



中国科学院机械工程系列规划教材
国家工科机械基础课程教学基地规划教材

机械原理

主 编 李树军

副主编 刘 杰 王 丹 李翠玲



科学出版社
www.sciencep.com

中国科学院机械工程系列规划教材
国家工科机械基础课程教学基地规划教材

机 械 原 理

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书在满足教育部高等学校机械原理课程教学基本要求的基础上,为适应现代教学手段的应用和兼顾不同层次学校的教学特点和教学方法,突出适用于计算机辅助分析的解析法,保留部分直观实用的图解法。本书增加了机构的结构组成原理及设计的内容,注重培养学生的创新意识和设计能力。

全书共13章。第1章绪论;第2章机构的组成原理及结构分析;第3~4章机构的运动和力分析;第5~9章基本机构及其设计;第10~12章机械的平衡、摩擦及动力学;第13章机械运动方案设计。

本书可作为高等工科院校机械类专业机械原理课程教材,也可供相关专业的师生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理/李树军主编. —北京:科学出版社,2009
(中国科学院机械工程系系列规划教材·国家工科机械基础课程教学基地规划教材)

ISBN 978-7-03-024681-3

I. 机… II. 李… III. 机构学-高等学校-教材 IV. TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 138676 号

责任编辑:毛 莹 于宏丽 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京智力达印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年8月第 版 开本:135(720×1000)

2009年8月第一次印刷 印张:19

印数:1—3 500 字数:368 000

定价:28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

中国科学院机械工程系列规划教材

编写委员会

顾 问：闻邦椿

主 编：谢里阳

执行主编：陈良玉

委 员：（以姓氏笔画为序）

马星国 王玉良 王世杰 王淑仁 巩云鹏

巩亚东 刘 杰 孙志礼 李为民 李树军

李景春 宋锦春 柳洪义 黄秋波

序

装备制造业是我国国民经济中的重要基础工业。机械装备为各类产品的物化提供平台和载体,机械装备的技术水平是衡量社会生产力水平的重要标志,机械科学、机械工程技术和机械工业的发展水平对经济建设和社会发展的作用都至关重要。

目前,世界机械工业产值达到了总工业产值的 $1/3$ 以上。我国制造业增加值在国内生产总值所占的比重高达 40% ,我国的财政收入一半也来自制造业。随着我国加入 WTO,经济越来越融入到全球经济体系中,我国的制造业在世界制造业中的地位也越来越重要,并正从制造大国迈向制造强国。至少在 21 世纪的前 20 年,制造业将仍然是我国国民经济增长的主要来源,因此需要大批综合素质高、能力强的机械类专业人才。

另外,我国高等教育已从精英型教育阶段进入了大众型教育阶段,实现了高等教育的历史性的跨越式发展,技术的进步和社会的发展也对高等院校机械工程专业教育的人才培养提出了新的要求。

为此,中国科学院教材建设专家委员会和科学出版社组织我国机械工程领域的中国科学院院士、教育部教学指导委员会成员、教学名师以及经验丰富的专家教授组成编委会,共同组织编写了这套《中国科学院机械工程系列规划教材》,以适应我国高等机械工程教育事业的发展,更好地实现机械工程类专业人才的培养目标,在规模上、素质上更好地满足我国机械科学技术和机械工业发展的需要,为建设创新型国家做出贡献。

本套教材主要有以下几方面的特点:

1. 适应多层次的需要。本套教材依据教育部相关教学指导委员会制定的最新专业规范和机械基础课程最新的教学基本要求,同时吸取不同层次学校教师的意见,进行了教材内容的编排与优化,能够满足各类型高校学生的培养目标。

2. 结构体系完备。各门课程的知识之间相互衔接,以便学生完整掌握学科基本概念、基本理论,了解学科整体发展趋势。本套教材除主教材外,还配有辅导书、多媒体课件、习题集及网络课程等。

3. 作者经验丰富。参加本套教材编写的人员不少来自相关国家重点学科、国家机械教学基地的院校,有些还是国家级、省部级教学成果奖参加人,国家级、省级精品课程建设负责人以及相关院校的骨干教师代表。

