涡轮机械中的气动热力学和流动

〔美〕 M.H.瓦夫拉 著

徐家驹 译

机械工业出版社

本书系统地阐明了气动热力学的概念、物理意义，以及为了使流动规律公式化而作若干简化假定的场合和原因。书中从分析涡轮机械旋转部件中的相对运动出发，论述了旋转运动、等熵流动和势流等内容，讨论了涡轮机械中存在的特殊边界条件所引起的流动问题。本书在分析研究了涡轮机械极其复杂的流动现象之后，引出了简化分析涡轮机械的三元流动。

本书对于从事涡轮机械设计、研究和教学的广大科技工作者，是一本难得的参考书，对于本专业的研究生和高年级大学生，也是一本有益的读物。

Aero Thermodynamics and Flow in Turbomachines

M. H. VAVRA

ROBERT E. KRIEGER PUBLISHING COMPANY 1974

* * *

涡轮机械中的气动热力学和流动

〔美〕M. H. 瓦夫拉 著

徐家驹 译

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街 号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 · 印张 18 [illegible] · 字数 483 千字

1984年8月北京第一版·1984年8月北京第一次印刷

印数 0,001—3,530·定价 3.45 元

*

统一书号：15033·5615

译者的话

本书系美国舰船研究生学院教授M. H. 瓦夫拉所著，第一版发表于1960年，第二版发表于1974年。

自本书第一版发表以来，已有二十多个年头了。其间，在涡轮机械的设计、制造和测试方面已取得了不小的进展，但就流动理论而言，正如作者在序言中所说的，并未发生概念性的重大变化。

涡轮机械在化工、冶金、电力、国防和原子能等各工业部门中应用很广。与此相适应，在教学、科研、制造和使用等各条战线上，也有大量的工程技术人员在进行着创造性的劳动。涡轮机械内的流动属于粘性、不稳定、可压缩的三元流动，流动结构十分复杂。因此，涡轮机械的设计和研制被认为是工程技术界的难题之一。事实表明，这一难题的解决，应从详细了解涡轮机械内部的热力过程和流动状态出发。

由于工作需要，译者曾参阅过有关涡轮机械的一些文献。使译者吃惊的是，本书原著第一版问世以后，凡是涉及涡轮机械流动理论的著作，几乎无一不把此书作为必须引用的参考书。正是这一点，使译者开始对本书发生了浓厚的兴趣，仔细地研读了其中的一些章节，有的还作了摘译。但译者决心着手全文翻译此书，是在得到原著第二版本之后，这得归功于一些对本书同样感兴趣的同事们的鼓励和支持。

本书不仅在理论阐述上系统、深刻，而又易于理解，并且在设法弥补涡轮机械理论与设计计算实践之间的脱节方面，提供了有效的途径。本书对于从事涡轮机械研究的广大工程技术人员，是一本难得的参考书，对于涡轮机械专业的研究生和高年级大学生，也是一本有益的读物。

本书译稿承蒙西安交通大学苗永淼教授、陈迺晋副教授和李超俊讲师校阅，提出了许多宝贵的修改意见。在翻译过程中又蒙有关同志赐教。在此表示衷心的感谢。

限于译者水平，译文中定有很多错误和欠妥之处，欢迎读者批评指正。

徐家驹

1981年9月

再版序言

自本书第一版出版发行以来，在涡轮机械的设计方面，虽已取得了很大的进展，但仍决定按原版重印。倘若这本教科书的目的，是要制定明确的设计程序的话，当会增补有关内容。但本书的意图始终是为了论述和运用机器内部流动的基本理论，而 14 年以来，在这方面并未发生概念性的重大变化。再版时，已校正了印刷错误和不妥之处。

