



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 机械原理

韩建友 邱丽芳 主编



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 机 械 原 理

Jixie Yuanli

韩建友 邱丽芳 主编



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容简介

本书从内容和体系上与传统的机械原理教材有很大不同,具有鲜明的特色和时代的先进性。本书主要内容依次为:机械系统的设计过程(第1章),常用机构的类型、构成特点、功能及应用(第2章),连杆机构综合与运动分析(第3、4章),凸轮机构设计理论与方法(第5章),齿轮机构设计、轮系构成、运动分析与应用(第6章),机构的动力分析(第7章),刚性转子与机构的平衡设计(第8章),机械系统(包括轮系)效率的计算方法及效率与自锁的关系(第9章)。书后附有机机构运动与动力分析程序简介及机械原理名词术语中英文对照。

本书可作为高等院校机械类各专业的教学用书及工程技术人员和非机械类学生的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械原理 / 韩建友, 邱丽芳主编. —北京: 高等教育出版社, 2011. 6

ISBN 978-7-04-032671-0

I. ①机… II. ①韩…②邱… 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 (2011) 第 113055 号

策划编辑 庚欣

插图绘制 尹莉

责任编辑 庚欣

责任校对 刘春萍

封面设计 于文燕

责任印制 刘思涵

版式设计 范晓红

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市西城区德外大街4号

邮政编码 100120

印刷 北京明月印务有限责任公司

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 18.25

字数 440千字

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landaco.com>

<http://www.landaco.com.cn>

版次 2011年6月第1版

印次 2011年6月第1次印刷

定价 26.90元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 32671-00

# 前言

---

为提高机械原理课程的教学质量,了解国外优秀机械原理教材的教学体系,掌握其教学内容,采用双语教学是实现这一目标的重要途径之一。本书编者多年来一直采用改编自美国 Robert Norton 所著《An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines》的英文教材<sup>[1]</sup>,成功地进行多种形式的双语教学。本书在体系和内容上是以此英文改编教材为基础,作了部分的精简和修改,并根据我国机械原理课程教学基本要求补充了一些经典内容。

多年的机械原理课程教学使我们体会到,国外机械原理的课程体系、教学内容的讲授方法、经典内容的引入方法以及内容的繁简程度等与我国有很大不同。学习实践告诉我们,多一个看问题的角度与方法对深入理解问题并产生创造性思维是大有益处的,因此引入并探索一个适合我国教学的新体系是编写本书的目的之一。多年双语教学的经验使我们体会到,为提高双语教学的效果,满足不同层次的需求,一本与英文教材内容相同或相近的中文教材作为辅助是十分必要的,这是编写本书的另一目的。为了实现上述目标,本书尽可能保留英文改编教材的内容体系,在中文表达上尽可能与英文改编版一致,使读者在学习机械原理知识的同时,还能掌握英语表达的方式习惯,从而提高阅读和撰写英语科技论文的能力。

本书所采用的新教学体系和内容使读者了解到在美国和世界其他一些国家比较广泛应用的机械原理课程教学方法,其具有讲授的灵活性,有时甚至是随意性,这与我国有很大不同,对培养开放式创新思维能力提供了一个可供借鉴的新模式。本书还可使读者了解到机械理论方面的最新成果。

本书后附机械原理名词术语中英文对照,按章排列,便于查询。本书中带“\*”的内容可供有兴趣的读者自学,也可根据教学需要适当选取。全部内容需要50~60的课堂讲授学时。

本书第1章至第5章及附录由韩建友编写,第6章至第9章由邱丽芳编写。博士研究生尹来容、杨通在书稿的文字录入与图形的绘制与处理中做了大量工作,在此表示诚挚的谢意。

北京理工大学张春林教授对书稿进行了全面细致的审阅,提出了很多有益的修改意见,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平所限,书中错漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

韩建友

2010年10月于北京科技大学

# 英文缩写表

---

|      |                                                  |               |
|------|--------------------------------------------------|---------------|
| FEM  | —finite element method 有限元法                      | ..... (第 1 章) |
| DOF  | —degree of freedom 自由度                           | ..... (第 2 章) |
| BR   | —bearing ratio 支撑比                               | ..... (第 2 章) |
| GCS  | —global coordinate system 全局坐标系                  | ..... (第 4 章) |
| LNCS | —local nonrotating coordinate system 局部非旋转坐标系    | ..... (第 4 章) |
| LRCS | —local rotating coordinate system 局部旋转坐标系        | ..... (第 4 章) |
| IC   | —instant center 瞬心                               | ..... (第 4 章) |
| CG   | —center of gravity 重心                            | ..... (第 4 章) |
| CEP  | —critical extreme position 精确极位                  | ..... (第 5 章) |
| CPM  | —critical path motion 精确路径运动                     | ..... (第 5 章) |
| RF   | —rise—fall 升—回                                   | ..... (第 5 章) |
| RFD  | —rise—fall—dwell 升—回—停                           | ..... (第 5 章) |
| RDFD | —rise—dwell—fall—dwell 升—停—回—停                   | ..... (第 5 章) |
| BC   | —boundary condition 边界条件                         | ..... (第 5 章) |
| SHM  | —simple harmonic motion 简谐运动                     | ..... (第 5 章) |
| SCCA | —sine, constant, cosine acceleration 正弦、常数、余弦加速度 | ..... (第 5 章) |

