

一种卫星星况预测与监控技术方法

吴婵娟 郑建明 熊智强 赵慧渊 薛光皓

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)



摘要: 介绍了一种卫星星况监控与预测系统, 可以预测未来时间段内各卫星系统的星况分布, 提供卫星定位产品较优试验时间段, 提升大型试验中卫星定位产品的试验成功率。同时, 针对卫星导航信号干扰种类越来越多, 干扰强度越来越大, 通过本系统可知当前环境下是否有干扰信号及干扰信号的数量、强度。

关键词: 星况预测; 星况监控; 测试试验

A Method of Satellite Condition Prediction and Monitoring

Wu Chanjuan Zheng Jianming Xiong Zhiqiang Zhao Huiyuan Xue Guanghao

(Beijing Automation Control Equipment Research Institute, Beijing 100074)

Abstract: This paper introduces a satellite condition monitoring and prediction system, which can predict the satellite status distribution of various satellite systems in the future, provide a better test period for satellite positioning products, and improve the success probability of satellite positioning products in large experiment. Also, there are more types of interference for satellite navigation signals, and the interference intensity is getting bigger. Through this system, we can know whether there are interference signals in the current environment and the number and intensity of interference signals.

Key words: satellite prediction; satellite monitoring; experiment

1 引言

卫星接收机在使用和测试过程中, 定位、测速精度和性能受当时天上卫星的状况影响非常大。日常测试时, 同一款产品不同时刻、不同地点测试, 由于可用卫星数量的不同, 以及每颗可用卫星的不同参数和性能, 导致产品的性能差异非常大。有时甚至由于可用星少, 或者可用星偏于一侧, PDOP 值大等原因, 导致精度超差甚至不定位等情况发生。所以在很多测试时, 都希望能够知道测试时间段内的卫星情况, 是否会出现由于天上卫星的影响导致的性能大幅度下降。尤其是一些大型试验前, 能够知道试验区内的星况, 尽量避免因星况不好使卫星接收机定位精度下降导致试验偏差的情况发生; 同时, 在生产测试或一些大型试验过程中, 对具有 GPS、GLONASS、BDB1 和

BDB3 系统的卫星导航产品需要实时监测, 展示当前时刻、当前位置所有系统的可见卫星信息、定位信息 and 时间信息; 其次, 随着卫星导航信号干扰种类越来越多, 干扰强度越来越大, 在生产测试和大型试验中, 需要判断卫星接收机当前所处的环境是否存在干扰信号及干扰信号的数量、强度等。

针对以上提出的三项问题, 介绍了一种卫星星况预测与监控技术方法, 该方法实现了实时采集卫星历书, 输入需要预报的地点坐标, 预报未来一个月内各个时间点卫星分布状况及 PDOP 值分布, 同时实现了试验中星况实时监控以及测试环境的干扰信号检测功能。

2 现状与要求

作者简介: 吴婵娟 (1982), 硕士, 无线电技术专业; 研究方向: 卫星导航定位技术。

收稿日期: 2020-12-07

2.1 测试现状

目前基于 GNSS 星历(卫星星历指在 GPS 测量中,天体运行随时间而变的精确位置或轨迹表,是时间的函数,用于描述太空飞行体位置和速度的表达式^[1])预报的成熟软件有 StarReport,该软件通过从互联网 IGS 官网下载最新 GPS 星历文件,输入需要预报的地点坐标,可预报未来一个月内各个时间点卫星分布状况及 PDOP 值分布,但使用该软件有如下三个缺点:

- a. 该软件只能预测 GPS 卫星分布,无法预测 BD 和 GLONASS 卫星分布。目前随着 BD 二代逐渐发展壮大,所内大部分型号均采用了 BD 卫星定位系统,因此星历预报需要进行 BD 预报,在此情况下该软件无法使用;
- b. 该软件使用时需要从互联网上下载卫星星历参数,有时受制于试验现场环境,无法实时星历预测,同时互联网上的星历参数不会时时更新,导致下载的历书在预测中存在偏差;
- c. BD 历书参数无法从网络上获取,需要使用卫星接收机采集 BD 历书参数,并转化为软件识别的数据,操作复杂,工作量大。

2.2 目标要求

为实现 GPS、GLONASS、BD 系统准时预报,满足生产测试、靶场或大型试验前星况预测、试验中进行星况实时监控以及出现故障后的环境检测,卫星星况与预测系统应具有以下功能:

- a. 星况预测功能
- 实现卫星星况预测,系统能够采集接收机接收的卫星历书,能够向用户报告未来特定位置、特定时段的 GPS/GLONASS/BD 卫星分布情况。从而有计划选择适合测量的时段进行 GPS/GLONASS/BD 数据采集,提高数据分析的效率;

b. 星况实时监控功能

针对具有 GPS、GLONASS、BD 系统的卫星定位产品实现实时监控,可以展示当前时刻、当前位置所有系统的可见卫星信息、定位信息和时间信息。包括可见卫星 PRN 编号、卫星的仰角、卫星方位角、卫星信号载噪比、卫星是否可用、卫星的伪距值、卫星的伪距变化率、钟差、钟漂及定位结果等信息;

c. 试验环境检测功能

实现卫星定位产品测试环境检测功能,具有 GPS/GLONASS/BD 卫星导航系统信号频谱分析功能、具有 GPS/GLONASS/BD 卫星导航系统信号功率和频谱分析结果显示功能,基于上述信息可以判断卫星接收机当前所处的环境是否存在干扰及干扰信号强度等;

d. 便携式测试功能

实现测试硬件的小型集成化,将全频点接收机和电源电路集成到测试便携机中,减少设备、仪器等资源的占用,满足外场试验的主要测试保障,同时兼顾部门研制型号卫星定位产品对电源的使用需求,满足交流电压输入 220V (具备输入滤波和极性保护),输出 28V 和 5V 的供电要求。

3 技术方案

3.1 星况预测技术方案

星况实时预测部分的功能由卫星接收机和测控系统 (Satellite Predict) 配合完成。其中卫星接收机完成卫星信号接收,历书参数解译,并发送给测控系统;测控系统接收历书参数,运行测控软件实现卫星位置预测。星况预测的工作流程如图 1 所示。

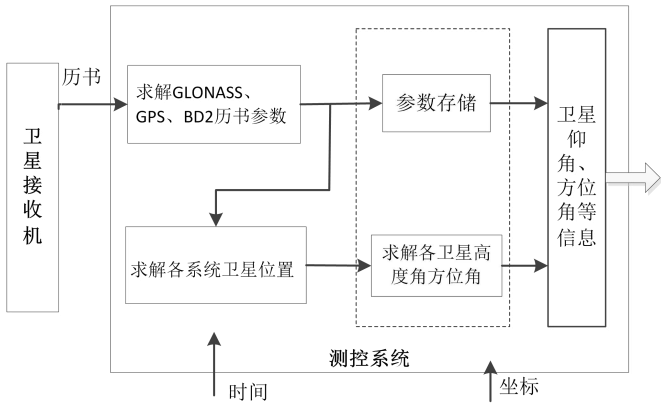


图 1 星况预测工作流程图

测控系统中卫星位置预测部分采用北斗、GPS 和 GLONASS 历书参数预测卫星位置，计算卫星位置分两步进行，首先修正卫星信号的发射时刻，然后计算修正后卫星信号发送时刻的卫星位置。

其中，接收机在部门研制的成熟产品上做了适应性更改，能够覆盖北斗、GPS 和 GLONASS 三个卫星系统的全频点，是具有独立结构的硬件电路，由信号处理和电源及接口两部分组成，设计原理如图 2 所示。

