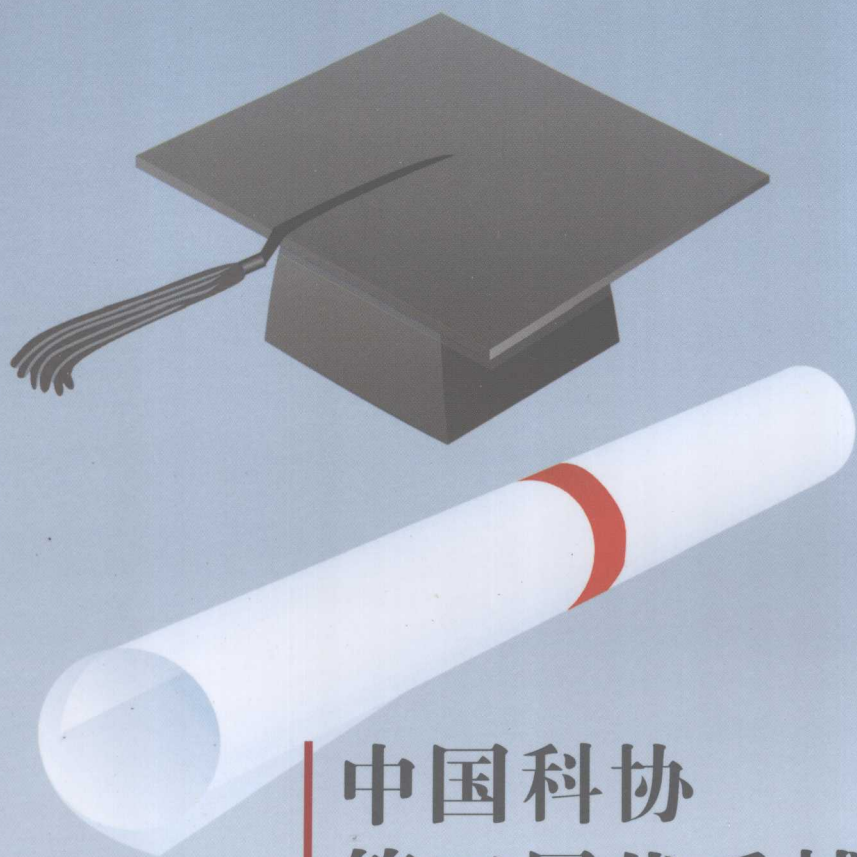




中国科协组织人事部
中国科协学会学术部 编



中国科协 第四届优秀博士生学术年会 论文集

〈下〉



中国科学技术出版社



中国科协第四届优秀博士生 学术年会论文集

中国科协组织人事部 编
中国科协学会学术部

(下 册)



中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

中国科协第四届优秀博士生学术年会论文集(下)/中国科协组织人事部、中国科协学会学术部编. —北京:中国科学技术出版社,2007.7

ISBN 978-7-5046-4564-7

I. 中… II. 中… III. 科学技术-文集 IV. N53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 109367 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科协组织人事部
中国科协学会学术部

(册 下)

中国科协学会学术部

· 北京 ·

目 录

下 册

国防科学

新型船用螺旋桨负载特性仿真系统的建模、仿真和研制	刁利军 等(841)
一种新型轮爪式越障轮的设计	岳荣刚 等(847)
正压力可调的扭轮摩擦传动机构研究	田军委 等(856)
膨胀波火炮发射原理研究	张 帆(860)
静电放电对晶体管造成的损伤研究	祁树锋 等(866)
宽带水声环境参数盲估计的仿真研究	叶琼龙 等(870)
基于调制线谱特征的水下噪声目标识别研究	史广智 等(876)
一种大功率超声波手枪的设计	陈仁松 等(883)
舰艇编队对空防御火力分配评价模型研究	孙 涛 等(889)
面向体系对抗的一体化联合作战仿真系统研究	王 晔 等(895)
地形可视化中 TIN 构建的平三角形修正算法研究	张立朝 等(901)
略论我军中远程打击力量信息化打击体系建设	肖 勇(907)
模型分辨率研究	蒲建春 等(911)
舰载驾束制导炮弹抗导可行性探讨	孙东彦 等(916)
计算机生成兵力 CGF(Computer Generated Forces)是指仿真(战场)环境中由 计算机生成和控制的(大量)海战 CGF 系统的构造与建模	姜 伟(920)
基于贝叶斯网络的 UUV 威胁等级评估研究	李 卓 等(926)
把握信息化战斗力生成机理	李锋锐(932)
试论陆军立足现有装备实现优化作战的基本途径	张 强 等(937)
基于体系结构视图描述的军事信息系统需求工程	贾海亮 等(942)
泡沫型干扰幕气泡结构与能量耗散机理研究	战希臣 等(947)
基于复杂适应系统理论的装备体系发展论证结构框架	孙 琰 等(955)
军事管理革命理论与部队科学管理实践研究	冯长松(961)
构建判断当代战争性质的理论分析框架	刘东哲(966)

