

# 数字化柔性装配在管路系统制造中的应用

## Application of Digitalized Flexible Assembly in Pipeline System

北京卫星制造厂 董礼港 张加波 杨颂华 曾如川 屈林 张佳朋 赵长喜

**[摘要]** 空间飞行器管路系统具有形状复杂、接口关系多、制造精度要求高等特点。传统的空间飞行器制造中,管路研制必须在总装阶段舱体、设备、仪器到位的情况下开展管路取样和试装,占用总装周期,且受仪器设备到位情况制约。数字化柔性装配在管路系统制造中的应用,从根本上改变了管路系统的生产模式。

**关键词:** 管路系统 数字化 柔性装配

**[ABSTRACT]** The pipeline system of spacecrafts is characterized by its complex shape, various interfaces, and high manufacturing precision requirement. In traditional spacecraft manufacturing, the development of pipeline systems must start under the circumstance that the cabin, the equipment and the instrument is all in position during the general assembly step to initiate the pipeline sampling and the trial assembly processes. This method occupies the general assembly period and is also restricted by the condition of the equipment and instrument. The application of the digitized flexible assembly in pipeline systems fundamentally changes the production mode of pipeline systems.

**Keywords:** Pipeline Digitalization Flexible assembly

长期以来,北京卫星制造厂一直承担了航天五院研制的卫星推进系统管路和载人空间飞行器环控/生保、推进、热控管路焊装任务。推进分系统具有轨道与姿态控制、机动及位置保持等功能,管路的性能直接影响到推进分系统的控制精度。环控生保分系统主要是为宇航员提供生命保障,其每一条焊缝质量都与宇航员的生命息息相关。可以说,在空间飞行器设计及实施过程中,管路系统设计及制造、安装占有重要地位。同时生产周期也是制约空间飞行器研制进度的关键因素<sup>[1-2]</sup>。

在传统的空间飞行器制造中,管路研制必须在总装阶段舱体、设备、

仪器到位的情况下,开展管路取样和试装,占用总装周期,且受设备、仪器到位情况的制约,可以说管路焊装的周期直接影响空间飞行器的总装周期。随着我国航天产业的高速发展,空间飞行器一直处于研制高峰期,多型号管路系统制造任务冲突状况日益严重,管路系统制造已成为空间飞行器研制的主要瓶颈之一,缩短管路占用总装周期和提高管路研制生产效率已迫在眉睫。

数字化柔性装配是基于三维模型的管路数据快速提取和装配,解决管路数字化焊装工艺的瓶颈问题,从而提升空间飞行器管路的生产和可靠性和满足日益增长的型号任务需求。

## 1 空间飞行器管路系统介绍

### 1.1 管路系统的特点

空间飞行器管路系统需连接贮箱、气瓶、泵、阀门、发动机等多个设备,通常有较多的分支,管路走向须依附舱体结构以便安装固定,同时还要避让其他仪器设备。一件完整的管路组件需与多个管路设备实现密封连接,同时还要实现管路自身与舱体结构的安装固定,图1为一个典型的管路系统三维模型。

