

国家“863”计划重大项目

隧道凿岩机器人

TUNNEL ROCK-DRILLING ROBOT

何清华 著



中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

隧道凿岩机器人/何清华著. —长沙:中南大学出版社,2005. 1

ISBN 7-81105-020-X

隧 何 机器人 - 应用 - 隧道工程
- 凿岩 .U455 6 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 141232 号

隧 道 凿 岩 机 器 人

何清华 著

责任编辑 谭 平

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

印 装 湖南大学印刷厂

开 本 880×1230 1/32 印张 10.5 字数 260 千字

版 次 2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-81105-020-X/TP·003

定 价 28.00 元

图书出现印装问题,请与出版社调换

内 容 简 介

本书以国家“863”计划重大项目——隧道凿岩机器人为技术原型，研究了隧道凿岩机器人的基本构成、基本工作原理及主要技术参数；建立了机械臂的运动学方程；研究了激光定位等车体定位方法；针对多关节多冗余度强耦合机械臂，首次提出了试凑基础上的解析法、线性近似解耦基础上的迭代法、试探性爬山法等运动学求逆方法；研究了多机械臂空间干涉的判别方法，首次使用乘同余方法产生伪随机数，进行机械臂工作空间的求解；针对同构多个机械手工作进度可能不均衡，为充分利用钻臂资源，创新性地提出了两种孔序任务规划方法：引入分界孔和平衡孔的“质点删减法”及遗传算法。本书进行了双三角平行联动机构各油缸的负载分析与运动速度比例策划研究，运用 GPC 自适应控制方法进行定位过程控制研究，进行了凿岩过程的计算机控制研究。

本书在机器人应用技术基础上，着重于隧道凿岩机器人课题中的攻关性理论研究，可供机械电子工程、特种机器人、机械设计理论、液压传动与控制等学科的科研人员、工程技术人员、大学教师和研究生参考。

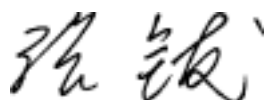
序

机器人技术自 20 世纪 50 年代开始，经过半个世纪的发展至今，从国际范围看，工业机器人技术已趋成熟，并已在各个行业，尤其是制造业上得到广泛的应用。从国内看，经过二十多年的艰苦努力，我国工业机器人无论在设计还是制造技术上都取得了较大的发展，一个令人鼓舞的现象是，国产机器人的身影开始出现在我国制造业的生产线上，这是一个不小的进步。但问题依然存在，这就是目前国产工业机器人在性能价格比、可靠性等方面与国际水平仍有很大差距，因此我国机器人产品仍然缺乏市场竞争力。20 世纪七八十年代，国际上在制造业中大量使用工业机器人的同时，机器人技术开始向非制造业领域发展。由于制造业的环境一般是静止、不变的，即所谓结构化（Structured）环境，因此工业机器人通常只要求完成简单、重复的工作，并无智能化的要求。非制造业的情况不同，它的工作环境复杂、多变，即非结构化（Non-structured），如水下、建筑、医疗、空间、服务、采掘、娱乐等等。在这种环境下工作的机器人，通常叫特种机器人、先进机器人（Advanced Robots）或智能机器人。由于工作环境不同，这种机器人外形千姿百态、功能多种多样。为了适应环境的变化，通常需要有一定程度的智能化，比如，需要传感器、需要对环境变化做出响应、需要多台机器人协同工作、需要作业规划等等。

由于特种机器人的多样性，工业发达国家的研发历史也不很长，从而至今仍留下许多发展的空间，这就为发展中国家提供了良好的发展机遇。我国通过“863”高技术研究发展计划，要在

水下机器人、医疗机器人等特种机器人的一些领域，用比较短的时间赶上和达到国际先进水平，正好表明在特种机器人技术的研发中我国可以有所作为。隧道凿岩机器人也是在这个背景下发展起来的，在何清华教授领导下，在较短时间里成功地研发出国内第一台计算机控制的隧道凿岩机器人样机，性能达到国际先进水平。这些经验值得总结。

