

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.02.018

三自由度海浪模拟器运动分析和控制系统设计^{*}

王仕奇¹, 李向国^{1,2*}, 梅志千^{1,2}, 朱灯林^{1,2}

(1. 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022; 2. 常州市特种机器人及智能技术实验室, 江苏 常州 213022)

摘要:针对船舶及船用设备在研发过程中的陆上海浪模拟问题,对一种采用 3 自由度并联机构的 3 自由度波浪模拟器的机械结构设计,工作空间分析及运动控制系统进行了研究。推导了 3-RPS 并联机构基于欧拉角的逆运动学分析,在 Matlab 中运用边界搜索法计算了海浪模拟器的工作空间;使用 SolidWorks 建立了海浪模拟器的三维模型并进行了运动学和动力学的仿真,加工零件并装配完成了海浪模拟器的机械结构本体,采用固高科技的嵌入式运动控制器作为控制核心设计了完整的控制系统;开展船舶受海浪影响下的运动模型分析,取得特定海浪环境下的船舶运动样本,使用该样本在海浪模拟器进行了试验。研究结果表明:模拟器具有完整的海浪模拟功能,能够实现自动曲线跟随、手动控制等多项功能。

关键词:海浪模拟;3-RPS 并联机构;工作空间;运动控制

中图分类号:TP242

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)02-0201-05

Motion analysis and control system design of 3DOF wave simulator

WANG Shi-qi¹, LI Xiang-guo^{1,2}, MEI Zhi-qian^{1,2}, ZHU Deng-lin^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. Changzhou Key Laboratory of Special Robot and Intelligent Technology, Changzhou 213022, China)

Abstract: Aiming at the problem of onshore wave simulation in the development of ships and marine equipment, the mechanical structure design, workspace analysis and motion control system of a 3DOF wave simulator using a 3DOF parallel mechanism were studied. The inverse kinematics analysis of the 3-RPS parallel mechanism based on Euler angles was derived. The working space of the wave simulator was calculated by using the boundary search method in Matlab. The 3D model of the wave simulator was built using SolidWorks, the kinematics and dynamics simulation was performed, the parts of the wave simulator were machined and assembled. The Googol embedded motion controller was used as the control core to design a complete control system. After the analysis of the motion model of the ship under the influence of the waves, the ship motion sample under the specific wave environment was obtained, and the sample was used to test the wave simulator. The results indicate that the simulator has complete wave simulation functions including automatic curve following, manual control, and other functions.

Key words: wave simulation; 3-RPS parallel mechanism; workspace; motion control

0 引 言

在船舶和船用设备的研发过程中,设备需要在模拟的海浪环境下进行试验。目前采用的主要试验方法有两种:(1)在专业的港航实验室,通过造波机生成海

浪;(2)使用海浪模拟器实现海浪模拟。造波机试验具有成本高、危险性大等缺点^[1],而海浪模拟器具有可控性好、经济和可靠的特点^[2]。

并联机构适合用于海浪模拟器的机械结构。目前的海浪模拟器大多采用 6 自由度并联机构(即 Stewart

收稿日期:2019-06-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375140)

作者简介:王仕奇(1994-),男,四川巴中人,硕士研究生,主要从事机电系统控制方面的研究。E-mail: wangsq30@foxmail.com

通信联系人:李向国,男,讲师。E-mail: hhlxg@hhu.edu.cn

平台),能实现 6 个自由度的运动模拟(垂荡、纵荡、横荡、横摇、纵摇和艏摇)。李继东^[3]采用 Stewart 机构和液压伺服驱动方式设计了并联六自由度船舶模拟器;魏亮^[4]采用了 Stewart 机构,使用西门子 S7-300PLC 实现了 Stewart 平台的运动控制,并开发了一种 6 自由度海浪模拟器。但 Stewart 结构的海浪模拟器结构复杂、运动耦合度高、造价高昂,而且很多船用设备使用了船舶动力定位技术^[5],消除了船体的纵荡、横荡和艏摇,这种情况下使用 6 自由度模拟器会造成资源浪费。事实上具有横摇、纵摇和垂荡 3 个自由度的海浪模拟器即可满足模拟要求。

海浪模拟器的误差主要由机械加工、装配误差和控制系统控制误差构成。相比于 6 自由度海浪模拟器,3 自由度海浪模拟器的误差主要集中于横摇、纵摇和垂荡这 3 个主动输入运动,而这 3 个固定自由度的附加运动误差远小于输入运动的误差,可忽略不计。

