

doi: 10.7690/bgzd.2018.06.014

基于数据处理的航天器总装过程风险管控

张春柳, 孙刚, 杨再华, 王春野, 郑丽得, 胡瑞钦
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 针对航天器总装过程的风险识别与控制要求, 提出一种基于数据处理的风险评价模型。该模型依托生产管理软件系统, 选取设计文件变更次数、工艺文件变更次数和工装不满足工序要求数等为统计原始数据, 依据经验公式量化地计算出总装各个阶段的风险, 针对不同风险等级采取相应的风险控制措施, 并应用到我国航天器总装过程管理中。在某遥感卫星的应用中, 该模型在整星总装研制周期压缩 25% 的条件下, 实现了“零缺陷”的质量目标, 表明了所述方法在航天器总装过程风险管控中的有效性。

关键词: 风险管控; 航天器; 总装; 数据处理

中图分类号: TP274 **文献标志码:** A

A Risk Management Based on Data Processing During Spacecraft Assembly

Zhang Chunliu, Sun Gang, Yang Zaihua, Wang Chunye, Zheng Lide, Hu Ruiqin
(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: According to the risk identification and control requirements for spacecraft assembly process, a risk management model based on data processing has been suggested. The model is based on the data from product management software, and the design change times, the number of process documentation alternation, the number of tooling failure to meet requirements are selected as risk evaluation indexes. According to the empirical formula, all risk quantitative indicators in each period are calculated, and the corresponding risk control measures are taken. The risk management model has been applied successfully in China's spacecraft assembly. For the situation in a remote sensing satellite assembly, although the cycle time reduction was compressed by 25%, zero defects have been achieved during the assembly, which indicates the effectiveness of the method in risk control of the spacecraft assembly process.

Keywords: risk management; spacecraft; assembly; data processing

0 引言

航天器总装是航天器生产的最后环节, 总装过程中出现的质量问题及其带来的工程反复严重影响航天器的研制进度^[1]。航天器系统庞大、技术状态复杂、总装及专业测试工序多^[2]。为了实现产品的零缺陷质量管理目标, 对工艺以及生产实施过程的控制管理提出了严苛要求。

航天器具有多品种、小批量、多系统、长流程的生产模式及特点。目前, 针对离散型制造业生产过程的产品质量管理往往只注重事后处理, 缺乏质量数据进一步分析的情况, 应采用事先预警的管理理念^[3]。若能在质量问题发生前及时掌握航天器总装实施状态, 识别其中可能出现的风险并进行合理管控, 则有助于采取措施预防质量问题的发生, 确保总装过程的顺利进行和产品质量。

质量过程控制的概念与实施过程监控的方法早在 20 世纪 20 年代就由美国的休哈特 (W. A. She w hart) 提出^[4]。它的基本思想是借助数理统计的理论

应用统计分析方法对制造过程进行监控, 科学地判别出制造过程中产品质量是否随机波动, 从而准确预报生产过程的异常, 以便生产管理人员及时消除异常, 采取措施, 使过程处于稳定状态, 从而实现监控和提高产品质量的目的^[5]。

我国航天在长期的研制生产过程中积累了大量生产数据, 这些数据具有潜在的应用价值, 可以采用数据挖掘技术^[6]探求风险识别与质量保障的规律, 使得产品质量达到最佳。

针对航天器研制中的风险管理, 国防科技大学的李江教授提出了基于 Multi-Agent 技术的大型航天研发项目风险分析方法^[7]; 中国航天科技集团公司的郭宝柱研究员提出全面分析各种可能的风险源, 通过专家打分量化排序, 根据风险指数排序采取针对性措施, 最终将技术风险降低到一个预先确定的可接受水平^[8]。

笔者利用航天器总装工艺及执行记录的统计信息, 对航天器总装过程中进度、质量、技术装填状态进行分析和风险识别。通过构建基于数据处理的

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-04-08

基金项目: 国家高分专项天基部分资助项目(科工高分[2011]1199号)

