

潜地弹道导弹发射系统 内弹道学

赵险峰 王俊杰 编著



哈尔滨工程大学出版社

潜地弹道导弹发射系统

内弹道学

赵险峰 王俊杰 编著

哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

潜地弹道导弹发射系统内弹道学/赵险峰,王俊杰编
著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2001
ISBN 7-81073-104-1

I. 潜... II. ①赵...②王... III. 水下对地导弹:
弹道导弹-发射系统-内弹道学 IV. TJ762.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 14158 号

内 容 提 要

本书从理论和实践的结合上比较全面、系统地阐述了潜地弹道导弹发射系统及其相类似的发射系统内弹道的有关问题。其中包括内弹道方程的建立、内弹道方程的解法、内弹道设计、内弹道仿真技术、内弹道试验、内弹道参数的测量方法和内弹道参数的误差分析方法等。本书既有基础理论为依据,又有作者从事内弹道研究工作的实践经验;既有方程的详细推导过程,又有其实践过程和试验结果。本书论据充足,实用效果显著,可供从事该专业工程技术和研究人员使用,也可作为该专业研究生专业课教材。

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×1 092mm 1/16 印张 11.75 字数 269 千字

2001年4月第1版 2001年4月第1次印刷

印数:1~1 000册

定价:16.00元

前 言

潜地弹道导弹发射系统内弹道学(以下简称导弹发射内弹道),是伴随着水下发射运载火箭技术研究而发展起来的一门新的学科。它是导弹发射技术中不可缺少的重要理论课题。多年来,伴随着导弹水下发射技术的研究,在导弹发射内弹道的理论研究和试验研究的相互促进、相互提高的基础上不断发展和完善,建立了精确度较高、适用性较强的内弹道工程设计计算方法。该项研究对发射动力系统的设计、优化试验方案进行试验研究、为水下发射运载火箭提供准确的初始参数,以及对相关发射技术的研究都起到了重要的促进作用。

然而,由于导弹发射内弹道是一门应用学科,涉及的基础知识面广,更有一些是导弹发射系统的特殊问题,难免在有些方面还存在学术上的分歧,但是这些学术上的分歧并不影响它的实用效果,可留给以后的研究者进一步研究探讨。

由于导弹发射内弹道涉及的基本理论和基本方程较多,在编写过程中力求通俗易懂,突出其实用性。本书可作为从事该专业科研人员继续工程教育的教材,也可作为该专业研究生的专业课教材。

本书由赵险峰研究员、王俊杰研究员编著;范有朋研究员主审;研究室领导赵世平、程栋审阅。在编写过程中得到了人教处领导岳茂山、杨有权和有关同志的指导与大力支持,作者在此表示深切的谢意。

限于编者水平,书中难免会有不妥或错误之处,恳请读者指正。

作者
2000年3月

主要符号表

- a ——加速度
 \dot{a} ——加速度变化率
 $A_i (i=2,3,4)$ ——M-H 方程系数
 A_{i1} ——燃气发生器喉道面积
 $A_j (j=1,2,3,4,5,6,7)$ ——内弹道设计关系式中的参量
 b ——M-H 方程中考虑分子体积的参数
 $B_i (i=2,3,4)$ ——M-H 方程系数
 $B_j (j=1,2,3,4,5,6,7)$ ——内弹道设计关系式中的参量
 C_i ——M-H 方程系数
 C^* ——火药特征速度
 C ——比热
 C_p ——定压比热
 C_v ——定容比热
 D ——直径
 D_t ——发射筒内筒内径
 D_m ——导弹圆柱段直径
 e ——自然对数的底
 F ——各种阻力之和
 g ——重力加速度
 G ——重力
 ΔH ——水的汽化潜热
 l ——位移
 l_e ——发射筒有效行程
 m ——质量
 M ——导弹质量(含适配器)
 m_{g0} ——点火药量折合的燃气量
 m_{10} ——预加水量
 n_t ——喷水孔数
 P ——压力
 R ——气体常数
 S ——截面积
 S_t ——喷水孔截面积

