

潜地导弹 发射动力系统

李咸海 王俊杰 编著



哈尔滨工程大学出版社

潜地导弹发射动力系统

李咸海 王俊杰 编著

哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

潜地导弹发射动力系统/李威海,王俊杰编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2000.5

ISBN 7-81073-032-0

I. 潜… II. ①李…②王… III. 导弹,水下发射-发射系统-动力装置 IV. TJ762.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 03544 号

内 容 简 介

本书从介绍一般导弹弹射动力系统的基本原理、基本结构出发,引出燃气-蒸汽式潜地导弹发射动力系统的特殊问题;应用工程热力学、气体动力学、固体火箭发动机等学科的基本理论、基本方法,着重阐述潜地导弹发射动力系统、燃气发生器、冷却器、发射内弹道、发射动力系统设计等课题的工程计算方法;特别是对当代最新导弹发射技术——导弹水下变深度发射的技术特点、实施方案、有用能调节原理和影响有用能调节的因素及有用能量的最佳调节做了深入分析。书后附有工程计算所必需的附表。

本书可作为从事该专业的科研人员继续工程教育的教材,也可以作为该专业研究生的专业课教材。

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼
发行部电话(0451)2519328 邮编:150001
新华书店经销
黑龙江省教委印刷厂印刷

*

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14.5 字数 345 千字

2000年5月第1版 2000年5月第1次印刷

印数:1~1 000册 定价:18.00元

如发现印、装质量问题,请与印刷厂技术科联系调换。

地址:哈尔滨市南岗区和兴路147号 邮编:150080

前 言

为贯彻国家人事部提出的有关继续教育科目指南精神,1995年4月,七院以院技教[1995]308号文《关于做好继续工程教育体系建设工作的通知》对专业模块编制工作做了部署。《潜地导弹发射动力系统》是《潜地弹道导弹发射装置》专业模块课程设置之一。

本书从介绍一般导弹弹射动力系统的基本原理、基本结构出发,引出潜地导弹发射动力系统的特殊问题,重点介绍燃气—蒸汽式潜地导弹发射动力系统。在内容编排上采取温故知新、由整体到部分的原则;在内容上注意基本理论的应用、工程计算方法的创立。力求体现教材的科学性和适用性。

本书是在分析大量试验数据的基础上应用工程热力学、气体动力学、固体火箭发动机等学科的基本理论、基本方法,着重阐述潜地导弹发射动力系统、燃气发生器、冷却器、发射内弹道、发射动力系统设计等课题的工程计算方法。特别是对当代最新导弹发射技术——导弹水下变深度发射的技术特点、实施方案、有用能调节原理和影响有用能调节的因素及有用能量的最佳调节做了深入分析。书后附有工程计算所必需的附表。

本书由李咸海研究员、王俊杰研究员编著,倪火才研究员主审。董金荣研究员对该书编写大纲设置,赵险峰研究员、邓贤满高级工程师对该书的编写大纲和内容设置,提出了不少宝贵意见。在本书的编写过程中得到了713所劳人处负责同志的指导和大力支持。在此一并向他们表示衷心感谢。

由于编者水平所限,书中难免有不完善或不当之处,恳请读者批评指正。

编者

1999年11月

主要符号表

a	——加速度或音速
c	——速度
c_1	——水的比热
C_d	——喷水孔流量系数
C^*	——火药的特征速度
C_p	——定压比热
$C_{p\mu}$	——过热蒸汽平均定压比热
C_v	——定容比热
D	——弹运动阻力
E	——总能量
e	——比总能量
f_p	——火药的定压火药力
G	——质量秒流量
H	——发射深度
I	——总焓
i	——比焓
i'	——饱和水比焓
i''	——干饱和蒸汽比焓
k	——等熵绝热指教
l	——行程
l_0	——初始容积当量长度
m	——质量
M	——马赫数
n	——喷水孔数或摩尔数
p	——压力
P_0	——燃气发生器头部压力
P_H	——水蒸气饱和压力
Q	——传热量
q	——单位质量的传热量
R	——气体常数
s	——比熵
S	——截面积或总熵
S_j	——单个喷水孔截面积