本文采用三转动副-移动副-球副(3-RPS)并联结构,具有 2 个旋转自由度和 1 个移动自由度;并对 3-RPS 并联结构进行运动学和工作空间分析,设计其运动控制系统。

1 运动学与工作空间分析

1.1 海浪模拟器的机械结构

模拟器由动平台、基座和 3 个对称分布的运动支链组成。3 个支链通过铰链与基座连接,再通过球铰与动平台连接,铰链的转动轴线垂直于基座,与动平台的中心连线;铰链和球铰均匀分布在基座和动平台上,构成两个正三角形;支链中的移动副由 3 个电动缸构成。电动缸采用 Lim-Tec 的 DMB20,采用松下伺服电机作为驱动,使用同步带和滚珠丝杠传动,3 个接近开关作为正、负限位和原点信号。

海浪模拟器结构参数如表 1 所示。

表 1 海浪模拟器结构参数

结构参数	数值
动平台直径/mm	420
动平台铰圆直径/mm	390
基座直径/mm	520
基座铰圆直径/mm	400
动平台零点高度/mm	465
球铰允许角度/(°)	15

1.2 逆运动学分析

3-RPS 并联机构的正运动学分析要求解一组具有强耦合性的非线性方程组,复杂度高,不利于实时运动控制^[6];逆运动学求解简单、方便编程实现,可用于运动控制。

本文分别在基座和动平台上建立静坐标系和动坐标系。

3-RPS 并联机构坐标系如图 1 所示。

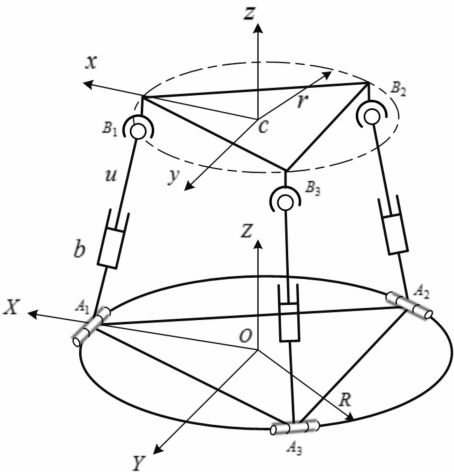


图 1 3-RPS 并联机构坐标系

该坐标系以 3 个转动副的铰支点组成正三角形 $A_1A_2A_3$,中心 O 为静坐标系的坐标原点, OA_1 为坐标系的 X 轴; Z 轴过 O 点与静平台垂直,其正方向向上;根据右手法则可以确定 Y 轴及其方向。动坐标系 $C-xyz$ 与静坐标系的建立过程类似。由 Kutzbach Grubler 公式可求得 3-RPS 的自由度^[7]:

$$F = 6 \times (n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (1)$$

式中: n —杆件的数目; g —运动副的数目; f_i —第 i 个铰链的自由度数。

求得 3-RPS 并联机构的自由度为 3,分别是 2 个旋转自由度和 1 个移动自由度,满足海浪模拟器自由度的要求。

本文采用绕旋转轴的 $Z-Y-X$ 欧拉角来描述动平台的姿态,由绕旋转轴的 $Z-Y-X$ 欧拉角即可得动平台在该位姿的旋转矩阵,加入动平台的中心点坐标,将旋转矩阵扩展为包括了刚体平移的齐次变换矩阵 T 。通过矩阵 T 和 3 个铰支点在静坐标系中的坐标,即得出某一位姿时动平台的 3 个铰支点在静坐标系中的坐标^[8],即:

$$\begin{bmatrix} B'_{ix} \\ B'_{iy} \\ B'_{iz} \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} B_{ix} \\ B_{iy} \\ B_{iz} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中: B'_i —第 i 个动平台铰支点在静坐标系中的坐标。

进一步可求得 3 个移动副的长度为:

$$L_i = \| B'_i - A_i \| \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

式中: A_i —第 i 个基座铰支点在静坐标系中的坐标;

L_i —第 i 个移动副的长度。

由基座 3 个铰链的运动可知, 3 个铰链将支链的运动限制在 3 个平面内, 其约束方程为:

$$\begin{cases} B'_{1Y} = 0 \\ B'_{2Y} = \sqrt{3} B'_{2X} \\ B'_{3Y} = -\sqrt{3} B'_{3X} \end{cases} \quad (4)$$

由这 3 个约束条件, 可以求得动平台的附加运动, 即:

$$\begin{cases} C_X = -\frac{r}{2}(c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma - c\beta c\gamma) \\ C_Y = -rc\beta s\gamma \\ \gamma = \arctan \frac{s\alpha s\beta}{c\beta + c\alpha} \end{cases} \quad (5)$$

式中: C_X —动平台中心点的 X 轴坐标; C_Y —动平台中心点的 Y 轴坐标; γ —动平台绕 Z 轴的旋转角度。

由此可以看出, 动平台的运动只有 3 个独立参数, 即绕 X, Y 轴的旋转角度和原点高度。

1.3 工作空间分析

3-RPS 并联机构的工作空间, 指末端执行件在驱动件和各关节的运动范围内能达到的位置。本文选择动平台的中心点位置集合表示海浪模拟器的工作空间, 主要由移动副的行程和各关节的极限角度决定^[9]:

(1) 电动缸的行程为 100 mm, 初始长度为 465 mm, 所以移动副的有效长度为 415 mm ~ 515 mm;

(2) 在移动副的有效长度内静平台铰链的运动角度不会超出允许角度, 所以关节角度的限制由球铰的允许角度决定。在动平台某一位姿时球铰的角度即为动平台和电动缸杆的夹角, 该夹角 λ 可以由动平台的法向量和电动缸的方向向量求得, 即:

$$n = \frac{(B'_2 - B'_3) \times (B'_2 - B'_1)}{\| (B'_2 - B'_3) \times (B'_2 - B'_1) \|} \quad (6)$$

$$l_i = \frac{B'_i - A_i}{L_i} \quad (7)$$

$$\lambda = \arccos(nl_i) \quad (8)$$

式中: n —动平台的法向量; l_i —第 i 个移动副的方向

向量。

工作空间的求解采用极限边界搜索法^[10], 即先将机构的输入参数离散, 在指定范围内将 α, β 角和 C_z 随机取若干个值, 得到若干组输入参数值; 然后通过逆运动学分析, 求得每组输入参数值对应的移动副长度和关节角度, 判断是否满足允许值, 若满足则该组输入对应的动平台中心点处于工作空间内, 反之则在工作空间外。实际编程时, 对 C_z 进行分层, 在每层中求解 α, β 角度范围内工作空间的边界, 将每层的边界组合起来, 即得到总的工作空间。本研究中采用的球铰的允许角度为 15° , 在 Matlab 中编程求解工作空间。

工作空间 Z 轴截面如图 2 所示。

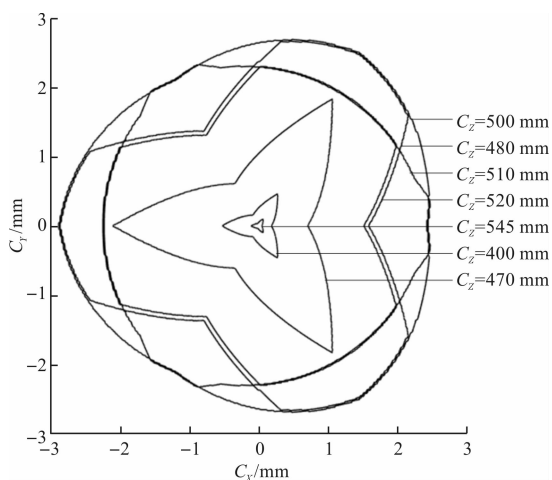


图2 工作空间 Z 轴截面图

从图 2 可以看出: 看出海浪模拟器的工作空间在初始位置附近成柱形, 由初始位置向两端收缩为锥形, 整体工作空间关于 3 个约束平面对称, 这也验证了前文逆运动学分析的结果。

2 控制系统设计

海浪模拟器的控制目的是使上平台跟随输入的 α, β 角和 C_z 曲线运动, 即先根据输入的 3 个运动参数进行逆运动学分析, 求解出 3 个驱动杆的长度, 然后进行数据处理, 获得 3 个电动缸的电机参数, 控制电机实现动平台的位姿跟随输入曲线变化。

2.1 硬件组成

本文以 CPAC 为平台, 开发海浪模拟器的控制系统, 其控制核心为固高科技的 GUS 嵌入式多轴运动控制器。伺服电机作为被控对象, 手持式示教器作为输入和显示设备, 磁性接近开关、编码器和电子罗盘作为反馈设备, 组成了完整控制系统。GUS 嵌入式运动控

制器集成了工业 PC 和运动控制处理器,系统处理器采用英特尔的 CPU,运动控制处理器为 DSP 和 FPGA 芯片^[11-13]。采用 CPAC 的平台,可简化控制系统结构和控制系统的开发流程,提高控制的精度。

控制系统硬件结构如图 3 所示。

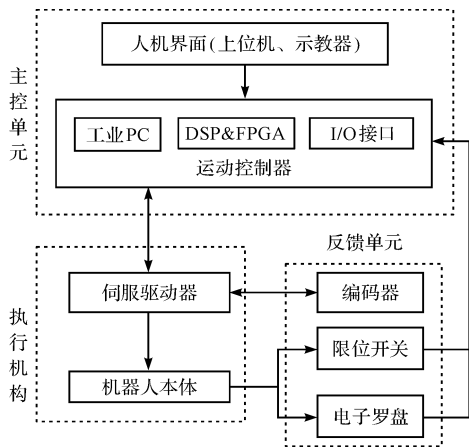


图 3 控制系统硬件结构图

2.2 软件设计

系统软件使用 CPAC 平台中的 Otostudio 环境进行开发,在 WinCE 系统中运行。控制软件的结构分为人机界面、运动控制、运动学反解等 5 个主模块,实现海浪运动模拟、上平台手动调试等功能。其中,自动曲线跟随模块是实现海浪模拟的主要模块。

海浪模拟流程图如图 4 所示。

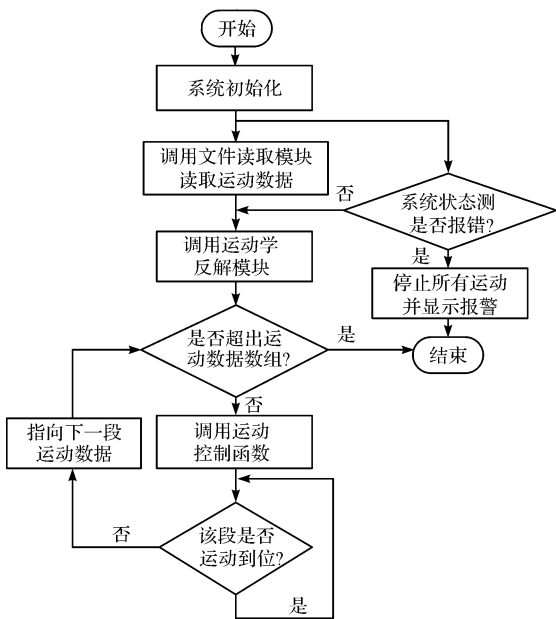


图 4 海浪模拟流程图

图 4 中,先通过人工示教或者文件读取方式,获得动平台的位姿曲线,然后调用运动学反解模块,计

算出 3 个电动缸的位置参数,最后调用运动模块,使动平台跟随输入曲线运动,并保存动平台实际位姿变化曲线。

3 海浪模拟实验及结果分析

3.1 海浪影响下的船舶运动

目前普遍采用皮尔逊-莫斯科维奇谱(P-M 谱)来描述海浪的运动。我国海洋局公布的半经验公式 P-M 谱为:

$$S_b(\omega) = \frac{0.74}{\omega^5} \cdot \exp\left[-\frac{96.2}{\omega^2 U^2}\right]$$
 (9)

式中: ω —圆频率; U —平均风速。

根据海浪谱的输入和船舶运动的传递函数,即可求出船舶的运动谱,进而得到船舶的横摇、纵摇和垂荡运动样本^[14]。

以船舶的横摇运动为例,平均风速 $U = 10 \text{ m/s}$,时间长度为 30 s,取得一个横摇运动样本,如图 5 所示。

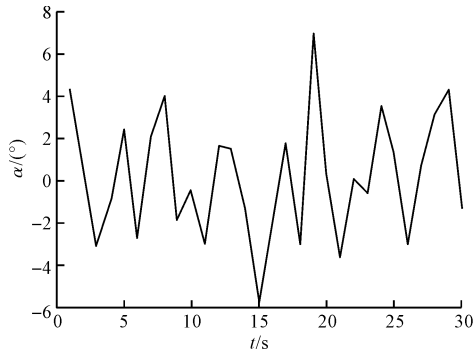


图 5 横摇运动样本

3.2 海浪模拟器实验结果及分析

本研究将船舶运动样本输入到控制系统中,模拟船舶横摇摆动,动平台绕 X 轴的角度由固定在动平台中心的电子罗盘得到。

动平台 α 角实际运动曲线与理想输入曲线的对比如图 6 所示。

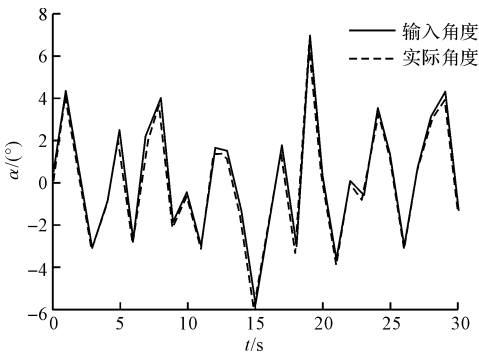


图 6 动平台角度输入曲线和实际曲线对比图

图6中:输入角度和输出角度的平均误差为 0.36° ,最大误差出现在18 s处,此时动平台速度达到最大值。实验结果表明,海浪模拟器能够很好地模拟锚定船舶在海浪中的运动。

4 结束语

本文研究了一种采用3-RPS并联机构的海浪模拟器,建立了三维模型,并推导了其运动学逆解,分析了其工作空间;开发了海浪模拟器控制系统,实现了船舶在海浪作用下的运动模拟;最后,求得了特定海浪环境下的一个船舶运动样本,并在模拟器上进行了实验。

实验结果表明,3-RPS并联海浪模拟器能准确模拟海浪环境。

参考文献(References):

- [1] 刘毅,程少科,郑堤. 大功率造波机中驱动技术的研究现状与展望[J]. 机械工程学报,2016,52(24):155-163.
- [2] 王志兵,李杏清,袁从贵. 基于Matlab程序设计的船舶舵机系统动态仿真[J]. 舰船科学技术,2017,39(6):52-54.
- [3] 李继东. 电液伺服并联六自由度船舶模拟器控制研究[D]. 燕山:燕山大学机械工程学院,2015.
- [4] 魏亮. 并联六自由度平台海浪运动仿真控制系统研究[D]. 镇江:江苏科技大学能源与动力学院,2017.
- [5] 郭云鹏,陈柏,吴洪涛. 一种六自由度海浪模拟并联平台的零点标定与性能评估[J]. 机电工程,2015,32(2):169-174.
- [6] 胡映光,胡明,刘军红. 基于混合遗传算法的3-RPS并联机构正解[J]. 组合机床与自动化加工技术,2017(6):34-36.
- [7] 刘天柱. 基于3-RPS并联机构的自调平升降机设计与研究[D]. 淄博:山东理工大学机械工程学院,2017.
- [8] LI Xiang-guo, ZHU Deng-lin, MEI Zhi-qian, et al. Kinematic analysis of 3-RPS parallel mechanism[C]. 2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering, Shanghai: IEEE, 2017.
- [9] JHA R, CHABLAT D, BARON L. Influence of design parameters on the singularities and workspace of a 3-RPS parallel robot[J]. **Transactions- Canadian Society for Mechanical Engineering**, 2018,42(1):30-37.
- [10] 韦岩,李冉冉,张鲁浩,等. 基于运动学正解的Delta机器人工作空间分析[J]. 机械制造与自动化,2018,47(1):173-175,180.
- [11] 杨帆. 基于CPAC的SCARA机器人控制系统的研究[D]. 武汉:湖北工业大学机械工程学院,2016.
- [12] 耿英博,杜向阳,张克平,等. 基于EtherCAT总线的涂胶机器人控制系统设计[J]. 轻工机械,2018,36(1):74-78.
- [13] 刘新乐,李红果,陶益林,等. 基于现场总线技术机器人码垛控制系统设计[J]. 包装与食品机械,2017(3):41-44.
- [14] 汪亭玉,梁忠诚. 一种模拟波浪中船载光通信机运动的实验平台[J]. 中国造船,2009,50(4):127-134.

[编辑:程浩]

本文引用格式:

王仕奇,李向国,梅志千,等. 三自由度海浪模拟器运动分析和控制系统设计[J]. 机电工程,2020,37(2):201-205.

WANG Shi-qi, LI Xiang-guo, MEI Zhi-qian, et al. Motion analysis and control system design of 3DOF wave simulator[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020,37(2):201-205.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>