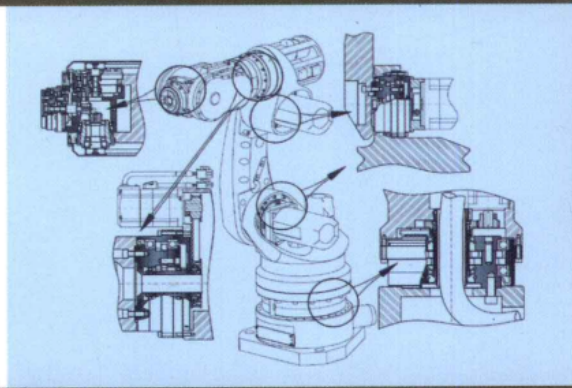
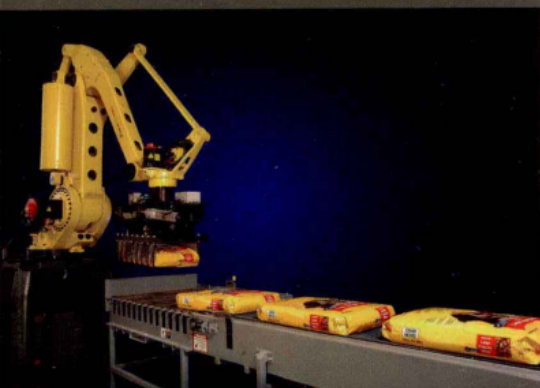


码垛机器人

机械结构与控制系统设计



李金泉 杨向东 付 铁 编著

码垛机器人机械结构与 控制系统设计

The Design of Palletizing Robot'
Structure And Control System

李金泉 杨向东 付 铁 编著

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书综合采用了多种现代设计方法:采用 Pro/E 进行三维结构设计,采用 D-H 方法求解工作空间从而确定机器人运动学参数;采用动态静力学方法利用 MatLAB 编程求解机器人的动力学模型,从而确定各关键轴所受的力和力矩,根据计算结果可以进行减速器和伺服电动机的选型;随后采用 ANSYS 进行了机器人关键零部件的应力和应变校核;最后阐述了码垛机器人控制系统的设计方法。

读者对象:从事机器人研究与技术开发的工程技术人员,有兴趣学习机器人技术的本科生、研究生阅读。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

码垛机器人机械结构与控制系统设计/李金泉,杨向东,付铁编著. —北京:北京理工大学出版社,2011.7

ISBN 978-7-5640-4719-1

I. ①码… II. ①李…②杨…③付… III. ①工业机器人-机器人机构②工业机器人-机器人控制-控制系统-系统设计 IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 124192 号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

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/787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张/9.75

字 数/224 千字

版 次/2011 年 7 月第 1 版 2011 年 7 月第 1 次印刷

印 数/1~2000 册

定 价/36.00 元

责任校对/陈玉梅

责任印制/王美丽

图书出现印装质量问题,本社负责调换



序

机器人技术是 20 世纪人类最伟大的发明之一，其应用已经从工业生产拓展至太空和深海探索、军事、服务和医疗等诸多其他领域。因此，当人类面对新世纪知识经济时代的机遇和挑战时，机器人技术的深入扩展应用和发展，必将推动新世纪社会的革命性变化和进步，对国民经济和国家安全产生巨大影响。

目前，在机器人研究领域，国内外学者和专家已发表许多关于机器人学与技术基础理论方面的教材和专著，为机器人学的发展奠定了坚实的理论基础和共性技术支撑；而随机器人的应用拓展，也需为机器人技术的推广、开发与工程应用提供专业的设计及研发方面的指导；但翻阅国内外相关资料，此类专著和材料甚少。

为丰富机器人技术的开发与研究，李金泉、杨向东和付铁三位中、青年学者合作撰写了《码垛机器人机械结构与控制系统设计》专著。该书基于三位作者多年的研究成果和工程实践经验提炼，从码垛机器人技术与设备开发角度，系统地介绍了码垛机器人的研究与设计内容、研制过程和详细开发步骤，以及实施技术方法等内容，且侧重于相关理论知识和实践经验在工业机器人研发过程中的综合应用阐述。

本书内容丰富，涉及机械、控制以及检测等多个技术领域，具有实用性和工程技术指导性强等特点。相信《码垛机器人机械结构与控制系统设计》一书的出版，将成为从事机器人研究与技术开发的研究和技术人员的重要参考著作，并为有兴趣学习机器人技术的本科生、研究生和机器人爱好者提供有价值的指导。

