

文章编号:1006-2343(2018)06-176-06

可重构模块化空间机械臂的模块库与构型

王 丹¹, 孟 悦¹, 尹伟萌¹, 刘金国², 韩亮亮³

(1. 沈阳建筑大学 机械工程学院, 沈阳 110168, E-mail: 1182897491@qq.com;

2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016;

3. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201108)

摘 要: 面向我国空间站战略规划实施, 为了满足航天器舱内外各种任务需求, 尤其是解决空间站复杂多样的在轨维修维护以及舱外的运行监测等问题, 根据空间站典型的任务需求, 基于模块化可重构机器人的设计思想, 研究空间机械臂的各个功能模块, 建立完整的模块库, 根据任务需求, 搭建了三种机械臂构型, 并仿真验证了直线模块对机械臂工作空间的影响。

关键词: 空间机械臂; 可重构; 模块化; 机械臂构型

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A

Study on Module Library and Configuration of Reconfigurable Modular Space Manipulator

WANG Dan¹, MENG Yue¹, YIN Weimeng¹, LIU Jinguo², HAN Liangliang³

(1. Shenyang Jianzhu University, School of Mechanical Engineering, Shenyang 110168, China;

2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation,

Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201108, China)

Abstract: Facing the implementation of the space station strategic plan in China, in order to meet various mission requirements inside and outside the spacecraft cabin, especially to solve the complex and diverse on-orbit maintenance and out-of-compartment operational monitoring of the space station, based on the typical mission requirements of the space station, based on the modularity, the design idea of reconfigurable robots, the study of the various functional modules of the space manipulator, the establishment of a complete module library, according to the task requirements, built three robot arm configurations, and simulated the impact of the linear module on the working space of the robot arm.

Key words: space manipulator; reconfigurable; modularization; robotic arm configuration

DOI:10.13952/j.cnki.jofmdr.2018.0260

随着我国载人航天工程和月球、火星等深空探测工程的不断深化和发展, 飞船、空间站面临的在轨维护、维修任务以及运行监测等需求也日益复杂和多样。针对太空特殊环境, 开发了一种模块化、可在轨再生的、面向复杂空间环境的新型柔性机械臂, 满足在特殊的非结构环境下的不同作业任务, 而且具有较高的容错性、安全性, 为航空航天后续发展奠定技术基础。

国外科研机构很早就开始了空间机械臂的相关技术研究, 其研究成果已经应用于现役的空间站^[1-5], 我国在模块机械臂方面也有很大的突破^[6-9], 但是目前关于空间机械臂的研究仍处于开始阶段, 机械臂的模块类型少, 功能相对单一, 无法满足空间站复杂多样的任务^[10]。面对存在各种干

扰因素的恶劣环境, 需要研究出一种适应能力强, 具有高容错能力、高可靠性和互换性的可重构模块化机械臂来满足空间站的各种任务需求。

1 机械臂模块库的建立

1.1 典型任务的分析

模块库的建立以满足空间任务为前提, 根据任务的特点研究设计模块库的各个功能模块。空间机械臂的几种典型任务主要有: 狭小空间环境复杂作业、舱外各关键部位、关键设备运行状态的即时监测、预警、部件更换及维修维护。为了实现这些需要精确且复杂操作的任务, 不但对冗余机械臂的外形尺寸、体积重量有严格的要求, 而且要实现现在空间站复杂的环境下能够躲避各种障碍物, 安全且准确的到达目标位置。因此在操作范围足够的前提下, 保证足够的冗余自由度, 能大大提高机械臂的灵活性。

收稿日期: 2018-05-09

基金项目: 载人航天工程预先研究项目(030401, 030201)

