

第1章 绪论

1.1 课题研究背景

机器人是“制造业皇冠顶端的明珠”，其研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志^①。近年来，随着国家战略的推进和制造业水平的提升，机器人技术在我国得到飞速发展，国产机器人的市场占有率不断攀升。其中，工业机器人在国民经济建设中扮演着越来越重要的角色，现已成为相关产业生产中保障质量、降低成本、提高效率的核心装备。

随着生产生活方式的快速发展，工业机器人的应用场合呈现多样化趋势，例如，电子、食品、医药、日化和新能源等行业需要对体积小、质量轻的产品进行封装、包装及分拣等高速无污染操作，此类操作通常要求机器人末端执行器能够实现空间内一定跨度的平动运动并完成水平面内的姿态调整运动，即3个移动自由度加1个绕固定轴的转动自由度（简称3T1R运动，T表示移动，R表示转动）^[1-4]。为满足生产需求，常规工业机器人多采用串联机构来实现末端执行器的灵巧运动，具有结构简单、工作空间大等特点，其中最典型的代表性产品当数SCARA^②机器人（见图1.1）。然而串联机器人的构型特点决定了其原动件需要参与运动，这导致机器人运动部分的质量增大从而不利于实现高速高加速运动^[5]。近年来，并联机器人凭借速度快、动态特性好等优势备受青睐，已逐渐成为相关领域的主流机器人。能够快速执行拾取和放置操作的并联机构装备也被业界称为高速并联机器人^[6-7]，其无需高精密减速器的结构特性，决定了此类机器人在未来拥有极大的发展空间。

① 摘自习近平总书记在中国科学院第十七次院士大会、中国工程院第十二次院士大会上的讲话。

② SCARA：选择顺应性装配机械臂(selective compliance assembly robot arm)。

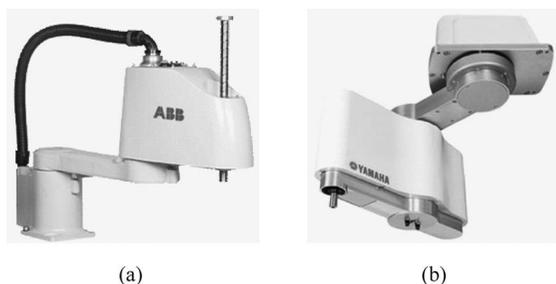


图 1.1 国际知名品牌 SCARA 机器人产品

(a) ABB 公司 SCARA 机器人^[8]; (b) YAMAHA 公司 SCARA 机器人^[9]

目前,国际上标志性的高速并联机器人原理构型是瑞士洛桑联邦理工学院(EPFL) Reymond Clavel 教授团队提出的 Delta 并联机构^[10-12]。该构型采用“开放式球铰”和“轻质杆件”方案有效降低了机器人的运动惯量,整机闭环式结构提升了机器人的刚度特性。基于 Delta 机构开发的高速并联机器人具有轻量化、模块化和原动件固连机架等结构特性,具备高速、高加速的潜在品质。最具市场影响力的 Delta 机器人产品当数 ABB 公司于 20 世纪末推出的 IRB 340 FlexPicker 机器人(见图 1.2(a)),该机器人的速度可达 10 m/s、加速度可达 100 m/s^2 ^[13],一经推出便在工业界引发极大反响,并获得广泛认可。待到 Delta 机构专利权到期后,机器人厂商相继推出了类似的高速并联机器人产品(见图 1.2(b))。



图 1.2 国际知名品牌 Delta 机器人产品

(a) ABB 公司 IRB 340 FlexPicker^[14]; (b) Adept 公司 Hornet 565^[15]

Delta 机器人展现出制造容易和使用方便的巨大优势,但因为采用了随动 UPU 支链,其使用寿命不仅受到影响,而且其运行速度、精度等性能的进一步提升也受到限制^[16]。为此,法国国家科学研究中心(CNRS)Pierrot 等基于 Delta 进行了构型改进和创新设计,提出了一系列具有双动平台特征的 H4^[17]、I4L^[18]、I4R^[19]、Par4^[20-21]、Heli4^[22-23] 等高速并联机器人构型。该系列机器人采用 4 条运动支链和双动平台方案,其中 4 条运动支链两两连接于同一动平台。原动件驱动 4 条运动支链并带动双动平台运动,可实现双动平台整体的 3 个移动自由度。此外,其利用两个动平台之间的相对运动产生末端执行器绕竖直轴的 1 个转动自由度。随后,双动平台型高速并联机器人被逐渐商业化,典型代表有 Adept 公司开发的 Quattro 机器人(见图 1.3(a)和图 1.3(c))。该机器人可实现高速高加速运动,每分钟可抓放上百次生产线物品,其综合性能代表了当前高速并联机器人业界的最高水平。类似的双动平台型高速并联机器人产品还有 Penta Robotics 公司开发的 Veloce 机器人(见图 1.3(b)和图 1.3(d))。