陈恳 博士

2011 年 6 月 12 日于清华园



前 言

随着现代计算机技术的飞速发展，多轴运动控制的技术越来越成熟，工业机器人的成本越来越低，目前其应用已经进入了爆发式增长的阶段。

本书主要定位于码垛机器人本体及其末端执行器设计的方法和思路：从机器人构型的确定到设计参数的确定和分配，从机器人工作空间计算到动态静力学的计算以及各关节驱动力矩的计算，从关键零部件有限元边界条件的确定到零件优化，其思路和方法都是从工程实践的角度出发进行的，这也是本书作者们多年来的工程实践经验的总结。

本书综合采用了多种现代设计方法：采用 Pro/E 进行三维结构设计，采用 D-H 方法求解工作空间从而确定机器人运动学参数；采用动态静力学方法利用 Matlab 编程求解机器人的动力学模型，从而确定各关键轴所受的力和力矩，根据计算结果可以进行减速器和伺服电机的选型；随后采用 ANSYS 进行了机器人关键零部件的应力和应变校核；最后阐述了码垛机器人控制系统的设计方法。

本书第 1~第 7 章由李金泉撰写，第 8 章由付铁撰写，第 9 章由杨向东撰写，全书由李金泉进行统稿。

非常感谢牺牲宝贵时间协助完成本书的许多人。北京邮电大学硕士研究生段冰蕾协助撰写第 2、第 4、第 5 章，任海英协助撰写第 1、第 3 章，朱素霞协助撰写第 7 章，朱素霞和任海英协助进行全书文字和格式校核，在此表示感谢。同时也感谢清华大学精仪系机器人实验室的朱森强、聂程辉、劭君奕同学在码垛机器人初始设计阶段所参与的计算和校核工作。

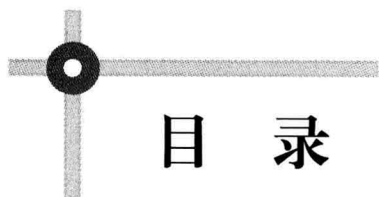
感谢清华大学陈恳教授为本书作序。

感谢北京理工大学丁洪生教授为本书进行审核并提出宝贵建议。

限于时间关系和作者水平，书中难免存在一些缺点和错误，欢迎读者批评指正和学术交流，作者联系邮箱，buptljq@sina.com.cn。

李金泉

2011 年 6 月 12 日



目 录

第 1 章 绪论	1
0 引言	1
1.1 国外码垛机器人发展状况	1
1.1.1 研究现状	1
1.1.2 应用现状	2
1.2 国内码垛机器人发展状况	3
参考文献	5
第 2 章 码垛机器人驱动系统选型	7
2.1 机械工业产品的设计开发流程	7
2.2 工业机器人的设计流程	8
2.3 机器人常用减速器和伺服电动机简介	10
2.3.1 机器人常用减速器简介	10
2.3.2 机器人常用伺服电动机简介	16
2.4 机器人的减速器和伺服电动机的选型方法	20
参考文献	23
第 3 章 TH50 码垛机器人技术参数设计与分配	24
3.1 TH50 码垛机器人工作参数	24
3.2 工作循环图设计简介	26
3.3 TH50 码垛机器人工作节拍	27
3.4 TH50 码垛机器人各轴工作循环图	27
参考文献	30
第 4 章 码垛机器人运动学分析	31
4.1 D-H 法简介	31
4.1.1 机器人的 D-H 坐标系和 D-H 参数	31
4.1.2 用 D-H 坐标系建立机器人相邻两连杆之间的运动学关系	33
4.1.3 基于 D-H 法的机器人运动学数学模型	33
4.2 码垛机器人任务空间分析	34
4.3 TH50 码垛机器人结构分析及运动学建模	35
4.3.1 码垛机器人结构分析	35
4.3.2 机器人运动学建模	36
4.4 TH50 码垛机器人工作空间分析	38
4.4.1 机器人工作空间及其分析方法简介	38

