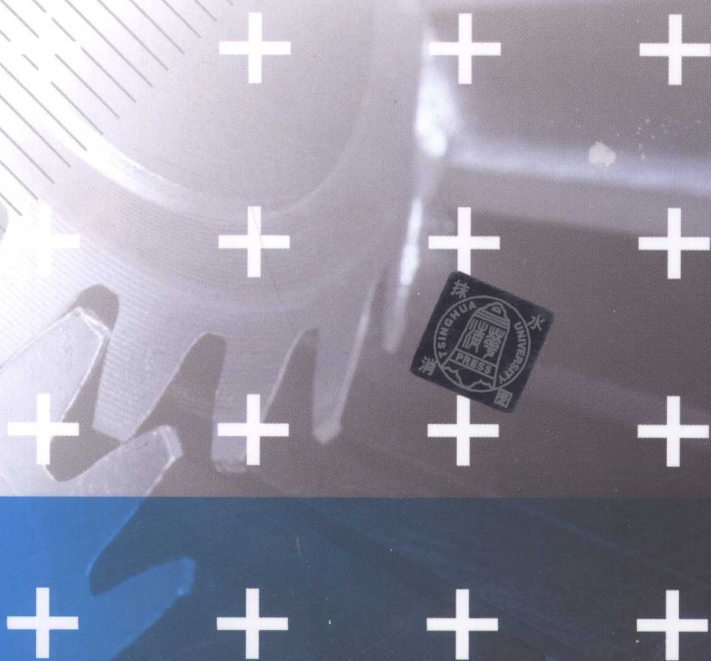


# 现代机械设计 理论与方法

杨义勇 编著

清华大学出版社





# 现代机械设计 理论与方法

杨义勇 编著

清华大学出版社  
北京

北京

## 内 容 简 介

本书致力于将知识的基础作用和创新实践活动相结合,从提出问题入手,系统介绍解决机械设计问题的理论与方法。全书内容分为三个部分,第一部分是现代机械设计的理论基础,包含绪论、机械设计进程、创新设计与创造技法、机械创新设计表达、机构的创新设计与实现、机械结构设计;第二部分是现代机械设计技术与实现,包含有限元法、机械动力学设计、逆向工程技术及设计、机械优化设计、机电系统建模仿真与控制设计;第三部分是现代机械产品的市场化设计,包含系列化、模块化与人-机工程设计。

本书可作为高等院校机械工程专业高年级本科生和研究生教材,也可作为机械设计、机电一体化、自动化、先进制造等领域科技人员的参考书籍。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

现代机械设计理论与方法/杨义勇编著.--北京:清华大学出版社,2014

ISBN 978-7-302-35963-0

I. ①现… II. ①杨… III. ①机械设计 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 066033 号

责任编辑:黎强

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者:北京鑫丰华彩印有限公司

装 订 者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:20.25

字 数:490千字

版 次:2014年5月第1版

印 次:2014年5月第1次印刷

定 价:88.00元

---

产品编号:057561-01

# 前言

## FOREWORD

机械及装备制造业真正体现了一个国家的实力,在产业链上具有非常强的带动性。现代机械设计与方法的学习对于机械及装备制造业具有重要的意义,在科技不断发展和多学科广泛交叉作用中,其内涵与外延将进一步丰富和扩展。

机械设计是根据使用要求对机械的工作原理、结构、运动方式、力和能量的传递系统、各个零件的材料和形状尺寸、润滑方法进行构思、分析和计算并将之转化为具体的描述,以作为制造依据的创造性工作过程。研究机械设计过程的理论、方法及实现手段等对工业、农业、国防、科技各个领域的理论探索及实践均具有重要意义。

现代机电产品的质量、性能和成本,在很大程度上是由设计阶段的工作决定的,设计实现产品标准化、系列化和通用化,能加速实现我国生产活动的高度机械化、电气化和自动化。设计水平与工业发展水平是相互影响的。设计先进的机器,可大大加速现代化建设的进程。另外,现代机械设计过程在本质上是一个创新过程,创新设计综合实践能力是尖端人才培养的“灵魂、动力”。