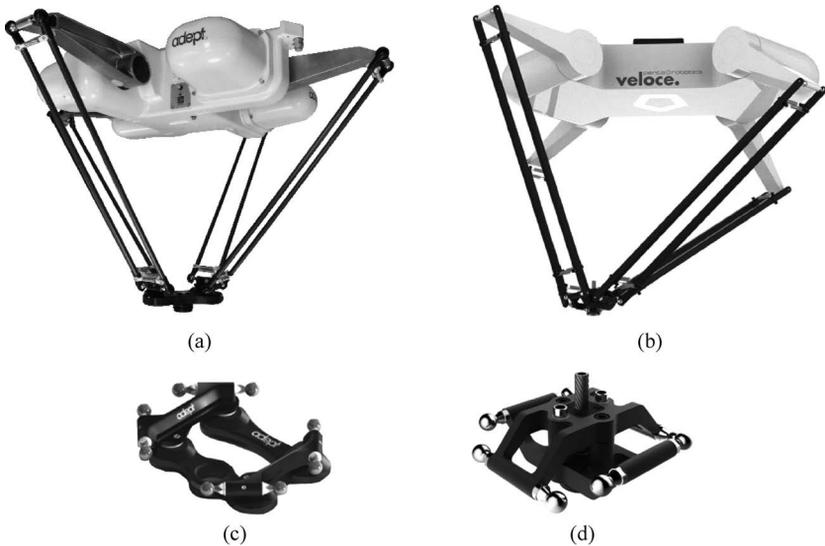


图 1.3 两款商业化的双动平台型高速并联机器人产品

(a) Adept 公司 Quattro 机器人^[24]; (b) Penta Robotics 公司 Veloce 机器人^[25];
(c) Quattro 机器人动平台^[24]; (d) Veloce 机器人动平台^[25]

随着延续多年的人口红利正在下行,我国生产制造业升级转型迫在眉睫。为降低生产成本和改善生产环境,进一步提高企业生产自动化水平势

在必行。然而,国外高速并联机器人公司对机器人进行原理构型垄断和关键技术封锁,产品价格居高不下,同时对本土企业需求痛点把握不准,存在产线柔性不匹配等问题,导致国内大量企业转型无望,被迫采用低产率、高负荷的人工作业模式。该现状严重制约了产业链的运转效率和自动化水平。因此,自主研发高品质本土化的高速并联机器人是提升相关产业自动化水平的当务之急和必由之路。

国内的高速并联机器人研究虽然起步较晚,但也取得了一些优秀的研究成果,这些成果有力地推动了高速并联机器人技术的发展。在高速高加速并联机器人领域,受 H4 并联构型的启发,天津大学黄田教授团队发明并研制了系列化 CrossIV 无随动支链的四自由度高速并联机器人,为此类机器人的本体创新设计及应用做出了贡献^[26-29]。此外,为避免双动平台型高速并联机器人动平台中包含结构复杂的摆角放大机构,清华大学的刘辛军教授团队采用单动平台和改进的平行四边形被动支链方案,独创一款 X4 单动平台型高速并联机器人^[5]。该机器人的末端执行器至少可实现 $\pm 90^\circ$ 的摆角范围,适用于高速大摆角操作任务。此外,大连理工大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学、中国科学院沈阳自动化研究所等高校和科研院所所在相关领域也开展了研究工作。

我国高速高加速并联机器人在产业中的应用尚处于起步阶段,而国际上一些发达国家或地区,如美国、欧洲、日本等已经进入推广应用阶段。在全球新一轮分工影响下,中国制造企业对机器人的需求也在迅速升温,曾经以人海战术支持成为“世界工厂”的中国,已然成为工业机器人的最大应用市场。在轻质、大批量操作需求日益旺盛的轻工领域,高速高加速并联机器人在我国仍有长期的应用发展空间。

