



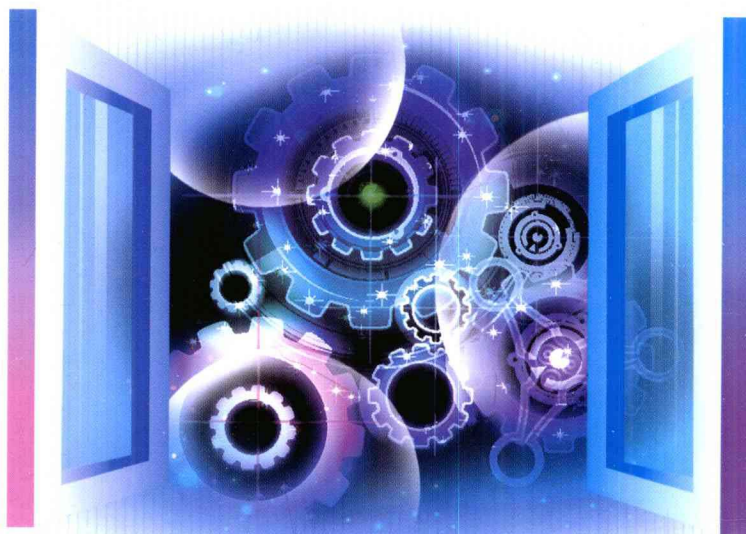
北京理工大学 **211工程**  
研究生规划教材

机  
械  
工  
程

# 高等机械设计理论

Higher mechanical  
design theory

◎ 路敦勇 王文中 编著 ◎ 张春林 主审



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

北京理工大学 211工程  
研究生规划教材

# 高等机械设计理论

Higher mechanical  
design theory

◎ 路敦勇 王文中 编著 ◎ 张春林 主审

机  
械  
工  
程

# 前 言

在全面推动研究生教育教学改革和提高研究生培养质量的背景下,自2010年起,我校研究生院启动按一级学科招生并制订培养计划的全面改革,《高等机械设计理论》是为机械工程一级学科培养研究生而设立的一门专业基础技术课。本教材是在学生已有机械设计基础理论和专业知识的基础上,结合机械制造及其自动化、机械设计及理论、机械电子工程和车辆工程四个二级学科发展前沿与现状,为进一步提高学生的创新能力和研究能力而编写的一本研究生教材。教材内容力求具有引导性、创新性、开放性和前瞻性,为提高研究生的科学创新研究能力起到抛砖引玉的作用。

本教材以设计为主线,突出系统设计核心理念,与学科发展前沿相结合,引导研究生关注机械学科的最新发展趋势和研究热点问题,从而达到提高研究生机械创新设计能力和科学研究能力的目的。教材突出特点是内容和习题与设计案例相结合,让研究生在案例中学习,从中汲取经验和智慧,培养严谨认真的科学求是态度,明白任何一个机械产品的发明和创造都不是一帆风顺的,不仅需要灵感,更需要踏踏实实的工作。目前,我国整体机械制造业水平与发达国家相比还有很大差距,希望研究生通过本课程的学习能为提高我国机械工业的水平作出自己的贡献。

本教材部分章节内容包括了北京理工大学机械设计教研室老师和编著者多年的科研积累和成果。

本教材第一章、第三章(第一节)、第八章、第九章由路敦勇博士编写,第二章、第三章(除第一节外)由孔凌嘉博士编写,第四章由赵自强博士编写,第五章、第六章由王文中博士编写,第七章由王晓力博士、路敦勇博士共同编写,本教材由路敦勇、王文中博士担任主编。由路敦勇博士负责全书内容的统稿。

本教材由北京理工大学张春林教授担任主审,张春林教授对全书内容进行了认真地审阅,针对教材体系和内容取舍提出了许多宝贵的意见,在此向张春林教授表示诚挚的敬意和衷心的感谢!

衷心感谢北京理工大学研究生院和北京理工大学出版社为本书的出版所给予的大力支持和帮助。

因时间仓促和学识上的欠缺,书中如有不妥之处,真诚地希望各位同行不吝赐教!来信请发至电子信箱 [lutony@163.com](mailto:lutony@163.com)。

