

复杂曲管机器人喷涂 理论与技术

F

UZA GUGUAN JIQIREN PENTU LILUN YU JISHU

陈雁 王国磊 陈恳◎著



重庆大学出版社
<http://www.cqup.com.cn>

内容提要

本书是作者研究团队在喷涂机器人领域多年研究成果的总结,系统地阐述了复杂空间曲管内表面智能机器人喷涂的基本理论、方法和技术。全书共 8 章,内容包括涂料雾化系统设计、机器人本体设计、机器人控制系统设计、机器人喷涂作业规划、机器人关节轨迹规划、涂层厚度 CFD 仿真及喷涂工艺流程。

本书可供从事喷涂机器人及工业机器人等研究的科研人员、相关专业的研究生或本科高年级学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂曲管机器人喷涂理论与技术/陈雁,王国磊,陈恳著. —重庆:
重庆大学出版社,2016.9

ISBN 978-7-5624-9791-2

I. ①复… II. ①陈…②王…③陈… III. ①管道—喷漆机器人
IV. ①TP242.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 108015 号

复杂曲管机器人喷涂理论与技术

陈 雁 王国磊 陈 恳 著

策划编辑:彭 宁 何 梅

责任编辑:李定群 版式设计:彭 宁 何 梅

责任校对:关德强 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:易树平

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址: <http://www.cqup.com.cn>

邮箱: fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

重庆紫石东南印务有限公司印刷

*

开本:720mm×960mm 1/16 印张:12.25 字数:181 千

2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5624-9791-2 定价:39.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

机器人自动化喷涂具有效率高、涂层质量好、节约涂料及环保性好等显著优点。经多年发展,喷涂机器人已成为目前最典型的工业机器人之一。但是,应用机器人对复杂曲管的内表面进行喷涂还是鲜有人尝试的“禁区”,这是因为受到狭窄作业空间的约束,复杂曲管喷涂对机器人的结构、控制、规划,乃至涂料雾化系统、喷涂工艺都提出了非常特殊的要求。

面对这个难题,陈恳教授带领的清华大学机器人与自动化装备及技术实验室研究团队一直坚持在这个领域进行不懈的研究和探索。艰辛与努力、挫折与进展、失败与成功,伴随着我们团队不断成长,也在该领域取得了一些有益的积累、突破和进展,研制出了国内首台超长冗余度曲管喷涂机器人“THPT-I”,并取得了良好的实际应用效果。回顾历史和国内外目前研究现状,深感有必要较完整地针对复杂空间曲管机器人喷涂问题,将我们多年来在

该领域的研究思想、理论方法和成果作一系列的总结、归纳和提高,撰写这本学术专著,以益于同行的深入研究,为青年科技人员提供研究与学习参考,并促进喷涂机器人的发展和应用。

本书是陈恳教授研究团队负责承担的国家重大项目、国家自然科学基金、中国博士后科学基金和国家重点实验室自主研究课题等项目研究成果的系统总结(复杂形面空气喷涂成膜机理及规律研究,编号 51475469;复杂内曲面喷涂过程建模与冗余喷涂机器人多维轨迹优化研究,编号 61403226;复杂曲管内壁喷涂机器人作业规划与参数优化技术研究,编号 2011M500305;复杂曲管冗余机器人喷涂运动规划研究,编号 2012M512093)。研究团队的杨向东副教授、李金泉副教授、付铁副教授、刘召博士、张传清博士、邵君奕博士、潘玉龙博士、缪东晶博士、吴聊博士、谢颖博士生、陈明启高工、曹文敦高工、吴丹教授、宋立滨博士、付成龙副教授、徐静副教授、于乾坤博士生、程建辉博士生、刘志博士生、任书楠博士生、陈文卓博士生、何少炜硕士生和张钢硕士生等与作者合作完成了相关研究课题,在此深表谢意!

本书涉及的研究工作得到了清华大学、中航集团、国家自然科学基金委员会、中国博士后

科学基金会和中国人民解放军后勤工程学院
“2110”三期工程的大力支持,在此一并表示衷心感谢!

限于作者水平,书中定有不少不足乃至疏漏,恳请读者和专家批评指正!

