

《国外机械工业基本情况》参考资料

机 构 学

机构学编写小组编

第一机械工业部科学技术情报研究所

一九八一年

出 版 说 明

党中央向全国人民提出了新时期的总任务，全国从上到下一心一意搞四个现代化。机械工业要适应“四化”的要求，必须为国民经济各部门提供现代化的技术装备。为此，需要研究和学习国外机械工业的先进技术和经验。在这种形势下，我们组织有关单位编写一套《国外机械工业基本情况》参考资料。这项工作第一次开始于1973年，1975年基本完成，这次是第二轮，在内容和范围上都比上次有所充实和扩大。

这套参考资料按专业分册出版。本书为机构学部分，主编单位是上海工业大学。参加编写单位有吉林工业大学、华中工学院、武汉水运工程学院、上海交通大学，主要执笔人员有殷鸿梁、胡潮曾、王清媛、袁佳朝、杨征贵、陈敏卿、仇文馨、马大铮、罗治荣、蔡志坡、金孟浩、邹慧君、颜志仁等同志。由殷鸿梁同志主编。

第一机械工业部科学技术情报研究所

目 录

第一章 国外机构学概况	1
一、机构的结构理论与机构选型	4
二、平面与空间连杆机构	5
三、凸轮机构	6
四、周转轮系	7
五、间歇与不均匀速传动机构	7
六、组合机构	8
七、机构动力学及测试技术	9
八、机构最优化设计	10
附录一 查阅国外机构学文献的几种主要文摘、索引简介	12
附录二 登载机构学文献的几种主要国外期刊	12
附录三 国外机构学的主要著作	14
附录四 国外重要的机构学学术会议举行情况简介	17
第二章 机构结构分析	22
一、历史简单回顾	22
二、现状概述	23
三、结束语	30
第三章 平面连杆机构	32
一、简史	32
二、现状概述	33
三、结束语	40
第四章 空间连杆机构	43
一、空间连杆机构的运动分析	43
二、按给定有限位置或函数进行空间连杆机构的综合	51
三、空间连杆曲线	53
四、空间连杆机构的力分析	54
第五章 凸轮机构	62
一、前言	62
二、凸轮机构的运动学	62
三、凸轮机构的动力学	65
四、发展趋势	73
第六章 周转轮系	76
一、周转轮系的类型综合	76
二、周转轮系的运动分析和受力分析	80
三、效率计算	84

四、浮动装置·····	88
五、装配条件及齿数选择·····	92
第七章 非圆齿轮与间歇运动机构·····	106
一、非圆齿轮·····	106
二、间歇运动机构·····	114
第八章 组合机构·····	132
一、概述·····	132
二、齿轮连杆机构·····	138
三、凸轮连杆机构·····	149
四、齿轮凸轮机构·····	154
第九章 机构动力学·····	162
一、简介·····	162
二、运动分析概述·····	162
三、刚体动力学计算·····	163
四、机构的振动与运动稳定性·····	166
五、运动弹性体动力学·····	167
六、运动弹性体动力学综合·····	175
七、结束语·····	176
第十章 机构最优化设计·····	181
一、简介·····	181
二、最优化数学方法·····	185
三、机构最优化设计的主要进展·····	195
四、结束语·····	197
第十一章 国外机构学展望·····	202

第一章 国外机构学概况

机构学是研究有关运动变换和动力传递装置共性问题的一门基础技术科学，即研究机构和动力学，包括分析与综合两个方面。18世纪初，随着蒸汽机和纺织机的发明，积分、理论力学等学科开始建立并臻完善，为各种机械的设计和创造提供了理论基础和手段。那时，机构学还包含在应用力学的范畴之中。19世纪下半叶以后，机械工业的迅速发展，对机构的应用以及与它相应的分析和综合提出了进一步要求。在英国，以 *R Willis* 为代表，建立按运动变换性质与速比关系进行机构分类，并着重研究了齿轮和行星传动。在德国，以 *F. Reuleaux* 和 *L. Burmester* 为代表，引入运动副、运动链和机构简图等概念，从机构结构原理上探讨机构的可能类型，把以往分散地研究个别机构发展到提炼机构的共性问题，并主要按运动几何学原理以图解方法进行机构的分析和综合。在俄国，以 *П. Л. Чебышев* 为代表，用函数逼近论等代数方法来解决机构尺度的近似综合问题。以这些成就为基础，机构学逐渐发展成为一门具有独立完整体系的学科。

机构学来源于机械工业生产的实践总结，同样，机构学基本理论的深入研究亦有力地推动和促进了机械工业中许多新产品、新设备的出现和发展。例如根据平面连杆机构中连杆曲线近似再现直线运动的原理而设计的起重机，至今仍是港口码头上的一个重要设备。近代的许多冶金设备，如飞剪、型材摆锻机等，亦常采用连杆曲线来执行需要的工艺动作，大大地提高了生产率。在农业机械中，广泛采用连杆机构来实现各种作业所需的动作，如插秧、捆草、耘耩以及适应山地耕作的机械等。在工程机械中广泛应用液压驱动的连杆机构。在自动生产线中亦可利用连杆曲线执行有间歇期的传送动作。动力机械中的一次重大改革——旋转活塞式发动机，就是根据互包络曲线原理而创造的。根据包络原理还发展了多种的油泵型线。最近又出现了利用空间连杆机构制成的发动机和压气机，已在新式水下武器中开始应用。在各种自动机床、纺织、印刷、食品等机械装备中，凸轮、连杆、间歇机构、组合机构的不断改进和创新，对提高产品质量和生产率起了很主要的作用。随着生产自动化的全面发展和机器人技术的推广应用，机构作为一种执行动作的必需装置，对它的深入研究和不断创新将会显示出愈来愈重要的作用。

