

机泵节能新思维——

射流-尾迹三元流动 理论及其应用

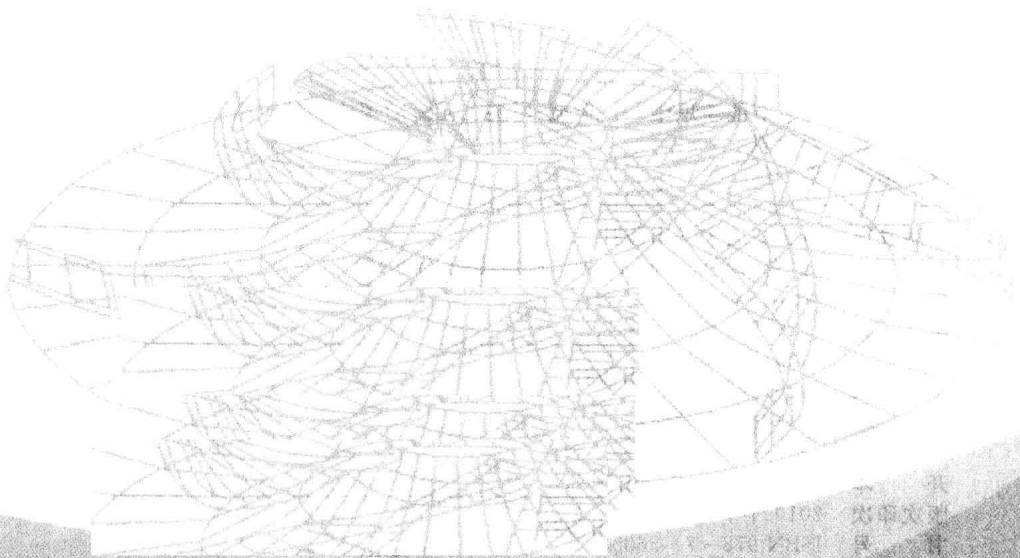
刘殿魁 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

机泵节能新思维——
**射流-尾迹三元流动
理论及其应用**

刘殿魁 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

机泵节能新思维——射流-尾迹三元流动理论及其应用/刘殿魁 著. —西安:西安交通大学出版社,2010.7
ISBN 978-7-5605-3542-5

I. ①机… II. ①刘… III. ①叶轮机械三元流动理论-应用-水泵;离心泵 IV. ①TH38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 083410 号

书 名 机泵节能新思维——射流-尾迹三元流动理论及其应用
著 者 刘殿魁
责任编辑 李 佳

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 西安交通大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 11 字数 261 千字
版次印次 2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-3542-5/TH·88
定 价 46.80 元

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdjgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

序

——介绍我国水泵节能的一位开拓者

这是一本好书，它详实地记录了刘殿魁先生几十年如一日追随吴仲华院士（原中科院院士委员会执行主席），将“吴氏三元流动理论”和他自己的“射流-尾迹三元流动计算方法”用于水泵节能的劳动成果，对于从事水泵节能、鼓风机节能和气轮机节能的同行会有所借鉴。

本书收录了刘殿魁先生近三十年来在国内外杂志上发表的水泵节能的文章。这些文章概括起来分为理论计算和应用两个方面。众多的应用实例证明，刘殿魁先生运用三元流动理论改造水泵叶轮在四个方面是国内领先的：一、国产水泵叶轮改造后节能效率一般达到10%左右，某些原设计选型不当的水泵改造后节能效率达到30%以上，数百台的工程实例证实了这一点。二、利用水力模型改型技术，实现了进口水泵叶轮国产化，且提高效率4%~8%。三、用三元理论改造美国潜油泵、欧洲国家的锅炉给水泵、水平中开泵等，主要技术指标达到世界领先水平。四、将航天技术移植到水泵上，开发出了具有前整流后消涡作用、节能明显的小型节能水泵。

上述成绩是刘殿魁先生含辛茹苦三十年才得到的。忆当年，他曾出任经中科院批准由吴仲华任董事长的科能公司总经理。上世纪80年代末，中科院院长周光召提出“一院两制”的结构：一制为基础、前沿性研究的研究所，一制为院办公司，要走上国民经济的主战场。刘殿魁是第一批从研究所走出来办公司的先行者。当初是很难的，带领研究所的15名科技人员，在一无场地，二无资金的情况下开始创业。他自筹资金，自谋出路，支持者寡，非议者多，真可谓“无人信高洁，谁为表予心？”刘殿魁先生知难而进，矢志不渝，“黄沙百战穿金甲，不破楼兰终不还”。经过几十年的努力，他成功了！《国际商报》、《北京科技报》、《中国石油报》等多家媒体报导他的事迹。当时本人在《中国经营报》当记者，对此感慨良多。我们把他誉为“中国水泵节能第一人”。刘先生一再嘱托，千万不可用此称谓。他说，全国有很多水泵节能专家，他只是其中的普通一员。而我认为“中国水泵节能第一人”的称谓，他是当之无愧的。扪心问，无论在中科院系统，还是在我国水泵行业，在水泵节能改造方面，谁会三十年如一日，何人能有如此辉煌的业绩啊！为了尊重刘先生的意愿，我还是把序言的标题改为“介绍我国水泵节能的一位开拓者”。“文人相轻”是中国知识分子的悲哀。把刘先生称作中国水泵节能的开拓者，可能有人也不认可。我之所以称刘先生是我国水泵节能的开拓者是有史可鉴的。

