



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

航空 燃气轮机原理

彭泽琰 刘刚 桂幸民 黄勇 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

航空燃气轮机原理

彭泽琰 刘刚 桂幸民 黄勇 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书重点介绍航空燃气涡轮发动机主要部件(风扇、压气机、主燃烧室、涡轮、加力燃烧室)的工作原理、设计概要和部件非设计工况特性与控制。为跟踪研究现代先进燃气轮机关键技术,本书还增添了专门章节,简要介绍压气机、涡轮和燃烧系统的新技术发展和应用,全书还多处提及中国科技人员在此领域的贡献和成就。本书是根据飞行器动力工程专业的航空燃气涡轮发动机原理的教学大纲编写而成的,读者对象主要是飞行器动力工程专业的大专生、本科生和研究生,也可供从事叶轮机械、燃烧及热机领域的广大科技人员参考。本书讲述的内容、方法以及经验数据对船用和工业用燃气轮机等动力系统的教学与科研人员均有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

航空燃气轮机原理 / 彭泽琰等编著. —北京: 国防工业出版社, 2008. 9

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 05868 - 0

I. 航... II. 彭... III. 航空发动机: 燃气轮机 - 高等学校 - 教材 IV. V235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 107636 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 22 1/4 字数 515 千字

2008 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 45.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

前 言

《航空燃气轮机原理》一书经国家教育部审定为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。它是根据飞行器动力工程专业的航空燃气涡轮发动机原理的教学大纲编写而成的。

本书讲授燃气涡轮发动机的主要部件(风扇、压气机、主燃烧室、涡轮、加力燃烧室)的工作原理、设计概要以及非设计工况特性与控制。全书由第一篇航空叶片机原理和第二篇燃烧与燃烧室组成。

在本书的编写过程中,既继承了我国编写和使用过的多种教材和讲义中的经典部分,又吸收了近期本学科发展及国内外新著中的先进材料。为培养本专业学生的科研创新能力,激励钻研航空高科技的兴趣和跟踪研究国外先进航空燃气轮机关键技术之飞跃发展,本书还用一定篇幅介绍和分析近期已采用和今后可能采用的风扇、压气机、燃烧系统和涡轮的关键新技术,全书多处提及中国科技人员在相关领域的贡献和成就。

此外,在本书的内容选取和编排方面,还特别注意吸取编者积累多年的课程讲授经验、参加国内重要型号研制和科学研究的成果。在讲清基本概念和物理图画的基础上,增加和丰富有关联系部件设计和使用实践方面的讨论内容。为巩固所学知识并开创思路,全书各章后均附有小结(有关重要概念和论点以及常用公式等)和思考练习题。

本书第一篇由彭泽琰、桂幸民编著,其中叶片机三元流场计算引论由桂幸民撰写,其余部分由彭泽琰完成。第二篇由刘刚、黄勇编著,其中大部分内容由刘刚编著,黄勇则着重补充了燃烧背景知识、一些重要的基础理论以及近期各种燃烧技术的进展等。

书中涡轮和燃烧部分,重点参考了郭秉衡、王洪铭和杜声桐曾编写的教材。本书原版(现为修订补充版)曾经朱方元、王洪铭审阅。在此特向他们表示感谢。

本书为本科生基本教材,但有关部分内容则适用于研究生(含博士生)和设计科研人员参考。由于编者水平有限,书中可能有错误和不妥之处,请读者批评指正。

作 者

2008年6月10日

目 录

第一篇 航空叶片机原理

第一章 绪论	1
第一节 叶片机概念和叶片机的主要形式	1
第二节 航空叶片机的发展概况	3
小结	5
思考和练习题	5
第二章 气体在叶片机内运动应遵循的基本方程	7
第一节 连续方程	7
第二节 能量守恒方程(热焓形式的能量方程)	7
第三节 热力学第一定律方程	9
第四节 机械能形式的能量方程(广义伯努利方程)	9
第五节 动量守恒方程(欧拉方程)	11
第六节 动量矩方程	12
小结	13
思考和练习题	13
第三章 轴流式压气机工作原理	14
第一节 压气机中的气动热力过程	14
第二节 多级轴流式压气机的分解研究方法	16
第三节 基元级的速度三角形	17
第四节 在基元级中对气流的加功和增压	19
第五节 压气机叶栅的基本参数	25
第六节 轴流式压气机级的工作原理	37
第七节 轴流式压气机超声速级和跨声速级的特点	65
第八节 多级轴流式压气机	70
第九节 轴流式压气机新技术的发展和应用	78
小结	88
思考和练习题	91

