

南京理工大学

硕士学位论文

小型排爆机器人总体设计的研究

姓名：刘铁军

申请学位级别：硕士

专业：机械制造及其自动化

指导教师：何勇

20060626

摘 要

小型化、轻量化和多功能的排爆机器人，在军事上极具应用和研究价值。本文针对军用机器人的特殊性，以定位于兼有排爆和作战功能的小型排爆机器人为研究对象，进行总体设计的研究。本文研究的机器人以小型通用移动平台作为载体，通过搭载机械手和武器平台，实现排爆和作战功能。本文首先通过对设计功能和任务的分析，制订了系统总体性能指标，并以此为基础，从机构角度对排爆机器人的移动平台、武器平台、机械手三个分系统展开方案的设计与论证。构造了移动平台基本结构，建立了运动学模型，对其越障运动进行了分析；对武器平台主要建立了枪架的受力模型，以及机器人的射击状态稳定性动力学模型，并定性的分析了影响稳定性的各因素，提出了提高稳定性的方法；从总体上对机器人的静态稳定性进行了分析；对机械手确定了结构基本参数，并在此基础上进行了详细的机械手样机设计，建立了机械手的位姿运动学方程和速度微分方程。通过总体设计提供的设计方案和分析方法，为下一步详细设计的深入奠定了理论基础。

关键词：小型排爆机器人 总体设计 运动学模型 稳定性模型

Abstract

Miniaturized and lightweight and multifunctional anti-explosion robots are of great practical and theoretical valuable in military. This research aims at the study of military robot, and tries to present a general design of robots that can be used for both purposes: anti-explosion and military action. The very robot takes the small and moveable platform as a carrier, through the equipment of a mechanical hand and a weapon platform, it can realize the functions of anti-explosion and combat. First, this paper analyzed the designing task, decided the general performance index, and then carried out the argument and design of every sub-system from organization angle. This paper construct reasonably of the movable platform, set up the kinematics model, and analyzed the typical movement of climbing barriers. To the military platform, this paper created a mechanistic model for the gun mount, a shooting stability dynamics model, and then analyzed the factors that will influence the stability and give count measures. On the basis of optimizing the basic index of the mechanical hand, this paper present a detailed design sample for the mechanical hand, formulate the kinematics equation of the mechanical hand and the differential equation of velocity to the mechanical hand. This study would provide theoretical base for further designing.

Key words: Anti-explosion robots General design
Kinematics model Stability model

声 明

本学位论文是我在导师的指导下取得的研究成果，尽我所知，在本学位论文中，除了加以标注和致谢的部分外，不包含其他人已经发表或公布过的研究成果，也不包含我为获得任何教育机构的学位或学历而使用过的材料。与我一同工作的同事对本学位论文做出的贡献均已论文中作了明确的说明。

研究生签名： 刘铁军

2006年6月26日

学位论文使用授权声明

南京理工大学有权保存本学位论文的电子和纸质文档，可以借阅或上网公布本学位论文的部分或全部内容，可以向有关部门或机构送交并授权其保存、借阅或上网公布本学位论文的部分或全部内容。对于保密论文，按保密的有关规定和程序处理。

研究生签名： 刘铁军

2006年6月26日

1 绪论

1.1 研究背景

机器人是二十世纪人类最伟大的发明之一。人类对于机器人的研究由来已久,但直到上世纪 50、60 年代,随着机构理论和数控伺服技术的发展才真正进入实用化。上世纪 70 年代后,计算机技术、控制技术、传感技术和人工智能技术迅速发展,机器人技术也随之进入高速发展阶段,并发展成为集机械、电子、控制和计算机技术的一项综合技术^[1]。

在历史上,所有的高新技术首先被考虑用于军事用途,机器人也不例外。未来战争将是建立在高科技条件下的、高度信息化的全方位立体化的战争,各种具有巨大杀伤力的先进武器的广泛使用,将使未来的战场环境异常复杂、信息瞬息万变,士兵的生命无时无刻受到来自天空、地面、水下各种先进武器的威胁,完全依赖士兵作战能力的战争模式正越来越受到挑战。在军用机器人领域,排爆机器人是较早投入实战的军用机器人之一,目前,排爆机器人在一些发达国家的军队已得到广泛使用。英国早在 60 年代就研制了“手推车”排爆机器人用于英阿马岛战争的爆炸物清理,其改进型的土拨鼠及野牛两种遥控电动排爆机器人被英国皇家工程兵在波黑及科索沃用于探测及处理爆炸物,德国 MV494 型遥控排爆机器人也曾装备了其驻索马里的维和部队^[3]。在近年来美国发动的几次局部战争中,基于“零伤亡”的作战思想,美军开始在战场上大量使用排爆机器人替代士兵执行排爆任务,其 Talon 排爆机器人 2000 年就参与波斯尼亚地区的军事行动,随后又参与 2002 年初的阿富汗行动以及 2003 年的伊拉克战争,执行的主要任务是爆炸物检测及其处理,阿富汗和伊拉克战争中共执行 20000 项任务,在战争中有效地降低了己方的伤亡^[4]。

此外,由于政治、经济、民族、宗教等关系的错综复杂,国际和地区恐怖主义在世界各国有泛滥的趋势。在公共场所安放爆炸物以产生恐慌(爆炸恐怖犯罪)即是其集中表现形式。相对于其他形式的恶性犯罪,恐怖爆炸由于其危害面广、社会和政治负面影响面大,日益成为令当今世界各国政府头疼的问题。据美国官方统计,1968 年国际上的恐怖主义事件仅有 120 起,而 1984 年增至 652 起。1983 年的 500 起恐怖活动中,有 262 起是爆炸事件^[3]。尤其是最近几年,随着国际形势的动荡,恐怖爆炸事件更是此起彼伏,接连不断。除了传统的恐怖活动热点地区,例如中东、阿富汗等地区外,美国、英国、西班牙、日本、俄罗斯、印度尼西亚、乌兹别克斯坦、马来西亚和泰国,菲律宾也接连发生恐怖爆炸事件,影响较大的有俄军医院爆炸案、西班牙马德里爆炸案、印尼巴厘岛爆炸案、伦敦连环爆炸案等。就连以往很少有恐怖活动波

及的国家和地区,近年来也接连发生恐怖爆炸事件。而且,随着时间的推移,这些活动还愈演愈烈。作为应对,反恐排爆已经成为世界各国政府最为关注的问题之一。目前在世界范围内,排爆机器人已经成为反恐作战的重要装备之一。

排爆机器人是目前较具研究价值的机器人产品,在反恐领域可用来执行诸如反恐排爆的任务,战场上排爆机器人则用以执行诸如排除爆炸物、战场信息收集的任务;稍加改造,即可加装单兵武器用于武装巡逻、战斗值勤等高危险任务。目前国内已经着力于排爆机器人的研发,但距离军事用途还有相当的距离。基于军用机器人产品系列化、通用性的需要,本文对基于小型移动平台基础上,兼具排爆和作战功能的机器人进行总体设计的研究。

1.2 国内外研究现状

排爆机器人是一种较为复杂、对智能化要求较高的机器人产品,属于非结构环境下的地面移动机器人范畴。对其研究的开展,也主要集中在西方发达国家。其中以美、英、德、法、以色列等国家技术较为成熟^[5],并相继有排爆机器人产品投入实际应用。



图 1.1 “手推车”排爆机器人

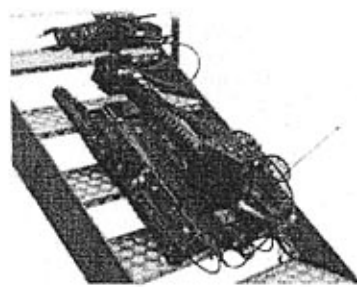


图 1.2 “独眼龙”排爆机器人

英国被公认为较早研制排爆机器人的国家之一。由于英国与北爱尔兰长期处于对峙状态,并不断受到爆炸威胁,早在 60 年代就研制出了实用化的产品“手推车”和“超级手推车”排爆机器人,累计在世界销售了 800 多台,见图 1.1。后来又加以改进,除了原有的电视监视器,引爆爆炸物的霰弹枪,各种转臂和夹具、钢索外,又安装了电荷耦合器件电视摄像机,使机器人提高了清理爆炸物的效率。其中“超级手推车”车重 204kg,长 1.2 米,宽 0.69 米,最大高度 1.32 米,最大速度 55 米/分钟。

ABP 公司成立于 1965 年,是英国国防部常用工程设备的供应商。近 30 年以来,ABP 公司专为英国国防部生产和供应 EOD 爆炸品解拆装置。“独眼龙”是 ABP 公司生产的小型排爆机器人(MROV),可无线遥控或通过光纤进行操作,用于解拆未爆炸装置和常规武器,或用于其他存在高风险的危险领域。“独眼龙”具有除障和爬梯能力,

可携带和操作爆炸物解拆器、小型武器、操纵器、手动工具、化学武器和爆炸品侦测器、X光检测仪以及热成像系统等等。现在“独眼龙”及其衍生产品已广泛应用于军队。见图 1.2。

美国 Remotec 公司的安德鲁斯 (Andros) 系列排爆机器人是产品系列和型号较多的排爆机器人系列产品, 主要型号有 Andros II、Andros VA、Andros VIA、F6A 等。其中 F6A 型最突出的特点是行走速度快, 操作人员可以迅速执行任务。F6A 机身较窄, 尤其适合在狭窄的地方 (例如飞机上) 进行操作。F6A 采用了 Andros 系列机器人独有的活节式履带, 能够跨越各种障碍, 在复杂的地形上行走。全重 159kg, 长 1.32 米, 宽 0.45 米、高 1.12 米, 速度最高 5.6 公里/小时速, 可爬 45°台阶和斜坡, 攀上 46 厘米高台, 跨越 46 厘米壕沟。其中 F6A 见图 1.3。

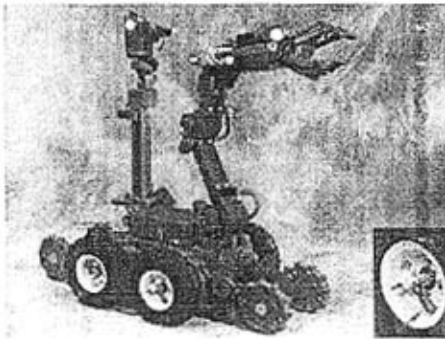


图 1.3 F6A 排爆机器人

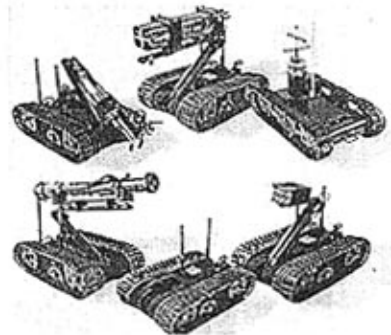


图 1.4 Talon 机器人系列

美国 Foster-Miller 公司是一家生产可在伊拉克和阿富汗执行排爆任务机器人的最大供应商。目前已有 250 多辆 TALON 型机器人部署于战场。TALON 机器人除了排爆外, 还可以直接参加反恐战斗, 可以装备 M240 或者 M249 型机枪。此外, 还可以装备火箭发射器, 用于爆炸物处理、侦查、通信、探测、警戒、防御与救援等各种任务。36kg 的重量非常便于人员携带, 可在全天候、昼/夜、两栖及各种地形环境下使用, 是典型的利用通用化底盘开发的系列化军用机器人产品。见图 1.4。

此外, 国外较具代表性的排爆机器人产品, 还有英国 P.W.ALLEN 公司 Defender 排爆机器人、加拿大 Pedesco 公司的 RMI-10 排爆机器人; 法国 Alsetex 公司的 MC 800 小型排爆机器人、法国 Cibernetics 公司的 Minirob 排爆机器人、法国 DM 公司研制的 RM35 机器人; 德国 Unimex Handels 公司的 Rode 排爆机器人、德国 Telerob 公司的 MV4 爆炸物处理机器人等, 其中部分机器人已经过实战考验, 并装备于军队和警察部队。

国外排爆机器人产品, 经过国外几十年的研究, 已经得到了大量的应用, 功能完善、技术先进是其主要特点, 目前, 国外在经历了第一代机器人产品, 即完全依赖人

工控制的遥控排爆机器人；以及第二代具有视觉、感知和信息处理技术的排爆机器人产品，正积极展开具有高度智能化、网络化控制、全自主能力的排爆机器人产品的开发，神经网络、多信息融合等技术逐步应用于其排爆机器人产品^[9]。

同时，国外基于多年的基础性研究以及相对成熟的技术，着手于系列化、规模化的排爆机器人的生产。其系列化产品配件不仅齐全，而且具有良好的通用性、互换性，模块化的设计思想使得一种产品经过简单的设计，即可派生出一系列适合不同用途的机器人。



图 1.5 super-D 排爆机器人

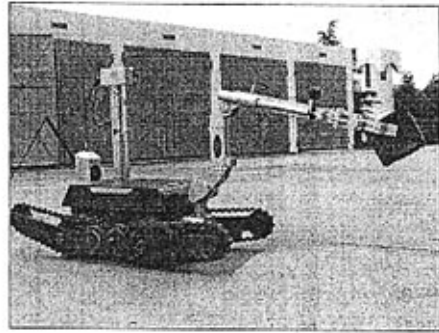


图 1.6 “灵晰-B”排爆机器人

相对国外在排爆机器人方面的研究，国内开展较晚，但是近年来在该研究领域也取得了一定的进展。国内一些厂家纷纷结合研究机构、院校展开排爆机器人的研发，并相继有一批产品问世，并投入市场。

北京中泰和上海交通大学研制的 Super-D 机器人，长宽高分别为 1.7 米×0.7 米×1.2 米，重 200kg。其移动速度可以达到 40 米/分，可以爬上倾斜角度为 40 度以上的楼梯和坡度。见图 1.5。

由中国科学院沈阳自动化研究所研制的“灵晰-B”由本体、控制台、电动收缆装置和附件箱四部分组成，自重 180kg，由电池电力驱动，最大直线运动速度为 40 米/分钟，采用三段履带的设计可以让机器人上下楼梯，跨越 0.45 米高的障碍，实现全方位行走，具备较强的地面适应能力，并应用于第十届全国运动会期间。见图 1.6。

北京金吾高科技公司的 JW901 排爆机器人，机械臂最高伸展 2.7m。可将可疑物放置于高 1.8m 的车载防爆罐中；机械臂最低可水平伸出距地面 0.2m，可伸入车底拆弹或抓取可疑物品；抓取器纵向旋转 360° 横向旋转 90°，可灵活地将物品从防爆罐之中取出；抓取器最大张开距离 48cm；双卡头机械手可卡装多种工具，包括切割器、水炮枪、光缆瞄准手枪、X 光机等。见图 1-7。

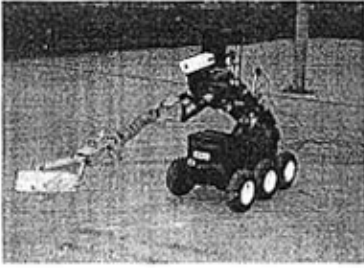


图 1.7 JW901 排爆机器人

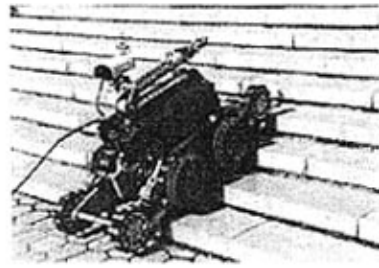


图 1.8 DRAGONIII 型排爆机器人

北京瑞琦时代技术开发有限公司的 DRAGONIII 型排爆机器人,采用关节型折叠四履带移动装置,装备有 3+1 自由度机械手(包括大、小臂及旋转抓爪),手臂全展时可抓举重物 10kg,手臂总长 ≥ 900 毫米。行驶速度最高 30 米/分钟,可在 40° 楼梯和斜坡行走,跨越 300 毫米高障碍和 300 毫米宽的壕沟。安装两台 CCD 摄像机、照明设备、一台监视器和扬声器、话筒。可选择爆炸物销毁器、散弹枪和双钳式抓爪。

国内各高校和科研机构中,上海交通大学较早开展了包括排爆机器人在内的特种机器人及其相关理论的研究,北京理工大学、华南理工大学、哈尔滨工业大学等高校也投入排爆机器人及其相关技术的研究,并相继有一批成果问世。对排爆机器人的研究也曾列入了国家“十五”863 计划^{[14][18]}。

与国外相比,国内排爆机器人的研究还处于发展阶段,从事排爆机器人研究生产的仅有极少数的厂家,基础性研究方面的投入不够,缺乏具有自主知识产权的技术,部分产品还处于模仿国外产品的阶段,没有系列化的、较为成功的排爆机器人产品。产品单一、功能尚有欠缺。国内目前还主要依赖国外的排爆机器人用于反恐排爆,军用领域的排爆机器人还是一片空白。国内对于排爆机器人的研究,应该借鉴国外的成功经验,积极开展具有自主知识产权的排爆机器人及其相关技术的研究,尤其基于小型化的,具有军事多用途排爆机器人的研究。

1.3 研究内容

1.3.1 研究意义

排爆机器人属于非结构化环境下作业的地面移动机器人。目前,国内对其研究主要在具有单一排爆功能的民用领域展开,单一地对具有一种功能的机器人进行研究,不考虑其通用性和系列化,将会带来大量的重复性研究,耗费不必要的人力和经费,开发过程漫长。相对于严格的军用标准,其军事用途更是受到质疑。未来战场,军用机器人将扮演越来越重要的角色。排爆机器人,尤其是小型化、轻量化和多功能的排

爆机器人,在军事应用领域具有更为广泛和深层的意义。以一种智能化小型移动平台作为载体,分别搭载可更换的机械手和武器平台,实现包括排爆、持枪作战等在内的多种功能,在战场上将具有较强的生存能力,更加适合于未来战争的要求。对其进行理论和实践的研究,对于国防现代化意义深远。

1.3.2 研究内容

本文对基于小型化、通用化、多功能的小型排爆机器人总体技术进行了分析和研究,本文研究的机器人是基于一种小型化移动平台的多功能排爆机器人,移动平台通过机械手实现其排爆功能,通过武器平台则可具有作战能力。由于军用机器人的复杂性和特殊性,对其展开研究需要大量的人力和物力,是一个复杂的系统工程,需要做大量的理论方面的研究,本文研究侧重于机器人机构及其实现,主要研究内容如下:

(1)小型排爆机器人系统组成和性能

从排爆机器人的作业环境和设计要求两方面对设计任务进行了分析,从整体概念上进行了机器人的功能分析,并在此基础上制定了总体性能指标。

(2)小型排爆机器人总体方案设计

对机器人结构主体的三个重要组成部分,即移动平台、武器平台、机械手进行了方案的设计分析与建模。对移动平台进行了方案的论证和结构设计,建立了正逆运动学模型,对越障过程进行了分析;武器平台分析了结构方案,并建立了枪架的力学模型,以及武器发射状态的射击稳定性模型,通过定性的分析,提出了提高稳定性的办法;对于机械手,确定了基本构型和臂长等参数;并从总体上对机器人的静态稳定进行了分析。本章中确定的设计和计算方法,为下一步展开更为详细的设计提供指导。

(3)机械手样机设计

对于排爆机器人的机械手,利用模块化设计方法,做了详细的设计。鉴于 D-H 方法在机器人的运动学建模中已经成为标准方法,在机械手运动学建模中运用 D-H 方法,对正、逆运动学方程和速度方程进行了推导,通过计算仿真证明了其正确性。

2 小型排爆机器人系统组成与性能指标

本文的排爆机器人属于军用地面移动机器人的范畴。其移动载体为小型移动平台，配合机械手，实现排爆功能；配合武器系统，可实现其作战功能。以实现系列化、通用化的军事多用途机器人的需要。相对于民用机器人，军用机器人的要求更为严格，设计开发也是一个复杂的过程。设计工作的开展，首先必须建立在任务分析的基础上，基于技术先进性和可行性，提出设计要求，对系统总体功能和性能指标参数进行初步的拟定，以指导进一步设计任务的展开。

2.1 设计任务分析

本文设计的排爆机器人，设计目的主要应用于在战场环境下，代替人工完成排爆、持枪作战等复杂的战斗任务。在总体设计阶段，对设计任务进行具体而又全面的分析是十分必要的。

(1) 作业环境

作为军用地面移动机器人，其实施的各项作业任务在复杂的环境下展开，作业环境受到各种非确定因素的影响，所面临的作业现场往往是无法事先预测的。作业环境是决定机器人设计的重要因素。对于排爆机器人，其作业可能需要在野外或城市内展开。机器人实施作业的地面环境由各种天然环境和人工环境构成，机器人到达任务现场，可能会遇到各种凸台、壕沟、斜坡、阶梯，完成穿越灌木丛、涉水上岸，在沙漠、草地、池沼等复杂的地形地貌下完成行走，各种结构化和非结构化环境相互交错，使其地面作业环境异常复杂。作业环境的非结构化是其主要特点。

(2) 设计要求

目前，小型化、轻量化和智能化是军用机器人的发展趋势之一，轻量化的设计不仅便于运输，也有利于各项后勤保障的实施。对于本文设计的排爆机器人，建立在结构简单、可靠的基础上，应能够以自主和半自主及人工遥控的方式，实现排爆和战场作战，并且体积小、重量轻。

2.2 功能分析

在吸收国内外研究成果的基础上，从兼顾先进性和可行性出发，对排爆机器人提出如下的功能要求。

(1)全天候作业

目前,作战飞机的全天候作战能力已经依靠微光夜视、自动导航、多普勒雷达、GPS等手段得以实现,地面作战车辆也利用相似的方式基本实现了全天候作战能力。在雨、雪、浓雾和夜间环境下,为单兵提供的适应全天候作战的工具极其有限,即使配合红外微光夜视设备,也由于其视野的限制难以对战场环境进行全面地了解。机器人可以利用其先进的探测和监测设备,对战场环境进行全面的监控,为士兵提供包括视景在内的全面的战场信息。机器人由各类精密仪器和机电系统构成,作为全天候的作战工具,机器人本体必须具有全天候环境下作战的包括防雨、防潮在内的自身防护能力。