其一，众所周知，吴仲华先生的叶轮机械三元流动理论和“吴氏方程”是1952年就提出了，但是受到计算机技术的限制，一直难以得到大量的应用。即使到了上个世纪70年代，国内外（包括航空领域）也都限于 S_1 或 S_2 流面的二元流动求解。后来进展到一组 S_1 流面再

加一个 S_2 流面的准三元求解。直到 1980 年，当时在中科院工程热物理所工作的刘殿魁先生和陈静宜就发表了用两类流面交叉迭代，特别是每个流面计算实行“瞬时冻结”的方法，才得以实现求解。这一成果当时至少领先国内外同一领域的研究者几年时间。鉴于此，我称其为我国水泵节能的开拓者。

其二，“射流-尾迹三元流动计算方法”是刘殿魁先生 1986 年发表的论文。这不仅是对三元流动理论的发展，更重要的是他用此理论设计的管道泵和潜油泵效率超过国外同类泵的 4%~8%。以至于，美国太平洋泵业公司和美国 BJ 泵业公司两次询价提出购买刘先生的程序和图纸。可是，与此同时，我国某水泵厂还在花几十万美元谈判引进美国某种泵图纸。原天津机电总厂进口潜油泵的改造是刘殿魁先生 1986 年完成的第一例进口泵改造工程。之前，天津机电总厂引进美国雷达泵业公司 16 个规格的潜油泵图纸，转让费高达 850 万美元。然而，依此造出来的潜油泵不符合大庆油田的需要，下井时被卡住了，需要重新设计。刘殿魁先生接受了这个烫手的山药。几经努力，经他设计的潜油泵外径由 89 mm 减少到 85 mm，长度缩短三分之一，扬程提高 30%，泵实测效率由 55% 提高到 62%，经鉴定，达到了国际领先水平。除技术转让费外，天津电机总厂当即给研究组重奖一万元。之后，刘先生作为第一发明人，把潜油泵申报了中国专利和美国专利。据查询，这是我国第一个获得的美国水泵专利。鉴于此，我称其为我国水泵节能的开拓者。

其三，国内外学术界有一个通则——衡量基础科学原著的一个重要标准是在国内外文献中引用的次数。但对于应用科学还有一个重要的标准，那就是应用实例及其经济效益。刘殿魁先生的论文至今还在被同行所引用，更重要的是刘先生几十年已完成了几百台水泵的改造。从本书附录的用户加盖红章的工程实例中可以看出，改造后的水泵节能效果突出。据不完全统计，经刘先生改造的水泵年节电上亿度。鉴于此，我称其为我国水泵节能的开拓者。

湖南利能科技股份有限公司具有雄厚的实力和超前的营销理念，核心团队所倡导的“管理降耗技术，系统工程的节能理念”和“节能 120”服务模式已经为多个省市节能主管机构所认同和推广，并在国家领导人视察集团公司时得到了相关领导的高度赞扬和关注、支持。股份公司从事水泵节能、工业余热利用和建筑节能成绩斐然，已得到社会的认可。

长沙是我国著名的水泵之乡，刘殿魁先生加盟湖南利能且出任水泵节能首席专家，必将把利能公司的节能工作推向更高的水平！

节能减排利在当代，功在千秋。让我们以刘殿魁教授为榜样，共同谱写节能减排的新乐章吧！

作为老友，讲点心里话，是为序！

湖南利能科技股份有限公司

技术总监 张宪坤

2010 年 5 月 8 日

前言

叶轮机械三元流动理论是由著名科学家、中国科学院院士吴仲华(1917—1992)于1951年在美国创立的,20世纪70年代电子计算机得到广泛应用后,这一理论才被广泛用于航空燃气轮机设计,西方各大发动机制造公司和国际航空界称之为“吴氏理论”或“吴氏方程”,在学术界吴仲华教授被公认为叶轮机械三元流动理论的奠基人。1976年美国多位泵专家合著的权威工具书《泵手册》把吴氏理论列为80年代可能出现的泵先进设计方法。

我作为吴仲华院士生前的学生和助手,于1980年提出了“流面坐标”迭代法,在电子计算机上实现了他提出的 S_1 、 S_2 两类流面求解三元流动的方法,并在1986年又提出了离心泵内具有射流-尾迹模型的三元流动计算方法。在美国大型泵业公司:Pacific Pumps及Byron Jackson Pump Division介绍这一方法时,引起极大兴趣。后来为Pacific Pumps作水力计算分析受到美方好评。

