

主 编 余同希
副主编 戴大农 朱 凌

英国应用力学前沿 研究课题选介

科学出版社

英国应用力学前沿 研究课题选介

主 编 余同希

副主编 戴大农 朱 凌

科 学 出 版 社

1 9 9 6

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是一部综述论文集,主要介绍近年来英国应用力学领域的重要的前沿课题。本文集共有 21 篇综述文章,每篇介绍一个不同课题。21 个课题基本上覆盖了英国各大学和研究机构开展应用力学研究的情况。

本书信息量大,并体现了当前国际应用力学研究的趋势——力学与机械、材料、土木、航空航天、能源、海洋等工程部门密切的结合。

本书可供从事应用力学研究的各专业人员阅读、参考,特别适合有关专业的研究生设置和选择研究课题和了解最新研究方向。

英国应用力学前沿研究课题选介

主 编 余同希
副主编 戴大农 朱 凌
责任编辑 杨 岭 杜 芑
科 学 出 版 社 出 版
北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717
中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1996 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16
1996 年 3 月第一次印刷 印张: 15
印数: 1—1 000 字数: 336 000

ISBN 7-03-005001-0/O · 830

定价: 25.00 元

旅英中国应用力学学会简介

旅英中国应用力学学会(CSAM(UK))是由从事应用力学研究的旅英中国学生、学者自愿组织的民间学术团体。该学会以为留学人员服务、为祖国科学事业和经济建设服务为宗旨,并致力于和海外华人力学工作者的联谊和交流。

该学会是由余同希博士倡导,于1993年初开始筹建成立,得到了中国力学学会和中国驻英使馆教育处的鼓励和支持。该学会于1993年6月初在伦敦召开了正式成立大会暨第一届学术讨论会,约有30位会员代表出席了会议,其中18人作了学术专题报告,相互交流了研究工作的进展情况。会议通过了学会章程和活动计划,选举了由徐力平,谢和平等13人组成的第一届理事会,并一致推选余同希任理事长,戴大农和朱凌任副理事长。与会代表还对学会应当从事的活动达成了以下共识:利用学会建立的电子通讯网,加强会员之间的信息交流;采用通讯或会议的形式进行学术交流;传播中国国内相关学术活动的信息,为会员与国内同行之间的合作牵线搭桥;逐步创造条件为国内企业界提供信息和咨询服务;加强与来自港、澳、台以及其它国家和地区的华人力学工作者的联络。

该学会现有注册会员约100人,遍布英国各主要大学和研究机构。在香港、新加坡和澳大利亚还有4名海外会员。该学会已经建立了完善的电子邮件网和人才库,并通过计算机网络发送会刊,为会员提供信息服务和学术论坛,同时也利于吸收新会员入会。

编写《英国应用力学前沿研究课题选介》一书,是该学会贯彻“为国服务”宗旨的一个尝试,也是该学会成立后所做的第一件大事。该学会今后还将陆续举办一些对留学人员、对国内力学事业和经济建设都有益的活动,并希望得到国内外各界仁人志士的合作和支持,共同携起手来,为祖国的繁荣昌盛而尽微薄之力。

序 言

本书是旅英青年学者怀着对发展祖国科学事业的一片热情,抽出宝贵的时间,结合他们亲身参加的工作,从不同角度介绍当前英国应用力学的一些前沿研究课题和进展情况。

我们知道,英国在力学理论方面是做出过重大贡献的,是很有传统的。然而,就我个人来说,对他们在应用方面的成就则印象不深。通过本书的介绍,我们可以看到英国在力学应用方面也是很开阔的,尽管本书并未求全面。我想强调本书在这方面的贡献,因为常常听到我们的力学工作者为找不到课题而苦恼,而实际上力学工作是大有用武之地。

当然,这种找不到课题的苦恼,原因并不全在力学工作者自身,主要的恐怕还是与科技体制的条块分割有关。这一点正在改革之中,随着竞争机制的日益深入,它将从根本上得到改变。为了在国内外激烈的竞争中生存下去,生产部门需要不断地改进产品,引入高新技术,将会提出许多新的问题,有远见的产业领导将会在他的研究与发展部门吸收力学工作者以至其它基础性学科的工作者参加,会和研究单位和高等学校取得更积极的联系。另一方面,这也要求我们力学工作者主动投入到工程领域中去,和工程技术人员共同研究,从而发现和提出问题,进行力学方面的分析加以解决。为了更新产品,出奇制胜。工程中还会提出一些基础性的问题,要求做更长期性的研究。这类问题多数是要在和工程技术人员共同战斗中才会发现,也才会给出求解的线索。我相信力学工作者找不到适当题目的状态会在大家的努力下很快得到解决,本书的出版也是这种努力的一部分,力学作为重要的一份生产力很快会在我国找到应有的位置。

我们十分赞赏广大的留学人员的这种为振兴祖国科学事业所做的努力,欢迎他们在更多方面做出贡献,并通过这些活动与国内建立更多联系。我在这里遥祝他们在留学期间取得更大收获,做出更大的成绩。

对于国家自然科学基金委员会力学处,驻英使馆教育处对本书出版的支持,谨以中国力学学会和我个人的名义表示敬意。我觉得这是一个创举,希望这一经验还能推广到其它领域中去。从这意义上来说,旅英中国应用力学学会做出了富有意义的贡献。

王 仁

中国科学院院士,中国力学学会理事长,北京大学力学系教授

编 者 的 话

我们怀着对祖国科学事业的热忱,把这本文集奉献给在国内的老师、同事和朋友们。

自改革开放以来,许多中华儿女先后踏上英伦三岛,或攻读学位,或从事研究。仅在应用力学领域内,现在仍在英国学习或工作的中国学生学者就有一百人以上。多年来他们同英国的导师、同事合作,在研究第一线作出了许多令人瞩目的成果。

