

PEARSON

推进力学和热力学

MECHANICS AND THERMODYNAMICS OF PROPULSION

[英] 菲利普·希尔(Philip Hill)

[美] 卡尔·彼得森(Carl Peterson)

著

侯敏杰 吴 锋 译



航空工业出版社

推进力学和热力学

Mechanics and Thermodynamics of Propulsion

[英] 菲利普·希尔 (Philip Hill)

[美] 卡尔·彼得森 (Carl Peterson)

著

侯敏杰 吴 锋 译

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书是作者将流体力学和气动热力学的基础理论、进排气系统、推进系统工作原理等知识系统地融会贯通,集理论研究过程、理论公式详解、实例展示,以及引申思考于一体的精华之作。全书共分三大部分、14章及10个附录,主要内容包括:喷气推进原理,流体力学及气动热力学,理想气体的稳态一维流动,边界层机理及换热,飞机喷气发动机热力学,进气道、燃烧室和喷管气动热力学,轴流式压气机及涡轮,离心式压气机,火箭运载器性能,化学火箭推力室、推进剂、燃烧和膨胀,液体推进剂火箭中的叶轮机械,以及电推进。

本书可作为科研院所和高等院校的航空航天、能源动力等专业的科研及教学参考用书,也可作为从事相关领域工作的非航空专业科技人员的学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

推进力学和热力学 / (英) 希尔 (Hill, P.), (美) 彼得森 (Peterson, C.) 著; 侯敏杰, 吴锋译. -- 北京: 航空工业出版社, 2015. 11

书名原文: Mechanics and Thermodynamics of Propulsion

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0938 - 8

I. ①推… II. ①希… ②彼… ③侯… ④吴… III. ①航天推进—动力学—教材②航空发动机—热力学—教材 IV. ①V23②V43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 282411 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01 - 2013 - 9226

Authorized translation from the English language edition, entitled MECHANICS AND THERMODYNAMICS OF PROPULSION, 2E, by HILL, PHILIP; PETERSON, CARL, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 1992.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and CHINA AVIATION PUBLISHING & MEDIA CO., LTD Copyright © 2015.

推进力学和热力学
Tuijin Lixue he Relixue

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2015 年 11 月第 1 版

2015 年 11 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 37.5

字数: 889 千字

印数: 1—2000

定价: 136.00 元

序 言

本书的基本前提是一些基本物理规律的正确应用,可以使得机械和航空航天工程专业的学生对于所有形式飞机和航天器的推进方式有一个更加深入的理解。此外,这些规律的正确应用可以直接作为定量的性能估计手段;并且,正确应用这些规律也可以阐明设计改进的可能性。毫无疑问,只有基于物理规律的基本原理层次,人类才不仅可以解答事物如何工作、为什么能工作,而且可以解答一些更具挑战性的问题,事物为什么能改进、如何改进。

当然,也不必过分地强调基本原理;只有在应用中,基本概念才具有生命力,才能鼓舞和刺激原理分析和发明创造。有时候,令人感到吃惊的是一些基本概念可以简化,将巨大繁杂的信息量简化到容易理解、处理的类别。基本原理针对具体工程的应用不仅可以大大增加学生的实践能力,同时也将加深学生对于原理本身的理解程度。

本书的第1版在过去的25年已经被数以千计的工程师采用,现在正是时候推出最新版。并不是因为推进的基本的原理发生了变化,而是从第1版问世至今,飞机及航天器方面的应用发展已经相当惊人。这一领域现在比以往都要令人感兴趣。因此,看起来推出最新版是合适的,不仅要反映近年来取得的巨大成就,也要体现为什么我们仍对进一步提升抱有期望。

在准备第2版的过程中,其中第一个目的是希望在书中提供能大范围覆盖现代飞机和火箭发动机的解释性材料;第二个目标是对相关的物理现象进行更为清晰的解释;第三个目标是在每一章结尾提供大量的问题供读者解答;第四个目标是在书中介绍了初步设计的步骤。

如今的学生有着性能非凡的电脑以及图形显示能力,借助于这些手段可以轻易地对潜在的新概念、新设计进行计算和显示。现实中对于机械结构和物理特性的处理在给定的时间内是相当容易实现的,因此,这个版本侧重于鼓励学生,通过设计案例和问题解答来审视初步设计的可行性,以此尽可能清晰地确定物理可能性以及相应的极限,以及确定结果的不确定性。举个例子,这并不是说在入门课上就可以使用纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程设计叶轮机,而是叶轮机的流体力学原理可以以更接近现实的方式进行处理,尽管更多的是近似,但简单的处理方式恰恰可以提供对叶轮机械如何工作以及如何设计的洞察能力。

