

# 基于多学科仿真模型的空间机械臂优化设计与应用

李大明<sup>1,2</sup> 危清清<sup>1,2</sup> 唐自新<sup>1,2</sup>

(1. 空间智能机器人系统技术与应用北京重点实验室, 北京, 100094;

2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京, 100094)

**摘要:**空间机械臂在载人航天活动中有着迫切的应用需求。航天器尺寸、质量等因素的限制使得空间机械臂具有大柔性、操作对象多以及负载变化大的特点,给机械臂的设计验证与任务验证均带来较大挑战。详细分析了空间机械臂设计验证及任务验证对多学科仿真模型的需求,完成空间机械臂多学科仿真模型建模、修正与验证工作,将修正后的仿真模型成功应用于后续中央控制器测试,在轨任务验证及数字机械臂的开发等多个方面,解决了空间机械臂任务验证的难题。

**关键词:**空间机械臂;多学科;仿真模型;半物理

**中图分类号:**V1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1005-2615(2018)S1-0112-06

## Optimization and Application of Space Manipulator Based on Multi-domain Simulation Models

LI Daming<sup>1,2</sup>, WEI Qingqing<sup>1,2</sup>, TANG Zixin<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Intelligent Space Robotic Systems Technology and Applications, Beijing, 100094, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing, 100094, China)

**Abstract:** Space manipulator has an urgent application demand in manned spaceflight activities. Due to the limitation of spacecraft size, mass and other factors, the space manipulator has the characteristics of large flexibility, many operating objects and large load variation, which brings great challenges to the design verification and mission verification of the manipulator. The paper describes the requirement of multi-domain simulation. The multi-domain simulation model of space manipulator is modeled, revised and verified. The revised simulation model is successfully applied to central controller test, on-orbit mission verification and digital manipulator development. The problem of mission verification for space manipulator is solved.

**Key words:** space manipulator; multi-domain; simulation models; HIL

空间机械臂是实现航天器在轨组装和空间维修等作业的重要支持设备。从 20 世纪 70 年代起,加拿大、日本和欧洲等相继开展了空间机械臂的研究,并成功将空间机械臂应用在多种载人航天器上。加拿大 SPAR 公司研制的航天飞机遥操作机械臂系统(Shuttle remote manipulator system, SRMS)<sup>[1-2]</sup>于 1981 年应用于美国的航天飞机上。SPAR 公司的空间站遥操作机械臂系统(Space

station remote manipulator system, SSRMS)<sup>[3]</sup>和日本实验舱遥控机械臂系统(Japanese experiment module remote manipulator system, JEMRMS)<sup>[4]</sup>及欧洲机械臂(European robotic arm, ERA)<sup>[5-9]</sup>也分别于 2001 年、2008 年和 2013 年应用到国际空间站上。中国未来的空间站也将应用空间机械臂执行相关空间作业任务<sup>[10]</sup>。

中国空间机械臂承担着舱段转位对接、悬停飞

收稿日期:2018-03-23;修订日期:2018-05-30

通信作者:李大明,男,高级工程师,E-mail:ttdd831@163.com。

引用格式:李大明,危清清,唐自新.基于多学科仿真模型的空间机械臂优化设计与应用[J].南京航空航天大学学报,2018,50(S1):112-117. LI Daming, WEI Qingqing, TANG Zixin. Optimization and application of space manipulator based on multi-domain simulation models[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(S1):112-117.