基于 LOWA 算子和 LWA 算子的防空信息战效能评估方法	张 肃等(971)
基于效果作战的定量描述	孟庆均等(978)
作战仿真结果数据的量化分析及其相关指标	王 浩等(983)
现代战争系统的非线性及其研究方法初探	谭亚新等(990)
战争场论	徐豪华(994)
基于网格技术的空间作战仿真研究	王 斌等(999)
复杂武器系统交互式电子技术手册关键技术研究	安 钊等(1005)
基于 XML 的分布式智能 FMEA 系统研究	周 健等(1011)
基于 HTCPN 的装备维修过程建模与分析	王岩磊等(1018)
基于 CAS 范式军事系统建模及算法研究	陈悦峰等(1024)
作战指挥决策时效性研究	靳 娜(1029)
装备指挥业务建模的 Petri - Net 元模型研究	周 文(1035)
基于博弈论的现代复杂武器装备软件保障活动终止性研究	王 军等(1041)
国防科技进步与国防费结构优化的耦合研究	杨 峰(1048)
装备成本加成定价的博弈分析	谭 丽(1052)
国防科技创新模式及其演化机制的经济性分析	马惠军(1056)
国防装备经济投入与国民经济协调发展研究	
——基于中国和美国数据的实证分析	周 洲(1061)
民用企业生产军品道德风险研究	孙 新(1067)
中国特色军事采购制度创新研究	史 艳(1071)
循环经济理论在武器装备寿命周期的应用研究	于向军(1075)
一体化联合保障力生成模式的经济学探究	黄福敏(1079)
战略驱动下的武器装备经费支出优化研究	张 涛(1083)
国防人力资源管理创新研究	黄 飞(1088)
基于多属性决策分析的国防工程供应商准入研究	汪红钢(1092)
合同战斗是信息化战争不可缺少的组成部分	陈新文(1098)
基于 DEA 的国防科技工业企业技术创新绩效评价研究	殷彦谋(1102)
突发需求下国防物资的采购策略研究	柴亚光等(1107)
业务流程再造与军事后勤结构转型	韩玉凯(1114)
贯彻科学发展观加强军队审计对权力的制约与监督	刘建峰等(1118)
略论国防科研生产管理立法	郭二忠等(1123)
谐振环厚度对负折射指数物质的电磁特性影响	冯 宇等(1129)
基于损伤综合技术的潜艇战损评估仿真研究	刘 博(1135)
基于增强现实技术的辅助信息系统建模方法研究	乔勇军等(1141)
基于二维自由空间蚁群算法的反舰导弹航路规划方法	孙 涛等(1148)
基于结构随机跳变最优控制理论的导弹制导新方法研究	伍友利等(1154)
导弹航天测控系统卫星鉴定技术研究	杨 萍等(1160)
数字化宽带测向系统的解模糊与基线设计	姜勤波(1169)
一种新型乘波构型前体设计与性能模拟	肖 洪等(1175)

圆柱形弹体的入水弹道分析	李 磊 等(1182)
基于模糊控制的导弹平滑导引律研究	李 静 等(1188)
多功能微弧等离子喷涂系统设计与实现	汪刘应 等(1195)
小概率事件分布规律及其在飞行安全评估中的应用	葛志浩 等(1202)
飞行器自主交会对接逼近阶段单台 CCD 测量方法研究	王保丰 等(1209)
信息化武器装备体系建设初探	果 辉(1216)
炮控系统中感应电机自抗扰控制器的参数整定	邵立伟 等(1221)
基于多频载波相位的单点定位新方法的研究	陈明剑 等(1228)
反舰导弹饱和攻击协同控制方法研究	马培蓓 等(1235)
一种水下目标的联合检测方法	刘科满 等(1241)
基于导频和数据联合辅助的半盲载波频偏估计	刘 波 等(1248)
基于多技术的网络入侵检测系统	林国庆 等(1255)
基于导航卫星信号的空中目标无源探测技术研究	曲 卫 等(1263)
一种用于估算基于 AF 协作分集系统的接收性能的方法	赵雄伟 等(1271)
信息战环境中的电磁频谱管理问题探析	王汉斌 等(1278)
无线传感器网络再部署问题研究	皮兴宇 等(1283)
基于小波和 PCA 的文种识别算法	程 娟 等(1288)
用方向向量随机化方法估计相干信号波达方向	张 辉 等(1294)
频差相差共存时的时延估计方法研究	王 江 等(1299)
阵列误差影响下的神经网络波达方向估计	于 斌 等(1304)
宽频带数字波束形成系统的多通道幅相误差校正方法	赵红梅 等(1312)
基于 USB 2.0 的雷达多通道实时数据采集发送系统的设计和实现	李寒梅 等(1316)
基于 Retinex 理论的图像增强方法研究	雷 玲 等(1322)
舰载光电成像系统的电子稳像技术研究	杨常青 等(1328)
舱内爆炸载荷特性数值模拟及实验研究	侯海量 等(1334)
夹层复合材料水下声隐身性能的研究	石 勇 等(1345)
从新军事变革演进性看我军军事理论创新	严正峰 等(1352)
EMP 混合型模拟器双锥天线辐射特性的理论研究	毛从光 等(1357)
压水堆全厂断电事故及高压安注系统的缓解能力研究	张龙飞 等(1362)
基于 SVM 与 UBM 的语言辨识技术	彭天强 等(1369)
大规模系统模拟器中 Trace 外推技术初步研究	郝子宇 等(1376)
面向下一代网络的新型多层联合组通信模型研究	胡曦明 等(1383)
附有动力学信息的星载 GPS 运动学定轨	秦显平等(1392)
高分辨率遥感影像中道路的半自动提取	杨 云 等(1399)
本体在地理信息科学中地位与作用的思考	李淑霞 等(1406)
通用线性随机模型的 Helmert 方差分量估计	刘长建 等(1411)
国际天球参考架的研究现状及发展	乔书波 等(1417)
The Foundation of the Lunar Reference System	MA Gaofeng et al. (1425)
大射电望远镜馈源系统精调平台位置基准的标定	骆亚波 等(1430)

军队药材联勤保障效能评估研究	刘 宁 等(1437)
西北地区军队人员潜在医疗服务需求及其影响因素分析	郭鹏飞 等(1442)
履带车辆悬挂系统振动的模糊控制与仿真	于 杨 等(1447)
基于小波和分形理论的坦克柴油机健康状况评估	张小明 等(1453)
装甲车辆热管理仿真软件系统的研究与开发	许 翔 等(1460)
两栖车水上绕流场数值模拟中的几个问题	王 涛(1466)
双树复数小波在 SAR 图像去噪中的应用	邢 帅 等(1473)
高光谱遥感目标探测识别技术及其军事应用	董广军 等(1480)
动态支持域约束的天文目标图像超分辨率重建	王振国 等(1486)
空间信息共享服务技术研究	王连备(1492)
遥感技术的国防应用及发展趋势	罗伊萍 等(1498)
基于机载视频影像的运动目标检测与跟踪	于文率 等(1503)
辽宁老工业基地装备制造业自主创新战略的理论模型	刘 岩 等(1513)
外军武器装备发展战略思想比较研究	雷 亮 等(1520)
提高推扫型成像光谱仪光通量的算法研究	梁敏勇 等(1525)
适用于遥感空间数据层次表达的全球网格系统	童晓冲 等(1532)
多道数据采集系统设计	王季红 等(1553)
机翼上冰脊的估算及其对气动特性影响的计算和试验研究	易 贤 等(1547)
论信息化条件下联合作战的体系制胜	牛玉俊(1554)
以科学发展观为指导,推进军事物流信息化建设	刘新华 等(1558)
效果评价技术在军事战略领域的应用前景	周 红 等(1563)
理想导电圆柱爬行波后向 RCS 的计算与测量研究	郝 雷 等(1569)

