

The top portion of the cover features a detailed, high-contrast image of a microchip or integrated circuit. The intricate patterns of the chip are rendered in shades of grey and white against a dark background, with some components appearing to glow.

大连海事大学

# 研究生科技创新论文集

(第3辑)

主编 孙玉清 陆梅 韩立东

大连海事大学出版社

# 大连海事大学 研究生科技创新论文集

(第3辑)

主编 孙玉清 陆梅 韩立东



大连海事大学出版社

©孙玉清等 2006

**图书在版编目(CIP)数据**

大连海事大学研究生科技创新论文集(第3辑)/孙玉清,陆梅,韩立东主编. —大连:大连海事大学出版社, 2006. 4

ISBN 7-5632-1948-X

I. 大... II. ①孙... ②陆... ③韩... III. ①社会科学—中国—文集 ②自然科学—中国—文集 IV. Z427

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第015279号

**大连海事大学出版社出版**

地址: 大连市凌海路1号 邮编: 116026 电话: 0411-84728394 传真: 0411-84727996

<http://www.dmupress.com>

E-mail: cbs@dmupress.com

大连市东晟印刷有限责任公司印装

大连海事大学出版社发行

2006年5月第1版

2006年5月第1次印刷

幅面尺寸: 210 mm×297 mm

印张: 24

字数: 797千字

印数: 0001~250册

责任编辑: 杨子江

版式设计: 天水

封面设计: 王艳

责任校对: 海钧

定价: 70.00元

# 序

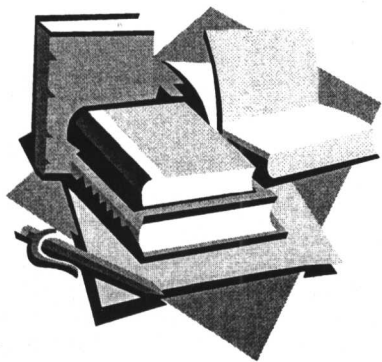
“创新是一个民族的灵魂，是国家兴旺发达的不竭动力。”当今的时代将是人类更多地依靠科学技术创新的可持续发展的时代，将是一个科技创新带动经济社会快速发展的时代，也将是一个依靠科技创新赢得竞争优势的时代。当我们远眺科学技术快速发展的前景时，看到《大连海事大学研究生科技创新论文集》的出版，我感到由衷的欣慰，读过文章后不禁信心倍增。

教育，特别是大学教育，是民族复兴、国家强盛的重要依托。没有大学，许多文化遗产将黯然无光；没有大学，许多先进思想将灰飞烟灭；没有大学，许多优秀人才将无从成长。大学校园是培养高素质人才、创新科学技术的场所，是为社会发展注入生机和活力的发动机。为了发展国家的航运事业，为国家培养更多的航运人才，我们将学生的优秀作品集结成册，公开出版。这更加体现了我校研究生科技创新活动由自发到自觉的过程，由感性认识到理性认识的升华。值得一提的是，本论文集的作品内容丰富、资料充实、结构严谨。多次翻看文集，使我感到责任重大又有荣誉。

于是，我想借此论文集出版之际对同学们提出三点希望：一、认清社会责任，将个人融入社会进步的大潮流。大学生要肩负时代重任，献身于民族振兴与国家昌盛的伟大事业，做推动社会进步的弄潮儿，这样才不愧于社会对我们同学的殷切希望。二、了解科技发展动向，将个人融入科技发展的大潮流。我们不能闭门造车，世界范围内的先进科学技术都是我们学习的对象，将视野定位在全世界，才不会造成狭隘的沾沾自喜或悲哀的妄自菲薄。三、挖掘自身创新能力，将个人融入科技创新、挑战未来的大潮流。创新是一个民族的灵魂，被称为“人生之主，人生之春，人生之华”的年轻人，是创新的生力军和主导力量。培养创新思维，培养创新能力，才不会使大好年华归于沉寂。青年学子们，努力吧！时不我待，莫辜负青春韶华！

王祖温

2006年2月28日



# 目 录

## 工学学科

自升式海洋平台桩腿开孔强度分析 .....	李文华, 沈 岩, 阎 欣, 杨海军, 王吉龙 (3)
曲轴瞬时转速估计内燃机气体压力扭矩 .....	范志勇, 王宏智 (6)
基于变频技术液压调速系统的稳定性分析 .....	王吉龙, 杨海军, 李文华, 阎 欣 (11)
错列翅片板翅式换热器温度场的数值模拟 .....	杨 闯, 何 屹 (14)
船舶综合监控系统的设计与实现 .....	王和平, 王 刚, 甘辉兵 (19)
船舶主机双冗余PLC控制系统设计 .....	魏巴杰, 王小明 (22)
基于嵌入式系统在船舶监控方面应用的研究 .....	张 晓, 张华力 (25)
新型船舶压载水取样方法探讨 .....	李晓涛, 吕海霆, 赵星福 (30)
液化气船装卸货的研究 .....	李明珂, 洪汇勇, 薛 成 (33)
电力推进船舶中央冷却系统优化 .....	赵天义, 赵 勇, 孟维明 (37)
改进神经网络与遥感图像的识别 .....	寇琳琳 (42)
构件检索条件转换机制研究 .....	盛义芳, 张维石 (45)
具有语音处理功能的OEM参数检测系统 .....	段尊雷, 滕国库, 许 峰 (49)
基于ARM的MP3解码优化算法 .....	李菁菁 (52)
汉字库的设计与实现 .....	王明亮, 段尊雷, 杨 光 (55)
基于RUP的软件成本估算模型的研究 .....	沙 莎, 蒋 波 (58)
基于TLC5510的高速图像采集系统 .....	张玲娟 (62)
基于Ajax的Web Service 研究 .....	白 璐, 谢益武 (65)
CFB锅炉温度场检测系统中CCD控制的实现 .....	高英侠 (69)
单片机控制的便携式多功能乳腺治疗仪的研究 .....	任丽君 (72)
由变频器的故障讨论提高其可靠性的措施 .....	李红岩 (75)
精确反馈线性化在船舶航向保持器上的应用 .....	官永超, 江日凡, 袁恩铭 (78)
基于B/S体系结构的物流管理信息系统的研究 .....	翟晶玉 (81)
基于CAN总线的数据采集与控制系统 .....	石 磊, 姜晓丽 (84)
Vega技术在汽车模拟驾驶中的应用 .....	张 雷 (87)
论湿地生态系统治理过程的理论及应用 .....	李柏强, 潘文静, 曾 苇 (90)
汽油和0#柴油对小球藻的急性毒性研究 .....	刘 娜, 刘 明, 高 会 (95)
海水氨氮分析化学参数测定的优化方法研究 .....	曾 苇, 许自舟, 潘文静, 李柏强 (98)
港口规划环境影响评价的实践研究 .....	吕 蓉 (102)
溶液体系对钛微弧氧化陶瓷膜结构的影响 .....	李 静 (105)
自修复材料对铝摩擦磨损特性的影响 .....	陈文刚, 孙昌国, 李 静 (108)
世界LNG船队发展趋势研究 .....	徐文涛 (111)
改进模糊综合评判在物流企业绩效评价中的应用 .....	张婷婷 (115)
灰色马尔可夫模型的水上交通事故量预测 .....	赵佳妮 (119)
公路客运枢纽项目客运量预测研究 .....	李艳松 (124)
大连港货物吞吐量预测 .....	王 磊, 李 鑫 (128)
基于实物期权理论下的码头投资决策 .....	陈 璨, 谈建平 (132)
综合AHP和目标规划解决多配送中心的选址问题 .....	李 鑫, 王 磊, 金春梅 (135)
基于聚类分析的我国集装箱港口分类研究 .....	张春生, 王芳新 (139)

