

# 火控系统测试用6自由度运动模拟器研制

何景峰<sup>1</sup>, 靳 军<sup>1</sup>, 李保平<sup>2</sup>, 叶正茂<sup>1</sup>, 韩俊伟<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001, hjfeng@hit.edu.cn; 2. 中兵光电科技股份有限公司, 北京 100176)

**摘要:** 为了能够在实验室内对火控系统进行综合性能试验, 采用液压驱动6自由度Gough-Stewart机构对载体的各种运动状态进行模拟. 利用Gough-Stewart机构机械系统动力学和液压驱动系统之间的力/力矩和速度双向作用关系, 将机械系统动力学模型和液压驱动系统模型相结合, 建立了并联机构整体动力学模型. 对运动模拟器的自由度耦合特性进行分析和实验研究. 结果表明, 自由度间耦合在系统固有频率范围内具有随着运动频率的提高而增强的特点. 针对运动模拟器的安全保护问题, 采用一种根据支腿长度直接对工作空间中的奇异区进行判别的方法, 避免了使用复杂、耗时的雅克比矩阵条件数判断奇异性的方法, 采用幅相控制(APC)和随机波复现技术, 使正弦波和随机波的复现精度都得到了明显提高.

**关键词:** 运动模拟器; 并联机构; Gough-Stewart机构; 耦合

中图分类号: TP242.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)07-1066-05

## Development of 6-DOF motion simulator for firing control system testing

HE Jing-feng<sup>1</sup>, JIN Jun<sup>1</sup>, LI Bao-ping<sup>2</sup>, YE Zheng-mao<sup>1</sup>, HAN Jun-wei<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, hjfeng@hit.edu.cn;  
2. Chinanorth Optical-Electrical Technology Co., Ltd. Beijing 100176, China)

**Abstract:** The hydraulically driven 6-DOF parallel Gough-Stewart mechanism was used as a motion simulator to simulate the real motions of carrier for testing firing control systems in laboratory. The bidirectional force/torque versus velocity interactions between mechanical dynamics system and its hydraulic driving system was explored to establish an integrated dynamic model. Then the couplings of pose outputs were presented and experimental results show that the couplings between these outputs will become more intense with the increase of motion frequency within natural frequency of the Gough-Stewart mechanism. Moreover, for the safety of the motion simulator, a simple criterion which only uses the lengths of legs instead of complicated and time-consuming method of condition number of Jacobian is proposed to distinguish singular area from the workspace. Amplitude and Phase Control (APC) and random wave duplication techniques were employed to greatly improve the simulation fidelity not only for sine waveform but for random waveform as well.

**Key words:** motion simulator; parallel mechanism; Gough-Stewart mechanism; coupling

火控系统是移动作战平台的重要组成部分, 为了提高武器系统综合作战能力, 必须提高火控系统的综合性能, 其中火控系统的动态性能测试试验是火控系统产品研制中的重要环节. 在以往的产品研制中, 火控系统的动态性能测试试验多数采用外场试验来调试验证, 调试难度大、周期

长. 经过调研和论证, 哈尔滨工业大学与项目合作单位确定和提出了采用六自由度(6-DOF)运动模拟器实现对载体的运动进行模拟.

本项目运动模拟器用于模拟试件在三级和四级海况条件下, 以及在复杂地形条件下行进时的运动状态, 为装甲车辆火控稳瞄系统研制和性能测试提供真实的环境模拟. 根据研制需求, 六自由度运动模拟器要求能够模拟车辆在各种路面条件下的姿态变化, 模拟舰载平台或武器在浮渡中的

收稿日期: 2009-03-17.

作者简介: 何景峰(1974—), 男, 博士, 讲师;

韩俊伟(1964—), 男, 教授, 博士生导师.

