

第1章

绪 论

机器人学(robotics)是人类进入 20 世纪以来具有代表性的多学科交叉的技术领域,是正在蓬勃发展的重要科技前沿之一,其涉及了机构学、机械动力学、电子学、传感技术、控制工程、计算机科学、模式识别、人工智能、仿生学等学科领域。其中,机器人运动学(kinematics)和动力学(dynamics)是机器人科学研究与应用开发的基础。

20 世纪初,美国 Unimation 公司推出了第一台工业机器人 Unimate(图 1-1),标志着第一代机器人(即操纵型机器人)的诞生。接着,第二代机器人(即自动型机器人)和第三代机器人(即智能型机器人)相继出现并投入应用。如今,机器人已经广泛应用于汽车、电子、核电等工业领域,并迅速拓展到娱乐服务、医疗卫生、采掘建筑、农牧林渔、航天军工等行业,特别是在海底开发、宇宙探测等人类极限能力以外的环境中,也越来越多地出现了机器人的身影(如图 1-2 所示“祝融”号火星车)。近年来,机器人的研发和应用逐渐成为世界各国科技工作者以及相关企事业单位的重要研究课题与科技攻关内容(如图 1-3 所示的 Boston Dynamics 机器人和图 1-4 所示的 HAL-5 助力机器人),毋庸置疑,机器人的智能化程度反映了一个国家科学技术实力的强弱,机器人的应用状况反映了一个国家工业自动化水平的高低。

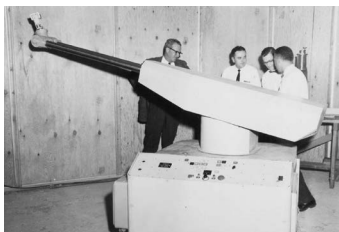


图 1-1 Unimate 机器人

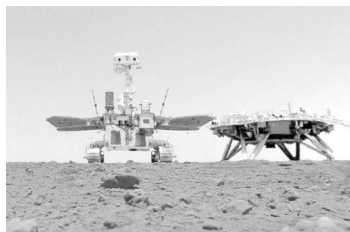


图 1-2 “祝融”号火星车



图 1-3 Boston Dynamics 机器人



图 1-4 HAL-5 助力机器人

1.1 串联机器人与并联机器人

根据组成机器人机械结构的连接形式,机器人一般可以分为串联机器人(serial manipulator/serial robot)(见图 1-5,即组成机器人的机械结构以串联形式连接)、并联机器人(parallel manipulator)(见图 1-6,即组成机器人的机械结构为并联形式连接)和串并混联机器人(serial-parallel manipulator)。串联机器人一般由基座、腰部(或臂部)、大臂、小臂、腕部和手部等构成。并联机器人的机械结构则为并联机构(parallel mechanism,简称 PM),这里的并联机构是指运动平台与固定平台之间由两个或两个以上分支相连,机构具有两个或两个以上自由度,且以驱动器分布在不同的支路上(以并联方式驱动)的机构。

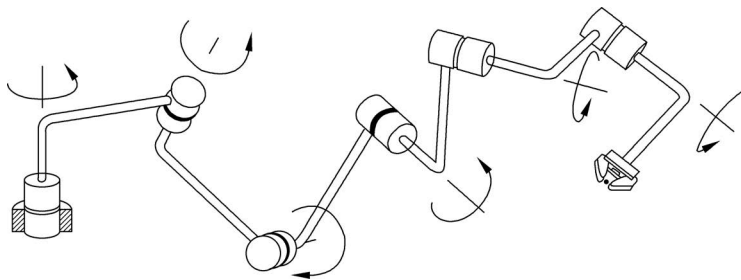


图 1-5 串联机器人

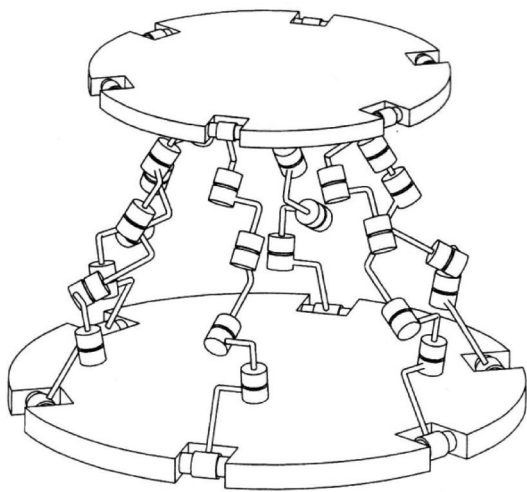


图 1-6 并联机器人

串联机器人也称机械臂或工业机器人,是较早开发与应用于工业领域的机器人,现已被广泛应用于工业、医疗、服务业、军事、太空等领域,主要用于完成诸如焊接、喷涂、切割、加工、搬运、分拣、装配、包装、码垛等众多工业操作任务以及其他特殊场合的操作动作。比较典型的串联机器人有 PUMA 机器人、SCARA 机器人和 Stanford 机器人,等等。