基于灰色—马尔可夫链的干散货运力预测 .....	孙绍伟, 董妍慧 (142)
作业成本法在物流运作中的应用 .....	官菲菲, 丁建飞 (146)
我国主要港口集装箱吞吐量预测分析 .....	柳艳娇 (149)
船舶领域模型的研究与发展 .....	刘绍满 (152)
航运项目风险分析问题的研究 .....	钱 缘, 孙美和 (155)
碳纤维棒(C-BAR)增强混凝土短柱的研究 .....	仇成竹 (159)
海运业的HSS应用及其动因研究 .....	郭 慧 (162)
一种基于循环相关的OFDM盲同步算法 .....	王伟伟, 刘 宇, 徐娇月 (165)
DTGS800在电车报警监控系统中的应用与设计 .....	陈少华, 李晓庆, 李春澍, 刘 科 (168)
利用PBG结构设计Wilkinson功分器 .....	陈宏巍, 房少军, 陆志洋 (171)
广播电视发射天线方向性图的计算机绘制 .....	张晓菊, 李英杰 (174)
基于图像空间分布的边缘检测算法 .....	许少娟, 李 瑛 (176)
空时分组码的性能分析 .....	徐 峰 (179)
应用CST5.0设计波导裂缝驻波阵DTV发射天线 .....	杨 昆 (182)
具有1 bit量化反馈的空时分组码 .....	孙 婷 (186)
多重级联奇偶校验码误比特率上限比较 .....	张幼承 (189)
AIS与雷达目标航迹融合算法 .....	于海霞, 索继东, 付才魁 (193)
共存系统中窄带干扰的抑制 .....	李 勇, 刘丽娜 (199)
基于Inmarsat的无线数字通信的研究 .....	杨 兵 (202)
LDPC码与Turbo码的性能比较 .....	王 芳 (205)
基于多分类器集成的手写体数字识别 .....	唐卫东, 马 恒, 杨家轩 (208)
一种接收方不可否认的数字签名协议 .....	王庆武, 代 平, 刘 冰, 田云凯 (211)
模拟雷达信号发生器的研制 .....	王 科, 刘秀文 (214)
汽车事故的信息采集与处理系统 .....	孙忠华, 杨婷婷 (217)

## 法学学科

从余祥林“杀妻”案看发回重审制度 .....	王宏伟 (223)
WTO框架下中国服务贸易法律体系的构建 .....	曹 薇 (226)
从人格权制度看罗马法的本质 .....	李 桐 (229)
浅议国际劳工组织的渔船船员立法 .....	赵佳妮 (232)
论保税区向自由贸易区的转型 .....	段清新, 王 娜 (235)
上市公司关联交易的法律问题——浅谈《证券法》的修改 .....	肖 欣, 李晶晶 (239)
船舶碰撞导致油污损害的赔偿主体 .....	沙琳琳 (242)
析格式条款之“合理提请注意”义务 .....	任 毅, 徐 静 (245)
论港口经营人的民事法律地位 .....	郭会玲 (248)
员工持股和现行公司法完善 .....	李晶晶, 肖 欣 (252)
以WTO《政府采购协议》为鉴, 浅析我国政府采购制度的完善 .....	何 平 (255)
《销售合同公约》中权利义务一致性条款的探析 .....	姜婷婷, 杜一媚 (257)
保险监管国际化 .....	刘 敏, 汪 倩 (260)
国际货物买卖合同法律适用的两种不同的方法论 .....	李雪芳 (263)
试论邓小平法律权威思想 .....	林 俏, 李 娜 (265)
网络平台的高校思想政治教育实效性探究 .....	王章勇, 陈浩静 (268)
中国社会转型时期道德失衡的主要原因探析 .....	车艳茹, 王顺娟 (271)
论江泽民对党的思想建设的继承和创新 .....	于晓楠, 苗晓艳, 王晓妹 (273)
论建设节约型社会的必要性 .....	许英红, 王小妹, 苗晓艳 (276)

