

doi: 10.7690/bgzdh.2024.07.012

## 星载仪器安装姿态在线测量与数据分析技术

王 治, 万 峰, 裴 佩, 赵文浩, 陈瑞启, 余成义

(上海卫星装备研究所, 上海 200240)

**摘要:** 针对星载仪器安装姿态测量效率低、数据采集与分析困难等问题, 提出一种模型数据驱动的产品安装姿态在线测量方法。通过提取卫星 3 维设计模型中待测目标上棱镜的坐标信息, 驱动高精度在线测量系统实现实测场景中目标安装姿态地自动化测量; 设计产品装配精度在线测量数据管理系统, 完成精测数据集成接口的设计与开发, 实现数据的在线采集、关联融合与分析应用。以风云四号某星上的探测仪器为精测试验对象, 结果表明: 相比传统精测方法, 该方法的精测效率提高 75.5%, 极大地减少操作人员数量, 提高作业效率, 增强卫星精测过程的数据追溯与质量管控能力, 应用效果良好。

**关键词:** 星载仪器; 物联网; 姿态测量; 模型驱动; 数据分析

**中图分类号:** V19 **文献标志码:** A

## On-line Attitude Measurement and Data Analysis for Space-borne Instrumentation

Wang Zhi, Wan Feng, Pei Pei, Zhao Wenhao, Chen Ruiqi, Yu Chengyi

(Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of low efficiency, difficult data acquisition and analysis in the attitude measurement of on-board instruments, an online measurement method of product installation attitude driven by model data is proposed. By extracting the coordinate information of the prism on the target to be measured in the 3D design model of the satellite, the high-precision online measurement system is driven to realize the automatic measurement of the target installation posture in the actual measurement scene; the product assembly accuracy online measurement data management system is designed, the design and development of the precise measurement data integration interface are completed, and the online data acquisition, correlation fusion, analysis and application are realized. Taking the detection instrument on FY-4 satellite as the test object, the results show that compared with the traditional method, the precision measurement efficiency of this method is improved by 75.5%, the number of operators is greatly reduced, the operation efficiency is improved, the data traceability and quality control ability of the satellite precision measurement process are enhanced, and the application effect is good.

**Keywords:** spaceborne instruments; internet of things; attitude determination; model-driven; data analysis

### 0 引言

产品装配精度测量是卫星装配、集成与测试 (assembly integration and testing, AIT) 过程中的重要环节。当前, 卫星领域面临高强密度的研制任务, 呈现出多品种、变批量、高复杂度的特点, 星载仪器安装姿态测量和数据集成与分析工作贯穿于航天器集成装配各个阶段, 不同星载仪器的安装姿态测量方法和数据分析技术不同, 技术难点主要表现为: 1) 测量精度高: 大型航天器结构尺寸一般为几米到十几米范围, 装配检测精度一般要求在亚毫米、角秒量级; 2) 测量工作量大: 一般一颗卫星需要在结构装配后、整星空载前后、力学前后、热试验前后及发射场等多个阶段进行重复测试, 单颗卫星在 AIT 研制周期中, 需要测量的项目多达上百项; 3)

测量数据利用成效低: 卫星研制过程属于典型的离散型模式, 技术状态复杂多变, 精测过程数据分散, 难以实现数据的在线快速集成与统计分析。

近年来, 国内外学者和先进制造企业对航天器星载仪器安装姿态精度检测及数据分析技术进行了深入研究。目前, 国外航天企业在星上产品装配精度检测时主要采用经纬仪布站测量方法<sup>[1-3]</sup>, 该方法通过多台带有准直功能的高精度电子经纬仪, 分别准直被测产品上的基准立方镜, 然后再通过经纬仪之间的互瞄进行传递, 最终解算出镜面法线之间的夹角矩阵。ESA 宇航局采用多台经纬仪测量探测器单机的位姿, 印度宇航局采用经纬仪测量火星探测器单机位姿, 现场测量场景如图 1 所示。国内方面, 杨再华、王伟等<sup>[4-5]</sup>构建了测量场数学模型, 使用多

收稿日期: 2024-03-23; 修回日期: 2024-04-27

基金项目: 国防基础科研项目 (JCKY2020203B039)

