

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.02.007

# 基于 ECRS 分析法的光学载荷发射场测试 流程设计和优化

王 羿<sup>1</sup>, 洪 津<sup>1</sup>, 骆冬根<sup>1</sup>, 凌 霄<sup>1</sup>, 代海山<sup>2</sup>, 叶擎昊<sup>2</sup>

( 1 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;  
2 上海卫星工程研究所, 上海 200240 )

**摘 要:** ECRS 分析法是取消、合并、重排和简化英文首字母的简称, 该方法在工业工程中有着重要而广泛的应用。针对航天发射场光学载荷测试的特点, 在继承前期发射任务的基础和确保可靠性安全性的前提下, 分析了测试流程之间的关系, 使用 ECRS 进行流程优化工作, 缩短了测试时间, 增强了测试发射能力。最后对发射场测试流程优化工作做了展望。

**关键词:** ECRS 分析法; 光学载荷; 发射场测试流程

中图分类号: TP31 文献标识码: A 文章编号: 1673-6141(2019)02-0123-06

## Design and Optimization of Test Procedure for Optical Payload on Space Launch Site Using ECRS Analytical Method

WANG Yi<sup>1</sup>, HONG Jin<sup>1</sup>, LUO Donggen<sup>1</sup>, LING Xiao<sup>1</sup>, DAI Haishan<sup>2</sup>, YE Qinghao<sup>2</sup>

( 1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;  
2 Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** ECRS, the abbreviation for eliminate, combine, rearrange and simplify, is important and widely applied in industrial engineering. Aiming at the present test situation of optical payload on space launch site, the relationship between tasks in test procedure was analyzed based on the results of earlier missions. ECRS analytical method was used for optimizing test procedure, shortening the period of test launch, enhancing the comprehensive test launch capability and ensuring reliability and safety. Finally, the trend in optimization of test procedure on space launch site was predicted.

**Key words:** ECRS analytical method ; optical payload ; test procedure on space launch site

**作者简介:** 王 羿 ( 1985 - ), 湖南湘潭人, 博士, 助理研究员, 主要从事光电信息获取技术研究。

**E-mail:** wangyi@aiofm.ac.cn

**收稿日期:** 2018-09-30; **修改日期:** 2018-11-06

## 1 引言

近年来,中国航天事业蓬勃发展,取得了令世人瞩目的成果,以载人航天工程、嫦娥探月工程、北斗导航卫星工程等专项工程为标志,中国航天进入了快速发展的时期。各种卫星、飞船、深空探测器、新型运载火箭等航天器的相继发射,使我国航天发射任务朝着高密度、常态化的特点发展。我国的西昌、太原、酒泉和文昌四大航天发射场火箭发射型号从单一到多种,发射卫星种类从国内到国际,航天发射场的综合能力显著提升,并取得了显著的社会效益和经济效益。

随着我国航天发射活动越来越密集,同一个发射场试验任务交叉并行的情况十分普遍。某型卫星即将发射的同时,另一型号卫星已经在总装厂房测试,第三型卫星即将进场的情况基本成为常态。对于运载火箭,两发同时进入发射场进行总装测试的现象也比较普遍。发射场地面设施、设备任务状态变化大、技术状态转换快,检测检修时间越来越紧张,设备状态的可靠性问题越来越突出<sup>[1-2]</sup>。

发射场测试流程是指航天产品进入发射场参加发射的工艺路线、关键的技术状态、主要的工作项目及场所、各系统之间及单个项目之间的相互关系和先后次序、时间安排及质量安全控制关键节点、大系统之间的联合操作、发射区的最后工作项目和发射程序,以及安全可靠保证措施的技术方案,是组织实施航天发射任务的基础和依据。

由于受到各种因素的影响和制约,我国的航天任务在发射场的总装和测试阶段所用的时间还比较长,一般小型卫星为1个月左右,中大型卫星达到2个月,飞船则需要3个月左右<sup>[3]</sup>。相对美国、俄罗斯和欧洲而言,技术相对还比较落后,效率还很低,制约了航天事业的发展。

