

机器人机械设计和分析

费仁元 张慧慧 编著

北京工业大学出版社



机器人机械设计和分析

费仁元 张慧慧 编著

北京工业大学出版社

内 容 简 介

本书从建立简化的平面刚体机器人模型出发,在介绍基本概念的基础上,分析了各类机器人的结构特点,并通过引入第三个运动自由度和关节变形,将二维模型中得出的结论推广到三维的真实(非刚性)机器人;详细分析了操作机的结构动态特性和在设计阶段提高动态特性的途径;着重介绍了构成机器人机械系统的典型零部件以及常见器件在机器人机械系统应用中的优缺点。

本书体系结构系统完整,既有一定的理论性,又有很强的实用性,可作为大学本科生、研究生教材,也可作为从事机器人研究和设计的工程技术人员的参考书。

机器人机械设计和分析

费仁元 张慧慧 编著

*

北京工业大学出版社出版发行

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

*

1998年9月第1版 1998年9月第1次印刷

850×1168毫米 32开本 10.625印张 264千字

印数 1~2000册

ISBN 7-5639-0494-8/T·51

定价: 14.00元

前 言

工业机器人^①在发达国家已经作为“钢领阶层”出现在生产线上，应用的范围遍及工业、科技和国防的各个领域，对国民经济和人民生活产生了越来越大的影响。专家预言，到本世纪末，一个国家如不拥有一定数量的机器人，就不再具备产品进行国际竞争的工业基础了。在技术方面，随着计算机和传感技术的发展，机器人已从程序控制型的简单机器人发展成为具有一定感知、逻辑判断和决策能力的智能机器人。这些发展反过来又对机器人的使用性能和动态特性提出了更高标准的要求。为适应机器人技术的发展，机器人学作为一门新兴的学科已经形成。

机器人学包括机器人的设计、制造和应用三大方面。作为综合性的学科，它涉及到机械、电气、自动控制、传感器等各个高技术领域。机器人的机械系统作为机器人的主要组成部分，它的使用性能和动态特性对于整体的性能和可靠应用是至关重要的。然而相对于其它部分，在机器人学发展的过程中对机械系统的研究却最不完善，不同专业背景的设计者往往从不同的角度去理解和处理机器人的机械设计问题。近年来，随着电子元件集成度的提高和计算机价格的下降，机器人的成本越来越多地取决于机械系统的成本。所以，对机器人机械系统特点的研究和独特设计方法的总结已经成为机器人学进一步发展的需要。80年代末，有关机器人机械系统的设计和分析已经成为机器人学中独立和重要的分支了。

① 鉴于本书主要论述有关工业机器人的问题，故以下简称机器人。

在我国,工业机器人的应用虽然起步较晚,但发展很快。目前,国内机器人已经从仿制引进阶段,逐渐过渡到自行设计和开发阶段了。许多学者已在众多的论文和著作中报告了这方面的进展。本书编写的目的希望能从机器人机械设计和分析的角度为读者提供一本较为系统和完整的指导性参考书,从而对我国机器人的应用和推广作出贡献。

本书从建立简化的平面刚体机器人模型出发,从第一章到第四章,在介绍基本概念的基础上,分析了各类机器人的结构特点和涉及运动学、动力学的一些重要问题,并通过引入第三个运动自由度和关节变形,将二维模型中得出的结论推广到三维的真实(非刚性)机器人。第五章详细地分析了操作机的结构动态特性和在设计阶段提高动态特性的途径。第六章到第八章着重介绍了构成机器人机械系统的典型零部件,如驱动器、手腕、关节以及其它常见的元器件在机器人机械系统应用中的优缺点。

本书在编写过程中得到机床研究所副总工程师、中国机器人协会研究部顾瑞龙教授,北京航空航天大学机器人研究所副所长、博士生导师宗光华教授,中国生产工程学会秘书长、北京机床研究所一分所副所长遇立基高级工程师,清华大学精密仪器系俞海清教授的指导和推荐,并由于北京工业大学教材建设委员会、机械工程学系及出版社的支持才得以顺利出版,编者在此一并表示衷心感谢。