第一作者: 王 治(1994—), 男, 内蒙古人, 硕士。

经纬仪布站方法确定相机与相机之间、相机与整星坐标系之间角度关系；zhang、潘廷耀、王德元、高廷等<sup>[6-9]</sup>研究了多经纬仪联合测量方法，利用统一测量坐标系和数字准直瞄准测量系统，实现对产品装配精度的快速测量。由于电子经纬仪测量时必需用人眼观测，调试过程复杂，且受经纬仪布站远近、光照等环境因素影响，测量效率较低，测量过程数据采集与管理滞后，对装配过程的质量控制较弱，无法形成一个闭环控制系统。数字孪生作为实现信息物理融合的重要使能技术，为星载仪器在线检测提供了切实可行的新思路和新途径<sup>[10]</sup>。万峰、易扬等<sup>[11-12]</sup>利用数字孪生技术实现对卫星等复杂产品装配精度预测和装配过程的智能化管控，极大地提高了检测与数据分析能力。

随着卫星技术向高精度、高稳定、多任务方向发展，精测任务量大幅增加，测量要求不断提高。传统的经纬仪布站测量方法难以满足型号高质量、高效率、高精度测量的需求。笔者结合星载仪器安装姿态高效率自动化测量、数据在线采集与管理、数据分析与应用的实际需求，开展模型数据驱动的产品安装姿态在线测量、基于物联网(internet of things, IoT)的精测数据在线集成与分析等技术研究，实现了星载仪器安装姿态的自动化测量、精测

数据在线采集与分析应用等功能，有效提高了产品安装姿态测量效率和质量数据管控能力，并设计了产品装配精度在线测量数据管理系统。该系统已在风云系列卫星型号测试中进行了应用，保障了型号产品装配精度的快速测量、数据在线分析。

## 1 测量流程

在对星载仪器安装姿态测量需求进行综合分析的基础上，提出星载仪器安装姿态在线测量与数据分析技术的体系架构，如图1所示。首先基于Proe进行二次开发，提取卫星3维设计模型中待测目标上棱镜的坐标信息；然后根据坐标信息优化待测目标的测量顺序，计算高精度在线测量系统中光电自准直仪的准直位置、俯仰角、水平角以及测量转台转角，进而驱动系统实现对待测目标的自动化测量。在精测数据与应用方面，基于统一的企业IoT平台，采用通用化的数据集成接口，实现异构数据的在线采集与管理；构建数据驱动的关键事件感知模型，利用IoT平台的聚合页面构建器和数据驱动引擎，结合产品精测过程的业务逻辑与属性规则，实现多层次数据间的关联匹配与操作运算，实现产品精测数据的在线采集与管理、分析与应用等功能。

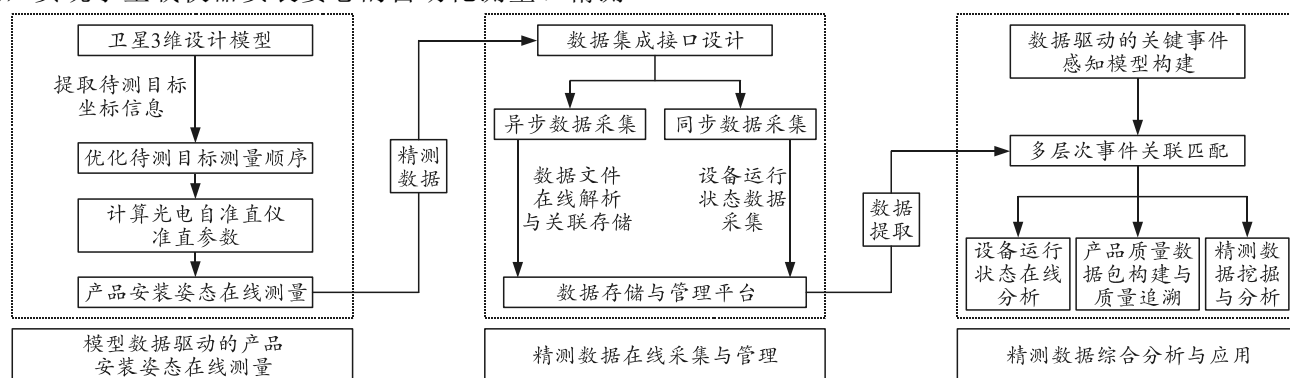


图1 星载仪器安装姿态在线测量与数据分析体系架构

## 2 模型数据驱动的产品安装姿态在线测量

### 2.1 测量系统构成

高精度在线测量系统如图2所示。系统主要由光电自准直分系统、安装定位分系统、高精度测量转台、隔振分系统、基准定位分系统以及上位机控制软件组成。

光电自准直分系统包括光电自准直仪、2维旋转装置及辅助准直装置。光电自准直仪用于产品安装姿态的测量，测量精度可达0.1"；2维旋转装置用于带动光电自准直仪进行运动，运动范围为方位

