

漂浮基空间机械臂的三维微重力环境模拟方法探讨

张文辉^{1,2}

(1.丽水学院工学院,浙江丽水,323000;2.哈尔滨工业大学航天学院,黑龙江哈尔滨,150001)

摘要 首先针对空间机械臂微重力模拟方法的国际现状,分别从运动轨迹、模拟精度、建造周期及经济性等方面进行了详细综述。考虑到空间机械臂的三维运动特征,对三维空间微重力模拟这一难点问题进行了论述,进而提出了剪式三维气浮微重力环境模拟装置的方案,该方案具有较大伸缩比,结构紧凑,通过利用气浮法的优点解决了水平随动问题,集聚力反馈伺服控制系统解决了竖直方向随动问题,该方案为做复杂运动的空间机械臂提供了灵活的微重力模拟环境。

关键词 空间机械臂;三维微重力;地面模拟系统;气悬浮

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.02.020

中图分类号 TP273 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)02-0086-05

Discussion of Three-dimensional Microgravity Simulation Methods for Free-floating Space Manipulators

ZHANG Wen-hui^{1,2}

(1. School of Engineering, Lishui University, Lishui 323000, Zhejiang, China;

2. Harbin Institute of Technology, School of Astronautics, Harbin 150001, China)

Abstract: The paper discuss particularly international actuality from movement track, simulation precision, construct periods and economy character aspects to space manipulators. Three-dimensional microgravity simulation is emphasized in view of three-dimensional movement character. Scissor style gas suspension microgravity simulation equipment is put forward. The scheme integrates advantage of gas suspension, has flex big ratio and structure close, level has been solved by the use of the advantages of air flotation with dynamic, integrated force feedback servo control system can solve the problem of vertical direction with the move. The novel system can simulate the spatial microgravity environment with complex movement for space manipulators.

Key words: space manipulators; three-dimensional microgravity; ground simulation system; gas suspension

近年来我国空间技术获得了快速发展,不仅建立了“天宫”实验室,而且顺利完成了与“神舟”的交

会对接,并计划争取在 2020 年建立自己的长期有人居住空间站,为实现该目标,我国正加紧空间机械臂

收稿日期:2013-01-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61171189);国家科技支撑计划资助项目(2013BAC16B02);浙江省自然科学基金资助项目(LZ12F02001);浙江省公益技术资助项目(2012JYZB30);浙江省教育厅科技资助项目(Y201330000)

作者简介:张文辉(1980—),男,河南正阳人,副教授,博士,主要从事空间机器人动力学与控制的研究。E-mail:hit-zwh@126.com

引用格式: 张文辉.漂浮基空间机械臂的三维微重力环境模拟方法探讨[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(2):86-90. ZHANG Wen-hui. Discussion of three-dimensional microgravity simulation methods for free-floating space manipulators[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(2): 86-90.

的研发进程^[1]。

空间机械臂一般是多自由度的双臂杆机械臂,在执行轨迹跟踪、抓取、轨迹规划等任务时,其运动状态在空间上呈现三维立体的运动轨迹。因此微重力模拟装置必须配合空间机械臂完成各种运动轨迹,并尽量在不改其动力学特性的情况下,在地面上为其营造一个微重力环境,以便开展机械臂的各种试验研究。因此空间微重力环境的地面模拟平台作为至关重要的部分对于整个实验研究的顺利开展具有重要意义^[2-4]。

为了验证空间机械臂轨迹跟踪、抓取、轨迹规划等问题,开展必要的地面试验是不可或缺的关键步骤。由于空间机械臂一般是多自由度的双臂杆机械臂,其运动状态在空间呈现三维运动轨迹。其微重力模拟系统必须能够配合空间机械臂在整个三维运动空间完成各种运动轨迹,并在尽量不改其动力学特性的情况下,在地面上为其营造一个微重力状态,以便开展机械臂的各种试验研究。因此开展三维微重力模拟是一项必须解决的关键技术。