t ——时间;摄氏温度
 T ——绝对温标温度
 U ——内能
 u ——比内能
 V ——容积
 v ——速度;比容
 v'' ——干饱和汽的比容
 v' ——湿饱和汽的比容
 W ——功
 x ——湿饱和蒸汽的干度
 x_e ——能量系数
 x_k ——动能系数
 x_p ——压力系数
 μ ——喷水孔流量系数
 ρ ——海水密度
 φ ——附加水惯性力系数
 α ——海水中含淡水百分度
 $\mu\sigma_f$ ——流量系数与总压恢复系数之积
 λ ——喷水压差系数

注角符号意义:

a —— 空气
C —— 燃烧室
e —— 出筒参数
g —— 燃气
l —— 水, 水蒸气
m —— 导弹
M —— 弹动参数
n —— 变量
P —— 定压参数
s —— 饱和状态
t —— 发射筒
v —— 定容参数

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 导弹发射系统及发射过程简介	1
1.2 内弹道指标	1
1.3 研究导弹发射内弹道的目的及内容	2
1.4 导弹发射内弹道的特点及研究方法	3
1.5 导弹发射内弹道的研究发展概况	3
第 2 章 基本概念和基础知识	5
2.1 热力系	5
2.2 平衡状态及状态方程	6
2.3 热力过程、准静态过程和可逆过程	8
2.4 气体的比热	8
2.5 热力系的储存能	9
2.6 功	10
2.7 热量	11
2.8 热力学第一定律表达式	12
2.9 水的汽化过程和水蒸气的状态参数	15
2.10 理想混合气体的压力、内能和焓的计算	17
2.11 可逆过程及不可逆过程的能量贬值	18
第 3 章 发射动力系统简介	21
3.1 概述	21
3.2 结构、工作原理与性能参数	23
3.3 变深度发射动力系统和有用能调节机构	30
第 4 章 导弹发射内弹道方程	33
4.1 热力系的选取与基本数学模型的建立	33
4.2 基本假设	35
4.3 流量方程	35
4.4 能量平衡方程式	36
4.5 状态方程	38
4.6 运动方程	40
4.7 内弹道方程组	42
4.8 数值积分关系式	43
4.9 几种特殊情况下的内弹道方程组	43

第 5 章	内弹道方程的解法	44
5.1	分段解法	44
5.2	静力学时期解法	44
5.3	动力学时期解法	45
5.4	计算机程序和流程图	46
5.5	关于内弹道方程解法实践问题讨论	46
第 6 章	导弹发射内弹道设计	52
6.1	内弹道设计基本要求	52
6.2	内弹道设计方案优劣的评价标准	52
6.3	内弹道设计的基本关系式	54
6.4	内弹道设计的基本步骤和方法	59
6.5	内弹道设计计算举例	60
第 7 章	导弹发射内弹道仿真技术研究	64
7.1	概述	64
7.2	系统仿真的基本概念	65
7.3	导弹发射内弹道数学仿真	69
7.4	变深度发射与数学-物理仿真技术研究	74
7.5	缩比模型试验(物理仿真)研究	87
第 8 章	内弹道试验	103
8.1	内弹道试验的作用	103
8.2	内弹道试验分类	104
8.3	燃气发生器地面试车	104
8.4	发射动力系统空放试验	105
8.5	陆上发射模型弹试验	106
8.6	水下发射模型弹试验	107
8.7	陆上和水下发射遥测弹试验	108
8.8	试验分析报告	108
第 9 章	内弹道参数的测量方法	110
9.1	概述	110
9.2	压力测量方法	110
9.3	温度测量方法	113
9.4	导弹运动速度、加速度测量方法	115
9.5	测试报告	119
第 10 章	导弹发射内弹道误差分析方法	120
10.1	概述	120
10.2	有关误差的基本知识	121
10.3	内弹道参数测量的误差分析	126
10.4	内弹道参数计算的误差分析	133