轴0~360°和俯仰轴±60°；辅助准直装置用于待测对象的快速定位，辅助光电自准直仪实现待测目标前的初步定位。

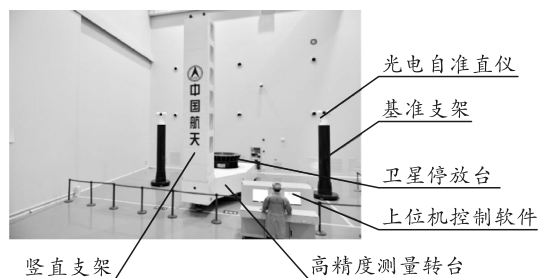


图2 高精度在线测量系统

安装定位分系统包括竖直支架、卫星停放台和基准支架等，主要用于承载光电自准直分系统沿 2 维方向进行移动，包括水平面内绕卫星外轮廓圆的圆弧运动和竖直方向的升降运动，定位精度优于 0.5 mm。

高精度测量转台用于承载卫星，并为卫星或光电自准直分系统提供精确的相对运动，保证光电自准直分系统对卫星周围所有待测目标矢量的精确测量。测量转台转角精度优于±1”。

基准定位分系统用于建立测量基准坐标系，作为多目标测量过程中统一测量的基准。

隔振分系统主要用于消除地面振动及环境振动的影响，保障测量过程中光电自准直分系统、安装定位分系统及基准定位分系统的稳定性，从而保障系统测量精度的准确性。

上位机控制软件用于各分系统参数设置、运算控制、数据采集、状态监测和交互展示等，具备运动定位、指令调配、数据解算和误差补偿等功能。通过预设算法对产品安装姿态进行测量及参数解算。

### 2.2 模型数据驱动的产品安装姿态在线测量

设被测项目为单机 A 和单机 B，系统测量流程如图 3 所示。

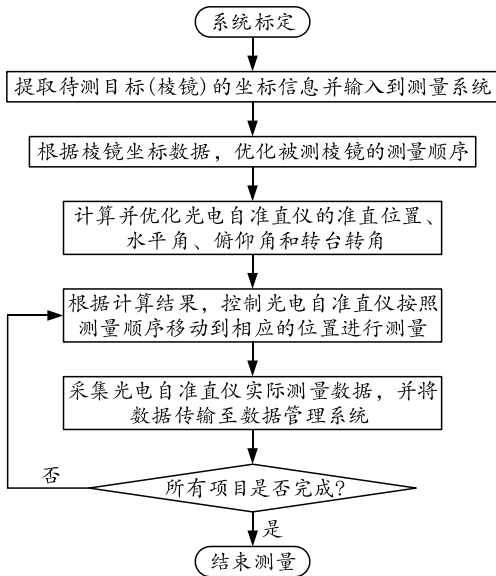


图 3 产品测量流程

1) 系统标定。标定光电自准直分系统、安装定位分系统、基准定位分系统和测量转台的运动学参数。

2) 将卫星安装在测量转台上，使卫星本体坐标系与测量转台坐标系重合。

3) 从卫星 3 维设计模型中提取待测目标(棱镜)的坐标信息，计算测量所有项目光电自准直经纬仪最优的准直位置、水平角、俯仰角和转台转角，并优化待测目标的测量顺序。

4) 驱动光电自准直仪沿导轨运动到单机 A 对应的测量位置 A，记录光电自准直仪的数据，即水平角  $\alpha_{sA}$ 、俯仰角  $\beta_{sA}$ 、测量转台旋转角度  $\theta_A$ ；保持光电自准直仪位置不动，旋转准直镜准直全局基准镜(平面反射镜)，准直过程始终保持装置水平，测得水平角  $\alpha_{gA}$ 。则单机 A 在全局基准镜下的水平角为  $\alpha_A = \alpha_{sA} - \alpha_{gA} + \theta_A$ ，俯仰角为  $\beta_A = \beta_{sA}$ ，计算出镜面法线的矢量  $\vec{l}_A$  为  $(\cos \alpha_A \cdot \cos \beta_A, \sin \alpha_A \cdot \cos \beta_A, \sin \beta_A)^T$ 。系统测量原理如图 4 所示。

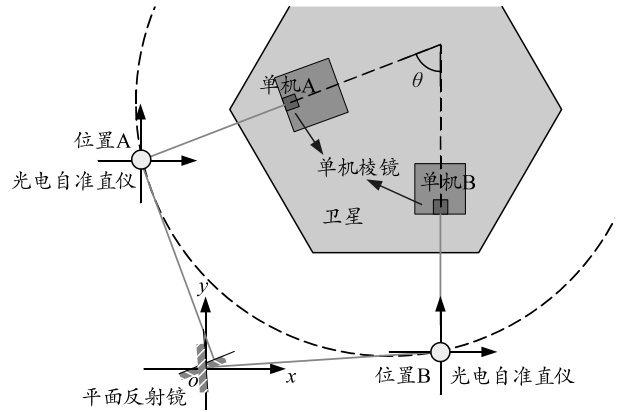


图 4 测量系统测量原理

5) 测量单机 B，重复步骤 4)，计算得到单机 B 镜面法线的矢量  $\vec{l}_B$  为  $(\cos \alpha_B \cdot \cos \beta_B, \sin \alpha_B \cdot \cos \beta_B, \sin \beta_B)^T$ 。

