

航空发动机原理与构造

白冰如 石日昕 著



西北大学出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

航空发动机原理与构造/白冰如 石日昕著
—西安市: 西北大学出版社, 2011.09
ISBN 978-7-5604-2971-7

【作者】白冰如, 石日昕

【出版发行】西安市: 西北大学出版社, 2011.09

【ISBN号】978-7-5604-2971-7

【原书定价】35.00

【中图法分类号】V231 (航空、航天>航空>

航空发动机(推进系统)>发动机原理)

【参考文献格式】白冰如, 石日昕. 航空发动机原理与构造.

西安市: 西北大学出版社, 2011.09

内 容 简 介

本书是航空类高等职业院校航空机电设备维修专业通用课程航空发动机原理与构造的教材,是西安航空职业技术学院航空维修工程系在国家示范院校建设中,重点专业课程体系改革与建设的专业通用课程教材建设的成果之一。该教材主要由四部分组成:工程热力学与燃气涡轮发动机基础知识;发动机主要部件组成、工作原理与结构分析;发动机的燃油、起动的滑油系统组成与功用及其他常见航空发动机。由于本教材在现代航空发动机的原理、构造及性能分析方面概念清晰,基本理论部分的教学深度要求适当;既在发动机和其主要系统的结构方面除强调其典型性和先进性外,更注重它们的实际应用。因此,使得该教材成为一本深入浅出,通用性很强的好教材。该书除供高等职业院校飞机与航空发动机维修专业的学生使用外,还是本科院校相关专业师生很好的参考书。

前言

航空技术的发展是伴随着航空发动机技术的发展而发展的,航空发动机技术是一个国家工业发展水平的体现,号称“工业之花”。人类在航空领域中取得的每一次重大的革命性进展,无不与航空发动机技术的突破和进步相关。飞机的需求和发展又促使发动机向更高水平迈进,两者相得益彰,促进了整个航空事业的蓬勃发展,已成为一个国家科技水平、军事实力和综合国力的重要标志之一。

航空发动机不仅仅是飞机的动力,其应用范围已由空中拓展到地面,如许多电厂和油田使用航空发动机进行发电从陆地拓展到海洋,如航空发动机可作为导弹驱逐舰的动力装置;从传统飞行器拓展到导弹,如海湾战争后被普遍重视的巡航导弹,其采用的动力装置就是航空发动机。

随着燃气涡轮发动机的应用范围不断扩大,与航空燃气涡轮发动机相关的专业也越来越多,如飞行器设计、民航维修工程、巡航导弹工程等。许多非航空发动机设计专业需要开设航空燃气涡轮发动机原理与结构课程。但是这些专业的教学要求与航空发动机设计专业的要求相差甚多:不要求掌握很深的专业基础理论,而要求很宽的知识面和建立正确的基本概念;而往往这些专业没有系统学过发动机设计专业的专业基础课程,能够给出的教学学时也非常有限。因此,从多年的教学实践中感到迫切需要一种综合性的、简约性的、系统介绍航空燃气涡轮发动机原理与结构的教材,以适应广泛的、与航空燃气涡轮发动机有关的专业教学需要。本教材在总结多年教学经验的基础上,根据航空发动机制造、修理与维护企业,地面燃气涡轮发动机、导弹用发动机使用与维护等单位对从业人员知识结构的客观要求和高职学生教学的需要编写。

本教材全面介绍航空燃气涡轮发动机的基本概念、工作原理和基本构造,发动机主要部件和工作系统的基本概念、工作原理和构造。力图从最少的专业基础知识出发,深入浅出地介绍有关航空发动机的基本知识,希望使读者用比较短的时间理解航空燃气涡轮发动机的基本规律、基本要求,理解发动机主要性能参数及其影响因素,掌握航空发动机的组成和结构,为所从事的专业技术工作服务。教材的内容比发动机设计专业的原理、构造课程要浅,比航空发动机概论课