管路系统主要由该系统的零部件、导管、管路接头焊接而成。根据型号不同,焊接零部件、弯管制造的数

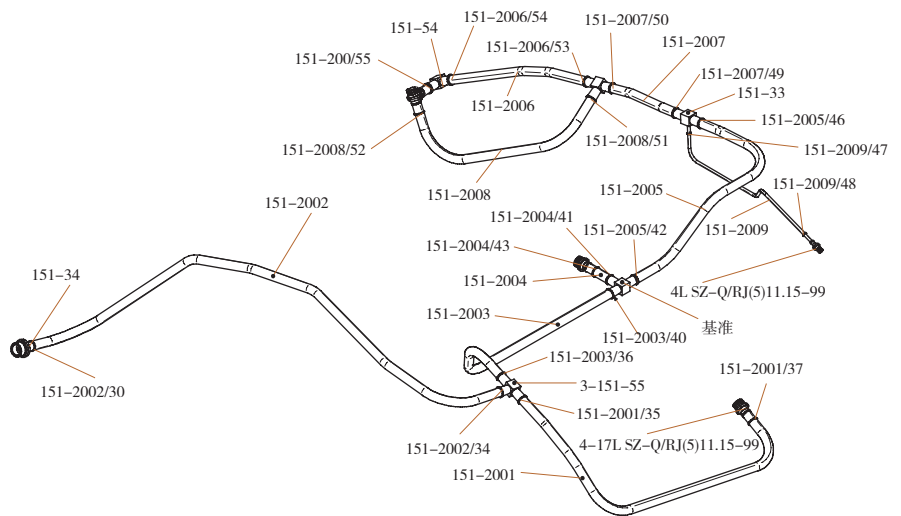


图1 导管组件三维设计模型  
Fig.1 3D model of conduit assembly

量由几十件到上百件不等,导管必须服从零部件的布局,满足焊接和定位要求,造成导管具有形状复杂、接口关系多、制造精度要求高等特点。

### 1.2 管路系统研制过程中存在的问题

近十年来,数控弯管开始在卫星管路中应用,但目前约有 1/3 的导管由于走向复杂、与数控弯管机干涉等原因无法采用数控弯管,仍采用手工取样的方法。手工取样与数控成形并存,缺乏快速高效的装配平台和检测方法制约了管路数字化制造的应用。目前,采用手工搭建组夹、利用精测手段配合,进行管路连接件的空间位置和角度摆放模拟,过程如图 2 所示。该技术能够脱离设备仪器实物,实现基于三维模型的管路制造,但是,为保证管路和连接件的对中精度,过程中需要反复调整、反复精测,过程繁琐且一致性难以保证。该问题的存在,制约了管路研制效率的进一步提高,与“十二五”需求存在较大的差距。

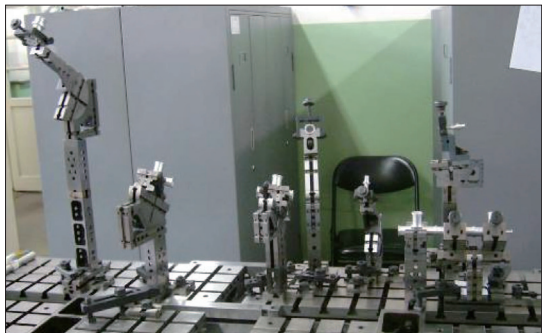


图2 管路系统手工取样平台

Fig.2 Manual sampling platform of pipeline system

## 2 管路系统工艺解决路线

针对空间飞行器管路研制过程中存在的问题,此处提出一种管路快速、高效焊装工艺技术解决方案。

通过对数控弯管设备弯管过程的运动仿真,分析不同走向导管的数控弯管适应性,利用专用的空间位置数据提取软件,实现管路连接件坐标数据的快速提取、相对坐标转换,给导管和管路连接件分类、编码,并记录工艺信息。

利用自主研发的一种管路接头位姿自动调整平台,实现对管路连接的空间位置和角度快速到达,并进行精度保持,提高自动化焊装效率和精度。

依据装配平台,利用专用的装配仿真干涉检查系统,进行装配路径规划、仿真,优化工装的设计和管路走向。

## 3 管路系统快速、高效焊装工艺关键技术

数字化柔性装配与传统的管路系统手工取样制作

不同,后者基于舱体仪器设备实物,而数字化柔性装配基于三维模型数据,采用专用软件将设计数据转化为工艺数据和生产数据后,由数字化装配平台以生产数据为依据,进行相应管路连接件的空间位置和角度快速摆放,模拟其在型号产品上的实际空间位姿。下面分别介绍数字化柔性装配用于空间飞行器管路系统制作的各项关键技术。

### 3.1 管路设计的规范化和可制造性分析

首先对空间飞行器管路的特性进行分析,通过有限元分析和试验验证确定管路的最佳弯曲半径;通过数控弯管仿真分析对数控弯管过程的干涉现象进行分析,确定导管数控弯管的可制造性。通过有限元分析和试验验证确定导管最佳弯曲半径,有限元分析结果如图 3 所示。