姿态变化,可以实现各种标准波形和随机波形的姿态运动。

并联机构的研究工作最早可以追溯到几个世纪以前,当时英国和法国几何学家正在进行多面体的研究<sup>[1]</sup>。1962年英国学者 Eric Gough 博士提到的一种并联运动机构<sup>[2]</sup>,并将该机构用于轮胎测试中。1964年 Klaus Cappel 独立地设计了6自由度运动平台用于飞行模拟器,并在1967年10月申请了美国专利<sup>[3]</sup>。随后,在1965年,Stewart 提出将6自由度并联机构用于飞行模拟器的运动系统<sup>[4]</sup>,并引起了学术界的广泛关注。此后,各国学者对并联机构进行了广泛的研究,并在多个研究领域取得重要进展。尽管如此,关于并联机构的研究,特别是六自由度 Gough-Stewart 机构,其很多问题仍然尚未很好解决,直到现在仍然是并联机构研究的热点问题。例如,位置正解的解析解问题<sup>[5]</sup>,工作空间<sup>[6]</sup>、奇异性研究<sup>[7-8]</sup>,控制策略<sup>[9-10]</sup>和优化设计问题<sup>[11]</sup>等。

本文以火控系统测试用的运动模拟器为研究背景,在该运动系统研制中进行了大量的理论研究和实验工作,包括多刚体动力学和整体模型的建立,动力学耦合的研究,奇异性分析,结构优化设计和控制方法研究。

## 1 运动模拟器组成与原理

运动模拟器采用典型的液压驱动6自由度 Gough-Stewart 机构。它由上平台、上虎克铰、液压缸、伺服阀、下虎克铰和固定平台组成,如图1所示。6根液压缸在伺服阀的控制下进行伸缩运动,从而推动上平台和负载实现空间6个自由度的运动,包括横摇、俯仰、偏航、纵向、横向、升沉方向运动,从而实现车辆、舰船的姿态变化,以便对火控系统动态测试提供逼真的模拟环境。图2为本项目设计的6自由度运动模拟器实物照片,该运动模拟器最大载荷为8 t,运动范围为3向平移为±0.8 m,3个转动角度±30°。

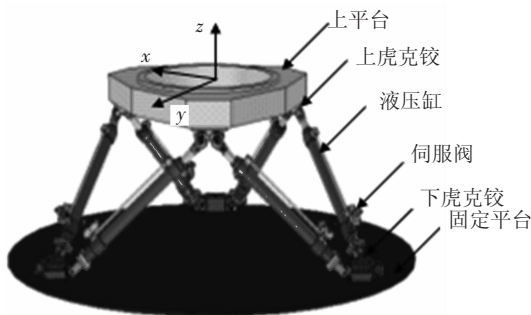


图1 6-DOF 运动模拟器

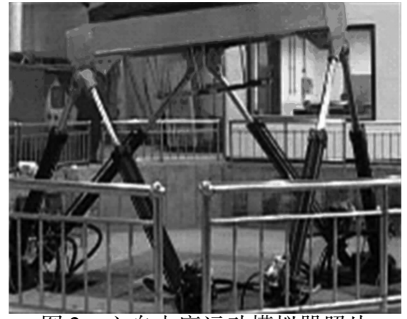


图2 六自由度运动模拟器照片

## 2 建模、分析与控制方法

### 2.1 整体动力学模型

运动模拟器是液压驱动的并联运动平台,该运动平台是一种典型的并联机构。如果将上平台及负载看作为一个刚体,运动模拟器共包含13个刚体,分别为6个液压缸活塞及活塞杆、6个液压缸缸筒以及1个上平台及负载。运动模拟器的拉格朗日动力学方程<sup>[12]</sup>为

$$J_{lq}^T(q)f_a = M_s(q)\ddot{q} + C_s(q, \dot{q}) + G_s(q). \quad (1)$$

式中:  $M_s(q)$  为惯性坐标系下质量矩阵,  $C_s(q, \dot{q})$  为惯性坐标系下哥氏/向心力项,  $G_s(q)$  为惯性坐标系下重力项,  $J_{lq}(q)$  为运动模拟器的雅克比矩阵,  $q$  为上平台广义坐标向量。