S_t ——一级喷管喉面积
 S_f ——气密件与筒壁接触面积
 t ——时间或摄氏温度
 t_H ——水蒸气饱和摄氏温度
 T ——绝对温度
 u ——比内能
 U ——总内能
 V ——容积
 v ——比容
 v'' ——干饱和蒸汽比容
 W ——膨胀功
 w ——比膨胀功
 x ——水蒸气的干度或相对摩尔
 x_1 ——能量利用系数
 y ——压差系数
 Z ——装填系数
 θ —— $k-1$
 ρ ——密度
 σ_{p0} ——燃气发生器总压恢复系数
 γ ——水蒸气的汽化潜热
 μ_f ——气密件摩擦系数
 λ ——速度系数
 α ——水药比
 β ——装药增面比

目 录

第一章 绪论	1
1-1 导弹弹射动力系统的功能	1
1-2 导弹弹射动力系统的基本工作原理	1
1-3 导弹弹射动力系统的基本结构	1
1-4 导弹弹射动力系统的分类	1
第二章 工程热力学预备知识	3
2-1 热变功的形式和热力系统	3
2-2 工质的状态参数和均匀状态	4
2-3 混合气体的压强	5
2-4 变量气体热力学关系式	5
2-5 蒸汽气体混合气体	8
第三章 燃气发生器气体动力学预备知识	13
3-1 理想气体和实际气体	13
3-2 一维等熵流气体动力学函数	13
3-3 气体在管道中的流动	14
3-4 气体管流突然膨胀的关系式	19
3-5 气体经小孔从有限容积容器中的流出	22
第四章 潜地导弹发射动力系统	25
4-1 概述	25
4-2 功用和分类	25
4-3 结构与工作原理	26
4-4 性能指标	28
4-5 变深度发射动力系统	30
4-6 燃气-蒸汽动力系统有用能量调节原理	31
4-7 需要调速范围和动力系统的有效调速范围	36
4-8 装药量与有效调速范围的关系	36
4-9 燃气-蒸汽动力系统有用能量的最佳调节	37
第五章 燃气发生器	38
5-1 燃气发生器的功用和结构	38
5-2 燃气发生器装药的性能	39
5-3 燃气发生器装药的选择	43
5-4 燃气发生器的性能参数	43
5-5 水药比和燃气发生器的装药量	44

5-6 燃气发生器的装药增面比	46
5-7 燃气发生器内弹道计算	51
第六章 冷却器	59
6-1 冷却器的分类	59
6-2 冷却器的功用和结构	59
6-3 冷却器的性能参数	62
6-4 冷却器内弹道	63
6-5 燃气发生器和冷却器的相关性	73
第七章 燃气-蒸汽发射动力系统发射内弹道	79
7-1 发射内弹道研究内容	79
7-2 导弹武器系统总体对发射内弹道的要求	79
7-3 发射内弹道方程组的建立	79
7-4 燃气滞留量的计算	86
7-5 x_1 的物理意义	88
7-6 内弹道方程组的求解	88
7-7 $\int_{V_0}^{V_c} p_c dV$ 的物理意义	89
7-8 $\int_{t_0}^{t_c} p_c dt$ 的物理意义	89
第八章 蒸汽发射动力装置发射内弹道	90
8-1 概述	90
8-2 发射内弹道数学模型	90
第九章 燃气-蒸汽发射动力系统设计	94
9-1 总体方案设计	94
9-2 冷却器内通道几何尺寸计算	113
9-3 结构强度设计	114
9-4 密封设计	125
附录	
附表1 正激波气体动力学函数	129
附表2 亚声速段和超声速段的 P/P_0 与 S/S_t 、 k 的关系表	166
附表3 气体动力学函数表	169
附表4 水蒸气特性表	208
主要参考文献	222

第一章 绪 论

1-1 导弹弹射动力系统的功能

发射技术中利用导弹自身以外的动力将导弹发射出去的技术称为弹射技术(导弹贮存在发射筒内),利用弹射技术发射导弹的装置称为弹射装置,俗称发射装置。发射装置中产生弹射动力将导弹发射出去的部分称为弹射动力系统,俗称发射动力系统。

发射动力系统的功能是产生符合设计要求的工质源,输入到发射筒中,在发射筒中膨胀做功,按规定的发射内弹道指标要求将导弹弹射出发射筒。

1-2 导弹弹射动力系统的基本工作原理

导弹弹射动力系统的型式各异,工作过程也不完全相同,但它们的基本工作原理是相同的。

无论哪种导弹弹射动力系统都必须能够产生高压气体(如压缩空气)或高温、高压气体(如燃气),并按设计质量秒流量规律输入到发射筒内。由于导弹承受轴向加速度和高温气体的限制,高压气体或高温、高压气体需要经过降压或降温、降压环节,然后进入发射筒内。进入发射筒的气体工质,在筒内弹后空间建立一定压力,膨胀做功,将导弹弹射出筒。

