



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材

机械原理

(第二版)

杨家军 主编



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

014032050

TH111-43

24-2



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



21世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材

机械原理

(第二版)

杨家军 主编

杨家军 冯丹凤 程远雄 朱洲 刘伦洪 编



TH 111-43
24-2

华中科技大学出版社
中国·武汉



北航

C1720017

内 容 提 要

机械原理是一门介绍各类机械产品中常用机构的基本知识、基本理论和基本设计方法的重要技术基础课程,本书以设计为主线,通过讲解机构在机电产品中的应用及相关案例,让学生了解所学机构的用途,提高学生综合设计能力和工程应用能力。

本书注重培养学生的创新思维与机构系统方案设计能力,以机构系统运动方案设计为主线,重点讨论连杆机构、齿轮机构、凸轮机构、间歇机构等常用机构设计的一般规律和方法,将设计基本知识、基本理论和设计方法有机地融合,进行教学边界再设计,加强创新思维和工程设计能力的训练,通过理论与实践有机地联系,为机械产品设计提供必要的基础知识与方法。

本书可作为高等学校各类机械专业机械原理的教材,也可供高等学校有关专业的师生和企业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理(第二版)/杨家军 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2014.1
ISBN 978-7-5609-9904-3

I. ①机… II. ①杨… III. ①机构学-高等学校-教材 IV. ①TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 017405 号

机械原理(第二版)

杨家军 主编

策划编辑:万亚军

责任编辑:刘勤

封面设计:潘群

责任校对:马燕红

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:23.25

字 数:509千字

版 次:2014年2月第2版第3次印刷

定 价:39.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

21 世纪高等学校
机械设计制造及其自动化专业系列教材
编审委员会

- 顾问： 姚福生 黄文虎 张启先
 (工程院院士) (工程院院士) (工程院院士)
- 谢友柏 宋玉泉 艾 兴
 (工程院院士) (科学院院士) (工程院院士)
- 熊有伦
 (科学院院士)
- 主任： 杨叔子 周 济 李培根
 (科学院院士) (工程院院士) (工程院院士)

委员： (按姓氏笔画顺序排列)

于骏一	王安麟	王连弟	王明智	毛志远
左武炘	卢文祥	朱承高	师汉民	刘太林
李 斌	杜彦良	杨家军	吴昌林	吴 波
吴宗泽	何玉林	何岭松	陈康宁	陈心昭
陈 明	陈定方	张春林	张福润	张 策
张健民	冷增祥	范华汉	周祖德	洪迈生
姜 楷	殷国富	宾鸿赞	黄纯颖	童秉枢
傅水根	傅祥志	廖效果	黎秋萍	戴 同

秘书： 刘 锦 徐正达 万亚军

21 世纪高等学校 机械设计制造及其自动化专业系列教材

总 序

“中心藏之，何日忘之”，在新中国成立 60 周年之际，时隔“21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材”出版 9 年之后，再次为此系列教材写序时，《诗经》中的这两句诗又一次涌上心头，衷心感谢作者们的辛勤写作，感谢多年来读者对这套系列教材的支持与信任，感谢为这套系列教材出版与完善作过努力的所有朋友们。

追思世纪交替之际，华中科技大学出版社在众多院士和专家的支持与指导下，根据 1998 年教育部颁布的新的普通高等学校专业目录，紧密结合“机械类专业人才培养方案体系改革的研究与实践”和“工程制图与机械基础系列课程教学内容和课程体系改革研究与实践”两个重大教学改革成果，约请全国 20 多所院校数十位长期从事教学和教学改革工作的教师，经多年辛勤劳动编写了“21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材”。这套系列教材共出版了 20 多本，涵盖了“机械设计制造及其自动化”专业的所有主要专业基础课程和部分专业方向选修课程，是一套改革力度比较大的教材，集中反映了华中科技大学和国内众多兄弟院校在改革机械工程类人才培养模式和课程内容体系方面所取得的成果。

这套系列教材出版发行 9 年来，已被全国数百所院校采用，受到了教师和学生的广泛欢迎。目前，已有 13 本列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材，多本获国家级、省部级奖励。其中的一些教材（如《机械工程控制基础》《机电传动控制》《机械制造技术基础》等）已成为同类教材的佼佼者。更难得的是，“21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材”也已成为一个著名的丛书品牌。9 年前为这套教材作序的时候，我希望这套教材能加强各兄弟院校在教学改革方面的交流与合作，对机械