并联机器人或并联机构的构想最早可追溯到 1895 年,数学家 Cauchy 开始研究一种“用关节连接的八面体”,这是目前知道的最早的并联机构。并联机构的研究最早可追溯到 20 世纪。1931 年 Gwinnett 在其专利中提出了一种基于球面并联机构的娱乐装置(图 1-7)。1938 年 Pollard 提出采用并联机构(图 1-8)为汽车喷漆。1949 年,Gough 提出用一种并联机构的机器(图 1-9,也称为 Stewart 平台机构)检测轮胎,这是真正得到运用的并联机构。1962 年,美国高级工程师 Cappel 独立发明了类似于 Gough 的并联机构并申请了专利(图 1-10),并于 1964 年将此机构的专利授权于飞行模拟器制造公司 Link,从而生产了世界上首台商用的飞行模拟器(图 1-11)。1965 年英国高级工程师 Stewart 提出了用于飞行模拟器的六自由度并联机构——Stewart 并联机构(图 1-12),它由一个三角形的运动平台、六个液压驱动缸等组成,可以模拟六个自由度的空间运动。Stewart 设计的平台显然与我们现在所熟知的 Gough-Stewart 并联机构(图 1-13,也称 Gough-Stewart 机构或 Stewart 机构)完全不同。从结构上看,Stewart 机构的动平台通过六个相同的独立分支与定平台相连接,每个分支中含有一个连接动平台的球铰、一个移动副和一个连接定平台的球铰,为避免绕两个球铰中心连线的自转运动,通常也用一个万向铰来代替其中一个球铰。自从 1978 年澳大利亚著名机构学教授 Hunt 提出把六自由度的 Stewart 机构作为机器人机构以来,并联机器人技术得到了广泛关注。

