

运载火箭总装过程质量控制策略的优化与实施

杭 高 李 萌 朱迎新

天津航天长征火箭制造有限公司 天津 300342

摘要: 随着我国航天事业的快速发展, 运载火箭总装质量控制面临高密度发射和高可靠性要求的新挑战。本文从优化环境条件, 规范检验环节, 提高设备管理水平, 提高人员素质, 优化总装实施方案等几个角度, 阐述了优化总装实施的对策。在此基础上, 将数字化技术引入到总装流程中, 实现精细化管理与流程优化, 大幅提高总装流程的质量控制水平, 为航天高质量发展奠定坚实基础。研究成果显示, 对发射装置进行系统的质量控制, 是保证发射装置高可靠、无故障的前提。

关键词: 运载火箭; 总装过程; 质量控制; 重要性; 优化策略

火箭升空是我国整体经济发展建设最重要的里程碑。作为保证运载火箭整体性能的最后一步重要步骤, 运载火箭总装是实现“零缺陷”质量要求的关键。当前, 随着我国新一代运载火箭高强度的发射任务和新一代运载火箭对高质量、高可靠性的新需求, 迫切需要对运载火箭总装质量进行系统性提高。

一、运载火箭总装过程质量控制的重要性

为了保证航天发射能够顺利进行, 对运载火箭总装过程的质量控制显得尤为重要。总装质量的好坏, 对整个系统的工作状态及工作可靠性有很大影响。运载火箭是用于空间飞行的载体, 其总装过程包括精密总装、线缆连接和密封性试验等。其中不管哪个环节质量出现问题, 都将会造成火箭的发射和飞行任务中止。

通过实施质量控制, 可以防止多余物出现。多余物是航天飞行器总装中普遍存在的一种质量问题, 它会引起火箭故障和阀门堵塞, 对航天飞行的安全性构成极大威胁。通过对零部件进行严格的清洁处理、对装配过程进行全程监控以及对操作人员进行防多余物培训, 可以有效减少多余物的产生^[1]。

同时, 通过对总装过程进行质量控制, 可以实现最大限度地提高制造效果, 同时也可以减少制造成本。通过产品精细化管理与数字科技的运用, 降低了由于产品质量问题造成的返工与延迟现象, 从而提升了企业的产能, 并防止由于产品质量问题而造成的资源浪费现象发生。

质量控制将为我国空间科技水平的不断提高奠定基础。通过对总装过程中出现的一些问题进行深入剖析与归纳, 可以进一步提高生产工艺水平, 促进航空航天科

技发展。

二、运载火箭总装过程质量控制优化策略

(一) 环境条件保证

运载火箭总装及储存厂房内的温度、湿度和清洁度应满足相应要求, 温度通常维持在 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$, 确保材料和设备的稳定运行, 湿度维持在40%–70%之间, 防止金属腐蚀和材料受潮。厂房应有对应的防静电接地体系, 操作人员在总装车间必须穿戴抗静电服装, 并佩戴防静电手环, 充分释放人体内部静电, 防止静电损害电子元件。

运载火箭多余物控制是确保火箭安全性和可靠性的关键环节。总装车间多余物包括金属屑、灰尘、纤维、工具、紧固件等, 它们可能导致系统故障或灾难性后果。在实际工作中, 定期培训操作员, 提高多余物空中意识。人员按照生产管理要求, 正确穿戴防尘工作服、工作鞋等防护用品。操作中具体要求包括: ①装配现场所用的资料、零件、仪器、工具及辅助材料等应定置管理, 工作前、后应及时清点。②操作人员禁止进入舱(箱)体内部, 如确需进入舱(箱)体内部时, 应做详细登记。带入舱(箱)体内的工具、零件和辅助材料等需详细登记, 出舱后核实数量。③舱(箱)体内部工作结束后, 操作人员要认真清理多余物, 并经检验人员检查, 符合要求后方可封舱(箱), 操作者和检验人员在质量控制记录卡上签字留名。④总装间只能放置待装产品、工作台和装配用的设备、工装、工具等, 不得放置其它与总装无关的物品。⑤在总装测试厂房内需进行少量加工时, 应制定工艺指导文件, 明确多余物控制要求, 采取隔离措施, 在指定地点进行, 加工时应有检验人员在场监督,

事后清理检查,不得留下多余物,并做记录。

(二) 总装过程检验阶段状态标准化

就火箭产品总装来说,典型的总装过程包括:文件录入、工艺文件编制、总装实施、总装检验。

文件录入是指在编制方案时,技术人员要对方案进行工艺性、操作性等方面检查,以确保其正确性、充足性和适当性。在文件录入过程中,对文件进行细致审核,保证文件内的技术需求与真实工况相符,对潜在的危险因素进行辨识和优化。这样既能增强文件的正确性与操作性,又能为随后的总装工序打下良好的基础,从而减少由于文件出现缺陷所带来的质量隐患。