在现有的并且推进工程专业学生能接触到的资源中,计算机代码程序是他们可以富有见识地、严谨地使用以用来显示某些重要现象的特性的资源。这些代码中,来自斯坦福大学(Stanford University)的W. C. 雷诺兹(Reynolds)所发展的名为STANJAN的程序可用于快速、多用途地评估高温燃气平衡组分。此外,在二维近似中,借助于个人计算机和本文中罗列的公式,边界层分离(对于叶轮机气动性能提升有着重要的限制

作用) 的处理现在变得非常容易。同样地, 也可以便捷地使用基本的电脑程序来考虑高温对于气体比热比的变化影响。总之, 现在的学生探索物理现象和设计可行性的手段被极大地增强了。

本质上的困难在于, 对于一门课程来说, 仅仅具有有限的时间可以提出新的创意。而这本书的涵盖范围比较全面, 大大超过了任一门课程, 因此是您的不二选择。

本书的第一部分主要回顾了一些关于气动热力学、燃烧、流动换热的主题, 这些主题都对发动机推进研究具有重要意义。第2章回顾了气动热力学中气流流过控制体在有化学反应和无化学反应条件下的情况。因为高速流动的重要性, 第3章着重介绍了可压缩流动、马赫数、激波。因为边界层对设计极限影响颇大, 所以第4章介绍了边界层的发展、分离及传热。

本书的第二部分专注于吸气式涡轮发动机。一上来首先分析了推进效率, 循环性能, 以及不同种类涡轮发动机的基本原理。紧接着介绍和分析了设计优良的进气道、燃烧室、喷管中应具备的流动特性。然后详细地介绍了压气机及涡轮的气动性能, 发展大流量、高效率的压气机一直以来都是涡轮发动机发展的一个重要挑战, 因此这些章节在一定深度上阐述了轴流以及离心压气机(同样还有涡轮)的专题。在每一章中, 首先解决的问题是这些涡轮发动机为什么以及如何工作; 然后分析了限制其性能的主要物理因素, 以及如何定量地描述这些因素; 最后是高度总结的初步设计步骤。如果读者没有时间深入每一章的后两部分, 那么第一部分也能带给读者相当完整的认识。(如果读者想在一个学期内学习火箭以及吸气式压气机, 那么这种选择是必需的。)

本书的第三部分主要介绍火箭推进系统。第10章给出了分析火箭动态特性的基本方法, 用于说明比冲和其他变量的意义, 同时展示如何确定满足太空飞行任务所需的推进系统。确定太空飞行任务需要关注太空飞行器的轨迹, 用于优化推进系统。第11~第13章主要介绍化学火箭推进系统。第11章主要介绍火箭喷管设计和优化的基本问题, 其中空气动力学特性和传热特性是重点关注的两个方面; 第12章主要分析液体和固体推进剂燃烧的重要特征, 本章的关键内容包括混合产物的解离过程和平衡/非平衡(甚至是两相流)膨胀过程; 第13章重点关注用于火箭飞行器的涡轮部件, 同时提供给定推进剂流速和压比条件下, 如何初步设计涡轮系统几何构型、尺寸和速度等参数。

本书第14章主要介绍电推进系统的特性, 重点论述为什么静电、电热、电磁推进具有优势, 以及如何最好地运用这些优势。

对于火箭推进的一个学期课程, 学生主要学习本书第2~第4章的基本内容, 并根据学习目标, 选取第10~第14章中的不同主题。

我们努力提高每一章节最后一部分的问题数量和问题陈述质量。给出这些问题旨在让读者通过每一个问题的解决都能够实现对某一类重要问题的深刻理解; 每一个问题都是可解析的(学生不应困惑求解过程如何开始)。针对某些通过文字表述无法清晰明了的问题, 我们给出相应指导, 以便于理解; 对于某些特定问题, 可以通过个人计算机进行初步设计求解。然而, 学生也不必要完成每一章节的所有题目。

