

**第18届
全国结构工程学术会议
论文集**

第 I 册

**PROCEEDINGS OF THE EIGHTEENTH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING**

No. I

主编：崔京浩

**《工程力学》杂志社
2009.10**

序

2008 年金秋时节, 举世瞩目的北京奥运刚刚闭幕, 凭借“同一个世界, 同一个梦想”的强劲东风, 踏着“和平、友谊、进步”的北京乐章, 迎来了第 17 届全国结构工程学术会议, 使我们的会议平添了几分喜庆和昂扬。

这次会议出版论文集 3 册, 共收录论文 352 篇, 内容包括: 力学分析与计算; 钢结构、材料与构件; 钢筋混凝土结构、材料与构件; 岩土、地基与基础、隧道及地下结构; 公路、铁路、桥梁、水工与港工; 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定; 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析; 舰船、车辆、航空航天结构及交叉学科等 8 个方面, 几乎囊括了国民经济的各个行业和技术科学的各个领域。

本届会议的主办单位之一华中科技大学, 是直属教育部领导, 涵盖文、理、工、医、农等多达 11 个学科门类的综合性高校, 是国家“211 工程”和“985 工程”重点建设的高水平大学。它的土木工程与力学学院是学校传统的重点学院, 众所周知的《固体力学学报》由该院承办, 该学报的英文版是我国最早被 Sci 收录的期刊之一, 是我国力学界公认的历史悠久的上乘学术刊物。

本届会议的大量会务工作是由学校土木工程与力学学院承担的, 对他们的辛勤劳动, 我们表示衷心的感谢。

今年(2008 年)正值中国力学学会结构工程专业委员会成立 10 周年, 为此我们撰写了一篇祝贺结构工程专业委员会成立 10 周年的文章“十年铸剑 初见成效”, 发表在论文集第 I 册的前面, 它既是一份汇报, 又是一份征求意见的公示书。热诚欢迎专家们建言献策。

崔京浩



2008 年 8 月

第 18 届全国结构工程学术会议论文集目录

第 I 册目录

特邀报告

现代密封转子动力学研究综述.....	曹树谦 陈予恕 (001)
混凝土结构服役智能化的若干研究进展.....	陈伟球 严 蔚 (014)
人行桥的人致振动理论与动力设计.....	陈政清 刘光栋 (029)
结构健康监测-智能信息处理及应用.....	姜绍飞 (045)
高速列车安全运行研究的关键科学问题.....	金学松 郭 俊 肖新标 温泽峰 周仲荣 (073)
结构随机动力激励的物理模型——以脉动风速为例.....	李 杰 阎 启 (088)
超高车辆撞击桥梁上部结构研究: 损坏机理与撞击荷载.....	陆新征 张炎圣 何水涛 卢 啸 (101)
一种适合于农村民居的抗震实用技术.....	尚守平 姚 菲 刘 可 周志锦 刘 洸 (111)
颗粒物质研究及多尺度统计规律.....	王光谦 孙其诚 (120)
混凝土各向异性损伤模型的数学和热力学表述.....	吴建营 李 杰 (128)
超高韧性水泥基复合材料基本性能和结构应用研究进展.....	徐世烺 李庆华 (147)
平面曲梁面内自由振动分析的自适应有限元法.....	袁 驷 叶康生 王 珂 (195)
广州市城市地下空间开发利用分析.....	张季超 丁晓敏 庞永师 林本海 童华炜 郑先昌 许 勇 (203)
锈蚀钢筋混凝土旧桥超限及极限荷载作用的现场破坏性试验研究.....	张建仁 彭 晖 张克波 郝海霞 (212)
自锚式悬索桥体系转换过程非线性行为与施工控制方法的试验研究.....	张俊平 黄海云 刘爱荣 梅力彪 李永河 (224)
铅粘弹性阻尼器的开发、研究与应用.....	周 云 吴从晓 邓雪松 (233)

1. 力学分析与计算

环肋圆柱壳受损伤后的剩余强度探讨.....	白雪飞 郭日修 (246)
新型装配整体式楼板的双向异性分析.....	曹军伟 张季超 (253)
一个求解振动系统的迭代方案.....	曾 达 罗健豪 (257)
剪切型结构动力特性求解的扫描搜索法.....	陈伯望 黄兰芝 (261)
弯管在面内开弯矩作用下的弹性应力解析解.....	陈孙艺 (265)
齿轮齿条爬升式升船机系统的自振特性和稳定性.....	程载斌 刘玉标 梁乃刚 (269)
含柔性约束结构的简明计算.....	崔清洋 朱 华 (275)
矩形钢管混凝土框架节点受剪承载力计算.....	高春彦 李 斌 (283)
深基坑开挖钢腰梁坠落力学分析.....	高华东 史凯华 马 辰 秦鹏飞 李四维 (288)
加载方式对 FRP-混凝土-钢混合双管柱界面剪切性能影响的理论研究.....	胡 波 王建国 (293)

基于稳定化有限元方法的高雷诺数流场大涡模拟.....	黄 橙 周 岱 张夏萍 (298)
有限元线法轴对称矩形单元在稳态温度场分析中的应用.....	黄其华 戴元军 高建岭 白玉星 王晓纯 (304)
圆柱体带空泡轴向绕流研究.....	金大桥 王 聪 魏英杰 赵 静 邹振祝 (310)
各向同性弹性介质非线性本构方程.....	李 忱 杨桂通 黄执中 (315)
25t 厂房用吊车强度及模态仿真计算.....	李红莲 孙继武 贾 媛 刘敏层 (326)
基于 Ottosen 准则的钢筋混凝土结构非线性有限元方法.....	李彤梅 (330)
框架结构系统辨识的统计方法研究.....	李炜明 朱宏平 (335)
1600t 环架压机仿真计算及实验考核.....	李运良 王占江 于 琴 刘 喻 文 潮 (341)
面向节点的桁架结构多阶段 BP 神经网络损伤识别.....	刘 伟 高维成 孙 毅 徐敏建 (346)
离心场下模型箱结构的强度分析.....	刘平艳 徐 兵 黄 鹏 王 军 (354)
二维粘弹性介质中波动传播数值模拟.....	刘铁林 刘洪飞 钟 伟 (359)
有限元计算中混凝土徐变应力分析方法比较.....	陆春阳 苏庆田 黄生富 (364)
不同载荷作用下的 III 型动态裂纹的解析解.....	吕念春 程云虹 王云涛 程 靳 (369)
圆 CFRP-钢管混凝土轴压短柱静力性能分析.....	毛明扬 王庆利 谭鹏宇 (373)
动载荷反演问题的正则化求解.....	毛玉明 郭杏林 吕洪彬 (378)
碳纤维增强的 H 型压弯钢柱弹塑性失稳分析.....	钮 鹏 杨 刚 金春福 宫本奇 (382)
确定扰动状态概念模型参数的一种改进方法.....	潘家军 张 计 钟敬全 张 婷 (387)
基于 Arlequin 方法和 XFEM 的结构多尺度模拟.....	乔 华 陈伟球 (391)
轴向荷载作用下 K 型管节点应力集中系数研究.....	石卫华 钟新谷 杨 胜 余志武 (396)
不同形状橡胶密封环结构的性能分析.....	史平安 符春渝 (401)
结构随机振动分析的等效激励法.....	孙作玉 王 晖 (407)
层状结构中弹性波分析的回传-传递矩阵法.....	田家勇 苏先樾 杨志勇 (411)
覆冰导线舞动数值解及影响因素分析.....	王 昕 楼文娟 (415)
板锥网壳结构的稳定极限承载力分析.....	王 星 陈冠能 王 凡 (420)
粘弹岩体中洞室开挖路径相关性的解析分析.....	王华宁 李 悦 (424)
分支井井筒与油藏渗流耦合研究与进展.....	王清河 刘 珊 (430)
联合应用分层法与 D 值法求解框架在竖向荷载作用下的内力.....	吴珊瑚 张季超 陈 原 (436)
薄壁箱梁稳定分析的广义位移有限杆元法.....	辛克贵 张寿玲 (440)
直井多级抽油杆柱系统纵向振动问题的频率和振型函数的超逆幂迭代求解.....	徐永君 王晓博 于俊波 张传绪 (446)
桁架结构大变形问题的位置解法.....	徐友良 (454)
时域非线性多自由度系统恢复力识别方法研究.....	许 斌 贺 佳 周 任 Sami F. Masri (461)
圆 CFRP-钢管混凝土轴压短柱荷载-应变曲线模拟.....	许硕娟 王庆利 谭鹏宇 (465)
梁式格栅桁架连续化模拟及有限元静力分析.....	晏育雄 孙 智 (470)
部分水中弹性支承梁的非线性动力响应.....	杨 骁 邱 波 徐小辉 (476)
热局部非平衡下饱和多孔弹性柱体的热-流-固耦合分析.....	杨 洋 何录武 (480)
含磁流变阻尼器的非线性结构的非参数化建模.....	许 斌 黄志刚 (488)
纤维增强复合材料圆管弯曲强度实验及其理论分析.....	易洪雷 周祝林 吴妙生 (492)
土工离心机的机室升温及其控制方法研究.....	尹益辉 余绍蓉 冯晓军 黄 鹏 王新伦 赵玉虎 (498)
基于 POD 方法的冷却塔风荷载的分析.....	余关鹏 沈国辉 孙炳楠 楼文娟 (506)
斜拉索参数振动精细化模型及其影响因素研究.....	于岩磊 高维成 孙 毅 (510)
平板开孔动力学优化设计研究.....	禹志刚 王 栋 (518)

采用有限元方法分析输电线的覆冰脱落.....	袁光辉 沈国辉 何运祥 孙炳楠 楼文娟 (522)
基于光纤光栅宏应变模态的损伤识别.....	许 斌 刘崇武 (526)
基于 Hamilton 变分原理的四边形 4 结点杂交元.....	张 涛 岑 松 (530)
索网结构平衡态弹性化与零应力态研究.....	张丽梅 陈务军 (534)
横向补给系统高架索横向振动研究.....	张良欣 何学军 任爱娣 (541)
细观力学经典理论适用性探讨.....	张子明 宋智通 何巨海 赵吉坤 (547)
扭转圆轴的边界条件研究.....	赵宝生 高 阳 周新祥 (553)
线材拉拔球坐标应变速率矢量场的内积.....	赵德文 兰亮云 刘相华 王国栋 (557)
实体单元几何非线性 CR 列式有限元方法.....	周凌远 李彤梅 (562)

2. 钢结构、材料与构件

多层冷成型钢住宅结构抗侧性能有限元分析.....	陈 伟 叶继红 (567)
半球面形件拉深成形有限元模拟.....	陈小芳 扶名福 袁志军 (573)
悬臂型张弦梁结构的模型试验研究.....	杜文凤 高博青 王圣翔 (577)
支撑型式与钢框架结构的侧移刚度.....	高轩能 彭观寿 张惠华 (585)
圆钢管高强混凝土短柱轴压试验与研究.....	黄 超 韩小雷 季 静 唐嘉敏 (590)
防屈曲支撑钢框架基于延性的抗震性能设计.....	贾明明 吕大刚 张素梅 蒋守兰 (597)
梯型波纹拱结构的屈曲模态及其极限承载能力.....	江 媛 高轩能 张惠华 (603)
填充墙对矩形钢管混凝土框架结构抗震性能的影响研究.....	李 斌 高春彦 (607)
轴向压力作用下主管壁加厚的 T 型方钢管节点静力强度研究.....	李 涛 邵永波 (613)
凯威特 K6 型单层球面网壳的动力可靠度分析.....	李会军 柳春光 (617)
压型钢板-竹胶板组合墙体抗震性能试验研究.....	李玉顺 沈煌莹 张王丽 韩添石 (621)
起重机桥架主梁结构优化设计.....	刘冬霞 梁 力 李 明 (626)
大型煤气柜的风载稳定性分析.....	聂 鑫 马 艳 樊健生 (630)
主管管壁加厚的 T 型方钢管节点的滞回性能研究.....	邵永波 (634)
考虑界面摩擦影响的组合楼板弯曲有限元分析.....	史晓宇 陈世鸣 (638)
圆 CFRP-钢管混凝土受弯构件滞回性能.....	孙 涛 王庆利 毛明扬 (642)
利用风洞加速砖风化的试验研究.....	谈晓青 刘卫东 杨伟波 肖煌俊 (648)
无加劲箱形柱与 H 型钢梁全焊节点性能有限元分析.....	王 飞 崔 佳 (652)
基于拟牛顿法的多层多跨钢结构火灾作用下极限温度研究.....	王乐斌 王晓纯 白玉星 高建岭 (659)
某客运站房管桁架空心球节点构造参数影响的研究.....	韦 韬 余志祥 赵世春 许 洵 赵雅娜 (663)
空间复杂钢管节点试验研究.....	徐祥斌 闫 伸 王 彬 赵宪忠 陈以一 范 重 彭 翼 李 丽 (668)
矩管桁架六向交汇节点力学性能数值仿真研究.....	许 洵 余志祥 赵雅娜 赵世春 (673)
整浇楼板板筋参与梁端负弯矩承载力后框架结构的 PUSH-OVER 分析.....	杨志利 隋杰英 公衍文 (678)
超薄型涂料在烃类火灾下室外钢结构抗火中的应用研究.....	余传柏 王晓纯 白玉星 高建岭 (682)
矩管桁架 KT 形强化节点承载力试验研究.....	余志祥 吴 昊 闫雁军 赵世春 张贵海 (687)
U 型肋加劲板抗压承载力计算方法比较.....	赵 秋 吴 冲 丁文俊 (693)
光源工程两类关键节点受力性能研究.....	赵必大 王 伟 孟宪德 陈以一 (699)
矩管桁架 T 形强化节点数值分析研究.....	赵雅娜 余志祥 许 洵 赵世春 (706)
钢结构房屋震害破坏原因及采取措施.....	周 卉 徐忠根 (712)