1-3 导弹弹射动力系统的基本结构

根据不同设计要求有若干种不同结构的弹射动力系统,但可以概括出它们的基本组成:

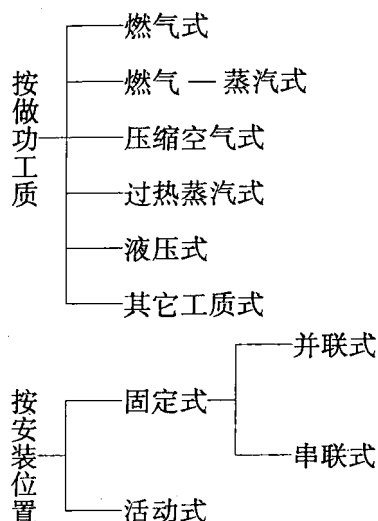
1. 动力源:动力源是提供弹射动力的能源,它可以是产生高温、高压燃气的燃气发生器,也可以是提供高压压缩空气或高压过热水蒸气的贮气罐。

2. 冷却装置或降压装置:由于受到导弹轴向发射加速度的限制以及不允许高温气体直接接触导弹,从动力源出来的高压气体(如压缩空气)或高温、高压气体(如燃气)不能直接用于推动导弹运动,而必须经过降压装置降压或冷却装置降温、降压,然后进入发射筒弹后空间产生弹射力,将导弹弹射出筒。

3. 管路装置:把动力源、冷却装置或降压装置与发射筒(也可称弹射室)联接起来,有的需要在管路中安装阀门控制流量。

1-4 导弹弹射动力系统的分类

根据不同的划分准则可对弹射动力系统进行不同的分类。



固定式弹射动力系统固定在发射筒上,与发射筒并联的为并联式(如图 1-1. c),与发射筒串联的为串联式(如图 1-1. b)。活动式弹射动力系统(如图 1-1. a),又称自弹式,固定在弹上,随弹一起运动。活动式本质上是自推力发射与弹射相结合,因弹射力为发射动力的主要部分,故归为弹射动力系统的一种。

限于篇幅,我们不可能详尽研究每一种弹射动力系统,只选择具代表性的、相对复杂的弹射潜地导弹的燃气—蒸汽弹射动力系统作为研究对象。书中涉及的有关基本理论,分析问题和解决问题的基本方法,对于其它弹射动力系统也是适用的。

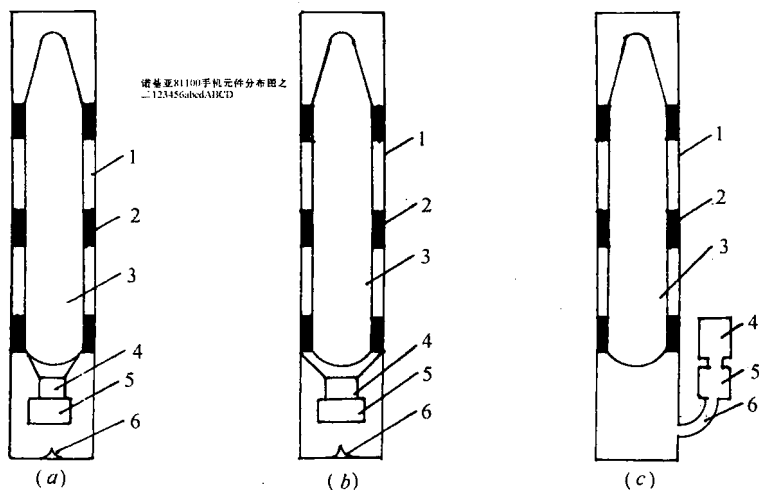


图 1-1 弹射动力系统

a. 活动式; b. 固定串联式; c. 固定并联式

1. 发射筒; 2. 适配器; 3. 导弹; 4. 燃气发生器; 5. 冷却器; 6. 导流锥(输气管)