作者简介: 张春柳(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事航天器质量管理研究。

风险评价模型，将数据处理和风险管控有机结合，在数据挖掘的基础上进行风险管控，提高了风险决策的有效性。相关成果已在我国航天器总装过程中进行了成功应用，取得了良好的效果。

1 基于数据处理的风险评价模型

笔者依托信息化管理平台软件“看板生产管理系统数据中心 3.0”，选取航天器总装实施过程风险的预警指标，将数据分析方法和风险管控流程相结合，设计了如图 1 所示的基于数据处理的风险决策模型。

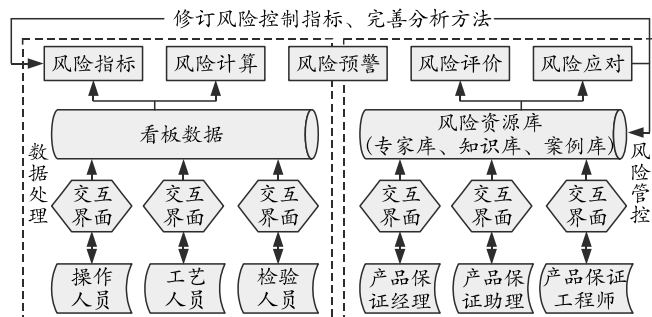


图 1 基于数据处理的风险决策模型

看板生产管理系统数据中心 3.0 是针对航天器总装研制过程开发的信息化管理平台软件，经过多年来在航天器研制过程中的应用和不断完善，已能够基本保证航天器总装过程质量信息的真实性、准确性和有效性，并具备较强的数据自动提取和汇总功能，通过该软件平台可获取相关数据进行风险分析评价。

该模型包括数据处理和风险管控 2 个模块。通过计算机交互界面，航天器总装各岗位人员(工艺人员、操作人员、检验人员、产品保证经理、产品保证助理和产品保证工程师等)可以访问、使用该系统。

在数据处理模块内，工艺人员、操作人员和检验人员通过编制工艺规程、签署过程记录，将航天器总装过程数据记录在看板生产管理系统中，系统通过已经选取的风险指标，进行风险计算，并以风险预警的形式传递到风险管控模块^[9]。

风险管控模块基于数据处理模块提供的各类报表开展工作，在该模块中，基于信息化系统建立风险资源库(主要包括专家库、知识库、案例库等)。专家库中的专家按专业分为总装工艺专家、操作技能专家、精度测量专家、检漏测试专家、质量测试专家、力学环境试验专家、热环境试验专家、磁环境试验专家、可靠性专家和产品质量专家等。知识库中包括技术风险识别与分析方法、各类风险评估

表、评估指标、评价准则、分值等。案例库中包含航天器总装研制过程发生的各类质量问题和质量异常，以及采取的纠正措施和举一反三措施。

产品保证经理组织各专业产品保证工程师对风险预警信息进行分析识别。通过调取专家库中的专家，分析案例库中的典型相关质量案例，选取知识库中的风险管控方法，形成针对风险的风险管控措施。产品保证助理对风险分级动态管控和发布信息。

1.1 风险指标选取

质量信息数据以表格、图纸、文件等形式散落在海量信息中，要想将海量数据信息转化为组织所用，成为支撑总装过程风险管控、质量监控实施的数据基础，就需要对数据进行抽取、转换、分析或模型化处理，找出规律性，获取有助于风险管控的关键信息。

航天器总装研制过程是多单位、多专业系统工程，因此，既要满足组织层面质量管理体系的要求，又要满足本航天器产品保证要求。航天器总装研制过程风险主要包括进度风险、质量风险和技术风险^[10-11]。基于长期的生产管理经验，研制进度与总装工序数量及研制计划调整情况紧密相关，进度风险指标选取工序数 n 、计划调整次数 p ；航天器总装以人工为主，“人”是航天器质量保障环节中的重要因素，操作错误情况可以反映操作者的身心状态，关系到最终的产品质量，因此，质量风险指标选取操作实施错误数 q 作为因变量；技术风险是由于航天器设计人员、工艺设计人员设计不到位带来的风险，相关设计文件的变更可以反映出设计人员对产品状态的掌控情况，过多的设计更改可以反映出设计人员对产品情况的不明晰，存在研制风险，因此对技术风险指标选取设计文件变更次数 a 、工艺文件变更次数 b 、工装不满足工序要求数 c 作为计算已知量。