1993年,我们留英学生学者组织起了“旅英中国应用力学学会”,并建立了相应的电子通讯网络和人才库,以加强会员之间的交流,集中会员的集体智慧,更好地为祖国的科学事业和经济建设服务。编写这本文集正是我们学会贯彻“为国服务”宗旨的一个尝试。

文集中收集的21篇文章从不同角度介绍了英国应用力学研究前沿的一些近况,涉及的问题来自机械、土木、航空、航天、冶金、材料、能源、交通、船舶、海洋、农业、食品等工程部门。这些前沿课题的广泛工程背景和多学科背景,可以为国内同行的研究选题提供借鉴。各篇文章都报道了课题的最新研究进展和发展方向,列出了主要参考文献,以求为国内研究人员和工程技术部门提供切实有用的信息。不少文章也反映了中国留英学生学者的成果,希望这些点滴的报道能引起国内同行的兴趣,为留学人员直接为国服务架设起桥梁。

本书在编写过程中得到我们学会全体会员的大力支持,尤其是文章的作者们更是为撰稿付出了辛勤的劳动。他们在繁忙的本职工作之余,广泛收集资料,精心撰写文稿;在听取了审稿意见之后,又反复修改、提高文章的质量。当然,由于时间匆忙,书中疏漏和错误一定还不少,请读者不吝指正。

许多会员和朋友参与了审稿和校对工作,为文集及时问世作出了很大的贡献。在英国参加审稿的会员有(以姓氏笔画为序):

文鹤鸣	王司铭	刘毅
李少平	李曙光	陈大年
陈霜立	严幼幼	波涛
周敏	周传吉	林建国
杨雨烟	杨嘉陵	曹俊杰
崔桂勇		

在国内参加校对的朋友有(以姓氏笔画为序):

赵亚溥 钟宏志

本书得以出版,要特别感谢中国国家自然科学基金委员会力学处和中国驻英使馆教育处的关心、支持和资助。王仁院士为本书撰写了序言,为本书增添了光彩。本书的出版还得到了中国矿业大学谢和平教授的支持,在此一并致以深切的谢意。

目 录

旅英中国应用力学学会简介

序 言

编者的话

轴流压气机的旋转失速的生成及其主动控制(徐力平).....	(1)
工程湍流模式研究及计算的新进展(符 松、波 涛).....	(12)
水波与海洋结构的相互作用(王北田)	(26)
热敏液晶对流传热测量技术的发展及应用(汪左澜)	(34)
陶瓷烧结的本构关系研究(潘敬哲)	(46)
新型单晶合金材料的高温疲劳-蠕变和力学性能(李书欣).....	(57)
疲劳裂纹工程评定方法的新进展(林晓斌)	(71)
高温蠕变及循环塑变损伤本构方程的发展及应用(林建国)	(81)
断裂力学在层状复合材料分析中的应用(王 宇)	(92)
复合材料板壳结构的解析解及其工程应用(叶建乔).....	(107)
UMIST 对冲击和爆炸的力学问题的研究(余同希,陈大年,杨嘉陵)	(114)
结构的塑性动力响应和破坏——近期来在利物浦大学冲击研究中心的研究课题 和成果(沈伟琴).....	(125)
亚兵器速度冲击下板及金属圆管的破裂与穿透(文鹤鸣,刘洞泉,张铁光).....	(137)
振动信号分析中的新方法——小波变换(王谓季).....	(151)
周期性结构上的波导分析(欧阳华江).....	(160)
斯旺西计算力学的新近进展(郑 耀).....	(167)
船舶结构力学中的一些研究进展(朱 凌,蒲永昌)	(182)
可展式结构中的典型应用力学问题(由 衷).....	(197)
粘接结构的耐久性(苏 宁).....	(205)
农作物材料的力学分析(刘建辉).....	(215)
牛津大学固体力学技术中心介绍(戴大农,崔桂勇)	(223)

轴流压气机的旋转失速的生成 及其主动控制

徐力平

(北京航空航天大学动力系)

(剑桥大学工程系 Whittle 实验室)

摘 要

本文介绍围绕轴流压气机的旋转失速生成和主动控制,在剑桥大学工程系 Whittle 实验室开展的研究。研究结果表明旋转失速的生成由当地叶栅气动条件而不是由系统稳定性决定,由于问题的非线性性质,旋转失速的主动控制,特别是其在真实条件下的实现,可能较原来想象的远为困难。然而对主动控制技术的研究和已取得的结果为失速成因的研究提供了新的手段。用主动控制技术来研究受控条件下过渡态的空气动力学问题可望得到用常规手段无法得到的结果。

一、问题的背景

轴流式压气机的旋转失速问题几乎与轴流式压气机同时产生(Grant(1949),见 Emmons(1958))。作为压气机可靠稳定工作的极限,已困扰工业界和学术界近半个世纪。经过几十年的研究,对旋转失速的动力学特征已有了比较明确的描述(见 Greitzer 1976, 1980; Moore & Greitzer, 1986; Hynes & Greitzer, 1987; Longiey, 1993),但对旋转失速团形成的流体力学机理,仍然不甚了了。近年来,由于旋转失速主动控制研究的开展和深入,对旋转失速的成因和失速先兆的研究又重新成为热点。

典型的压气机特性如图 1 所示,旋转失速发生在最高压力点 S 的左枝。当流量自 S 点减小时,压气机出口压力不能持续增大而进入旋转失速,对应在压气机的周向生成一个或数个与转子旋转方向相同但速度较低的失速团,旋转失速亦因此得名。由于旋转失速可引起较强的压力和流量脉动并导致更强的失稳——喘振,造成整个压缩系统的机械破坏,为避免在机器运行中进入不稳定工作而导致机械破坏,在设计时往往被迫将工作点选在远离失速边界以保证有足够的安全裕度。对于航空发动机,由于失稳可导致机毁人亡的重大事故,这一裕度可达 20%~25%。如对旋转失速能加以控制,使工作点能更接近最高压比点,则由此带来的性能提高不言而喻。正因为如此压气机旋转失速和喘振的主动控制的研究自 1986 年以来成为叶轮机界获单项资助强度最高的一个研究方向。美国海军、空军和世界各大航空发动机公司都先后注入大笔资金,支持该项研究。