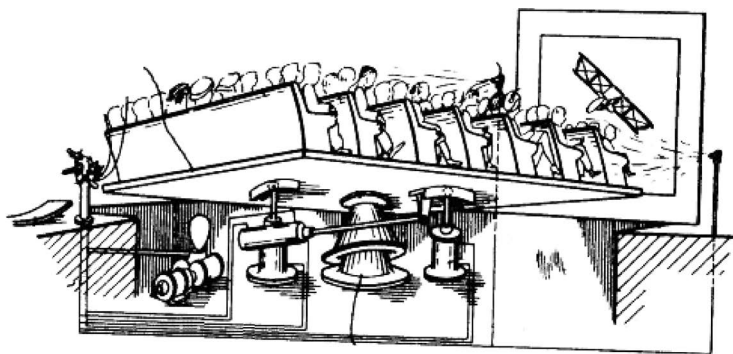


图 1-7 基于球面并联机构的娱乐装置

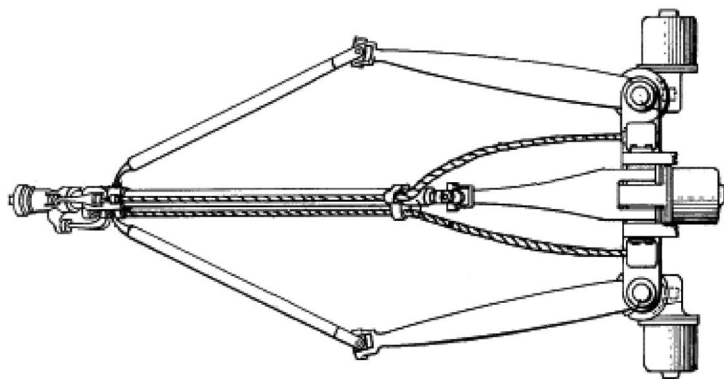


图 1-8 Pollard 提出的并联机构

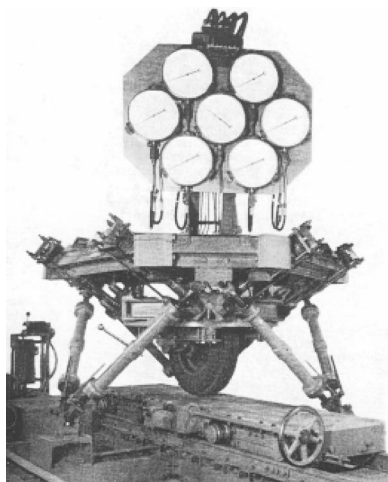


图 1-9 Gough 并联机构

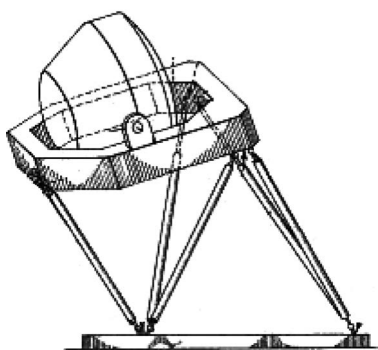


图 1-10 Cappel 并联机构

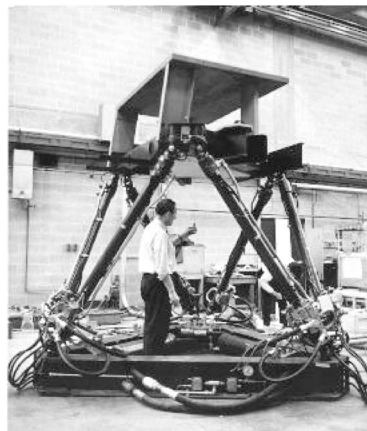


图 1-11 首台商用飞行模拟器

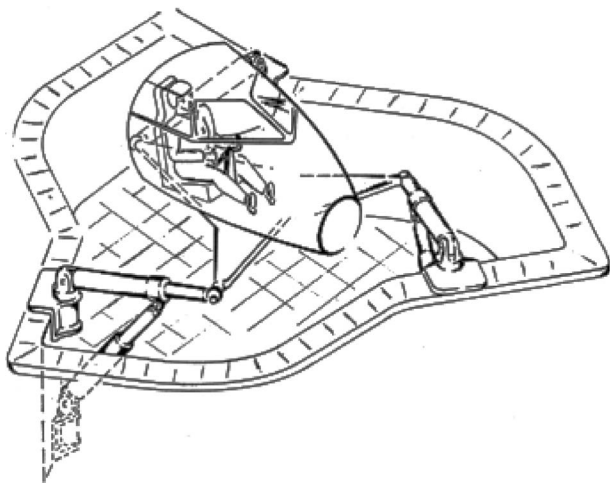


图 1-12 Stewart 并联机构

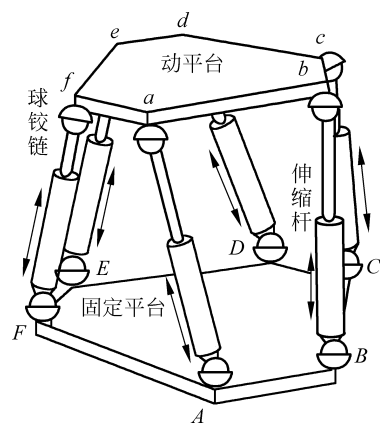


图 1-13 Gough-Stewart 并联机构

由于并联机器人特殊的结构形式,使得并联机器人相比于串联机器人,具有以下显著优点:第一,并联机器人的累积误差小,运动精度高;第二,并联机器人的驱动器固定于或靠近基座,转动惯量小;第三,并联机器人中的构件以并联方式运动,结构刚度大,并且不存在悬臂梁式负载;第四,并联机器人的运动学反解简单,有利于计算机实时控制。因此,并联机器人适用于高刚度、高精度、高速度、高加速度以及良好动态特性(高可操作性和无须较大工作空间)的场合,如航空航天、智能装备、医疗康养等领域。例如 Delta 并联机器人(图 1-14)就是较为典型的并联机器人之一。迄今为止,并联机器人的应用涉及运动模拟器(如图 1-15 所示的飞行模拟器)、精密数控机床(这类机床又称为并联机床或虚拟轴机床,即 parallel kinematic machine,PKM,如图 1-16 所示的 VARIAX 虚拟轴机床)、微动机器人(如图 1-17 所示的 Nonapod 微动并联机器人)、医用器械(如图 1-18 所示的医用 Delta 机器人)、光学仪器(如图 1-19 所示的灵巧眼)、空间对接机构(如图 1-20 所示的飞船对接装置)、集成电路加工、高速自动化生产线等诸多现代高、精、尖技术领域以及需要被隔离的复杂环境和军工航天业。