工程类专业人才培养质量的提高起到积极的促进作用,现在看来,这一目标很好地达到了,让人倍感欣慰。

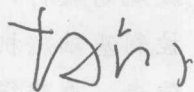
李白讲得十分正确:“人非尧舜,谁能尽善?”我始终认为,金无足赤,人无完人,文无完文,书无完书。尽管这套系列教材取得了可喜的成绩,但毫无疑问,这套书中,某本书中,这样或那样的错误、不妥、疏漏与不足,必然会存在。何况形势总在不断地发展,更需要进一步来完善,与时俱进,奋发前进。较之9年前,机械工程学科有了很大的变化和发展,为了满足当前机械工程类专业人才培养的需要,华中科技大学出版社在教育部高等学校机械学科教学指导委员会的指导下,对这套系列教材进行了全面修订,并在原基础上进一步拓展,在全国范围内约请了一大批知名专家,力争组织最好的作者队伍,有计划地更新和丰富“21世纪机械设计制造及其自动化专业系列教材”。此次修订可谓非常必要,十分及时,修订工作也极为认真。

“得时后代超前代,识路前贤励后贤。”这套系列教材能取得今天的成绩,是几代机械工程教育工作者和出版工作者共同努力的结果。我深信,对于这次计划进行修订的教材,编写者一定能在继承已出版教材优点的基础上,结合高等教育的深入推进与本门课程的教学发展形势,广泛听取使用者的意见与建议,将教材凝练为精品;对于这次新拓展的教材,编写者也一定能吸收和发展原教材的优点,结合自身的特色,写成高质量的教材,以适应“提高教育质量”这一要求。是的,我一贯认为我们的事业是集体的,我们深信由前贤、后贤一起一定能将我们的事业推向新的高度!

尽管这套系列教材正开始全面的修订,但真理不会穷尽,认识不是终结,进步没有止境。“嚶其鸣矣,求其友声”,我们衷心希望同行专家和读者继续不吝赐教,及时批评指正。

是为之序。

中国科学院院士



2009.9.9

第二版前言

机械原理课程是高等学校各类专业讲授机械产品共性技术的一门重要的技术基础课,为了使 学生适应社会的需求,加强对 学生创造性思维与工程实践能力的培养,将课程理论教学、课程设计与实践性教学环节进行融合与整体优化,进行教学边界再设计迫在眉睫。

机械原理教学改革中,注重以案例为牵引、设计为主线,先系统再分析,通过讲解机构在机电产品中的应用及相关案例,学生所学的机构就不再是孤立的、没有联系的,通过设计引导与案例教学提高学生综合设计能力和工程应用能力。

开放机械原理课程设计(实践教学环节)题目,学生自选设计课题,课程设计任务、内容要求学科交叉,同一功能多方案设计,设计要求提前在课堂教学中布置,整个实践教学环节完全由学生独立完成。这样学生必须通过查询资料,运用所学的知识,发挥自己的想象力和创造力,来实现实践教学提出的目标。部分有实用价值的课程设计选题还延伸到后续课程直至毕业设计中进行完整的详细设计,如仿马步态的多杆机构、指南车、爬楼轮椅等课程设计选题,在后续课程直至毕业设计进行结构设计与制作,通过这些环节对学生进行了较完整的设计过程训练,这种教学体系、方法与手段的组织与再设计,促进了学生主动实践的积极性。

多元化的教学模式是培养学生创新能力的基础,施行“以学生为中心的教育”,结合“学习是基础、思考是关键、实践是根本”的高素质人才培养的指导思想,将学生的被动学习变为研究性学习,变封闭式学习为开放式学习,变知识教育为能力培养,课堂讲授与实践教学灵活互补:教学方式的多样化,即课堂讲授、实践活动、讨论式教学、项目式与案例式教学相结合;考核方式的灵活化,即笔试、小论文、实践活动成果、大赛作品均为考核内容,结合全国机械创新设计大赛、CCTV 机器人大赛、国际学生交流等活动,将相关内容与机械原理教学结合,并作为考试成绩一部分;教学内容的工程化,即通过介绍产品设计及机构在产品中应用的案例,通过案例教学项目牵引,打破了创新的神秘感,提高了学生的综合素质。

为了突出机械产品中常用机构设计的一般规律,给学生以清晰的设计思路,而又不失本课程的结构特点,全书采用文字、图表及图文对照的形式。参加本书编写的有:杨家军(第0、1、7、8、10章);冯丹凤(第5、9章);程远雄(第4章);朱洲(第2章);刘伦洪(第3、6章)。全书由杨家军主编。

本书在编写过程中,得到华中科技大学机械科学与工程学院教师的热情鼓励与大力支持,对本书提出了许多宝贵的意见和建议;在出版过程中,华中科技大学出版社的领导和编辑给予了很大支持与帮助,并付出了辛勤劳动。编者在此谨向他们表示真挚的谢意!