除了上述高速高加速并联机器人的需求外,精密电子行业往往需要对不规则来料进行大角度姿态调整的高精度入模装配,此类操作虽仍需实现 3T1R 运动,但对机器人的精度水平提出了更高要求。当前以 Delta 和 Par4 为代表的高速并联机器人多应用于小型、轻质物品的分拣操作,其定位精度较难满足上述高精度需求。另外,在相当一部分食品和日化领域,仍大量存在大载荷桶装或袋装产品的搬运和装箱作业,该工作任务量大,对相关自动化装备需求迫切。此类应用中,规则、有序的重物一般仅需 2 个移动自由度(简称 2T 运动)即可实现操作需求,大大降低了机器人自由度要求,但对于机器人负载能力提出了新的挑战。目前国内外在 3T1R 高精度型高速并联机器人和 2T 高负载型高速并联机器人的需求与应用之间仍存在较大的进步空间。

迄今,国内高速并联机器人研究已经取得了可喜的进展。尽管如此,随着现代批量化生产模式的快速发展,高速并联机器人在高速高加速、高速高精度、高速高负载等领域依然存在广阔的应用需求空间和关键技术创新空间,尤其是机器人本体构型及其性能还有较大的提升潜力。并联机器人的机构创新是机器人和装备创新的根本,性能评价方法是评估机器人性能的重要手段,更是提升机器人性能的必要前提。因此,从并联机器人的设计理论出发,创新设计高速并联机器人原理构型、有效评价并提升机器人的性能是实现高速并联机器人从无到有、从有到优的关键,将有助于从机构源头提升我国本土化高速并联机器人的性能和竞争力,相关课题的研究是本书的核心内容。

1.2 相关领域研究状况综述

根据研究背景所提出的应用需求,本节结合研究高速并联机器人原理构型设计和性能评价方法来创新高性能高速并联机器人的研究目标,将围绕并联机器人设计理论、高速并联机器人构型设计、高速并联机器人性能分析与评价这几部分开展调研,对当前国内外相关领域的研究现状进行综述。在此基础上,本节将挖掘分析需进一步解决的关键科学问题,总结提炼本书的主要研究内容。

1.2.1 并联机器人设计理论

并联机器人由定平台、动平台及连接于两平台之间的至少两条独立驱动的运动链组成^[30]。作为串联机器人机构的互补构型,并联机器人机构因其结构紧凑性高、刚度质量比大、承载能力强及动态特性好等理论特点获得广泛关注^[31-33]。并联机器人的研发过程中所涉及的各阶段工作多涵盖在机器人的设计范畴内,如构型综合、运动学分析、静力学和动力学分析、尺度和驱动系统参数优化、精度设计与保证、轨迹规划和运动控制等。相对于串联机器人机构而言,并联机器人机构的研究虽然起步较晚,但近几十年来汇集了大量的理论和应用成果。清华大学刘辛军教授^[34]曾指出,并联机器人在设计过程中面临“型(构型综合)-性(性能评价)-度(尺度综合)”三大挑战,这同时也是领域内亟须解决的关键难题。

构型综合指给定设计任务后,通过合理配置并联机构中的刚体及刚体间运动副的形式和布局方式,以实现目标运动,解决的是并联机构从“无”到

“有”的问题。并联机器人的原理构型直接决定整机综合性能,发掘有优势的并联机构构型一直是机构学领域的重要目标。

Gough-Stewart 平台是并联机器人领域的里程碑,于 1947 年被 Gough 提出并作为轮胎测试机方案^[35]。1965 年,Stewart 提出具有类似结构特征的飞行模拟器并发表研究论文^[36],由此拉开了并联机器人的研究序幕。继 Gough-Stewart 平台后,诸多并联机器人原理构型被相继提出,典型代表有 3-PRS^[37]、3-RPS^[38]、3-UPS-UP^[39]、2-UPR-SPR^[40]、3-PPaS^[41]和 3-RPa^{*}-RUPUR^[12]等^①。随着工业制造水平和计算机技术的飞速发展,上述并联构型先后被开发成高端机械装备并应用于生产实际中,取得了丰硕的应用成果。其中,3-PRS 构型由德国 DS-Technologie 公司开发成 Spring Z3 并联模块,然后装备于 ECOSPEED 加工中心;3-RPS 构型被天津大学开发成 A3 并联主车头^[42];3-UPS-UP 和 2-UPR-SPR 被先后开发成著名的 Tricept 和 Exechon 混联式加工机器人;3-PPaS 被清华大学开发成混联式加工机床^[43-44];3-RPa^{*}-RUPUR 则是在高速分拣领域取得商业成功的 Delta 机器人原理构型^[45]。值得注意的是,Merlet^[46]曾指出,这些早期的经典构型多源于设计者的机构学才能。在之后的机构学研究中,系统性的并联机构构型综合方法日益受到关注。