浅析道德法律化问题.....	王慧敏 (279)
对经济全球化过程中我国文化安全的思考.....	程玉萍, 田 穗 (282)
中美德育教育之比较.....	张 慧, 魏 冲 (285)
论新形势下大学生思想政治教育目标管理体系的构建.....	郭海侠 (288)
大学生成长受网络消极影响的原因探析.....	苏 畅, 卢 静 (292)
浅谈知识社会青年创新意识的培养.....	张 靓 (295)
试论思想政治教育的管理载体.....	钟雪冰 (298)

## 管理学学科

逆向物流预测方法研究.....	邱 奇, 王 刚 (303)
大连建设临港产业集群进化博弈分析.....	巴雅尔 (306)
我国中小航运企业逆向营销策略应用研究.....	梁松波, 邱 奇 (309)
关于增值税转型问题的思考.....	于竺鑫 (312)
旅游产品的体验化设计.....	陈 娟, 韩 颖 (315)
跨国公司技术转移策略研究.....	王亚勤, 赵 艳 (318)
三星电子快速发展的原因探析.....	赵 艳, 范文宇 (322)
EVA模型在我国交通运输业上市公司价值评估中的应用.....	王艳玲, 谢文婕 (325)
以技术创新促进对外贸易可持续发展.....	于丽莎 (328)
航运企业种群演化规律浅析.....	李孟英, 董忆丽 (331)
项目管理中的和谐团队建设研究.....	梁松波 (334)
从生态学原理看企业的可持续发展.....	胡 博, 方世华 (339)
我国港口企业内部控制存在的问题及对策.....	王灵艳, 熊桂晶, 刘 娜 (342)
基于消费品市场的品牌营销.....	陈春涛, 方可心 (345)
浅议人力资源外包.....	张 莹 (348)
后方堆场集装箱进场随机性分析.....	万 宁 (351)
数据挖掘方法在银行CRM系统中的应用.....	陈 峰, 孔庆霞, 刘 洋 (354)

## 文学学科

也谈“中国英语问题”.....	宁 强, 杨 川 (359)
儿童语言习得的条件.....	毛佩剑 (362)
浅析语言性别歧视的表现及其原因.....	何 平 (365)
9·11事件的新闻关涉性对比分析.....	张 瑶 (368)
体育新闻词汇特点分析.....	张绪华, 宋玉香 (372)
对比分析句式省略在口语及书面语中的应用.....	李晶洁 (375)

