

河南省高等学校重点科研项目 (15A460007)

少自由度并联机器人 机构分析方法研究

SHAO ZIYOU DU
BINGLIAN JIQIREN
JIGOU FENXI FANGFA
YANJIU

季晔 著



西南交通大学出版社

河南省高等学校重点科研项目 (15A460007)

少自由度并联机器人机构 分析方法研究

季 晔 / 著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目(CIP)数据

少自由度并联机器人机构分析方法研究 / 季晔著.

—成都: 西南交通大学出版社, 2017.4

ISBN 978-7-5643-5228-8

I. ①少… II. ①季… III. ①机器人机构—机构分析

IV. ①TP24

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第007407号

少自由度并联机器人机构分析方法研究

季晔 著

责任编辑	李伟
封面设计	米迦设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市二环路北一段111号 西南交通大学创新大厦21楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都睿军广告印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	12.25
字 数	188 千
版 次	2017年4月第1版
印 次	2017年4月第1次
书 号	ISBN 978-7-5643-5228-8
定 价	48.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

少自由度并联机构用途广泛，可以作为航天飞船对接器、航海潜艇救援对接器、高档数控机床等设备的原型，具有结构紧凑、设计制造和控制成本低等优点。近年来，随着人力资源成本的提高、社会老龄化的加剧，企业用工成本大幅增加，机器人已逐步成为重要的劳动力和生产工具。面向不同的应用领域，机器人需求种类的多样化也十分迫切。

本书对并联机器人机构构型演变及其机构分析进行了系统阐述，提出了机构型综合和性能分析新方法；将六自由度 **Stewart** 并联机构去掉两个驱动支链，得到四驱动支链并联机构；利用螺旋理论分析了机构的运动螺旋和约束螺旋，发现支链对运动平台无约束，故改变支链中与运动或固定平台相连的运动副以及增加约束从动支链，可以得到 **3T1R**（**T** 表示移动，**R** 表示转动）、**2T2R** 和 **1T3R** 四自由度并联机构。为了表示这些结构相似而运动特征不同的机构，定义了更为明晰的机构代号表示方法。

奇异是机构的固有属性，机构处于奇异位形会使其运动学和动力学性能发生突变。本书采用 **Jacobian** 代数法研究机构奇异位形，提出采用循环迭代计算得到行列式零点，根据零点分布规律研究机构奇异位形；根据机构约束条件，建立

并联机构工作空间约束方程，并建立了相应的计算流程图，提出利用“点集”来近似计算机机构工作空间大小的方法；建立了并联机构的输入/输出的一阶和二阶影响系数矩阵，采用“分层”研究的方法，得到了输入对机构各输出变量的影响。本书以全域性能评价指标为依据，得到了尺度参数与性能评价指标的关系；对并联机构进行运动学分析，根据机构的输入与输出位置关系方程，推导出机构的输入与输出的速度和加速度关系方程，采用改进的 PSO（粒子群优化）算法为基本求解方法，同时与 Broyden 迭代法相结合，得到了机构的高精度位置正解；根据推导出的运动学方程，在给定输入的条件下，得到了机构输出端位置、速度和加速度变化规律；对机构进行受力分析，利用 N-E（牛顿-欧拉）法建立了机构动力学方程，根据未知数与方程数量，将机构分为含局部自由度机构、静定机构和过约束机构；在不同的输入轨迹条件下，得到了机构的驱动力和运动副约束反力/力偶的变化规律。

本书利用仿真软件，建立了机构的虚拟样机模型，通过仿真计算验证了理论计算结果；根据机构运动特征，说明了书中并联机器人机构的潜在应用价值。

希望本书内容能为机构综合和分析提供借鉴。由于本人水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请读者、专家批评指正，不吝赐教。