早期的并联机构构型综合多采用 Grübler-Kutzbach(G-K)公式法^[47],根据 G-K 自由度计算理论,通过试凑机构的杆件数、运动副数量、运动链阶数等条件,列举出可以实现目标自由度的新机构。Merlet^[48]指出,自由度公式并未考虑运动副的几何分布情况,因此该方法可能会产生许多无效的设计结果。随后,Lie 群及其位移子群理论^[49]、旋量理论^[50]和图论法^[51]被用于构型综合,一定程度上克服了 G-K 公式法的不足。在构型设计方法上,国内众多学者做出了大量卓有成效的贡献。燕山大学黄真教授等^[52-54]基于约束旋量理论创新性地提出了对称的四自由度和五自由度并联机构,解决了并联机构构型综合领域内公认的难题。浙江理工大学李秦川教授等^[55-57]采用 Lie 群及其位移子群理论提出了三自由度 RPR 和 UP 等支链的等效并联机构,此外还在冗余驱动并联机器人构型设计上取得进展^[58-60]。上海交通大学高峰教授等^[61-63]在集合理论的基础上提出一套 G_F 集构型设计方法,借助集合元素表征机器人末端执行器的运动,并通过

① P: 移动副; R: 转动副; S: 球副; U: 虎克铰; Pa 和 Pa^{*}: 关节处为 4 个转动副和 4 个球副的平行四边形机构。

运动特征的合成与求交运算获得并联机构构型,设计出多款并联微操作机器人和重载操作机方案。中国地质大学丁华峰教授等^[64-66]基于图论法提出一种平面机构设计理论,并开发出相应的自动化设计算法。北京航空航天大学于靖军教授等^[67-69]将 Grassmann 线几何理论应用于构型综合领域,发展出一套图谱化机构设计方法。此外,相关的构型设计理论还有改进的 G-K 公式法^[70]、有限旋量法^[71]、位姿特征(POC)法^[72]等。

性能评价指的是通过建立合理的数学或物理模型揭示并联机构本质属性,以实现机构性能的评估,解决并联机构从“有”到“知”的问题。其中,优异的运动学性能更是发挥并联机器人各项潜在优势的必要前提,发掘反映并联机构本质属性的性能评价指标是机构学领域的另一重要目标。

1982年,Salisbury和Craig提出基于Jacobian矩阵的条件数指标^[73],并用于串联机器人的灵巧性评价。随后,Angeles等^[74-76]推广了Jacobian矩阵条件数指标LCI/GCI,用于并联机器人的灵巧性评价。然而上述基于Jacobian矩阵的指标依赖坐标系的选取,指标值大小没有对应的物理意义,Merlet^[77]、Gosselin^[78]和Bowling等^[79]均指出:对于同时具有移动和转动自由度的并联机构,其Jacobian矩阵量纲不统一,使得基于此类矩阵条件数的指标的物理意义混乱。正如Shayya等^[80]提及的,性能评价指标的研究可分为两大类:一类是修正已有指标存在的问题,以完善现有指标的理论体系;另一类则是有针对性地建立新的评价指标。大量工作聚焦在第一类研究,不可否认的是,Jacobian矩阵确实与坐标系的选取密切相关,因此诸多精力被投入到解决Jacobian矩阵量纲不统一所带来的物理意义不明确问题。其中最具代表性的是特征长度法^[81-83],即将Jacobian矩阵中所有具有长度单位的分量都除以一个特征长度,据此获得一个量纲一致的矩阵。尽管特征长度获得应用,但Mansouri^[84]和Rosyid等^[85]认为其几何意义并不直观。Gosselin^[86]在建立串联平面三自由度机构的运动学模型时,采用动平台上不同点的速度信息替代传统的单一点的速度和角速度信息获得了量纲统一的Jacobian矩阵。在该方法的启发下,基于动平台的多点速度法被相继用来构建并联机构的Jacobian矩阵^[87-90]。实际上,此类方法的本质是在机构任务空间寻求矩阵量纲问题的答案,对转动和移动混合驱动的并联机构Jacobian矩阵量纲不统一问题则显得无能为力。