机构学的研究，传统上以德国最为著名并居于国际上的领先地位。二十世纪三十年代以后，机构学在德国有了更快的发展，并与机床、起重机、动力机械、农业机械、轻工业机械等产品设计密切结合，出现了许多卓越的成就。其主要研究特点是以运动几何学为基本理论，着重用图解法进行平面连杆机构的分析和综合。1953年出版的 *R. Beyer* 所著《机构的运动综合》一书(附录三中(二)-III-1)，可看作是当时德国几何学派的代表性文献。50年代以后，德国机构学的研究，继续沿着几何学派的方向发展，创造了如点位重合法等简化的几何综合方法，并在几何学与代数学相结合的机构学研究方法上作出了许多贡献。*K. Hain* 所著《应用运动学》和 *J. Volmer* 所著《机构学》(附录三中(二)-III-2和3)比较集中地反映了这一时期的成就。近年来，在连杆机构、组合机构以及机械动力学与测试技术等方面均出现了许多卓越的成就。德国机构学的主要研究中心有：西德的亚亨工业大学机构与机械动力学研究所 (*W. Meyer zur Capellen*)、布劳恩施威格工业大学的机构与机械动力学研究所

(*B. Dizioglu*)和农机研究所(*K. Hain*)、慕尼黑工业大学(*R. Koller*)、斯图加特工业大学(*H. J. Warnecke*)等,东德的德累斯顿工业大学机构学与精密机械研究所(*W. Lichtenheldt*和*K. Luck*)、卡尔马克斯城工业大学(*J. Volmer*)等。东德和西德大致每隔两年都分别举行一次机构学学术会议,每次会议有不同的讨论专题,可参见附录四。会议的简要报导常刊载于西德的《德国工程师协会通报》、《机械、仪器与工具设计》、《工业通讯》以及东德的《机械技术》等杂志上,会议的主要论文常全文刊载于《德国工程师协会专集》上。在德国出版的经常登载机构学方面研究论文的主要杂志见附录二中(三)和(四)。

美国对机构学的研究,在第二次世界大战以前,不及机械传动那样重视,特别是连杆机构的综合。二次大战期间,由于军事工业对操纵与控制领域的需要,对机构设计提出了新的要求。40年代,一些侨居美国、澳大利亚和印度的德国和欧州血统的机构学家(如*A. V. Svoboda*, *A. E. Richard de Jonge*, *N. Rosenauer*和*R. A. Kraus*等),用英语发表了一系列介绍德国机构学研究的论文和著作,开始引起了美国工业界与学术界的重视。从1953年起,由普渡大学和《机械设计》杂志主办,每年召开一次美国机构学会议,交流机构学研究成果,这对美国机构学的研究有很大促进,出版了一些较有影响的著作:如*H. A. Rothbart*的《凸轮》和*D. C. Tao*的《实用连杆机构综合》等(附录三中(二)-[1-2和3])。50年代末,随着电子计算机技术的迅速发展,以*F. Freudenstein*和*R. S. Hartenberg*与*J. Denavit*为代表,开始发展以矩阵代数为基础利用电子计算机书介的机构学研究方法。1964年出版的《连杆机构的运动综合》一书(附录三中(二)-[1-4]),可看作是美国在学习德国几何学派基础上发展具有美国特色的机构学新研究方法过程中的代表作。60年代以后,美国的机构学研究有了转折性的飞跃发展,在机构结构理论、平面与空间连杆机构的分析与综合、凸轮机构动力学、运动弹性体机构动力学以及机构最优化设计等领域都进行了大量的研究工作。比较显著的特点是在机构学研究中非常注意引进各种工程数学方法以加深机构学分析与综合的基础理论,并重视推广电子计算机的应用与编制标准程序。1978年出版的*C. H. Suh*和*C. W. Radcliffe*所著《运动学和机构设计》一书(附录三中(二)-[1-18])集中反映了这方面的成就。经过25年来的努力,现在美国在机构学领域中许多方面的研究已经跃居于世界上的领先地位。美国机构学的研究力量,主要分布在许多大学里,较著名的有:哥伦比亚大学(*F. Freudenstein*)、普渡大学(*A. S. Hall*)、西北大学(*R. S. Hartenberg*、*J. Denavit*)、麻萨诸塞州大学(*F. R. E. Crossley*)、史坦福大学(*B. Roth*)、加里福尼亚州大学(*A. T. Yang*)、威斯康辛大学(*J. Uicker*)、俄亥俄州大学(*C. W. McClarnan*、*R. L. Fox*)、纽约伦斯勒尔学院(*G. N. Sandor*)、纽约市立大学(*G. G. Loewen*)、俄克勒荷马州大学(*A. H. Soni*)、柯罗累达大学(*C. H. Suh*)、特克萨斯州大学(*T. E. Shoup*)和田纳西州大学(*C. Bagci*)等。美国很重视机构学研究的学术交流工作,其主要学术年会情况简介可参见附录四中的(三),这些会议一般均出版论文集或以美国机械工程师协会论文单行本发表,有些代表性的论文则络续登载在《美国机械工程师协会会报——B集工业工程杂志和E集应用力学杂志》上。许多学位论文亦常以缩节形式在此两本杂志上发表。而一些与实际工程设计结合较密切并附有实用图表、曲线、数据的文章,则常发表在《机械设计》和《产品工程》等期刊上,可参见附录二中(二)。

英国从60年代以后,对机构学的研究加快了步伐。近年来在凸轮机构、机械动力学以及空间连杆机构等方面均有不少成就。英国机构学研究较著名的有:达茵河畔纽卡斯特大学

(L. Maunder)、曼彻斯特科技学院 (W. Johnson)、利物浦科技学院 (J. Duffy) 和 克伦菲尔技术学院 (S. Molian) 等。近十年来, 由英国机械工程师学会与有关大学合作, 基本上每年一次轮流举办英国机构学会议或专题会议 (参见附录四中 (四)), 並出版会议论文集。1966年在英国开始创办的《机构学》杂志, 从1972年起改由国际机器理论与机构学联合会主办, 並改名为《机构学与机器理论》杂志。