# 目录

---

|                               |    |                              |     |
|-------------------------------|----|------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....         | 1  | 2.13.2 其他机构 .....            | 41  |
| 1.1 运动学和动力学 .....             | 2  | 2.13.3 组合机构 .....            | 45  |
| 1.2 机构和机器 .....               | 2  | <b>第 3 章 连杆机构综合</b> .....    | 47  |
| 1.3 设计过程 .....                | 3  | 3.1 引言 .....                 | 48  |
| 1.4 用于设计的其他方法 .....           | 8  | 3.2 型综合 .....                | 48  |
| 1.5 多解 .....                  | 8  | 3.3 函数、轨迹和运动生成 .....         | 49  |
| 1.6 人机工程学 .....               | 9  | 3.4 极限位置状态 .....             | 50  |
| 1.7 工程报告 .....                | 9  | 3.5 尺寸综合 .....               | 52  |
| 1.8 本课程的内容 .....              | 10 | 3.5.1 图解法 .....              | 52  |
| <b>第 2 章 机构基础知识概述</b> .....   | 11 | 3.5.2 解析法* .....             | 62  |
| 2.1 自由度 .....                 | 12 | 3.6 急回机构 .....               | 72  |
| 2.2 运动的类型 .....               | 12 | 3.7 连杆曲线 .....               | 78  |
| 2.3 构件、运动副和运动链 .....          | 13 | <b>第 4 章 连杆机构的运动分析</b> ..... | 81  |
| 2.4 自由度的确定 .....              | 17 | 4.1 引言 .....                 | 82  |
| 2.4.1 平面机构的自由度 .....          | 18 | 4.2 坐标系 .....                | 82  |
| 2.4.2 空间机构的自由度 .....          | 20 | 4.3 点的位置 .....               | 83  |
| 2.5 机构和结构 .....               | 20 | 4.4 速度分析 .....               | 83  |
| 2.6 反例 .....                  | 21 | 4.4.1 速度的瞬心 .....            | 85  |
| 2.7 连杆机构变换 .....              | 23 | 4.4.2 用瞬心进行速度分析 .....        | 90  |
| 2.8 机架变换 .....                | 25 | 4.4.3 滑动速度 .....             | 97  |
| 2.9 Grashof 条件 .....          | 27 | 4.5 加速度分析 .....              | 99  |
| 2.10 实际设计中需要考虑的<br>问题 .....   | 29 | 4.6 机构运动分析的解析法 .....         | 102 |
| 2.11 平面连杆机构的构成——<br>杆组法 ..... | 34 | 4.6.1 矢量环法 .....             | 103 |
| 2.12 平面连杆机构的构成分析 .....        | 37 | 4.6.2 杆组法 .....              | 110 |
| 2.13 常用机构简介 .....             | 39 | 4.6.3 杆组法分析建模示例 .....        | 115 |
| 2.13.1 间歇运动机构 .....           | 39 | <b>第 5 章 凸轮机构设计</b> .....    | 117 |
|                               |    | 5.1 引言 .....                 | 118 |
|                               |    | 5.2 凸轮机构术语 .....             | 119 |

|                                  |     |                                   |     |
|----------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 5.2.1 从动件运动的形式 .....             | 120 | 可变性 .....                         | 165 |
| 5.2.2 运动副的封闭形式 .....             | 120 | 6.3.4 间隙 .....                    | 166 |
| 5.2.3 从动件的形式 .....               | 120 | 6.4 渐开线标准直齿圆柱齿轮 .....             | 166 |
| 5.2.4 凸轮的形式 .....                | 122 | 6.4.1 齿轮轮齿的基本术语和<br>符号 .....      | 166 |
| 5.2.5 运动约束的形式 .....              | 123 | 6.4.2 基本参数 .....                  | 167 |
| 5.2.6 运动进程的形式 .....              | 123 | 6.4.3 标准齿轮的几何尺寸 .....             | 168 |
| 5.3 svaj 运动线图 .....              | 123 | 6.4.4 美国标准齿轮介绍* .....             | 168 |
| 5.4 双停凸轮设计——svaj 函数<br>的选择 ..... | 124 | 6.5 正确啮合条件与重合度 .....              | 172 |
| 5.4.1 凸轮设计的基本定律 .....            | 126 | 6.5.1 正确啮合条件 .....                | 172 |
| 5.4.2 简谐运动 .....                 | 127 | 6.5.2 重合度 .....                   | 172 |
| 5.4.3 组合函数 .....                 | 130 | 6.6 干涉与根切 .....                   | 175 |
| 5.4.4 双停凸轮的 SCCA 函数 .....        | 134 | 6.6.1 变位圆柱齿轮传动的原理和<br>分类 .....    | 175 |
| 5.4.5 多项式函数 .....                | 141 | 6.6.2 变位齿轮传动的应用和变位系数的<br>选择 ..... | 180 |
| 5.4.6 多项式函数在双停凸轮设计中的<br>应用 ..... | 141 | 6.7 斜齿轮 .....                     | 182 |
| 5.5 单停凸轮设计——svaj 函数的<br>选择 ..... | 144 | 6.7.1 渐开线斜齿圆柱齿轮的齿面<br>形成 .....    | 182 |
| 5.6 精确路径运动 .....                 | 147 | 6.7.2 渐开线斜齿圆柱齿轮的基本<br>参数 .....    | 182 |
| 5.7 凸轮尺寸的确定——压力角和<br>曲率半径 .....  | 147 | 6.7.3 平行轴斜齿圆柱齿轮传动 .....           | 186 |
| 5.7.1 压力角——滚子从动件 .....           | 148 | 6.8 齿轮类型 .....                    | 186 |
| 5.7.2 初始圆半径的选择 .....             | 151 | 6.8.1 直齿轮、斜齿轮和人字齿轮 .....          | 187 |
| 5.7.3 倾翻力矩——平底从动件 .....          | 152 | 6.8.2 蜗杆和蜗轮 .....                 | 188 |
| 5.7.4 曲率半径——滚子从动件 .....          | 152 | 6.8.3 齿条和齿轮 .....                 | 188 |
| 5.7.5 曲率半径——直动平底从<br>动件 .....    | 156 | 6.8.4 锥齿轮和准双曲面齿轮 .....            | 189 |
| 第 6 章 齿轮系 .....                  | 161 | 6.8.5 非圆齿轮 .....                  | 190 |
| 6.1 引言 .....                     | 162 | 6.9 轮系 .....                      | 190 |
| 6.2 摩擦传动 .....                   | 162 | 6.9.1 轮系的分类 .....                 | 190 |
| 6.3 齿轮啮合的基本定律 .....              | 162 | 6.9.2 轮系传动比计算 .....               | 192 |
| 6.3.1 渐开线齿形 .....                | 163 | 6.9.3 轮系的应用 .....                 | 199 |
| 6.3.2 渐开线齿轮啮合传动 .....            | 164 | 6.9.4 轮系的设计 .....                 | 202 |
| 6.3.3 渐开线齿轮传动中心距的                |     | 6.10 轮系应用实例简介 .....               | 204 |