程要深;但是知识面比发动机设计专业的原理、构造课程要系统全面。

教材采用发动机原理与构造整合的思路框架,从实际需要出发,尽可能较少地涉及发动机设计专业课程所必须的基础知识,简明扼要地讲授工程热力学、气体动力学、传热学的相关内容,在适当的深度和范围选用发动机原理的内容。教材在发动机构造方面力求反映当前航空发动机技术的最新进展。

教材以军用航空发动机为主,兼顾民用航空发动机、直升机以及巡航导弹上使用的航空发动机,在内容和架构上不仅满足非航空发动机设计专业的教学需要,也满足航空院所、陆军航空兵、二炮部队和民用航空运输企业人员培训的要求。广泛适用于飞行器设计、使用与维护,航空发动机制造、修理与维护,地面燃气轮机和弹用燃气轮机使用与维护等与航空发动机有关的非航空发动机专业教学使用,也可供广大与航空发动机相关行业的从业人员作为参考。

该教材是国家软科学研究计划项目——《高等职业教育“工学四合”人才培养模式创新与实践》(项目编号 2010GXSH5D263)资助教材。是西安航空职业技术学院航空维修工程系在国家示范院校建设和重点专业课程体系改革与建设中,专业通用课程教材建设的成果之一。

本书由西安航空职业技术学院白冰如、石日昕主编,马康民教授主审。具体分工为西安航空职业技术学院石日昕编写第一章、第二章、第三章、第四章,白冰如编写第五章、第十章、第十一章、第十二章、第十三章,刘志武编写第九章,马康民编写绪论,空军工程大学杨帆编写第六章、第七章,陈鑫编写第八章。全书由白冰如统稿。由于编写航空类高职院校教材的经验有限,加之时间较紧,内容处理和编写方法还有值得商榷之处,使得本教材难免有许多不足之处,希望使用教材的老师和同学提出宝贵意见,以便再版时修改完善。

编 者

2011年8月20日

目录

绪 论	/1
第一章 燃气涡轮发动机热工气动基础	/6
1.1 热力学基本概念	/6
1.2 热力学第一定律	/17
1.3 热力过程	/21
1.4 热力学第二定律	/25
1.5 气体动力学基本方程	/30
1.6 气流的滞止参数及气动函数	/33
1.7 膨胀波和激波	/38
1.8 一维定常管流	/39
第二章 燃气涡轮发动机基础知识	/48
2.1 喷气发动机的分类和基本工作原理	/48
2.2 发动机的推力和效率	/55
2.3 发动机的理想循环和实际循环	/59
2.4 发动机的性能评定指标	/64
2.5 不加力发动机单位推力和耗油率与工作过程参数的关系	/66
第三章 进气系统的工作原理与构造	/70
3.1 概 述	/70
3.2 进气道的工作原理	/72
3.3 进气道的构造	/77
第四章 压气机的工作原理与构造	/89
4.1 概 述	/89
4.2 轴流式压气机的工作原理	/90
4.3 轴流式压气机的构造	/97
4.4 压气机防喘、消喘系统	/118
4.5 防冰装置	/120

4.6	封气装置	/127
4.7	离心式压气机	/128
第五章	燃烧室的工作原理与构造	/135
5.1	燃烧室的工作原理	/135
5.2	燃烧的基本知识	/136
5.3	燃烧室的工作原理	/139
5.4	燃烧室的构造	/144
5.5	加力燃烧室的工作原理	/156
5.6	加力燃烧室的构造	/159
第六章	涡轮的工作原理与构造	/170
6.1	涡轮工作原理	/171
6.2	涡轮构造	/174
6.3	涡轮的冷却	/197
第七章	排气系统的工作原理与构造	/208
7.1	喷管的工作原理	/208
7.2	喷管的构造	/213
7.3	其他形式的喷管	/225
7.4	气动噪声及消音措施	/229
第八章	涡轮喷气发动机	/233
8.1	各部件的共同工作	/233
8.2	发动机特性	/239
8.3	发动机通用特性和台架性能换算	/245
8.4	双转子涡轮喷气发动机	/247
8.5	加力涡轮喷气发动机	/252