10.5	误差传递理论初探·····	135
第 11 章	导弹发射内弹道在产品研制中的作用 ·····	137
第 12 章	导弹发射内弹道的推广应用 ·····	139
12.1	对飞机弹射系统的分析与基本假设·····	139
12.2	飞机弹射内弹道方程的建立·····	140
12.3	蒸汽弹射系统内弹道设计的基本关系式·····	146
12.4	发射阀供汽规律研究·····	149
12.5	内弹道设计计算举例·····	151
12.6	基本看法·····	156
第 13 章	集中注水式内弹道计算方法简介 ·····	157
13.1	概述·····	157
13.2	连续注水与集中注水·····	157
13.3	内弹道方程简介·····	158
13.4	应用效果分析·····	160
第 14 章	导弹发射内弹道目前的研究水平及进一步发展方向 ·····	162
14.1	导弹发射内弹道目前的研究水平·····	162
14.2	应继续开展的研究工作·····	164
附录 1	饱和水与饱和蒸汽表(按压力排列) ·····	166
附录 2	未饱和水与过热蒸汽表 ·····	168
参考文献	·····	176

第1章 绪论

1.1 导弹发射系统及发射过程简介

水下动力发射潜地弹道导弹发射系统简化模型如图 1-1 所示。

水下动力发射潜地弹道导弹的发射系统主要由发射筒、水密装置、适配器以及发射动力系统组成；发射动力系统又由点火保险机构、燃气发生器、冷却器、弯管等部分组成。其发射过程如下：燃气发生器点火后，装药按设计规律燃烧，产生高温、高压气体。当燃气流经冷却器时，建立喷水压差，迫使冷却水从水室经喷水孔连续喷入燃气流中，与燃气一起进入发射筒。高温燃气与水进行热交换，并使水汽化。这一过程一方面降低了高温燃气的温度，同时又在发射筒内形成由燃气-水蒸气组成的混合气体，并依靠其在发射筒内建立起来的压力，克服导弹重量及各种阻力，把导弹弹射出去，获得预定的出筒速度。

1.2 内弹道指标

导弹发射系统除了必须安全、可靠地把导弹弹出发射筒外，还必须满足导弹总体所提出的各项内弹道指标的要求。这些指标是：导弹出筒速度满足某一允许值及其误差范围；导弹在发射筒内的运动加速度不大于某一允许值；发射筒内工质气体的压力不大于某一允许值；发射筒内工质气体的温度不大于某一允许值。上述四项指标称为内弹道四大指标。当然，对于这四项指标也有一定的侧重，比如导弹的出筒速度，这是导弹进入水中弹道的初始条件，关系到弹的出水姿态等问题，因此显得更为重要；发射筒内压力及其变化规律是满足四项指标的关键。另外即使对四项指标都能满足要求，也

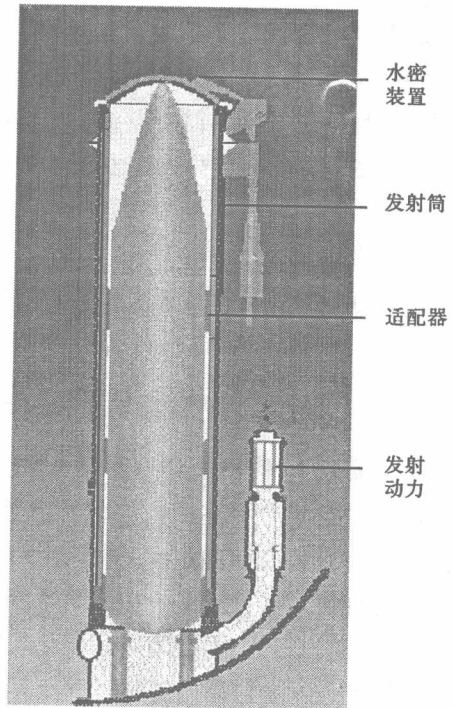


图 1-1 导弹发射简化模型

还有内弹道性能优劣的问题。在设计阶段以内弹道指标为依据;在试验和定型阶段以达到内弹道指标为目标。总之,满足内弹道指标是内弹道课题的责任,它将贯穿发射系统研制的全过程,也是发射系统研制的最终归宿。