图 1-14 Delta 并联机器人



图 1-15 飞行模拟器

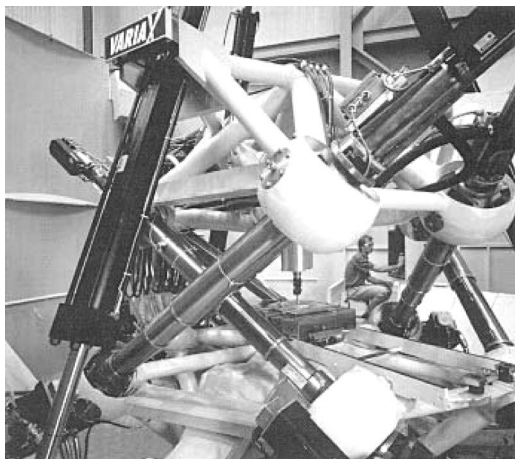


图 1-16 VARIAX 虚拟轴机床



图 1-17 Nonapod 微动并联机器人



图 1-18 洪堡大学的医用 Delta 机器人



图 1-19 灵巧眼

另外,20 世纪 80 年代,美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)研发了第一台并联柔索机器人 Robocrane,其实验装置如图 1-21 所示,从而进一步扩展了并联机器人的类型及应用领域,开启了并联机器人研究和应用的新方向。

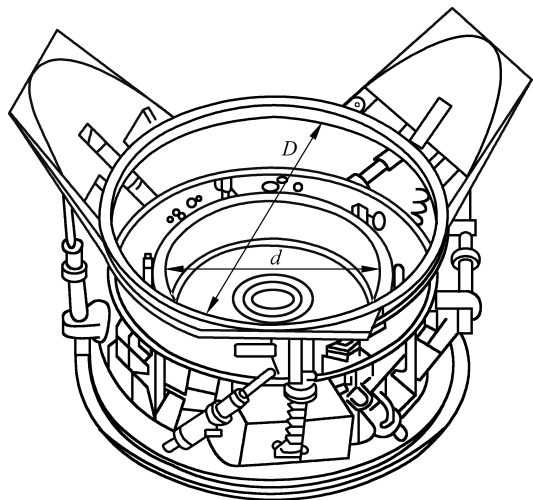


图 1-20 飞船对接装置

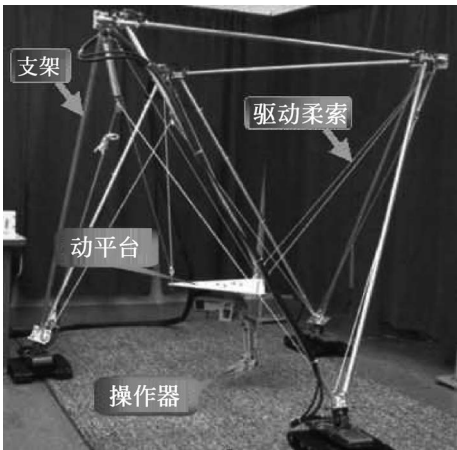


图 1-21 Robocrane 并联柔索机器人实验装置

大多数六自由度并联机器人的机构都可以根据 Stewart 平台的基本结构形式进行设计。然而,在许多场合(如焊接、医疗、切削加工、搬运等)应用的机器人往往只需要 2~5 个自由度就可以满足使用要求。因此,20 世纪 80 年代以来,世界各国的机构学学者先后开展了少自由度并联机器人的研究,特别是三自由度并联机器人成为机器人技术研究的热点之一。少自由度并联机器人相较于六自由度并联机器人的主要优点表现为:机构的复杂度和成本较低、运动学和动力学模型简单、控制容易等,像著名的 Delta 并联机器人、3-RRR 平面并联机器人(图 1-22)、3-RPS 并联机器人(图 1-23)等,都是应用较为成功的少自由度并联机器人。一般来说,对称的、分支不再含有闭环的少自由度并联机构才会具有最典型的性

质,如果不特别要求各向同性,或仅针对某种具体情况而言,非对称机构可能更合适一些,如 Tricept 并联机器人(图 1-24)等。目前,少自由度并联机器人的创新研究和产品开发方兴未艾,大量的研究成果正逐步应用于生产生活中,取得了良好的经济价值和社会效益。

