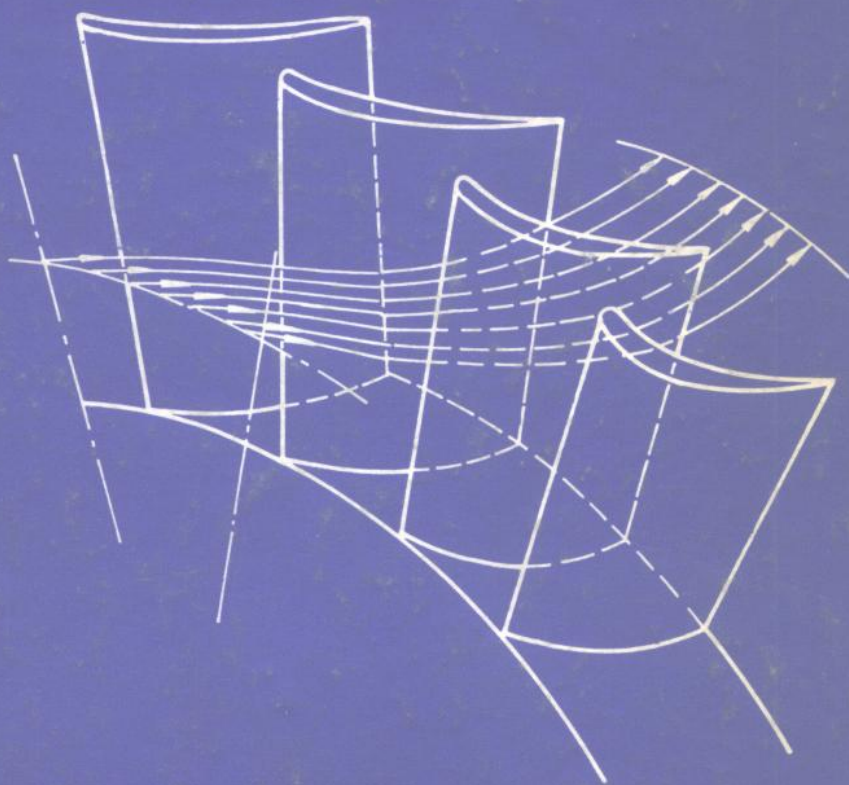


船用燃气轮机轴流式 叶轮机械气动热力学

(原理、设计与试验研究)

上册

李根深 陈乃兴 强国芳 编著



国防工业出版社

船用燃气轮机轴流式 叶轮机械气动热力学

(原理、设计与试验研究)

上 册

李根深、陈乃兴、强国芳 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是以船用燃气轮机研制工作中对有关问题所取得的理论与试验研究成果以及所积累的工程实践经验为基础编写而成,本书分上、下两册。上册中系统地叙述了轴流式叶轮机械(压气机和涡轮)气体流动基本方程及其工作原理、测试方法和试验结果、气动设计和计算方法等三个主要方面的内容。

本书适合已经掌握一定的高等数学、流体力学和热力学的基础知识,初步具备叶轮机械工作原理等专业知识并需要扩大和加深这方面的知识的读者,对从事轴流式压气机和涡轮的设计计算、试验研究的工作人员以及高等院校等有关专业的师生也可供自学时参考。

船用燃气轮机轴流式叶轮机械气动热力学 (原理、设计与试验研究)

上 册

李根深、陈乃兴、强国芳 编著

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 20⁷/₈ 插页 2 486 千字

1980年11月第一版 1980年11月第一次印刷 印数: 0,001—1,050册

统一书号: 15034·2004 定价: 2.90元

目 录

绪论	1
1. 叶轮机械与船用燃气轮机的发展	1
2. 叶轮机械内部流动实况的物理描述	3
3. 求解叶轮机械内部流动问题的简化模型	4
4. 我国叶轮机械研究工作的现状和发展	8
5. 本书各章的主要内容及其叙述方法	10
第一章 叶轮机械气动热力学的基本方程	14
§ 1.1 引言	14
§ 1.2 质量守恒定律	15
1.2.1 微小封闭体系的连续方程	15
1.2.2 适用于控制体概念的连续方程	17
§ 1.3 动力学定律	18
1.3.1 运动方程	18
1.3.2 动量定律及动量矩定律	27
§ 1.4 热力学第一定律	30
§ 1.5 热力学第二定律	34
§ 1.6 相对流动的基本方程	38
1.6.1 连续方程	38
1.6.2 运动方程	39
1.6.3 能量方程	42
§ 1.7 有旋流动问题	43
§ 1.8 本章小结	45
参考文献	46
第二章 压气机和涡轮基元级的工作原理	47
§ 2.1 引言	47
§ 2.2 基元级中气体流动的基本方程	48
§ 2.3 基元级的工作过程	50
2.3.1 压力、速度和温度的变化	50
2.3.2 速度三角形	52
2.3.3 焓焓图	53
§ 2.4 叶栅和基元级的损失和效率	57
2.4.1 叶栅的升力系数和阻力系数	57
2.4.2 叶栅的损失系数	60
2.4.3 叶栅的效率	67
2.4.4 基元级的效率	69
2.4.5 基元级工作过程的计算	72
§ 2.5 基元级的无量纲特性参数	75
2.5.1 反力度 ρ_T 和 ρ_K	75
2.5.2 负荷系数 ψ_T 和 ψ	79
2.5.3 速度比 u/C_{ad} 和 u/C_1	80