(2)多地形适应和自主导航

无论野战环境还是城市作战,所面临的地形都将极其复杂。完全依赖人工操作不仅是行动缓慢,而且操作起来相对比较复杂。对于多地形适应能力的地面军用移动机器人的研究,国外在实现了基本的爬坡、越障、避障功能的基础上,目前已广泛开展了基于自主和半自主的路径规划优化等技术的研究,在实验室阶段通过了部分实验的验证。通过软件实现其智能化的前提是机器人本体具有多地形适应能力。对于体积和重量都相对小巧的机器人来说,其爬坡越障和过沟壑的能力相对有限,尤其是涉水上岸,由于河泥的软滑,移动平台的附着力和攀爬能力急剧下降,这是一个较难解决的问题。设计功能主要应能实现具有爬坡越障及各种复杂地理环境的多地形适应能力。

自主和半自主导航是机器人应具有的功能,通过避障雷达、激光测距、GPS等设备,机器人可以在复杂的环境下无需人工干涉完成各项作战任务,最后回到指定目标地点。自主导航并非万能,以目前的技术条件,对于较为复杂的环境,利用软件实现自主导航,可能会使机器人处于“两难”的境地,因此,还应能够与人工遥控相配合,由人工进行适当的干预,相对较为简单的环境,以及其基本的避障,越障能力判断则由机器人自主进行。

(3)排爆和战场信息收集

各类隐蔽和非隐蔽的爆炸物,对士兵的生命是极大的威胁。以海湾战争后的科威特为例,在伊科边境一万多平方公里的地区内,有16个国家制造的25万颗地雷、85万发炮弹和多国部队投下的布雷弹及子母弹的2500万颗子弹,其中20%没有爆炸^[20],在许多国家,甚至还残留着第一次世界大战和第二次世界大战未爆炸的炸弹和地雷。新型的爆炸引信大量应用于地雷等爆炸物,使人工排爆的难度越来越大,由此带来的非战斗减员对于部队的战斗力和士兵的士气是一种严重的打击。

此外,在战场上,敌我双方为获得全方位的战场信息,在战场上通过飞机等方式大量布撒各类传感器用于侦测情报,其传感器大都体积较小,通过肉眼极难分辨,且具有自毁功能。机器人以其小巧的体积穿梭于战场,利用红外、电子鼻、无线侦测等

先进的传感器进行探测，有效的销毁敌方的各类战场传感设备，切断敌方的信息来源和数据链路，这些都是依靠士兵难以实现的。

(4)持枪作战

恶劣的作战环境和复杂的作战任务是造成士兵伤亡的主要原因，此外对作战环境的判断由于人为因素的影响也会造成无谓的非战斗减员，从美国军方的统计数字不难看出，非战斗减员也是造成人员伤亡的一大因素。（见图 2.1）但终其因原，恶劣的作战环境本身是造成士兵心理压力从而导致伤亡的主要因素。机器人可以相对专注的投入作战任务，准确而又及时地做出判断，为作战任务赢取时间、取得先机。

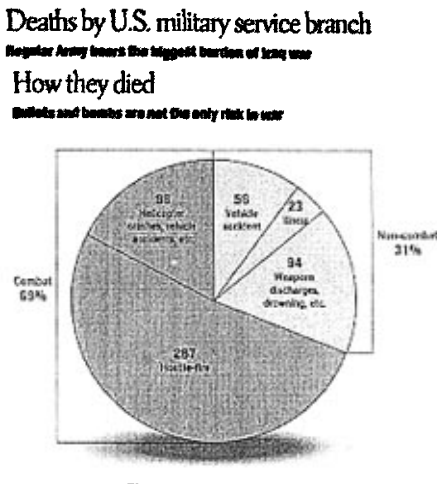


图 2.1 美军对于非战斗减员的统计

机器人的武器系统主要为可自动瞄准的自动步枪，携带武器系统，机器人取代士兵执行各种高危险任务，如战斗巡逻、执勤等高危险的作战任务。尤其是在夜间和复杂气象条件下，利用机器人先进的传感和监控设备，有利于首先发现敌情并采取应对措施。对于机器人的攻击，目前还不能依赖其基于敌我识别和模式识别的自动系统，必须由人工发出指令才能够采取攻击行动，否则极易造成误伤。国外预测，具有完全自主射击能力的机器人还需 30 年的时间。

2.3 系统组成

根据设计任务的分析，确定排爆机器人由图 2.2 所示各部分组成，包括机器人本体和远程控制端。机器人本体结构主要由移动平台、武器平台、机械手三个部分组成。移动平台作为整个排爆机器人功能实现的载体，可分别搭载机械手执行爆炸物排除任务，或搭载武器平台执行作战任务。

控制端部分由人工进行监控和执行相应的操作，图 2.3 对控制端作了大体布局的设计。对于机械臂的人工遥控，除了能够实现各关节的独立控制，还应能够联动控制，以实现排爆操作时的灵活控制性。

机器人本体与控制端通过加密的无线数据链路通讯，实现可靠的双向数据交流，并可通过网络系统实现网络化控制以及多机器人协调的功能。

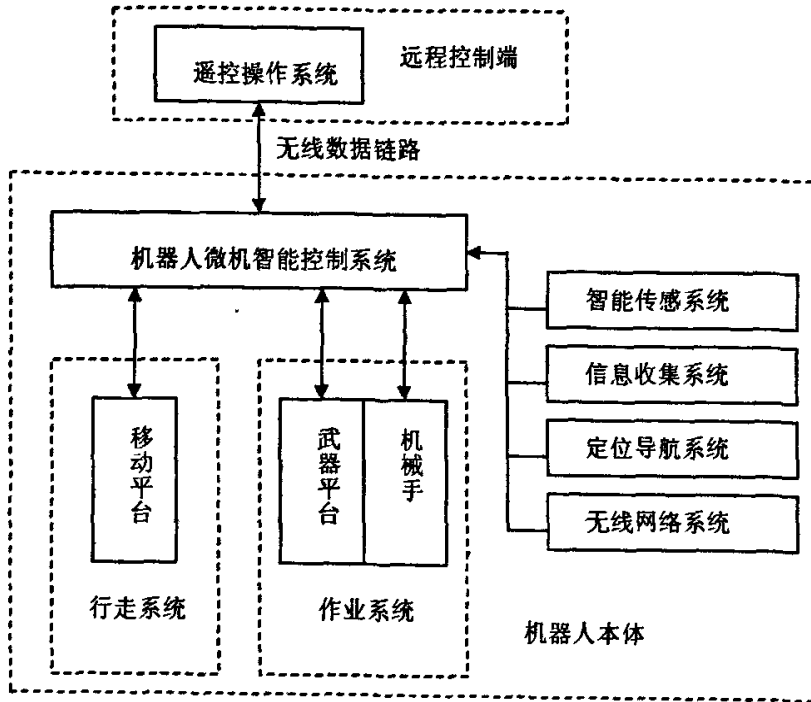


图 2.2 系统总体组成框图

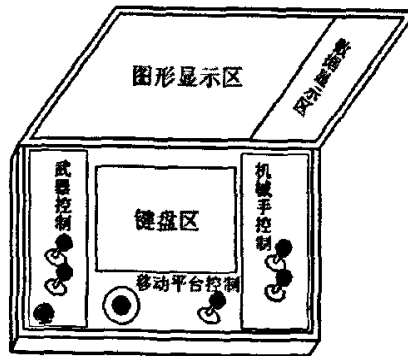


图 2.3 远程控制端简图

2.4 总体性能指标

通过对设计任务和对系统功能和组成的分析,对排爆机器人总体性能指标进行初步拟定。

(1)移动平台

自重: $\leq 50\text{kg}$

载重: $> 30\text{kg}$

公路最高直行速度: 3m/s

续航时间: 3h

爬坡能力: $\geq 30^\circ$

平地越障高度: $\geq 15\text{cm}$

此外,移动平台应能实现原地回转的运动特性要求,并在实现上述功能的前提下减小车体结构尺寸,车体宽度应小于 70cm 。

(2)机械手:

机械手性能主要由自由度和抓取能力衡量,对于本文设计的小型排爆机器人的机械手,主要设计用于轻型爆炸物的抓取及战场收集和布置各种传感器,因此抓取能力设计要求满足 $1\sim 2\text{kg}$,自由度 ≥ 4 。

(3)武器平台:

武器主要考虑选择 5.8mm 枪弹系列轻武器,武器平台的运动应能实现俯仰角度 $-5^\circ \sim 10^\circ$,水平方向左右偏转 $\pm 180^\circ$ 。

(4)控制方式:自主、半自主、遥控。

(5)供电方式:锂离子电池

2.5 本章小结

在本章中,从排爆机器人的作业环境和设计要求两方面对设计任务进行了分析,从整体概念上确定了机器人应具有的功能,对于整个系统,从本体结构上确立了由移动平台、机械手、武器平台三大部分的结构,并在此基础上制定了初步的总体性能指标。

3 小型排爆机器人总体方案设计

排爆机器人的设计,受到多方面因素的制约,基于战场条件的要求,机器人必须满足结构简单、可靠、小型化、轻量化的要求。合理的方案设计是实现机器人良好性能的前提,在方案设计中,必须进行大量的分析和论证。从机器人的总体结构上,排爆机器人主要由移动平台、机械手和武器平台组成,其中,移动平台是整个机器人实现各项任务的载体。在本章中,移动平台部分设计了基本结构,进行了正逆运动学的建模,并对越障运动进行了分析;通过对武器平台的稳定性建模,定性地分析了机器人的射击稳定性问题;通过优化确定了机械手的主要参数,并从总体的角度对机器人的斜坡静态稳定性进行了分析。

3.1 移动平台方案设计

3.1.1 移动平台构型

移动平台的作业环境非常复杂,其环境因素主要包括原有的天然环境,以及各种人工干预的环境,称之为非结构化环境。对于移动机器人来说,非结构环境是多样的,复杂的三维地形,一般由平坦的地面、斜坡、障碍、台阶、壕沟、浅坑等地形组成。实质上,最典型的情况是斜坡、向上和向下的台阶,所有地形可简化为以上三种典型地形的组合,移动机构只要能够通过上述三种地形及其组合,即可通过一系列动作序列通过各种复杂的三维环境。

具有多地形适应能力的移动机构,目前主要有轮式和履带式、腿足式。对于本设计,其主要功能除了爬坡越障和多地形适应能力、全方位转向功能外,还应在速度、运行平稳性、载重自重比等方面全面予以考虑。在非结构环境下,任何一种移动机构都有其优势和实用性,同时存在某些缺陷。对移动机构的设计和选择,需要综合设计要求及其他相关因素。

(1) 轮式移动机构

轮式移动机构可以达到较高的运动速度,在相对平坦的地面上,轮式移动具有相当的优势,控制也相对简单,轮式移动机构由于应用广泛,是目前研究最为透彻的移动机构之一。传统的轮式行走机构有三轮、四轮、六轮的结构形式。相对而言,轮式移动机构的缺点也是明显的,由于与地面接触面积小,在土壤压比较小的柔软路面和湿滑的路面上易产生沉陷和打滑。这些都使轮式机构在大多数野外复杂环境下功能受

到限制。为提高轮式行走机构的多地形适应能力及其通过性，在传统的轮式行走机构上进行结构变形，出现了四轮加前后摆、六轮加前后摆、行星轮式等具有多地形适应能力的行走机构；车轮结构也出现了超轻线编制轮胎、半球形轮胎、麦卡姆轮等多种车轮形式。

(2)履带式移动机构

典型的履带式移动机构由驱动轮、导向轮、托带轮、履带板、履带架等部分构成。履带式移动机构适合于在复杂路面上行驶，它是轮式移动机构的拓展，履带本身起着给车轮连续铺路的作用。履带式移动结构具有主要有以下的优点：地面支撑面积大，接地比压小，滚动摩擦小，通过性能较好，转弯半径小，牵引附着性能、越野机动性、爬坡、越沟等性能优于轮式移动机构，履带式移动机构广泛用于各种军用地面移动机器人。

普通履带式移动机构越障能力有限，只有通过加大带轮直径和履带长度来提高其越障性能，并且履带式移动机构结构复杂，对其控制和运动分析较为困难，大多都是通过实验方法进行研究。

为改善普通履带式移动机构的缺点，主要通过改变履带的形状和结构来实现，卡特比勒 (Caterpillar)、形状可变履带、位置可变履带、履带式加装前后摆等结构形式相继出现，并应用于各种机器人移动机构。近年来各种增强的非金属复合材料运用于履带，大大减轻了履带式移动机构笨重的缺点，改善了其整体性能。对野外环境，履带式移动机构具有较强的适应性。

(3)腿足式移动机构

腿足式移动机构基于仿生学的原理，目前展开广泛研究的有两足、四足、六足等各种腿足式移动机构，该机构几乎可以适合任何路面的行走，且具有良好的机动性，其运动系统具有良好的主动隔振功能，可以较轻松的通过松软地面和大跨度障碍。但该机构运行速度慢，结构形式在上述各种移动机构中最复杂，控制也相对较为困难，目前应用较少，大多处于研究和实验室阶段。

表 3.1 各种移动机构综合评价

评价形式 \ 性能	越障能力	越野性能	通过性	速度	小型化实施	行驶稳定性	转向性能	载重自重比
腿足式	A	A	A	D	D	A	A	D
普通履带式	C	B	B	B	A	B	B	B
特种履带式	B	B	B	B	B	A	B	B
普通轮式	D	C	C	A	A	B	C	A
特种轮式	B	C	C	A	B	B	C	B

对本设计而言，爬坡越障能力、小型化、轻量化是其主要特点。在表 3.1 中对各种行走机构进行综合评价。基于设计要求，对各性能分配权重，A 至 D 分别为从高至低的分值。表中特种履带式移动机构为加装前摆及加装前后摆的结构形式，对表 3.1 中的几种可能的设计方案，综合评价的结果，特种履带式为相对较优的方案。加前后摆的履带机构，比单独加装前摆具有更强的越障和地形适应能力，但由此带来了的机构复杂性和重量的增加，也会带来对系统的可靠性的影响，实质上加装前摆即可实现爬坡越障功能。其通过各种典型地形的情况见图 3.1。为了使摆臂有更强的地形适应能力，前摆部分左右两摆臂可单独控制即独立驱动。

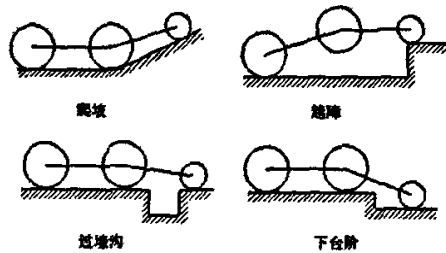


图 3.1 前摆式履带移动机构通过几种典型地形

3.1.2 移动平台结构

在确定机构方案的前提下，对移动平台的结构方案进行初步设计，移动机构结构简图见图 3.2。

履带驱动方式为后轮驱动，左右两后驱动带轮 1 分别由两个直流伺服电机通过后轮驱动传动机构 2 驱动，由于齿轮减速器传动效率和传动精度较高，运行平稳性好等特点，因此可以为整个机器人提供良好的直线行走、差速转向和原地回转的功能。

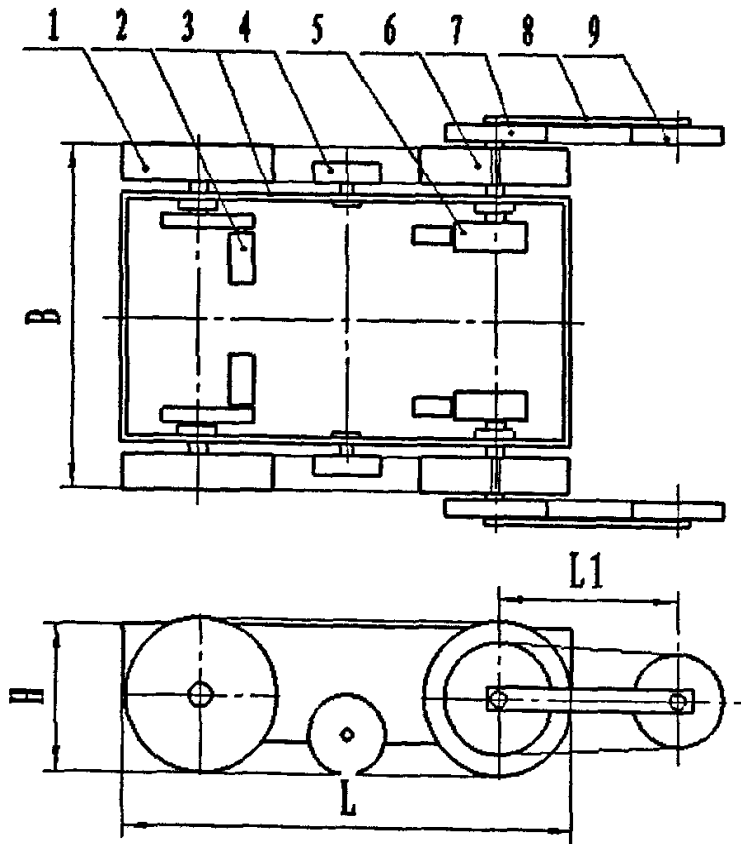
(1) 摆臂运动的实现

两个前摆的转动摆臂动作，分别由直流伺服电机经前摆减速机构 5 减速后带动摆杆 8 产生前摆的摆臂运动，左右两摆臂为独立驱动，可分别进行控制，动作更加灵活。摆臂减速机构可采用蜗轮蜗杆传动，以使结构更加简单。

(2) 摆臂部分履带控制的实现

前摆主动轮 7 空套履带承重轮 6 上，通过离合器控制两者的分离和啮合，离合器分离时，前摆履带不转动；啮合时，前摆履带转动。在前摆履带不接地时，可通过离合器控制前摆履带不转动以降低整机的电能消耗。

因此，此结构可实现前摆部分以下几种方式的运动：摆杆摆动+前摆履带转动；摆杆摆动+前摆履带不转动；摆杆制动+前摆履带转动；摆杆制动+前摆履带制动。



1—后驱动轮 2—后轮驱动传动机构 3—车体框架 4—支撑轮 5—前摆驱动传动机构
6—承重轮 7—前摆主动轮 8—摆杆 9—前摆从动轮

图 3.2 移动平台结构示意图

移动平台是实现整个机器人功能的载体，其性能将直接影响到机器人的整体性能。移动平台的刚性对机器人整体性能影响最大，结构刚性不足容易使车体产生变形，在野外复杂路面行走造成车体的震颤，不仅难以实现越野功能，而且会直接降低移动机构及其所承载的作业系统的作业精度，因此，移动机构应采用整体式底盘设计。此外，考虑其整体的防水性能要求，除了在前后轮和压带轮轮轴部分采取防水措施外，车体部分应设置为多个隔离舱室，减速器和驱动电机均采用独立舱室，中间部位的舱室则用来安装控制系统电路板、其它电子线路模块、GPS、电子陀螺仪等设备，以及驱动整机的锂离子电池。

移动平台的基本结构参数进行如下的确定。整体长度尺寸，应以所承载的武器系统为参考来确定，目前使用 5.8mm 枪弹的单兵轻武器，以 840mm 全枪长的 95 式班用

机枪作为参考,枪身前后可略有外伸,初步确定移动平台的结构尺寸为单侧履带接地宽度 10cm,履带接地长度 50cm,前后带轮直径 25cm,中心距 50cm,前摆主动轮直径 20cm,前摆轮与前驱动轮中心距为 30cm,车体长度为 75cm(前摆收回状态),宽度为 60cm,高度为 24cm。

对于采用履带式移动机构的移动平台,承载能力是其重要指标,履带的承载能力主要有两个指标表示,即平均比压和最大比压,这里主要对平均比压进行计算。履带的平均比压为用 q_0 表示,平均比压为:

$$q_0 = \frac{V}{s} = \frac{G+Q}{2Lb} \quad (3.1)$$

式(3.1)中, G 为履带式移动机构的重量, Q 为承载后引起的偏载, L 为履带接地长度, b 为履带接地宽度。许用比压 $[q_0]$ 为 $0.05 \sim 0.15 \text{ N/mm}^2$ 。按照载重系数为 0.85,车体重 50kg,平均比压为 0.00833 N/mm^2 ,满足许用比压的要求。移动平台从结构上满足承载的要求。

3.1.3 移动平台运动学建模

移动平台是机器人实现地面运动的主要载体,在非机构环境实现运动,机器人必须能够在由壕沟、台阶、障碍和斜坡等复杂地形上行驶。这就要求移动平台能实现路径跟踪控制和障碍回避,在行驶过程中应能估计出自己的位置、方向、速度、加速度,能根据期望的前进速度确定出各驱动轮的速度,建立移动平台的运动学模型是十分必要的。对于运动学建模,本文采用基于移动平台几何中心位姿的运动学建模方法,实际上研究的是二维平面的运动学问题。

由于移动平台采用履带式移动机构,使得其实际运动非常复杂,尤其是在转弯运动时,由于履带压力分布不均匀,在转弯过程中车体产生滑移和刮土,这些因素都使得对移动平台的运动学分析极为困难。因此对其进行运动学分析,必须建立在适当的假设和简化基础上。

由于运动学只分析运动,而不考虑受力,在此可作以下假设:

- 不考虑结构变形,将移动平台结构各部分视为刚体;
- 履带传动机构的履带轮与履带之间没有滑转,即驱动轮滑转 $\delta = 0$,履带与地面之间不发生侧滑;
- 两侧履带均匀着地;
- 前摆机构主要用于越障、爬坡,对运动学分析没有影响,因此运动学分析中不考虑前摆机构;