英国剑桥大学工程系 Whittle 实验室在旋转失速成因和旋转失速先兆的研究方面多年来成果颇丰,近年来结合失速的主动控制研究对旋转失速成因的认识又有所突破。本文

试图对以 Whittle 实验室为主的有关工作作一扼要综述并对旋转失速及其主动控制研究的今后发展作一展望。

二、旋转失速生成过程的研究

早在五十年代中期 Emmons(1955)即提出了一个旋转失速的物理模型。这一模型从局部流动分析出发,在二维叶片排的上、下游的平均流上迭加一周向线性小扰动,叶栅特性用激盘模拟,可以得出流动是否稳定的本征值(Dunham(1965))据此提出了其著名的二维稳定性判据($d\Delta p)/(dV_x) \leq 0$)。这一模型可定性解释失速

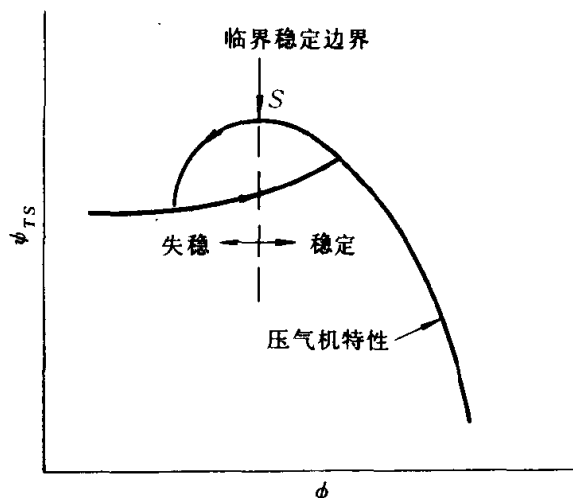


图1 典型压气机特性曲线

团相对转子的旋转和扰动失稳的条件,但无法解释旋转失速团的成因。Emmons 对失速团的旋转作如下物理解释:由于某种周向不对称如气流的周向扰动、叶片制造、安装不均匀等在小流量时引致叶片排中几个叶片通道中的气流分离,由此形成有限 R 度的失速团。由于失速团引起的堵塞效应、使来流向失速团两边分流而造成失速团左方的叶片因大攻角而进入失速;而其右方的叶片通道因负攻角而退出失速,因此形成失速团从右向左的移动,图 2。在固定坐标系中这一相对转子的移动使旋转失速团的旋转速度低于转子的旋转速度。七、八十年代以来以 Moore 和 Greitzer 为代表,在 Emmons 理论的基础上,将旋转失速置于压缩系统内来研究,从压缩系统不稳定性的角度,而不是孤立地从某一特定的叶片排的角度来分析包括旋转失速和喘振在内的压气机失稳现象,建立了一套比较完整的压缩系统稳定性模型(Moore,1984)。

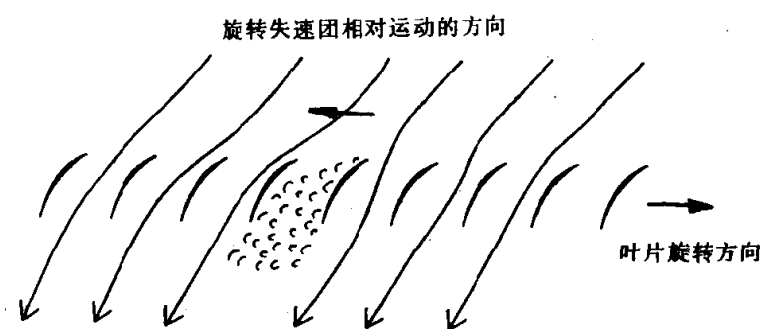


图2 Emmons 旋转失速团模型

虽然 Moore-Greitzer 模型与 Emmons 模型类似,都从轴向动量守恒、流量守恒和压气机特性出发,但注意到流经叶片排通道流体的惯性和压升的关系,将整个压缩系统处理成一个质量—弹簧—阻尼系统(图 3),从系统动力学稳定性分析得出产生旋转失速或喘振的条件(Greitzer,1976),Greitzer 用于判断某一失稳属旋转失速或喘振的 B 因子,在物理上即表现为流体压力和流团的惯性之比,当压力远大于惯性时,将出现大 R 度轴向失