针对本书中的数学求解部分, 我们假定读者已经具备微积分知识, 另一方面我们尽

量减少繁杂的数学问题推导,使得读者能够更加清晰地认识物理原理。读者应当通过稳态流动控制体分析,学习和体会工程分析方法,因为这种方法在后续一维/二维、可压缩/不可压缩、黏性/非黏性流动分析过程中不断使用。

为了让本书具备更高的可读性,我们将初步设计过程中的方程组推导放置于附录。有别于书中正文针对特定假设的讨论,附录中提供的方程推导足够详细,为更多设计假设衍变提供保证。

回顾本书第1版的编写,作者不禁想起 E. S. 泰勒 (Edward S. Taylor) 带给我们的巨大恩惠。在麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 燃气涡轮实验室多年岁月,他是我们的良师、益友和指引者。我们最初的写作内容,很大程度上是通过他的鼓励而产生的,在书中的一些章节仍显现出他的影响。

纵观本书,我们参考了 J. H. 基南 (Keenan) 和 A. H. 夏皮罗 (Shapiro) 的一些工作。他们作为大师,在气动热力学和流体力学的论述一直指引着我们,并深刻地影响着本书的整个内容。

本书第2版的筹备过程,离不开以下各位人士的良好建议和鼓励: A. 布莱恩 (Alexander Bryans), N. 坎普斯蒂 (Nicolas Cumpsty), J. 登顿 (John Denton), E. 格雷策 (Edward Greitzer), S. W. 霍索恩 (Sir William Hawthorne), W. 霍恩 (William Horne), H. 萨拉夫那马托 (Herbert Saravanamuttoo), G. 塞罗维 (George Serovy) 和 D. 威尔逊 (David Wilson), 同时也要感谢那些匿名审稿人,他们观点强烈,并提出改进提高的方向。本人非常感谢他们的帮助。

C. 伊托克 (Claire Eatock), B. 格雷瓜尔 (Bernie Gregoire), D. 肯尼 (David Kenney), J. 林肯 (Joyce Lincoln), D. 朗 (David Long), J. A. J. 里斯 (Rees) 和 J. 施坦格兰 (Joe Stangeland) 在提供发动机图片和数据方面给予了很大的帮助,在此表示衷心感谢。

我的妻子玛格丽特 (Marguerite), 她将整个困难的文字处理工作转化成一件事愉快的事情,以非常专业的方式完成文本处理工作,我对妻子的感激溢于言表。

剑桥, 丘吉尔大学
P. G. 希尔

译者前言

译者一直从事航空发动机研发的相关工作，在这些年的学习和工作经历里，最为推崇的就是这部由 P. G. 希尔 (Philip G. Hill) 先生和 C. R. 彼得森 (Carl R. Peterson) 先生编著的《推进力学和热力学》(Mechanics and Thermodynamics of Propulsion)，也被认为是航空发动机专业最著名的专业教材之一。

该书比较难得的是将流体力学和气动热力学基础理论、进排气系统、推进系统工作原理等知识系统地组织在一起，通过力学和热力学主线，将基础理论和工程实例相结合，既确保了理论公式的展开与推导，同时更注重知识系统的诱导与延伸。由于其系统性和权威性，也使该书成为了包括 MIT 在内的美国航空航天相关专业的专用教材，无论对在校学生还是航空航天领域的工作者都是必备的指导书。我们也将这本书推荐给了身边正在学习推进系统理论的年轻人。从个人经验来看，这本书能够让航空发动机专业的学习者少走弯路，让他们能够完成推进系统热力学与相关基础理论的一站式学习，更快捷和系统地掌握相关知识，从专业最底层深刻理解推进力学和热力学理论。这些促使我们萌生了将此书翻译为中文版本向国内同行推广的想法。

本书第一版于 1932 年在美国问世，当时一度被美国航空航天工程师广泛传阅，并逐渐成为了高校教材，是美国航空航天领域的权威之作。随着航空航天技术的高速发展，于 1992 年推出了最新一版，增加了对当时的航空航天推进系统的介绍，我们翻译的就是由艾迪生-韦斯利公司 (Addison-Wesley) 出版的最新版本。全书分为三个部分，共 14 章。

由于本书是行业经典之作，在翻译的过程中，也战战兢兢，倍感压力，只有尽力求语言表达精准，流畅易懂。也邀请多位院校教授和发动机行业的专家校阅、审稿，在此向百忙之中抽出大量时间和精力给予帮助的各位教授和专家表示由衷的感谢。同时也感谢航空发动机高空模拟重点实验室和航空工业出版社为本书的出版提供的大力支持。