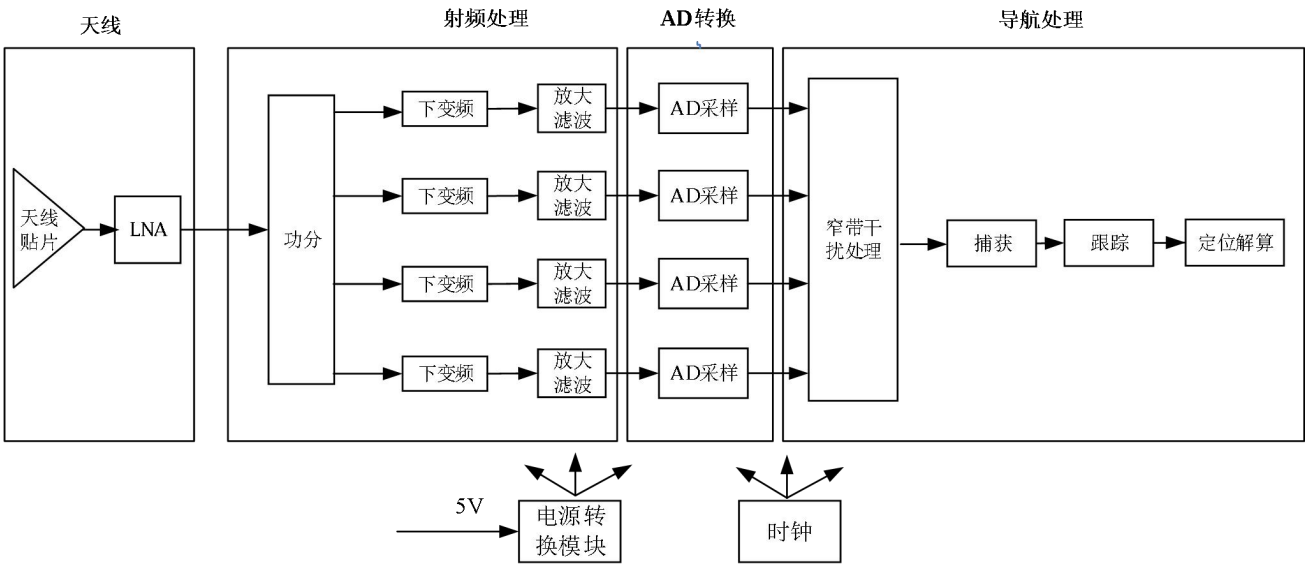


图 2 全频点卫星接收机原理框图

3.2 星况实时监控技术方案

星况实时监控由全频点卫星接收机和测控系统配合完成。其中，接收机完成卫星信号捕获跟踪、卫星观测量提取和卫星位置速度计算，并将卫星伪距和载波相位观测量、卫星位置速度信息、电离层对流层修正量、钟差改正参数等信息发送给测控系统；测控系统接收上述信息，运行测控软件实现电离层和对流层异常监测、故障卫星识别。星况实时监控的工作流程如图 3 所示。

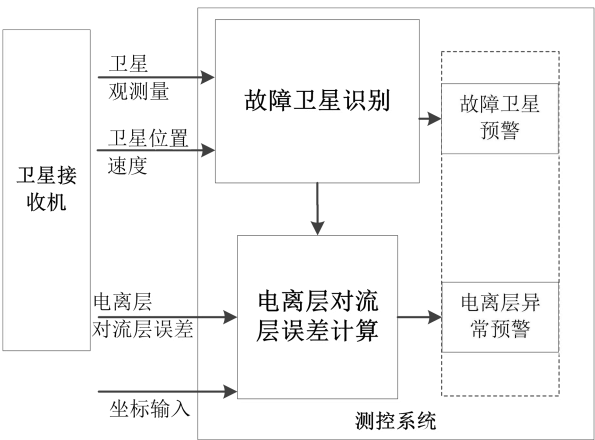


图 3 星况实时监控工作流程图

别，通过本地点坐标进行电离层和对流层误差反算，并与电离层对流层延时测量值比较。

3.3 试验环境检测技术方案

如图 4 所示，试验环境检测主要对北斗、GPS 和 GLONASS 卫星频带内的干扰信号检测。试验环境检测由全频点卫星接收机和测控系统配合完成。接收机中 FPGA 将 AD 采样数据通过 422 串口发给测控系统，由测控系统将接收的 AD 采样数据存储，并对该数据进行傅里叶变化 (FFT)，将时域信息转换为频域信息，最后显示北斗 B1 B3、GPS L1 和 GLONASS 系统的中频信号频谱分析图。