稳即喘振,反之压力差不足以驱动整块流体回流,则失稳表现为旋转失速。

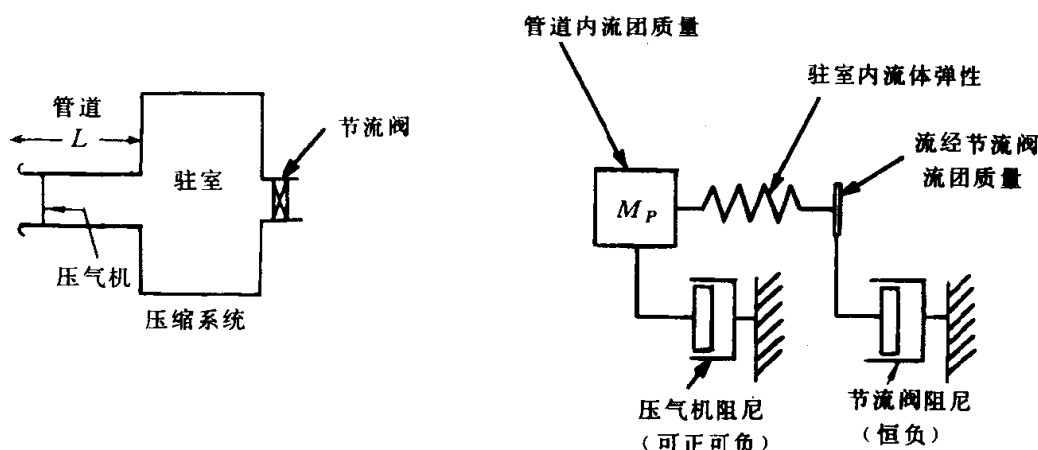


图3 Greitzer 压缩系统模拟模型

在 Moore-Greitzer 模型的指导下,形成了旋转模态波是旋转失速的成因的观点。与 Emmons 模型描述的局部失速的观点相反,这一观点认为旋转失速的成因为由周向不对称性而产生的周向模态波引起。在叶片排间的任何周向不对称性由于流体的惯性和压力平衡的要求,必以模态波的形式以 $0 < \omega < \omega_{\text{转子}}$ 的角速度旋转,图4以旋转扰动为参考坐标系说明这一关系(Campsty & Greitzer, 1982)。在压缩系统处于稳定状态时,模态波将衰减,而当系统处于失稳状态时,模态波呈指数增长最后导致有限失速团的出现。对于旋转失速形成过程的这一认识,成为近年来旋转失速研究的基础并被引为旋转失速主动控制研究的重要理论依据。McDougall 在 Whittle 实验室首先在实验中观察到旋转模态波的存在(McDougall, 1990),很快,Day 在 Whittle 实验室;Garnier 在麻省理工学院燃气轮机实验室(MITGTL),最近 Hoying 等在美国 Wright-Patterson 空军基地 Wright 实验室在不同的压气机(单、多级,低、高速)都证实了旋转模态波的存在(Day, 1991, Garnier, 1990, Hoying, 1993)。

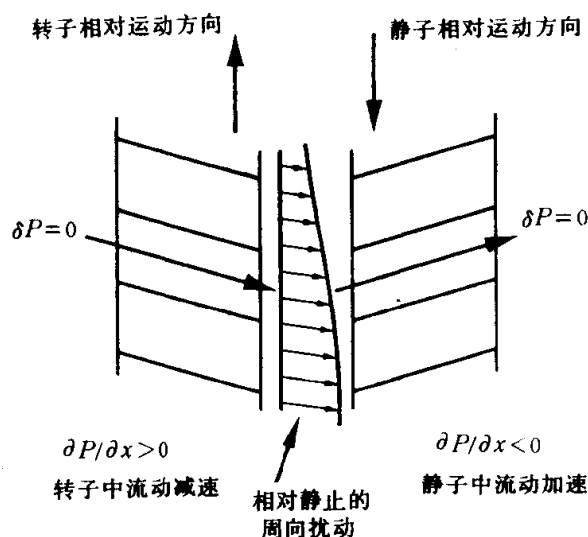


图4 周向扰动旋转模型: 旋转速度由压力平衡条件确定

虽然在各个实验压气机上观察到的旋转模态波的旋转速度,强度和发展速度各不相同,但它们都出现于压气机即将进入旋转失速之时,在旋转失速团出现前瞬间其幅度呈指数增长。图5为 McDougall 的典型一阶(基态)旋转模式波的实验结果。旋转模式波的相位和幅度由均布在压气机前方周向的六个热线风速探头所测得的瞬时速度信号经过 Fourier 分析得出。从图中可见在旋转失速发作时模态波的幅度呈指数增长。McDougall 的研究兴趣在旋转失速的成因而不在其主动控制,在仔细分析旋转模态波发展和旋转失速形成的过程后,他断言 Emmons 模型与旋转失速的成因无关,旋转模态波是旋转失速的先兆