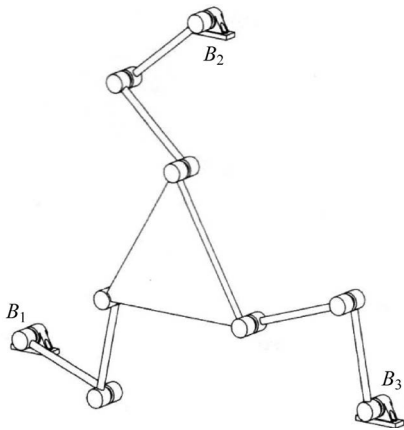


图 1-22 3-RRR 平面并联机器人

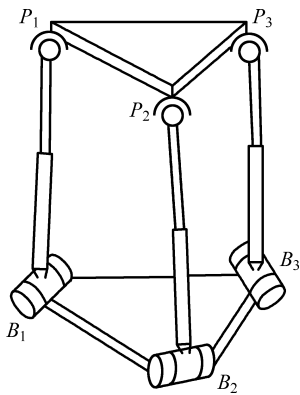


图 1-23 3-RPS 并联机器人

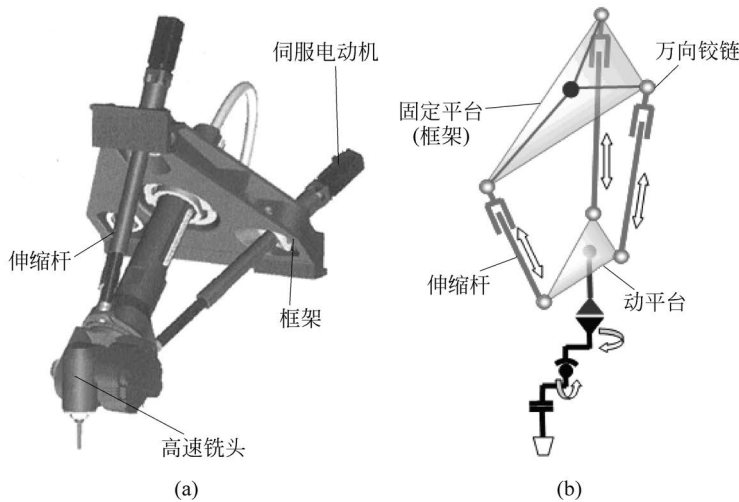


图 1-24 Tricept 并联机器人

(a) 实物图; (b) 机构简图(不含被动支链)

1.2 柔性机器人

随着现代机械装备不断向轻量化、低能耗和高效率等方向发展,高速、高精度和高承载能力的机器人相继出现。在这种情况下,把机器人的机械结构当作刚性系统处理,已不能满足其运动学和动力学分析的需要,这就产生了考虑构件弹性变形的柔性机器人。柔性机器人中构件的弹性变形不可避免地带来两方面的影响:一是机器人末端轨迹偏离理想轨迹较大,导致运动失真;二是机器人发生弹性振动,使其动态性能降低。所以,对于具有高精

度和高性能要求的并联机器人应用场合,就必须研究计入构件弹性变形时的机器人运动学和动力学问题。

诚然,机器人中构件的弹性变形并非只是一种不利因素,如果能充分认识并发挥其特性,在机器人设计和运动控制时充分考虑并利用构件的弹性变形,柔性机器人将会在结构、重量、能耗、灵活性、响应速度、综合费用等方面显示出巨大优势。目前,柔性机器人技术主要应用于微外科手术操作机、自动化去毛刺柔性机械手、磨削机器人、油漆机器人以及空间站的大型机械臂等领域。

1.3 机构学的发展阶段与机器人机构学的研究内容

1.3.1 机构学的发展阶段

机械的使用减轻或代替了人类的劳动,改善了人类的生活条件,促进了人类社会的进步与发展。机构学的发展基本上经历了三个飞跃阶段。

第一阶段,欧洲文艺复兴和18世纪的工业革命,导致了机械工业的空前发展。这时迫切需要机械理论指导生产的发展,德国人勒洛(Reuleaux)于1875年出版的《机械运动学》(*Kinematics of Machinery: Outlines of A Theory of Machines*),奠定了机构学的基础。同时期的俄国人切比雪夫(Chebyshev)应用代数法解决了机构的近似计算问题,使得机构学逐渐成为一门独立的技术基础学科。