最后，我们也要再一次向 P. G. 希尔先生和 C. R. 彼得森先生献上我们的敬意，感谢他们的努力，为我们带来了这本最经典的教材。

由于译者水平有限，翻译不当之处，恳请读者批评指正。

译者

2015 年 4 月

目 录

第 1 部分 基础科学导论和综述

第 1 章 喷气推进原理	(3)
1.1 引言	(3)
1.2 流体动量和反作用力	(4)
1.3 火箭	(6)
1.4 螺旋桨	(11)
1.5 涡喷发动机、涡扇发动机和冲压发动机	(13)
参考文献	(17)
第 2 章 流体力学及气动热力学	(18)
2.1 引言	(18)
2.2 基本方程	(19)
2.3 气体热力学	(25)
2.4 平衡状态燃烧热力学; 化学反应	(30)
习题	(43)
参考文献	(48)
第 3 章 理想气体的稳态一维流动	(50)
3.1 引言	(50)
3.2 理想气体一维流动的基本方程	(50)
3.3 等熵流动	(53)
3.4 非等熵流动	(55)
3.5 滞止温度变化的无摩擦等截面流动	(57)
3.6 等截面摩擦流动	(60)
3.7 激波	(64)
习题	(69)
参考文献	(72)
第 4 章 边界层机理及换热	(73)
4.1 引言	(73)

4.2 边界层方程	(78)
4.3 层流边界层计算	(83)
4.4 湍流边界层	(86)
4.5 边界层换热	(96)
习题	(101)
参考文献	(106)

第 2 部分 空气喷气发动机

第 5 章 飞机喷气发动机热力学	(111)
------------------------	-------

5.1 引言	(111)
5.2 推力和效率	(115)
5.3 冲压发动机	(122)
5.4 涡喷发动机	(129)
5.5 涡扇发动机	(139)
5.6 涡桨和涡轴发动机	(149)
5.7 典型发动机性能	(155)
5.8 发动机/飞机匹配	(161)
习题	(166)
参考文献	(171)

第 6 章 进气道、燃烧室和喷管气动热力学	(173)
-----------------------------	-------

6.1 引言	(173)
6.2 亚声速进气道	(173)
6.3 超声速进气道	(180)
6.4 燃气轮机燃烧室	(193)
6.5 加力燃烧室和冲压发动机燃烧室	(206)
6.6 超声速燃烧	(210)
6.7 排气喷管	(212)
习题	(215)
参考文献	(218)

第 7 章 轴流式压气机	(220)
--------------------	-------

7.1 引言	(220)
7.2 角动量	(221)
7.3 做功与压缩	(226)
7.4 单级压气机特性	(229)

7.5 多级压气机的工作特性	(234)
7.6 边界层限制	(240)
7.7 压气机效率	(254)
7.8 反力度	(263)
7.9 径向平衡	(264)
7.10 亚声速轴流式压气机设计	(268)
7.11 跨声速风扇级	(276)
习题	(284)
参考文献	(291)
第8章 轴流式涡轮	(293)
8.1 引言	(293)
8.2 轴流式涡轮级	(294)
8.3 级效率	(300)
8.4 转子叶片与盘应力	(304)
8.5 叶片冷却	(311)
8.6 涡轮性能	(317)
8.7 涡轮和压气机匹配	(318)
8.8 涡轮级设计	(322)
习题	(328)
参考文献	(335)
第9章 离心式压气机	(337)
9.1 引言	(337)
9.2 离心式压气机级动力学	(338)
9.3 进口导叶与叶轮	(345)
9.4 扩压器	(352)
9.5 典型性能	(356)
9.6 离心式压气机中级的设计	(359)
习题	(364)
参考文献	(368)

第3部分 火箭发动机

第10章 火箭运载器性能	(373)
10.1 引言	(373)
10.2 静态性能	(373)