行器捕获和辅助对接、支持航天员出舱活动、舱外货物搬运、舱外状态检查、暴露平台实验载荷照料以及光学平台照料等任务,用于保障空间站在轨寿命期间内安全、可靠运营,支持空间站组装建造、维护维修及其他空间应用等任务,是中国空间站工程的重要装备,空间机械臂系统涉及机、电、热和控制等系统的开发,本质上是一个集成了电气、机械、三维多体动力学、热力学以及控制等多个学科的产品,产品设计、地面测试验证都十分复杂。

由于空间机械臂在布局、包络和质量等方面均有较为苛刻的约束条件,导致机械臂具有长径比大、柔性明显等特点,另外机械臂在轨任务多样、操作对象多和负载变化大的特点,按照空间条件设计的机械臂无法在地面上依靠物理样机进行任务验证,尤其是对机械臂发射后追加的任务,甚至缺乏相应产品以完成地面验证。因此,机械臂任务验证已成为机械臂产品设计和应用的最主要难题之一。

美国和加拿大在航天飞机机械臂 30 年飞行数据和经验的基础上,已实现了基于全数学仿真的系统验证和任务验证,加拿大 II 臂抓捕“龙”飞船任务通过全仿真即实现了任务模拟与验证。但对于中国,当前阶段由于研制基础和经验的不足,还不能够完全依靠纯数学仿真来代替硬件验证,还需要通过全物理试验和半物理试验相互补充开展任务验证并修正数学模型,未来逐步过渡到全数学验证,由此,对空间站机械臂多学科仿真模型提出了迫切需求。

本文将对中国空间机械臂的设计验证和任务验证进行系统性需求分析,提出当前空间机械臂多学科仿真模型的解决方案,建立并验证空间机械臂多学科仿真模型,并将其应用于中国空间机械臂的研制中,以期解决上述难题。

## 1 空间机械臂多学科仿真模型需求与方案

机械臂任务验证已成为机械臂产品设计和应用的最主要难题之一。机械臂任务验证属于系统级验证,验证的核心是动力学性能及控制系统验证,针对这一级别的验证,有 3 种方法:全物理试验验证、半物理试验验证及数学仿真验证,由于大型空间机械臂无法在地面完整模拟在轨工作环境及无法在地面开展全三维的运动,仅依靠全物理试验不可行,需要采用数学仿真或半物理试验方式进行验证。空间机械臂多学科仿真模型需具备以下能力:

- (1) 仿真模型应能对空间机械臂的实际任务进行数字计算,且结果正确;
- (2) 支持模块化建模且模块划分合理;
- (3) 仿真模型参数可配置;
- (4) 模型便于作实时简化及实时性检测;

(5) 仿真模型能支持后续模型智能化测试,以探寻任务完成的边界条件。

空间机械臂系统仿真模型往往涉及机械、传动、电子电气、多体动力学、结构动力学以及控制等多物理领域、多学科的分析与仿真。

传统的分析方法是各个领域/学科在不同的专业软件上分析,以多体动力学与结构动力学为例,一般选用 ADAMS 来分析机械臂(或复杂机构)的多体动力学;解决运动过程中的关节输入力矩与关节输出结果之间的联系,结构动力学则通常选用 MSC. Patran/Nastran, ANSYS 或 Abaqus 来分析;控制系统则一般采用 MATLAB 建模。然而机械臂产品十分复杂,上述方法难以满足全面的任务分析要求。机械臂的仿真模型需要综合考虑机械、控制和电子等不同学科领域的知识和模型,分析时也需要属于不同学科的仿真模型之间并行运算、实时交互,共同实现对整个复杂系统的仿真分析,此时,传统的单学科分析在分析过程中越来越无法满足多学科的要求,需要采用多学科耦合建模技术。

为了解决上述的多学科耦合问题,需要在同一模型中综合考虑不同学科的内容,将不同学科的仿真工具相结合,充分发挥各仿真工具的优势,根据多学科仿真实现方式的不同,可以分为 3 类:

### (1) 基于仿真软件接口联合仿真的方法

基于接口的多学科联合仿真模式通过提供统一的接口标准来实现不同仿真应用之间的信息交互,现有的仿真软件只需要对自身的信息交互接口进行改造和封装,无需改变应用系统内部具体的算法和实现机制。因此,具有较好的适用性,是目前复杂产品协同仿真技术发展的重要方向。