季 晖

2017 年 4 月

目 录

1 绪 论	1
1.1 发展概况	1
1.2 少自由度并联机构型综合及性能分析研究进展	6
1.3 本书主要研究内容	19
2 少自由度并联机构构型演变与符号表示	21
2.1 概 述	21
2.2 并联机构构型演变描述	21
2.3 代号表示方法分析	22
2.4 机构结构分析	24
2.5 不同结构驱动支链运动/约束特征分析	27
2.6 4-UPU/UPS/SPS 并联机构结构分析	31
2.7 本章小结	39
3 少自由度并联机器人机构奇异性分析	40
3.1 概 述	40
3.2 并联机构奇异位形研究方法	40
3.3 3T1R 四自由度的 4-UPU/UPS/SPS 并联机构奇异性分析 ..	41
3.4 2T2R 四自由度的 4-UPU/UPS/SPS 并联机构奇异性分析 ..	45
3.5 1T3R 四自由度的 4-UPU/UPS/SPS 并联机构奇异性分析 ..	51
3.6 规避奇异分析	53
3.7 本章小结	54
4 少自由度并联机器人机构工作空间与尺度分析	55
4.1 概 述	55
4.2 4-UPU/UPS/SPS 并联机构工作空间约束条件	56
4.3 4-UPU/UPS/SPS 并联机构工作空间区域求解	58
4.4 4-UPU/UPS/SPS 并联机构工作空间边界求解	60
4.5 工作空间体积与尺度关系	62

4.6	数值算例	63
4.7	本章小结	74
5	少自由度并联机构运动性能评价指标与尺度分析	76
5.1	概 述	76
5.2	建立 4-UPU/UPS/SPS 并联机构的一阶影响系数矩阵	76
5.3	建立 4-UPU/UPS/SPS 并联机构的二阶影响系数矩阵	77
5.4	4-UPU/UPS/SPS 并联机构性能评价指标分析	79
5.5	数值算例	82
5.6	结 论	98
6	少自由度并联机器人机构运动学分析	100
6.1	概 述	100
6.2	建立 4-UPU/UPS/SPS 并联机构的运动学关系方程	101
6.3	4-UPU/UPS/SPS 并联机构位置正解方法分析	105
6.4	数值算例	108
6.5	本章小结	122
7	少自由度并联机器人机构动力学分析	123
7.1	概 述	123
7.2	3T1R _z 并联机构动力学分析	124
7.3	2T _{xz} 2R _{xz} 四自由度并联机构动力学分析	141
7.4	1T _z 3R 四自由度并联机构动力学分析	150
7.5	本章小结	159
8	少自由度并联机器人机构运动学和动力学仿真分析	160
8.1	概 述	160
8.2	仿真模型的建立	161
8.3	机构应用实例——烹饪机器人	166
8.4	本章小结	168
9	结 论	169
9.1	工作总结	169
9.2	后续研究	170
	参考文献	171

1 绪论

1.1 发展概况

随着德国“工业 4.0”和我国“中国制造 2025”战略的提出，机器人与智能装备引起了国内外科学界和工程界的高度重视，毫无疑问，机器人对未来社会的发展具有深远影响。据资料统计，2014 年中国市场共销售工业机器人约 5.7 万台，较上年增长 55%，约占全球市场总销量的 1/4，已连续两年成为全球第一大工业机器人市场。但目前我国机器人的“密度”依然只有德国、日本的 10%，推算到 2020 年则至少应有 23.7 万台工业机器人的替代空间。并联机器人作为一类重要的工业机器人，具有刚度大、承载能力强、累积误差小、控制精度高等诸多优点。与关节机器人相比，并联机器人在工业现场占有率不足 5%，而食品、医药、3C 电子产品和印刷等行业对其有迫切的需求，因此具有广阔的应用前景。

数学、力学、计算机科学与技术和控制理论等学科发展迅速，并联机构的各类问题也凸显出来，激发了众多国内外学者的研究热情。数学家 Cauchy 在 1895 年研究了一种八面体并联机构，这是至今为止知道的最早的并联机构。据史料记载，Gwinnett 在 1931 年提出一种球面并联机构^[1]专利；Pollard 在 1934 年发明了一种用于喷漆的并联机构，并于 1940 年申请了该机构的专利^[2]。自从 20 世纪 70 年代开始，很多学者在并联机器人的机构学和控制策略等方面进行了研究，国外的知名学者有 Duffy^[3, 4]、Tesar^[5, 6]、Gosselin^[7, 8]、Merlet^[9, 10]、Angeles^[11]、Tsai^[12]、Herve^[13, 14]等。并联机器人的早期研究主要集中在 Gough^[15]和 Stewart^[16]提出的六自由度平台机构（见图 1-1、1-2），该机构由六条支链组成，具有强非线性和强耦合等特点。在实际应用中，很多情