作 者

2015 年 9 月于清华园

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 复杂曲管机器人喷涂研究背景	1
1.2 复杂曲管机器人喷涂研究现状	4
1.3 复杂曲管机器人喷涂存在的问题	11
1.4 本书内容安排	13
第 2 章 涂料雾化系统设计	14
2.1 涂装工艺方法	14
2.2 涂料雾化系统设计	21
2.3 实验	27
第 3 章 机器人本体设计	29
3.1 工作要求	29
3.2 喷涂机构构型综合	30
3.3 喷涂机构尺度综合	37
3.4 机构三维建模	40
3.5 仿真与实验	44

第 4 章 机器人控制系统设计	46
4.1 喷涂机器人操控模式与流程	46
4.2 控制系统设计	47
4.3 机器人测试	72
第 5 章 机器人喷涂作业规划	78
5.1 涂层均匀性的基本影响因素	78
5.2 喷涂作业路径规划	90
5.3 喷扫速率规划	113
5.4 喷涂作业规划实验	115
第 6 章 机器人关节轨迹规划	117
6.1 定位标定	117
6.2 机器人数学模型	123
6.3 机器人逆运动学	125
6.4 机器人关节轨迹规划步骤	127
6.5 仿真与实验	128
第 7 章 涂层厚度 CFD 仿真	132
7.1 涂层厚度 CFD 仿真概念	132
7.2 欧拉-欧拉法	135
7.3 欧拉-拉格朗日法	138
7.4 喷涂模拟	142

第 8 章 喷涂工艺流程	159
8.1 喷涂准备	159
8.2 底漆喷涂	160
8.3 中间涂层喷涂	161
8.4 面漆喷涂	166
8.5 实验	167
参考文献	172

第 1 章

绪 论

1.1 复杂曲管机器人喷涂研究背景

所谓复杂曲管,通常是指具有狭长、弯曲等特征的管道,在航空、石油、天然气、化工、建筑等很多行业中都很常见,如图 1.1 所示。典型曲管为狭窄的 S 形变截面管道,其中心线(或近似中心线)为 S 形,截面形状随中心线位置而逐渐改变,喷涂难度最大。

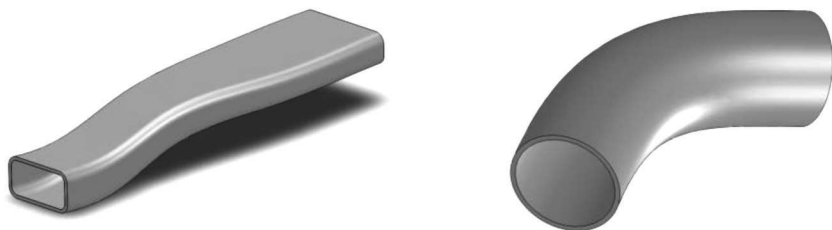


图 1.1 曲管示意图

典型曲管的内壁喷涂作业可由人工进行,但采用手工喷涂上述典型曲管有以下 3 个明显缺点^[1]:

①喷涂完成后涂层关键技术指标——均匀性差。喷涂过程中无涂料搅拌和循环造成涂料黏度和浓度变化大,尤其是喷涂作业困难,更容易造成喷涂厚度偏差过大,手工喷涂后在未打磨前的部分涂层厚度偏差可超过 50%。

②由于工作空间限制,喷涂作业困难,工人只能采用仰卧和俯卧方式勉强喷涂部分区域,这导致不仅工作效率低,作业时间长,而且易造成涂层过厚或过薄,返工打磨和补喷耗时过多,严重影响生产进度。

③涂料含有重金属和有毒有机溶剂等,施工的恶劣环境对喷涂工人健康危害很大,特别是若出现静电等导致的火灾等事故,会对喷涂工人造成严重伤害,甚至危及生命。

采用机器人涂装替代手工喷涂能很好地解决以上问题,虽然喷涂机器人已在汽车、机械、电子、家具、航空等领域大量应用^[2-4],但市场现有通用涂装机器人无法满足上述典型曲管的特殊施工要求。因此,必须针对曲管和涂料特点研究机器人智能喷涂理论与技术。

复杂曲管机器人喷涂是以作业要求、曲管 CAD 模型和喷涂成膜模型为基础,设计出喷涂机器人,通过离线规划得到喷涂作业轨迹,经涂层厚度仿真证实和机器人关节轨迹生成后,根据喷涂工艺流程用于机器人生产性喷涂,如图 1.2 所示。