6) 设单机 A 和单机 B 之间的夹角为  $\theta$ ，则  $\theta$  可以由矢量  $\vec{l}_A$  与  $\vec{l}_B$  点积得到：

$$\theta = \arccos \left( \frac{(\vec{l}_A \cdot \vec{l}_B)}{\left( \|\vec{l}_A\| \times \|\vec{l}_B\| \right)} \right) \quad (1)$$

## 3 基于物联网的精测数据在线集成与分析

IoT 具有信息数据动态感知、可靠传输与统一管理、智能处理与优化控制等功能，可有效满足当前卫星离散型研制模式下数据精确、完整、高效采集和有效管理的需求，对实现型号产品制造资源精细化管理、产品数据包构建、质量和技术状态管控等都具有重要意义<sup>[13]</sup>。

### 3.1 精测过程数据在线采集与管理

根据产品装配精度测量过程中数据的特性、结构及格式不同，进行感知数据的描述与存储。感知

数据格式与分类如表 1 所示。

表 1 感知数据的格式与分类

数据格式	数据结构	存储方式	数据说明
字符数值	结构化	关系型数据库	静态数据-测量设备的基本信息, 如设备的属性
文本	半结构化	XML 文档	动态数据-采集的实时数值型数据, 如角度、温湿度等
图像	半结构化	XML 文档	动态数据-测量现场图像数据, 如 *.jpg/. *bmp 等
视频	非结构化	XML 文档	动态数据-如 *.mp4/. *wmv 等

根据上述描述, 产品装配精度测量过程中数据集成方式可以分为 2 类: 1) 异步数据采集方式。按照一定的数据采集周期, 对 \*.doc/\*.docx、\*.pdf 等非结构化数据文件进行远程同步及关联存储, 实现文件的名称、格式、创建时间等属性与精测任务的

关联; 对固定格式的 \*.xls/\*.xlsx 等数据文档进行解析, 实现精测数据的提取与结构化存储。2) 同步数据采集方式。对高精度测量设备的转角、电机转速、温度等传感器数据进行实时采集。

针对型号产品多、精测项目繁杂、跨度时间长等问题, 为满足产品装配精度测量数据与型号产品的统一集成管理, 以及产品数据包构建与快速质量追溯的迫切需求, 根据精测数据组成要素, 按照型号、阶段、产品、系统单元、工艺流程、具体工序等树形结构层级, 构建数据组织模型, 实现卫星型号、测量状态、测量单机、测量时间、关联工艺工序等数据的关联存储。精测数据组织结构模型如图 5 所示。