编著者

# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| <b>第一章 机械系统与运动方案设计</b> ..... | 1   |
| 第一节 机械系统的构成 .....            | 1   |
| 第二节 现代机械产品的设计与开发 .....       | 11  |
| 第三节 机构运动与机构选型 .....          | 24  |
| 第四节 机械机构系统设计的基本理论与方法 .....   | 34  |
| 第五节 机械传动机构系统的构思 .....        | 46  |
| 第六节 机械系统运动方案评估 .....         | 51  |
| 习题 .....                     | 55  |
| <b>第二章 机械结构设计</b> .....      | 56  |
| 第一节 机械结构设计概述 .....           | 56  |
| 第二节 符合功能要求的结构设计 .....        | 57  |
| 第三节 符合工作能力要求的结构设计 .....      | 64  |
| 第四节 符合工艺要求的结构设计 .....        | 81  |
| 习题 .....                     | 108 |
| <b>第三章 机械疲劳强度设计</b> .....    | 110 |
| 第一节 机械系统载荷识别 .....           | 110 |
| 第二节 机械疲劳破坏与疲劳强度 .....        | 115 |
| 第三节 影响疲劳强度的因素 .....          | 123 |
| 第四节 名义应力法 .....              | 130 |
| 第五节 局部应力应变法 .....            | 137 |
| 第六节 损伤容限设计 .....             | 154 |
| 习题 .....                     | 163 |
| <b>第四章 齿轮传动设计</b> .....      | 164 |
| 第一节 齿轮系统动力学 .....            | 164 |
| 第二节 内平动齿轮传动的基本原理与设计 .....    | 179 |
| 第三节 谐波齿轮传动简介 .....           | 185 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 习题                          | 189 |
| <b>第五章 机械抗磨损设计</b>          | 191 |
| 第一节 机械抗磨损设计概述               | 191 |
| 第二节 机械零件表面性质、接触与摩擦          | 191 |
| 第三节 机械零部件的粘着磨损              | 204 |
| 第四节 机械零部件的磨粒磨损              | 212 |
| 第五节 机械零部件的接触疲劳磨损            | 216 |
| 习题                          | 222 |
| <b>第六章 润滑设计</b>             | 223 |
| 第一节 润滑力学基本方程——Reynolds 方程   | 223 |
| 第二节 润滑问题的数值求解方法             | 233 |
| 第三节 典型零件的润滑设计               | 248 |
| 习题                          | 272 |
| <b>第七章 微机械系统 (MEMS) 设计</b>  | 273 |
| 第一节 微机械系统 (MEMS) 概述         | 273 |
| 第二节 微机械系统 (MEMS) 的基础理论和关键技术 | 277 |
| 第三节 微机械系统 (MEMS) 材料和微细加工    | 284 |
| 第四节 微机械系统 (MEMS) 的封装与测试技术   | 294 |
| 第五节 微机械系统 (MEMS) 的应用与发展趋势   | 300 |
| 习题                          | 302 |
| <b>第八章 机械可靠性设计</b>          | 303 |
| 第一节 概述                      | 303 |
| 第二节 应力-强度分布干涉理论             | 304 |
| 第三节 机械强度可靠性设计               | 307 |
| 第四节 机械系统可靠性设计               | 309 |
| 习题                          | 314 |
| <b>第九章 系统工程学与人类中心系统设计</b>   | 315 |
| 第一节 系统科学与系统分析方法             | 315 |
| 第二节 软计算及其主要方法介绍             | 321 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第三节 人类中心系统分析与设计 .....  | 328 |
| 第四节 人类中心系统设计实例分析 ..... | 334 |
| 习题 .....               | 344 |
| 参考文献 .....             | 346 |

# 第一章 机械系统与运动方案设计

本章主要介绍机械、机器、机构的基本概念，并重点分析机械系统的构成及机械系统中运动方案的关键设计技术。

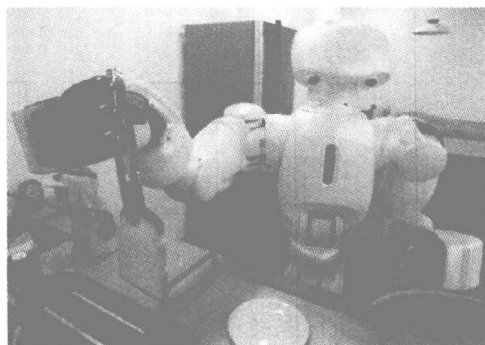
## 第一节 机械系统的构成

### 一、机械的概念

机械是伴随人类社会的不断进步和发展而完善的，从原始社会人类使用的最简单的石制工具如石斧、石刀等，到现在人类用以登陆月球或探测外太空的各类航天器以及最有高度人类智能和情感的机器人，都属于机械产品的范畴，如图 1-1 所示。



(a) 德国开发的路轨两用消防车



(b) 早稻田大学研发的智能机器人Twendy-one在夹面包

图 1-1 机械产品

机械是一个比较宽泛的概念，从广义角度看，凡是能完成一定机械运动的装置都是机械。从人们日常使用的螺丝刀、钳子等简单工具，到汽车、坦克、航天飞机等高级复杂的设备都属于机械的范畴。它们一个共性的特点就是可以实现一定的机械运动。在现代社会中，人们常把没有动力源的机械称为工具、机构或器械。

工程中常把具体的机械称为机器。机器是根据使用要求设计和制造的一种执行机械运动的装置，实现人类进行变换和传递物料、能量或信息的目的。在开发和设计机械产品时，满足人类的使用要求是设计工作的核心和立足点。只有能敏锐地反映市场和客户需求的产品，

才能在市场上有立足之地。

在机器中执行机械运动的装置称为机构，机构与机器统称为机械。

进入 21 世纪以来，随着系统科学理论的发展和成熟，常把由机械装置为主体构成的系统称为机械系统，引入系统设计的概念来研究机械产品的开发和研究，从系统角度分析其功能的实现和性能的可靠性，例如复杂的航天飞机系统和具有高度智能的机器人系统。随着现代信息技术的飞速发展，机械产品变得功能日益强大和复杂，已经不再是传统意义上的机械产品，而是更多地综合了机、电、液、光、控、智、情等多门学科的综合产品，成为人类现代文明进步程度的标志和标尺，例如数码相机和具有人类情感和智能的机器人的发明与产生。