作者长期主讲机械设计、机械系统动力学、数控技术、现代机械设计理论与方法等课程,在教学过程中,请教多位教学名师和专家,不断探索现代机械设计课程应处的地位、教授的目的和课程的体系。在多年教学经验总结和专家指导的基础上,对教案、主编的相关教材进行了体系变更、内容更新和改写,从而形成了这本《现代机械设计理论与方法》。本书紧扣设计科学规律的研究与运用,强调知识的基础作用和创新实践活动相结合。全书内容可分为三个部分,共 12 章。

第一部分,是现代机械设计的理论基础,包含第 1 章绪论,第 2 章机械设计进程,第 3 章创新设计与创造技法,第 4 章机械创新设计表达,第 5 章机构的创新设计与实现,第 6 章机械结构设计。

第二部分,是现代机械设计技术与实现,包含第 7 章有限元法,第 8 章机械动力学设计,第 9 章逆向工程技术及设计,第 10 章机械优化设计,

第 11 章机电系统建模仿真与控制设计。

第三部分,是现代机械产品的市场化设计相关内容,包含第 12 章系列化、模块化与人机工程设计。

本书后面附有思考题。有些题目工作量较大,可作为从方案设计、建模、计算,再到设计结果讨论的机械创新设计综合实践的题目。如果能与相关的实验设备、课题研究相结合,则可以形成机械工程设计的实例,使学生对解决机械设计问题的过程有较完整的了解。

本书编写时力求贴近教学实际,按照工科专业的教学大纲要求和课时要求,提供大量图示说明和实例。本书既可作为高等学校工科类本科生、研究生的教材,也可作为相关专业工程设计人员和研究人员的设计参考书。

作者在编写过程中收集、运用部分科研和教学研究资料,参考了大量论文、专著、教材以及相关网页的资料文献。感谢清华大学金德闻教授、季林红教授、王人成副教授长期以来在专业学习、设计理论与实践教学方面给予的指导帮助。此外,本书的编写过程还得到郑州轻工学院陈鹿民教授、中国地质大学(北京)众多同仁的帮助,在此作者表示衷心感谢。

书中的部分内容参考并选用了作者所指导的硕士生、博士生所做的工作。中国地质大学(北京)“机械工程学科建设项目”给予了必要的资助,作者谨对这些学生和资助项目管理机构表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,编写时间仓促,书中难免存在不妥甚至错讹之处,敬请读者批评指正。

作 者

2013 年 10 月于北京

# 目录

## CONTENTS

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 机械设计科学的发展及其在现代化建设中的作用 .....	1
1.1.1 机械设计科学在实践、创新中不断发展 .....	1
1.1.2 发展历程 .....	4
1.1.3 机械工业及其设计理论在现代化建设中的作用 .....	5
1.2 机器、机构、零件要素 .....	6
1.2.1 机器 .....	6
1.2.2 机构 .....	7
1.2.3 零件 .....	11
1.3 现代设计理论与设计方法 .....	11
1.3.1 设计、发明与创造 .....	11
1.3.2 现代设计方法 .....	12
思考题 .....	14
<b>第 2 章 机械设计进程</b> .....	15
2.1 机械设计的一般过程 .....	15
2.1.1 机械设计的重要阶段及特征 .....	15
2.1.2 机械产品的工程设计步骤 .....	16
2.2 方案设计的关键环节 .....	18
2.2.1 研究和确定设计任务 .....	18
2.2.2 总体方案设计的重点方法 .....	18
2.2.3 系统性能综合评价 .....	21
2.2.4 多方案设计实例 .....	23
2.2.5 总体布局设计 .....	25
2.3 技术设计的重点环节 .....	30
2.4 技术文件编制与设计总结报告 .....	34

