

卫星三维电缆网设计与制造一体化集成研究与应用

孟宪超 姚 骏 张月强 邓丁元

(上海卫星工程研究所, 上海, 200240)

摘要:针对卫星三维电缆网数字化设计、制造协同“信息孤岛”问题,提出了卫星三维电缆网设计与制造一体化流程和方法。通过基于模型的定义(Model based definition, MBD)三维电缆网协同设计方法,可以快速生成标准化、精细化的三维电缆网。基于 MBD 三维电缆网设计与工艺联动,开发了电缆网设计、加工、检测和装配联动软件模块,形成了一套电缆模型工艺信息快速提取方法。通过具体型号应用,验证了该方法在电缆网设计、加工、检测和总装的有效性和精确性。

关键词:三维电缆网;基于模型的定义;协同设计

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2018)S2-0074-06

Research and Application of Integration of Design and Manufacture in Satellite 3-D Cable Network

MENG Xianchao, YAO Jun, ZHANG Yueqiang, DENG Dingyuan

(Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai, 200240, China)

Abstract: In order to eliminate the information silos and achieve interoperability between design and manufacture in the design of satellite 3-D cable network, a integration of design and manufacture is proposed, Through the collaborative design based MBD, a needed satellite 3-D cable network is set up immediately. Through the collaborative process design based on MBD, a software module is developed during the design processing testing and assembly, then a set of process extraction method is formed. The application based on specific satellite demonstrates the quality and effectiveness of proposed approach.

Key words: 3-D cable network; model based definition(MBD); collaborative design

随着数字化制造^[1]的发展,飞机、汽车等批量生产的行业逐步采用基于模型的定义(Model based definition, MBD)的三维设计,并取得了显著的效果^[2-3],电缆作为卫星重要的组成部分,由于卫星本身单件、小批量生产的特点以及其相关电子设备连接的复杂性,经常出现由于设计、工艺原因导致的设计优化、更改和迭代现象。同时由于电缆网设计、加工、检测和装配等还未有效集合在一起,导致设计、工艺过程无法快速响应各方变更,设计

端无法与制造端联动贯通等问题,严重影响了型号研制进度。后续也更难以满足批量自动化生产的需求。目前急需改变现有的工作模式,完善相应的设计规则以及标准,重点开展了电缆网组件的接口定义规范化和设计资源库标准化、三维电缆网的空间路径优化、干涉避让技术和电缆网质量特性精细化建模研究和基于 MBD 的三维电缆网设计与工艺联动集成等研究,保证电缆网产品的质量和效率。

收稿日期: 2018-03-23; **修订日期:** 2018-05-30

通信作者: 孟宪超,男,工程师, E-mail: shandabogo@hotmail.com。

引用格式: 孟宪超,姚骏,张月强,等. 卫星三维电缆网设计与制造一体化集成研究与应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(S2): 74-79. MENG Xianchao, YAO Jun, ZHANG Yueqiang, et al. Research and application of integration of design and manufacture in satellite 3-D cable network[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(S2): 74-79.

1 电缆网数字化协同设计核心技术

通过分析目前电缆网研制流程,如图 1 所示,与以往设计流程和平台^[4]相比主要优点在于电缆网模型能快速、准确地建立基于全三维模型驱动^[5]的设计和工艺信息,能快速联动传递,同时在以下核心技术实现了突破:通过电缆三维布线模型和知识规则库标准化,建立了完备、准确和标准的电缆三维模型做铺垫。通过空间路径优化技术、空间干涉避让和电缆网质量特性信息,快速完成了带准确质心的电缆三维模型设计。通过基于 MBD 三维电缆网协同设计方法和基于 MBD 的三维电缆网设计与工艺联动,实现了设计端到设计端、设计端到工艺端的快速协同联动。最终提高了电缆网设计、加工、检测和总装效率,提升了卫星电缆网精细化设计水平。

2 三维电缆网数字化协同基础研究

2.1 电缆三维布线标准化模型和规则知识库建立

针对电缆网组件研制具体特点,在设计、加工、检验和总装等业务流程分析和整理的基础上,要实现三维电缆网快速和精细化设计,需从设计源头规范机械和电器信息、建立涉及电缆网设计、加工、检验和总装等具体环节的数字化标准、规则库以及设计资源库。