2.5.4 流量系数 Φ	81
§ 2.6 基元级无量纲特性参数的相互关系	81
2.6.1 速度三角形与无量纲特性参数的关系	81
2.6.2 压气机和涡轮基元级的效率与无量纲特性参数的关系	86
2.6.3 涡轮基元级的最佳轮周效率	87
2.6.4 涡轮基元级的等熵滞止效率的最佳设计问题	92
2.6.5 基元级效率与叶栅效率的关系	93
§ 2.7 本章小结	95
参考文献	95
第三章 叶轮机械三维流动理论与长叶片的气动计算	96
§ 3.1 引言	96
§ 3.2 气体在转动叶片内 S_2 相对流面上的流动	101
3.2.1 S_2 流面的运动方程和流面方程	101
3.2.2 S_2 流面的连续方程	105
3.2.3 能量方程	108
3.2.4 流面的积分条件	108
3.2.5 基本方程组在正反问题中的应用	109
§ 3.3 通流矩阵法(流函数方程的求解)	109
3.3.1 扭转规律简述及流函数方程	109
3.3.2 流函数方程的求解	111
§ 3.4 速度梯度法(流线曲率法)	117
3.4.1 用静压梯度表示的运动方程	117
3.4.2 径向平衡方程的另一种形式	120
3.4.3 非径向计算站的平衡方程	121
3.4.4 速度梯度法(流线曲率法)的求解步骤	122
§ 3.5 长扭转叶片气动设计计算的近似方法	123
3.5.1 在上下游及叶列间隙中取计算站	124
3.5.2 不计径向速度的轴向梯度项的计算	125
3.5.3 近似考虑径向速度的轴向梯度项的计算	125
§ 3.6 气体在转动叶片内 S_1 相对流面上的流动	126
3.6.1 角坐标和轴向坐标为自变量的流函数方程	126
3.6.2 角坐标和径向坐标为自变量的流函数方程	131
3.6.3 角坐标和流线在子午面上投影的长度为自变量的流函数方程	132
§ 3.7 本章小结	133
参考文献	133
第四章 二维叶栅的绕流理论	135
§ 4.1 引言	135
§ 4.2 二维叶栅绕流的正反问题及其解法分类	136
§ 4.3 二维叶栅绕流理论的基本方程	137
4.3.1 任意回转面叶栅绕流的方程组	137
4.3.2 平面叶栅绕流的方程组	138
§ 4.4 流动的复势和几种简单的位势流动	139
4.4.1 流动的复势	139
4.4.2 几种简单的位势流动	140
§ 4.5 叶栅绕流计算的保角变换法	143
4.5.1 保角变换在流体力学中的物理意义	143
4.5.2 回转形流面映象为平面的保角变换	144
4.5.3 平板叶栅的不可压流体的绕流	145

4.5.4	等价平板叶栅	152
4.5.5	由茹可夫斯基翼型组成的理论叶栅	153
4.5.6	任意叶栅的保角变换	154
4.5.7	应用电比拟法求解叶栅的绕流问题	154
§ 4.6	奇点法	160
4.6.1	奇点法的一个解法	161
4.6.2	求解任意叶栅绕流问题的奇点法的几种方案	166
§ 4.7	流道法	167
4.7.1	平面叶栅的中心流线法	167
4.7.2	任意回转面叶栅的中心流线法	170
4.7.3	中心流线法的改进	171
4.7.4	平面叶栅中心流线法的解析解	172
4.7.5	任意回转面叶栅中心流线法的解析解	174
4.7.6	计算涡轮平面叶栅的近似流道法	176
§ 4.8	平面叶栅设计的速度图方法	179
§ 4.9	任意回转面叶栅流动的数值解法	182
4.9.1	通流矩阵法	182
4.9.2	任意非正交曲线坐标的任意回转面叶栅的计算	184
4.9.3	速度梯度法(流线曲率法)	186
4.9.4	斜交坐标系的通用解法	189
§ 4.10	本章小结	192
参考文献		192
第五章 附面层理论在叶轮机械气动设计中的应用		200
§ 5.1	引言	200
§ 5.2	附面层的一般概念	200
5.2.1	附面层的流态	200
5.2.2	附面层流态的过渡	204
5.2.3	附面层的脱离	205
5.2.4	热附面层	206
§ 5.3	附面层方程的偏微分形式	208
5.3.1	层流附面层的方程组	208
5.3.2	轴对称体的层流附面层方程组	209
5.3.3	附面层方程组的边界条件	209
5.3.4	紊流附面层的方程组	210
§ 5.4	附面层方程的积分关系式	210
5.4.1	附面层的动量和能量积分关系式	210
5.4.2	任意回转面叶栅的附面层动量积分关系式	212
§ 5.5	不可压缩流体动力附面层的计算	214
5.5.1	动力附面层的通用计算方法	214
5.5.2	层流附面层的计算	216
5.5.3	过渡区附面层的计算	217
5.5.4	紊流附面层的计算	219
5.5.5	计算实例	226
§ 5.6	可压缩流体动力附面层的计算	230
5.6.1	附面层动量积分关系式的压缩性变换	230
5.6.2	无换热时可压缩流体动力附面层的计算	232
5.6.3	任意回转面叶栅附面层的计算	233
§ 5.7	二维叶栅的流量系数与损失系数	234
5.7.1	叶栅的流量系数	234
5.7.2	叶栅的损失系数	234

5.7.3	压气机叶栅损失系数与扩压因子的关系	238
5.7.4	涡轮叶栅损失系数与通道收敛梯度的关系	239
§ 5.8	关于涡轮叶栅壁面的最优速度分布问题	242
5.8.1	问题的提出	242
5.8.2	叶型壁面的速度分布对附面层发展的影响	243
5.8.3	通道形状等几何参数对叶栅壁面速度分布的影响	247
5.8.4	涡轮叶栅的理论最优叶栅的损失系数	248
§ 5.9	叶轮机械中的环面附面层	249
5.9.1	计算环面附面层运动方程轴向分量的简单数学模型	249
5.9.2	环面附面层计算方法的改进	251
§ 5.10	本章小结	251
参考文献		251
第六章 叶轮机械的试验研究方法		253
§ 6.1	引言	253
§ 6.2	量纲分析和模化条件	254
6.2.1	量纲分析	254
6.2.2	模化条件	259
§ 6.3	叶轮机械的主要部件试验	262
6.3.1	环形叶栅风洞试验	262
6.3.2	压气机试验	263
6.3.3	涡轮试验	271
6.3.4	整机试验	272
§ 6.4	气流参数的测量	273
6.4.1	气流压力、速度和方向的测量	273
6.4.2	气流温度的测量	290
§ 6.5	本章小结	293
参考文献		294
第七章 叶轮机械平面叶栅的试验研究		297
§ 7.1	引言	297
§ 7.2	平面叶栅风洞设备的设计和调整	298
7.2.1	模化计算	300
7.2.2	气动设计和调整	300
7.2.3	总体布置和机械设计	302
7.2.4	整流部件的设计选择	303
7.2.5	筒体流场调整经验	305
§ 7.3	平面叶栅风洞的试验技术	307
7.3.1	高亚音速叶栅风洞试验技术	308
7.3.2	超、跨音速叶栅风洞试验技术	308
7.3.3	多孔壁附面层抽吸技术	309
7.3.4	叶栅试验中的遥控遥测	310
7.3.5	气流方向的自动跟踪	310
7.3.6	测量数据的自动记录和计算	311
§ 7.4	平面叶栅测量数据的整理	312
7.4.1	考虑压缩性时的计算公式	312
7.4.2	简化测量和整理的几个途径	320
7.4.3	试验结果的修正	324
§ 7.5	本章小结	325
参考文献		326