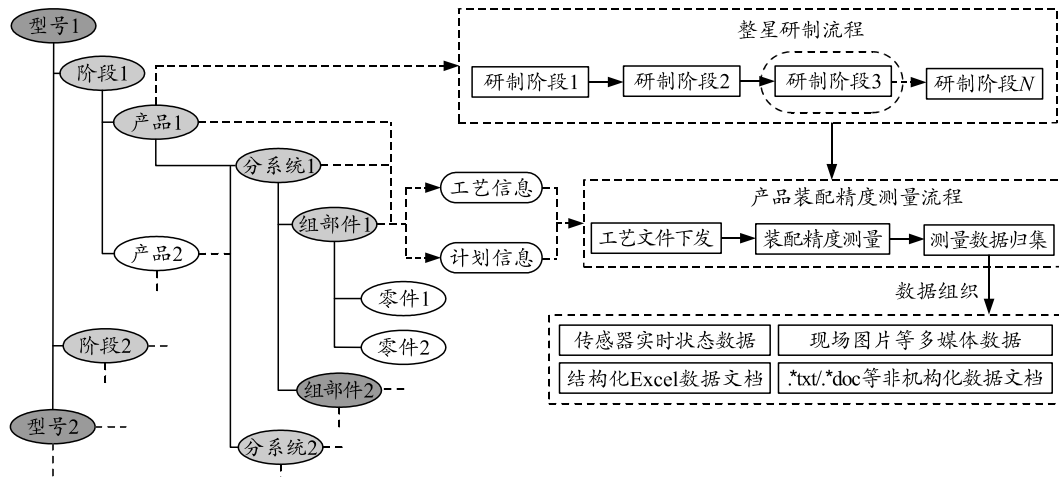


图 5 精测数据组织结构模型

### 3.2 数据驱动的关键事件感知模型构建

针对星载仪器安装姿态测量过程中数据关联性描述不足、数据语义表达能力缺乏、数据与实际应用之间表达分离等问题, 基于物联网平台, 构建数据驱动的关键事件感知模型。构建过程中主要包括以下阶段: 1) 定义事件的属性, 可命名为 Event=(Name, Attribute, Content, Time), 包括原始事件与关键事件。原始事件指高精度测量系统产生的基础数据, 主要包含事件的主体和内容; 关键事件指原

始事件经过数据关联、分析运算形成的具有应用意义的事件<sup>[14]</sup>。2) 异构数据的同构化处理, 构建精测过程事件统一描述语言和处理操作逻辑。3) 建立多层次事件数据的业务逻辑模型, 进行多层次事件的关联关系解析。4) 应用物联网平台的事件处理引擎与聚合页面构建引擎进行多层次事件的关联匹配及操作运算, 得出关键事件的感知结果。5) 感知结果的推送与应用。数据驱动的关键事件感知模型构建流程如图 6 所示。

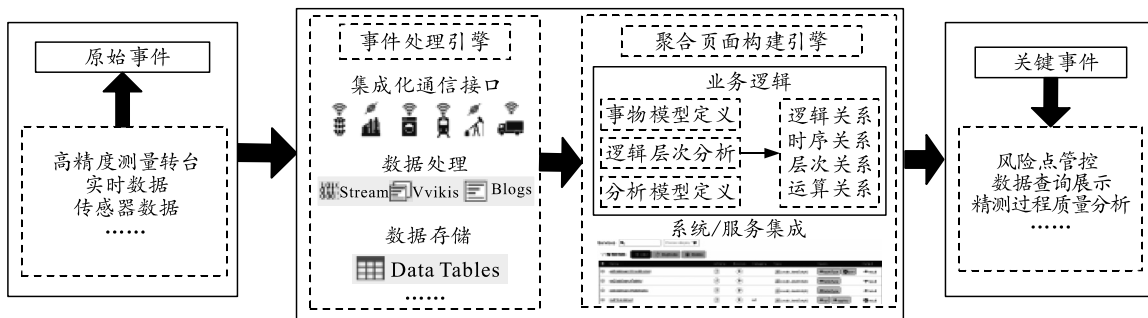


图 6 数据驱动的关键事件感知模型

以 F 星产品装配精度测量为例,精测事件包括:目标任务、所用设备及运行状态、过程执行情况、精测数据分析、调控决策等信息。基于业务应用需求,提取该流程中的关键事件,命名为 Event=(Name, Attribute, Content, Time), 其中: Event 为卫星单机

装配精度测量过程在线可视化监控; Name 为单机装配精度测量; Attribute 为卫星精测; Content 包括精测设备名称、设备运行状态监控、精测过程数据采集、精测过程分析、调控决策等信息; Time 为实时运行时间。具体事件执行过程如图 7 所示。