光学载荷是遥感系列卫星中比较常见的一类星载设备。不同于微波类载荷及卫星平台(例如测控、热控、电源等)分系统,发射前光学性能测试及定标工作使光学载荷发射场测试工作有一定的特殊性。这些工作对卫星发射后遥感数据质量的提升具有很重要的作用,因此该项工作的开展是有必要,且具有重要意义的。然而,这项工作的开展会从三个方面影响发射场测试工作的进度。首先是测试项目多,工作量大。光学载荷除了完成常规的测试项目外,还需要开展多项光学性能测试及定标工作。对于多光谱载荷,需要针对不同光谱进行测试。对于气体探测类光学载荷,需要针对不同的样本气体开展测试。这些都使光学载荷测试工作比其他分系统工作量大。第二是每项测试时间长。测试期间为了获取有效数据,需要等待光源输出稳定及光电探测器温度稳定。等待时间长是造成测试时间长的主要因素。第三是测试环境要求苛刻。光学载荷对防污染要求较高,测试过程中要求在有洁净度控制的测试间。我国航天发射场测试厂房建成时间较早,条件比较落后,有符合洁净度要求的测试间数量较少<sup>[4]</sup>。而一颗卫星通常有多个光学载荷,不同载荷通常需要“排队”测试,这也较大影响了测试进度。

为了适应新形势,提升发射场效率,缩短测试时间,保证测试质量,航天发射场迫切需要优化和改进现有任务测试发射流程,科学、合理、高效地安排各系统,尤其是光学载荷在发射场测试过程中的技术状态、工作次序和有关测试项目内容,以保证后续航天任务顺利圆满完成。

## 2 ECRS 分析方法简介

优化和改进测试流程,根本目的是要提升工作效率、保证工作质量、保障安全,其手段包括整体优化、部分改进等办法。其中在工业工程中经常采用 ECRS 分析的方法。其中字母 E 表示取消(Eliminate)、C 表示合并(Combine)、R 表示重排(Rearrange)、S 表示简化(Simplify)。ECRS 分析法,用于对生产工

序进行优化, 以减少不必要的工序, 达到更高的生产效率的方法。

ECRS 分析法思路如图 1 所示。

由图可知, ECRS 分析法针对工业中每一道工序流程都给出取消、合并、重组和简化四项提问。

针对原因或者目的, 提问是否可以取消。如果取消后不影响后续工作的质量和其它工作的进度, 则可以较大提升效率。如果不能全部取消, 也可以考虑部分取消。

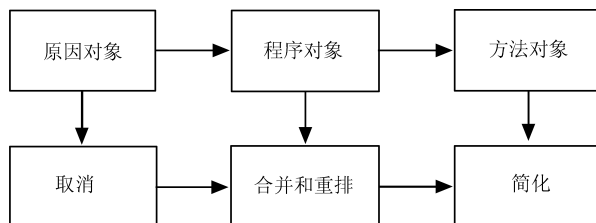


图 1 ECRS 分析过程

Fig.1 ECRS method procedure

针对流程, 提问是否可以合并或者重排。合并就是将两个或两个以上的对象变成一个, 包括工序合并、工具合并等等。合并可以有效地消除重复现象。重排即改变工作程序, 使工作的先后顺序重新组合, 以达到改善工作的目的。

针对工作方法, 提问是否可以简化。使现行方法尽量地简化, 以最大限度地缩短作业时间, 提高工作效率。

实际工作中重复性的利用 ECRS 分析法, 多次迭代优化和实践, 可以达到更高的生产效率。

光学载荷发射场的测试工作本质上就是一种工序流程, 符合 ECRS 分析法的应用条件, ECRS 分析法完全适用于光学载荷发射场测试工作和测试流程的优化。

### 3 ECRS 分析法的应用过程分析

光学载荷在运抵卫星发射场后, 通常需要经过卸车、包装箱清洁、通过风淋进入测试场和开箱检查等几个步骤。开箱检查完成、目测无损害后, 随即进入了光学载荷发射场测试工作。

常规的光学载荷发射场测试流程如图 2 所示。

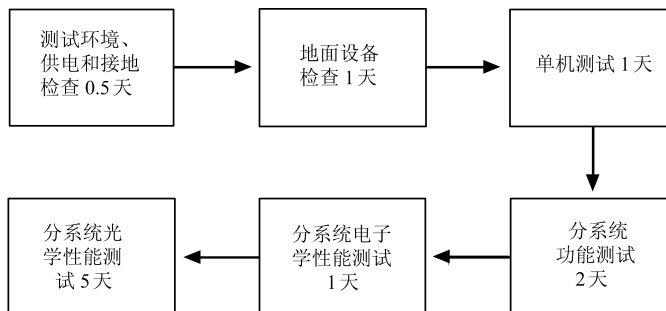


图 2 光学载荷常规的发射场测试流程

Fig.2 Normal test procedure in optical payload space launch site

根据 ECRS 分析法对图中每一项工作给出四项提问, 检查是否有优化的可能性。

测试环境、供电和接地检查, 目的是保证测试过程中光学仪器不受污染, 保证供电安排, 不损坏用电

设备和星上产品。发射场日常环境保障小组每天都会定时检查测试厂房的洁净度、氮气气压，定期检查接地和供电是否正常，并填写检测记录。因此该测试项目可以取消，通过审查当天的检测记录保证测试环境符合要求，供电和接地安全。