况下不需要六自由度特性的机构，因此对少自由度（2~5 自由度）的研究已成为国内外学者的研究热点，其中三自由度并联机构的研究更为广泛。瑞士学者 Clavel 在 1988 年提出了一种四杆三自由度 Delta 移动并联机构^[17]（见图 1-3），该机构已成功应用在工业装配线上，并被视作三自由度移动并联机构的一个里程碑。而后，美国马里兰大学学者 Tsai 在 1996 年将 Delta 机构做了进一步改进，发明了 Tsai 氏空间移动并联机构^[18]，如图 1-4 所示。1994 年，加拿大学者 Gosselin 发明了一种称为“灵巧眼”的摄像机自动定位装置^[19]，该机构亦为三自由度转动并联机构，如图 1-5 所示。并联机构还用于航天飞船的对接装置，它由六个直线式电机驱动，可以实现主动抓紧、锁紧、柔性对接等动作，此类装置在航海中也有应用，在海上救援过程中，也用此类装置作为对接器，图 1-6 为俄罗斯研制的飞船对接装置。

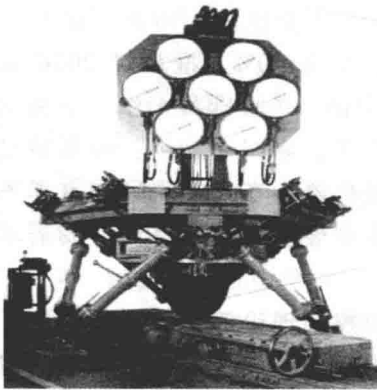


图 1-1 Gough 并联机构

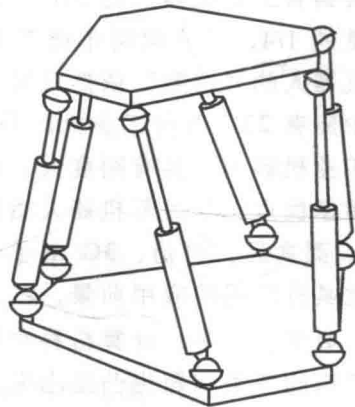


图 1-2 Stewart 并联机构

在国内，早在 20 世纪 80 年代黄真教授就率先开始了并联机构的前瞻性研究^[20, 21]（当时国际上研究并联机构的学者寥寥无几），并在 1991 年研制出我国第一台六自由度并联机器人样机，在 1994 年首次研制出以柔性铰链代替球副的六自由度并联机构补偿器^[22]，如图 1-7 所示。此外，我国学者杨廷力、高峰教授等在并联机器人机构学领域也取得了重要进展，例如他们分别提出了基于方位特征集和 G_F 集的类型综合法^[23, 24]，高峰课题组还研制出了并联机构的六维鼠标^[25]，如图