|                                   |     |                                |     |
|-----------------------------------|-----|--------------------------------|-----|
| 6.10.1 回归复合轮系变速箱 .....            | 204 | 8.2.1 图解法 .....                | 239 |
| 6.10.2 行星轮系变速箱 .....              | 205 | 8.2.2 解析法 .....                | 240 |
| 6.10.3 差速器 .....                  | 207 | 8.3 动平衡 .....                  | 241 |
| <b>第7章 动力分析</b> .....             | 211 | 8.3.1 图解法 .....                | 242 |
| 7.1 引言 .....                      | 212 | 8.3.2 解析法 .....                | 242 |
| 7.2 牛顿求解方法 .....                  | 213 | 8.4 连杆机构的平衡 .....              | 246 |
| 7.3 纯转动件 .....                    | 213 | 8.4.1 质量代换法 .....              | 246 |
| 7.4 四杆机构的力分析 .....                | 215 | 8.4.2 连杆机构惯性力的完全平衡 .....       | 247 |
| 7.5 四杆曲柄滑块机构的力分析 .....            | 220 | 8.4.3 机构惯性力的部分平衡法 .....        | 249 |
| 7.6 连杆机构力分析的能量方法 .....            | 222 | 8.5 平衡对振动力和铰链力的影响 .....        | 250 |
| 7.7 机械系统等效动力学模型及运动方程式的建立与求解 ..... | 223 | 8.6 平衡对输入扭矩的影响 .....           | 251 |
| 7.7.1 等效动力学模型 .....               | 224 | 8.7 不平衡量的测量与校正 .....           | 252 |
| 7.7.2 机械运动方程式的建立 .....            | 225 | 8.7.1 静平衡 .....                | 252 |
| 7.7.3 机械运动方程式的求解 .....            | 226 | 8.7.2 动平衡 .....                | 253 |
| 7.8 机械系统功率平衡的动力学设计 .....          | 227 | 8.7.3 转子的许用不平衡量和平衡品质 .....     | 254 |
| 7.8.1 非周期性速度波动及其调节 .....          | 227 | <b>第9章 机械系统的效率</b> .....       | 257 |
| 7.8.2 周期性速度波动及其调节 .....           | 228 | 9.1 机械系统的效率的计算 .....           | 258 |
| 7.8.3 飞轮设计 .....                  | 231 | 9.2 轮系的效率 .....                | 260 |
| 7.9 实际设计需要考虑的问题 .....             | 234 | 9.3 机械效率和自锁 .....              | 263 |
| <b>第8章 平衡</b> .....               | 237 | 9.4 提高机械效率的途径 .....            | 266 |
| 8.1 引言 .....                      | 238 | <b>附录一 机构运动与动力分析程序简介</b> ..... | 267 |
| 8.1.1 机械平衡的目的 .....               | 238 | <b>附录二 机械原理名词术语中英文对照</b> ..... | 276 |
| 8.1.2 机械平衡的分类 .....               | 238 | <b>参考文献</b> .....              | 281 |
| 8.2 静平衡 .....                     | 239 |                                |     |

# 第 1 章

## 绪论

---

在绝大多数的中文机械原理教材中,本章主要介绍研究对象、研究内容及研究方法,有关这部分内容中外教材差别不大,仅仅是叙述方法不同而已。通常的研究对象大体上是机器和机构。研究内容主要是运动学与动力学,而运动学与动力学的内容是伴随着机构的分析与综合的内容而出现的。有关这两部分内容本书不详细介绍,有兴趣的读者可参阅相关书籍。对于研究方法的介绍,国内外的教材差别很大。本书把参考文献[1]第一章中的设计过程和方法部分进行重新编写作为第一章。目的除前言中所述要达到的两个目标外,还详细阐述了设计过程,这在同类中文教材中是很难见到的。如此详细阐述一个产品从构思到设计完成整个过程所应经历的必要阶段,这对任何产品的设计都具有指导意义。