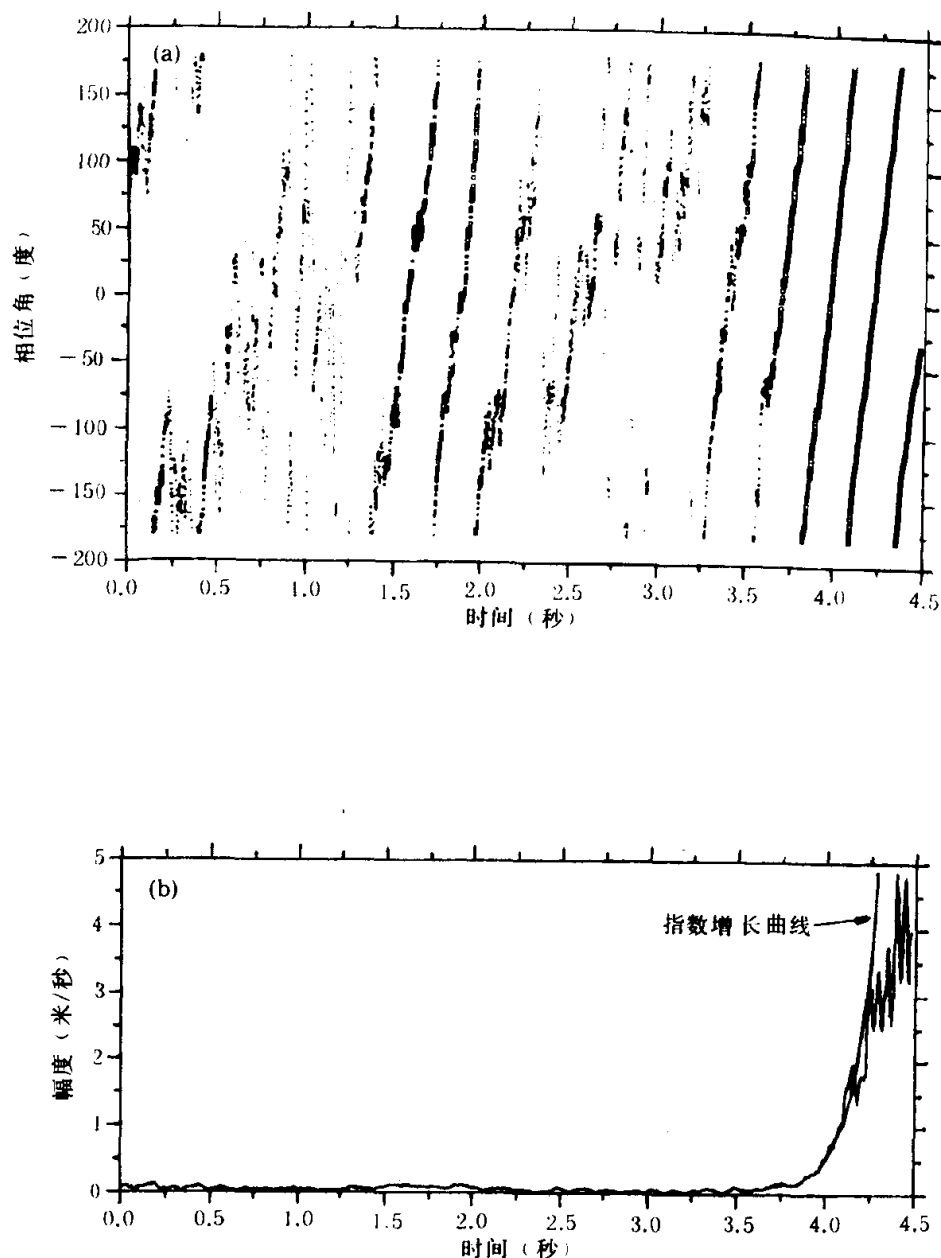


图5 一阶周向模态波的相位和幅度在失速发作时
随时间的变化(周向扰动 FFT 分析结果)

和直接成因。Garnier 等人的兴趣在实现旋转失速的主动控制而并未仔细研究旋转模态波在失速团生成瞬间的行为。MITGTL 的压气机中的旋转模态波在失速发作前 200 多转以前即可被检测出来,Paduano 等(1991)以模态波为对象施行主动控制,使压气机的稳定工作范围增宽达 20%。

此后,Day 在实验中发现改变压气机的某些参数如转子叶尖径向间隙,在旋转失速出现以前并不能发现旋转模态波的存在。在这种情况下旋转失速是突发性的,几乎无先兆可察。从出现极小扰动到旋转失速团完全形成,前后不过数转。图 6 所示为当转子叶尖间隙分别为 1.2% 和 3% 时旋转失速团形成的不同过程。Day 称前者为小尺度失速团,失速发作时仅有几个叶片通道失速(对应图中 17~18 转间尖窄的速度亏损),后者有模态波先其出现,为大尺度失速团,因旋转失速刚发生时“受害”通道数就较多。小尺度失速团发作的一个特征是突发性,初生失速团的旋转速度很高,表明其为局部的现象,而与系统关系不

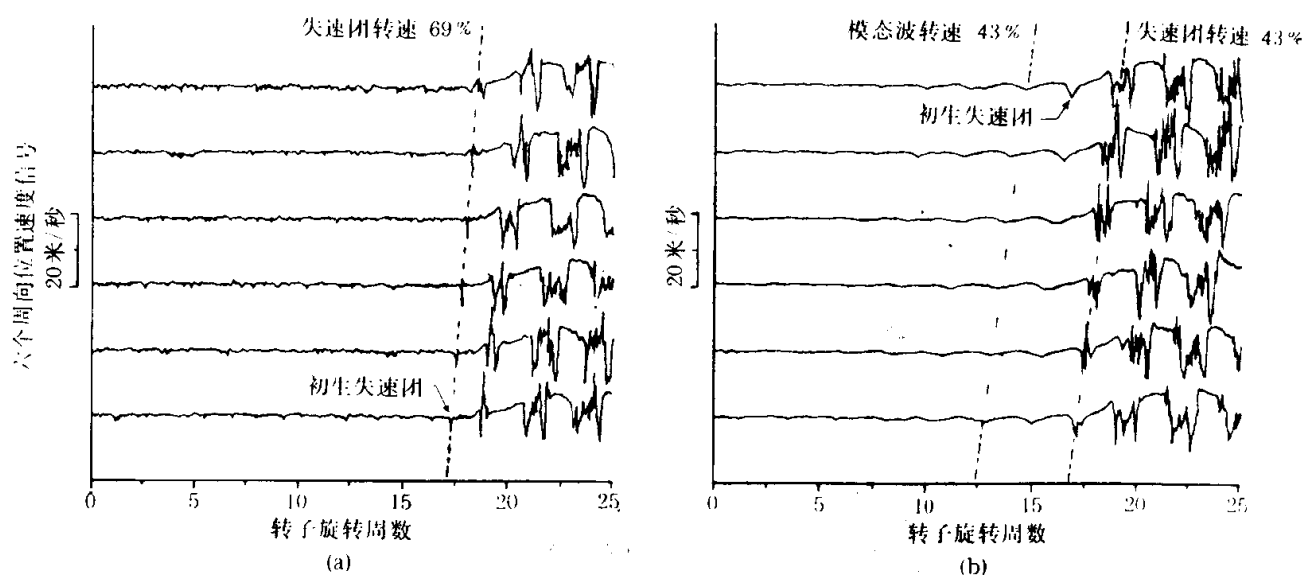


图6 两种尺度旋转失速团生成示例。

a)小尺度失速团,无伴生旋转模态波; b)大尺度失速团,在旋转模态波后出现。

大。直到失速团充分发展,其旋转速度才降低至与系统耦合。小尺度失速团形成过程的这一现象,又恰与 Emmons 模型暗合。若旋转失速的发作为大尺度失速团类型,则其影响的周向跨度大,起始旋转速度较慢,失速团与旋转模态波的耦合也强。这正是 McDougall 研究的情况,从表面上看,与 Moore & Greitzet 模型相符。为解释这一矛盾,Day 用改变叶尖间隙和主动控制的方法,得到了两种失速团并存以及旋转模态波和小尺度失速团并存的工况。其结论为旋转模态波与旋转失速团的生成是两种不同的物理过程。虽然它们都在压气机接近失稳时出现,但二者间并不存在继承关系。从本质上看,旋转模态波是叠加在轴对称流场上的周向谐波,其发展是一个可逆过程,即在旋转模态波出现后,如果开大节流阀,则扰动将消失。与此相反,一旦形成有限的失速团,则即使马上开大节流阀,压气机仍将进入旋转失速,需走完特性线(图1)上的时滞回线才能退出,尽管大尺度失速由于波数与旋转模态波相近,容易产生耦合作用,但它们还是相对独立的。