1-8 所示。此外，国内学者在机构性能分析方面也做出了大量有意义的工作，但仍有很多问题需进一步研究。



图 1-3 3 自由度 Delta 移动并联机构

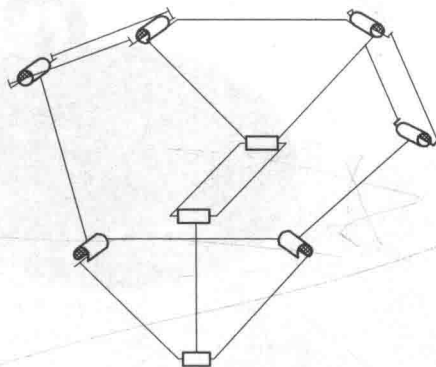


图 1-4 Tsai 氏移动并联机构

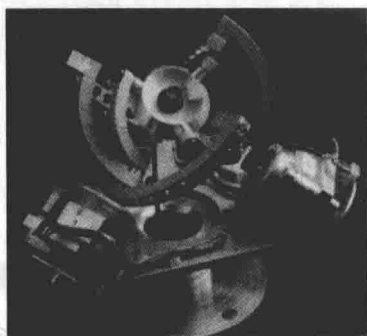


图 1-5 灵巧眼

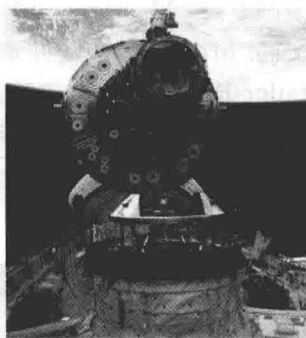


图 1-6 俄罗斯飞船对接装置



图 1-7 六自由度并联机构补偿器



图 1-8 并联机构六维鼠标

并联机构在军工和民品已有应用，主要领域有：

(1) 运动模拟器。这是并联机构较早的应用领域，如 Frasca 公司研发的 MBB BO105 并联机构飞行训练装置，如图 1-9 所示。德国 Daimler-Benz 公司制造的超大型六自由度 Stewart 运动平台多媒体动态驾驶模拟器，体现了国际并联机构的研究和应用水平，如图 1-10 所示。在我国，星光凯明动感仿真模拟器中心也从事运动模拟器的研发工作。

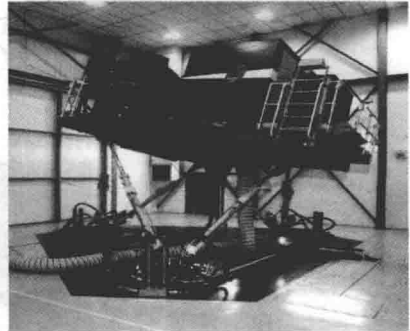
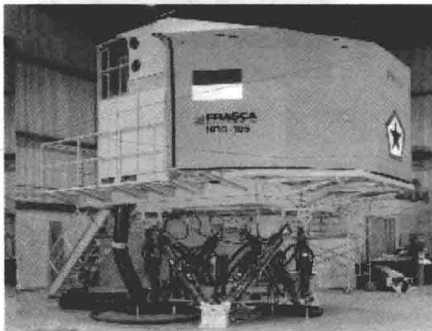


图 1-9 MBB BO105 型飞行训练装置 图 1-10 多媒体动态驾驶模拟器

(2) 并联机床。并联机构在机床研发、生产领域已有广泛应用。并联机床又称虚拟轴机床，是机床工业发展水平的重要指标。1994 年，Giddings&Lewis 公司在美国芝加哥举办的 IMTS 博览会上展示了

VARIAX 并联机床，标志着并联机构已应用于机床行业，如图 1-11 所示。此外，瑞士和德国等欧洲国家也相继研制了一批高性能并联机床。在国内，沈阳自动化研究所、清华大学、哈尔滨工业大学、河北工业大学等单位也开发了一些并联机床，图 1-12 为河北工业大学研制的五轴并联机床。

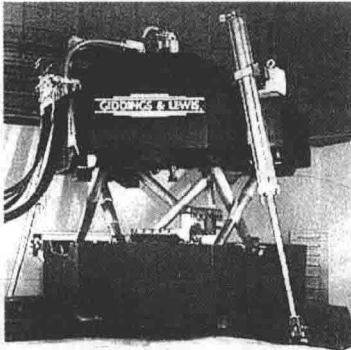


图 1-11 VARIAX 并联机床

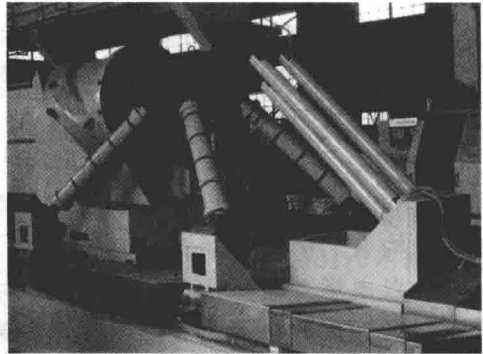


图 1-12 河北工业大学的五轴并联机床

(3) 机器人。并联机器人在航空航天、医学工程等领域也有应用，它具有与串联机器人优势互补的关系，适合于重载、高精度等场合。Tricept 和 Delta 是最为成功的并联机器人，图 1-13 和 1-14 分别是这两种机器人在生产线上的应用。