第Ⅱ册目录

3. 钢筋混凝土结构、材料与构件

预应力混凝土箱梁桥的裂缝防治研究现状.....	曾庆响 韩大建 (001)
东航培训大楼裂缝原因分析.....	陈海斌 郑乔文 (006)
玻化微珠在自保温墙体中的应用研究.....	代学灵 李 珠 张泽平 刘元珍 魏增宝 (011)
高性能混凝土剪力墙基于性能的抗震设计截面延性分析.....	邓明科 梁兴文 (018)
混凝土的 SHPB 冲击试验研究进展.....	高 乐 焦楚杰 蒋国平 魏晓峰 (026)
基于宏观单元的结构非线性分析方法、算例及工程应用.....	韩小雷 陈学伟 林生逸 (032)
拱式转换层刚度比对结构抗震性能的影响分析.....	何和萍 (041)
钢筋用量对钢筋混凝土开孔梁受力性能的影响.....	黄伟军 吴炎海 周凯敏 (046)
现浇混凝土密肋空心板的设计计算方法.....	蒋方新 尚仁杰 吴转琴 李佩勋 (050)
大跨钢筋砼楼板——墙组合层梁的设计分析.....	李 密 任晓崧 (056)
地下室现浇混凝土圆弧外墙单侧支模施工技术.....	李春安 杨凯明 (062)
超高韧性水泥基复合材料在受弯构件中应用研究.....	李庆华 徐世烺 (066)
边缘构件在 CS 板式结构中的作用.....	李砚波 吴春锋 戴自强 (070)
钢骨混凝土柱与钢筋混凝土梁组合框架节点受剪承载力的试验研究.....	林拥军 葛宇东 潘 毅 程文灏 (074)
钢管混凝土梁的承载力实验与模拟分析.....	刘 香 周 平 李 剑 (081)
基于变形的框架-剪力墙结构地震内力实用计算方法.....	刘建新 高圣宝 梁本亮 王红因 (087)
框架边梁中复合抗力预应力筋新束型的研究.....	刘晚成 吕 兴 (092)
EPS 轻集料混凝土力学性能试验研究.....	刘嫔春 刘华军 王秋萍 陈卫东 (100)
荷载作用下钢筋混凝土梁中氯离子扩散的试验研究.....	鲁 列 周建民 王建东 张俊芝 (104)
CS 板式结构体系的动力特性试验研究.....	李砚波 张 鸣 戴自强 (108)
预制装配整体式混凝土住宅结构体系研究与应用.....	吕超兵 刘茂龙 吴 超 张季超 (112)
预制叠合墙抗剪承载力试验分析研究.....	潘陵娣 鲁 亮 梁 琳 李检保 (116)
海砂混凝土及其耐久性保护.....	施养杭 王丹芳 吴泽进 (122)
钢纤维活性粉末混凝土弯曲抗折性能试验研究.....	苏家伦 吴炎海 林 清 (127)
基于纤维模型叠合板式剪力墙非线性分析.....	王德才 叶献国 连 星 常 磊 (131)
压区粘钢加固钢筋混凝土梁的 ANSYS 分析.....	王琳鸽 张耀庭 (135)
负载下预应力 CFRP 板加固 RC 梁弯曲性能研究.....	王兴国 张春生 徐 平 周朝阳 (140)
混凝土耐久性研究进展.....	魏晓峰 焦楚杰 何 娟 高 乐 (145)
钢管混凝土柱的弹塑性屈曲荷载研究.....	闻 洋 马军力 罗国荣 (153)
自密实轻骨料混凝土的双 K 断裂参数和断裂能试验研究.....	吴 熙 付腾飞 吴智敏 (157)
高强高性能混杂纤维轻骨料混凝土的试验研究.....	吴平安 刘宜平 杨 洁 刘 首 (163)
钢管混凝土轴心受压短柱承载力概率分布研究.....	向天宇 赵人达 徐腾飞 (170)
基于损伤理论的预应力混凝土梁弹性模量分析.....	熊辉霞 张耀庭 司马玉洲 (175)
聚丙烯纤维混凝土力学性能试验研究.....	徐一沅 林 茂 师 伟 (181)
反力墙预应力筋张拉顺序的模型试验研究.....	姚 勇 古 巍 (185)

复杂梁式转换结构受力性能分析.....	叶艳霞 雷 静 (192)
钢筋混凝土 T 型剪力墙斜截面承载力的新解	尹新生 范雪梅 (197)
钢筋混凝土受弯构件正截面承载力简便计算.....	张会平 卫国祥 (205)
短切玄武岩纤维水工混凝土的基本力学性能试验研究.....	张灵福 徐雪峰 刘华挺 张俊芝 (209)
钢筋混凝土梁柱构件地震损伤机理试验研究.....	郑建波 蒋欢军 陈林之 (214)

4. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构

基于 WIEGHARDT 地基的桩弹性分析.....	陈 林 张永兴 (219)
刚性芯夯实水泥土桩复合地基非线性数值分析.....	丁继辉 孟艳杰 王维玉 徐成杰 (224)
广州大学城综合管沟应用实践研究.....	丁晓敏 张季超 许 勇 朱 超 (230)
高地应力区巷道断面形状对围岩稳定的模型试验.....	范广勤 (234)
石笼单元压缩试验研究.....	付 丹 郭红仙 程晓辉 周 卫 (240)
后压浆钻孔灌注桩基桩内力试验新技术.....	韩 亮 (244)
考虑时空效应的软土冻结围护信息化设计施工.....	黄建华 (247)
相变效应对钻孔灌注桩与冻土回冻过程的影响.....	贾艳敏 郭红雨 (254)
瞬态瑞雷波法在软土地基处理检测中的应用.....	江平意 张季超 李云华 许 勇 (258)
地震荷载作用下条形基础地基动承载力的近似解.....	丁继辉 赵 拓 袁 满 麻颜君 (262)
桩基的 Winkler 模量(I)—水平 Winkler 模量	雷文军 许名鑫 黄圣钧 (268)
配合盾构法建成三连拱地铁车站模型试验研究.....	李 围 何 川 陈晓婷 (273)
QXS 注浆材料及控制技术的研究应用.....	李国富 李 珠 戴铁丁 (277)
碎石排水桩抗地震液化的试验研究与理论分析.....	李立军 梁仁旺 牛琪瑛 (283)
动力排水固结法加固某吹填淤泥地基试验研究.....	李云华 张季超 许 勇 (289)
楔形刚性桩复合地基中桩的最佳楔角范围研究.....	刘 杰 何 杰 闵长青 (293)
广州外国语学校首期软基处理工程检测与监测.....	刘茂龙 吴 超 吕超兵 张季超 (300)
任意形状明置基础竖向振动复合集总参数模型.....	刘志久 尚守平 王贻荪 (304)
单桩侧阻力强化与退化的荷载传递法模拟.....	马文旭 龙跃凌 伍伟林 (310)
碎石桩加固不同密实度液化土的孔隙水压力变化规律探讨.....	牛琪瑛 郭 英 吴永娟 张 明 (316)
基于强度折减法的加筋土挡墙稳定性数值分析.....	童华炜 刘恒强 (321)
利用原位测试法预测地震液化引起的地面大变形.....	王 斌 杨 军 童立元 (326)
北京某山区高层住宅工程地基基础设计.....	王晓琳 王棣生 (334)
山地城市高边坡风险管理信息系统研究.....	文海家 李 鑫 赵 亮 (338)
多高层建筑共同作用中的比例衰减模式.....	武建勋 陈 辉 王永亮 郑伟涛 王运兴 (342)
动力排水固结法处理填海地基的研究应用.....	许 勇 张季超 (347)
双排桩支护结构优化设计与工程应用研究.....	杨德健 王铁成 (351)
一种桩基完整性诊断的神经网络方法.....	张灿辉 张建霖 谢建华 肖能标 张建国 (356)
预应力锚杆在深基坑支护中的应用.....	张明聚 王诚浩 吕 琦 杨文峰 (360)
排水固结垫层材料试验研究.....	张巧芬 (365)
超长灌注桩荷载传递规律研究.....	郑 晓 蔡晓丽 (369)
刚性桩复合地基沉降机理与影响因素研究.....	杨德健 王铁成 (374)
中国南极中山站区冻土融沉和冻胀模拟试验及基础对策研究.....	郑先昌 郑伟锋 (379)

无线监测系统在真空预压分层沉降观测中的应用.....	朱 超 张季超 许 勇 王可怡 丁晓敏 (385)
CFG 桩有限元分析.....	郑 晓 王道冠 (389)

5. 公路、铁路、桥梁、水工与港工

跨海大桥桥塔区风环境数值风洞模拟.....	艾辉林 陈艾荣 (396)
砂沥青混合料粘弹特性实验研究.....	蔡宜洲 叶 永 (401)
水泥砼路面的工后可靠度及其计算方法.....	陈富坚 黄世斌 包惠明 (406)
轨枕支撑弹簧刚度和阻尼对钢轨磨耗型波磨影响的有限元研究.....	陈光雄 王国新 (411)
钢-混凝土组合箱梁日照温度场分析.....	陈晓强 (420)
横隔板构造对桥面板疲劳应力幅的影响.....	丁文俊 吴 冲 赵 秋 (425)
夹芯复合材料悬臂箱梁初等梁理论适应性分析.....	段金曦 袁端才 徐文明 (429)
桥梁健康跟踪及灾后快速评估系统分析.....	郭 莹 姚 勇 陈代果 (434)
斜拉桥合理索力分析以及拉索找形中弹性悬链线单元的应用.....	何铭华 辛克贵 郭 佳 (439)
利用阻尼型辅助索的斜拉索减振试验研究.....	何永龙 孙利民 周亚刚 (445)
坝基加固后锦屏一级高拱坝应力变形计算分析.....	胡著秀 张建海 周 钟 饶宏玲 (449)
路堤全断面沉降观测与工后沉降分析.....	黄 跃 罗晓辉 罗 潇 (456)
基于易损性分析的桁架桥传感器布设方法.....	姜绍飞 杨 博 吴兆旗 (461)
PC 斜拉桥辅助墩拉力摆断裂的成因分析.....	李宏江 (465)
斜拉桥并列拉索尾流驰振风洞试验研究.....	李永乐 王 涛 廖海黎 (471)
混凝土箱梁翼板厚度变化对剪滞效应的影响分析.....	蔺鹏臻 周世军 刘凤奎 (478)
基于竖向位移测试的 PC 梁有效预应力预测研究.....	刘龄嘉 贺拴海 (482)
强风环境下列车运行安全保障体系的初步研究.....	刘庆宽 (486)
超重交通水泥混凝土路面结构分析.....	刘少文 申俊敏 周玉民 (492)
包边填砂路堤结构稳定性与优化分析.....	罗 潇 罗晓辉 黄 跃 (497)
采用激波拟合法数值模拟城市雨水管道中明满流混合流动.....	茅泽育 肖 汉 胡应均 罗 昇 (501)
移动模架造桥机在铁路客运专线中的应用.....	牛保金 吕 剑 (505)
岳阳新港集装箱堆场沉降观测试验及预测分析.....	潘宣何 刘晓平 陈中秋 (511)
波浪作用下软土地基残余变形分析.....	邱长林 闫 玥 闫澍旺 (515)
开口组合曲梁焊钉剪力分布规律研究.....	苏庆田 曾明根 吴 冲 (519)
桥上线路异常周期性高低不平顺的试验分析.....	孙国钧 (525)
铁路箱梁有效宽度计算的程序实现及应用.....	王 聪 钟亚伟 (529)
钢管混凝土拱桥灌注仿真分析.....	王 剑 李青宁 (533)
斜拉桥钢-混组合箱梁焊钉连接件剪力分布研究.....	王正阳 吴 冲 陆春阳 (537)
基于健康监测的大跨度连续刚构桥支座位移评估.....	夏樟华 朱三凡 宗周红 (542)
大跨度悬索桥初始平衡状态及成桥特性研究.....	谢官模 谢小飞 (549)
五跨连续斜拉桥扁平钢箱梁剪力滞效应分析.....	熊礼鹏 吴 冲 陆春阳 (553)
桥梁荷载试验快速检测.....	徐有刚 冯加权 杜 强 周帮友 (557)
机械动荷载传递方式对水电站厂房动力特性影响研究.....	杨晓明 张振国 (560)
剑科心墙堆石坝应力应变计算分析.....	姚 颖 张建海 何昌荣 杨宏昆 周 涛 (566)
交通车辆引起路基振动特性分析.....	于国友 (572)

结构健康监测用的大跨度悬索桥模型研制.....	詹 胜 徐幼麟 洪小健 朱乐东 张笑华 (576)
锦屏一级高拱坝大垫座稳定性研究.....	张 肖 张建海 周 钟 饶宏玲 韩 荣 纪 亮 (583)
吊拉组合桥考虑索鞍影响的线形计算及程序设计.....	张 征 黄才良 张 哲 (588)
近海风力发电机基础桩群潮汐水动力脉动特性试验研究.....	张陆陈 骆少泽 (593)
斜交预应力空心板桥拓宽承载力分析.....	张美珍 林锦滔 夏樟华 宗周红 (597)
钢混桥梁面板抗冲切承载力算法研究及程序设计.....	郑 愚 于国友 (603)
列车荷载作用下软土地基横观各向同性响应.....	周 晔 郑荣跃 刘干斌 (611)
FRP 桥面板静载试验研究及分析.....	朱坤宁 万 水 刘玉擎 (618)
大跨度钢筋混凝土拱桥模型修正和动力特性分析.....	朱三凡 宗周红 夏樟华 (623)
高速公路防治跳车的施工技术研究.....	庄 宁 叶万军 朱苦竹 (628)

第Ⅲ册目录

6. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

新型多层住宅结构抗震研究现状与展望.....	曹万林 杨兴民 张建伟 董宏英 (001)
地震作用下深水高桩承台体系桥梁结构——水相互作用分析.....	曹新建 袁万城 高 永 魏 凯 (008)
非线性随机介质场地的地震反应分析.....	陈 原 李 杰 (015)
简化的能力谱法及其应用.....	陈兴冲 夏修身 (021)
考虑温度影响下的混凝土梁桥的模式参数识别研究.....	狄生奎 王立宪 杜永峰 李 慧 (025)
单自由度结构地震激励下瞬时均方根响应的小波变换估计.....	杜 鹏 孙 智 (032)
广东科学中心 E 区隔震支座监测预警指标研究与应用.....	范 雁 张季超 许 勇 (037)
LRB 基础隔震结构在近断层脉冲型地震作用下的碰撞响应.....	符 蓉 叶 昆 李 黎 (041)
椭圆曲线滑道辊轴摩擦摆隔震系统性能的分析计算.....	葛 楠 苏幼坡 王兴国 (046)
同时设置金属和粘滞阻尼器的钢框架结构减震效果初探.....	郭道远 裴星洙 (052)
网络化结构实验室-桥梁结构远程拟动力试验平台开发与应用.....	郭玉荣 范云蕾 曾 东 肖 岩 (056)
设防水准对典型框架结构土建工程造价的影响.....	韩 淼 李守静 刘健兵 (061)
烟囱爆破拆除方案的模拟研究.....	何 煌 魏万鑫 (067)
纵向地震动输入下的大型渡槽结构减振控制研究.....	黄 亮 王 博 徐建国 侯玉洁 (071)
非结构构件地震破坏机理及抗震性能分析.....	黄宝锋 卢文胜 (077)
爆炸试验中电磁脉冲对测试信号的影响.....	黄家蓉 王 幸 孙桂娟 (084)
静动力分析法及其在高层框架-核心筒结构减震分析中的应用.....	黄瑞新 李爱群 张志强 赵耕文 (089)
悬吊煤斗结构减震理论与振动台试验研究.....	纪金豹 张士练 闫维明 马 华 (096)
混凝土 SHPB 试验的数值模拟.....	焦楚杰 李 桢 高 乐 (101)
多维地震动输入下钢筋混凝土高层结构的弹塑性反应分析.....	李 兵 赵乃志 陈 鑫 (107)
地震作用下隔震桥梁的动力稳定分析.....	李 黎 刘文静 张 行 (111)
防屈曲支撑的实时能量守恒子结构试验.....	李 妍 吴 斌 欧进萍 (116)
土与结构相互作用振动台试验模型土设计方法分析.....	李 岳 姜忻良 (123)
某核安全壳的隔振减震分析.....	李冬梅 陈树华 侯钢领 (127)
广东科学中心 E 区结构模型振动台试验研究.....	李鹏程 张季超 许 勇 (131)

泡沫铝-钢层合板衰减爆炸荷载数值模拟	林 茂 余晓青 徐一沅 (136)
四渡河悬索桥抖振响应时域分析	龙晓鸿 李 黎 胡 亮 (140)
单地震动记录随机增量动力分析	吕大刚 于晓辉 王光远 (145)
钢筋混凝土框架结构抗震性能水平划分标准	吕伟荣 谭 磊 王 猛 刘锡军 (150)
错层建筑在汶川地震中受损分析	毛蓉萍 (155)
曲线钢箱梁立交桥地震反应分析	苗 峰 张 哲 李斐然 (159)
一座新型协作体系桥地震响应分析	牟瑛娜 张 哲 汤铮飞 苗 峰 (163)
重物冲击下悬臂梁动力响应的能量法	牛文杰 (168)
Pushover 方法在既有结构安全性鉴定中的应用	潘 毅 赵世春 杨 成 林拥军 代 杰 (173)
双三角形激励冲击响应谱数值分析	彭 彪 王 基 (178)
纤维层合板抗弹性能数值模拟分析	卿尚波 晏麓晖 (182)
松软基础上几幢高层建筑振动特性测试	史文海 李正农 (187)
Kelvin 模型阻尼器连接相邻结构减震优化分析	孙黄胜 陈士海 (191)
矩形底扁球面网壳非线性振动的频率特性	王 钢 韩明君 王新志 (197)
变电构架柱地震反应时程分析	王 磊 吕 涛 朱爱珠 朱宏平 (201)
空中爆炸大跨度桥梁冲击波荷载初探	王 赟 蒋志刚 胡 平 (206)
最小二乘时滞实时在线估计方法的试验研究	王 贞 吴 斌 (211)
顶点斜向冲击荷载下 K8 单层球面网壳的动力响应	王多智 支旭东 范 峰 沈世钊 (219)
工程结构隔震理论与技术	王林建 刘树堂 (224)
组合结构桥梁抗震潜力及性能研究	魏 凯 袁万城 曹新建 (229)
某超限高层结构软钢阻尼器振动控制的试验研究	闻 辉 鲁 亮 (235)
地震波时变谱估计方法比较研究	吴巧云 朱宏平 (241)
半刚性连接对钢框架结构抗震性能的影响	吴兆旗 姜绍飞 (247)
抗震框架结构位移和滞回耗能响应随结构损伤的变化分析	肖明葵 王肖巍 边 江 (253)
基于小波技术改进的 AR 算法在随机场模拟中的应用	徐 林 叶继红 (258)
烈度指标函数对 IDA 曲线离散性的影响	杨 成 潘 毅 赵世春 李彤梅 李英民 (264)
不同矢跨比对支承网壳动力性能的影响	杨 颢 李 娜 王 凯 (269)
匀速移动均布荷载作用下弹性支座简支梁冲击系数研究	杨 予 (273)
大跨度斜拉桥的地震位移控制	杨喜文 (279)
多级力控制随机 Pushover 方法	于晓辉 吕大刚 王光远 (283)
火灾全过程后钢筋混凝土柱滞回性能试验研究	张家广 霍静思 肖 岩 (288)
再生混凝土中高剪力墙的抗震性能研究	张建伟 曹万林 朱 珩 董宏英 (293)
土钉长度对边坡抗震性能影响的研究	张明聚 吕 琦 李立云 王诚浩 (298)
一种新型全钢防屈曲支撑抗震性能的试验研究	赵俊贤 吴 斌 欧进萍 (303)
黏弹性边界在土石坝地震反应分析中的应用	周晨光 孔宪京 邹德高 胡志强 (310)

7. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析

CFRP 加固 H 型钢梁数值模拟分析	曹 靖 王建国 完海鹰 (317)
碳纤维布折叠多层制作的 CFRP 片材力学性能的测试	陈小英 陈明政 李唐宁 (321)
软岩大断面隧道施工对地表的影响	邓洪亮 付孝银 (326)

旧水泥砼道面沥青加铺层抗反射裂缝试验研究.....	董 昊 谢卫红 李高健 辛家宝 (331)
基于无网格法的反向器拓扑优化设计及性能测试.....	杜义贤 田启华 吴正佳 (335)
改进蚁群算法在空间桁架中的应用研究.....	段敬民 陈少杰 赵洪波 (342)
思南路 47、48 号街坊风貌保护区砖木结构别墅的检测.....	樊建良 郑玉庆 (347)
最大熵法可靠度理论在工程应用中的改进.....	高 渊 叶继红 (353)
定日镜结构优化分析.....	宫 博 李正农 王莺歌 王志峰 (359)
基于中介状态的串联工程系统抗震优化设计.....	韩 侠 沈小伟 王大均 (363)
扣件式钢管模板支架的试验和数值模型研究.....	胡长明 曾凡奎 王 静 沈 勤 (372)
旧水泥砼路面碎石化施工技术及应用.....	黄斌宇 梁维广 冯在高 (377)
基于最大裂缝宽度的钢筋混凝土桥梁可靠度分析.....	焦美菊 孙利民 (382)
聚合物钢网架仓库的性能化防火设计.....	兰 静 张 旭 王晓纯 白玉星 高建岭 (388)
加固钢箱预推力作用下的混凝土拱桥内力分析.....	李大庆 舒正超 殷俊华 李应钦 汤 鹏 (394)
结构动力可靠度的条件反应估算法.....	刘 佩 姚谦峰 (401)
城市化建设带来的水问题.....	刘 颖 茅泽育 (405)
已破损非预应力钢筋混凝土吊车梁的试验研究.....	刘海生 (409)
浅谈超限高层建筑结构抗震设防审查.....	刘利惠 鲁 亮 (413)
位移约束桁架尺寸优化设计的改进齿形法.....	刘树堂 (419)
医院医用流体系统施工技术.....	刘越岭 (425)
基于单位脉冲相应的框架结构损伤检测.....	吕中荣 刘济科 (430)
风力发电塔井格梁板式预应力锚栓基础设计研究.....	马人乐 孙永良 黄冬平 (434)
碳纤维布约束混凝土圆柱抗压性能研究.....	苏 骏 (439)
某梁式转换层双塔结构的抗震设计.....	苏艳桃 许 勇 (444)
现代竹结构住宅抗震性能研究.....	肖 岩 陈 国 杨瑞珍 余立永 周 泉 (448)
时代广场时代大厦桩基设计探讨.....	田秀荣 (454)
基于 ANSYS 的等截面臂架腰绳优化.....	王 欣 张 静 郑亚辉 高顺德 (459)
基于可靠度指标的空心钢管混凝土轴心受压构件设计.....	王宏伟 钟善桐 (467)
某地下室混凝土裂缝灌浆堵漏补强工程施工技术探讨.....	韦莲红 张季超 (472)
防护工程综合防护的模型构建及其优化研究.....	夏逸平 陶西贵 (476)
装配式竹结构房屋在汶川地震灾后安置的应用.....	肖 岩 余立永 单 波 (480)
历史保护建筑砖材强度检测方法研究.....	肖煌俊 刘卫东 谈晓青 杨伟波 (488)
高大模板支架极限承载力的计算方法.....	谢 楠 王 勇 李 靖 (492)
基于群锚效应的后锚固受拉计算方法分析.....	谢 群 陆洲导 (498)
大型 LNG 低温储罐预应力施工.....	杨建江 杜 帅 冯 迪 (504)
既有砌体结构建筑抗震加固和节能改造一体化的提出及应用.....	杨 博 李 珠 (511)
现代竹结构车行桥梁的建造与研究.....	肖 岩 周 泉 单 波 (516)
在役历史保护建筑结构时变安全性分析.....	杨伟波 刘卫东 苏海华 (523)
石化企业钢结构聚合物仓库性能化防火设计.....	杨彦海 高建岭 白玉星 王晓纯 (527)
冲击荷载下混凝土结构的有限元分析.....	杨建江 王蓉蓉 崔秋君 (531)
基于灰色关联度和经济优化相结合的服役桥梁维修加固决策.....	张 爽 谢 剑 (538)
青岛游泳跳水馆复杂异形网架结构抗震性及可靠性研究.....	张纪刚 张同波 欧进萍 (544)
飞机滑行道桥健康状况动静载力学分析.....	张宇辉 张献民 (551)
深圳宝安体育场屋盖索膜结构的找形和索的剖断分析研究.....	赵 冉 魏德敏 孙文波 李 頔 (555)