1.2 过程风险计算

进度风险 r_1 是工序数 n 和计划调整次数 p 2 个参数的函数，

$$r_1=f(n,p) \tag{1}$$

质量风险 r_2 与操作实施错误数 q 相关，根据经验可得

$$r_2=q/n \tag{2}$$

技术风险 r_3 与设计文件变更次数 a 、工艺文件变更次数 b 、工装不满足工序要求数 c 相关。单位工序数下发生的操作实施错误、设计文件变更、工艺文件变更、工装不满足工序要求数越多表明风险

越大，根据经验可得

$$r_3 = a/n + b/n + c/n. \quad (3)$$

航天器总装过程风险需要对进度风险、质量风险和技术风险三者进行综合考虑。根据长期航天器总装实施经验，航天器总装过程风险 r 与进度风险 r_1 、质量风险 r_2 和技术风险 r_3 相关，如下式所示：

$$r = k_1 \times r_1 + k_2 \times r_2 + k_3 \times r_3. \quad (4)$$

其中： k_1 为进度风险的影响系数； k_2 为质量风险的影响系数； k_3 为技术风险的影响系数。3 个分项对航天器总装过程风险的影响系数可以采用德尔菲方法(Delphi method)进行量化评价^[12]。经量化评价， $k_1=0.2$ 、 $k_2=0.3$ 、 $k_3=0.5$ 。这样，就得出航天器总装过程风险 r 的计算公式：

$$r = 0.2 \times r_1 + 0.3 \times r_2 + 0.5 \times r_3. \quad (5)$$

1.3 风险评价

风险评价是对识别出的风险事件和风险环节的综合分析与评价，以得出风险等级为评价目标。根据航天器总装过程风险管控和实施的实际情况，制定三级风险等级，分别为组织级、项目级和研究室级。通过对近 5 a 航天器总装过程数据统计和分析，得出依据航天器总装过程风险 r 判断风险等级的方法，即：

- 当 $0 < r < 0.25$ ，风险为室级风险；
- 当 $0.25 < r < 0.5$ ，风险为项目级风险；
- 当 $0.5 < r < 1$ ，风险为组织级风险。

1.4 风险应对

根据风险等级和总装过程对风险的承受能力，制定相应的防范计划和控制措施，即风险应对，可以采用表格化文件，便于传递和闭环管理。

对于组织级风险事件，专家组对风险事件进行分析，从进度、质量、技术和资源保障等要素入手，结合知识库和案例库，从人、机、料、法和环等环节制定风险应对措施；对于项目级风险事件，从航

天器项目的自身特点出发，进行专项分析，在具体项目实施过程中采取相应风险应对措施；对于研究室级风险事件，由研究室应进行认真梳理分析，找出风险发生的潜在隐患，采取相应措施。

2 某遥感卫星总装风险管控应用案例

2.1 ××卫星总装流程概述

××卫星是我国一颗典型遥感光学卫星，其总装研制过程主要包括各状态总装及电测、力学试验、热试验、可靠性试验和出厂前总装等环节，总装研制流程如图 2 所示。

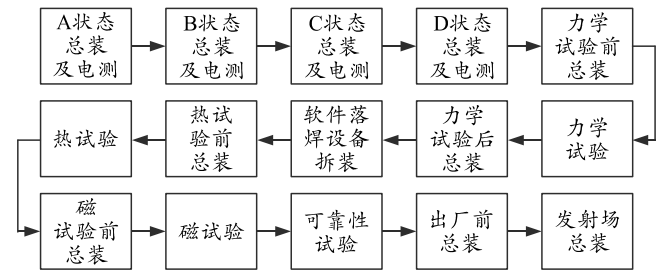


图 2 典型遥感平台卫星总装研制流程

用户因特殊需要，要求该型号比其他遥感卫星总装研制周期缩短 25%；因此，总装过程中如果出现质量问题带来工程反复，将严重影响卫星出厂和发射。项目组采用文中方法，及时掌握航天器总装状态，识别风险并进行科学管控，确保了总装过程的顺利进行和产品质量。