分析运动学,首先要建立坐标系,移动平台在二维平面中的坐标系如图 3.3 所示。

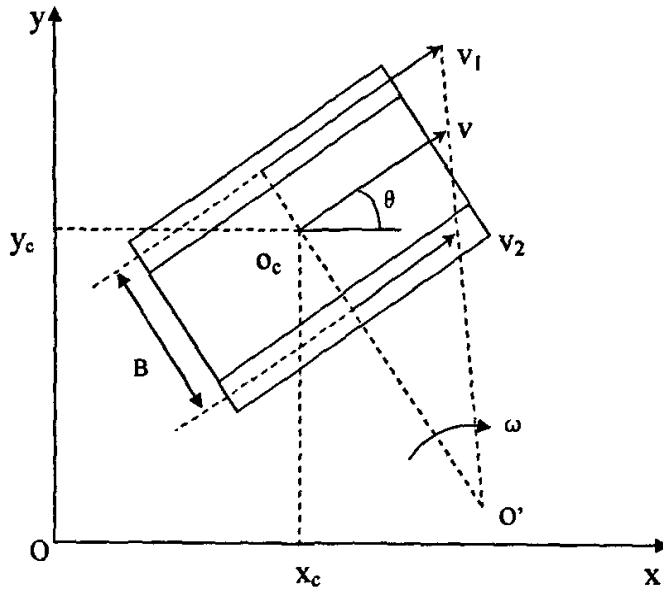


图 3.3 移动平台坐标系

图 3.3 中： xoy 为固连于地面的固定坐标系； O_c 为移动机构的几何中心； x_c, y_c 分别为 O_c 点对应的坐标值； B 为左右履带中心线之间的距离； v 和 ω 为移动平台几何中心 O_c 的瞬时线速度和角速度；此外，用 ω_1, ω_2 分别表示左右驱动带轮的角速度， r 表示驱动带轮的半径，移动平台在固定坐标系 xoy 的位姿用 (x, y, θ) 来表示。

3.1.3.1 正运动学模型

如图 3.3 所示，对于移动平台左右履带的速度，可表示为：

$$\begin{cases} v_1 = \omega_1 r \\ v_2 = \omega_2 r \end{cases} \quad (3.2)$$

由速度瞬心法确定移动平台几何中心 O_c 的线速度和角速度为：

$$\begin{cases} v = \frac{v_1 + v_2}{2} \\ \omega = \frac{v_1 - v_2}{B} \end{cases} \quad (3.3)$$

将式 (3.2) 代入式 (3.3) 即可得到：

$$\begin{cases} v = \frac{r(\omega_1 + \omega_2)}{2} \\ \omega = \frac{r(\omega_1 - \omega_2)}{B} \end{cases} \quad (3.4)$$

移动平台几何中心 Oc 相对固定坐标系 xoy 的运动方程，以矩阵形式表示为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 \\ s\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

将式 (3.4) 代入式 (3.5)，进行整理，则可得到：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r \cdot \cos\theta}{2} & \frac{r \cdot \cos\theta}{2} \\ \frac{r \cdot \sin\theta}{2} & \frac{r \cdot \sin\theta}{2} \\ \frac{r}{B} & -\frac{r}{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

式 (3.6) 即为移动平台在平面坐标系 xoy 的运动速度。对式 (3.6) 进行分析：

- (1) $\omega_1 = \omega_2$ 时，左右两侧履带驱动轮角速度相等，移动平台直线行使；
- (2) $\omega_1 \neq \omega_2$ ，为差速转向状态，其中 $\omega_1 > \omega_2$ 为向右行使， $\omega_1 < \omega_2$ 为向左行使，若 ω_1 、 ω_2 其中之一为 0，即左或右驱动轮制动，则实现制动转向；
- (3) $\omega_1 = -\omega_2$ 时，移动平台为原地回转状态，此时转弯半径为 0。

用 (x, y, θ) 表示移动平台相对固定坐标系 xoy 的位姿，对式 (3.6) 各项进行积分可得到：

$$\begin{cases} x = \frac{r}{2} \int r \cos\theta(\omega_1 + \omega_2) dt \\ y = \frac{r}{2} \int r \sin\theta(\omega_1 + \omega_2) dt \\ \theta = \frac{r}{B} \int (\omega_1 - \omega_2) dt \end{cases} \quad (3.7)$$

θ 也可直接由水平陀螺仪获得其航向偏角。式 (3.7) 即为移动平台相对地面固定坐标系 xoy 的正运动学模型描述。

实际上，如前所述，由于履带运行时驱动轮与履带的滑移、履带的侧滑等现象的存在，这种理想的状况是较难实现的，尤其在湿滑和相对松软的地面，这些现象尤为严重，由于采用对时间积分的形式，一段时间后会加大的累计误差，误差的大小由路面状况决定，因此，必须由相应的位置检测装置定时进行校正。

3.1.3.2 逆运动学模型

以上建立了移动平台的正运动学方程,在移动平台实际运动中,需要能够使移动平台以期望的前进速度 v 和转向角速度 ω ,确定其左右履带驱动轮的角速度 ω_1 和 ω_2 ,以避免前进道路上的障碍物,这对于移动平台是非常重要的。这类问题被称为运动学的逆问题。因此必须对逆运动学问题进行分析。

由上节式(3.2)和式(3.3),可以得到:

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{2v - \omega B}{2r} \\ \omega_2 = \frac{\omega B + 2v}{2r} \end{cases} \quad (3.8)$$

则由式(3.8)即可实现对机器人的控制。对式(3.8)进行分析:

- (1) $v=0, \omega \neq 0$, 移动平台处于原地转向状态;
- (2) $v=0, \omega=0$, 移动平台静止不动;
- (3) $v \neq 0, \omega=0$, 移动平台则处于直线行使状态。

上面所建立的正逆运动学方程,建立在二维平面基础上的,实际上,机器人的实际工作环境为复杂的三维环境。因此对于三维环境的运动学建模具有更重要的意义。Muir和Newman在1986年对轮式移动机器人(WMR)运动学的建模使用了类似于机械手臂运动学的推导方法,并沿用了机械手臂运动学关节的概念,用于轮式移动机器人(WMR)运动学建模,也可以借鉴用来进行履带式移动机器人的运动学建模。^[36]

Muir和Newman在沿用关节这一概念的同时又极大丰富了它的内涵,即移动机器人的关节不仅可以是实际的物理关节,更可以是一种约束关系。运用这种思想,将复杂的三维地形进行近似描述,机器人在复杂三维地形上行驶时,主要依靠履带与地面的作用力前进,在各不同时刻,履带与地表面外切形成的系列平面可以用于近似逼近实际地形,这样机器人在不同时刻、不同斜面上的运动学模型就组成移动机器人在复杂三维地形上行驶的运动学模型,对于非结构环境的描述与机器人的真实运动状态在某种程度上相吻合,基于这种思想所构建的运动学模型能够近似地描述移动机器人对复杂地形六个自由度的运动。

上述方法的前提是对各种地形进行适合于机器人本体尺度的近似,为获得足够精确的结构,必须减小运动平面转换时间间隔,但是由此带来的庞大的计算量将使机器人的控制更加困难,因此,对本文的研究机器人,主要进行了二维平面的运动学分析。

3.1.4 移动平台越障分析

3.1.4.1 越障过程分析

对于移动平台来说,非结构化环境最典型的情况是斜坡、向上和向下的台阶障碍,其中台阶障碍最为典型,在不同的尺度衡量下,较低的台阶障碍可以在不利用摆臂的前提下直接通过,较高的障碍则需要摆臂的辅助。如图 3.4 所示,由移动平台的结构参数可知,在不需摆臂时,移动平台的最大越障高度约等于履带轮半径,即 12.5cm,因此,在越障高度大于该值时,必须由摆臂的配合才能通过。

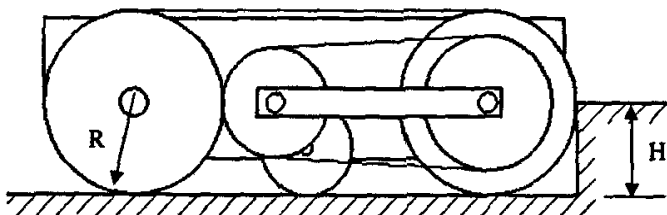


图 3.4 不需摆臂的最大越障高度

在配合摆臂越障时,其越障过程见图 3.5 所示。

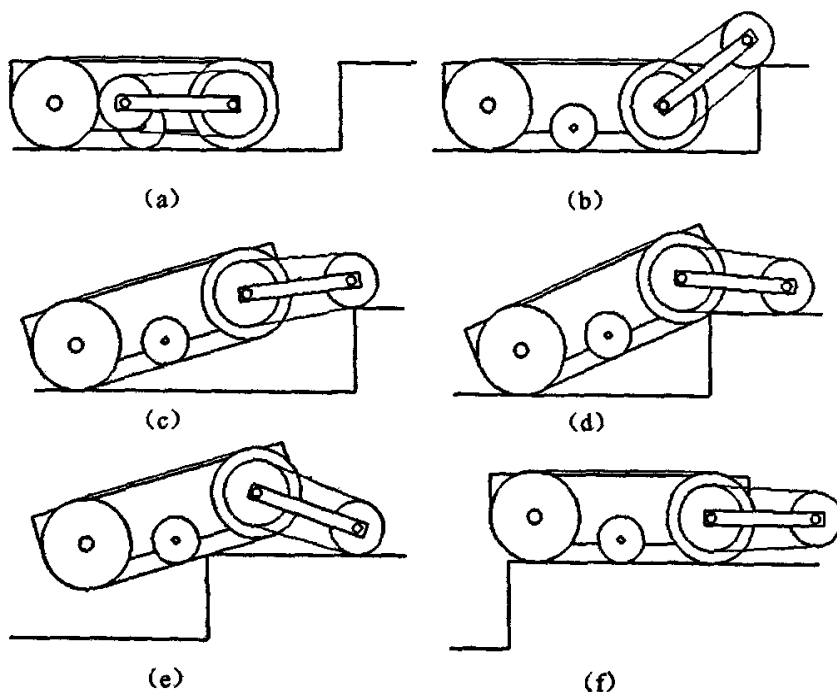


图 3.5 越障运动过程示意图

图 3.5 中, (a) ~ (f) 的过程分别为: 移动平台停靠于障碍前→摆臂抬起→整体抬升→移动平台前移→后部悬空→越过障碍。在 (c) 阶段由摆臂电机提供将移动平台抬升的力矩。由越障过程分析可知, 最大越障高度不仅与摆臂结构形式有关, 还必须保证在整个越障过程中整体不倾翻。下面主要对 (c) 过程进行受力分析。

3.1.4.2 越障运动力学分析

移动平台越障时, 首先要在静止状态下调整姿态, 使机器人整体抬起至一定高度, 因此可以用静态分析的方法对越障运动进行分析。上海交通大学的乔风斌等在文献 [19] 中对排爆机器人的爬阶梯运动进行了详细的分析, 并提出了合理的假设条件和分析方法, 其提出的思想和方法可以用来对本机器人的越障运动进行分析。首先假设攀爬台阶障碍时机构各部分不变形, 其受力情况如图 3.6 所示。图中, R 为履带轮半径, M 为摆臂所受总力矩, N 为地面对前摆轮的反作用力, r 为摆轮半径, h 为台阶高度, l_1 为摆臂长, l_2 为载重时质心到后驱动轮的位置尺寸, a 为载重时的质心高度。

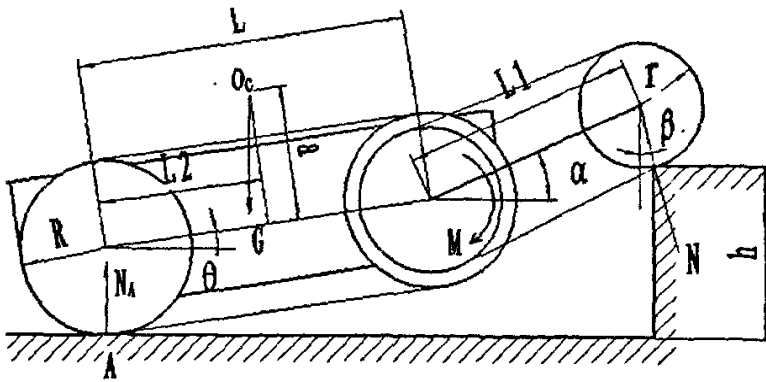


图 3.6 越障运动受力分析

则有力矩平衡条件 $\sum M_A = 0$, 可以得到:

$$\sum M_A = N \cos \beta (l_1 \cos \alpha + L \cos \theta) + N \sin \beta (l_1 \sin \alpha + L \sin \theta) - G(l_2 \cos \theta - a \sin \theta) = 0 \tag{3.9}$$

对式 (3.9) 可得到:

$$N = \frac{G(l_2 \cos \theta - a \sin \theta)}{l_1 \cos(\alpha - \beta) + L \cos(\beta - \theta)} \tag{3.10}$$

则两摆臂总力矩为:

$$M = N \cos \beta \cdot l_1 \cos \alpha + N \cdot \sin \beta \cdot l_1 \sin \alpha$$

$$= \frac{G \cdot l_1 \cdot (l_2 \cos \theta - a \sin \theta)}{l_1 + L \cos(\beta - \theta) / \cos(\alpha - \beta)} \quad (3.11)$$

每个摆臂上均匀受力, 则单个摆臂爬阶梯式的力矩为:

$$M_{左} = M_{右} = \frac{M}{2} = \frac{1}{2} \times \frac{G \cdot l_1 \cdot (l_2 \cos \theta - a \sin \theta)}{l_1 + L \cos(\beta - \theta) / \cos(\alpha - \beta)} \quad (3.12)$$

考虑到传动比 i 和传动效率 η , 则单个摆臂电机的驱动力矩为:

$$M_{驱} = \frac{M}{2i \cdot \eta} \quad (3.13)$$

式 (3.13) 可用来确定摆臂部分电机的输出力矩, 其输出功率 P 可由 $M_{驱} \times n$ 来确定, 其中 n 为转速。假设在载重 30kg 的条件下, 爬高为 15cm, 按照结构参数则摆臂的最大驱动力矩约为 42Nm, 以转速 1500r/min 的直流伺服电机, 传动比为 120: 1, 则电机功率需要 0.158kw 的功率。

3.2 武器平台方案设计

从系统来分析, 武器平台由枪架和及其伺服系统 (火控系统) 构成。在性能上, 武器平台应能实现比人工控制射击更高的射击精度以及快速响应能力, 否则用机器人代替人工将没有任何意义。武器平台的性能决定于枪架结构刚度、强度, 以及伺服系统的动态响应特性。如前所述, 具有完全自主射击能力的机器人目前还不现实, 因此武器平台必须在人工干涉下完成最终的射击动作。

对于枪械的选择, 为实现与单兵武器的通用, 武器选择 5.8mm 枪弹系列轻武器, 以 QBB95 班用机枪作为机构设计的依据。QBB95 班用机枪使用 5.8mm 枪弹, 全长 840mm, 枪重 3.98kg, 弹丸初速 970m/s, 理论射速 600~750 发/分。

火控系统的瞄准装置可利用与 QBB95 班用机枪配套的白光瞄准器和微光瞄准器, 在瞄准器目镜上安装瞄准 CCD 摄像头实现精确瞄准。全视野的目标捕捉则由三维全景摄像装置提供, 通过伺服系统的运动控制, 从瞄准到发射的过程可分为以下几个阶段, 见图 3.7 所示。

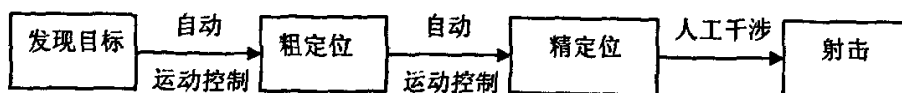


图 3.7 武器瞄准过程

由三维全景摄像装置提供模式识别以发现可疑目标，精定位则转换至相对视野较小的瞄准装置，即瞄准 CCD 摄像头和微光瞄准器组合，图像发送至操作装置，最终由人工判断发出射击指令。

3.2.1 武器平台枪架构型

武器平台机构主体，也称之为枪架，主要的功能是实现对武器的水平和俯仰运动和姿态的控制，机构需要二自由度以实现水平（ $\pm 180^\circ$ ）和俯仰（ $-5^\circ \sim 10^\circ$ ）的运动以进行枪身的姿态控制。作为武器系统平台的基础，枪架的性能优劣是实现射击精度的前提，所有的功能必须建立在结构刚度、强度良好的枪架基础上，所以，对于武器平台来说，枪架的设计是武器平台设计内容的核心。武器平台机构方案简图见图 3.8。

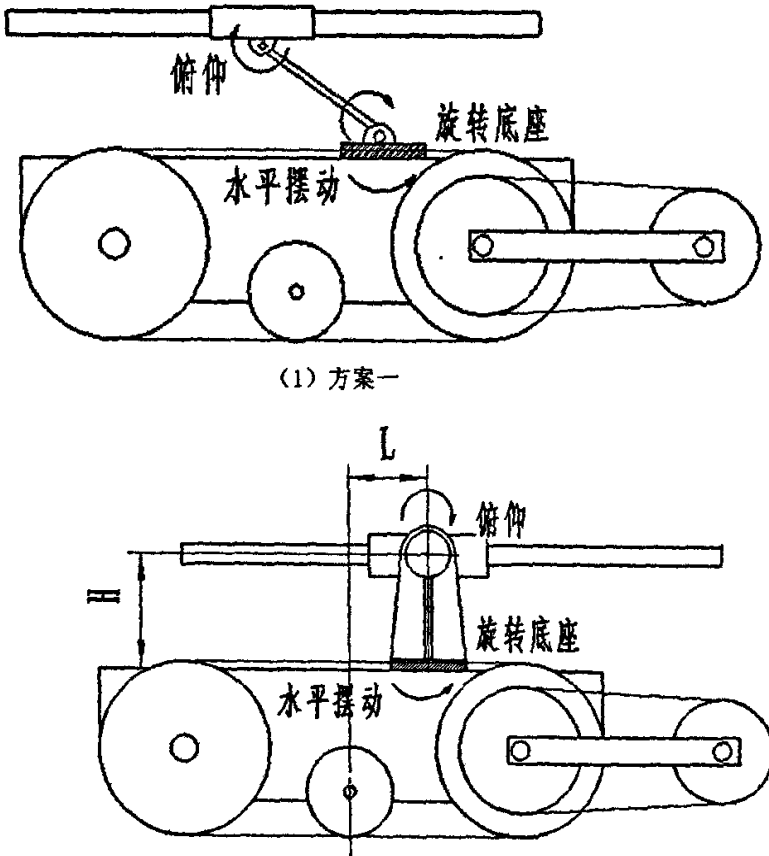


图 3.8 武器机械平台结构方案简图

图 3.8 (1) 所示方案一为开式链连杆机构，枪身由二连杆通过驱动关节联动实

现俯仰运动和姿态的控制,水平摆动则由安装在移动平台上的旋转底座控制,方案一在进行瞄准和射击在大动态运动时,各活动关节驱动力矩较大,连杆必须有足够的强度和刚度减小变形以满足射击精度的要求,整体重心较高。美军 Talon 排爆机器人曾采用方案一的设计,并且架装上各种武器,见绪论部分图 1.4,但仅仅是作为其产品过渡,即在原排爆机械手臂上架装武器。方案二整个平台安装在车体旋转底座上,枪身由枪架的抓握装置安装定位,枪架整体为二自由度,易实现控制,且可实现比方案一更低的重心以增强机器人运动及射击稳定性,两个方案对比方案二更合理。

为使枪架全向旋转时枪身外伸不致过长,枪架旋转底座的位置处于移动平台几何中心的位置,以实际测算数据,当 QBB95 班用机枪安装弹鼓时,在俯仰运动时不会产生运动干涉,即弹鼓与车体发生碰撞,枪身的安装高度须满足 $H \geq 250\text{mm}$,为使枪身不至前身过长,旋转底座的安装范围为其轴心线距车体几何中心 $L = -100 \sim +100\text{mm}$,其结构尺寸需通过具体分析来确定。

3.2.2 枪架受力分析

枪械发射时,受力情况十分复杂,其瞬间的作用力必须通过内弹道方程和膛压曲线进行解算。对于非自动武器,如火炮,在射击时作用于膛底的火药燃气压力,推动炮箱带动炮身后座,此力使炮身产生运动的唯一主动力,常称为后坐力,以 F_p 来表示,对于导气式自动武器,如 95 式班用机枪,推动机匣后坐的力不仅只是膛底的火药燃气压力,还有通过导气孔的火药燃气压力,它一方面压导气室前壁推机匣向前,另一方面作用于枪击框压缩复进簧,弹簧力推进机匣向后。为了研究方便,这些在后坐期作用于机匣上的所有主动力统统包括在后坐力 F_p 内^[42]。

对枪架机构进行受力的分析,首先作以下基本假设:

- (1)枪架底座与机器人刚性联接,视为刚体,枪身为一均质杆;
- (2)枪械结构上左右对称,射击时所有外力及其合力均位于枪械对称面内,并略去弹丸在枪膛内运动时膛线导线侧的反抗力矩的影响;
- (3)射击时,枪架保持不动。

枪架部分受力如图 3.9 所示:

第一种情况:假设枪身与枪架刚性联接,图中 M 为俯仰机构所受动力偶, e 为膛线到耳轴(俯仰机构轴心线)的距离,水平射角为 α 。俯仰机构耳轴承受的载荷为 F_p 和附加的动力偶 $F_p \cdot e$,以发射最大膛压进行计算:

$$F_p = P \times S \quad (3.14)$$

式中: P ——最大膛压,按 300MPa 计算;

S ——枪管作用面积,对于 5.8 口径,面积为 0.27cm^2

则最大膛压作用下,耳轴受到约 8300N 的作用力,若膛线和耳轴之间距离为 5cm,则俯仰机构承受最大 407Nm 的动力偶的作用。对于控制俯仰动作的伺服电机及其传动机构来说,如果采用枪身刚性联接,则需要俯仰机构提供较大的制动力矩才能保证枪身稳定不动。因此,必须减小 e , 即枪身膛线到的俯仰机构轴线的距离。

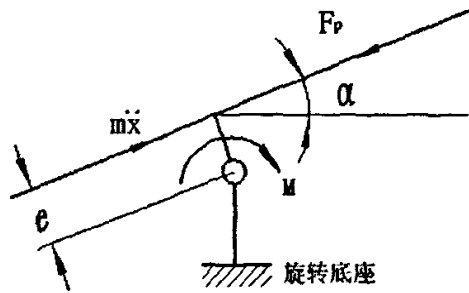


图 3.9 枪架受力分析

第二种情况:枪身通过缓冲器与枪架连接,此时,由于枪身沿着其相反的射向后坐,用动静法进行分析。可以把枪身作用于枪架的后坐力按照下式计算:

$$F_R = F_p - m\ddot{x} = P \times S - m\ddot{x} \quad (3.15)$$

式中: $m\ddot{x}$ 由后坐时间和缓冲器的刚度 K 来决定。后坐时间的计算式为^[42]:

$$t_r = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot m}{K}} \cdot \cos \frac{F_0}{F_m} \quad (3.16)$$