2.1.1 电缆网三维设计输入机械和电气信息规范化

电缆网三维设计输入主要包括接口数据单 (Interface data sheet, IDS) 和单机设备简化模型^[6]。针对 IDS 电气信息,需形成 IDS 系统填报、签署、入库要求及操作指南,并将设计规范、规则等知识库内容固化,形成 IDS 数据校验工具,保证 IDS 电器信息与填写规则的一致性。

针对 IDS 机械信息,通过一套工具对签署的 IDS 机械信息与单机设备简化模型进行一致性检查,首先对设备识别检查:包括单机模型的基本信息、安装信息、轮廓信息、主体轮廓、耳片及筋、质量信息和电连接器信息等识别检查。其次检查表单数据的完备性,将单机模型与表单数据进行对比检查,导出对比差异报表,保证 IDS 机械电器信息与填写规则的一致性。

2.1.2 电缆网设计资源库建设和使用

电缆网三维设计资源库的建立可以为后续总装,制造有效信息的提取和使用提供支撑,电缆网三维设计资源库具体包括电缆的接插件、尾罩、导线信息以及电缆制造和总装时的辅料信息。在设计资源库完善以后,单机提交轻量化时,将接点数据源导出的插头信息和模型中的插头信息进行匹配,自动完成相应电缆插头的装配,实现单机入库时电缆网资源的自动替换和使用。完成后为后端