4. 理论与实际相结合,加强实践教学。在达到掌握基本理论、基本知识、

基本技能的教学要求前提下，注重例题、设计实践和实验教学，着力于学生分析问题能力、创新能力和实际动手能力的培养。

另外，为了保证本套教材的质量，编委会聘请国内知名的同行专家对教材进行了审定。

我们还将根据机械科学与工程学科发展的战略要求，对本套教材不断补充、更新，以保持本套教材的系统性、先进性和适用性。

我们热忱欢迎全国同行以及关注机械科学与工程教育、教学及教材建设的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议，共同为我国机械工程教育的发展而努力。

中国科学院院士

A stylized, handwritten signature in black ink, likely belonging to Yan Bangxi, a Chinese Academy of Sciences Academician.

2006 年 5 月

前 言

本书由五所高等学校联合编写,在满足教育部高等学校机械原理课程教学基本要求的基础上,为适应现代教学手段的应用和兼顾不同层次学校的教学特点和教学方法,对当前各校使用的教材内容进行了精选和整合,既考虑了传统经典内容和方法,又考虑到近年来的教学改革成果及学科发展的新动向,以求达到实用性和系统性的统一。本书以解析法分析为主线,增加了机构的结构组成原理及设计的内容,注重培养学生的创新意识和设计能力。本书有如下特点:

(1) 加强适用于计算机辅助分析的解析法,解析法与图解法融合互补。各章以解析法分析为主线,部分章节保留直观实用的图解法,形成两种方法的有机融合和互补。既适应现代计算机辅助教学手段的应用,又兼顾不同层次学校的教学特点和教学方法,为教材的使用者提供了更宽的选择余地。

(2) 注重计算机辅助分析与设计。将适用于计算机辅助分析的解析法和程序设计与应用紧密结合,培养学生应用现代设计方法、计算数学及有关知识与方法的能力,使学生能利用所学知识进行机构的分析与设计,提高学生的理论分析和设计能力及计算应用技能。

(3) 注重立体化教材建设。本书配套出版有《机械原理课程设计》(王淑仁主编,科学出版社)和《机械原理学习指导与习题解答》(王丹主编,科学出版社),并提供免费电子课件,方便教学参考和使用。

本书由东北大学李树军(第1章,3.1节,3.3节),东北大学李翠玲(第2章,5.1节,5.2节,5.6节,第6章,第8章部分内容,第10章部分内容),沈阳工业大学刘杰(3.2节,第12章),东北大学王丹(第4章,5.3节,5.4节,5.5节),东北大学王淑仁(第7章),辽宁石油化工大学王晓华(第8章部分内容),沈阳理工大学李金泉(第9章),辽宁工业大学熊晓航(第10章部分内容),沈阳理工大学邵伟平(第11章),沈阳理工大学赵满平(第13章)共同编写。全书由李树军任主编,刘杰、王丹、李翠玲任副主编,各章文稿由李翠玲统一编排处理。

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳望广大读者批评指正。

编 者

2009年4月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 机械	1
1.2 机械原理	3
1.3 机械设计过程概述	3
1.4 机械原理课程学习导引	8
第 2 章 机构的组成原理及结构分析	9
2.1 机构的组成	9
2.2 机构运动简图.....	13
2.3 平面机构的自由度.....	17
2.4 平面机构的组成原理与结构分析.....	25
2.5 空间机构自由度简介.....	33
第 3 章 平面机构的运动分析	36
3.1 简单机构速度分析的速度瞬心法.....	36
3.2 机构速度和加速度分析的矢量方程图解法.....	40
3.3 机构运动分析的解析法.....	50
第 4 章 平面机构的动态静力分析	61
4.1 机构力分析的目的和方法.....	61
4.2 机构动态静力分析的基本原理.....	63
4.3 II 级机构的动态静力分析.....	65
第 5 章 平面连杆机构及其设计	72
5.1 平面连杆机构的特点及类型.....	72
5.2 平面四杆机构的设计基础.....	79
5.3 连杆机构的设计概论.....	84
5.4 连杆机构设计(图解方法).....	86
5.5 连杆机构设计(解析方法).....	98
5.6 多杆机构	107
第 6 章 凸轮机构及其设计	110
6.1 概述	110