目录

第九章 涡轮风扇发动机	/255
9.1 基本工作原理和性能特点	/255
9.2 部件特点	/257
9.3 涡轮风扇发动机的调节规律	/260
9.4 涡轮风扇发动机的特性	/261
第十章 涡轮风扇发动机总体结构	/263
10.1 转子的连结	/263
10.2 转子的支承	/271
10.3 发动机受力分析	/283
10.4 静子承力系统	/285
10.5 发动机在飞机上的安装	/288
10.6 附件传动装置	/292
第十一章 航空发动机工作系统	/304
11.1 航空发动机控制系统	/304
11.2 航空发动机起动系统	/319
11.3 滑油系统	/321
第十二章 涡轮轴发动机	/355
12.1 基本工作原理和性能特点	/356
12.2 部件特点	/358
12.3 各部件的共同工作及调节规律	/361
12.4 涡轮轴发动机特性	/364
第十三章 涡轮螺桨发动机	/367
13.1 基本工作原理和性能特点	/367
13.2 各部件共同工作和调节规律	/370
13.3 涡轮螺桨发动机特性	/371
参考文献	/373

绪 论

为了使任课教师和学生明确本门课程的地位、教学目的和要求,以便更好地搞好该课程的教学工作。此处与大家讨论三个问题。

一、本课程是航空机电设备维修专业示范建设中重点整合的专业通用课程之一

2007年8月,西安航空职业技术学院被教育部、财政部确定为国家示范院校建设立项单位,同时航空机电设备维修专业也被确定为中央财政重点支持建设的项目之一。其中航空机电设备维修专业课程体系改革是项目建设的重点和难点,也是研究经费投入较大的几个子项目之一。项目组在负责人马康民教授的带领下,制定了详尽的、切实可行的调研计划和课程体系改革研究方案。项目组先后调研了西安飞机工业(集团)有限责任公司、中国人民解放军第5702工厂、中航工业5716厂、西安航空发动机(集团)有限公司、厦门太古发动机服务有限公司等航空企业的岗位设置和人才需求,分析了空军工程大学工程学院、成都航空职业技术学院、西安航空技术高等专科学校、长沙航空职业技术学院等兄弟院校相关专业的课程设置,经过广泛地分析和研讨,运用现代高等职业教育理念和方法,结合本专业的特点和要求,提出了以培养学生真正维修能力为目标的课程体系重构指导思想。继而,运用系统分析的理论和方法,开展了大量的研究工作。确立了飞机修理技术、航空发动机修理技术、飞机维护、飞机及发动机附件修理技术和航空电气设备与维修为专业核心课程;按照专业通用课程支持核心课程;专业基础课程支持专业通用课程;公共文化课程支持专业基础课程的思路,重构了航空机电设备维修专业的课程体系。为了进一步完善新的课程体系,我们还对专业通用课程、专业基础课程、公共文化课程进行了补充、完善和整合,重新编写了与新课程体系配套的教材。并将研究成果贯彻在学院2009级航空机电设备维修专业教学计划中。

表1 航空机电设备维修专业课程体系

课程层次	课程名称		备注
专业核心课程	1	飞机维护	新编5门专业核心课程的教材。即《飞机维护》《飞机修理技术》《航空发动机修理技术》《飞机及发动机附件修理技术》《航空电气设备与维修》
	2	飞机修理技术	
	3	航空发动机修理技术	
	4	飞机与发动机附件修理技术	
	5	航空电气设备与维修	

↑↑

专业通用课程	1	航空工程与技术概论	新编《航空材料及应用》和《航空工程与技术概论》教材 整合工程热力学、航空发动机原理、航空发动机构造三门课为航空发动机原理与构造一门课程,重编教材 整合空气动力学、飞行原理和飞机构造三门课为飞机原理与构造一门课程,重编教材
	2	航空材料及应用	
	3	飞机原理与构造	
	4	航空发动机原理与构造	
	5	航空维护技术基础	
	6	无损检测及在航空维修中的应用	
	7	专业英语	
↑↑			
专业基础课	机械制图与航空识图、机械设计基础、液压与气动技术、机械制造技术、公差与技术测量、电工电子技术		机械制图课增加航空识图内容变更为机械制图与航空识图
↑↑			
公共文化课	思想道德修养与法律基础、形势与政策、应用文写作、计算机应用基础、高等数学、毛泽东思想和中国特色社会主义理论体系概论、体育、英语等		新增应用文写作课程,提高学生的公文写作能力