新型船用螺旋桨负载特性仿真系统的建模、仿真和研制

刁利军 刘志刚 李哲峰 张钢

北京交通大学电气工程学院, 北京, 100044

摘要 为了在实验室实现电力推进船舶推进系统带桨考核的目的, 根据船与螺旋桨、海水的关系建立了船桨数学模型, 并利用实时仿真、实时控制和电力电子技术设计了螺旋桨负载特性仿真系统。基于 MATLAB 的实时控制工具箱、数据采集卡和 DSP 技术搭建了一台 30kW 的仿真系统并进行了功能性试验。实验结果表明, 仿真系统满足螺旋桨的四象限运行模式, 能够方便、有效地达到推进系统带桨考核的目的, 为全比例仿真系统的建立提供了理论和实践基础。

关键词 船舶工程; 电力电子; 电力推进; 实时仿真; 船桨模型

引言

与传统的机械式船舶相比, 全电力推进系统摒弃了齿轮箱, 推进系统和其他备用设备只需要一个原动机, 原动机侧的燃油利用率更高, 这些优点减小了全电力推进系统的体积和重量, 并具有更高的可靠性和功率密度、更好的可操作性和机动性^[1]。随着半导体器件、材料、封装技术和控制技术等的发展, 全电力推进系统将取代现有机械式系统而占据未来船舶推进市场。在推进系统的设计初期, 为了满足功能性能指标要求, 对推进系统和推进电机进行带桨考核是必不可少的^[2]。受实际条件的限制, 考核工作不太可能在实际环境中进行; 再结合考虑研制周期、实验调试、系统完善等因素, 在实验室建设螺旋桨特性仿真系统(以下简称“仿真系统”)来完成考核任务无疑是一种行之有效的方式。船舶具有重载、螺旋桨转速慢等特点, 从而推进电机要求采用多相多极的方式。考虑到多相多极电机的复杂性, 在设计最初, 一般采用小比例样机来研究推进系统和螺旋桨的负载特性。传统的做法是采用直流电机做负载模拟电机^[2,3], 但直流电机由于电刷和换向器的存在, 使得其结构、成本、可维护性、可靠性、功率密度等方面都不如交流电机^[4]。

以电力电子技术、数字信号处理、实时仿真和控制技术为基础, 本文研制了一种新型的采用交流异步电机作为负载模拟电机的小比例仿真系统, 研究了该仿真系统的原理、数学模型和各组成部分功能, 并给出了该仿真系统的仿真和实验波形。

1 仿真系统简介

仿真系统的主旨在于模拟实际的螺旋桨负载特性来考核推进系统和推进电机, 其组成也可以根据此分成三部分: 推进系统、负载模拟系统、上层监控系统, 如图 1 所示。

推进系统包括推进逆变器、推进电机、应用控制器等, 用于模拟实际的船舶推进系统; 负载模拟系统包括模拟电机、模拟变频器(包括模拟逆变器、网侧整流器)、模拟控制器(含船桨模型)等, 用于模拟实际螺旋桨的负载特性, 给推进系统提供逼真的轴负载; 上层监控系统是前述部分的辅助部分, 用于监控仿真系统的各个参数、曲线。

推进电机和模拟电机都采用三相鼠笼式异步电机, 之间用法兰盘和扭矩速度传感器连接。模拟变频器主要按照实际螺旋桨的负载特性控制模拟电机, 同时为模拟电机与实验室电网的能量交换提供一个桥梁。

在实际的推进系统中,螺旋桨可以运行在正转、反转、牵引、制动四个象限,这就要求模拟电机和模拟变频器也可四象限运行。以 MATLAB Simulink 作平台,根据船与桨、水之间的关系建立船桨模型;以实时工作模块 RTWT 和数据采集卡 PCI1711 作接口,实时采集电机转速和扭矩,进行实时仿真,得到船速和模拟变频器的扭矩给定量;模拟控制器根据扭矩给定量控制模拟电机达到模拟实际负载特性的目的。

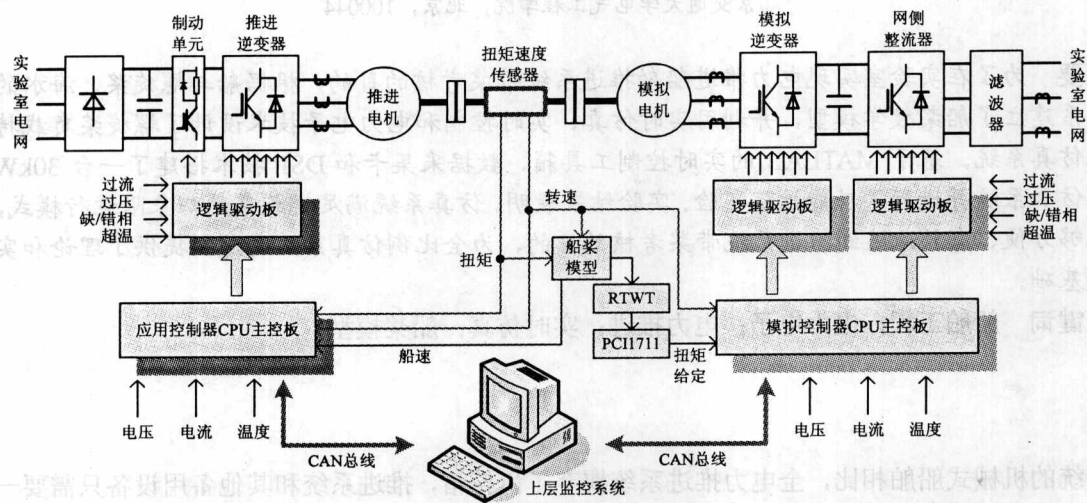


图1 仿真系统原理框图

仿真系统四象限的运行模式如表1所示。当螺旋桨做正转、反转、牵引、制动时,模拟电机和模拟变频器相应地做四象限运行。以第一象限正向牵引为例:此时推进电机处于正向电动状态,模拟电机反转,但扭矩为正,工作在第四象限反向回馈制动状态,回馈的能量经由模拟变频器回馈到实验室电网。其他象限的运行模式类似。