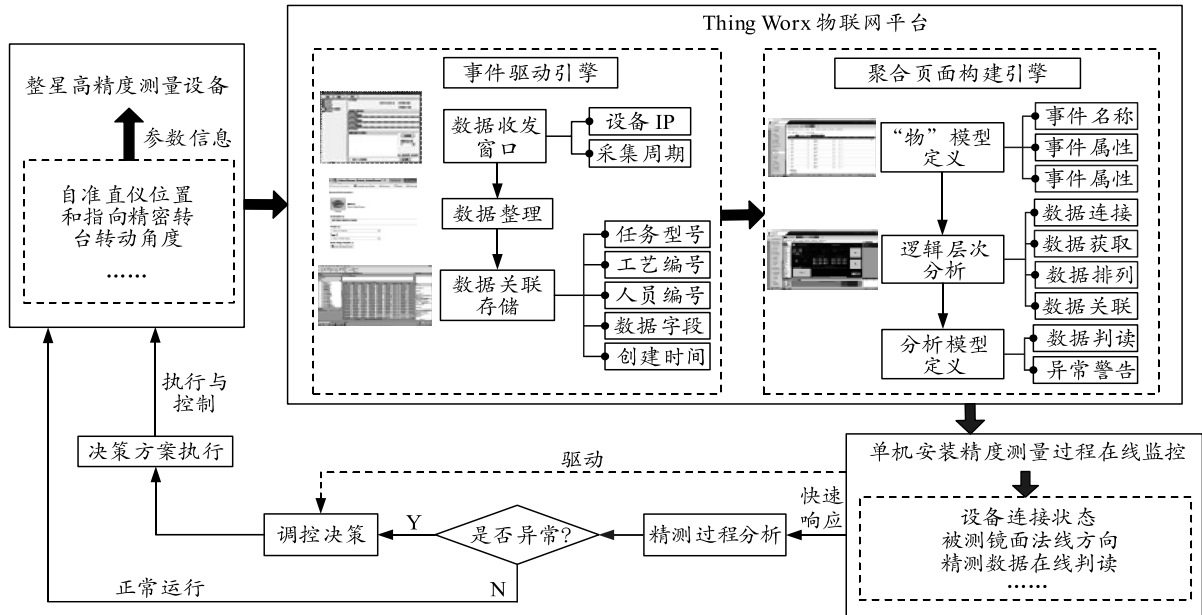


图 7 产品装配精度测量在线监控事件执行过程

### 3.3 精测数据综合分析与应用

基于准确、完整及实时的精测数据及数据驱动的关键事件感知模型,根据型号产品具体的应用需求,对卫星产品的精测数据进行统计分析。

#### 1) 高精度在线测量设备运行状态分析。

基于卫星精测过程中实时、丰富的物联集成数据,通过图形化统计图表、颜色标识集合等多种动态可视化方法对设备进行可视化展示,实现设备连接状态、电源状况、运动参数、检测数据、故障报警等信息的在线实时监控,做到及时发现并解决问题,保证卫星装配精度测量过程的顺利进行。基于统一的物联网平台形成设备运行状态在线可视化监控模块,主要包括设备基础信息查看、设备故障预警和设备利用效率分析 3 大子功能: ① 设备基础信息查看功能可实现设备名称、设备编号及设备运行参数等信息的查看,便于管理人员及时了解设备的运行状态; ② 设备故障报警功能可对设备的故障进行报警并及时停止设备运行,提醒车间设备管理人员进行设备检修; ③ 设备效率分析功能可对设备的占有率、利用率及性能状态等进行分析,对提高装配生产线设备的使用效率具有重要意义。

#### 2) 产品数据包构建与快速质量追溯。

为实现精测数据与产品数据的统一集成管理、满足产品数据包构建与快速质量追溯的迫切需求,以“产品 BOM-生产计划-工艺流程-工序工步-测量数据”为主线,统一组织形成全面、完整的产品数据包,实现以型号产品为核心的纵向查询、以数据类型为核心的横向查询。

① 产品 BOM 维度: 采用产品 BOM 作为管理和组织精测数据的主框架; 产品结构树用于维护“型号-阶段-整星-分系统-组部件-单机”等各层级相关产品信息; 基于 BOM 节点和数据间的关联关系实现测量数据的统一组织。

② 工艺流程维度: 工艺流程是组织制造资源、指导生产执行的核心驱动,以工艺流程为核心骨架,以结构化工序工步为基本组织单元,实现细化至工序级的制造执行过程中测量数据的统一组织管理。通过工艺流程与产品 BOM 结构化关联,实现工艺流程维度与产品 BOM 维度的有机融合。

③ 数据类型维度: 数据类型维度是实现海量测量数据分类组织、快速汇总与一键归集的主要依据,通过区分不同类型,实现对特定产品 BOM 节点或特定总装任务中某一类数据的快速组织、提取与一键归集,为不同型号、不同计划、不同车间

同类数据的横向对比分析提供有力支撑。综合考虑数据格式、属性、对象等多个维度，产品数据包中数据类型具体可分为：

数据格式：结构化数据、数据文件、文档报告等类型；

数据属性：所属型号、所属阶段、所属任务、测试项目等类型；

数据对象：原始测量数据、测量结果数据、测量管理数据等类型。

### 3) 精测数据挖掘与分析。

基于产品数据包集成的所有产品精测过程的历史数据，对精测数据的变化量、趋势分析、测量误差分析等特性进行挖掘分析，形成每类特定产品的特性指标的数据包络线，为后续卫星结构设计提供依据。统计分析主要分为纵向分析和横向分析，框架如图 8 所示。

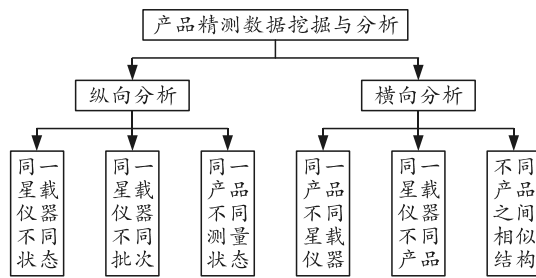


图 8 产品精测数据挖掘与分析

① 纵向分析是指对同一星载仪器不同状态、同一星载仪器不同批次、同一产品不同测量状态的数据进行分析，了解不同状态或不同批次下星载仪器或产品安装精度的变化情况，分析影响精度变化的干扰因素，建立精度保障措施，形成产品质量数据成功包络模型，为后续产品设计提供依据。