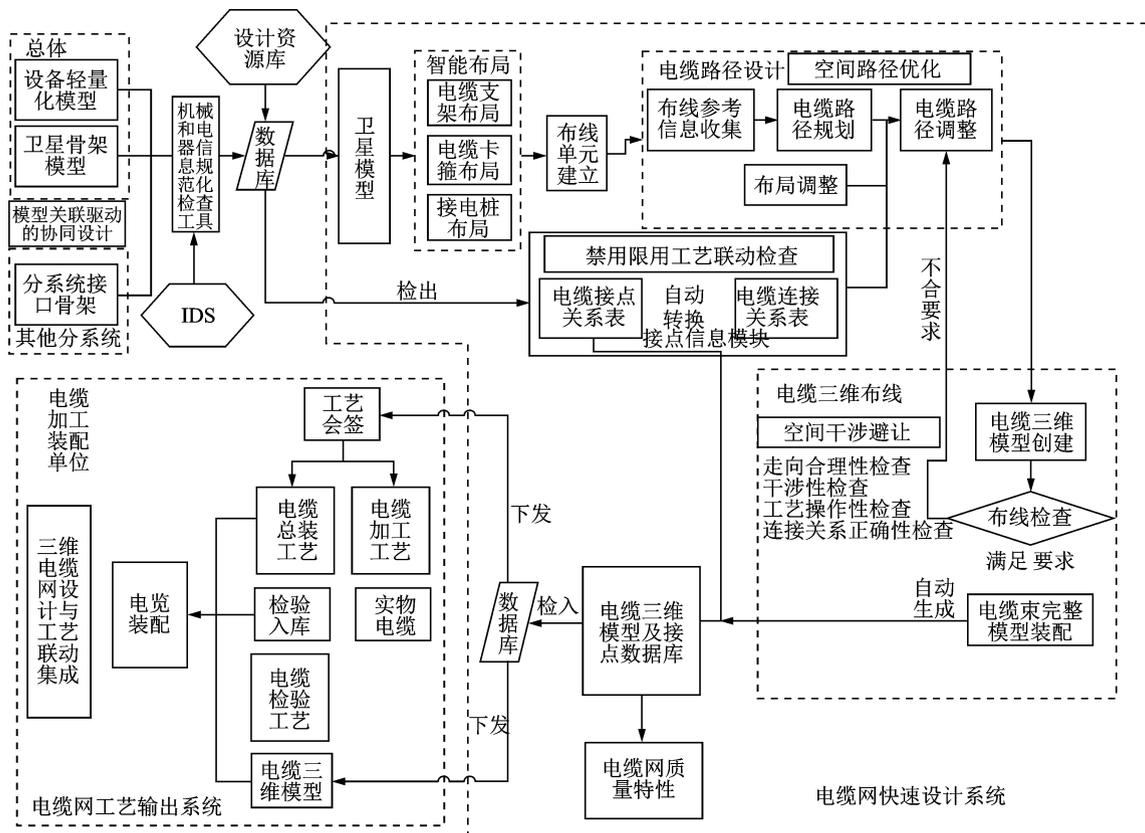


图 1 三维电缆网设计与制造一体化流程

Fig. 1 Flowchart of integration of design and manufacture

电缆网整星质量特性的精细化评估提供数据支撑。

2.2 空间路径优化技术

航天器电缆网设计是一个庞大、复杂的设计过程,由于它的复杂性、多约束性等问题,很难依靠人工计算的优化方法解决电缆网设计优化问题。本文采用基于 Pro/Toolkit 的二次开发技术,电缆路径以样条曲线作为基础,通过识别模型中电子设备的端口坐标系、电缆卡箍的控制点,并将识别的信息收集到统一的参考骨架模型中,识别并设置布线环境中舱板轮廓,识别出自动连线的干扰因素。根据卫星电缆卡箍布局的特性(间距信息),系统自动解析各卡箍之间的路径,根据详细描述起点/终点端口信息及线规信息的接点表,通过递归算法,解析出最短设计路径,并自动生成电缆。该技术实现了一个布线单元 80% 卡箍支架自动连接,大大节约时间,减少或避免了人工连接造成的一系列问题。

2.3 空间干涉避让技术

电缆空间干涉避让主要研究电缆走线自动隔离技术、接插件可插拔间隙检查和电缆孔位通量余量检查三部分。针对电缆走线自动隔离技术,程序自动以舱板为边界避开,在有限区域内按设定的距离进行自动连接、端口的自动识别。

针对接插件可插拔间隙检查,根据理论和实际测量值,形成尾端接插件出线距离的矩阵知识库,通过电缆尾端接插件出线距离与其他单机、舱板等其他刚体间隙计算,在干涉检查工具软件中给出提示信息。

针对电缆孔位通量余量检查,在电缆卡箍的模型属性中标记卡箍的最大电缆通量信息,当生成的电缆经过卡箍或电缆孔时,分别计算出每束电缆的直径信息,判断该卡箍经过的电缆网束直径是否超差,有效避免过于粗壮的路径穿不过穿舱孔的情况,同时也可对线束再分配,为合理布线提供决策参考,来指导后端的线缆装配工艺预先规划与安装仿真。

2.4 电缆网质量特性精细化建模技术

电缆网质量特性对于整星的质量特性评估和总装配重具有重要的影响^[7],电缆网质量特性精确提取的关键在于设计和后端工艺设计中使用的电缆设计资源库是否标准。

电缆网质量特性主要取决于以下几点:(1)电缆导线质量特性及电缆长度,(2)电连接器质量特性及连接器数量,(3)其他辅料质量特性。针对以上 3 点,电缆网质量特性提取的技术方案如下:(1)从源头梳理,建立完善航天型号产品电缆常用导线的信息数据表,主要包含导线单位长度质量、导线直径和弯曲半径等信息(2)完善电连接器模型库,明确每一类连接器质量特性。(3)根据型号使用的辅料采用适当系数,将其他辅料的质量特性赋到电缆网中。

通过电缆网数字化标准模型、标准元器件库和数据库信息继承的方式,以电缆网三维模型为设计载体,自动生成电缆分支图,利用导线信息表中的单位长度质量计算出较为真实的电缆零件质量,将求出单位质量赋值到电缆线规中,得到带有真实质量的三维电缆网线束模型,自动装配使用设计资源库中的电连接器三维模型,形成具备真实质量特性的电缆网组件模型。

3 基于 MBD 三维电缆网设计协同技术

航天产品的设计过程不是单向一次性完成的,而是存在设计过程反复修改,各专业之间反复迭代的过程。这就要求在总体构型布局及相关环境的技术状态发生变化时,三维电缆网能够快速响应。

本文根据 Pro/E 参数化建模的特点,基于 Pro/E 的二次开发,将卫星骨架^[8]体系的建模思路、流程及骨架模型中各层级、各专业包含的信息固化到程序中,实现了其他各专业接口骨架的快速派生。具体将卫星总体构架分为整星、舱段和舱板 3 个层级,如图 2 所示,根据 Pro/E 的复制几何特征所具有的关联性,使用 Pro/E 独有的骨架体系传递构型几何信息和参数信息。