应用这一软件我们在1986年改进过美国Reda Pump Division公司和Centriflith-Hughes公司的潜油泵,水力效率提高了4%~8%,并获得了美国专利(United States Patent 4,865,519);2004年改进过瑞典ABS泵公司的水平中开泵,自来水厂实测泵性能有明显改进:在大约相同扬程条件下,泵流量和效率提高了4%~8%。

自1994年以来,应用这一方法在国内自来水、石油、化工、钢铁、电力等多个领域改造多种型号的离心泵,均取得了5%~15%甚至更高的节能效果,累计各单位节电超过一亿度。

我1962年清华大学燃气轮机专业(这是吴仲华回国后1956年首创的专业)毕业,分到中国科学院作吴所长的助手时,还根本看不懂他的论文。后来一点点终于学懂的时候,我曾在日记里写过这样几句话:

“我爱科学。当我从那里探求到一点东西的时候,犹如信徒渴望天国一样虔诚;犹如情侣渡蜜月一样欢悦;犹如乞丐发现了金矿一样狂喜……

但这些比喻还不确切。因为我虔诚,但无任何迷信;我快乐,却不似蜜月般短暂;我狂喜,但没有一点独占的念头。

也许下一种比喻还比较贴近,那就是终生跋涉于沙漠中的骆驼,对于水的执著探索。科学,将是我生命得以繁荣的源泉。”

可惜随之而来的是“文化大革命”的浩劫。

到了1970年,总算由“横扫一切牛鬼蛇神”变为“抓革命,促生产”。吴先生刚刚从“反动权威”的“牛棚”中解放出来,即率我们到东北参加某航空发动机的改型设计。当时没有电子计算机,他亲自用自己提出的简化径向平衡方程,用手工计算,在工厂里干了两个多月。他精神焕发,被工人师傅亲切地称之为“我们的教授”(自此时到他逝世,私下里我们也都叫他“教授”,而不叫他吴所长)。

联想他 1955 年抛下全部家产，以旅行名义辗转英国、瑞士、前苏联返回祖国，其拳拳报国之心，让我深深体会了一个科学家是怎样为人师表的。

正是始于那次实践，以后几十年使我下决心把这一理论应用到实际产品设计中去。我从 1986 年改行水泵，始终以他为榜样，不让一日有所松懈。现将公开发表过的主要论文集成一册，借以表达对教授深切的怀念，也许对同行有点参考价值。

作者

2010 年 2 月

致 谢

为将各刊物上登载的论文，重新编排打印为统一版式，吴一平同志付出了大量劳动，在此表示诚挚的谢意。

目 录

一、基本理论

- 叶轮机械沿任意曲线的运动方程及其应用,《力学》,科学出版社,1976…………… (1)
- 叶轮机械内的三元流动——“流面坐标”迭代法,《工程热物理学报》第1卷第3期,1980年…………… (21)
- 离心泵内具有射流-尾迹模型的三元流动计算,《工程热物理学报》第七卷第1期,1986年…………… (31)

二、试验研究

- 离心泵的改型设计及试验研究,《工程热物理学报》第6卷第4期,1985年… (36)
- 离心泵特性的调整,《油田地面工程》第5卷第4期,1987年…………… (41)
- 油田注水泵三元叶轮的设计及试验验证,《石油学报》第9卷第2期,1988年 (48)

三、在压气机、潜油泵、多级输油泵中的应用

- 关于压气机改型设计的若干问题,《工程热物理学报》第4卷第3期,1983年 (56)
- 潜油泵的改进,《石油矿场机械》第15卷第1期,1986年…………… (63)
- 射流-尾迹三元流动计算在潜油泵设计中的应用,《石油学报》…………… (69)
- 输油泵站的节能技术改造,《第七届全国工业与环境流体力学会议论文集》2001年…………… (79)

四、在水泵中的应用

- 供水系统的节能改造,《中国工程热物理学会流体机械学术会议论文集》,1996年 (84)
- 供水泵站节能技改的新途径,《给水排水》第26卷第5期,2000年…………… (87)
- 电厂循环水泵的节能改造,《流体机械》第28卷第9期,2000年…………… (92)
- 加压泵站水泵节能技术改造,《通用机械》第7期,2003年…………… (96)
- 进口水泵的节能改造,《上海节能》第2期,2005年…………… (99)
- 小型锅炉给水泵的优化设计,《工业锅炉》第1期,2006年…………… (103)
- 三元流技术及其在发电厂循环水泵节能改造中的应用,…………… (107)

五、英文论文

- Calculation of 3-D Jet-Wake Flow and its Application in the Design of Boiler Feed Pump, Proceedings of International Conference on Pumps and Systems, Beijing, 1992…… (112)
- Reform the Impeller of a Water Supply System for Energy Saving, ICEST'95 Paper, 1995…………… (121)
- Calculation of Complete Three-Dimensional Flow in a Centrifugal Rotor with Splitter Blades, ASME Paper 88—GT—93, 1988…………… (125)