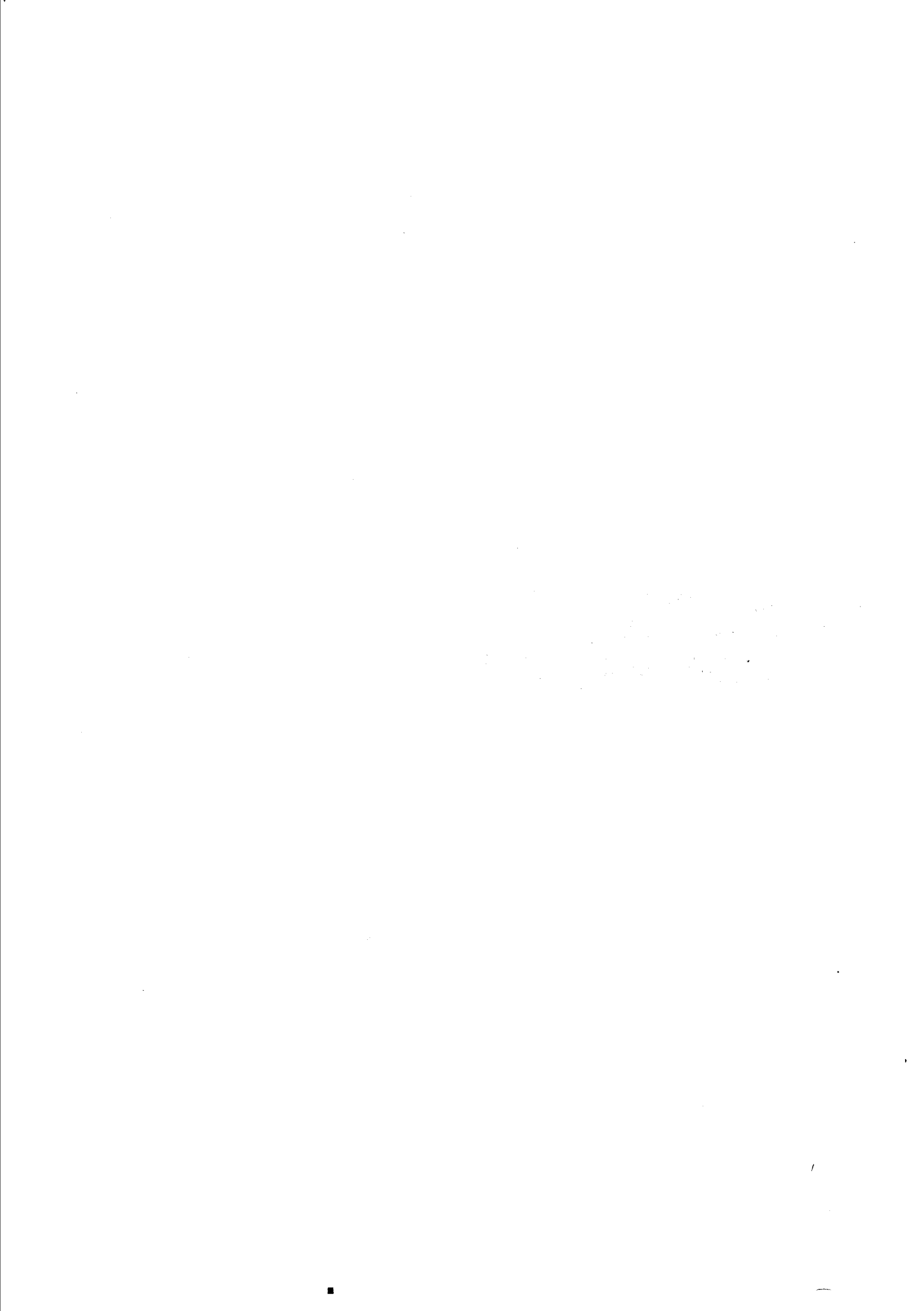




# 工学学科







# 自升式海洋平台桩腿开孔强度分析

李文华, 沈岩, 阎欣, 初海军, 王吉龙

**摘要:** 本文采用大型有限元分析软件MSC/NASTRAN对自升式海洋平台桩腿开孔部位建模进行了分析, 并给出了相应的数值计算结果。结果表明, 桩腿的应力均在许用应力范围内, 平台桩腿结构满足局部强度校核要求。

**关键词:** 自升式海洋平台; 桩腿; 开孔; 强度分析

## The Intensity Analysis of the Hole Position Modeling in the Leg of the Self-elevating Offshore Platform

Li Wenhua, Shen Yan, Yan Xin, Yang Haijun, Wang Jilong

**Abstract:** This paper analyses the hole position modeling in the leg of the self-elevating offshore platform with large finite element analysis model software MSC/NASTRAN, and provides the corresponding result of calculation of number value. The result showing that stress of the leg is in the range of the permission stress, the leg structure of platform meets some intensity check.

**Keywords:** self-elevating offshore platforms; leg; hole; intensity analyse

### 0 前言

自升式平台的主体依靠桩腿的支撑才得以升高水面, 使平台处于钻井状态。桩腿的作用除了支承平台的全部重量外, 还要经受住各种环境外力的作用<sup>[2]</sup>。“辽河作业一号”平台是一艘三腿自升式海洋平台, 由平台主体、桩腿(带桩靴)、升降系统等三部分组成。平台拔桩时, 如果土壤吸附力很大, 会出现拔桩困难的现象, 需要冲桩, 因此为安装冲桩管线需要在平台桩腿上开孔, 而开孔位置无法避开桩腿高应力区(参见图1~3)。

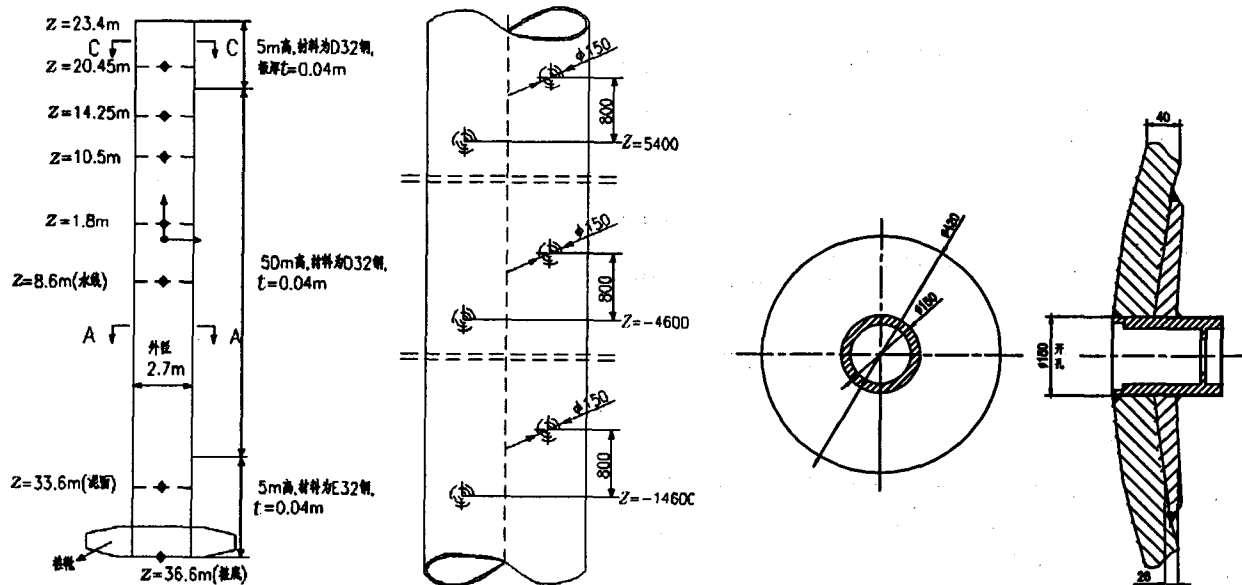


图1 桩腿总体结构

图2 平台桩腿喷冲接口正面视图 (单位: mm)

图3 开孔内部加强图示 (单位: mm)

## 1 桩腿结构概况

选取平台首桩作为分析对象, 桩腿材料为 D32 钢, 最下部 5 m 为 E32 钢, 桩腿内组合型材采用 D32 钢 (均为船用钢), 其主要材料特性为: 屈服极限  $\sigma_s=315$  MPa, 密度  $=7\ 857$  kg/m<sup>3</sup>, 弹性模量  $E=210$  kN/mm<sup>2</sup>, 剪切模量  $G=80$  kN/mm<sup>2</sup>。

## 2 桩腿结构计算模型

本文采用 MSC/NASTRAN 对桩腿结构有限元建模, 采用 ABAQUS 结构分析程序求解, 对桩腿开孔部位进行局部强度分析。对桩腿喷冲接口的开孔位置以及开孔周围的加强结构进行了细致的模拟, 所建模型扣除了 3 mm 的腐蚀余量。对整个桩腿模型都采用板壳单元, 网格足够细密, 桩腿的外壳沿圆周设置 52 个节点, 其网格尺度大约为 163 mm (参见图 4~6)。