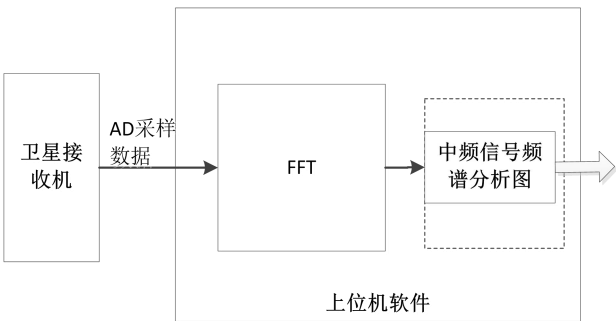


图 4 试验环境检测流程图

3.4 便携式测试技术方案

针对生产测试、外场监测和排故过程中方便携带、

测控系统软件采用 RAIM 算法进行故障卫星识

减少设备资源的占用，提出了便携式要求，将全频点卫星接收机、电源电路和测试便携机集成。

3.5 关键技术和难点

3.5.1 卫星接收机

卫星接收机包含接收天线和主机电路，天线在设计制作过程中借鉴了已有产品 09 系列的成熟天线，主要针对天线贴片进行了适应性更改，涉及的关键技术、难点如下：

a. 采用具有剖面薄、体积小、重量轻、能与载体共形、易于加工制造、成本低廉的微带贴片。同时，为了提高天线的相位中心稳定性，达到阻抗的匹配，使用了双馈点方式馈电，两个馈电点之间进行了 90° 的相移，实现天线的圆极化；

b. 天线由上下两层贴片组成，上层贴片覆盖的工作频段为 BD2-B1、GLONASS、GPS-L1，下层贴片覆盖的工作频段为 BD2-B3。其中上层贴片为了涵盖三个频点（1561MHz、1575.42MHz、1602MHz）反复进行了多次的仿真、验证、调整、再仿真的更改，最终的贴片调试也经过了粗调和精密调试两个过程。

3.5.2 便携式测试系统

便携式测试系统由便携式计算机、接收机和电源电路集成，其中接收机和电源电路板集成在便携机的扩展坞中，由于扩展坞的空间狭小，不利于散热，相关的电气布线需要考虑电磁兼容和信号干扰，涉及的关键技术、难点主要有：

a. 扩展坞的改造在借鉴了以往集成电源电路和相关测试板卡成熟经验的基础上，额外增加了全频点接收机，分析了接收机的功耗，重新评估了集成的电源电路板，应能同时满足接收机和型号产品的 5V 需求，5V 电源模块最大输出电流 20A，设计具有 75%左右的冗余要求；

b. 由于涵盖了卫星定位系统的 4 个频点，卫星接收机使用过程中产品功率较高，发热量大，结构件做了适应性更改，采用了散热较快的铝合金材料。内部

的电子组件通过安装导热垫与结构外壳接触。结构件设计成散热片式，能够更快地将热量传递出去，提高了散热能力；

c. 拓展坞中的电气布线，考虑到射频信号和电磁屏蔽的要求，针对射频信号采用定制尺寸的高频线缆；电源和数字信号线在布线过程中尽量分开两端，同时表面增加屏蔽层。

3.5.3 测控系统 Satellite Predict

a. 卫星星况预测算法设计，该算法首次实现针对通用的使用历书参数预测卫星位置的方法^[2]。根据仿真程序可知，简单的依照 ICD 文件中计算公式无法精确得到卫星的位置信息，预报精度不够，需要大量的实验确定历书参数发射时刻修正时，该修正时确定具有较大难度；

b. 电离层和对流层异常监控功能实现，电离层和对流层延时误差具有很大的随机性，行业中通用的误差模型均不能较好地拟合两者实际值，测控软件中需要设计并实现一种电离层和对流层异常监控的算法，该部分具有较大难度；

c. 故障星剔除算法实现，卫星状态实时监控时涉及到星历参数健康性判断、可视并具备仰角高于门限的卫星是否存在故障星，如果存在故障的卫星参与用户的位置确定，将带来极大的位置或者测速误差，导致用户无法准确得知自己的位置、速度信息，故测控软件该部分需要设计并实现一故障检测及剔除算法，实现故障卫星的监测并清除，该部分程序实现难度较大；

d. 环境干扰监测功能实现，卫星导航信号功率强度较低，极易受到外部其它信号的干扰，造成卫星导航接收机定位出现偏差或者不定位的现象，为了较地开展实验，较快地定位故障原因，开展了环境监测功能的研究，目的是能够实时有效地展现当前环境状况，该部分工作难度亦较大。