本项目研究制定的航空机电设备维修专业新的课程体系具有鲜明的职业教育特色。

1. 5 门专业核心课程,在航空职业教育中属于首创。

从表 1 可见,5 门专业核心课程,即飞机修理技术、航空发动机修理技术、飞机维护、飞机及发动机附件修理技术和航空电气设备与维修是根据飞机与发动机高等职业教育要求,落实本专业人才培养方案,满足飞机维护、飞机修理、航空发动机修理、航空电气设备与维修及飞机及发动机附件修理中对应的 11 个工作岗位的需求开设的课程。这 5 门课程填补了航空职业教育的空白,在国内属于首创。

2. 7 门专业通用课程及其配套教材,对航空类职业院校相关专业具有很好的辐射作用。

新课程体系中有 7 门专业通用课程,其中飞机原理与构造是原来空气动力学、飞行原理和飞机构造三门课整合的结果;航空发动机原理与构造是原来工程热力学、航空发动机原理、航空发动机构造三门课程整合的结果;航空工程与技术概论是原来航空航天概论课程整合的结果。这都充分体现了“理论够用、重在应用、强调技能培养”的高等职业教育理念,加强了飞机和发动机修理中需要的内容,而大幅度删减了飞机和发动机设计方面的内容。因为,本专业毕业生不搞飞机与发动机设计工作。充分体现了构建课程体系时,专业通用课程

必须大力支持专业核心课程的宗旨。上述三门课程的教材及我们编写的《航空材料及应用》,可以供航空类职业院校相关专业使用,很好的发挥了重点示范专业的辐射作用。

3. 在按照系统理论和方法指定的新课程体系中,优化和重构的专业基础课和文化基础课,有力的支持了本专业的全面建设。

新制定的6门专业基础课程,即机械制图与航空识图、机械设计基础、液压与气动技术、机械制造技术、公差与技术测量、电工电子技术。其中机械制图与航空识图、液压与气动技术、机械制造技术、公差与技术测量是新增加的,他们都是支持专业通用课程必不可少的。

新制定的课程体系列出了9门文化基础课。其中应用文写作课是新增加的。由于在调研中发现高职院校毕业的毕业生普遍写作能力较差,调查对象业主动要求开设应用文写作课程,提高毕业生的公文写作能力。

综上所述,本课程体系使用系统的观点和方法认识该专业的所有课程,整合原有课程,创建新的课程体系,并对其进行最佳设计、管理与控制,使之处于最佳运行状态;同时采用新的理论和方法分析和评价课程体系。这种用系统工程的理论和方法作指导,使本专业所有课程形成有一定联系、相互依赖、相互影响,推动教学工作运行的系统成为课程体系。它是职业教育由模仿本科教育和中技教育的初级阶段,向具有专门理论和实践特色深度发展的产物。课程体系是人才培养方案的主轴,是制定人才培养方案、进行师资培养、教学设施建设、实训室建设的依据。因此,搞好课程体系建设是航空机电设备维修专业在示范建设中的首要任务。

二、《航空发动机原理与构造》教材的主要内容

本教材共分四大部分,即工程热力学与燃气涡轮发动机基础知识,发动机主要部件组成、工作原理与结构分析,发动机的燃油、起动和润滑系统组成和功用,其他常见航空发动机等。

第一部分工程热力学与燃气涡轮发动机基础知识。主要介绍与航空发动机有关的工程热力学基本概念、热力学第一和第二定律、热力过程和热力方程等基本概念和基本理论。

第二部分发动机主要部件组成、工作原理与结构分析。本部分内容是教材的重点内容之一。分别介绍了涡轮喷气发动机的进气系统、压气机、燃烧室、涡轮、排气系统等主要部件的组成、功用、工作原理和结构分析。

