技术、计算机技术、传感器技术、智能决策技术、伺服控制技术等方面得到宝贵的学习与锻炼机会，能够有效加深青少年对科技创新的理解能力，并提高其实践水平，让他们尽早爱科学、爱创新。

了解机器人的基本概念，学习机器人的基本知识，掌握机器人的设计与制作技巧，提升机器人的展演水平与竞技能力，将使广大青少年走近我国科技创新的最前沿，激发青少年对于科技创新尤其是机器人创新的兴趣与爱好，挖掘青少年开展科技创新的潜力，夯实青少年成为创新型、复合型人才的理论与技术基础。

“我的机器人创客教育系列”丛书重点讲述了仿人、仿蛇、仿狗、仿鱼、

仿狗机器人的设计与制作

仿蛛、仿龟等六种机器人的设计与制作，之所以选择了这六种仿生机器人作为本套丛书的主题，是出于以下考虑：在仿生学一词频繁在科研领域亮相时，仿生机器人也逐步进入了人们的视野。由于当代机器人的应用领域已经从结构化环境下的定点作业，朝着航空航天、军事侦察、资源勘探、管线检测、防灾救险、疾病治疗等非结构化环境下的自主作业方向发展，原有的传统型机器人已不再能够满足人们在自身无法企及或难以掌控的未知环境中自主作业的要求，更加人性化和智能化的、具有一定自主能力、能够在非结构化的未知环境中作业的新型机器人已经被提上开发日程。为了使这一研制过程更为迅速、更为高效，人们将目光转向自然界的各种生物身上，力图通过有目的的学习和优化，将自然界生物特有的运动机理和行为方式，运用到新型仿生机器人的研发工作中去。

仿生机器人是一个庞大的机器人族群，从在空中自由飞翔的“蜂鸟机器人”和“蜻蜓机器人”，到在陆地恣意奔跑的“大狗机器人”和“猎豹机器人”，再到在水下尽情嬉戏的“企鹅机器人”和“金枪鱼机器人”；从肉眼几乎无法看清的“昆虫机器人”到可载人行走的“螳螂机器人”，现实世界中处处都可看见仿生机器人的身影，以往只有在科幻小说中出现的场景正在逐步与现实世界交汇。

仿生机器人的家族成员们拥有五花八门的外观形貌和千奇百怪的身体结构，它们通过不同的机械结构、步态规划、行动特点、反馈系统、控制方式和通信手段模拟着自然界中各种卓越的生物个体，同时又通过人类制造的计算机、传感器、控制器以及其他外部构件，诠释着自己来自实验室的特殊身份。如今，这支源于自然世界和科学世界混合编组的突击部队正信心满满，准备在人类生活中大显身手。

时至今日，仿生机器人已经成为家喻户晓的“大明星”，每一款造型新颖、构思巧妙、功能独特、性能卓异的仿生机器人自问世之时起都伴随着全世界的惊叹和掌声，仿生机器人技术的迅速发展对全球范围内的工业生产、太空探索、海洋研究，以及人类生活的方方面面产生越来越大的影响。在减轻人类劳动强度，提高工作效率，改变生产模式，把人从危险、恶劣、繁重、复杂的工作环境和作业任务中解放出来等方面，它们显示出极大的优越性。人们不再满足于在展示厅和实验室中看到机器人慢悠悠地来回走动，而是希望这些超能健儿们能够在更加复杂的环境中探索与工作。

北京理工大学特种机器人技术创新团队成立于2005年，是在罗庆生教授和韩宝玲教授带领下，长期不懈地走在特种机器人科技创新探索、科研任务攻关道路上，充满创新能量、奋斗不息的一支标兵团队。该创新团队的主要研究领域为光机电一体化特种机器人、工业机器人技术、机电伺服控制技