作者期望，这个再版本会象原版一样，受到科学界的欢迎。并感谢 R·E·克利格出版公司，正是由于其努力，才使本书得以重新出版发行。

M. H. 瓦夫拉

1974年

第一版序言

多年来，涡轮机械内部流体流动的分析，有了若干有趣的变化。在空气动力学理论尚未建立或即将建立的早期发展阶段，人们把涡轮机械内的流动假定为一元流动，并采用纯热力学方法加以研究。在此期间，虽然空气动力学仅局限于不可压缩流体的运动，但蒸汽轮机工程师却已熟悉超音速流动的特性、产生激波的条件和阻塞现象。他们使用的那些理论，至今在一些特殊研究课题中仍被使用着，并可在大多数新近的热力学教科书中找到。

稍晚些，随着低速空气动力学，以及物体和机翼绕流理论的进展，在二元流动条件的假定下，提出了用不可压缩流体理论，估价涡轮机械及其叶栅性能的若干方法。主要是这些方法，促进了高效轴流压气机的发展。随着高速飞行的到来，开始运用较新的可压缩流动理论(现在习惯称为气体动力学)，该理论考虑可压缩性的影响，并直接获得流谱，或修正按不可压缩流动条件得到的流谱。

通常，气体动力学这门学科，是处理那些基本上属于二元的机翼表面流动，或过物体的绕流，以及总能大体上保持不变的流体问题。然而，涡轮机械（泵、压气机、蒸汽轮机、燃气轮机和水轮机）的主要作用，在于改变流体的能级。而且，在这些机器内运动的固体边界，与空气动力学所研究的外部流动边界大不相同。因为在涡轮机械内部，导引气流的一些部件，总是处于旋转面形的界壁之间。上述两个特点，构成涡轮机械内部的流动和气体动力学通常所论述的流动之间的主要差别。

另一方面，所有的流体流动，都是由相同的自然定律所支配的。目前通常认为：涡轮机械内的各种流动分析，都必须基于流体力学和热力学的一般原理。这些原理对于任何可压缩介质流动

都是适用的，当然也要注意能量变化与边界条件。本书第一篇，就是根据这些一般原理，借助于矢量法，有时也用一点并矢量，来推导任意流动的基本关系式（在本书附录A和B的引言中，已讨论了应用这种方法的原因。这些附录概述了矢量和并矢量分析方法，也列出了推导过程中所用的全部关系式）。这一篇，力图说明各种空气动力学概念的物理意义，并阐明为了把不同的规律公式化，必须作若干简化假定或假设的场合与原因。因此，这一篇可以用作涡轮机械以外其它流动领域的分析基础。我已把它作为研究生理论流体力学教程的内容，在美国舰船研究生学院讲授了多年。

本书第二篇，论述性质比较特殊的流动问题，即把流体的性质或流体所经历的热力过程理想化了的流动问题。从分析发生在涡轮机械旋转部件中的相对运动开始，探讨了诸如旋转运动、等熵流动和势流这类课题。我试图论证绝对流动和相对流动的特性差异，以及阐明涡轮机械中那种特殊边界条件所引起的流动现象。这种流动现象在外部流体力学所研究的对象中，通常并不存在。

本书第三篇，更直接地论述了涡轮机械中的流动问题。这类流动问题极其复杂，多半需要引进简化假定才能分析研究。在电子计算机应用之前，往往要作这样的假定，以便能用经典的数学手段求解。而今天，这类简化假定，则多半可着眼于所研究问题的物理形态方面。因此，工程师必须从物理上很好地了解流动现象，而描述流动的数学公式，也就变得比求解所用的方法更为重要。把涡轮机械内的流动简化至何种程度，不仅取决于确定这种流动所应有或必须有的精确程度，也取决于所研究的机器型式。

上述观点是论述本书第三篇各种课题的指南，但并未因此而忽视所用研究方法的实用价值。处理涡轮机械任意形状通道（或固定，或旋转）中的流动问题时，把流动假定为轴对称的，并适当地修正实际三元流动的影响。对于流面是旋转面的流动（所谓的准二元流动）所建立的关系式，可用来分析研究轴流压气机的