第四章 轴流压气机的非设计和非稳定工况 95

 第一节 引言 95

 第二节 单级轴流压气机特性 95

 第三节 多级轴流式压气机特性的特点 98

 第四节 压气机的相似准则和轴流压气机的通用特性 100

 第五节 压气机的非稳定工况与进口流场畸变 107

 小结 119

 思考和练习题 120

第五章 离心式压气机 123

 第一节 离心式压气机的基本组成部分和工作概况 123

 第二节 空气在进气装置中的流动 124

 第三节 空气在工作轮中的流动 124

 第四节 空气在扩压器中的流动 128

 第五节 离心式压气机的损失和效率 131

 小结 132

 思考和练习题 132

第六章 涡轮 133

 第一节 涡轮的基元级 133

 第二节 涡轮级和多级涡轮 145

 第三节 涡轮特性 154

 第四节 涡轮部件的材料、工艺和冷却 161

 第五节 径流式涡轮 164

 第六节 涡轮新技术的发展和应用 166

 小结 168

 思考和练习题 170

主要参考文献 173

第二篇 燃烧与燃烧室

第七章 绪论 175

 第一节 燃烧与燃烧室本质 175

 第二节 燃烧研究进展 176

 第三节 权威学术文献与国际奖项 188

 小结 190

思考和练习题	191
第八章 燃烧理论基础	192
第一节 燃烧热力学基础	192
第二节 化学动力学基础	199
第三节 着火理论	211
第四节 预混可燃气体的火焰传播	224
第五节 火焰稳定	233
第六节 扩散燃烧	240
小结	249
思考和练习题	250
第九章 液体燃料的雾化与喷嘴	252
第一节 液体燃料的雾化	252
第二节 燃油喷嘴	259
第三节 影响喷嘴喷雾特性的因素	273
小结	275
思考和练习题	275
第十章 燃烧室工作过程及设计特点	277
第一节 气流流动过程的组织	277
第二节 燃烧区中燃料浓度场的组织	284
第三节 燃烧区中可燃混合物的形成与燃烧	285
小结	287
思考和练习题	288
第十一章 燃烧过程的物质平衡与能量平衡计算	289
第一节 燃烧过程的能量平衡	289
第二节 燃烧室的排气污染	296
小结	301
思考和练习题	302
第十二章 燃烧室工作性能	303
第一节 燃烧效率特性	303
第二节 燃烧稳定特性	308
第三节 燃烧室的流阻特性	309
第四节 燃烧强度及出口温度分布	314
小结	316
思考和练习题	317

第十三章 加力燃烧室	318
第一节 加力燃烧室工作特点	318
第二节 加力燃烧室工作原理	322
第三节 振荡燃烧	329
小结	333
思考和练习题	333
第十四章 燃烧系统技术的新发展和应用	335
第一节 高性能燃烧室的研究与发展	335
第二节 先进的设计方法和先进的燃烧诊断技术	339
第三节 其它先进燃烧技术	340
小结	341
思考和练习题	342
附录1 国产喷气燃料技术条件	343
附录2 焓值表	345
主要参考文献	348

第一篇 航空叶片机原理

第一章 绪 论

航空叶片机包括压气机(风扇)和涡轮,它们和燃烧室一样,是航空燃气轮机的重要组成部分。本篇主要阐述、讨论和研究航空叶片机的基本工作原理。本章将概略介绍叶片机概念和航空叶片机的发展概况。

第一节 叶片机概念和叶片机的主要形式

叶片机包括的范围很广泛,从人们生活中见到的电风扇到工业生产上用的各种形式的鼓风机和叶片式水泵;用于发电的水轮机和蒸汽轮机,以及航空发动机或舰船上用的螺旋桨、风扇、压气机、涡轮等统属叶片机范畴。它们的共同特点是都有叶片,且只作旋转运动而无往复运动部件。它们的工作原理都是建立在叶片和工质间的流体动力、能量交换以及工质在叶片机中的能量转换等基础上。工质可以是液体、气体或两相流体。本课程只讲授工质为气体的叶片机,且只讲授航空叶片机原理部分。但是,本书所讲内容对于研究和设计其它工业用叶片机亦具有参考价值。

