

● 高等学校教学参考书

高等机械原理

楼鸿棣 邹慧君 主编



高等教育出版社

内 容 简 介

本书阐述了机器和机构的设计理论和方法。除第一章绪论外,分为五个部分:第二章、第三章为机构结构原理和机构运动几何学基础;第四章、第五章为高副机构分析与综合基础;第六章、第七章和第八章为低副机构分析与综合基础;第九章、第十章、第十一章和第十二章为机构和机器动力学分析方法;最后,第十三章介绍机构优化设计的方法和数学模型的建立。

本书可以作为机械类各专业高年级学生选修课教材、机械学科的研究生教材,亦可供从事机器和机构设计、研究的科技人员、教师参考之用。

高等学校教学参考书

高 等 机 械 原 理

楼鸿棣 邹慧君 主编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 27.5 字数 626,000

1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷

印数 0001—2 880

ISBN 7-04-001096-8/TH·171

定价 6.20 元

序 言

随着科学技术的日益发展,要求机械产品的质量不断提高、机械产品的品种不断增加。同时,机械产品更新换代的周期却愈来愈短。为了有力地推动和促进机械工业中许多新产品、新设备的出现和发展,需要我们深入掌握和广泛应用机器和机构的设计原理。

近 20 年来,由于电子计算机的发展和被广泛应用,对于机器和机构理论的研究已有了显著的进展,其中不少成果已被逐步地反映到国内外一些机构学和机械原理的教材和教学参考书中。但是目前国内比较系统、比较深入地介绍有关机器和机构设计原理的书籍还不多,远不能适应机械原理的教学和满足有关工程技术人员需要。本书就是试图为满足上述要求而编写的。

自 1978 年我校机械学专业重新招收研究生以来,为了满足培养机构学方面硕士研究生的教学需要,我们教研室先后开出了“机构运动几何学基础”、“高副机构分析和综合”、“低副机构分析和综合”、“机构动力学”以及“机械优化设计”等研究生课程,并且编写了讲义或讲稿。在对前后五届硕士研究生的教学实践的基础上,根据这五门课程的最基本内容,我们编写了这一本较为全面和系统地论述机器和机构设计原理的教学参考书。由于这些内容是在现有“机械原理”课程内容的基础上进一步深化、充实和扩展。因此,从这个意义上来讲,我们把本书定名为《高等机械原理》。这“高等”两字仅仅是英文“Advanced”的意思。

本书共分十三章。第一章绪论阐述了机器和机构理论的研究对象、内容、发展趋向和机构综合方法等内容。第二章和第三章介绍了机构结构原理和机构运动几何学基础的基本内容,是机构分析与综合的基础理论知识。第四章和第五章是介绍高副机构分析与综合的基本问题,对瞬心面机构和共轭曲面机构的设计原理作了比较全面的论述。第六章、第七章和第八章是介绍低副机构分析与综合的基本问题,对刚体导引机构、实现函数机构和实现轨迹机构的设计原理和方法作了较为系统的阐述。第九章、第十章、第十一章和第十二章是介绍机构和机器动力学,对回转机构的振动、临界速度和挠性转子平衡,对机构惯性力和惯性力矩的平衡,对凸轮机构动力模型的建立和求解,以及对机械系统的动力学问题都作了比较详细的阐述。最后,第十三章对机构的优化设计的方法和数学模型的建立作了简明的分析和讨论。本书的体系和内容安排,主要是从适当加强机构综合、机构和机器动力学、以及基础理论出发,同时考虑密切联系实际、根据机器与机构设计的需要来编写的。

本书可以作为机械类各专业高年级学生选修课教材,机械学科的研究生教材;也可供那些需要进一步了解机器和机构设计原理的科学研究人员、工程技术人员和教师参考之用。

本书第一章由楼鸿棣、邹慧君编写;第二章由金孟浩编写;第三章由楼鸿棣、金孟浩编写;第四章和第五章由蒋正渠编写;第六章由楼鸿棣、许有恒编写;第七章和第八章由许有恒编写;第九章、第十章、第十二章由邹慧君编写;第十一章由楼鸿棣、邹慧君编写;第十三章由黄宇中、