《隧道凿岩机器人》这本书是何清华教授编写的，它综合和总结了作者十多年来的研究成果。书的内容不仅涉及机器人领域的共性问题，如机器人运动学、工作空间、计算机控制等；同时涉及特种机器人的个性问题，如任务动态规划、干涉判别、定位控制技术。由于作者具有丰富的设计与工程实践的经验，该书的主要特点是，不仅有原理的叙述，而且深入到技术与工程实践的细节，具有很大的实用参考价值。它是特种机器人领域中一本颇具学术价值和实用价值的专著，可供机械电子工程、特种机器人、机械设计理论、液压传动与控制等学科的科研人员、工程技术人员、大学教师和研究生参考。



2004年10月18日

(序作者为中国科学院院士、清华大学计算机系博士生导师张钹教授)

前 言

自 20 世纪 80 年代以来，机器人技术作为 20 世纪人类最伟大的发明之一，在信息技术、控制技术等其他学科迅速发展的支持下，其应用领域已远远超出制造业，已被广泛应用于非制造领域。随着人们对特种机器人技术智能化本质认识的加深，特种机器人技术开始源源不断地向人类活动的各个领域渗透，尤其是在替代人从事劳动条件艰苦、对人危害大的工作方面的发展比较迅速。

隧道施工是一项潮湿、多粉尘、振动与噪声污染严重、劳动强度大的工作。从在北京举行的 2002 年国际隧道研讨会获悉，我国修建的铁路隧道数量和长度已位于世界首位，近两年则以每年 200 公里左右的速度增长，其发展趋势是隧道数量相对在减少，而单个隧道的长度有所增加。我国公路隧道有了长足发展，也有同铁路隧道一样的发展趋势。目前，在隧道施工方面，我国已拥有了世界上所有的先进设备，并掌握了其施工操作方法和技术。隧道施工中，钻爆法施工一直占据着主导地位，它的特点是能适应地质条件的变化和不同的隧洞断面大小及形状。因此，至今世界上 70% 左右的隧洞仍采用钻爆法。钻爆法不仅更适合于我国的国情，而且特长隧道的钻爆法施工前景越来越广阔。钻爆法正向着全断面、大断面掘进迅速发展，从而使钻爆法施工机械也向着大型化、高效率方向发展。

自 20 世纪 70 年代末以来，液压凿岩机与液压台车形成了高效节能、劳动条件好的液压凿岩设备，在世界发达国家岩矿采掘作业中率先取代手持式气动钻孔机具。液压凿岩台车作为大型工

程施工设备，广泛应用于国家重大建设项目，为矿山、水电、交通等各种重大工程服务，在国民经济建设中的作用日益明显。凿岩机器人是自动化技术与机器人技术在凿岩台车上的应用，具有高精度、少“超欠挖”、高经济性、高效率、低污染、低劳动强度等优点。70年代末，许多国家开始了凿岩机器人的研究，目前瑞典、芬兰、法国、美国、日本、挪威等近20个国家的厂商已开发了高性能的凿岩机器人。而凿岩机器人的控制系统相对来说要复杂得多，因此，1998年以前，世界各国大多采用挪威Bever公司与挪威大学合作开发的Bever系统。1998年以后，世界最大的凿岩台车生产厂家瑞典的Atlas Copco公司和芬兰的Tamrock公司才推出了各自的控制系统。

国内，1986年原中南工业大学开始从事再现式凿岩机器人的实验室研究工作。在国家“863”计划的资助下，1998~2000年，中南大学仅用两年半的时间就出色地完成了基础研究、工程设计和样机试制三项难度和工作量都相当大的研发工作，成功开发出了国内第一台计算机控制凿岩台车样机，达到了国际先进水平。本书以该样机的研制工作为基础，在运动学求逆、孔序动态规划、自适应控制等方面进行了更深入的研究。