1.2 建立模块库

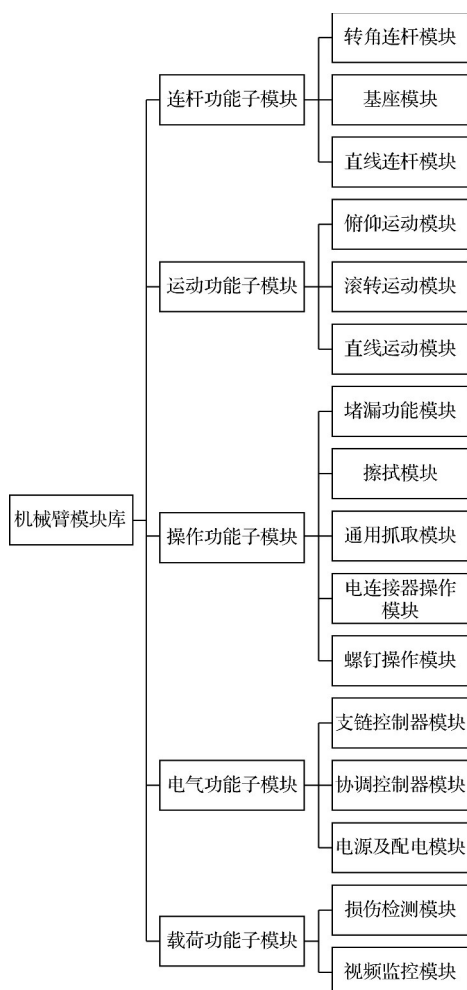
由于空间机械臂的工作规划依赖于空间站复杂多样的任务需求,同时机械臂的模块划分必须考虑不同环境、不同位置、不同路径、不同功能、不同目的等各方面的因素,

机械臂的功能模块具有如下特点:

(1) 具有独立的功能。每个模块都有它对应的功能,单个模块的更改不影响其它模块的功能和使用情况,大大降低了维护和更新的复杂性。

(2) 各个模块具有标准化的几何接口和通信接口,以实现模块的快速连接,且具有互换性。

通过研究机械臂在轨的工作环境和工作任务,将机械臂的模块划分为实现不同功能的子模块,主要包括:运动功能子模块、连杆功能子模块、操作功能子模块、载荷功能子模块、电气功能子模块,再把每个单独的功能模块归类分入子模块。模块的具体分类如图1所示。



▲图1 机械臂的模块分类

1.3 功能模块

1.3.1 连杆功能子模块

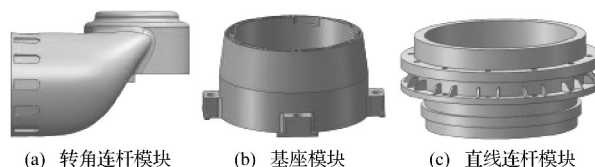
连杆功能模块是用来连接各个模块的,它也可以作为运动模块的一部分,作为输出单元。

(i) 转角连杆模块是机械臂外部结构的最小单元。它的两个轴相互垂直,其外形参考欧洲航天局机器人手臂

DEXARM,该模块可作为每个基础模块的输出端或输入端。

(ii) 基座模块不仅为整个机械臂提供支撑,还可以作为电源模块或者电气功能模块的固定座。基座一端可以固定在可移动的在轨的平台上,基座模块的另一端可以连接连杆,也可以直接连接模块。机械接口采用螺栓连接,加入机械对准装置。

(iii) 直线连杆是关节固定连接的模块,负责将负载传递给相邻的模块。此模块还可以作为电气模块的外壳,起到保护通讯元件和内部的电气器件免于外部环境干扰的作用。直线模块的输出、输入接口尺寸可以根据与其连接模块的接口大小确定。

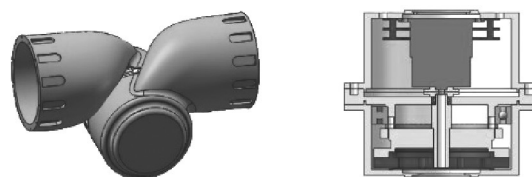


▲图2 连杆功能模块

1.3.2 运动功能模块

运动功能模块是冗余机械臂的主要运动单元,是机械臂的关节,它决定了机械臂的空间姿态,运动功能模块的输出输入接口均是可重构的,可与其它模块连接。

(i) 俯仰运动模块(如图3所示),由两个转角连杆和一个旋转单元组成,模块轴与连杆轴相互垂直,可做俯仰运动^[11]。俯仰模块拥有自己的处理器系统,为增强其灵活性,输出与输入轴的旋转角度范围为 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 。



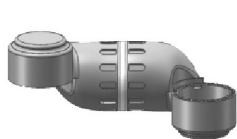
▲图3 俯仰模块

(ii) 滚转运动模块的结构与俯仰模块类似,如图4所示。由两个连杆和一个旋转单元组成,其主要区别在于:它的模块转动轴线与连杆的轴线共线,实现两个关节的相对转动。滚转模块的旋转范围是 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 。

(iii) 直线运动模块部分结构参考文献[13],如图5所示,在此基础上,本文将模块驱动系统轴线与产生滑动的轴线设计成不同轴,而是平行分布,可以保证直线模块在伸缩前占据的空间相对较小。在模块内部设计有自锁系统,若该模块出现故障,自锁系统启动,可将此模块做为一个刚性的连杆使用。

1.3.3 操作功能子模块

(i) 堵漏功能模块(见图6)具有焊接功能,该模块能对舱体上范围小的裂缝进行焊接、堵漏。焊接模块参考激光焊接机,利用了激光焊接原理。模块的底座采用了双自由度的



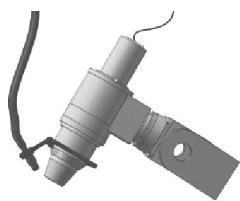
▲图 4 滚转模块



▲图 5 直线运动模块

设计 在整个手臂不移动的前提下该模块依旧可以灵活的转动 稳定而精确的进行焊接工作。

(ii) 擦拭模块(见图 7)是用来清除设备表面灰尘的操作模块,刷子轴线相对于模块中心具有一定的偏心量,扩大了一次清扫的范围。擦洗用具可根据擦拭要求更换成不同材质。



▲图 6 堵漏功能模块



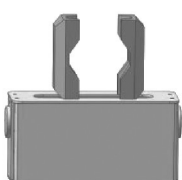
▲图 7 擦拭模块

(iii) 通用抓取模块(见图 8)是用来抓取工件的末端执行器,采用三指抓取机构,每个手指有三个关节,以抓取不同尺寸的工件^[14]。为了扩大手指的开闭范围,三个手指的运动采取独立的运动控制,实现对复杂形状物件的抓取。手指抓取时要求融合角度位移传感器、压力传感器、限位开关等元件,以确定构件的方位,同时规划出最佳的抓取路径。

(iv) 夹持操作模块(见图 9)可夹取规则形状的工件,移动到指定位置。采用两指结构,手指采用双“V”型槽的设计,可以更好的夹紧工件,也能适应一些不太规则物体的夹持操作^[15]。



▲图 8 通用抓取图



▲图 9 夹持操作模块

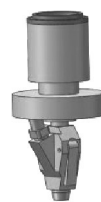
(v) 电连接器操作模块(见图 10)旨在保证空间站内接头和电子部件的可靠连接,对出现故障的部件进行及时更换。该模块的夹紧装置通过控制螺旋滑道的旋转,使四个滑块实现夹紧和放松的动作。为尽量控制尺寸,该模块只用了一个电机,模块的夹紧装置,进给装置的动作都由电磁离合器来控制,即可同时动作也可分开动作。

(vi) 螺钉操作模块(见图 11)包含自动换刀单元、螺钉输送单元、螺钉拧紧单元。输送单元将存贮库里的螺钉输送到拧紧单元的工作头部。螺钉的输送方式为吹气推送式,随着存放螺钉的刀盘转动到指定位置,螺钉沿着输送管道输送

到待拧入位置,不受螺钉类型和尺寸的限制。自动拧紧单元包括旋转动力部分和进给部分,旋转单元安装在尾部,进给由气缸完成。自动换刀单元主要实现自动的选刀、换刀。



▲图 10 电连接器操作模块



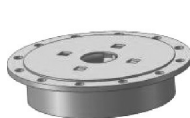
▲图 11 螺钉操作模块

1.3.4 电气功能模块

电气功能模块是实现电气功能的相关模块,它涉及到机械臂的控制系统和供电系统,安放在机械臂的内部。

(i) 控制器模块(见图 12)是为了更好的控制机械臂的动作,配合模块的控制器实现精细控制。控制器模块由中央处理器、控制驱动单元、反馈处理单元、和各种类型的扩展电路组成。

(ii) 电源及配电模块(见图 13)为机械臂提供电源,包括电源、电源管理单元、电源转换单元、保护电路。它的外形可以看作是一个直线连杆,不但满足刚性要求,还有标准的机械接口,可以与基座连接,也可以放在机械臂的两个模块之间。



▲图 12 控制器模块

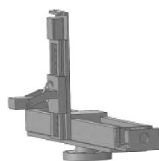


▲图 13 电源模块

1.3.5 载荷功能模块

(i) 损伤检测模块(见图 14),空间飞行器在运行时可能会遭到太空环境对舱体的破坏,引起泄漏,该模块用来定向的探测泄漏位置,由超声波发生器、探头和移动支架等组成。由于超声波发射的方向性比较强,因此采用了垂直导轨作为探头调整的支架,以便控制好探头的方向,避免错过漏孔输出信号的位置。

(ii) 视频监控模块(见图 15)由摄像头和旋转云台组成。摄像头采用红外摄像头和高像素的 CCD 摄像头,实现双摄像头监测,云台既可以调整两个摄像头的角度,还可以绕自身轴线转动,扩大了监测视野。



▲图 14 损伤检测模块

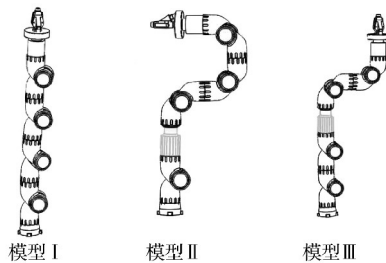


▲图 15 视频监控模块

使用相同模块类型和数量的前提下,直线运动模块在机械臂中的位置则会对构型的运动产生直接的影响,为此,针对直线模块在构型中的不同位置,建立三种构型模型,仿真分析机械臂末端操作模块的工作空间,寻求最优构型。

3.1 模型的建立

建立三个采用相同类型和数量运动模块的机械臂构型,均有 9 个自由度。其中,模型(I)全部由滚转模块和俯仰模块组成,没有加入直线运动模块;模型(II)中直线运动模块位于第 3 个关节处,靠近根部;模型(III)的直线运动模块位于第五个关节的位置,更靠近末端(如图 20)。



▲图 20 仿真 3 维模型

根据模型结构,建立各个构型的 D-H 参数表,对三种模型进行数字化处理得表 1、2、3。根据该参数建立简化的仿真模型如图 21。

表 1 模型 I 的 D-H 参数

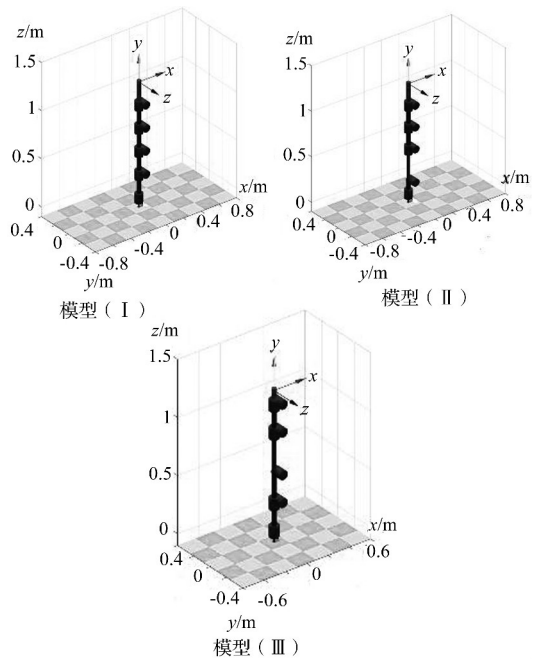
i	a_{i-1}/m	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	d_i/m	$\theta_i/(^{\circ})$	自变量范围
1	0.05	90	0.24	θ_1	$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$
2	0.05	90	0	θ_2	$20^{\circ} \sim 180^{\circ}$
3	0.05	90	0.24	θ_3	$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$
4	0.05	90	0	θ_4	$20^{\circ} \sim 180^{\circ}$
5	0.05	90	0.24	θ_5	$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$
6	0.05	90	0	θ_6	$20^{\circ} \sim 180^{\circ}$
7	0.05	90	0.24	θ_7	$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$
8	0.05	90	0	θ_8	$20^{\circ} \sim 180^{\circ}$
9	0	90	0.24	θ_9	$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$

表 2 模型 II 的 D-H 参数

i	a_{i-1}/m	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	d_i/m	$\theta_i/^{\circ}$	自变量范围
1	0.05	90	0.24	θ_1	$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$
2	0.05	90	0	θ_2	$20^{\circ} \sim 180^{\circ}$
3	0.05	90	d_3	π	0.365~0.945
4	0.05	90	0	θ_4	$20^{\circ} \sim 80^{\circ}$
5	0.05	90	0.24	θ_5	$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$
6	0.05	90	0	θ_6	$20^{\circ} \sim 180^{\circ}$
7	0.05	90	0.24	θ_7	$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$
8	0.05	90	0	θ_8	$20^{\circ} \sim 180^{\circ}$
9	0	90	0.24	θ_9	$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$

表 3 模型 III 的 D-H 参数

i	a_{i-1}/m	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	d_i/m	$\theta_i/(^{\circ})$	自变量范围
1	0.05	90	0.24	θ_1	$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$
2	0.05	90	0	θ_2	$20^{\circ} \sim 180^{\circ}$
3	0.05	90	0.24	θ_3	$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$
4	0.05	90	0	θ_4	$20^{\circ} \sim 180^{\circ}$
5	0.05	90	d_5	π	0.365~0.945
6	0.05	90	0	θ_6	$20^{\circ} \sim 180^{\circ}$
7	0.05	90	0.24	θ_7	$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$
8	0.05	90	0	θ_8	$20^{\circ} \sim 180^{\circ}$
9	0	90	0.24	θ_9	$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$



▲图 21 matlab 简化模型

设机械臂旋转关节的关节变量为 θ_i , 直线关节的关节变量为 d_i , 则该机械臂的末端相对于基座的关系则可以表示为:

$${}^0T_9 = {}^0T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

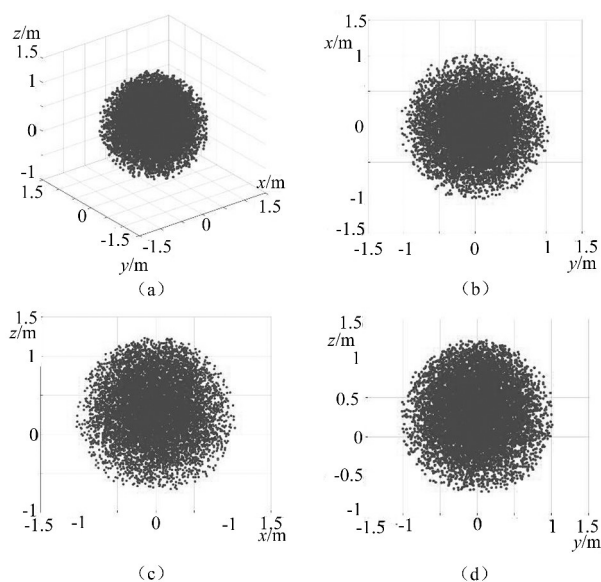
式中: p_x p_y p_z 为末端的位置坐标。

3.2 构型末端工作空间分析

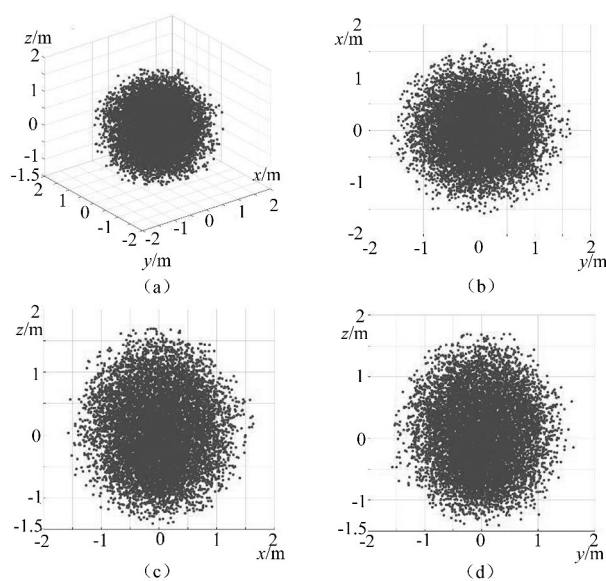
利用蒙特卡罗方法^[16], 根据运动学方程得到的模型末端的位置坐标, 构造末端位置点的工作空间。利用 matlab 里的 rand 函数对各个关节的变量进行随机赋值, 然后将各个关节变量在其范围之内生成 n 个随机点:

$$\theta_i = \theta_{\min} + (\theta_{\max} - \theta_{\min}) \text{rand}(n, 1) \quad (3)$$

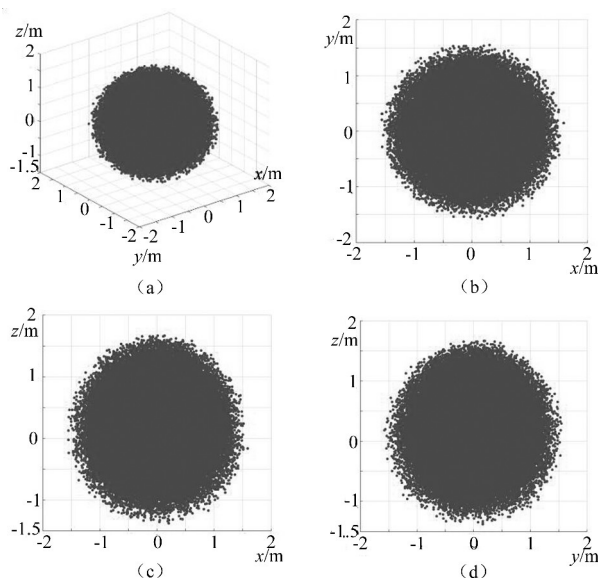
文中选用了 $n=10\,000$, 得到 3 种不同构型下末端操作模块的工作空间, 如图 22、23、24。其中图(a) 为三个模型末端位置的 3 维云图, 反映整体空间的外形与边界的预估尺寸; 图(b)、(c)、(d) 为 3 维云图分别在 $o-xy$ 、 $o-xz$ 、 $o-yz$ 平面上的投影, 其图形可近似表示空间尺度在两个轴线方向的极限位置。



▲图 22 模型(I)末端位置云图



▲图 23 模型(II)末端位置云图



▲图 24 模型(III)的末端位置云图

根据三种构型的末端位置云图可以看出, 构型 I 投影在三个平面的边界为明显的圆形, 图(a)整体工作域也更加趋近于规则的球形。所有的随机点位置分布均匀, x 方向 y 方向呈现对称分布, z 方向的图像则整体偏上。在此区域里, 末端机构到达各个位置概率基本相同。构型(II)末端模块工作空间为椭球形状, z 轴方向的边界明显比其余两个方向要大, 其分布在外围的点散乱稀疏, 使期望域的极限范围不够明确, 整体空间范围比构型(I)要偏大。构型(III)的空间区域也是近似的球形, 随机点在外围分布较为密集, 代表该范围的位姿也就更多。各个方向均呈现对称分布。图像极限边界范围向外扩张的同时更加饱满紧凑。根据对三个模型图像的特点的分析, 可以得出加入直线模块可以在一定程度上扩大外围空间的边界, 尤其 z 方向上的域的极限边界, 直线模块的位置愈加的靠近末端, 越能影响末端模块在外围区域的位姿, 得到更多不同的姿态, 提高构型的灵活度。反而靠近根部的直线模块使空间区域向某个方向产生偏斜, 还会影响整个构型的达到位置空间的密度。在设计构型时可在末端适当的加入直线模块提升构型工作空间的几何特性, 增强整个冗余机械臂的功能。

4 结 论

针对我国的空间探测任务, 综合空间机械臂复杂的空间工作环境, 研究设计了机械臂的各个功能模块, 建立了空间可重构机械臂的模块库, 通过分析典型任务需求, 搭建了三种任务构型。同时, 利用仿真模型分析了直线运动模块的位置对构型操作模块工作空间的影响, 从而为设计空间任务构型提出了较为优化的模块搭配方案。

参考文献

- [1] KELMAR L, KHOSLA P K. Automatic generation of kinematics for a reconfigurable modular manipulator system [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1988, Philadelphia, PA: 663-668.
- [2] PAREDIS C J J. An agent-based approach to the design of rapidly deployable fault tolerant manipulators [D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1996.
- [3] BELAND S, 潘科炎. 加拿大的空间机器人—从国际空间站的灵敏作业机器人到行星探测器机器人[J]. 控制工程, 2001(2): 22-29.
- [4] RUSCONI A, MAGNANI P, CAMPO P, et al. DEXARM engineering model development and testing [C]//10th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation-ASTRA, 2008. 2008.
- [5] 金玉兰. 日本新一代试验卫星—ETS—VIII [J]. 电信技术研究, 2002(4): 16-25.
- [6] 王树国, 蔡鹤皋. 空间智能机器人地面实验综合平台实时仿真系统 [G]. 中国宇航学会机器人学术会议(空间机器人专题)论文集. 哈尔滨工业大学机器人研究所, 1992: 49-52.
- [7] 邵志宇, 孙汉旭, 贾庆轩, 等. 一种空间机械臂构造模块的研制[J]. 宇航学报, 2007, 28(1): 147-151.
- [8] 史士财, 史磊, 李荣, 等. 空间机械臂关键技术研究[J]. 机械与电子, 2007(9): 53-55.

(下转第 187 页)

表 7 测点 4 仿真与测试结果对比

工况	应力最大值			应力幅最大值		
	仿真/ MPa	实验/ MPa	相对 误差/%	仿真/ MPa	实验/ MPa	相对 误差/%
工况 1	3.23	3.0	7.67%	0.44	0.46	-4.35%
工况 2	3.33	3.32	0.30%	0.58	0.63	-7.94%
工况 3	3.71	3.62	2.49%	0.77	0.80	-3.75%

各测点仿真与实验结果对比(见表 4~表 7)分析表明,通过仿真及实验方式获取的货载起升阶段桥架动态应力相对误差大多在较为合理的范围内,少数测点相对误差较大,其影响因素有:①货载起升过程驾驶员操作起重机,调整大车及小车的位置,防止货载触碰周围物件;②建立的桥架 3 维模型与实际桥架存在微小差异;③仿真所得小车轮压与桥架实际载荷存在差异;④应变片粘贴及数据传输过程的影响;等等。总体而言,基于本文方法开展的 50/10t 双梁桥式起重机货载起升阶段不同工况下桥架动力学仿真分析结果与实验测试结果基本吻合,从而验证了本文起重机动力学分析方法的有效性。

5 结 论

本文以 50/10t 双梁桥式起重机为对象,开展货载起升阶段桥架应力特性研究,具体结论如下:

(1) 建立了货载起升动力学模型,考虑钢丝绳时变刚度,获取该阶段小车动态轮压,较准确地反映了桥架的动态载荷;

(2) 应用有限元分析软件开展了桥架模态及瞬态动力学分析,揭示了货载起升速度对桥架动态应力的影响规律。结果表明,小车起升速度越大应力以及货载离地后的应力幅最大值均越大,而且两者与小车起升速度呈线性关系;

(3) 通过应力应变测试技术采集货载起升过程桥架侧板跨中位置不同位置的动态应力,开展了小车起升速度的影响分析,并与仿真结果进行了对比。结果表明,实验测试与仿真结果基本吻合,从而进一步验证了本文通过建立货载起升动力学模型方式获取桥架动态载荷并开展桥架有限元分析

的正确性,为该型桥式起重机桥架动态设计及优化提供了理论依据。

参考文献

[1] 焦洪宇,周齐才,李英,等. 桥式起重机轻量化主梁结构模型试验研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(23): 168-174.

[2] PU H J, XIE X P, LIANG G C, et al. Analysis for dynamic characteristics in load-lifting system of the crane [J]. Procedia Engineering, 2011, 16: 586-593.

[3] ZRNIĆ N D, GAŠIĆ V M, BOŠNJAK S M. Dynamic responses of a gantry crane system due to a moving body considered as moving oscillator [J]. Archives of Civil and mechanical Engineering, 2015, 15(1): 243-250.

[4] 侯骅玲,王宗彦,冯庆欢. 基于灵敏度分析的桥式起重机箱梁结构的多目标优化[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(1): 121-125.

[5] XIANG Z Y, XIAO Z M, WANG X, et al. Dynamic analysis of the main trolley frame in load-lifting system of casting crane [C]// IEEE International Conference on Information and Automation, 2015: 1816-1820.

[6] 项载毓,肖正明,伍星,等. 冲击载荷下铸造起重机主梁疲劳裂纹扩展寿命研究[J]. 机械强度, 2015, 37(4): 718-724.

[7] 徐格宁,李俊杰. 起重机铸造箱型主梁拓扑优化[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(2): 175-180.

[8] 浦汉军,谢小鹏,梁广炽. 变频调速起重机起升动载特性[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(2): 205-210.

[9] COOPER M G, MIKIC B B, YOVANAVICH M M. Thermal contact conductance [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1969, 12(3): 279-300.

[10] 肖正明,项载毓,伍星,等. 基于瞬态动力学的铸造起重机桥架裂纹形成寿命研究[J]. 机械设计, 2015, 32(8): 62-68.

[11] 王爱红,徐格宁,高有山. 桥式起重机随机应力谱获取及疲劳剩余寿命估算[J]. 机械工程学报, 48(18): 192-198.

[12] MAEDA Y, YOSHIMI M, YOSHIHISA E. Stress spectrum of the jib of rough terrain crane with carrying a load [J]. Nippon Kikai Gakkai Kotsu, Butsuryu Bumon Taikai Koen Ronbunshu, 2003 (12): 257-258.

作者简介:项载毓(1988-),男,硕士,助教;主要研究方向:机械系统动力学及其应用,已发表论文 7 篇。

(上接第 181 页)

[9] 李树军,张艳丽,赵明扬. 可重构模块化机器人模块及构形设计[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2004, 25(1): 78-81.

[10] 刘宏,蒋再男,刘业超. 空间机械臂技术发展综述[J]. 载人航天, 2015(5): 435-443.

[11] HUANG C C, KUSIAK A. Modularity in design of product and system[G]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics -Part A: Systems and Human, 28 (1): 66-77

[12] 李大明,饶炜,胡成威,等. 空间站机械臂关键技术研究[J]. 载人航天, 2014, 20(3): 238-242.

[13] 潘新安. 一种模块化可重构机器人的设计理论与实验研究[D]. 沈阳:中国科学院沈阳自动化研究所, 2013.

[14] 王念峰,韦帅,张宪民. 基于机构运动平稳的灵巧手指优化设计[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(04): 16-18+21.

[15] 蒋国生. 新型双足攀爬机器人夹持器模块的改型设计[J]. 湖南农机: 学术版, 2013(3): 36-39.

[16] RASTEGAR J, FARDANESH B. M. Manipulator workspace analysis using the Monte Carlo method [J]. Mechanism & Machine Theory, 1990, 25 (2): 233-239.

作者简介:王丹(1977-),女,副教授;主要研究方向:模块机器人,已发表论文 12 篇。