限于编著者的水平,书中缺点和错误在所难免,欢迎读者和专家不吝指教。

编 者

1997年10月于北京工业大学

目 录

前 言

第一章 工业机器人机械系统的特点	(1)
§ 1.1 工业机器人的组成和结构特点	(1)
§ 1.2 基本参数和特性	(6)
第二章 工业机器人的平面模型	(21)
§ 2.1 平面直角坐标模型	(26)
§ 2.2 平面极坐标模型	(31)
§ 2.3 平面关节模型	(36)
第三章 平面刚体模型的受力分析	(46)
§ 3.1 有势力系的拉格朗日方程	(48)
§ 3.2 直角坐标和极坐标模型的受力分析	(57)
§ 3.3 关节模型的受力分析	(71)
§ 3.4 臂杆平衡技术	(86)
第四章 二维关节机器人模型的推广	(93)
§ 4.1 刚性三维关节机器人的受力分析	(93)
§ 4.2 非刚性关节机器人的受力分析	(104)
§ 4.3 平行连杆机构模型	(114)
第五章 机器人手臂的结构动态特性	(127)
§ 5.1 材料的选择	(128)
§ 5.2 刚度与载荷的关系	(133)
§ 5.3 截面形状的影响	(135)
§ 5.4 负载—变形特性	(138)

§ 5.5	关节的接触刚度	(139)
§ 5.6	强度—刚度的转换	(147)
§ 5.7	机器人系统的刚度分析	(161)
§ 5.8	提高机器人手臂阻尼的方法	(187)
第六章	驱动系统	(190)
§ 6.1	各类驱动系统的特点	(190)
§ 6.2	液压驱动系统	(192)
§ 6.3	气动驱动系统	(215)
§ 6.4	电动驱动系统	(234)
第七章	关节和传动元件	(249)
§ 7.1	平移关节的导轨	(249)
§ 7.2	转动关节轴承	(264)
§ 7.3	小位移运动机构	(267)
§ 7.4	机器人的机械传动机构	(274)
§ 7.5	联轴器与无键联接	(306)
第八章	手腕结构分析	(313)
§ 8.1	手腕的结构和特点	(314)
§ 8.2	典型腕关节传动	(322)
参考文献		(331)

第一章 工业机器人机械系统的特点

§ 1.1 工业机器人的组成和结构特点

1.1.1 工业机器人的组成

工业机器人的组成一般可分成三大部分，即机械系统、控制系统和驱动系统，如图 1-1 所示。机械系统按控制系统的指令进行运动，动力由驱动系统提供。

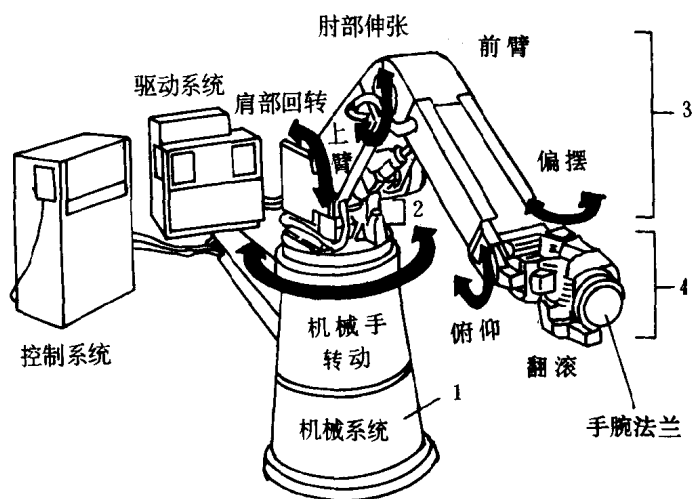


图 1-1 工业机器人的组成

1—基座；2—腰部；3—臂部；4—腕部

机械系统又叫操作机 (Manipulator)，是工业机器人的执行机构。它又可分成基座、腰部、臂部、腕部和手部（未在图 1-1 中画

出),分析时,一般将操作机简化成由连杆、关节和末端执行件组成(参见图 2-1)。连杆首尾相接,通过关节相联,构成一个开式连杆系。在连杆系的开端安装末端执行件。

末端执行件即手部,是操作机直接参与工作的部分。手部可以是各种夹持器,也可以是各种工具,如焊枪、喷头等。操作时,

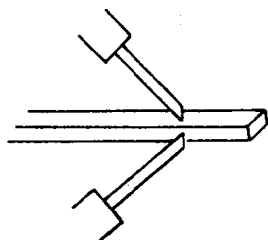


图 1-2 焊接时座标相同,取向不同对臂杆姿态的要求

往往要求末端执行件不仅能达到指定的位置,而且要有正确的取向。为了完成所要求的操作,有时即使臂端的位置座标几乎完全相同,也仍可能因为要求末端执行件有不同的取向,而使臂部采取完全不同的姿态,图 1-2 焊接操作便是这样的例子。