级。进行分析研究时，只涉及到了极少量的经验数据，这是为了说明如何应用已有的空气动力学理论和方法去确定设计极限。由于正文中所阐明的原因，涡轮级的分析仅仅是在一元流动的基础上进行的。附录C示出的表格，是具有最佳效率的涡轮级计算结果，表中数据是利用计算机计算出来的。在本书后面列出的计算结果，以及那些属于轴流压气机级的数据，都可以用于轴向流动机器三元流动状态的简化分析。

本书并未包罗涡轮机械中流动的各个方面。书中主要考虑的是设计点或额定工况点的流动状态，并未涉及性能图线的绘制法。一般说来，我力图排除那些基于设计准则的条文式的计算步骤和方法，因为通过目前和今后的研究工作，知识愈来愈多，这些东西迟早会要改变的。我希望本书不只暂时有用，还愿它能为一般流体机械领域中更加专门化的研究，尤其是为涡轮机械中流动问题的探索，提供广阔的基础。

最后，对直接或间接地帮助我写作本书的有关人员表示感谢。

M. H. 瓦夫拉

1960年

目　录

译者的话

再版序言

第一版序言

第一篇　基本流动关系式

第一章　流体质点的运动学 …… 1

　第一节　总论 …… 1

　第二节　速度场中的变化 …… 2

　第三节　流体质点的一般运动 …… 5

　第四节　流体质点的形变 …… 8

　第五节　应变椭圆面 …… 14

　第六节　流导数（连续方程） …… 20

第二章　流体质点的一般应力状态 …… 23

　第一节　引言 …… 23

　第二节　应力并矢量 …… 26

　第三节　任意平面内的应力 …… 28

　第四节　应力与应变之间的关系式 …… 31

　第五节　流体内的应力 …… 35

　第六节　流体基元的表面力 …… 40

第三章　运动方程 …… 43

　第一节　公式表示 …… 43

　第二节　热力学关系式 …… 45

　第三节　运动方程 …… 51

第四章　能量方程 …… 54

　第一节　总论 …… 54

　第二节　公式表示 …… 54

　第三节　讨论 …… 56

第五章　动量定理 …… 60

第一节　总论……60
第二节　公式表示……60
第三节　推导……63
第四节　动量定理的表达式……66
第五节　应用：排气速度不均匀的喷气发动机……75
第六节　应用：直叶栅……78
第七节　应用：直叶栅内部和尾后的损失……82
第六章　动量矩定律……91
第一节　推导……91
第二节　特殊表达式……95
第三节　应用：涡轮试验装置……100

第二篇　特殊的流体运动

第七章　相对运动……105
第一节　相对速度……105
第二节　相对加速度……110
第三节　连续方程……118
第四节　运动方程……120
第五节　能量方程……122
第六节　动量定理……124
第七节　动量矩定律……129
第八章　有旋运动……132
第一节　总论……132
第二节　环量……134
第三节　绝对流动中环量的流导数……137
第四节　赫姆霍茨涡流定理……142
第五节　相对流动的有旋特性……146
第六节　涡丝……148
第七节　不可压缩流动的诱导速度（毕奥-萨伐尔定律）……150
第九章　理想气体的等熵流动……154
第一节　音速……154
第二节　理想气体的热力学关系式……156

第三节　气流的密度变化 ……158
第四节　具有圆柱流面的贝尔特拉米流 ……160
第五节　自由涡流型的贝尔特拉米轴对称流 ……163
第六节　强迫涡流型的贝尔特拉米轴对称流 ……166
第七节　气流角度不变的贝尔特拉米轴对称流 ……170
第八节　通过环形孔道的质量流率 ……172
第九节　环形孔道内的气流阻塞 ……175
第十节　轴向叶栅前的超音速流动 ……181
第十一节　叶片间距无限小的超音速叶栅 ……185
第十章　势流 ……197
第一节　绝对势流 ……197
第二节　理想气体的绝对势运动流动方程 ……200
第三节　转子内稳定流动的涡度 ……204
第四节　稳定绝对转子流的流动方程 ……210
第五节　具有轴对称流面的流动 ……214
第六节　涡轮机械内的二元流动 ……220