2.5	设计过程的规划与监控	34
2.5.1	节点计划说明	36
2.5.2	各个阶段的启动和完成情况审查	41
2.5.3	文件管理	42
2.6	国外对机械系统具体设计步骤的分析	42
2.6.1	诺顿关于设计步骤的分析	42
2.6.2	设计过程的反复、多解特性分析	46
	思考题	47
<b>第3章</b>	<b>创新设计与创造技法</b>	<b>48</b>
3.1	创新的特点分析	48
3.2	创新设计的基础	49
3.2.1	理论基础	49
3.2.2	传承基础	50
3.2.3	方法基础	51
3.2.4	思维基础	52
3.2.5	群众性基础	53
3.2.6	多学科基础	53
3.3	创造力原理	53
3.3.1	创造力的一般特性	53
3.3.2	创造力的影响因素	54
3.3.3	个人智力与群体智慧	56
3.3.4	想象、幻想、灵感思维、逆向思维	57
3.4	常用的创造技法	57
3.4.1	综合创造	57
3.4.2	分离创造	62
3.4.3	移植创造	62
3.4.4	其他方法	64
3.4.5	创新设计基本方法	64
3.5	创造技法的实施	64
3.5.1	智力激励法的实施	64
3.5.2	典型的检核表——设想提问法	66
3.6	发明问题解决理论	66
	思考题	68
<b>第4章</b>	<b>机械创新设计表达</b>	<b>69</b>
4.1	机构示意图与机械系统运动简图	69
4.1.1	机构示意图	69
4.1.2	机械系统运动简图	71

4.1.3	液压传动系统简图 .....	76
4.1.4	机械加工装备及加工过程简图 .....	79
4.2	功能原理分析及表达 .....	83
4.2.1	功能分析 .....	83
4.2.2	功能原理关键特征的设计表达 .....	84
4.2.3	功能原理图与工作原理确定 .....	86
4.3	设计目录方法简介 .....	88
4.3.1	逻辑功能元及其物理实现方法 .....	88
4.3.2	数学功能元与物理功能元 .....	89
4.4	机械运动循环图设计 .....	92
4.5	三维设计显示 .....	94
4.5.1	三维设计软件 .....	94
4.5.2	草图绘制 .....	95
4.5.3	实体建模特征 .....	95
4.5.4	装配体 .....	96
4.6	运用三维软件设计的实例 .....	97
4.6.1	自动爬楼梯装置 .....	97
4.6.2	减速器三维显示 .....	99
	思考题 .....	100
<b>第 5 章</b>	<b>机构的创新设计与实现 .....</b>	<b>101</b>
5.1	机构选型 .....	101
5.1.1	机构选型基础 .....	101
5.1.2	机构的形式设计 .....	103
5.1.3	选型实例分析 .....	106
5.2	机构变异 .....	110
5.3	机构组合 .....	115
5.3.1	串联式机构组合 .....	115
5.3.2	并联式机构组合 .....	116
5.3.3	复合式机构组合 .....	116
5.3.4	叠加式机构组合 .....	117
5.4	功能综合 .....	118
5.5	构型综合的基本要求 .....	119
5.6	机构的演绎法 .....	120
5.7	广义机构 .....	122
	思考题 .....	124
<b>第 6 章</b>	<b>机械结构设计 .....</b>	<b>125</b>
6.1	机械结构设计任务 .....	125



6.2	零件的结构要素、工作要素、连接要素 .....	126
6.3	机械系统结构设计的主要原则 .....	128
6.3.1	简单 .....	128
6.3.2	明确 .....	133
6.3.3	安全可靠 .....	139
6.4	结构设计的原理及实现 .....	141
6.4.1	等强原理 .....	141
6.4.2	变形协调原理 .....	143
6.4.3	自助原理 .....	144
6.5	轴系支承结构设计 .....	145
6.5.1	轴承的调心性能 .....	145
6.5.2	滚动轴承的预紧结构设计 .....	146
6.5.3	密封结构 .....	148
6.5.4	轴承的“正装”与“反装”结构 .....	148
6.5.5	止推轴承、静压轴承结构 .....	149
6.5.6	几种联轴器结构设计 .....	150
6.5.7	轴的安装结构 .....	151
6.6	提高机械性能的结构设计 .....	152
6.6.1	提高散热性能 .....	152
6.6.2	非金属结构设计 .....	153
6.6.3	提高精度的结构设计 .....	154
	思考题 .....	156
<b>第7章 有限元法 .....</b>		<b>157</b>
7.1	有限元法的发展背景 .....	157
7.2	有限元法解题步骤和过程 .....	158
7.3	含弹性构件机构的有限元法 .....	160
7.3.1	单元坐标和系统坐标 .....	161
7.3.2	系统力和单元力 .....	163
7.3.3	单元位移函数 .....	164
7.3.4	单元动力学方程 .....	165
7.4	刚架结构的有限元法 .....	172
7.4.1	单元刚度矩阵的建立 .....	172
7.4.2	单元刚度矩阵的导出 .....	173
7.4.3	总体刚度矩阵的集成 .....	176
7.4.4	位移的求解 .....	177
7.5	有限元分析软件 .....	180
7.6	机械系统有限元分析的力学基础与实例 .....	181
7.6.1	力学基础 .....	181