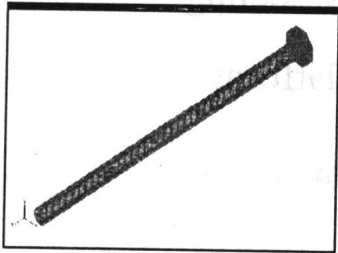


图4 首桩模型示意图

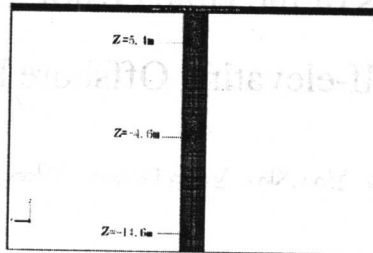


图5 首桩喷冲接口开孔的总体视图

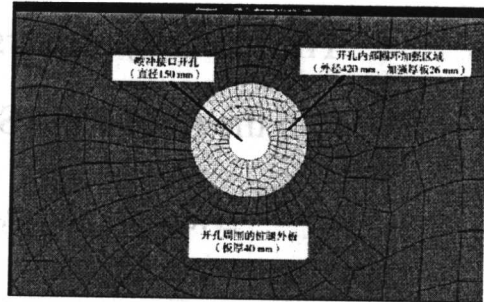


图6 首桩喷冲接口开孔的局部视图

## 3 计算工况、边界条件以及外载荷

### 3.1 计算工况

桩腿的3种危险工况是: 工况1 (LC1), 自存工况, 只有环境载荷作用, 不包括自重; 工况2 (LC2), 作业工况, 包括自重以及环境载荷; 工况3 (LC3), 自存工况, 包括自重以及环境载荷其中工况1是虚拟工况, 2和3是实际存在的组合工况。

### 3.2 边界条件

根据平台整体分析计算得到的桩腿在  $z=1.8$  m 高程和  $z=10.5$  m 高程的位移结果以及  $z=-36.6$  m 处 (即桩底处) 的支反力结果, 确定边界条件如下: (1) 在桩腿  $z=1.8$  m 高程处约束三个方向的线位移; (2) 在桩腿  $z=10.5$  m 高程处加相对于  $z=1.8$  m 高程处的相对线位移; (3) 在桩腿  $z=-36.6$  m 处 (即桩腿底部) 加支反力。

### 3.3 外载荷

平台桩腿的自重: 和整体分析一致, 对于平台桩腿的局部强度分析, 工况1 (LC1) 不考虑桩腿的自重, 对于工况2 (LC2) 和工况3 (LC3) 都要考虑桩腿的自重作用。静水压力: 自静水面 ( $z=-8.6$  m) 到泥面 ( $z=-33.6$  m) 范围内, 桩体表面受到海水的静水压力作用。

环境载荷: 对上述三种工况, 环境载荷均对应  $69.16^\circ$  入射角 (与  $x$  轴正向夹角)。

波浪和流载荷。波浪和流载荷根据 Morison 公式计算得到。根据 Morison 公式, 作用于垂直柱体一微小长度上的水平力为

$$dF = \rho \frac{\pi D^2}{4} C_M \dot{v}_x dz + \frac{1}{2} \rho C_D D v_x |v_x| dx$$

式中:  $\rho$ ——流体密度, 取海水密度为  $1\ 028.6$  kg/m<sup>3</sup>;

$D$ ——柱体直径, 桩腿的外径为  $2.7$  m;

$C_D$ ——柱体的曳力系数或阻力系数, 取为  $1.5$ ;

$C_M$ ——柱体的惯性力系数或称质量系数, 取为  $2.0$ ;

$v_x$ —— $d$ 段中点处流体瞬时速度的水平分量，根据Stokes五阶波理论求得；

$\dot{v}_x$ —— $d$ 段中点处流体瞬时加速度的水平分量，在波峰与柱子轴线重合时，水质点瞬时加速度的水平分量为零。

#### 4 桩腿强度应力校核

桩腿强度校核的标准：桩腿的材料为D32钢，最下部5 m为E32钢，其屈服极限  $\sigma_s=315$  MPa，取安全系数为0.8，则许用应力为  $[\sigma]=0.8 \sigma_s=252$  MPa。首桩的应力强度校核：首桩结构的Mises 应力值与许用应力的比较见表1，相应的应力图如图7~11；

表1 首桩的 Mises 应力值与许用应力的比较

	LC1	LC2	LC3
桩腿最大 Mises 应力 (MPa)	183.8	164.6	227.7
许用应力 (MPa)	252	252	252
桩腿总体应力图编号	图 7	图 8	图 9
是否满足强度要求	是	是	是

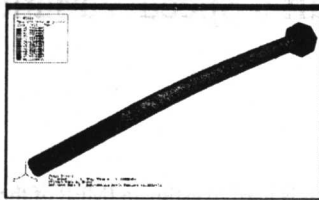


图 7 首桩工况 1 的总体应力图

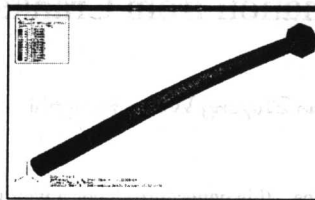


图 8 首桩工况 2 的总体应力图

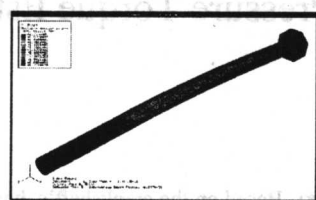


图 9 首桩工况 3 的总体应力图

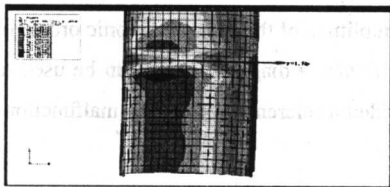


图 10 首桩工况 2 的  $Z=1.8$  m 高程处的应力图



图 11 首桩工况 3 的  $Z=1.8$  m 高程处的应力图

#### 5 结论

从以上平台桩腿结构有限元计算结果可以得到，首桩的应力均在许用应力范围内，所以平台桩腿结构满足局部强度校核要求。经过海上生产钻井作业证明，“辽河作业一号”平台桩腿开孔强度可靠，保证了“辽河作业一号”平台运行平稳、安全、可靠。