## 1.1 运动学和动力学

**运动学:**研究在不考虑力作用下的运动。

**动力学:**研究作用在运动系统上的力。

这两个概念实际上是不可分割的,而人们之所以把它们分开,是出于工程教育中的教学原因。在工程设计实践中,正确处理问题的方法是先从运动学上考虑所要求的运动及其结果,然后才从动力学方面研究与该运动相关的力。学生亦能认识到划分为运动学和动力学是很随意的,主要是为了方便。若不通过考虑这两方面的问题,多数动态机械系统是不可能设计出来的。在实际设计中,通常也是先进行运动分析,然后进行动力学分析。例如,根据牛顿第二定律  $F = ma$ ,当已知系统运动的质量( $m$ ),为了计算出力( $F$ ),通常需要知道加速度( $a$ )。还有许多其他情况,如在已知力的作用下,求出所产生的总加速度。

运动学的一个主要目标是设计(创造)各运动构件的运动参数,包括位移、速度和加速度。对于地面上的多数机械系统,由于质量对时间基本上保持常数,若已知加速度是时间的函数,则动态力亦应是时间的函数。依此,应力是作用力和惯性力( $ma$ )两者的函数。由于工程设计所担负的任务是创造出一个在期望服务寿命内不失效的系统,因此在一定的工作环境下,要求应力保持在材料的极限应力范围内。显而易见,这也就要求确定作用在整个系统上的力,并应保持在所要求的极限范围内。运动的机械中,所遇到的最大力往往是由机器自身所产生的动态力。这类力与加速度成正比,确定加速度又回到了运动学领域,运动学是机械设计的基础。在设计过程中,前期的运动学设计对机械设计的成败起到至关重要的作用。一项运动学问题考虑不成熟的设计将是一次失败的设计。

## 1.2 机构和机器

机构是一种将运动变换为某种所要求的形式,而产生非常小的力和传递很小的功率的装置。机器除包含机构的特征外,通常还可以产生有效的力和传递有效的功率。常见的机构例子有削铅笔器、照相机快门、机械钟、折叠椅、可调台灯和雨伞骨架等。类似于上述机构,具有运动特征的机器例子有食物搅拌器、银行拱顶门、汽车变速器、推土机、机器人和公园的木马车等。机构与机器之间没有明显的划分界线,它们的差异只是在程度上而不是在种类上。如果在一个装置中力或能量级别很重要,则应把它看做机器,否则就可认为是机构。一个实用的机构定义是:机构是按预定形式传递运动的构件组合系统。将这一定义只要在“运动”后面添上“和能量”一词,便变成了机器的定义。

一个机构如果是轻载低速运行,严格来说,可以把它看做一个运动装置,也就是说,对它只需要进行运动学分析而不需要考虑力。另外,机器(和高速运行中的机构)必须首先把它看做机构,进行速度和加速度的运动学分析,然后按照动力学分析理论确定作用在机器上的静力和由加速度产生的动态力。本书主要讨论机构运动学和机械动力学的内容。运动学部分所讲的机构综合方法既可用于机构设计也可用于机器设计,因为不论哪一种情况,都需要把可动的构件创造出一个能达到(或控制)要求的运动和几何条件的装置。

### 1.3 设计过程

**设计、发明与创造** 这几个都是人们熟悉的术语。但对不同的人又有不同的含义。这几个术语也包括很宽的行业范围,从符合时代潮流设计最新款式服装到创作令人难以忘怀的建筑物,直至画出图样制造机器。这里所指的“工程设计”既包括上述三个行业也可以包括许多其他行业。“design”一词是拉丁语“designare”的派生词,其意思是“指明或策划”。Webster 给出了几个定义,其中最可用的是“以画草图、曲线或做计划作为活动或工作……去构想、发明-创新”。工程设计可定义为“……为了把一个装置、工艺或系统制定得十分详细以至可以参照实施的目的,各种技术和科学原理的利用过程。……设计可以是简单的或非常复杂的、容易的或很难的、粗糙的或精确的,它可以是一个无关紧要的问题也可以是一个极其重要的问题”。设计是工程实践的一个普遍的组成要素。但是,工程问题的复杂性常常要求给学生提供一堆结构化、事先精心设置好的问题来阐述特定的概念或与特定问题有关的概念。这些教科书中的问题通常所采取的形式是“已知  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$ ,求  $E$ ”。然而,实际工程问题几乎都不是这种结构化的问题。实际设计问题更通常采取的形式是“需要一个装置,用此移动装置能在规定的时间内把该种小产品装入孔内”。新毕业的工科学生要想从教科书中寻找解决这一问题的指导是徒劳的,这类非结构化问题的提法通常导致所谓的“空白纸综合症”。工程师们常常会发现他们自己在凝视一张白纸,同时在考虑如何开始解决这类不清楚的问题。