McDougall 在其失速成因的研究中,发现转子叶尖间隙对旋转失速的生成有很大的影响,在接近失速时叶尖端壁附面层的厚度呈周期性变化,其幅度不断增大以至失速,而 Cumpsty 发现在转子进口,端壁附面层在失速前也突然增厚(Cumpsty,1989)。McDougall 结合三维 N-S 方程数值模拟,提出了叶尖间隙泄流在模态波调制下回流吐出叶片前缘的失速流动模型(McDougall,1989)。根据 Day 的最近结果,如果确认失速团生成是当地(相对系统而言)现象,而叶尖泄流又确实对旋转失速的生成有重要的影响,则叶尖泄流向前缘回流确实可能是旋转失速团形成的原因。笔者在计算跨音风扇时,发现叶尖泄漏涡与通道激波干扰,在经历激波的突然压力升后爆发(Vortex burst)形成大的堵塞。在接近失速时,这一干扰发生在叶片前缘附近,涡爆发将激波推出前缘造成失稳。(Adamczyk,1991)亦观察到了这一现象。在亚音压气机中,虽然不存在激波,但叶片通道内的逆压梯度与叶尖泄漏涡的干扰仍然存在,数值模拟表明在接近失速时,叶片的气动载荷增加,使通道出口压力升高,迫使叶尖泄漏涡转向相邻叶片的压力面,即从原来基本上流向变成横断通道,并逐渐前移。在此过程中堵塞增大,其位势影响前方来流速度降低,使攻角进一步增

大,载荷上升,作用于泄漏涡的逆压梯度更强,使其进一步前移。如此恶性循环直至载荷崩溃导致失速。虽然泄漏涡不一定在叶片前缘吐出,但在失速前叶尖附近的轴向回流是存在的。图7所示压力测量结果和数值模拟的对比,表明在压力场作用下叶尖泄漏涡转向导致失速的情况。

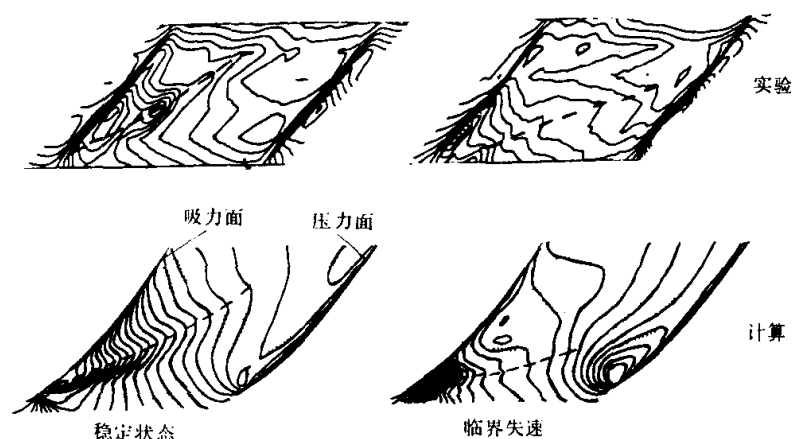


图7 实验测量和数值模拟转子叶尖压力分布,临界失速
时叶尖泄漏涡(用虚线描出的低压区)向压力面偏转

这一系列实验和数值模拟的结果都说明叶尖泄漏涡与叶片通道内逆压梯度的干扰以及泄漏涡在前缘附近破碎是导致旋转失速发作的直接原因。同时实验中观察到旋转模态波的存在可促使这一过程的发展:失速前转子前后的周向压力扰动基本同相;而在接近失速时压力扰动出现相位差。而通道内载荷的崩溃总是对应于转子进口恰逢压力低点而出口的压力扰动达到高峰,这一附加压力差使通道内的逆压梯度超过极限。从这一观点出发,就不难解释以前观察到的失速团出现时完全不同的特征,如:小尺度旋转失速团的出现无旋转模态波先导;而在旋转模态波后出现的失速团往往是大尺度的,与局部的小波长周向不均匀性无关。即局部加大一、二个叶片的安装角并不能在这几部叶片间率先诱发失速,而在周向稍事加大一组(七~八个)叶片的安装角就可诱发失速(McDougall, 1989, Day, 1991)。

三、旋转失速的主动控制

压气机不稳定工作(包括旋转失速和喘振)的主动控制的概念(Epstein 等, 1986)基于 Ffowcs-Williams 的“反声”原理(Ffowcs-Williams, 1984)。从线化的 Moore-Greitzer 模型出发, Ffowcs-Williams 认为任何系统不稳定性都由线性小扰动开始发作,如能应用一等幅反相的小扰动以主动方式施加其上,则系统的不稳定性可得以控制。1987 年黄晓阳首先实现离心式压气机喘振的主动控制(Huang, 1988),其后 Paduano(1991)和 Day(1991)分别实现了在单级和多级低速轴流压气机中的旋转失速的主动控制。除 Day 以外,几乎所有主动控制旋转失速的企图都集中归结于旋转模态波的识别和控制。最成功的例子为 Paduano 在 MITGTL 的一个单级轴流压气机上同时对一、二阶模态波施加主动控制,使失速流量减少了 20%。