4.4.2 机器人可达工作空间分析	40
4.4.3 机器人工作空间灵活性分析	44
4.4.4 其他可实现的任务空间	44
4.5 工作空间影响系数分析	46
4.5.1 机器人工作空间影响系数的定义	46
4.5.2 工作空间影响系数应用举例	47
参考文献	48
第5章 码垛机器人动力学分析及各轴伺服电动机和减速器选型计算	50
5.1 动态静力学方法简介	50
5.2 TH50 型码垛机器人动态静力学建模	51
5.2.1 机器人受力分析	51
5.2.2 机器人的动态静力学建模	53
5.3 TH50 型码垛机器人 J_4 轴电动机和减速器选型计算	56
5.4 TH50 型码垛机器人 J_2 轴电动机及减速器选型计算	57
5.5 TH50 型码垛机器人 J_3 轴电动机及减速器选型计算	58
5.6 TH50 型码垛机器人 J_1 轴电动机及减速器选型计算	59
5.7 TH50 型码垛机器人 D 、 J 处轴承的受力和选型计算	59
参考文献	61
第6章 TH50 型码垛机器人本体机械结构设计	62
6.1 常见减速器在机器人中的安装	62
6.2 码垛机器人机械结构设计注意事项	62
6.3 码垛机器人本体机械结构	63
6.3.1 国外常见码垛机器人机械结构 (图 6-1~图 6-5)	63
6.3.2 TH50 型码垛机器人机械结构	64
6.4 TH50 型码垛机器人本体机械结构设计分析与总结	67
参考文献	67
第7章 码垛机器人关键零部件的有限元静力学校核	68
7.1 Ansys 简介	68
7.2 Ansys 与 Pro/E 接口简介	71
7.3 Ansys 静力学分析方法简介	73
7.3.1 静力学分析类型	73
7.3.2 结构线性静力分析的基本步骤	73
7.3.3 单位的选取	75
7.4 TH50 型码垛机器人中间臂有限元校核	75
7.4.1 边界条件	75
7.4.2 建立有限元模型	76
7.4.3 加载求解	78
7.4.4 后处理	79
7.4.5 结果分析	83

7.5 TH50 型码垛机器人上臂有限元校核	83
7.5.1 边界条件	83
7.5.2 计算结果	84
7.5.3 结果分析	88
7.6 TH50 型码垛机器人 J_3 轴拉杆有限元校核	88
7.6.1 边界条件	88
7.6.2 计算结果	88
7.6.3 结果分析	92
7.7 TH50 型码垛机器人旋转底座有限元校核	92
7.7.1 边界条件	92
7.7.2 计算结果	93
7.7.3 结果分析	97
7.8 TH50 型码垛机器人中间臂优化设计	97
7.8.1 提高机器人手臂的抗扭措施	97
7.8.2 优化后的中间臂有限元校核	98
7.9 TH50 型码垛机器人旋转底座优化设计	102
参考文献	107
第 8 章 码垛机器人末端执行器的研究与开发	108
8.1 码垛机器人末端执行器概述	108
8.2 TH50 型码垛机器人末端执行器的设计要求	109
8.3 TH50 型码垛机器人末端执行器的方案设计	109
8.3.1 被码放物料的特点分析	109
8.3.2 末端执行器机械系统方案设计	110
8.3.3 末端执行器工作循环图设计	111
8.3.4 末端执行器驱动系统方案设计	113
8.4 TH50 型码垛机器人末端执行器的载荷分析	113
8.4.1 末端执行器的结构设计	113
8.4.2 末端执行器的载荷分析	114
8.5 TH50 型码垛机器人末端执行器驱动元件的选型设计	125
8.5.1 侧板开合机构驱动元件的设计与选型	125
8.5.2 手指开合机构驱动元件的设计与选型	130
参考文献	133
第 9 章 码垛机器人控制系统设计	135
9.1 控制系统结构	135
9.2 机器人编程	137
9.3 任务规划与运动规划	139
9.4 伺服控制	142
参考文献	145

第 1 章

绪 论

0 引言

码垛是物流自动化技术领域的一门新兴技术，码垛要求将袋状、箱体等对象按照一定模式和次序码放在托盘上，以便实现物料的搬运、存储、装卸、运输等物流活动，现代化码垛技术常用于食品饮料、化工、煤炭等大批量生产的场合。

现代码垛技术最初采用的是机械式或液压式堆垛机，但是随着生产规模的扩大和自动化水平的提高，自动堆垛机的占地面积大、柔性差以及故障率高等缺点越来越突出，而码垛机器人以其高柔性、高处理能力及高可靠性的“三高”特性正在成为一种流行趋势。

国外从 20 世纪 60 年代开始研究工业机器人，码垛机器人是伴随着工业机器人技术的发展而出现的，日本、德国、美国等发达国家的研究已取得很好的成果，我国在这方面的研究也有了一定的积累，但是尚未有批量销售的成熟码垛机器人产品。