第三篇　应用于涡轮机械

第十一章　旋转和固定通道内的轴对称流动 ……227
第一节　引言 ……227
第二节　叶面的几何形状 ……228
第三节　流动的平衡条件 ……237
第四节　叶片前缘处状态的影响 ……242
第五节　转子进口处的流动状态 ……245
第六节　转子出口处的流动状态 ……253
第七节　具有任意叶片的转子内的流动 ……257
第八节　具有法向叶片的转子内的流动 ……260
第九节　固定叶栅内的绝对流动 ……267
第十节　具有法向叶片的固定叶栅 ……269
第十一节　解法 ……276
第十二节　有限叶距和有限叶厚的修正 ……280
第十三节　试验研究 ……284

第十四节　无叶通道内的流动 ……288
第十二章　涡轮机械内的准二元流动 ……299
第一节　引言 ……299
第二节　旋转面上的准二元流动 ……300
第三节　圆柱流面上的无旋流动 ……306
第四节　叶片力和环量 ……308
第五节　替换叶栅的涡线系 ……314
第六节　由涡面替换的轴向叶栅 ……317
第七节　对非径向叶片叶栅涡系毕奥-萨伐尔定律之应用 ……320
第十三章　轴流压气机的级 ……328
第一节　叶栅内具有摩擦的不可压缩流 ……328
第二节　轴流压气机级的性能 ……332
第三节　设计参数的影响 ……338
第四节　叶片负荷准则 ……349
第五节　马赫数的影响 ……356
第六节　叶型损失 ……362
第七节　端损失 ……370
第八节　多级压气机的总性能 ……379
第十四章　通过任意叶栅的二元势流 ……388
第一节　引言 ……388
第二节　利用辅助流动转绘流场 ……391
第三节　辅助流动的确定 ……396
第四节　任意进口条件下的叶栅性能 ……400
第五节　计算步骤 ……405
第六节　实例 ……407
第十五章　通过涡轮级的一元流 ……412
第一节　引言 ……412
第二节　假定 ……413
第三节　涡轮级的作功能力和效率 ……417
第四节　级参数和反动度之间的关系式 ……421
第五节　涡轮级内流体的热力状态 ……424
第六节　计算与结果 ……427

第十六章　轴向涡轮机械的简化三元分析 ……………………433
第一节　引言 ……………………………………………………433
第二节　平衡条件 ………………………………………………434
第三节　解法 ……………………………………………………439
第四节　曲率的影响 ……………………………………………447
第五节　叶片类型的影响 ………………………………………449
第六节　施加能量梯度的影响 …………………………………457
附录A　矢量分析复习 ……………………………………………465
A 1　矢量代数 ……………………………………………………466
A 1.1　加法和减法………………………………………………466
A 1.2　标量积或点乘积…………………………………………467
A 1.3　矢量积或叉乘积…………………………………………468
A 1.4　互为垂直的单位矢量的乘积……………………………469
A 1.5　三个矢量的叉乘积和点乘积……………………………470
A 1.6　应用………………………………………………………472
A 2　矢量微分学 …………………………………………………474
A 2.1　矢量函数对标量变量的求导……………………………474
A 2.2　标量场和矢量场…………………………………………475
A 2.3　标量场的导数……………………………………………476
A 2.4　矢量场的导数……………………………………………480
A 2.5　流导数……………………………………………………484
A 2.6　矢量函数的散度和旋度…………………………………485
A 2.7　Del 的运算规则 …………………………………………487
A 2.8　对不同函数算子 ∇、∇·和∇×之应用……………………487
A 2.9　含有双重 Del 的运算法…………………………………490
A 3　曲线坐标 ……………………………………………………491
A 3.1　一般考虑…………………………………………………491
A 3.2　正交曲线坐标……………………………………………493
A 3.3　轴对称的正交坐标………………………………………494
A 3.4　轴对称的特殊正交系……………………………………501
A 3.5　以正交坐标表示的散度、拉普拉斯算子和旋度………504
A 3.6　以轴对称正交坐标系表示的梯度、散度、