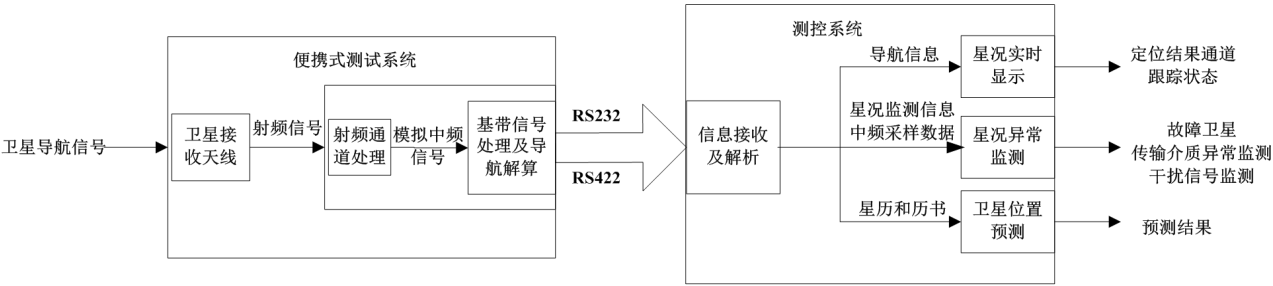


图 5 星况预测与监控方法原理框图

3.6 技术方案的总结

为了实现卫星星况预测、监控、检测以及便携式测试功能，采用以往便携机集成改造中成熟的方法和全频点卫星接收机相结合的思路进行系统集成。测控系统部分实现了接收相关卫星信息，经过修正、解析、计算处理等一系列工作，实现星历、历书存储、星况预测、监控以及检测功能。原理如图 5 所示，测控系统的组成模块如图 6 所示。卫星星况预测与监控方法中涉及的产品包括测控系统（Satellite Predict）和便携式测试系统，其中便携计算机为部门产品测试中普遍使用的设备，只对其扩展坞进行了适应性更改，接收机（含天线）为部门成熟产品，为了满足全频点要求对天线贴片和部分电路进行了适应性更改，电源电