2.2 ××卫星总装风险分析

以 2 周为时间周期，通过看板数据中心采集质量信息数据，如表 1 所示，包括航天器本周期内工序数 n 、计划调整次数 p 、操作实施错误数 q 、设计文件变更次数 a 、工艺文件变更次数 b 和工装不满足工序要求数 c 。

通过式(5)可以计算出该航天器进度风险 r_1 、质量风险 r_2 、技术风险 r_3 和总装过程风险 r ，具体结果见表 2，航天器总装过程风险曲线见图 3。

表 1 ××卫星总装过程风险指标数据清单

工作周期	工作项目	工序数 n	计划调整次数 p	操作实施错误数 q	设计文件变更次数 a	工艺文件变更次数 b	工装不满足工序要求数 c
1	力学试验前总装 1	27	0	1	9	10	0
2	力学试验前总装 2	95	0	2	5	10	0
3	力学试验后总装	132	0	4	9	12	0
4	拆除软件落焊设备	83	0	0	2	11	0
5	安装软件落焊设备 1	84	0	5	7	18	0
6	安装软件落焊设备 2	119	0	4	2	17	0
7	热试验前总装 1	27	0	0	4	8	0
8	热试验前总装 2	124	0	5	8	24	0
9	出厂前总装 1	71	0	1	8	13	0
10	出厂前总装 2	83	0	0	1	10	0
11	出厂前总装 3	65	0	0	1	6	0

表 2 ××卫星总装过程风险数据清单

工作周期	工作项目	进度风险 r_1	质量风险 r_2	技术风险 r_3	总装过程风险 r
1	力学试验前总装 1	0.14	0.04	0.70	0.39
2	力学试验前总装 2	0.48	0.02	0.16	0.18
3	力学试验后总装	0.66	0.03	0.16	0.22
4	拆除软件落焊设备	0.42	0	0.16	0.16
5	安装软件落焊设备 1	0.42	0.06	0.30	0.25
6	安装软件落焊设备 2	0.60	0.03	0.16	0.21
7	热试验前总装 1	0.14	0	0.44	0.25
8	热试验前总装 2	0.62	0.04	0.26	0.27
9	出厂前总装 1	0.36	0.01	0.30	0.22
10	出厂前总装 2	0.42	0	0.13	0.15
11	出厂前总装 3	0.33	0	0.11	0.12

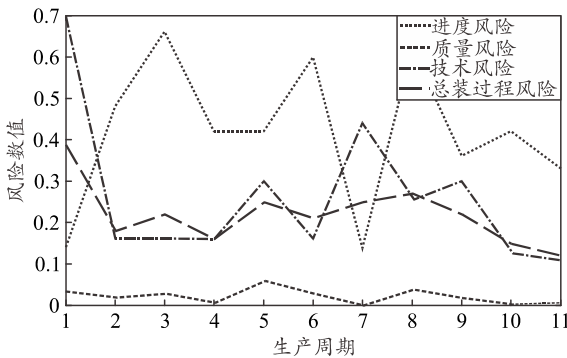


图 3 ××卫星总装过程风险走势

2.3 风险应对措施及效果

笔者通过××卫星总装过程风险走势图，逐项分析风险，并采取措施：

- 1) 进度风险在力学试验后总装、落焊设备安装、热试验前总装阶段激增，主要是 3 个阶段工作量急剧增加，需要关注人员工作状态，防止因人员疲劳引起的质量问题发生。
- 2) 质量风险都小于 0.1，平稳运行，说明在实施层面风险较低，可以暂时不采取控制措施。