由于叶片机是没有往复运动部件的旋转机器,因此,转子易于平衡(相对于曲柄、连杆、活塞等运动机构),适于高速旋转。我们知道,功率与转速和扭矩的乘积成正比,所以,高转速机器本身就意味着它可以是功率大、尺寸小的机器。此外,和往复式活塞发动机相比较,燃气轮机没有复杂的进、排气活门装置,气体流入和流出叶片机时都比较顺畅,因而有利于在单位时间内实现大量工质和叶片机之间的能量交换,这就是为什么一个尺寸不大(例如:约占 1m^3 空间)的多级涡轮部件,能发出数十万千瓦功率的原因。

由于叶片机工作原理主要建立在叶片与工质间的气体动力、能量交换以及工质在叶片通道中实现的能量转换等基础之上,所以,在叶片机原理中特别重视对气流的组织,尽量使流阻损失最小,使能量的交换以及能量的转换最为有效。

如果在叶片机上输入机械功,使工作轮转动,同时气流组织合适,气体流经叶片机后总压升高,则这种叶片机称为压气机。气体流经压气机时,从旋转的工作轮上获得能量,因而气体的总温和总压都得到提高。反之,如果高压和高温的气体流经涡轮叶片膨胀加速到低压和低温状态,同时气流组织良好,则高速气体有效地吹动叶片并在叶片机轴上输

出机械功,则这种叶片机称为涡轮(或气轮机)。气体流经涡轮时,推动工作轮旋转,气体把能量交给涡轮的工作轮(动叶)以后,总温和总压都下降。

叶片机按其工质流动的方向和增压(或膨胀)特征,可以分为轴流式、径流式和斜流式。由离心式和轴流式组成的压气机被称为混合式压气机。

图 1-1 为轴流式压气机和涡轮示意图。气体轴向流入和流出,气流的静压增加(或降低)是通过叶栅通道实现的。

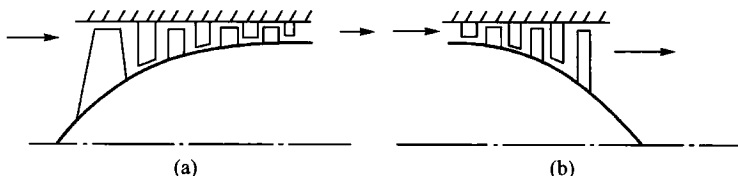


图 1-1 轴流式叶片机示意图
(a) 轴流式压气机; (b) 轴流式涡轮。

目前,在大型或中型航空燃气轮机中,主要用轴流式压气机和涡轮。它们的优点是效率高、径向尺寸小,因而适用于大流量、高性能的航空发动机。

图 1-2 为离心式压气机和径流式涡轮。离心式压气机的气体轴向(或径向)流入,径向流出(有的离心式压气机出口接轴向扩压器)。气体流经离心式压气机的叶轮,会受到强大的离心力作用,静压有效增高,离心增压(或向心膨胀)是径流式叶片机的重要特征。

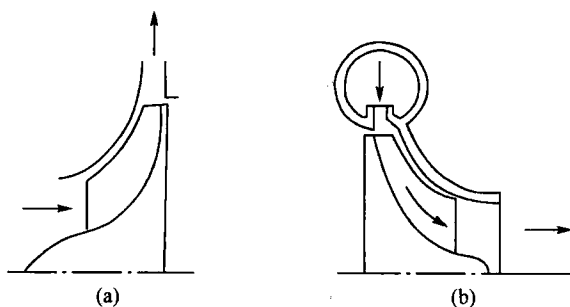


图 1-2 径流式叶片机示意图
(a) 离心式压气机; (b) 径流式涡轮。

离心式压气机在早期航空燃气轮机上曾经得到较广泛应用,目前,高性能的离心式压气机应用于小型航空发动机上。它的优点是结构简单、特性宽广,缺点是径向尺寸大和效率略低。径流式涡轮多用于航空附件。

图 1-3 为斜流式压气机示意图。气流轴向流入,斜向流出。气体流经斜流式叶轮静压提高,部分由于扩压叶栅作用,部分由于离心增压作用。近年来,斜流式压气机(含工业用鼓风机)有较大发展。