第三部分发动机的燃油、起动和润滑系统组成和功用。主要介绍了发动机的燃油、起动和润滑系统组成与功用。

第四部分其他常见航空发动机。本部分主要介绍了常见的涡扇、涡轮轴和涡轮螺旋桨发动机的结构和性能特点。

教材努力做到在介绍基本概念、基本组成和基本原理的同时,尽量使这些知识与实际应用联系得更加紧密。即从航空发机构造和系统的基本要求和设计思想出发,全面介绍它们的功用、工作原理和结构特点。使学生能从感性认识和一定的理论高度认识航空发动机的结构和系统组成的特点。从而为以后进一步学习飞机维护和发动机修理技术课程打好基础。

三、航空发动机原理与构造课程的教学特点和要求

航空发动机原理与构造课程是航空类高职院校飞机制造技术、航空机电设备维修、航空电子设备维修等专业的通用课程之一。由于它具有理论性较强,实际应用广泛的特点。因此,在本课程的教学过程中要努力做到以下几点:

1. 充分利用好学校和校企合作单位的两方面的教学资源,在航空工程与技术概论课程的基础上做好本课程的教学工作。

西安航空职业技术学院和许多航空类院校一样,都有航空馆科技馆。其中航空发动机不少,并且有分解成各种类型教具的部件和组件。这些实物与教材相应的内容配合,能更直观使学生理解航空发动机主要部件的结构特点和要求;能更好地激发学生的学习积极性和主动性,是搞好本门课程教学重要的教学资源。任课老师要主动发挥这些教学资源作用,经常引导学生到实践中去学习。另外,校企合作单位也有广泛的教学资源,而且这部分资源往往较之学校的教学资源更为先进,因此利用和发挥好这部分资源的作用也是搞好航空发动机原理与构造教学的先决条件。

2. 以现代先进航空发动机为主要教学对象,以其有代表性的典型结构和系统,如压气机、涡轮、燃烧室和主要系统等为重点,详细讲解发动机主要部件和系统的结构特征和要求。使其教学效果具有一定的先进性和超前性。

众所周知,近年来,航空发动机技术发展很快。尤其是与军用飞机配套的航空发动机,无论是设计理论、采用的结构材料、制造工艺和使用维护方法等都有十分显著的进步,甚至是飞跃。在本门课程的教学,老师要充分认识到这一特点,把教学重点放在讲解现代先进发动机的设计理论,代表型号及其制造工艺的特征方面,使学生详细了解和掌握现代先进发动机的设计理念和重点。达到高等教育必须对所教知识及时更新,教学效果有一定超前性和先进性的要求。

3. 自觉贯彻高等职业教育的原则和要求,在本门课程的教学,努力实现注重应用知识和技术的传授,尤其是自觉地适应学生所从事专业的要求,讲好这门课。

蓬勃发展起来的职业教育,以其“理论够用,重在应用,注重技能培养”为指导原则,强调在所开设课程之中都要自觉为学生就业服务,为学生毕业后到生产一线从事航空发动机修理所承担工作做好准备。这种要求就使得任课老师要十分重视本课程的实际应用内容,并将其列为课堂教学重点。还要在教学过程中不断摸索和积累这方面的做法和经验,从而进一步补充和优化本教材的相关部分,使得其日臻充实与完善。

4. 该教材也是飞机制造技术、航空电子设备维修等专业的相关专业通用课程的教材,怎样使得本教材在其中发挥良好的辐射作用是国家示范建设的初衷之一,也是我们继续努力的方向。

我们深切地希望使用本教材的老师和学生,在自己的教学实践和学习工作中,不断提出建议和要求,和我们一起为进一步优化和完善本教材的内容和教学方法而努力。以期通过几年的使用使之更加成熟,更好地适应航空类高职院校教学需要。

与本教材配套的有多媒体教学课件,适合现场教学的纪录片,分解后的飞机和发动机部件及教具等;同时我们还编写相应的实训指导书,以供任课老师和学生使用。

由于本课程是实践性很强的专业通用课程。建议该课程的部分内容采用实训技能考核的方法考察学生学习效果;尽量不要全部采用笔试、闭卷的考核方式。努力使职业教育通用课程具有生动活泼、深入浅出、实用性强的特点,而不要像高等教育传统理论课那样采用满堂灌的教学方法。