绪 论

船用燃气轮机轴流式叶轮机械气动热力学(原理、设计与试验研究)是一本结合船用燃气轮机研制工作,系统叙述燃气轮机主要部件——轴流式压气机和涡轮的气动热力学原理、设计,计算和试验调整方法的参考书。长期以来,作者在实际工作中深深感到,在这样的参考书中,应该把一般气动力学原理与叶轮机械的实际设计、计算工作有机地结合起来。书中的叙述方法既要注意到基本原理的系统阐述和物理现象的本质描绘,又要着重这些基本理论的概念和方法的实际应用^[1]。这种专题技术书的基本内容和材料,在选择时要本着“独立自主,自力更生”的方针,总结解放以来我国自己的研究成果。对于国外的文献资料,则要遵照“洋为中用”的原则,有区别、有分析地吸收,使之更好地为我国的社会主义建设服务。作者试图将上述原则作为编写本书的指导思想,以期“赶上和超过世界先进水平”,实现四个现代化作出贡献。

由于压气机和涡轮的内部流动问题极其复杂,加上作者在认识上的局限性,要做到上述各点是很不容易的。为了便于把问题叙述清楚,在讨论各个单项问题之前,先对叶轮机械气动设计这个总题目,从整体角度出发,作一简要而系统的介绍。

1. 叶轮机械与船用燃气轮机的发展

大家知道,燃气轮机作为舰船主推进动力装置,具有一系列的优点。与蒸汽动力装置相比,它尺寸小、重量轻、油耗低、起动和加速性好,日常运行维护简单、便于远距离集中控制。与柴油机相比,它的单机功率没有后者受到的那些限制,因此单机功率大,四~五万匹马力的船用燃气轮机在技术上是完全可以实现的。

由于这些优点,从四十年代末期到现在不到三十年的时间内,船用燃气轮机已经经历了三个发展阶段,即:

- 1) 五十年代初期在小型船舶上的试用阶段;
- 2) 五十年代中期以后,在大、中型水面舰船上进一步的试用阶段;
- 3) 六十年代以来在大、中型水面舰船和特殊推进舰船(如喷水推进和气垫船…等)上的批量使用阶段。

最近几年,在一些高速运输船上也开始使用燃气轮机作为主推进动力。有些国家的海军已明确规定了主要战舰全部采用燃气轮机作为推进动力的政策。随着舰船对电力需要的增长,因此亦有采用燃气轮机作为电站的动力。根据不完整的统计,迄今为止,全世界船用燃气轮机装船总功率已经超过2,000万匹马力,并且还在继续增长。我国船用燃气轮机的研制工作也取得了进展,并且有着广阔的发展前景。

船用燃气轮机的发展,一般是采取以下两条途径:一条是船用专用化设计,另一条则是航空发动机的船用化改装。在航空工业有一定基础的国家,利用航空发动机改装是发展船用燃气轮机的一条成功的途径。即使这样,对叶轮机械工作过程的基本研究和试验工作仍然是重要的,不可忽视。因为唯有抓住了基本的研究和试验工作,才能打好基础,培养

队伍，提高水平，加快进度。

船用燃气轮机迅速发展的另一原因，是由于它继承和利用了航空燃气轮机和工业燃气轮机的已有的技术基础。特别是前者，它始终是燃气轮机技术发展的前驱。大家知道，燃气轮机的原理在很早以前就已为人们所掌握，但是在四十年代以前相当长的时期内，与蒸汽轮机相比，它在工业上的实际应用却是非常缓慢。蒸汽轮机的工质能冷凝成水，因此给水泵消耗的功率不大。然而燃气轮机的工质是不能冷凝的空气-燃气，所以压气机需要消耗相当大的能量来实现压缩过程。因此，只有在循环温度较高、压气机和涡轮的效率较好的情况下，燃气轮机才能具有较高的循环效率，并提供较大的有用功率。正是高温材料（和叶片冷却技术）以及压气机的气动性能这两方面的技术困难，构成了燃气轮机发展和应用的障碍。

根据简单开式循环的分析得知：提高压气机和涡轮的气动性能对燃气轮机的发展是十分重要的。由于涡轮总功率的大约三分之二至四分之三是用来驱动压气机对空气的压缩，有用的净功率只有三分之一至四分之一左右；而压气机效率提高1%，装置效率可提高2~3%左右。此外，燃气轮机在变工况下的稳定运行范围及其起动、加速性能，在很大程度上取决于压气机的特性。认识和掌握压气机的气动设计规律，对于促进燃气轮机的技术发展和实际应用来说，殊感重要。

正是由于压气机和涡轮气动性能以及冶金、冷却、工艺…等方面技术的进展，目前船用燃气轮机已经发展到了第二代。与第一代相比，第二代机组的性能结构和工艺都有了明显的改善（表1）。

表1 船用燃气轮机的主要性能参数

项 目	单 位	第 一 代	第 二 代
单机功率	马力	4500~15000	20000~40000
总压比	/	6~9	9~18
燃气初温	°C	650~870	870~1200
比气耗	公斤/马力小时	20~25	10~12
耗油率	克/马力小时	260~340	~180
比功率	马力/公斤·秒	160~200	~400
翻修期限	小时	500~2000	4000~10000