许多工程教育所涉及的是分析主题,分析意指分解、拆开,使其分解到它的组成部分,这是十分必要的。一名工程师必须懂得如何分析机械、电子、热力或流体等的各类系统。通过分析,要求完全弄清实现该系统功能适用的数学方法和基本的物理理论。但是,在进行任何一种系统的分析之前,该系统必须是存在的,一张白纸并不提供任何可分析的内容。因此,任何工程设计训练的第一步就是进行系统的综合分析。

实际上,不论是哪类学科的设计工程师都会不断地面临把非结构化问题变为结构化问题的挑战,因为他所面临的问题不可避免地是不清楚和不完全的。在进行任何一种分析之前,必须先利用工程方法仔细地定义设计问题,以确保求出的结果都是该设计问题的解。实际中有这样的一些例子,虽然存在一些好的解,但由于求解的是错误问题(与委托人提出的问题有区别)而被弃用。

一些人专心致力于确定“设计过程”的研究,想为非结构式问题结构化提出方法并得出其可行的解。在这类研究中,有一些人把设计过程归纳为几步或很多步,但根据工程设计实践的成功经验,一个设计过程至少应包含 10 步,见表 1-1。

表 1-1 设计过程

|           |          |
|-----------|----------|
| 1. 需求识别   | 6. 分析    |
| 2. 背景调查   | 7. 选择    |
| 3. 目标陈述   | 8. 详细设计  |
| 4. 性能技术条件 | 9. 样机与试验 |
| 5. 构思与发明  | 10. 生产   |

**反复** 在详细讨论每个设计步骤之前,必须指出的一点是,从第一步一直做到第十步,每一次的设计过程都不是按部就班地进行,更确切地说,设计从本质上说是一个反复的过程,而且每一次反复都有所前进和提高。反复意味着重复,返回前一步。例如,如果对某个重大构思经过分析,结果证明是违背热力学第二定律的,则需返回形成概念那一步,以获得一个更好的构思。例如,如有必要则返回到设计过程的最初几步,甚至返回背景调查,认识问题的更多方面。以设计过程的实际实施包括反复为前提,下面简要地讨论表 1-1 中所列的每一个设计步骤。

**需求识别** 需求识别是设计师根据主管或委托人说的“我们需求什么……”所要做的第一步工作。由于需求的提法往往是简短而不详细的,而且提供的是非常不具体的一种问题提法,例如,“我们需求一台较好的割草机”。

**背景调查** 背景调查是设计过程中很重要的一个阶段,但遗憾的是经常被忽视。设计过程中的调查,不应该像穿白外套的科学家凭想象在试管内搅拌配制品那样,更确切地说,应该是对设计问题进行调查研究,收集与该问题有关的物理、化学或其他方面的背景信息。如果该类问题(或相类似问题)已经解决,则应把它找出来,不要盲目地再去重新发明什么自行车。如果很幸运地在市面上找到了一个现成的求解结果,则应把它购买进来,总要比自己设计经济一些。最有可能的是那些东西和你设计的不同,但是通过调查研究现存的有关相似技术和产品的“技艺”,可以学到很多与要求解问题有关的东西。

**目标陈述** 一旦完全明了原先表述的设计问题的背景,就应该把设计问题改写为更明晰的目标陈述。对一个新设计问题,目标陈述应有三个特征:一般应是简明的;应该不经任何措辞修饰,并对其问题有一个预定的解;应该根据它的功能给出形象化描述(即使它的功能更具体化)。例如,原先对需求说的是“设计一台较好的割草机”,在调查过许多种割草方法并经过仔细研究之后,一位聪明的设计师会重述目标为“设计一种把草剪短的工具”。这一新的目标陈述已经从有特色词“割草机”到有固定范围的一个具体要求。对许多人来说,这个阶段也可能想象出多种东西,如飞旋的刀片、有噪声的发动机等。为使构思阶段取得最大成功,应避免这类想象,而应把问题的陈述概括得简练和清晰。作为一次练习,读者不妨列出十种剪短草的方法,更多的就不必要了,因为你已经要对十种较好的割草机进行设计。可以利用功能形象化以避免对创造性的不必要的限制。

**性能技术条件** 当设计问题的背景已详尽调查,设计目标已经陈述清楚,接着就应该准备建立一组性能技术条件。应该注意的是,性能技术条件不是设计技术条件,区别在于,性能技术条件定义系统必须做什么,而设计技术条件是定义必须如何把它做出来。在设计过程这个阶段中,想要规定出如何完成目标是不明智的,因为这还属于表 1-1 中的构思阶段。性能技术条件的目的是仔细定义与约束设计问题,使它既能求解而事实上又能把它解出来。有关“剪草机”的一组性能技术条件见表 1-2。

表 1-2 剪草机的性能技术条件

|                        |                           |
|------------------------|---------------------------|
| 1. 机器自带动力供给系统          | 4. 离机器 50 英尺的声音强度小于 80 dB |
| 2. 机器要求防锈              | 5. 机器每小时剪短草 1/4 英亩        |
| 3. 机器的成本要求低于 10 000 美元 | 6. 等等                     |

需要指出,这类约束设计问题的技术条件不应该过分地限制工程师的设计自由。例如,对技术条件 1 规定要求用汽油发动机是不适宜的,因为还有其他可选用的动力装置,而且都能提供所要求的运动。同样,对技术条件 2 规定所有零件采用不锈钢也是不明智的,因为防锈亦可以采用其他廉价的材料。简言之,性能技术条件确定的设计问题,应尽可能地以完整、全面、普通的样式定义设计问题,并且可以起到契约的作用。最终的设计可以根据技术条件进行验收。