第一章 燃气涡轮发动机热工气动基础

燃气涡轮发动机首先是一种热机,它将燃料化学能转变为机械能;同时又是推进器,它将获得的机械能转变为有效推进功,推动飞行器前进。燃气涡轮发动机内部的能量转换是通过以气体作为工作介质(简称工质)的热力循环来完成的,那么气体与燃气涡轮发动机之间的相互作用必然要遵循热力学和气体动力学的基本规律,即热力学第一定律、热力学第二定律、能量转换与守恒定律、质量守恒定律以及牛顿第二定律(即动量定理),为了较全面地了解和分析燃气涡轮发动机的工作原理、性能及结构,有必要对上述内容作简要概括。因此本章将首先介绍热力学和气体动力学的基础知识,包括热力学的基本概念、气体的状态方程、热力过程、能量转换规律以及一维定常管流。

1.1 热力学基本概念

1.1.1 热力学体系

分析任何现象时,首先应明确研究的对象,分析热力现象也不例外。按照研究任务的具体要求,人为地选取某一特定范围内的物质作为研究对象,该研究对象就叫做热力学体系或简称体系。与体系发生作用,但不被列为研究对象的物质叫做外界。体系与外界之间的界限,叫做分界面。体系和外界之间通过分界面进行能量的传递与物质的迁移。分界面的选取可以是真实的,也可以是假想的;可以是固定的,也可以是胀缩的或是运动的。作为体系的分界面,可以是这几种分界面的组合。图1-1表示选取封闭在气缸中的气体作为研究对象时,气缸和活塞的内壁面就是真实的分界面,而活塞顶部却又是可以胀缩的或运动的分界面。图1-2为一个叶轮机装置,表示气体不断地从1-1截面流入,在叶轮的作用下,压力升高,并不断地从2-2截面流出。若选取进、出口截面之间的气体作为研究对象,那么进、出口截面1-1和2-2是假想的、固定的分界面,壳体的内壁是真实的、固定的分界面。

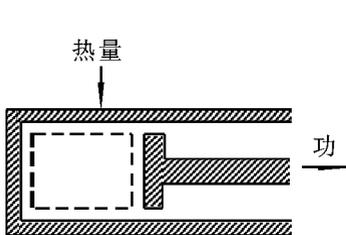


图1-1 闭口体系

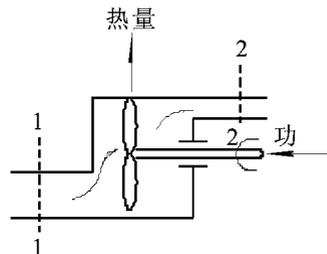


图1-2 开口体系

体系与外界之间的作用总是通过分界面进行的,按体系与外界之间进行能量和质量交换的情况,可将热力学体系分成下述不同的类型。图 1-1 所示的体系和外界之间,可以有功的交换和热量的交换,但没有物质的交换,这种体系叫做封闭体系或闭口体系。闭口体系由于与外界没有物质交换,体系内包含的物质质量为一不变的常量,所以又叫做控制质量体系。但应注意的是,闭口体系具有恒定的质量,但具有恒定质量的体系不一定是闭口体系。图 1-2 所示的体系与外界之间,不仅可以有功和热量的交换,而且还有物质的交换,这种体系叫做开口体系。由于开口体系中能量的交换和物质的交换是在某一划定的空间范围内进行的,所以开口体系又叫做控制容积或控制体,相应地,开口体系的分界面也叫做控制面。如体系与外界之间没有热量交换,则叫做绝热体系。若体系与外界之间既没有功和热量的交换,又没有物质的交换,则叫做孤立体系。

自然界中的一切事物都是普遍联系、相互制约的,所以绝对的封闭体系、绝热体系、孤立体系实际上是不存在的。当体系与外界的作用在某一方面或某些方面无限削弱,或作用的影响小到可以忽略不计时,那么就可以把它看作某一特定的体系,将复杂的问题简化,这就有利于热力学问题的分析研究。

