

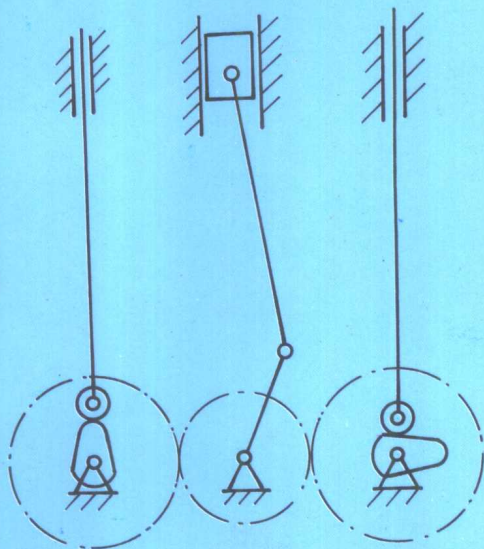
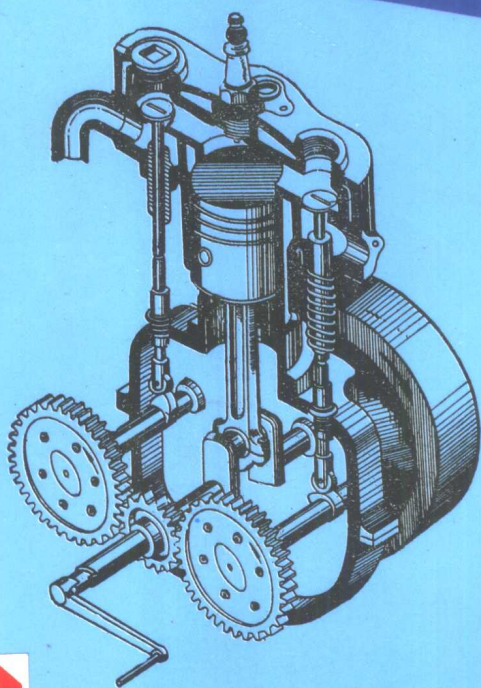
高等学校教材

# 机械原理

(第七版)

东南大学机械学学科组

郑文纬 吴克坚 主编



高等教育出版社

高等学校教材

# 机械原理

(第七版)

东南大学机械学学科组  
郑文纬 吴克坚 主编

高等教育出版社

(京)112号

图书在版编目(CIP)数据

机械原理 / 郑文纬, 吴克坚主编; 郑星河等编. —7版.  
北京: 高等教育出版社, 1997. 7(2000重印)  
高等学校教材  
ISBN 7-04-005966-5

I. 机… II. ①郑… ②吴… ③郑… III. 机械学—高等  
学校—教材 IV. TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 02226 号

---

出版发行	高等教育出版社		
社 址	北京市东城区沙滩后街 55 号	邮政编码	100009
电 话	010-64054588	传 真	010-64014048
网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>		
经 销	新华书店北京发行所		
排 版	高等教育出版社照排中心		
印 刷	北京印刷集团有限责任公司印刷二厂		
		版 次	1956年10月第1版
开 本	850×1168 1/32		1997年7月第7版
印 张	18.875	印 次	2000年2月第4次印刷
字 数	490 000	定 价	17.80 元

---

凡购买高等教育出版社图书, 如有缺页、倒页、脱页等  
质量问题, 请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

## 内 容 提 要

本书是在前六版的基础上,根据国家教育委员会批准的《高等工业学校机械原理课程教学基本要求(1995年修订版)》进行全面修订的。

本书除绪论外共十三章,包括机构的结构分析、平面机构的运动分析、平面连杆机构及其设计、凸轮机构及其设计、齿轮机构及其设计、轮系及其设计、其他常用机构、机械运动方案的拟定、平面机构的力分析、平面机构的平衡、机器的机械效率、机器的运转及其速度波动的调节、计算机在机构分析和综合中的应用。此外,书末还附有各章思考题和习题以及常用的图表。

本书可作为高等工业学校机械类各专业的教材,也可供有关教师及工程技术人员参考。

## 序 言

本版是根据国家教育委员会颁发的《高等工业学校机械原理课程教学基本要求(1995年修订版)》(以下简称《基本要求》)进行全面修订的,它适用于机械类各专业。书中大部分是《基本要求》所规定的内容,有\*号的内容为扩充材料,供不同学时数和不同专业的教学需要,或因材施教及自学提高之用。