## 二、机械系统的组成

机械系统的种类虽然繁多，但基本组成情况是相同的。机器一般由原动机、传动系统、执行系统、控制系统和其他辅助系统所组成，如图 1-2 所示。也有一些机械系统没有传动系统，直接由原动机驱动工作机，如水力发电机组中，水轮机作为原动机直接驱动发电机，但此类机械在工程应用中较少。

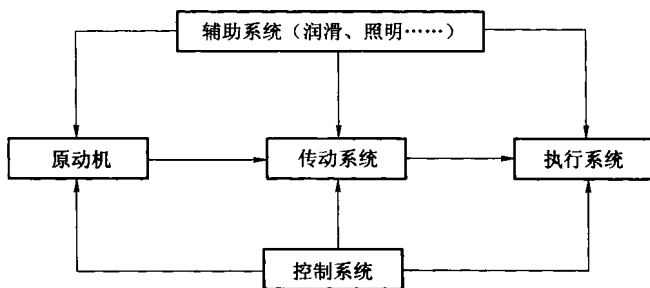


图 1-2 机械系统的基本组成

由图 1-2 机械系统的组成可以看出，原动机、传动系统和执行系统构成了机械系统的主体部分。控制系统作为机械系统的灵魂部分，在工程应用中根据实际情况，可选择对原动机、传动系统和执行系统的全部或部分来实现对机械系统的控制。控制系统性能的优劣决定了机械系统能否按人类预期的设计要求进行安全有效的工作。为提高机械产品的宜人性、安全性和可靠性，辅助装置在机械系统是不可缺少的重要组成部分。例如小轿车中的空调系统、安全气囊装置、倒车影像系统等都是为提高人们在车辆使用中的舒适性和安全性而发展起来的重要技术装置。

## 三、原动机的选择与应用

原动机是把其他形式的能量转化为机械能的装置，为机器的运转提供动力。按原动机转换能量的方式可将其分为三大类：电动机、内燃机和一次能源型原动机。

### (一) 电动机

电动机的作用是利用电磁感应原理将电能转换为机械能。电动机分为交流电动机和直流电动机两大类。交流电动机分为异步电动机和同步电动机两类。常用的异步电动机按照定子相数的不同主要有单相异步电动机和三相异步电动机，为常用的普通电动机。交流和直流伺服电动机以及步进电动机则属于控制电动机的范畴。

#### 1. 三相异步交流电动机

三相异步电动机的基本结构由定子和转子两部分组成，如图 1-3 所示。三相异步电动机工作原理是：旋转的磁场（定子）使其中的导体（转子）产生感应电动势（电流），电流处在磁场中受磁场力的作用而转动。

三相异步电动机有下列四种常用的同步转速：3 000 r/min、1 500 r/min、1 000 r/min 和 750 r/min。三相异步电动机的同步转速越高，所含极对数越少，电动机的尺寸和质量相应越小，电动机本身成本和价格相对较低。然而，同步转速高的三相异步电动机往往需要配备大传动比的减速装置，因此使得减速器结构尺寸较大，导致机械产品成本提高。因此在选择电动机时要综合考虑各种因素，选取合适同步转速的三相异步电动机。三相异步电动机常用功率为 0.75~75 kW。

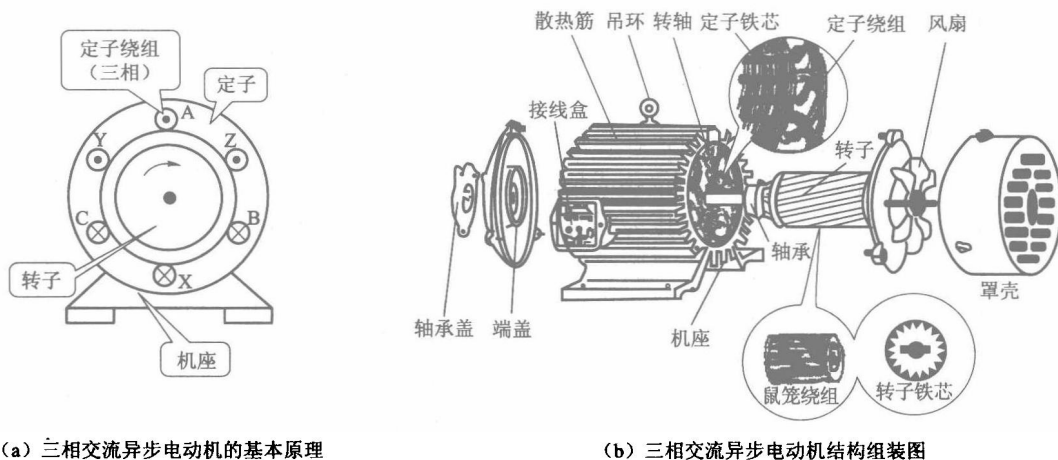


图 1-3 三相交流异步电动机原理与结构图

三相异步电动机具有结构简单、坚固耐用、运行可靠、成本低廉、维护方便等优点，广泛应用于工农业生产中，主要用于驱动金属切削机床、起重机、锻压机、物料输送机、铸造机械及功率不大的通风机和水泵等。