1.1.2 热力学状态、状态参数和平衡状态

热力学体系在某一瞬间所处的宏观物理状况称为热力学状态。用以描述体系所处状态的一些宏观物理量则称为状态参数,通常热力学体系由工质组成,因此所谓体系的状态,也就是指体系内工质在某瞬间所呈现的宏观物理状况;描述工质状态的参数也就称为工质的状态参数。体系或工质的状态是要通过参数来表征的,而状态参数又单值地取决于状态。也就是说,状态一定,描写状态的参数也就一定;若状态发生变化,至少有一种参数随之改变。状态参数的变化只取决于给定的初始与最终状态,而与变化过程中所经历的一切中间状态或路径无关。

在给定的状态下状态的单值性,在数学上表现为点函数,具有积分特性和微分特性。积分特性指的是当体系经历一系列状态变化而又恢复到初态时,其状态参数的变化为零。微分特性指的是状态参数的微分是全微分。如果某物理量具有上述数学特征,则该物理量一定是状态参数。热力学中广泛采用平面坐标系来描述一定的状态,经常采用的是以纵坐标轴代表压力 p ,横坐标轴代表比容所组成的压容图或 $p-v$ 图来表示。

如图 1-1 所示的闭口体系,在没有外界影响的条件下,如果体系各部分的状态不随时间而改变,即反映体系宏观性质的物理量,例如压力和温度等,在任意两个不同的瞬间进行比较,其结果是一样的,那么该体系就是处于热力学平衡状态或简称平衡状态,否则就处于不平衡状态。平衡状态时,虽然气体的每个分子仍然在不停地运动,但是这些分子运动的统计平均值并不随时间而改变,所以这样的平衡为动态平衡。平衡状态必须满足热平衡、力平衡和化学平衡的条件。热平衡必须是体系内部的温度均匀一致,并且等于外界的温度;力平衡必须是体系内部的压力均匀一致,并且也等于外界的压力;化学平衡是指体系内各部分之间不发生化学反应和扩散等物质变化。假若外界的温度和压力改变为另一数值时,体系与外界之间将有一定的温度差和压力差,首先发生变化的是体系与外界接触的地方(即分界面

附近), 然后才涉及到体系的内部。显而易见, 这时体系的分界面与体系内部的物质性质就不是均匀一致的, 所以它是不平衡状态。但是经过相当时间以后, 体系的温度和压力又到处均匀一致, 并且也等于外界的温度和压力, 这时的体系又重新达到了新的平衡状态。

在外界条件发生变化的情况下, 由于气体分子运动得很快, 体系会自动地由不平衡状态过渡到平衡状态, 而且完成这一过渡所需的时间通常都很短, 因此所遇到的体系往往处于平衡状态或非常接近于平衡状态。平衡状态下的体系, 不考虑宏观状态随时间改变的因素, 所以进行分析计算时, 要方便得多。

给定状态下的状态参数按其数值是否与体系内物质数量有关, 可分为两类: 在给定状态下, 凡与体系内所含物质的数量有关的状态参数称为广延参数。这类参数具有可加性, 在体系中它的总量等于体系内各部分同名参数值之和。容积、能量、质量等均是广延参数。在给定状态下, 凡与体系内所含物质的数量无关的状态参数称为强度参数, 如压力、温度、密度等。强度参数不具可加性。单位质量的广延参数具有强度参数的性质, 称为比参数。例如, 对于容积为 V , 质量为 m 的均匀体系, 其比容 ($v = V/m$) 即为比参数。

1.1.3 基本状态参数

压力、比容和温度是三个可以测量而且又常用的状态参数, 称为基本状态参数。其他的状态参数可依据这些基本状态参数之间的关系间接地导出。

1.1.3.1 压力

垂直作用在单位面积上的力, 叫做压力(又称压强), 用符号 p 表示。

1. 绝对压力、表压力和真空度

工质的压力用压力计测量。工程上常用的压力计有两种, 即弹簧管式压力计和测量微小压力的形管压力计。由于压力计本身总处在某种环境(通常是大气环境) 中, 因此, 由压力计测得的读数所代表的是被测工质压力与当地环境压力之间的差值, 故又称压差计。