由于编者水平有限,错误和不当之处在所难免,恳请各方面专家和广大读者批评指正。

编 者

2013.12.10

第一版前言

机械原理是一门介绍各类机械产品中常用机构设计基本知识、基本理论和基本方法的重要技术基础课程,主要介绍机构的运动学、动力学原理及机构设计的方法。在机械类专业人才培养计划中,本课程的教学及其实践环节在培养学生的机械工程背景、机械设计能力与创新思维方面占有极为重要的地位,是培养机械类高素质人才的重要组成部分。

本书针对培养现代机电产品创新设计人才的需要,为了适应现代机械设计中机构设计与选型方面的要求,培养学生创新意识和工程设计能力,从提高学生创新设计能力入手,打破创新设计的神秘感,加强工程设计和实践内容,注重设计技能的基本训练,由专业教育转向通识教育,拓宽学生知识面,全面提高学生的综合素质。本书在教学体系与教学内容上进行了系统改革:在体系上,以创新思维训练为主线,以应用领先为重点;在内容取舍上,注重先进性与实用性,注重知识面的广阔性;在内容编排上,大胆创新,注重主动实践,通过案例培养学生创新意识和能力,内容力求简明、新颖、有实用性。本书面向产品设计,注重启发创新思维,加强实践,培养学生扎实的工程设计能力,即以机构设计为主线,重点讨论机构设计的一般规律和方法,将设计基本知识、基本理论和设计方法有机地融合,加强创新思维和工程设计能力的训练,并通过理论与实践有机的联系,为现代机械产品设计提供必要的基础知识与方法。本书不仅向学生介绍了机械设计的基本原理与方法,还对工程设计的问题进行了剖析,有利于提高学生独立分析和解决实际问题的能力。

本书在教学体系上强调学科之间的交叉融合,注重相关课程边界再设计;在内容上不拘泥于系统性,而是围绕工程的需求来安排;在思维方式上从重视分析转到重视综合,从重视如何认识世界转到重视如何改造世界。本书以培养学生的机械综合设计能力为目标,突破思维定式,加强学生观察与分析问题的能力、独立思考与创新的能力,在教学体系和教学内容上,注重激发学生的求知欲望,调动学习的积极性,开阔思路,让学生了解更多、更新的机械设计理论和技术;使学生既能掌握本课程的核心内

容,又有利于培养学生的创新意识和工程设计能力。

本书可作为普通高校机械类专业机械原理课程的教材,也可供其他有关专业的师生和工程技术人员参考。

本书由杨家军教授主编,参加编写的是:华中科技大学杨家军(第0,1,4,5,6,7,8,9,10章),冯丹凤(第3,8,9章),朱洲(第2,10章),毛宽民(第6,10章),凌玲(第1,6章)。

在本书的编写过程中,得到了华中科技大学机械设计与汽车工程系教师的热情鼓励与大力支持,提出了许多宝贵的意见和建议;在出版过程中,华中科技大学出版社的领导和编辑给予了很大的支持与帮助,并付出了辛勤劳动。编者在此谨向他们表示诚挚的谢意!

有关本课程的多媒体课件及相关资料,可参阅华中科技大学精品课程网站(<http://jpkc.hust.edu.cn/jpkc/>)。

由于编者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,恳请各方面专家及广大读者批评指正。

编 者

2009年1月



机械原理

第 0 章 绪论	(1)
0.1 机械设计概述	(1)
0.2 机械系统	(9)
0.3 机械的组成及运动副	(16)
习题	(20)
第 1 章 平面机构具有确定运动的条件	(21)
1.1 平面机构运动简图的绘制	(21)
1.2 平面机构具有确定运动的条件	(23)
1.3 平面机构自由度的计算	(28)
习题	(30)
第 2 章 平面连杆机构及其设计	(33)
2.1 平面四杆机构的基本形式、演变及其应用	(33)
2.2 平面四杆机构设计中的共性问题	(39)
2.3 平面四杆机构的设计	(46)
2.4 平面连杆机构的解析综合	(58)
习题	(70)
第 3 章 凸轮机构及其设计	(75)
3.1 凸轮机构的组成和分类	(75)
3.2 从动件常用的运动规律	(81)
3.3 盘形凸轮机构基本尺寸的确定	(87)
3.4 盘形凸轮轮廓曲线的设计	(92)
3.5 凸轮机构设计	(104)
习题	(112)
第 4 章 齿轮机构及其设计	(115)
4.1 齿轮机构的类型与特点	(115)
4.2 渐开线直齿圆柱齿轮机构	(119)