1.3 研究导弹发射内弹道的目的及内容

1.3.1 研究导弹发射内弹道的目的

研究导弹发射内弹道的规律,一方面可为导弹发射技术提供一个可靠的理论依据;另一方面,也是更重要的方面,是通过对这些规律的认识去指导实践,指导设计和改进发射动力系统。因此,其目的是:

- a. 在发射动力系统设计阶段,提供发射动力系统的设计依据;提出发射动力系统的改进方法和途径。
- b. 在性能和结构方面对发射动力系统进行优化设计,优化试验参数和试验方案。
- c. 为发射导弹提供内弹道预示参数,为计算水中弹道和空中弹道提供初始参数。
- d. 调节和确定发射动力系统技术状态,在研制性试验和定型试验中,使发射内弹道参数满足总体设计要求。
- e. 通过内弹道分析计算来分析影响内弹道参数的因素,从而达到控制内弹道参数的目的。

1.3.2 导弹发射内弹道的研究内容

为了实现上述目标,导弹发射内弹道主要研究下述内容:

- a. 通过对导弹发射系统进行分析,建立描述发射系统的数学模型即内弹道方程。
- b. 通过求解内弹道方程,研究导弹在发射筒内的运动规律,即导弹运动速度、加速度随时间变化规律及其特征值——出筒速度与最大加速度;研究发射筒内工质气体状态变化规律,即发射筒内压力、温度随时间变化规律及其特征值——最高压力和最高温度。
- c. 研究进入发射筒内的燃气量及其流量规律,冷却水量及其流量规律;建立关于内弹道设计的有关方程,为发射动力系统设计提供基本设计参数。
- d. 进行内弹道试验研究,验证内弹道方程的准确性以及所设计的发射动力系统能否满足总体性能要求,以便进一步改进和完善内弹道计算方法,修改发射动力系统的设计。

上述内容一方面是研究怎样才算满足总体设计要求;另一方面是研究如何才能满足总体设计要求。

1.4 导弹发射内弹道的特点及研究方法

1.4.1 导弹发射内弹道的特点

与火炮内弹道相比,导弹发射内弹道具有如下特点:

- a. 导弹装在与其体积相当的发射筒空间内,要求弹射过程变化平稳。在获得预定的出筒速度的同时,导弹的运动加速度不能超过允许值。因此内弹道设计的难度很大。
- b. 推动弹做功的能量是从发射筒外输入的,除了要考虑工质气体本身的内能转换为弹运动的机械能外,还要考虑由于热力系本身宏观动能的变化所引起弹运动参数的变化。
- c. 导弹发射内弹道要求工质气体的温度不能太高,因此必须具有冷却装置。研究燃气和冷却水的热交换规律成为导弹发射内弹道的主要特点之一,也是导弹发射内弹道的难点所在。
- d. 由于导弹从水下弹射出来,周围介质的影响,以及由水密装置造成复杂的阻力变化影响,也是区别于火炮内弹道的重要特点。

1.4.2 导弹发射内弹道的研究方法

导弹发射过程是一个复杂的物理化学过程,首先必须对发射过程所出现的各种矛盾加以分析,采取抓主要矛盾的方法,通过抓主要矛盾、解决主要矛盾来揭示事物的本质。而对一些次要的和认识不完全的矛盾,则必须通过假设加以简化,或通过试验进行恰当的工程处理。