本版修订前,编者广泛听取了有关学校师生的意见,并吸取了第六版问世七年来在教育改革实践中的经验(编者参加的机械原理课程组被评为江苏省一类优秀课程组,这门课程的教学被江苏省评为普通高等学校优秀教学质量一等奖)。修订时编者经过了多次集体讨论,力争吃透《基本要求》精神,明确修订重点和方案。《基本要求》明确指出:机械原理课程的任务是“使学生掌握机构学和机械动力学的基本理论、基本知识和基本技能,并初步具有拟定机械运动方案、分析和设计机构的能力”。因此,编者在修订中,除继续努力精选有关“三基”的内容外,还突出了“机械运动方案的拟定”及“分析和设计机构的能力”方面的内容介绍,吸收了国内有关教育改革和科学研究的成果。如系统论述了机械运动方案的拟定在整个机器设计中的地位和内容,并结合例题介绍了具体步骤;重点说明了机构组合和机构选型在机械运动方案拟定中的作用,特别是机构组合后的设计方法及机构选型的评价问题,使理论和实际结合更为密切。在平面连杆机构和凸轮机构方面,内容有较多的更新。在齿轮机构、轮系和其他常用机构以及机械动力学的有关内容也都作了细致的精选工作。为了便于教学,计算机在本课程中的应用同第六版一样仍自成一章,可以用于课堂教学,也可结

合课程设计或其他方式进行教学。本版总篇幅有适当的精简,思考题和习题均有改进和调整,以使 学生能更好地集中精力,并在分析和思考问题的能力上得到锻炼。

本版的名词术语、单位及符号采用现有国标(GB)和法定计量单位及国际标准化协会(ISO)的标准。

参加本版编写的同志有吴克坚(第一章、第五章、第六章)、钱瑞明(第三章、第四章)、郑星河(第二章、第七章、第十三章)、郑文纬(绪论及其余各章),由郑文纬和吴克坚两同志任主编。

本版承国家教育委员会前属机械原理课程指导组成员、上海交通大学博士生导师邹慧君教授精心审阅,提出了很多宝贵意见,编者特此表示衷心感谢。

本书初编人和前几版主编黄锡恺教授始终关怀着本版的编写工作,编者深表敬意。

由于编者水平所限,误漏欠妥之处在所难免,竭诚欢迎同行和读者批评指正。

编者

1996年11月

# 目 录

绪 论	1
§ 0-1 机械原理的研究对象	1
§ 0-2 机械原理课程的内容及在培养人才中的地位、任务和作用	5
§ 0-3 机械原理学科的发展趋势	7
第一章 平面机构的结构分析	9
§ 1-1 研究机构结构的目的	9
§ 1-2 运动副、运动链和机构	10
§ 1-3 平面机构运动简图	14
§ 1-4 平面机构的自由度	16
§ 1-5 平面机构的组成原理和结构分析	25
第二章 平面机构的运动分析	33
§ 2-1 研究机构运动分析的目的和方法	33
§ 2-2 速度瞬心法及其在机构速度分析上的应用	35
§ 2-3 用相对运动图解法求机构的速度和加速度	41
§ 2-4 用解析法求机构的位置、速度和加速度	54
§ 2-5 运动线图	64
第三章 平面连杆机构及其设计	67
§ 3-1 平面连杆机构的特点及其设计的基本问题	67
§ 3-2 平面四杆机构的基本型式及其演化	69
§ 3-3 平面四杆机构的主要工作特性	76
§ 3-4 实现连杆给定位置的平面四杆机构运动设计	88
§ 3-5 实现已知运动规律的平面四杆机构运动设计	93
§ 3-6 实现已知运动轨迹的平面四杆机构运动设计	103
第四章 凸轮机构及其设计	108
§ 4-1 凸轮机构的应用和分类	108