金孟浩编写。并由楼鸿棣、邹慧君负责主编。

本书承国家教委机械原理课程教学指导小组委员、南京工学院黄锡恺教授以及程光蕴教授和郑文纬副教授仔细审阅,提出很多宝贵的意见。编者特表示衷心的感谢。

限于编者水平,误漏欠妥之处在所难免,恳切欢迎读者批评指正。

编 者

1987年10月于上海交通大学

目 录

第一章 绪论	1	(三) 动点轨迹的曲率	45
§ 1-1 引言	1	§ 3-3 波比里尔(Bobillier)	
§ 1-2 机器和机构理论的概况	2	定理	46
§ 1-3 机器和机构设计原则		§ 3-4 曲率驻点曲线	48
和步骤	7	(一) 曲率驻点曲线三次方程	48
第二章 机构的组成原理	12	(二) 曲率驻点曲线的特性	50
§ 2-1 概述	12	(三) 曲率驻点曲线的作图法	51
§ 2-2 机构的组成	12	(四) 铰点曲线	52
(一) 运动副的分类	12	(五) 鲍尔(Ball)点	53
(二) 运动链与机构	14	(六) 布尔梅斯特(Burmester)点	53
§ 2-3 机构的自由度	16	§ 3-5 瞬时不变量分析	54
(一) 平面机构自由度	16	(一) 坐标变换	55
(二) 空间机构自由度	18	(二) 瞬时不变量的计算	57
§ 2-4 平面机构的分类方法	25	(三) 曲率驻点曲线三次方程	58
(一) 杆组的定义	25	(四) 拐点圆	58
(二) 杆组的分类	26	(五) 布雷塞(Bresse)圆	59
§ 2-5 平面机构的类型综合		(六) 瞬时不变量运动分析	59
和演化	27	(七) 瞬时不变量的应用	60
(一) 单自由度机构的类型综合	28	习题	62
(二) 平面机构的演化	32	第四章 瞬心面机构	64
§ 2-6 空间机构的类型综合	34	§ 4-1 瞬心线的求法	64
习题	36	§ 4-2 已有的机构可用瞬心线机构	
第三章 机构运动几何学基础	39	来代替	65
§ 3-1 概述	39	§ 4-3 瞬心线机构的设计及其性质	
(一) 速度瞬心	39		66
(二) 瞬心线	40	(一) 瞬心线机构的基本关系式	66
(三) 哈特曼(Hartman)方法	40	(二) 瞬心线机构的设计	67
(四) 动点轨迹与曲率圆相切的条件	41	(三) 传动比函数的性质	69
§ 3-2 欧拉-萨伐里(Euler-Savary)		(四) 封闭瞬心线	70
方程	42	(五) 凸形瞬心线	73
(一) 拐点圆	44	(六) 主从动瞬心线具有相同形状的	
(二) 瞬心线曲率	44	条件	75
		§ 4-4 空间相对运动	77

§ 4-5 瞬时回转轴	80	综合方法	128
§ 4-6 空间瞬轴面机构	81	§ 6-5 用位移矩阵综合空间刚体导引	
习题	83	机构	131
第五章 共轭曲面机构	85	(一) 空间有限位移及螺旋位移矩阵	131
§ 5-1 平面共轭曲线	85	(二) 空间旋转矩阵	131
§ 5-2 平面共轭曲线机构的图解法		(三) 空间位移矩阵	133
设计	85	(四) 有限螺旋位移矩阵	133
(一) 包络线法	86	(五) 由数值位移矩阵求螺旋运动参数	134
(二) 啮合线法	86	(六) 空间常用导引构件的综合	136
(三) 反转法	87	(七) 空间导引机构综合实例	139
§ 5-3 平面共轭曲线机构的解析法		习题	143
设计	87	第七章 实现函数机构	144
(一) 微分几何的方法	87	§ 7-1 概述	144
(二) 齿廓法线法	94	§ 7-2 按封闭形法综合实现函数的平	
§ 5-4 空间共轭曲面机构的设计	101	面机构	145
(一) 微分几何的方法	101	(一) 位移方程	145
(二) 接触线法	106	(二) 最小二乘逼近的应用	147
习题	111	§ 7-3 用位移矩阵综合实现函数的平	
第六章 刚体导引机构	113	面机构	148
§ 6-1 概述	113	(一) 基本综合方法	148
§ 6-2 用复数按封闭形法综合平面刚		(二) 平面相对位移矩阵	149
体导引机构	114	(三) 三个精确点的综合	150
(一) 圆点曲线和圆心曲线的概念	114	(四) 四个精确点的综合	152
(二) 圆点曲线和圆心曲线的参数方程	114	§ 7-4 按封闭形法综合实现函数的空	
(三) 平面刚体导引机构的综合	115	间机构	153
§ 6-3 用位移矩阵综合平面刚体导引		(一) 位移方程直接化成线性设计方程组的	
机构	117	综合方法	154
(一) 平面位移矩阵	117	(二) 用线性叠加原理的综合方法	157
(二) 位移约束方程	118	§ 7-5 具有最佳结构偏差的实现函数	
(三) 平面三个位置综合	120	的空间机构综合	159
(四) 四个、五个位置综合	122	§ 7-6 用位移矩阵综合实现函数的空	
(五) 牛顿-莱夫森法解非线性方程组	123	间机构	161
(六) 五个以上位置的综合	124	(一) 空间相对位移矩阵	161
§ 6-4 按封闭形法综合平面刚体导引		(二) $RSSR$ 实现函数机构的综合	162
机构	125	习题	163
(一) 线性叠加原理	125	第八章 实现轨迹机构	165
(二) 用线性叠加原理的综合方法	126	§ 8-1 概述	165
(三) 用线性叠加原理和最小二乘逼近的		§ 8-2 用位移矩阵综合实现轨迹的平	

面机构	165
(一) 铰链四杆机构	165
(二) 曲柄滑块机构	168
§ 8-3 按封闭形法综合实现轨迹的平面机构	170
(一) 利用线性叠加原理的综合方法	170
(二) 利用线性叠加原理和最小二乘逼近的综合方法	172
(三) 直接按非线性方程组求解的综合方法	175
§ 8-4 用位移矩阵综合实现轨迹的空间机构	176
§ 8-5 用相对位姿矩阵综合实现轨迹的空间机构	178
(一) 相对位姿矩阵及其矩阵方程	178
(二) 实现轨迹机构的综合	182
习题	188
第九章 回转机械动力学	190
§ 9-1 概述	190
§ 9-2 转轴的横向振动及其临界速度	190
(一) 单圆盘转轴的振动和临界速度	190
(二) 多圆盘转轴的振动和临界转速	192
(三) 多圆盘转轴临界速度的近似解法	195
§ 9-3 考虑圆盘转动惯量时转轴的临界速度、回转效应	199
(一) 回转效应	199
(二) 圆盘转动惯量对单圆盘转轴临界速度的影响	200
(三) 考虑圆盘转动惯量时多圆盘转轴的临界速度	201
§ 9-4 均布质量转轴的横向振动及其临界速度	202
(一) 均布质量转轴的横向振动	202
(二) 轴向力、转动惯量和剪切变形对转轴横向振动的影响	205
(三) 近似解法	208
(四) 传递矩阵法	211
§ 9-5 回转构件的扭转振动和临界速度	212