组成工业机器人操作机的连杆和关节,按其功能可以分成两类:一类是组成操作机手臂的长连杆(图 2-1),也称臂杆,产生主运动,是操作机的位置机构。另一类是组成手腕的短连杆,它实际上是一组位于臂杆端部的关节组(见图 8-2),是操作机的姿态机构,确定了末端执行件在空间的方向。

控制系统实现对操作机的控制。它通过控制各关节运动坐标的驱动器,使各臂杆端点按要求的轨迹、速度和加速度运动,并通过协调各臂杆的运动,或使末端执行件按指定的路径运动,或使其到达空间指定的位置,并满足正确的取向要求。为完成指定的作业,在工作过程中,控制系统还必须实现操作机和周边设备间的信息交流和工作协调。

控制系统一般由多 CPU 的单级计算机或两级计算机组成。按照所执行的功能,控制系统的计算机通常可分成两个部分:一部分是控制计算机,它在系统软件的支持下实现对应用软件的编

译，相邻基点间的插补运算，各点的运动和动力学综合，对操作机和作业对象的信息采集处理，以及对整个系统的故障监测诊断和预报。另一部分是伺服控制器，它接受位移、速度及驱动的命令，实现对臂杆的加减速和闭环伺服控制。

早期的非伺服型机器人也有使用挡块限位、微动开关发信或者采用可编程控制器实现刚性控制的。

操作机的驱动系统包括驱动器和传动机构，它们常和执行机构联成一体，驱动臂杆和载荷完成指定的运动。

常用的驱动器有电机和液压、气动驱动装置等。电机是最常用的驱动器，包括直流伺服电机、交流伺服电机及步进电机等。它们的精度高，可靠性好，能以较大的变速范围满足机器人应用的要求。液压驱动输出功率大，惯量小，压力和流量容易控制，常用在负载较大或需要防爆的场合。气动驱动成本低，污染小，易于管理，常用于较为简单和负载较轻的机器人上。

除了上述三大部分外，现代机器人还应包括智能系统。它由感知和决策两部分组成。前者主要是传感器组，后者靠运行软件实现。

由于计算机的普及和价格的迅速下降，从目前市场的情况看，控制系统的价格和机器人大小的关系不太大，机器人的价格主要取决于操作机的成本，因而机械系统设计的好坏，不仅决定了机器人的性能，也决定了机器人的成本。

1.1.2 机器人机械设计和结构的特点

机器人机械设计的特点是由它的独特结构决定的。它和其它机器的设计相比，有许多不同之处。如机床的设计需保证所有零部件在最不利的条件下仍能正常地工作。如果在承受极限负载的条件下，最薄弱的环节不能满足要求的强度或刚度，通常就要采取“增加质量”的方法，例如用加大传动轴的直径，增加箱体或

床身的壁厚来解决。但对于机器人的操作机，“增加质量”虽然可能提高机件的局部刚度，但整体的动态性能可能会因为惯量的随之增加而恶化，各关节电机的驱动功率也会随之提高，使机器人的成本上升。实际上，因为机器人最常见的工作是搬运重物（包括为执行操作需要搬运的工具，如焊枪等），由于搬运极限载荷时可以通过降低搬运速度来补救，因此，机器人操作机的优化设计不必以满足极限负载为条件，而是可以依据统计规律，以在选定的有代表性的工况中出现概率最高的负荷状态为典型工作条件来进行设计。

机器人独特的结构特点大致可以归纳为以下四点。

(1) 工业机器人操作机可以简化成各连杆首尾相接、末端开放的一个开式连杆系。为实现要求的坐标运动，在大多数工作时间内，连杆系末端是无法加以支撑的，因而操作机的结构刚度差，并随连杆系在空间位姿的变化而变化。

(2) 在组成操作机的开式连杆系中，每根连杆都具有独立的驱动器，因而属于主动连杆系。这和普通的连杆系不同，在普通连杆系中，所有的连杆运动都出自同一驱动源，各连杆间的运动是互相制约的。由于操作机连杆的运动各自独立，不同连杆的运动之间没有依从关系，故而操作机的运动更为灵活。