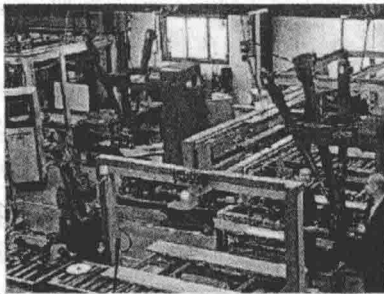


图 1-13 Tricept 并联机器人

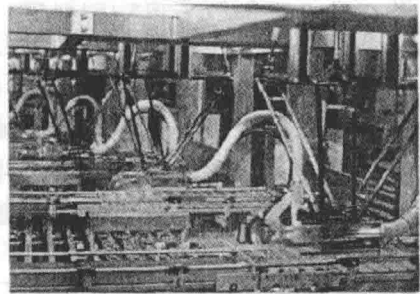


图 1-14 Delta 并联机器人

此外，并联机构还用于医疗器械、外科手术、天文望远镜、农业和工程机械等领域。

1.2 少自由度并联机构型综合及性能分析研究进展

目前,国内外学者已经提出了很多 2~6 自由度的并联机器人机构。根据法国人 Merlet 的统计:在已经公开的并联机器人机构构型中,三、六自由度机构大概各占 40%,四自由度的约占 6%,五自由度的约占 3.5%,二自由度的约占 10.5%^[26]。从以上数据可以看出,四、五自由度的并联机构在已公开的机构构型中所占的比重较低,而这两类并联机构有广阔的市场前景。

少自由度并联机构是机器人家族中的重要组成部分,实际需求也日渐增多,且其自身具有结构简单紧凑、驱动元件少、成本低、实用经济和控制相对容易等优点。并联机构的构型设计、性能分析和应用研究是三个热点问题,三者是相辅相成、不可分割的^[26],构型设计实际是新机构的综合问题,这个过程属于机构创新设计;性能分析包括奇异位形分析、工作空间分析、运动学和动力学分析等内容。求解机构各构件运动过程中的受力变化是机构性能分析的关键,无论是已有机构构型还是新综合出的机构构型,完成不同轨迹条件和不同尺度下的受力分析是机构实用化的前提,但进行动力学分析之前,需要完成机构奇异性、工作空间和运动学分析等工作。

与串联机构相比,并联机构的构型设计是一个更具挑战性的工作。另外,串联机器人在自由度减少后,机构的运动分析方法和思路一般不变,计算往往更为简单。并联机构却并非如此,由于机构输入与输出数学关系的复杂性,自由度减少未必会降低分析难度,有时还会使问题更加复杂。

1.2.1 少自由度并联机构型综合研究

并联机构型综合可以定义为:为了得到满足某种预期自由度的机构而实施的一种机构设计行为,包括连杆的形状和数量设计,运动副

的数量、类型以及空间位置设计。时至今日，国内外学者已综合出了很多的少自由度并联机构构型，一些机构已申请了专利，推动了机构学的发展。型综合与机构自由度分析密不可分，目前型综合的方法主要包括螺旋理论综合法、基于群论的位移群综合法、基于运动输出的型综合法和基于自由度计算公式的列举法。

1. 螺旋理论综合法

螺旋理论起源于 19 世纪^[27]，是研究并联机构的一个重要数学方法，在少自由度并联机构型综合领域取得了巨大成功，在并联机构性能分析方面也有举足轻重的作用。1996 年，黄真等利用螺旋理论综合了多种三自由度立方体并联机构^[28]，在 1997 年又用螺旋理论综合出 3-RRRH 三维移动并联机构^[29]。Huang^[30]、Gosselin^[31]、Fang 和 Tsai^[32]均采用螺旋理论得到了大量少自由度并联机构。文献[33]利用螺旋理论研究了三移动并联机构的型综合。文献[34]研究了三转动一移动并联机构的型综合。文献[35]研究了两移动一转动完全各向同性并联机构的型综合。文献[36]研究了三自由度球面并联机构的综合理论。文献[37]研究了三自由度移动并联机构的综合理论。文献[38]研究了五自由度并联机构的综合理论。

2. 基于群论的位移群综合法

Hervé 和 Angeles 是较早利用位移群研究并联机构型综合问题的学者。刚体在空间的所有运动可以构成一个具有群的代数结构的集合，这个群是位移群。位移群综合法是利用所有分支运动生成的位移子群的交集来得到并联机构运动平台运动生成的位移子群。文献[39]提出了基于群论的位移流形少自由度并联机构综合理论。文献[40]采用位移子群综合了一类三自由度并联机构。文献[41]利用位移流形型综合法研究了三自由度并联机构。文献[42]提出了位移流形方法研究了移动并联机构的型综合。文献[43]利用位移流形研究了转动并联机构的型综合。文献[44]利用位移群理论研究了三移动并联机构的型综合。文献[45]利用位移群理论综合出了三种两移动一转动并联机构。

3. 基于运动输出的型综合法

我国学者杨廷力在基于运动输出的型综合法方面做了深入的研

究,综合出多种新型并联机构。该方法以单开链支路为基本综合单元,首先综合单开链,然后对这些单开链所允许的运动类型求交集,从而确定运动平台的自由度,综合出所期望的并联机构。文献[46]以单开链为单元,提出了综合三自由度并联机构的方法。文献[47]研究了三移动并联机构的型综合。文献[48]提出了基于自由度分配和方位特征集的混联机器人机型设计方法。文献[24]提出的基于 G_F 集的型综合方法也属于此类。

4. 基于自由度计算公式的列举法

从目前发展趋势来看,列举法已较少使用,文献[49]利用列举法对三自由度移动并联机构进行了型综合分析。文献[50]利用列举法对三自由度转动并联机构进行了型综合分析。文献[51]利用列举法综合了一类三自由度并联机构。基于群论的位移群综合法需要较深的理论;螺旋理论综合法使用较为广泛。

上述方法在四自由度并联机构型综合方面也有广泛应用。四自由度并联机构可以有 $3T1R$ 、 $2T2R$ 和 $1T3R$ 三类,第一种对称的四自由度并联机构是由 Pierrot 和 Company 提出的 ($H4$ 并联机构)^[52]。在 2000 年,黄真,赵铁石提出了约束螺旋综合理论的思路,少自由度并联机构型综合的螺旋法以及输入选择原理^[53],并首次综合出分支中不含闭环子链的 $3T1R$ 四自由度对称的 $4-URU$ 并联机构。Zlatanov 等在 2001 年提出了第一种对称的 $1T3R$ 并联机构^[54]。Li 等在 2003 年提出了第一种对称的 $2T2R$ 四自由度并联机构^[55]。近年来,一些年轻学者在型综合方面也做了很多工作,综合出了大量有特点的新机构。文献[56]研究了对称四自由度并联机构的型综合。文献[57]提出了一种 $2-TPR/2-TPS$ 四自由度并联机构。李秦川等在 2008 年提出了变自由度且对称的四支链并联机构^[58]。文献[59]综合出了大量无奇异完全各向同性的 $2T2R$ 四自由度并联机构。文献[60]利用李群理论也综合出了一类 $2T2R$ 四自由度并联机构。

螺旋理论和基于群论的位移群综合法使用较为广泛,但刚体的很多运动不具备群的代数结构,如两移动三转动 ($2T3R$)、三移动两转动 ($3T2R$)、一移动三转动 ($1T3R$) 等运动特征无相应的位移子群。由于运动螺旋和力螺旋可能具有瞬时性,它们只能描述物体瞬时状态下的

运动和约束，所以螺旋理论综合法需要对机构进行非瞬时性判别。

对称并联机构的综合是型综合的难点，尤其是四自由度并联机构，其中第一种由简单串联链构成的对称四自由度并联机构在 2000 年提出，第一种对称的一移动三转动（1T3R）并联机构是在 2001 年提出的^[61]，第一种两移动两转动（2T2R）并联机构是在 2003 年提出的^[62]。这类对称并联机构的特点是各支链都提供约束螺旋，一般来说，机构支链数与自由度数相同。另外，无论采用哪种方法，综合机构基本是以寻找更多的、尽量找到所有可能的构型为目标，几乎没有关注不同机构之间的联系；不同运动特征甚至具有同一运动特征的机构，结构相差都会很大，不利于机构的实际应用。