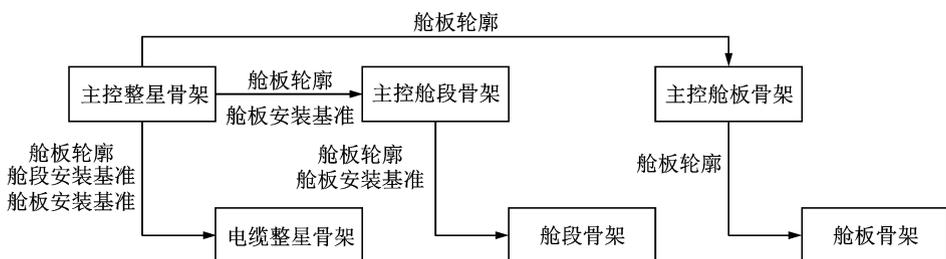


图 2 卫星骨架层次示意图

Fig. 2 Schematic diagram of satellite's skeleton models

当总体设计输入发生变更时,电缆网设计架构能够实现快速变更响应,电缆网络设计关联驱动示意图如图 3 所示。

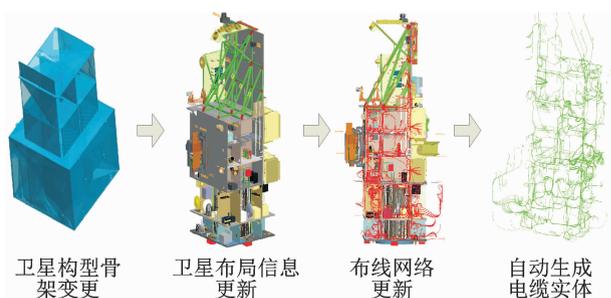


图 3 电缆网设计关联驱动示意图

Fig. 3 Change of skeleton models

4 基于 MBD 三维电缆网工艺协同技术

在电缆网开展三维设计时,设计师需要在电缆网模型上或者电缆网的属性信息里定义电缆编号、电连接器类型、导线规格和导线数量等信息,这些信息是后续在生产、测试和检验设备等工艺数据(工艺端下线表、材料消耗明细表和电缆检验导通表、电缆捆扎工艺)的主要输入,本文将以上设计端的信息直接压缩到模型和数据库中,电子分发至下游电缆厂,下游生产厂通过基于联网的产品生命周期管理(Product lifecycle management, PLM)系统,获取三维电缆网模型和配套接线关系信息,通过模型与数据的信息集成、设计资源库的统一标准,并快速导入计算机辅助工艺设计过程(Computer aided process planning, CAPP)系统^[9]中,快速提取工艺所需要的信息,生成对应的符合要求的报表,为后续的工艺设计提供设计依据。电缆网设计、工艺协同流程架构图如图 4 所示。

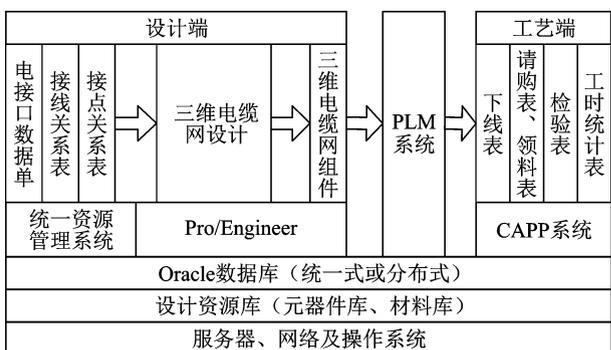


图 4 电缆网设计、工艺协同流程架构图

Fig. 4 Architecture of collaborative design and manufacturing in cable network

4.1 工艺数据表格的联动

下线表、请购表、领料表和工时统计表是工艺

人员根据设计提供的模型和技术要求出具的一种表格,电缆制造人员依据该表格选用电连接器、领用导线规格,截取导线参考长度和根数,并在相应的制造工艺指导下制造电缆,后续该数据可直接导入自动化导线成束系统,完成自动下线、标签粘贴和捆扎。检验人员将该表格导入电缆导通、绝缘和耐压检测仪器,根据实际的导通情况和导通表格做核对,并给出是否通过的提示。调度管理系统根据工艺工时表给出工时定额数据,对人员状态、生产进度进行动态跟踪和监控。极大方便了后端工艺人员。