1.1 国外码垛机器人发展状况

1.1.1 研究现状

最早将工业机器人技术用于物体的码垛和搬运是日本和瑞典。20 世纪 70 年代末日本第一次将机器人技术用于码垛作业。1974 年，瑞典 ABB 公司研发了全球第一台全电控式工业机器人 IRB6，主要应用于工件的取放和物料的搬运。随着计算机技术、伺服技术以及多轴运动控制技术的发展和日趋成熟，日本、美国、意大利、瑞典、德国、韩国等国家工业机器人的研发取得了很好的成绩，相应推出了自己的码垛机器人，如日本的 FANUC 和 OKURA 以及 FUJI 系列，德国的 KUKA 系列，瑞典的 ABB 系列等。

德国、瑞典以及日本等国家的码垛机器人一般为 4 轴空间关节式机器人，主要由机器人本体、控制柜和末端执行器组成，机器人本体由基座、臂部以及腕部组成，如图 1-1 所示。

码垛机器人主体多采用优质轻巧的铸铝或铸铁材料制造，连杆式关节型的机构形式，均利用 CAD 和 FEM 有限元技术进行结构优化设计，具有较高的机械性能和抗震能力；驱动系统均采用模块式数字化 AC 伺服电动机和 RV 减速器，取消了腕部关节驱动电动机和平衡块，大大优化了整机结构；针对不同类型的产品和包装件，还设计了真空吸持、夹持、叉式等多种形式的智能末端执行器。这些先进码垛机器人最显著的技术特点就是采用了基于 PC 的开放式控制系统，令机器人能够高速、精准、稳定可靠地运行。如瑞典 ABB 公司为 IRB 系列

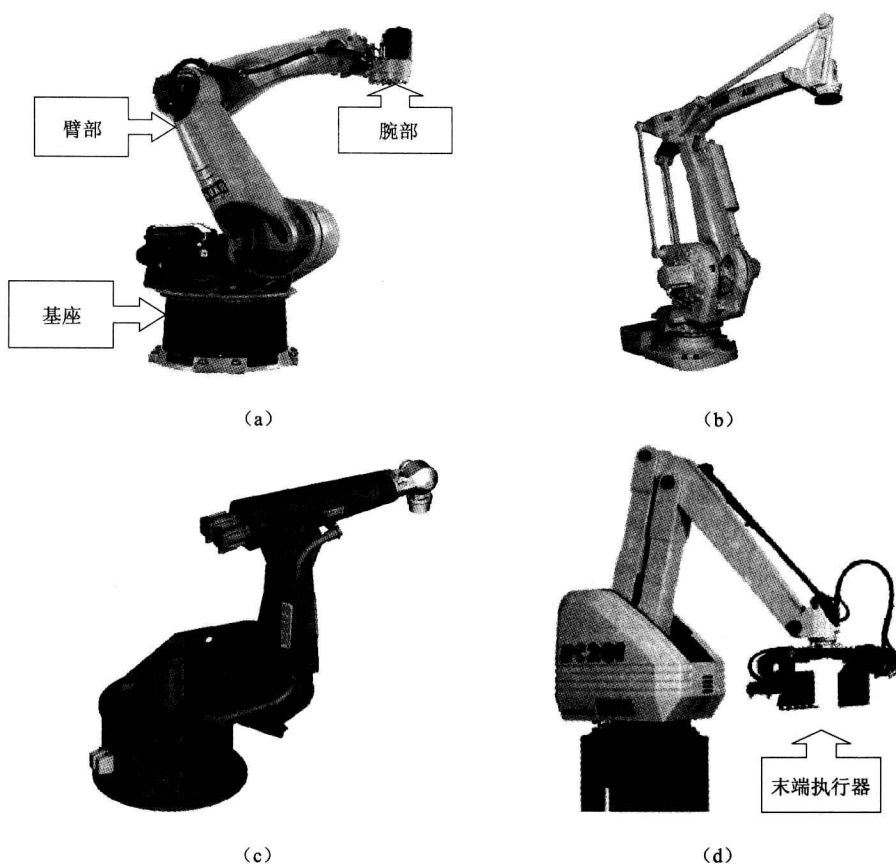


图 1-1 国外码垛机器人

(a) 德国库卡卸码垛机器人 KR 300A; (b) 瑞典 ABB 码垛机器人 IRB660;
(c) 德国 REIS 码垛机器人 RP40; (d) 日本不二码垛机器人 EC-201