拉普拉斯算子和旋度……506
A 4 矢量的积分学……509
A 4.1 线积分……509
A 4.2 高斯散度定理……510
A 4.3 从高斯散度定理引出的若干推导……512
A 4.4 斯托克斯定理……513
A 4.5 从斯托克斯定理引出的若干推导……516
A 4.6 矢量函数的唯一性……517
A 4.7 泊松方程……519
A 4.8 矢量函数分解为无旋部分和螺线部分……523
附录B 并矢量运算引论……525
B 1 并矢量代数……526
B 1.1 定义和运算规则……526
B 1.2 矢量和并矢量的乘积……532
B 1.3 对称并矢量和反对称并矢量……533
B 2 并矢量的微分法……537
B 2.1 并矢量对标量变量的微分法……537
B 2.2 并矢量$\nabla\vec{V}$和$(\nabla\vec{V})_c$……540
B 2.3 并矢量的散度和旋度……543
B 3 并矢量的积分法……551
B 3.1 高斯散度定理的变换……551
B 3.2 斯托克斯定理的变换……553
附录C 轴向式涡轮级的最佳工况表……554
表Ⅰ 回收95%出口损失的级……554
表Ⅱ 余速损失不回收的级……562
文献目录……570

第一篇　基本流动关系式

第一章　流体质点的运动学

第一节　总　　论

可以用两种截然不同的方法分析流体运动。以 J·L·拉格朗日（1736～1813年）取名的所谓拉格朗日法或经典方法，研究流体的特定基元沿着其轨迹移动时的变化。用这种方法，可以确定每一瞬时质点的位置、速度、加速度、压力和热力状态。若所有流体质点的这些数据都已确定，也就了解了流体的流动情形。

另一种可用于研究流体流动的方法，就是以 L·欧拉(1701～1783年）取名的所谓欧拉法或统计方法。这个方法研究流场内固定位置的流动状态。当不同的流体质点通过流场特定位置时，观察者就记下它们各自的速度、加速度和其它有关数据。若流动区域内各点的这些数据，都已记录下来，也就了解了流体的流动情形。

拉格朗日法比欧拉法对流动的了解更透彻，但其数学关系式复杂，只能解特殊的流型问题。对于多数的实际应用，由统计方法得出的数据，已足以正确估算流场。如在涡轮机械中，问题主要在于确定叶面或界壁上的流动状态，而不必精确了解流体质点在其轨迹上运动时，情况是怎样变化的。对于出现膨胀波和压缩波的可压缩流体非稳定流动，拉格朗日法更优于欧拉法，但若不能把过程简化为一元流动，求解时数学上的困难将是很大的。

以下仅考虑用欧拉法观察流场。用这种方法，若流动特性和所处流场位置之间的函数关系已经确定，则流动状态也就确定了。

在非稳定流动中，这些关系式也是时间的函数。对于欧拉法，使用矢量处理方法是有利的。如像速度和加速度这样的矢量，以及像压力和温度这样的标量，就可以分别用矢量点函数和标量点函数表达（见附录A 2.2）。确定流场的问题，在于建立一些满足自然定律和流场边界条件的函数。

除应用矢量以外，还借助并矢量导出流体流动的若干基本规律。附录A和B的引言中，讨论了采用这些方法的原因。附录A复习矢量分析方法，附录B论述并矢量运算方法。这些附录列举了所有用于正文中的关系式，读者对这两门学科即使知识有限，仍能领会推导过程。附录中的公式，例如公式A(2－)和公式B(3－)，分别表示附录A和B，括弧内的第一个数字为列出这些公式的附录的节数。正文中采用相同的公式计数法。例如，公式(3－)系指正文第三章的公式。