#### 2. 单相交流异步电动机

单相交流异步电动机能够在单相交流电上使用，结构如图 1-4 所示。与同容量三相交流异步电动机相比，单相交流异步电动机体积较大，效率较低。单相异步电动机有多种类型，

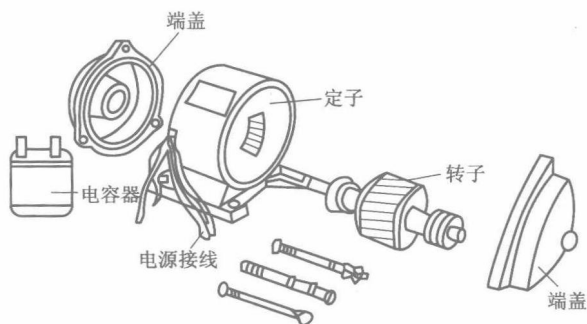


图 1-4 单相交流异步电动机原理与结构图

目前应用最多的是电容分相的单相异步电动机，主要制成小型电动机。

目前，实际工程中多为额定功率 1 kW 以下的小容量单相异步电动机，常用功率为 8~750 W。单相交流异步电动机具有结构简单，成本低廉、维修方便等特点，广泛应用在家用电器（洗衣机、电冰箱、电风扇）、电动工具（如手电钻）、医用器械、自动化仪表等产品中。

### 3. 控制电动机

控制电动机和普通电动机在工作原理上没有本质差异。普通电动机功率大，工程应用中主要侧重于电动机的启动、运行和制动等方面的性能指标；控制电动机输出功率较小，工程应用中主要侧重于电动机控制精度和响应速度等性能指标。

控制电动机按其功能和用途分为两大类：一是以动作执行为目的控制电动机；二是以信号检测与传递为目的的控制电动机。交流和直流伺服电动机以及步进电动机常用于自动化程度较高的机械产品中。

下面主要介绍第一类中的伺服电动机和步进电动机。

#### (1) 伺服电动机

伺服电动机又称为执行电动机，在自动控制系统中用作执行元件，其工作原理是把接收到的电信号转换成电动机轴上的角位移或角速度输出。伺服电动机分为直流和交流伺服电动机两大类，主要特点是：当信号电压为零时无自转现象，转速随转矩的增加而匀速下降。

传统的直流伺服电动机实质上是容量较小的普通直流电动机，有他励式和永磁式两种，结构与普通直流电动机基本相同。杯形电枢直流伺服电动机的转子由非磁性材料制成空心杯形圆筒，转子轻而使转动惯量小，响应快速。转子在由软磁材料制成的内、外定子之间旋转，气隙较大。无刷直流伺服电动机用电子换向装置代替了传统的电刷和换向器，工作更可靠。它的定子铁芯结构与普通直流电动机基本相同，嵌有多相绕组，转子用永磁材料制成。直流伺服电动机通过调节电枢电压控制转速，无自转现象。

交流伺服电动机通常都是单相异步电动机，有鼠笼形转子和杯形转子两种结构形式。与普通电机一样，交流伺服电动机也由定子和转子构成。定子上有两个绕组，即励磁绕组和控制绕组，两个绕组在空间相差 90°电角度。固定和保护定子的机座一般用硬铝或不锈钢制成。

交流伺服电动机输出功率一般在 100 W 以下。电源频率为 50 Hz 时，其电压有 36 V、100 V、220 V 和 380 V 数种。电源频率为 400 Hz 时，电压有 20 V、36 V 和 115 V 多种。

交流伺服电动机运行平稳、噪声小，控制特性为非线性，因转子电阻大使损耗增大，效率低，与同容量直流伺服电动机相比体积和质量较大。只适用于 0.5~100 W 的小功率自动控

制系统中。交流伺服电动机为正弦波控制, 转矩脉动小与直流伺服电动机相比好一些; 直流伺服电动机为梯形波控制, 与交流伺服电动机相比简单、便宜。

20 世纪 80 年代以来, 随着集成电路、电力电子技术和交流可变速驱动技术的发展, 永磁交流伺服驱动技术有了更大的发展, 各国电气厂商相继推出各自的交流伺服电动机和伺服驱动器系列产品并不断完善和更新。交流伺服系统已成为当代高性能伺服系统的主要发展方向, 使原来的直流伺服电动机面临被淘汰的危机。20 世纪 90 年代以后, 各国已经商品化的交流伺服系统多采用全数字控制的正弦波电动机伺服驱动。交流伺服驱动装置在传动领域的发展日新月异, 到目前为止, 高性能的电伺服系统大多采用永磁同步型交流伺服电动机, 控制驱动器多采用快速、准确定位的全数字位置伺服系统, 满足了工作机械、搬运机构、焊接机械人、装配机器人、电子部件、加工机械、印刷机、高速卷绕机、绕线机等产品的需要。

### (2) 步进电动机

步进电动机是一种将电脉冲转化为不连续机械运动的机电装置。当施加适当的电脉冲指令时, 电动机转子的输出轴或外转子将会以不连续的步进增量旋转。电动机旋转方向取决于施加脉冲的顺序, 旋转速度取决于施加脉冲的频率, 旋转角度或者圈数, 与施加脉冲数成正比。