码垛机器人研发了主动安全软件和被动安全软件，可对机器人的运动和载荷情况进行监控；电子稳定路径功能可确保机器人在考虑加速度、阻力、重力、惯性等条件的同时，遵循预定运行路径；主动制动系统可以确保机器人维持运行路径的同时对制动予以控制，被动安全功能可实现机器人进行负载识别。日本 FANUC M410i 系列码垛机器人软件体系也非常强大，PalletTool/PalletPRO™ 用于码垛设置、仿真和操作；Supports Collision Guard™ 用于减少机器人、夹持器、箱/袋以及外围设备的碰撞损坏；基于网络的软件工具用于远程联机、诊断和生产监控；还专门配备了机器视觉引导系统，用于引导机器人完成拆垛和检查工作。

1.1.2 应用现状

国外先进的工业机器人技术和高度发达的机器人产业使得码垛机器人在各行各业都得到了广泛的应用。

奥地利、瑞士、挪威等国家的酿酒厂、咖啡企业以及食品生产厂家，为减轻工人的负担，提高生产能力，降低产品破损率，利用 2~3 台 KUKA 码垛机器人，借助特殊的智能末端执行器，精准地抓取（或吸取）纸盒、香蕉纸箱、啤酒塑料箱或托盘，完成搬运和码垛（或拆

垛)。基于 PC 的控制平台确保机器人能同时处理 4 条生产线和多种类型产品,整个过程中被抓取对象不会承受过大的夹持力或吸力,而且紧凑的设计使机器人的占地面积和工作空间达到了理想的水平。

美国润滑油制造商 JTM 公司选择 MotomanModel UP165 型机器人用于箱装和桶装润滑油的码垛,该机器人 6 轴机器人,采用 AC 伺服电动机驱动。专门设计的真空吸附式末端执行器由 23 个直径为 75 mm 的真空吸头组成,每个真空吸头的控制阀由 PLC 实现控制,可一次吸取 2 个箱子或 3 个桶。采用码垛机器人后,每年可完成 200 000 桶和 150 000 箱润滑油的码垛作业,是人工工作量的近 2 倍。

Eric Hemmingson 指出 ABB FlexPalletizerRB640 型码垛机器人极大迎合了食品和饮料行业的需求,可用于纸盒、箱、袋类产品的包装、码垛、拆垛,其最大的特点之一就是弧形的上部手臂。腕关节的后仰不需要转动上部手臂,而由和上部手臂平行的连杆驱动实现。真空夹持器的动作由电磁控制器和真空泵实现。该码垛机器人的“大脑”是 ABB S4C 控制系统,系统的核心是基于微处理器的控制器,利用 CAN 现场总线实现通信。该控制系统配备一个存有不同状况信号的双通道安全系统,确保机器人安全运行。

Hershey 公司利用 3 台 Motoman 码垛机器人将 3 条生产线上不同类型的糖果纸箱集中码放在一个货盘上,然后送到发货中心。不同类型纸箱的码垛模式已经编好程序输入机器人,每一层的码放模式由纸箱尺寸决定,如果纸箱尺寸发生变化,预存的码垛程序需由技术人员从内存中调出,从而实现快速转换。每台机器人安装了柔性真空吸附系统,可自动控制需要触发的吸附手个数,以满足所需要拾取纸箱的个数。

J.Norberto Pires 开发了玻璃码垛系统,利用 ABB IRB4400 工业机器人(图 1-2 所示)完成玻璃的吸取和码放。该系统采用 ABB S4C 控制器,配备 PLC S7-300 控制机器人外围设备。带有接触式图像传感器的真空吸附装置可实现玻璃的吸取以及货盘参数的测量,每块玻璃从识别、吸取到码放完毕需要 9 s。软件系统利用 VC 开发,基于远程 PC 进行监控,可在线修改产品和工作参数,实现人机协作。

1.2 国内码垛机器人发展状况

我国工业机器人研究和应用开始于 20 世纪 70 年代,受当时经济体制等因素的制约,发展比较缓慢,研究和应用水平比较低。进入 20 世纪 80 年代以后,随着改革开放的不断深入,我国工业机器人技术的开发和研究才达到一定水平,码垛机器人技术也得到了快速的发展。

目前,我国自主研发的码垛机器人的结构形式主要有直角坐标型、关节型。直角坐标型码垛机器人为 4 轴机器人。4 根运动轴对应直角坐标系中的 x 轴、 y 轴和 z 轴,以及 z 轴上带有的一个旋转轴。直角坐标机器人的传动主要是通过驱动电动机的转动带动同步带运动,同步带带动直线导轨上的滑块运动。直角坐标机器人具有定位精度高、空间轨迹易于求解、计算机控制简单等优点,但所占