§ 4-2	从动件的运动规律 .....	111
§ 4-3	按给定运动规律设计凸轮轮廓曲线——作图法 .....	121
§ 4-4	按给定运动规律设计平面凸轮轮廓曲线——解析法 .....	130
§ 4-5	凸轮机构基本尺寸的确定 .....	138
* § 4-6	高速凸轮机构简介 .....	149
<b>第五章</b>	<b>齿轮机构及其设计</b> .....	<b>153</b>
§ 5-1	齿轮机构的应用和分类 .....	153
§ 5-2	齿廓啮合基本定律 .....	157
§ 5-3	渐开线及渐开线齿廓 .....	162
§ 5-4	渐开线齿轮的各部分名称及标准齿轮的尺寸 .....	167
§ 5-5	渐开线直齿圆柱齿轮的啮合传动 .....	174
§ 5-6	渐开线齿廓的展成加工及根切现象 .....	184
§ 5-7	变位齿轮 .....	191
* § 5-8	变位齿轮传动 .....	195
§ 5-9	平行轴斜齿圆柱齿轮机构 .....	202
* § 5-10	交错轴斜齿轮机构 .....	212
§ 5-11	蜗杆机构 .....	217
§ 5-12	圆锥齿轮机构 .....	222
* § 5-13	其他曲线齿廓的齿轮机构简介 .....	228
<b>第六章</b>	<b>轮系及其设计</b> .....	<b>236</b>
§ 6-1	轮系及其分类 .....	236
§ 6-2	定轴轮系的传动比及应用 .....	237
§ 6-3	周转轮系的组成及传动比 .....	242
§ 6-4	复合轮系的传动比及应用 .....	248
§ 6-5	行星轮系各轮齿数和行星轮数的选择 .....	258
* § 6-6	渐开线少齿差行星减速器、摆线针轮行星减速器及谐波齿轮 传动简介 .....	262
<b>第七章</b>	<b>其他常用机构</b> .....	<b>270</b>
§ 7-1	万向联轴节 .....	270
§ 7-2	螺旋机构 .....	276
§ 7-3	棘轮机构 .....	278
§ 7-4	槽轮机构 .....	286



· § 7-5	不完全齿轮机构 .....	295
* § 7-6	凸轮式间歇运动机构 .....	299
* § 7-7	非圆齿轮机构 .....	301
<b>第八章</b>	<b>机械运动方案的拟定 .....</b>	<b>306</b>
§ 8-1	机械运动方案的拟定在机器设计中的地位和内容 .....	306
§ 8-2	机构的组合方式和有关的设计方法 .....	308
§ 8-3	机构的选型 .....	330
§ 8-4	机器执行机构的协调和运动循环图 .....	335
§ 8-5	机械运动方案拟定示例 .....	337
<b>第九章</b>	<b>平面机构的力分析 .....</b>	<b>345</b>
§ 9-1	研究机构力分析的目的和方法 .....	345
§ 9-2	构件惯性力的确定 .....	348
§ 9-3	运动副中摩擦力的确定 .....	352
§ 9-4	不考虑摩擦力的机构力分析 .....	363
§ 9-5	速度多边形杠杆法 .....	371
* § 9-6	考虑摩擦力的机构力分析 .....	374
<b>第十章</b>	<b>平面机构的平衡 .....</b>	<b>377</b>
§ 10-1	平衡的目的和分类 .....	377
§ 10-2	刚性回转件的平衡 .....	378
§ 10-3	刚性回转件的平衡试验法 .....	385
* § 10-4	挠性回转件的平衡概述 .....	390
§ 10-5	机架上的平衡 .....	395
<b>第十一章</b>	<b>机器的机械效率 .....</b>	<b>404</b>
§ 11-1	机器的运动和功关系 .....	404
§ 11-2	机器的机械效率和自锁 .....	406
* § 11-3	瞬时效率计算及自锁分析示例 .....	412
<b>第十二章</b>	<b>机器的运转及其速度波动的调节 .....</b>	<b>425</b>
§ 12-1	研究机器运转及其速度波动调节的目的 .....	425
§ 12-2	机器等效动力学模型 .....	426
§ 12-3	机器运动方程式的建立及解法 .....	434
§ 12-4	机器周期性速度波动的调节方法和设计指标 .....	440
§ 12-5	飞轮设计 .....	443