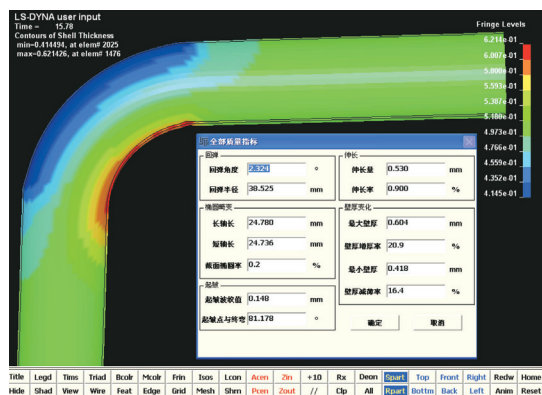


图3 弯管过程有限元分析

Fig.3 Finite element analysis to pipe bending process

开发一种弯管机干涉检查软件,该软件模拟真实的弯管机机构运动,在运动模拟过程中,不断进行物体碰撞检测,以检查每一次运动是否会产生管路与机床的干涉。通过仿真能够发现工件的不合理设计,为设计人员改进设计提供依据,干涉检查软件的仿真界面如图 4 所示。

### 3.2 管路组件设计数据的快速提取

为了实现航天器管路系统三维空间位姿再现,需要将设计三维模型中包含的设计数据转化为管路装配工艺数据。完成数据转换,需要经过数据提取,装配仿真,干涉检查,偏置补偿计算等环节。数据转换后,软件系统输出硬件平台能够识别的驱动数据,并实现设计数据到驱动数据转换过程中的偏置补偿。

软件具有 9 个功能模块,分别是:(1)数据导入模块;(2)数据提取模块;(3)坐标系原点设定及工作平台创建模块;(4)导管组件标识模块;(5)管路摆放姿态优化模块;(6)管路装配仿真模块;(7)多维组合台偏置补偿模块;(8)驱动数据输出模块;(9)测量数据输出模块。