图 1-2 ABB IRB4400 码垛机器人

空间大、相对工作范围小、操作灵活性差、运动速度较低。

与直角坐标机器人相比,关节型机器人机身小而且动作空间大,动作灵活,可满足更多的生产要求,应用范围更广。为了提高国产关节型机器人的市场竞争力,促进产业化发展,在近 10 年的时间里,我国涌现出一批具有较强实力的专家企业、产业基地和科研院校。沈阳新松机器人自动化股份有限公司为满足客户特定环境下的需求,成功开发了码垛机器人系统。哈尔滨工业大学于 2004 年推出 1600 型基于 FFS 的高速高精度称重包装码垛生产线,采用全新结构形式与原理的新型全自动称重、包装、机器人码垛生产线,生产能力可达 1 600 包/小时以上。



图 1-3 TPR 系列码垛机器人在工作现场

上海交通大学机器人研究所携手沃迪包装科技有限公司开发出了新一代 TPR 系列码垛机器人,具有独特的线性四连杆机构,采用高强度铝合金制造的节能环保手臂,生产能力可达 1 600 包/小时,见图 1-3 所示。基于工业 PC 的控制器系统以及码垛现场 3D 仿真和自动干涉检测,大大提高了系统的可靠性、易操作性和可维修性。

苏海新等人开发了新型工业码垛机器人,其主体结构是基于平衡吊原理的七杆机构,具有 4 个自由度;开发了一种基于 IPC 和 PMAC 的模块化分布式控制系统,集主机通信、运动控制、后台任务处理等基本功能于一体,具有开放性强、实时性好、伺服控制精度高等特点。

李成伟等人研究设计了一种 4 自由度并联关节式搬运码垛机器人,只需更换手爪,即可对硬纸箱、塑料箱、袋状物、盒装物等搬运码垛。控制系统设计采用了基于 PC 的模块化分布式控制结构,上位机采用普通工业 PC,实现监控和作业管理,下位机采用 PMAC 运动控制卡和 PLC 可编程控制器,实现运动规划和控制。

杨灏泉等人研制了一种通用拆垛、码垛 SCARA 机器人,采用水平关节的机械结构形式,以基于 PC 的开放式 DSP 多轴运动控制器作为控制系统的核心,采用标准总线结构,使系统具有良好的可扩展性和网络通信功能;使用面向对象的开发模式,自主开发了机器人控制软件,实现了机器人监控、示教、文件管理、参数设置、轨迹规划和伺服控制等。

清华大学精仪系自动化实验室陈恳、杨向东和北京邮电大学自动化学院李金泉以及北京理工大学机械与车辆工程学院付铁共同开发了 TH50 型码垛机器人(图 1-4 所示),负载 50 kg,

旋转 70° 的情况下可搬运 1 000 袋/小时。图 1-5 为机器人搬运点、码盘相对位置布置图。



图 1-4 TH50 型码垛机器人

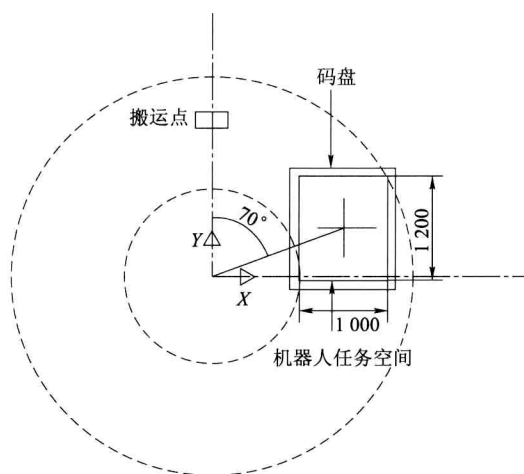


图 1-5 机器人、搬运点、码盘相对位置布置图

参 考 文 献

- [1] 李晓刚, 刘晋浩. 码垛机器人的研究与应用现状、问题及对策 [J]. 包装工程, 2011, (03).
- [2] 胡洪国, 高建华, 杨汝清. 码垛技术综述 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2000 (6): 7~9.
- [3] 毕胜. 国内外工业机器人的发展现状 [J]. 机械工程师, 2008 (7): 5~7.
- [4] MAHALIK Nitaigour P. Processing and Packaging Au-tomation Systems: a Review [J]. Sensing and Instrumen-tation for Food Quality and Safety, 2009, 3 (1): 12~25.