苏联自30年代成立苏联科学院机械学研究所以后, 机构学就作为该研究所的主要发展方向之一。二次世界大战以后, 苏联机构学的研究有了更快的发展。在机构结构理论、机构精确度、平面低副机构综合、高副包络理论、空间机构、多自由度系统动力学等方面均有许多贡献, 有些领域在国际上亦居于先进水平。现在其主要研究中心有莫斯科苏联科学院机械学研究所 (И. И. Артоболовский, 已于1978年逝世; 以及 А. П. Бесснов, Н. И. Левитский, Ф. М. Диментберг 等)、莫斯科鲍曼工业大学 (Л. Н. Решетов, В. А. Гавриленко)、列宁格勒工业大学 (П. А. Лебедев, В. Л. Витез)、列宁格勒光学与精密仪器学院 (Ф. Л. Литвин)、基辅工业大学 (С. Н. Кожевников)、哈尔科夫工业大学 (А. П. Филиппов)、梯比里斯的乔治亚工业大学 (Д. С. Гавхлидзе) 等。苏联科学院机械学研究所以前出版有不定期刊物:《机械理论与机构学论文集》和《机器制造与仪器制造中的精确度论文集》, 1965年以后, 改为期刊《机械学》, 专门刊登机构学、机械动力学及其它方面的研究论文。该所还出版不定期论文集《机器力学》。从50年代来以后, 苏联又开始出版了高等学校通报, 与机构学有关的有两本期刊: 由莫斯科鲍曼工大主编的《机械制造》和由列宁格勒工大主编的《仪器制造》。此外还有在哈尔科夫出版的报导苏联各加盟共和国机构学与机械动力学研究论文的两本不定期刊物《机械原理》和《机器动力学与强度》。苏联自1954年起, 每隔三到四年召开一次全苏机构学与机器理论当代问题会议。

日本机构学研究近年来着重点是环绕着生产过程自动化中机构及其组合的实际应用。一些期刊如《机械设计》、《自动化技术》等经常刊登这方面的设计构思、图片、分析计算等内容, 並连载有关的机构学讲座, 还常出版专集报导这方面资料。日本在凸轮机构的动力学、凸轮用电子计算机辅助设计与制造以及平面连杆机构中连杆曲线的应用等方面都进行了不少的研究, 较著名的有日本机械技术研究所的洼田雅男, 东京工业大学的小川洁和横山良明, 山梨大学的牧野洋等。70年代以后, 日本对机械手、自动行走机和机器人的研究与制作发展特别迅速, 对机械手抓取机构的分类与性能鉴别、多自由度多关节开式运动链的运动可能性与动作分析以及动态稳定性等问题的研究均有不少贡献。以早稻田大学加藤一郎和日本机械技术研究所伊藤英世和谷江和雄为代表, 从仿生学角度研究人的手指、手臂和腿的功能, 以建立人造肌肉、人造骨骼和人造手足, 逐渐形成了一门新的技术科学——生物机构学, 並在日本成立了仿生机构学会。日本出版的刊登机构学文献的期刊可参见附录二中 (五)。

在国际上, 对机构学研究较著名的还有澳大利亚的蒙纳斯大学 (K. Hunt) 和悉尼大学 (J. Hirschhorn 和 J. R. Phillips), 荷兰代尔夫特技术大学 (O. Bottema 和 H. Rankers) 和英德哈文技术大学 (G. R. Veldkamp 和 E. A. Dijkstra), 他们的研究特点较接近于德国学派。此外, 加拿大蒙特利尔的康考迪厄大学 (M. O. M. Osman) 和魁比克的勒伐尔大学 (G. V. Tordion), 印度新德里的印度技术学院 (J. S. Rao 和 K. Lakshminarayana) 亦经常发表机构学研究论文。近年来, 东欧一些国家, 如罗马尼亚 (C. S. Pelecudi 和 N. I. Manolescu)、南斯拉夫 (B. Ilić, T. Pantelic 和 M. Vukobratovic)、捷克 (J. Tomas)、波兰

(A. Morecki 和 J. Oderfeld)、保加利亚 (M. S. Konstantinov) 等对机构学的研究均有相当贡献, 在机构结构理论、平面与空间连杆机构、机器人与自动行走机中的活动人造关节机构、机构最优化设计等方面发表了不少研究论文。

为了加强机构学研究的国际间学术交流与适应国际科技合作的需要, 1969年秋成立了国际机器理论与机构学联合会 (简称 IFToMM), 现有会员国美、英、苏、德等20余国, 正在进一步扩大中。它由各国机构学方面的著名学者组成执行理事会以及联合会中的各种技术发展委员会。联合会定期举行国际机器理论与机构学学术会议并与一些会员国合办专题国际学术会议 [可参见附录四中 (一) 和 (二)]。联合会还办有定期刊物《机构学与机器理论》, 专门刊登世界各国机构学与机械系统动力学、齿轮与机械传动、计算机辅助设计、机器人与操作器系统等方面的研究论文, 并聘请国际上著名的学者负责各专题的论文选编, 许多机构学方面的学位论文, 亦常以缩节形式在此杂志上发表。

机构学的发展是与近代基础理论科学与工业技术的发展分不开的。随着生产过程自动化程度的不断提高, 要求制造许多新的机构来完成。适应宇宙探索、海洋开发等领域需要的机器人技术亦对机构学提出了新的更高要求。同时由于电子计算机容量和运算速度的日益提高, 使机构的复杂分析和设计成为实际可行的, 这就促进了机构学研究方法的新发展以及形成许多新的研究专题, 许多过去经常沿用的近似方法和经验数据, 现在必须也有可能用有充分理论依据的逻辑分析和精确设计来取代。另一方面, 由于机械制造技术的进步, 有可能采用各种新工艺来完成精密制造, 使复杂程度较高的机构在制造上达到设计所规定的精度的可能性日趋现实。这些科学技术的发展, 已经引起了近十几年来机构学研究的重大变化, 下面仅就机构学领域中一些主要专题的当前研究水平作一个简单的综述。