(一) 力学模型的建立	212
(二) 带有两圆盘转轴的扭转振动	213
(三) 带有三个圆盘转轴的扭转振动	216
(四) 传递矩阵法	218
§ 9-6 齿轮传动系统的振动	222
(一) 双轴单级齿轮传动系统	222
(二) 考虑齿轮转动惯量的单级齿轮传动系统	223
(三) 考虑齿轮转动惯量的多级串联齿轮传动系统	223
§ 9-7 挠性转子的动平衡	225
(一) 挠性转子动平衡的特点	225
(二) 挠性转子的动平衡基本原理	226
(三) 挠性转子动平衡的基本方法	228
习题	232
第十章 机构的平衡	234
§ 10-1 引言	234
§ 10-2 机构平衡的基本原理	224
§ 10-3 质量代换	237
(一) 质量代换的条件	237
(二) 两质量代换	238
(三) “转化质量”的静代换方法	239
§ 10-4 平面连杆机构惯性力完全平衡	243
(一) 平面机构惯性力完全平衡的条件	243
(二) 铰链四杆机构的平衡	243
(三) 曲柄滑块机构的平衡	245
(四) 导杆机构的平衡	247
(五) 平面连杆机构惯性力完全平衡计算举例	248
(六) 多杆机构惯性力的平衡	250
(七) 利用机构的对称布置得到完全平衡	252
§ 10-5 平面四杆机构惯性力矩的平衡	253
(一) 平面四杆机构的动量矩	253
(二) 惯性力平衡后的铰链四杆机构的动量矩	254
(三) 惯性力平衡后的铰链四杆机构的震动力矩	255

(四) 铰链四杆机构惯性力矩的平衡	256
(五) 对输入扭矩和支承反力矩的影响	257
§ 10-6 曲柄滑块机构的部分平衡	258
(一) 曲柄滑块机构的运动分析	258
(二) 在曲柄上加回转质量的平衡方法	259
(三) 采用齿轮平衡机构的平衡方法	260
(四) 采用几套相似机构的平衡方法	261
§ 10-7 多缸发动机惯性力系的平衡	262
(一) 单缸发动机的震动力和震动力矩	262
(二) 单列式多缸内燃机惯性力系的平衡	262
(三) V形布置的内燃机的惯性力系的平衡	265
习题	267
第十一章 凸轮机构动力学	269
§ 11-1 概述	269
(一) 推杆运动规律的概述	269
(二) 凸轮机构的静态设计和动态设计	273
(三) 推杆运动规律对凸轮机构振动的影响	273
(四) 凸轮机构动力学的基本内容和研究方法	275
§ 11-2 凸轮机构振动的原因及其减小途径	275
§ 11-3 凸轮机构的力分析	277
(一) 弹簧力及最小弹簧预紧力	277
(二) 凸轮廓线形状对弹簧力和接触力的影响	278
(三) 作用在凸轮上的扭矩	279
§ 11-4 动力多项式凸轮机构	280
(一) 基本原理	280
(二) 采用 3-4-5 多项式的动力多项式凸轮设计	282
§ 11-5 凸轮机构动力模型建立的基本原理	283
(一) 引言	283
(二) 实际凸轮机构简化的原则	284
(三) 质量和刚度的等效	285
(四) 动力学模型的运动和动力特性参数	

的转化	286
(五) 凸轮机构动力学模型建立的举例	291
§ 11-6 推杆动力响应及其常用确定方法	294
(一) 解析法求推杆的真实运动	295
(二) 用数值法求推杆的真实运动	297
(三) 用谐量分析法求推杆的真实运动	301
§ 11-7 凸轮机构动力学其他几个问题	302
(一) 实际凸轮机构中影响推杆动力响应的一些因素	302
(二) 换向接触冲击	303
(三) 腾跳现象	303
(四) 凸轮的平衡	304
(五) 推杆弹簧颤动	304
(六) 高速凸轮机构设计要点	305
习题	305
第十二章 机械系统的动力学	308
§ 12-1 概述	308
(一) 机械系统动力学主要的研究内容	308
(二) 机械系统动力学的基本分析方法	308
(三) 作用在机械上的力	308
(四) 原动机及工作机的机械特性	309
(五) 机械特性的解析表示法	310
§ 12-2 机械系统的运动方程式	311
(一) 力的转化	311
(二) 质量的转化	313
(三) 转化构件的运动方程式	313
§ 12-3 单自由度机械系统的动力学	314
(一) 等效力和等效质量与位移有关时转化构件的动力学	314
(二) 当力为速度和时间的函数时转化构件的动力学	316
(三) 当力为角速度和角位移的函数时转化构件的动力学	320
(四) 当力为角速度和角位移的函数时转化构件稳定运动状态的动力学计算	323
§ 12-4 飞轮计算问题	324

(一) 活塞式发动机机组的飞轮计算.....	324	§ 13-4 无约束最优化方法	348
(二) 冲击作用机械的飞轮计算.....	325	(一) 牛顿法.....	348
§ 12-5 非周期性速度波动的调节 ...	328	(二) 变尺度法.....	350
(一) 机械的自调性.....	329	(三) 鲍威尔法.....	354
(二) 调速器的工作原理.....	329	(四) 可变多面体搜索法.....	358
(三) 调速器的性能.....	331	§ 13-5 约束最优化方法	361
习题	333	(一) 可变容差法.....	361
第十三章 机构优化设计	335	(二) 惩罚函数法.....	366
§ 13-1 概述	335	§ 13-6 机构优化设计实例	369
§ 13-2 基本概念和术语	335	(一) 实现函数的平面铰链四杆机构的优化设计.....	369
(一) 设计变量.....	335	(二) 实现轨迹兼作刚体导引用平面铰链四杆机构的优化设计.....	371
(二) 目标函数.....	336	(三) 六杆压力机构的优化设计.....	374
(三) 设计约束.....	337	(四) <i>RSSR</i> 空间机构的优化设计.....	378
(四) 优化设计的数学模型.....	337	习题	381
(五) 最优化问题的几何描述.....	338	附录	382
§ 13-3 一维搜索的最优化方法	339	主要参考文献	425
(一) 确定搜索区间的进退法.....	340		
(二) 0.618 法	342		
(三) 二次插值法.....	344		