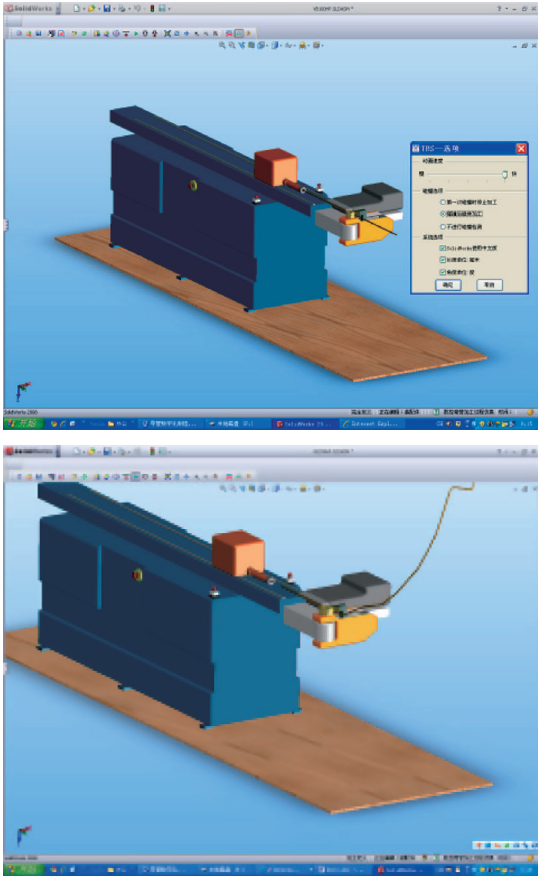


图4 干涉检查仿真示意图

Fig.4 Diagram of interference checking simulation

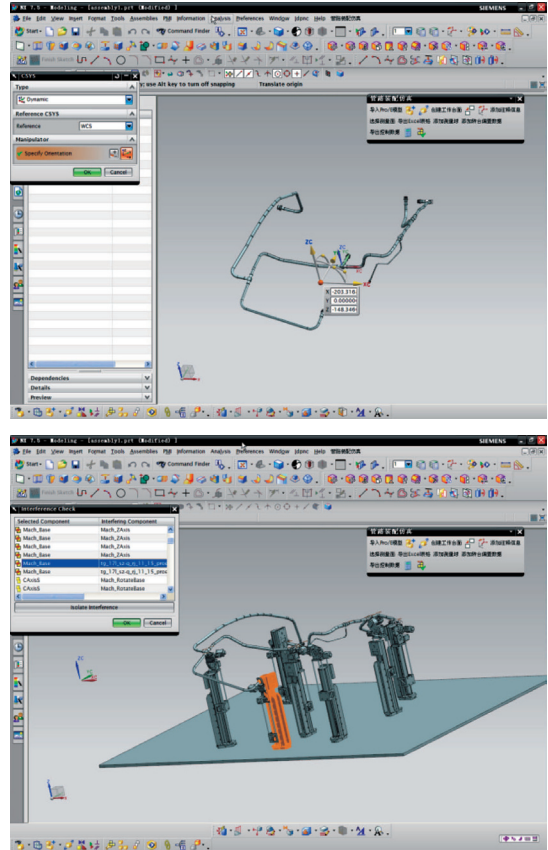


图5 坐标原点设定与装配过程仿真

Fig.5 Origin of coordinates definition and assembly process simulation

图5为利用专用软件进行管路组件数据提取,以及进行管路布局摆放过程仿真验证的截图。

### 3.3 基于三维模型的管路焊装平台

管路焊装平台结构上包括龙门型位移台、10套多维组合台和管路连接件夹持工装3大部分,布局关系如图6所示,组合实现管接头空间位置和角度调整。管路组件的位置和角度调整由专门的控制软件进行驱动。龙门位移台 $X$ 轴采用双电机同步驱动设计、 $Y$ 轴采用龙门结构,用于解决管路跨度大及位置避让问题。组合台设计有与龙门位移台和夹持工装的接口,既能跟随龙门台进行大范围位置调整,又能用于实现对管路连接件的精确调整。

为了实现复杂空间走向的管路系统的三维空间位置和角度再现,设备各部分功能如下。

龙门型位移台可以沿 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 3个方向做平移运动

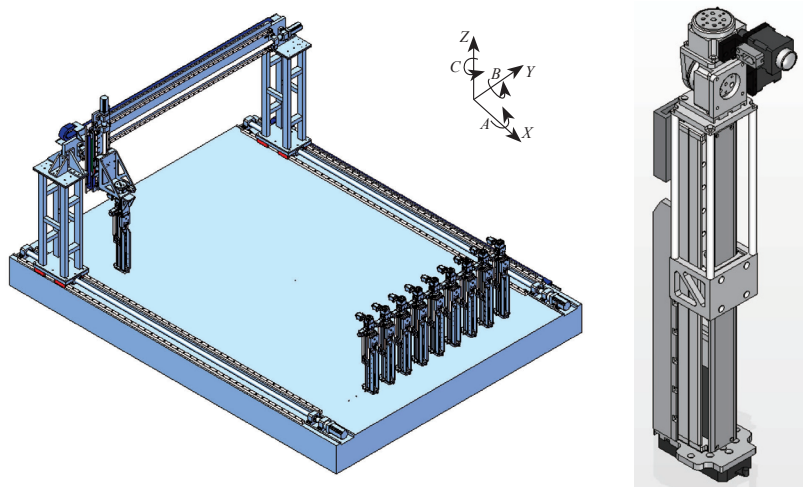


图6 管路焊装平台模型

Fig.6 Model of pipeline welding platform

及绕 $C$ 轴做转动,位移台的末端设计有抓手,主要用于抓持多维组合台在 $X$ 、 $Y$ 向大范围的位置调整,以及绕 $C$ 轴角度调整。组合台移动到位置后,利用末端抓手将多

维组合台固定在下平台。

多维组合台可以沿 Z 轴升降及绕 B、C 轴转动,当龙门位移台携带组合台移动到到位后,组合台能够携带管接头进行 Z 轴位置精确调整,以及绕 B、C 轴做精确角度调整。它主要用于实现管路连接件的位置和角度精确调整。

夹持工装设计有管路连接件的安装接口,随多维组合台一起运动。

### 3.4 多轴协调运动控制系统

龙门位移台具有 X、Y、Z、C 4 个自由度,控制系统完成位移台 4 套交流电机和 1 套步进电机的运动控制;单套多维组合台具有 Z、C、B 3 个自由度,控制系统完成组合台 1 套交流电机和 2 套步进电机的运动控制;控制系统至少具有 11 控制通道和 7 轴控制能力,完成整个硬件平台位置控制。

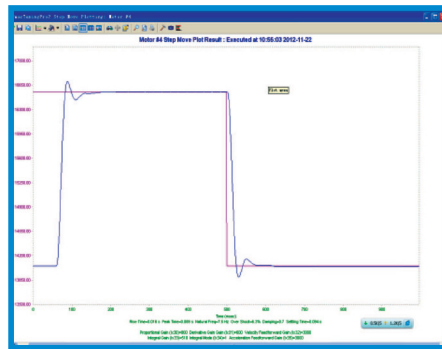
采用“PC+ 运动控制器”的体系结构,工业控制计算机作为控制平台,完成系统管理和部分实时性要求不高的任务。运动控制卡作为控制系统的核心控制单元,完成实时控制任务,电机的响应曲线及控制效果如图 7 所示。