联合仿真的典型应用为:多体动力学与控制系统的耦合分析,机械臂的多体动力学、无重力环境需要在专业的多体动力学软件(如 ADAMS)中实现,而控制系统一般在 MATLAB 中实现。利用 MATLAB/Simulink 控制工具箱与 ADAMS/Control 模块通过接口集成(图 1)。

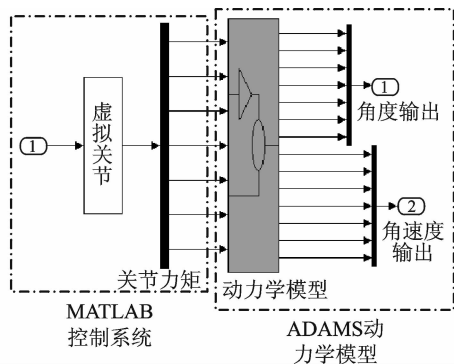


图 1 机械臂多体动力学与控制系统联合仿真流程  
Fig. 1 Workflow of co-simulation of dynamics and control of space manipulator

同样支持此类联合仿真的软件有: EASY5-ADAMS, EASY5-ANSYS 等。

## (2) 模型转换式

模型转换式的仿真原理是将其中一个学科或多个学科模型转化为特定的标准格式的包含模型信息的数据文件, 导入到另一个工具中调用, 从而实现信息交互。

典型的模型转换式仿真如机械臂刚柔耦合分析时, 由 Patran/nastran 计算柔性臂杆的模态, 并生成模态中性文件(. mnf), 该文件中包含了柔性臂杆的质量阵、刚度阵以及振型等, 将模型导入到多体动力学软件(ADAMS)中, 即可实现机械臂大范围运动与臂杆柔性变形及振动的仿真, 以模拟真实的情况。

## (3) 基于统一建模语言的多学科仿真

基于统一语言编程的方法是指利用通用的编程语言, 对不同学科的系统元素采用统一的方式进行描述, 编写成统一的模型, 彻底实现不同学科模型的无缝集成和数据交互, 可以同时满足多学科的分析。具有代表性的语言有 C 语言和 Modelica 语言。

Modelica 语言是一种免费的、面向对象的建模语言, 其设计目标是用来处理大型的、复杂的以及混合的物理系统问题。Modelica 的两个重要特点是面向对象和非因果关系。经过分析, 以上 3 个方案优缺点如表 1 所示。

表 1 空间机械臂系统建模方案比较

Tab. 1 Comparison of different modeling methods of space manipulators

方案	优点	缺点
1	各个软件的专业性较强, 都是各个专业的最有效、最成熟的解决方法, 在各自的领域内准确性与正确性均有保证	各软件之间的接口繁多, 由于不同商用软件的模型格式、编写语言及封装方式不同, 接口也不具有标准型、开放性及可扩展性, 使得基于接口的联合仿真方式存在着较大的局限性, 模型复杂时计算速度也没法保证, 以此作出的多学科模型无法满足实时性要求, 仅能用于任务验证
2	在同一平台上实现不同学科的仿真, 定性好, 且模型建立后便于重复使用	需要定义交互模型的标准, 通用性稍差, 求解速度无法保证
3	此方法可以从根本上解决多学科知识的表达与交互的问题, 模型具有开源特性, 便于对模型的二次开发或者修正, 另外经过适当的改进, 可以达到实时性的要求	当模型复杂时, 其模型开发过程复杂, 任务重, 不利于快速建模与分析; 另外还需较大的精力来对模型的正确性、准确性进行验证

经过比较, 方案 3 是解决空间机械臂系统仿真模型对最优方案, 后续机械臂建模依照此思路进行。

## 2 空间机械臂仿真模型建模与验证

仿真模型的建立, 包含两层面的内容: (1) 按任务要求建立的机械臂模型。包括多体动力学模型、关节控制器模型以及路径规划程序等; (2) 部件级模型。如关节模型、臂杆模型、电机模型以及由不同任务需求而建立的模型, 如实时模型、真实模型、纯刚性模型, 连续控制器模型以及离散控制器模型等。详细模型分类如图 2 所示。