第一章 绪 论

§1-1 引 言

机器和机构的理论是研究机构与机器的运动及动力特性及其简图设计的一门基础技术科学。具体来说,它是研究机构和机器的结构原理、运动学与动力学的学科。机器和机构的理论中最基本的问题是机构分析与机构综合。机构分析是根据给定的机构简图来研究机构的运动特性和动力特性,而机构综合是根据给定的运动和动力要求来设计机构简图。机构的分析与机构的综合是密切相关的。在进行机构综合时,常常要应用机构分析所得的结果。在分析的基础上才能进行更好的综合。

把机器和机构的理论划分为机构运动学以及机器和机构动力学是有利于深入研究机构的运动分析和综合,以及机械动力性能等问题。但是随着机构综合的内容和方法的不断深入发展和充实,把机构的运动学与机器和机构动力学截然分开,是不利于设计出性能良好的机器和机构的。在设计机构和机器的简图时应该同时考虑其运动条件和动力条件。

机构的结构原理是研究机构的组成原理、机构的分类以及机构确定运动的条件(包括计算机构的自由度)等方面的问题。

机构的运动学就是撇开引起机构运动的力,从几何观点来研究机构的运动,以及按已知的运动条件来研究新机构的设计方法。

机器和机构的动力学是研究机器和机构运动过程中作用在各构件上的力,确定作用在机构构件上的未知外力和在运动副中所产生的反作用力;研究机器和机构的能量的平衡(即作用在它们上的力所产生的功之间的关系),确定产生机器和机构运动所需的总能量及机械效率;研究在已知力作用下机器的运动规律;研究机器和机构构件的与运动有关的尺寸、质量分布和作用力之间关系,确定能保证机器运动情况的调速方法(即飞轮设计和调速器的选择等);研究减少机构运动副中的动力载荷的方法,解决机械平衡问题。随着机器和机构向高速、精密和重载等方向发展,动力学的研究内容更为广泛。

机器和机构的理论的研究对象是机器和机构。那么什么是“机器”和“机构”呢?

随着机器的发展,对于“机器”的含义也有所变化。现代化的机器可以定义为:机器是一种作机械运动的装置,它用来完成有用的机械功或变换机械能,以代替人类的劳动。根据机器用途的不同,一般还可以分为动力机器和工作机器两类。

动力机器的用途是把任何一种能量变换成机械能,或者把机械能变换成其他形式的能量。例如内燃机、压气机、涡轮机、电动机、发电机等等都属于动力机器。

工作机器的用途是完成有用的机械功或搬运物品。例如,金属加工机床、轧钢机、织布机、包装机、汽车、机车、飞机、起重机、输送机等等都是。

在这里,我们必须指出的是机器与其他装置的主要不同点是作机械运动,并且完成有用的

机械功和变换机械能。

现代化的机构不能认为只是由刚体所组成,液体、气体及胶带、链条等柔韧体,也可参与运动的变换。但是,对于机构,我们仍可定义为:用作把一个或几个刚体的运动变换成其他刚体所需的运动的刚体系统。这里的刚体,在机械原理中被称之为构件。在机构中如果液体或气体也参与运动的变换,该机构就应称之为液压机构或气动机构。

机器一般均应包含有机构。但是“机器”与“机构”这两个概念不能混为一谈。这是因为机器中除了有机构外,一定还有操纵某些机构的辅助装置。另外,机器与机构还有一个不同之点是机器必须完成有用的机械功或变换机械能以代替人类的劳动。

随着科学技术的不断发展和电子计算机的广泛应用,机器中采用的机构的数目有不断减少的趋势,但是至今机构还是大多数机器的最重要的组成部分。由于机构是传递和变换机械运动的构件系统,因此在各种仪器、设备和技术装置中,机构也得到广泛应用。

为了简化叙述,常常用“机械”一词作为“机构”和“机器”的总称。

机构是运动确定的构件系统。任何机构都由可动构件和固定构件所组成。机构中支持运动构件的固定构件称为机架。驱动机构的外力所作用的构件称为原动件或主动件,而所有其余被推动的构件称为从动件。原动件是机构运动的输入件,从动构件中实现输出运动的构件称为输出件。

由于科学技术的飞速发展,机械产品更新换代的周期愈来愈短,对机械产品的性能、质量的要求愈来愈高。机器和机构的理论的广泛应用和深入研究可以有力地推动和促进机械工业中许多新产品、新设备的出现与发展。机器和机构的理论的研究成果为设计更加经济、合理、更为先进的机器和仪器设备,创造发明新机械,提供了正确的、有效的途径与先进的方法。世界上许多工业发达的国家,如美国、苏联、联邦德国、日本等等,都十分重视机器和机构的理论的研究,就是这个道理。采用机器和机构的理论来创新、开发新的机械产品的例子,真是不胜枚举。例如,选用合适的连杆曲线来实现所需要的工艺动作,大大提高了飞剪、型材摆锻机的生产率;根据互包络曲线原理设计制造了旋转活塞式发动机和多种油泵转子叶片的型线;利用组合机构制成了结构简单而动作复杂的包装机械;利用空间连杆机构制成的摆盘式发动机已用于新式水下武器;采用开式运动链的研究成果已制成了机器牛和机器人等等。凡此种种,充分说明机器和机构的理论对于设计与创造新机器有何等的重要作用!