我们由此不禁会产生疑问:基于Jacobian矩阵的条件数指标是否适用于并联机器人的性能评价^[91]?作为串联机器人机构的互补构型,并联机器人机构无论在机构学特性还是在应用场景上均有较大的差异,如果仍然直接采用

源于串联机构的性能评价指标衡量其性能,不免缺乏一定的说服力。众所周知,并联机器人机构的本质功能是在驱动空间和任务空间之间传递运动和力。具体而言,空间六自由度并联机器人机构须在自由度空间内通过支链内力将输入运动传递至动平台生成末端运动并抵抗外载荷;对少自由度并联机器人机构而言,支链内力不仅要传递运动至动平台生成自由度空间所需的运动,而且还要有效限制非自由度空间内的运动(见图 1.4)。Angeles^[92]曾指出,机器人机构的性能评价方法应能够反映机构传递运动和力的能力。对并联机器人机构而言,运动和力的相关作用特性评价显得尤为重要。

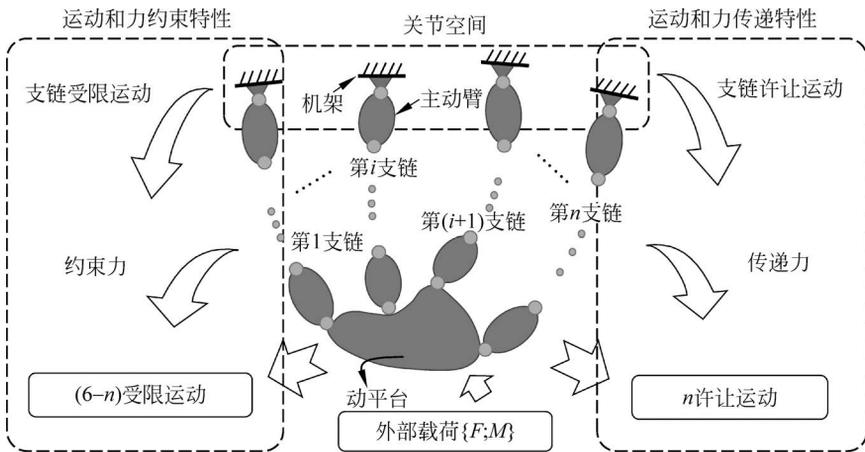


图 1.4 并联机器人的工作机理

并联机构的运动和力传递特性研究可追溯至平面连杆的传动角研究,早在 1932 年,Alt^[93]就已经提出平面四杆机构传动角的概念。随后,传动角的概念作为机构设计的一个重要指标,在机械领域得到应用^[84]。1971 年,Yuan 等^[95]在旋量理论中的虚拟系数概念基础上提出了用于空间七杆机构性能分析的传递因子(transmission factor),该传递因子的取值可以无穷大。1973 年,Sutherland 和 Roth^[96]提出传递力旋量的概念,将机构传递力旋量和输出速度的虚拟系数通过除以其潜在最大值的方式进行了归一化处理,定义了用以分析空间闭环机构的传递指标(transmission index, TI)。1994 年,Tsai 和 Lee^[97]进一步考虑到闭环机构输入端的操作度,结合机构输出端的传递性提出一套较为完整的传递性评价方法。2007 年,Chen 和 Angeles^[98]针对具有确定输出运动的运动链给出了传递力旋量求解方法,在此基础上进一步拓展了 Sutherland 和 Roth 的方法提出广义传递指标

(generalized transmission index, GTI)。然而,上述研究均局限于单闭环运动链,尚不能直接应用于多闭环并联机构性能分析和评价。其实早在 1995 年, Takeda 等^[99-100]就开始关注 n 自由度空间并联机器人的传递特性研究,通过求解 n 条支链末端铰链点的速度和力的夹角余弦的最小值来评价空间并联机器人的传递特性。然而,该研究仅聚焦于并联机构的输出端,未考虑机构输入端的特性,因此尚不能全面反映并联机器人的运动和力传递特性。2008 年,受四杆机构传动角的启发, Liu 等^[101-102]发现平面机构输入端的运动和力作用线夹角是影响机构运动/力传递特性的一个重要因素,为此,提出逆传动角的概念并将先前的传动角定义成正传动角,在此基础上,利用正传动角或逆传动角的正弦值定义局部传递指标分析平面并联机构的传递特性。随后, Wu 等^[103]通过引入旋量理论将基于正、逆传动角的传递指标推广到空间 5R 并联机构,定义了输入传递指标(input transmission index, ITI)和输出传递指标(output transmission index, OTI),用以分别评价空间 5R 并联机构的运动和力的输入与输出传递特性,并将输入传递指标与输出传递指标的较小值定义为局部传递指标(local transmission index, LTI)用以综合评价并联机构在给定位形下的运动和力传递特性。同年, Wang 等^[104]进一步完善了上述指标体系,探讨了一般性的非冗余并联机器人的运动和力传递性能分析与评价,该工作获得浙江理工大学李秦川教授的评价:建立了一套新的局部传递指标,是评价非冗余并联机构运动和力传递性能的第一个通用性指标^[105]。