步进电动机根据工作原理可分为磁阻反应式、永磁式和混合式三种基本形式。

步进电动机的主要优点有: 具有良好的可控性, 电动机旋转的角度正比于脉冲数; 当绕组激磁时电动机停转时具有最大转矩; 每步控制精度高, 不会将当前的误差积累到下一步, 有较好的位置精度和运动重复性; 具有优秀的启停和反转响应性能; 没有电刷, 可靠性高, 因此电动机的寿命仅取决于所选轴承寿命; 电动机响应仅由数字输入脉冲确定, 可以采用开环控制, 使电动机结构简单且控制成本低, 将负载直接连接到电动机的转轴上可以实现极低速的同步旋转; 由于速度正比于脉冲频率, 具有较宽的转速范围。

步进电动机的缺点主要是控制不当容易产生共振, 难以实现较高的工作转速。步进电动机最大优点是在开环系统里可以实现精确地控制。开环控制不需要转子位置方面的反馈信息。避免了使用昂贵传感器以及像光学编码器这样的反馈设备, 使控制成本降低。

### 4. 直流电动机

直流电动机是将直流电能转换成机械能的电动机, 具有如下突出优点。

第一, 调速性能好, 电动机在一定负载条件下, 可以根据需要人为地改变电动机转速。直流电动机可以在重载条件下, 实现均匀、平滑地无级调速, 调速范围宽。

第二, 启动力矩大, 可以均匀经济地实现转速调节。直流电动机这种优越的调速性能是交流电动机无法取代的。直流电动机过载能力强, 制动转矩大。因此, 在重载下启动或要求均匀调节转速的机械多用直流电动机拖动, 例如大型可逆轧钢机、卷扬机、电力机车、电车等。由于直流电动机换向困难, 会产生火花、寿命短, 需要经常维护成本较高。

总之, 在机械产品中电动机作为原动机在固定设备中应用广泛, 优势在于其体积小、绿

色环保,易于控制等特点。由于某些类型电动机转速高,需要配备专门设计的减速器来实现所需要的传动比。

## (二) 内燃机

内燃机是把热能转换为机械能的机器,常用内燃机有汽油机和柴油机,用于活动范围大的各类移动式机械中。中小型车辆中常用汽油机作为原动机;大型车辆如各类工程机械、内燃机车、装甲车辆、舰船等常用柴油机作为原动机。随着石油资源的消耗和空气污染的加剧,人们正在积极探索一些新兴替代能源,如从水中分解出氢气做燃料的燃氢发动机已处于实验阶段。

### 1. 汽车发动机技术简介

汽车整体技术日新月异,作为汽车的“心脏”——发动机技术的进步显得更受关注。如今可变气门正时技术、双顶置凸轮轴技术、缸内直喷技术、汽缸管理技术、涡轮增压技术等都已经运用得相当广泛;用料向轻量化方向发展,如全铝发动机的应用;由于汽车排放污染是不可避免的,新能源技术,包括柴油机的高压共轨、燃料电池、混合动力、纯电动、生物燃料技术已经有普及应用的趋势。

汽车技术的迅猛发展从我国汽车教材也能看出,新技术的发展已经让国内部分汽车教材落后于时代发展的步伐。如还是以东风汽车化油器式发动机作为范例,与现今全电子化的发动机技术差之甚远。

汽车发动机技术主要经历了以下几个重要发展阶段。

#### (1) 化油器式发动机

化油器式发动机是由美国人杜里埃于1892年发明的。随着技术的发展和进步,化油器功能逐渐发展完善。20世纪中后期,化油器技术趋于成熟。化油器式发动机由主供油系统、启动系统、怠速系统、大负荷加浓系统(省油器)和加速系统五部分组成。可以根据发动机不同情况下需要,将汽油气化并与空气按一定比例混合成可燃混合气及时适量地送入汽缸。

化油器式发动机优点主要有:能够将内燃机的油气比控制在理想水平,无论在何季节和温度,永远进行着一成不变的工作。化油器成本低、可靠度高,维修、保养容易。但化油器存在本身原理上不能克服的许多弱点,如在冷车启动、怠速运转、急加速或低气压等环境下,固定的供油方式不能全面满足引擎的运转需求,甚至可能产生黑烟、燃烧不全与马力不足等情况。自2002年起,我国已经明令禁止销售化油器轿车,随着时间推移,化油器式汽油发动机必将退出历史的舞台。

#### (2) 电喷发动机

两次世界大战期间,德、美两国先后研制出机械控制汽油喷射装置用于飞机上。第二次世界大战以后,这种电喷航空发动机技术被逐渐应用到汽车上,为汽车提供了全新的动力装置。

1957年1月,美国汽车工程师年会在底特律召开,班迪克斯(Bendix)公司展示了他们的最新研究成果——电子控制汽油喷射装置,引起了克莱斯勒汽车公司的极大兴趣,他们从