机器和机构的理论中一些最基本的内容,在各种机械专业人才的培养计划中,都是由机械原理课程来作系统的阐述。机械原理课程在各种机械专业的教学计划中是一门重要的技术基础课程,在工程师的培养上有它独特的作用。但是,仅仅掌握机械原理课程的内容,对于高等工院校机械类专业高年级学生和硕士研究生来说还是不够的,对于从事机械设计的工程师来说也是不够的。因此,在大学机械原理课程的基础上,进一步学习比较系统地阐述机器与机构设计原理的参考教材是十分必要的,这就是编写本书的目的。

§1-2 机器和机构理论的概况

人类创造发明机械的历史是十分悠久的。但是机器和机构的理论作为一门独立的学科,

一直到 19 世纪中下叶以后才奠定了一定的基础。例如, 1875 年德国的列罗(F. Reuleaux)所著的《机械运动学》, 系统地论述了机构运动学。以列罗和布尔梅斯特(L. Burmester)为代表的德国学者根据运动几何学原理用图解法进行机构的分析和综合。差不多在同时, 俄国以契贝舍夫(П. Л. Чебышев)为代表用函数逼近论等代数方法来解决机构的近似综合问题。以上述研究成果为基础, 机器和机构的理论才逐渐发展成一门独立的技术基础学科。

20 世纪 30 年代以后, 对于机器和机构的理论的研究, 在德国和苏联各有特点。德国是以运动几何学为基本理论进行平面连杆机构分析和综合的研究, 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取得了不少成就, 并出现了亚亨工业大学的机构与机械动力学研究所(联邦德国)、德累斯顿工业大学的机构学与精密机械研究所(民主德国)等机器和机构的理论的研究中心。苏联在代数方法解决机构综合问题方面是有很重大成就的。并且在机构结构理论、机构精确度、平面低副机构综合、高副包络理论、空间机构、机械动力学等方面都有很多贡献。主要研究中心为莫斯科苏联科学院机械学研究所。

第二次世界大战以后, 美国对机器和机构理论的研究逐渐重视起来。特别是 60 年代以后, 对于机器和机构理论的研究有了飞跃的发展。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、运动弹性机构动力学以及机构优化设计等方面取得了引人注目的成就。与此同时, 美国还十分重视电子计算机在机构学与机械动力学方面的应用, 成果累累。1978 年出版的 O. H. 苏和 C. W. 拉德克利夫所著《运动学和机构设计》(中译本, 机械工业出版社, 1983 年)集中反映这方面的成就。英国从 60 年代以后, 对机构学与机械动力学也加快了研究步伐, 在凸轮机构、机械动力学以及空间连杆机构等方面有不少成绩。日本近年来重点围绕生产过程自动化和机器人、机械手的研制进行了机构分析和综合的研究, 在步行机、多自由度多关节开式运动链的运动分析和动态稳定性等方面的研究均有不少贡献。在国际上其他一些工业比较发达的国家, 如澳大利亚、加拿大、罗马尼亚、捷克斯洛伐克、南斯拉夫、波兰、保加利亚等等, 都十分重视机构学与机械动力学的研究, 取得不少重大的研究成果。

为了加强对机器和机构理论研究的国际科技合作、为了组织和举行国际会议和各种学术讨论会, 1969 年秋在波兰正式成立了国际机器和机构理论联合会(The International Federation for Theory of Machines and Mechanisms, 简称 IFTMM)。联合会每四年定期举行机器和机构理论学术会议, 并与一些会员国合办专题国际学术会议。联合会还办有定期出版的双月刊《机构学与机器理论》(Mechanism and Machine Theory, 简称 MMT)。

我国对于机械原理的研究自 1978 年以来发展异常迅速。1980 年, 在中国机械工程学会机械传动学会(即现在的中国机械工程学会机械设计与传动学会)中成立了机构学专业委员会, 并且在 1982 年、1984 年、1985 年、1986 年四次召开了全国机构学学术讨论会, 在会上发表了不少有关机构结构理论、平面与空间连杆机构分析与综合、凸轮机构设计、组合机构分析与综合、机构优化设计、机械动力学等方面的研究论文, 取得了可喜的进展。自 1979 年以来, 我国曾先后邀请了国际著名机构学专家来华讲学, 其中有美国的劳思(B. Roth)、杨安慈(A. T. Yang)、陶德昌(D. C. Tao)、福克斯(R. L. Fox), 日本的小川潔、牧野洋、加藤一郎、佐久保西康, 波兰的莫莱斯基(A. Morecki), 澳大利亚的菲利普斯(J. R. Phillips)等等, 这些专家来华

讲学在一定程度上加强了机械原理国际学术交流,促进了我国机械原理的深入研究,推动了我国机械原理界赶超世界先进水平的进展。1983年,我国机械传动学会正式参加了 IFTMM 国际学术组织。

由于近代基础理论科学与工业技术的迅速发展、电子计算机运算速度的提高和广泛应用,促进了机构学与机械动力学在研究内容和研究方法上的很大发展。下面对机构学与机械动力学领域中的一些主要专题的概况作一简要的介绍。

1. 机构的结构理论

由于机器人、步行机、人工假肢的发展需要,以及机器的动力源广泛采用液压与气动,因此近年来对于多自由度、多闭环的多杆平面连杆机构以及开式运动链的结构理论有了较多的研究。同时,对于空间连杆机构的公共约束和过约束等问题也作了很多的研究。在机构的结构理论的研究中,近年来采用了图论、网络分析、线性几何学、螺旋坐标等各种工程数学方法。并且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。