- [5] BLOSS Richard. JTM use Motoman to Stack Pails of Lubri-cants [J]. Industrial Robot, 2006, 33 (1): 24~26.
- [6] BRANTMARK Hakan, HEMMINGSON Eric. FlexPick-er with PickMaster Revolutionizes Picking Operations [J]. Industrial Robot: An International Journal, 2001, 28 (5): 414~419.
- [7] BLOSS Richard. Palletizing Candy Orders and Never Squee-zing the Chocolates [J]. Assembly Automation, 2010, 30 (1): 32~35.
- [8] PIRES J Norberto. Handling Production Changes On-line: Example Using a Robotic Palletizing System for the Automobile Glass Industry [J]. Assembly Automation, 2004, 24 (3): 254~263.
- [9] 赵臣, 王刚. 我国工业机器人产业发展的现状调研报告 [J]. 机器人技术与应用, 2009 (2): 9~13.
- [10] 苏海新, 韩宝玲, 罗庆生, 等. 基于 PMAC 的工业码垛机器人控制特性研究 [J]. 机械与电子, 2009 (9): 57~60.
- [11] 李成伟, 朱秀丽, 负超. 码垛机器人机构设计与控制系统研究 [J]. 机电工程, 2008, 25 (12): 81~99.
- [12] 杨灏泉, 李涛, 张勇, 等. 基于 DSP 运动控制器的拆垛、码垛 SCARA 机器人研制 [J]. 昆明理工大学学报 (理工版), 2004, 29 (6): 54~58.

第 2 章

码垛机器人驱动系统选型

2.1 机械工业产品的设计开发流程

机械产品设计是一项非常复杂细致的工作，要提供性能好、质量高、成本低、有市场竞争力、受用户欢迎的新产品，必须有一套科学的工作程序和方法。

根据中华人民共和国机械行业标准：《机械工业产品设计和开发基本程序》JB/T 5055—2011，机械产品的设计和开发的基本程序一般包括以下几个阶段。

1. 决策阶段

决策阶段是对市场需求、技术发展、生产能力、经济效益等进行可行性研究，包括必要地先行试验和（或）与产品有关要求的评审后，做出开发决策的工作阶段。

2. 设计阶段

设计阶段是通过产品结构、材料、工艺的分析选择，设计计算及必要的试验，完成编（绘）制全部产品图样和设计文件的工作阶段。

3. 试制阶段

试制阶段是通过产品的试制与试验，验证产品图样、设计文件、工艺文件、工装图样的正确性，产品的适用性和可靠性，并完成产品鉴定的工作阶段。试制可有样机（品）试制和小批试制。

4. 定型生产阶段

定型生产阶段是工艺、工装定型，并进行生产制造的阶段。大批量生产的某些产品（如汽车、拖拉机等）的设计和开发工作，在定型生产前可增加“试生产阶段”。

5. 持续改进阶段

持续改进阶段是通过了解并掌握加工、装配、贮运及使用中的质量信息、用户要求，及时汇总、分析与处理，进行必要的试验，及时改进和改善，以实现产品质量的不断发展，提高产品适用性的工作阶段。

对于一个已经决定开发设计的产品来说，意味着其已经经过了产品决策阶段，对于设计人员来说，接下来一般更关注设计阶段。设计阶段的详细内容见表 2-1。

表 2-1 设计阶段详细内容

阶段	工作程序	工 作 内 容
初步设计	1. 总体方案设计（设计和开发输入）	（1）编制技术（设计）任务书，其内容按 JB/T 5054.5 的规定 （2）绘制总图（草图）、简图（草图），其内容按 JB/T 5054.2 的规定

续表

阶段	工作程序	工 作 内 容
初步设计	2. 研究试验	根据提出的攻关项目及需要编制研究试验大纲，进行新材料、新结构、新原理试验。编写研究试验报告，其内容按 JB/T 5054.5 的规定
	3. 初步设计和开发评审	对初步设计进行评审并予以记录，其内容按 JB/T 5054.5 的规定
技术设计	1. 研究试验	根据需要提出研究试验大纲，进行主要零部件结构、材料、关键工艺试验。编写研究试验报告，其内容按 JB/T 5054.5 的规定
	2. 设计计算	根据需要，进行设计计算（如零部件的结构强度、应力、电磁等），并编写计算书，其内容按 JB/T 5054.5 的规定
	3. 技术经济分析	根据需要，进行技术经济分析，并编写技术经济分析报告，其内容按 JB/T 504.5 的规定
	4. 修正总体方案	修正并绘制总图、简图，提出技术设计说明书，其内容按 JB/T 5054.2、JB/T 5054.5 的规定
	5. 主要零部件设计	（1）绘制主要零部件草图，其内容按 JB/T 5054.2 的规定 （2）进行早期故障分析，并编写早期故障分析报告，其内容按 JB/T 5054.5 的规定
	6. 提出特殊外购件和特殊材料	编制特殊外购件清单和特殊材料清单
	7. 技术设计和开发评审	对技术设计进行评审并予以记录，其内容按 JB/T 5054.5 的规定
（设计和开发输出） 工作图设计	1. 全部零部件设计及编制设计文件	（1）提出全部产品工作图样、包装图样及设计文件，其内容按 JB/T 5054.2 和 JB/T 5054.5 的规定 （2）进行产品质量特性重要度分级，其内容按 JB/T 5054.5 的规定 （3）进行早期故障分析并采取措施，编写早期故障分析报告，其内容按 JB/T 5054.5 的规定
	2. 图样及设计文件审批	按规定程序对图样及设计文件进行会签、审批。其中标准化审查按 JB/T 5054.7 的规定；产品结构工艺性审查按 JB/T 9169.3 的规定。如需要，进行工作图设计和开发评审并予以记录，其内容按 JB/T 5054.5 的规定
	3. 工艺规程及工装设计	（1）工艺规程设计，编制工艺文件，其内容按 JB/T 9169.5、JB/T 9165.1 的规定 （2）必要的工装设计