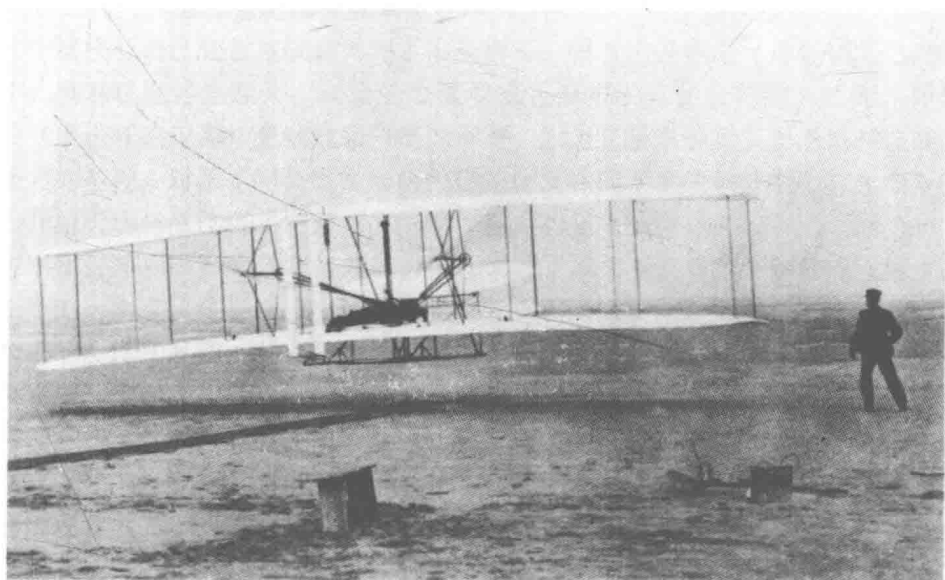
10.3	运载器加速度	(375)
10.4	化学火箭	(379)
10.5	电火箭飞行器	(390)
10.6	航天任务	(394)
	习题	(404)
	参考文献	(407)
第 11 章 化学火箭推力室		(409)
11.1	引言	(409)
11.2	性能特性	(410)
11.3	喷管	(415)
11.4	火箭传热	(430)
11.5	液体推进剂火箭性能数据	(444)
	习题	(445)
	参考文献	(450)
第 12 章 化学火箭推进剂：燃烧和膨胀		(452)
12.1	引言	(452)
12.2	液体推进剂	(452)
12.3	平衡组分	(454)
12.4	非平衡膨胀	(459)
12.5	液体推进剂燃烧室	(462)
12.6	固体推进剂	(468)
12.7	固体推进剂燃烧室	(475)
12.8	燃烧不稳定性	(482)
	习题	(483)
	参考文献	(487)
第 13 章 液体推进剂火箭中的叶轮机械		(489)
13.1	引言	(489)
13.2	离心泵	(494)
13.3	导流器与轴流泵	(500)
13.4	轴流式涡轮	(508)
	习题	(511)
	参考文献	(514)
第 14 章 电推进		(516)
14.1	引言	(516)

14.2 静电推进剂加速	(519)
14.3 轰击式电离	(522)
14.4 平面二极管	(527)
14.5 静电推进器性能	(531)
14.6 电弧加热推进器	(533)
14.7 脉冲-磁等离子体加速器	(536)
习题	(538)
参考文献	(540)

附 录

附录 I 单位换算和物理常数	(545)
附录 II 低压下的气体特性	(547)
附录 III 国际民用航空组织 (ICAO) 标准大气	(551)
附录 IV 亚声速轴流式压气机级的初步设计	(554)
附录 V 跨声速压气机级的初步设计	(560)
附录 VI 轴流式涡轮级的初步设计	(562)
附录 VII 带预旋的离心式压气机级的初步设计	(566)
附录 VIII 多级火箭优化	(570)
附录 IX 静电力和电磁力	(573)
附录 X 符号表	(578)
部分习题参考答案	(582)

第1部分 基础科学导论和综述



1903年12月17日北卡罗来纳州基蒂霍克 (Kitty Hawk): 世界上首架飞机飞行。著名的莱特兄弟 (Wright brothers) 的飞行机器是世界上第一个将人带到空中的飞机。奥维尔·莱特 (Orville Wright) 乘坐首架飞机, 脸朝下趴在双翼中的下机翼上。他的飞行离地面只有几英尺, 共持续 12 s, 飞行了 120 ft^①。(照片由美国国会图书馆和联合航空公司提供)

^① 1 ft = 0.304 8 m。——译者注

第1章 喷气推进原理

1.1 引言

本章目的是介绍喷气推进原理，以及历史上是如何理解和应用该原理的。即使喷气推进和火箭推进变得十分常见，但喷气推进原理依然难以理解。有很多困惑的问题，例如：

- (1) 一个喷气发动机或火箭发动机向真空排气时能够产生推力吗（无大气的反作用力）？
- (2) 火箭飞行器能够被加速到比离开其喷管的气体速度更高的速度吗？
- (3) 火箭飞行器能够运送有效载荷进入太空吗？