“实践—认识—再实践—再认识”也是一条基本的研究方法。导弹发射内弹道就是在理论研究和试验研究的相互促进、相互提高的基础上发展起来的。

1.5 导弹发射内弹道的研究发展概况

导弹发射内弹道在理论上和实践上都是一项复杂的研究课题,因此它伴随着导弹发射技术的研究也经历了一个发展和完善过程。其发展过程大致如下:

1.5.1 燃气—水蒸气发射动力系统和燃气—水蒸气内弹道方程的建立

在研制初期,为了建立感性认识,采用压缩空气或不进行冷却的火药气体作工质,进行一些小比例试验。为此也要建立一套简单的内弹道方程。然而这些方程终不能满足水下发射导弹的特殊要求和导弹总体部门提出的指标要求。经论证必须采用冷却装置。水既廉价且汽化潜热又大,可作为良好的冷却剂。因此伴随采用燃气—水蒸气发射动力系统,建立起

燃气-水蒸气内弹道方程,用于研究为满足导弹总体性能指标要求所必须的发射动力系统参数选择和优化设计等问题。

1.5.2 水蒸气对内弹道性能的调节与湿蒸汽过程内弹道方程的建立

实践表明,水既能有效地降低高温火药气体的温度,又能调节和稳定内弹道性能。据国外资料报导,冷却水和火药的比值在1~2之间其效果较佳。然而给发射内弹道研究带来的新问题是必须建立具有湿蒸汽过程的内弹道方程。因此,在认真分析工质状态并作必要的假设基础上建立起反映冷却水加热过程、汽化过程和过热过程的内弹道方程。实测数据表明:虽然整个发射过程时间很短,但仍然明显地表现出三种不同的工质状态,使内弹道方程更真实地描述了发射筒内工质的状态,并使导弹发射内弹道的研究向前迈进了一大步。

1.5.3 研究水密装置效应,根据实际情况研究解决内弹道中的实际问题

由于导弹发射装置的特殊性,对导弹发射内弹道的力学分析,就不能像弹在水中和空中那样在同一介质环境中进行分析。其中水密装置效应对导弹运动阻力造成的复杂变化影响,既区别于火炮发射内弹道,又区别于水中弹道和空中弹道的力学分析。通过理论研究和试验研究能比较好地解决这一特殊力学问题。同时也使内弹道的研究有了新的突破。

1.5.4 研究工质气体动能做功,解决工质气体从发射筒外流进的特殊问题

与火炮内弹道相比,发射导弹时用于推动导弹运动的工质是从筒外流入的。因此工质气体除具有内能外,还具有宏观动能。此动能对导弹所获得的有用能仍有贡献。通过理论研究和试验研究也较好地解决了这一特殊问题。

1.5.5 引入实际气体状态方程,使内弹道方程更加完善和准确

过热水蒸气在压力不太高、温度不太低的情况下,工程上可以视为理想气体。然而对于水、汽共存的湿蒸汽,则必须引入实际气体状态方程其概念才正确。伴随而来的问题是,也不能应用道尔顿定律计算混合气体的压力。经过调研、分析、比较,将马丁-侯(M-H)实际气体状态方程和温度函数混合法则引入内弹道方程,不但概念正确,而且计算的准确性更高,取得的效果更好。

第2章 基本概念和基础知识

为了便于理解内弹道方程的建立过程,本章先把主要的、与内弹道学联系紧密的一些基本概念和基础知识简述如下。详细研究可见有关参考书。

2.1 热力系

2.1.1 定义

在分析任何现象和任何过程时,首先应明确研究对象。如在分析力学问题时,常将研究对象取作分离体,然后分析它与有关物体的相互作用。同样,在分析热力现象时,也应根据研究问题的需要,在相互作用的各部分物质中,选取某一范围的物质,作为研究对象。我们将这种作为研究对象而选择的一定范围的物质称为热力系统,或简称为热力系。与系统有关的外部物质称为外界,系统与外界的分界面称为边界。边界可以是实际设备的器壁,也可以是假想的边界。