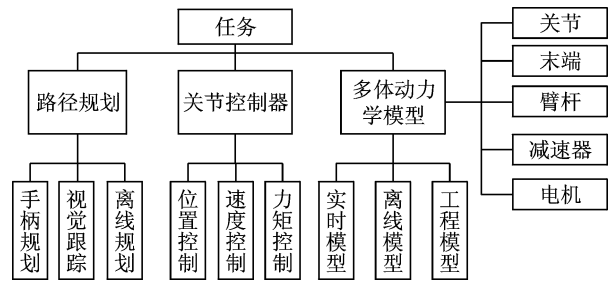


图 2 机械臂任务模型的模块划分

Fig. 2 Module of manipulator task models

考虑到后续实时仿真及半物理仿真的需求, 本文采用模块化建模思路, 不同部件的设计人员建立部件的模型并进行验证, 最终封装成独立的模块, 便于后续快速建模与规范化仿真, 并按照实际物理系统的组成进行模块划分, 保持模型接口与实物接口一致, 便于后续半物理测试与验证中以实物来快速替换对应的模型。

按照以上思路选取基于 Modelica 的 SimulationX 软件建立空间机械臂仿真模型如图 3 所示。

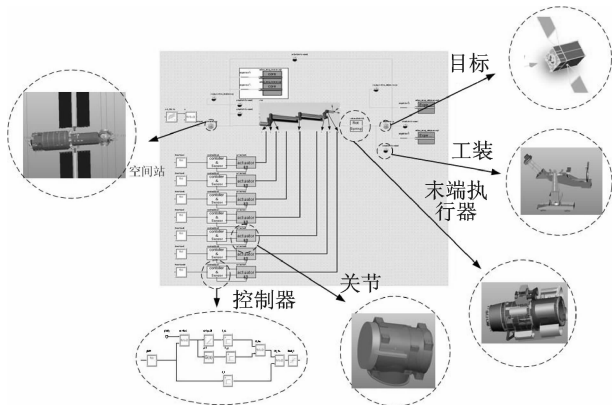


图 3 空间机械臂系统仿真模型

Fig. 3 Simulation model of space manipulator systems

空间机械臂仿真模型的验证是模型开发的最重要的环节, 也是确认模型产品有效性、开展任务预示的基础。模型的验证解决两个方面问题: (1)

模型本身的正确性,验证模型中没有奇异,积分不收敛,软件错误等基本问题;(2) 验证模型与产品的一致性,给出模型能够反应产品实际指标的接近程度。

机械臂仿真模型的确认采取 2 个步骤开展,软件对软件的验证和软件对硬件的验证,以逐步提高模型的置信度,为预示机械臂在轨真实工作情况,地面试验作为参考模型使用。

空间机械臂系统模型软件对软件验证是指借助不同的软件,对 SimulationX 中的模型予以验证,以排除基本的建模错误。本文开展了 SimulationX 模型与 ADAMS 模型的对比验证。具体内容见表 2。