喘振的控制为一维(轴向)的不稳定控制,其失稳模式单纯,先兆信号特征往往较明显。黄晓阳实现主动控制时,用了非常简单的线性比例控制回路,驻室内的脉动压力信号由一传感器检出,经移相、放大后输入一装在驻室内的扬声器,由其产生相同频率不同相位的控制脉动压力。这一工作除了验证主动控制压气机失稳在实际上是可行的外,另外得到两个重要的结论,都支持 Ffowcs-Williams 的“反声”理论。一、相位是一个非常重要的控制参数,如果相位不正确,则可促使压气机过早进入喘振;二是加入控制使系统处于受控稳定后,维持控制所需能量微乎其微。稍后 MITGTL 用一由弹簧支承的平板作为驻室的一面模拟扬声器纸盒的运动,通过选择合适的质量—弹簧—阻尼参数,实现了喘振的无源自适应控制(Gysling, 1991),说明主动控制可由系统内的能量自维持,不一定需要外加能量。

旋转失速则是二维的流动失稳(其成因往往是三维扰动的结果),其控制的实现难度要大得多,对于多级压气机则更是如此。虽然控制的理论出发点都是以 Moore-Greitzer 稳定性理论为基础加一反相扰动,但具体实现可有多种方案。Day 用的是在进口导叶后沿压气机周向布置十二个由快速反应阀门控制的喷嘴,可向第一级转子叶尖喷射气流以造成各种所需的扰动分布,而 MITGTL 则用快速转动进口导叶的方法来给出周向扰动的分布及其运动。后者对形成周向旋转扰动以抑制模态波是有效的,但对小尺度失速团的失稳发作,则将无能为力。而 Day 的射流法对于应付各种不同情形更为有效。对模态波类型的失稳,可用计算机控制沿周向依次开启和关闭阀门以造成所要求的控制波;对小尺度突发性的失稳,则可以在检测到失速团信号的瞬间按一定相差迅速开-闭几个阀门,如图 8 所示,对应一个扰动就给出一个控制脉冲,用射流“吹走”失速团。Day 称之为“救火”过程。随着流量的继续减小,阀门的启闭越来越频繁,接近控制失效流量时,新失速团形成的强度增大,增长率加快,直至无法控制。

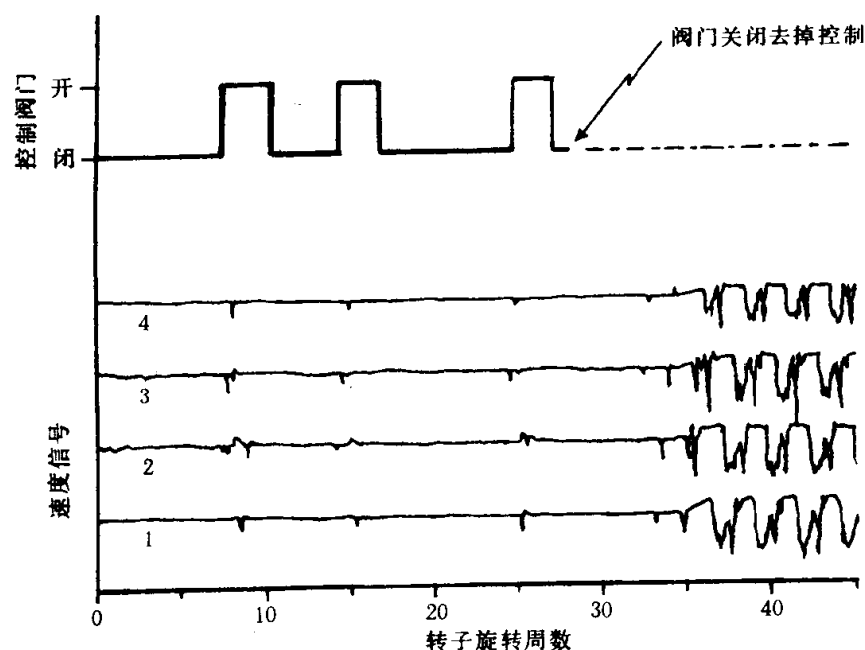


图 8 用射流法控制小尺度突发性旋转失速团。控制系统在 29 转处切断,旋转失速团在 35 转后充分形成

Day 还进行了喘振主动控制的实验,在加大驻室容腔诱发喘振后,Day 发现每一个喘振周期前都有短时间的旋转失速团存在,即喘振由旋转失速引起。这也是压气机失稳过程的一个经典假说,后因 Greitzer 的 B 因子而失去支持。Day 用同样的方法检测并抑制这些失速团,结果成功地抑制了喘振,其效果如图 9 所示。在这些控制中,控制射流的总流量(12 个喷口)仅为压气机流量的 1%,而在“救火”式控制过程中,每一瞬间只有两三个阀门处于同时开启状态,实际消耗甚微。用射流控制,在实际应用中可以从压气机后级直接引气而不需要复杂的作动机构。