运动模拟器运动所需的驱动力由6套液压系统提供。6套液压系统动力学模型可以用向量形式的微分方程表示,可以写成下面几个方程。

伺服阀流量方程:

$$Q_L = K_q x_v - K_c P_L; \quad (2)$$

液压缸连续性方程:

$$Q_L = A\dot{l} + C_{tc}P_L + C_r\dot{P}_L; \quad (3)$$

液压驱动系统和负载间的力平衡方程:

$$P_L A = f_a + B_c \dot{l}. \quad (4)$$

方程式(2)~(4)中各符号的物理意义见文献[13],这里不再赘述。

根据机械和液压相互作用关系,可以将上面得到的多刚体动力学与6套液压驱动系统动力学相结合,得到了6自由度运动模拟器的完整动力学模型,如图3所示。

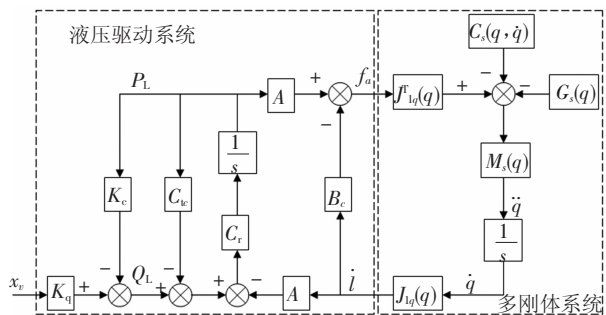


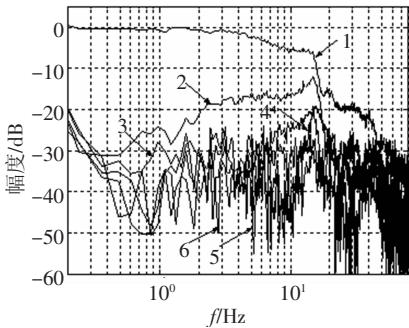
图3 运动模拟器整体动力学模型

利用该动力学模型可以对并联机构进行动态特性分析,例如,运动模拟器固有频率和耦合特性等,从而揭示并联机构内在的本质动力学特性。

## 2.2 动力学耦合

当运动模拟器沿着某一个自由度运动时,会在其他自由度方向产生一定的位姿输出,称之为耦合输出。在项目研制中,对动力学耦合进行了深入分析,并给出了运动模拟器的耦合与运动频率的关系<sup>[13]</sup>。

运动模拟器6个自由度对 $x$ 向平移运动的频率响应特性,如图4所示。图4中曲线1~6分别为 $y$ 向平移、绕 $x$ 轴旋转、绕 $y$ 轴旋转、 $x$ 向平移、 $z$ 向平移、绕 $z$ 轴旋转对 $y$ 向平移的频率特性。可见, $y$ 向平移对绕 $x$ 轴旋转耦合最大,此时的最大耦合输出发生在频率约为10.5 Hz。同时,运动模拟器的 $y$ 向平移自由度在该频率处具有一个谐振峰,相当于由机械系统和液压油柱形成的固有频率。



1— $y$ 向平移; 2—绕 $x$ 轴旋转; 3—绕 $y$ 轴旋转;  
4— $x$ 向平移; 5— $z$ 向平移; 6—绕 $z$ 轴旋转

图4 自由度输出的耦合特性(实验结果)

由图4也可以看出,运动模拟器自由度间的耦合程度与运动频率有关,在低频区耦合很小,随着运动频率的提高,耦合也逐渐增大,当运动频率接近运动模拟器固有频率附近时,耦合达到最大,之后,随着运动频率的进一步增加,耦合很快减小。