验证标准为:仿真模型在相同工况、相同输入条件下,角速度、速度总体趋势一致,角度、位置平均误差小于 2%,即判定模型一致。

表 2 空间机械臂系统模型软件对软件验证内容

Tab. 2 Verification of space manipulators

序号	验证内容	验证说明	验证结果
1	关节动力学模型验证	(1) 分别在 MATLAB/Simulink 与 SimulationX 软件中建立空间机械臂动力学模型,互相对比 (2) 验证了关节摩擦力、关节非线性刚度等关键参数对关节的影响结果是否一致 (3) 验证了不同输入力矩下,关节运动输出结果是否一致	(1) 关节关键参数对关节动力学模型影响结果一致 (2) 不同工况下,关节动力学模型输出最大误差约 0.199%,结果一致,初步认为模型正确
2	关节闭环性能验证	(1) 关节控制器模型在 MATLAB/Simulink 软件中开发,利用 FMI 标准导入 SimulationX 软件 (2) 验证了关节摩擦力、关节非线性刚度等关键参数对关节闭环性能的影响结果是否一致 (3) 验证了不同输入工况下,关节运动输出结果是否一致	(1) 关节关键参数对关节动力学模型影响结果一致 (2) 不同工况下,关节模型输出最大误差约 0.64%,结果一致,初步认为模型正确
3	空间机械臂多体动力学模型验证	(1) 空间机械臂多体动力学模型分别在 ADAMS 软件与 SimulationX 软件中开发,互相对比 (2) 验证不同关节输入力矩下,机械臂多体运动输出结果是否一致 (3) 验证不同初始条件下,机械臂多体动力学运动输出结果是否一致	不同工况下空间机械臂动力学模型运动输出结果最大误差约 1%,满足软件对软件验证判据,初步认为模型正确
4	空间机械臂仿真模型闭环验证	(1) 空间机械臂仿真模型分别为 ADAMS+MATLAB 联合仿真与基于 SimulationX 同一软件中开发建立,互相对比 (2) 验证不同工况下,机械臂多体运动输出结果是否一致 (3) 验证不同初始条件下,机械臂多体动力学运动输出结果是否一致	不同工况下空间机械臂动力学模型运动输出结果最大误差约 1%,满足软件对软件验证判据,初步认为模型正确

空间机械臂仿真模型软件对软件验证结果满足验证标准,初步认为基于 SimulationX 的空间机械臂系统模型正确,可以进行后续工作。

空间机械臂软件对试验验证内容较多,后续专文描述,本文不再赘述。经过验证后,确认正确的模型被定义为基础模型,后续仿真任务的开展都是基于基础模型进行的。

### 3 空间机械臂系统模型实时化

所谓实时模型,是指模型计算时间小于仿真步长(交互周期)的仿真模型,通过对基础模型作适当简化得到,且计算结果与基础模型结果基本一致。主要含以下内容:

#### (1) 非线性参数线性化

地面测试结果表明,某些关节关键参数,如关节刚度、关节摩擦力矩等具有较大的非线性,此非线性特性会明显降低空间机械臂模型的仿真效率。

采用连续函数对上述关键参数进行拟合、逼近,替代非线性参数即可有效提高关节计算效率。

#### (2) 简化基础模型的高频部分

空间机械臂系统模型柔性特征明显,关节、臂杆及末端执行器等关键部件都要考虑其柔性影响,而将上述关键模块集成为空间站系统模型后,其高频部分需要以更小的步长来计算,计算步长的降低,必然导致关节计算效率的降低,同时这些高频部分对空间机械臂系统模型的角度、角速度计算结果影响甚小,可以忽略,因此在不关注空间机械臂高频振动的前提下,可以简化基础模型中的高频部分,提高模型的计算效率。

#### (3) 仿真算法优化

不同积分求解器求解效率不同,对模型阶数的适应程度也不同,且阶数越高,求解精度越高、求解效率却越低,经过对基础模型的分析,判断模型可接受的程度,选取合适的求解器、优化求解过程。