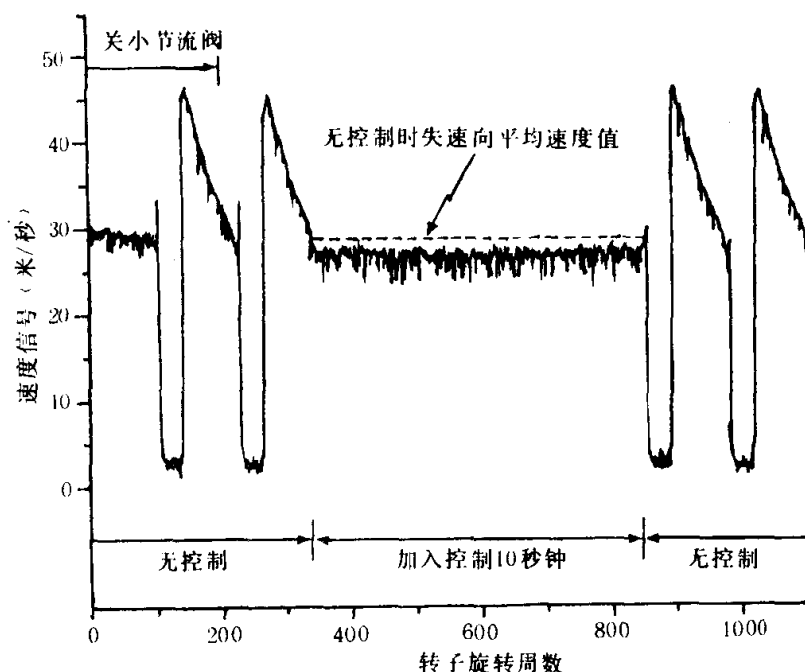


图 9 通过主动控制旋转失速而实现喘振抑制示例:喘振发作后再加入 10 秒钟然后重新切断控制

由于旋转失速主动控制的潜在应用前景,在航空发动机界很快就得到了广泛和积极的响应。在学术界,则有更多的保留。因为即使在实验室甚至在工程上成功地对旋转失速或喘振实施了主动控制,压气机获得了更宽的稳定工作范围,但对流体力学本身它并没有告诉人们更多的东西。从表面上看,主动控制压气机不稳定工作是“反声”原理成功应用的一个范例,控制过程中出现的现象大多在理论的预言之中。但旋转失速或喘振的控制与噪音控制的最根本的不同,即在于前者的控制对象为非线性动力系统。在黄晓阳的喘振主动控制实验中,在喘振未发作前,其控制工作原理与“反声”理论的线性迭加而抵消的说法并不矛盾。矛盾出现于当喘振发作后,加入控制,喘振仍可在几个周期内很快消失。这意味着在强非线性区,控制仍起作用但其所依据的理论完全不能成立。Day 旋转失速主动控制过程亦是如此,用射流直接吹除失速团而不是模拟反相的周向扰动。图 9 所示通过控制旋转失速而抑制喘振就很说明问题。事实上压气机不稳定工作的主动控制过程不能看成是两个反相波(不稳定扰动波和控制波)的迭加,而实际上是一个临界稳定的非线性质量—弹簧—阻尼动力学系统中由于控制的加入,改变了其动力学特征,使其临界稳定边界向不稳定一侧移动,系统的稳定范围得以扩展。如果此时继续迫使工作点向不稳定一侧移动,

则一旦越过计入控制后形成的新的稳定边界,整个系统仍将进入失稳。Day 的研究的一个最重要的结论就是存在不同尺度的旋转失速团,有效的主动控制方案,必须能够同时对不同尺度的扰动作出反应。事实上无先兆的旋转失速团的出现表明系统的非线性性质在失稳过程中起决定作用。Day 断言模态波与失速团是物理上不同的独立事件,就是认为前者源自线性扰动,是可恢复的,而后者是不可逆过程,更多地表现为当地性。设若 MITGTL 的压气机的失稳发作为小尺度失速团类型的而无模态波,则其控制方案可能完全失效。

只有在 Day 的工作以后,人们才认识到主动控制可以成为研究失稳过程的一个强有力工具。Day 的主动控制的最重要的意义,并不在控制实现的本身,而是证明了在可控环境下研究失稳过程的可能性和优越性。通过利用主动控制研究过渡问题,就可能分离各种因素,找出最本质的动因。Day 正是利用主动控制分离小尺度旋转失速团和模态波,证明了它们属于不同的物理过程。

四、展 望

压气机不稳定工作主动控制概念的提出及其成功实现,给旋转失速成因的研究注入了新的活力。迄今为止,在低速多级压气机上的主动控制的最好效果是 6%~8% 失速流量的降低(Day, 1991), (Haynes, 1993), 在高速压气机上,由于系统频率更高,压气机特性更陡,所能得到的收益可能更少一些。从单纯扩展失速裕度的角度来看,不用主动控制而用其它手段也可能得到。

从流体力学的角度看,因主动控制的实现而提出了更多的新问题。预计今后主动控制本身的研究将集中于两个方面,一是将已有成果向高速和实用压气推广,试图在高速机器上验证主动控制技术。Hoying(1993)的工作就是为此所做的技术准备。这方面的工作将集中在政府和军方的研究机构以及工业界。而在另一方面,学校的实验室将集中力量探索主动控制的新前沿,力求使控制更简单,有效和可靠。如 MITGTL 已初步验证无源自适应控制旋转失速的可能性(Gysling, 1994),其原理为利用旋转模态波产生的压力差控制转子前方射流阀门的启闭,完全用气动-机械的耦合而不用电子-机械反馈系统。通过优化阀门簧片的气动-弹性参数,在单级压气机上可获得 10% 的失速流量降低。这些工作,使主动控制技术向工程实用化方向发展,同时也验证了计入控制的稳定性理论。

失稳机理,特别是旋转失速团生成过程的研究,是实现可靠的和可预测的主动控制的前提要求。由于新手段的获得,这一研究将再度得到重视和更多的投入。在实验方面除充分利用动态测量和分析技术外,利用主动控制,研究受控条件下失稳的过渡过程,将形成实验研究的一个新特色。如前节所述,主动控制本身并不揭示流体力学的规律,但利用主动控制控制失稳的过渡过程,在受控条件下可以观察到否则无法观察的流体力学现象。利用主动控制可以分离一些参数对失稳过程的影响,针对失稳的局部性的研究将得到深入,如研究叶尖泄漏涡在失速发作前的动态行为和端壁附面层的扰动等。同时,随着计算流体力学的发展,很快将有可用于叶片非动态过程研究的三维非定常 N-S 方程数值模拟方法问世。何力(He, 1992)曾用非定常 N-S 方程模拟得到二维压气机叶栅旋转失速的解。用数值模拟研究旋转失速团的形成的过渡过程,与实验测量相结合,可能是解决旋转失速生成问题的最终途径。由于计算机技术和计算流体力学的快速发展,数值模拟可望率先获得突