术、机电装置测试技术、传感探测技术和机电产品创新设计等。目前已研制出仿生六足爬行机器人、新型特种搜救机器人、多用途反恐防暴机器人、新型工业码垛机器人、新型轮腿式机器人、新型节肢机器人、新型工业焊接机械臂、陆空两栖作战任务组、外骨骼智能健身与康复机、“神行太保”多用途机器人、履带式壁面清洁机器人、小型仿人机器人、“仿豹”跑跳机器人、先进综合验证车、仿生乌贼飞行机器人、履带式变结构机器人、制导反狙击机器人、新型球笼飞行机器人等多种特种机器人。该团队在承研某部“十二五”重点项目——新型仿生液压四足机器人过程中，系统、全面、详尽、科学地开展了四足机器人结构设计技术研究、四足机器人动力驱动技术研究、四足机器人液压控制技术研究、四足机器人仿生步态技术研究、四足机器人传感探测技术研究、四足机器人系统控制技术研究、四足机器人器件集成技术研究、四足机器人操控装备技术研究，在有关液压四足机器人的仿生研究、机构设计、结构优化、机械加工、驱动传感、液压伺服、系统控制、人工智能、决策规划和模式识别等高精尖技术方面取得一系列创新与突破，从而为本套丛书的撰写提供了丰富的资料和坚实的基础。

本套丛书的主创人员在开发高性能、多用途仿生机器人方面具有丰富的研制经验和深厚的技术积累，由罗庆生、韩宝玲、罗霄撰写的专著《智能作战机器人》曾获“第五届中华优秀出版物奖图书奖”称号，这是我国出版物领域中的三大奖项之一，表明其在科技领域，尤其是在机器人领域中的实力与地位。

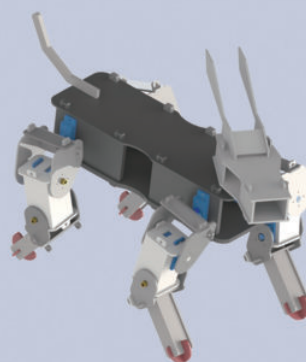
本丛书由罗庆生、罗霄担任主撰；蒋建锋、乔立军、王新达、陈禹含、郑凯林、李铭浩等人参与了本套丛书的研究与撰写工作，并担任各分册的主创人员。

在本套丛书的研究与写作过程中，得到了北京市教委、北京市科委等部门相关领导的极大关怀，得到了北京理工大学出版社的热情帮助，还得到了许多同仁的无私支持。值本书即将付印出版之际，谨向所有关心、帮助、支持过我们的领导、专家、同事、朋友表示衷心的感谢！

少年强则中国强，创新多则人才多。让机器人技术助圆我国广大青少年的“中国梦”！

作者

2019年7月于北京



目 录

CONTENTS

第 1 章	我能像狗一样奔跑	1
1.1	给你讲讲机器人的历史	1
1.1.1	古代的机器人	4
1.1.2	“机器人”得名的由来	5
1.1.3	现代机器人的问世	7
1.2	仿生机器人	13
1.2.1	机器人的定义	13
1.2.2	机器人的分类	21
1.3	“仿生”是什么	23
1.3.1	形态仿生	24
1.3.2	结构仿生	34
1.3.3	力学仿生	37
1.3.4	分子仿生	37
1.3.5	能量仿生	37
1.3.6	信息与控制仿生	37
1.4	仿生机器人的分类	38
1.4.1	按照仿生类型分类	38
1.4.2	按照工作环境分类	40
1.5	仿生机器人的特点、应用与发展	42

仿狗机器人的设计与制作

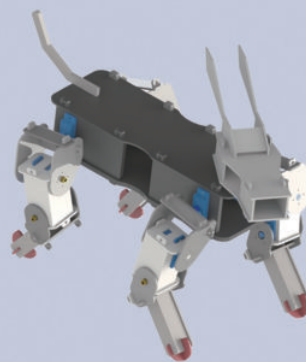
1.5.1	在军事领域的应用	42
1.5.2	在服务业中的应用	48
1.5.3	在防灾救援中的应用	51
1.5.4	在教育娱乐中的应用	52
1.6	为什么要研制仿狗机器人	53
1.7	狗狗的运动	60
1.7.1	仿生学及四足动物的生理结构	60
1.7.2	步行动物腿足的普遍规律	60
1.8	我叫仿狗机器人	64