经对空间机械臂基础模型的有效简化与测试,当前空间机械臂实时模型计算步长低于 1 ms,计算精度优于 1%,能满足后续实时仿真任务的开展。

### 4 基于多学科仿真模型的应用成果

#### (1) 空间机械臂任务仿真

利用空间机械臂系统模型完成了空间站辅助舱段转位与对接、悬停飞行器捕获以及辅助航天员出舱等多项任务级、分系统级的仿真(图 4),给总师决策提供支撑。

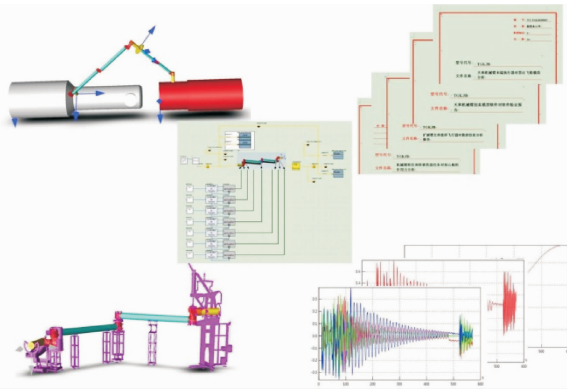


图 4 支持空间机械臂任务仿真

Fig. 4 Simulation on space manipulator tasks

#### (2) 空间站数字机械臂建设

空间站数字机械臂是指按照空间机械臂实际物理特征建立的数字替代(图 5),包含操作台、中央控制器、关节控制器、机械臂动力学模型、遥控遥测、供配电以及相机等。主要依托空间机械臂实时仿真模型,将其封装成动态链接库,在实时仿真平台(LABVIEW)中集成与测试。按照模块化的思路,以上各个模块均可以与实物直接替换。

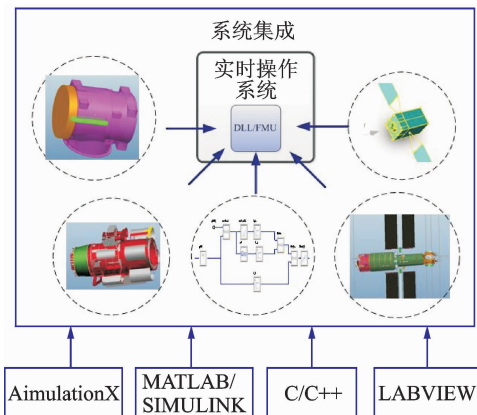


图 5 支持空间机械臂任务仿真

Fig. 5 Digital model of space minipulator

#### (3) 支持中央控制器半物理测试

由于重力及机械臂自身条件的限制,机械臂地面试验只能实现平面二维零重力的模拟,无法支持

空间三维零重力的模拟,则空间机械臂地面测试系统无法充分地测试到中央控制器的所有工况。而依托空间机械臂实时模型的半物理测试可以有效地解决此问题。

所谓半物理测试是指机械臂一部分模型是实际物理产品,剩下的均是数字模型。支持中央控制器的半物理测试是将空间机械臂中央控制器的物理产品替换数字机械臂中中央控制器模块(图 6),对中央控制器进行测试。

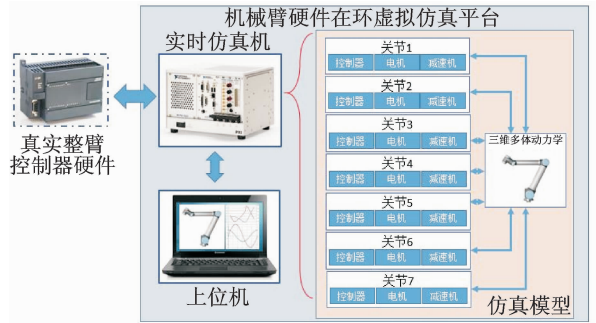


图 6 中央控制器半物理测试

Fig. 6 Hardware in loop test of the central controller

此测试系统有效地规避了地面重力对真实机械臂带来的影响,能完成中央控制器所有工况的测试。经过测试,发现了如中央控制器预编程数据丢失、中央控制器复位电流异常等诸多问题,有效地支持了中央控制器的研制,提高产品的可靠性。

#### (4) 支持空间机械臂模拟器建设

空间机械臂模拟器(图 7)是机械臂物理产品的直接替代,包含数字机械臂、舱内仪表显示系统等。既能对航天员的操作作出正确反应,又反应了机械臂的真实物理特性,以有效支持航天员的训练。