不明确选择热力系,就无法研究热力系中的有关问题;同样,热力系的选择方式不一样,研究方式甚至研究结果也就不同。因此,正确选择热力系是研究,分析力、质量、热、功等问题的前提。

2.1.2 热力系的分类

按热力系与外界进行质量交换的情况可将热力系分类为:

a. 闭口系(或闭系):热力系与外界无物质交换,或者说没有物质穿过边界。此时热力系内部的质量将维持固定不变,称为“控制质量”。故闭系是我们所研究的某“控制质量”。

b. 开口系(或开系):热力系与外界间有物质交换,或者说有物质穿过边界。这种热力系内部的质量可以是变化的。这时,我们可以把研究的对象规划在一定的空间范围内,这种空间范围叫作控制容积。故开系是我们所研究的某“控制容积”。

热力系还有其它一些分类方法,此处不再一一介绍。

2.2 平衡状态及状态方程

2.2.1 状态、基本状态参数

在能量传递和转换过程中,工质本身的状况都在不断地变化,我们将热力系统中工质在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为系统的热力状态,简称状态。

用以描述系统状态的状态参数,常用的有压力、温度、比容、内能、焓和熵等。其中压力、温度和比容可直接被测量,其它状态参数又可根据压力、温度、比容计算得出,故压力、温度和比容称为基本状态参数。

2.2.2 平衡状态

一个热力系统,在不受外界影响条件下,系统的状态保持不变,则系统的这种状态称为热力平衡状态,简称平衡状态。对于一个不存在化学反应的热力系统,只有同时具备了热和力的平衡,系统才能处于平衡状态。

处于平衡状态的系统,只要不受外界的影响,平衡不会自发地破坏,它的状态不随时间而变;处于不平衡状态的系统,由于系统内各部分之间的热传递和位移,其状态将随时间的变化而变化,总会自发地恢复平衡状态。实际上完全不受外界影响的平衡状态是不存在的。但在许多情况下,系统的实际状态偏离平衡状态不远,此时可按平衡状态对待。

对于处于平衡状态的气体(或液体),如忽略重力场的影响,则气体内部的温度、压力和密度等状态参数均有确定的数值。这些参数也都能在参数坐标图(如 $P \sim V$ 图)中表示出来,反之,由于不平衡状态,系统没有确定的状态参数,因此在图上没有确定的点,显然,参数坐标图不能表示非平衡状态。我们所研究的热力系都是指处于平衡状态的热力系。

2.2.3 理想气体状态方程

对于大多数气体来说,由于气体分子本身的体积与分子之间的距离相比可以忽略不计;分子之间的相互作用力也可以忽略不计,对于这样一个假想的气体模型叫作理想气体。

在平衡状态下,理想气体的状态参数之间存在下列数学关系,这些关系式叫作理想气体状态方程。

$$\text{对于 } 1\text{kg 气体有} \quad pv = RT \quad (2-1)$$

$$\text{对于 } m\text{kg 气体有} \quad PV = mRT \quad (2-2)$$

$$\text{对于 } 1\text{kmol 气体有} \quad PV_m = \mu R_m T \quad (2-3)$$

上列各式中:

P ——气体绝对压力,单位 Pa;

v ——气体的比容,单位 m^3/kg ;

V ——气体容积,单位 m^3 ;

m ——气体质量,单位 kg ;

R ——气体常数,取决于气体性质,同一种气体, R 为常数。单位 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

V_m ——千摩尔容积,单位 m^3/kmol ;

R_m ——通用气体常数,单位 $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;