鉴于轴流式叶轮机具有尺寸紧凑、流量大、效率高等优点，在功率为6,000马力以上的舰船燃气轮机中得到了广泛的采用。只是在较小功率的机组上才采用离心式或离心-轴流混合式的压气机和涡轮。

一般说来，压气机和涡轮的气动设计需要满足以下五个方面的要求：

1) 达到设计点所要求的主要参数 对压气机来说是增压比、流量，对涡轮则是流量和膨胀比（它们都是由热力循环及总体方案确定的）；

2) 在设计点及其附近要有优良的气动性能，例如效率；

3) 具有宽广和平稳的变工况特性；

4) 满足总体对尺寸、重量的要求，并且尽可能使结构简单、制造方便；

5) 尽量选定比较成熟的技术方案，以减少调试工作量，缩短研制周期。

至于叶轮机械的安全可靠性，在一定程度上也与气动设计有关，但主要是通过合理的

机械设计来加以确保。安全可靠对船用燃气轮机来说是一个应该首先满足的基本要求。

上述五个方面的基本要求，对所有用途的压气机和涡轮都是适用的，这是矛盾的普遍性的一面。可以看出：这些要求既是彼此联系，又是互相制约的。例如，要满足尺寸和重量的要求 4)，势必要加大级负荷，提高圆周速度；但如超出一定限度，就会和要求 1)，2)，3)，5) 发生矛盾。就是说，在要求项目 1)，2)，3) 之间也往往难以同时兼顾。例如，照顾到设计点的最高效率，压气机的变工况特性可能就不够理想。因此，对于某一特定使用条件下，压气机和涡轮最佳气动设计方案的选定，必须根据具体情况，通过对各种不同方案进行比较，对各种矛盾的要求作出通盘考虑之后，才能最终完成。

具体地对船用燃气轮机的压气机和涡轮来说，又有其矛盾的特殊性。首先，与工业燃气轮机相比，船用燃气轮机对重量和尺寸有比较严格的要求；但与航空燃气轮机相比，则远不如后者要求的那样苛刻。相反，船用燃气轮机气动设计中应注意的重点，或者说主要的矛盾，往往仍然是高的部件效率和平稳的变工况特性。同时，为了缩短研制周期，减少调试工作量，船用燃气轮机主要部件设计时，又需要充分注意技术成熟，方案稳妥，结构简单，制造方便。换句话说，又是属于比较“保守”的。正因为如此，目前船用燃气轮机的压气机和涡轮都广泛采用高亚音速级；在少数场合下才采用跨音速级。

其次，舰船与飞机的发动机之明显不同在于：其主动力装置的巡航功率比最大功率要小得很多（往往只有后者的 $1/8$ 左右）。这一特殊性虽然可以通过巡航机与加速机加以解决，但毕竟还要求舰用燃气轮机在功率变化很大的范围内能稳定而经济地工作。因此，改善压气机和涡轮变工况的气动特性这一特殊问题，需要我们给予足够的注意。

2. 叶轮机械内部流动实况的物理描述

叶轮机械是以连续流动的流体为工质，以叶片为主要工作元件，通过工质与工作元件的相互作用以实现机械功与流体势能有效转换的工作机（如泵、压气机、风扇等）和动力机（如蒸汽轮机、水轮机…等）的通称。燃气轮机的叶轮机械主要是指从外界输入机械功对气体进行压缩的压气机，以及燃气在其中膨胀并对外输出机械功的涡轮。

气体在叶轮机械中的流动是一种内部流动。它与二维机翼及轴对称物体绕流的外部流动主要有两大区别。首先，在叶轮机械内进行着机械功与气体内能的转换；其次，四周存在着固体的边界，就是说，气体是在内外壁面之间的叶片通道中运动着。因此，叶轮机械气动热力学乃是讨论叶轮机械中能量转换过程的热力学和气体动力学的学科。

取多级轴流式叶轮机械的任何一级来看，它是由叶轮（包括动叶）与静叶环（包括静叶）所组成。对压气机来说，其转子通过动叶对气流做功，使气流在动叶内产生周向的转折并增加其绝对滞止温度（或简称总温）和绝对滞止压力（或简称总压），同时，气流的静压和绝对速度也往往同时增加。然后在静叶中，气流又进一步扩压，把一部份气体动能再转化为气体势能。气流在静叶内也有周向转折，以满足下一级动叶进口的要求。涡轮的工作过程则恰恰相反：气流先是在静叶内膨胀，静压降低，流速（主要是周向流速）增大，气体势能转化为动能，然后气流在动叶内实现周向转折（往往同时还进一步膨胀），最后通过转子向外界输出机械功。

叶轮机械内部的流动在本质上是三维的。首先，在轴流式叶轮机械中，气流参数沿轴向必然有显著变化。其次，由于有机功的输入或输出，气流在动叶内必然在周向发生转

折。这样，在叶片通道内的高压面（内弧）与低压面（背弧）之间便形成压力差，从而使气流参数在周向呈现显著的周期性变化。最后，由于转子圆周速度沿叶高的变化，以及下面谈到的其它原因，气流参数在半径方向也有显著变化。

随着级负荷和圆周速度的增加，叶轮机械内气体的可压缩性不能忽略。就拿亚音速压气机来说，动叶叶尖进口马赫数也常常达 0.8~0.9 左右。涡轮静叶根部出口流速一般接近或略为超出当地音速。因此，在船用的压气机和涡轮叶片通道中，往往可能有局部超音速区的存在以及随之而来的激波的产生。

同时，实际气体总是有粘性的，它必然会在叶片表面及环形通道的端壁上产生附面层，这些附面层大部份是紊流性质的。需要着重指出：这些附面层并不是孤立的，由于它们之间以及与主流之间的相互作用，就产生了所谓“二次流”的现象。