7.6.2 齿轮有限元分析实例	191
思考题	194
<b>第8章 机械动力学设计</b>	195
8.1 动力学研究领域	195
8.2 系统动力学建模的原理	196
8.2.1 牛顿第二定律	196
8.2.2 达朗贝尔原理	196
8.2.3 拉格朗日方程	197
8.2.4 凯恩方程	197
8.2.5 影响系数法	197
8.2.6 传递矩阵法	198
8.3 机构动力学模型方程的建立	198
8.3.1 旋转机械动力学方程	198
8.3.2 电磁铁机构动力学方程	199
8.3.3 含周期性运动构件的机构动力学方程	200
8.3.4 四杆机构动力学方程	200
8.3.5 五杆机构动力学方程	201
8.3.6 开链机构动力学方程	203
8.3.7 齿轮传动系统模型方程	203
8.3.8 电机驱动起动过程运动规律	206
8.4 动力学仿真	207
8.4.1 仿真设计技术	207
8.4.2 计算机数字仿真与物理仿真	208
8.4.3 机械系统的耦合特性及线性图简化	208
8.4.4 多领域仿真的计算机实现	211
8.5 ADAMS 动力学建模与仿真	213
8.5.1 软件简介	213
8.5.2 动力学问题的求解算法简介与坐标系	214
8.5.3 ADAMS 的建模与求解过程	215
8.5.4 ADAMS 仿真分析模块	218
思考题	232
<b>第9章 逆向工程技术及设计</b>	233
9.1 逆向工程概念	233
9.2 逆向工程设计流程	234
9.3 实物逆向工程设计中的几项关键技术	237
9.4 逆向工程关键技术的实现	239
9.5 数字模型重构技术	243

9.6 快速原型制造技术 .....	244
思考题 .....	248
<b>第 10 章 机械优化设计 .....</b>	<b>249</b>
10.1 优化设计的概念 .....	249
10.2 机械优化设计的发展 .....	250
10.3 机械优化设计的数学模型 .....	250
10.3.1 优化准则与目标函数 .....	251
10.3.2 设计变量 .....	253
10.3.3 约束条件 .....	255
10.3.4 求解数学模型的方法 .....	256
10.4 最优化方法的数学基础 .....	257
10.4.1 偏导数与梯度 .....	258
10.4.2 泰勒展开式 .....	258
10.4.3 极小点存在条件 .....	259
10.5 优化方法举例 .....	260
10.5.1 一维搜索方法 .....	260
10.5.2 无约束优化方法 .....	262
10.5.3 约束优化方法 .....	265
10.6 优化计算结果的分析及处理 .....	267
10.7 优化设计建模流程示例 .....	268
思考题 .....	271
<b>第 11 章 机电系统建模仿真与控制设计 .....</b>	<b>272</b>
11.1 机电系统集成 .....	272
11.2 机电系统控制 .....	273
11.2.1 控制方式基本分类 .....	274
11.2.2 控制实现方式 .....	275
11.3 机电系统建模与仿真 .....	277
11.3.1 建模 .....	277
11.3.2 机电系统模型结构 .....	278
11.3.3 仿真环境 .....	280
11.4 机电系统控制设计 .....	281
11.4.1 电动机控制方案 .....	281
11.4.2 可逆调速系统、稳速系统 .....	284
11.4.3 交流电动机的变频控制 .....	287
11.4.4 常规指令实现 PID 控制 .....	288
11.5 多轴协调运动控制 .....	289
思考题 .....	290