8. 舰船、车辆、航空航天结构及交叉学科

充气悬臂梁的弯曲失效行为研究.....	陈 帅 李 斌 杨智春 (560)
基于概率的车载电子设备隔振性能分析.....	陈建军 杨林硕 朱增青 (566)
高职院校建工专业教学改革的探讨.....	丁 恒 (570)
蜂窝板 GA-PSO 模型修正.....	孔宪仁 秦玉灵 罗文波 (575)
FDPSO 立管涡激振动响应分析.....	雷 松 张文首 赵 岩 岳前进 (580)
复合材料 T 型单元损伤演化的声发射特性研究.....	李 仲 黄华斌 魏宏艳 白生宝 张德俭 (586)
加筋板多处损伤的预制及检测方法、维修寿命分析.....	刘秀丽 陈 莉 魏玉龙 闫文伟 (593)
结构初始广布疲劳损伤发生预估的概率模型.....	薛景川 弓云昭 (597)
不同浮重比水中悬浮隧道动力特性的实验研究.....	陆 维 葛 斐 王 雷 龙 旭 洪友士 (601)
电阻应变计的技术要求、试验方法及应变电测方法的应用技术.....	沈观林 (608)
嵌入法求解直井多级抽油杆柱系统纵向振动问题的频率和振型函数.....	徐永君 赵清清 于俊波 张传绪 (612)
复合材料微波修复技术在舰艇结构损伤抢修中的应用.....	许陆文 董 露 (620)
金属薄壁结构剩余强度估算方法研究.....	薛景川 张 茂 樊优优 窦秋芳 (624)
基于非线性动力学理论的故障诊断方法与进展.....	张庆虎 高普云 (628)
轮胎承载机制有限元分析.....	张士恒 危银涛 (632)
钻柱纵向振动固有频率分析.....	张治勇 何 洋 胡中伟 (638)
《工程力学》论文编排格式命令操作步骤.....	黄丽艳 (642)

现代密封转子动力学研究综述

—第 18 届全国结构工程学术会议特邀报告—

曹树谦*, 陈予恕

(天津大学机械工程学院, 天津 300072; 天津市非线性动力学与混沌控制重点实验室, 天津 300072; 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 对转子密封动力学的发展给出了比较全面的综述, 特别是针对现代高参数密封转子的存在问题、研究内容及主要成果进行了介绍。将密封转子动力学的研究分为四个方面: (1) 对密封力模型及其计算方法的研究; (2) 对密封力集总参数 (8 个动力系数) 的识别; (3) 不同形式密封 (含减阻结构和预旋等) 对转子失稳的影响; (4) 转子/密封动力学模型的建立和分析。对取得的主要成果概括为: (1) 以 Muszynska 模型为代表的集总参数模型; (2) 密封力线性动力系数的识别方法; (3) 简单转子/密封系统的分岔与混沌等复杂行为; (4) 近年正在开展的 CFD (Computational Fluid Dynamics) 与密封/转子相结合的研究取得的进展。文后附有包含经典成果与最新成果的 100 余篇参考文献。本文可供从事密封转子动力学方面的研究人员参考。

关键词: 转子; 密封; 动力学; 综述

A REVIEW OF MODERN ROTOR/SEAL DYNAMICS

CAO Shu-qian, CHEN Yu-shu

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

Tianjin Key Laboratory of Nonlinear Dynamics and Chaos Control, Tianjin 300072, China;

State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A review of rotor/seal dynamics is given, focusing on the issues of problems, contents, and main results achieved in modern rotor/seal dynamics. Researches of modern rotor/seal dynamics are divided into four parts: (1) modeling and calculation methods of the seal force; (2) identification of the eight lumped parameters of the seal force (the eight dynamic coefficients of the seal); (3) effect of different structure of seals (including damp-reduced structure and pre-swirl) on rotor stability; and (4) modeling and analysis of rotor/seal dynamic, especially the nonlinear dynamics of the rotor/seal model. The achieved main results are summarized as follows: (1) proposed the lumped parameter seal force model by Muszynska and Bently; (2) obtained some techniques to identify the lumped parameters of the seal force; (3) studied some complex behaviors including bifurcation and chaos on some simple rotor/seal models; and (4) applied CFD (Computational Fluid Dynamics) to seal force calculation and rotor/seal dynamic analysis. Over one hundred of references are listed at the end of the paper. This review will be helpful for researchers of rotor/seal dynamics.

Key words: rotor; seal; dynamics; review

1 引言

环流密封是透平机械中的关键部件 (图 1), 其性能直接影响透平机械的工作效率和转子稳定性。特别是在高参数 (高温、高压、高转速、高效率和高容量) 透平机械中, 密封的作用更加突出。

现代透平机械不断向高参数发展。如汽轮机的蒸汽参数由亚临界 16.7MPa/537°C/537°C 提高到超临

*基金项目: 国家自然科学基金项目(10632040); 教育部高校博士点基金项目(200800560037); 天津市自然科学基金项目(09JCZDJC26800)

作者简介: 曹树谦(1964—), 教授, 博导, 主要从事非线性振动、转子动力学和压电智能结构动力学等方面的研究(E-mail: sqcao@tju.edu.cn);

陈予恕(1931—), 教授, 博导, 中国工程院院士, 主要从事非线性动力学及应用方面的研究

界 24.1MPa/538°C /538°C 或 566°C (美国), 再提高到超超临界 28.0Mpa/580°C/580°C (欧美) 或 24.1MPa/538°C/593°C (日本) [1-2]。欧盟 1998 年启动长达 17 年的超超临界机组 AD700 计划, 计划完成单机 1000WM、参数 37.5MPa/700°C/720°C/720°C 的机组研制[3]。超超临界机组不仅可以节省大量能源, 其重要的战略意义在于可减少大量的 CO₂ 排放, 如 AD700 计划中的机组可减少 30% 的 CO₂ 排放。再如, 美国航天飞机主引擎高压燃油涡轮泵(SSME HPFTP, 图 2)转速在 36000rpm 以上, 气体温度超过 1500°C、压力达到 22Mpa[4-5]。NASA 于 1999 年提出了超高效发动机技术 (UEET) 计划, 在大幅度降低污染的同时, 可提高效率 8~10% 并减少油耗 3~10% [6]; 这要求燃烧室出口温度达到 2700°C 以上、压力大于 4.0MPa。我国在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020)》中, 将“重型燃气轮机”和“高参数超超临界机组”列为优先发展主题[7]。透平机械的高参数化带来的直接后果之一是增加了气动不稳定性, 无论是超超临界机组 [1-2], 或涡轮发动机 [4-5], 还是气体压缩机[8], 密封失稳或气流激振对机组安全运行的潜在危险更大[9]。HPFTP 开发过程中的半速涡动直接源于密封[4], 事实上, 从 1976 年在试验中首次发现该问题, 直到 1981 年航天飞机首次试飞成功, 与 Otto Geotz 领导的小组在密封方面的工作有重要关系[9]。

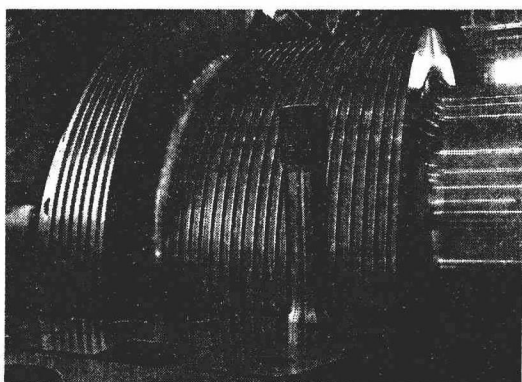


图 1 汽轮机转子环流密封(哈尔滨汽轮机厂)

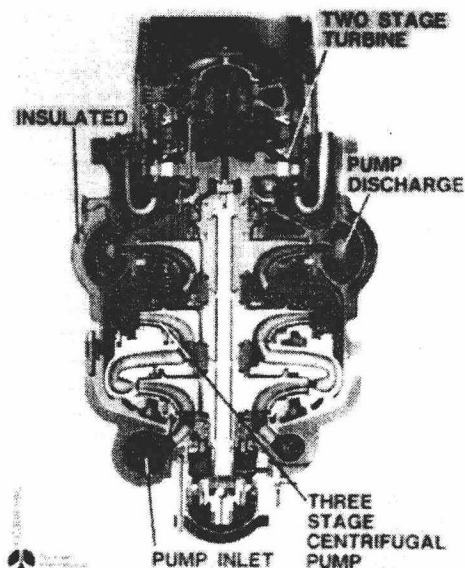


图 2 美国航天飞机主引擎高压燃油涡轮泵(SSME HPFTP)[4]

密封失稳是机组腔室内高温、高压流体与高速转子耦合作用的结果, 是透平机械的固有属性, 因此是设计和运行中必须考虑的重要因素。涡轮转子密封包括级间密封(叶顶气封和隔板气封)和端部密封(轴封), 以环流密封形式为主。密封失稳与多种因素有关, 现有成果表明, Lomakin 效应、Alford 效应、螺旋流动效应、三维流动效应及二次流效应等均与密封失稳有关[10]。但普遍认为, 较大的环流速度是导致环流密封失稳的主要原因, 因此 von Pragenau GL 提出了阻尼密封的概念[11], 从而使密封稳定性大大提高, 图 3 为 von Pragenau GL 提出的一种阻尼密封。然而, 由于密封失稳的复杂性, 以及现代透平机械对密封不断带来新的挑战, 密封失稳问题仍是现代透平机械研究中的一个热点问题。NASA 的“密封与转子动力学”研讨会(后改为“密封与二次流系统”)就是一个例证。自从 1980 年 Childs DW 组织了首届密封与转子动力学研讨会后, 至今 NASA 每年都举行密封方面的研讨会(前三届中间间隔一年)。从 NASA 的官方网站可以看到, NASA 每年有许多与密封相关的报告公布。

有关转子动力学中密封及密封失稳的文献众多, 本文挑选了一百余篇代表性文献, 将其归纳整理为四个方面: (1) 对密封力模型及其计算方法的研究; (2) 对密封力集总参数(8 个动力系数)的识别; (3) 不同形式密封(含减阻结构和预旋等)对转子失稳的影响; (4) 转子/密封动力学模型的建立和分析。对每个方面的工作, 在追溯历史的基础上, 力图出现代密封转子动力学研究的最新成果。本文工作希望对从事密封转子动力学研究、特别是超(超)临界汽轮发电机组密封失稳研究的工作者提供一份系统的背景资料。

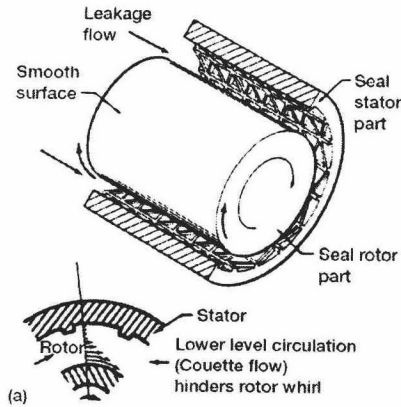


图3 von Pragenau GL 的三角形蜂窝密封专利^[9]

2 历史回顾

从 Thomas HJ 开始, 现代密封失稳研究已经走过了半个世纪, 在机理认识和密封结构等多方面取得了巨大进步。1958 年, Thomas HJ^[12] 针对汽轮机系统研究了转子的自激振动, 并引入金属阻旋片减少或消除作用在转子上的自激力, 开创了现代密封动力学研究。Alford JS^[13-15] 在研究航空涡轮机械动力学时指出, 气体切向速度是影响环流波动共振的主要因素, 并给出了著名的 Alford 力公式。Benckert H 和 Wachter J^[16-17] 的工作加深了人们对密封力的认识, 并提出进气涡旋是导致高密度气流密封失稳的主要因素, 自此学术界开始了涡旋减阻的研究并导致迷宫密封的成熟。随后, von Pragenau GL^[11] 提出了阻尼密封的概念, 并促使多种阻尼密封形式的出现。围绕 SSME HPFTP 的开发, Childs DW 在 Otto Goetz 领导的小组中开展了大量的密封试验工作, 为 NASA 航天飞机的成功发射做出了贡献^[9]。其间, Muszynska A^[18-19] 和 Bently DE 建立的集总参数模型, Tam LT^[20-22] 开创的 CFD 方法成为密封力理论研究的代表成果。至今, 有关密封力及其导致转子失稳的研究仍有大量成果发表^[23]。

事实上, 至今每年都有许多密封动力学成果发表。除一些专门的密封会议(如 NASA 的 Seal/Secondary Air System Workshop) 以外, 尚有一些行业会议(如 European Turbomachinery Conference, ASME Turbomachinery Symposium, ASME Turbo Expo) 也涉及大量的密封问题, 许多与动力学相关的会议(如 Conference on Modelling Fluid Flow, IFToMM, ICDVC 等) 也都列有密封或转子动力学主题。

3 研究现状

以下从四个方面论述密封转子动力学方面的成果。

3.1 密封力模型及其计算方法

密封力模型概括为两类: (1) Muszynska A 的集总参数模型(或称 Bently/Muszynska, B/M 模型); (2) 数值计算模型。

Muszynska A^[18-19] 将小间隙流体力以简单的解析式表示为三项: 弹性力、阻尼力和惯性力。

$$F = [K_0 + \psi_1(|z|)]z + [D + \psi_2(|z|)](\dot{z} - j\lambda\omega_R z) + M_f(\ddot{z} - 2j\lambda\omega_R \dot{z} - \lambda^2\omega_R^2 z)$$

式中, $z = x + jy$, $\psi_{1,2} = B_{1,2}|z|^2$, $B_{1,2}$ 为正常数。

除惯性力外, 弹性力和阻尼力均包含交叉项(环向作用力)。该模型的主要贡献是引入平均环流速度比 λ , 该参数与密封转子失稳直接相关。在线性假设下, 转子的失稳转速与 λ 成反比^[19,24], 这解释了环流速度是导致密封转子失稳的主要因素。根据测量的转子涡动响应, Muszynska A 和 Bently DE 得到了流体的动刚度复数表达式^[25-26], 其实部为径向刚度(direct stiffness), 虚部为交叉刚度(quadrature stiffness)。

该方法的优点是模型以解析式表达,方便用于转子系统的解析建模和分析;此外,当考虑 λ 与轴径位移(涡动幅值)的非线性关系时,该模型成为非线性模型,可用于转子系统的非线性分析。其缺点是,由于是一个宏观模型,该模型无法直接考虑密封结构的细节,各参数和系数通常需要实验测定。因此,许多学者寻求从流体力学方程出发直接求解流体的数值方法。

早期的数值方法大多基于体积流模型(bulk-flow model)。Black HF 和 Jensen ND^[27]最早将体积流模型应用于密封力研究。之后, Iwatsubo T^[28]、Childs DW 和 Scharrer JK^[29]、Kirk RG^[30]、潘永密^[31]、鲁周勋^[32]、Marquette OR^[33]、成玫^[34]在研究中都使用了该模型,如图4。该方法速度很快,但由于做了简化(如单控体模型和双控体模型,剪切力由代数式表示等),Moore JJ^[35]指出,使用传统的 Bulk-flow 模型在小间隙、高转速和大压力条件下计算气体密封力时存在较大误差。事实上该模型仅适用于少数几种密封(如迷宫密封),无法考虑其他密封结构的细节。