六、附录：“射流-尾迹三元流动理论”用于水泵技改的部分实例

叶轮机械沿任意曲线的运动方程及其应用

中国科学院北京力学研究所 刘殿魁 陈静宜 刁正纲

前 言

本文推导了叶轮机械内理想气体沿任意曲线方向的运动方程，方程表示为流面上气体速度沿任意曲线方向变化率的一阶微分方程，适于求解。详细讨论了方程在 S_1 和 S_2 两类流面上的求解。将计算实例与其它文献或实验结果作了比较，表明本文提供的方法适合在叶轮机械气动设计中应用。

符 号

G 质量流量 千克/秒	h 单位质量气体的焓 公斤·米/千克
H 单位质量气体的滞止焓 公斤·米/千克	l (相对) 滞止转子焓 公斤·米/千克
K 气体的比热比	R 气体常数 公斤·米/千克·°K
r, φ, z 相对圆柱坐标	r, θ, z 绝对圆柱坐标
l 气体流面上的任意曲线	q 任意曲线
m 流线在子午面上的投影	P 气体的压强 公斤/米 ²
T 气体的绝对温度°K	ρ 气体的密度 千克/米 ³
s 单位质量气体的熵 公斤·米/千克	V 气体的绝对速度 米/秒
W 气体的相对速度米/秒	$g_0=9.81$ 千克·米/公斤·秒 ²
N 叶片数目	Δn 子午面上的法向流片厚度 米
子午面流线与 z 轴的夹角	aq 子午面上任意曲线 q 与 r 轴的夹角
β 回转面上流线与 m 方向的夹角	ω 旋转角速度 1/秒
t 时间 秒	$t\theta$ 叶片周向厚度 米
η 绝热效率	μ 离心式压气机的滑动系数
下注:	
r 径向分量	θ, φ 周向分量
Z 轴向分量	m 子午面流线方向
i 进口截面	2 出口截面
O 滞止参数	av 叶片通道内平均流线上参数
P 压力面	S 吸力面或等熵流动

1 S_1 流面

1.1 S_1 流面的运动方程

根据牛顿第二定律，在相对圆柱坐标系 r, φ, z 中无粘性理想气体的运动方程可用下式

表达

$$\frac{dW}{dt} - \omega^2 r + 2\omega \times W = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (1)$$

其分量形式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dW_r}{dt} - \frac{(W_\varphi + \omega r)^2}{\rho} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{d(rW_\varphi + \omega r^2)}{dt} &= -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \omega} \end{aligned} \right\} \quad (1a)$$

$$\frac{dW_z}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$$

叶轮机械中气体质点的运动是十分复杂的三元流动。如果我们观察叶片上游的某一曲线（例如一根径向线，或一根圆弧线），则过此曲线上各点的诸流线将组成一复杂的空间曲面。文献[2]将这种曲面称为气体流面，利用这个概念可把三元流动的求解分解为 S_1 和 S_2 两类流面上的求解（图 1）， S_1 流面通常取为以转轴为对称轴的任意回转面， S_2 流面则为近似于叶片中心面的某种连续曲面。为了计算方便起见，有时我们取与流面不重合的坐标面来定义流体质点的空间位置，当考察坐标面上沿某一任意曲线 q 气体参量的变化时，我们应将该曲线 q 视为流面上相应曲线 l 在坐标面上的投影，而沿 q 方向的气体参量的变化是指流面上与 q 相应的曲线 l 上气体参量的变化。为了使运动方程的数学表达式能确切地反映叶轮机械中气体流动的这种物理模型，可采用沿流面偏导数的表达方法

$$\frac{\bar{\partial}(\cdot)}{\partial q} = \frac{\partial(\cdot)}{\partial r} \frac{dr}{dq} + \frac{\partial(\cdot)}{\partial \varphi} \frac{d\varphi}{dq} + \frac{\partial(\cdot)}{\partial z} \frac{dz}{dq} \quad (2)$$

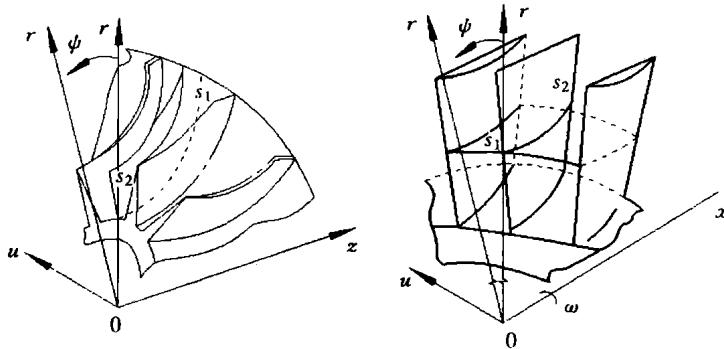


图 1 S_1, S_2 流面及圆柱坐标系
(a) 径流式；(b) 轴流式

为了得出沿任意曲线 q 运动方程的适用形式，我们再使用能量方程。在相对运动稳定和绝热的假定下，可有

$$\frac{dI}{dt} = 0 \quad (3)$$

其中

$$I = H - \frac{\omega}{g_0}(V_{\theta r}) = h + \frac{W^2}{2g_0} - \frac{\omega^2 r^2}{2g_0} \quad (3a)$$