式中: t_r ——后坐时间;

ε ——弹簧效率,一般取 0.5;

m ——后坐部分质量;

F_0 ——后坐初弹簧力;

F_m ——后坐末弹簧力;

由上述两式 (3.15) 和 (3.16) 可以看出,采用弹性联接,使用缓冲器,可以使枪架俯仰机构受理情况明显改善。通过对枪架进行受力分析,得出如下结论:枪身通过缓冲器安装并固定于枪架上;减小枪身膛线到耳轴的距离以减小对俯仰机构电机和传动机构的冲击载荷。

3.2.3 射击稳定性动力学建模

在机器人搭载武器(机枪)进行射击时,机器人整体的稳定性和机枪的射击精度是必须要考虑的问题。机枪是一种主要以连发的方式使用的武器,连发射击时机器人的稳定性对射击精度有非常大的影响,尤其是对散布密集度的影响,连发射击过程中

机枪、机器人整体可能产生跳动、移动或下沉,枪身、武器机械平台、移动平台等也可能产生弹性变形引起局部振动以及整体振动,这些都是影响射击稳定性的因素。

射击稳定性的概念是与射击精度的概念密切相关的,单纯的考虑机器人的稳定性而不考虑其射击精度将没有任何意义。对于射击稳定性的理解,可以认为,机枪射击时,无论机器人整体是否跳动,移动或振动,只要武器能够保证弹丸出枪口瞬时的射向误差在一定的允许范围内,就能满足武器的射击精度要求,即可以认为其射击是稳定的^[42]。

3.2.3.1 稳定性分析方法

对于射击稳定性问题的分析,主要有绝对稳定性、相对稳定性以及动态稳定性几个概念^[46]。

(1)绝对稳定性

绝对稳定性是传统的稳定性观点,该稳定性要求武器系统在射击时,相对应各支点既不产生跳动,也不产生移动和下沉,符合静止性的要求。

(2)相对稳定性

相对稳定性允许机器人整体沿射击方向前后移动,也允许有规律的轻微跳动,前者很显然是保证了射向一致性,后者则需要验证武器上跳过程与周期是否影响弹丸出枪口时的射向。

(3)动态稳定性

动态稳定性认为,射击时,无论武器是否产生移动、跳动、变形和振动,只要保证武器的射向一致性就认为是稳定的。相对稳定性与动态稳定性的区别是,前者只考虑刚体位移,后者主要考虑武器结构的弹性变形,后者实现起来要比前者困难得多。本文用相对稳定性的理论进行稳定性分析。

3.2.3.2 射击稳定性模型

发射时的枪身后坐阶段中,若某时间区段内的翻倒力矩大于重力矩(稳定力矩),则机器人就会有绕后驱动轮接地点转动的趋势,即表现为机器人上抬;当翻倒力矩小于重力矩时,则上抬转慢或转为下降,落地后又有下沉和抬起。对于重量较轻的小型机器人来说,枪械设计时必然会发生略微上跳的现象。

用绝对稳定的理论,如果实现在射击过程中完全的静止,解决的办法只有通过增加机器人的重量,假设机器人在静止状态下进行射击,并保持静止,其水平方向和铅垂方向仅有地面摩擦和重力的作用与武器发射产生的后坐力相平衡,阻止机器人上抬的稳定力矩则仅有重力矩。

按照绝对稳定理论,则对于本设计的机器人来说,其总体质量根本无法满足要求。根据相对稳定性分析理论,我们认为,机器人无论是否上跳,只要能保证在弹丸射出枪口之前,下落至起跳位置或在一定的误差范围内,或者在机枪连发时,保持一个相对稳定的动态位置微小跳动,都可以认为射击过程是稳定的。

下面我们对机器人整体进行研究。对于整个机器人的射击稳定性的分析,必须建立在合理的基本假设上,在这里对系统模型进行如下基本假设:

- 机器人整体位于水平面上,即水平角度为零;
- 不考虑机器人各部分的变形,视之为刚体,枪械视为刚体;
- 不考虑土壤在后坐运动方向的变形过程,不计地面摩擦;
- 枪械和机器人整体左右对称;
- 射击时武器平台枪架及移动平台机构等机器人各部分不下沉;
- 机器人初始为静止状态,即初速为 0。

对其后坐运动阶段进行分析,机器人射击时的受力情况如图 3.10 所示。

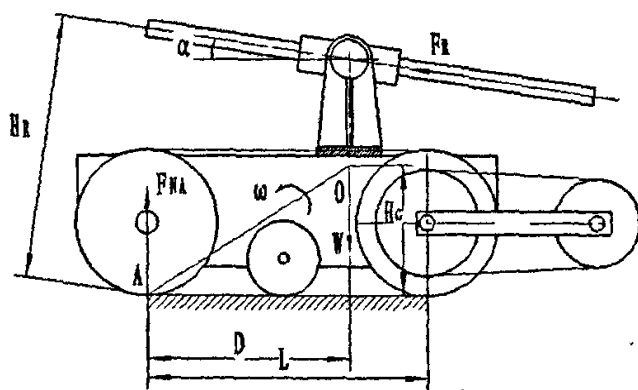


图 3.10 射击状态稳定性分析

- 图中: F_{NA} ——地面对后驱动轮履带接地点的垂直抗力;
 W ——机器人重量;
 ω ——质心相对于后驱动轮接地点 A 的转动;
 α ——机枪水平射角,范围为 $(-5^\circ \sim 30^\circ)$ 图示位置 α 值取负;
 hc ——机器人质心高度;
 h_r ——后驱动轮接地点到枪身膛线的距离;
 L ——履带接地长度;
 D ——机器人质心到后驱动轮接地点 A 的水平距离;
 h_r ——后驱动轮履带接地点到枪身膛线的距离

对图 3.10 进行分析，显然，保持机器人稳定的力矩只有重力矩，稳定力矩为：

$$M_{\text{稳定}} = mg \cdot D \quad (3.17)$$

在后坐过程的任一时间，机器人整体有绕后驱动轮履带接地点 A 翻转跳动的趋势，根据动量矩定理：

$$\frac{d}{dt} L_o = \sum_{i=1}^n M_o(F_i) \quad (3.18)$$

将各力对 A 点取矩，则可得到：

$$J \frac{d\omega}{dt} = F_R \cdot h_R - mgD \quad (3.19)$$

上式中： J ——机器人对后驱动轮履带接地点 A 的转动惯量；

ω ——机器人绕点 A 的旋转角速度

上式 (3.19) 对时间 t 的积分，可求出转动角速度和角位移的方程。

由图 3.10 进行分析， h_R 的值由枪械俯仰角确定，计算值为：

$$h_R = (H - \frac{L}{2} \tan \alpha) \cos \alpha \quad (3.20)$$

如果把式 (3.19) 中 $F_R \cdot h_R$ 称为翻倒力矩，则结合式 (3.20) 可知，翻倒力矩为：

$$M_{\text{翻}} = F_R \cdot h_R = F_R \cdot (H - \frac{L}{2} \tan \alpha) \cos \alpha \quad (3.21)$$

在最大俯仰角度时，翻倒力矩最大，机器人可能产生的抬起角度最大。

将式 (3.21) 代入式 (3.19)，则可得到在任意设计角度时的方程：

$$J \frac{d\omega}{dt} = F_R \cdot (H - \frac{L}{2} \tan \alpha) \cos \alpha - mgD \quad (3.22)$$

对式 (3.22) 进行积分，则可得到：

$$\omega = \frac{1}{J} \int [F_R \cdot (H - \frac{L}{2} \tan \alpha) \cos \alpha - mgD] dt \quad (3.23)$$

式 (3.23) 就是机器人在任意俯仰角度进行射击时的射击稳定性描述，需要注意的是，这里考虑的是机器人水平方向不发生移动的情况，如果考虑水平方向的移动，情况更加复杂，但在这样的假设条件下，由于忽略了摩擦阻力的做功，机器人产生的抬起角度会略大。实质上，机器人的射击稳定性分析相当复杂，各构件的弹性变形，

射击过程中时各构件的碰撞,履带轮与履带之间,履带与地面之间的接触变形等因素都会对射击稳定性带来影响。

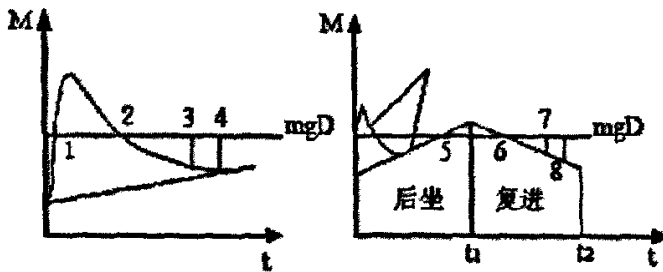
(1)跳动现象的估计与分析

假设枪身仅有后坐和复进阶段,对两个阶段进行机器人跳动现象的分析。参考图 3.11 所示两个阶段的跳动和稳定力矩图进行分析。

在弹丸出枪口前,1 到 2 时刻,翻倒力矩大于稳定力矩 mgD , 机器人自 1 时刻加速上跳, 2 时刻后为等减速上跳然后下落, 则机器人总的上跳高度为^[42]:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \frac{\omega_{\max 1} \cdot D}{2} t_{1,2} + \frac{\omega_{\max 2} \cdot D}{2} t_{2,3} \quad (3.24)$$

在 3 时刻到达最大高度后, 机器人整体开始回落, 4 时刻为回落 δ 高度的时刻, 应控制在弹丸出枪口前。随着机器人的落至地面, 速度最大, 之后履带轮与履带之间的碰撞, 以及土壤缓冲将部分能量吸收衰减并停止, 衰减时间长短与落点速度、土质有关, 在硬质路面上, 衰减时间较长。



(1) 弹丸出枪口前 (2) 枪身后坐与复进阶段

图 3.11 跳动与稳定力矩分析

枪身后坐和复进阶段, 用同样的方法分析, 5 到 6 时刻为加速上跳, 6 到 7 时刻为减速上跳, 7 时刻后开始回落, 其上跳高度为:

$$\delta' = \delta_1' + \delta_2' = \frac{\omega_{\max 1} \cdot D}{2} t_{5,6} + \frac{\omega_{\max 2} \cdot D}{2} t_{7,8} \quad (3.25)$$

为提高稳定性, 提高点射密集度, 必须保证图 3.11 中 4 时刻在弹丸出枪口前, 8 时刻在下一发子弹发射前, 否则, 射击精度就会受到影响。

(2)提高机器人射击稳定性的方法

要增加机器人的射击稳定性, 通过增加整体重量提高稳定力矩的办法是不可行的, 在移动平台质量已确定的前提下, 通过增加武器平台, 即枪架的重量来增大稳定力矩, 将会是机器人的整体重心高度上移, 从而影响到机器人整体的稳定性。所以必

须采取另外的途径。

分析式 (3.23) 各参量, 其中 L 和 m_c 为常量, 可采取的具体措施有:

- (1) 通过枪身缓冲器减小后坐力 F_R 。
- (2) 降低膛线高度以减小颠覆力矩;
- (3) 机器人整体质心前移;

对于可行方法一, 通过前一节的受力分析, 我们已经得出相同的结论; 对于可行方法二, 在枪身与移动平台上表面不发生运动干涉的前提下, 我们取枪身膛线安装高度 H 为 250mm, 并在结构上使枪身膛线与俯仰机构轴心线相交; 在结构尺寸下, 通过质心前移的办法来解决, 只有通过前移旋转底座的位置来实现, 可安装范围内, 即旋转底座轴心线距离移动平台几何中心 $L=-100\sim 100\text{mm}$ 的范围内, 我们取 $L=100\text{mm}$ 的位置。

3.3 机械手方案设计

对机械手部分的设计, 要求重量轻、灵活、工作空间范围大。根据设计指标的要求, 必须能够满足 $1\sim 2\text{kg}$ 轻型爆炸物的抓取能力, 在本节中, 主要对机械手的构型和结构参数进行分析和确定, 具体的设计内容在放在后面的章节中。

3.3.1 机械手构型

在三维空间一刚体的位姿由独立的六个自由度来确定, 机器人也应就有相应的自由度以实现空间物体的抓取, 冗余自由度可提供更好的灵活性和避障能力。没有特殊要求, 根据实际任务的需要, 机器人往往采用满足工作任务的最少自由度。

机械手的构型, 主要有直角坐标型、圆柱坐标型、球坐标型和关节坐标型等结构形式, 其中模拟人手臂的多连杆开式链结构的关节坐标型机械手作业最为灵活, 按照人手臂的结构, 将该种构型的机械手按照腰关节、肩关节、肘关节、腕关节命名, 通常手爪的自由度不计入机械手的自由度, 配合大臂连杆、小臂连杆和末端执行器(手爪) 即构成了一个仿人手臂的机械手构型。人手臂结构见图 3.12 所示。

目前, 工业机器人和大中型排爆机器人机械手较多采用具有二至三自由度的臂部设计和二至三自由度的腕部设计, 构成具有 3 到 6 自由度的机械手结构。轻量化与灵活性和抓取能力是一对矛盾, 自由度的增加意味着机械手整体重量的增加, 此外还要考虑到由此带来的整体结构刚性的降低, 在灵活性和轻量化之间必须做出选择。工业机器人基于对定位精度和重复定位精度以及结构刚性的考虑, 往往体积庞大, 负荷能力与其自重相比往往非常小, 如 Fanuc Robotics LR Mate 自重 39Kg, 其负荷能力仅为约 3Kg, M-16i 自重 269Kg, 负荷能力仅为约 16Kg, 目前, 国内外具有类似抓取能

力的排爆机器人整体重量均在 100kg 以上。排爆及野外取放物体的作业无需达到工业机的精度，因此可以在结构刚性满足的前提下，采用图 3.12 中 (2) 所示的四自由度的机械手构型。

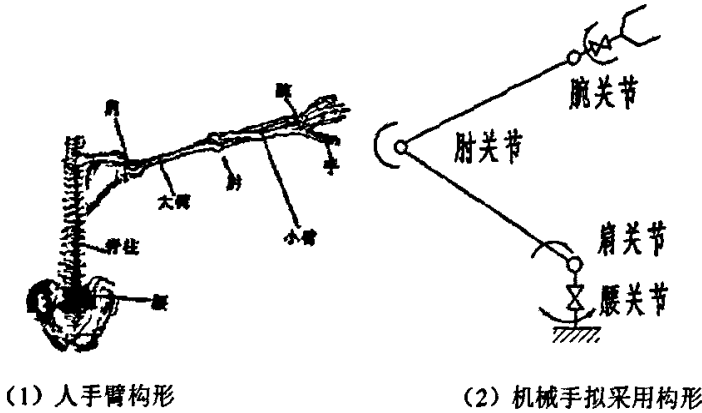


图 3.12 人手臂及机械手机构简图

3.3.2 机械手的主要参数

(1) 臂长的确定

加拿大西蒙弗雷泽大学的高峰等人根据人体手臂和腿部的机构组成，提出了尺寸综合的三动杆原理^[49]，作为机械手机构运动学、动力学的评价准则。该原理的内容是：人体手臂、腿部及动物四肢从机构原理上分析都可以看作由三自由度平面三动杆演化而来，因为决定它们的运动学和动力学特征的最基本的部分是平面运动，这部分运动被称为三动杆的主运动，它是瞬时运动轴线平行的三动杆机构运动，三自由度面三动杆机构可以作为上述机构的简化模型，该机构的运动学、动力学的评价准则同样可以用来衡量手臂机构的运动学和动力学性质。根据三动杆基本运动理论，仿人手臂可以看作三动杆机构，即将大臂、小臂、手爪作为三动杆。

假定机械手各部分长度为：上臂 l_1 、小臂 l_2 、手爪 l_3 ， $L = (l_1 + l_2 + l_3) / 3$ ，则可得到 $r_1 = l_1 / L$ ，根据三动杆机构的性能分析，可以得出下面的结论，即当三杆长度满足下列条件， $r_1 : r_2 = 1 \sim 1.2$ ，并且 $r_3 < 0.5$ 时，三动杆的灵活性和运动幅度较高，同时，其全局条件数最大，手臂末端的操作速度、变形也处于中等范围内。当全局条件数最大时，操作过程中易于实现精度控制。

因此，结合三动杆原理，确定机械手的各部分尺寸长度为大臂 400mm、小臂 400mm、手爪 200mm。设计该长度还考虑到了机器人的反恐排爆用途，即机械手必须能够将爆炸物放入排爆罐中，以某型排爆罐 800mm 高度为例进行了计算，并确定了上述尺寸。

(2)机械手重量

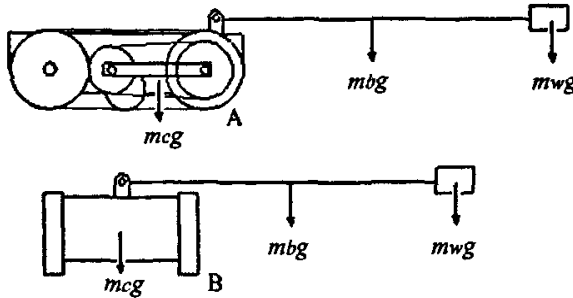


图 3.13 两个抓取重物水平极限位置力矩图

以前伸和侧伸两个极限状态，如图 3.13 所示，分别取 L_i 为各质心点到 A 点或 B 点距离，则手臂重量必须满足 $m_c g L_c \geq m_b g L_b + m_w g L_w$ 才能保证不发生颠覆。机械手的安装位置距离移动平台前端约 100mm 的位置上，移动平台质量以 50kg 计算，对图 3.14 两个状态分别进行初步计算，则机械手须满足质量 $\leq 33\text{kg}$ ，才能满足机器人整体不颠覆，图 3.13 中机械手前伸位置颠覆力矩最大，为使其更稳定，手臂设计时应尽量减轻其重量，以满足机器人整体稳定性的需要。

3.4 机器人斜坡静态稳定性分析

3.4.1 稳定性分析方法

对于机器人整体，相对于是否能够爬上一定的坡度，更重要的是机器人在斜坡上的稳定性，即机器人在斜坡上不会发生倾覆这种极端情况，所以，稳定性指标相对于爬坡能力更加重要。本文主要分析静态稳定性。

对于机器人来说，当机器人以任意方向置于角度为 θ 的斜坡上，其重力作用线与坡面交汇于 P 点。随着坡度角 θ 的变化，点 P 沿着梯度线移动，当交点移出稳定区域，见图 3.14，机器人就会发生倾翻。

图 3.14 中，机器人与斜面接触的点、线、面构成稳定区域 ABCD，在这里没有考虑摆臂与斜坡的接触，而是分析最一般的情况。W 为机器人的质心，O 点为质心向 ABCD 区域做投影所得的垂足，P 点为重力作用线与斜面的交点，P 点随坡度角 θ 的增加向下移动，当 P 点在 AB 边界 Q 时，即落在稳定区域边界上时，称为临界稳定状态^[33]。

此时 $\angle OQW$ 就是在坡度角为 θ ，行驶方向为 ψ 时置于斜坡上的临界倾翻角。不同的行驶方向角 ψ ，临界倾翻角也不相同， $\tan \angle OQW = WO/OQ$ ，可以认为，以上

研究的倾翻仅与机器人的几何形状、机器人的质心位置、斜坡角度、机器人的行驶方向等因素有关。斜坡运动时的失稳状态主要表现为前后翻和侧翻。

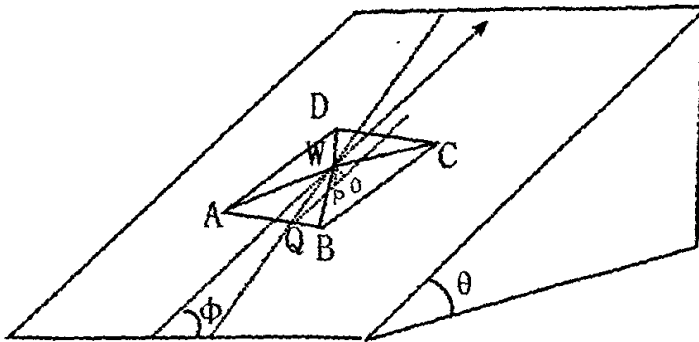
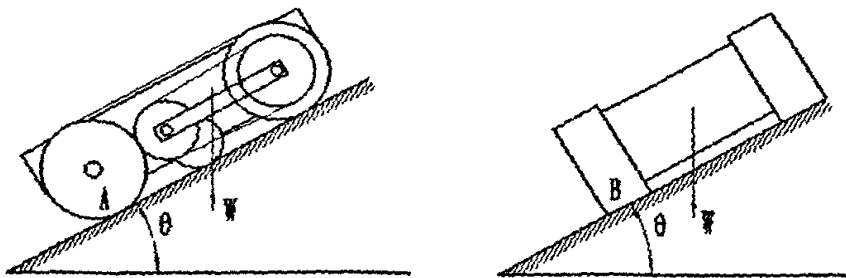


图 3.14 机器人斜坡静态稳定区域



(1) 方向角 $\phi=0^\circ$

(2) 方向角 $\phi=90^\circ$

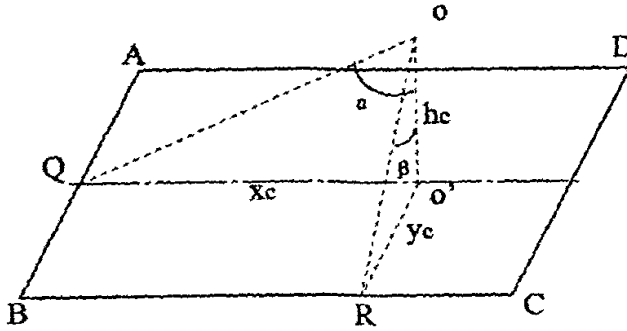
图 3.15 斜坡稳定性分析

在特定情况下，通过静力分析可知，当坡度角 θ 满足 $\theta = \arctan(f)$ 时，这里 f 指静摩擦系数，此时为临界状态，当坡度角继续增加，机器人就会从坡面上滑下。显然，如果坡度角继续增加，达到前述的临界倾翻角，机器人就会产生倾翻。图 3.17 (1)、(2) 所示两种状况下，未达到临界倾翻角，若 $\theta = \arctan(f)$ ，图中 (1) (2) 状况下并不会发生倾翻，而是可能保持静止或从斜坡上滑下。