第 12 章 系列化、模块化与人-机工程设计 .....	291
12.1 标准化设计、系列化设计 .....	291
12.1.1 设计步骤与方法 .....	292
12.1.2 优先数与标准公比 .....	292
12.1.3 设计举例 .....	294
12.2 模块化设计 .....	295
12.2.1 模块化设计的主要方式 .....	295
12.2.2 模块化设计的关键 .....	296
12.2.3 模块化设计的步骤 .....	298
12.2.4 模块化程度的度量 .....	298
12.3 人-机工程设计 .....	299
12.3.1 人-机特性比较与功能匹配 .....	300
12.3.2 从人体尺度考虑显示与控制的设计 .....	302
12.3.3 由人体力学考虑人-机学设计 .....	303
12.3.4 人-机系统的可靠性评价 .....	304
思考题 .....	308
参考文献 .....	309

## 绪论

## 1.1 机械设计科学的发展及其在现代化建设中的作用

## 1.1.1 机械设计科学在实践、创新中不断发展

常用的机械样式繁多、层出不穷。人们在各种机械的差异中寻找共同点,为新机械的诞生寻求设计原理和方法,一直没有停止脚步。例如,“带有减速功能机械”的设计就存在一个不断涌现并逐步发展、优化的过程,直至出现减速器的标准化、系列化产品。最早出现的是图 1-1~图 1-3 所示的单级或串联传动形式,之后发展成为可实现传动转向、各种分流传动的形式(见图 1-4~图 1-9)。

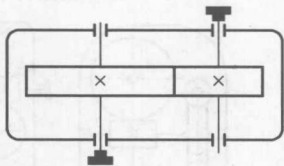


图 1-1 单级圆柱齿轮型

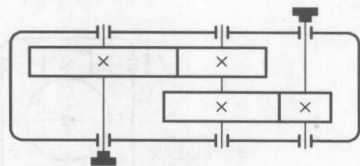


图 1-2 展开式双级圆柱齿轮型

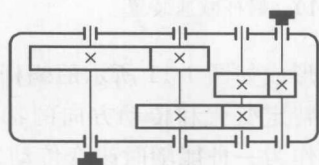


图 1-3 三级圆柱齿轮型

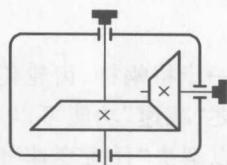


图 1-4 圆锥齿轮型

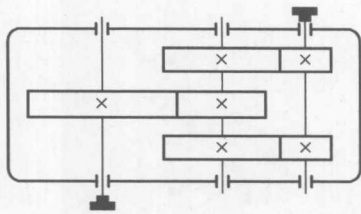


图 1-5 分流式双级圆柱齿轮型

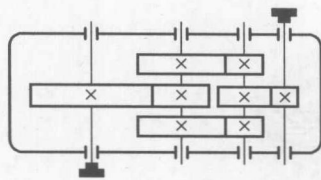


图 1-6 分流式三级圆柱齿轮型

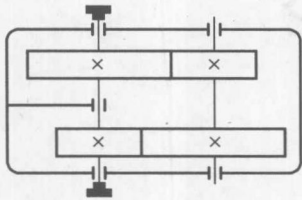


图 1-7 同轴双级圆柱齿轮型

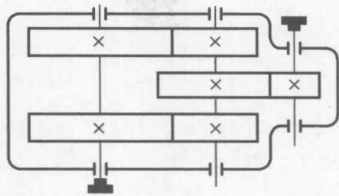


图 1-8 分流双级圆柱齿轮型

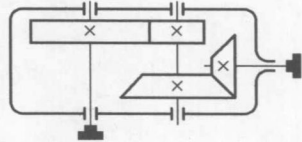


图 1-9 圆锥-圆柱齿轮型

由于生产的发展,简单的“减速装置”并不能满足不断增长的生产需要,随着加工制造水平的提高,各类新的装置、机构不断出现,构成了各种减速装置的新品种,如蜗杆减速装置(见图 1-10),这种结构具有结构紧凑、传动比大、工作平稳、噪声较小等特点,具有特定的用途。