4.2 电缆捆扎工艺的联动

电缆线束捆扎随着整星功率的逐步增大,电缆电磁兼容性等内容越来越重要,针对电缆捆扎工艺主要设计两个部分的内容,(1)电缆制造时的单束导线捆扎,(2)电缆在总装环节的捆扎。针对线束的捆扎规则固化到软件中,在电缆制造时进行捆扎,也作为后续下线机自动捆扎的规则。针对多束线束捆扎按照设计端的信号类型(如功率电缆、普通信号电缆和通信电缆)在三维模型上进行区分、识别和防护,总装时根据颜色标识区分捆扎,避免产生电磁干扰、供电插头误插拔等操作。

4.3 电缆禁用限用工艺联动

卫星电缆网中最主要产品禁(限)用工艺为:每个焊杯内导线芯线的数量应限制在能与焊杯内壁整个高度都相接触为宜,不宜超过 3 根,导线芯线总线径与焊杯内径之比一般为 0.6—0.9。若不满足将使得焊接部位易产生焊接缺陷,影响卫星的可靠性。这里在电缆网设计输入的电缆接点表中增加校验规则,通过获取接点表中两个端口的电连接器规格,匹配电连接器限用规格表中的导线限用信息规格,若不满足给予信息提示。这就使得电缆工艺的检查工作前移,避免后续设计的返工,影响型号质量和进度。

5 三维电缆网设计与工艺一体化设计工程应用

选取某卫星型号按照如下实施流程完成了设计和验证工作。设计人员首先搭接协同设计所必须的软件和硬件平台:包括电缆工艺知识库和规则的梳理,IDS 系统填报规则梳理,并反馈给软件设计单位,作为软件的设计输入。电缆设计人员和工艺人员完成电缆三维数字化设计和反馈,完善电缆设计资源库,并开展空间路径优化、空间干涉避让、电缆网质量特性精细化建模技术研究,明确软件需求,软件开发人员完成软件开发,并完成电缆下线表、领料表、导通表、工时定额表以及设计与禁用和

限用工艺的联动规则检查软件的固化。电缆制造单位/部门工艺人员拿到经禁用限用工艺检修后的产品模型和文件后,提取模型中的工时定额给技术调度管理部门安排制造、制造和总装计划,制造人员和检验人员对产品制造和检测,电缆总装制造单位/部门使用三维模型直接编制装配工艺指导书,并将相应的工艺模型信息反映至模型中,指导后端总装。

5.1 电缆网质量精细化的验证情况

对电缆网质量进行了验证,选取全部 142 束电缆实际质量和设计质量进行了比较,142 束电缆总设计质量为 97.7 kg,真实质量为 100.2 kg,误差在 2.5%,电缆网实际质量和设计质量曲线吻合度较好。质量误差大于 20% 仅占 2.8% (4 束/142 束),这些都是极轻的电缆,由于在拟合时采用了统一的系数导致。表明电缆插头和辅料对于电缆网质量预估的精度针对小质量电缆有较大程度的影响,电缆越复杂、总质量越大,误差反而越小。究其原因在于电缆插头和辅料建模的精度不高,且电缆插头在制作时由于涉及焊接和压接的不同,针对部分焊接产品如微距型接插件需灌胶密封,而建模时对其灌封胶精度未充分引入导致。电缆质量统计分析如图 5 所示。

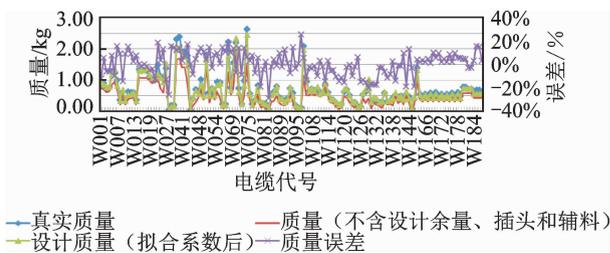


图 5 电缆质量统计分析

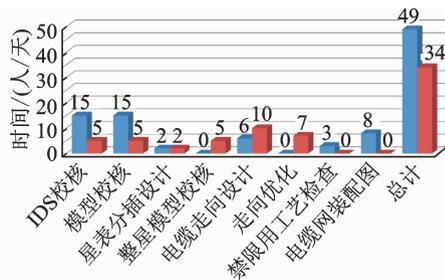
Fig. 5 Estimation of error of cable weight