第2章 我身体的由来 65

2.1	我的能量源	65
2.1.1	我的“能量源”其实是电池	66
2.1.2	我的电源系统如何组成	67
2.1.3	我的电源系统有何作用	68
2.2	锂离子电池	68
2.2.1	锂离子电池的前世今生	68
2.2.2	锂离子电池的工作原理	73
2.2.3	锂离子电池的使用特点	74
2.2.4	锂离子电池的充放电特性	75
2.3	锂聚合物电池	76
2.3.1	锂聚合物电池的点点滴滴	76
2.3.2	锂聚合物电池的工作原理	78
2.3.3	锂聚合物电池的使用特点	79
2.3.4	锂聚合物电池的充放电特性	79
2.4	镍氢电池	80
2.4.1	镍氢电池的工作原理	81
2.4.2	镍氢电池的使用特点	82
2.4.3	镍氢电池的充放电特性	83
2.5	你知道磷酸铁锂和三元锂的“恩怨”吗	84
2.6	我有灵活的四肢	86
2.6.1	机器人的结构分类	86
2.6.2	仿狗机器人腿部尺寸与结构形式	86
2.6.3	仿狗机器人腿部结构设计	88
2.7	我有强壮的躯干	90

2.8 我身体的另一个玄机——舵机	92
2.8.1 舵机简介	92
2.8.2 舵机的驱动与控制	94
2.8.3 仿狗机器人的舵机选型	97
第3章 瞧瞧我的感官	99
3.1 传感器	100
3.1.1 传感器的定义	100
3.1.2 传感器的分类	101
3.1.3 传感器的基本组成	104
3.1.4 传感器的主要作用	105
3.1.5 传感器的发展特点	106
3.1.6 传感器的主要特性	106
3.1.7 传感器的选型原则	107
3.1.8 环境对传感器的影响	108
3.2 眼睛眨眨看得远——机器视觉系统	109
3.2.1 机器视觉的应用	109
3.2.2 机器视觉的照明系统	110
3.2.3 镜头	112
3.2.4 摄像机/照相机	114
3.2.5 图像采集模式	115
3.2.6 机器视觉系统的主要作用与工作机理	116
3.3 我的眼球——视觉传感器	117
3.3.1 CCD 与 CMOS 的工作原理	118
3.3.2 CCD 与 CMOS 的比较	119
3.3.3 彩色摄像机	120
3.4 我可以知远近——测距传感器	121
3.4.1 测距传感器的分类	121
3.4.2 测距传感器的工作原理	122
3.5 我的皮肤有触觉——能量传感器	125
3.5.1 触觉传感器的分类	125
3.5.2 触觉传感器的工作原理	126
3.6 我的运动可平衡——姿态传感器	130
3.6.1 姿态传感器的分类	130
3.6.2 姿态传感器的工作原理	130

3.7 拥有灵敏感觉的其他奥秘	132
第4章 快把我制作出来吧	138
4.1 组装我的四肢	138
4.1.1 仿狗机器人零件的加工	138
4.1.2 仿狗机器人单腿的组装	144
4.2 组装我的躯干	150
4.3 拼到一起看一看	151
第5章 请你教我思考	153
5.1 我大脑的运行原理	154
5.1.1 机器人控制系统的基本组成	154
5.1.2 机器人控制系统的工作机理	155
5.1.3 机器人控制系统的主要作用	155
5.2 大脑的神经元——单片机	156
5.2.1 单片机的工作原理	156
5.2.2 单片机系统与计算机的区别	157
5.2.3 单片机的驱动外设	158
5.2.4 单片机的编程语言	158
5.3 大脑的左半球——DSP 控制技术	159
5.3.1 DSP 简介	159
5.3.2 DSP 的特点	160
5.3.3 DSP 的驱动外设	160
5.3.4 DSP 的编程语言	161
5.4 大脑的右半球——ARM 控制技术	162
5.4.1 ARM 简介	162
5.4.2 ARM 的特点	163
5.4.3 ARM 的驱动外设	163
5.4.4 ARM 的编程语言	164
5.5 调整姿态，让我动起来	164
参考文献	167