表1 仿真系统运行模式简表

推进电机运行状态		模拟电机运行状态			模拟变频器运行工况	仿真系统能量流动方向
		功能	转矩方向	象限		
牵引	正转	发电	正向	四	网侧逆变	由模拟电机向电网方向回馈
	反转		反向	二		
制动	正转	电动	反向	三	网侧整流	由电网向模拟电机方向传递
	反转		正向	一		

2 系统建模

2.1 系统平衡模型

仿真系统的轴系统如图2所示。

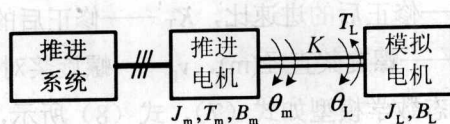


图2 仿真系统轴系统简图

根据前面所述，仿真通过控制模拟电机的轴负载转矩来达到仿真目的。根据牛顿运动方程，系统的机械模型可以表述为

$$J_m \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega + K(\theta_m - \theta_L) + F_{cm} \operatorname{sgn} \omega \pm F_{sm} |_{\theta=0} = T_m \quad (1)$$

$$J_L \frac{d\omega}{dt} + B_L \omega + K(\theta_L - \theta_m) + F_{cl} \operatorname{sgn} \omega \pm F_{sl} |_{\theta=0} + T_L = 0 \quad (2)$$

式中，若以 x 代表 m 和 L ，则 J_x 、 T_x 、 B_x 、 F_{cx} 、 F_{sx} 、 θ_x 、 K 、 ω 分别为推进电机和模拟电机的惯性系数、电磁转矩、黏滞摩擦系数、库仑摩擦系数、静止摩擦系数、角位移、弹性系数和角加速度。忽略库仑摩擦和静止摩擦，两式相加可得

$$J_m \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega + F_{cm} \operatorname{sgn} \omega + T_{SL} = T_m \quad (3)$$

式中 $T_{SL} = J_L \frac{d\omega}{dt} + B_L \omega + F_{cl} \operatorname{sgn} \omega + T_L$ 表示实际系统的轴负载转矩。试验时，只要控制 T_{SL} 与船桨模型实时算出来的 T_{SL}^* 一样，就可以达到试验的目的。

根据式(3)得出仿真系统平衡原理框图如图3所示。

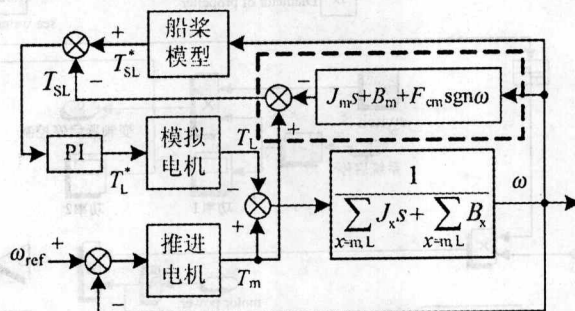


图3 仿真系统平衡原理框图

T_{SL}^* 是通过船桨模型获得的，图中虚线框表示实际轴负载转矩 T_{SL} ，可以通过扭矩速度传感器直接测得而不需要知道电机的参数，但成本较高；还可以通过观测的方式得到，同样不需要电机的参数，但成本大为下降^[5]；文献[6]还提出了一种电机惯性系数和轴弹性系数的辨识方法。

2.2 船桨数学模型

船桨模型是根据船跟螺旋桨、海水之间的关系得到的由桨速计算船速、桨的机械特性等的数学模型，参考文献[7]介绍了其简单数学模型，由该模型可知：当桨速趋于零时，将会出现进速比趋于无穷的情况，为此，对船桨模型按下式的子进行修正^[8]。

$$K'_T = F_p / [\rho D^2 (v_p^2 + D^2 n_p^2)] \quad (4)$$

$$K'_Q = T_L / [\rho D^3 (v_p^2 + D^2 n_p^2)] \quad (5)$$

$$J' = v_p / \sqrt{v_p^2 + D^2 n_p^2} \quad (6)$$

式中: F_p ——螺旋桨推力(N), J' ——修正后的进速比, K_T' ——修正后的推力系数, K_Q' ——修正后的扭矩系数, ρ ——海水密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), D ——螺旋桨直径(m), v_p ——螺旋桨对水的相对速。

根据牛顿运动方程, 船舶的动态数学模型如式(7)、式(8)所示, 由该模型可实时算出船速的大小和方向。

$$T - R_f = M \frac{dV}{dt} \quad (7)$$

$$V = \frac{1}{M} \int (T - R_f) dt \quad (8)$$

式中: R_f ——阻力(N), M ——船舶的重量(kg)。

以此为基础, 在 MATLAB Simulink 中建立船桨模型和船舶运动动态模型如图 4、图 5 所示。

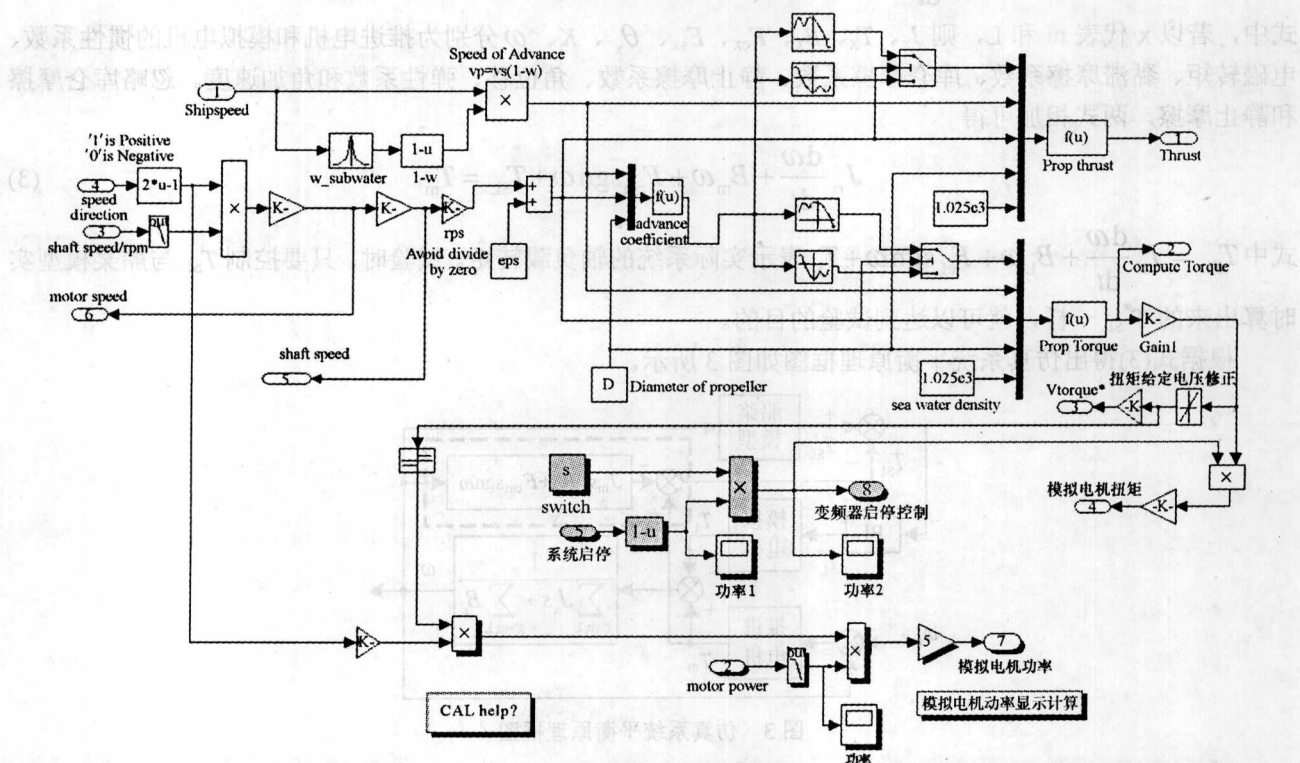


图 4 Simulink 中建立的船桨模型

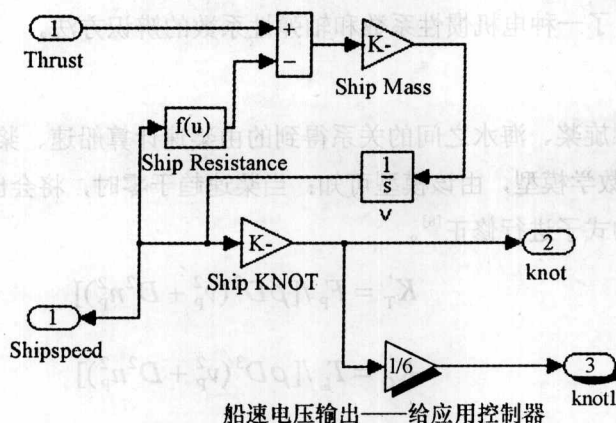


图 5 船舶运动动态模型

3 实验结果

为了验证论文提出的螺旋桨特性仿真系统,设计了一套 30kW 的实验系统,系统主要参数如下:

螺旋桨直径: 4.2m

船舶重量: 3500t

阻力系数: 364

海水密度: $1025\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

电机额定功率: 30kW

电机额定电压: 3 Φ 380V

电机额定转速: 1470r/min

电机额定扭矩: 200N·m

船桨模型采样时间: 0.01s

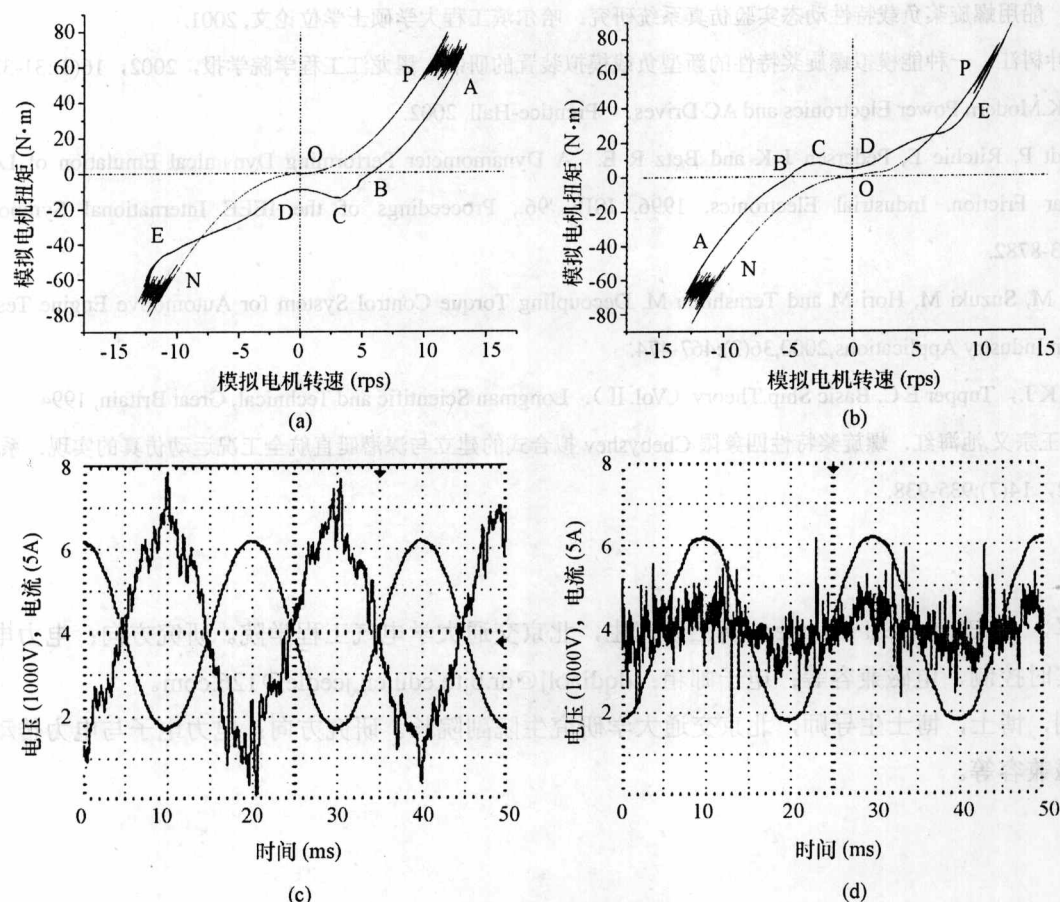


图6 仿真系统实验波形

(a)由正向航行反转的模拟电机机械特性曲线; (b)由反向航行反转的模拟电机机械特性曲线;

(c)模拟变频器逆变工况下的网侧电压电流波形; (d)模拟变频器整流工况下的网侧电压电流波形;

其中,电机额定转速 1470r/min 对应实际螺旋桨额定转速 220r/min,模拟变频器的控制采用 TMS320LF2407A 和 CPLD。在此基础上,对仿真系统进行功能性实验,得到如图 6 所示的实验结果:图 6(a)中 OPABCDENO 段为船舶从零速正向启动航行然后倒航、停止时对应的螺旋桨特性曲线,图 6(b)中 ONABCDEPO 段为船舶从零速反向启动航行然后倒航、停止时对应的螺旋桨特性曲线;图 6(c)、图 6(d)分别为推进系统工作在牵引和回馈制动时模拟变频器网侧的电压电流波形。

从实验波形可知:当推进系统运行在正转、反转、牵引、逆变的四象限工况时,仿真系统的运行模式和能量流动与前面分析的四象限工作模式相符。

4 结论

根据船舶电力推进系统中的动力平衡原理设计了螺旋桨负载特性仿真系统方案,建立了仿真系统平衡

数学模型和船桨数学模型,在此基础上搭建了实验仿真系统。实验结果表明,仿真系统满足螺旋桨的四象限运行模式,可以达到考核推进系统带桨运行的目的,为全比例仿真系统的研制提供了理论和实践基础。

参考文献

- [1] C G Hodge. Modern Applications of Power Electronics to Marine Propulsion Systems. Power Semiconductor Devices and ICs Symposium, 2002, 9-16.
- [2] 陈实如. 船用螺旋桨负载特性动态实验仿真系统研究. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2001.
- [3] 刘勇, 叶树江. 一种能模拟螺旋桨特性的新型负载模拟装置的研制. 黑龙江工程学院学报, 2002, 16(3):31-32.
- [4] Bose B K. Modern Power Electronics and AC Drives. Prentice-Hall, 2002.
- [5] Sandholdt P, Ritchie E, Pedersen J K and Betz R E. A Dynamometer Performing Dynamical Emulation of Loads with Nonlinear Friction. Industrial Electronics, 1996. ISIE '96., Proceedings of the IEEE International Symposium on, 1996:873-8782.
- [6] Nomura M, Suzuki M, Hori M and Terashima M. Decoupling Torque Control System for Automotive Engine Tester. IEEE Trans. on Industry Applications, 2000, 36(2):467-474.
- [7] Rawson K J., Tupper E C. Basic Ship Theory (Vol. II). Longman Scientific and Technical, Great Britain, 1994
- [8] 李殿璞, 王宗义, 池海红. 螺旋桨特性四象限 Chebyshev 拟合式的建立与深潜艇直航全工况运动仿真的实现. 系统仿真学报, 2002, 14(7):935-938.

作者简介

刁利军, IEEE student member, 博士研究生, 北京交通大学电气工程学院。研究方向: 电力电子与电力传动、实时控制、电磁兼容等; 电子邮箱: dqdiaolj@dr.bjtu.edu.cn, jeedle@126.com。

刘志刚, 博士, 博士生导师, 北京交通大学研究生院副院长。研究方向: 电力电子与电力传动、实时控制、电磁兼容等。

一种新型轮爪式越障轮的设计

岳荣刚 王少萍 焦宗夏 康荣杰

北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京, 100083

摘要 本文针对当前行星探测车车轮的缺点和不足, 结合行星表面的复杂环境, 设计了一种新型轮爪式越障轮, 该轮的主要创新点在于越障轮的轮爪。文中对该新型越障轮进行了受力分析, 推导出越障轮平稳行走的条件, 为设计者提供了一定的理论依据。最后用Pro/ENGINEER软件建立了探测车的三维模型, 并用ADAMS软件对行星车进行了运动学和动力学仿真。仿真结果表明该新型越障轮具有较强的越障能力, 可以翻越高度超过越障轮半径1.4倍的台阶, 能够适应各种地形环境, 基本克服了当前行星探测车车轮存在的缺点和不足。

关键词 新型; 行星探测车; 越障轮; 仿真

Design of a New Type Obstacle-climbing Wheel with Claw

Yue Ronggang, Wang Shaoping, Jiao Zongxia, Kang Rongjie

School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of A University, Beijing, 100083

Abstract Aiming at the disadvantages of current planet rover wheel, a new type obstacle-climbing wheel with claw is designed according to the complex environment of planet surface. Its main innovation is the claw of wheel. Mechanic analysis of the new type obstacle-climbing wheel is computed, and the condition of steady running is deduced. It offers designers several theory foundations. At last, a three-dimension model of planet rover with the new type obstacle-climbing wheels is built by Pro/ENGINEER software, and kinematic simulation of the wheel is given by ADAMS software. The results of simulation indicate that the new type wheel has strong obstacle-climbing capabilities. It can cross the step whose height is 1.4 times than the radius of wheel, and can adapt itself to all kinds of rough and uneven terrain environment. The new type wheel overcomes disadvantages and shortages of current rover wheels.

Key words new type; planet rover; obstacle-climbing wheel; simulation

引言

随着空间科学技术的飞速发展, 许多航天大国制定了行星探测计划。由于行星表面环境复杂恶劣, 采用行星探测车登陆进行探测是一种比较可行的办法, 近年来, 行星探测车已经成为各国的研究热点, 各种新型探测车不断出现。目前已经研制的探测车主要有以下几种形式: 履带式、腿式、轮式和其他形式^[1]。由于履带式和腿式行星探测车存在各种缺陷, 轮式探测车是当前行星探测车的主流。

为了适应复杂恶劣的行星表面环境, 人们把主要精力放到了新型车身结构的设计上, 对新型车轮的研究相对较少。目前能见到的车轮结构主要有以下3种形式:

(1)传统圆形车轮 其代表为美国“勇气号”火星车车轮和日本“Micro5”轻型月球车车轮^[2]。这种车轮应用最广泛,其外形是传统的圆形,轮的周向有均匀分布的横向(或斜向)条纹或锥形突起,以增强抓地能力。装有这种车轮的探测车运动平稳,转向灵活,但它的致命缺点是不能翻越高度超过车轮半径的台阶,也不能跨越宽度超过车轮直径的壕沟。

(2)弹片式车轮 其代表为日本东芝公司的火星探测车车轮^[3]。这种车轮也是圆形的,所不同的是它的行走机构为周向均匀分布的薄弹片。该车轮与第一种车轮相比增加了一定的缓冲功能,也能翻越高度略超过车轮半径的台阶,但不能跨越宽度超过车轮直径的壕沟。

(3)行星轮式越障轮 其代表为哈尔滨工业大学月球车的行星越障轮^[4,5]。每个越障轮由3个小行星轮构成,在平坦路面上行走时,其中两个小轮着地,当遇到较大的障碍或台阶时,3个小轮会绕其公共中心旋转(类似于行星公转,故得名)以翻越障碍。这种越障轮克服了前两种越障轮的缺点,可以翻越高度超过小轮直径的台阶,但它与履带式越障轮有同样的缺点:转向比较困难。

为了使行星探测车车轮运动平稳,转向灵活,既能翻越高度超过车轮半径的台阶,又能跨越宽度超过车轮直径的壕沟,本文设计了一种新型轮爪式越障轮。

1 新型轮爪式越障轮的结构设计

行星探测车完成各种任务的前提是能够在行星表面安全行走,并能越过一定的障碍,因此,其行驶系统的越障能力是完成探测任务的基本保证。当前的行星探测车大都只通过改进车身结构来提高其越障能力,只有少数的探测车考虑了车轮本身的越障能力,而且车轮的越障能力和灵活性也有限。本文从提高行星探测车车轮本身的越障能力这一角度出发,设计了一种新型轮爪式越障轮。

该新型轮爪式越障轮的原理图如图1所示。为保证越障轮运动的平稳性和转向的灵活性,越障轮基体仍采用传统的圆形结构。为提高越障轮的越障能力,沿越障轮的周向均匀安装6套轮爪机构,每套轮爪机构由轮爪、轮爪轴、限位轴和拉力弹簧构成。每个轮爪都可以绕轮爪轴摆动,当其与路面接触时,轮爪在拉力弹簧和限位轴的共同作用下呈张开状态;当其与路面接触后,轮爪会在探测车的自身重力作用下向轮内摆动,这样就减小了越障轮的六边形效应带来的行走不平稳现象。在这样的基础上设计了新型轮爪式越障轮,其剖视图如图2所示。