(3) 连杆驱动扭矩的瞬态过程在时域中的变化是非常复杂的，且和执行件反馈信号有关。连杆的驱动属于伺服控制型，因而对机械传动系统的刚度、间隙和运动精度都有较高的要求。

(4) 连杆系的受力状态、刚度条件和动态性能都是随位姿的变化而变化的，因此，极容易发生振动或出现其它不稳定现象。

从以上特点可见，一个好的机器人设计应当使其机械系统的抓重—自重比尽量大，结构的静动态刚度尽可能好，并尽量提高系统的固有频率和改善系统的动态性能。

人类的手臂是最优秀的操作机，它的性能是机器人设计追求

的目标。人类手臂的质量大约为 $4\text{kg}\sim 9\text{kg}$ ，最多大约能举起 $15\text{kg}\sim 25\text{kg}$ 的质量，抓重大约为自重的 $3\sim 4$ 倍。即使在快速搬运重物时，也能搬动大约 $4\text{kg}\sim 9\text{kg}$ 的重物，抓重和自重大致相当。但从目前机器人的统计资料看，操作机的抓重—自重比大约为 $1/20\sim 1/15$ ，因而与人类手臂相比，相去甚远。

臂杆的质量小有利于改善操作机工作的动态性能，抓重—自重比大意味着工作效率高，造价低。

结构静动态刚度好有利于提高手臂端点的定位精度和对编程轨迹的跟踪精度，这在离线编程时是至关重要的。刚度好还可以使复杂的前馈控制变得不那么重要，从而降低对控制系统的要求和造价。操作机具有较好的刚度，还可以增加机械系统设计的灵活性，比如在选择传感器安装位置时，刚度好的结构允许传感器放在离执行件较远的位置上，所受到设计方面的限制减少了。

尽可能提高操作机结构的固有频率，其目的在于避开机器人工作时的工作频率。通常机器人的低阶固有频率在 $5\text{Hz}\sim 25\text{Hz}$ 的范围中，在以中等速度运动时，输入信号的脉冲延续时间大约在 $0.05\text{s}\sim 1\text{s}$ 之间，振荡频率相当于在 $1\text{Hz}\sim 20\text{Hz}$ ，因而机械系统很可能会因此激发振荡。提高机械系统的固有频率有利于系统的稳定。

在运动速度变化时振荡的振幅和衰减时间是衡量操作机动态性能好坏的重要指标。动态刚度好可以减小定位时的超调量，缩短达到稳定状态的时间，从而提高操作机的使用性能。

操作机的动态性能在很大程度上决定了机器人的工作效率。资料表明，对于一个工人在 1.4 秒内能完成的装配作业，采用 PUMA 机器人大约需要 3 秒，用 SCARA 机器人大约需要 2.7 秒，即使使用先进的 NIPPONDESO 机器人也需要约 1.9 秒的时间，对于抓重为 60kg 的 ASEA IRB 60 大型机器人，在到达目标点时仅定位时间就长达 6 秒。机械系统的响应通常要比计算机慢

得多，因而改进机器人机械系统设计，改善其动态性能，缩短它对输入信号的响应时间，对提高机器人的使用性能是十分重要的。

§ 1.2 基本参数和特性

表示机器人特性的基本参数主要有工作空间、自由度、有效负载、运动精度、运动特性、动态特性和经济性指标等。

表示机器人经济性的指标一般不作为技术参数列入说明书中，但它是一项极为重要的技术—经济指标，是选用和合理使用机器人的主要依据。决定机器人经济性指标的因素包括初始投资和运行成本两大部分。初始投资取决于对机器人性能的要求（如工作空间大小、自由度多少、负载能力及对精度和速度的要求等）以及对结构形式和复杂程度的要求（如驱动类型、功率、自身质量和尺寸等）。运行成本包括运行时的能量消耗、非故障停机时间、工作的可靠性和维修的方便性等。显然，所有与经济性指标有关的因素都直接或间接地和机器人的机械设计有关，但满足所期望的技术指标并尽量使其结构简单和成本低廉仍然是设计的主要原则。因而，经济性也是机器人机械设计的主要指标之一。

在说明书中列出的直接和使用或选用机器人有关的主要技术指标以及它们的含义如下。

1.2.1 工作空间 (Work Space)