本书的特色与主要创新有：

本书研究的隧道凿岩机器人本体为国内首创，与国外产品相比具有其独特性——采用宽度可调的门架，司机室可升降，既解决了运输不超宽超高的问题，又做到了转场时不需大的解体拆装工作；采用直接定位式可伸缩的钻臂结构，尽管存在控制上的难点，但提高了工作稳定性与可靠性；关键部件推进器翻转装置采用了自行设计的螺旋液压缸，提高了安装的方便性；提出了一种分配式电液比例控制技术，在提高系统可靠性的同时，大幅度降低了制造成本；在控制系统设计上，采用上、下位机的结构，通过RS232进行通讯，减轻了控制器的负担，提高了控制的实时

性；开发了一套全方位集成控制手柄，很好地满足了钻臂定位要求。

建立了机械臂的运动学方程，深入研究了车体定位方法。针对具有六个转动关节、三个移动关节的多冗余度强耦合机械臂，进行了运动学求解研究，这是当前该机器人领域的一个难题。本书首次提出了试探性爬山法的求解方法，并在该隧道凿岩机器人机械臂运动学求逆中得到应用，针对本身固有的结构特点应用试凑基础上的解析法、线性近似解耦基础上的迭代法等方法进行运动学求逆的研究。

在理论上探讨了伪随机数的产生方法，首次提出使用乘同余方法产生伪随机数，能较好地解决伪随机数的周期性和独立性问题，并应用到采用数值法求解凿岩机器人工作空间的过程中。

针对两个或多个机械臂在同一工作空间完成离散的工作任务时各机械臂工作进度可能不一致，为充分利用钻臂资源，避免机械臂的干涉，保证各臂完成各自最后任务的时间基本同步，研究了如何给各钻臂分配任务、如何安排各臂工作任务的先后顺序以及工作过程中如何动态调整工作任务等问题，这些是本书研究的难点。本书创新性地提出的方法有：纳入分界孔和平衡孔概念，应用“质点删减法”进行孔序任务静态与动态规划；基于遗传算法的孔序任务动态规划，首次以各关节运动变化的加权总量作为目标优化函数，设计了遗传算法的适应度函数，首次采用遗传算法优化规划了凿岩机械臂的钻孔孔序，对于解决多机器人多任务动态分配问题具有重要的理论意义。

隧道凿岩机器人钻臂定位过程的计算机控制技术是本书的关键技术之一。一个钻臂重 2 吨多，伸出长达 10 多米，为使钎杆在定位过程中保持平移运动，并走直线路径，使运动路程最短，双三角平行联动机构各油缸的负载分析与运动速度比例策划是关键。本书进行了双三角钻臂对称并联五边形液压空间平行联动机

构的机理建模与参数估计的研究，实现控制算法的解耦。根据双三角钻臂变幅机构非线性和时变的特点，采用自适应控制策略进行钻臂直接定位运动速度控制。这样易于在线估计和实现自适应控制，因而能有效补偿非平稳随机扰动引起的静差。

凿岩过程的计算机控制技术在国内都是一个难题。Atlas最近推出的 RCS 控制系统具有钻孔过程检测功能 MWD (Measure While Drilling)。MWD 钻孔控制功能包括钻进过程自适应控制、自动防卡钎等功能，但还不能取代传统的钻孔勘探，且数据分析还只能凭专家的经验。本书从岩石破碎原理入手，研究凿岩过程的计算机控制，实现了凿岩过程的自动控制功能，对凿岩控制中的难点——防卡钎处理进行了深入研究，以软件方法解决防卡钎处理难题，而且又降低了凿岩控制的成本。

隧道凿岩机器人计算机控制系统的实施也是本书的关键技术之一。多年来世界各国大都是采用挪威 Bever 公司与挪威大学合作开发的 Bever 系统，由此可知控制系统开发的难度。作者在国内没有相关资料的情况下，自主开发了 SUNWARD 隧道凿岩机器人控制系统。其操作界面采用中文系统，更好地适合了本土化的要求。