如今这些问题已经通过试验得到了准确解答，喷气推进理论（可以认为已经发展了数百年）现在已经建立起来，以至于今天看来它似乎没有什么问题。然而，即使到今天，喷气推进理论应当接受细致而严格的审查，因为它是理解真实发动机和性能提升发动机潜力的基础。对于不同类型发动机的理论含义在接下来的章节中会有详细介绍（此处我们开始给出与流体流动定量相关的喷气推力的基本解释）。

在牛顿（Newton）力学和经典热力学框架内，本书不仅要统一解释喷气推进设备是如何工作的，而且要统一论述喷气推进发展方向和未来重点方向。为了所有类型喷气推进发动机的设计和未来，对力学和热力学的充分理解是必不可少的。

火箭发动机和飞机发动机的设计提供了许多的实例，通过这些实例来发展优良技术是十分经济的。它不仅能极大地激励设计者应用各种可能的方法来使设计的产品更加强劲、高效、持久且安全，而且刺激了新技术的发展，这也是近10年来设计技术、材料和制造出现巨大进步的原因。计算机已经让基本知识和实践经验向优良设计的转变成为可能。研究发生了什么和考虑这些发展背后的原因，能够帮助我们看到未来技术发展可能成功的方向。

在对任一种形式的推进设备开展详细讨论之前，应该先考虑不同类型的火箭发动机和涡轮发动机的性能特点，以及它们为什么具有各自独特的应用和限制。例如，化学火箭功率很大，但是为什么不用它来推进宽体客机？对宇宙中的长距离飞行而言，为什么其他类型的火箭比化学火箭合适？为什么传统的螺旋桨受限制，但其仍是某些特定应用条件下的最佳选择？为什么在高速飞行中采用涡轮喷气（涡喷）发动机明显优于传统螺旋桨推进？涡轮风扇（涡扇）发动机和冲压发动机怎么样？本章几乎按顺序对上述问题做了初步解释，这些解释反映了流体动力学和热力学分析的重要性。

本章提到的未来可能的推进系统，不是要预言，而是要关注21世纪正在研制的推

进系统领域的发展。因为本章是介绍性的，且在考虑定量时非常近似，所以绕开了一些细节逻辑，这些细节将会在接下来的章节中进一步阐述。

1.2 流体动量和反作用力

理解喷气推进原理的一个简单方法是考虑如图 1-1 所示的管道。图 1-1 (a) 为具有横截面面积 A_i 的封闭管；内压力为 p_0 ，外压力（大气压）为 p_a 。很明显内外压力在 x 方向平衡，内部流体或者外界大气没有在管子上施加静推力。现在我们假设在 t_0 时刻瞬间移除管子右半边。图 1-1 (b) 给出了 $t_0 + dt$ 时为了使左半边管子静止而需要施加的推力 T ^①。在这个瞬时时刻，流体没有离开管子，并且左端内压力仍然是 p_0 。在管子出口处出现有限速度之前，施加在管子上的瞬时平衡力为