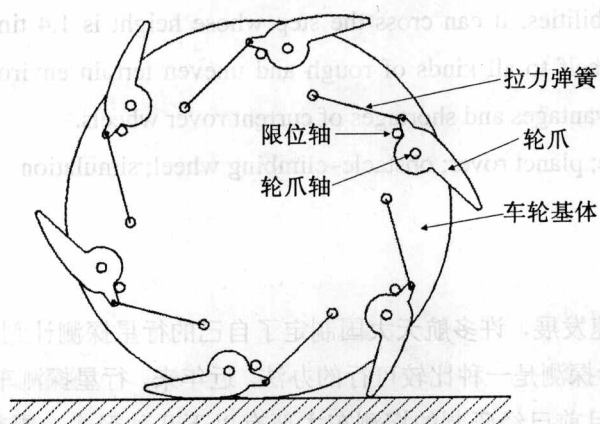


图1 新型轮爪式越障轮的原理图

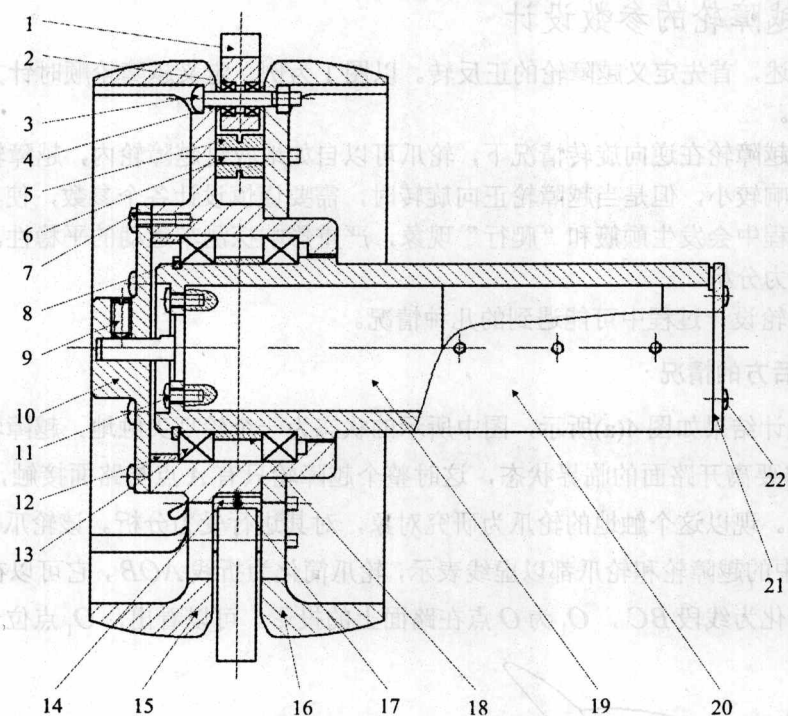


图2 新型轮爪式越障轮的剖视图

1.轮爪; 2.轮爪轴承; 3.轮爪螺钉和螺母; 4.轮爪轴承挡圈; 5.车轮顶套; 6.顶套螺钉和螺母; 7.端盖螺钉; 8.卡环; 9.紧定螺钉; 10.车轮端盖; 11.电机安装螺钉; 12.大挡环; 13.轴承; 14.限位螺钉和螺母; 15.外轮; 16.内轮; 17.拉力弹簧; 18.小挡环; 19.电机组件; 20.电机安装座; 21.电机安装盖; 22.电机安装盖螺钉

该新型轮爪式越障轮的三维模型如图3所示,其中包括了转向机构和越障机构。转向机构负责越障轮的转向,越障机构(其剖视如图2所示)负责抓住地面驱动探测车前行,两大机构均选择直流伺服电机做动力部件。从图3中可以看到,为了保持良好的转向灵活性,越障轮基体仍为传统的圆形,为增强与地面的摩擦力,其周向刻有沟槽。为了便于轮爪的安装和受力平衡,越障轮分为两部分(见图2中的外轮和内轮),轮爪安装在两者中间。



图3 新型轮爪式越障轮的三维模型图

2 新型轮爪式越障轮的参数设计

为方便下文的叙述,首先定义越障轮的正反转。以图1为例,定义越障轮顺时针方向旋转为正转,逆时针方向旋转为反转。

根据以上定义,越障轮在逆向旋转情况下,轮爪可以自如地收进越障轮内,越障轮的六边形效应对探测车的运动平稳性影响较小,但是当越障轮正向旋转时,需要谨慎设计各个参数,使其满足一定的条件,否则探测车在前进过程中会发生颠簸和“爬行”现象,严重影响探测车运动的平稳性。因此,需要对越障轮正转的情况进行受力分析。

下面分析在越障轮设计过程中可能遇到的几种情况。

2.1 O_1 点位于A点后方的情况

如果越障轮的设计结果如图4(a)所示,图中所示的状态为一个轮爪尖触地,越障轮将所有重力都作用于A点,越障轮将要离开路面的临界状态,这时整个越障轮只有A点与路面接触,当然也只有A点受到来自路面的支持力。现以这个触地的轮爪为研究对象,对其进行受力分析。该轮爪的受力图如图4(b)所示,为便于分析,图中的越障轮和轮爪都以虚线表示,轮爪简化为折线AOB,它可以在外力的作用下绕O点摆动,拉力弹簧简化为线段BC, O_1 为O点在路面上的投影。可以看出, O_1 点位于A点后方。

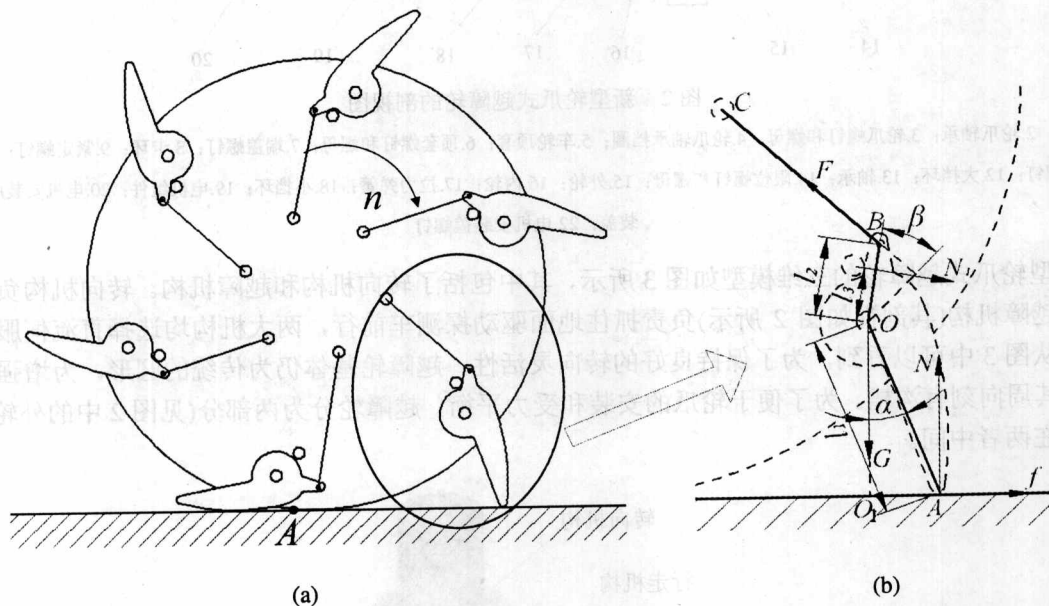


图4 O_1 点落在A点后方的受力图

从图4(b)的受力分析中可以看出,轮爪此时符合以下的力矩平衡方程

$$Nl_1 \sin \alpha + fl_1 \cos \alpha + Fl_2 \cos \beta = N_1 l_3 \quad (1)$$

式中: N ——路面在A点对越障轮的支持力; N_1 ——限位轴对轮爪的支持力; l_1 ——OA的长度; l_2 ——OB的长度; l_3 —— N_1 的力臂长度; α ——图4状态下OA与竖直线的夹角; β ——图4状态下OB与BC的垂线的夹角; f ——A点与路面的摩擦力; F ——弹簧BC的拉力。

由于轮爪处于力矩平衡状态中,所以当 O_1 点落在A点后方时轮爪不会绕O点转动,也就不可能收入越障轮内。此时可以得出越障轮平稳前进的第一个条件:当A点触地时, O_1 点要位于A点前方。

下面分析 O_1 点位于A点前方的情况。