② 横向分析是指同一产品不同星载仪器、同一星载仪器不同产品、不同产品之间相似结构的数据变化进行分析。横向分析主要是找出不同结构形

式对精度的影响，通过横向数据比对再进行仿真分析，确定合适的结构形式。

## 4 系统实现与应用

基于上述研究，笔者设计产品装配精度在线测量数据管理系统，并以风云四号某星的光纤陀螺组件、光学相机、星敏感器等仪器的安装姿态测量为验证对象，实现星载仪器装配精度自动化测量，以及测量数据的在线采集、存储与管理及分析与应用。

### 4.1 星载仪器安装姿态在线测量

笔者基于 Proe5.0 和高精度测量系统开发模型驱动的装配精度自动化测量功能组件，实现卫星设计模型中待测目标(棱镜)坐标信息的提取与坐标系配准，并驱动高精度测量系统自动准直仪进行测量。精测现场如图 9 所示。

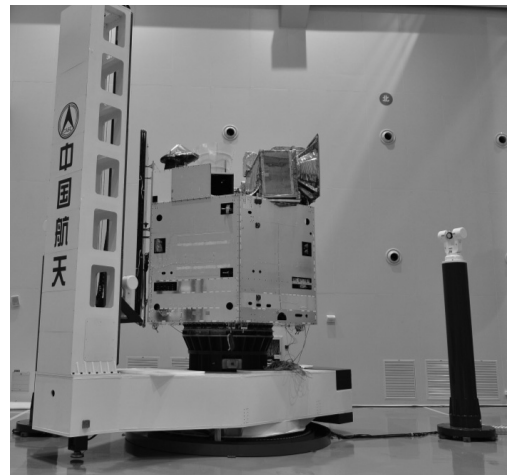


图 9 模型数据驱动的产品安装姿态在线测量

选取风云四号某星上的探测仪器为验证对象，对比传统精测方法(经纬仪布站测量方法)和模型数据驱动的产品安装姿态在线测量方法精测过程所用的测量人数和测量时间，分析测量效率。具体数据如表 2 所示。

表 2 风云四号某星探测仪器精测数据

序号	单机名称	棱镜序列号	传统精测方法(经纬仪布站测量方法)		模型数据驱动的产品安装姿态在线测量方法	
			测量人数	测量时间	测量人数	测量时间
1	光纤陀螺组件	FY4RH301-01	6	10'31"	2	7'23"
2	X 向反作用飞轮	FY4RH301-02	6	9'45"	2	7'12"
3	Y 向反作用飞轮	FY4RH301-03	6	9'12"	2	7'45"
4	Z 向反作用飞轮	FY4RH301-04	6	10'34"	2	7'37"
5	斜向反作用飞轮	FY4RH301-05	6	9'34"	2	7'28"
6	光学相机	FY4RH301-06	6	10'05"	2	7'09"
7	+Y 星敏感器镜头	FY4RH301-07	6	9'48"	2	7'17"
8	-Y 星敏感器镜头	FY4RH301-08	6	10'23"	2	7'16"
9	数字太阳敏感器	FY4RH301-09	6	10'15"	2	7'22"
平均测量时间				10'02"	7'23"	
测量总时间				60'12"	14'46"	

星载仪器精测效率计算如式(2)所示:

$$\eta_{\text{精测}} = (1 - T_{\text{模型驱动}} / T_{\text{传统}}) \times 100\% = (1 - 886/3\ 612) \times 100\% = 75.5\% \quad (2)$$

通过上述分析可知:相比传统精测方法(经纬仪布站测量方法),模型数据驱动的产品安装姿态在线测量方法的精测效率提高了 75.5%,极大地减少了操作人员,提高了作业效率。

### 4.2 装配精度测量数据集成与应用

通过对基于物联网的精测数据在线集成与分

析,设计产品装配精度在线测量数据管理系统,实现星载仪器装配精度测量数据的集成与应用,系统主界面如图 10 所示。该系统主体功能模块采用 B/S 架构(browser/server)进行开发,利用 JS(java script)与 CSS 进行界面功能与优化设计,并将 ORACLE 关系型数据库作为数据存储平台。目前,该系统已在上海卫星装备研究所精测单元间进行部署应用,有效提升了星载仪器装配精度测量的效率与质量管控水平,应用效果良好。