## 4 应用情况及应用前景

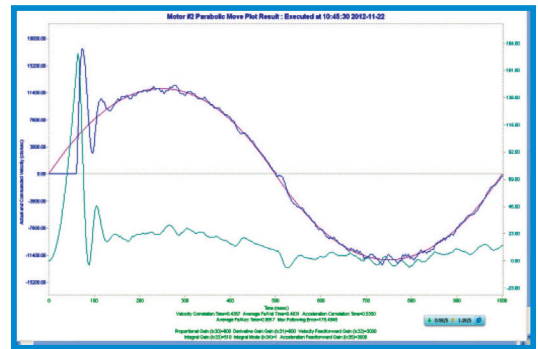
目前这种数字化柔性装配技术已应用到多个型号的主动热控、水升华回来和流体回路,以及多个型号的卫星推进系统管路数控弯管中,不仅为空间飞行器管路系统的制造提供了新的技术手段,也为航天、航空等领域相关产品和其他领域的相关产品提供了技术手段,具有广泛的应用前景。图 8 为利用该系统进行管路快速焊装的过程照片,以及对应的数字化焊装后的部分管路实物照片。

## 5 结论

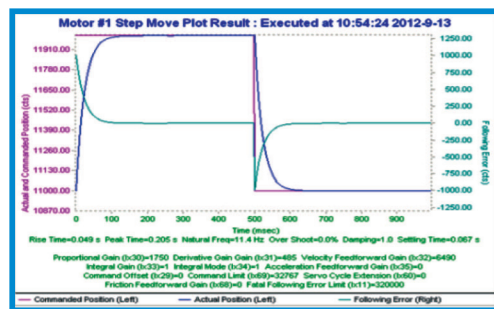
通过开展管路设计规范化和可制造性分析,建立管路设计规范,开展基于三维模型的管路数据快速提取和装配方法研究,解决管路数字化焊装工艺的瓶颈问题,



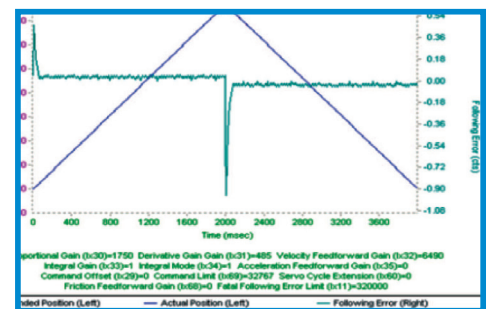
(a) 交流电机阶跃响应曲线



(b) 交流电机抛物线跟踪响应曲线



(c) 步进电机阶跃响应曲线



(d) 步进电机斜坡跟踪响应曲线

图7 电机响应曲线

Fig.7 Motor response curves

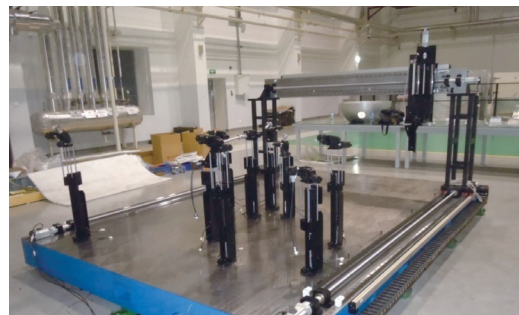


图8 管路及焊装平台实物照片

Fig.8 Photograph of pipeline and welding platform

提升了空间飞行器管路焊装的生产能力和可靠性。改变了空间飞行器管路的生产模式,使空间飞行器管路制造从传统的手工模式、依赖舱体仪器设备实物取样改变

(下转第 58 页)