班迪克斯公司购买了这种装置进行了试用,但未投入生产。

德国 Bosch 公司经过数年地试验和改进,在 1967 年研制出了更为先进的 D 型电子控制汽油喷射发动机,随后被用于大众等德系轿车上。此后,德、日、美等国汽车公司纷纷在自己生产的轿车上装备电喷汽油发动机。D 型电子喷射装置以进气管里面的压力作参数,与化油器相比,仍存在结构复杂、成本高、不稳定的缺点。针对这些缺点,波许公司开发了一种新的 L 型电子控制汽油喷射装置,它以进气管内的空气流量作参数,直接按照进气流量与发动机转速的关系确定进气量,据此喷射出相应的汽油。这种装置设计合理,工作可靠,广泛为欧洲和日本等汽车制造商采用,奠定了今天电子控制燃油喷射装置的雏形。

电喷汽油发动机提高了燃油利用率,降低了噪声和尾气排放,达到了美国进口汽车要求节能、低耗和环保的标准,大量销往美国汽车市场。由此也刺激了各国汽车制造商研究电喷发动机的热情,分别开发出机械、半机械、单点和多点等多种电喷发动机,使各种品牌的电喷轿车成为国际汽车市场的主流车型,受到各国汽车消费者的青睐。

目前为止,电喷系统的行车电脑可随时侦测引擎温度、进气流量、转速变化、振动状况,并依照实际需求调整供油量和点火时间,在动力输出、燃油经济与排污上取得了不错的平衡。为增加发动机进气量、提高燃油效率,发动机从早期的单点喷射,已演化至多点喷射,气门数量也从 2 个增加至 5 个。目前最先进的为搭载 VVT 可变气门技术的电喷发动机。

总体而言,电喷供油系统的最大优点就是燃油供给控制十分精确,引擎在任何状态下都能有正确的空燃比,引擎保持运转顺畅,废气排放符合环保要求。然而,电喷供油系统并不是最科学的,由于内燃机构造的先天限制,电喷喷嘴安装在气门旁,只有在气门打开时才能完成油气喷射,因此喷射受到开合周期的影响,产生延迟,影响电脑对喷射时间的精确控制。最新发展的缸内直喷技术则使上述问题迎刃而解。

### (3) 缸内直喷技术

自 20 世纪 90 年代,不少欧美汽车厂商意识到电喷技术研发已进入瓶颈期,德国大众提出了缸内直喷技术的概念,于是缸内直喷技术(FSI, Fuel Stratified Injection)成为了各大厂商的主攻方向。目前市场上备受关注的缸内直喷发动机包括:奥迪 FSI 缸内直喷发动机、凯迪拉克 SIDI 双模直喷发动机。

与电喷发动机相比,缸内直喷发动机的喷油嘴移到了汽缸内部,因此缸内油气的量不再受气门开合的影响,直接由电脑自动决定喷油时机与分量,气门仅掌管空气的进入时程,两者则是在进入到汽缸内才进行混合的动作。由于油气的混合空间、时间都相当短暂,因此缸内直喷系统必须依靠高压将燃油从喷油嘴压入汽缸,达到高度雾化的效果,更好地进行油气混合。

发动机混合油气的压缩比越高,动力越强劲,节能效果也就越明显。此外,缸内直喷系统的燃烧室、活塞具有特殊的导流槽,供油气在进入燃烧室后能够产生气旋涡流,提高混合油气的雾化效果与燃烧效率。一般而言,应用了缸内直喷技术的发动机要比同排量的多点喷

射发动机的峰值功率提升 10%~15%，峰值扭矩提升 5%~10%。这样的提升是一种质变，单靠传统的增加气门数量的方式是难以达到这一效果的。

总之，在发动机的工作方式和喷油方式确定后，发动机的技术研发之路并未终止。发动机技术正朝着运转更加平顺、燃油经济性更好，马力更大的方向发展。这些都依赖于新技术的运用和推广。为了改善进气，有本田的电控无级式自动变速器技术（ECVT，Electronic Continuously Variable Transmission），丰田的可变气门正时技术（VVT-I，Variable Valve Timing with Intelligence），现代连续可变气门正时技术（CVVT，Continue Variable Valve Timing）。这些应用于轿车上的可变气门正时技术，虽然名字不同，但目的都是为了给发动机的不同工作状况匹配最佳的气门重叠角（气门正时），只是实现方法不同。为了获得更好的空燃比，有大众的涡轮燃油分层喷射技术（TFSI，Turbo-charging Fuel Stratified Injection），可变进气道技术（VIS，Variable Intake System），涡轮增压冷技术等；为了使环境污染最小，在排气管里增加了氧传感器，三元催化转化器，以及废气再循环技术。

目前，由于环境污染的恶劣影响，对汽车尾气排放的要求越来越高，过时的发动机技术淘汰已经成了必然，更多充分利用新能源的技术在不停地研发当中。同时由于全球能源危机的巨大影响，更加节能的新能源技术必将在发动机技术的发展和应用上占有重要的一席之地。

## 2. 航空发动机技术简介

航空发动机先后经历了活塞式发动机、燃气涡轮发动机两个重要阶段。

### （1）活塞式发动机时期

早期液冷发动机居主导地位，1903 年莱特兄弟把一台 4 缸水平直列式水冷发动机改装之后，成功地应用到“飞行者一号”飞机上进行了飞行试验。虽然首次飞行留空时间只有 12 s，距离也只有 36.6 m，但却是人类历史上首次有动力、载人、持续、稳定、可操作的成功空中飞行。