运动和力约束特性的研究同样具有重要的学术价值和工程意义。韩国首尔国立大学 Park^[106]团队关于 3-UPU 并联机器人的研究实例给出了生动的启示。研究之初,团队按照当时的理论设计了目标自由度为三移动的 3-UPU 并联机器人,并给出精确的自由度分析结果来确保该机器人的自由度特性。然而,团队成员在对该机器人进行硬件平台测试时却惊讶地发现:在任意位形下,当驱动副锁定时,机器人都会产生多余自由度并伴有较大的位姿偏移。上述现象一经披露,立即吸引了大量机构学与机器人学同行的关注。Zlatanov 等^[107]首次用约束奇异的概念解释上述现象,随后近 10 年间,领域内对并联机器人的约束特性认知仅限于约束奇异,未有显著进展。Merlet^[77]指出:过去由于未考虑机构中约束的作用,少自由度并联机构中对很多问题的分析可能存在缺陷。如何有效开展运动和力约束特性研究面临两个难点:①如何精准地辨识并联机器人的约束奇异位形;②如何有效地度量并联机器人距离约束奇异位形的远近。Liu 等^[108]在运动和力传递

特性指标的基础上提出约束传递指标 (constraint transmission index, CTD), 并综合输入传递指标 ITI、输出传递指标 OTI 和约束传递指标 CTI 建立了一套非冗余并联机器人性能评价方法。约束力不仅与输出端受限运动相互作用, 同时也应该对输入端受限运动有一定的约束效果。为此, Liu 等^[109] 进一步提出输入约束指标 (input constraint index, ICI) 来评价少自由度并联机器人机构约束力对输入端运动的约束效果, 与此同时, 定义输出约束指标 (output constraint index, OCI) 代替约束传递指标来评价约束力对输出端受限运动的约束效果, 并基于输入约束指标与输出约束指标定义了整体传递指标 (total constraint index, TCI), 用以综合评价并联机构在给定位形下的运动和力约束特性。综合上述运动和力传递与约束特性指标体系, 最终形成一套并联机器人运动和力传递与约束特性评价方法^[110]。此外, 相关领域还汇集了一批有意义的研究工作^[105, 111-117]。

尺度综合指基于并联机器人机构构型和评价指标, 建立优化问题, 以获得指导并联机器人制造的最优尺度参数, 解决并联机构从“知”到“用”的问题。经典的尺度综合方法有目标函数法^[118] 和性能图谱法^[119]。随着计算机技术的飞速发展, 近年来涌现出一批智能优化算法^[120], 如粒子群算法、遗传算法和人工神经网络等, 其中部分此类优化算法在并联机器人尺度综合领域已获得应用^[121-122]。

综上所述, 并联机器人机构的构型综合和性能评价是并联机器人设计过程中的基础核心理论, 直接决定了并联机器人的本质属性。为此, 本书将从构型综合的角度出发设计高速并联机器人原理构型; 在此基础上, 重点研究基于运动和力作用特性的性能评价方法, 并将其应用于高速并联机器人的设计和开发。

1.2.2 高速并联机器人构型设计

具有与 SCARA 机器人相同运动特性的并联机器人通常也被称为 Schönflies 运动生成器^①。Angeles^[123] 指出, 随着被 Freudenstein 称为“珠穆朗玛峰”的 7R 机构的逆运动学问题和 Gough-Stewart 平台的正运动学问题得到基本解决, 四自由度高速并联机器人的设计已经成为机构学领域的新挑战。

针对 3T1R 四自由度并联机器人构型的设计问题, 相关专家学者开展

^① Schönflies-motion generator(SMG)。