为了创造和设计出更多更好的机构,对于机构选型值得深入研究。对于包括液压、气动、电磁、电子、光电等等非机械传动元件的组合机构的研究,也日益受到重视。

2. 平面与空间连杆机构

在进行平面连杆机构的分析和综合时,已经广泛采用电子计算机进行复杂的运算;同时还利用电子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。电子计算机的广泛应用也推动了平面连杆机构的最优化综合。对于用多自由度、多闭环、多杆的平面连杆机构的连杆曲线来再现各种工作机械中工艺要求的轨迹已引起了注意并加以研究。另外,近年来还开展了具有可变杆长结构、可变运动学和动力学参数的机构的研究。

空间连杆机构的分析与综合,计算公式和运算过程都比较繁复,常常采用矢量、张量、矩阵、对偶数、四元数、旋量计算等数学工具进行研究。对于单自由度闭环的空间四杆机构和空间五杆机构研究得比较透彻,对于单自由度闭环的空间六杆与七杆机构也已作了不少研究。对于空间连杆机构的最优化设计问题也开始进行研究。由于机器人技术的需要,多自由度空间多杆机构与开式空间运动链的运动分析和综合以及它们的动力学问题也都引起人们的注意。

3. 凸轮机构

为了改善凸轮机构的动力性能,凸轮曲线由等加-等减速运动规律、正弦加速度运动规律、余弦加速度运动规律改用改进正弦加速度运动规律、改进梯形加速度运动规律和代数多项式运动规律。寻找高速运转时具有良好动力特性的凸轮曲线是一个重要的研究内容。按动力学要求设计凸轮廓线除了采用动力多项式凸轮曲线外,现在较多采用某些符合动力特性要求的凸轮曲线,这种曲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-从动件系统动力学问题的研究中,对于凸轮-从动件系统动力学模型的建立,动力学模型的运动微分方程式及其求解方法,系统动力响应的分析,凸轮机构设计参数的选择及其最优化,凸轮廓线的动力学综合等等都得到很大的重视,取得了重要的研究成果。

为了建立更符合实际情况的动力学模型和更精确的分析和设计方法,考虑质量分布、弹性变形、间隙、阻尼、外界干扰频率、不平衡力、表面润滑等多方面因素的动力学问题正得到重视和研究。

4. 间歇运动机构

槽轮机构是一种常用的间歇运动机构。为了提高机器运行速度,改善动力性能,近几年来提出了改直线槽为曲线槽,使用串联式槽轮机构,导杆机构与槽轮机构组合使用,采用链条式槽轮机构,以及使用行星链轮式槽轮机构等等。

凸轮间歇分度机构,由于分度凸轮的加速度变化规律可以自由选择,使冲击与振动现象大大减轻,工作平稳,送料精度提高。目前最高使用速度已达每分钟 2000 次的分度。对于凸轮间歇分度机构的设计方法和制造技术均有较多的研究。

5. 组合机构

组合机构由于结构简化而又能实现单一机构无法实现的运动要求,因此近年来在农业机械、纺织机械、印刷机械、包装机械、冶金机械中应用日广。常用的有齿轮-连杆机构、凸轮-连杆机构和齿轮-凸轮机构。目前对于组合机构的组成原理、基本类型、功能等方面均有比较系统的研究。美、英各国对组合机构的分析和综合是以复数矢量法等解析法为主。而德国则多采用简化计算和图表等实用方法进行计算。对于各种组合机构的最优化设计的研究也日益加强。

6. 机械动力学

随着机械装置向高速、精密和重载方向发展,对于机械的精度和可靠性要求也日益提高,按动力性能要求进行机构的分析与综合愈来愈受到重视。

转子动力学中对于各种因素对转子振动影响、转子的振动特性、转子临界转速的精确计算以及挠性转子平衡原理及方法等方面的研究均有很大的进展。

对于刚性构件组成的机构的动力学有了进一步深入研究。例如,用能量分配法进行空间机构的动力分析,用线性相关法分析在弹簧载荷作用下加速起动的运动过程以及对具有间隙的机械系统的动力学模型和动力响应的研究。

机构的平衡问题也日益受到重视。对平面机构惯性力完全平衡的研究比较充分,采用的方法也较多,如有主矢量法、线性无关矢量法、附加机构法等。平面机构惯性力矩平衡问题也有不少研究成果,如利用惯性配重和物理摆杆的方法。对于空间连杆机构的平衡问题目前还研究得不多。对于 $RSSR$ 和 $RSSP$ 空间连杆机构的惯性力完全平衡问题已作了研究;对空间连杆机构震动力和震动力矩的一阶谐波平衡的理论与方法已作了比较系统的研究。另外,对于平面连杆机构和空间连杆机构惯性力和惯性力矩的综合优化平衡的研究也日益受到重视。

机构运转速度提高后,在惯性力的作用下,构件将产生复杂的横向振动与纵向振动,其振幅大小不仅影响机构综合的精度,而且这些振动在一定条件下还会造成失稳的状态,带来严重的危害。因此研究这个动力学问题具有一定的实用价值。另外,在对机构运动稳定性问题进行深入的研究基础上又可得出分析稳定性所需的平衡图。

对于运动构件的质量作周期性的分离的机械(如挖土机、筛选机、离心分离机等等)以及对运动构件的质量作重新分布的机械(如绕线机、转炉机构等)必须进行具有变质量构件的机构动力分析。

机构的运动弹性动力学已经发展成为机构学与机械动力学的一个重要分支。机构在高速运转时,考虑构件惯性力所引起的弹性变形对机构运动所产生的附加影响是提高机构综合精度的有效途径。目前常采用有限元的结构动力学分析方法来进行研究。主要分析方法有刚度法、柔度法和集中参数法等。机构的运动弹性动力学包括的内容有弹性动力分析(即准静态分析, Elastodynamic Analysis)、运动弹性动力分析(Kineto-Elastodynamic Analysis)和运动弹性动力综合(Kineto-Elastodynamic Synthesis)。对于运动弹性动力综合的研究,目前还局限于用最优化理论在机构重量最轻的条件下,确定构件的截面积,而且又要保证弹性应力和变形在允许的范围内。