图 1-4 为混合式压气机示意图。混合式压气机由进口轴流级(1 级或多级轴流级)压气机和离心式压气机混合组成,它兼有轴流式和离心式压气机的优点,这种压气机在现

代小型航空燃气轮机上获得广泛应用。

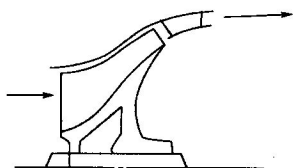


图 1-3 斜流式压气机示意图

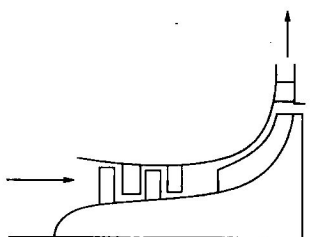


图 1-4 混合式压气机示意图

第二节 航空叶片机的发展概况

叶片机发展到今天这样完善的程度只有几十年的历史,但是,叶片机概念却在很早就产生了。在中国,早在南宋高宗时代(1131 年—1162 年)就有走马灯的记载。所谓走马灯,就是利用燃烧灯火所产生的热气上升,推动带纸叶片的叶轮,使装在叶轮轴上的纸影(做成人马状)回转,如图 1-5 所示。这就是燃气涡轮的始祖。而中国古代玩具——竹蜻蜓则是螺旋桨(属压气机范畴)的锥型。

20 世纪 30 年代,现代工业蓬勃发展,特别是航空事业的发展,促进了热力学、空气动力学、机械学和冶金材料等方面的发展,使首批叶片机(特别是涡轮)产品问世。

20 世纪 30 年代末,飞机性能的提高受到发动机的限制,因而对涡轮喷气发动机展开了多方面的研究,作为涡轮喷气发动机的主要部件——压气机和涡轮,受到了极大重视。在广泛和深入研究的基础上,于 20 世纪 40 年代初,叶片机气体动力学在理论方面和实验方面都取得了重大进展(进行了大量的、系统的平面叶栅实验,并且从理论上成功地对这些实验结果进行了总结和概括),使得有可能设计并且制造出高效率、高性能的压气机。而只有在冶金技术取得了新成就——耐高温的高强度材料出现,才使得在高温、高压、高转速下工作的涡轮部件得以运行成功。然而,航空叶片机真正取得重大进展和突破还是最近四十多年的事情。

20 世纪 50 年代末至 70 年代中期,航空工业进入了又一个新时代,一方面高空、高速飞机对涡轮喷气发动机提出了迎风面积小、推重比高、特性好等要求;另一方面则是涡轮风扇发动机的出现和发展,大大地促进了航空叶片机的发展,无论是用于低涵道比加力风扇发动机的高性能压气机和风扇,或是用于高涵道比风扇发动机中的超跨声风扇,以及传动这些风扇和压气机的高温、高负荷涡轮,都给航空叶片机的研制提出了崭新的、极富挑战性的任务。在上述任务推动下,设计和研制成功的航空产品有:高速、高负荷、高失速裕度和高迎风面流量的进口级超、跨声速压气机(风扇);高负荷、高效率、大尺寸单级跨声速风扇;高速、高负荷、高效率和高失速裕度核心压气机;高温、高速、高负荷涡轮;低速、高

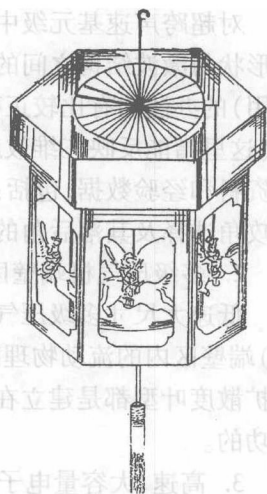


图 1-5 走马灯(南宋)

负荷、高效率多级涡轮;还有用于小型航空发动机的高增压比离心式压气机(采用管式超声速扩压器)。

20 世纪 80 年代是航空燃气轮机和航空叶片机发展更为活跃和激进的年代,美国于 80 年代中期提出了“综合高性能涡轮发动机技术”跨世纪(1983 年—2003 年)计划,该计划实施后,发动机推重比将从 10 提高到 20,而耗油率则将降低 40%。