6.2	从动件的运动规律	114
6.3	凸轮轮廓曲线的设计	119
6.4	凸轮机构基本参数的设计	126
第7章	齿轮机构及其设计	133
7.1	齿轮机构的应用和分类	133
7.2	齿廓啮合基本定律	135
7.3	渐开线直齿圆柱齿轮	136
7.4	渐开线齿轮的啮合传动	140
7.5	渐开线齿轮齿廓的切制及变位原理	146
7.6	渐开线直齿圆柱齿轮设计	152
7.7	其他类型齿轮传动	159
7.8	其他齿廓齿轮传动简介	168
第8章	轮系及其设计	171
8.1	轮系及其分类	171
8.2	定轴轮系的传动比	173
8.3	周转轮系的传动比	176
8.4	复合轮系的传动比	179
8.5	轮系的功用	182
8.6	行星轮系各轮齿数和行星轮数的选择	185
8.7	其他行星传动简介	188
第9章	其他常用机构	192
9.1	万向联轴节	192
9.2	间歇运动机构	194
9.3	螺旋机构	207
9.4	摩擦传动机构	210
9.5	液压、气动机构	212
第10章	平衡	215
10.1	平衡的目的和分类	215
10.2	刚性转子的平衡	216
10.3	挠性转子的平衡简介	224
10.4	平面机构的平衡	225
第11章	机械的运转及其速度波动的调节	228
11.1	概述	228
11.2	机械系统的动力学模型	232
11.3	机械系统运动方程式求解	237

11.4	稳定运转状态下机械的周期性速度波动及其调节	240
11.5	机械的非周期性速度波动及其调节	247
第 12 章	机械中的摩擦和机械效率	249
12.1	摩擦现象及其规律	249
12.2	移动副中的摩擦	249
12.3	转动副中的摩擦	254
12.4	考虑摩擦时机构的力分析	256
12.5	机械效率	257
12.6	机械的自锁	260
第 13 章	机械系统运动方案设计	263
13.1	概述	263
13.2	执行机构的运动及相互协调配合	264
13.3	原动机、传动机构的选择及应用	267
13.4	执行机构的选型及变异	271
13.5	机构的组合	274
附录		284
附录 I	机构运动分析 C 语言主程序	284
附录 II	机构动态静力分析 C 语言主程序	286
附录 III	渐开线函数($\text{inv}\alpha_K = \tan\alpha_K - \alpha_K$)表	290
参考文献		292

第 1 章 绪 论

1.1 机 械

1.1.1 机械

机械是人类重要的生产工具,机械的不断改进和新机械的发明与应用,显著地加速了生产力的发展,推动了生产方式的变革,促进了人类文明和进步。在人类历史上,简单机械的发明与应用可以追溯到几千年以前,古代的中国、埃及和希腊为了满足从事建筑、运输和起重需要,都曾发明和应用了杠杆、斜面、绞盘等简单机械。在现代,机械的应用已遍及生产、流通、生活和服务等各个领域。

我们通常所说的“机械”是从许多具体机械中抽象出来的一个概念。人们把轧钢机、起重机、机床、水泵等都称为机械,那就意味着这些功用各异的不同设备之间必然存在某些本质上共同的特定因素,即形成了机械的概念。1997 年 Erdman 和 Sandor 将机械装置定义为“a mechanical device that has the purpose of transferring motion and/or force from a source to an output”。

通常机械原理课程所讲述的机械的定义为:机械是由许多抗力物体(刚体或构件)组成的系统,其各部分之间有确定的相对运动,在生产过程中利用机械能做有用功或者实现机械能与其他形式能量之间的转换。

图 1.1 所示的内燃机,它由曲轴 4、连杆 3、活塞 10、凸轮轴 7、推杆 8、气阀 17 和机架 2 等组成。其工作过程是,进气阀打开,活塞下移,将一定浓度的混合气吸入气缸,而后进气阀关闭,活塞上升压缩油、气混合物,待活塞接近上止点时,火花塞点火,使油气混合物迅速燃烧、膨胀推动活塞下移,经过连杆使曲轴转动,向外部输出机械能,之后排气阀打开,活塞上移将废气排出气缸。可见,在整个工作过程中,活塞、