二次流主要有两类。一类是周向的二次流，它与叶片通道内高压面与低压面的压力差直接有关。在环形通道两端端面上的附面层内的气流速度比主流区内的要低得多，因此在附面层内由于气流转折而产生的离心力不足以平衡上述压差（附面层内及主气流区内的这种压差是大致相同的）。端面附面层就因此由高压面向低压面作周向流动，而在叶片出口处形成一对旋涡。另一类是径向的二次流，它与气流在附面层内和在主流区内的径向流动有关。大家知道，无论是相对于静叶还是动叶来说，附面层内气流的周向和径向分速总是要比主流区内气流的分速来得低。但是在附面层内和主流区中的径向压差却是大致相同的。因此，根据运动方程，必然会导致附面层内的径向流动。由于动叶中的附面层受到转动的影响，由运动方程也可以得出，静子与转子内径向二次流的流动方向是不同的。一般说来，在静子内的附面层是向根部流动聚集；而在转子内的附面层则向叶尖方向流动堆积（它也可用离心力作用来解释）。

除了这两类二次流以外，还有叶片出气边处的尾迹旋涡，叶尖径向间隙中的轴向漏气，不带冠叶片本身从内弧到背弧的周向漏气以及不带冠叶片顶部与机匣之间的擦流作用等几种二次流动。它们也都必然要与主气流相互作用。当有超音速区存在时，它们又还会与激波相互作用。显而易见，这是一种十分复杂的流动情景。

再者，叶轮机械内部的流动是明显不稳定的。从固定的绝对坐标系来看，甚至在进口均匀的第一级动叶内的流动也是不稳定的。后面级的进口气流常常是不均匀的。考虑到转子与静子间的相对运动，流动的不稳定性就更加明显。严格说来，只有进口气流均匀，同时在静叶的上下游没有动叶，动叶的上下游没有静叶，即分别把静叶和动叶看作是孤立的叶列时，才能把静叶中的绝对运动和动叶中的相对运动当成是稳定的。

从以上的简单描绘中可以清楚地看出：叶轮机械气动热力学研究的对象是一种性质极为复杂的、同时又伴随有能量传递（和热交换）的、高温可压缩粘性气体的、三维不稳定的流动过程。其中某些物理现象的基本机理，如紊流，二次流，叶片通道内的激波模型以及附面层与激波的相互作用…等，目前还不十分明瞭，无法进行精确的理论计算，有待于今后的进一步研究。

3. 求解叶轮机械内部流动问题的简化模型

对于前面简单描绘过的叶轮机械内部这样一种极其复杂的流动问题，要想不作任何简化而直接进行计算和分析，在目前的技术水平条件下，不但是不可能的，而且也是没有实

际意义的。因此，需要从客观事物的复杂现象出发，抓住其中最本质、最主要的因素，忽略某些次要的、非本质的因素，以建立起某种近似的简化模型，从而进一步研究过程特性与其主要影响因素之间的相互关系。至于被暂时忽略掉的次要因素的影响，则可以通过某些经验数据加以综合修正，然后再由实际试验的结果来进行验证。只有这样，才能建立起在技术上可行，在实际应用上有价值的设计计算和分析方法。

在燃气轮机进入实际工程应用以及叶轮机械气动热力学理论尚未正式形成之前，蒸汽轮机叶片的设计长期应用一维流动的方法。由于所处理的是一种膨胀过程，总的说来，这种方法还是可行的。直到二十年代，才开始应用低速空气动力学的成果来分析压气机叶栅的二维流动，并相应地开展了二维平面叶栅的试验研究工作。二维流动的大量的系统研究取得了很大进展。例如四十年代初期在此基础上产生的以压气机平面叶栅负荷极限和偏角特性为特征的设计方法，以及随后的其它进展，逐步形成了亚音速轴流式压气机气动设计的基础。对压气机和涡轮中三维流动的研究主要是从三十年代以后开始的。尽管那时以来不断提出了若干理论方法，但是在相当长的时期内，实际工程中采用的却仍然是简化了的径向平衡计算方法。在六十年代，由于电子计算机及计算数学的迅速发展和普遍推广，以及更重要的，对叶轮机械内部流动规律的认识在实践中得到验证以及才开始在产品研制和设计中逐步应用早已提出的三维流动理论。从较新的文献资料中也可以看到，近年来正在陆续出现一些处理流体粘性，分析不稳定流动以及考虑流面翘曲……的尝试。但是在叶轮机械内部流动问题的分析方面，长期以来基本上保持了四个简化假设。它们不但已被大量的实践所肯定，而且看来在一段时期内，仍然可以作为工程上进行叶轮机械气动设计和计算的出发点。这四个基本的简化假设是：

(1) 假定不稳定流动中的气流参数的周期平均值与稳定流动时的数值非常接近，因此可以用后者来代替。这样一来，就可以把静叶内气流绝对运动和动叶内的相对运动都看成是稳定流动。

(2) 假定粘性的作用只是集中表现在附面层中，进一步说，在主流区可以忽略粘性力的影响，因此，可以在运动方程中略去粘性力项，而只考虑由于粘性引起的熵的变化。至于粘性及由此产生的二次流等复杂因素对级的作功能力，通道面积、气流参数、级效率以及级间配合的影响，则采用减功系数、流量系数、叶片速度系数、通道阻塞系数、级的多变效率等经验数据进行综合修正。换句话说，我们只是部份地考虑了粘性的影响，即粘性在流动过程中的积累影响。这里可以看出：关于粘性的处理以及与之密切有关的损失模型，乃是当前叶轮机械气动设计计算方法中最薄弱的环节之一。

经过这样两个假设，流动便被简化为稳定的、部份地考虑粘性影响的三维流动了。这种流动的通用计算方法，最早由我国吴仲华同志详尽给出^[3]。这个方法的基本思想是用两个相对流面的概念，把一个三维流动的问题在数学处理方法上演化为两个二维问题。

第一类流面（称为 S_1 流面）与某一个位于叶列前或叶列中 $z = \text{常数}$ 的平面的交线是一个圆弧；而第二类流面（称为 S_2 流面）与某一个 $z = \text{常数}$ 平面的交线是一条径向线。反复求解这两个二维问题就可以得到三维流动的解（参看第三章图 3.1, 3.2 和 3.3）。