工作空间是指机器人臂杆的特定部位在一定条件下所能到达空间的位置集合。由于工作空间的形状和大小反映了机器人工作能力的大小，因而它对于机器人的应用是十分重要的。

通常说明书中表示的工作空间指的是手腕上机械接口坐标系的原点在空间能到达的范围，也即手腕端部法兰的中心点（参见图 1-1）在空间所能到达的范围。这里须注意的是说明书中所指的

工作空间不是末端执行件端点所能到达的范围。这是因为工作空间是机器人的特性，它不随应用环境的变化而变化，而末端执行件的形状和大小恰恰是随应用环境变化的。故在选用机器人时，要注意安装了末端执行件后，实际的工作空间和说明书中给出的会有所不同。注意到这一点，对防止机器人的末端执行件在工作时和其它设备发生碰撞是很重要的。

此外，还应注意说明书上所提供的工作空间还可能不是运动学意义上的最大可达空间。这是因为在可达空间中，手臂位姿不同时有效负载、允许达到的最大速度和最大加速度都是不一样的，在臂杆最大伸展位置允许的极限值通常要比其它位置的小一些。

为了说明这一情况，可以看图 1-3 中关节型机器人在 $X-Y$ 平面中的情况。图 1-3 (a) 说明，机器人在工作平面中各个位置上有效负载值的分布是不同的，其大小变化可达 3 倍之多，其中最小值在工作平面的边缘。图 1-3 (b) 表明臂端在各个位置上可能达到的最大速度，相差也在 3 倍左右。图 1-3 (c) 则是在工作空间中允许的最大加速度，最大的变化可相差 4 倍。由于在最大伸展位置时有效负载、最大运动速度和加速度都比其它位置要小，所以，如果适当地缩小工作空间的范围，便有可能大大地提高机器人的其它性能指标，这在许多情况下显然是符合经济性原则的。

说明书中提供的工作空间范围小于运动学意义上最大可达空间的另一个原因是因为在最大可达空间边界上可能存在自由度退化 (degeneracy) 的问题。以关节型机器人为例，它的臂杆端点可达范围的边界是个雅可比曲面，当臂端位于边界曲面时，手臂所对应的位姿是奇异位形。此时，机器人出现自由度退化现象。当自由度退化现象出现时，操作机便减少了一个或几个自由度。

有关自由度退化的现象将在第三章详细讨论，此处仅以关节型机器人为例加以简单说明，以便使初学者对此现象能有初步认识。当机器人的臂端位于边界上时，相应的前臂杆和上臂杆处于

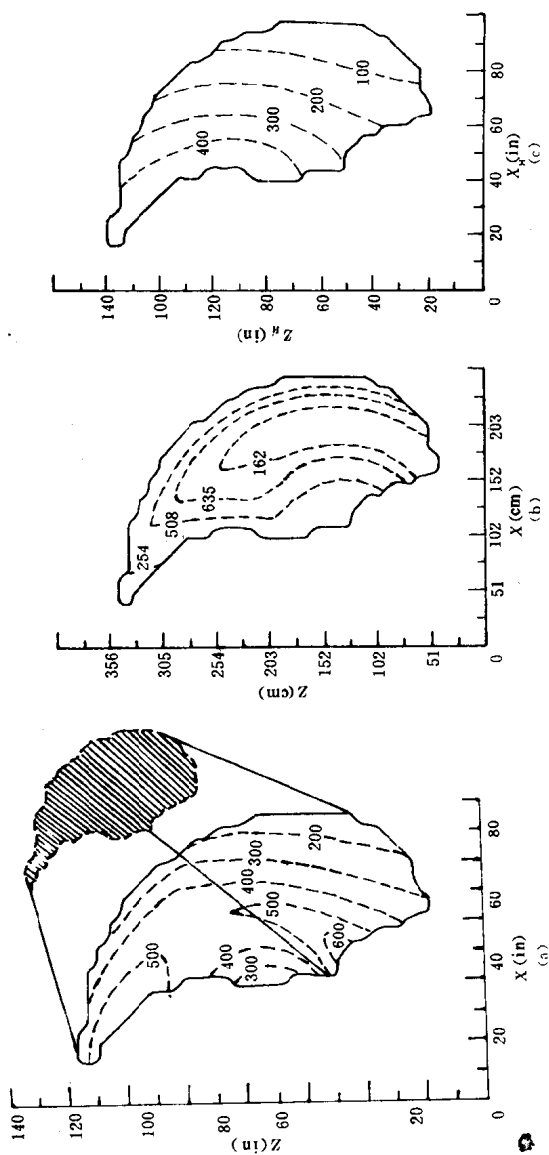


图 1-3 关节机器人在工作空间中的情况

(a) 有效负载; (b) 臂端最大允许速度 (cm/s); (c) 臂端最大允许加速度 (cm/s²) 的分布图^[1]