编写本书的初衷是及时反映隧道凿岩设备智能化技术研究的一些最新成果和动向，以期对工程机械智能化与特种机器人的研究有所促进。但是，由于隧道凿岩机器人是一个机电液集成的复杂系统，而且凿岩过程控制具有极大的复杂性，本著作中，有些问题还有待继续深入研究和探讨，加之作者水平有限，书中定有不妥之处，敬请专家和读者赐教指正。

本书的研究工作主要得到国家“863”计划智能机器人主题重大项目(863 - 512 - 9806 - 01)和引导资金项目(2002AA001019)的支持以及科技部中小企业技术创新基金(01C26224300194)的资助。谨向国家“863”计划先进制造与

自动化技术领域委员会、科技部中小企业技术创新基金管理中心表示衷心的感谢。作者指导的博士研究生谢习华、周友行、李力争、郭勇等为本书的撰写做了大量工作，周宏兵、曾桂英、吴凡、贺湘宇、方向等在硕士研究生期间为本课题做了许多前期研究工作，周宏兵讲师校对了部分章节，谢习华讲师校对了全书书稿，在此一并表示感谢。本书还得到了清华大学张钹院士、贾培发教授，北京科技大学高澜庆教授的热情帮助，在此表示衷心感谢。

作者

2004年9月18日

目 录

第 1 章	绪 论	(1)
1.1	我国开展隧道凿岩机器人研究的必要性	(2)
1.2	隧道凿岩机器人的国内外发展现状	(7)
1.3	隧道凿岩机器人概述	(12)
1.4	隧道凿岩机器人的研制	(18)
第 2 章	二臂隧道凿岩机器人的基本结构与性能 ...	(21)
2.1	简 介	(21)
2.2	整机基本结构	(22)
2.3	系统基本功能	(24)
2.4	液压系统	(26)
2.5	电气控制系统	(33)
2.6	计算机控制系统基本构成	(35)
2.7	整机性能参数	(39)
第 3 章	隧道凿岩机器人机械臂运动学研究	(43)
3.1	机械臂——钻臂的定位机构	(43)
3.2	钻臂正向运动学方程的建立	(48)
3.3	隧道凿岩机器人的车体定位方法	(58)
3.4	隧道凿岩机器人逆运动学研究	(66)

第 4 章	隧道凿岩机器人的工作空间	(108)
4.1	隧道凿岩机器人钻臂工作空间的描述	(109)
4.2	计算钻臂工作空间的数值法	(110)
4.3	数值解法求钻臂的工作空间的仿真结果	(114)
4.4	基于结构的隧道凿岩机器人钻臂工作空间	(121)
第 5 章	隧道凿岩机器人的干涉判别	(128)
5.1	杆件的简化模型	(129)
5.2	干涉判别算法思路	(132)
5.3	直线段间的位置关系	(133)
5.4	两直线段间的最短距离	(140)
5.5	平面干涉判别	(143)
5.6	环境干涉判别	(145)
5.7	算法仿真分析	(149)
5.8	有关干涉检测算法的几点说明	(150)
第 6 章	隧道凿岩机器人孔序任务动态规划	(151)
6.1	任务规划的基本概念	(154)
6.2	隧道凿岩机器人钻臂孔序任务规划	(165)
第 7 章	隧道凿岩机器人钻臂定位控制技术	(217)
7.1	钻臂结构组成及几何分析	(217)
7.2	支臂缸运动速度的策划	(225)
7.3	双三角钻臂平行联动机构的机理建模与参数估计	(233)
7.4	钻臂平行联动机构定位过程自适应控制策略.....	(250)
7.5	凿岩机器人钻臂定位控制过程	(263)

第 8 章	隧道凿岩机器人凿岩过程的计算机控制	(265)
8.1	概 述	(265)
8.2	凿岩过程的计算机控制	(272)
第 9 章	SUNWARD 隧道凿岩机器人控制系统 ...	(284)
9.1	隧道凿岩机器人工作原理	(284)
9.2	计算机控制系统基本硬件构成	(288)
9.3	控制过程的软件实现	(290)
9.4	SUNWARD 隧道凿岩机器人控制系统软件 ...	(292)
参考文献	(308)