1 空间机械臂的微重力环境模拟方法

为了对空间机械臂的地面试验进行更好地研究,需要相应的物理实验平台,由于空间机械臂在太空中是一个处于微重力状态的自由漂浮系统,因此需要设计相关的微重力环境模拟系统。

微重力模拟需要在尽量不改变其动力学特性的情况下,在地面上为其创造微重力状态以便开展相应的研究与验证,因此所设计的微重力模拟方法需要从以下几个方面进行考虑:

1)从运动轨迹考虑,要求微重力模拟系统尽量能够配合空间机械臂在整个三维运动空间完成各种运动轨迹,以便系统地对地面试验进行考核;

2)从模拟精度考虑,要求微重力模拟系统在尽量不改变空间机械臂动力学特性的情况下,对重力进行高精度补偿,以便客观地对地面试验进行考核;

3)从试验效率考虑,要求所采用的微重力模拟系统尽可能不受时间、次数的限制,能够配合空间机械臂完成各种展开运动,以便充分地在地面试验进行考核。

1.1 自由落体法

自由落体法就是通过微重力塔中执行自由落体运动,物体在作自由落体运动时可获得很好的微重力状态。整个系统主要由内外两部分构成^[5],能够实现 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 量级的微重力环境。东京大学

通过自由落体运动进行了空间机械臂的捕获目标实验^[6]。图 1 为 1990 年德国研制的莱梅落塔。

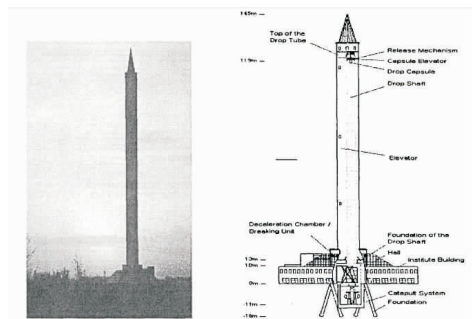


图 1 德国莱梅落塔

Fig.1 German microgravity tower

1.2 抛物法

抛物法是一种利用抛物线机动飞行来创造微重力和低重力环境的方法^[7],见图 2。抛物飞行法相比落塔法获得了更长的微重力时间,其创造的失重时间可达 20~30 s 左右,能够实现 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 量级的微重力环境^[7]。

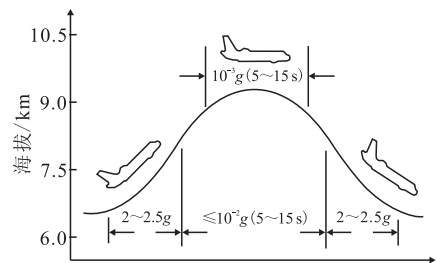


图 2 抛物法

Fig.2 Parabolic flight

1.3 水浮法

水浮法就是利用水的浮力来抵消空间飞行器重力,利用调整装置来调整漂浮器的浮力,通过使试验目标所受的向上的水浮力与向下的重力平衡^[8],进而产生随机平衡漂浮状态的一种微重力模拟方法,水浮系统见图 3。



图 3 Ranger 机械臂水浮系统

Fig.3 Ranger neutral buoyancy system

目前各个空间大国都有自己的水浮试验系统,其中较具代表性的为马里兰大学研制的 Ranger 试验系统^[9],Padova 大学的 CISAS 中心研制的水下

机械臂试验系统^[10],中国科学院智能机械研究所也研制了水浮式的微重力模拟系统^[11]等。浮力水槽见图4。



图4 浮力水槽

Fig.4 Neutral buoyance flume

1.4 悬吊法

悬吊法的主要通过绳索机构及滑轮组,并利用配重来抵消飞行器自身的重力。悬吊法由于其结构相对简单且易于实现,目前许多国家在微重力模拟试验方面均在使用此方法^[12-13],例如美国 Carnegie Mellon 大学研制的 SM² 空间机械臂地面实验系统^[14],见图5。中国科学院智能机械研究所也研制了悬吊式的微重力模拟系统^[15-16]等。

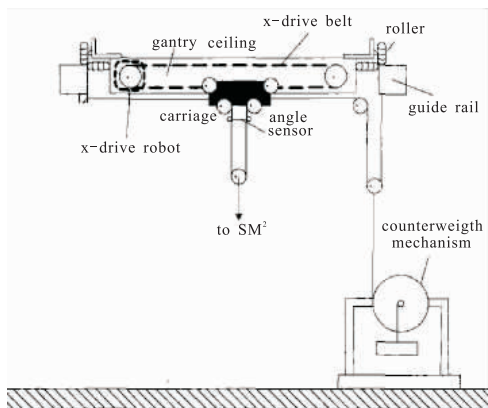


图5 SM² 机械臂吊丝实验系统

Fig.5 Gravity compensation system for SM²

目前空间机械臂三维试验通常采用的微重力模拟方法为悬吊法。图6表示的是加拿大 ERA 气浮实验系统。

图6 加拿大 ERA 气浮实验系统

Fig.6 Canada ERA air-bearing system

由图6可以看出,在关节头部安装有吊丝,但由于吊丝易颤振,运动中会出现滞后现象,模拟精度差,仅应用于轻质机械臂,否则悬吊处摩擦力会很大,且其运动轨迹必须和上方悬吊处的导轨安放轨迹一致,运动范围受到严格限制。

1.5 气悬浮法

气悬浮法的主要是通过气足(平面止推气浮轴承),由气源产生高压气体,经气足底面的微米级气孔喷出,使整个设备处于悬浮状态,此时的气体摩擦力极小,这使得整个设备在水平面内几乎完全自由无阻力,是一种精度很高微重力环境模拟方法,也是目前应用最广的方法之一。

美国 Standford 大学建造的自由飞行空间机械臂系统^[17],日本东京理工大学^[18],以及哈尔滨工业大学等国内高校都建立了平面气浮台的地面实验系统^[19]。图7为日本 JEMRMS 机械臂采用气悬浮系统开展试验。图8为美国 Standford 大学采用气悬浮为自由飞行空间机械臂系统进行试验。

图7 日本 JEMRMS 气浮试验系统

Fig.7 Japan JEMRMS air-bearing system

图8 Standford 大学机械臂气浮实验

Fig.8 Standford air-bearing system

上述微重力模拟方法优缺点总结归纳见表1。由表可知气浮法有着诸多优点,倘若气浮法能够应用于三维空间运动的微重力模拟,那么将会以高效的方式服务于空间机械臂地面试验的验证。因此需要设计的基于气浮的微重力模拟系统必须具有三维运动功能,能够适应空间机械臂较复杂的三维运动轨迹,从而具备验证空间机械臂地面试验的能力。因此研究出一种简单易行,且相对成熟的基于气浮

的空间机械臂三维微重力模拟方法具有重要意义。

表 1 空间机械臂的微重力模拟方法比较图

Tab.1 Space micro-gravity simulation methods comparison

项目	落塔法	抛物飞行法	水浮法	悬吊法	气浮法
三维空间模拟	能	能	能	能	不能
模拟精度	高	高	一般	略差	高
模拟时间	仅 10 s	仅 2 s	无时间限制	无时间限制	无时间限制
机械臂尺寸要求	有严格限制	有严格限制	有严格限制	无限制	无限制
机械臂重量要求	无限制	有严格限制	无限制	有限制	无限制
模拟设备造价	昂贵	昂贵	较贵	较贵	较低
设备建造周期	很长	很长	长	短	短
设备维护费用	昂贵	昂贵	贵	极低	极低
设备维护手段	复杂	复杂	复杂	简单	简单
重复使用性	好	好	一般	差	好

2 空间机械臂三维气浮微重力模拟系统

目前陈三凤^[20]等设计了基于气浮的三维微重力模拟系统,但该系统采用气缸作为传动系统,这带来了较大附加质量,且通过压力阀进行控制,需要考虑气源衰减等各种因素。

由于任何复杂的空间三维运动都可以分解为水平二维运动和竖直一维运动,本文采用了剪式机构,这种结构采用机械传动机构及成熟的力伺服反馈系统,见图 9。

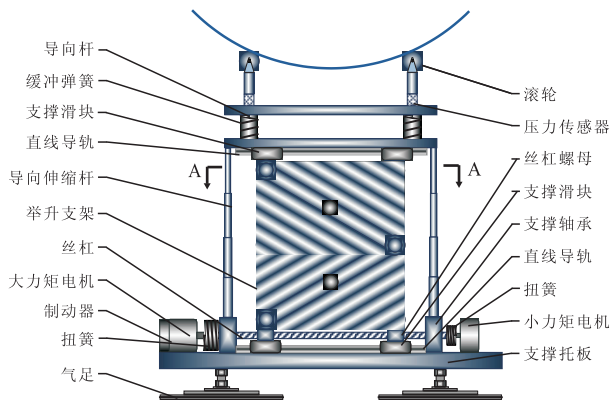


图 9 剪式三维空间地面模拟试验设备结构图

Fig.9 Structure for three-dimensional spatial microgravity simulation system

所设计的装置水平方向采用气浮方法,即气足(气体止推轴承)的方式。通过气源装置供应的高压气体,经气管进入气足内腔,进而从气足底部的微米级气孔喷出,使整个模拟装置(包括滚轮处的空间机械臂)悬浮起来。这种方法能够使装置在仅受到极微弱气体摩擦力的情况下,达到良好的二维水平方

向上的随动效果。竖直方向上,采用力伺服反馈控制,并组合剪式机械传动装置,从而达到竖直一维方向上的重力补偿效果。

该系统主要由一套电机驱动系统及机械传动系统(剪式升降支架、导杆、直线轴承等)组成,并通工作板处的压力传感器形成一个恒力伺服系统,缓冲弹簧起到降低接触刚度的作用。

所设计的系统利用成熟技术,不仅更加稳定,易于实现,且大大节省了空间,降低了高度,结构紧凑,而且获得了很大的伸缩比,具有较好的应用价值。

3 结语

空间微重力模拟是随着空间技术发展而出现的一个新领域。本文面向当前做复杂运动空间机械臂的微重力模拟研究现状,提对应的微重力模拟系统应该满足的条件,并对目前国内外空间机械臂的微重力模拟方法及现状进行了分类综述,重点对三维空间性、模拟精度及研制周期等方面进行了详述,通过分析优缺点,进而提出了新颖的三维气浮微重力环境试验装置的设计思想,具有较好工程应用价值。

参考文献(References):

- [1] 戚发轫. 中国载人航天发展回顾及未来设想[J]. 航天器环境工程, 2011, 28 (1): 1-4.
- [2] QI Faren. Reviews and prospects on the development of manned space flight in China[J]. Spacecraft environment engineering, 2011, 28 (1): 1-4. (in Chinese)
- [3] Sullivan B R, Akin D L. A survey of serviceable spacecraft failures [C]//AIAA space-conference and exposition. Reston, VA, USA: AIAA, 2001: 4531-4540.
- [4] White G C, Xu Y S. Active vertical-direction gravity compensation system [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 1994, 43 (6): 786-

- 792.
- [4] Xu Y S, Brown H B, Friedman M J. Control system of the self-mobile space manipulator[J]. IEEE transactions on control systems technology, 1994, 2(3): 207-219.
- [5] 徐文福, 梁斌, 李成, 等. 空间机器人微重力模拟实验系统研究综述[J]. 机器人, 2009, 31(1): 88-96.
XU Wenfu, LIANG Bin, LI Cheng, et al. A review on simulated micro-gravity experiment system of space robot[J]. Robot, 2009, 31(1): 88-96. (in Chinese)
- [6] Watanabe Y, Araki K, Nakainura Y. Microgravity experiments for a visual feedback control of a space robot capturing a target[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. Victoria, Canada; IEEE press, 1998; 1993-1998.
- [7] Sawada H, Ui K, Mori M, et al. Micro-gravity experiment of a space robotic arm using parabolic flight [J]. Advanced robotics, 2004, 18(3): 247-267.
- [8] Lin C K. Fuzzy-basis-function-network-based H_{∞} tracking control for robotic manipulators using only position feedback[J]. IEEE transactions on fuzzy systems, 2009, 17(5): 1208-1216.
- [9] Carignan C R, Akin D L. The reaction stabilization of on-orbit robots[J]. IEEE control systems magazine, 2000, 20(6): 19-23.
- [10] Menon C, Busolo S, Cocuzza S, et al. Issues and new solutions for testing free-flying robots [R]. AIAA, IAC-04-IAF-1, J.5.
- [11] 姚燕生, 梅涛. 空间操作的地面模拟方法-水浮法[J]. 机械工程学报, 2008, 44(3): 182-188.
YAO Yansheng, MEI Tao. Simulation Method of Space Operation on the Ground-Buoyancy Method [J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2008, 44(3): 182-188. (in Chinese)
- [12] Fujii H, Yoneyama H. Experiments on cooperative motion of a space robot[C]//Proceedings of intelligent robots and systems '93, Yokohama; IEEE press, 1993; 2155-2162.
- [13] Ullman M A, Cannon R H. Experiments in autonomous navigation and control of a multi-manipulator [C]//Space robotics: dynamics and control. MA: Kluwer academic, 1991; 269-284.
- [14] Gregory C W, Xu Y. An active vertical-direction gravity compensation system [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 1994, 43(6): 769-792.
- [15] 宋彦锋, 梅涛. 模糊 PID 控制器在微重力系统中的应用[J]. 自动化与仪表, 2006, 21(2): 36-39.
SONG Yanfeng, MEI Tao. Application of fuzzy PID controller in micro-gravity system [J]. Automation & instrumentation, 2006, 21(2): 36-39. (in Chinese)
- [16] 林旭梅, 梅涛. 地面失重实验系统的控制器设计[J]. 中国科技大学学报, 2008, 38(5): 542-548.
LIN Xumei, MEI Tao. The controller design of ground microgravity testing system [J]. Journal of university of science and technology of China, 2008, 38(5): 542-548. (in Chinese)
- [17] Koningstein R, Cannon R H J. Experiments with model-simplified computed-torque manipulator controllers for free-flying robots [J]. Journal of guidance, control, and dynamics, 1995, 18(6): 1387-1391.
- [18] Yoshida K. Experimental study on the dynamics and control of a space robot with experimental free-floating robot satellite (FFORTS) simulators [J]. Advanced robotics, 1995, 9(6): 583-602.
- [19] 金飞虎, 洪炳熔, 柳长安. 双臂自由飞行空间机器人捕捉目标实验研究[J]. 宇航学报, 2002, 23(1): 64-68.
JIN Feihu, HONG Bingrong, LIU Changan. Experiment research of a dual-arm free-flying space robot capturing a target [J]. Journal of astronautics, 2002, 23(1): 64-68. (in Chinese)
- [20] 陈三风, 梅涛, 张涛, 等. 空间微重力环境地面模拟系统的控制器设计[J]. 机器人, 2008, 37(3): 201-204.
CHEN Sanfeng, MEI Tao, ZHANG Tao, et al. Design of the controller for a ground simulation system of spatial microgravity environment [J]. Robot, 2008, 37(3): 201-204.

(编辑: 徐楠楠)