3.4.2 机器人斜坡稳定性分析

对于本文研究的机器人，工作状况为两种，即安装机械手状态和配备武器系统状

态。下面对两种工作状况进行静态斜坡稳定性分析。对稳定性进行分析，首先要确定整个机器人的质心位置，以对其静态稳定性进行分析。如图 3.16 所示，ABCD 分别为机器人的接触区域， $\psi=0^\circ$ 和 $\psi=90^\circ$ 时，机器人的临界倾翻角度分别为 $\alpha = \angle QOO'$ 和 $\beta = \angle ROO'$ 。



3.16 纵向和侧向临界倾翻角度

机器人的整体质心由质心定理分别对两种状态进行计算：

$$\begin{cases} x_c = \sum m_i x_i / \sum m_i \\ h_c = \sum m_i h_i / \sum m_i \end{cases} \quad (3.26)$$

移动平台的质心位置在前摆全收回时估算水平高度为距地面 15cm，距履带后轮接地点水平距离约为 30cm。结合方案设计中的各项结构数据进行计算，并且将可能安装的各项辅助装置考虑在内，分别对安装机械手和武器平台时的极限状态进行分析， $\psi=0^\circ$ 和 90° 时，倾翻角分别为 $\alpha = \arctan(x_c / h_c)$ 和 $\beta = \arctan(y_c / h_c)$ 。

(1) 移动平台安装机械手

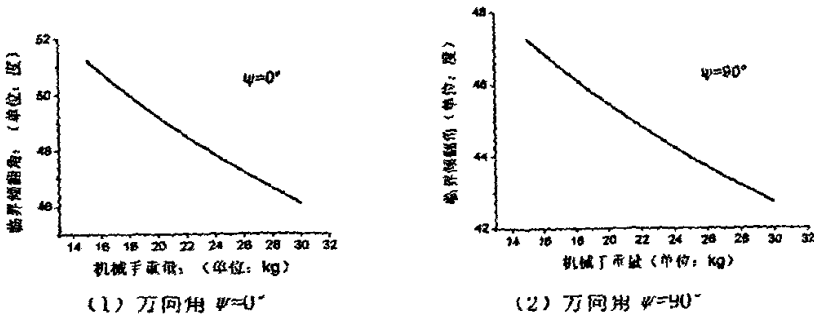


图 3.17 机械手重量对斜坡稳定性的影响

在安装机械手时，以机械手为全收停放状态进行计算，在方向角 ψ 为 0° 和 90° 极限状态下，机械手臂重量达到 30kg 时，机器人整体可保持在 46° 的斜坡上稳定不生倾翻，在侧向即方向角 90° 位置时临界倾翻角略小，约为 41° 。

(2)移动平台安装武器平台

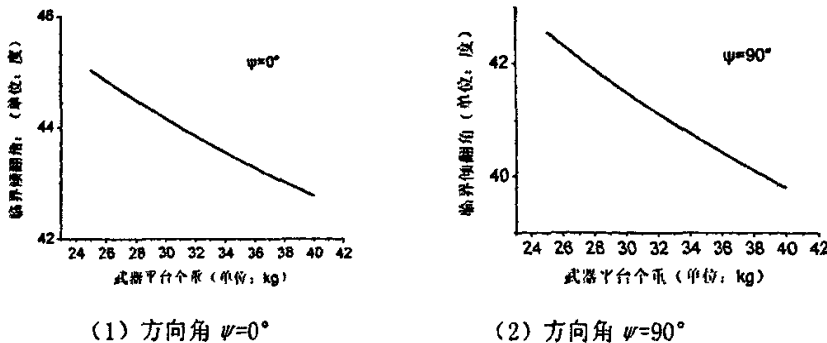


图 3.18 武器平台重量对斜坡稳定性的影响

安装武器平台时，枪械重量估算按照枪重及满荷弹重，如图 3.18 (2) 所示侧向即 ψ 为 90° ，武器平台重 40kg 时临界倾翻角约为 39° ，如果考虑在斜坡上侧向射击，则侧向射击将是机器人的薄弱环节。从稳定性分析的结果分析，为提高机器人的整体静态稳定性，武器平台和机械手重量应控制在 30kg 以内。

3.5 本章小结

在本章中，按照移动平台、武器平台、机械手三部分进行了方案设计和计算分析。对移动平台进行了方案的论证和结构设计，建立了运动学模型，以及典型运动的受力模型；武器系统部分则主要建立了枪架的力学模型，以及武器发射状态的射击稳定性模型，通过定性的分析，提出了提高稳定性的办法；对于机械手，确定了基本构型和臂长等参数。在本章中确定的设计和计算方法，可为下一步展刀更为详细的设计提供指导。

4 机械手样机设计

本文研究的小型排爆机器人,从实际开发来讲,将是一个耗资较大,耗时较长的研究过程,对其研究应采取分步、分阶段的方法进行研究。本章主要对机械手的样机进行设计。在机械手样机设计中,利用模块化的方法,对机械手的整体进行了详细的设计,利用 D-H 方法对机械手建立了正逆运动学方程和速度方程,并通过仿真进行了验证。

4.1 机械手样机设计要求

机械手在满足抓取功能的前提下,降低样机成本是样机设计的主要指导思想。在样机设计中,没有考虑采用直流伺服电机、印刷电机等驱动元件,相对来说步进电机是一个较好的选择,步进电机对于手臂样机设计有如下的优点:

- 同等体积下锁定力矩大;
- 转速控制范围大,低速力矩大;
- 开环控制,降低系统成本;
- 分辨率高,采用细分驱动器技术可达到每步 0.0072 度;
- 低速运行平稳,已接近交流伺服系统水平;
- 功耗低。

同时,传动机构主要以蜗轮蜗杆传动机构为主,相对而言,谐波齿轮减速器、整体式关节等传动元件价格较为昂贵,而且基本上需要到厂家订制,尤其是军用机器人的特种要求,更难以从市场上购买,单从研制周期来讲已很难由研制方控制,因此,采用简单的蜗轮蜗杆不仅易制造,成本低,而且特有的自锁功能使传动机构设计更简单,虽然该传动机构传动效率相对较低,难以实现大动态的运动,但从可实现运动和功能的实现来讲是可以满足的。

机械手各驱动电机部分应避免外露,由于使用蜗轮蜗杆一级传动机构,整体较难布局,国内类似结构的机械手,有采用将蜗轮外伸出关节,电机和蜗杆也外露的设计形式;也有采用基于轴孔配合的蜗轮蜗杆传动方案,但主要用于较短臂长的机械手设计。这些在本样机设计中都进行了综合的考虑。

4.2 机械手样机主要结构

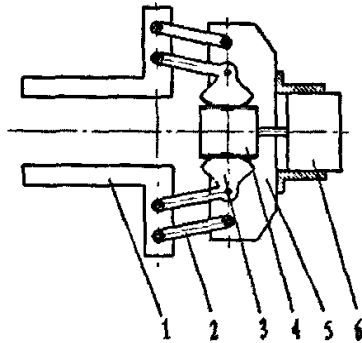
机械手样机主要包括手爪、腕关节、肘关节、肩关节、腰关节及大小臂连杆等结构，设计中，采用了模块化的设计方法进行设计。机械手设计的要点主要有以下几个方面：为防止手臂运动中产生较大变形，应通过合理的选择截面形状以提高刚度，手臂整体重量要轻。

4.2.1 机械手爪结构

在满足抓取力、抓取精度、夹钳开合尺寸的前提下，机械手爪设计还应使结构简单、质量轻。由于抓取物体形状、尺寸的不确定因素，其夹持部分应设计为快速可更换。

在手爪的设计中主要考虑了以下几种方案：

方案一：齿轮齿条平行连杆的机构，该方案见图 4.1。



1—夹钳 2—连杆 3—扇形齿轮 4—齿条 5—手爪壳体 6—直线电机

图 4.1 直线电机带动齿轮齿条的手爪方案

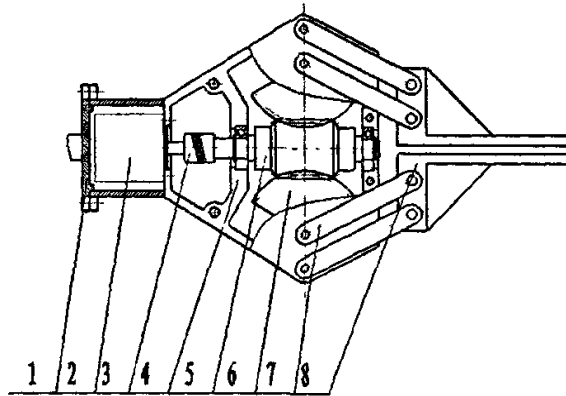
该结构驱动电机为直线电机，直线电机轴带动齿条沿轴线方向直线运动，两个扇形齿轮则在齿条的带动下实现转动，从而带动连杆和与连杆铰接的夹钳实现开合动作，该机构从实现上最为简单。考虑到与后面要使用电机的配套，如果选择直线电机，则必须选择单独的一套驱动器，势必增加成本。

方案二：丝杠螺母带动齿轮齿条的机构。

该方案为方案一的改进，即将方案一的直线电机改用旋转电机，电机轴直接联接

一丝杠或直接向厂家订制丝杠轴的电动机，与丝杠配合的螺母上镶嵌齿条。

方案一和方案二存在着一个共同的问题，为了实现较大的手爪开合尺寸，齿条部分必需做的较长，而在整个手爪开合的行程中，手爪完全张开时，齿条有一部分要伸出手爪壳体。综合以上因素，实际设计中，对机械手进行了如下的结构设计。手爪部分的结构见图 4.2。



- 1—腕转驱动盘 2—步进电机 3—柔性联轴器 4—手爪下壳体
5—蜗杆 6—蜗轮 7—连杆 8—平行式夹钳

图4.2 机械手爪结构简图

为实现更平稳的抓取动作，为手爪设计了平行式夹钳。在夹钳表面粘附一层1mm的橡胶，以增加夹持物体时的摩擦力。根据不同抓取需要，可将夹钳进行快速更换，也可将连杆7和夹钳8都换下，以适应更大尺寸和形状的物体。

连杆的摆动由蜗轮蜗杆传动机构实现。其中蜗杆双边工作，带动两蜗轮旋转，从而带动连杆摆动，实现夹钳开合。由于蜗轮蜗杆传动中，蜗杆承受轴向力，因此蜗杆采用一对向心球轴承支撑，电机轴通过联轴器与蜗杆联接。由于蜗轮蜗杆、轴承、螺钉等都采用标准件，配件问题也较容易解决。手爪的旋转动作由腕部步进电机驱动的手爪驱动盘带动，手爪驱动盘前端和手爪壳体通过螺纹联接。

抓取力的计算：

对于一般物体的抓取，其抓取力取2~3倍的物体重量即可满足使用要求，设手爪卡钳单边夹紧力为 F_n ，手爪的开合角度为 α ，主动连杆从蜗轮获得的力矩为 T ，见图 4.3所示。

手爪夹紧力可由下式计算：

$$F_n = \frac{Tm \times i \times \eta}{2L \sin \alpha} \quad (4.1)$$

T_m —步进电机转矩

η —传动系统效率

i —传动机构传动比

L —连杆长度

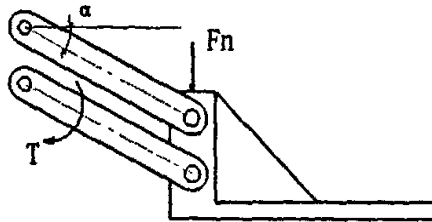


图4.3 抓取力的计算

总的夹紧力为 $2Fn$ ，手爪抓取力一般取抓重的2~3倍即可。蜗轮蜗杆机构的传动比 i 为30:1，步进电机保持转矩0.11Nm，由于步进电机工作速度较低，直接使用其名义转矩进行计算。连杆长度为60mm，开合角度为 α 为 $-30^\circ \sim 30^\circ$ ，则手爪能提供的最大夹紧力约为107N， α 为0时抓取力最小，约为53N，从抓取力能够满足设计要求。

手爪开合尺寸：手爪的最大开合尺寸为120mm，如果水平抓取，最大可抓取尺寸为120mm的物体。

控制精度：以步距角 1.8° 进行计算，卡钳单边摆动范围 60° ，行程60mm，蜗轮蜗杆传动比30，则在单边可实现其行程1/1000的细分，即0.06mm，则整个手爪卡钳可实现的控制精度为 $2 \times 0.06 = 0.12\text{mm}$ ，这只是理论精度，由于实际传动中机构的传动误差和间隙，实际精度要低。

4.2.2 腕关节结构

腕关节及其结构见图4.4。为减小驱动电机重量对肘关节产生的力矩，将电机设置在小臂杆的末端，通过驱动轴，由腕部前端法兰盘与手爪壳体联接。

腕关节带动手爪的旋转角度范围为 $0 \sim 90^\circ$ ，仅用于手爪姿态的简单调整，转速相对较低，可以不考虑转动惯量因素，即使直接和电机轴连接影响也较小，因此选择了由步进电机直接驱动手爪旋转。考虑到加工误差和装配误差，电机轴和驱动轴之间不能刚性联接，因此在电机轴和手爪驱动轴之间采用了柔性联轴器。腕关节通过肘关节连杆2与肘关节旋转轴联接，实现整个小臂及其前端的手爪的旋转抬升。

小臂连杆 6 为中空轴，各连接部分均采用螺纹连接，该设计的优点是小臂臂杆可根据需要选择不同的长度。该结构可以在结构变化不大的前提下，快速地进行设计变型。由于手爪的对称设计，其质心位于旋转轴上，即使由于加工和安装误差等因素造成质心偏离轴线，空载时（不抓取重物），也仅产生较小的偏心转矩，转动较为轻巧。腕关节电机选用保持转矩为 1.04Nm 的步进电机，额定条件下可承受抓取 1.5kg 重物质心在水平位置相对轴线约 7cm 的偏距。

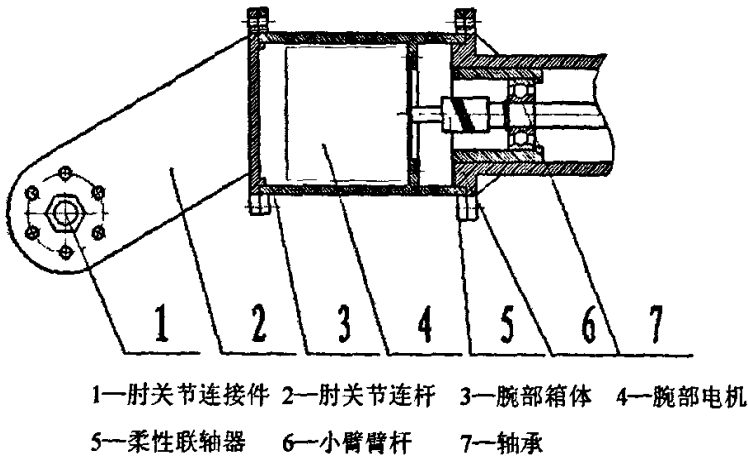
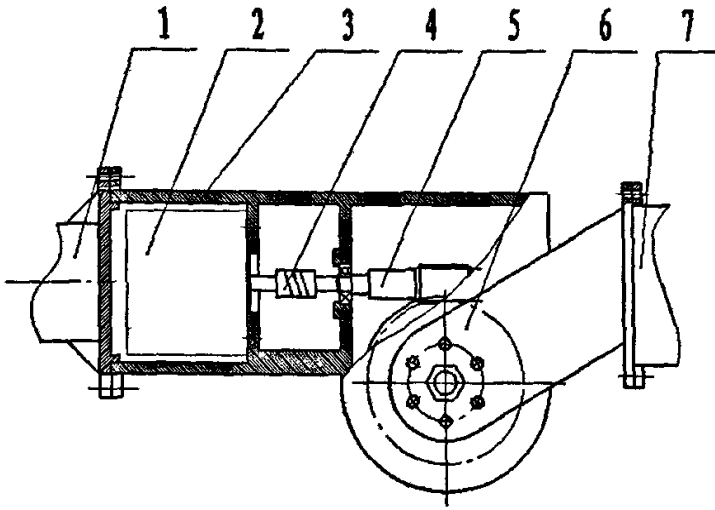


图 4.4 腕关节结构图

4.2.3 肘关节结构

肘关节的结构见图 4.5 所示，大臂杆 1 和肘关节箱体 3 之间通过螺纹连接，步进电机 2 通过柔性联轴器 4 与传动机构的蜗杆 5 联接，并带动蜗轮实现肘关节的驱动。小臂连杆 6 通过螺纹连接和铆接的方式与旋转轴进行连接和固定。

肘关节从结构上实现了将蜗轮蜗杆以及驱动步进电机不外露的目的，但为实现这一目的也付出了体积大的代价，为了实现蜗轮蜗杆的装配，肘关节箱体采用对开式的箱体结构，前后箱体通过螺栓进行联接和紧固，由于联接部件的增多，对机械手的刚性产生了一定的影响。为了能够实现电机不外露以及体积小，曾考虑了使用一级伞齿轮加两级直齿圆柱齿轮的传动设计方案，通过初步设计，该传动方案造成箱体内部结构复杂。肘关节设计中如果采用整体式关节，或者采用直流伺服电机配合谐波传动的的设计方法，所有一切问题都可迎刃而解。但作为折衷方案，采用如图 4.5 的结构满足机械臂样机的设计要求。

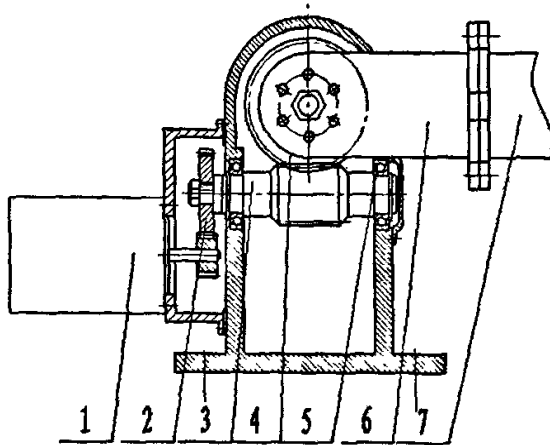


- 1—大臂臂杆 2—驱动电机 3—轴关节箱体 4—弹性联轴器
- 5—蜗杆 6—小臂连杆 7—小臂臂杆

图 4.5 肘关节结构图

4.2.4 肩关节结构

肩关节的结构见图 4.6。



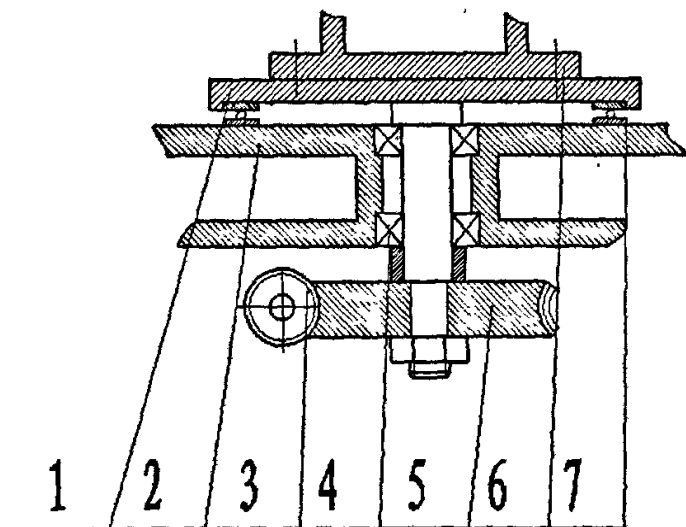
- 1—驱动电机 2—直齿齿轮 3—蜗杆 4—蜗轮
- 5—轴承 6—肩部连杆 7—大臂臂杆

图 4.6 肩部结构图

肩关节在整个机械手各关节中承受最大负载，带动大臂和小臂及抓取重物的的抬

升, 如果采用一级蜗轮蜗杆传动, 则蜗轮直径过大, 因此, 采用了两级传动, 一级蜗轮蜗杆加一级直齿圆柱齿轮传动的结构。肩关节驱动电机是整个机械手唯一外露的电机, 为避免电机裸露, 在电机外罩上一个外壳。

4.2.5 腰部结构



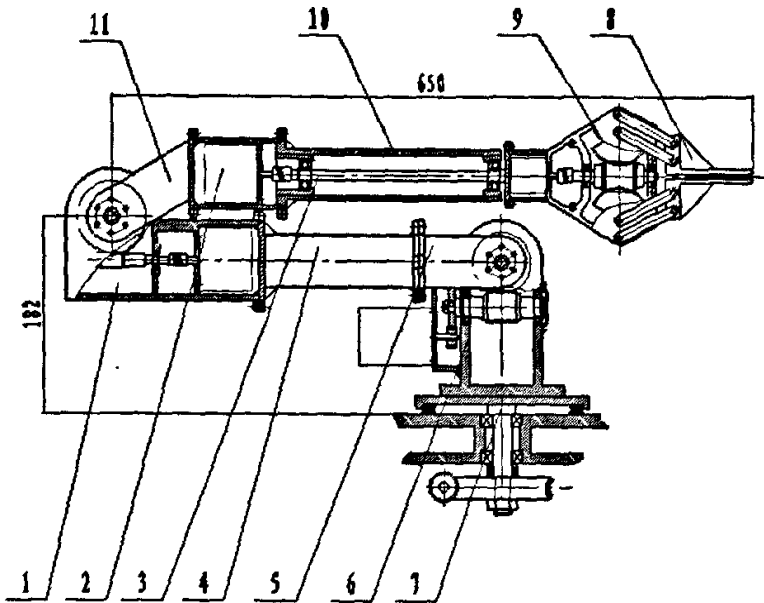
1—旋转盘 2—车体框架 3—蜗轮 4—向心球轴承
5—蜗杆 6—肩关节箱体 7—止推轴承

图 4.7 腰关节结构图

腰关节结构见图 4.7。机械手安装于移动平台的框架上, 由旋转盘带动整个机械手臂旋转, 腰部关节的驱动步进电机及传动机构安装在移动平台的框架内, 传动机构采用了一级蜗轮蜗杆传动。机械手的整体重量通过轴承卸荷在移动平台的结构框架上使得传动机构更加轻巧。