第二章 工程热力学预备知识

2-1 热变功的形式和热力系统

2-1-1 热变功的形式

热变功的装置统称为热机。在热机中把热能转变为机械功的方式有两种。一种是利用工质高速流动的动能。工质的高速流动是由喷管实现的,在喷管中工质膨胀,温度、压力降低,速度增加,将热能首先变为动能,动能再转变为机械功。动能转变为机械功有两种不同的结构形式,一种如具有叶片和轮盘的涡轮机,工质的动能被叶片和轮盘吸收,轮盘转动从而得到机械功;另一种如喷气发动机和火箭发动机,直接利用喷管喷出的高速气流所产生的反作用力,推动飞机或火箭前进。另一种热变功的形式是直接利用工质的膨胀功,即直接利用工质的压力做功,如活塞式内燃机和蒸汽机等。弹射动力系统就是属于这种做功形式的热机,它与活塞式内燃机等不同的是后者连续循环做功,而弹射动力系统是一次性做功,但其热力过程和遵循的热力学关系是相同的。

燃气-蒸汽弹射动力系统的动力源是燃气发生器,它本质上是火箭发动机,但由于它的做功形式是直接利用燃气工质的膨胀功,为了与作为运载动力的火箭发动机相区别,故称为燃气发生器。它们做功形式的不同,带来了不同的设计特点,在设计工作中必须把握住其不同的设计特点,才能使所设计的动力系统满足规定的设计要求。

2-1-2 热力系统

分析任何现象时,首先应明确研究对象,分析热力现象也不例外。根据所研究问题的需要,人为地划定一个或多个任意几何面所围成的空间作为热力学研究对象。这种空间内的物质的总和称为热力学系统,简称为系统或体系。系统之外的一切物质统称为外界。系统与外界的边界面称为边界。系统与外界之间,通过边界进行能量的传递与物质的迁移。

按照系统与外界是否进行物质交换,系统可分为:

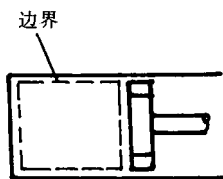


图 2-1 闭口系统

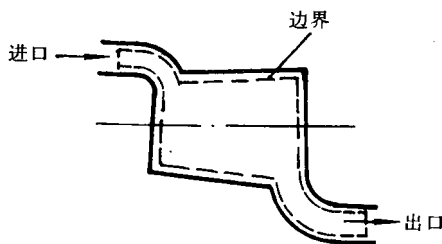


图 2-2 开口系统

(1)闭口系统:如图 2-1 所示,该系统与外界只有能量而无物质交换,系统内包含的物质质量为一不变的常量。但这并不意味着体系内不能因有化学反应发生而改变其成分。

(2) 开口系统: 该系统与外界有能量且有物质交换。通常, 开口系统取为相对固定的空间(见图 2-2)。

根据系统与外界之间所进行的能量交换情况可分为:

- a. 绝热系统: 该系统与外界之间完全没有热量交换。
- b. 孤立系统: 该系统与外界之间既无物质交换又无能量交换。
- c. 非绝热系统: 该系统与外界之间有能量交换发生。

这里需要注意, 绝热系统和孤立系统是相对而言的, 绝对的绝热系统与孤立系统是不存在的。

2-2 工质的状态参数和均匀状态

2-2-1 工质的状态参数

工质是将热变为功的媒介。系统内工质在某瞬间所呈现的宏观物理状况称为系统的状态。描述工质状态的参数称为工质的状态参数。压力、温度和比容是工质的基本状态参数。

工质的状态参数具有如下特征:

(1) 一个状态参数可用任意两个独立状态参数的函数来表达。即知道了任意两个独立状态参数的值, 工质的状态就是确定的, 其它状态参数都可以根据这两个状态参数确定, 如:

$$T = f_1(p, v)$$

$$i = f_2(p, v)$$

$$S = f_3(p, v)$$

(2) 状态参数只决定于状态, 状态参数的变化与过程的路线无关。如压力由 p_1 变化到 p_2 , 可以写出:

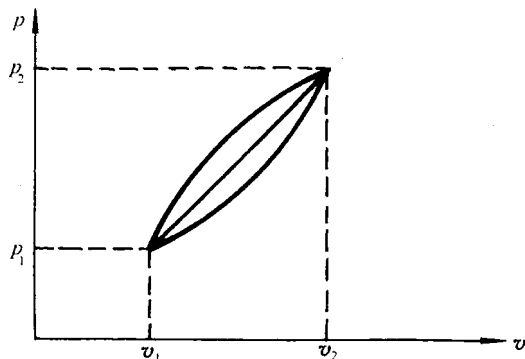


图 2-3

$$\int_{p_1}^{p_2} dp = p_2 - p_1 = \Delta p$$

压力变化 Δp 只与初压力和终压力有关, 与压力如何从 p_1 变化到 p_2 的路线无关(图 2-3)。由此可推论出状态参数的循环积分一定为零。如:

$$\oint dp = 0$$

(3) 状态参数既然是与变化的路线无关的点函数, 则它们的微分是全微分。如:

$$dp = \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T dv$$

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T dp$$

2-2-2 均匀状态

工质内部状态参数不平衡的状态称为不均匀状态。工质内部状态参数均匀一致称为均匀状态。

在工程热力学中,研究讨论的状态都是均匀状态,也就是说,把工质的状态都假定为均匀状态来讨论分析,这样才使我们有可能从纯理论的角度,用状态参数的计算来研究热功互变的规律。

2-3 混合气体的压强

混合气体是由几种气体成分(组分)所组成的,因此,其状态不能只由两个状态参数,例如压强和温度来确定。这里必须补充表示混合物成分的量,例如可以利用相对质量和相对摩尔来表示各组分的量。

如果用 m 表示质量, n 表示摩尔数, μ 表示摩尔质量, ξ 表示相对质量; φ 表示相对摩尔,下标 $a, b, c, \dots$ 表示各组分,则有下列一系列关系式。

$$m = m_a + m_b + m_c + \dots$$

$$\xi_n = \frac{m_n}{m_a + m_b + m_c + \dots} = \frac{m_n}{m}$$

$$n = n_a + n_b + n_c + \dots$$

$$\varphi_n = \frac{n_n}{n_a + n_b + n_c + \dots} = \frac{n_n}{n}$$

$$\xi_a + \xi_b + \xi_c + \dots = 1$$

$$\varphi_a + \varphi_b + \varphi_c + \dots = 1$$

混合物 n 组分的分压强 p_n 由下式计算:

$$p_n = \varphi_n p \quad (2-1)$$

式中, φ_n —— n 组分的相对摩尔;

p ——混合物的压强,也称总压强。

根据分压强的这个定义,由于相对摩尔的总和等于1,所以混合物各组分分压强的总和等于总压强:

$$p_a + p_b + p_c + \dots = (\varphi_a + \varphi_b + \varphi_c + \dots) p = p \quad (2-2)$$

这对任何混合物都是正确的,与组分是否为理想气体和实际气体无关。

2-4 变量气体热力学关系式

气体经管道、阀门或喷嘴流出或流入容器等情况带来了热力过程是在变量工质情况下进行的问题,而一般工程热力学教材中讲述的热力学关系式只适用于定量气体,因而建立变量气体热力学关系式是非常必要的。

2-4-1 气体流出比能量

单位质量气体具有的能量称为比能量。现在研究气体经小孔从容器流出的情况(图 2-4)。

在 dt 时间内从所研究的容器中流出的能量由两部分组成,即排出气体量的内能及将气体由容器排出至孔内的功。该功包括两部分:抵抗外介质压力的功和传给流出气体的动能。取在小孔附近的气流活动截面(在小孔内忽略气体的速度),截面积为 f ,在 dt 时间内前进 dl 距离。

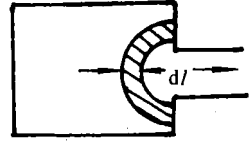


图 2-4

在 dt 时间内排出的气体容积(阴影线)为

$$dV = s dl$$

排出气体的质量为

$$dm_{out} = \frac{dV}{v}$$

所分出的表面抵抗阻力 p_s 移动 dl 距离的功为

$$dw = p_s dl = p dV$$

根据以上所述及上述关系式得出流出能量:

$$e_{out} dm_{out} = u dm_{out} + p dV$$

$$e_{out} = u + pv = i \quad (2-3)$$

可见气体经小孔从容器排出的能量为容器内气体的焓。

2-4-2 气体流入比能量

现在研究气体由气源流入热力体系的能(图 2-5),该能就是气源所放出的能与在供气管道内有热损失时所消耗能之差。

根据(2-3)式,由气源流出的秒能量为 Gi ,流入热力体系的秒能量相应地为

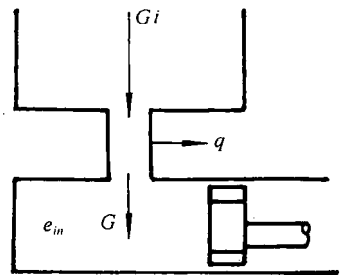


图 2-5

$$e_{in} G = Gi - \frac{dQ}{dt}$$

上式除以 G 得

$$e_{in} = i - \frac{dQ}{G dt} = i - q \quad (2-4)$$

式中, q 是单位质量流入气体的传热损失。

显然,当用能量利用系数折合热损失 q 时, $e_{in} = x_1 i$; 当 q 为零时,流入比能量等于流出比能量。当气体是由热力体系内的火药燃烧产生的,则 i 等于火药的潜能。