图 10 产品装配精度在线测量数据管理系统主界面

为实现不同型号产品之间以及同型号之间单机精测数据的集成展示与对比分析,利用数据驱动与数据服务引擎,构建单机精测数据在线快速查询、集成展示与测量结果分析单元模块,满足用户多样化数据需求,支撑数据挖掘分析。

#### 1) 基于关联搜索的测量数据查询。

基于物联集成的经纬仪在线测量数据,按照“型号-单机名称-详细测量信息”的组织架构,构建型号结构树、单机列表、单机详细测量信息单元区域,通过以型号产品为核心的纵向查询,能够实现不同型号下各类单机精测数据的快速查询;通过单机信息为核心的横向查询,能够实现同一型号不同精测阶段(空载、振动前、振动后等)各类单机数据的在线查询与展示分析。单机精测信息在线查询与统计分析界面如图 11 所示。

#### 2) 精测数据的统计分析。

根据型号产品精测工艺和报告,提取单机“设计精度要求值”,并与单机“实际测量精度值”进行在线判读对比,给出“测量结果统计”,极大地减少了工艺人员的漏判、错判,提高了检测效率与

质量。从“单机精测历史数据列表中”可在线查看单机历史数据,包括单机名称、所属型号、测量状态、设计精度要求、测量精度要求、测量结果统计以及测量时间等信息,满足工艺技术人员在线快速浏览的需求。



图 11 单机精测数据集成展示与分析界面

## 5 结束语

针对卫星 AIT 过程中星载仪器安装姿态高效率测量和数据集成需求, 笔者提出一种模型数据驱动的产品安装姿态在线测量方法, 通过卫星 3 维设计模型中提取的待测目标的位置信息, 驱动高精度测量系统中光电自准直仪实现对待测目标的自动化测量。实验结果证明: 相比传统精测方法(经纬仪布站测量方法), 模型数据驱动的产品安装姿态在线测量方法的精测效率提高了 75.5%, 应用效果良好。此外, 设计产品装配精度在线测量数据管理系统, 实现了精测数据在线快速查询、集成展示与测量结果分析。后续, 将依托该系统对产品装配精测质量数据包构建、装配精度影响因素分析、装配质量包络线分析等应用方面进行深入分析。

## 参考文献:

- [1] KWON T H, GUEE W M, CHANG L C, et al. A study on accurate alignment measurement of dual thruster module using theodolite[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 36(11): 1399-1404.
- [2] WICKS R T, MALLET A, HORBURY T S, et al. Alignment and scaling of large-scale fluctuations in the solar wind[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 110(2): 025003-025013.
- [3] ZHANG X H, ZHU Z K. A universal and flexible theodolite-camera system for making accurate measurements over large volumes[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012(50): 10-13.
- [4] 杨再华, 孙刚, 刘建新. 采用经纬仪测量航天相机视轴的方法分析[J]. *航天器环境工程*, 2010(1): 92-94.
- [5] 王伟, 万毕乐, 郭洁琰, 等. 基于虚拟立方镜的航天器总装精度测量新方法[J]. *兵工自动化*, 2017, 36(6): 32-36.
- [6] ZHANG R, CHEN H H, YANG Z H, et al. Design of a data processing system for automatic measurement of spacecraft[J]. *Journal of Convergence information Technology(JCIT)*, 2015, 10(2): 57-61.
- [7] 潘廷耀, 范百兴, 西勤, 等. 经纬仪多基准尺联合标定技术研究[J]. *测绘工程*, 2016, 25(5): 56-63.
- [8] 王德元, 唐文彦, 张晓琳, 等. 基于标准器的大尺寸测量系统坐标统一化方法[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(8): 1845-1852.
- [9] 高廷, 孙安斌, 马骊群, 等. 一种新型带有自标定的数字准直瞄准测量系统[J]. *计测技术*, 2016, 36(3): 18-21.
- [10] 刘蔚然, 陶飞, 程江峰, 等. 数字孪生卫星: 概念、关键技术及应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(3): 565-588.
- [11] 万峰, 邢香园, 吴剑锋, 等. 基于数字孪生的卫星总装过程管控系统[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 631-641.
- [12] 易扬, 冯锦丹, 刘金山, 等. 复杂产品数字孪生装配模型表达与精度预测[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(02): 617-630.
- [13] 侯瑞春, 丁香乾, 陶冶, 等. 制造物联及相关技术架构研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(1): 11-20.
- [14] 陈伟兴, 李少波. 生产过程制造物联关键事件主动感知实现技术及方法[J]. *制造业自动化*, 2015, 37(9): 148-152.