一、机构的结构理论与机构选型

机构的结构理论主要研究机构的组成原理、可能类型及运动自由度计算。机构结构理论的研究很早就已开始, 最初多集中于研究平面机构问题, 但当时由于工程实际上应用的机构一般都是单自由度单闭环的, 而且构件数不多, 因此从机构结构组成原理角度得出的机构分类系统, 对创设新机构所起的作用似乎不很显著。近年来, 由于机器人、自动行走机、人工关节式手足的发展需要, 以及机器的动力源中液压、气动技术的日益广泛采用, 因此多自由度、多闭环的多杆平面连杆机构以及开式运动链在工程实践中亦有了愈来愈多的应用, 这就对于机构结构理论的研究提出了新的要求。同时, 空间连杆机构在一些新产品新设备中不断出现, 由于空间连杆机构中公共约束条件或虚自由度的判断比较复杂, 而运动可能性的分析又是机构设计中最先碰到的问题, 因此关于机构中构件数与运动副种类和数量间的可能组成形式及运动自由度的计算, 这些年来, 又引起人们的注意, 并发表了不少研究文章。从50年代中期, 在美国提出了用矩阵符号表示机构的运动特征以来, 至于空间机构的称呼已经基本统一。在机构结构理论的研究中, 近年来发展应用了各种工程数学如图论、网络分析、线性几何学、螺旋坐标等, 并利用电子计算机来系统地讨论机构的结构类型及运动自由度问题。现在, 机构运动自由度的研究重点是分析多环路、而且每个环路中公共约束不相同或具有超约束的空间连杆机构, 以及机构工作时不同位置的瞬时自由度问题。并探索建立对进行机构的分析和综合有普遍意义的机构结构原理和分类原则。

在机构设计中，机构选型是首先碰到的也是非常重要的一个问题，近年来，美国、苏联、德国和日本都出版了一些机构选型的手册和图册，将一些典型的机构按结构特征或运动变换的性能分类罗列，供设计时参考选用。日本在这方面的研究，注意力集中于自动线上的应用，有很多连载性的文章和专集介绍在传送、进料、分离、定位、整列、排出、装配和检测等各种工序中具体应用的机构。英国也出版了一套用于自动化装配时，进行机构选型的图册。这些选型手册和图册〔参见附录三中（三）〕对工程设计人员很有启发和帮助。但总的说来，机构选型问题还没有形成一种比较普遍适用和系统化的原则和方法，需要进一步深入研究。另一个重要问题是研究包括液压、液力、气动、电磁、电子、光电等非机械传动元件的组合，把刚性构件、挠性构件、弹性元件以及上述非机械传动元件组合而成的机构，按其功能来进行合理分类，以编制更方便于设计者参考选用的系统化机构图册，是一种很有价值的研究工作。

二、平面与空间连杆机构

平面连杆机构的分析和综合，在近十几年来进行了大量的研究，其主要成就可归纳为下列两方面：

1. 60年代以后，由于电子计算机技术的迅速发展，平面连杆机构分析与综合的过程均可利用电子计算机进行复杂的运算。现在美国、德国等都已建立有典型平面四杆机构运动分析与综合的基本标准算法程序，同时还利用计算机来编制表示机构主要参数与运动特性、动力特性之间关系的曲线图谱，以及根据机构综合方法建立的一定范围内能求解机构尺度的设计数表、诺谟图等。这方面工作的发展趋向是系统地制作一些供分析和设计时能直接读出的数据和线图，尽量减少进行换算的过程。

2. 平面连杆机构的尺度综合从精确点向最优化方向发展。50年代末，在美国发表了在平面四杆机构尺度综合中的重新安置精确点法，利用电子计算机采用迭代程序使一组组精确点逐步逼近于最优解答，这是利用电子计算机技术进行机构综合最先采用的方法。自此以后，平面连杆机构的分析与综合有了很大的发展，发表了大量的研究论文。但是精确点数目毕竟有限，而且有时即使精确点数能很多，也不一定能使最大的设计偏差减少。因此就往往不一定要求在所有设计点偏差为零，而只要求机构在全部运动范围内的累积设计偏差最小（例如采用最小二乘方）。同时按精确点法解得的机构尺度有时在机构结构上有一定的缺陷，例如杆长之间的比值相差太悬殊、传动角不好以及其它运动学或动力学性能不合适等。60年代中期以后，又开始把数学中的最优化理论引进机构设计，根据机构的职能要求规定某些规范（目标函数），机构尺度综合不再像精确点方法那样只是精确地符合某些个别点，而是更密切地符合于规定的职能目标。由于目标函数与约束函数往往是非线性的，因此机构最优化设计实际上是一种非线性规划问题。机构设计最优化的求解依赖于数学的搜索和迭代过程以及电子计算机的逻辑判断功能。近年来，最优化方法已逐渐成为平面连杆机构尺度综合上主要的发展方向。

现在平面连杆机构的研究比较注意于应用多自由度、多闭环、多杆机构的连杆曲线来再现各种工作机械中工艺要求所提出的一定轨迹。另外，近年来还发展具有可变杆长结构、可变运动学和动力学参数的机构，即机构在运行过程中根据工作需要可调整和改变其某些构件

尺寸以符合工作要求。此外，在平面连杆机构的动态静力分析与质量平衡等问题以及具有挠性构件的连杆机构运动分析等方面，都进行了不少的研究。

虽然平面连杆机构研究中近年来的主要倾向是适合于电子计算机运算的代数方法和数值计算方法，但几何图解法的研究仍在继续努力深入，因为在某些情况下，例如轨迹问题，图解法仍具有其独特的简明直观作用，它还可能对解析法的发展提供启发。

由于空间连杆机构在实际工程应用中的逐渐推广，近年来对于空间连杆机构的研究是机构学家们极感兴趣的课题之一，在这方面发表了大量的文章。应用了各种数学工具如矢量、张量、矩阵、对偶数、四元数、旋量计算等进行研究。由于空间机构的分析与综合，公式和运算都比较繁复，所以一般必须利用电子计算机求解。这十多年来，在空间连杆机构中主要研究单自由度单闭环的四杆和五杆机构，其基本理论和方法都已逐渐形成一定的体系。最近几年，对六杆机构亦进行了一些研究，并开始探索七杆机构的问题。但多年来，主要还只局限于研究只包括转动副、移动副、圆柱副和球面副的机构，最近几年来才开始讨论包含螺旋副的机构，而对其它类型的空间运动副则仍很少涉及。在空间连杆机构中，着重研究了位移分析以及输出杆再现给定有限位置或函数问题，对速度和加速度分析以及动态静力学亦有相当的研究。最近几年也开始研究空间连杆机构的最优化设计问题。空间连杆曲线的分析还需要进一步发展，目前还缺少比较完整的实用综合方法。多自由度多杆空间机构与开式空间运动链的运动分析和综合以及其动力学问题，由于机器人技术的需要，是一个很有发展前途的研究课题。