目前在叶轮机械的气动计算中常常利用一些流动损失的经验数据折算出气体流动时的熵增，这可认为是一种局部地考虑粘性的处理方法，按热力学定律可有

$$Tds = dh - \frac{1}{\rho} dp \quad (4)$$

合并式 (3a) 与式 (4)，并取沿任意曲线 q 的沿流面偏导数，可得

$$\frac{1}{g_0} \frac{\partial W}{\partial q} = \frac{1}{W} \left[-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial q} + \frac{\omega^2 r}{g_0} \frac{\partial r}{\partial q} + \frac{\partial I}{\partial q} - T \frac{\partial s}{\partial q} \right] \quad (5)$$

将上式中的 $\bar{\delta}p/\partial q$ 项按式 (2) 展开，并将式 (1a) 代入，再注意到如下的几何关系 (图 2)

$$W_r = W \cos \beta \sin \alpha$$

$$W_\varphi = W \sin \beta$$

$$W_z = W \cos \beta \cos \alpha$$

$$W_m = W \cos \beta$$

$$\frac{d(\quad)}{dt} = Wm \frac{d(\quad)}{dm}$$

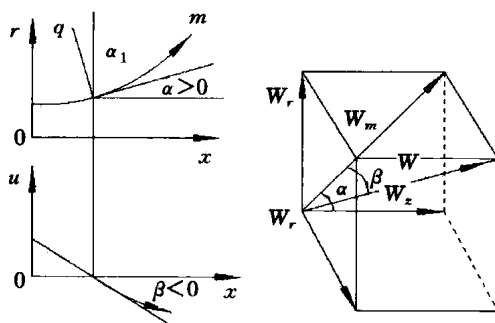


图 2 子午面流线及速度在圆柱坐标中的投影

则由式 (5) 即可得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial q} = & \left[\frac{d(W \cos \beta \sin \alpha)}{dm} \cos \beta - \frac{W \sin^2 \beta}{r} - 2\omega \sin \beta \right] \frac{dr}{dq} + r \left[\frac{d(W \sin \beta)}{dm} \cos \beta \right. \\ & \left. + W \sin \beta \cos \beta \sin \alpha + 2\omega r \cos \beta \sin \alpha \right] \frac{d\varphi}{dq} \end{aligned}$$

$$+\frac{d(W \cos \beta \cos \alpha)}{dm} \cos \beta \frac{dz}{dq} + \frac{g_0}{W} \left[\frac{\bar{\partial} I}{\partial q} - T \frac{\bar{\partial} s}{\partial q} \right] \quad (6)$$

这是叶轮机中理想气体沿任意曲线形式的运动方程。对于 S_1 流面情况，气体流面关系式为 $r = r(\varphi, z)$ ，通常任意曲线 q 取为 φ 坐标方向，则 $z = \text{常数}$ ，因此有

$$\frac{dz}{d\varphi} = 0 \text{ 和 } \frac{dr}{d\varphi} = \frac{\partial r}{\partial \varphi}, \text{ 代入式 (6) 后即得}$$

$$\begin{aligned} \frac{\bar{\partial} W}{\partial \varphi} = & \left[\frac{d(W \cos \beta \sin \alpha)}{dm} \cos \beta - \frac{W \sin^2 \beta}{r} - 2\omega \sin \beta \right] \frac{\partial r}{\partial \varphi} + \left[r \frac{d(W \sin \beta)}{dm} \cos \beta \right. \\ & \left. + W \sin \beta \cos \beta \sin \alpha + 2\omega r \cos \beta \sin \alpha \right] + \frac{g_0}{W} \left[\frac{\bar{\partial} I}{\partial \varphi} - T \frac{\bar{\partial} s}{\partial \varphi} \right] \quad (6a) \end{aligned}$$

若流面为回转面，则 $\frac{\partial r}{\partial \varphi} = 0$ ，再注意到此时有 $\frac{\bar{\partial}(\cdot)}{\partial \varphi} = \frac{d(\cdot)}{d\varphi}$ ，方程 (6a) 可进一步化简为

$$\begin{aligned} \frac{dW}{d\varphi} = & r \frac{d(W \sin \beta)}{dm} \cos \beta + W \sin \beta \cos \beta \sin \alpha + 2\omega r \cos \beta \sin \alpha \\ & + \frac{g_0}{W} \left[\frac{dI}{d\varphi} - T \frac{ds}{d\varphi} \right] \quad (6b) \end{aligned}$$

对于纯径流式叶机械的 S_1 流面计算，还可将气体流面关系式定义为 $z = z(r, \varphi)$ ，通常任

意曲线 q 也取为 φ 坐标方向，则 $r = \text{常数}$ ，因此有 $\frac{dr}{d\varphi} = 0$ 和 $\frac{dz}{d\varphi} = \frac{\partial z}{\partial \varphi}$ ，代入式 (6) 后可得

$$\begin{aligned} \frac{\bar{\partial} W}{\partial \varphi} = & \left[r \frac{d(W \sin \beta)}{dm} \cos \beta + W \sin \beta \cos \beta \sin \alpha + 2\omega r \cos \beta \sin \alpha \right] \\ & + \frac{d(W \cos \beta \cos \alpha)}{dm} \cos \beta \frac{\partial z}{\partial \varphi} + \frac{g_0}{W} \left[\frac{\bar{\partial} I}{\partial \varphi} - T \frac{\bar{\partial} s}{\partial \varphi} \right] \quad (6c) \end{aligned}$$