§ 12-6	机器非周期性速度波动的调节方法·····	452
<b>第十三章</b>	<b>计算机在机构分析和综合中的应用</b> ·····	<b>455</b>
§ 13-1	概述·····	455
§ 13-2	单杆及杆组的运动分析·····	457
§ 13-3	单杆及杆组的力分析·····	469
§ 13-4	平面机构的分析示例·····	479
* § 13-5	平面机构的综合示例·····	481
* § 13-6	机构优化设计简介·····	485
	<b>思考题和习题</b> ·····	<b>497</b>
	<b>附表 5-1 至 5-6; 附表 10-1</b> ·····	<b>579</b>
	<b>附图 10-1</b> ·····	<b>587</b>
	<b>主要参考文献</b> ·····	<b>588</b>

# 绪 论

## §0-1 机械原理的研究对象

“机械”是“机器”和“机构”的总称。“机械原理”是一门以机器和机构为研究对象的学科。

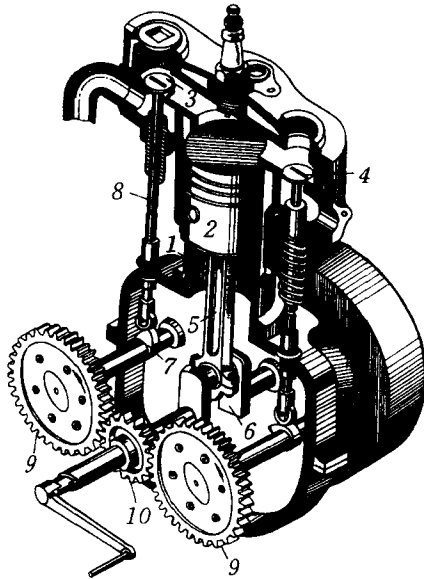


图 0-1

机器这一概念多少年来已逐渐在人们的头脑中形成,而且还在不断发展。机器的种类繁多,其构造、性能和用途等各不相同。如图0-1所示为单缸四冲程内燃机,它是由气缸体1、活塞2、进气阀3、排气阀4、连杆5、曲轴6、凸轮7、顶杆8、齿轮9和10等所组成。活塞的往复移动通过连杆转变为曲轴的连续转动。凸轮和顶杆是用来启闭进气阀和排气阀的。三个齿轮保证进、排气阀和活塞之间形成有一定节奏的动作。以上各件的协同工作便能使燃气的热能转换为曲轴转动的机械能。又如如图0-2所示的五自由度关节式焊接机器人是由基座1、立柱2、下臂3、上臂4、连杆5、螺杆6、螺母7、手腕8和五个电动机(图中只看到 $M_1$ 、 $M_2$ 和 $M_3$ 三个)等组成。其中 $M_1$ 经减速器使螺杆6旋转,带动螺母7和连杆5使上臂4作角度为 $\varphi_3$ 的俯仰运动。其他四个电动机分别通过减速器使立柱2相对基座1作角度为 $\varphi_1$ 的水平回转;使下臂3作角度为 $\varphi_2$ 的前后倾斜运动;使手腕8作角度为 $\varphi_4$ 和 $\varphi_5$ 的弯曲和旋转运动。最后实现对焊炬位置和姿态的控制。再如电动机是由一个转子(电枢)和一个定子所组成。当定子中有电流输入时,转子便能作回转运动,使电能转换为机械能。从以上三个例子可以看出,这些机器的构造、性能、用途等虽然不同,但从其力学特性和在生产中的地位来看,它们仍保持着下列共同的特征。即:

1) 它们都是由各种材料做成的制造单元(通常称为零件)经装配而成的各个运动单元(通常称为构件)的合体;

2) 各个运动单元之间具有确定的相对运动。当在预定的力约束条件下,其中一个或一个以上单元的运动一定时,该合体就能实现预期的机械运动;