4.3	渐开线斜齿圆柱齿轮机构	(139)
4.4	直齿锥齿轮机构	(148)
4.5	变位齿轮传动	(153)
	习题	(171)
第5章	齿轮系及其设计	(176)
5.1	定轴齿轮系及其传动比	(176)
5.2	周转齿轮系及其传动比	(178)
5.3	复合齿轮系及其传动比	(182)
5.4	齿轮系的应用	(184)
5.5	行星轮系设计	(190)
5.6	其他行星传动简介	(193)
	习题	(197)
第6章	其他常用机构	(201)
6.1	间歇运动机构	(201)
6.2	广义机构	(211)
6.3	具有其他功能的机构	(219)
6.4	螺旋机构	(227)
6.5	万向联轴节	(229)
	习题	(232)
第7章	机构系统运动方案设计	(234)
7.1	机构系统运动方案设计	(234)
7.2	执行机构运动规律设计	(236)
7.3	执行机构运动协调设计	(241)
7.4	机械运动循环图设计	(244)
	习题	(247)
第8章	机构创新设计	(249)
8.1	机构选型	(249)
8.2	机构构型的创新设计	(253)
8.3	基于功能分析的机构设计	(264)
8.4	机构系统设计实例	(272)
8.5	机构设计方案的评价	(275)
	习题	(278)
第9章	机构系统的动力学设计	(281)
9.1	平面机构的平衡设计	(281)
9.2	作用在机构上的力和机构的运动过程	(290)

9.3 机构系统动力学模型及运动方程式	(293)
9.4 机构系统的真实运动规律	(302)
9.5 机构系统的动力学设计	(306)
习题	(318)
第 10 章 机构优化设计	(323)
10.1 机构优化设计概述	(323)
10.2 平面连杆机构的优化设计	(326)
10.3 平面凸轮机构的优化设计	(334)
10.4 齿轮变位系数的优化选择	(338)
习题	(345)
复习思考题	(347)
综合练习题	(349)
参考文献	(355)



绪 论

0.1 机械设计概述

0.1.1 设计与创新

设计是复杂的思维过程。设计就是尽可能少地消耗以材料、能源、劳动力、资金等形态存在的资源,创造出满足预先设想功能要求的物质实体。设计是人类进行的一种有目的、有意识、有计划的创造活动。设计过程蕴涵着创新和发明的源泉。

设计的发展与人类历史的发展一样,是逐渐进化的。例如,人类最初进行的设计是一种单凭直觉的创造活动,仅仅是为了生存、为了保暖,剥下兽皮或树皮,稍加整理就披在身上,这就是当时设计的服装;为了猎取动物,分食兽肉,设计了刀形斧状的工具,这也许就是最初的结构设计。后来,人们设计不仅仅是为了生存,而是上升到了提高生活的质量和满足精神上的某种需要,开始利用数学与物理学的研究成果解决设计问题。当人们设计的产品经过实践的检验,并有了丰富的设计经验以后,就开始归纳总结出各种设计的经验公式,还通过试验与测试获得各种设计参数作为以后设计的依据,同时开始借助于图纸绘制设计产品,逐步使设计规范化。

现代设计强调创造能力的开发和充分发挥人的创造性,重视原理方案的设计、开发和创新产品。现代设计已不再把时间花费在烦琐的计算推导及平面图的设计上,而是在设计过程中,综合考虑和分析市场需求、设计、生产、管理、使用、销售等各方面的因素,综合运用优化系统工程、可靠性理论、价值工程、信息技术等学科的知识,探索多种解决设计问题的科学途径。在当前科学技术迅猛发展的时代,人们对产品的要求越来越高,社会也就对设计工作者提出了更高的要求。设计朝什么方向发展,设计如何解决现代人的需求,已经成为重要的研究课题。