三、凸轮机构

凸轮机构的分析与设计一般可分成两大类问题——运动学和动力学。凸轮机构运动学方面，近年来主要应用解析法，在廓线设计时主要考虑加速度曲线及跃动曲线，尽量减少最大加速度值，并保持合适的曲率半径和压力角。凸轮运动曲线已由早期的标准函数（如直线、抛物线、摆线、简谐等）向修正函数（修正摆线、修正梯形等）及可进行谐波分析的富里哀级数与代数多项式发展。当给定的设计条件是瞬时运动参数时，例如规定最大速度或加速度值，则要采用有限差分、有限积分等数值计算方法。近年来，凸轮机构研究中注意力集中于动力学问题。凸轮机构工作时，由于从动件系统的弹性、制造误差、质量分布的不均匀、运动副之间的间隙等各种因素，往往使从动件系统输出端的真实运动与预期的运动规律有所偏离，这在凸轮机构高速运行时，尤为显著。因此预测和控制高速凸轮机构的动力学特性就显得非常重要。近年来，在这方面比较集中于探讨凸轮机构的激励阶段和残留阶段的振动分析，提供控制和减少残留振动的途径，并寻找高速运转时，具有良好特性的凸轮廓线。

按动力学要求设计凸轮廓线，早期多采用把一种补偿曲线加在标准凸轮廓线上，以抵消从动件系统的位置误差，但这种方法只能用于从动件系统的质量和刚性都比较大，且运转速度与设计速度很接近时。现在多采用另一种方法，即寻找符合设计要求所规定动力学特性的廓线，使凸轮从动件系统的残留振动的振幅在全部工作速度范围内不超过某一极限值。

在凸轮机构动力学研究中，首先必须进行机构系统的模拟，即把实际的凸轮机构分解为几个区域，包括质量点和相应弹性的分配。同时，进行从动件系统的模拟，考虑凸轮与从动件接触区域的润滑情况和从动件各元件间的间隙与载荷影响等。然后对从实际凸轮机构抽象

出来的相应动力学模型，建立其运动微分方程式，研究其求解方法，分析系统的响应，并对设计参数进行选择评定，建立按动力学设计的凸轮廓线方程式。具体分析方法大致有下列几种：

1. 简化为单自由度线性系统。60年代已开始用电子计算机程序来研究这种系统的时间响应并制作图谱。

2. 对两个以上自由度的线性系统，可把每个标准模型分别按单自由度系统方法计算后，总的系统响应可由迭加各个标准模型的响应来获得。

3. 70年代以后，开始考虑凸轮与从动件间接触区域中各种因素，而进行按非线性系统分析，分析时常令其线性化，并用假设一种模型按插值求解的技术进行研究。

4. 计及凸轮驱动轴弹性的凸轮-从动件-驱动轴系统的模拟，考虑凸轮质量、凸轮轴的变形、润滑油膜等因素。一般用以分析高速、重载的凸轮机构。

5. 用有限元方法研究凸轮机构中间隙、振动及冲击等问题。

今后应进一步研究质量、弹性变形、间隙、阻尼、外界干涉频率、不平衡力、表面润滑等方面的影响，建立更接近真实情况的动力学模型和更精确的分析和设计方法。

随着机构设计最优化发展的，在凸轮设计中，70年代以后亦开始采用各种运动学要求为目标函数的最优化设计，最近几年才开始研究凸轮动力学最优化设计问题。

应用高速摄影机和各种电子仪器进行凸轮机构的实验研究，这十几年来亦有很快的发展，特别在内燃机的配气凸轮机构研究方面。

凸轮机构的分析与综合，都必须建立在保证良好加工质量的前提之下，因此近年来，发展了把凸轮的设计和制造结合起来，即把电子计算机与数控机床联合应用，进行凸轮的计算机辅助设计和制造，这方面今后应进一步深入研究。

四、周转轮系

近年来发展应用各种近代工程数学进行轮系的分析和综合，例如应用图论、网络分析和计算技术等按照运动结构研究轮系的可能类型及其分类，并按各个基本环路进行运动分析和受力分析，研究循环功率流的路线、数值和方向以及效率计算。应用数论研究周转轮系的齿数选配问题，应用对偶数、对偶数矩阵讨论圆锥齿轮周转轮系的运动学、静力学和动态静力学。从载荷均匀分布角度研究各种行星轮系的方案。以外，在行星摩擦轮传动和不等速非圆齿轮行星传动方面也进行了一些研究。具有弹性元件的谐波传动发展很快，除了一般圆形齿圈的谐波传动以外，还发展了具有端面波形发生器和圆锥齿圈的谐波传动和摩擦式谐波传动。

五、间歇与不匀速传动机构

在间歇运动机构中，应用较广的是槽轮机构，其基本几何学分析在50年代已比较完整。但槽轮在间歇转动过程中，总出现突变的加速度，因而冲击、振动以及定位问题均未很好解决。近年来，由于自动机上要求槽轮机构高速运转，所以围绕着改善其加速度变化规律，采用了许多改进形式，主要有下列一些：

1. 改直线槽为曲线槽

2. 串联使用槽轮机构, 使输出轴在开始运动时的角加速度为零, 消除起动时的动载荷。
3. 槽轮机构与其它机构组合, 例如将平面连杆机构、非圆齿轮、带销链条、行星链轮等与槽轮机构的输入转臂连接, 以改善槽轮机构的各种运动性能, 符合工作要求。
4. 空间槽轮: 主要有输入转臂轴线与槽轮轴线相垂直以及两轴线间夹角小于 90° 的球面槽轮等。

近年来在研究中, 讨论了槽轮机构中各个尺寸对槽轮运转性能的影响, 推导了槽轮机构参数选择时传动函数的计算公式, 用无量纲系数比较各种槽轮机构的性能等。

在高速间歇运动机构中, 近年来发展了蜗杆形凸轮间歇分度机构, 从动滚子在输出转盘上的安装方法主要有两种: 滚子轴线与转盘输出轴线平行和滚子轴线与转盘输出轴线垂直, 后者刚性较好。这种机构一般可有 $3 \sim 24$ 停歇期, 每分钟分度可高达1000次。

非圆齿轮利用速比的周期变化, 使工作机构或控制机构获得所需的不匀速运动, 在纺织机、印刷机、包装机等处的应用日益增多。近年来非圆齿轮的节曲线形式应用较多的有:

- (1) 椭圆: 其速比按对称规律变化, 应用最广。
- (2) 变形椭圆: 其速比按非对称规律变化, 可缩短工作机械空行程时间。
- (3) 一对偏心圆轮: 速比变化较小, 其极限值由允许的齿隙而定, 多用于纺织机械。
- (4) 卵形: 速比可以不是 $1:1$ 。
- (5) 正弦曲线: 在一个循环内可产生两种或多种速度。
- (6) 对数螺旋线: 用于变比例的秒表, 变机械利益的杆杠操纵装置以及近似函数执行器等, 且可与直线齿条啮合。
- (7) 倒数曲线: 用在函数执行器中, 实现正确的倒数函数。

非圆齿轮机构一般降速时速比不宜超过 $1:7$, 升速时不宜超过 $5:1$ 。近年来已导出有关于一对啮合的单圈封闭连续曲线非圆齿轮位移函数的普遍定理, 可用以判断对于给定的角位移函数能否设计出所需的非圆齿轮来。近年来关于椭圆齿轮的加工原理以及精度检验等均进行了不少研究。

六、组合机构

组合机构可分为串连式和並连式两大类。串连式组合机构中, 各个组成部分的基本机构仍保持原来的运动变换特性, 组合机构的输入输出运动间关系是各个基本机构运动函数的乘积。而並连式组合机构, 其输入输出运动间关系则是个别构件间运动的复合叠加, 这样有可能使几种基本机构的个别有利性能综合到一个机构上去, 使之最好地符合工作要求。並连式组合机构, 近年来在农业机械、纺织机械、印刷机械、冶金设备中应用日广。其中以西德研究得最多, 美国和苏联亦都有不少研究。

並连式组合机构主要有三种类型:

1. 齿轮——连杆机构。可用较少的构件近似实现一定的轨迹或复杂的运动规律(包括位置、速度和加速度), 其中以齿轮——四杆机构和齿轮——五杆机构应用最广。为了扩大其功能, 还可将其中一些构件位置做成可调式的。还可把连杆机构中的摇杆与差动轮系中的系杆固连, 实现差动的齿轮——连杆机构。

2. 凸轮——连杆机构。把凸轮或从动件与连杆机构上的构件固连, 可以准确地实现予

期的轨迹或运动规律，甚至两者可同时实现。特别是可以使摆动从动件实现整圈的迴转或形成输出同轴线的回归式机构。

3. 齿轮——凸轮机构。它由周转轮系和凸轮机构组成，通过凸轮廓线控制行星轮作一定的附加转动，而使从动中心轮产生具有任意周期或任意停歇的步进或反复步进运动。它一般常用的间歇运动机构易于调整传动性能，减少加速度及冲击，适用于高速工作情况。

总之，组合机构能实现预期的轨迹或位置，常可用作机械的直线、圆弧或平行导向；亦能实现特殊的运动规律，例如在一个运动循环中有一个或几个停歇位置或作步进运动；能在一定角度范围内传递定传动比的运动；能执行一个或几个变量的数学函数，故常用组合机构来代替平面多杆机构。在分析和综合方法上，美国和苏联多采用复数矢量法和代数解析法等，德国则常制成图表曲线，并列当实现一定运动要求时，各种基本类型组合机构的构件尺度，以供设计时选用。

七、机构动力学及测试技术

随着机械装置中功率和速度的日益增加，对精度和可靠性的要求亦日益提高，从动力学角度进行机构的分析与综合在机械系统设计中亦日益受到重视。

近年来，在刚体动力学范畴中，主要研究了机构在非稳定状态及瞬变过程中时间、位移、速度和加速度等动力响应的计算问题，主要有能量分配法和线性相关法等。还研究了具有变质量构件和运转过程中结构有变化的机构动力学问题。研究了考虑运动副中的间隙和冲击影响的机械系统的运动，通常是高次非线性的，常用控制理论中的描述函数来解决其运动方程式问题。在机构平衡问题上，主要发展了线性无关矢量法，即重新分配构件质量，使机构的总质心运动轨迹方程的时间相关项消失，以保持质心稳定。

70年代以后，与传统的刚体动力学在基本原理上有所区别的“运动弹性体动力学”开始发展。机构在高速运转时，各构件的弹性变形将使机构偏离按刚体计算时预定的轨迹和运动规律，因此在讨论机构的动力学问题时，要计及构件及其运动副的应力与应变，要计及构件弹性变形所引起的加速度和惯性力的重新分布以及对运动产生的附加影响，现常采用有限元的结构动力学分析方法来进行研究。即把机构处在各个不同的瞬时位置的图形，当作一个固定的结构系统来分析，每个构件当作一个受力单元体，较复杂的构件亦可分开当作两个单元体，以建立这种结构系统在外力和惯性力作用下的运动方程式。主要分析方法有刚度法、柔度法和集中参数法等。

近年来还研究了刚性系统中加弹簧后改善机构高速运动时的动力响应，研究了用弹性件调节机构运转速度，以及构件连接处为弹簧及阻尼装置时的多自由度机构动力学等。

机构动力学的实验技术亦有了进一步的发展，测量各种瞬时运动量以及力参数的仪器陆续出现。例如测量线位移和角位移的电子电位器、半导体应变仪、利用电感原理的线性可变微分传感器和磁同步器、数字式编码器以及利用光学原理的摩尔条纹等；测量瞬时线速度的电感式运动线圈和磁阻传感器、激光德普勒效应测速仪；测量瞬时角速度的直流与交流电感式测速计、电容测速计与数字式测速计；各种振动测量中的加速度计；测量力和力矩的压电晶体压力传感器、电压式测力仪以及频率静力测量仪等。

八、机构最优化设计

60年代中期以后,由于机构分析理论逐渐完善,近代的数学规划论提供了各种数学手段,以及电子计算机的广泛应用,使机构最优化设计的研究得到了迅速的发展。最近十年来,这已成为机构综合领域中最吸引人们注意的课题,并逐渐成为近代机构尺度综合中普遍适用的方法和主要发展方向。机构最优化设计大致包括下列几项主要内容:

1. 根据设计要求确定设计准则和设计变量。设计变量数目愈多,计算机的源程序亦愈复杂。按设计变量的多少,一般可把设计项目分为小型(设计变量 $n = 2 \sim 10$ 个)、中型($n = 10 \sim 50$ 个)、大型($n = 50 \sim 200$ 个)等三型。

2. 给出数学模型,确定设计约束,建立目标函数。这是最优化设计中机构学研究的重点。在许多可行的设计方案中,用以选择最优方案标准的函数称为目标函数。对设计变量选择的某些限制称为设计约束,它分为等式约束与不等式约束两种。如果目标函数与等式约束和不等式约束都是变量的线性函数,则称为线性规划问题。如果目标函数是变量的非线性函数,则不论等式约束和不等式约束是否为变量的线性函数,均称为非线性规划问题。机构最优化设计往往都是非线性规划问题。

3. 探索最优化途径,优选设计变量。利用数学规划方法选定搜索策略,按照一定方向与步长一步步搜索最优值。数学最优化方法很多,对于机构学工作者来说,属于数学原理与方法的应用。即根据设计变量的多少,选择最优化方法,拟定计算程序,按照计算机要求用算法语言编写源程序并上机运算。近十年来,对于机构最优化设计,某些方面已建立有标准计算程序。

4. 最优化方案的确定。根据初步求得的机构方案中的结构参数和运动学尺寸,进行机构分析,以获得其实际值。然后利用电子计算机的逻辑判断能力,按实际值与目标函数比较,来评估所选机构参数是否达到最优值。这一过程是计算机的迭代运算过程。最后,按终止条件决定最优化方案。

最优化方法很多,一般可分为无约束最优化方法和约束最优化方法两大类:

(1) 无约束最优化方法:一般求解是采用电子计算机容易接受的迭代法,即以一个初始点出发,按照一定原则寻找可行方向和适当步长,一步步向最优点逼近。在一系列迭代中,目标函数一次比一次减少,最后必须收敛于目标函数的最小值(即最优值)。对于优化方向和步长选择方法的不同,现在主要有经典的牛顿法以及这种方法的修正如梯度法、共轭梯度法、变尺度法等。最近多采用波惠尔法,它不用对目标函数作求导计算,属于直接搜索类型,常用于设计变量 $n < 10 \sim 20$ 个时,是求无约束最优化问题的一种有效方法。

(2) 约束最优化方法:这种方法中最常用的是所谓“惩罚函数”法,是将约束最优化方法转化为无约束最优化问题的一种求解方法。它把原来的目标函数和所谓“惩罚函数”组成新的目标函数,使新的目标函数在优化过程中不破坏约束方程并收敛到和原问题的同一最优解上去。这种方法适用于设计变量 $n < 100$ 个的中型最优化设计中。此外,还有可行方向法和随机搜索法等。

最优化设计在平面连杆机构中讨论得最多的是符合运动学要求,70年代以后,机构动力学特性的最优化问题开始被注意,例如某些目标函数是从动杆的角加速度与运动副中的反力

最小、输入轴扭矩波动极小、机构具有最佳质量平衡条件、以及运动副的间隙和偏差对动力特性的影响最小等。空间连杆机构的最优化问题近年来亦开始进行研究。在凸轮机构最优化设计方面，研究了基圆最小尺寸的确定和偏置量的确定等，现在则比较注重处理动力学问题，其目标函数例如为凸轮与从动杆滚子间接触应力最小、在给定速度范围内凸轮机构的振荡最优化等。另外，例如齿轮-连杆组合机构再现函数与轨迹的最优化设计以及齿轮变速器和行星减速器的体积最小化等亦均有所研究。

参 考 文 献

[1] B.Roth, Getriebeforschungen in den USA und ihre Praktische Bedeutung, VDI Berichte, Nr.110, 1970, S.51—53。

[2] И.И.Артобольевский, Некоторые общие проблемы современной теории машин и механизмов, Изв.ВУЗ Машиностр. Вып. 4, 1970, СТР.11—22。

[3] 小川洁, 机构学发展の现状と将来, 日本机械学会志, 74卷, 624期, 1971, 19—29页。

[4] F.Freudenstein, Kinematics: Past, Present and Future, MMT, vol. 8, No.2, 1973, PP.151—160。

[5] E.Stephan, 25 Jahre Forschungskoooperation des Industriezweiges Getriebe und Kupplungen und der Technischen Unversität Dresden, Maschinenbautechnik, Bd.23, Nr.10, 1974, S.458—462。

[6] I.I.Artobolevskii, General Problems in the Theory of Machines and Mechanisms, MMT, vol.10, No. 2 / 3, 1975, PP.125—130。

[7] I.I.Artobolevskii, Past, Present and Future of the Theory of Machines and Mechanisms, MMT, vol.11, No. 6, 1976, PP.353—361。

[8] W.Meyer zur Capellen, Kinematics—A Survey in Retrospect and Prospect, J.Mech. vol.1, No. 3 / 4, 1966, PP.211—228。

[9] K.H.Hunt, Geometry—The Key to Mechanical Movements, MMT, vol.11, No. 2, 1976, PP.79—89。

[10] 日本机械学会编, 机械工学最近10年の歩み (1968~1977), 东京, 1977。

[11] L.Harrisberger, A Number—Synthesis Survey of Three Dimensional Mechanisms, Trans, ASME (B), vol.87, 1965, PP.213—220。

[12] L.Harrisberger, A.H.Söni, A Survey of Three Dimensional Mechanisms With One General Constraint, ASME Paper 66—Mech—44, 1966。

[13] H.Nolle, Linkage Coupler Curve Synthesis: A Historical Review, MMT, vol.9, No. 2, 1974, PP.147—168; vol. 9, No. 2, PP.325—348; vol.10, No.1, 1975, PP.41—55。

[14] B.S.Thompson, A Survey of Analytical Path—Synthesis Techniques for Plane Mechanisms, MMT, vol.10, No. 2 / 3, 1975, PP.197—205。

[15] K.Hain, Zusammenfassung und Ausblick zum Thema Kurbel und Kurvengetriebe, VDI Berichte, Nr.110, 1970, S.105—108。

[16] F.Y.Chen, A Survey of the State of the Art of Cam System Dynamics, MMT, vol. 12, No. 3, 1977, PP.201—224。

[17] G.Dittrich, R.Braune, Ungleichförmig Übersetzende Getriebe, Z.VDI, Bd.116, Nr. 12, 1974, S.998—1004。

[18] C.Becker, Ungleichförmig übersetzende Getriebe, Z.VDI, Bd.117, Nr. 23, 1975, S.