3) 在生产过程中,它们能代替或减轻人的劳动,完成有用的机械功(如机器人仿人工作)或转换机械能(如内燃机、电动机分别将热能和电能转换成机械能)。

因此,机器是执行机械运动的装置,用来完成有用的机械功或

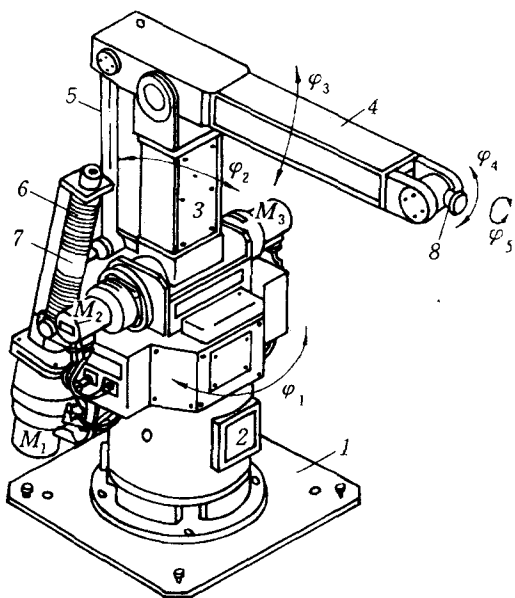


图 0-2

转换机械能。凡用来完成有用功的机器称为工作机，如各种机床、起重机、轧钢机、纺织机、搅拌机、发电机、压缩机等。凡将其他形式的能量转换为机械能的机器称为原动机，如内燃机、蒸汽机、电动机等。工程中大多是工作机和原动机互相配合应用，有时再加上独立的传动装置(如齿轮减速器等)，则称为机组。

机器中的构件可以是单一的零件，也可以是由几个零件装配成的刚性结构。所以说构件和零件是两个不同的概念，构件是运动单元，而零件是制造单元。在本课程中，我们将构件作为研究的基本单元。

凡本身固定不动的构件，或相对地球运动但固结于给定坐标参考系并视为固定不动的构件统称为机架。前者如各种固定在地

基上的机座；后者如飞机的机体和车辆的车架。由于机架支持各个作相对运动的构件，故研究它们的运动时，通常以机架为基准，即假定它是静止的。

在除机架外的构件中，驱动力(或力矩)所作用的构件称为原动构件或主动构件，而其余随着原动构件的运动而运动的构件称为从动构件。也有将输入运动或动力的构件称为输入构件，而将输出运动或动力的构件称为输出构件。在一般情况下，原动构件即输入构件，而从动构件中能够实现预期运动的构件即为输出构件。在本课程中，常将各构件专门名称中的“构件”简称为“件”，如原动件、从动件等。

机器的概念已如上述，但仔细分析有关图例可以发现，一般机器还不是能够实现预期运动的最基本的组合体。在图 0-1 所示的内燃机中，活塞、连杆、曲轴和气缸体组合起来，可将活塞的往复移动变成曲轴的连续转动；凸轮、顶杆和气缸体的另一组合，可将凸轮的连续转动变成顶杆的按另一种预期运动规律的往复移动；而三个齿轮与气缸体组合在一起后，又可将转动变快或变慢，甚至改变转向。这些具有各自运动特点且均含有一个机架(这里是气缸体)的组合体才是基本的。人们将能够实现预期的机械运动的各构件(包括机架)的基本组合体称为机构。因此，机器应是由各种机构所构成的系统。多数机器都包含若干个不同的机构，上述内燃机就包含了曲柄滑块机构、凸轮机构和齿轮机构等三个不同的机构。最简单的机器只含有一个最简单的机构，如电动机、鼓风机等只含有一个双杆回转机构。

由于机器最终承担了“能代替或减轻人类的劳动，完成有用的机械功或转换机械能”的任务，故一般认为机器的研究重点是功能问题，延伸来说机器与其应用有密切的联系；而机构的研究重点是在其结构、运动和力作用等基本方面。两者研究的着重点有所不同。

随着近代科学技术的发展，机器和机构的概念也有相应的变

化。如当今人类不仅对力学有了深刻的认识,而且在数学、电子学、自动控制、计算机等科学技术方面也有了巨大的进步。人类综合应用了各方面的知识和技术,不断创造出各种新型的机器。特别是电子计算机(电脑)的出现和不断完善,在减轻人类的脑力劳动方面有显著的成效。这类机器除具有使其内部各机构正常动作的先进控制系统外,还包含有信息采集、处理和传递系统等。因此,“机器”的概念可以扩充为:一种用来转换或传递能量、物料和信息的、能执行机械运动的装置。这些是“机构”所不具备的。至于当前机构所涉及的问题也日益广泛和多样化。如组成机构的构件在有些情况下已不能简单地看成刚体;有时候气体和液体也参与了实现预期的机械运动。对于前者含有弹性构件的机构学已成为本学科的研究内容之一;而后者特称之为气动机械和液压机械,已形成新的专门课程。至于“机组”的概念,在有些情况下也应包括独立的电子计算机控制系统和其他系统,如“机器人”便是包括多种系统的机组。