**构思与发明** 这一步既充满兴趣又有挫折。这一设计阶段最能证明工程师的潜在能力,但也是最难的一步。不少研究都曾探索过“创造性”的现象,多数认为这是人类的一个共同的特性。就所有的幼小儿童来说,亦显示出非常强的创造力。人类出生最初几年的创造力发展速度与程度当然要求有某种天性。有些人认为,传统的教育方法由于鼓励统一性和限制个性而抑制儿童自然的创造力。从幼儿园小班的“线内着色”到大班的按教材模仿写字都会抑制个性的发展,但却有利于融合社会。这对避免无政府状态或许是必需的,但有可能影响每个人的思想创造的能力。有一些论点认为,创造力是可以教会的,也有一些人只认为创造力是遗传的,无论哪一种说法都没有根据,其实一个人抑制或丧失的创造力是可以重新唤起的。另一些研究提出,几乎每个人都可以利用人们的潜在创造力,而每个人都可以通过多种方法来提高创造力。

**创新过程** 已研究出有许多种方法可以提高或激发设计问题的创新性求解。事实上,正如已经确定设计过程那样,也可以确定创新过程,见表 1-3。可以把这个过程看做设计过程的一个子过程,也可以把它放在设计过程的各个阶段中。这样,构思与发明步骤也可以放在这四个分步骤中。

表 1-3 创新过程

|         |         |
|---------|---------|
| 1. 概念产生 | 3. 酝酿   |
| 2. 挫折   | 4. 创意产生 |

**概念产生** 这一步是最困难的,甚至于连非常善于创新的人在按“需求”进行创新时也会遇到困难。目前,已经提出许多种方法可以增进一个概念的产生,其中最重要的是延缓评判,意指暂时不评判,在此阶段不评判所产生概念的质量,而把它放在更后的分析阶段谨慎地进行。这一步的目的是尽可能多地获得设计方案,甚至欢迎那种肤浅的、荒谬的想法,因为由此常可以引发新的见识,并提出另一些更现实的方案。

**集体自由讨论** 这是一种获得创新设计解成功的方法。这种方法要求成立一个由 6~15 人组成的小组,并尽力防止对创新的最大障碍的发生,如“怕”被嘲笑,即在一个组内的多数人因怕被别人笑话而不想提出对该项设计的真实想法。集体自由讨论的规则要求不允许有人开玩笑和批评别人的提议,即使是荒谬的也无所谓。每个参加者充当“抄写员”并履行记录全部提议(哪怕表面看是非常可笑的)的职责。只要合适地去做,这种方法是非常有趣的,并且由于互相启发有时可能造成想法“供给风暴”,在短时间内便有大量的想法产生。但对质量的评判只能推迟到后期进行。

当单独工作时,必须采用其他方法,常用的是类比与反演。类比是把现有问题与其他物理环境问题作类比,如一个机械问题可以把它转化为流体或电子问题。反演是把设计问题由里向外,例如考虑用什么方法可将运动的物体变为静止或者相反,这一点在后面可以看到。另一种有助于创新的有效技巧是同义词的应用,即先找出问题陈述中定义动作的动词,然后尽可能多地列出

该动词的同义词。

例如,问题陈述:将此物体从A点移动到B点。

动作的动词是“移动”,其同义词有推、拉、滑、挤、抛、射、喷射、跳跃等。

不论采用何种技巧与方法,构思这个步骤的目的是产生大量不具体涉及其性质的想法。在某些时候,要做到让“智力源泉”枯竭为止。在创新过程中,要是达到了这种程度就称之为挫折。这时,可以暂时把问题放下先去做其他事。当意识智力专注于其他有意义的事时,亚意识智力还在考虑这个设计问题,这一步就是所谓酝酿,在一个十分意外的时间和地点,一个想法突然出现在意识中,并且好像是显而易见和正确地解出了问题。当这些解经后续的分析发现有一些缺陷时,则须倒退和反复。或许必须更深入地调查研究,甚至可能需要重新确定问题。

在“激发人类创造性”的论文中,Wallen对创造力的三个必要条件或阶段描述为:

- 对问题产生兴趣;
- 对问题的实情、技术、资料和背景深入分析;
- 对问题重新组织。

在这几个要求中首要的是对解决问题的动力,其次是前面说过的背景调查。改组时期是指挫折阶段(这时亚意识还在考虑这个问题)。Wallen的论文指出,创造者的陈述告诉我们,在这个改组时期,他们都不考虑那个具体问题,顿悟瞬时常常出现在放松或睡眠期间。因此,为了提高创造力,应沉浸于问题及其背景材料里面,然后放松让你的亚意识努力工作。