工质真实的压力常称为绝对压力, 用 p 表示。当地的大气压力用 p_b 表示。当绝对压力高于大气压力(即 $p > p_b$) 时, 压力计指针指示的数值称为表压力或超出压力, 用 p_g 表示, 如图 1-3(a) 所示, 显然

$$p_g = p - p_b$$

则

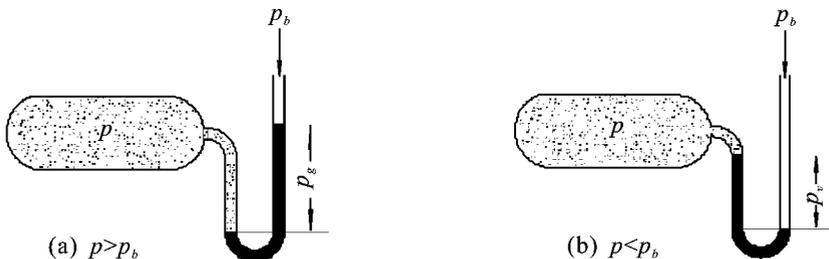
$$p = p_g + p_b \quad (1-1)$$


图 1-3 表压力、真空度定义图

当工质的绝对压力低于大气压力(即 $p < p_b$) 时, 测压仪表指示的读数称其为真空度, 用

p_v 表示,如图 1-3(b) 所示,显然

$$p_v = p_b - p$$

则

$$p = p_b - p_v \quad (1-2)$$

若以绝对压力为零作基线,可将表压力、真空度、绝对压力、大气压力间的关系用图 1-4 表示。

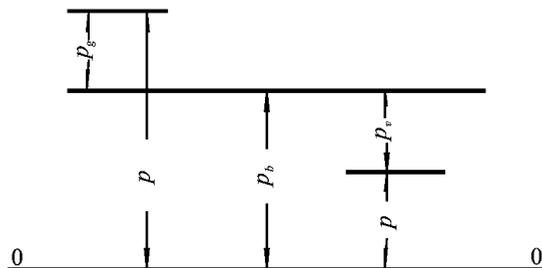


图 1-4 p_g 、 p_v 、 p 、 p_b 关系图

由此可见,为确定工质的绝对压力除使用压力计外还应同时使用大气压力计,以确定当时当地的大气压力。但由于大气压力变化不大,若被测工质压力值很高,大气压力数值的变化相对来说影响甚小,在工程计算中可将大气压力视为常数。但当被测工质压力值较小,与大气压力相近时,则不能将大气压力视为常数,而应利用大气压力计测定其具体数值。

需要说明的是,表压力和真空度只是确定工质绝对压力所需的辅助参数,绝对压力才是工程计算中所应用的状态参数。如果无特殊说明,本书中的压力均指绝对压力。

2. 压力的单位

若气体作用于容器壁面积 A 上的垂直作用力为 F ,那么该壁面上的压力为

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-3)$$

可见,压力的单位由力和面积所取的单位而定。在国际单位(SI)制中,力的单位是牛顿(N),面积的单位是平方米(m^2),则压力的单位是牛顿/米²(N/m^2)。1969年国际计量大会上把这个压力单位定名为帕斯卡,简称帕。用符号 Pa 表示,即

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

采用帕 Pa 作为压力单位,在工程应用上显得太小,而数值太大,读数不方便,所以实际上取千帕(kPa)、兆帕(MPa)和巴(bar)作为压力的单位,它们与帕(Pa)的关系为

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{ kPa} &= 1000 \text{ Pa} \\ 1 \text{ MPa} &= 10^6 \text{ Pa} \\ 1 \text{ bar} &= 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa} = 0.1 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

压力的大小也可以用液柱高度来度量,如图 1-4 所示。设液柱的横截面积为 A ,高度为 h ,液体的密度为 ρ ,则作用于底面积上的总作用力应为该液柱的重量,即

$$P = \rho g A h$$

因而作用于底面积上的压力为

$$p = \frac{P}{A} = \rho g h = \gamma h \quad (1-5)$$