## §0-2 机械原理课程的内容及在培养人才中的地位、任务和作用

### 一、机械原理课程的内容

如前所述,机械原理是一门研究机构和机器的学科。为了科学系统性和便于教学起见,在机械原理课程中,我们将各种机器的共同问题归纳成机构的结构和运动学以及机构和机器的动力学两大部分来讨论。这两部分的具体内容如下:

(1) 机构的结构和运动学 分析机构的结构是为了研究机构运动的可能性和确定性,并进一步讨论机构的组成原理;机构的运动学不考虑引起机构运动的力的作用,而从几何的观点来研究机构各点的轨迹、位移、速度和加速度的求法,以及按已知条件来设

计新机构的方法。

(2) 机构和机器的动力学 研究在机械运动过程中作用在机构各构件上的力分析和惯性力的平衡问题;并研究确定机械效率的方法和已知力作用下机械的真实运动规律,以及作用力、运动构件的质量和这些构件的运动之间的关系,即机械的运转和调速问题。

就上述内容的性质而论,机械原理所研究的问题又可归纳为两类:第一类问题是根据已有机构的结构和主要参数来分析该机构或所组成机器的各种特性(结构、运动学和动力学),即机构和机器的分析问题,如机构的结构分析、运动分析、力分析和在已知力作用下机器的真实运动等;第二类问题是根据预期的各种特性来确定新的机构和机器的型式、结构和主要参数,即机构和机器的设计问题,如各种主要机构的运动设计、机构的平衡和机器速度波动的调节等。这里研究的问题只限于就与机构和机器的运动和动力特性有关的机构型式、结构和各部主要参数之间的关系进行综合,而不研究与机械零件有关的问题,如零件的形状、构造、强度、材料和工艺等。故在机械原理学科中常用“综合”来代替上述的“设计”这一名词,以示区别。综合也就是分析的逆问题。

为了在有限的学时中能对机器中最典型和常用的机构有较深入的探讨,故本课程以作平面运动的平面机构为主要内容。

电子计算机的应用为本课程提供了先进的工具和新的途径(如优化、仿真等),使机构和机器的分析和综合中的一些复杂问题成为实际可行。另一方面,测试技术的进步为机械运动学和动力学的研究创造了有利条件。本课程中(包括课程设计和实验)均有所涉及。

## 二、机械原理课程在培养人才中的地位、任务和作用

机械的种类是十分繁多的,因此在高等工业学校中,相应地设置了各种专业的课程来详细地研究各种不同用途的专门机械。但



是当研究任一具体的机械时,不仅需要研究它所具有的特殊问题,而且还要研究所有机械的共同问题。机械原理便是为此目的而开设的技术基础课程。它是以高等数学、普通物理、机械制图及理论力学等课程为基础,同时又为以后学习机械设计和有关专业课程以及掌握新的科学技术成就打好工程技术的理论基础,并能使学生受到一些必要的,严格的基本技能和创造思维的训练。因此,《高等工业学校机械原理课程数学基本要求(机械类专业适用)》明确指出:机械原理是机械类专业中研究机械共性问题的一门主干技术基础课。它的任务是使学生掌握机构学和机械动力学的基本理论、基本知识和基本技能,并初步具有拟定机械运动方案、分析和设计机构的能力。它在培养高级工程技术人才的全局中,具有增强学生对机械技术工作的适应能力和开发创造能力的作用。

### §0-3 机械原理学科的发展趋势

根据以上所述,“机械原理”是“机构和机器的原理”的总称。在国内也有称作“机器理论与机构学”,国际上有相应的学科组织称为国际机器理论与机构学联合会(International Federation for Theory of Machines and Mechanisms,简称 IFTOMM)。从近几年该会组织交流的学术论文反映,本学科的发展趋势有以下几个方面<sup>[28]</sup>:

(1) 平面、空间机构的分析与综合 平面机构研究中主要是涉及机构的型、数综合和活动度分析,其中较多地应用图论这一数学工具来研究问题;对于机构运动学和动力学的新理论和新方法也注意研究。

空间机构的研究中有涉及平面机构理论向空间机构推广的问题,也有研究空间基本机构分析与综合的新方法。

(2) 机器人机构 由于机器人是当前研究的热点,所以在机构学中形成了专题研究。其中以普通、特殊串联,多环并联机器人