即使是这样一个简化了的计算模型，在实际应用上也是有不少困难的；虽然随着计算技术的进展，这种流动在技术上求解原则上是可能的。此外，工程设计是一个最佳方案的

选择问题,有时还需要进行变工况特性的计算,因此需要考虑的变化参数是非常之多的。如果每次都用这一计算方法进行方案比较和特性分析,必然十分繁复,难以推广应用。所以,在工程设计中还必须根据实际需要,作出进一步的简化。

(3) 由于气流参数在三个方向均有变化, S_1 流面严格说来不是一个简单的圆柱面或圆锥面,也不是一个回转面。它是一个有翘曲的曲面(见图 3.1),并且级负荷越大,压缩性影响越显著,与自由旋涡流型设计偏离越厉害,翘曲程度也越大。

第三个简化假设就是对轴流式叶轮机械来说,可以忽略 S_1 流面的这种翘曲,即认为 S_1 流面可以简化为以子午面流线为母线,绕 z 轴旋成的回转面。在叶轮机械的早期发展阶段,这个任意回转面被简化为圆柱面。后来考虑到级负荷的加大以及子午面流道斜率的影响,圆柱面的假设被改进为圆锥面。近年来,任意回转面理论有了新的进展。 S_1 流面作为回转面的假设,实质上就是把 S_1 流面上的流动简化为任意回转面上叶型间的流动。对圆柱形流面来说,如果把流面展开,就成为众所周知的二维平面叶栅了。

这种平面叶栅的模型虽然看来十分简化,但它却抓住了轴流式叶轮机械的最本质之点,即:连续流动的气体通过叶栅实现周向的转折,从而在动叶内完成机械功与气体内能的有效转换这一工作过程(这里是指广义的内能,包括气体的动能在内)。

与这一假设密切有关的是所谓“基元级”的概念。因为只有在认为 S_1 流面是一个回转面的前提下,才能够按子午面流线方向切出高度为 dr 的回转微元体,并得到可以忽略气流参数沿此微元高度变化的基元级(见图 2.1)。而叶轮机械的每一级也才可以被看作是按一定条件联系起来的无数个基元级的总和。这样,一个复杂的设计问题就简化为按一定条件联系起来的不同径向高度处基元级的设计问题了。如果叶片较短,级的轮毂比又较大,甚至可以把参考直径(一般是平均直径)处的基元级,看作是整个级的代表。这样,设计问题就更为简化了(早期的蒸汽轮机直叶片级就是这样设计的)。

由于平面叶栅的试验研究比较简单,容易实现,并且已经积累了大量系统的实验结果,因此它在一定程度上形成了叶轮机械工程设计计算的基础。在 S_1 流面的反问题求解方面,尽管按照预先给定速度分布来设计叶型的理论方法有了相当的发展,但在实际工程设计中至今还没有得到广泛的应用。因为单单根据气动要求这一唯一的条件求得的叶片各个截面的叶型,必然难以满足结构、工艺、强度、振动、冷却等各方面的要求;特别是按任意回转面设计出来的叶型更是如此。因此,在工程上大量应用的还是根据平面叶栅所揭示的规律,用半经验的工程造型方法来设计叶型。即使是 S_1 流面的正问题,也往往不作详细的理论计算,而是用半经验公式或图表确定叶栅的出气角,并估算其损失系数。随着气动设计要求的日趋严格以及计算技术的发展,有时也在造型之后再求解 S_1 任意回转面的正问题以校核设计的合理性,并进行反复修改以达到设计要求。近年来已出现了根据叶片厚度分布及调整沿叶型表面的速度分布来设计叶型,使其能同时满足气动特性及强度振动和冷却要求的设计方法。并且应用了专用电子计算机及叶型图象显示的新技术,为叶片造型提供了便利。这是颇值得注意的发展动向。

(4) 最后一个假设是为了简化 S_2 流面的计算。这个假设可以通过两种不同的形式表现出来,但其实质则是一致的。

一种是“中心流面法”,即假定存在着一个中心流面 S_{2m} (见图 3.1),在此流面上的

气流参数可以看作是叶片通道内各 S_1 流面上的周向平均值。另一种形式则假定流动是所谓“轴对称”的，然后运用基本方程求出沿径向和轴向的气流参数。在假设“轴对称”之后，必须注意在径向运动方程中人为地近似引入一项“叶片作用力”^[4]，否则就与叶轮机机械的基本功用相矛盾了。

可以看出：这个所谓“轴对称”或“周向平均”的假设是与动叶内稳定流动的近似假设相一致的。没有这个假设，动叶内稳定流动也就不能成立了。

长期以来，往往只计算叶列间隙内气流参数沿径向的变化，因此可以忽略叶片力与叶片厚度的影响；同时还不计流线斜率和曲率的影响，这就是所谓的“简化径向平衡”的概念。常用的“流型”则有自由旋涡、等 α 角、等反力度及等密流等。由于电子计算机的发展， S_2 流面的计算，亦即“完全径向平衡”方法得到了推广。上述种种具体简化和假设的限制逐渐成为不必要了。这样一来，不但气动设计更为合理，更为准确；尤其重要的是，它揭示了提高级负荷，改善气动性能，实现设计意图的新的途径，为设计提供了更大的自由度，例如，径向变功的设计以及利用流线曲率或叶片作用力的影响来控制反力度沿径向的变化等。涡轮设计中的所谓的“控制旋涡流型设计”就是这种发展的一个自然的结果^[5]。

作了上面四个假设以后，如果再以流线为曲线坐标，基元级叶片通道中的流动就可以看成是一维性质的了。这样，在叶片进、出口处表示基元级周向平均参数的速度三角形也就可以建立起来。基元级进、出口处流体的状态参数以及与机械功转换的关系也可以用一维流动的流管概念简明地书写出来。这种简单的一维流动乃是蒸汽轮机发展初期所采用的计算模型。至今在方案设计（即子午面通流图设计）以及变动工况计算中，仍应用它。