对于静止叶栅情况，只要将式 (6a) — (6c) 中的 W 换成 V ， I 换成 H ，并令 $\omega = 0$ ，即可得相应的各种适用形式。例如对于离心式压气机的径向扩压器叶栅，可有流面关系式 $z = z(r, \theta) = \text{常数}$ ，此时除 $dr/d\theta = 0$ 外还有 $dz/d\theta = 0$ ，再注意到 $\alpha = 90^\circ$ ，即 $dm = dr$ ，则

式 (6c) 可化简为

$$\frac{dV}{d\theta} = r \frac{d(V \sin \beta)}{dr} \cos \beta + V \sin \beta \cos \beta + \frac{g_0}{V} \left[\frac{dH}{d\theta} - T \frac{ds}{d\theta} \right] \quad (6d)$$

运动方程 (6) 还具有以下两个特点。

(1) 采用了沿流面偏导数的方法, 使式 (6) 在概念上较为清晰。文献[3]曾使用方向导数的表达方法得到了沿任意曲线的运动方程。按方向导数的概念, 虽形式上和式 (2) 相同, 但其参量变化均应在曲线 q 上取值, 当曲线 q 不在流面上时, 该曲线 q 上的各点将各自分属于不同的流面, 这将给实际计算带来困难。

(2) 式 (6) 中除焓、熵的变化规律和角速度 ω 等给定参数外, 只出现速度 W 和气流角 β 与子午面流线倾角 α , 而后者属于流线的几何参数, 因此运动方程的式 (6) 形式适于使用流线曲率法进行计算。下面就以式 (6b) 为例, 介绍叶轮机械回转面正问题气动计算的方法和结果。

1.2 回转面正问题的气动计算

1.2.1 计算公式与求解步骤

目前在回转面计算中通常仍忽略焓和熵的周向变化, 因此式 (6b) 将写为 (注意此时沿流面偏导数退化为普通导数)

$$\frac{dW}{d\varphi} = r \frac{d(W \sin \beta)}{dm} \cos \beta + W \sin \beta \cos \beta \sin \alpha + 2\omega r \cos \beta \sin \alpha \quad (7)$$

按式 (7) 由通道的平均流线向两侧积分求速度分布时, 采用简单的隆哥-库塔方法

$$\left. \begin{aligned} W_{K+1}^A W_k + \left(\frac{dW}{d\varphi} \right)_k \Delta \varphi \\ W_{K+1}^B = W_k + \left(\frac{dW}{d\varphi} \right)_{k+1} \Delta \varphi \\ W_{K+1} = \frac{W_{K+1}^A + W_{K+1}^B}{2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中求 $(dW/d\varphi)_k$ 时用 K 站的几何参数和速度初值 W_k , 求 $(dW/d\varphi)_{k+1}$ 时用 $K+1$ 站的

几何参数和速度初值 W_{K+1}^A 。

流线的几何参数按下式计算:

$$\alpha = \arcsin \frac{dr}{dm} \quad (9)$$

$$\beta = \arcsin \left(\frac{rd\varphi}{dm} \right) \quad (10)$$

数值微分公式采用按等距步长的多项式五点微分公式，对于函数两端的各二点采用三点公式。

计算中需假定自进口到出口截面的效率分布，以便通过密度计算的修正局部地反映沿流线方向的流动损失。

对压气机有（图 3）

$$\begin{aligned}\Delta H &= \omega V_{\theta} r - \omega(V_{\theta} r)_i = (W \sin \beta + \omega r) \omega r - \omega(V_{\theta} r)_i \\ H &= H_i + \Delta H \\ H_s &= H_i + \eta \Delta H\end{aligned}\quad (11)$$

对涡轮有（图 4）

$$\begin{aligned}\Delta H &= \omega(V_{\theta} r)_i - (W \sin \beta + \omega r) \omega r \\ H &= H_i - \Delta H \\ H_s &= H_i - \frac{\Delta H}{\eta}\end{aligned}\quad (11a)$$