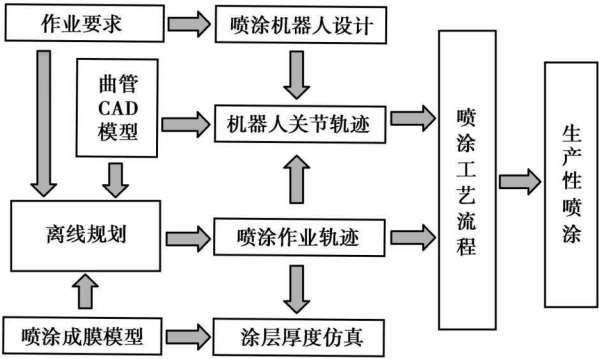


图 1.2 机器人智能喷涂过程

作业要求主要是涂装工艺要求、喷涂作业规划优化准则和机器人工

作要求等。喷涂工艺要求包括涂装工艺方法、工艺系统、工艺流程及工艺参数等。复杂曲管喷涂作业规划的优化准则是满足指定涂层平均厚度,求最优涂层厚度均匀性,这是目前研究和应用最多的一类喷涂优化问题。机器人工作要求是指机器人在复杂曲管内喷涂作业时不仅要满足工作空间要求,不能与管壁发生任何碰撞,而且喷涂机构还应与管壁保持一定的安全距离。

设计喷涂机器人是实现复杂曲管智能喷涂的基础和关键环节,必须完全满足设计要求。机器人设计要求包括机器人结构、尺寸、材料、强度、刚度、运动学、动力学、工作空间及作业安全要求等。喷涂机器人设计包括涂料雾化系统设计、机器人本体设计和机器人控制系统设计。

复杂曲管 CAD 建模是自动作业规划流程的重要一步,一般采用计算机辅助几何设计或标准图形接口转换完成造型。造型后的复杂曲管和机器人 CAD 数据就存放于作业规划系统 CAD 数据库中,为作业规划提供工件表面和机器人结构数据信息。

喷涂成膜模型是用于计算涂层厚度和规划喷涂作业轨迹的喷枪喷涂过程的涂料沉积模型。它可分为喷枪喷涂成膜简化模型和 CFD (Computational Fluid Dynamics, 计算流体动力学) 成膜模型两类。喷枪喷涂成膜简化模型是指始终保持喷枪轴线与工件法线重合进行等喷涂距离喷涂时,在涂膜横截面上获得的涂料厚度分布函数。实际使用的喷枪喷涂成膜模型都采用喷涂平面工件时获得的涂膜厚度的拟合函数。CFD 成膜模型是指利用计算流体动力学计算涂层厚度的涂料沉积模型。

喷涂作业规划的目的是得到喷涂作业时的喷枪的位置、姿态和速度,也涉及初始路径的选择、搭接间距优化和速率优化等。喷涂作业规划采用离线规划完成,即利用计算机图形学等理论和软件,建立喷涂机器人及工件模型,再利用设计的规划算法在离线条件下完成喷涂作业轨迹规划,这是一种安全和高效的方法。

涂层厚度仿真是指利用得到的喷涂作业轨迹,计算出工件上的涂层厚度,并以此判断喷涂作业轨迹是否满足涂层厚度要求。若不满足要求,

则需重新规划喷涂作业轨迹。涂层厚度仿真通常采用经验模型法,即利用喷枪喷涂成膜简化模型完成。

机器人关节轨迹生成是指利用得到的喷涂作业轨迹,在满足不出现奇异位形、速度不超限、加速度不超限和安全要求等条件下,通过运动学逆解求得机器人各关节轨迹。其中,安全要求是机器人关节轨迹生成必须解决的一个重点问题。

喷涂工艺流程包括喷涂工艺过程、步骤和参数,必须结合涂料喷涂实验和喷涂作业轨迹规划确定。其中,喷涂工艺参数优化是提高涂层质量的重要途径。喷涂工艺流程是保证涂层质量的必备条件。复杂曲管喷涂机器人用于生产性喷涂前,必须进行复杂曲管喷涂试验,以检验喷涂工艺流程的有效性和适用性。