近十多年来,航空叶片机方面引人瞩目的成就还有:具有先进蜂窝结构的高效率、宽弦长、无阻尼台风扇叶片;高亚声速可控扩散度压气机叶型;改进效率和失速裕度的“端弯”叶片和“拱形”叶片;改善气动稳定性并减少损失的“前掠”和“后掠”叶片;改进的“带叶片”式处理机匣;主动间隙控制技术;多通道冷却三维单晶(第二代)叶片;以及对转涡轮的应用等。

一、关于高性能风扇和压气机的进展

1. 超跨声速气体动力学在理论方面和实验方面的重大进展

对超跨声速基元级中气体流动物理图画、激波模型有较深入的了解,对叶栅几何和叶型形状与激波结构之间的关系以及减弱激波强度(特别是减弱激波与附面层之间的相互作用)的办法均有比较正确的认识。而且,在此基础上进行了大量的超跨声速压气机试验(这里指能反映三维效应的“级”和“转子”实验),积累了比较多的、可供设计参考的实验资料和经验数据,包括:适用于高马赫数条件下工作的尖薄叶型;超跨声速基元级设计的攻角选择及其落后角的确定(均考虑了三维影响),以及沿叶高的损失分布模型等。

2. 多级压气机端壁区内的旋涡结构与二次流动研究成就

低速大尺寸多级压气机模拟试验技术,使人们对于多级压气机(特别是后面级压气机)端壁区内的流动物理图画有了更详细和深刻的了解,“端弯”叶片以及所谓第二代可控扩散度叶型都是建立在对端壁区内的旋涡结构和二次流动有深刻了解的基础上而研制成功的。

3. 高速、大容量电子计算机的应用

早期的压气机和涡轮设计,由于受到计算工具的限制,在求解气体流经叶片机的运动方程时,不得不做了许多简化假设。今天,高速、大容量电子计算机的发展和应用使人们设计和计算中有可能更好地反映真实物理过程。在超跨声速的压气机设计中,采用考虑通道几何特征、叶片空间形状和位置、沿叶高焓熵梯度以及附面层增长等因素的三元流场计算方法或准三元流场计算方法(本计算需和实验、经验数据选取紧密结合)。不仅如此,高速、大容量电子计算机的采用使人们能够在极短时间内完成复杂程度不同的风扇和压气机流场计算,因而,在风扇、压气机和涡轮的设计过程中可以采用优化设计方法来进行参数选择和通道形式的确定。今后,计算机辅助分析和计算机辅助设计将对新一代叶片机的研制和发展发挥更大的作用。

4. 先进的实验(特别是测量方面)技术

激光技术、高频响应敏感元件和测量技术使人们有可能更细致和深入地了解叶片机转子中的流动,特别是关于非定常流动部分和复杂的激波结构。

5. 先进的材料、工艺和结构

提高风扇和压气机级负荷的最重要途径之一是提高叶片切线速度,钛合金叶片使风

扇、压气机叶尖切线速度可提高至 $550\text{m/s} \sim 600\text{m/s}$ 以上,而先进的复合材料、工艺及结构不仅能大大提高叶片切线速度,还可大大减轻风扇和压气机部件质量。

二、高性能航空涡轮产品和重要技术进展的关系

(1) 采用了较详细的三元流场计算方法并充分利用电子计算机作数值解,所谓“可控涡”涡轮设计正是运用上述方法,优选出环量沿各叶片排和沿叶高的最佳分布,这不仅大大提高了涡轮的作功能力而且提高了涡轮效率。

(2) 高速、高负荷跨声速涡轮在理论设计和实验研究方面取得的成功。

(3) 涡轮冷却技术的实验成就。近三十年来,由于涡轮冷却技术方面所取得的实验成就,使冷却效果达到 400°C 以上,因而有可能采用燃气温度 T_3^* 高达 $1850\text{K} \sim 2050\text{K}$ 的高温、高负荷涡轮。

(4) 耐高温、高强度材料和工艺方面研制工作取得的重大成就。

多通道冷却的三维单晶涡轮叶片的研制成功、粉末冶金涡轮盘的应用不仅使涡轮可在高温环境下工作,而且可以承受极大的离心负荷在高切线速度下运行。

如上所述,近三十多年来,航空叶片机取得了巨大进展,然而,无论在叶片机内流气体动力学方面抑或是实验技术方面,还有很多课题有待解决,例如:目前用于叶片机内流场的计算方法还没有很好解决激波和湍流附面层干扰问题(包括模型);风扇和压气机端壁区内的旋涡流结构和二次流动以及环壁附面层和叶型附面层间的干扰也都需要开展进一步的理论和实验研究,发展计及这方面效应的计算方法和控制技术;多级压气机的特性和不稳定边界的计算在和实验结果对比时,有时相差较远;在叶片机实验技术中至今尚未很好解决多级压气机级间气流参数的详细准确测量等。