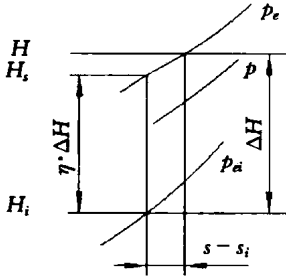


图 3 压气机工作过程焓熵图

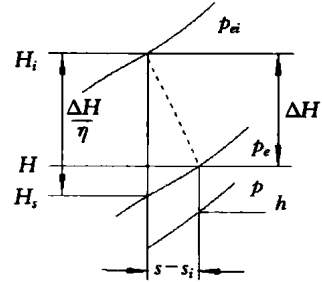


图 4 涡轮工作过程焓熵图

$$\frac{\Delta s}{R} = \frac{K}{K-1} \ln \frac{H}{H_s} \quad (12)$$

$$\frac{T}{T_{0i}} = \frac{h}{H_i} = \frac{(H - \omega V_{\theta} r)_i - \frac{W^2}{2} + \frac{\omega^2 r^2}{2}}{H_i} \quad (13)$$

$$\frac{p}{p_{0i}} = \left(\frac{h}{H} \cdot \frac{H_s}{H_i} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{T}{T_{0i}} \cdot \frac{H_s}{H} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (14)$$

$$\frac{\rho}{\rho_{0i}} = \frac{\rho}{\rho_{0i}} \cdot \frac{T}{T_{0i}} \quad (15)$$

采用梯形公式积分连续方程求流量

$$G = N \int_{\varphi_p}^{\varphi_s} \rho W \cos \beta \Delta n r d\varphi \quad (16)$$

G 为由回转面流片厚度所形成的环形通道所通过的流量。按弦线求根法作流量迭代，一般迭

代 3-5 次可满足精度要求 ≤ 0.005 。为保证解的收敛性,在流量迭代时式 (7) 中的 $d(W \sin \beta) / dm$ 项保持不变,它只在作外层流线迭代时才改变。流线迭代时的松弛因子取为 1/5-1/10,流线位置和速度迭代的精度要求均取为 ≤ 0.005 ,一般需迭代 10-20 次。此外,还应进行满足下游区周期性条件的迭代计算,并据此来求得出气角或离心式压气机所惯用的滑动系数。

按上述步骤采用 BCY-乙算法语言编写了电子计算机计算程序,使用 109-乙机一个回转面的计算需时 10 分钟左右。

1.2.2 上下游区的处理方法

在回转面的气动计算中,在出口截面应满足库塔—儒可夫斯基的后驻点条件,但在按理想气体处理的计算中后驻点位置是不确定的,文献[8]曾作了计算比较。说明后驻点位置的微小差异将给解带来极为不同的结果。我们采用的原则是满足下游区的周期性条件,并据此来确定气流的出气角或离心式压气机的滑动系数,具体作法可有如下两种:

(1) 电子计算机求解

在下游区取一个计算站,该站上由叶片压力面和吸力面延长而形成的边界流线位置可作两种均为任意的假定,两个假定值之差建议取为通道周向宽度的 1/10—1/20,分别求解后可得出两组速度分布,计算程序按弦线求根法比较之,即可得出一个新的、满足周期性条件的下游站边界流线位置,并按其求解而得出计算结果。若需要可自动再作调整计算,一般只需调整三次即可得到满意的结果。

曾与文献[7]建议的方法作了计算比较。文献[7]在假定速度沿周向在线性变化规律的前提下,推导出了下游区若干站(4-6站)都满足周期性条件时,求解各站流线位置调整量的代数方程组。这种方法通用性强,但计算工作量较大,一般需进行 8 次左右的调整计算才能得到满意的结果。

上游区的边界流线按如下方法给定:由叶片中线的前端点按给定的进气角方向作延长线,在该延长线上可取 4—5 个计算站,对于进入叶片通道后的第一站,采用文献[7]建议的光滑化公式来消除由于叶片厚度而引起的边界流线位置之突跳。计算实践表明,这样求解得到的速度分布一般已能满足上游区的周期性条件,因此无需如下游区那样再作调整计算。

(2) 手算近似解

目前在离心式压气机叶片的回转面计算中仍广为采用文献[6]建议的简化算法,但所得的叶片表面速度在出口截面处不能满足库塔-儒可夫斯基条件。文献[6]曾建议按给定的 μ 值在某一半径 R_x 之上用抛物线规律修正平均流线位置的办法,但修不能得到满意的结果。实际上,由于出口截面的库塔-儒可夫斯基条件即相当于卸载条件,因此我们可对文献[6]建议的手算近似解作如下改进:由给定的 μ 值得到出口截面处满足 W_{av} 、亦即 $(V_{\theta r})_{av}$ 之后,以出口截面处满足 $d(V_{\theta r})_{av} / dm = 0$ 为条件,由作图使用多项式拟合公式,得到半径 R_x 之上的 $(V_{\theta r})_{av}$ 的分布规律(图 5 的虚线),据此再反算平均流线的位置修正,即可仍按文献[6]建议的公式计算而得到满足库塔-儒可夫斯基条件的结果。