## 2.3 奇异性分析

奇异性是运动模拟器的重要研究内容。当运动模拟器处于奇异位形时,其雅克比矩阵的行列式为零。此时,机构的运动和力传递特性变得非常差,甚至会造成机构的破坏。实际上,即使运动模拟器尚未到达奇异位形,而只是在奇异位形附近的区域时,机构的运动和动力特性就已经变得很差了,在实际应用中应该避免。为了表征这种奇异区,可利用机构在该位形时各个液压缸所受到的最大静态力是否超出该缸设计的最大驱动力为依据。

当运动模拟器接近奇异位形时,各个缸所受静态力显著增加,如图5所示。

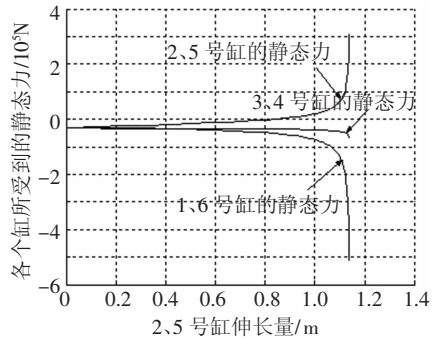


图5 液压缸静态力变化

图5中,纵坐标为液压缸所受到的静态力。负值表示压力,正值表示拉力。曲线1为2、5号缸所受的静态力,曲线2为1、6号缸所受的静态力。曲线3为3、4号缸所受的静态力。由图5可见,在2、5号缸伸长过程中,各个缸的受力呈现单调增加。这种特点是十分危险的,因为这意味着一旦运动模拟器向奇异位形靠近,当各个缸受力增大到该液压缸无法提供的压力或者拉力时,运动模拟器将被被动地继续向奇异位形靠近,最终达到奇异位形,会造成运动模拟器破坏。

同时,研究表明,当运动模拟器处于奇异位形附近时,其位形特点是某些缸很长,而某些很短,运动模拟器处于极端的姿态。为此,提出了以下的奇异位形判别条件<sup>[13]</sup>:

$$L_2 + L_5 - (L_1 + L_6) > S_H, \quad (5)$$

$$L_1 + L_4 - (L_2 + L_3) > S_H, \quad (6)$$

$$L_3 + L_6 - (L_4 + L_5) > S_H. \quad (7)$$

式中:  $S_H$  为奇异性特征长度(本项目  $S_H = 2$ ),  $L_i$  为第  $i$  号液压缸的长度。

满足上述不等式任何一个,运动模拟器将接近奇异区。表明此时的位形很危险,需要控制系统立刻实施保护措施,避免进入奇异区。这种奇异区判别方法直接利用了支腿长度信息而无须计算雅克比矩阵的条件数,能够嵌入到实时控制系统中进行在线判别,并及时进行系统保护,这对6自由度运动模拟器的实时奇异区检测和奇异避让具有非常重要的价值。

## 2.4 结构优化设计

设计一台运动模拟器时,需要确定运动模拟器的机构形式,需要对机构的结构参数进行分析和设计,本项目以结构紧凑为优化目标,以满足运动参数要求为约束条件,对运动模拟器的结构参数进行了优化设计。结构紧凑指的是当运动模拟器处于工作零位时,上铰分布圆和下铰分布圆所

围成的体积.这个优化目标的提出主要基于以下两个方面考虑:

1) 对于给定的运动参数,例如平台的位移、速度等,在满足这些运动参数的条件下,几何结构越小,对应的液压缸行程越小,从而液压缸运动速度也小,意味着可以选择更小的液压源流量和伺服阀,这样有利于节约系统运行成本;

2) 运动模拟器的频率特性除了与机构的几何尺寸有关外,也与液压缸的行程有关.液压缸行程越短,其油柱等效刚度就越大,那么运动模拟器等效的结构刚度就越高,这有利于提高运动模拟器的动态特性.