1.2 复杂曲管机器人喷涂研究现状

机器人喷涂可以追溯到 20 世纪 80 年代,克莱因^[5]首先将离线编程的思想用于喷涂作业规划。1991 年,徐锡焕等^[6]首先开发了一套基于 SUN4/330 工作站的喷漆机器人离线编程系统,功能包括交互式的非静电喷涂工件建模、最优喷涂参数求解和喷涂仿真。随后,研究者研究了喷枪轨迹的优化问题^[7-9]和喷枪喷涂模型问题^[6-7, 10-15]。近年来,卡耐基梅隆大学^[15-16]、密西根州立大学^[17-20]和 ABB 公司^[21]研究了自动作业规划。我国清华大学^[22-24]、广西大学^[25]、江苏大学^[26]、兰州理工大学^[27]、北京航空航天大学^[28]、华中科技大学^[29]、西安理工大学^[30]、上海交通大学^[31]、石家庄铁道大学^[32]、后勤工程学院^[33-37]都在利用喷枪喷涂简化成膜模型进行研究。目前,机器人喷涂不仅在汽车、机械等工业领域广泛应用,也在航空及飞机涂装上大量应用^[38-39],但机器人喷涂仍存在成膜机理与特性、涂层厚度仿真和复杂曲面喷涂作业轨迹规划等难题^[2-3, 40-41]。

喷枪喷涂简化成膜模型最先用于涂料成膜建模、喷涂作业规划及涂

层厚度仿真研究。这种模型的优点是大大简化问题,但由于没有从成膜本质机理上进行深入研究,很难获得对复杂形面都适用的模型。根据函数的自变量数目,喷枪喷涂简化成膜模型可分为一维模型和二维模型。一维模型通常是在喷涂平面时获得的模型,即单喷涂行程上涂层横截面厚度分布只与到喷锥底心的距离有关,如柯西分布模型^[7]、高斯分布模型^[10-11]、抛物线模型^[12]、 β 分布模型^[13-14]、组合模型^[42]、椭圆双 β 分布模型^[43]等。康纳等^[15]建立了二维模型,提出模型的涂层厚度分布是到喷锥底心的距离和该点的法线角度两个变量的函数。此外,王国磊等^[44]提出利用BP神经网络方法建立不变参数下的涂层厚度分布建模。陈雁等^[1,45-48]基于喷枪喷涂一维模型提出交错喷涂法解决喷涂厚涂层的路径规划难题,利用涂料涂着效率比解决喷扫速率规划问题。

喷枪喷涂一维模型形式简单,便于简化问题,用于平面或大曲率半径的形面和恒参数(喷涂距离、角度、涂料流量等)喷涂可取得较好预测效果。同一维模型相比,二维模型简单考虑了对涂膜厚度分布影响的形面因素,但也不能较好反映形面因素对涂膜厚度分布的影响。工件形面不仅是多种多样,而且极其复杂。这使得喷枪喷涂的涂料分布特性更加复杂,甚至部分复杂工件不能采用常规方法喷涂。喷枪的喷雾图形有圆形、椭圆形和橄榄形3种,喷涂参数的变化将导致喷雾图形及成膜特性的变化。喷枪喷涂成膜模型的准确性决定了涂料成膜计算的偏差大小及作业规划的成败,而应用于复杂形面喷涂和变参数喷涂是喷枪喷涂简化成膜模型无法突破的瓶颈。正因如此,美国采用高精度机器人喷涂战机外表面时,也仅75%~85%^[49]的涂层厚度是在检验指标范围内。

自动作业规划是以喷枪喷涂模型、工件表面CAD模型、约束条件和优化准则为基础,利用按照一定算法设计的规划器可自动完成喷枪轨迹的生成与优化工作,可提高喷涂机器人的智能化水平。在自动作业规划上,盛伟华等^[17-21]提出了用约束盒法(bounding box method)和改进的约束盒法规划自由表面作业。其包括喷涂片区生成和喷涂片区内喷涂作业规划两个步骤。这种方法是实现作业轨迹规划的自动化及智能化研究方

面的重要进展,但最大不足是没有考虑复杂形面对喷涂流场及涂料成膜的极大影响,用于复杂形面工件的作业规划尚有不足。

随着计算机技术和 CFD 的发展和应用,尤其是软件 FLUENT 等的应用和推广,涂料成膜建模及涂层厚度仿真研究开始探讨采用 CFD 结合实验的方法。对静态空气喷涂(喷枪不运动)的涂料成膜建模的研究学者主要有意大利的加贝拉等^[50],德国的叶乔燕等^[51]和福格莉亚蒂等^[52],浙江大学的刘国雄等^[53]。对动态喷涂(喷枪运动)的涂料成膜建模的研究学者主要有德国的叶乔燕等^[54]和多姆尼克等^[55],加拿大的托吉克等^[56-66]。