当然，除了以上四个基本假设外，还有工质的热力性质满足理想或半理想气体的状态方程，以及叶轮机机械内部流动是绝热的等常用假设，这里就不详述了。

从以上的分析中可以清楚看出：在工程应用上，叶轮机的气动计算就是对任意回转面（即简化后的 S_1 流面）和中心流面（即 S_{2m} 流面）或子午面这样两个二维流场进行互相迭代而得到准三元流场的解。严格的三维流动的求解，只能通过若干个 S_1 和 S_2 两类流面的互相迭代才能实现，虽然近年来国内外已经展开了工作，取得了进展，但是在工程设计上尚未得到实际应用。

基于上述四个基本简化假设的叶轮机气动设计和计算方法，主要由下面四个阶段组成：

1) 子午面通流图的确定 这个阶段中的大部份计算是利用一维流动的关系式，对参考半径（一般是平均半径）上的基元级进行的。实质上它是一种热力计算而不是流动分析。在这一阶段里，很多矛盾的处理及方案的选择都是根据经验来作出判断和决定的；计算本身所需要的很多数据也都是由实践经验提供的。通过这阶段的计算，诸如叶轮直径、转速、级数、级负荷的分配、各级动、静叶片的高度和弦长、叶列间的轴向间隙以及内外壳壁面型线…等参数便就都确定了下来。所以尽管计算很简单，但作用却很重要，可以说是气动设计中最基本的部份。在通流图确定之后，气动设计的要素很多都定下来了，其后的一切设计计算只能在它所规定的“框框”中进行，因此作用便有一定限度了。

2) 子午面（或 S_{2m} 流面）上气流参数的计算，即所谓“沿径计算”

这阶段计算的主要目的是确定不同径向高度的截面上基元级叶片进、出口的气流速

度、角度及状态参数，画出每一基元级进出口速度三角形。通常是根据设计对象及要求的不同而采用不同的方法：对于一般的情况，用简化后的径向平衡方法来确定叶列间隙中的参数还是可行的。只是对于少数负荷高，压缩性影响显著，轮毂比小的级，则有必要用通流矩阵法或速度梯度法（流线曲率法），在叶列通道内布置计算站，进行 S_2 流面亦即完全径向平衡的计算，更精确地求得在叶列间隙内的气流参数。

3) 按照上一阶段的计算结果进行叶片造型。这项工作大部份是采用半经验方法，利用大量叶栅试验所揭示的规律以及单级试验的结果进行的。最终的结果在很大程度上也取决于结构、强度和工艺的考虑。

4) 最后是对已经确定的子午面通流图及叶片型线，进行各种不同转速和流量时的变工况计算。

实际经验告诉我们：上述设计计算程序并不是一成不变的，在各个阶段中往往需要有试验的配合，然后经过多次的中间反复修改，逐步调整，相互协调，综合平衡，才能最终确定满意的方案。

4. 我国叶轮机械研究工作的现状和发展

根据历史的记载，我国劳动人民在很早以前就制作了近代燃气轮机的雏型——走马灯，它比外国同类的发明要早好几百年。

但是在旧中国，无论是燃气轮机的设计生产还是研究试验，都是毫无基础的，可以说是“一穷二白”。

在中华人民共和国成立以后，在建设社会主义总路线的指引下，我国社会主义工业和国防科研事业取得了迅速的发展。燃气轮机叶轮机械的设计、研究、生产和使用各个方面也都取得了很大的成绩。

在叶轮机械气动设计计算的基本理论方面，吴仲华同志提出的三维流动理论^[8]在我国得到了进一步的发展，并已用于工程实际。不但在燃气轮机各个应用领域中采用这种理论，并且在计算程序及方法上取得了不少实际经验，某些方面在理论和处理方法上还作出了新的改进。例如，导入了更通用的任意非正交曲线坐标系统^{[6][7][8]}；改进了沿非径向计算站 S_2 流面的计算公式^{[9][10]}；提出了求解 S_1 和 S_2 流面的沿任意曲线运动方程的通用形式^[11]；编制了利用流线曲率法求解 S_1 和 S_2 流面的计算程序^[12]...等。在轴流式涡轮叶片的控制旋涡流型设计分析方面也作了分析探讨并着手进行试验验证^{[13][14][15]}。

平面叶栅和任意回转面叶栅理论也取得了进展。涡轮平面叶栅的中心流线法^[16]被推广到任意回转面叶栅上去^[17]，在两种情况下都提出了解析解^{[18][19]}。引进了流动参数的无因次化，提出了有相当实用价值的任意回转面叶栅的通用数值解法^{[20][21][22]}以及其它方法^[23]。

对叶轮机械内部流动附面层的计算和测量也进行过一些工作，取得了若干结果^{[22][24][25]}。

对叶轮机械跨音速流动理论及其应用也开始了探讨。[26]中应用时间相关法对跨音速叶栅流场求解进行了分析和计算。跨音速压气机的设计计算和试验分析工作也有了进展^{[27][28][29][30]}。

由于试验研究工作在叶轮机械研制过程中有着重要的地位，在大跃进年代，燃气轮机

及其部件的试验室开始兴建。通过几年的踏实工作，掌握了某些基本的测试技术并取得了若干重要的结果。亚音速涡轮平面叶栅风洞流场调整取得了成效^[31]。压气机平面叶栅的多孔壁附面层抽吸技术已经掌握^[32]。测量气流参数的气动探针的设计制造和校正使用也积累了经验^{[33][34]}。环形叶栅试验为三维流动及二次流的研究提供了资料^[35]。单、多级轴流式压气机和涡轮的试验对产品发展起了重要的作用^{[36][37][38]}。对压气机级中的颤振和旋转失速现象进行过研究^{[39][40]}。亚音速涡轮平面叶栅为设计提供了简单可靠的半经验计算公式^{[41][42]}。对自行设计的压气机东风叶型做过大量细致的试验和分析工作，证明具有良好的性能^[43]。360 涡轮叶片的研制体现了理论和试验的结合，取得了满意的结果^[44]。红旗-1 和红旗-2 叶型设计也达到了先进的水平^[45]。与高性能压气机及涡轮的发展密切有关的试验设备和研究工作也已建设和进行了多年。