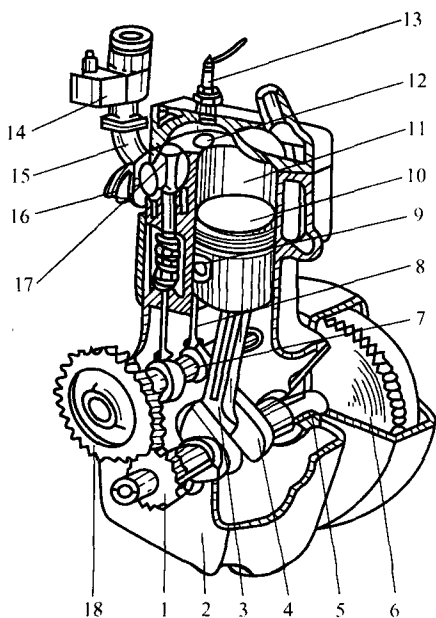


图 1.1 内燃机结构简图

连杆、曲轴等构件在做有规则的相对运动的同时,实现了热能与机械能之间的转换。而用于切削加工的机械,如牛头刨床,也是由许多个构件组成的,滑枕带动刨刀沿着机架上的导轨做往复运动,刨削金属,克服切削阻力而做功。

1.1.2 机械系统

机械的概念与其他科学概念一样,是一个历史的范畴,它随着机械的发明与应用而产生,也随着机械品种的增多和日新月异的进化而发展。

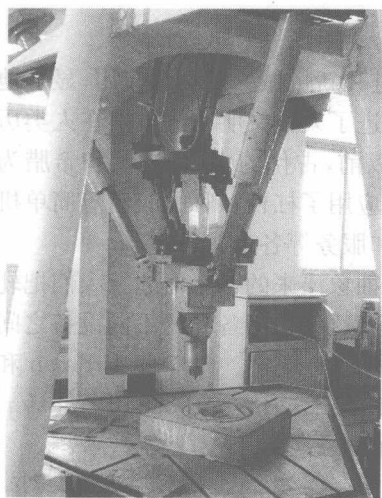


图 1.2 用于加工作业的并联平动机器人

图 1.2 所示为一种用于加工作业的并联平动机器人(东北大学)。其末端执行器可以按事先设置的程序,完成工件的加工、磨削及部件装配等复杂操作。这类机械可以根据工况的变化重新设置控制程序,改变其作业流程。通过对其工况自行检(监)测,它具有信息反馈和处理机能,并可据此控制和修正本身的动作。对这类机、电、液(气)、控制一体化的机械来说,上述的机械定义就显得不够完善了。

Hall 早在 1953 年引用 Franke 对机械定义时指出,“Franke’s definition also includes such things as ①electrical systems, ②fluid dynamic system, and ③mechanical systems, in which the relative motions of the parts are dependent on the inertia, friction, gravity, and spring forces”。

广义地说,现代机械应是机、电、液(气)、控制一体化的系统。因此机械不仅由前述的抗力物体,即刚体或刚性构件组成,而且也包含柔性构件、传感装置及控制系统。一般机械系统组成如图 1.3 所示。