近年来还研究了在刚性构件机构中加弹簧来改善机构高速运动时的动力响应,用弹性件来调节机构的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。

机械动力学测量技术也有很大的发展。特别是近年来由于数据处理方法和技术的迅速发展,使机械动力学测量达到更高的水平。

7. 机构最优化设计

近 20 年来机构最优化设计的研究得到了迅速的发展,机构最优化设计已成为机构综合中普遍适用的方法和主要发展方向。机构优化设计大致包括:根据设计要求确定设计准则和设计变量;给出数学模型,确定设计约束,建立目标函数;探索最优化途径,优选设计变量;最优方案的确定。最优化方法很多,对于机械优化设计问题大多属于非线性规划问题,一般可以分为无约束最优化方法和约束最优化方法两类。在机械设计中,无约束最优化方法主要有坐标轮换法、鲍威尔方法、共轭梯度法、变尺度法等。约束最优化方法主要有惩罚函数法、随机方向搜索法、复合形法、可行方向法等。

机构最优化设计应用十分广泛。对于平面连杆机构和凸轮机构的运动综合和动力综合,组合机构中再现函数与轨迹的设计以及如何使齿轮减速器体积最小等等均采用了最优化设计方法,效果显著。另外,对于机构的优化平衡、机构运动弹性动力综合以及空间连杆机构的最优化问题也有不少研究。

8. 仿生机构学

近 10 多年来,仿生机械的研究受到很大的重视,不少国家积极开展对人的手指、手腕和手臂的结构、动作原理和运动范围的分析研究,研制出各种多自由度的生物电或声控的机械假手。同时在深入研究人体步态和大小腿的结构、动作原理和可动范围之后,已研制出各种类型的双足步行机。另外,还大力开展蛇行和鱼游机构的研制。随着对仿生机构学的不断深入研究,人们将会创造出各种新颖的、具有特殊功能的新机构来,为机构学与机械动力学开辟了一个崭新的领域。

总之,对机器与机构理论的深入研究和不断创新,将会对我国机械工业的发展显示出愈来愈重要的作用。

§ 1-3 机器和机构的设计原则和步骤

传统的机械设计方法所包含的步骤大体上包括方案设计、技术设计和施工设计三个部分。由于现代机械设计的理论和方法不断充实和完善,采用现代机械设计的方法可以大大提高机械设计的水平。图 1-1 表示现代机械设计工作循环流程图。由图可见,对于某一机器的方案