第 1 章 绪 论

机器人是一种自动化的机器，这种机器具备一些与人或生物相似的能力，如感知、规划、动作能力的协同等。机器人技术作为 20 世纪人类最伟大的发明之一，自 20 世纪 60 年代初问世以来，经历 40 年的发展已取得了长足的进步。机器人作为生产自动化的典型代表，在制造业获得了巨大的成功。进入 20 世纪 80 年代，机器人技术在信息技术、控制技术等其他学科迅速发展的支持下，其应用领域已远远超出制造业，还被广泛应用于非制造领域。在非制造领域应用机器人技术已成为当今国际自动化技术发展的重要方向。目前国际上非制造领域的机器人技术（也称为特种机器人技术）的研究和开发非常活跃。在研究和开发位置不确定环境下作业的特种机器人的过程中，人们逐步认识到特种机器人技术的本质是感知、决策、行动、交互四大技术的结合。随着人们对特种机器人技术智能化本质认识的加深，特种机器人技术开始源源不断地向人类活动的各个领域渗透。

特种机器人技术综合了多学科的发展成果，代表了高技术的前沿发展方向。它在人类生活应用领域的不断扩大，引起了国际上对机器人技术的作用和影响的重新认识。正因为如此，研究和开发特种机器人技术一直受到世界各国的重视，许多国家都把特种机器人技术列入本国的高技术发展计划或国家的关键技术进行研究和开发。如美国的“国家关键技术”、“商业部新兴技术”和“国防部和能源部关键技术”计划，欧共体的“尤里卡计划(EUREKA)”和“信息技术研究发展战略计划(ESPAIT)”，新加坡、韩

国、巴西等发展中国家也都有相应的研发计划。

特种机器人技术也是我国开发利用空间、地下和海洋资源的核心技术之一，1986年中共中央24号文件明确地把特种机器人技术的攻关作为国家高技术发展计划自动化领域的主要内容之一，提出了开发在恶劣环境下工作的特种机器人产品。十多年来，这一领域取得了令国外专家惊奇、令世人瞩目的累累硕果，把我国特种机器人技术的研究、开发、应用推上了一个新的台阶。

特别需要指出，在非制造领域中应用的特种机器人，通常是在非结构化环境下工作。所谓非结构化环境，是指作业过程中环境可能产生变化。与结构化环境下作业的工业机器人相比，特种机器人与环境的交互作用更加复杂，控制更加困难，要求的智能化程度更高。开发适应于非结构化环境下工作的机器人是一个更加复杂的发展目标。

工程实际应用中的隧道凿岩机器人就是这样一种特种机器人。1998年，国家科学技术委员会和“863”计划智能机器人主题将应用于隧道开挖的特种机器人——隧道凿岩机器人列入了“863”计划的重大项目，并由中南大学承担研制和开发工作。

1.1 我国开展隧道凿岩机器人研究的必要性

隧道开挖是现代交通、水电等大规模基本建设中一项难度大、耗资耗时多、劳动条件差、但又十分重要、十分关键的施工作业。当前隧道开挖一般采用掘进法和钻爆法。前者采用庞大复杂的掘进机，用类似机械切削的方法一次将整个隧道断面切削成形。这种施工方法的特点是掘进速度较快、安全。但是该法使用的全断面掘进机价格非常昂贵，运转功率大，体积庞大运输困难，断面适应性差（一般为圆形），而且对地质条件的要求相对比