上述两个方面涵盖了运动模拟器的性能和成本两个方面.将结构紧凑作为优化目标,将结构的固有频率和运动参数作为约束条件,利用序列二次规划方法(SQP方法)进行求解.利用该优化方法得到了一组最优解,作为运动模拟器的结构参数,如表1所示.

表1 6自由度运动模拟器结构参数

上铰圆半径	下铰圆半径	相邻上铰间距	相邻下铰间距	液压缸最短/最长缸长	工作零位时缸长
1.75	2.8	0.26	0.65	2.69/4.28	3.41

## 2.5 控制技术

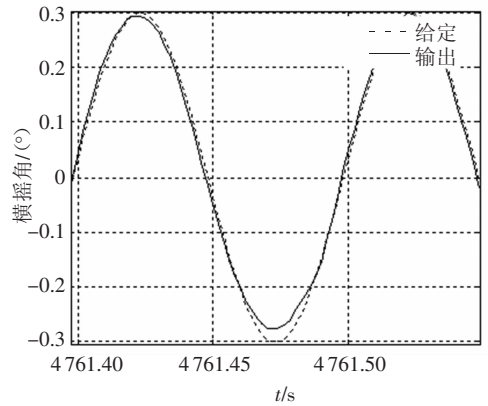
### 2.5.1 幅相控制

运动模拟器是一个典型的多输入多输出非线性系统.其各个自由度的位姿输出特性具有较大差别.为了实现对正弦信号的精确跟踪,使各自由度输出相位一致,采用基于Widrow-Hof算法的幅相控制技术<sup>[14]</sup>.图6是采用幅相控制时运动模拟器对10 Hz正弦信号的响应.以Y向平移为例,由于系统频宽(3 dB)在5 Hz左右,如不采用幅相控制对10 Hz信号的衰减将很大.而采用幅相控制,运动模拟器能够实现对更高频率的正弦信号的精确跟踪.

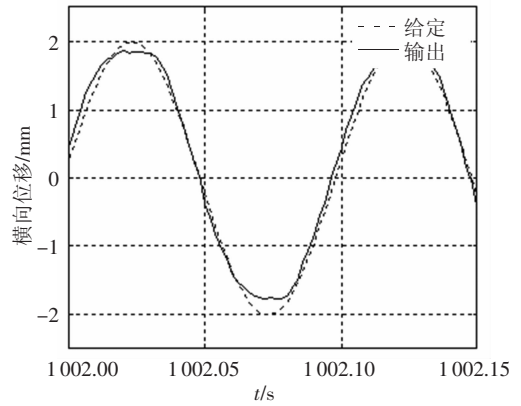
### 2.5.2 随机波复现

6自由度运动模拟器的位姿控制模式对正弦激励信号有衰减和滞后,幅相控制是一种有效的解决方案.然而,幅相控制技术对诸如随机波等非正弦的激励信号的复现就无能为力了.随机波复现技术是针对上述问题的有效解决方法.本项目采用基于EV模型的随机波复现技术<sup>[15]</sup>,实现对随机波的复现.如图7和图8所示,通过采用随机复现技术,运动模拟器的输出信号能够逼真期望信号,在1~4 Hz频带内,位姿输入输出的相干函数大于0.95,提高了运动模拟器对载体的振动环

境进行模拟的精度.



(a) 横摇角



(b) 横向位移

图6 幅相控制(APC)下的正弦波跟踪

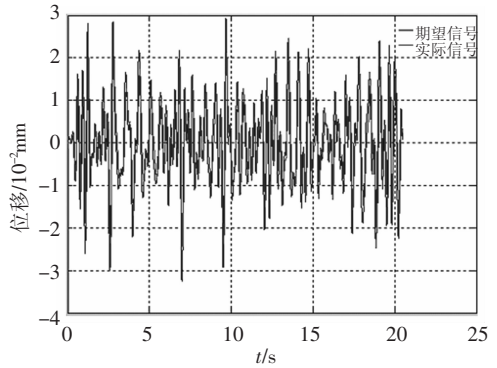


图7 随机波形的复现试验结果

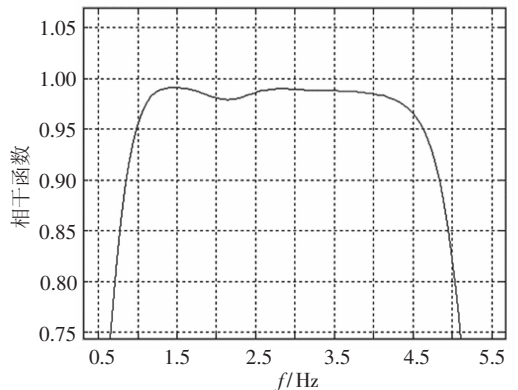


图8 位姿输入输出的相干函数



### 3 结 论

1) 采用基于 Gough-Stewart 机构的六自由度运动模拟器对载体的运动姿态进行模拟. 根据机械多刚体系统与液压驱动系统的作用机理, 建立了运动模拟器的整体动力学模型.

2) 对运动模拟器的奇异性进行了分析, 提出了以缸长为判别依据的奇异区判别方法. 该方法易于实现, 无须计算负载的雅克比矩阵条件数就可以对运动模拟器的状态进行判断.

3) 将幅相控制技术和随机波复现技术应用用于运动模拟器中, 提高了模拟器对载体运动环境模拟的准确性.

### 参考文献:

- [1] BONEV L. The True Origins of Parallel Robots[J/OL]. (2003-01-24) [2009-07-22]. <http://www.parallelic.org/Reviews/Review007.html>.
- [2] GOUGH E, WHITEHALL S G. Universal tyre test machine[C]//Proceedings of the FISITA Ninth International Technical Congress. London: [s. n.], 1962: 117-137.
- [3] CAPPEL K. Motion simulator; USA, 3295224[P/OL]. (1967-01-03) [2009-07-22]. <http://www.delphion.com/details?&pn10=US03295224>.
- [4] STEWART D. A Platform with Six Degrees of Freedom [C]//Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers. London: IME, 1965: 371-386.
- [5] JI Ping, WU Hongtao. A Closed-form forward kinematics solution for the 6—6 Stewart platform [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(4): 522-526.
- [6] MERLET J P. Determination of 6D workspace of gough-type parallel manipulator and comparison between different geometries[J]. International Journal of Robotics Research, 1999, 9(18): 902-916.
- [7] LI H D. The analytical singularity locus equation and the determination of singularity-free zones in the workspace of the general Gough-Stewart platform[D]. Canada: University Laval, 2005.
- [8] KIM D, CHNG W. Analytic singularity equation and analysis of Six-DOF parallel manipulators using local structurization method[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(4): 612-622.
- [9] GHORBEL F. Modeling and pd control of closed-chain mechanical systems[C]//Proceedings of the 34th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans: [s. n.], 1995: 540-542.
- [10] KOEKEBAKKER S H. Model Based Control of a Flight Simulator Motion System[D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2001.
- [11] HAO F, MERLET J P. Multi-criteria optimal design of parallel manipulators based on interval analysis [J]. Mechanism and Machine Theory, 2005, 40: 157-171.
- [12] 何景峰. 液压驱动六自由度并联机器人特性及其控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2007.
- [13] 李洪人. 液压控制系统[M]. 修订版. 北京: 国防工业出版社, 1990: 53-58.
- [14] 延皓, 叶正茂, 李洪人. 基于 Widrow-Hoff 学习算法的液压协调加载控制策略研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(3): 104-107.
- [15] 关广丰, 丛大成, 韩俊伟, 等. 随机振动功率谱复现迭代算法的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(6): 71-76.

(编辑 杨 波)