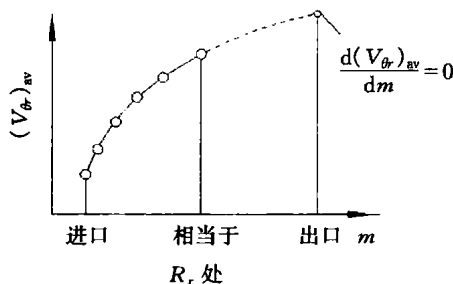


图 5 $(V_{\theta r})_{av}$ 分布规律的假定

1.2.3 计算例题

(1) 与文献[6]中四个例题的比较

文献[6]提供了一个纯径流式压气机叶轮在不同流量、叶片造型和叶片数各种情况下的八个计算例题，我们选其 a,b,c,e 四个例题作了计算比较。仅就叶片表面速度分布的比较即可看出，本文的计算结果与文献[5]建议的张弛解很为一致，而与文献[6]的简化解有所不同。图 6 给出了例题 c 的结果。

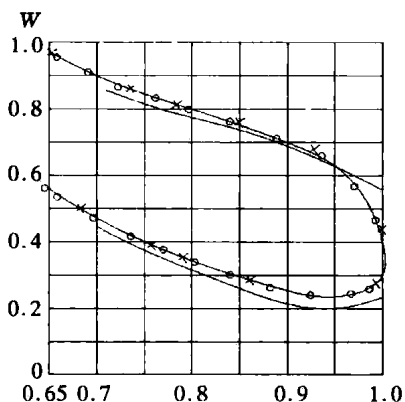


图 6 一台纯径流式压气机回转面的变负荷计算结果
(文献[6]中的例题 c)

按文献[5]张弛解：——按文献[6]近似解；×按文本方法

滑动系数的比较如下：例题 a,b,c 均为 30 片叶片，文献[5]给出的 μ 值在 0.934-0.938 之间，按本文方法均得到 $\mu = 0.9$ 左右；例题 e 为 20 片叶片，文献[5]给出的 $\mu = 0.899$ ，本文得到 $\mu = 0.87$ ，文献[9]曾对大量的计算 μ 值的各种理论与经验公式作了比较，其中按文献[5,6]推荐的公式计算出的 μ 值也均偏高，本文结果相当于文献[9]推荐的公式： $\mu = 1 - \frac{\sqrt{\cos \beta_2}}{N^{0.7}}$ ，这也是目前在离心式压气机设计中广为采用的公式。

(2) 离心式压气机叶片负荷的分析

在一台压比为 2.5 的离心式压气机气动设计的回转面计算中，我们曾作了调整叶片负荷

的计算比较。从运动方程(7),稍加变换可写出

$$\frac{dW}{d\varphi} = \cos \beta \frac{d(V_{\theta} r)}{dm} \quad (7a)$$

如果我们以叶片吸力面和压力面的速度之差 $\Delta W = W_s - W_p$ 作为叶片负荷的某种代表性参数,则在给定的总参数下,例如加功量(亦即 $\Delta(V_{\theta} r)$)、叶片数(亦即 $\Delta\varphi$),可以通过调整变化率 $d(V_{\theta} r) / dm$ 来改变叶片负荷的分布。

哪些因素将影响 $d(V_{\theta} r) / dm$ 的变化率呢?为了讨论这一问题,我们将式(7)写为另一种形式

$$\frac{dW}{d\varphi} = W \left(r \frac{d\beta}{dm} + \sin \alpha \sin \beta \cos \beta \right) + r \frac{d(W \cos \beta)}{dm} \sin \beta + 2\omega r \sin \alpha \sin \beta \quad (7b)$$

分析式(7b)右端各项可以看出,由于 $\frac{d(W \cos \beta)}{dm} = \frac{dW_m}{dm}$ 一般较小,该项的影响可

暂略去,因此对离心式压气机的导风轮部分,由于 α 角较小,曲率项 $d\beta/dm$ 将是影响负荷分布的最主要因素。图7表示出了我们在顶部回转面所作的改变负荷分布的计算结果,两种情况虽然进口叶片角相同,但造型规律不同,得到的负荷分布也不同,实线对应于导风轮进口部分曲率较小的造型,虚线对应于导风轮出口部分曲率较小的造型。

有些现代的高压比离心式压气机,考虑到进口 M 数较高,为了在导风轮部分把负荷尽量向后移,以致在其出口部分使叶片过度弯曲,结果在与工作轮相转接的附近甚至形成了S形的叶片造型。

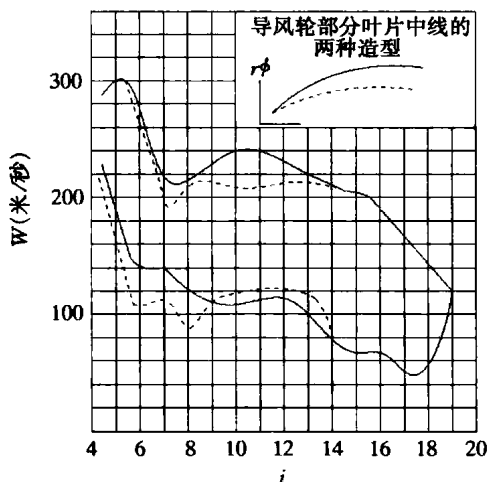


图7 一台离心式压气机回转面的变负荷计算结果

在离心式压气机的工作轮部分情况将较为复杂,对于纯径向的叶片造型,叶片负荷的分布将主