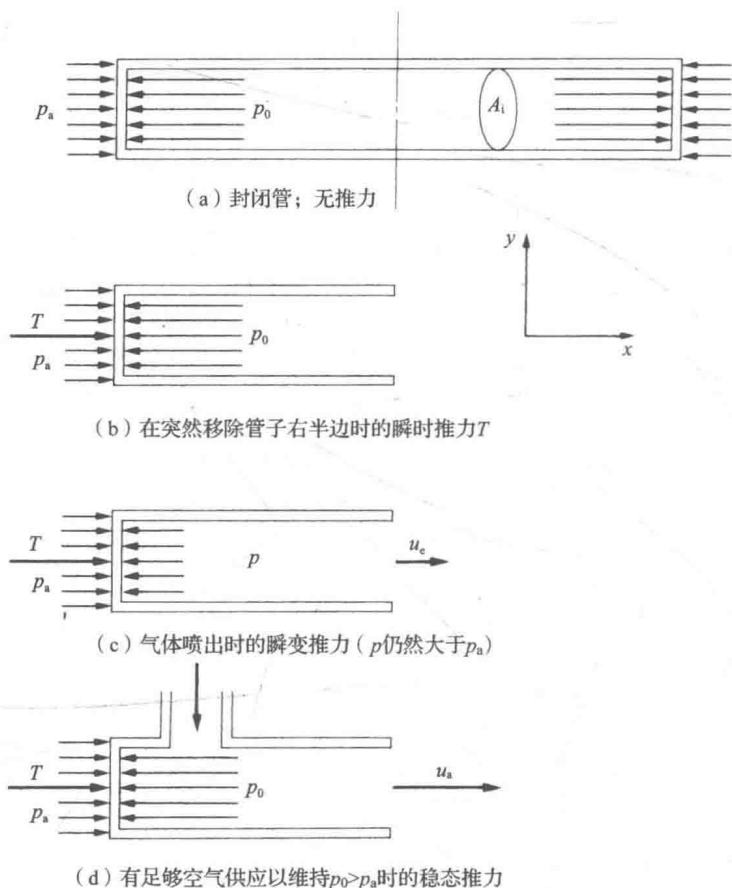


图 1-1 喷气推进

① 根据国标规定，推力用 T 表示，不采用花体 $\mathcal{T}$ 。——译者注

$$T = A_i (p_0 - p_a)$$

在很短时间间隔后, 流体以出口速度 u_e 立刻离开管子, 如图 1-1 (c) 所示, 此时左端内压力下降为 p 。推力变为

$$T = A_i (p - p_a)$$

并且推力很快会变为零, 为 $p \rightarrow p_a$ 。

如图 1-1 (d) 所示, 通过补充流体 (以其离开管子的速率) 可以产生稳定推力, 此时内压力保持为 p_0 , 推力仍然为

$$T = A_i (p_0 - p_a)$$

这里的估算方法忽略了流体施加在管壁上的剪力 (shearing force) 影响 (趋向于减小推力), 但是它们说明了普遍含义, 如果我们知道了推进器的内、外压力分布 (以及壁面切应力^① (shear stress)), 我们就可以通过累加所有表面上的受力来计算推力。

该方法在实际应用中的难点在于推进器内部几何形状复杂, 例如, 涡轮喷气发动机内部形状十分复杂, 以至于用这种方法计算推力将变得非常乏味。幸运地, 第 2 章将会介绍更加简单的方法来计算稳态推力。对于图 1-1 (d) 给出的稳态流动推进器, 应用牛顿定律 (见第 2 章) 能计算推力

$$T = \dot{m} u_e$$

式中, $\dot{m}$ 为流出腔体处的质量流量; u_e 为按质量平均的排气速度。

该方程看似是很有道理的, 因为我们认识到动量变化可以仅仅通过力的改变来实现。然而, 该方程只在外界剪力可以忽略且排气平面压力等于 p_a 时才成立 (更加普遍情况将在第 2 章和第 5 章中进行讨论)。可以看到在如此简化的条件下, 对于给定的出口动量通量, 推力与内压力和内部几何无关, 并且也与环境压力 p_a 无关。该方程直接适用于化学火箭; 谈到火箭喷管, 其出口动量通量的产生源于储藏于飞行器内的固态或液态推进剂的燃烧, 推进剂自身并无初始动量。

如果火箭推进剂的燃烧过程是“几乎稳态”的, 就可以通过 $\dot{m} u_e$ 来粗略估计推力大小; 如果该过程是高度非稳态的, 就需要用更加复杂的表达式来计算推力, 该式可通过将牛顿定律应用于快速加速气流得出。

至此, 我们已经通过静止的“火箭”讨论了推力问题。如果火箭在快速运动时又是什么情况呢? 如果它几乎是匀速直线运动, 随它一起运动的观察者 (测量相对与火箭运动的排气速度为 u_e) 将能得到与我们之前讨论过的、相同大小的推力 $\dot{m} u_e$ 。如果火箭本身加速非常快, 就需要对该推力表达式进行动力学修正。

值得注意的是, 给定相对于火箭运动的出口动量变化后, 推力大小就与火箭的飞行速度无关。因此火箭可以被加速至高于 u_e 的速度。

大约 2000 年前, 亚历山大港的海罗 (Hero of Alexandria) 用他的蒸汽“涡轮”证明了反作用力概念, 图 1-2 为想象图。由加热产生的蒸汽 (可能几乎是稳定速率), 压

^① 根据 GB 3102.3—1993《力学的量和单位》的规定, shear stress 译为“切应力”, 旧称“剪应力”。——译者注