3) 技术风险在力学试验前总装、热试验前总装、出厂前总装开始时均处于高值，工作 2 周后技术状态趋于平稳，风险降低。说明各阶段开始时，需要关注技术状态变化引发的风险。

4) 总装过程风险值在周期 1(力学试验前总装开始阶段)为 0.39，在周期 8(热试验前总装完成阶段)为 0.27，大于阈值 0.25，需要进行项目级风险管控；其余风险均小于 0.25，可以由室级进行风险管控。

项目组从专家库中选取总装、力学试验、传感器等专业的专家形成专家组开展风险分析，力学试验前阶段第 1 周由于工作量未显著上升，航天器技术状态较为稳定；但是第 2 周时工作内容涵盖了太阳翼、天线等大型复杂设备安装、热控多层铺设等繁琐工作，造成该阶段风险较高，进一步调取案例库中关于力学试验前出现的质量问题案例，充分研讨造成的影响和分析举一反三的控制措施，在结合本航天器技术状态、资源保障和接口操作项目等特点的基础上，编制风险应对控制表，见表 3。

表 3 航天器总装过程风险应对控制

表格编码	××_总装_××××	填表人	×××
专家组	×××、×××、×××	填表日期	2015 年 4 月 20 日
产品名称	遥感××号	产品代号	××-××(××)
风险事件描述	力学试验前总装阶段风险，主要包括： 1、帆板驱动机构转动过程根较电缆拉拽、挤压风险； 2、卫星在两轴转台上调整姿态发生磕碰星表突出物风险； 3、该阶段涉及多单位多专业操作较多，存在外单位人员因不了解总装现场规定发生质量问题的风险。		
风险事件类型	<input type="checkbox"/> 生产进度风险 <input checked="" type="checkbox"/> 过程质量风险 <input checked="" type="checkbox"/> 研制技术风险	风险等级	<input type="checkbox"/> 组织级风险 <input checked="" type="checkbox"/> 项目级风险 <input type="checkbox"/> 研究室级风险
风险应对措施	<p>人 加强外单位人员管控，对进入总装工作区的人员进行安全和质量培训。</p> <p>机 太阳翼安装到位后，固定电缆前，确认电缆的折弯半径满足要求，电缆包络不影响太阳翼收拢和展开，以及帆板驱动机构的旋转。</p> <p>料 热控多层、3M 胶带等辅料和操作工具、检验量具应放置在多余物盒中，严禁放置在舱内。</p> <p>法 严格执行多余物控制措施，特别关注活动部件周边电缆、热控多层等。</p> <p>环 安全员严格控制工作区人员数量，无关人员禁止进入工作区。</p> <p>其他 卫星在两轴转台上调整姿态前，对卫星倾倒、旋转路径进行检查确认，调整范围内应无干涉物；所有星表突出仪器应安装保护盖(罩)。</p>		
风险监控情况			

针对各级风险，项目组和研究室从人、机、料、法和环等方面制定了控制措施，并保证各项措施得到有效落实和闭环，未发生质量隐患。该航天器按要求于 2015 年出厂并发射，尽管压缩整星总装研制周期 25%，但在北京地区和发射场均实现了“零缺陷”的质量目标。

3 结束语

笔者将数据分析方法与风险管理程序相结合，提出了基于数据处理的风险评价模型，给出了风险计算公式和风险等级评价准则，采取表格的形式制定和落实人、机、料、法、环等方面的控制措施。该方法在我国航天器总装过程中进行了成功应用。实践结果证明：该模型和方法适应航天器总装过程的特点，能够实现航天器总装过程风险的有效辨识与控制，使风险识别实现量化，预警体系更加明确，风险管控水平显著提升，为大型航天器总装研制过程的风险管理提供了新的思路和方法。

参考文献：

- [1] 邢雪瑞. 航天产品总装质量链管理技术研究[D]. 南京：南京航空航天大学, 2012: 1-5.