#### 参考文献

- [1] 马志良, 罗德涛. 近海移动式平台. 北京: 海洋出版社, 1993
- [2] 隋允康. 多约束膜结构截面优化及在 MSC/Nas Tran 上的程序实现. 力学季刊, 2005 (6): 184-189

## 曲轴瞬时转速估计内燃机气体压力扭矩

范志勇, 王宏智

**摘要:** 本文根据曲轴动力学理论分析得出, 曲轴上气体压力扭矩的最低主谱次振幅可以用来估计内燃机平均指示压力的大小, 并在实验的六缸机上进行了验证, 同时通过对曲轴瞬时转速波形的频谱分析得出, 其最低主谱次的振幅同样可以用来估计内燃机的平均指示压力。基于此基础上我们在实验的六缸机上建立了转速为1 200 r/min的气体压力扭矩估计曲线图, 为内燃机故障诊断并诊断故障缸的位置等提供了理论和实验依据。

**关键词:** 瞬时转速; 频谱分析; 谐波; 故障诊断

## Gas Pressure Torque Estimation from Crankshaft's Speed Variation

Fan Zhiyong Wang Hongzhi

**Abstract:** Based on the crankshaft's dynamics, this paper introduces a way which is used to estimate IMEP of the diesel by analyzing frequency spectra of the resultant gas pressure torque. And we have verified the conclusion in a six cylinders diesel. We also analyze the frequency spectra of the crankshaft's speed, and estimated the IMEP from the major order amplitude. At the end of this paper, we correlate the amplitude of the major harmonic orders of the crankshaft's speed variation with the average engine torque, and finishe a diagram which can be used to estimate the average torque at 1 200 r/min speed. This paper has provided a reference for further malfunctions diagnosis.

**Keywords:** instantaneous speed; frequency analysis; harmonic orders; malfunctions diagnosis

### 0 引言

内燃机的瞬时转速是指内燃机的瞬时角速度, 瞬时转速蕴含着内燃机丰富的工作状态信息, 利用内燃机的瞬时转速可以很方便地判断内燃机的工作状态及其故障特征。如通过测量的内燃机瞬时转速波形可以检测工作缸的功率输出以及各缸的燃烧差异, 诊断内燃机失火故障等。同时还可以利用建立的内燃机动力模型反演气缸的指示压力和进行扭振分析。

利用瞬时转速信号诊断内燃机故障的研究从 20 世纪 80 年代初就已开始, 而国外的研究要比国内早十多年。因此在理论和经验方面都要比国内成熟。目前利用瞬时转速诊断内燃机故障的研究方法很多, 主要有诊断模型法、波形分析法和模式识别法<sup>[1-3]</sup>。其中诊断模型法由于需要建立比较精确可靠的动力学模型, 涉及较多的内燃机结构参数, 且计算量较大, 故不利于在线检测和实时诊断。模式识别则是在模型诊断法和波形分析法的基础上提取多种无量纲特征参数, 利用模式识别技术进行信息融合, 从而识别整机的故障特征。

本文主要讨论的是曲轴瞬时转速的波形分析法, 由于内燃机在各缸工作不均匀或部分缸失火的情况下, 曲轴输出力矩低谱次分量将产生相当大的振幅, 反应到曲轴瞬时转速上, 转速的低谱次分量振幅将大大增加, 因此可以通过对曲轴瞬时转速波形进行频谱分析, 定量地判断出内燃机曲轴输出扭矩大小。

### 1 曲轴动力学理论分析

如图 1 为内燃机的瞬时转速两自由度模型<sup>[4]</sup>, 作用在曲轴上的驱动力矩主要包括气体压力扭矩  $T_{cyl}$  和往

复惯性扭矩  $T_{rec}$ ，负载力矩为  $T_{load}$ 。

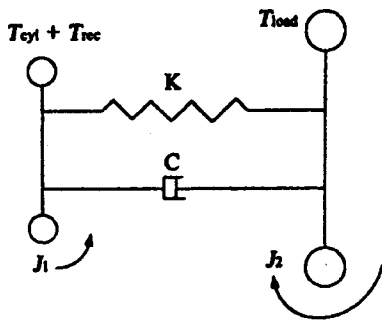
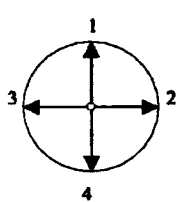


图1 内燃机瞬时转速两自由度模型

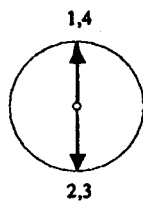
根据内燃机动力学基本定律，内燃机曲轴输出扭矩的变化与曲轴速度的波动有如下关系

$$J_1 \frac{d\omega}{dt} = T_{cyl} + T_{rec} - T_{load}$$

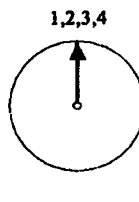
在内燃机正常的工作状态下，往复惯性力矩和气体压力扭矩都是按照内燃机气缸的发火顺序周期变化的，而且各个气缸的往复惯性力矩和气体压力扭矩都具有一致的变化规律，因此曲轴输出扭矩可以表示为曲轴转角的函数。由于曲轴输出扭矩是各个相差一定间隔角的气缸输出扭矩的矢量和，在循环周期内，将曲轴上总的输出扭矩离散化为傅立叶级数的形式，就可以用如图2、3所示的矢量形式表示。曲轴上的动力响应就是各个气缸谐波成分的叠加，其中较高谱次的谐波成分将使曲轴产生扭转振动，而较低谱次的谐波成分由于矢量和为零，故占整个谐波谱的很小部分。