机械产品的设计可以分为三种类型,如表 0-1 所示。

由表 0-1 可知,开发性设计和适应性设计明显占大多数,因此有必要在设计领域中大力加强有关创造能力和创新设计等观念、方法的培养、教育和开发。

表 0-1 机械产品设计的三种类型

类 型	含 义	占设计总数 的比例
开发性设计	在工作原理、功能结构等完全未知的情况下,运用成熟的科学理论或经过试验证明可行的新技术,设计出过去没有的新型机械。这是一种完全的创新设计	25%
适应性设计	在工作原理、功能结构基本保持不变的前提下,对产品作局部的变更或重新设计少数零部件,以改变产品的某些性能或克服原来的某些明显缺陷。这是具有部分创新的设计	55%
变型设计	在工作原理、功能结构基本保持不变的前提下,对产品作尺寸大小或布置方式的改变,以适应量的变化要求。在此类设计中,不但功能和解析原理不变,而且不会出现诸如材料、应力、工艺等方面的新问题	20%

图 0-1 所示为机械设计的一般流程。整个设计流程大体上可划分为产品规划、概念设计、详细设计及试制生产四个阶段,各个阶段所要完成的工作目标或结果如图 0-1 所示。需要强调的是,在概念设计阶段,建立功能结构、寻求作用原理、构思总体原理解及布局造型等都是最具创造性的工作,因此概念设计阶段也是决定新产品开发成败与否的关键阶段。设计本身是一个不断反馈循环的过程,设计者在每一步都可能获得新的信息,从而反馈到前面的步骤。一个出色的设计往往要经历图 0-1 所示流程的多次反复才能真正达到其最优效果。

创新设计是指充分发挥设计者的创造力,利用人类已有的相关科学技术成果(含理论、方法、技术原理等)进行创新构思,设计出具有新颖性、创造性及实用性的机构或机械产品的一种实践活动。

归纳起来,创新设计具有以下特点:

(1) 创新设计是涉及多种学科,包括设计学、创造学、经济学、社会学、心理学等的复合性工作,其结果的评价也是多指标、多角度的;

(2) 创新设计中相当一部分工作是非数据性、非计算性的,要依靠对各学科知识的综合理解与交融,对已有经验的归纳与分析,运用创造性的思维方法与创造学的基本原理开展工作;

(3) 创新设计不只是因为问题而设计,更重要的是提出问题、解决问题;

(4) 创新设计是多层次的,不在乎规模的大小,也不在乎理论的深浅,注重的是新颖性、独创性;

(5) 创新设计必须具有实用性,其最终目的在于应用。

学起于思,思源于疑。生活中经常会出现一些小问题。例如:在饮水机上倒水时,手推开关会把一次性纸杯压扁;在台灯下写字时,手会遮住光线留下影子;在墨水瓶中吸墨水时,会把笔弄脏;电梯按钮的位置不能满足不同身高的人,且只有视觉提示,没有考虑盲人等特殊人群的需求;等等。将这些问题解决就是创新设计。