第 1 章

我能像狗一样奔跑

1.1 给你讲讲机器人的历史

提起机器人这个名词想必大家都不会陌生，大量的科幻小说及影视作品中到处可见机器人的形象。《变形金刚》《钢铁侠》等优秀机器人电影更是伴随着 80 后、90 后、00 后一起成长。科幻作品中的机器人形象是多种多样的。例如，电影《星球大战》里出现的能进行修理、翻译工作的小机器人 R2 - D2 忠实可靠、爱岗敬业，礼仪机器人 C - 3PO 则胆小怕事、逗人发笑；《终结者》系列中来自未来的机器人终结者冰冷恐怖、高深莫测；《人工智能》中的大卫则是一个令人感伤、思念久远的角色^[1]，这些机器人栩栩如生，如图 1 - 1 所示。

仿狗机器人的设计与制作



图 1-1 科幻作品中的形形色色的机器人

科技发展到了今天，机器人早已不是那些只能在人类的幻想中才会出现的科技怪物，它们正在人类社会的方方面面发挥着重要的作用。例如，“勇气号”“机遇号”“好奇号”火星探测机器人在火星上奔波不停，为人类的火星移民计划提供了必要的信息（如图 1-2 所示）；深海机器人潜入深渊，代替人类对深海火山的生态系统进行考察（如图 1-3 所示）；PackBot 机器人不惧核辐射的威力，进入福岛第一核电站内部进行辐射情况探测（如图 1-4 所示）；军用机器人在局部战争中初露锋芒，代替军事人员进行各种特殊作业等（如图 1-5 所示）。



图 1-2 火星探测机器人

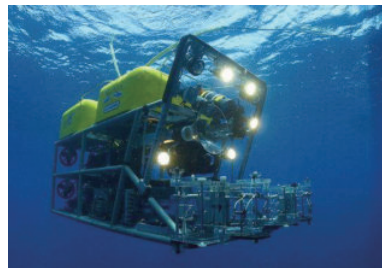


图 1-3 深海机器人



图 1-4 PackBot 机器人



图 1-5 军用机器人

各类媒体中的机器人也常常映入人们的眼帘。春晚上的机器人集体舞蹈精彩纷呈、气势恢宏（如图 1-6 所示）、餐厅里的机器人服务生彬彬有礼、气质超群（如图 1-7 所示）。企业提高产品品质、增进生产效益，需要机器人；人们改善物质生活、丰富精神享受，也需要机器人。我国政府在《中国制造 2025》中也将机器人作为重点领域加以强调。



图 1-6 春晚上的舞蹈机器人



图 1-7 机器人服务生

或许有人认为以上事情离普通人还比较遥远，但其实我们每个人的生活都与机器人密切相关。人们乘坐的汽车、火车是工业机器人在工厂里参与制造的（如图 1-8 所示）；人们吃的粮食、水果是农业机器人在田野里参与收割的（如图 1-9 所示）；甚至一些人家都已经开始有机器人在清扫卫生、端茶倒水（如图 1-10 和图 1-11 所示）。所以，机器人的世界，离我们真的已不再遥远。

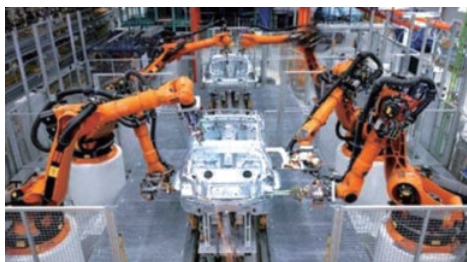


图 1-8 工业焊接机器人



图 1-9 农业收割机器人



图 1-10 扫地机器人



图 1-11 服务机器人

1.1.1 古代的机器人

自古以来，人类就希望制造一种像人一样聪明、能干的机器，以便代替人类完成各种工作，将人类从繁重的体力劳动和复杂的脑力劳动中解放出来，古今中外许多能工巧匠和科学大师们都在为此而不懈努力。

公元前 400—公元前 350 年，《墨子·鲁问篇》记载公输子（即鲁班）“削竹木以为鹊，成而飞之，三日不下”^[1]。

公元前 2 世纪，亚历山大时代的古希腊人发明了被称为“自动机”的装置，它是以水、空气和蒸汽压力为动力的装置，它会活动，可以自己开门，还可以借助蒸汽来发声唱歌^[2]。