地面设备检查，目的是检查运输后设备是否损坏，工作内容包括上电检查、软件运行正常性检查、与星上产品有电连接的电特性检查、各项测试光源性能检查等工作。该项工作用于保证星上产品测试的安全和星上产品测试数据的有效性，不可取消。由于地面设备众多，可以采取同时并行检查的方法缩短测试时间，提高测试效率。对于光学测试设备，尤其是涉及计量的设备，完成设备计量后再运至发射场，更能提高测试数据的有效性，也是简化测试方法的一种。

单机测试，目的是确认星上单机经过运输后状态正常，为分系统顺利测试提供打下基础。分系统由各单机构成，只有各单机测试正常，才能开展分系统各项测试工作。单机测试项目包括安全检查、静态阻抗检查、功能测试和性能测试等。该项工作可以通过取消简化的方法进行优化。单机在运输到发射场之前，先后经历了整星老炼试验、拆卸下星、打包装车和运输等过程。从拆卸下星到运输至发射场，全程温度湿度和压力受控，运输过程中包装箱附近安装有加速度传感器实时检查。通过检查各项数据，可以分析评价整个过程中存放和运输的环境。在各项数据正常的情况下，可以认为没有风险因素对单机状态产生影响，因此该项工作可以简化为数据复查、安全检查和通电测试，取消其余所有工作。

分系统功能测试，目的是检查分系统功能是否满足任务书需求。通常工作包括检查各单机接口匹配性、分系统与地面设备(通常指卫星平台模拟器)接口的匹配性、成像功能检查、转动部件功能检查、热响应测试等等功能。

分系统性能测试，目的是检查和确认分系统各项性能。性能测试包括电子学性能和光学性能两部分。电子学性能指各项模拟量遥测值、数字量状态以及转动部件相关性能。光学性能通常包括整机信噪比、MTF、相对辐射响应等等，如果时间允许还可以完成发射前定标工作。发射场性能测试，除了检查性能是否正常外，测试数据需要与之前数据进行比对，且作为发射前的最终状态参与在轨飞行的数据判读工作。因此分系统性能测试具有十分重要的意义。

分系统越复杂、单机数量越多分系统功能和性能测试内容越多，同时还需要覆盖主份和备份。因此分系统测试是花费时间最长、工作内容最多的测试。但通常情况下，除热控仪相关测试外，其他部分工作都

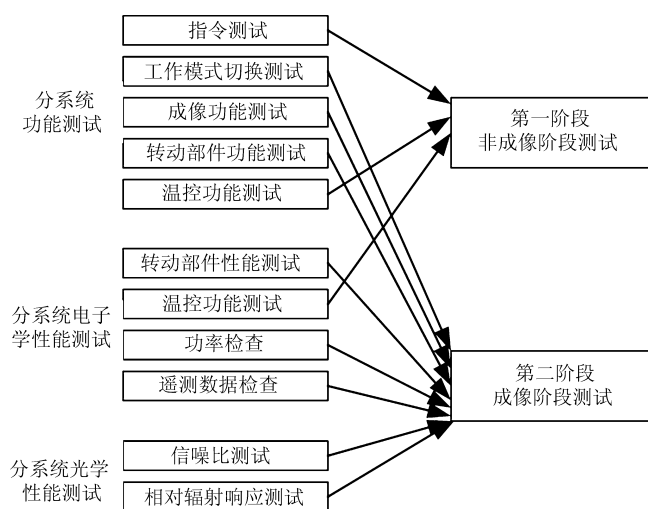


图 3 分系统测试流程合并和重排结果

Fig.3 Result of combination and rearrangement

是关联的, 例如转动部件不转动, 成像无法进行等等。而转动部件功能测试时同时又可以检测转动部件转动的性能, 成像过程中又可以检测光学性能, 因此分系统所有测试可以通过合并重排进行优化。

以某多光谱光学载荷分系统为例进行优化。该光学载荷要求转动部件运动到固定位置后开始成像, 再运动到另一固定位置成像, 依次循环。该载荷功能测试包括遥控指令测试、工作模式切换测试、成像功能测试、转动部件功能测试和控温功能测试等等。电子学性能测试包括转动部件性能测试、温控性能测试、功率检查、遥测数据检查等等。光学性能包括信噪比、相对辐射响应测试等等。采用合并重组的方法进行优化如图 3 所示。