2.2 工业机器人的设计流程

工业机器人是一种自动化程度很高的机械产品，其设计流程即应该符合机械产品设计的一般流程，又具有其特殊性。

本节主要讨论工业机器人的机械系统设计，并且关注的是其设计阶段流程，工业机器人

机械系统的设计阶段大致可以分为总体设计和详细设计。

机械系统总体设计是机器人设计的关键阶段,很大程度上决定了产品的技术性能、经济指标、外观造型。总体设计可分为功能原理设计和结构总体设计两个阶段,主要内容包括功能设计、原理方案设计、总体布局、主要技术参数的确定及技术分析等内容。

对于机器人来说其机械系统总体设计主要内容有:确定基本参数、选择运动方式、手臂配置形式(构型)、驱动方式、机械结构设计等,具体如下:

(1) 根据机器人工作任务和目的来确定机器人本体的基本构型、驱动和控制方式、自由度数目。

(2) 根据机器人工作任务、工作场地的空间布置等来确定机器人的工作空间。

(3) 根据机器人工作任务来对机器人进行动作规划、制定各自由度的工作节拍、分配各动作时间,初步确定各自由度的运动速度。

(4) 根据机器人的工作空间,初步确定机器人各部分(各臂)的长度尺寸。

(5) 对机器人进行初步受力分析,根据受力分析结果及各关节的运动速度,选择各关节驱动部件的基本参数(电动机和减速器的选型计算),对于速度较低的可以对机器人进行静力分析,对于速度较高的机械,各构件的惯性力影响较大,要进行动力学分析,本书第5章中就是采用动态静力学分析方法对机器人进行动力学分析。

(6) 根据工作要求确定机器人的定位精度。定位精度取决于机器人的定位方式、运动速度、控制方式、机器人手臂的刚度等。

(7) 根据技术要求等确定各部件的材料和结构及加工工艺;然后验算各构件的机械强度、驱动功率和给出最大负载重量,验算机器人各关键部件使用寿命。初步确定各构件的机械结构。

(8) 把机器人机械系统总体设计编写成文,编制技术(设计)任务书,并绘制系统总图(草图)、简图(草图)。

经过以上过程,完成了机器人机械系统总体设计,接下来还需对机器人机械系统进行详细设计计算,其过程如下:

(1) 对关键零部件的结构进行详细设计,并对主要零部件结构、材料、关键工艺进行试验。

(2) 编写设计计算说明书,绘制主要零部件草图。

(3) 全部零部件设计及编制设计文件。

以上是工业机器人机械系统设计的一般流程,通过本阶段的设计和计算,可以初步确定机器人各构件的结构、材料、工艺的要求等,完成设计计算及必要的试验,完成编(绘)制全部构件的图样和设计文件。

此外,以上各步骤常需要互相配合、交叉进行。设计工作也需要多次修改,逐步逼近,以便设计出技术先进可靠、经济合理、造型美观的工业机器人。

在机器人的总体设计完成后,就可以进行机器人驱动系统的设计计算了,驱动系统的设计除了确定驱动方式外,还需要确定驱动系统的具体参数,本书所设计的码垛机器人的驱动系统采用伺服电动机和精密减速器的电动机伺服驱动(区别于液压驱动、气动驱动)。

在选择伺服电动机和精密减速器之前,还需要清楚工业机器人对驱动电动机的要求,以便根据要求选择机器人的伺服电动机和精密减速器,工业机器人对伺服电动机的要求有: