

ISSN1000-4750

《工程力学》增刊 CODEN GOLIEB

CN11-2595/O3

# 第十届全国结构工程学术会议 论文集

## 第Ⅲ卷

PROCEEDINGS OF THE TENTH NATIONAL CONFERENCE ON  
STRUCTURAL ENGINEERING

Vol.Ⅲ

主编：崔京浩

中国 南京  
NANJING, CHINA  
10.21~10.24,2001

ISSN1000-4750  
《工程力学》增刊 CODEN GOLIEB  
CN11-2595/O3

# 工程力学

ENGINEERING MECHANICS

增刊  
2001

中国力学学会主办

清华大学出版社  
中国力学学会《工程力学》期刊社

# 热烈祝贺全国结构工程学术会议已满十届

## 衷心感谢学界同仁对会议的关心和支持

历届全国结构工程学术会议简况

| 届 次 | 时 间                | 地 点        | 收录论文 | 特邀报告 | 中 青 年<br>优秀论文奖 |
|-----|--------------------|------------|------|------|----------------|
| 第一届 | 1991.10.28 ~ 10.31 | 徐州, 中国矿大   | 165  | 10   |                |
| 第二届 | 1993.5.4 ~ 5.8     | 长沙, 湖南大学   | 162  | 20   |                |
| 第三届 | 1994.6.6 ~ 6.9     | 太原, 太原工大   | 295  | 24   |                |
| 第四届 | 1995.9.19 ~ 9.23   | 泉州, 华侨大学   | 393  | 18   | 19             |
| 第五届 | 1996.11.25 ~ 12.2  | 海口, 海南大学   | 425  | 11   | 13             |
| 第六届 | 1997.10.22 ~ 10.26 | 南宁, 广西大学   | 406  | 14   | 14             |
| 第七届 | 1998.10.7 ~ 10.12  | 石家庄, 石家庄铁院 | 397  | 19   | 20             |
| 第八届 | 1999.10.22 ~ 10.26 | 昆明, 云南工大   | 531  | 11   | 22             |
| 第九届 | 2000.9.16 ~ 9.20   | 成都, 西南交大   | 520  | 17   | 18             |
| 第十届 | 2001.10.20 ~ 10.24 | 南京, 河海大学   | 496  | 18   |                |
| 累 计 |                    |            | 3790 | 162  |                |

# 第十届全国结构工程学术会议论文目录

本次会议论文集收录论文 496 篇, 共计 2621 页, 分装成三卷, 每卷独立编页。第 I 卷载入全套论文集的总目录, 第 II、III 卷则只载本卷目录。

第 I 卷载论文 158 篇 (共 969 页), 包括:

特邀报告; 一. 力学分析; 二. 钢结构、桥梁、水工与地下结构。

第 II 卷载论文 165 篇 (共 810 页), 包括:

三. 钢筋混凝土与试验; 四. 地基与岩土。

第 III 卷载论文 173 篇 (共 842 页), 包括:

五. 动力与稳定; 六. 设计、施工、优化和可靠度。

## 第 III 卷目录

### 五、动力与稳定

|                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| 系泊浮体水弹性分析一阶主坐标的频率特征 .....     | 陈徐均 吴有生 崔维成 孙芦忠 (001)     |
| 快增殖反应堆主容器结构试验模型的动力分析 .....    | 钱 江 鲁 亮 陈 原 吕西林 翁智远 (008) |
| 隔震和半主动控制组成的结构振动混合控制系统分析 ..... | 李 江 何玉敖 (013)             |
| 随机噪声污染下的土建结构系统辨识与响应预测 .....   | 马卓军 何玉敖 (018)             |
| 桥梁连续模型随机抖振分析 .....            | 李 立 袁明武 (023)             |
| 单轴偏心的基础隔震结构地震响应分析 .....       | 江宜城 唐家祥 (027)             |
| 一种结构主动控制方法 .....              | 蔡国平 黄金枝 (032)             |
| 佳华广场中庭网壳工程的动力分析 .....         | 闫 旭 魏德敏 (038)             |
| 预应力组合梁抗震性能试验研究 .....          | 李 昆 薛伟辰 李 杰 (042)         |
| 钢筋砼带暗支撑开竖缝剪力墙抗震性能试验研究 .....   | 曹万林 张建伟 田宝发 刘建民 胡国振 (048) |
| 带暗支撑双功能剪力墙抗震性能试验研究 .....      | 张建伟 曹万林 王洪星 田宝发 高树军 (053) |
| 考虑时延的内置经络系统半主动控制研究 .....      | 董宏英 霍 达 徐宁寿 李云栋 (058)     |
| 多点输入作用下结构随机振动的振型加速度法 .....    | 夏友柏 王年桥 (063)             |
| 巨型框架多功能减振结构的减振效果及其影响因素 .....  | 蓝宗建 田玉基 邹宏德 (068)         |
| 钢管桁架的单塔斜拉桥结构分析研究 .....        | 陈晓冬 彭大文 (073)             |

|                                        |                             |
|----------------------------------------|-----------------------------|
| 高层建筑悬挂结构体系的动力性能研究 .....                | 周 坚 邓思华 ( 078 )             |
| 卧式重型精密金属切削机床的动力模型研究 .....              | 叶清华 ( 083 )                 |
| 龙潭河大桥空间地震反应分析 .....                    | 郑家树 ( 088 )                 |
| 多层厂房楼盖竖向振动计算中的几个问题 .....               | 周增国 ( 093 )                 |
| 巨型框架悬挂体系阻尼控制设计方法 .....                 | 江燕瑜 张耀华 ( 098 )             |
| 工程结构非线性动态失稳的分叉理论 .....                 | 彭妙娟 程玉民 ( 103 )             |
| 铅芯橡胶支座桥梁减震设计与分析 .....                  | 王 丽 闫贵平 闫志刚 ( 108 )         |
| 半刚接钢框架的弹性屈曲研究 .....                    | 陈爱国 郭 兵 赵海元 ( 113 )         |
| 油气储层裂缝扩展的动力学模型 .....                   | 刘建军 刘先贵 ( 118 )             |
| 粘弹性阻尼器对桥面铺装层的车振控制 .....                | 李保德 ( 123 )                 |
| 消能减震钢筋砼框架结构的设计方法研究 .....               | 张建宇 王曙光 ( 128 )             |
| 大跨度拱形平面结构竖向 TMD 制振研究 .....             | 薛松涛 秦 岭 陈 谔 王远功 ( 133 )     |
| 场地土类别与埋置土深度对排架结构自振周期的影响 .....          | 刘 香 吴永博 文建国 ( 138 )         |
| 三峡大坝深孔弧形闸门流激振动水弹性模型试验研究 .....          | 张林让 张晓平 ( 143 )             |
| 黄河小浪底工程进水塔拟静力法稳定分析 .....               | 阎红梅 李效泉 张群波 ( 148 )         |
| 组合支座隔震结构及其动力反应分析 .....                 | 刘小煜 施卫星 徐 磊 ( 154 )         |
| 折板式网壳结构的减震控制 .....                     | 吴建华 章少珍 杨 晔 ( 159 )         |
| 广深线雅瑶大桥第 17 孔桥梁动力实验分析 .....            | 闫志刚 张 楠 王 丽 ( 164 )         |
| 混合结构的震害机理及抗震加固 .....                   | 吴世红 葛燕锋 崔 岩 ( 169 )         |
| 配有圆钢管的钢骨混凝土柱抗震性能试验研究 .....             | 金向前 陈忠范 ( 175 )             |
| Winkler 地基上功能梯度材料矩形厚板的自由振动 .....       | 边祖光 王亚明 陈伟球 ( 181 )         |
| 福州市区重要桥梁震害预测 .....                     | 王东生 翟 桐 冯启民 ( 186 )         |
| 砌体结构圈梁和构造柱地震作用计算研究 .....               | 陶 燕 罗小青 ( 190 )             |
| 风速谱的分析研究及风致响应的计算分析 .....               | 薛松涛 钱宇音 陈 谔 王远功 ( 194 )     |
| 地铁列车对临近建筑物振动影响的研究 .....                | 张 楠 夏 禾 ( 199 )             |
| 用静力弹塑性分析(push-over)方法评估建筑结构的抗震能力 ..... | 熊向阳 戚震华 ( 204 )             |
| 钻井液的流动对钻柱屈曲的影响 .....                   | 焦永树 范慕辉 孙正义 孙国华 ( 210 )     |
| 新型索杆预应力结构体系及其应用研究 .....                | 高博青 卢群鑫 陈维健 毛建江 ( 214 )     |
| 不同基础形式下的结构地震动输入研究 .....                | 陈清军 赵云峰 王汉东 ( 219 )         |
| 基于扩展卡尔曼滤波(EKF)的结构动态物理参数识别 .....        | 孙 清 张 陵 张爱社 伍晓红 ( 224 )     |
| 钢筋混凝土巨型框架多功能减振结构地震能量反应分析 .....         | 邹宏德 蓝宗建 田玉基 梁书亭 戴 航 ( 231 ) |
| 一种新型的灌浆加固材料 .....                      | 施养杭 ( 236 )                 |
| 某住宅楼基础隔震设计与分析 .....                    | 欧 谨 刘伟庆 ( 239 )             |
| 机场水泥砼道面动力响应研究 .....                    | 许金余 王肖戎 曹定国 陈 勇 侯庆平 ( 244 ) |
| 多层圆管抗冲击机理分析 .....                      | 刘传华 薛红萍 胡功笠 顾红军 ( 249 )     |
| 光纤陀螺仪在结构振动测量中应用的研究 .....               | 李正农 李校兵 吴红华 ( 254 )         |
| 与震中烈度相关的地震动功率谱参数 .....                 | 屈铁军 ( 258 )                 |
| 密肋壁板轻框结构计算模型及数值分析 .....                | 袁 泉 姚谦峰 陈 平 赵 冬 贾英杰 ( 262 ) |
| 结构附连的气粒两项流层的颗粒运动研究 .....               | 张东兴 ( 267 )                 |
| 脉动流对热交换器中管排的诱发振动分析 .....               | 韩 铁 ( 271 )                 |

|                                        |                             |
|----------------------------------------|-----------------------------|
| 用多层管材内衬提高抗爆炸结构比强度及比刚度 .....            | 陈海天 顾红军 陈太林 胡功笠 ( 276 )     |
| 碰撞振动系统的复杂分叉与混沌 .....                   | 罗冠炜 ( 281 )                 |
| 几幢高层钢结构建筑动力特性的实测与分析 .....              | 陈志鹏 王宗刚 ( 286 )             |
| 基于动柔度变化的结构损伤检测 .....                   | 师本强 ( 291 )                 |
| Pushover 分析中侧向力分布形式的影响 .....           | 种 迅 叶献国 吴本华 ( 298 )         |
| 高耸柔性建筑结构非平稳非线性动力方程统计线性化分析的等效参数计算 ..... | 张洵安 姜节胜 ( 303 )             |
| 桩-土-结构相互作用体系承台水平地震响应分析 .....           | 孙敦本 ( 308 )                 |
| 简支钢-混凝土组合梁腹板的稳定分析 .....                | 朱万明 曹本周 ( 313 )             |
| 弹性节点钢框架结构弹塑性地震响应分析 .....               | 陈维健 吴久算 姚建锋 ( 317 )         |
| 橡胶垫隔震砌体房屋的简化计算 .....                   | 龚志文 周发存 蒙祖布 陈福全 ( 322 )     |
| 应用拟动力算法对单层网壳水平地震反映进行研究 .....           | 孙晶莹 甘 明 ( 328 )             |
| 六边形管作为抗爆、吸能材料的优势分析 .....               | 顾红军 邵 宁 殷克功 陈太林 ( 333 )     |
| 弹体对半无限厚混凝土靶侵彻的数值分析 .....               | 张凤国 李恩征 ( 336 )             |
| 密肋壁板轻框结构恢复力模型探讨 .....                  | 贾英杰 姚谦峰 陈 平 赵 冬 王建强 ( 341 ) |
| 关于时程分析方法的几点建议 .....                    | 窦立军 雷 艳 宫 刚 ( 346 )         |
| 钢筋砼摩擦耗能支撑框架结构的地震反应分析 .....             | 李慧峰 ( 351 )                 |
| 平面装药爆炸作用下钢筋砼板的塑性动力响应分析 .....           | 冯 艳 ( 357 )                 |
| 奇异函数建立侧移刚度矩阵的新方法 .....                 | 徐 彬 梁启智 ( 363 )             |
| 钢筋砼摩擦耗能支撑框架结构的 P- $\Delta$ 反应分析 .....  | 李慧峰 ( 368 )                 |

## 六、设计、施工、优化和可靠度

|                               |                                 |
|-------------------------------|---------------------------------|
| 一种高效的结构可靠度近似分析方法 .....        | 李 刚 程耿东 ( 373 )                 |
| 天津保税区商务交流中心四季厅预应力索拱结构设计 ..... | 韩庆华 尹 越 谢礼立 刘锡良 ( 379 )         |
| 建筑工程中的分形和标度现象 .....           | 高福聚 刘锡良 ( 383 )                 |
| 基于腐蚀控制的在役结构优化维修决策 .....       | 滕海文 赵 卓 霍 达 ( 388 )             |
| 探讨低温对砼施工养护影响和措施 .....         | 田克琦 汪慎隆 ( 393 )                 |
| 单层网壳球节点刚性反应的研究 .....          | 王秀丽 徐 菁 方有珍 王文达 ( 398 )         |
| 收费站大棚网架结构设计模型研究 .....         | 卞汉兵 吴胜兴 倪 军 ( 403 )             |
| 澜沧江大桥挂篮的方案设计和研究 .....         | 宁晓骏 李 睿 叶燎原 唐 亮 ( 408 )         |
| 铁路线路选线设计及评价体系 .....           | 崔丽红 魏庆朝 ( 413 )                 |
| 多高层建筑的共同作用中的差异衰减 .....        | 武建勋 任胜谦 樊延霞 王晓刚 ( 417 )         |
| 基于遗传算法的结构破损参数检测 .....         | 段雪平 朱宏平 ( 422 )                 |
| 直立轻型浆砌块石挡土墙的设计与施工 .....       | 张新乐 任辉启 杨仁华 ( 427 )             |
| 耐久性分析的改进的 DFR 法计算程序设计 .....   | 陈 莉 王志智 ( 431 )                 |
| 地下厂房洞室群施工的时空随机模拟 .....        | 王民寿 熊敏峰 李艳玲 谢培忠 张文仲 陈 江 ( 436 ) |
| SP-55 系列模架的优点及其应用前景 .....     | 肖历文 万胜武 朱丽华 ( 441 )             |
| 某砖混结构拆墙换柱后基础处理 .....          | 张顺宝 沈 欣 ( 445 )                 |

|                                            |     |     |         |             |
|--------------------------------------------|-----|-----|---------|-------------|
| 燃气管道改装后的应力状态分析 .....                       | 邱棣华 | 高 峰 | 路方杰     | ( 448 )     |
| 钢筋混凝土柱在南京交通大厦中的应用 .....                    | 徐 明 | 苏丽莉 | 程文灏     | ( 452 )     |
| 轻型钢结构厂房的结构体系设计 .....                       | 史三元 | 李进军 |         | ( 457 )     |
| 超长钢筋混凝土结构无缝设计施工新技术的工程实践 .....              | 王 蕾 | 孙晓辉 |         | ( 462 )     |
| 短肢墙结构体系结构设计实践 .....                        | 董卫国 | 付义东 | 李从斌 王小平 | 蒋沧如 ( 466 ) |
| 预应力砼结构裂缝控制及设计方法 .....                      | 李忠诚 | 谭卫东 | 李唐宁     | ( 472 )     |
| 桥梁方案比选计算机模拟系统 .....                        | 崔丽红 | 刘 鑫 | 魏庆朝     | ( 477 )     |
| 指标权重的一种确定方法 .....                          | 王育德 | 高孟民 | 殷剑波 陈砚平 | 庞彦军 ( 482 ) |
| 弹性地基上三维框剪结构施工模拟分析 .....                    | 崔晓玲 | 杨菊生 |         | ( 487 )     |
| 移动荷载作用下轨道系的反应谱分析 .....                     | 谢伟平 | 徐 劲 | 左鹏飞     | ( 494 )     |
| 改造用房的内力分析及加固处理 .....                       | 孙洪刚 | 陕 亮 | 蒋沧如     | ( 499 )     |
| 现浇混凝土验收批强度评定结果的置信度 .....                   | 佟晓君 | 马 群 |         | ( 504 )     |
| “格构式”框架结构设计方法概述 .....                      | 万胜武 | 郭在林 | 朱丽华     | ( 508 )     |
| 浅谈外套式框架旧房加层改造中的应用 .....                    | 曾铁梅 | 袁海庆 |         | ( 512 )     |
| 钢管混凝土拱桥转体施工方法 .....                        | 孙 潮 | 陈宝春 | 陈友杰     | ( 515 )     |
| 索张拉平面预应力钢桁架优化分析与方案比较 .....                 | 王新堂 |     |         | ( 520 )     |
| 预测机场航空业务量的灰色模型方法 .....                     | 陈太林 | 张 伟 | 谢永亮 庄惠平 | 刘宏伟 ( 525 ) |
| 悬索屋盖结构中索受力优化的处理方法 .....                    | 罗小青 | 陶 燕 |         | ( 530 )     |
| 基于可靠度的在役工程结构可靠性评估 .....                    | 张俊芝 | 高延红 |         | ( 535 )     |
| 注浆与掏土结合纠偏法的应用 .....                        | 陈 红 | 李宪立 |         | ( 540 )     |
| 钢管混凝土设计方法比较 .....                          | 王来永 | 陈宝春 | 孙 潮     | ( 544 )     |
| 结构安全的模糊综合评价 .....                          | 王亚军 | 刘道永 | 滕桃居     | 郭跃明 ( 549 ) |
| 大吨位拼装式架桥机研究试验 .....                        | 李云峰 | 王炳灵 |         | ( 555 )     |
| 一个非标准的遗传算法在高耸结构动力逆设计中的应用 .....             | 施志深 | 李卓球 |         | ( 559 )     |
| 小浪底工程进水塔设计与施工 .....                        | 阎红梅 | 李效泉 | 张群波     | ( 565 )     |
| 混凝土轴心受压构件经济截面的选定 .....                     | 谢果清 |     |         | ( 569 )     |
| 建筑物抗拔桩设计的若干问题讨论 .....                      | 吴建华 | 徐晓波 |         | ( 575 )     |
| 基础底板大体积超长钢筋混凝土结构无缝设计与施工 .....              | 葛燕锋 | 吴世红 |         | ( 580 )     |
| 建筑物基础合理设计和施工 .....                         | 郑襄勤 | 刘忠昌 | 王明恕     | ( 584 )     |
| 桥梁工程大体积砼冬季施工技术研究 .....                     | 赵方刚 | 朱增奇 | 李立增     | ( 589 )     |
| 工程结构抗震设防水准之我见 .....                        | 李鸿晶 | 王静萍 |         | ( 593 )     |
| 洪涝灾害损伤结构可靠度分析 .....                        | 杨春侠 | 杨伟军 | 卜乐奇     | ( 598 )     |
| HBR400MPa 新III级钢筋在深圳天健世纪花园结构设计中的推广应用 ..... | 江 建 | 林 江 | 于海学     | ( 603 )     |
| 后张有粘结预应力梁施工技术 .....                        | 杨红霞 | 李凤霞 | 蒋沧如     | ( 607 )     |
| 轻钢结构在多层建筑中的应用及发展 .....                     | 管克俭 | 王新武 | 彭少民     | ( 612 )     |
| 包钢 CSP 工程钢包回转台基础施工方案 .....                 | 王 坤 | 李智超 | 张文巧     | ( 617 )     |
| 改善表层混凝土耐久性的措施 .....                        | 戎 贤 | 陈 钢 |         | ( 622 )     |
| 援尼泊尔肿瘤医院监理实践 .....                         | 智 菲 | 李美华 |         | ( 627 )     |
| 苏州恒和广场文化娱乐中心局部大柱网结构的设计 .....               | 肖志斌 |     |         | ( 631 )     |
| 大型铁路箱梁横移技术及结果分析 .....                      | 吕宝华 | 惠向兵 | 王文华 高文宏 | 华 渊 ( 636 ) |
| 现浇钢筋砼楼板裂缝的处理和检验分析 .....                    | 申向东 | 姬宝霖 | 李红云     | ( 641 )     |

|                                  |                                 |
|----------------------------------|---------------------------------|
| 筏板基础大体积混凝土施工技术 .....             | 李凤霞 ( 646 )                     |
| 吊挂结构悬索吊点位置的优化 .....              | 齐朝辉 徐新生 曲 牧 ( 651 )             |
| 基于遗传算法的地下洞室设计与施工反演分析优化 .....     | 张志刚 李惠强 ( 656 )                 |
| 焊接钢吊车梁的疲劳损伤评估 .....              | 邵立平 ( 661 )                     |
| 某烧结厂 1#运输线通廊可靠性分析 .....          | 马建军 柳长江 刘海生 任锡跃 ( 665 )         |
| 已破损大型屋面板的试验研究 .....              | 刘海生 李 斌 刘建文 于无私 雷 军 顾 敏 ( 669 ) |
| 钢筋混凝土结构工业厂房耐久性破坏及对策 .....        | 赵根田 解建喜 杭美艳 ( 674 )             |
| 柱下独立基础连系梁的设计计算探讨 .....           | 毕 征 许金余 马 波 张 军 ( 679 )         |
| 重庆黄花园大桥三向预应力施工技术 .....           | 林 胜 ( 684 )                     |
| 工厂化钢结构房屋系统集成问题的研究 .....          | 谢芝馨 郑艺群 ( 689 )                 |
| 一种提高桩承载力的方法 .....                | 吴开成 ( 693 )                     |
| 基于实数编码的改进遗传算法在结构可靠度中的应用研究 .....  | 楼 杨 刘 宁 武清玺 ( 697 )             |
| 降低结构工程造价的途径及技术措施 .....           | 周献祥 宋明军 ( 702 )                 |
| 柱下交梁基础宽度的确定 .....                | 麻建锁 李 洁 ( 707 )                 |
| 石灰挤密桩在加固旧建筑物地基中的应用 .....         | 张其顶 许金余 赵德辉 朱宗金 吴 侃 ( 711 )     |
| 建设工程事故风险路径、风险源分析与风险概率估算 .....    | 李惠强 涂晓敏 ( 716 )                 |
| 深圳文化中心钢结构施工方案及验算 .....           | 潘 湧 王 宏 ( 720 )                 |
| 某网架局部斜腹杆变形的鉴定与处理 .....           | 李安起 贾留东 张 鑫 ( 725 )             |
| 导管架海洋平台可靠性模糊优化设计 .....           | 徐发淙 翟钢军 封 盛 ( 729 )             |
| 曲线斜腿连续刚构与预应力系杆拱组合桥施工阶段仿真分析 ..... | 谭厚斌 ( 734 )                     |
| 厚板焊接 H 型钢生产中的变形控制 .....          | 张爱国 贾海真 ( 739 )                 |
| 40 米跨度门顶梁部分预应力混凝土设计与施工 .....     | 燕国强 ( 743 )                     |
| 建筑工程施工模糊工期控制方法 .....             | 陈砚平 高孟民 王育德 ( 749 )             |
| 某综合楼工程隔震设计 .....                 | 嵇蔚冰 李晨钟 唐海毅 戴凤萍 ( 754 )         |
| 轻轨车站深基础施工技术 .....                | 张国峰 黄天寅 沈三新 张沪生 ( 759 )         |
| 某建筑补偿性基础设计 .....                 | 彭定新 ( 765 )                     |
| 导管架海洋平台模糊可靠度优化分配 .....           | 翟钢军 李玉成 康海贵 徐发淙 ( 769 )         |
| 结构控制与智能材料 .....                  | 刘华波 王红因 ( 775 )                 |
| 供水系统原形贮水池的优化设计 .....             | 周楚荣 贾乃文 ( 780 )                 |
| 专家仿真系统及其在大体积砼浇筑系统优化中的应用 .....    | 白润山 ( 784 )                     |
| 结构动力响应的可视化分析 .....               | 田洪臣 黄胜伟 ( 789 )                 |
| 谈异形柱、短肢剪力墙在高层住宅中的应用 .....        | 李文盛 卢哲安 ( 793 )                 |
| 天津市震害预测的特点与方法 .....              | 崔玉红 邱 虎 王建山 聂永安 田 清 ( 799 )     |
| 粘弹性地基上圆形薄板的振动 .....              | 张系斌 ( 805 )                     |
| 钢管混凝土拱桥施工监测与控制技术 .....           | 向木生 杜国东 ( 809 )                 |
| 某条形基础砖混结构六层住宅楼纠倾的成功实践 .....      | 宋 彧 安丽丽 曹 凯 祁怀通 孔令泉 李学强 ( 815 ) |
| 梁柱构件设计系统 ( BCDS ) 的设计研究 .....    | 卢哲安 李顺国 ( 820 )                 |
| 深基坑加固中钢管锚杆的设计和施工 .....           | 张 勇 盛宏光 ( 825 )                 |
| 高喷止水帷幕在深基坑支护中的应用 .....           | 程吉泉 李乐峰 刘玉宝 卓 越 ( 831 )         |
| 影响结构阻尼的部分因素分析 .....              | 杨志勇 李秋胜 魏文晖 ( 834 )             |
| 基于形状记忆合金的桥梁隔震 .....              | 陈海泉 李忠献 ( 838 )                 |

# 系泊浮体水弹性分析 一阶主坐标的频率特征

陈徐均<sup>1</sup>, 吴有生<sup>2</sup>, 崔维成<sup>1</sup>, 孙芦忠<sup>3</sup>

(1. 上海交通大学, 上海 200030; 2. 中国船舶科学研究中心, 无锡 214082; 3. 解放军理工大学, 南京 210007)

**摘 要:** 介绍了系泊浮体的三维水弹性力学分析方法, 给出了作用于弹性浮体的锚链系统恢复力刚度系数, 建立了系泊浮体的频率三维水弹性运动方程, 计算了系泊浮体水弹性运动的一阶主坐标, 重点讨论了主坐标的频率特征。表明系泊浮体不但存在高频弹性谐振, 而且存在低频刚体谐振及耦合谐振现象。

**关键词:** 系泊浮体; 水弹性力学; 主坐标; 频率特征

## 1 引言

海上浮体的耐波性理论和水弹性理论分别以刚性浮体和弹性浮体为研究对象, 系泊浮体的耐波性理论已发展得较为成熟, 其低频谐振特征也被人们所公认, 对于弹性航行浮体的高频谐振特征也已有较多的研究<sup>[1][2][3]</sup>, 本文将三维水弹性力学分析方法应用于系泊浮体的分析, 并对水弹性分析一阶主坐标的频率特征作较为详细的讨论。

## 2 三维线性水弹性理论概述

### 2.1 离散系统的主坐标运动方程

在三维线性水弹性理论中浮体的前六阶振动模态分别对应于线性耐波性理论中的纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇和艏摇六个刚体运动模态, 其后的弹性变形模态以其相应的固有频率值由低至高的顺序排列。利用线性系统的模态叠加法得出结构离散系统的主坐标运动方程为:

$$[a]\{\ddot{p}\} + [b]\{\dot{p}\} + [c]\{p\} = \{Z\} + \{\Delta\} + \{Q\} \quad (1)$$

式中  $\{p\}$  为广义主坐标列阵;  $[a]$ 、 $[b]$ 、 $[c]$  分别为结构广义质量矩阵、广义阻尼矩阵和广义刚度矩阵;  $\{Z\}$ 、 $\{\Delta\}$ 、 $\{Q\}$  分别为广义表面分布力, 广义集中力和广义体积力列阵。

作用于浮体的广义表面分布力的第  $r$  阶分量可表示为:

$$Z_r = - \iint_S \bar{n} \cdot \bar{u}_r p dS \quad (2)$$

式中  $\bar{n}$  为浮体湿表面单元上的法向量;  $\bar{u}_r$  为浮体干结构的第  $r$  阶模态振型;  $p$  为平均湿表面  $S$  上的压力分布, 对于系泊浮体可表示为:

$$p = -\rho(i\omega\Phi + gz' + gw) \quad (3)$$

式中  $\rho$  为流体密度;  $z'$  为浮体表面任一点在随体坐标系中  $z'$  方向的坐标值;  $w$  为该点在随体坐标系中  $z'$  方向的位移;  $\omega$  为波浪频率;  $\Phi$  为流场中总的速度势。(3) 代入 (2)

式可求得广义分布力为:

$$Z_r = (F_r + E_r + R_r)e^{i\omega t} + \bar{R}_r \quad (4)$$

式中  $F_r$ ,  $E_r$ ,  $R_r$ ,  $\bar{R}_r$  分别为广义波浪激励力、广义辐射力、广义静水恢复力和广义静态力, 对于系泊浮体可分别表示为:

$$\begin{cases} F_r = \rho \iint_S \bar{n} \cdot \bar{u}_r (i\omega)(\phi_I + \phi_D) dS \\ E_r = \sum_{k=1}^m p_k \rho \iint_S \bar{n} \cdot \bar{u}_r (i\omega)\phi_k dS \\ R_r = \sum_{k=1}^m p_k \rho \iint_S \bar{n} \cdot \bar{u}_r (gw_k) dS \\ \bar{R}_r = \rho \iint_S \bar{n} \cdot \bar{u}_r (gz') dS \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\phi_I$ ,  $\phi_D$  和  $\phi_k$  分别为入射波速度势、反射波速度势和辐射波速度势, 可用三维法<sup>[4]</sup>求解;  $m$  为模态总数。

对于系泊浮体, (1) 式中广义集中力表现为锚链系泊力, 其第  $r$  接分量可表示为<sup>[5]</sup>:

$$\Delta_r = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^m C m_{rk}^j p_k(t) \quad (6)$$

式中  $J$  为锚链根数;  $C m_{rk}^j$  为第  $j$  根锚链的恢复力矩阵中的元素, 可表示为:

$$C m_{rk}^j = [\bar{u}_{rj}^0]^T \mathbf{H} \bar{u}_{kj}^0 \quad (7)$$

式中  $\bar{u}_{rj}^0$  为第  $j$  根锚链在浮体上的系留点的位移振型; 转换矩阵  $\mathbf{H}$  可表示为:

$$\mathbf{H} = \frac{E's}{L} \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha \cos^2 \beta & \cos^2 \alpha \cos \beta \sin \beta & -\cos \alpha \sin \alpha \cos \beta \\ \cos^2 \alpha \cos \beta \sin \beta & \cos^2 \alpha \sin^2 \beta & -\cos \alpha \sin \alpha \sin \beta \\ -\cos \alpha \sin \alpha \cos \beta & -\cos \alpha \sin \alpha \sin \beta & \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中  $\alpha$ ,  $\beta$  分别为锚链在浮体上系留点处锚链的切线方向与水平面的夹角和锚链的水平投影与平衡坐标系  $x$  轴的夹角;  $E'$ ,  $s$  和  $L$  分别为锚链的弹性模量、截面积和长度。

对于系泊浮体, (1) 式中的浮体结构所承受的体积力即为浮体所受的重力, 所以广

义体积力的第  $r$  阶分量可表示为:

$$Q_r = - \iiint_{\Omega} \rho_b g w_r d\Omega \quad (9)$$

式中  $\Omega$  为材料总体积;  $\rho_b$  为浮体结构的材料密度。

## 2.2 频域线性水弹性运动方程

将 (5)、(4)、(2)、(6) 和 (9) 式代入 (1) 式, 可得系泊浮体的频域线性水弹性运动方程为:

$$[a + A]\{\ddot{p}\} + [b + B]\{\dot{p}\} + [c + C + Cm]\{p\} = \{F\} + \{Q\} + \{\bar{R}\} \quad (10)$$

式中  $[Cm]$  为锚链系统刚度矩阵, 矩阵中的元素可由 (7) 式对锚链根数求和得到;  $\{F\}$  和  $\{\bar{R}\}$  分别为广义波浪激励力列阵和广义静态力列阵, 它们的第  $r$  阶分量分别如 (5) 式中第 1 和第 4 式所示;  $[A]$ 、 $[B]$  和  $[C]$  分别为广义附加质量矩阵、附加阻尼矩阵和静水恢复力矩阵。当仅考察浮体在规则波波浪激励力下的运动和结构变形响应时, (10) 式的频域表现形式为:

$$[-\omega^2[a + A] + i\omega[b + B] + [c + C + Cm]]\{p\} = \{F\} \quad (11)$$

式中  $[A]$ 、 $[B]$  和  $[C]$  的元素可由 (5) 式的第 2 和第 3 式分别表示为:

$$\begin{cases} A_{rk} = \frac{\rho}{\omega^2} \operatorname{Re} \iint_S \bar{n} \cdot \bar{u}_r(i\omega) \phi_k dS \\ B_{rk} = -\frac{\rho}{\omega} \operatorname{Im} \iint_S \bar{n} \cdot \bar{u}_r(i\omega) \phi_k dS \\ C_{rk} = -\rho \iint_S \bar{n} \cdot \bar{u}_r(gw_k) dS \end{cases} \quad (12)$$

## 3 算例分析及一阶主坐标的频率响应

### 3.1 算例模型

以一艘排水量近 10000 吨的箱型驳船 (或系泊船舶、浮式平台) 作为算例。该船可作为一个均匀浮式箱梁进行分析计算。假定该均匀浮式箱梁的主尺度为:  $L=120\text{m}$ ;  $H=8\text{m}$ ;  $B=14\text{m}$ ; 壁厚  $t=0.01\text{m}$ ;  $E=2.07 \times 10^5 \text{Mpa}$ ; 吃水  $T=5.749\text{m}$ 。利用梁的弯曲及扭转振动理论可求得梁的前 10 阶弹性振动的固有频率及相应的广义质量如表 1。

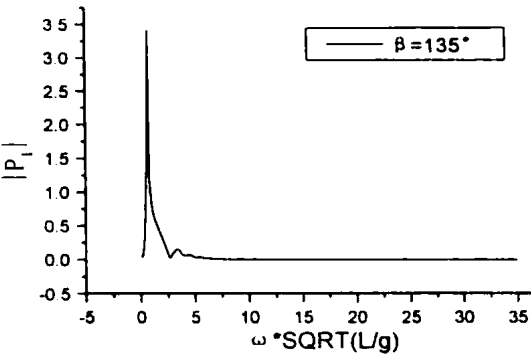
### 3.2 锚泊浮体水弹性振动的一阶主坐标

在求得了 (11) 式中各系数矩阵和广义波浪激励力列阵后可求得锚泊浮体水弹性运动

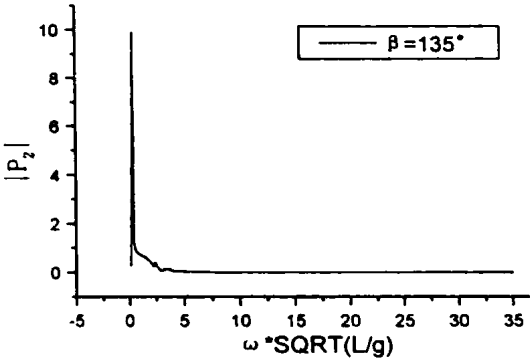
各运动模态的广义一阶主坐标，图 1 给出了波向角  $\beta=135^\circ$  的前 10 个运动模态的计算结果。

表 1 前 10 阶弹性振型及相应的广义质量

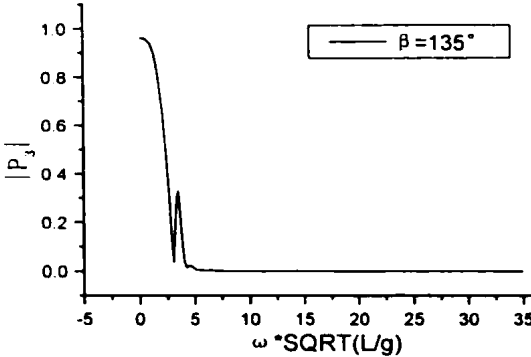
| 序号 | 振动类型    | 固有频率 (red/s) | 广义质量             | 模态特性  |
|----|---------|--------------|------------------|-------|
| 7  | 二节点垂直弯曲 | 5.762230     | 2399992.075961   | 左右对称  |
| 8  | 二节点水平弯曲 | 8.794543     | 2399992.075961   | 左右反对称 |
| 9  | 三节点垂直弯曲 | 15.883809    | 2399988.010947   | 左右对称  |
| 10 | 一节点扭转   | 17.325088    | 185405838.355888 | 左右反对称 |
| 11 | 三节点水平弯曲 | 24.242497    | 2399988.010947   | 左右反对称 |
| 12 | 一节点轴振   | 28.505832    | 4799987.003524   | 左右对称  |
| 13 | 四节点垂直弯曲 | 31.138616    | 2399982.130573   | 左右对称  |
| 14 | 二节点扭转   | 34.650176    | 185405618.594298 | 左右反对称 |
| 15 | 四节点水平弯曲 | 47.524987    | 2399982.130573   | 左右反对称 |
| 16 | 五节点垂直弯曲 | 51.473713    | 2399974.341913   | 左右对称  |



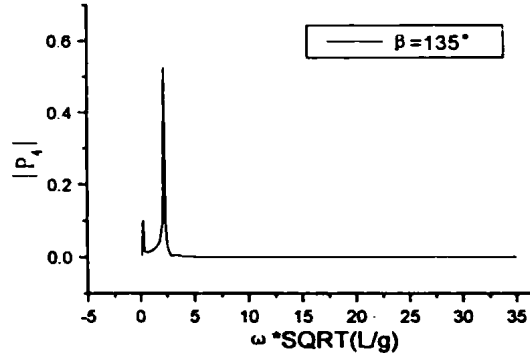
(a)



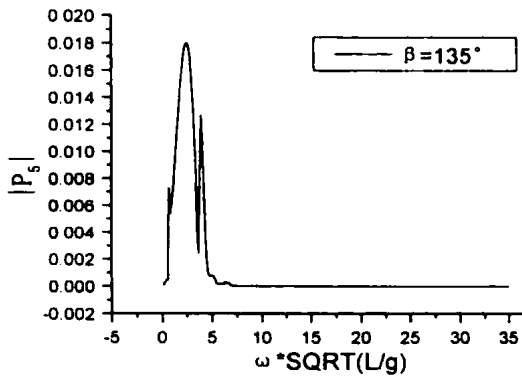
(b)



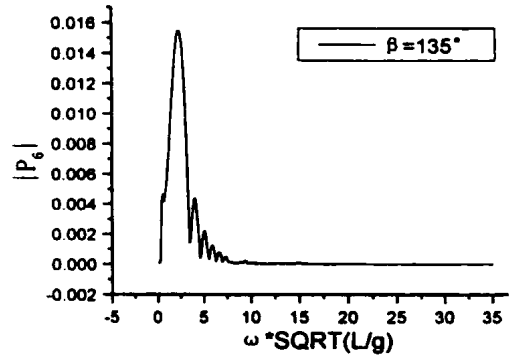
(c)



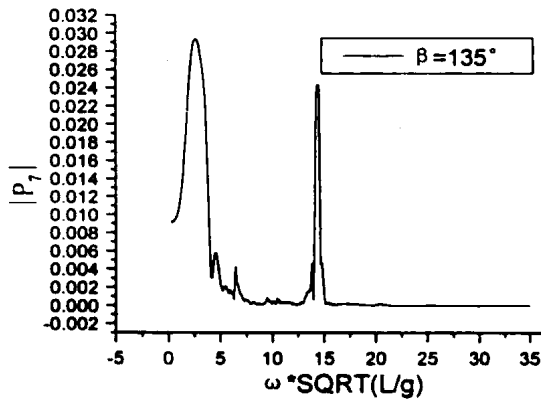
(d)



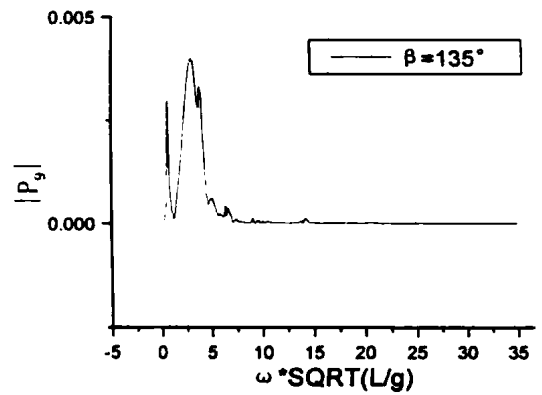
(e)



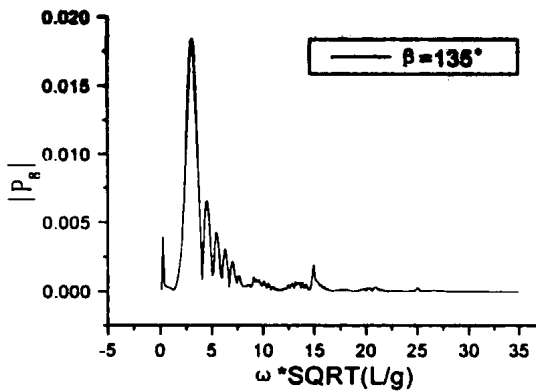
(f)



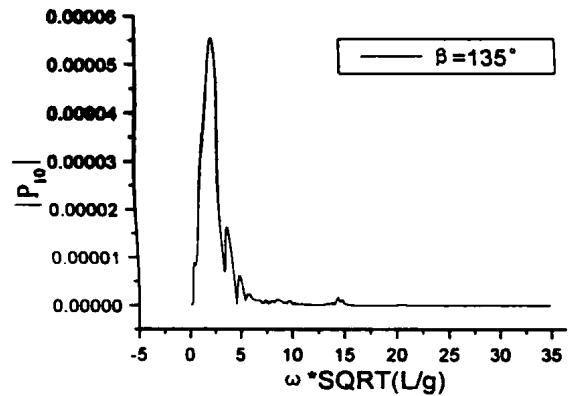
(g)



(h)



(i)



(j)

图1 前10个模态的一阶主坐标

图1中(a)~(f)为浮体的六刚体运动模态, (g)~(j)为浮体的前四阶弹性振动模态, 分别对应为二节点垂弯、二节点水平弯曲、三节点垂弯和一节点扭转模态。

### 3.2 一阶主坐标频率特征的讨论

根据图 1 中各曲线, 现对波向角  $\beta = 135^\circ$  的水弹性振动的一阶主坐标的频率特征作如下讨论:

a. 在频率趋于无穷大时, 所有一阶主坐标均趋于零。垂荡一阶主坐标在频率趋于零时趋于 1。

b. 一阶横荡主坐标大于一阶纵荡主坐标, 一阶横摇主坐标大于一阶纵摇主坐标, 二节点垂弯模态大于三节点垂弯模态的一阶主坐标 (根据未给出的曲线的进一步分析, 同类振动的低频振动的一阶主坐标大于高频振动的一阶主坐标)。

c. 所有曲线都出现了峰值, 经分析, 发现它们都具有一定的物理意义, 是客观物理现象的反映。他们可分为两类, 一是该运动模态本身的谐振, 另一类就是两种运动模态的耦合。具体分析如下:

对于本文所讨论的锚泊浮体系统的每一运动模态, 当其作给定频率  $\omega$  的运动时都对应有其本身的湿谐振频率  $\omega_{wr}$ , 该频率可由如下特征方程求解:

$$-\omega_{wr}^2 [a_{rr} + A_{rr}(\omega)] + (c_{rr} + C_{rr} + Cm_{rr}) = 0 \quad (13)$$

式中  $A_{rr}(\omega)$  为浮体以频率  $\omega$  作振荡运动的附加质量矩阵对角线元素;  $a_{rr}$ ,  $c_{rr}$ ,  $C_{rr}$  和  $Cm_{rr}$  分别为结构质量矩阵、结构刚度矩阵、静水恢复力矩阵和锚链刚度矩阵对角线的元素。

利用 (13) 式对图 1 各图中的峰值进行所属运动频率的湿谐振频率分析, 分析结果如表 2 所示, 表中同时给出了对各峰值物理意义的解释。由于只计算到小于等于  $10\text{rad/s}$  的波浪频率, 故下表中湿谐振频率大于  $10\text{rad/s}$  的弹性模态未出现该模态本身的谐振现象, 但从表中数据可以预见, 在波频等于  $11.7$  和  $15.9\text{rad/s}$  左右将分别出现三节点垂弯、一阶点扭转谐振现象。

由表 2 可见, 当波频接近于各模态的湿谐振频率时, 各模态的主坐标响应曲线均出现响应峰值, 纵荡和横荡运动的湿谐振频率是系泊浮体的特性, 这两个运动模态的谐振及其由于与这两个运动模态的耦合引起的谐振现象是一般自由浮体的水弹性分析<sup>[1]</sup>所不具备的。而弹性模态的谐振峰值则由于系泊系统的存在比自由浮体而稍有降低。

## 4 结束语

主坐标的求解是浮体水弹性分析的关键步骤, 在求解了浮体在波浪中运动的各阶主坐标后, 可进一步求解浮体的动态位移、弯矩、剪力和应力等。主坐标响应峰值的存在必然对浮体的动态位移、弯矩等有较大的影响。本文对系泊浮体水弹性主坐标响应的频率特征分析较好的反映了系泊系统的低频谐振特征。说明在对结构刚度较小的锚泊弹性浮体 (如 VLFS) 进行波浪中的动力特性分析时, 不但要考虑高频波浪 (主要体现为和频) 激起弹性谐振, 而且要考虑低频波浪 (主要体现为差频) 激起的低频谐振。

表 2 湿谐振频率及对峰值的解释

| 模态     | 峰值处波频                                    |                            | 广义质量<br>$a_{rr}$ | 附加质量<br>$A_{rr}$ | 总刚度<br>$c_{rr} + C_{rr} + Cm_{rr}$ | 湿频<br>$\omega_{wr}$<br>$\left(\frac{rad}{s}\right)$ | 物理意义的解释    |
|--------|------------------------------------------|----------------------------|------------------|------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------|
|        | $\omega$<br>$\left(\frac{rad}{s}\right)$ | $\omega\sqrt{\frac{L}{g}}$ |                  |                  |                                    |                                                     |            |
| $r=1$  | 0.20                                     | 0.699                      | 9.60E+06         | 8.12E+05         | 3.99E+05                           | 0.196                                               | 纵荡谐振       |
| $r=2$  | 0.08                                     | 0.280                      | 9.60E+06         | 9.24E+06         | 1.33E+05                           | 0.084                                               | 横荡谐振       |
|        | 0.68                                     | 2.378                      |                  | 1.30E+07         |                                    | 0.077                                               | 与横摇耦合引起    |
| $r=3$  | 0.96                                     | 3.357                      | 9.60E+06         | 9.44E+06         | 1.76E+07                           | 0.961                                               | 垂荡谐振       |
| $r=4$  | 0.08                                     | 0.280                      | 3.87E+08         | 6.86E+07         | 1.90E+08                           | 0.646                                               | 与横荡耦合引起    |
|        | 0.64                                     | 2.238                      |                  | 6.63E+07         |                                    | 0.647                                               | 横摇谐振       |
| $r=5$  | 0.20                                     | 0.669                      | 8.12E+09         | 1.80E+10         | 2.26E+10                           | 0.930                                               | 与纵荡耦合引起    |
|        | 1.12                                     | 3.917                      |                  | 1.07E+10         |                                    | 1.096                                               | 纵摇谐振       |
| $r=6$  | 0.16                                     | 0.560                      | 8.27E+09         | 9.72E+09         | 3.11E+08                           | 0.132                                               | 艏摇谐振       |
| $r=7$  | 4.16                                     | 14.55                      | 2.37E+06         | 2.52E+06         | 8.40E+07                           | 4.142                                               | 二节点垂弯谐振    |
| $r=8$  | 0.08                                     | 0.280                      | 2.37E+06         | 1.81E+06         | 1.84E+08                           | 6.622                                               | 与横荡耦合引起    |
|        | 0.64                                     | 2.238                      |                  | 2.49E+06         |                                    | 6.144                                               | 与横摇耦合引起    |
|        | 7.68                                     | 26.86                      |                  | 7.34E+05         |                                    | 7.687                                               | 二节点水平弯曲谐振  |
| $r=9$  | 0.20                                     | 0.699                      | 2.33E+06         | 2.53E+06         | 5.93E+08                           | 11.05                                               | 与纵荡耦合引起    |
|        | 1.12                                     | 3.917                      |                  | 1.99E+06         |                                    | 11.71                                               | 与纵摇耦合引起    |
| $r=10$ | 0.08                                     | 0.280                      | 1.85E+08         | 3.52E+07         | 5.55E+10                           | 15.89                                               | 与横荡耦合引起    |
|        | 1.16                                     | 4.057                      |                  | 3.48E+07         |                                    | 15.91                                               | 与纵摇耦合引起    |
|        | 4.12                                     | 14.41                      |                  | 3.50E+07         |                                    | 15.90                                               | 与二节点垂弯耦合引起 |

## 参考文献

- [1] Wu Y.S.. Hydroelasticity of floating bodies[D]. U.K.: Brunel Univ., 1984
- [2] 杜双兴. 完善的三维航行船体线性水弹性力学频域分析方法[D]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 1996
- [3] 王大云. 三维船舶水弹性力学的时域分析方法[D]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 1996
- [4] 刘应中, 缪国平. 船舶在波浪中的运动理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987
- [5] 陈徐均. 浮体二阶非线性水弹性力学分析方法[D]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2001

# 快增殖反应堆主容器结构 试验模型的动力分析

钱江 鲁亮 陈原 吕西林 翁智远

(同济大学结构工程与防灾研究所, 上海200092)

**摘 要:** 反应堆主容器是整个核电站的核心设备。本文对一座式快增殖反应堆主容器结构的试验模型, 采用有限元法进行了整体分析, 给出了结构的自振频率和模态特征, 并用谱分析法计算了结构在地震作用下的动力响应。与模型试验测量结果比较, 两者符合良好, 表明本文建立的计算模型是合理的。