4.2.6 机械手装配

机械手整体装配见图 4.8。



- 1—肘关节箱体 2—腕关节箱体 3—手爪旋转轴 4—大臂连杆
 5—肩部连杆 6—腰关节箱体 7—旋转底座 8—夹持器
 9—机械手爪 10—小臂连杆 11—肘部连杆

图 4.8 机械手装配图

4.2.7 传动机构的计算及电机的选择

4.2.7.1 传动机构传动比的确定

步进电机驱动旋转关节运动时，其负载力矩有两种情况：一种为峰值力矩，对应电机最严重工作状况；一种为均方根力矩，对应长时间连续工作情况。

折算到电机轴的的负载峰值力矩：

$$M_{LP}^m = \frac{M_{LP}}{i \times \eta} + \frac{M_{fp}}{i \times \eta} + \left(J_m + J_G^m + \frac{J_L}{i^2 \times \eta} \right) \times i \times \varepsilon_{LP} \quad (4.2)$$

式中： M_{LP} ——机械臂抓取重物时作用在负载轴上的力矩；

M_{fp} ——作用在负载轴上的峰值摩擦力矩；

- J_m ——电机轴上的转动惯量;
- J_G^m ——各传动零件折算到电机轴上的转动惯量;
- J_L ——负载轴上的转动惯量;
- η ——传动装置的效率;
- ε_{LP} ——负载轴的峰值加速度。

对式 (4.2) 进行求导, 使得:

$$\frac{dM_{LP}^m}{di} = 0 \tag{4.3}$$

就得到了折算峰值力矩最小的最佳传动比:

$$i_{opt} = \sqrt{\frac{(M_{LP} + M_{FP} + J_L \varepsilon_{LP})}{(J_m + J_G^m) \varepsilon_{LP} \eta}} \tag{4.4}$$

将式 (4.4) 代入式 (4.2), 则可得到再次最佳传动比上折算的峰值力矩最小值:

$$\min M_{LP}^m = 2 \sqrt{\frac{(M_{LP} + M_{FP} + J_L \varepsilon_{LP})(J_m + J_G^m) \varepsilon_{LP}}{\eta}} \tag{4.5}$$

此值即为所需的电机转矩, 即 $M_m = \min M_{LP}^m$ 。实际设计时根据各关节工作状态进行简化, 即可由以上各式对传动机构进行计算。

(1) 肩、肘关节

对应于肘、肩关节, 主要带动的大臂和小臂的抬升动作, 由于采用步进电机, 抬升过程基本为匀速旋转, 其绕关节轴旋转速度较低, 不考虑转动惯量因素, 忽略摩擦力矩, 主要考虑其所受的最大静力矩, 直接将式 (4.2) 进行简化后计算。式 (4.2) 简化为:

$$M_{LP}^m = \frac{M_{LP}}{i \times \eta} \tag{4.6}$$

M_{LP}^m 即为静平衡时所需的步进电机转矩 M_m 。肘关节负载轴在小臂呈水平状态时承受最大静力矩, 肩关节负载轴在整个手臂水平全伸时承受最大静力矩, 图 4.9 为手臂全伸时的受力分析。

则肘、肩关节静力矩分别为各力对肩、肘关节旋转轴线之矩的和。

$$M_{LP} = \sum_{i=1}^n m_i g L_i \tag{4.7}$$

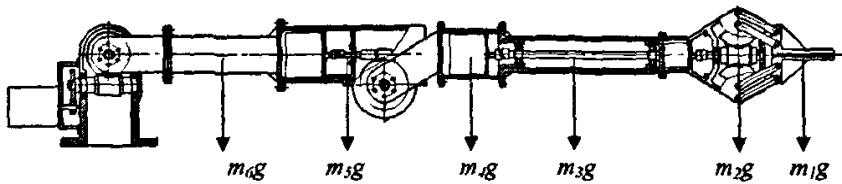


图 4.9 水平伸展时受力

综合式 (4.6) 和式 (4.7), 即可对肘、肩部传动机构进行计算。肘部、肩部的静力矩分别为 23.3Nm 和 77.6Nm。设计中分别选择了保持转矩为 1.04Nm 和 1.72Nm 的步进电机, 然后确定传动比均为 60:1, 其中间关节为两级传动, 分别为 30:1 和 2:1。

(2)腰关节

对于腰关节, 为简化计算取式 (4.5) 中取 $J_{Gm} = 0$, 即不考虑传动齿轮折算到电机轴的转动惯量; 取 $M_{LP} = 0$ 。则式 (4.5) 简化为:

$$i = \sqrt{\frac{J_l \times \epsilon_{LP}}{J_m \times \epsilon_{LP} \times \eta}} \tag{4.8}$$

其中 J_m 由表 4.1 查得, J_l 则取其零件折算到传动轴上的最大转动惯量, 当机械手水平时, 见图 4.9, 该值最大, 其值为:

$$J_l = \sum m_i \times L_i^2 \tag{4.9}$$

将式 4.9 代入式 4.5, 则得到:

$$i = \sqrt{\frac{M_{LP} + (\sum m_i \times L_i^2) \times \epsilon_{LP}}{(J_m + J_G^m) \times \epsilon_{LP} \times \eta}} \tag{4.10}$$

即为腰部关节的传动比计算公式。腰部驱动步进电机选择了保持转矩为 1.72Nm 的混合式步进电机, 根据 4.10 进行传动比计算和圆整, 腰关节的选择了传动比为 30:1。

4.2.7.2 驱动电机选择

机械手的驱动电机均采用北京和利时电机技术有限公司的混合式步进电机, 其中手爪驱动电机型号为 35BYG250B-SAFSMQ-0081, 腕关节、肘关节驱动电机型号为 56BYG250C-SASSBL-0241, 肩关节和腰关节的驱动步进电机型号为 56BYG250D-SASSBL-0241, 共选择了三种型号的电机, 步进电机驱动器分别选择了 SH-20403 和 SH-20808, 步进电机技术参数见表 4.1。步进电机的矩频特性曲线见下

图 4.10 所示。

表 4.1 步进电机技术数据

电机型号	35BYG250B-SAFSMQ-0081	56BYG250C-SASSBL-0241	56BYG250D-SASSBL-0241
相数	2	2	2
步距角(°)	0.9/1.8	0.9/1.8	0.9/1.8
相电阻(Ω)	5.7	1.2	1.5
相电感(A)	7	4.0	5.4
保持转矩(Nm)	0.11	1.04	1.72
定位转矩(Nm)	0.012	0.04	0.07
转动惯量 gcm ²	14	260	460
质量(Kg)	0.18	0.6	1
驱动电压(V)	24	48	48

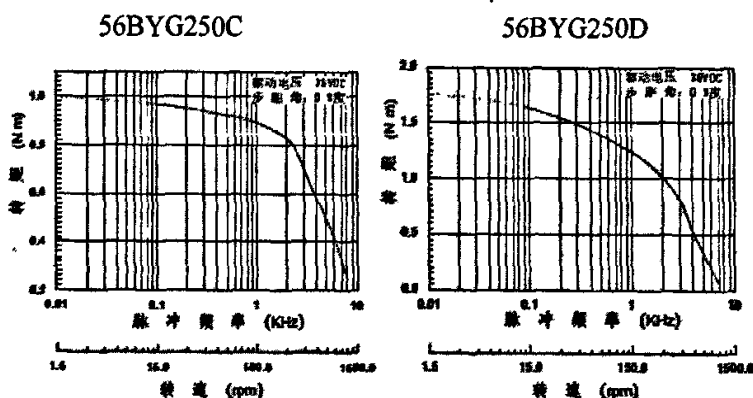


图 4.10 步进电机矩频特性曲线

4.3 运动学分析

机器人运动学实质上是位置运动学分析，基于分析的连贯性，本节将运动学和速度分析放在一起进行分析。运动学研究机械手相对于固定参考系原点的位姿几何关系，尤其是机械手末端执行器位置和姿态与关节空间变量之间的关系，也称为位置运动学。对于一已知构型的机械手，即已知了所有的连杆长度和关节角度，对机械臂末端（手爪夹钳的中心）的位姿求解称为正运动学分析，通过输入关节变量的值，即可用正运动学方程计算出相应的位姿。一般称该问题为运动学的第一个问题。作为一个相反的问题，即在确定抓取目标的前提下，如果要使手爪夹钳中心定位在期望的位姿，各关节的关节变量的值如何求解。这个问题被称为运动学的第二个问题。

通常用D-H法对机器人进行建模和运动学方程的求解。正、逆运动学问题中，逆运动学问题更重要，它是机械手运动规划和轨迹控制的基础。

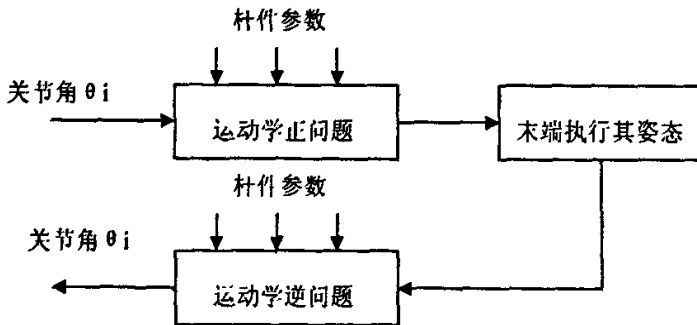


图 4.11 运动学正问题和逆问题

4.3.1 运动方程的表示

Denavit 和 Hartenberg^[64]于 1955 年在“ASME Journal of Applied Mechanics”发表了一篇论文，并导出运动方程，被命名为 D-H 表示法，现在已成为对机器人建模的标准方法。D-H 模型表示了对机器人连杆和关节进行建模的一种通用方法，无论机器人的结构顺序和复杂程度如何，都可以方便的进行建模工作，并可以此为基础对机器人进行雅可比矩阵的计算和力分析。

机器人的机械手都可以看作是一系列由关节连接起来的连杆构成的。为每一关节指定一参考坐标系，确定从一个关节到下一个关节（坐标系之间）的齐次坐标变换 A 矩阵，一个 A 矩阵是描述连杆构件坐标系之间相对平移和旋转的齐次坐标变换。将从基座到第一关节，再从第一关节到第二关节直到最后一个关节的所有变换结合起来，就可以得到机器人的总变换矩阵。

用 D-H 法为机器人建模，首先要为每一个关节指定一个参考坐标系。对于 D-H 法建立的坐标系，所有的关节均用 Z 轴表示。 Z 轴位于按右手规则旋转的方向， Z_n 为关节 $n+1$ 的运动轴，对于旋转关节，绕 Z 轴的旋转角度 θ 为关节变量，对滑动关节，沿 Z 轴的连杆长度 d 为关节变量， Y 轴由 X 、 Z 轴根据右手笛卡儿坐标系确立，无需标出。依照图 4.12 (a) 所示，对具体的构型进行分析，即可建立相应的连杆坐标系。合理坐标系的建立应能起到模型简化的作用。

图 4.12 (b) 至 (g) 表示了连杆坐标变换 A 矩阵建立所需的几个标准运动，依照该步骤即可实现相邻两个坐标系之间的坐标转换，其中坐标系之间的转换按照下列顺序进行：

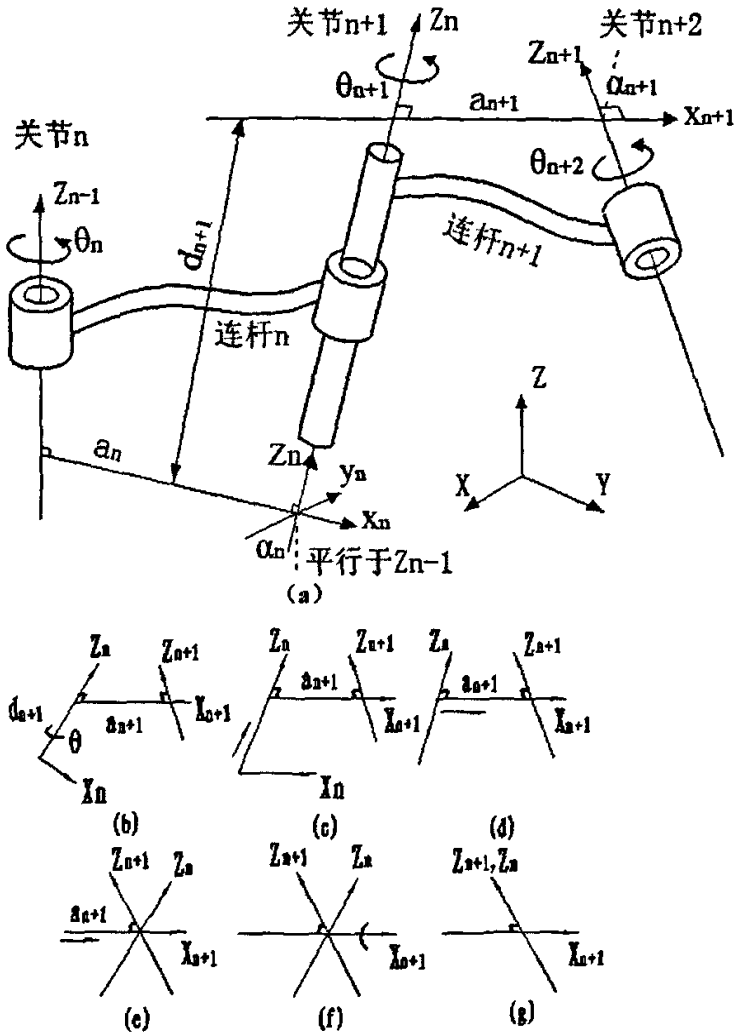


图 4.12 通用关节—连杆组合的 D-H 表示

- (1) 绕 Z_n 轴旋转 θ_{n+1} ，使得 X_n 和 X_{n+1} 互相平行；
- (2) 沿 Z_n 轴平移 d_{n+1} 距离，使 X_n 和 X_{n+1} 共线；
- (3) 沿 X_n 平移 a_{n+1} 的距离，使得 X_n 和 X_{n+1} 的原点重合，这时两个参考坐标系的原点处在同一位置；
- (4) 将 Z_n 轴绕 X_{n+1} 轴旋转 α_{n+1} ，使得 Z_n 轴与 Z_{n+1} 轴对准，这时坐标系 n 和 $n+1$ 完全重合，即可完成坐标系之间的转换。

通过右乘上述四个运动的转换矩阵即可得到齐次变换矩阵 A 。

$$A_{n+1} = Rot(z, \theta_{n+1}) \times Trans(0, 0, d_{n+1}) \times Trans(a_{n+1}, 0, 0) \times Rots(x, a_{n+1})$$

$$\begin{aligned}
 &= \begin{bmatrix} C\theta_{n+1} & -S\theta_{n+1} & 0 & 0 \\ S\theta_{n+1} & C\theta_{n+1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_{n+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{n+1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_{n+1} & S\alpha_{n+1} & 0 \\ 0 & S\alpha_{n+1} & C\alpha_{n+1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} C\theta_{n+1} & -C\alpha_{n+1}S\theta_{n+1} & S\alpha_{n+1}S\theta_{n+1} & a_{n+1}C\theta_{n+1} \\ S\theta_{n+1} & C\alpha_{n+1}C\theta_{n+1} & -S\alpha_{n+1}C\theta_{n+1} & a_{n+1}S\theta_{n+1} \\ 0 & S\alpha_{n+1} & C\alpha_{n+1} & d_{n+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.11}
 \end{aligned}$$

则四自由度机械手基座与机械手之间的总变换为：

$${}^0T_4 = A_1 A_2 A_3 A_4 \tag{4.12}$$

对于本文研究的机械手样机，首先利用标准 D-H 方法，建立机械手样机的坐标系，其坐标系的描述如图 4.13 所示。

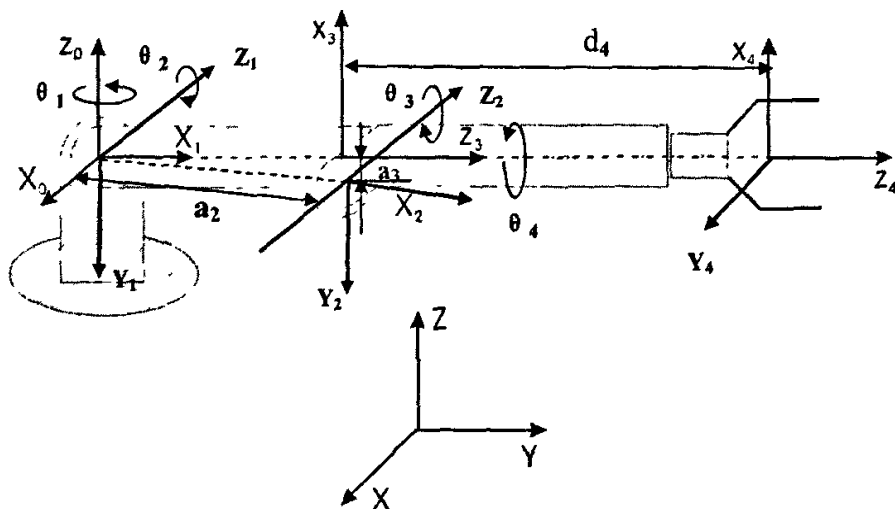


图 4.13 机械手样机 D-H 坐标系

表 4.2 机械手的参数和关节变量表

关节 n	α_n	a_n	d_n	θ_n	关节变量 θ_n
1	90°	0	0	θ_1	$-90^\circ \sim +90^\circ$
2	0°	a_2	0	θ_2	$-180^\circ \sim 0$
3	90°	a_3	0	θ_3	$-0 \sim 180^\circ$
4	0°	0	d_4	θ_4	$0 \sim 90^\circ$

表 4.2 中, $a_2 = \sqrt{400^2 + 42^2} = 402\text{mm}$; $a_3 = 42\text{mm}$, d_4 的值为手爪末端夹钳中心到关节 4 坐标原点的长度, 值为 600mm。

4.3.2 正运动学方程

正运动学只涉及到物体的运动规律, 不考虑产生运动的力和力矩。机器人正运动学所研究的主要内容, 就是给定机器人各关节的角度, 计算机器人末端执行器相对于参考坐标系的位置和姿态问题。将各连杆变换矩阵相乘, 可得到机械手末端执行器的位姿方程。

机械手基座与机械手之间的总变换为:

$${}^0T_4 = A_1 A_2 A_3 A_4 \tag{4.13}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c_3 & 0 & s_3 & a_3 c_3 \\ s_3 & 0 & -c_3 & a_3 s_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

由以上各式依次右乘:

$${}^0T_2 = A_1 A_2 = \begin{bmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & s_1 & c_1 c_2 a_2 \\ s_1 c_2 & -s_1 s_2 & -c_1 & s_1 c_2 a_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$${}^0T_3 = {}^0T_2 A_3 = \begin{bmatrix} c_1 c_2 c_3 - c_1 s_2 s_3 & s_1 & c_1 c_2 s_3 + c_1 c_3 s_2 & c_1 c_2 a_3 c_3 - c_1 s_2 a_3 s_3 + c_1 c_2 a_2 \\ c_2 c_3 s_1 - s_1 s_2 s_3 & -c_1 & c_2 s_1 s_3 + s_1 s_2 c_3 & s_1 c_2 a_3 c_3 - s_1 s_2 a_3 s_3 + s_1 c_2 a_2 \\ s_2 c_3 + c_2 s_3 & 0 & s_2 s_3 - c_2 c_3 & s_2 a_3 c_3 + c_2 a_3 s_3 + a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$= \begin{bmatrix} c_1 c_{23} & s_1 & c_1 s_{23} & c_1 c_{23} a_3 + c_1 c_2 a_2 \\ s_1 c_{23} & -c_1 & s_1 s_{23} & a_3 s_1 c_{23} + s_2 c_2 a_2 \\ s_{23} & 0 & -c_{23} & a_3 s_{23} + a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$${}^0T_4 = A_1 A_2 A_3 A_4 = \begin{bmatrix} c_1 c_{23} c_4 + s_1 s_4 & -c_1 c_{23} s_4 + s_1 c_4 & c_1 s_{23} & c_1 s_{23} d_4 + c_1 c_{23} a_3 + c_1 c_2 a_2 \\ s_1 c_{23} c_4 - c_1 s_4 & -s_1 c_{23} s_4 - c_1 c_4 & s_1 s_{23} & s_1 s_{23} d_4 + a_3 s_1 c_{23} + s_2 c_2 a_2 \\ s_{23} c_4 & -s_{23} s_4 & -c_{23} & -c_{23} d_4 + a_3 s_{23} + a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

上述各式中 s_i 、 c_i 分别表示 $\sin\theta_i$ 和 $\cos\theta_i$;

s_{ij} 和 c_{ij} 分别表示 $\sin(\theta_i + \theta_j)$ 和 $\cos(\theta_i + \theta_j)$ 。至此, 求出了机械手正运动学解, 将表 4.2 的数据代入式 (4.21) 即可得到:

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} c_1 c_{23} c_4 + s_1 s_4 & -c_1 c_{23} s_4 + s_1 c_4 & c_1 s_{23} & 600 c_1 s_{23} + 402 c_1 c_{23} + 42 c_1 c_2 \\ s_1 c_{23} c_4 - c_1 s_4 & -s_1 c_{23} s_4 - c_1 c_4 & s_1 s_{23} & 600 s_1 s_{23} + 402 s_2 c_2 + 42 s_2 c_2 \\ s_{23} c_4 & -s_{23} s_4 & -c_{23} & -600 c_{23} + 402 s_2 + 42 s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

式 (4.22) 即为机械手的正运动学解方程, 利用式 (4.22), 给定各关节的旋转角度参数, 即可求出机械手末端夹钳中心的位置。

4.3.3 逆运动学方程

逆运动学解是非常重要的,为使机械手处于期望的位姿,有了逆运动学解就可以确定各个关节变量的值,逆运动学解是进行机械手控制系统程序编程的重要依据。下面论述机械手逆运动学解的求解过程。

为了书写的方便,将上一节式(4.21)的矩阵表示为 $[RHS]$ 。

将机械手末端期望的位姿表示为:

$${}^R T_H = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

为了求解角度,依次用 A_i^{-1} 左乘上述两个矩阵,得到:

$$A_i^{-1} \times \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = A_i^{-1} \times [RHS] = A_2 A_3 A_4 \quad (4.24)$$