**分析** 一旦进入设计过程的分析阶段,至少暂时已有了一个选定的设计方案,并立刻可以采用最现代的分析方法(其中有些方法将在后面的几章中详细讨论),以考查该方案的技术特性。当经分析发现问题时,为确保设计成功,重复设计过程的前面几步是必要的。

**选择** 当通过技术分析表明有几个可选用的设计方案时,一种最通用的办法是通过详细设计、样机与试验做出选择。选择过程也包括几个可选用设计方案的分析与结果的比较。当考虑多因素进行选择时,用分类方法中的决策矩阵可以选出最好的方案。表1-4为一种较好的剪草机的决策矩阵,每一个设计方案在矩阵中占一行,各列为待选设计方案的各项指标,如成本、使用简易性、效率、性能、可靠性和其他的适当指标。然后对每一项指标规定一个权重因子,以度量它的相对重要程度。例如,对用户来说,可靠性要比成本是一个更为重要的判据,反之亦然。再用一个能反应每项指标好坏级别的数(如用1到10)填在矩阵表内,注意,这基本上是对设计指标的一种主观的定级。最后,须根据每个设计的得分多少来考查设计方案并做出决策。每项指标所定的级乘以权因子(权因子的选择通常是使其和为一个方便的数,如等于1)的总和即为该设计的得分。在使用这类结果时必须小心谨慎,因为原始资料、指标的定级以及权因子的选择都具有主观性。相信这些结果比进行论证更有诱惑力。毕竟看到这类资料让人印象深刻。至于把这类数取到小数点后几位是完全没有必要的。决策矩阵的实际值把问题变成更容易处理的资料,且强迫设计者认真考虑每个设计各项指标的相对值,直至可以做出一个更合理的决策以获得“最好”的设计。

**详细设计** 这一步通常包括完成装配图和整套零件图的设计或计算机辅助设计(CAD)的各个零件的文件。在每张零件图上必须标注出全部尺寸、所用材料的性质。根据这些图样(或CAD文件)便可以设计出试验用的样机或试验模型。当在试验中发现一些缺陷时,需要进一步反复修正。

表 1-4 决策矩阵

| 项<br>权 因 子<br>方案 | 成本        | 安全性       | 性能        | 可靠性       | 得分  |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|
|                  | 0.35      | 0.30      | 0.15      | 0.20      | 1.0 |
| 设计 1             | 3<br>1.05 | 6<br>1.80 | 4<br>0.60 | 9<br>1.80 | 5.3 |
| 设计 2             | 4<br>1.40 | 2<br>0.60 | 7<br>1.05 | 2<br>0.40 | 3.5 |
| 设计 3             | 1<br>0.35 | 9<br>2.70 | 4<br>0.60 | 5<br>1.00 | 4.7 |
| 设计 4             | 9<br>3.15 | 1<br>0.30 | 6<br>0.90 | 7<br>1.40 | 5.8 |
| 设计 5             | 7<br>2.45 | 4<br>1.20 | 2<br>0.30 | 6<br>1.20 | 5.2 |

**样机与试验——模型** 任何一项设计直到把它制造出来和在试验之前基本上都不能保证设计的正确性或可行性。基于这个原因,通常要求做样机的实物模型。数学模型虽然很有用,但由于需要简化和假设,总不能像物理模型那样完全正确地表征实际的系统。样机通常是非常昂贵的,但比按原尺寸制作一台装置来检验设计还是要经济得多。样机可以有多种形式,从按比例尺寸的模型到原尺寸的模型,但是都要经过简化,样机只是设计概念的一种表示。比例模型是按照产品的复杂性将实际参数适当地缩小。例如,材料的体积按长度尺寸的立方变化,面积按平方变化,散发到周围环境的热量可以取与表面面积成比例,而热量的产生与容积成比例。线性化缩放一个系统都可能导致与原尺寸系统性能上的差别。因此,按一定比例制作物理模型时必须小心谨慎。在设计连杆机构时,可以用图钉把按所选择长度做的硬纸板连接起来作为一个简单的模型,便可以从中获得大量的机构运动的特征和性能。作为一名设计师,应该习惯于制作这种简单连接的模型进行所设计的连杆机构的研究。

**试验** 样机或模型的试验是把机器完全开动起来,并观察其功能,与广泛的测试设备连接可以精确地测量出位移、速度、加速度、力、温度及其他参数。试验也可以要求把温度和湿度控制在一定的环境下进行。用微机还可以获得比以前所做的更多的精确、廉价的测量资料。

**生产** 通过足够多的时间和资金上的投入,以及坚持不懈的努力,终于准备好投产了。生产可以是最终设计方案的单件制造,但也有可能是新产品上千甚至上亿件的批量生产。当在制造中出现大量的次品时,说明设计存在缺陷,这将使设计者难堪并造成浪费。由此进一步得到启发,对设计过程中的前面几个步骤应特别仔细,以保证设计产品的质量。

工程方法是一种完全、精细、考虑全面的方法。看起来,强调“精细”与鼓励开明的特质、无约束的创造性思维似乎有矛盾,其实不然,两项活动不仅兼容而且可以共存。若仅有一个创造性

的原始思想而没有或不能把它付诸实施,并简化到可实际应用的程度,那么它基本上是没用的。要做到这一点,每一位设计师都必须培养自己注意问题实质的能力,并不厌其烦地做好设计过程中每个阶段必须做好的琐碎工作。例如,要把一项设计当做与自己声誉有关的事情去做,必须全面地定义设计问题,如果漏掉定义中的某些细节,则最终将导致去求解一个错误的问题,因此,设计师必须仔细研究设计问题的有关背景材料,周密考虑问题的正确概念解,然后必须对正确概念解做出详细的分析,最后还必须把所选用的解进行详细设计,直到最小的螺母与螺栓都已确信能正常工作。要想把自己培养成为一名工程师或设计师,就必须约束自己做事要彻底,并养成一套符合逻辑、有序的工作方法,甚至在思考重大的创造性想法和反复求解时也能如此。创新性和注意细节是工程设计获得成功所必需的两个特征。