最后应该指出,由于航空叶片机内的流动是极其复杂的,今后叶片机的研制、发展仍须以叶片机实验研究为基础,并密切结合理论分析和数值计算。可以预计,在发展和研究更高性能的航空叶片机的过程中,先进的实验技术将仍占有特殊重要地位。

小 结

本章概略介绍了叶片机概念和航空叶片机发展概况。叶片机的最大特征是无往复运动部件,而且气体流入和流出顺畅。因而,叶片机是一种适于高速运行、尺寸紧凑、高流量、高功率和高效率的机器。为研究、发展新一代高性能航空叶片机,先进的实验研究技术和新概念应用占有特殊重要的地位。

思考和练习题

1. 指出下列机械中哪些属于叶片机类? 哪些属于压气机类? 哪些属于涡轮类? 为什么?

(1) 齿轮油泵;

- (2) 风车;
 - (3) 竹蜻蜓(儿童玩具);
 - (4) 打气筒;
 - (5) 水力发电站的水轮机;
 - (6) 理发用的吹风机;
 - (7) 农业灌溉用的水泵。
- 2. 简单叙述压气机的产生、发展、取得重大进展的过程。
 - 3. 简单叙述涡轮的产生、发展、取得重大进展的过程。

第二章 气体在叶片机内运动 应遵循的基本方程

气体运动的基本方程组是研究任何流场的基础,这些方程联系着流场中各点的气流参数。在工程热力学和气体动力学中已经推导过这些方程,本章将这些方程重新列出,不作推导,着重从物理意义上和从它们在叶片机中的应用角度加以说明。

第一节 连续方程

在发动机原理和叶片机中得到广泛应用的连续方程形式是以气流的滞止参数和气动函数 $q(\lambda)$ 表示的。

由气体动力学知道,微元流股单位时间的流量 Δm_i 为

$$\Delta m_i = K \frac{p_i^*}{\sqrt{T_i^*}} q(\lambda_i) \sin \alpha_i \Delta A_i, \quad K = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (2-1)$$

式中 p_i^*, T_i^* ——研究截面 $i-i$ 上的滞止压强和温度,亦称总压和总温;

$q(\lambda_i)$ —— $i-i$ 截面上的气动函数无因次密流;

K ——取决于气体绝热指数 k 和气体常数 R 的综合常数。

如果所研究的截面上气流参数是均匀的,或者把这些截面上的气流参数取平均值,则可以把上述微元流股的连续方程推广应用到叶片机任何一个截面,这时单位时间流过截面的流量 m_i 为

$$m_i = K \frac{p_i^*}{\sqrt{T_i^*}} q(\lambda_i) \sin \alpha_i A_i \quad (2-2)$$

第二节 能量守恒方程(热焓形式的能量方程)

热焓形式的能量方程(简称能量方程),显式地反映外界对气体做功(包括作负功)和加热(也可以是散热)对气流参数静温(或静焓)、速度和总温(或总焓)变化的影响。可以在两种坐标系情况下表示能量方程。

一、绝对坐标系

研究气体在叶片机中的流动时,可以略去重力影响,在定常流动情况下,热焓形式的

能量方程可以表示为

$$\pm q_e \pm L_u = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = h_2^* - h_1^* \quad (2-3)$$

式中 q_e ——外界与流经叶片机单位质量气体交换的热量；

L_u ——外界与流经叶片机单位质量气体交换的机械功，在叶片机中又叫轮缘功；

h_1, h_2, h_1^*, h_2^* ——表示对应截面上的单位质量气体的静焓和滞止总焓。

式中，“+”号表示外界对气体加入热量或机械功，“-”号表示气体对外界输出热量或机械功。显然，对于压气机， L_u 前取“+”号；对于涡轮则取“-”号。

将焓的定义式 $h = c_p T$ 和 $h^* = c_p T^*$ 代入式(2-3)，得

$$\pm q_e \pm L_u = c_p (T_2 - T_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = c_p (T_2^* - T_1^*) \quad (2-3')$$