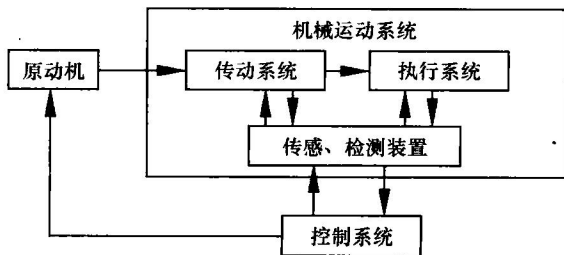


图 1.3 机械系统的组成

1.2 机械原理

1.2.1 机械原理

现代机械种类繁多,功用各异。按机械的功能和应用领域来划分,则有冶金机械、矿山机械、工程运输机械、金属切削机床等。如果抛开各种具体机械的特定功能,从总体功能考查各种机械,它们存在一些需要研究的共性问题:怎样才能把许多构件组合并以一定的方式连接起来使之有确定的相对运动?构件间的不同类型的连接对机械的性能有何影响?如何实现将一种运动形式变换成另一种运动形式(如图 1.1 中的活塞的移动变成曲轴的转动)完成不同的工艺目的?使之运转的外力在机械的各个构件之间是怎样传递的,它们对机械的运转会产生什么影响?如何使机械在工作过程中耗费较少的能量获得更大的效益?这些都是设计和分析各种具体机械过程中的共性问题,对这类问题的系统研究就形成了机械科学中的一个重要分支——机械原理。机械原理课程所研究的主要是图 1.3 中的执行系统和传动系统部分的内容。

1.2.2 机构

机械原理课程所研究的对象不是特定的机械,而是研究能够组成各类机械的可以实现各种运动变换功能的系统(当然在运动变换的同时也传递力和功率),通常称这种由许多构件所组成的用以实现各种运动变换功能的系统为机构。机构和机械在具体问题中实际上是一种事物,只不过从不同角度去研究它有不同的称呼而已。如图 1.1 所示内燃机,它是一种动力机械,热能通过它转变为机械能;从机械原理角度去看,它是由机架、曲柄、连杆、滑块、凸轮和推杆组成的机构,能实现往复移动和连续转动之间的运动变换。又如 1.3 节中图 1.6 所示的缝纫机机构,从功能上看,它是一种缝纫机械,而从机械原理角度去研究,它是由把旋转运动变换为往复直线移动或往复摆动的曲柄滑块机构、曲柄摇杆机构和凸轮机构等组成的机构传动系统。

1.3 机械设计过程概述

在学习机械原理课程之前,如果能对整个机械设计过程以及在设计过程中需要解决哪些问题有一个概括的了解,明了机械原理知识在机械设计过程中的作用,将会对机械原理课程的学习有所裨益。机械产品的一般设计过程可用图 1.4 所示的框图表述。

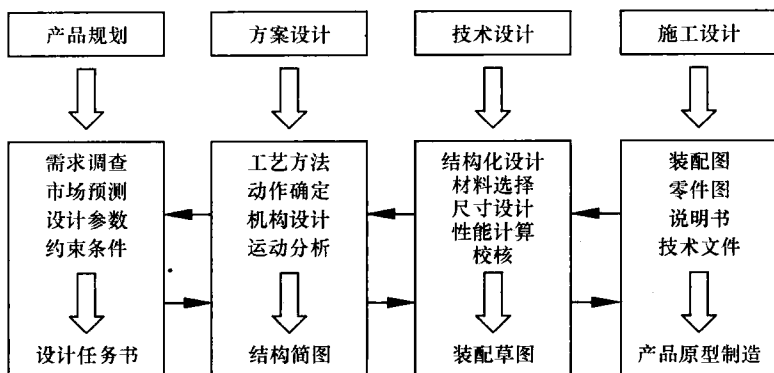


图 1.4 机械产品的一般设计过程框图

1.3.1 产品规划

拟定设计任务书就是确定所设计机械的工艺目的和各种功能指标。这是一项需要从技术、经济、市场、国家有关产业政策、环境保护法规以及考虑区域文化背景等多方面研究论证的复杂任务,需要进行需求调查、市场分析及预测,综合各方面因素,确定工艺目的和设计参数,最后下达设计任务书。

1.3.2 方案设计

1. 工艺方法、工艺动作的确定

工艺目的确定之后,应研究用什么样的方法去达到工艺目的。例如,设计一台破碎石料的机械,破碎石料是工艺目的。石料可以被压碎(压力)、搓碎(剪切力)、

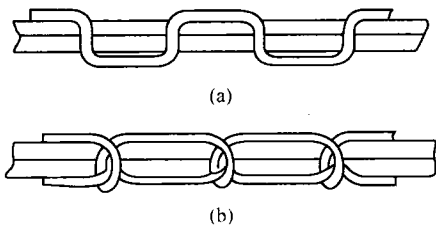


图 1.5 手工结线和机械结线示意图

(a) 手工结线方式;(b) 机械结线方式

击碎(冲击力),在具体工艺指标下,用哪一种破碎方法较好这是值得研究的。因此,颚式破碎机、圆锥旋转破碎机等应运而生。若设计一台缝纫机,按图 1.5(a)所示的传统手工缝纫的穿针引线的结线方法把布料缝合起来将是十分困难的。19 世纪 40 年代,美国人哈威通过观察织布工手中的梭子,将手针倒置并采取增设底线的方法,首先研究出了新的结线方法,