**关键词:** 快堆主容器, 有限元, 动力分析

## 1 前言

快增殖反应堆(简称快堆)是一种核燃料利用率较高的先进堆型, 与轻水堆相比, 快堆的运行工况处于低压高温状态, 为了减小结构的温度应力, 一般都设计成薄壁结构。就结构形式而言, 快堆可分为环流式和池式两种结构类型, 其抗震设计的主要区别在于是否将冷却泵和热交换系统纳入反应堆容器中。此外, 根据主容器支撑方式的不同, 还可区分为吊式及座式两种安装方式。目前, 欧美、日本等工业发达国家实用或研究用快堆以吊式结构为主[1-6]。图1为一顶部支承吊式结构的池式快堆结构示意图, 堆内设备等荷重, 大部分通过其顶盖板直接传递至外围建筑结构, 因而与主容器本身较少耦联。但在地震作用下, 基底地面运动则是先传导至主容器上沿然后再影响堆内设备。对吊式快堆已有许多研究成果见诸于历届国际反应堆结构会议[1-6]。本文研究的是如图2所示的座式快堆。座式快堆与吊式快堆的区别不仅仅在支撑方式上, 更主要的还在于其堆内设备一般是通过一个整体刚度比较大的堆内支承结构作用于主容器底部附近的支承环上, 通常堆内设备等的荷重约占堆本堆结构总重的1/2, 因此, 堆内设备与主容器之间的相互耦联影响较大。另一方面, 对地震作用, 由于座式结构的支承环位置较低, 基底地面运动的传递途径较短, 结构放大效应自然要比吊式结构小一些, 这是该结构形式的有利之处[7、8]。对池式结构, 液体与结构之间的动力相互作用也是一个突出的问题, 有关座式快堆流固耦合分析方面的研究可参见文献[7、9]。

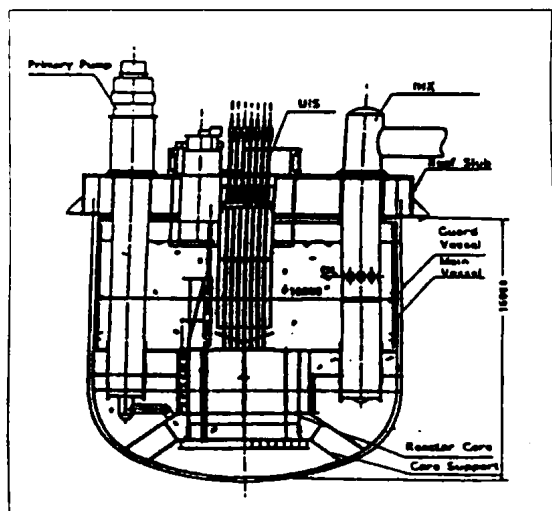


图1. 顶部支承的吊式快堆结构示意图

## 2 结构概述及有限元计算模型

在综合考虑了实验设备的性能参数等因素后, 决定了模型的缩尺比例。并根据堆内构件的相对重要性确定了主容器、支承裙座、堆内支承结构、主要堆内设备如一回路钠泵、中间热交换器 (IHx) 的主体结构等, 按刚度相似设计, 而对保护容器、旋塞、堆芯部分、堆内屏蔽、径向热屏蔽等仅满足质量分布相似, 模型结构的主要尺寸见图2a。

数值分析采用通用有限元程序 ANSYS。先对构成主容器结构的各构件、子结构、子系统进行了局部精细分析, 根据局部精细分析的结果再确定整体计算建模方案[8]。对构成主容器的底封头、筒体、锥顶盖部分均用壳体单元离散, 并适当考虑了锥顶盖上安装钠泵及中间热交换器的开孔。支承裙座也采用壳体单元离散。钠泵、中间热交换器及模拟旋塞顶外接管道的质量较小, 且高径比较大, 故采用了梁单元进行离散。由于堆芯部分、堆内屏蔽、径向热屏蔽等构件都是按质量分布相似而设计成具有等效质量的厚壁圆筒, 刚度相当大, 计算中使用了较稀疏网格的三维实体单元进行离散。旋塞也是一个刚度相当大的构件, 因而也是用三维实体单元进行离散。由于旋塞下的吊篮与堆芯构件的相对位移是涉及设备运行功能的一个重要参数, 故对吊篮采用了较精细的壳体单元进行离散。位于下支承环处用以模拟保护容器的环肋采用梁单元离散。堆内支承结构是一个比较复杂的箱—梁结构, 子系统局部精细分析结果表明, 该构件水平方向具有足够大的整体刚度, 而竖直方向由于承重较大会产生一定的整体挠曲, 因此整体建模时将其等效为一支承于一圆锥壳上的环板, 用板壳单元进行离散; 同时为了模拟封闭于该构件各腔室内的液体冷却剂及热屏蔽等的质量分布, 对该构件所围体积用三维实体单元进行分割以便将各部分质量较合理地分配至相关节点。有限元离散后的计算模型如图2b, 包括壳体单元3332个, 三维实体单元3208个, 梁单元498个, 共计8333个节点。

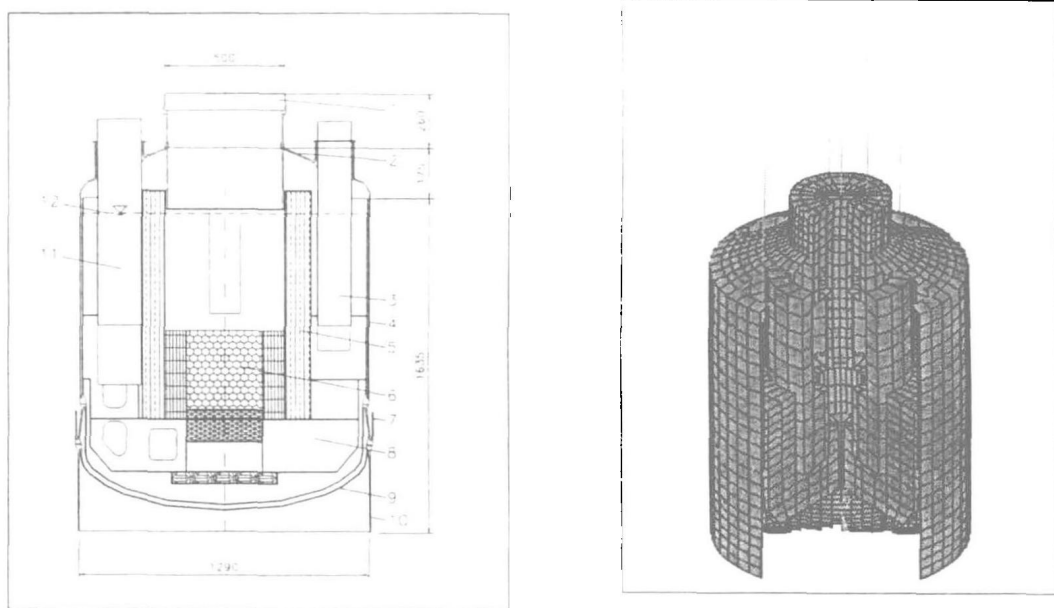


图2. 座式快堆 (a) 结构示意图, (b) 有限元计算模型图

1. 旋塞; 2. 锥顶盖; 3. 中间热交换器 (IHx); 4. 主容器筒体; 5. 堆内屏蔽结构; 6. 堆芯;  
7. 模拟保护容器; 8. 堆内支承结构; 9. 底封头; 10. 支承裙座; 11. 钠泵; 12. 自由液面