东汉时，人们发明了“记里鼓车”（见图 1-12），它靠传动齿轮和凸轮杠杆等机械装置驱动，车行一里，车上木人受凸轮的牵动，由绳索拉起木人右臂击鼓，无须人们手工测量计程，这是最早的计程工具。

后汉三国时期，诸葛亮制造了木牛流马（见图 1-13）。据《三国志·诸葛亮传》记载：“九年，亮复出祁山，以木牛运”，“十二年春，亮悉大众由斜

谷出，以流马运”。木牛流马“口内舌头扭转，即不能动弹；再扭回来，复奔跑如飞”^[3]。“搬运粮米，甚是便利。牛马皆不水食，可以昼夜搬运不绝也”。



图 1-12 记里鼓车



图 1-13 木牛流马

人类社会迈入 18 世纪之后，第一次工业革命从英国发展起来，开创了以机器代替手工工具的时代^[4]。随着各种自动机器、动力系统的问世，机器人也开始进入了自动机械时期，出现了很多机械式控制的机器人，具有代表性的是各种精巧的机器人玩具和机器偶人。

1662 年，日本杰出工匠竹田近江利用钟表技术发明了自动机器玩偶，并在大阪的道顿堀演出，引起轰动^[5]。

1738 年，法国天才技师杰克·戴·瓦克逊发明了一只机器鸭，栩栩如生，它能发出嘎嘎的叫声，会游泳和喝水，还会进食和排泄。

1768—1774 年间，瑞士神奇钟表师德罗斯父子三人，设计制造出三个像真人一般大小的机器人——写字偶人、绘图偶人和弹风琴偶人，这些偶人本领高超，分别会写字、绘画和弹琴^[6]。它们是由凸轮控制和弹簧驱动的自动机器，至今还作为国宝保存在瑞士纳切特尔市艺术和历史博物馆内，供游人观赏。

1893 年，加拿大著名机师摩尔设计了以蒸汽为动力、能行走的机器人“安德罗丁”，“安德罗丁”摇摇摆摆的步伐经常引起人们的围观，也博得世人的啧啧称奇。

在科学家和工程师们实际制造出这些精巧的偶人的同时，文学家也对机械偶人产生了浓厚的兴趣，有关偶人的文学作品在这一时期得到了蓬勃发展，出现了《浮士德》《木偶奇遇记》《未来的夏娃》等一系列文学作品，将偶人的形象在大众中广为传播，这也预示着，机器人即将正式走上历史舞台。

1.1.2 “机器人”得名的由来

在工业革命推动科学技术迅速发展的同时，人们的思想观念也得到了极大的解放。自古罗马时代以来，欧洲就处于封建神学的统治之下，宗教氛围笼罩

在人们的身边，当时大家都认为人是上帝创造的。后来，随着文艺复兴的兴起，生理学和医学得到了进一步的研究和发展，在对人类结构研究的基础上，一些科学家、哲学家逐渐从宗教神学的束缚下摆脱出来，他们对上帝造人说产生了质疑。

基于对人体的构造与功能的系统研究和深入探索，法国数学家笛卡儿提出了一个“人是机器”的宏大命题。英国哲学家霍布斯对此更进一步地加以了阐述：“人不过是一架正立行走的机器：心脏是汲筒，四肢是杠杆，关节是齿轮，神经是游丝……”

这种思想观念彻底改变了人们对自身的看法，人们发现人与机器之间并没有本质区别，二者之间是有联系的。人是机器，有机器性的一面，于是人们开始反过来思考，那么机器是否可以模仿人，具有人的人格，从而转变为人呢？

科幻文学作家们首先对这个问题进行了深入思考，并不断发表引发人们思考和争论的文章。1920年，捷克作家卡雷尔·卡佩克发表了科幻剧本《罗萨姆的万能机器人》，开启了人们对机器人认识的新纪元^[7]。