如图 1.5(b)所示,于是实用的缝纫机产品问世。

为了实现选定的工艺方法,要求所设计的机械能完成确定的工艺动作,这需要通过设计机械系统的传动机构或执行机构来实现。例如,按图 1.5(b)所示结线方

法设计的家用缝纫机,可能至少需要四种工艺动作:机针带着上线刺布做上下往复运动;为了使上线绕过底线,摆梭勾线往复摆动;挑线杆完成挑线动作;送布牙板完成步进式送布动作。当同时需要两个以上的工艺动作时,还应使各个工艺动作之间相互协调。

可见,实现一种工艺目的可有不同的方法,但从节省能量、提高工效和用机械方法是否易于实现的角度分析,各种方法有很大差别。研究合理、可行的工艺方法和对应的工艺动作,是机械设计过程中的重要问题,也是机构创新的重要环节。

2. 机构设计

由于多数机械是由动力机驱动的,而常用的动力机,如电动机、液压油缸等,它们一般只能给出如匀速转动、直动等最简单的运动形式,但是实际工况要求的工艺动作却是多种多样的。因此,将动力机给出的简单运动变换为工艺动作要求的运动形式,要靠各种机构来实现。例如,颞式破碎机要求其破碎颞板模仿上下颞咀嚼食物时的动作,在牙齿间既产生压力,又产生剪切力。因此需要设计一机构,将电动机的匀速转动运动,转换成颞板的平面任意运动。若设计上述结线方式的缝纫机,需要设计:机针带着上线刺布做上下往复运动的走针机构;使上线绕过底线,摆梭勾线往复摆动的摆梭机构;挑线杆完成挑线动作的挑线机构;送布牙板完成步进式送布动作的送布机构,并使各动作间相互协调。图 1.6 为一种实现该功能的缝纫机机构结构示意图,其中包括曲柄滑块机构、曲柄摇杆机构、凸轮机构及带传动等。

机构设计环节不仅包括机构形式的选择与设计,还包括构件尺寸的初步选择、动力机的选择等。这一步工作的结果是满足运动变换要求的机构结构(运动)简图。

3. 运动学分析与综合

经过以上各阶段的工作,得到了以机构运动简图表示的机构。这个机构及初步设计的相应的尺寸参数能否满足所提出的工艺动作要求,需要通过运动分析来验证。机构的运动分析,就是令机构的主动件按给定的运动参数运动,求出输出构件的对应运动参数和运动规律,根据运动分析的结果判定机构能实现的运动与工艺动作的符合程度。

例如,筛分机械中的筛筐,运动形式可以是往复直动,又如设计成曲柄滑块机构(类似图 1.1 由曲轴 4、连杆 3、活塞 10 组成的机构)。但如果机构类型或结构参数选择不当,将导致其往复运动中速度和加速度的变化规律不当,有可能出现物料与筛筐始终是一起运动的情况,从而达不到筛分的目的。如果分析结果表明机构实际所能实现的运动变换不能满足工艺动作要求,则需要修改机构尺寸或者重新选择机构类型。