由于坐标转换矩阵 A_n 为酉矩阵,其逆矩阵可有以下式求得:

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & -p \cdot n \\ n_y & o_y & a_y & -p \cdot o \\ n_z & o_z & a_z & -p \cdot a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

式(4.24)中左式的计算为:

$$\begin{aligned} & A_i^{-1} \times \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ s_1 & -c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c_1 n_x + s_1 n_y & c_1 o_x + s_1 o_y & c_1 a_x + s_1 a_y & c_1 p_x + s_1 p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ s_1 n_x - c_1 n_y & s_1 o_x - c_1 o_y & s_1 a_x - c_1 a_y & s_1 p_x - c_1 p_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.26) \end{aligned}$$

式 (4.24) 中右式的计算为:

$$A_1^{-1} \times [RHS] = A_2 A_3 A_4$$

$$= \begin{bmatrix} c_{23}c_4 & -c_{23}s_4 & s_{23} & s_{23}d_4 + a_3c_{23} + a_2c_2 \\ s_{23}c_4 & -s_{23}s_4 & -c_{23} & -c_{23}d_4 + a_3s_{23} + a_2s_2 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

对比式 (4.26) 和式 (4.27), 根据式 (4.26) 和 (4.27) 的 3,4 元素, 有:

$$s_1 p_x - c_1 p_y = 0 \quad \rightarrow \quad \theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right) \quad (4.28)$$

根据式 (4.26) 和 (4.27) 的 3,1 元素和 3,2 元素, 得到:

$$s_4 = s_1 n_x - c_1 n_y$$

$$c_4 = s_1 o_x - c_1 o_y$$

则:

$$\theta_4 = \arctan \frac{s_1 n_x - c_1 n_y}{s_1 o_x - c_1 o_y} \quad (4.29)$$

根据式 (4.26) 和式 (4.27) 的 1,3 和 2,3 元素, 得到:

$$s_{23} = c_1 a_x + s_1 p_y \quad (4.30)$$

$$-c_{23} = a_z \quad (4.31)$$

则:

$$\theta_{23} = -\arctan\left(\frac{c_1 a_x + s_1 p_y}{a_z}\right) \quad \text{或} \quad \theta_{23} = \theta_{23} + 180^\circ \quad (4.32)$$

根据式 (4.21) 和式 (4.23) 的 3,4 元素, 得到:

$$-c_{23}d_4 + s_{23}a_3 + a_2s_2 = p_z \quad (4.33)$$

则:

$$s_2 = \frac{p_z + c_{23}d_4 - s_{23}a_3}{a_2} \quad (4.34)$$

根据 (4.21) 和式 (4.23) 的 1,4 元素, 得到:

$$c_1 s_{23} d_4 + a_3 c_1 c_{23} + c_1 c_2 a_2 = p_x \quad (4.35)$$

则:

$$c_2 = \frac{p_x - c_1 s_{23} d_4 - a_3 c_1 c_{23}}{c_1 a_2} \quad (4.36)$$

由式 (4.34) 和式 (4.36), 得到:

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \arctan \frac{p_z + c_{23}d_4 - s_{23}a_3}{c_1(p_x - c_1s_{23}d_4 - a_3c_1c_{23})} \\ &= \arctan \frac{p_z - c_{23}d_4 - s_{23}a_3}{c_1p_x - c_1^2(s_{23}d_4 + a_3c_{23})} \end{aligned} \quad (4.37)$$

由于 θ_{23} 和 θ_2 均已求出, 则:

$$\theta_3 = \theta_{23} - \theta_2 \quad (4.38)$$

θ_{23} 有两个解, 所以 θ_2 也有两个解。对于方程的多解问题, 需要进一步的分析。式(4.32)中, θ_{23} 的可能取之有两个, 即:

$$-\arctan\left(\frac{c_1a_x + s_1p_y}{a_z}\right) \quad (4.39)$$

$$-\arctan\left(\frac{c_1a_x + s_1p_y}{a_z}\right) + 180^\circ \quad (4.40)$$

实际 θ_2 和 θ_3 均只能取负值, 不会出现正值的情况, 所以 θ_{23} 只能够取式(4.39)的值。则机械手的逆运动学方程为:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right) \\ \theta_2 = \arctan \frac{p_z - 600a_z - 42(c_1a_x + s_1p_y)}{C_1[p_x + 42c_1a_z - 600c_1(c_1a_x + s_1p_y)]} \\ \theta_3 = \arctan\left(\frac{c_1a_x + s_1p_y}{a_z}\right) - \arctan \frac{p_z - 600a_z - 42(c_1a_x + s_1p_y)}{C_1[p_x + 42c_1a_z - 600c_1(c_1a_x + s_1p_y)]} \\ \theta_4 = \arctan \frac{s_1n_x - c_1n_y}{s_1o_x - c_1o_y} \end{cases} \quad (4.41)$$

4.3.4 速度方程

对机器人速度的求解建立在微分运动的基础上。微分运动时机构的微小运动, 如果在一个小的时间段进行测量和计算该运动, 就可得到速度关系。其求解一般要借助于机器人雅可比矩阵。多自由度机器人中, 可通过雅可比矩阵将关节的的微分运动(速度)和手的微分运动(速度)联系起来。

雅可比矩阵[J]是由位置方程的各元素对各关节变量 θ 求微分得到的, 然而为了

计算各关节的微分运动（速度）以得到所需要的手爪的微分运动（速度），如同运动学的逆问题，需要计算雅可比矩阵的逆。求解了雅可比矩阵的逆，就可计算出每个关节需要以多快的速度，才能使手爪产生期望的微分运动或速度。求解雅可比矩阵的逆可采用高斯消元法或其他类似方法进行求解，但是都比较困难和麻烦。

在机械手运动中，随着运动及构型的变化，雅可比矩阵中所有元素的实际值是不断变化的，虽然雅可比矩阵的符号方程相同，但由于数值的变化，需要不断计算雅可比矩阵的值。这对于控制来说，将产生大量的计算开销，必须保证计算过程快速高效，否则将极不精确，或产生无用的结果。

本文则采用上一节已经求得的逆运动学方程来进行关节速度的求解。

由上一节逆运动学方程求解中的式（4.28），可知：

$$s_1 p_x - c_1 p_y = 0 \quad \rightarrow \quad \theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right)$$

可通过对该式进行微分计算求得 $d\theta_1$ 。

$$\begin{aligned} s_1 p_x &= c_1 p_y \\ dp_x s_1 + p_x c_1 d\theta_1 &= dp_y c_1 + p_y s_1 d\theta_1 \\ d\theta_1 (p_x c_1 + p_y s_1) &= -dp_x s_1 + dp_y c_1 \\ d\theta_1 &= \frac{-dp_x s_1 + dp_y c_1}{p_x c_1 + p_y s_1} \end{aligned} \quad (4.42)$$

由上节式（4.30）：

$$\begin{aligned} s_{23} &= c_1 a_x + s_1 p_y \\ c_{23}(d\theta_2 + d\theta_3) &= -s_1 a_x d\theta_1 + c_1 da_x + c_1 p_y d\theta_1 + s_1 dp_y \\ d\theta_2 + d\theta_3 &= \frac{-s_1 a_x d\theta_1 + c_1 da_x + c_1 p_y d\theta_1 + s_1 dp_y}{c_{23}} \end{aligned} \quad (4.43)$$

由上节式（4.34）：

$$\begin{aligned} s_2 &= \frac{p_z - c_{23} d_4 - s_{23} a_3}{a_2} \\ s_2 a_2 &= p_z - c_{23} d_4 - s_{23} a_3 \\ c_2 a_2 d\theta_2 &= dp_y + s_{23} d_4 (d\theta_2 + d\theta_3) - c_{23} a_3 (d\theta_2 + d\theta_3) \\ d\theta_2 &= \frac{c_{23} dp_z + (s_{23} d_4 - c_{23} a_3) [c_1 da_x - (s_1 a_x + c_1 p_y) d\theta_1 + s_1 dp_y]}{c_2 a_2} \end{aligned} \quad (4.44)$$

将式 (4.44) 代入式 (4.43), 得到:

$$d\theta_3 = \frac{-s_1 a_x d\theta_1 + c_1 da_x + c_1 p_y d\theta_1 + s_1 dp_y}{c_{23}} \\ \frac{c_{23} dp_z + (s_{23} d_4 - c_{23} a_3)[c_1 da_x - (s_1 a_x + c_1 p_y) d\theta_1 + s_1 dp_y]}{c_2 a_2} \quad (4.45)$$

由上节式 (4.29) 的推导:

$$s_4 = s_1 n_x - c_1 n_y \\ c_4 d\theta_4 = c_1 n_x d\theta_1 + s_1 dn_x + s_1 n_y d\theta_1 - c_1 dn_y \\ d\theta_4 = \frac{c_1 n_x d\theta_1 + s_1 dn_x + s_1 n_y d\theta_1 - c_1 dn_y}{c_4} \quad (4.46)$$

将上节式 (4.29) 的推导:

$$c_4 = s_1 o_x - c_1 o_y$$

将上式代入式 (4.46), 则得到:

$$d\theta_4 = \frac{c_1 n_x d\theta_1 + s_1 dn_x + s_1 n_y d\theta_1 - c_1 dn_y}{s_1 o_x - c_1 o_y} \quad (4.47)$$

最终求得四个关节的关节微分值:

$$\left\{ \begin{aligned} d\theta_1 &= \frac{-dp_x s_1 + dp_y c_1}{p_x c_1 + p_y s_1} \\ d\theta_2 &= \frac{c_{23} dp_z + (600s_{23} - 42c_{23})[c_1 da_x - (s_1 a_x + c_1 p_y) d\theta_1 + s_1 dp_y]}{402c_2} \\ d\theta_3 &= \frac{-s_1 a_x d\theta_1 + c_1 da_x + c_1 p_y d\theta_1 + s_1 dp_y}{c_{23}} \\ &\frac{c_{23} dp_z + (600s_{23} - 42c_{23})[c_1 da_x - (s_1 a_x + c_1 p_y) d\theta_1 + s_1 dp_y]}{402c_2} \\ d\theta_4 &= \frac{c_1 n_x d\theta_1 + s_1 dn_x + s_1 n_y d\theta_1 - c_1 dn_y}{s_1 o_x - c_1 o_y} \end{aligned} \right. \quad (4.48)$$

其中, dn_x 、 dn_y 、 da_x 、 da_y 等可从 dT 矩阵中得到, dT 是 \bar{n} 、 \bar{o} 、 \bar{a} 、 \bar{p} 的微分变化。

$$dT = \begin{bmatrix} dn_x & do_x & da_x & dp_x \\ dn_y & do_y & da_y & dp_y \\ dn_z & do_z & da_z & dp_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

由上式 (4.49), 给出机械手爪夹钳中心末端的微分变量, 即可求解相应的各关

节变量对应的微分变化，由 $d\theta_i/dt$ 即可求解各关节的角速度。

4.3.5 仿真分析

(1) 正运动学仿真

所有的仿真计算， θ_4 即手爪的旋转均取 0 值。为验证所建立方程的正确性，首先对上节式 (4.22) 中 θ_1 和 θ_2 取零， θ_3 在 $0 \sim 180^\circ$ 取值，以初步验证运动学方程的正确性。图 4.14 中，由于 θ_1 和 θ_2 取零，所以 x 坐标无变化，为绕肘关节的平面运动，图 4.15 的手爪末端轨迹，对图 4.14 进行了更直观的描述。

θ_1 取 0，加入 θ_2 的变化，在 $0 \sim -180^\circ$ 间取值，对正运动学方程进行仿真。仿真结果见图 4.16，空间轨迹见图 4.17。

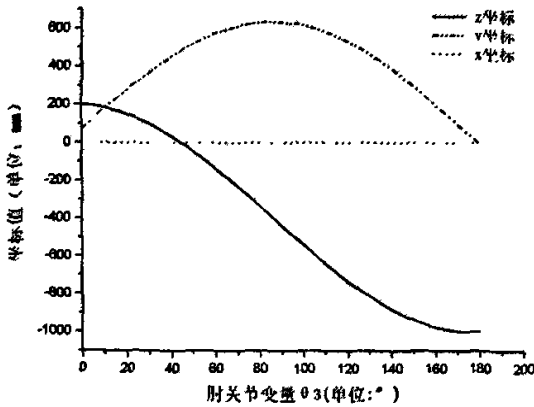


图 4.14 关节变量 θ_3 对应手爪夹钳中心坐标变化

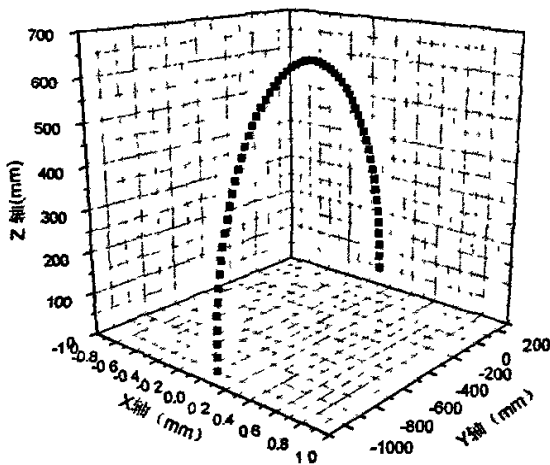


图 4.15 关节变量 θ_3 对应手爪夹钳中心轨迹

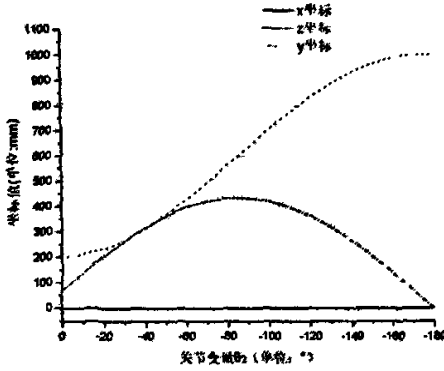


图 4.16 关节变量 θ_2 、 θ_3 对应手爪夹钳中心坐标变化

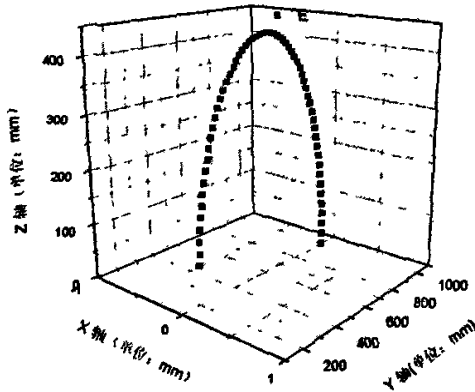


图 4.17 关节变量 θ_2 、 θ_3 对应手爪夹钳中心轨迹

由于 θ_1 取 0，从图 4.16 和图 4.17 可知手爪运动仍为二维平面。

对 θ_2 、 θ_3 采用前面相同的取值， θ_1 在 $0\sim 90^\circ$ 之间取值，进行仿真分析。仿真结果见图 4.18，手爪夹钳中心空间轨迹见图 4.18。

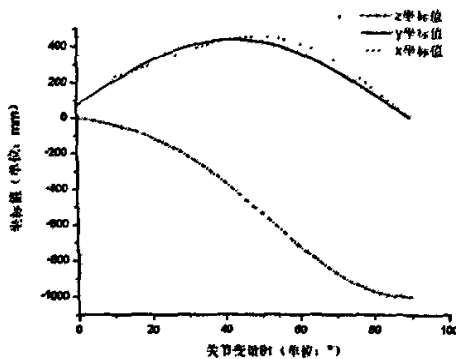


图 4.18 关节变量 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 对应手爪夹钳中心坐标变化

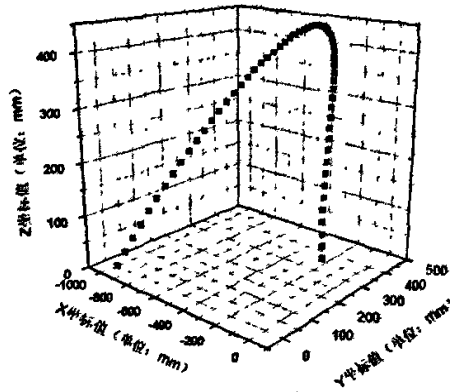


图 4.19 关节变量 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 对应手爪夹钳中心轨迹

仿真结果的图形和特征数据点，验证了理论分析的正确性。在此基础上，即可作为对机械臂控制系统进行编程的指导。

(2)逆运动学仿真

首先选择若干组数据点进行仿真计算，确定各关节变量 θ 的值，数据结果见表 4.3。

表 4.3 逆运动学仿真结果

序号	手爪夹钳中心坐标位置			对应各关节角度 (弧度)		
	P_x	P_y	P_z	θ_1	θ_2	θ_3
1	-76.864	323.453	222.912	0.013	-0.767	0.547
2	-145.528	417.90	243.122	0.019	-1.114	0.835
3	-355.03	586.222	148.081	0.0315	-1.81	1.357
4	219.961	494.04	227.678	-0.0242	1.392	1.044
5	632.721	594.165	219.672	-0.047	2.714	2.036

表 4.4 运动学正解的验证

序号	正解值			逆解值		
	P_x	P_y	P_z	P_x	P_y	P_z
1	-76.802	323.402	223.001	-76.864	323.453	222.912
2	-145.541	417.98	243.01	-145.528	417.90	243.122
3	-355.14	586.273	148.17	-355.03	586.222	148.081
4	220.011	494.253	227.89	219.961	494.04	227.678
5	632.76	594.174	219.732	632.721	594.165	219.672

在表 4.3 和 4.4 中, p_x 、 p_y 、 p_z 的单位为 mm, 对应各关节角度为弧度, 通过两表结果的对比, 误差相对较小, 证明了逆运动学方程的正确性。

4.4 本章小结

本章对机器人的机械手样机进行了详细的设计, 对于机械手的设计采用了模块化的方法进行实施。鉴于 D-H 方法在机器人的运动学建模中已经成为标准方法, 在机械手运动学建模中运用 D-H 方法, 对正、逆运动学方程和速度方程进行了推导, 仿真结果证明了其正确性。

5 总结与展望

排爆机器人是一种极具研究价值和应用前景的军用地面移动机器人,在未来的战场上将扮演越来越重要的角色,本论文对具有排爆和持枪作战功能的小型化排爆机器人进行了总体技术的研究,并对其本体结构的移动平台、武器平台和机械手三个组成部分进行了方案设计和论证,本论文完成的主要工作如下:

1. 通过功能和设计任务的分析,确立了以轻型爆炸物抓取和持枪作战的总体功能构架,初步制定了小型排爆机器人的总体组成和性能指标。

2. 在非结构环境下,移动平台是小型排爆机器人实现复杂地形运动的功能载体,本文采用了后轮驱动的履带式移动机构,并具有可独立控制的前摆,具有较强的地形适应能力。本文对其基本结构参数进行了设计,特别对其越障运动进行了分析。通过对移动平台的运动学分析,建立了移动平台的二维运动学模型。

3. 射击稳定性是机器人实现持枪作战首先要解决的问题,本文提出了可行的武器平台方案,在合理假设的基础上,对武器平台的枪架进行了受力分析,建立了机器人的射击稳定性模型,并定性的分析了提高射击稳定的解决办法;

4. 斜坡是较为典型的地形结构,斜坡稳定性对机器人尤其重要,本文对移动机构搭载武器平台和机械手两种情况,对其不同重量下的静态稳定性进行了分析,并进行了仿真计算;

5. 对机械手样机进行了详细的结构和传动机构进行了设计,并利用 D-H 方法,建立了机械手的正逆运动学方程和速度微分方程,并主要对正逆运动学方程进行了计算仿真,验证了其正确性;

对于本文研究的小型排爆机器人,是一个复杂的机器人系统,在总体设计中,由于能力和精力有限,研究内容还是很初步的,由于作者水平有限,本文所作的研究还有相当的不足之处,在进一步的研究中,许多内容还有待于完善与改进:

1. 移动平台的运动学建模,建立在刚体结构和理想地面的假设条件下,由于履带移动机构的实际运行情况十分复杂,在不同的地面条件下表现为不同的状态,本文主要建立了二维运动学模型,对其运动学模型应该做更深入的研究;

2. 机器人的射击稳定性模型,建立在机器人各部分结构为刚体的假设条件下,并建立在理论的基础上,主要进行了定性的分析,其具体的研究还需要作进一步的深入,在进一步的研究中,可通过建立 Adams 环境下的虚拟样机进行动力学分析,并通过实验获得进一步完整的数据;

3. 机械手样机还有许多需要改进和完善的地方，结构设计上还需进一步的优化，以减轻机械手重量及提高抓取能力。

4. 机器人的控制系统非常复杂，涉及到智能控制、模式识别等软硬件的相关研究，本文的研究内容偏于机构的角度，研究内容还有欠缺。控制系统还须在后续的研究中作大量的工作。

由于本人水平和能力有限，文中难免存在有疏漏和不妥之处，敬请专家和同行给予批评和指正。

致 谢

首先,衷心感谢我的指导老师何勇教授,在两年的研究生阶段学习,以及学位论文撰写的各阶段,何老师严谨的治学态度,朴实、热情、开朗、乐观的性格,对事业孜孜不倦的追求和富于进取的开拓精神,精益求精的工作态度深深地影响着我。在两年研究生阶段的学习中,在学位论文撰写的各阶段,何老师的悉心指导使我受益匪浅。在此向何老师表示衷心的感谢和深深地敬意。

在论文研究过程中,得到了冯虎田老师的指导和帮助,并提出了许多宝贵的修改意见,在此向冯老师表示诚挚的谢意。

对向志军、孙新同学,同事王毅在论文研究过程中提供的无私帮助,在此表示深深的谢意;感谢王永成、蔡晨晓、顾志明博士在生活和学习上对我的帮助;感谢我的室友聂怀云、刘平,以及郑波、吴国林同学等在日常生活带来的欢声笑语,让我的研究生生活添加了更多的色彩。