分系统测试简化为两个阶段, 第一阶段为非成像阶段测试, 该阶段工作包括地面测试光源上电预热, 遥控指令测试和温控功能性能测试。

第二阶段为成像阶段测试。该阶段控制载荷对光源进行成像。成像过程中完成成像功能和转动部件功能测试, 并同步开展光学性能测试和电子学性能测试。测试过程中分析成像数据获得信噪比、相对辐射响应等指标。由于光学性能测试项目多, 时间长, 测试过程中也有足够的能够开展遥测数据检查、转动部件性能测试和功率检查等电子学性能测试。另外, 不同的测试项目需要更换光源, 更换光源过程中可以进行工作模式切换测试。

#### 4 优化结果及讨论

根据 ECRC 分析法对光学载荷发射场流程进行重新设计, 得到优化后的流程图如图 4 所示。

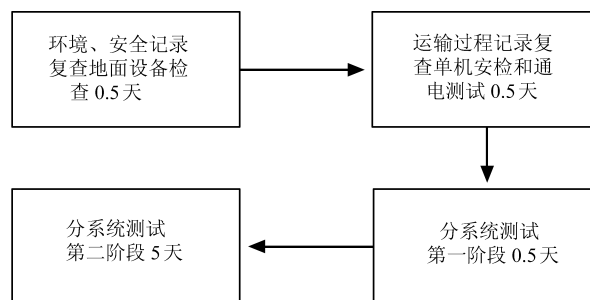


图 4 优化后光学载荷发射场测试流程图

Fig.4 Test procedure after optimization

经过优化, 测试过程由原来的 6 项减少至 4 项。取消了两个测试项: 测试环境和安全性检查、单机测试。使用记录复查的形式替代。将分系统测试三个大项合并为两个阶段, 每个阶段测试过程中同步开展功能测试、电子学性能测试和光学性能测试, 实现同一项操作, 完成多个测试项目, 获得多个测试结果的效果, 提升了效率。

优化后, 测试时间由原来的 10.5 天缩短至 6.5 天, 用时缩短超过 1/3, 节约了测试时间, 也为后续按时装星测试提供了保证。

从测试覆盖性和测试质量来看, 优化后的测试项目能够完全覆盖优化前的测试项目, 省略的单机测试项目, 在分系统测试中完成覆盖。测试覆盖性、测试项目完整性、测试质量和强度均没有低于优化前的水平, 没有改变单机的技术状态, 优化后各项质量标准没有降低。

优化后, 分系统测试第二阶段耗时 5 天, 约占整个测试时间 77%。该测试过程与测试项目因光学载荷技术特点不同而不同, 不具备通用性和普适性。但该测试过程仍具有优化的空间, 且该测试过程优化对

整个测试过程具有很重要的意义。

## 5 结 论

ECRS 分析法在工业工程上得到了广泛的应用, 将 ECRS 分析法应用于航天发射场测试的光学载荷测试环节, 减少了测试过程, 节约了测试时间, 测试覆盖性和测试项目完整性没有降低, 提高了测试效率, 为后续高强度卫星发射奠定了良好的基础。

后续研究的重点, 应针对具体的光学载荷, 深入分析光学性能测试的项目, 运用 ECRS 分析法进行优化和设计, 以期获得更好的结果。

### 参考文献:

- [1] Li Mengjun, Wang Dongfeng. Analysis of the effect of Parallel-multitask on the capability of Aerospace Launch Center [J]. *Systems Engineering*. 2009, **27**(8): 114-117.  
李孟军, 王东锋. 多任务并行对航天发射场能力的影响 [J]. *系统工程*, 2009, **27**(8): 114-117.
- [2] Su Yongzhi, Chen Jingpeng. Research on the Reliability of Spaceflight Launch Site's Facilities and Equipment [J]. *Journal of Equipment Academy*. 2014, **25**(2): 56-59.  
苏永芝, 陈景鹏. 航天发射场地面设施设备可靠性工作研究 [J]. *装备学院学报*, 2014, **25**(2): 56-59.
- [3] Cui Bao, Zhao Jiguang, Chen Jingpeng, et al. Research of the Risk Analysis System of Space Launch Site [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2014, **21**(4): 152-158.  
崔 豹, 赵继广, 陈景鹏, 等. 航天发射场风险分析系统研究 [J]. *安全与环境工程*, 2014, **21**(4): 152-158.
- [4] Xian Feng. An analysis of the design requirements of general assembly-test building at manned spacecraft launch site [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2011, **28**(1): 87-90.  
鲜 峰. 载人航天器发射场总装测试厂房设计需求分析研究 [J]. *航天器环境工程*, 2011, **28**(1): 87-90.