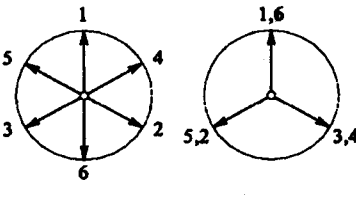
$k = 1/2$



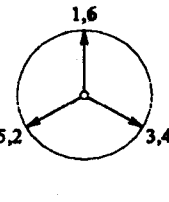
$k = 1$



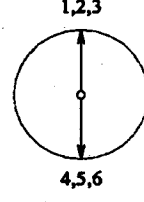
$k = 2$



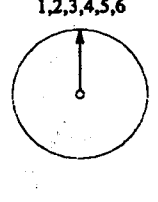
$k = 1/2$



$k = 1$



$k = 1 \frac{1}{2}$



$k = 3$

图2 四冲程四缸机的低谱次相位角图表

图3 四冲程六缸机低谱次相位角图表

从图中可以看出，在正常工作状态时，气体压力扭矩较低谱次成分（小于主谱次的谐波部分， $k=2, 3$ ）的振幅向量和为零，其主谐波成分（对于四冲程内燃机，为气缸半数的整数倍）将是气体压力扭矩的主要部分。因此，我们可以通过分析不正常工况下的较低谱次振幅来定量判断气缸故障的程度。如图4即为正常状态下的气体压力谐波分析图。

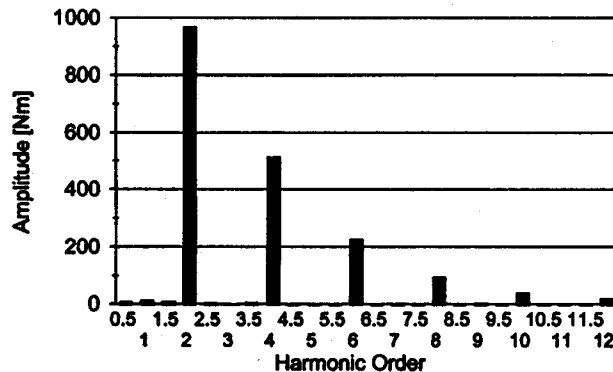


图4 四缸机的气体压力谐波分析图

## 2 实验验证

### 2.1 曲轴气体压力扭矩的频谱分析

试验分别在四冲程直喷式六缸机上进行,通过控制高压油管的供油量来模拟气缸的部分失火故障直到完全失火故障。用压力传感器和轴角编码器分别测量气缸的气体压力和曲轴的瞬时角速度,并根据所测气缸压力数据计算出气缸的平均指示压力(IMEP);对所测曲轴转速进行傅立叶变换(DFT)。如图5为六缸机在1200 r/min下的气体压力扭矩谱波图:

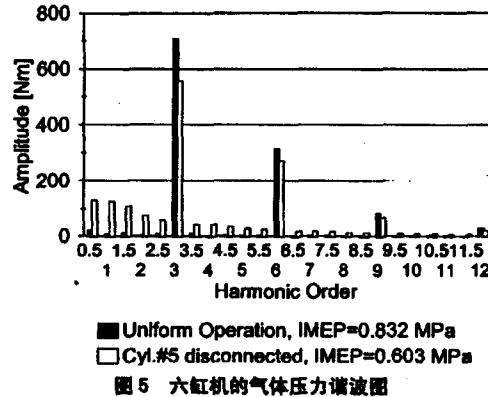


图5 六缸机的气体压力谱波图

从图中可以看出,在正常工况下气体压力的谐波成分主要有主谱次( $k=3, 6, 9, 12$ )组成,相对于最大主谱次振幅( $k=3$ ),其较低谱次振幅的总和不足其振幅的5%;而与之形成鲜明对比的是,在当对某一气缸引入故障时,气体压力扭矩的较低谱次成分的振幅在整个频谱图中将占较大部分,如图中白色柱状图所示。从图中还可以看出,无论是在正常的工作状态下还是在故障发生的状态下占支配地位的谱次振幅都是第一个主谱次振幅( $k=3$ ),同时根据计算的单缸平均指示压力发现, $k=3$ 时的谱次振幅的幅值在一定程度上反映了平均指示压力(或内燃机平均扭矩)的大小。如图6是六缸机在不同的故障状态,相同的平均指示压力下的气体压力谱波图。通过图6的数据分析看出,即使在不同的故障下,只要其内燃机的平均指示压力(IMEP)相同,最低主谱次( $k=3$ )的振幅值就有几乎相同的值,因此我们可以得出这样的结论:只要发动机的平均指示压力(或平均扭矩)相同,曲轴上气体压力扭矩的最低主谱次振幅就有相同的值。而且也可以看出较低谱次的振幅( $k=1/2, 1, 3/2$ )在一定程度上反映了单缸对曲轴扭矩贡献率的大小。

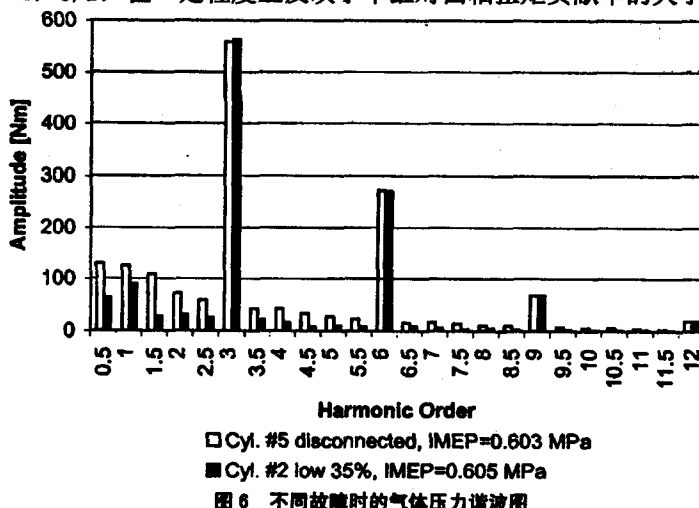


图6 不同故障时的气体压力谱波图

### 2.2 曲轴瞬时转速的频谱分析

对于内燃机来说,如果其最低主谱次的频率与曲轴的自振频率相差较大,那么曲轴转速最低主谱次的振幅将与相应谱次的气体压力扭矩振幅值成一定的比例关系<sup>[5-7]</sup>。据此我们可以建立出曲轴转速和气体压力扭矩之间相应谱次的数量关系。