完全伸展（即两者夹角 $\theta=180^\circ$ ）或完全折合（ $\theta=0^\circ$ ）的状态。很明显，此时前臂杆的端点只可能沿切线方向运动，而不可能沿径向运动，就是说此时失去了沿径向运动的自由度，也即出现了自由度退化现象。实际上在臂端接近边界曲面也即当前臂杆和上臂杆的夹角 θ 接近 0° 或 180° 时，问题就已经存在了。如果此时对臂杆端点的速度有所要求，那么，为达到此要求的速度，相应关节的运动速度会很大，甚至趋向于无穷大，这在工程上是无法做到的。所以可以说自由度退化现象不仅出现在奇异位形时，而且出现在奇异位形周围相当大的范围中，这部分工作空间在操作中是不能被利用的。说明书中的工作空间应当是操作中可被利用的空间，这就是为什么说明书中的工作空间要比理论上的工作空间小一点的原因。

除了在工作空间的边缘，实际应用中的操作机还可能由于受到机械结构的限制，在工作空间的内部也存在着臂端不能达到的区域，这就是所谓的空洞或空腔。空腔是指在工作空间内臂端不能达到的完全封闭空间（图 1-4 中 (a)），而空洞则是指在沿转轴周围全长上臂端都不能达到的空间（图 1-4 中 (b)）。

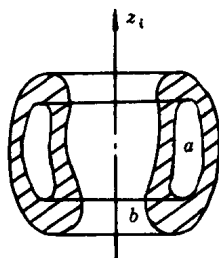


图 1-4 工作空间中的空洞和空腔

a—空腔；b—空洞

说明书中列出的工作空间只考虑了臂端能达到的位置，没有考虑末端执行件的取向。但在实际作业中，除了应考虑臂端能到达的位置外，还必须考虑末端执行件在到达该位置时的取向能力。末端执行件的取向是由安装在臂端的关节组决定的，虽然它不是常规参数，但由于对应用的重要性，因此仍然是机器人机械设计和分析的重要内容。

对于在工作空间中的任意给定点，机器人末端执行件可能取向的角度大小可以用方向角指数 (Service Index) S 的数值来表示。此处， S 的数值是末端执行件在该点极限取向位置间的夹角度 (θ) 和理想角度，即全球角 (4π 立体弧度) 的比值来表示的，即有

$$S = \frac{\theta}{4\pi} \quad (1.2.1)$$

在平面中，平面方向角指数用 S_p 来表示，它被定义为末端方向杆件 (相当于三维机器人的末端执行件) 在工作平面中对某点极限取向位置间的角度 (θ) 和理想角度，即平面弧角 2π 的比值

$$S_p = \frac{\theta}{2\pi} \quad (1.2.2)$$

从公式 (1.2.1) 和 (1.2.2) 可以看出，为了确定末端执行件在工作空间中某点的方向角指数，必须先确定末端执行件在该点所有可能取向的范围。此时，可以先假定将其开端固定在要求点，把开式连杆系转化为闭式连杆系，然后调整臂杆，使末端执行件绕该点转动，得出极限位置之间所包容的角度 θ ，将它和理想转角相比，比值即为方向角指数。有了方向角指数，不同机器人都可以用同一个指标来表示它对给定点的取向能力了。 $S=1$ ，能力最大，它表明机器人的末端执行件可以从任意方向到达该点。 $S=0$ ，取向能力最小，它表明末端执行件在达到该点时只能有一种取向可能。增加了方向角指数的概念后，工作空间的描述就变得更加确切。方向角指数 S 和平面方向角指数 S_p 的具体求法将在第二章中详述。

1.2.2 运动自由度 (Degrees Of Freedom, DOF)

自由物体在空间有六个运动自由度，即三个移动自由度，三个转动自由度。