1176—1181。

[19] P.N.Sheth, J.J.Jr. Uicker, IMP, A Computer Aided Design Analysis System for Mechanisms and Linkage, Trans.ASME (B), vol.94, No. 2, 1972, PP.454—464。

[20] R.L.Fox, K.C.Gupta, Optimization Technology as Applied to Mechanism Design, Trans.ASME (B), vol.95, No. 2, 1973, PP.657—662。

[21] R.R.Root, K.M.Ragsdell, Survey of Optimization Methods Applied to the Design of Mechanisms, Trans.ASME (B), vol.98, No. 3, 1976, PP.1036—1041。

[22] G.G.Lowen, W.G.Jandrasits, Survey of Investigations into the Dynamic Behavior of Mechanisms Containing Links with Distributed Mass and Elasticity, MMT, Vol.7, No.1, 1972, PP.3—17。

[23] A.G.Erdman, G.N.Sandor, Kineto—Elastodynamics—A Review of the State of the Art and Trends, MMT, Vol.7, No.1, 1972, PP.19—33。

[24] T.E.Shoup, C.W.Mclarnan, A Survey of Flexible Link Mechanisms Having Lower Pairs, J.Mech. Vol.6, No.1, 1971, PP.97—105。

附录一、查阅国外机构学文献的几种主要文摘、索引简介

1. 国外科技资料馆藏目录, 机械制造、动力工程与电工分册和数学、力学分册, 北京中国科学技术情报研究所出版, 月刊。有原文文献题目及中文译名, 期刊名称、卷期、页次及年份, 以及馆藏资料分类索取编号。
2. 机械制造文摘, 科技文献出版社重庆分社出版, 双月刊, 在通用机械零件和机构栏中刊有国外机构学的文献标题或摘要, 但1977年以后本栏已删去。
3. The Engineering Index, 美国纽约出版, 有月刊、年刊两种, 按文献类别的第一个英文字母分类查阅, 如Mechanism查M类, Kinematic查K类。有文献内容的英文摘要。
4. British Technology Index, 英国伦敦出版, 月刊, 按文献标题第一个英文字母分类, 无摘要。
5. 科学技术文献速报, 日本科学技术情报社出版, 半月刊, 在工学一般、机械工学篇中的机械工学一般、机械の要素与计测器械等栏中载有机构学文献的原文标题以及日文摘要。每年还出版一本年度目录总汇编, 按专题分类。
6. 机械工学年鉴, 日本机械学会编, 年刊, 在机械要素栏中刊有机构学方面文献的综合报导。
7. Реферативный журнал, 苏联科学院科技情报研究所出版, 月刊, 其第48分册 Машиностроительные материалы Конструкции и расчет деталей машин Гидропривод 中机械零件栏内载有机构学方面的文献摘要。本文摘有年度文献题目索引。

附录二、登载机构学文献的几种主要国外期刊

(一) 英国出版

1. Mechanism and Machine Theory, 原名Journal of Mechanisms, 1972年第7卷起改称现名, 由国际机器理论与机构学联合会 (IFTOMM) 主办, 原为季刊, 1975年后改为双月刊。本书中引用时缩写为MMT和J.Mech.。
2. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 月刊, 系英国机械工程师学会会报。本书中引用时缩写为Proc.IME.。

3. International Journal of Mechanical Science, 月刊。本书中引用时缩写为 Int. J. Mech. Sci.。

4. Bulletin of Mechanical Engineering Education, 曼彻斯特科技学院主办。本书中引用时缩写为 Bull. MEE。

(二) 美国出版

1. Transaction ASME, Series B, Journal of Engineering for Industry, 季刊, 系美国机械工程师协会会报, 本书中引用时缩写为 Trans. ASME (B)。

2. Transaction ASME, Series E, Journal of Applied Mechanics, 季刊, 系美国机械工程师协会会报, 本书中引用时缩写为 Trans. ASME (E)。

3. Machine Design, 半月刊, 本书中引用时缩写为 Mach. Des.。

4. Product Engineering, 月刊, Mc Graw-Hill 出版, 本书中引用时缩写为 Prod. Engng.。

5. Mechanical Engineering, 月刊, 由美国机械工程师协会主办, 本书引用时缩写为 Mech. Engng.。

6. ASME Paper, 美国机械工程师协会会议论文, 单行本, 文献编号: 年份——会议名称缩写——论文编号。

(三) 西德出版

1. Konstruktion im Maschinen-Apparate-und Geraetebau, 月刊, 德国工程师学会 (VDI) 主办。本书引用时缩写为 Konstruktion.。

2. VDI-Zeitschrift, 半月刊, 德国工程师学会主办。本书引用时缩写为 Z. VDI.。

3. VDI-Berichte, 系德国工程师学会主办的不定期专集。

4. Industrie-Anzeiger, 每三天一期的快报, 在埃森出版。本书引用时缩写为 Ind. Anz.。

5. Feinwerktechnik und Messtechnik, 月刊, 德国工程师学会主办, 本书引用时缩写为 Feinwerk.。

(四) 东德出版

1. Maschinenbautechnik, 月刊, 由东德工程师学会 (VEB) 主办。

(五) 日本出版

1. 日本机械学会论文集, 月刊, 日本机械工程师学会主办。

2. Bulletin of the JSME, 月刊, 系日本机械工程师学会用英文出版的会报。本书引用时缩写为 Bull. JSME.。

3. 日本机械学会志, 月刊, 日本机械工程师学会主办。

4. 机械设计, 月刊, 东京日刊工业新闻社出版。

5. 机械の研究, 月刊, 东京养贤堂出版。

6. 自动化技术, 月刊, 东京工业调查会出版。

7. 精密机械, 月刊, 东京精密机械学会出版的会志。

(六) 苏联出版

1. Машиноведение, 双月刊, 苏联科学院机械研究所出版, 本书引用时缩写为 Машиновед. АН. СССР.。