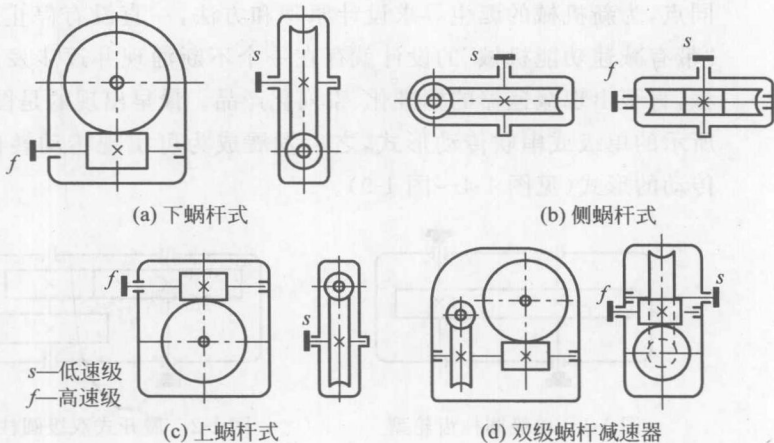


图 1-10 蜗杆减速装置

进一步将蜗杆、齿轮传动结合起来,形成如图 1-11 所示的蜗杆-齿轮减速装置。

上述“减速”功能可以实现传动比的特定变化和传动方向的特定改变,但是单一的减速功能难以解决“任意变速”问题。变速器作为一种能随时改变传动比的传动机构就在实际制作中被研发、完善出来,不仅出现了系统的、可靠的有级变速器,即传动按既定的设计要求通过操纵机构分级进行变速(见图 1-12),而且出现了无级变速器,即传动比在设计预定的范围内无级地进行改变(见图 1-13)。