第二节　速度场中的变化

在非稳定流中，可以用矢量点函数表示速度场，即

$$\vec{V}=\vec{V}(\vec{r},t) \tag{1-1}$$

式中　$\vec{V}$——速度矢量。

在时间t，矢量$\vec{V}$位于矢径$\vec{r}$的端点。在稳定流场中，速度$\vec{V}$仅为$\vec{r}$的函数。图1-1的矢径端点P处，在时间t，速度$\vec{V}_{P,t}=\vec{V}(\vec{r},t)$。在时间$t+dt$，$P$处速度为：

$$\vec{V}_{P,t+dt}=\vec{V}_{P,t}+\frac{\partial\vec{V}_{P,t}}{\partial t}dt \tag{1-2}$$

在时间t的Q点处，速度按附录公式A(2-22)计算，即

$$\vec{V}_{Q,t}=\vec{V}_{P,t}+d\vec{V}=\vec{V}_{P,t}+d\vec{r}\cdot\nabla\vec{V} \tag{1-3}$$

Q点无限接近P点，处于矢径$\vec{r}+d\vec{r}$的终点。在时间$t+dt$，位置Q处的速度表达式，类似于公式（1-2）：

$$\vec{V}_{Q,t+dt}{}^{\ominus}=\vec{V}_{Q,t}+\frac{\partial\vec{V}_{Q,t}}{\partial t}dt \tag{1-4}$$

⊖ 原文为$\vec{V}_{Q,+tdt}$，似有误——译者注。

由公式（1-3）看出，速度$\vec{V}_{Q,t}$和$\vec{V}_{P,t}$之间的差别，仅为一个无限小的增量，除高阶差分外，公式（1-2）和（1-4）中对于时间的偏导数相等。因此，按公式（1-4）和（1-3），得

$$\vec{V}_{Q,t+dt}-\vec{V}_{P,t}=\frac{\partial\vec{V}}{\partial t}dt+d\vec{r}\cdot\nabla\vec{V} \tag{1-5}$$

式中　$\partial\vec{V}/\partial t$——$\vec{V}$在$P$点处和时间$t$的偏导数，是由流场的非稳定性质引起的。

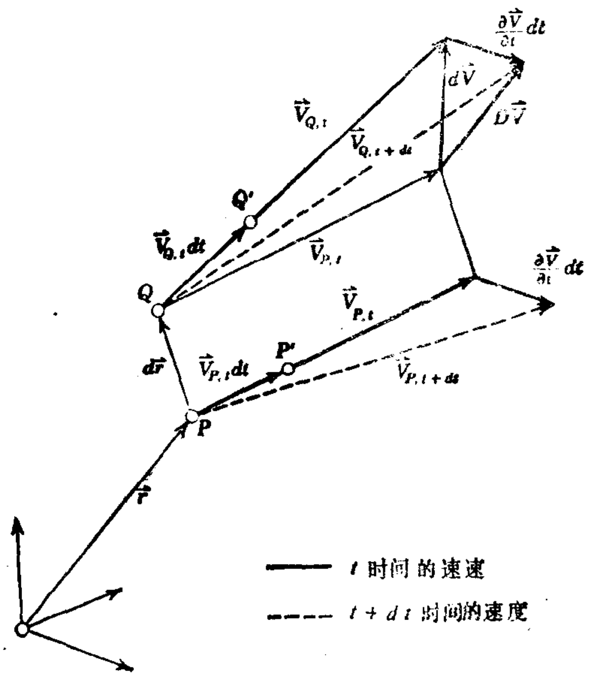

图1-1　速度场中的变化

按附录A2.4中所采用的符号表示，公式（1-5)左边就是所谓的速度总变化$D\vec{V}$。局部变化$(\partial\vec{V}/\partial t)dt$与速度在一个固定位置的变化有关，而$d\vec{V}=d\vec{r}\cdot\nabla\vec{V}$为速度增量，它是在流场中由此固定位置位移$d\vec{r}$时所引起的。在关系式

$$D\vec{V}=\frac{\partial\vec{V}}{\partial t}dt+d\vec{r}\cdot\nabla\vec{V} \tag{1-6}$$