较严格，这些不利之处限制了它在工程中的应用范围。相比之下，钻爆法的施工则比较灵活，断面适应性好，设备费用相对低廉得多。

目前的隧道开挖中，采用凿岩(钻孔)后爆破成形的钻爆法还是占主导地位。钻爆法即在待开挖的隧道断面上首先钻凿爆破孔，然后装入炸药引爆，将崩落下的岩石运走，便形成隧道的初形，然后喷锚支护、稳定地层，最后一般用混凝土衬砌好，成为供车辆行走或引水通过的隧道。显然，用最快的速度完成按一定规律分布的爆破孔的钻凿，并使爆破后的断面尽量接近设计的断面形状，减少“超挖”、“欠挖”所造成的经济损失，同时尽力为施工人员创造尽可能舒适、安全的劳动条件，这些都是人们在工程实践中追求的经济技术指标。为达到上述目的，必须研制和开发先进的施工设备。

凿岩设备是钻爆法施工的主要设备之一，凿岩设备的技术进步直接促进了隧道施工水平的提高。早期的液压凿岩设备全由人工操作，操作人员不熟练往往导致严重的“超挖”或“欠挖”，对工程的成本和工期都会产生不利影响。自20世纪70年代末以来，液压凿岩机和与之配套的液压台车形成了高效节能、劳动条件好的液压凿岩设备，在世界发达国家采掘作业中开始逐步取代原有的低效耗能、劳动条件十分差的手持式气动钻孔机具。为了将隧道开挖水平提到一个新高度，几乎在液压凿岩台车实用化的同时，国外许多厂商都将计算机技术和自动控制技术引入新型液压凿岩设备。随后，世界上许多发达国家都推出了具有机器人特征的半自动计算机辅助凿岩台车和全自动凿岩台车。由于这类凿岩台车主要用于隧道的开挖，所以称它为隧道凿岩机器人。

隧道凿岩机器人对操作工人的熟练程度要求不高；可以改善作业环境；不必在工作断面画爆破孔；可精确控制炮孔深度、角度和位置，获得精确的隧道断面轮廓，减少超挖与欠挖，提高隧

道施工质量，提高经济效益；可以减少对围岩的机械破坏，从而节省支撑工程的费用；通过优化钻孔布置，达到单位进尺炸药消耗量最少和炮孔利用率最高，获得较好的爆破进尺和破碎块度；根据凿岩过程中自动记录的凿岩穿孔速度数据，预测岩层条件和破碎带，从而预先确定开挖参数、支护工作量以及是否需要加固，并准确确定钻头修磨周期和设备维修周期。通过计算机自动定位、定向，减少钻车和钻臂定位时间；通过计算机控制实现凿岩过程各输出参数的最优匹配，从而使穿孔推进速度或效率达到最优，钻头、钻杆、钻车的机械损耗大大减小。世界各地隧道工程现场使用得到的数据表明：计算机控制凿岩超挖可减少 10% ~ 15%；一次爆破进尺可提高 10% 以上；生产率提高 15% ~ 30%；钻头寿命提高 27% 以上；钻进成本降低 25% 以上。

图 1 - 1 为计算机控制凿岩与普通液压钻车凿岩的作业成本比较。图中数据是挪威研究者长期使用凿岩机器人后，20 世纪 80 年代总结出来的，目前效果会更好。这些数据是从工期两年以上、长度为 4.5 km、截面为 60 m² 的公路隧道中系统地采集而来的。它表明，减少超爆量最能降低成本，要取得更大利润的途径是进一步优化钻孔图。

实践表明，计算机控制凿岩的优越性主要体现在有衬砌的隧道。图 1 - 2 比较了无衬砌的隧道与有衬砌的隧道采用计算机控制凿岩施工的经济效益。其数据是根据钻孔、爆破、从隧道中清理碎石每立方米 100 挪威克朗的成本和用混凝土回填超量爆破每立方米 1000 挪威克朗的成本获得。从上述数据可以发现，计算机控制凿岩用于掘进长 5 km 截面 50 m² 无衬砌隧道，可节省 250 万挪威克朗(43.5 万美元)；用于掘进长 5 km 截面 100 m² 混凝土衬砌的隧道，可节省 8500 万挪威克朗(1500 万美元)。可见，计算机控制凿岩用于大断面、混凝土衬砌的隧道，经济效益十分显著。