2-4-3 变质量气体热力学第一定律解析式

热力学第一定律是能量守恒与转换定律在热力学上的具体应用,是研究热力学问题最基本的定律之一。在一般的工程热力学教材中,根据图 2-1 推导出的热力学第一定律解析

式为

$$dQ = dU + dW \quad (2-5)$$

$$\frac{dQ}{m} = \frac{dU}{m} + \frac{dW}{m}$$

$$dq = du + dw \quad (2-6)$$

$$dw = p dv \quad (2-7)$$

因为 $\frac{dU}{m} = \frac{d(mu)}{m} = du$; $\frac{dW}{m} = \frac{pdV}{m} = \frac{pd(mv)}{m} = dw$, 所以只当 m 为常数的条件下(2-6)、(2-7)式才成立, 对于变量气体是不成立的。

现在研究图 2-5 所示物理模型的热力学第一定律解析式。假设有气体流出, 流出秒质量流量为 G_{out} , 流出比焓为 i_{out} , 流入秒质量流量为 G_{in} 。

在 dt 时间内气体能量的变化为 dU 。

dQ ——壁与气体间的热交换;

$idm_{in} = iG_{in}dt$ ——当流入 $dm_{in} = G_{in}dt$ 公斤气体时进入热力体系的能量;

$i_{out}dm_{out} = i_{out}G_{out}dt$ ——当流出 $dm_{out} = G_{out}dt$ 公斤气体时热力体系失去的能量;

dU ——气体总内能的变化。

根据能量不灭定律, 对上述热力体系内的气体有:

$$dU = (dQ + idm_{in}) - (dW + i_{out}dm_{out})$$

$$dQ + idm_{in} = dU + dW + i_{out}dm_{out} \quad (2-8)$$

或

$$\frac{dQ}{dt} + iG_{in} = \frac{dU}{dt} + \frac{dW}{dt} + i_{out}G_{out} \quad (2-9)$$

所得方程(2-8)、(2-9)是变量气体热力学第一定律的解析式, 适用于当气体量变化时进行的热力过程, 它们与(2-5)、(2-6)式是不同的。

2-4-4 压力变化速度方程

对理想气体, 由内能公式

$$U = \frac{PV}{k-1}$$

对时间微分得

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{k-1} \left(V \frac{dp}{dt} + P \frac{dV}{dt} \right)$$

由此得

$$\frac{dp}{dt} = \frac{k-1}{V} \left(\frac{dU}{dt} - \frac{1}{k-1} \cdot P \frac{dV}{dt} \right)$$

将(2-9)式的 $\frac{dU}{dt}$ 代入上式, 得

$$\frac{dp}{dt} = \frac{k-1}{V} \left(\frac{dQ}{dt} + iG_{in} - i_{out}G_{out} - \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{dt} \right) \quad (2-10)$$

(2-10)式是压力变化速度的公式, 是计算和研究变量气体工作过程最方便的一个关系式。

2-4-5 变量气体状态变化的方程

将密度的式子 $\rho = \frac{m}{V}$ 对时间微分得

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{V \frac{dm}{dt} - m \frac{dV}{dt}}{V^2}$$
$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{V} \left(\frac{dm}{dt} - \rho \frac{dV}{dt} \right)$$

因为

$$\frac{dp}{dt} = \frac{dp}{d\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt}$$

所以

$$\frac{dp}{d\rho} = (k-1) \frac{\frac{dQ}{dt} + iG_{in} - i_{out}G_{out} - \frac{k}{k-1}P \frac{dV}{dt}}{\frac{dm}{dt} - \rho \frac{dV}{dt}}$$

或

$$\frac{dp}{d\rho} = (k-1) \frac{\frac{dQ}{dt} + iG_{in} - i_{out}G_{out} - \frac{k}{k-1}P \frac{dV}{dt}}{G_{in} - G_{out} - \rho \frac{dV}{dt}} \quad (2-11)$$