最后,感谢我的父母家人,正是他们无私的关心和支持,我才能安心地投入学习和工作,顺利完成我的学位论文。

参考文献

- [1]何克忠,郭木河等.智能机器人技术研究机器人技术与应用.1997,54(1):19~21
- [2]蔡鹤皋.机器人将是21世纪技术发展的热点.中国机械工程.2000,11(1-2):58~60
- [3]刘进长,辛建成.机器人世界(第一版).河南科学技术出版社.2000:15~40
- [4]常文森,贺汉根,李晨.军用移动机器人技术发展综述.计算技术与自动化.V.8 No.2 1989:2~7
- [5]莫海军,吴少炜.排爆机器人及相关技术.机器人技术与应用.2005:31~36
- [6]Puttre Michael. Space-age Robots come down to Earth. Mechanical Engineering. January 1995. 88~99
- [7]徐国华,谭民.移动机器人的发展现状及其趋势.机器人技术与应用.2001,(3):7~14
- [8]李科杰.危险作业机器人发展传略研究.机器人技术与应用.2003(5):14~22
- [9]干树国,付宜利.特种机器人的基础科学问题与发展战略思考.中国科学基金.2002(5):269~272
- [10]欧青立,何克忠.室外智能移动机器人的发展及其关键技术研究.机器人.V.22 No.6 2000:519~525
- [11]朱森良,吴春明等.军用智能机器人体系结构.军用机器人.2001(4):20~25
- [12]杨德智,明守远.地面排爆机器人的应用.机器人技术及应用.2004.04
- [13]张海洪,龚振邦等.全方位越障移动机构研究.机器人.V.23 No.4 2001:341~345
- [14]张凯.防爆机器人平台的研制.硕士研究生论文.哈尔滨工业大学.2005.6
- [15]戴炬,熊丽英等.监控式遥控机器人初探.机器人.V.12 No.4 1990:51~54
- [16]龚振邦,陈振华等.机器人机械设计.北京:电子工业出版社.1995
- [17]Kehtarnavaz N, Grisworld N, Lee J. Visual Control for an Autonomous Vehicle(BART)-the Vehicle Following Problem. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1991 40(3):654~662
- [18]杨志国,李东光,刘志峰,崔学军.微小型地面移动机器人控制系统的研究.测试技术学报.V19 No.1 2005:112~114
- [19]乔凤斌,谢霄鹏,杨汝清.基于准极限理论的排爆机器人直流电机选择.上海交通大学学报.V.39 No.6 2005.9:892~895
- [20]张诗军.野外移动机器人总体功能的概念性设计及计算机虚拟仿真.武汉理工大学硕士论文.武汉理工大学.2003.5
- [21]张均享等.高机动性运载车辆动力系统[M].北京:中国科学技术出版社.2000:493~504

- [22]梁世瑞.现代火炮自动机技术[M].北京:兵器工业出版社.1995
- [23]李波,陈慧宝,徐解民等.轮-履带式车辆的力学性能研究.机床与液压. No.5 2005:42~45
- [24]汤久望,刘维平,廖自力,颜南明.电传动履带车辆动力特性研究.车辆与动力技术.2005(97):14~17
- [25] Hyun-Sik Shim Yoon-Gyeong Sung. Stability and four-posture Control for Non-homonymic Mobile Robots. Robotics and Automation, IEEE Transactions Vehicular Technology. 2004.1
- [26]Patrick F. Muir, Charles P. Neuman. Kinematics Modeling of Wheeled Mobile Robots, Journal of Robotic Systems. 1987 4 (2) : 281~340
- [27]费仁元,张慧慧.机器人机械设计和分析.北京:北京工业大学出版社.1998
- [28]王田苗,邹丹,陈殿生.可重构履带机器人的机构设计与控制方法实现.北京航空航天大学学报. V.31 No.7 2005:705~708
- [29]Zhang Liang, Zhao Jie, Cai Hegao. Research on mechanism design and motion planning of a modular-self reconfigurable robot. In Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation[C]. Hangzhou, 2004. 4821~4825
- [30]钱炜,付东翔,李晓燕等.越障机器人的设计与研究.上海理工大学学报. V.24 No.3 2002:264~267
- [31]王德新.自主式微小型越障机器人研究和设计.中国科学技术大学硕士学位论文.中国科技大学.2005.5
- [32]王宏,艾海舟,何克忠.移动机器人体系结构与系统设计.机器人. V.15 No.1 1993:42~47
- [33]信建国,小凡,王忠等.履带腿式非结构环境移动机器人特性分析.机器人. V.26 No.1 2004:26~39
- [34]Nancy G C, Xu Y S. Dynamic model of a gyroscopic wheel[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. 1998:2683~2688
- [35]张友军.自主式移动机器人系统的体系机构.机器人. V.19 No.5 1997:378~383
- [36]信建国.基于复合机构的非结构环境移动机器人机构研究.中国科学院沈阳自动化研究所硕士研究论文.中国科学院沈阳自动化研究所.2004.6:
- [37]师翼,姚养无.枪机自由后坐式武器动力分析.机械管理开发. V.83 No.2 2005:35~38
- [38]郑津生,程贤进,祁志民.多维运动平台对武器发射精度的影响与修正.火力与指挥控制. V.28 2003 29~32
- [39]姚建军,徐诚.机枪系统发射动力学研究.兵工学报. V.23 No.3 2002:406~408
- [40]吴小清.机枪动态特性数值模拟与仿真技术研究.[博士后研究工作报告].南京:南京理工大学.1999
- [41]王瑞林.连发武器射频与固有频率匹配关系研究.兵工学报. V.21 No.2 2000:105~107

- [42]申正宾. 自动武器架座设计[M]. 北京:国防工业出版社. 1988
- [43]王瑞林, 罗学深. 机枪枪架稳定性计算统一公式及其应用[J]. 军械工程学院学报. 1996(4): 23~27
- [44]王永娟, 赫雷, 曾伟胜, 徐 诚. 自动武器动力学分析方法及应用. 南京理工大学学报. V. 26 No. 3 2002: 235~238
- [45]刘敏杰, 李从心, 李志刚. 车载武器发射底架的结构特性分析. 机械科学与技术. V. 19 No. 1 2000: 81~83
- [46]王瑞林, 陈运生, 郝建伟. 机枪相对稳定性理论及模型研究. 南京理工大学学报. V. 28 No. 5 2004: 472~476
- [47]王宝元, 李魁武. 自动武器机构动力学. 北京:国防工业出版社. 2002
- [48]吴广玉, 姜复兴. 机器人工程导论. 哈尔滨工业大学出版社, 1998
- [49]李洪波, 冗余七自由度串并联拟人手臂的设计研究, 河北工业大学硕士论文, 河北工业大学, 2003. 3
- [50]明守远, 杨德智. 地面反恐防爆机器人的机械运动探讨. 机器人技术与应用. 2004
- [51]李伟招. 基于多传感器信息的移动机器人障碍探测系统的研究. 硕士学位论文. 哈尔滨工业大学. 2002. 7
- [52]崔学军, 张建民, 李东光, 李科杰. 小型双节地面移动机器人运载子系统设计. 机器人技术与应用. 2004. 2: 42~46
- [53]王月梅, 周义清, 常列珍. 履带车辆的一种动力学建模. 华东工学院学报. V. 26 No. 3 2005: 164~166
- [54]王德新, 王付锐, 董二宝等. 自主越障机器人在非结构化环境下的越障控制研究. 制造业自动化. V. 27 No. 7 2005: 35~38
- [55]何友, 王国宏, 陆大瑜, 彭应宁. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2000
- [56]王志文, 郭戈. 移动机器人导航技术现状与展望[J]. 机器人. V. 5 No. 5 2003: 470~474
- [57]徐正飞, 陆际联, 杨汝清等. 关节式移动机器人越障动态稳定性分析与控制. 北京理工大学学报. V. 25 No. 4 2005: 311~316
- [58]Martens D, Newman S. Stabilization of a mobile robot climbing stairs [Z]. IEEE International Conference on Robotics, SanDiego, 1994
- [59]陈 刚, 程荫杭, 赵广涛, 闫晓霞. 自主移动机器人实验平台的设计与实现. 实验室研究与探讨. 2005(24): 309~312
- [60]李磊. 自主轮式移动机器人 CASIA2I 的整体设计[J]. 高技术通讯. 2003(11): 51~55
- [61]贾建强, 陈卫东, 席裕庚. 开放式自主移动机器人系统设计与控制实现. 上海交通大学学报. V. 39 No. 6 2005: 905~909
- [62]段清娟, 王润孝, 冯华山. 自主移动机器人系统的新研究方法. 计算机工程与应用. 2005(32): 65~68

- [63]李婷, 陈慧宝, 徐解民. 关节式履带移动机器人的爬梯运动研究. 机械制造, V. 43 No. 495 2005: 10~14
- [64]Saeed B. Niku. 机器人学导论——分析、系统与应用. 北京: 电子工业出版社. 2004
- [65]张海洪, 龚振邦, 谈士力等. 具有越障功能的全方位移动机构的研究. 高技术通讯, 2001: 95~97
- [66]吴振彪, 熊有伦. 工业机器人. 武汉: 华中科技大学出版社. 1997. 3
- [67]单以才. 机器人机械操作臂的模块化设计及其控制的研究. 扬州大学硕士生研究论文. 扬州大学. 2003. 3

作者: [刘铁军](#)
学位授予单位: [南京理工大学](#)

参考文献(67条)

1. [何克忠, 郭木河](#) [智能机器人技术研究](#) 1997(01)
2. [蔡鹤皋](#) [机器人将是21世纪技术发展的热点](#)[期刊论文]-[中国机械工程](#) 2000(1)
3. [刘进长, 辛建成](#) [机器人世界](#) 2000
4. [常文森, 贺汉根, 李晨](#) [军用移动机器人技术发展综述](#) 1989(02)
5. [莫海军, 吴少炜](#) [排爆机器人及相关技术](#)[期刊论文]-[机器人技术与应用](#) 2005(4)
6. [Puttre Michael](#) [Space-age Robots come down to Earth](#) 1995(01)
7. [徐国华, 谭民](#) [移动机器人的发展现状及趋势](#)[期刊论文]-[机器人技术与应用](#) 2001(3)
8. [李科杰](#) [危险作业机器人发展战略研究](#)[期刊论文]-[机器人技术与应用](#) 2003(5)
9. [王树国, 付宜利](#) [特种机器人的基础科学问题和发展战略思考](#)[期刊论文]-[中国科学基金](#) 2002(5)
10. [欧青立, 何克忠](#) [室外智能移动机器人的发展及其关键技术研究](#)[期刊论文]-[机器人](#) 2000(6)
11. [朱森良, 吴春明](#) [军用智能机器人体系结构](#) 2001(04)
12. [杨德智, 明守远](#) [地面排爆机器人的应用](#)[期刊论文]-[机器人技术与应用](#) 2004(4)
13. [张海洪, 龚振邦, 谈士力](#) [全方位越障移动机构研究](#)[期刊论文]-[机器人](#) 2001(4)
14. [张凯](#) [防爆机器人系统平台的研制](#)[学位论文]硕士 2005
15. [戴炬, 熊丽英](#) [监控式遥控机器人初探](#) 1990(04)
16. [龚振邦, 陈振华](#) [机器人机械设计](#) 1995
17. [Kehtarnavaz N, Grisworld N, Lee J](#) [Visual Control for an Autonomous Vehicle\(BART\)-the Vehicle Following Problem](#) 1991(03)
18. [杨志国, 李东光, 刘志峰, 崔学军](#) [微小型军用地面机器人运载控制系统的研究](#)[期刊论文]-[测试技术学报](#) 2005(1)
19. [乔凤斌, 谢霄鹏, 杨汝清](#) [基于准极限理论的排爆机器人直流电动机选择](#)[期刊论文]-[上海交通大学学报](#) 2005(6)
20. [张诗军](#) [野外移动机器人总体功能的概念性设计及计算机虚拟仿真](#)[学位论文]硕士 2003
21. [张均享](#) [高机动性运载车辆动力系统](#) 2000
22. [梁世瑞](#) [现代火炮自动机技术](#) 1995
23. [李波, 陈慧宝, 徐解民, 孙涛](#) [轮-履带式移动车辆的力学性能研究](#)[期刊论文]-[机床与液压](#) 2005(5)
24. [汤久望, 刘维平, 廖自力, 颜南明](#) [电传动履带车辆动力特性研究](#)[期刊论文]-[车辆与动力技术](#) 2005(1)
25. [Hyun-Sik Shim, Yoon-Gyeong Sung](#) [Stability and four-posture Control for Non-homonymic Mobile Robots](#) 2004(01)
26. [Parick F Muir, Charies P Neuman](#) [Kinematics Modeling of wheeled Mobile Robots](#) 1987(02)
27. [费仁元, 张慧慧](#) [机器人机械设计和分析](#) 1998
28. [王田苗, 邹丹, 陈殿生](#) [可重构履带机器人的机构设计与控制方法实现](#)[期刊论文]-[北京航空航天大学学报](#) 2005(7)
29. [Zhang Liang, Zhao Jie, Cai Hegao](#) [Research on mechanism design and motion planning of a modular-self reconfigurable robot](#)[会议论文] 2004
30. [钱炜, 付东翔, 李晓燕, 李海渊](#) [越障机器人的设计与研究](#)[期刊论文]-[上海理工大学学报](#) 2002(3)

31. [王德新](#) [自主式微小型越障机器人研究和设计](#)[学位论文]硕士 2005
32. [王宏](#). [艾海舟](#). [何克忠](#) [移动机器人体系结构与系统设计](#) 1993(01)
33. [信建国](#). [李小凡](#). [王忠](#). [姚辰](#). [原培章](#) [履带腿式非结构环境移动机器人特性分析](#)[期刊论文]-[机器人](#) 2004(1)
34. [Nancy G C](#). [Xu Y S](#) [Dynamic model of a gyroscopic wheel](#) 1998
35. [张友军](#) [自主式移动机器人系统的体系机构](#) 1997(05)
36. [信建国](#) [基于复合机构的非结构环境移动机器人机构研究](#)[学位论文]硕士 2004
37. [师翼](#). [姚养无](#) [枪机自由后坐式武器动力分析](#)[期刊论文]-[机械管理开发](#) 2005(2)
38. [郑津生](#). [程贤进](#). [祁志民](#) [多维运动平台对武器发射精度的影响及修正](#)[期刊论文]-[火力与指挥控制](#) 2003(z1)
39. [姚建军](#). [徐诚](#) [机枪系统发射动力学研究](#)[期刊论文]-[兵工学报](#) 2002(3)
40. [吴小清](#) [机枪动态特性数值模拟与仿真技术研究](#) 1999
41. [王瑞林](#). [李永建](#). [张国光](#) [连发武器射频与固有频率匹配关系研究](#)[期刊论文]-[兵工学报](#) 2000(2)
42. [申正宾](#) [自动武器架座设计](#) 1988
43. [王瑞林](#). [罗学深](#) [机枪枪架稳定性计算统一公式及其应用](#) 1996(04)
44. [王永娟](#). [赫雷](#). [曾伟胜](#). [徐诚](#) [自动武器动力学分析方法及应用](#)[期刊论文]-[南京理工大学学报](#) 2002(3)
45. [刘敏杰](#). [李从心](#). [李志刚](#) [车载武器发射底架的结构特性分析](#)[期刊论文]-[机械科学与技术](#) 2000(1)
46. [王瑞林](#). [陈运生](#). [郝跃伟](#) [机枪相对稳定性理论及模型研究](#)[期刊论文]-[南京理工大学学报\(自然科学版\)](#) 2004(5)
47. [王宝元](#). [李魁武](#) [自动武器机构动力学](#) 2002
48. [吴广玉](#). [姜复兴](#) [机器人工程导论](#) 1998
49. [李洪波](#) [冗余七自由度串并联拟人手臂的设计研究](#)[学位论文]硕士 2003
50. [明守远](#). [杨德智](#) [地面反恐排爆机器人的机械运动探讨](#)[期刊论文]-[机器人技术与应用](#) 2004(3)
51. [李伟招](#) [基于多传感器信息的移动机器人障碍探测系统的研究](#)[学位论文]硕士 2002
52. [崔学军](#). [张建民](#). [李东光](#). [李科杰](#) [小型双节地面移动机器人运载子系统设计](#)[期刊论文]-[机器人技术与应用](#) 2004(2)
53. [王月梅](#). [周义清](#). [常列珍](#) [履带车辆的一种动力学建模](#) 2005(03)
54. [王德新](#). [王付锐](#). [董二宝](#). [宋轶群](#). [杜华生](#). [杨杰](#) [自主越障机器人在非结构化环境下的越障控制研究](#)[期刊论文]-[制造业自动化](#) 2005(7)
55. [何友](#). [王国宏](#). [陆大焱](#). [彭应宁](#) [多传感器信息融合及应用](#) 2000
56. [王志文](#). [郭戈](#) [移动机器人导航技术现状与展望](#)[期刊论文]-[机器人](#) 2003(5)
57. [徐正飞](#). [陆际联](#). [杨汝清](#). [熊光明](#). [杨华](#) [关节式移动机器人越障动态稳定性分析与控制](#)[期刊论文]-[北京理工大学学报](#) 2005(4)
58. [Martens D](#). [Newman S](#) [Stabilization of a mobile robot climbing stairs](#) 1994
59. [陈刚](#). [程荫杭](#). [赵广涛](#). [闰晓霞](#) [自主移动机器人实验平台的设计与实现](#) 2005
60. [李磊](#). [陈细军](#). [侯增广](#). [谭民](#) [自主轮式移动机器人CASIA-I的整体设计](#)[期刊论文]-[高技术通讯](#) 2003(11)
61. [贾建强](#). [陈卫东](#). [席裕庚](#) [开放式自主移动机器人系统设计与控制实现](#)[期刊论文]-[上海交通大学学报](#) 2005(6)
62. [段清娟](#). [王润孝](#). [冯华山](#). [王立刚](#) [自主移动机器人系统的新研究方法:AIS](#)[期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2005(32)
63. [李婷](#). [陈慧宝](#). [徐解民](#) [关节式履带移动机器人的爬梯运动研究](#)[期刊论文]-[机械制造](#) 2005(11)

64. [Saeed B Niku](#) [机器人学导论—分析、系统与应用](#) 2004
65. [张海洪](#), [龚振邦](#), [谈士力](#), [冯星华](#) [具有越障功能的全方位移动机构研究](#)[期刊论文]-[高技术通讯](#) 2001(2)
66. [吴振彪](#), [熊有伦](#) [工业机器人](#) 1997
67. [单以才](#) [机器人机械操作臂的模块化设计及其控制的研究](#)[学位论文]硕士 2003

相似文献(2条)

1. 学位论文 [马传艺](#) [排爆机器人的运动分析与结构设计](#) 2008

机器人在人类的活动中担当起越来越多的工作和越来越重要的角色。经过近一个世纪的发展,目前机器人已经具备了一定的智能化,作业领域从传统的工业延伸到了所有的行业。现代机器人能精确重复地执行各种各样的任务,并且作业时对安全措施和工作条件的要求非常低,具备一定的学习能力,应对变化多端的任务。

由于近年来国际环境的局部动荡不安和恐怖主义的出现,排爆机器人得到了迅速的发展。排爆机器人属于地面移动机器人的范畴,是特种机器人的一种,主要由小型移动平台和多功能的灵活机械手臂组成,也可以根据作业特点配备其它设备。排爆机器人虽然发展历程短,但目前的产品都已具备一定的智能化和较强的作业能力,并且已经大量应用于军事领域。

通过查阅国内外的文献和出售的产品可知,目前国内外研究和使用的排爆机器人都应用于军事用途,结构复杂,成本较高,主要服役于非结构化环境的地形。故本文只对服役于民用领域的排爆机器人特点进行分析,研究和设计出结构紧凑简单,高精度的灵活机器人样机。

本文根据设计对象的民用特点,首先查阅现代居民住宅和建筑的设计规范,分析其结构特点,研究使用于其上的移动平台应具备的性能;同时根据排爆机器人的典型作业状态对机械手臂进行分析,研究可疑爆炸物的结构,得出作业对机械手臂的要求,制定设计指标。然后根据设计性能指标,参考人类手臂结构,确定手臂的构型,运用D-H方法对机械手臂进行正、逆运动学方程推导,为控制系统提供必须的参数。在得到总体设计要求和手臂构型的前提下,对机械手臂和移动平台进行详细的结构和受力研究,设计和装配出性能良好,满足性能指标的机械手臂和移动车体。

最后利用先进的虚拟样机技术软件建立机械手臂样机模型,并进行相关仿真和验证,为控制系统提供调试样机。

2. 学位论文 [刘琦](#) [排爆机器人无线数据通信与监控平台的研究](#) 2008

反恐排爆机器人系统主要用于代替人工,直接在案发现场进行侦察,排除和处理爆炸物以及其它危险品,也可以对一些持枪的恐怖分子及犯罪分子实施有效攻击,是反恐专业队伍中必不可少的重要装备,同时也广泛应用于救援以及作战平台领域。

本文针对上海市科委重点项目《反恐排爆机器人系统研究》,采用上下位机控制结构实现大型爆炸物处理功能,并着重研制了面向灵活移动载体和大型排爆机械手的上位机无线数据通信与监控平台系统。通过本系统,操作者不但可以向远程的机器人平台发送各种相应的机器人的运动控制指令来实现机器人的运动控制,而且它还还为操作者提供反恐机器人系统的最新的状态数据和机器人工作现场的实时视频和音频信息,从而实现操作者和机器人之间的交互。

本文主要内容如下:

首先,在分析论述了反恐机器人系统国内外的发展现状及趋势的基础上,对平台控制系统进行了总体设计。并按照功能要求将系统按模块进行划分,使开放式系统模块化设计思想贯彻于系统的设计总过程。

其次,设计了上位机无线数据通信和监控平台系统硬件,实现了操作按钮、操纵杆信息采集、现场信息显示、报警信息处理等若干硬件模块,然后对每一个模块进行详细的设计,并设计了无线视频与音频监视平台的硬件结构。

最后,设计了上位机无线数据通信和监控平台的软件结构,在底层软件部分,定制了基于LPC2131ARM微控制器的 μ C/OS-II操作系统,实现了此系统在微处理器上的移植。在上层软件部分,针对系统的硬件结构对平台系统的各功能模块进行软件设计,实现了系统功能要求。还提出了一种基于Golay码的通信系统纠错编码算法,保证了系统通信的可靠性和实时性。

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1000259.aspx

授权使用:常熟理工学院(wfcs1g),授权号:034cacb0-ca72-467b-8250-9e5000d25ebc

下载时间:2010年12月18日