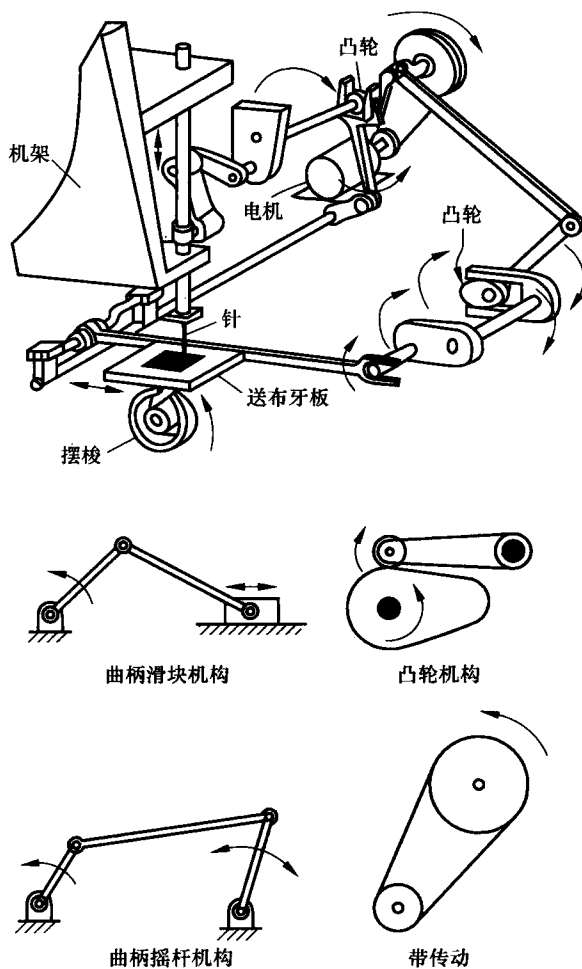


图 1.6 缝纫机机构结构简图

按给定的运动变换要求确定机构中与运动性能有关的尺寸参数的工作称机构的运动学综合(kinematic syntheses of mechanisms)。可见,机构设计、机构的运动分析和机构的运动学综合通常为反复交互的过程。在以计算机辅助设计为手段的现代设计方法中,机构综合和分析工作常常是交织在一起的。运动学分析工作已成为设计工作中不可分割的一部分,并为机械系统的动力学分析建立基础。

1.3.3 技术设计

1. 零部件的结构设计

主要包括机械的各个零部件结构尺寸的初步设计。在经过分析、验证了所选

择的机构形式和尺寸参数能满足工艺动作要求的前提下,需要把机构简图转化为机械的结构图(装配图和零件图)。在这一环节里,要考虑材料的选择,零部件承载情况,加工、装配的可能性和方便性,以及保证它们正常工作所需要的调整、润滑措施等问题。

2. 机械的受力分析及动力学分析

在机械的零部件结构形状和尺寸初步确定了的前提下,就可估算出各个构件的动力学参数,即质量、质心位置及转动惯量。利用运动分析结果就可以计算出在运转过程中构件的惯性力和惯性力偶,然后可以进行包括动载荷在内的受力分析。受力分析不仅可以确定机械中各个零部件在工作过程中所承受的载荷大小及其变化规律,为零部件承载能力验算提供依据,还可以计算出为了驱动机械正常运转所需动力机的容量大小。同时,通过受力分析可以检验所设计机构的合理性。

现代机械对其运转质量的要求不断提高,因此需要对其进行动力学分析与设计,其内容主要包括:求机械在外力作用下的真实运动规律,探求提高机械运转的平稳性和如何避免和减轻机械运转过程中的振动途径等。这一环节对于大型、高速重载机械或精密机械是十分重要的。

动力学分析是在机械的结构设计基本完成和动力机已选定的前提下进行的。根据动力学分析的结果可能会导致某些零部件结构形状和尺寸的修改,有时甚至导致机构形式的重新选择。

在此基础上,对所设计的零部件进行承载能力验算,如果验算结果不满足工作需要,则应修改结构参数或结构形式。

1.3.4 施工设计

上述各环节均满足设计要求后,完成机械装配图和零件图,并进行产品样机的制造(产品原型制造)。

1.3.5 机械原理研究的主要内容

机械原理知识主要用于完成其中方案设计和技术设计中的受力分析及动力学分析内容。主要研究内容包括:

- (1) 机械系统的组成原理。
- (2) 实现各种运动变换功能机构的设计。
- (3) 机构的运动学及动力学分析。
- (4) 机械系统运动方案的设计。

机械原理是研究机械系统的组成原理、设计实现各种运动变换功能的机构系统、分析机械中力和功率传递规律的设计理论和方法的科学。