经过大量的试验之后发现,使用这种加工动作,能够有效地解决刀具在两种材料之间的过渡问题,减少过渡时刀具的抖动现象,使刀具对孔壁磨损降低,提高孔的加工质量。

## 4.2 基准扫描解决方案

为了保证机器人系统能够通过加工之前的基准孔扫描。首先在预装工装之上加装钻套,钻套的位置根据理论数模中基准孔的位置确定,这样能够尽可能地减少人工加工基准孔的误差;然后在柔性装夹系统中增加定位器数量,使工件在装夹系统中的位置定位更加准确和牢固,实现减少因装夹导致的位置偏差的目的;同时可以修改柔性装夹系统的转动控制系统,更加精确地控制工装的转动,减少因工装旋转造成的位置精度丢失。

## 4.3 法向找正问题解决方案

在最多只有 2 个传感器的位置落在零件上时,如果加工工件外形曲率变化不大,可以使用冻结法向的方法来确认待加工孔的法线方向,即在加工完最后一个能够使用法向传感器找到法向的孔之后,将这个孔的法向参数固定在程序中,之后需要加工的孔,沿用该孔的法向参数。

使用这种方法能够在法向传感器无法产生作用时,最大限度地满足加工需求,保证待加工孔的法向精度。同时可以对系统进行改进,采用其他的法向找正方式,例如可以采用扫描待加工孔位附近表面曲率的方式,但因这种方法将会改变系统的现有模式,对系统产生较大影响,而且改进时的成本也较高,所以较少采用。

## 5 结论

自动制孔技术是提高飞机钻孔质量和加工效率的重要手段,本文针对翼面类部件的加工特点,分析了在使用自动制孔机器人加工该类零件时出现的难点及问题,提出了相应的解决方案,并通过试验验证了解决方案的可行性。本文提到的这些问题,只是机器人自动制孔系统在实际加工应用时遇到的问题中较为突出的,除此之外还存在其他问题,例如在离线编程阶段,会涉及到坐标融合;实际加工阶段,加工路径的合理安排等问题。

综上所述,想要使机器人加工更加顺利、效率得到有效提高,还有很多问题亟待解决,需要我们进行更多的学习研究。

### 参考文献

[1] 毕树生,宗光华,梁杰. 机器人技术在航空制造业中的应用. 机器人技术与应用,2009(3):29-35.

(责编 亿霖)

(上接第 45 页)

## 7 结论

翼身融合整体结构装配涉及多学科多领域,通过柔性装配技术规划研究,确定了不同阶段应用的不同柔性装配技术,得到了柔性装配工装的输入,自动制孔设备的利用率,统计出所需的工艺装备和专用设备,为实现翼身融合整体结构优异性能,满足设计技术要求,提高装配质量提供了有效保障。同时,翼身融合整体结构涵盖了机翼和机身,其他型号的非翼身融合结构在开展柔性装配时,本研究成果也可提供一些支持和服务。

### 参考文献

[1] 彭亮,薛红军,张玉刚. 翼身融合飞机结构研究. 科学技术与工程,2009(8):244-247.

(责编 小城)

(上接第 49 页)

为独立完成的全过程数字化制造模式,从根本上提高了管路系统制造的响应速度,为后续日益增长的型号任务提供了必要的技术支持和保障。

### 参考文献

- [1] 高慎斌. 卫星制造技术(下). 北京:中国宇航出版社,2006.
- [2] 孙伟,闫荣鑫,韩琰. 航天器密封管路的气态与示漏气体漏率等效关系研究. 航天器环境工程,2009.
- [3] 王奇娟,薛忠明,杨颂华,等. 钛合金、不锈钢和铝合金异材管路结构钎焊工艺. 航天制造技术,2007(6):25-27.

(责编 亦非)

(上接第 54 页)

对舱体变形、装配应力大,采用增加调整垫片的工艺措施;针对设备安装支架精度要求高,引入了离线加工的工艺措施,保证了舱内结构装配后满足各项技术指标要求。该装配工艺技术可在未来空间站等大型密封舱内结构的高精度装配提供借鉴。

### 参考文献

- [1] 熊威,甘忠. 测量辅助飞机装配技术. 航空制造技术,2011(8):57-60.
- [2] 张于. 基于统一空间测量网络的大尺寸测量方法. 航天器环境工程,2011,28(3):277-281.
- [3] 王莉,方伟,邢宏文. 大尺寸空间测量方法的实施及应用. 南京航空航天大学学报,2012,44(S):48-51.
- [4] 刘建新,马强,杨再华. 激光跟踪测量系统及其在航天器研制中的应用. 航天器环境工程,2008,25(3):286-290.

(责编 良辰)