图 7 空间机械臂模拟器

Fig. 7 Simulator of space minipulator

#### (5) 空间站操作仿真软件

空间站操作仿真软件(图 8)运行于空间站舱内笔记本中,包含数字机械臂、轨道模块、3D 图像显示系统以及舱内仪表系统等。航天员执行空间任务之前,先通过操作空间站操作仿真软件来对任务进行模拟与联系。

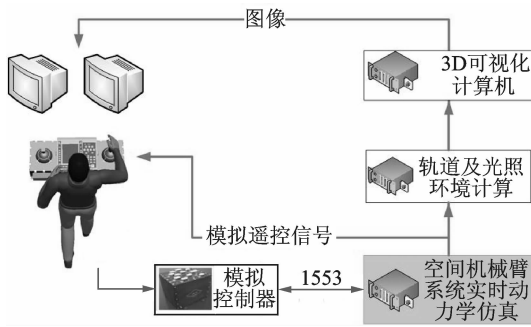


图 8 空间站操作仿真软件

Fig. 8 Space task simulator

## 5 结束语

本文详细分析了空间机械臂设计验证及任务验证的难题,进行了空间机械臂多学科仿真模型需求分析,并寻找了一条合适的解决方案,成功应用于中国空间机械臂的产品验证中,得到结论如下:

- (1) 针对空间机械臂设计验证及任务验证的难点,宜采用基于统一语言编程的方法建立空间机械臂多学科仿真模型。
- (2) 为了适应后续仿真模型的修正验证及半物理仿真,空间机械臂仿真模型宜安装实际物理系统进行模块化划分,保持模型接口与实物借口一致,便于后续半物理仿真中完整替代。
- (3) 中国空间机械臂多学科仿真模型经软件对软件验证与软件对试验验证,判定模型准确有效,可以应用于后续的仿真分析与任务验证。

### 参考文献:

- [1] HUNTER J A, USSHER T H, GOSSAIN D M. Structural dynamic design considerations of the shuttle remote manipulator system[R]. Washington D C: AIAA-0706, 1986.
- [2] NGUYEN P K, RAVINDRAN R, CARR R, et al. Structural flexibility of the shuttle remote manipulator system mechanical arm[C]//Guidance and Con-

trol Conference. Washington D C: AIAA, 1982:246-256.

- [3] GIBBS G, SACHDEV S, MARCOTTE B, et al. Canada and the international space station program overview and status[J]. Acta Astronautica, 2003, 51(1):591-600.
- [4] SHIRAKI K, OZAWA K, MATSUEDA T, et al. JEMRMS development status, Japanese experiment module used for international space station [C]//44th International Astronautical Congress. Paris: IAF, 1993:16-22.
- [5] AMADIEU P J. European contribution to the international space station alpha[C]//45th International Astronautical Congress. Paris: IAF, 1994.
- [6] FREUNDE E, ROSSMANN J. Multimedia and virtual reality techniques for the control of ERA, the first free flying robot in space [C]//Proceedings 2001 ICRA, IEEE International Conference. Washington D C: IEEE, 2001:1921-1926.
- [7] KAMPEN S, MANDERSLOOT W, THIRKETTLE A J, et al. The european robotic arm and its role as part of the russian segment of the international space station alpha[C]//46th International Astronautical Congress. Paris: IAF, 1995.
- [8] LAMBOOY P J, MANDERSLOOT W M, BENTALL R H. Some mechanical design aspects of the european robotic arm[R]. Washington D C: NASA, 1995.
- [9] BOUMANS R, HEEMSKERK C. The European robotic arm for the international space station[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1998, 23(1):17-27.
- [10] 于登云,孙京,马兴瑞.空间机械臂技术及发展建议[J].航天器工程,2007,16(4):1-8.  
YU Dengyun, SUN Jing, MA Xingrui. Suggestion on development of Chinese space manipulator technology[J]. Spacecraft Engineering, 2007, 16(4):1-8.

(编辑:刘彦东)