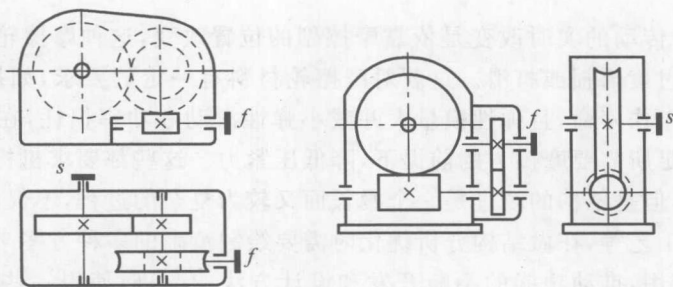


图 1-11 蜗杆-齿轮减速装置

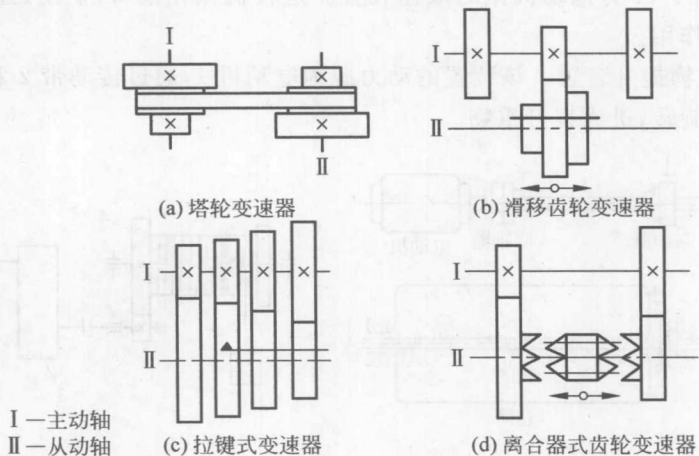


图 1-12 有级变速器

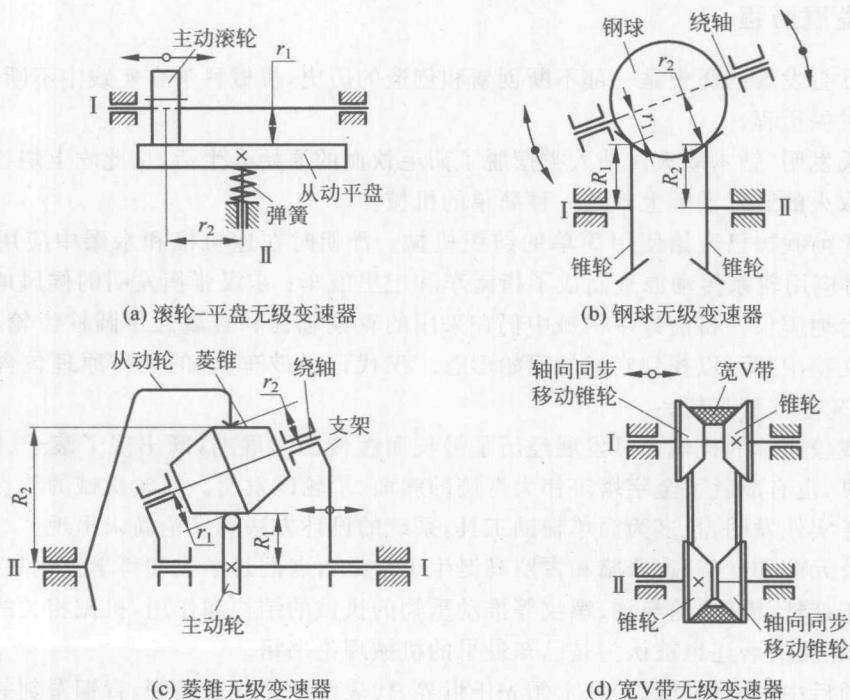


图 1-13 无级变速器

在图 1-13 中,传动的实时改变是依靠摩擦副的位置改变,这种摩擦轮传动的主要失效形式是接触疲劳、过度磨损或打滑。这就对摩擦轮材料有一定的要求,如接触疲劳强度高、耐磨性好、有长的工作寿命,且弹性模量大并减小弹性滑动和功率损耗,在传动中要求摩擦系数大,以便在满足所需要摩擦力的前提下,降低压紧力。这些都要求机构的详细结构等有不断的优化、改进,但是结构的改进是一个漫长而又较为复杂的过程,不仅涉及支承设计、装配关系、零件加工工艺等,在做结构分析优化时需要绘制清晰的多种方案来对比分析。

工业生产的应用,推动功能的不断开发和设计方法的改进,使得一些简单机械通过组合、综合,实现重要装备的功能,直接用于工业生产或农业现代化。如减速装置在大型工程机械中的应用,图 1-14 为拖动机件的减速装置。这种机械在港口、矿山、建筑、制造业等领域发挥了重要的作用。

图 1-15 为重物提升装置。该装置的动力源为电动机 1,通过传动带 2 和齿轮减速器 3,驱动提升卷筒 4 旋转,进而提升重物。

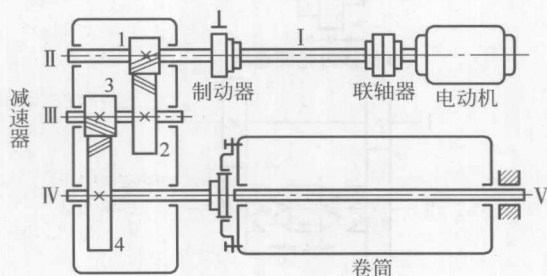


图 1-14 拖动机件的减速装置

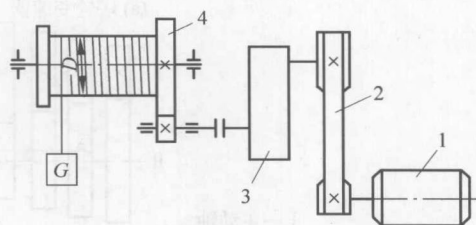


图 1-15 重物提升装置

### 1.1.2 发展历程

人类社会发展的历史是一部不断创新和创造的历史,机械科学在实践中不断发展,经历了长久的发展历程。

燧人氏发明“钻木取火”,使人类摆脱了茹毛饮血的原始人生活,从此吃上烧熟烤香的食物。钻木取火的装置实际上就是一种简单的机械。

五千年前我国已开始使用简单的纺织机械;晋朝时在连机椎和水碾中应用了凸轮原理;西汉时应用轮系传动原理制成了指南车和记里鼓车;东汉张衡发明的候风地动仪是世界上第一台地震仪。目前许多机械中仍在采用的青铜轴瓦和金属人字圆柱齿轮,在我国东汉年代的文物中都可以找到它们的原始形态。汉代记里鼓车,它的工作原理包含一套减速齿轮组,齿轮组连着车轮。