在两次世界大战期间，发动机整流罩、废气涡轮增压器、变距螺旋桨和内充金属钠的冷却排气门等几项重要发明，使得活塞式发动机性能大为提升。20 世纪 20 年代中期开始，气冷发动机发展迅速，气冷星型发动机由于有刚性大、质量轻，可靠性、维修性和生存性好，功率增长潜力大等优点而得到迅速发展，开始在大型轰炸机、运输机和对地攻击机上取代液冷发动机。到第二次世界大战结束时，活塞式发动机已经发展成熟，以它为动力的螺旋桨飞机的飞行速度从 16 km/h 提高到近 800 km/h，飞行高度达到 15 000 m。活塞式发动机达到技术发展的顶峰。

第二次世界大战结束后，由于涡轮喷气发动机的发明而开创了喷气时代，活塞式发动机逐步退出主要航空领域，但功率小于 370 kW 的水平对缸活塞式发动机仍广泛应用在各类轻型低速飞机和直升机上，如行政机、农林机、勘探机和各种无人机。

### （2）燃气涡轮发动机时期

第二次世界大战结束后，航空燃气涡轮发动机取代活塞式发动机进入喷气时代，居航空

动力的主导地位。在技术发展的推动下, 涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轮螺旋桨发动机、桨扇发动机和涡轮轴发动机在不同时期和不同的飞行领域内发挥着各自作用, 使航空器性能跨越了一个又一个新的台阶。

涡轮喷气发动机, 英国的惠特尔和德国的奥海因分别在 1937 年研制成功离心式涡轮喷气发动机, 1939 年 8 月亨克尔公司的首架涡轮喷气发动机飞机试飞成功, 开创了喷气推进的新时代和航空事业的新纪元。

涡轮风扇发动机是从民用发动机开始的。世界上第一台涡扇发动机是 1959 年定型的英国康维涡轮风扇发动机, 主要用于波音 707 等客机。以后, 涡轮风扇发动机向低涵道比的军用发动机和高涵道比的民用发动机的两个方向发展。

涡轮螺旋桨发动机, 1942 年, 英国开始研制世界上第一台涡轮螺旋桨发动机。该发动机主要用于海军舰载反潜飞机上。以后, 英国、美国和苏联陆续研制出多种涡轮螺旋桨发动机, 这些涡轮螺旋桨发动机的耗油率低、起飞推力大, 主要用于装备重要的运输机和轰炸机。

桨扇发动机, 在 20 世纪 80 年代后期, 掀起了一阵性能上介于涡桨发动机和涡扇发动机之间的桨扇发动机热。一些著名的发动机公司都进行了不同程度的研究和试验, 其中通用电气公司的无涵道风扇 (UDF) GE36 曾进行了飞行试验, 这类发动机最终因技术原因没有成功实现商业化应用。

涡轮轴发动机, 从 1950 年法国透博梅卡公司研制出 206 kW 的阿都斯特 I 型涡轴发动机并装备美国的 S52-5 直升机上首飞成功以后, 涡轮轴发动机在直升机领域逐步取代活塞式发动机而成为最主要的动力形式。

航空发动机的研发特点是技术难度大、耗资多、周期长。发动机对飞机性能以及飞机研制成败和进度有着决定性的影响, 而且发动机技术具有良好的军民两用特性, 对国防和国民经济有重要意义。因此, 世界上几个能独立研制先进航空发动机的国家都将优先发展航空发动机作为国策, 把发动机技术列为国家和国防关键技术, 给予大量投资, 保证发动机相对独立地领先发展, 并严格禁止关键高新技术出口。

目前发达国家提出的远期发展目标是: 提供高超声速有人驾驶飞机、跨大气层飞行器和低成本可重复使用的天地间往返运输系统的组合动力系统, 其他一些新概念发动机和新能源发动机也在探索之中, 如以微机电技术为基础的微型无人机用超微型涡轮发动机和多电发动机, 以及液氢燃料、燃料电池、太阳能和微波能等新能源动力发动机。航空动力的发展是无止境的, 2009 年 9 月美国航天局宣布, 2010 年 9 月将进行最后一次航天飞机飞行, 之后, 美国“航天飞机时代”将正式宣告结束。“后航天飞机时代”, 美国计划由新一代航天器“奥赖恩”以及“战神”火箭接棒进行载人航天活动, 并设立了 2020 年重返月球的目标。

### (三) 一次能源型原动机

电动机和内燃机的原料都是二次能源, 电能来自水力发电、火力发电、地热发电、潮汐发电、风力发电或原子能发电等转换后的二次能源; 内燃机用的汽油或柴油是由开采的石油

冶炼出的二次能源。其缺点是受地球上的资源储存量及开采量的限制,成本高。一次能源型原动机指直接利用地球上的能源转换为机械能的机器。常用一次能源型原动机主要有水轮机、风力机、太阳能发电机等。因此开发利用水力、风力、太阳能、地热能、潮汐能等绿色一次能源,则是 21 世纪动力工程的一项艰巨任务和目标。