## 1.4 用于设计的其他方法

近年来,为了更好地理解设计方法学和设计过程,已进行了许多卓有成效的研究。设计方法学就是对设计过程进行研究,其中目的之一是把设计过程细化到能在计算机上用“人工智能”的方法直接译成可控制的执行编码。

Dixon 把设计定义为一种信息的处理。这种信息可以是文字、图形、电子资料和(或)其他几种形式中的一种,可以是部分或是全部,其范围可以从设计过程初期阶段少量的高度抽象信息到过程后期足以完成制造所需的大量细节信息,可以包括与尺寸和形状、功能、材料、制造厂、仿真性能、制造过程、公差以及不限于此的一些有关信息。当然,有关实物和经济方面的信息亦是该项设计的一个部分。

Dixon 接着描述了一些一般化的信息状态,如需求状态,与性能技术条件相类似。把有关物理概念的信息都归属于概念的信息状态,而与我们的构思相类似。他的特征构型和参数的信息状态,在概念上类似于我们的详细设计。然后,他把设计过程定义为设计过程的一系列活动就是设计对象的信息从一种信息状态变化到另一种信息状态。

**公理设计** N·P·Suh 提出一种可用于设计的公理设计方法。在该方法中规定有四个范畴:用户范畴、功能范畴、实物范畴和过程范畴。每一个范畴都表示一个从“什么”到“如何”的范围,即从用户需求的状态到如何达到这一希望的结果的过程,用户需求是通过确定功能要求和实物的具体要求给出的。为此,他规定要求满足两个公理:

- (1) 保持功能要求的独立性。
- (2) 极小化信息量。

第一个公理是要求建立一个完全和互不相关的一组性能技术条件,第二个公理是指最好的设计应该是信息量最少(即最不复杂)的设计。第二个公理的思想早些时候称为 KISS,即“Keep it simple, stupid”(保持它简单、傻瓜)。把 Dixon 和 Suh 的方法在设计过程中实施是相当复杂的。

## 1.5 多解

设计过程的性质表明,对于任何一个设计问题,都不会只有一个正确的答案或方案,这与做教材的习题有所不同。对任何实际问题,都不可能在“书后”找到正确的答案。正是这个原因,

有不少设计师乐于去找出问题的许多可能的解,其中有些解应比另一些要好,但其中许多是可用的,有些则是不能用的。在工程设计中,都不只是“一个正确的答案”,这就使设计问题变得很有意思。确定各个设计解的相对优点的唯一方法是彻底分析,通常包括对设计对象样机的物理试验。但这是一种非常昂贵的做法,所以一般都尽可能在实际制造前在图样上或计算机上进行分析,此时应该建立所设计产品或零部件的有效数学模型。这些模型根据物理系统的形式可取多种形式。在机器和机构的设计时,通常都能写出系统的刚体动力学方程,并按“封闭形”采用(或不用)计算机求解。至于考虑机器或机构构件的弹性变形,则通常要求采用更复杂的方法进行计算,如有限差分法或有限元法(finite element method, FEM)。

## 1.6 人机工程学

除少数例外,所有设计的机器都是为人所用的,哪怕机器人也是按人所设计好的程序进行工作的。人机工程学是研究人和机器间相互关系,协调机器的实际工作条件与人的工作能力和要求的一门应用科学。设计师必须认识到这个问题,并且使所设计的机器“适应人”而不是让人去适应机器。术语“工效学”是人机工程学的同义词。人们经常可以看到汽车或家用器械的工效学如何好的这类介绍。一台机器如果设计的工效学不好,用起来就会不方便,而且容易让人疲劳甚至可能发生事故。

在文献中可以查到许多有用的人体因素的资料。这些资料可能是机器设计所需要的,它们按照人体尺寸和由年龄和性别在人群中的分布、对人体各向承受加速度的能力,不同姿态时人体所能承受的压强和能使出的力进行分类。当所设计的装置是一种由人操纵的机器(如割草机)时,就必须知道用户在不同姿势时手所能使出力的大小,对人会有什么影响,耳朵能承受多大噪声就会受到伤害。如果所设计的装置是用于运载人的,则需要知道人体所能忍受最大加速度的大小。上述几个方面的资料都可以找到。其中有些资料是靠政府的支持,通过系统地做试验获得的,如军事装备人员耐外界环境条件的能力。任何机器设计问题背景调查的一部分就是获取人体因素的有关资料。

## 1.7 工程报告

有关设计思想和结果的交流是工程设计的一个非常重要方面。许多工程实习生想象自己还像学生时那样,在专业实践中把大部分时间放在一种特性的计算上。幸运的是,工程实践中这种情况是非常少见的,也是非常令人厌烦的。实际上,每位工程师都需要花大量的时间去与其他人进行口头或书面的交流。工程师经常通过编写建议书和技术报告与同行业人和经理进行相互交流。当做完一项设计时,一般都需要把设计结果送给委托人、合作者或主管,其所采用的形式也是一种正式的工程报告。因此,对于工科学生,交流技巧的培养是非常重要的,即使是世界上最聪明的人,如果不能清晰、简要地与他人进行交流,其思想就不可能被他人知道。实际上,一位不能够将自己所做的工作表达清楚的人,很有可能是对所做的工作理解不够透彻。