路板采用设计成熟的电路板。

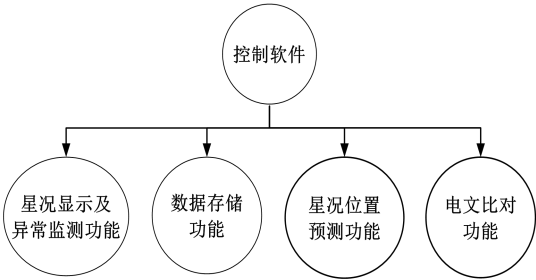


图 6 测控系统的组成模块图

依据图 6 的组成模块图，测控系统的设计方案中给出了程序流程图，如图 7 所示。

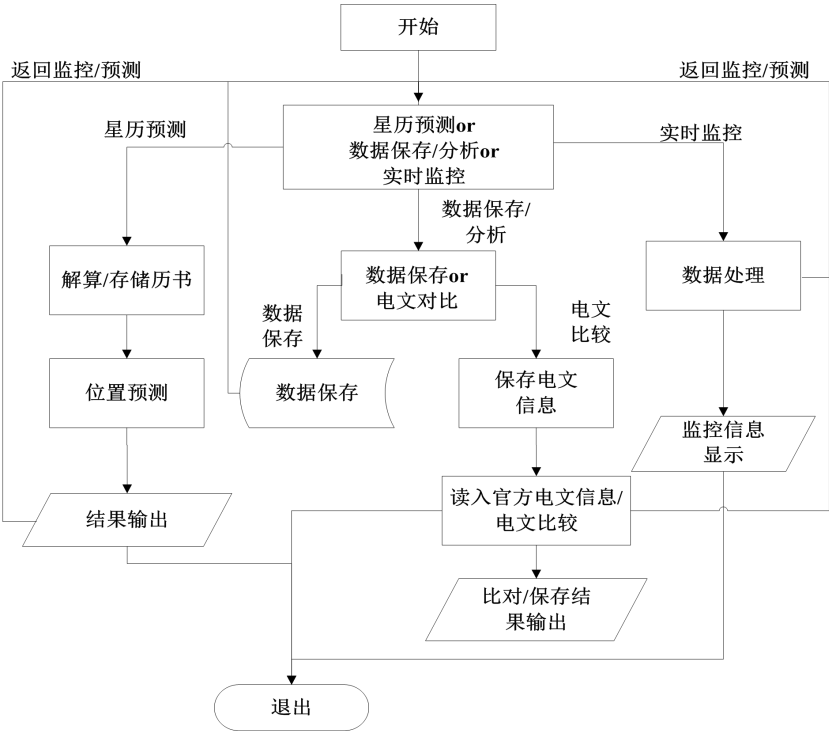


图 7 测控系统程序流程图

4 研制过程

4.1 全频点卫星接收机



图 8 卫星接收天线



图 9 全频点卫星接收机

全频点卫星接收天线和卫星接收机实物如图 8、图 9 所示。

4.2 便携式测试系统

测试系统的研制借鉴了便携机改造的成熟方法，同时对其拓展坞进行了适应性更改，满足安装接收机、电源电路板的尺寸要求以及相关布线、电磁干扰和散热的要求。

4.3 测控系统研制过程

测控系统主要实现星况预测、实时监测和环境检测三部分的功能。针对上文中技术难点，开展了以下四方面的技术研制。

4.3.1 卫星星况预测

测控软件中卫星位置预测部分采用 GPS、BD 历书参数预测卫星位置，计算卫星位置分两步进行，首先修正卫星信号的发射时刻，然后计算修正后卫星信号发送时刻的卫星位置。关于卫星信号发射时刻修正，通过大量的实验和数据分析比对后，确定了信号发射时刻后 1800s (0.5h) 是一个关键时间点，[0,1800s]确定一个发射时间修正量，[1800s,1month]确定一个发射时间修正量^[3]。

4.3.2 电离层和对流层异常监测

由于可以确切知道监控接收机的位置，故该系统可以判断监控接收机所处区域的电离层和对流层是否存在异常，电离层对流层延时误差估计值同测量值之差小于 10m/光速，则认为当前区域没有发生异常，如大于该值，认为该区域大概率发送了电离层或对流层异常。

4.3.3 故障卫星识别及剔除

故障星检测剔除单元的算法可参考 Satellite Predict 操作步骤。

4.3.4 试验环境干扰监测

为了实时了解当前型号的卫星导航用户机是否受到干扰，判断干扰信号强度，本软件研究了卫星导航系统环境监测。

将北斗 B1 B3、GPS L1 和 GLONASS 卫星系统的四组频谱图呈现在测控软件上。通过观察频谱分析是否有干扰信号及干扰信号的数量及强度，干扰信号检测预期效果见图 10。

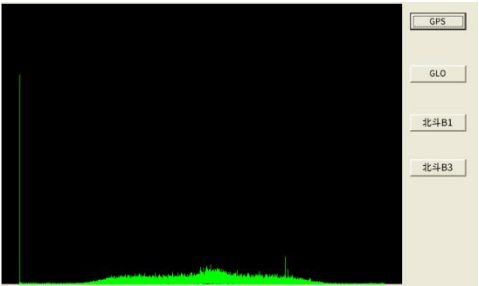


图 10 干扰信号检测预期效果图

5 试验验证

5.1 测试连接及测试方法

卫星星况预测与监控测试系统的测试连接方法见图 11。

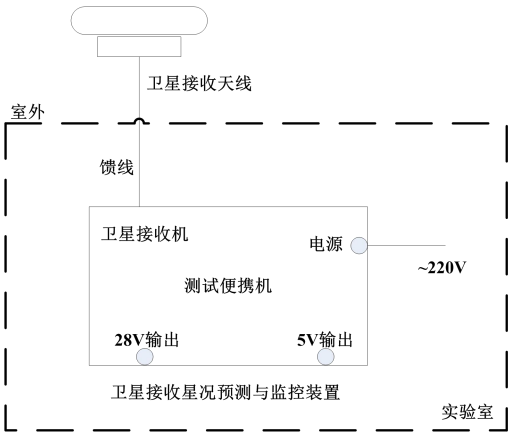


图 11 卫星接收星况预测与监控系统测试连接图

5.2 测试效果

2018年10月，开展了卫星星况预测与监控系统的测试验证，同时编写了相关操作说明。在测试验证过程中，针对同一天的同一时刻分别对导航楼进行了星况预测，在型号产品的露天收星、跑车、抗干扰等室外试验中，星况预测与监控系统作为陪测产品，也成功开展了测试环境的检测。