首先研究者对静态空气喷涂进行 CFD 研究。研究将空气喷涂涂料按时间先后分为雾化过程、喷雾过程和碰撞黏附过程。雾化过程是利用空气冲击使涂料变成细小微粒,喷雾过程可视为空气和涂料微粒两相流的运动过程,碰撞黏附过程是涂料微粒碰撞工件表面和湿膜表面形成最终涂料膜。目前喷雾过程都采用欧拉-拉格朗日模型建模,气相被处理为连续相,直接求解时均纳维-斯托克斯方程,而离散相数据是通过计算流场中大量的涂料微粒的运动得到的统计结果,可以详细地对单独的颗粒运动进行跟踪和计算。文献[53]采用适宜于欧拉-拉格朗日模型的碰撞黏附过程的壁面液膜模型。欧拉-拉格朗日模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型(renormalization group $k-\varepsilon$)的计算结果与速度衰减较为吻合,采用可实现性 $k-\varepsilon$ 模型(realizable $k-\varepsilon$)计算结果与喷雾形状较为吻合^[52]。虽然模型计算得到的涂膜厚度结果和实验的分布形状大体相似,但在部分区域厚度相差较大^[51]。

随后研究者对动态静电喷涂进行了研究,动态喷涂涂膜厚度计算的关键是 CFD 的运动边界问题。研究采用两种方法:一种是采用欧拉-拉格朗日模型结合多个静态喷涂叠加的方法研究动态喷涂问题,但这种方法只适合于轴对称几何形面^[56];另一种方法是采用欧拉-拉格朗日模型结合动网格法。动网格法是通过定义初始网格、边界运动的方式并指定参与运动的区域,以实现计算中网格的动态变化,用来解决流场形状由于边界运动随时间改变的问题。动网格法可以用 3 种模型进行计算,包括

弹性光滑模型、铺层模型和局部重构模型^[59]。其中,局部重构模型更适合于喷涂作业工况。叶乔燕等^[55]采用动网格局部重构模型计算静电喷枪完成一个1维直线动态喷涂,喷枪以5 cm/s运动1.5 m,在一台PC机上计算耗时144 h。从计算时间的角度考虑,需要 N 个时间步长的动态喷涂成膜计算大致可看作 N 个静态喷涂的累积,所以动态喷涂成膜计算所耗费的时间大约为静态喷涂的 N 倍^[57]。因此,要使动态喷涂成膜计算时间大大缩短,关键是缩短静态喷涂成膜计算时间。

曲管喷涂机器人属于内管道机器人。卢武铨等^[60]和王哲龙等^[61]根据运动方式不同,将内管道机器人分成7种基本类型,包括清管器型^[62]、轮型^[63]、履带型^[64]、尺蠖型^[65]、行走型^[66]、螺旋型^[67]和压壁型^[68-69]。目前,曲管喷涂机器人采用了压壁型管道机器人^[68-69]和非接触型管道机器人^[70-72]两种结构形式。

压壁型曲管喷涂机器人为了保持与管壁的压力,设计有柔性机构,可以用于各种场合。它可用于变截面管道,但必须要有一种方法能够使机器人实时改变位形,以确保对管壁有足够压力来支撑在管壁上。支撑装置也必须有足够推力的驱动轮以保证机器人移动和保持稳定,这样机器人才能完成作业任务。压壁型曲管喷涂机器人的不足是喷涂一道后需等涂层干燥后才能实施下一道喷涂,效率低,还可能在移动基座时压坏上一道涂层。

美国德克萨斯大学的刘凯等^[65]研究了基于斯图尔特平台的机器人喷涂系统(SPPS)自动喷涂曲管内壁。SPPS针对的曲管是一个组合件,入口的横截面为平行四边形,逐渐过渡到圆形截面。SPPS包括3个独立的组成部分:移动基座、斯图尔特平台和末端喷涂装置。移动基座用于安装6自由度斯图尔特并联机构平台,并驱动自身从曲管的一端运动到另一端。末端2自由度喷涂装置安装在斯图尔特平台上。移动基座、斯图尔特平台和末端喷涂装置相互独立地设计和控制。如图1.3所示为SPPS在曲管内的喷涂过程,SPPS从右往左运动。SPPS是典型的压壁型曲管喷涂机器人。