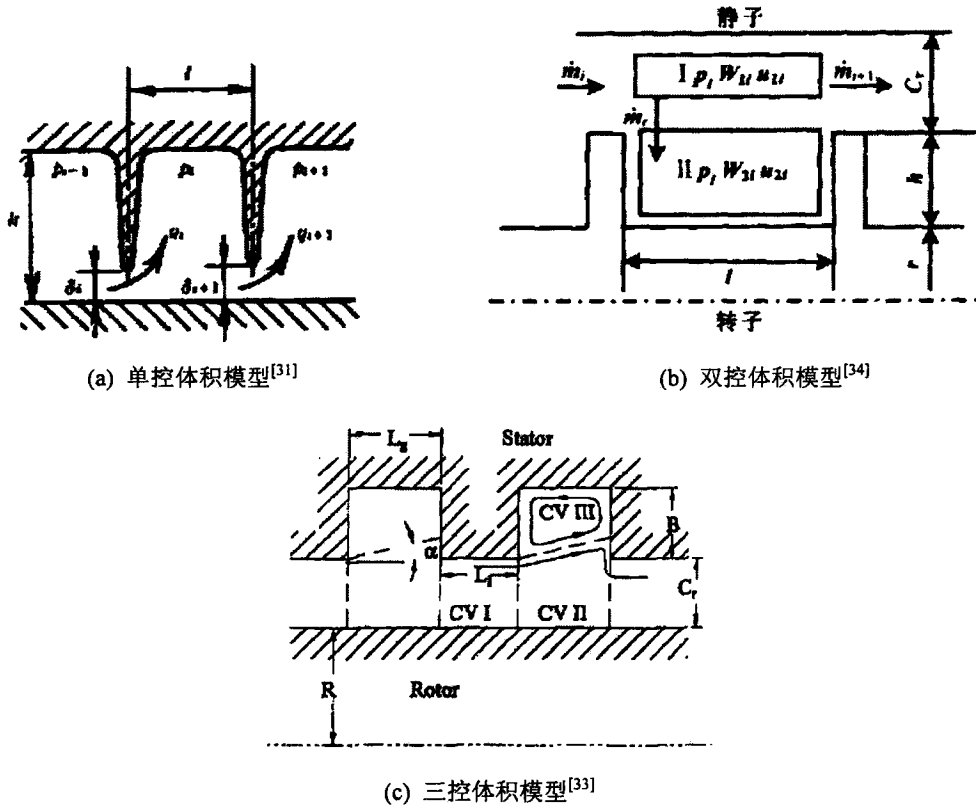


图4 体积流模型

从 Tam LT^[22]开始建立3D模型并采用CFD方法求解,陆续包括 Nordmann R^[36]、Rhode DL^[37]、Athevale MM^[38](发明了 SCISEAL 计算软件)、Moore JJ^[39-40]等均采用了该模型,但均针对液体密封。Kwanka K^[41]应用到气体密封,但仅针对低压(100kPa)。Moore JJ^[35]则成功将3D模型应用于迷宫密封动力系数及泄漏量的计算,图5是流场分布。

然而,3D模型的发展受到了计算量的限制,3D模型的计算时长比体积流模型大得多。于是,一些学者将3D模型转化为2D模型进行求解^[42-43],或称为准3D模型(quasi-three-dimensional CFD-perturbation model)^[44]。该方法需要在不同涡动比下计算方程的零阶和一阶解,通常未考虑紊流影响,并且仅对不变直径的密封有效。Kim N 和 Rhode DL^[45]发展了2D方法,抛开了变换并推广到可变直径密封,但文中指出该方法仅对液体密封有效。

Thomas S^[46]对密封力系数的计算方法给出了综述。

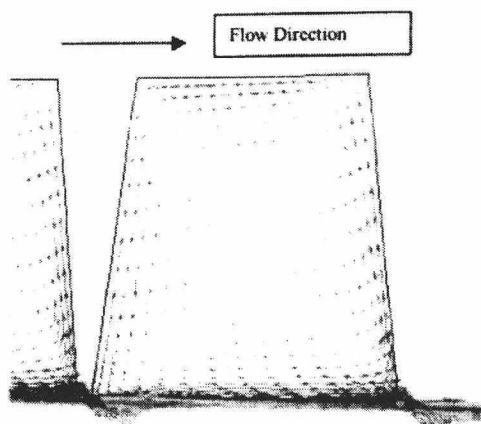


图 5 Moore JJ^[35]计算的密封腔内气流流速矢量

3.2 密封力集总参数（8 个动力系数）的识别

实验研究是密封动力学的一项重要工作，密封力计算需要实验结果的验证和修正。对密封力或动力参数的识别通常有两种方法：时域法和频域法，其中频域法应用较多。Benckert H 和 Wachter J^[16-17]较早开展了迷宫密封力的实验研究，并考虑了预旋和转子涡动的影响，但将其分开研究，且仅关注于刚度系数。之后，Iwatusbo T^[47] (1982, as well as 1985) 针对单室和五室迷宫密封模型，通过照相观察了气体流动模式，测量了流体动态压力变化及 8 个静力密封系数。Nordmann R^[48] 针对水介质，研究了双密封转子系统的环流密封特性；Nolan SA^[49] 研究了齿形密封的动力特性，并与光滑密封和孔型密封进行了比较；潘永密^[31]、沈庆根等^[50-51] 考虑预旋影响，研究了迷宫密封的刚度特性。Muszynska A 和 Bently DE^[25]、Muszynska A^[26] 则采用时域法识别了密封动刚度的实部（径向动刚度，direct dynamic stiffness K_D ）和虚部（切向动刚度，quadrature dynamic stiffness K_Q ）。Li JM^[52] 则应用频域识别技术，对立式密封转子系统中的阻尼密封力系数进行了试验研究。该密封为 4 叶（four-blade）、双 4 袋结构（two-four-pocket），最高转速 6000rpm，进出压比 1~3。Seifer BA^[53] 对孔型密封力进行了试验研究，得出压力比对密封失稳影响很小，而转速的影响很大。

值得一提的是，德国 DEMAG DELAVAL Turbomachinery 的 Wagner NG 在离心压缩机全尺寸密封模型实验中做了出色的工作（图 6）。作者论文^[54] 曾在 Structures & Dynamic Committee (1999) 获最佳论文奖。作者所在公司设计的高压离心压缩机密封全尺寸试验台（High-pressure centrifugal compressor, full-scale test rig），使用 N_2 （氮气）作气体介质，压力可达 25MPa。其特点为：①完全模拟机组实际条件，如实

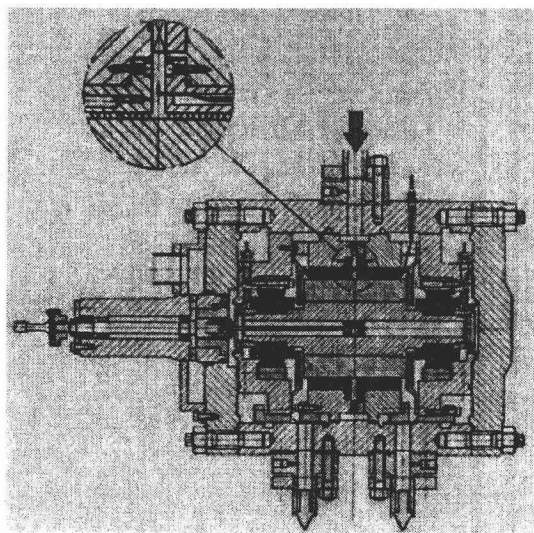


图 6 DEMAG DELAVAL Turbomachinery 的离心压缩机全尺寸密封模型实验台^[54]