(上接第 47 页)

由仿真结果可得：当导弹距海面高度逐渐降低并低于 50 m 时，海面回波和高度波门在重合门内产生相关脉冲。同时随着导弹距海面高度降低，高度跟踪电压逐渐减小，且下降的幅度与相关脉冲的宽度成比例。当高度跟踪电压减小时，高度波门左移，距离波门压缩。当导弹高度由 50 m 下降到 20 m 时，高度波门相对于同步脉冲的延时由 313 ns 处左移至 113 ns 处，距离波门的宽度由 283 ns 压缩至 63 ns，故该电路系统能准确地实现高度跟踪和距离波门的压缩^[1]。

4 结论

距离波门压缩是无线电引信抗海杂波干扰的一种重要技术手段。笔者通过分析距离波门压缩的原理，对高度跟踪和波门压缩的实现方式进行研究，并在 Matlab/Simulink 环境下构建了距离波门压缩的模型。从仿真结果看：该方法能够准确地实现高度跟踪和距离波门压缩，有效地将海杂波抑制在引信的目标检测范围之外，增强了目标检测的准确性和可靠性，从而提高了引信超低空作战能力。

- [2] 谭维炽, 胡金刚. 航天器系统工程[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009: 577-581.
- [3] 宋建聪, 戴青云, 付品欣, 等. 数据挖掘在生产过程质量管理中的应用[J]. 现代制造工程, 2013(9): 12-16.
- [4] JURAN J M, GODFREY A B. Quality Control handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 1999: 8-10.
- [5] 胡胜. 基于数据挖掘的质量过程诊断建模[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2013: 3-7.
- [6] 邬文帅. 基于多目标决策的数据挖掘方法评估与应用[D]. 西安: 电子科技大学, 2015: 5-8.
- [7] 李江, 雷晓刚. 基于 Multi-Agent 技术的大型航天研发项目风险分析方法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(6): 148-152.
- [8] 郭宝柱. 航天项目风险管理——预先识别与控制风险到可接受程度[J]. 航天器工程, 2014, 23(4): 1-4.
- [9] 龚霄, 邓超志, 朱怀金, 等. 输变电设备多源数据处理系统的功能设计[J]. 机电工程, 2017, 34(6): 659-663, 673.
- [10] 刘玉刚. 航天总装工艺专业内涵及体系地位简析[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(1): 108-113.
- [11] 彭涛, 李世其, 徐迟, 等. 面向航天器舱体的智能装配系统研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(5): 545-549.
- [12] 米洁, 邓家褪. 观测卫星概念方案设计及其不确定性研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(7): 781-786.

参考文献：

- [1] MARVIN K S. Speed spectrum communications handbook[M]. McGraw: Hill Companies, 2002: 22-25.
- [2] 陈小霞, 朱建平, 李玉钊. 基于距离波门压缩的无线电引信抗海杂波干扰技术[J]. 制导与引信, 2014, 35(1): 21-24.
- [3] 曹亮, 尹逊青, 秦丽. 脉冲多普勒引信抗干扰通道距离门优化设计[J]. 航空比兵器, 2017(1): 79-82.
- [4] 闫岩, 李玉钊, 刘岩. 超低空引信截止距离压缩因子计算方法[J]. 制导与引信, 2016, 37(3): 19-22.
- [5] 路明, 林涛, 赵曦. 无线电引信抗海杂波干扰技术分析[J]. 探测与控制学报, 2007, 29(2): 35-41.
- [6] 赵惠昌. 无线电引信设计原理与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 73-75.
- [7] 梁棠文. 防空导弹引信设计及仿真技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1995: 148-150.
- [8] 周新刚, 赵惠昌, 涂友超. 脉冲多普勒引信抗干扰性能评判方法和仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(1): 207-211.
- [9] 褚凯, 朱一旺, 牛红岩. 便携式无线电频谱管理系统研究与实现[J]. 兵工自动化, 2016, 35(9): 38-40.
- [10] 刘跃龙, 张艳. 超低空引信技术综述[J]. 制导与引信, 2010, 31(4): 1-6.
- [11] 苏益德, 路明, 臧伟. 无线电引信海面后向散射系数仿真分析[J]. 兵器装备工程学报, 2017(5): 52-55.