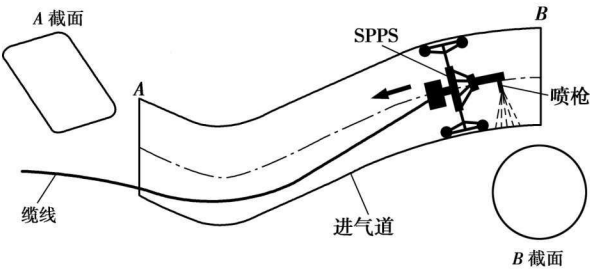


图 1.3 SPPS 喷涂过程

非接触型曲管喷涂机器人是模仿人手臂伸入曲管内手持喷枪喷涂，利用一条机械臂伸入曲管喷涂管道内壁。非接触型管道机器人的优点是可连续多道喷涂，作业效率高，不接触涂层而避免了可能的涂层损伤，但喷涂臂不仅需要具有较高的刚度，而且还要能灵活避障。

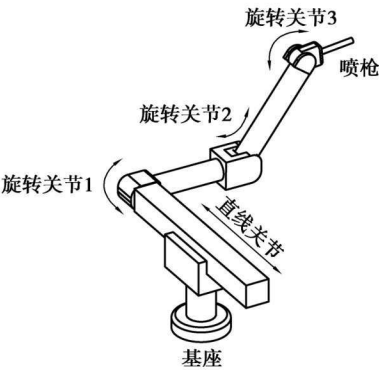


图 1.4 4 自由度喷涂机器人

天津大学^[70]研究喷涂的曲管长度为 6.3 m，内壁截面从 0.9 m 长和 0.7 m 宽的长方形过渡到直径为 0.94 m 的圆，并且各截面中心不在同一条直线上。其设计的一台 4 自由度机器人示意图如图 1.4 所示。它的 1 个移动自由度主要是用来满足其纵向伸缩需求，3 个转动自由度主要是用来满足其任一截面的位姿需求，移动和转动自由度相互解耦。控制系统采用基于可编程运动控制卡的开放式实时数控系统。该曲管喷涂机器人可以喷涂较短的轻微弯曲管道。

洛克希德·马丁公司^[49, 73]采用多种机器人喷涂曲管，其中采用了安装在 1 条轨道上的 6 自由度 M-710 机器人（见图 1.5）喷涂曲管。该曲管长为 2.74 m，高为 0.51 m。该曲管喷涂机器人系统为 7 个自由度，工作空间较小，适合喷涂较短的曲管。

北京机械工业自动化研究所^[74]研制了由移动装置、调整平台和喷涂机等组成的管道喷涂机器人，如图 1.6 所示。3 自由度喷涂机由实现前后

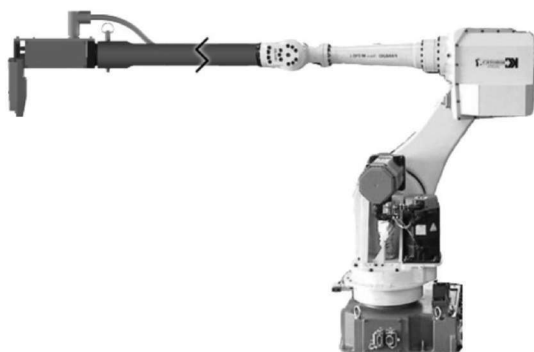


图 1.5 安装在轨道上的曲管喷涂机器人

运动的悬臂和 2 自由度手腕组成,手腕可实现喷枪绕管道中心线的连续回转和垂直管道中心线的径向运动。该喷涂机器人可以喷涂较长的轻微弯曲管道。



图 1.6 大型喷涂机器人

清华大学^[71-72]研制的复杂曲管喷涂机器人本体由定位机构和喷涂臂组成,如图 1.7 所示。定位机构包括移动机座、位置机构和姿态机构 3 部分。移动机座实现机器人粗定位,即将复杂曲管坐标系与机器人坐标系的相对位姿关系确定在一个合理的范围内。它装有车轮,设置有气囊移动系统和螺旋机构支腿。位置机构和姿态机构用于完成喷涂臂与复杂曲管之间的精定位,由 3 自由度直角坐标机构和 1 个转动关节串联组成。喷涂机构为由 3 个移动关节和 7 个转动关节组成的 10 自由度串联机构,其冗余度特性确保实现喷枪穿越狭窄 S 形复杂曲管空间和无碰撞喷涂。