μ ——摩尔数。

R 与 R_m 的关系为

$$R = \frac{R_m}{M} \quad (2-4)$$

M 为千摩质量,在数值上等于气体的分子量,以千克为单位。

理想气体虽然是一个假想的气体模型,但对大多数气体来说在常温常压下都可视为理想气体。对某些气体来说,当压力不太高,温度不太低时按理想气体对待,导出的状态参数间的关系产生的误差也在允许的范围内,也可以用理想气体状态方程计算。因此理想气体状态方程具有广泛的应用价值,而且大大简化了工程计算。

2.2.4 实际气体的状态方程

在某些蒸汽动力装置中的蒸汽,或者水汽共存状态下的水蒸气,或者制冷装置中的制冷工质,由于它们离液态不远,因而不能把它们简化为理想气体,都应作为实际气体对待。

由于实际气体的分子体积不能忽略,分子之间的作用力不能忽略,因而用于实际气体最基本的状态方程是引入体积修正项和分子引力修正项的范德瓦耳方程式,其形式为

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad (2-5)$$

将式(2-1)和式(2-5)相比, p 变成了 $\left(p + \frac{a}{v^2}\right)$,修正了分子间的引力; v 变成了 $(v - b)$,修正了体积。然而,范德瓦耳方程并不能解决水蒸气的问题。乌卡洛维奇所导出的实际气体状态方程目前认为是比较准确的,但这个方程十分繁杂。经有关专家的推荐,马丁-侯(M-H)实际气体状态方程既准确且又比较简单,现介绍如下:

$$P = \frac{RT}{v - b} + \frac{A_2 + B_2 T + C_2 e^{-5.475T/T_k}}{(v - b)^2} + \frac{A_3 + B_3 T + C_3 e^{-5.475T/T_k}}{(v - b)^3} + \frac{A_4}{(v - b)^4} + \frac{B_5 T}{(v - b)^5} \quad (2-6)$$

经与极性和非极性物质的实测数据相比较,表明此方程在气相的偏差通常在1%以内。因此,本方程被采用到内弹道方程中来。

2.3 热力过程、准静态过程和可逆过程

2.3.1 热力过程

对于一个处于平衡状态下的热力系,如果其过程不发生任何变化,那么它也就没什么实际意义了。处于平衡状态下的系统当其受到外界影响时,其状态即发生变化。系统经过一系列状态变化后,又平衡在一个新的平衡状态。因此,热力学将从一个状态出发,经过一系列的中间状态而变化到另一个平衡状态的过程称为热力过程,简称过程。

2.3.2 准静态过程

如前所述,由于只有平衡状态,才有确定的状态参数,才能用状态方程式表示状态参数间的关系。当一个系统从一个平衡状态变化到另一个平衡状态时,中间经历了一系列不平衡状态,对这一系列的不平衡状态又如何进行分析计算呢?故热力学又引入一个理想的过程——准静态过程(又称准平衡过程)。准静态过程是指在该热力过程中,系统所经历的一系列中间状态都无限接近平衡状态。即过程中系统的每一次状态变化都无限小的偏离原平衡状态。

严格地说,实际热力过程都是不平衡过程,但在一定的条件下,可近似地视为准静态过程,因而也就可以应用状态方程进行分析计算了。

2.3.3 可逆过程

在过程的进行中,若满足下列两个条件即为可逆过程。

(1) 过程进行中,系统内部、系统与外界之间,热和力的不平衡都无限小,即系统进行的是准静态过程。

(2) 过程中不存在摩擦等耗散效应。

任何实际过程都是不可逆过程,可逆过程只是一种理想的极限过程。但它的实际意义在于一方面便于理论分析和计算,另一方面可以作为实际过程中能量转换效果的标准,因此,可逆过程也是热力学极为重要的概念。

2.4 气体的比热

比热是物质本身的一种属性,也是热力计算中的重要参数。由物理学可知,单位质量的物质温度升高(或降低)1K(或1℃)时吸入或放出的热量称为比热,符号用 C 表示,其国际单位为: $J/(kg \cdot K)$ 。