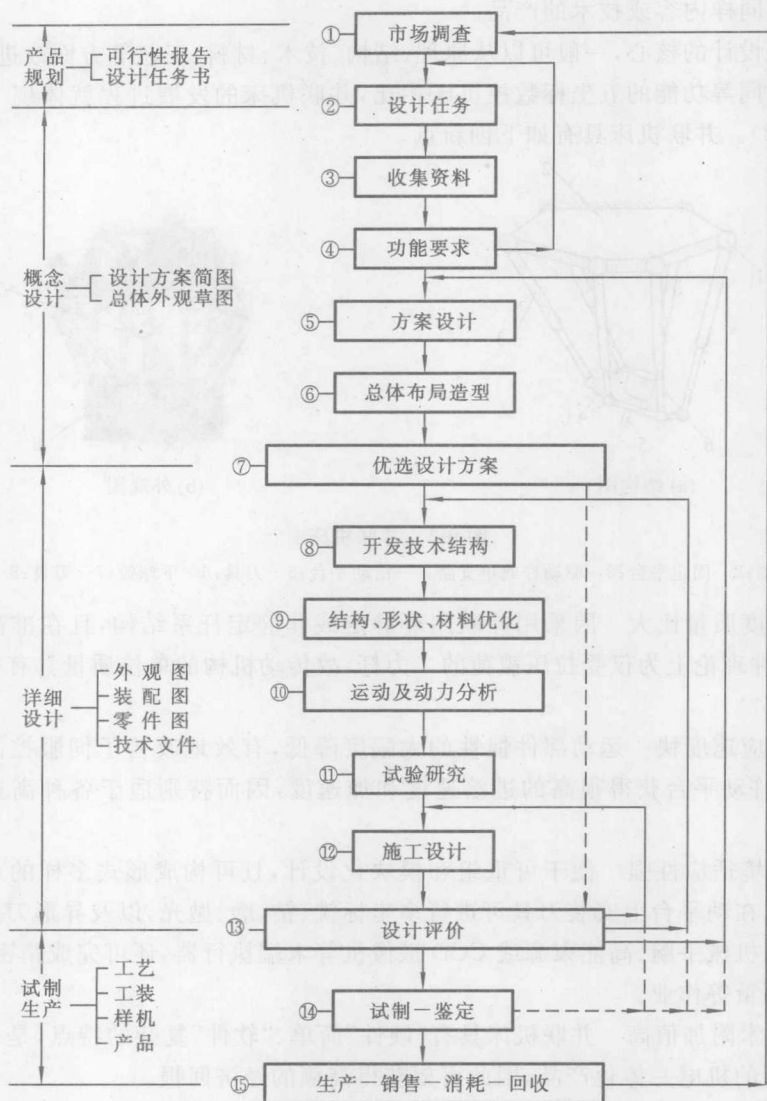


图 0-1 设计的一般流程

0.1.2 设计的原则

设计的原则是指导设计的基本要求,通常有创新原则、实用原则、经济原则、美观原则、道德原则、技术规范原则、可持续发展原则、安全原则、科学性原则等。

1. 创新原则

设计的创新原则就是通过引入新概念、新思想、新方法、新技术等,或对已有产品的革新来创造具有相当社会价值的事物、形式。新颖性是指在完成产品设计之前,还

没有出现过同样内容或技术的产品。

创新是设计的核心,一般可以从原理、结构、技术、材料、工艺等方面改进和突破。例如与实现同等功能的五坐标数控机床相比,并联机床的发展过程就体现了创新原则(见图 0-2)。并联机床具有如下创新点。

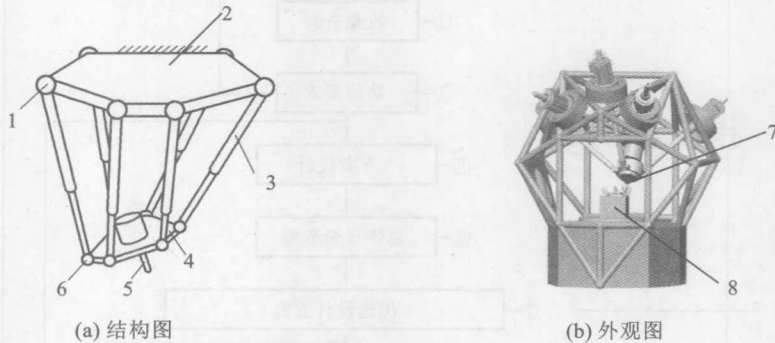


图 0-2 并联机床

1—上球铰;2—固定平台;3—驱动杆或单支路;4—活动平台;5—刀具;6—下球铰;7—刀具;8—工件

(1) 刚度质量比大 因采用并联闭环静定或非静定杆系结构,且在准静定状态下,传动构件理论上为仅受拉压载荷的二力杆,故传动机构的单位质量具有很高的承载能力。

(2) 响应速度快 运动部件惯性的大幅度降低,有效地改善了伺服控制器的动态品质,允许动平台获得很高的进给速度和加速度,因而特别适于各种高速数控作业。

(3) 环境适应性强 便于可重组和模块化设计,且可构成形式多样的布局 and 自由度组合。在动平台上安装刀具可进行多坐标铣、钻、磨、抛光,以及异形刀具刃磨等加工。装备机械手腕、高能束源或 CCD 摄像机等末端执行器,还可完成精密装配、特种加工与测量等作业。

(4) 技术附加值高 并联机床具有“硬件”简单、“软件”复杂的特点,是一种技术附加值很高的机电一体化产品,因此可望获得高额的经济回报。

洗衣机从手摇、电动、单缸、双缸到全自动的发展过程也体现了创新原则(见图 0-3)。

2. 实用原则

设计的实用原则是指将物理功能、生理功能、心理功能、社会功能巧妙地进行交叉融合,满足用户对产品的不同需求,提高产品的实用性。设计的实用性,要求产品简洁、方便、宜人、安全、耐用,以较少的物质消耗获得更大的效益。一个产品如果失去了基本功能,也就没有了价值。

雪地自行车(见图 0-4(a))和汽车修理升降支架(见图 0-4(b))的发明就体现了实用原则。