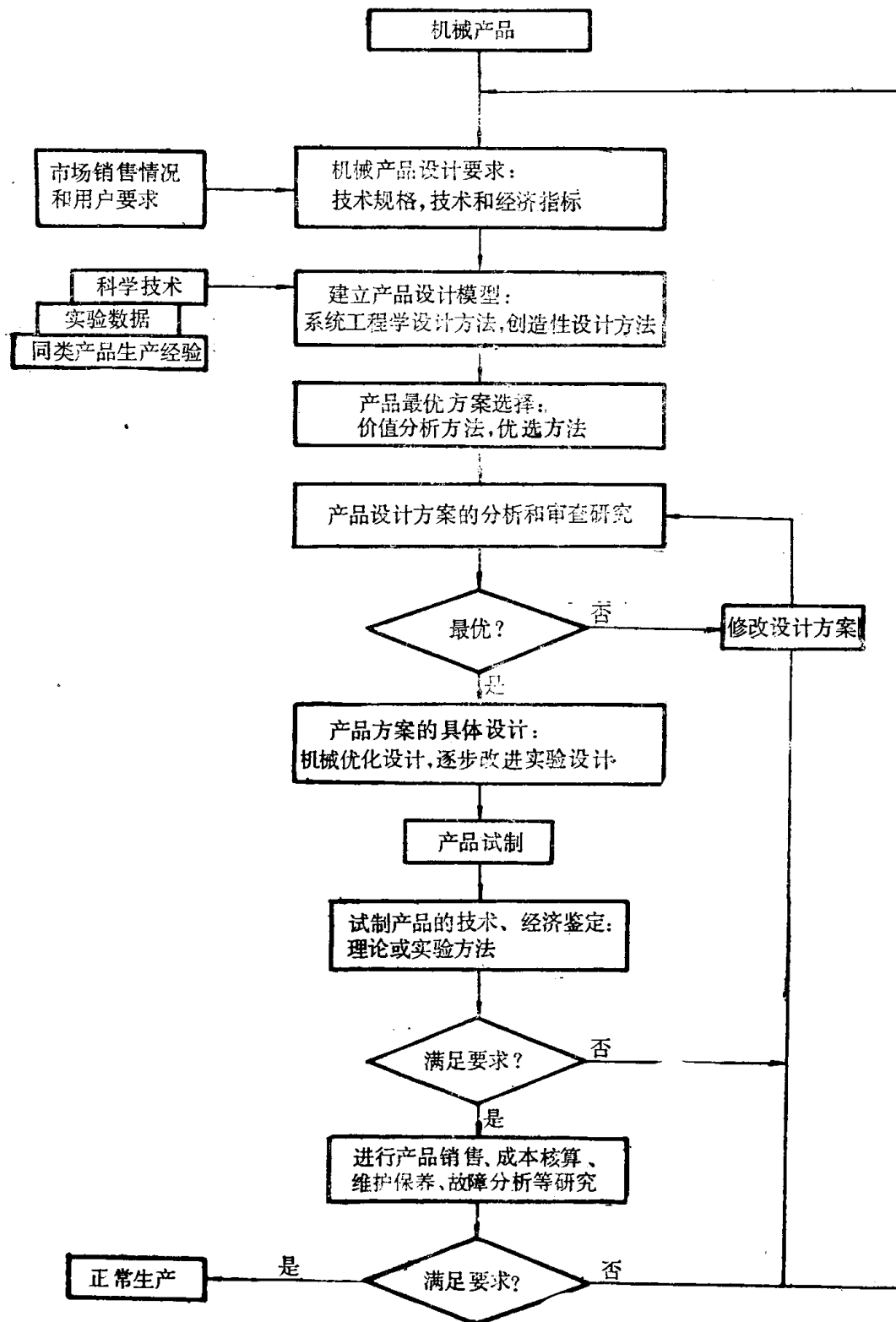


图 1-1

设计来说,其主要步骤和内容:第一,对同类产品进行调查(包括性能、技术参数、生产经验、使用情况、市场情报等等),对生产动作要求进行分析,为拟定初步设计方案作好准备。第二,采用系统工程方法或创造性的设计方法,确定可能实现的设计方案,然后再用价值分析方法和优选方法选择产品的最佳设计方案。第三,用机械优化设计方法确定所选方案的主要参数。

根据工作性质和动作要求进行新机器的方案设计时,首先就要找出它的运动规律和动作过程,然后再按此运动规律和动作过程设计出此机器的机构的运动系统的简图。所谓机构运动简图的设计就是从机构学(或机械运动学和动力学)的角度来设计机械运动系统的简图。如图 1-2 表示机械运动系统设计的流程图。这一设计过程就是机构综合所应包括的完整内容,即它包括通常的机构的型、数综合,机构的尺度综合和机构运动、动力性能的评估。

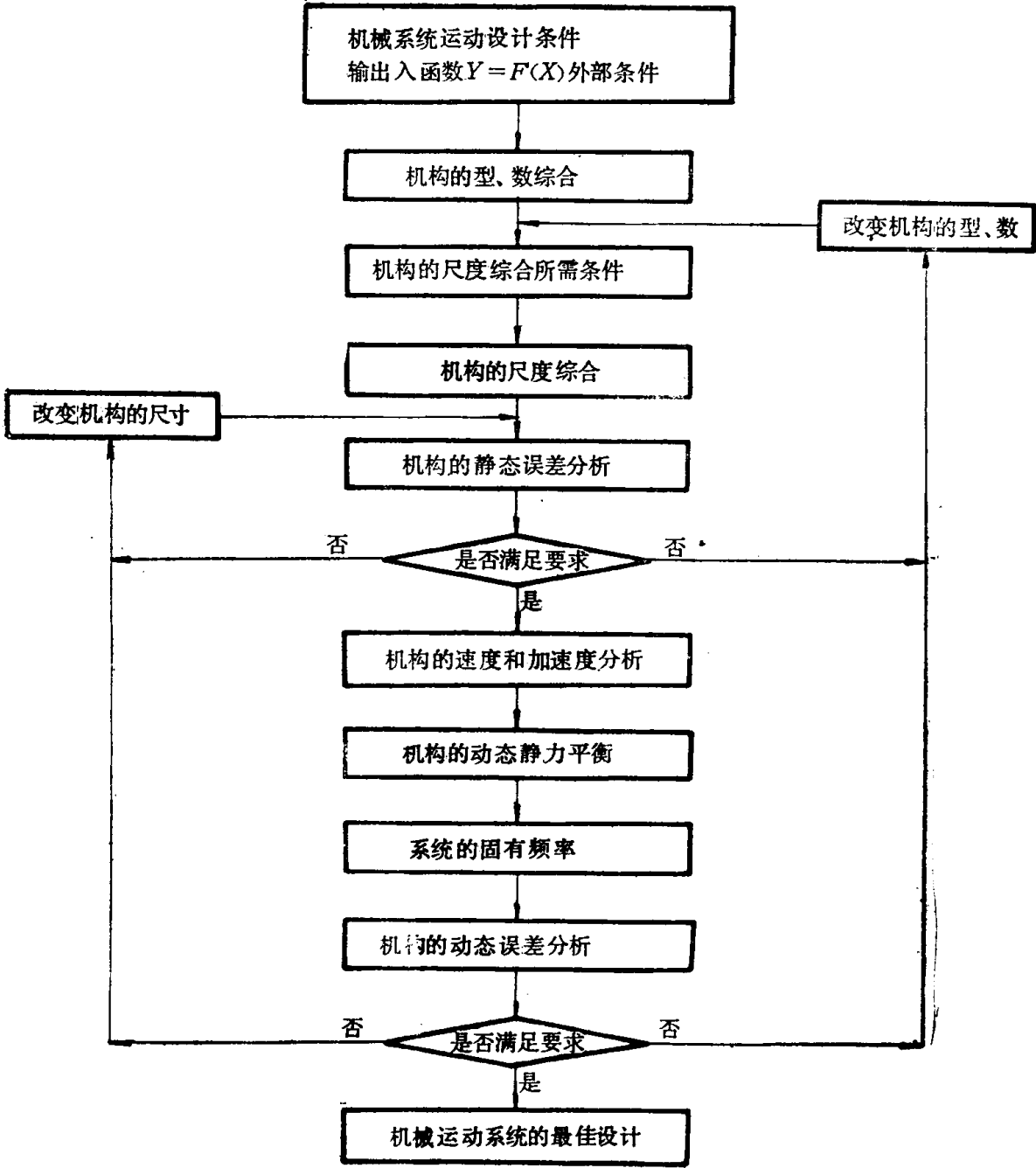


图 1-2