原始或较简单的机械工具发展经历了漫长而缓慢的发展期,既出现了滚子、撬棒、轮车等日用工具,也有成就了金字塔等伟大奇迹的斜面、滑轮的发明。原始机械的特点是基于经验获得的务实性发明,且多为简单辅助工具,系统的设计方法和理论尚未出现。

直到公元前 600 年,古希腊和古罗马诞生了一批著名的哲学家和科学家,如学者希罗著书阐明关于杠杆、滑轮、轮与轴、螺纹等推动重物的机械的结构和作用,机械相关的理论探索开始出现,相关的著述也被认为是已知最早的机械理论书籍。

公元前后中国的铸、锻、冶技术领先于世界,代表性的曾侯乙编钟、青铜秦剑等皆出现于



此时期；其后指南车、水转大纺车、浑天仪等机械也相继出现。

欧洲的车床于公元前5世纪出现。之后，机械在注重逻辑思维与实证主义的欧洲发展更为迅速，如帕斯卡基本定律的发现、齿轮啮合基本定律的提出等。此时机械的特点是利用自然能源作为动力实现基本的动力和运动功能，并开始对机械的工作原理、设计方法进行系统的研究。

近现代机械是以蒸汽机和纺纱机的发明与改良为标志的。18世纪末，织布机、缝纫机、蒸汽船、水压机、造纸机、蒸汽机车不断出现和改进，加工机床中的龙门刨床、卧式铣床、滚齿机等为现代工业的飞速发展打下了坚实基础。机械相关理论如画法几何、傅里叶定律、摩擦理论等相继提出，创立了机械学科的基本体系。至1875年，德国等国的学者逐步建立构件、运动副、运动链和机构运动简图等概念，奠定了机构学的基础。19世纪末20世纪初，现代机械已建立起完善的学科分支和理论体系。

现代机械设计与制造，广泛使用代数学、力学、几何学、拓扑学、生物学、材料学、电气与电子学等，结合计算机技术，逐步实现自动化、信息化、智能化的设计、制造、控制系统的集成。现代机械设计理论与方法不断得到发展，并将进一步拓展、更新、完善。

### 1.1.3 机械工业及其设计理论在现代化建设中的作用

机械工业在现代化建设中起着重要的关键作用，主要体现在：机械工业肩负着为国民经济各个部门提供装备和促进技术改造的重任，机械工业生产水平和设计手段现代化是国家现代化水平的主要标志之一，高速发展的科技依赖机械工业的推动。

机械设计与机械工业的作用表现在：

(1) “信息化、智能化装备必须联接机械系统完成具体动作”。

(2) 机械设计是根据使用要求对机械的工作原理、结构、运动方式、力和能量的传递系统、各个零件的材料和形状尺寸、润滑方法进行构思、分析和计算并将之转化为具体的描述，以作为制造依据的创造性工作过程。研究机械设计过程、理论方法及实现手段等对工业、农业、国防、科技各个领域的理论探索及实践均具有重要意义。

(3) 机械设计是科学技术转化为生产力的过程。现代技术主要通过设计的途径在机电产品中得到体现。“设计的新机器成为代替人们体力和部分脑力劳动的工具，能够大大提高劳动生产率和改善劳动条件”。

(4) 机械设计是联接需求到满足需求这一链条上的最基本环节。

(5) 机电产品的质量、性能和成本，在很大程度上是由设计阶段的工作决定的（设计的技术意义）。设计实现产品标准化、系列化和通用化，能加速实现我国生产活动的高度机械化、电气化和自动化。

(6) 设计水平与工业发展水平是相互影响的。创新设计先进的机器，可大大加速现代化建设的进程。

(7) 机械设计过程在本质上是一个创新过程。创新设计综合实践能力，是尖端人才培养的“灵魂、动力”。