(2-11)式为变量气体状态变化方程式,该式表明,在变量气体的过程中决定气体状态,不像在定量气体过程中那样需两个状态参数值,而是需要三个参数值,时间 t 是新的附加参数。

2-5 蒸汽气体混合气体

蒸汽气体混合气体是蒸汽与其它气体的混合物,这里讨论的其它气体是在所研究的温度范围内不凝结的或凝结物很少可以忽略的气体;这里的蒸汽指水蒸气,由于水蒸气在所讨论的温度范围内可能凝结,因而在研究蒸汽气体混合物气体中,必须注意区别饱和和未饱和蒸汽这两个不同特性的状态区域。

2-5-1 水蒸气的饱和压强

纯水蒸气的饱和压强仅是温度的函数,在一般工程热力学教材中均有水蒸气饱和压强表,很容易由温度查出饱和压强值。但在蒸汽气体混合物(蒸汽与其它气体组成的混合气体,如燃气蒸汽混合气体)中水蒸气的饱和压强,从理论上讲,不仅与混合气体的温度有关,而且与混合气体的总压有关。

采用如下下标:

S——饱和;

D——纯蒸汽、蒸汽;

k——凝结相(液相);

G ——混合气体中水蒸气之外的气体。

我们知道,在气相和液相共存的情况下,只有在两相的温度与压强都相同的条件下,两相才处于热力学平衡(我们所研究的是热力学平衡状态),两相的比自由焓 $g = u + pv + Ts$ 相等。即

$$dg_D = dg_k \quad (2-12)$$

将比自由焓 $g = i - Ts$ 微分得

$$dg = di - Tds - sdT = vdp - sdT$$

所以,在 $dT=0$ (热力学平衡)的条件下,由(2-12)式得

$$v_D dp_s = v_k dp \quad (2-13)$$

液相的比容 v_k 总是比干饱和蒸汽的比容 v_D 小得多,而干饱和蒸汽的比容为

$$v_D = \frac{R_D T}{P_s} \quad (2-14)$$

因而 $dp_s \ll dp$ 。由(2-13)、(2-14)式得

$$\frac{dp_s}{p_s} = \frac{v_k}{R_D T} dp \quad (2-15)$$

在 P_{Ds} 到 P_s 范围内,对上式进行积分,同时把液相当作不可压缩的介质,得

$$\ln \frac{P_s(T, P)}{P_{Ds}(T)} = \frac{v_k(T)}{R_D T} [P - P_{Ds}(T)] \quad (2-16)$$

由此得出饱和压强为

$$P_s(T, P) = P_{Ds}(T) \left\{ 1 + \frac{v_k(T)}{R_D T} [P - P_{Ds}(T)] + \dots \right\} \quad (2-17)$$

因而,随着蒸汽气体混合物总压强 P 的增加,蒸汽饱和压强的增加不是很大的。上式所确定的关系与气体的种类无关。蒸汽气体混合物中水蒸气饱和压强的计算数据列于表 2-1。由此得出结论:在总压强不太高时($P < 9.617 \times 10^4 \text{ Pa}$), P_s 与 P_{Ds} 的差别小于 1%, 因此,在工程计算中,为了简化计算,可以忽略蒸汽的饱和压强与总压强的关系,而采用

$$P_s(T, P) = P_{Ds}(T)$$

表 2-1 饱和蒸汽气体混合物的水蒸气饱和压强 P_s
与温度 t 和总压强 P 的关系

$\begin{matrix} P(\text{MPa}) \\ P_s(\text{Pa}) \\ t(^{\circ}\text{C}) \end{matrix}$	$P = P_{Ds}$	0.1	0.5	1.0	2.0	最大误差 (%)
0	610.7192	611.2192	613.1193	615.6193	620.5195	1.6
20	2337.0734	2339.0734	2346.0737	2354.0739	2372.0745	1.5
40	7375.2316	7380.2317	7400.2324	7426.2332	7478.2348	1.4
60	19920.6255	19930.6258	19980.6274	20050.6296	20180.6337	1.3

2-5-2 未饱和蒸汽气体混合气体

这种混合气体中,水全部为水蒸气,无液态水存在,且水蒸气的分压强 P_D 小于混合气体中蒸汽的饱和压强(指在临界点 374.15°C 以下,按混合气体温度 T 确定的蒸汽饱和压强,