第二阶段,第二次世界大战结束后,工业生产的恢复和电子计算机的研制成功,发展和完善了机构学中的分析方法与综合方法。诸如平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、间歇运动机构等机构的分析与设计理论,机械平衡、机械动力学响应等传统机构学内容基本发展成熟。

第三阶段,20世纪中后期以来,随着计算机技术、自动控制技术和传感技术的发展,促进了工业自动化和机器人技术的迅速崛起,从而带动了机构学的飞速发展。空间闭链机构、空间开链机构的理论研究基本成熟,考虑动力学因素的机构综合研究得到了发展。传统机构学与仿生学、生物力学、电磁学、控制理论相结合,使得机构学的内涵不断扩大。微机械、生物机械以及机械电子的结合为机构学的发展带来了新机遇、新挑战。

总体来讲,机构学领域的研究内容主要包括三个方面:一是机构的构型原理与新机构的发明创造;二是机构的运动学与动力学分析;三是基于运动学与动力学性能的机构设计。这三个方面的研究内容,在机器人机构学的研究中尤为突出。

1.3.2 机器人机构学的研究内容

现代机构学发展的重要标志之一就是机器人机构学的诞生。机器人机构学的研究对象主要是机器人的机械系统,也是机器人实现操作任务的主体。机器人机构学是一个庞大的体系,它包括机器人结构学、工作空间(working space)、奇异位形(singular configuration)、轨迹规划(path planing)、机器人运动学和机器人动力学等内容。

机器人机构学已成为机构学中最活跃的一个分支,机器人机构学的研究与发展是现代机构学研究与发展的主要组成部分。例如,由研究串联机器人机构发展到研究并联机器人机构;由研究刚性机器人机构发展到研究含有柔性构件或柔性体的机器人机构;由研究全

自由度/全驱动的机器人机构发展到研究少自由度机器人机构、欠驱动机器人机构以及冗余机器人机构；由研究宏机器人机构发展到研究微机器人机构；等等。总之，机器人机构学的研究为机构学的发展注入了新动力，机器人机构学也必将是机构学的主要研究内容和主要发展方向。

概括来讲，机器人机构学的主要研究内容为机器人的结构分析与综合、机器人运动学、机器人动力学、性能评价指标以及机器人的设计理论等。随着现代机器人向着高速、高精度、高负载、轻质量、低能耗等方向的迅猛发展，对机器人动态特性的认知必将成为决定其产品性能的关键问题，因此，开展机器人动力学研究的重要性也日益凸显。

1.3.3 机器人动力学

机器人动力学的主要研究内容包括惯性力计算、受力分析、动力平衡、动力学建模、动态仿真、动态参数识别和弹性动力分析等几个方面。进行机器人动力学研究的常用方法有：牛顿-欧拉(Newton-Euler)法、拉格朗日(Lagrange)法、达朗贝尔(D'Alembert)原理、虚功原理、哈密顿(Hamilton)原理、凯恩(Kane)方程、旋量(对偶数)法和影响系数法等。随着科技的进步和机器人研究的深入，一些如李群李代数、微分几何、分析力学和神经网络等新理论、新方法，也逐步应用到了机器人运动学和动力学的分析之中，极大扩展了机器人动力学研究方法的多样性。

机器人动力学有正反两类问题。动力学正问题(direct dynamics)是指已知操作机各关节提供的广义驱动力的变化规律，求解机器人手部或操作端的运动轨迹以及轨迹上各点的速度和加速度；动力学反问题(inverse dynamics)是指已知机器人手部或操作端的运动路径和路径上各点的速度、加速度，求解各驱动器应施加的广义驱动力的变化规律。机器人动力学正问题一般要用数值方法求解微分方程，在计算机上求解机器人动力学正问题的过程也称为机器人动态仿真；动力学反问题是机器人系统进行动态控制时，开展机器人控制策略与算法设计的依据，具有更为重要的实际意义。

1. 刚体机器人动力学

在串联机器人问世不久，人们就随即开始了串联机器人动力学研究。与串联机器人动力学相比，并联机器人动力学的研究更为困难或烦琐，这主要源于并联机器人自身的复杂性。一般来讲，并联机器人动力学模型是一个多自由度、多变量、高度非线性、多参数强耦合的复杂微分方程或方程组，其推导和求解都具有较大难度。目前，在机器人动力学分析，被广泛应用的软件有 Matlab 软件、ADAMS 软件等，而且国内外学者在刚体串、并联机器人动力学方面也都已取得了较为丰硕的研究成果。