图7为在图5两种不同状态下的曲轴转速频谱分析图,比较图5与图7可以看出两种不同状态下的频谱图非常相似,主要的不同是在 $k=7.5$ 与 $k=8$ 处,曲轴转速在此处有一个较大的振幅值,而气体压力扭矩

在此处的振幅值几乎为零，这主要是因为转速为 1 200 r/min 时，曲轴转速的第  $k=8$  次的频率非常接近曲轴的自振频率，因此在此处会产生共振，反映到曲轴转速的频谱上就会产生较大的振幅。另外对比曲轴气体压力扭矩的频谱图，曲轴转速的最低主谱次振幅的确代表了内燃机平均指示压力 (IMEP) 的大小。

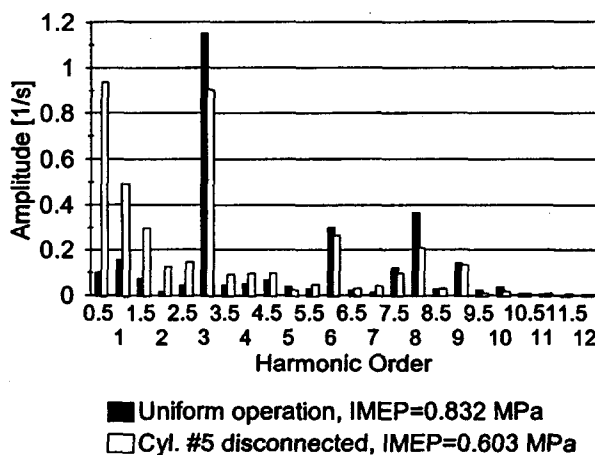


图 7 六缸机曲轴转速频谱分析图

图 8 为在图 6 两种不同的故障状态下的曲轴转速频谱分析图，即使单缸贡献率的不同，只要内燃机平均指示压力的值相同，曲轴转速的最低主谱次振幅值就有相同的值。在此进一步得到了验证。

基于此基础上，我们建立了六缸机的曲轴转速主谱次振幅与气体压力扭矩的线性关系图。图 9 为在转速为 1 200 r/min 下不同负荷和故障状态下的线性图。在此转速下，我们可以直接根据所测的曲轴瞬时转速得出气体压力扭矩的大小。

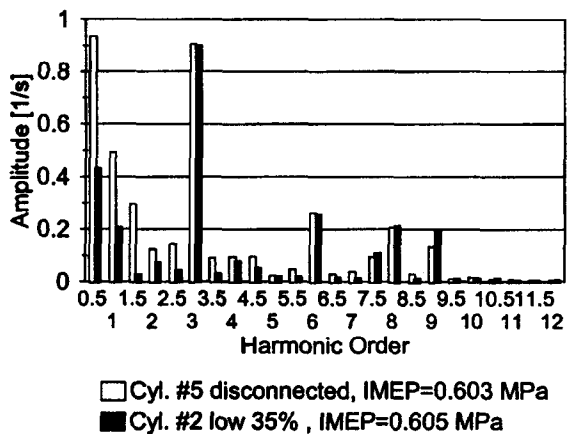


图 8 六缸机曲轴转速频谱分析图

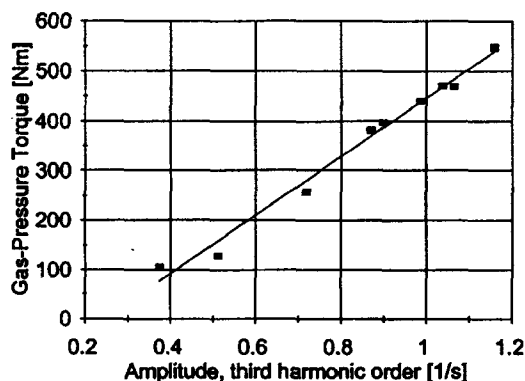


图 9 1 200 r/min 时的气体压力扭矩估计图

### 3 结论

(1) 通过对气体扭矩的频谱分析，其最低主谱次振幅值在反应了气缸的平均指示压力的大小；而且其小于最低主谱次振幅 ( $k=1/2, 1, 3/2$ ) 的幅值反映了气缸做功的不均匀程度。

(2) 对曲轴转速的频谱分析看出，曲轴转速最低主谱次振幅同样反映了气缸平均指示压力的大小，由此可以用其振幅来估计气体压力扭矩的大小。

(3) 对于某一内燃机，由于气体压力扭矩与曲轴转速主谱次存在近似线性的关系，所以在不同的转速下，可以建立气体压力估计图，为进一步的故障诊断奠定了理论基础。

### 参考文献

- [1] 刘世元, 杜润生, 杨叔子. 利用转速波动信号诊断内燃机失火故障的研究(1)——诊断模型方法. 内燃机学报, 2000, 18 (3): 315-319
- [2] 刘世元, 杜润生, 杨叔子. 利用转速波动信号诊断内燃机失火故障的研究(2)——波形分析法. 内燃机学报, 2000,





18 (3): 320-323

- [3] 刘世元, 杜润生, 杨叔子. 利用转速波动信号诊断内燃机失火故障的研究(1)——多特征综合法. 内燃机学报, 2000, 18 (4): 395-398
- [4] 杨少波, 张永祥等. 柴油机瞬时转速的建模与仿真研究. 内燃机车, 2003 (8): 10-13
- [5] Brown T S, Neil W S. Determination of Engine Cylinder Pressures from Crankshaft Speed Fluctuations. SAE Paper, 2002
- [6] Iida K, Akishino K, Kido K. IMEP Estimation from Instantaneous Crankshaft Torque Variation. SEA Paper, 2002
- [7] Freestone J W, Jenkins E G. The Diagnosis of Cylinder Power Faults in Diesel Engines by Flywheel Speed Measurement. SAE Paper, 2003