理论研究 with 试验研究的成果必然会反映到产品研制工作中并且促进产品的发展。这对燃气轮机叶轮机产品的研制也是一样的。我国自行设计的亚音速压气机已经调试成功。自行设计的涡轮具有良好的气动性能。船用燃气轮机的研制工作，无论是自行设计还是航空改装，都取得了进展。再拿电站燃气轮机来说，1964 年首先试制成功了功率为 1500 千瓦的固定式燃气轮机。此后 3000 千瓦和 6000 千瓦的燃气轮机卡车电站和列车电站，以及 3000 马力，4000 马力的机车用燃气轮机也积累了许多经验^[46]。

1963~1966 年间先后多次召开的“测试技术”和“工程热物理”等学术会议促进了科研成果和技术经验的交流。特别是 1976 年举行的“全国叶轮机气动设计计算和试验经验交流会”更是在一定程度上总结、反映了上述发展过程和研究成果。某些教材和讲义也从不同角度总结了我国叶轮机气动设计、研究和试验工作的成果^{[47][48][49][50]}。

我国叶轮机发展具有理论与实际结合的明显特点，这是十分可喜和可贵的。同时也需要强调指出：我们在叶轮机研制和发展方面具有很大的潜力。与设计计算和分析验证工作相比，试验研究的步伐需要加快。应当看到：无论是在叶轮机内部流动的基本研究，还是在新产品的研制工作方面，迄今还有不少重大的问题尚待进一步深入研究。

在很长一段时间内，由于缺乏有效的计算手段，以致当时已经提出的叶轮机内部流动的一些物理数学模型，一直未能在产品设计中加以详细分析并实际应用。随着计算技术的飞速发展它已经不再是应用新理论、新方法的障碍了。现在已经可以这样说：当前的主要矛盾乃是对叶轮机内部流动中某些基本机理还了解得不够具体，不够深入，以致提不出更精确、更完善的物理数学模型。因为电子计算机只是一种工具，它的最终计算结果是否符合实际，关键在于物理数学模型及其原始输入数据的精确可靠。而要达到这一点，我们既要有先进的计算工具的配合，而尤其迫切需要的乃是深入开展试验研究工作，借以弄清机理，积累数据，验证理论并最终使计算模型逐步地趋向完善、精确。

在叶轮机内部流动的基本研究方面，还存有以下三个方面的问题迫切需要解决：

(1) 流体粘性问题的恰当处理迄今仍是一个大问题。对于亚音速压气机来说，可以说它是头号问题，因为在亚音速压气机研制中最棘手的级间配合与协调，说到底乃是一个粘性问题。众所周知，沿径各基元级损失模型的正确选择，对气动设计计算的合理性与精确度有着直接的关系。而它不但取决于叶型表面以及机匣内外壳环形端面的附面层，而且还与各种复杂的二次流密切相关。根据叶栅试验得出的损失与单级试验得到的相应基元级的

损失有明显的差别；甚至在单级与多级动态试验中相应基元级的损失也有显著差别，原因就在于此。此外，在 S_2 流面的计算中，大家一致认识到：在理论上应该计入熵的沿径梯度；但是如果沿径损失模型选择不当，就会给 S_2 流面的计算带来误差，甚至得到截然不同的结果。

(2) 叶轮机内部超、跨音速流动的试验研究及理论研究亦是急待进行的课题。对于叶片通道内激波系统的形状与位置需要进一步深入了解。特别是对于激波间及激波与附面层间的相互作用，至今认识仍十分肤浅，急需开展工作。在一个有激波的混合流型的叶片通道内，如果对激波形状（它往往是一个复杂的曲面）和超音速及亚音速的分界面没有确切的知识，那么在叶栅通道内部 S_2 及 S_1 流面的迭代计算必将会遇到不少困难。因此，不但在这方面的理论计算及分析方法有待创新，超、跨音速流动的试验测量工作更是急需展开。

(3) 对于叶片通道内周期性不稳定流动的研究工作，也需要认真组织进行。目前，国外已开始搞了一些理论分析和探讨。随着现代气流参数测量技术的进步（如激光测速，微型小惯性传感器以及遥测遥感技术等），开展包括压气机旋转失速及喘振机理的深入研究，已经具备了一定的有利条件。

在燃气轮机发展研制工作中所面临到的一些实际问题是：

1) 多级压气机的级间配合及调试技术，看来仍需要进一步掌握并逐步完善。在此基础上，方有可能迅速成功地研制出高压比、高性能的多级压气机。

2) 随着压比的不断提高，改善高压比压气机的喘振特性的任务便显得更为现实而迫切。为此目的，除了需要对旋转失速及喘振机理进行深入研究以外，开展关于可转导叶的应用以及机匣处理技术的试验工作也是具有实际意义的。

3) 高压比轴流式压气机的进一步发展已经把跨音速压气机级的研制工作提到日程上来了。为了确保跨音级的性能，一方面需要合理地组织激波，研究良好的叶型；同时，看来也有必要把叶片喉部面积作为一个重要的设计控制参数来处理。此外，高亚音速大转折角导叶的试验研究工作与跨音速压气机级的设计直接有关，也必须认真对待。

4) 随着燃气轮机循环总压比以及涡轮进口温度的提高，涡轮的级负荷将会大幅度的增加，叶片冷却技术也要进一步推广应用。为了妥善处理叶片冷却与提高气动性能这一矛盾，大负荷气冷叶片气动力学的研究工作显得日益重要了。

完全可以相信，我国叶轮机气动热力学的研究以及船用燃气轮机的研制工作，今后将会更快地发展并取得更大的成果。

5. 本书各章的主要内容及其叙述方法

前面已经介绍了燃气轮机有着相当广阔的技术应用领域。尽管航空、电站、工业以及船用燃气轮机的工作原理基本相同，但应该清楚看到：随着应用领域和使用特点的不同，它们都各自有其不同的技术特点，某些差别还是相当明显的。

正因为这样，本书各章系统讨论的内容，主要是与船用燃气轮机气动设计计算和研究试验直接有关的那些问题。

因此，本书只叙述轴流式压气机和涡轮的有关问题，对其它型式的叶轮机机械则不予讨论。

因此，本书将主要叙述亚音速级的问题，对跨音速级只作简要的讨论。