2. 柔性机器人动力学

柔性机器人动力学研究的内容主要包括运动误差分析、振动特性研究、构件应力计算、驱动力/力矩的确定、动力规划、动态仿真、结构优化、振动控制及抑振等方面。

由于柔性机器人系统中的柔/弹性构件的弹性变形在空间上连续存在，因而柔/弹性构件是分布参数系统，具有较小的刚度系数和结构阻尼，细长构件接近于欧拉-伯努利梁(Euler-Bernoulli beam)，而短粗构件则接近于铁摩辛柯梁(Timoshenko beam)。整个柔性机器人系统则是由驱动器等集中参量部分与柔/弹性构件分布参量部分组成的混合系统，

因而描述其运动规律的方程是偏微分方程。除极个别情况外,很难得到精确解。所以,一般不将其作为分布参数系统处理,而是设法将偏微分方程化成常微分方程,用常微分方程来求解系统构件的弹性变形。

1) 建模方法

常用的建模离散化方法有:集中质量法(lumped mass method)、有限元法(finite element method)、有限段法(finite segment method)、假设模态法(assumed mode method)等。

集中质量法将柔性体的分布质量按一定的简化原则聚缩于若干离散点上,形成集中质量和集中转动惯量,在这些集中质量之间用无质量的弹性元件连接,用这些点处的有限自由度代替连续弹性体的无限自由度。集中质量法对密度和质量不均匀的物体很有效。按集中质量法建立起来的动力学模型是常微分方程,对质量分布形式简化较多,精确度较低。

有限元法将具有无限自由度的连续弹性体理想化为有限自由度的单元集合体,使问题简化为适合于数值解法的结构型问题。这种方法以结点(或节点)的弹性位移作为广义坐标,在结点之间建立起关于结点坐标的弹性位移场或型函数,并以此假设为基础导出单元的动力学方程,经过单元动力学方程的装配得到系统动力学方程。在单元划分数目相同的情况下,有限元法模型比集中参数模型更精确。随着有限元理论和技术的发展,现已提供了多种平面和空间单元,可模拟任意复杂形状的构件。

有限段法是将具有无限自由度的连续体离散为有限刚性梁段,将系统的柔性等效至梁段结点。它的本质在于将柔体系统离散化为多刚体-铰链-弹簧及阻尼器系统,再利用建立多刚体系统动力学方程的矩阵方法导出离散化模型的非线性系统动力学方程。此方法的最大特点是无须对梁结构的变形场进行假设,也不受小变形的限制,容易计入几何非线性影响,比较适合于含细长构件的柔性机器人系统。

假设模态法以瑞利-里茨(Rayleigh-Ritz)法为基础,采用模态截断技术舍去柔性体的高阶模态部分,再利用拉格朗日方程、哈密顿原理等建模方法得到离散化的动力学方程。假设模态法的优点为建立的动力学方程规模小,计算效率高,有利于系统仿真与实时控制。模态函数的选取有约束模态法和非约束模态法两种。约束模态法采用瞬时结构假定,忽略刚体惯性力及科氏力的影响,根据梁的自由振动方程确定模态函数。非约束模态法以柔性机器人的振动方程为基础,直接由几何、物理边界条件推导出系统的频率方程及相应的模态函数。约束模态法较简单,但精度不如非约束模态法,而非约束模态法计算复杂,很难用于多构件系统。

2) 建模原理

由于柔性机器人本身所具有的高度非线性、强耦合和时变等特点,建立其精确的动力学模型便是柔性机器人动力学研究的关键点。目前,柔性机器人动力学的建模原理主要有两类,即矢量力学方法与分析力学方法。矢量动力学的基础是牛顿运动定律的直接引用,它的注意力集中在与系统的个别部分相联系的力和运动以及各部分之间的相互作用。而分析动力学则更多地把系统看作一个整体并且利用如动能、势能之类的纯量来描述函数,得到运动方程。主要的建模原理有牛顿-欧拉法、拉格朗日方程、哈密顿原理和凯恩方程等。

牛顿-欧拉法描述了柔性机械系统完整的受力关系,物理意义明确,易于形成递推形式的动力学方程,但方程数量大,包含系统的内力项,约束力或力矩的消除较为困难。