5.3 应用效果

针对卫星星况预测与监控测试方法开展了测试验证，编写了操作使用说明。对采集的数据结果分析、对比后得出，卫星星况预测与监控方法可以接收卫星信号，分析信号频谱，可以感知电磁干扰环境及其变化；可实时监控北斗、GPS和GLONASS系统卫星分布和卫星健康状况、电离层异常变化、各系统周及周内秒等技术指标；可以根据星历和历书，预测未来一个月之内任意地点的卫星分布状况；可重现过去任意时间和地点的卫星分布状况，精度达到1°以内。基于该方法改造的便携式计算机方便携带，后续经改进可达到国家北斗二级监测站技术要求。达到的具体效果为：

a. 星况预测功能

实现了卫星星况预测，系统能够采集接收机接收的卫星历书，能够向用户报告未来特定位置、特定时段的 GPS/GLONASS/BD 卫星分布情况。提高了生产测试和大型试验的成功概率。

b. 星况实时监控功能

对具有 GPS/GLONASS/BD 系统的卫星定位产品实现了实时监控,能够展示当前时刻、当前位置所有系统的可见卫星信息、定位信息和时间信息。包括可见卫星 PRN 编号、卫星的仰角、卫星方位角、卫星信号载噪比、卫星是否可用、卫星的伪距值、卫星的伪距变化率、钟差、钟漂及定位结果等信息。

c. 试验环境检测功能

实现了卫星定位产品测试环境检测功能，具有 GPS/GLONASS/BD 卫星导航系统信号频谱分析功能，具有 GPS/GLONASS/BD 卫星导航系统信号功率、频谱分析结果显示功能，能够判断卫星接收机当前所处的环境是否存在干扰及干扰信号强度等。

d. 便携式测试功能

实现了测试硬件的小型集成化，满足了外场试验的星况预测、监控以及检测功能的主要测试保障，同时兼顾了部门研制型号卫星定位产品对电源的使用需求，满足交流电压输入 220V（具备输入滤波和极性保护），输出 28V 和 5V 的供电要求。

（上接第 6 页）

求。并且,通过液压强度试验、气密试验、液氮冷冲击试验、机械刚度测试以及位移疲劳试验等试验项目的性能考核,大直径不锈钢波纹管均满足型号应用的需求。同时,对波纹管进行极限位移拉伸试验,内部充压至工作压力且拉伸量达到 120mm 才出现端波的平面失稳,具有良好的补偿性能。因此,通过本文的研究,掌握了大直径厚壁高刚度的不锈钢波纹管的成型工艺技术,无论波纹管的成型精度还是性能指标均满足重型运载火箭增压输送系统管路产品对于补偿能力的需求。

参考文献

- 1 张智, 容易, 秦瞳, 等. 重型运载火箭总体技术研究[J]. 载人航天, 2017, 23(1): 1~7
- 2 何巍, 刘伟, 龙乐豪. 重型运载火箭及其应用探讨[J]. 导弹与航天运载技

6 结束语

卫星星况预测与监控测试系统，解决了卫星接收机在使用和测试过程中受当时天空中未知卫星影响大的问题。掌握了测试时间段内是否会出现因天上卫星影响导致性能大幅度下降的情况。避免了因星况不好使卫星接收机定位精度下降导致试验偏差情况的发生；同时，实现了在生产测试或一些大型试验过程中，对具有 GPS、GLONASS、BDB1 和 BDB3 系统的卫星导航产品的实时监测，展示当前时刻、当前位置所有系统的可见卫星信息、定位信息和时间信息；最后，在生产测试和大型试验中，可判断卫星接收机当前所处的环境是否存在干扰信号及干扰信号的数量、强度等。

参考文献

- 1 董绪荣. 卫星导航软件接收机原理与设计[M]. 北京: 国防工业出版社
- 2 李征航. GPS 测量原理及应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社
- 3 鲁郁. 北斗/GPS 双模软件接收机原理[M]. 北京: 电子工业出版社

- 朱, 2011(1): 1~5
- 龙乐豪, 郑立伟. 关于重型运载火箭若干问题的思考[J]. 宇航总体技术, 2017, 1(1): 8~12
- 谭永华. 中国重型运载火箭动力系统研究[J]. 火箭推进, 2011, 37(1): 1~6
- 廖少英. 液体火箭推进增压输送系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007
- 廖少英. 航空-航天飞行器推进增压输送系统设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2012
- 于颖, 李永生, 於孝春, 等. 波纹管的结构优化设计[J]. 压力容器, 2005, 22(12): 22~24
- 陈友恒, 段玫. U形波纹管疲劳寿命有限元分析[J]. 材料开发与应用, 2013, 28(1): 62~66
- 曹宝璋, 陈永忠, 俞彬, 等. 金属波纹管成型方法的分析与比较[J]. 设计与研究, 2001(2): 11~15