1.2.2 并联机构奇异性研究

奇异性是机构的固有属性，也是衡量机构性能最为重要的内容。在进行机构分析研究时，奇异位形是诸多问题中应首先考虑的问题，也是运动学和动力学问题研究的基础，并对机构设计起决定性作用。串联机构处于奇异位形时，其末端将失去自由度；并联机构处于奇异位形时，末端往往是获得瞬时自由度。早在 20 世纪 70 年代，Whitney^[63]就认识到了奇异位形严重影响机器人的控制，并提出了增加机构自由度规避奇异；Dizioglu^[64]和 J. Eddie Baker^[65]也在同时期研究了机构的特殊位形和奇异位形。对于串联机构的奇异位形研究已相对成熟^[66, 67]，Hunt^[68]在 1983 年开始研究并联机构奇异位形，是较早研究并联机构奇异位形的学者之一。近年来，研究机构奇异的方法相对固定，主要有几何法和代数法两种：

1. 几何法

几何法通常是依据 Grassmann 线几何原理判断机构的奇异位形，主要是探讨奇异机理等理论研究，具有明确的物理意义且形象直观，对理解和研究机构的特殊构型非常重要，但运算性较差，不能对奇异性进行全面分析，对复杂机构进行奇异分析较困难，经验依赖比较严重。

文献[69]首次采用 Grassmann 线几何判断 Stewart 并联机构的奇异

位形, 后来有学者采用此方法研究了不同结构 Stewart 平台的奇异位形^[70, 71, 72, 73]。文献[74]研究了 3-UPU 和 Delta 并联机构的奇异。文献[75]研究了一种三自由度并联机构的奇异位形。在国内, 黄真在这方面做了大量工作^[76, 77], 为奇异性的研究奠定了基础。

2. 代数法

在实际应用中, 机构在整个工作空间内的工作状况是我们更为关注的, 需要得到奇异位形与结构参数和位姿参数的关系。从理论上来说, 代数法根据 Jacobian 矩阵可以得到明确的奇异位形与结构参数和位姿参数的关系, 而几何法却对经验依赖严重, 因此代数法的应用更为普遍。无论是串联机构还是并联机构, 运用代数法研究奇异位形都是可行的。代数法是根据机构输入/输出的 Jacobian 矩阵是否满秩判断机构的奇异位形。当 Jacobian 矩阵的行列式等于零, 机构的速度反解不存在, 此时机构处于奇异位形, 这种方法是最为一般的判断方法, 逻辑性强, 不易受主观判断的影响, 但不足之处也是显而易见的, 由于大多并联机构输入输出关系方程的强耦合特性, 且 Jacobian 矩阵很复杂, 在这种条件下判断矩阵降秩的条件则显得非常困难, 这也是制约该方法使用的主要因素。

基于代数法, Gosselin 和 Angeles 依据机构的速度约束方程, 又把奇异分为边界奇异、位形奇异和结构奇异^[78]。Gregorio 根据正、逆运动学, 把奇异分成正向奇异和逆向奇异^[79]。O'Brien 提出末端奇异和驱动奇异的研究方式^[80]。Zlatanov 基于螺旋的相关性, 提出约束奇异^[81]。

早期的并联机构奇异性研究很多是围绕 Stewart 运动平台展开的, 随着少自由度并联机构研究的深入, 这类机构的奇异性也引起了学者们的关注。与 Stewart 运动平台相比, 通过其改进的四自由度并联机构的输入和输出较少, 运动特征多样, 奇异位形表现形式也会更丰富。Gosselin^[82]和 Fang^[83]等分别研究过四自由度并联机构的奇异性问题。Gosselin 采用的方法是对约束方程进行求导, 分析 Jacobian 矩阵, 得到一些四、五自由度并联机构的奇异位形; Fang 通过研究四自由度并联机构的输入关系, 对 Jacobian 矩阵分块, 研究机构的奇异位形; Wolf 采用线几何法判断奇异位形; 文献[84]对选择不同输入条件下的