由以上方程可以看出，热焓形式地能量方程中没有显式地包含摩擦力所作的功，这是因为所研究的体系的摩擦力所消耗的功实际上全部转换成热，而在总的能量平衡中没有显式地反映。所以，上述热焓形式能量方程对于无黏和有黏的情况，都是正确和适用的。

必须指出，对于整体气流是正确的方程式(2-3)和式(2-3')也适用于单股微元流股，但是，这时必须计及相邻微元流股间的能量交换情况。

二、相对坐标系

在研究叶片机的动叶中的气体流动时，采用相对转动坐标系（即观察者站在旋转的叶轮上观察气体的流动）更为方便。当人们站在叶轮上观察时，动叶不再旋转而是相对静止的，因而动叶不对气体作功，即 $L_u = 0$ ，此外，由于非惯性坐标系的采用，而必须计及所有惯性力所作的功，在相对旋转坐标系中受有离心惯性力和哥氏惯性力作用，后者与相对速度垂直，故其作功为零；离心惯性力对单位质量气体做的功为 $(u_2^2 - u_1^2)/2$ 。在对外界无热交换的情况下，相对坐标系的热焓形式的能量方程为

$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} = h_2 - h_1 + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = h_{2w}^* - h_{1w}^* = c_p (T_{2w}^* - T_{1w}^*) \quad (2-4)$$

式中 w ——气流的相对速度；

h_w^* ——相对滞止焓；

T_w^* ——相对滞止温度。

若沿流线 $u_1 = u_2$ ，则离心惯性力作功为零，气流的相对滞止焓不变，即

$$h_{1w}^* = h_{2w}^* = c_p T_1 + \frac{w_1^2}{2} = c_p T_2 + \frac{w_2^2}{2} \quad (2-5)$$

应用上式分析动叶中的气流速度和静温之间的转换关系极为方便，相对动能增加，静温下降，相对动能减少，静温增加。

若沿流线 $u_1 \neq u_2$ ，则可引用转焓定义， $I = h_w^* - \frac{u^2}{2}$ ，变换式(2-4)如下：

$$h_{2w}^* - \frac{u_2^2}{2} = h_{1w}^* - \frac{u_1^2}{2} = I \quad (2-4')$$

式(2-4')表明,沿流线转焓守恒。

第三节 热力学第一定律方程

热力学第一定律方程是对气体微团而言的能量守恒方程式,它对于运动和静止的气体都是正确和适用的。

由工程热力学可知,它的表达形式之一为

$$dq = c_p dT - v dp = dh_1 - v dp \quad (2-6)$$

式中 dq ——输入气体微团的微小热量;

$v dp$ ——压缩功或膨胀功。

积分式(2-6)可得

$$q = h_2 - h_1 - \int_1^2 \frac{dp}{\rho} \quad (2-7)$$

式中 $\int_1^2 \frac{dp}{\rho}$ ——运动气体的压缩功(或膨胀功)。

在此方程中, q 是输入到截面1-1和2-2之间的气体的全部热量。它是由外界输入到这部分气体的热量 q_e 和摩擦力做功所产生的热量 q_f 组成的,因此有

$$\pm q_e + q_f = h_2 - h_1 - \int_1^2 \frac{dp}{\rho} \quad (2-8)$$

如前所述,不计相邻流股间的能量交换,摩擦热和摩擦力所做的功是当量的,即 $q_f = L_f$,因此,式(2-8)又可写成

$$\pm q_e + L_f = h_2 - h_1 - \int_1^2 \frac{dp}{\rho} \quad (2-9)$$

第四节 机械能形式的能量方程(广义伯努利方程)

热焓形式的能量方程不反映气体流动中机械能(例如,压强势能与速度动能)之间的转换关系,它也不能显式地反映流动损失对气流参数的影响,因此,导出机械能形式的能量守恒方程是必要的。可以在两种坐标系下列出机械能形式的能量守恒方程。

一、绝对坐标系

$$\pm L_u = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + \int_1^2 \frac{dp}{\rho} + L_f \quad (2-10)$$

可以看出,方程式(2-10)显式地表达了流阻损失功 L_f 对机械能平衡关系的影响。