5.2 设计和工艺端效率提升验证情况

采用三维电缆网设计与工艺一体化设计方法后,针对设计端,人力资源利用更加高效,具体表现在传统模式下 1 颗卫星至少设 1 人专岗进行电缆设计,数字化模式下 1 人可以完成 4—5 颗卫星的电缆设计,单颗卫星的纯电缆设计从原 49 人/天下降至 34 人/天,效率提升超过 30%。采用三维电缆网设计与工艺一体化设计方法后,针对工艺端,单根电缆 180 min 下降至 33 min,效率提高超过 81%。效率对比图如图 6 所示。

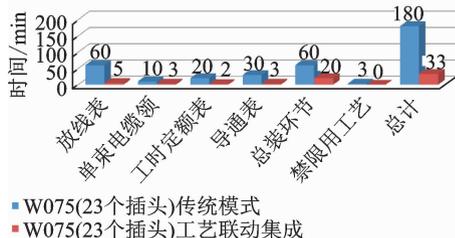
6 结束语

本文实现了三维电缆网数字化设计和制造协同,改变现有电缆网设计、工艺研制模式,加快了航天型号电缆产品的研制进度。实现了设计数据向



(a) Efficiency after collaborative design

电缆网工艺联动集成前后效率比较



(b) Efficiency after collaborative process

图 6 设计端和工艺端效率提升对比图

Fig. 6 Improvement efficiency of design and processing

工艺数据的快速转化,工艺数据信息快速提取和自动生成,为后续全自动化电缆制造提供了数据驱动。提高了电缆后端制造、加工、检验和总装的效率。

参考文献:

- [1] 张训杰,童伟国,陈林静,等. 先进制造技术与数字化制造. 装备制造技术,2007(11):106-107.
ZHANG Xunjie, TONG Weiguo, CHEN Linjing. The advanced manufacturing technology and digital manufacturing[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2007(11):106-107.
- [2] 刘检华,孙连胜. 三维数字化设计制造技术内涵及关键问题[J]. 计算机集成制造系统,2014,20(3):494-504.
LIU Jianhua, SUN Liansheng. Connotation and key problem of three-dimensional digital design and manufacturing technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(3):494-504.
- [3] 武鹏,张一哲,闻敬谦,等. 面向航空线束的数字化制造关键问题探讨[J]. 航空制造技术,2017(14):97-100.
WU Peng, ZHANG Yizhe, WEN Jingqian, et al. Discussion on key issues of digital manufacturing for aircraft wire harness[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(14):97-100.
- [4] 邓丁元,江莉芬,铁琳,等. 基于 Pro/E 的卫星数字化电缆网设计平台研究[J]. 数字军工,2015(3):43-47.
DENG dingyuan, JANG Lifen, TIE Lin, et al. Study on the platform of satellite 3-D cable network based on Pro/E software[J]. Digital Military Industry, 2015(3):43-47.

- [5] 范玉斌,刘闯,吴红兵,等.全三维模型驱动的复杂产品智能制造[J].计算机集成制造系统,2017,23(6):1176-1186.
FAN Yubin, LIU Chuang, WU Hongbing, et al. Intelligent complex product manufacturing driven by complete three-dimensional model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(6): 1176-1186.
- [6] 范凯,黄业平,刘政,等.基于 Pro/E 软件的卫星三维布局与电缆的协同设计[J].航天器环境工程,2015,32(4):390-394.
FAN Kai, HUANG Yeping, LIU Zheng, et al. Collaborative design for satellite tridimensional layout and cables based on Pro/E software[J]. Aircraft Environment Engineering, 2015, 32(4): 390-394.
- [7] 张旺军,陈向东,潘艳华,等.一种航天器电缆网精确质量特性计算方法[J].航天器工程,2014,23(4):33-38.
ZHANG Wangjun, CHEN Xiangdong, PAN Yanhua. A method of accurate mass property calculation for spacecraft cable network[J]. Aircraft Environment Engineering, 2014, 23(4): 33-38.
- [8] 李飞,章乐平,王志勇.航天器数字化协同技术研究[J].导弹与运载航天技术,2013,324(1):71-74.
LI Fei, ZHANG Yueping, WANG Zhiyong, et al. Study on digital collaborative design technology for spacecraft[J]. Missiles and Space Vehicles, 2013, 324(1): 71-74.
- [9] 孙刚.基于三维模型的卫星装配工艺设计与应用技术[J].计算机集成制造系统,2011,17(11):2343-2350.
SUN Gang. Secondary planet assembly process design and applied technology based on 3D model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(11): 2343-2350.

(编辑:陈珺)