#### 四、原动机选择与应用的一般原则

在进行原动机选择时,作为设计者和开发者,应结合具体工作需要和所学的相关专业知识选择合适的原动机类型。原动机的选择应考虑以下因素。

第一,考虑现场能源供应情况,有电源情况下尽可能选择电力驱动,因为其成本低,操作控制方便。当机械活动范围广、离电源远或无电源时则可考虑选择内燃机作为原动机。当有现成气源时(如铸造车间)则可选用气动马达。

第二,考虑工作机械负载特性、调速范围、工作平稳性、启动和制动的频繁程度等具体要求。对于轧钢机、提升机械和皮带运输机等负载转矩与转速无关的工作机械,可选同步电动机或直流并励电动机;对于无调速要求机械,尽可能采用交流电动机,其中负载平稳、对启动和制动无特殊要求且长期运行的工作机械,宜选用鼠笼式异步电动机,工作负载为周期性变化、传递中大功率并带有飞轮或启动沉重的工作机械,应采用绕线型异步电动机;对于需要调速的机械,可根据具体调速要求,采用绕线型异步电动机、直流电动机或液压马达;要求启动迅速、便于移动或在野外作业场地工作时,宜选用内燃机。

第三,考虑机械系统整体结构外形需要,在相同功率下,要求外形尺寸尽可能小、质量尽可能轻时,宜选用液压马达。

第四,考虑工作环境因素,如防爆、防尘、防腐蚀等。对于易燃、易爆、多尘、振动大等恶劣环境中,宜采用气动马达;对于食品机械要求对工作环境不能造成污染且便于清洗时,宜选用电动机或气动马达,如果选择油缸,则会因漏油可能造成对食品的污染。

第五,考虑机械系统的经济效益,如初始成本和运转维护成本。此外,原动机的额定功率必须满足负载需要,也不宜过大。如电动机所选功率过大,则会造成功率因数参数过低而浪费;在额定功率相同情况下,额定转速越高的电动机尺寸越小,质量轻和价格也越低,所以高速电动机反而相对经济。

自 20 世纪 90 年代以来,随着产业化推进,特别是与计算机信息技术(IT)、新材料技术、传感技术及智能控制技术等相结合的机械和其他新产品的相继出现,使得机械产品从原来的笨大、粗重向轻薄、短小新的产品方向改变。因此,必须采用新的控制策略和方法来实现对机械产品的良好控制。以上机械产品的发展变化趋势既是历史的必然,也是新技术发展的必然结果。由此,节省劳动力、减少能源消耗,大幅度提高生产效率,同时满足人们使用时的宜人性要求已经成为进行机械产品设计的主要追求目标。与产业界发展相适应,机械工程学科内容必然要与信息工程学、系统工程学等新的学科进行交叉融合,从而促进机械工程学科的

进一步发展。

## 第二节 现代机械产品的设计与开发

### 一、现代产品设计开发概述

设计是指在前人经验和知识累积的基础上进行的全新或部分创新设计,是一个富有挑战性和创造性的工作,开发人员进行设计时,不仅仅是按部就班、呆板式的设计,而是应该时刻具有根据用户需求进行开发,具有时刻捕捉和把握灵感的能力。如鲁班由带刺的草划伤手指这一现象带来的灵感发明了木工用的锯子;牛顿则由苹果成熟后落在地上思考背后蕴涵的道理发现了万有引力定律。

产品设计技术主要是指产品开发过程中涉及的思想、理论和方法,其中有关机构和零件结构的设计技术,是一个合格机械设计工程师必备的专业知识素养。在现代信息技术大发展的背景下,机械工程师应具有从更高的层次和理念来进行产品开发与研制的能力。

在很长一段历史阶段中,一些机械工程师认为进行机械设计只要具备机械零部件知识就足够了,但从20世纪中叶,电子元件被引入到机械装置后,机械产品经历了从纯机械向机电一体化产品的转变。20世纪60年代,软件设计被引入到机械产品设计中,许多机电产品都将微处理器作为控制系统的核心部分,如数码相机、复印机和智能玩具。这些产品都具有机械电子和软件部分,称为智能装置。在这些产品的设计上,专业学科知识的应用出现了强烈的相互交叉效应,所用专业知识显然属于完全不同专业领域和设计过程的知识。

机械工程设计一般主要涉及流体力学、热力学、机械学等专门知识,但面对具体的设计问题,明确属于哪个领域的专门知识是非常困难的。在进行机械系统产品开发和设计时,大多数设计问题往往是不同类型问题的组合,涉及多学科专业知识。

机械产品设计问题可以大致分为以下几类。

#### 1. 选择设计

选择设计是指从现有成熟产品的部件中进行类比选择,再进行修改设计的一类问题。选择设计问题,一般从一个明确需求开始,以便能够有效地从产品目录中得到解决问题的可能方案。并根据给出的特定需求对可能的方案进行评价,以获取正确的选择。

#### 2. 组装设计

组装设计问题中所有零、部件已经设计完成,要解决的问题是如何将这些零件装配在一起组成一个完整产品。组装设计思想与搭积木或其他装拼类游戏十分类似。如要组装一台笔记本电脑,需要键盘、电源、主板,硬盘、光驱和外设插口等部件组成。选用性能和配置不同部件来进行组合设计,就可以组装出外观和性能各异的笔记本电脑产品,从而满足不同用户群的需要。如某公司先于同类企业开发了具有强烈市场潜力需求的功能组件,就会在技术