该剧本的故事梗概是：

未来，机器人会按照其主人的命令默默地工作，没有感觉和感情，以呆板的方式从事繁重的劳动^[8]。后来，罗萨姆公司取得了成功，打破常规，使机器人具有了感情，导致机器人的应用部门迅速增加，在工厂生产和家务劳动中，机器人成了必不可少的成员。再后来，机器人通过与人类的接触，发觉人类十分自私和不公正，怨愤渐生，终于有一天机器人造反了。机器人的体能和智能都非常优异，它们消灭了人类主人。但是机器人不知道如何制造它们自己，而每台机器人的寿命最多只有20年，它们认识到自己很快就会灭绝，所以它们保留了罗萨姆公司技术部主任的性命，让他研究机器人繁殖技术。但是，当机器人繁殖技术被研制出来，且被机器人掌握以后，机器人最后将那位技术部主任也杀掉了，从此人类灭绝了。

卡雷尔·卡佩克提出的是机器人的安全、感知和自我繁殖问题，科学技术的进步是一把双刃剑，既可能促进人类社会的发展，也可能引发人类社会动荡^[9]。虽然《罗萨姆的万能机器人》只是一篇科幻剧本，但是它却揭示了人类社会未来可能面临的危机。因此，该剧本得到了人们的广泛关注，被翻译成多国文字在全世界流传开来。

在这篇享誉世界的科幻作品中，卡佩克根据捷克文 *robota*（原意是劳役、苦工）和波兰语 *robotnik*（原意是工人），创造出了一个词语 *Robot*，用来称呼剧中的机器人主角^[10]。随着小说被翻译成多国文字广为流传，各国也纷纷将 *Robot* 作为机器人的名称，在中国则译为机器人。从此，机器人这个名词开始

正式走上历史舞台。

1.1.3 现代机器人的问世

进入 20 世纪以后，随着电的发明及其广泛应用，机器人技术也进入了一个新的发展时期。

1939 年，美国纽约世博会上展出了西屋电气公司制造的家用机器人 Elektro，如图 1-14 所示^[11]。Elektro 相貌堂堂，体形魁梧，拖缆控制，可以行走，会说 77 个字，甚至还可以抽烟，但离真正干家务活还差得很远。不过它让人们对家用机器人的憧憬变得更加清晰和具体起来。

第二次世界大战之后，美苏两国竞相发展核技术以争夺世界霸权，但是由于核武器所用材料具有致命的辐射作用，人体不能直接接触，所以美国原子能实验室迫切希望使用某些操作机械代替人来搬运、处理放射性物质。在这一需求背景下，美国原子能委员会的阿尔贡研究所于 1944 年发明了主-从机械手（如图 1-15 所示），开创了机械手研究的先河^[12]。所谓主-从机械手，就是人们通过把放射性物质放置在辐射屏蔽间内，再通过控制在屏蔽间外面的主机机械手，来驱动在屏蔽间内部的从机械手移动放射性物质。这种机械手至今仍应用在很多场合中。

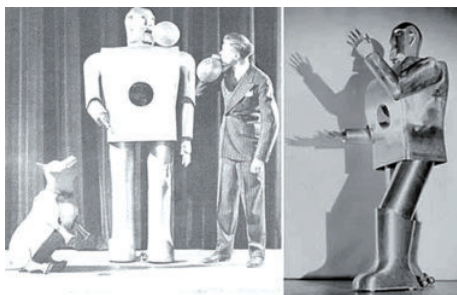


图 1-14 家用机器人 Elektro



图 1-15 主-从机械手

进入 20 世纪 40 年代，人类又迎来了两项重大科技发明。1946 年 2 月 14 日，第一台电子计算机 ENIAC 在美国宾西法尼亚大学诞生（如图 1-16 所示），并于次日正式对外公布。

ENIAC 每秒钟能执行 5 000 次加法或 400 次乘法运算，是人类手工计算速度的 20 万倍，人们为计算机的超凡能力而赞叹不已。但是，初生的 ENIAC 绝对不是一个“襁褓中的婴儿”，而是一个庞然大物，它包含了 17 468 个真空管、7 200 个水晶二极管、1 500 个中转器、70 000 个电阻器、10 000 个电容器、1 500 个继电器、6 000 多个开关。ENIAC 长 30.48 m，宽 1 m，占地面积