其次是过程文件的编制要求,在编制过程文件前,根据产品的设计要求工艺员要对总装过程中可能出现的各种危险因素进行分析,制定出具有针对性的过程质量保证方法;尽可能选择已被试飞证明有效的技术工艺,要充分论证,测试和鉴定新技术、新设备等应用;在编制过程文件时,做到准确、有条理,并与设计文件状态保持一致;在编制过程中,技术文件要以图文并茂形式呈现,尽可能地少用语言表述,提高文件的可读性,以保证生产过程中的可实施性;对于容易出错和操作困难的项目,特别是出现过质量问题的项目,要强调过程文件的重要性,需要时,可以建立关键过程或强制性检查点,实现整个过程的闭环管理;过程要求应当定化,以增强其可验证性,并设定工作步骤,对量化的真实数值进行反馈;对于有极性和分离动作等对飞行成功有决定作用的项目,除了在文件中特别注明之外,还需要分别进行统计和总结,形成表格,以便于随后的核查和验证;对于不可测项目,要将其转换成执行阶段的可检项目,并加以验证^[5]。

在发射流程的技术文件制作过程中,通过对技术文件进行标准化、模块化和表格化编写,大大提高了文件实用性,不仅提高了操作人员的工作效率,更有效降低了现场出现的问题。在编制过程文件之前,由技术人员对总装过程中可能出现的危险因素进行识别、分析,并对新技术和新装备进行全面适用和测试。同时将技术文件以图表方式呈现出来,从而减少文本描述,并结合实际图形,提高产品的易读性。另外对于容易出错的项目,设定强制性检查点,以达到过程控制的闭环,保证过程文件的精确与可操作性。

(三) 设备使用与管理的质量保障

在运载火箭总装过程中,各种工具设备、仪器仪

表、工具量具等对产品的质量起到了很大影响。具体要求包括:①各种设备必须在现行的计量检定周期之内,且满足检验结果的准确性。②凡与箭身连接的装备,都要在开始使用之前,对其质量证书和有效期限进行检验,对其外形及多余物进行检验,如发现过多之处应予以清除或替换。③在箭体作业过程中,各种器械均应具有防坠落功能,操作人员应佩戴抗坠落护腕,且护腕与防脱扣机构牢固相连。④扭矩钳在使用前后必须在测试平台上测试,并做好数据统计,当偏差大于规定值时,不得使用。

结合长征系列发射装置的实际情况,采用数字化、信息化等手段对总装设备进行智能控制。采用MES技术对总装车间的装备实施全面周期管理,其中包含了计量检定、维护以及运行日志等内容,以保证装备一直处于良好状态下,并达到精确要求^[4]。在总装时,采用模块化方法,对零件进行优化,降低产品的多余物,降低产品的组装精度。以长征七号火箭为例,利用垂直组装工艺,解决了由于组装过程中出现的各种问题,从而大大减少了生产中出现的各种问题。将多媒体记载技术应用于总装过程中,实现对总装过程中关键工序及组装过程的可视化,为产品质量复核与缺陷溯源等方面的研究奠定基础。同时引进自动控制和扭矩钳等防错装置,降低由于人为原因引起的产品质量问题,使螺丝拧紧的可靠性得到明显提升。从“人、机、料、法、环”五个方面对总装过程进行全方位质量把关,达到产品零缺陷目的,实现总装过程的精确化。这些优化策略有助于提升火箭总装过程的质量与效率,并为提升我国航空航天产业的高质量发展奠定基础。

(四) 总装过程检验阶段优化

考虑到火箭自身特点,需要对运载火箭总装过程进行全程、全方位的检测,以实现总装各阶段的质量控制,保证产品质量。对重要操作部位要用多媒体录像,关键操作过程可以用全程摄像记录。

新一代运载火箭涉及总装、总测的工序有成千上万,截至目前,所有工序均为“三检”,也就是操作人员自检、组长(或指派人员)互检及专职人员检查^[6]。从接收检查开始到安装过程再到最终状态验收,均需专职检验员全程把关。由于专职检验人员数量与全过程检验的工作性质不匹配,为更好的满足型号高质量、高效率发展要求,需要改进检验模式,优化检验流程,持续做好总装检验点优化工作,让专职检验员把有限的精力放在

易错、风险高、代价大的项目。

发射场检验工作是一项重点内容，由于其特殊性，对于检验人员把关、预防能力要求相对较高，任何一点工作失误都有可能带来较为严重的后果。大部靶场工作在总装、总测阶段无法真实模拟。针对人员工作经验尚浅、靶场实际检验能力参差不齐等现状，通过经验的积累，材料的持续整理，编纂《靶场工作手册》，手册记录涉及靶场操作的工艺流程及检验要点，对检验岗位人员是一项良好的学习材料，能高质量、高效率完成型号检验任务，节省时间精力检查易错、风险高、代价大的项目，为检验人员靶场工作零失误做好有力支撑。

（五）提升人员素质与能力

由于发射装置的特点，需要有高度责任心和较高质量意识的总装操作人员来完成。操作人员必须掌握火箭组装的基本原理，熟知相关国家标准、行业标准和企业标准，并按照工艺操作规程要求进行操作。在组装工作开始之前，操作人员要仔细阅读技术规范、总装图和工艺规程等相关的技术资料，针对要求进行详细设计。

对工艺流程进行优化时要结合产品可操作性，工艺复合参考数设计文件，以保证所选技术不仅能满足设计要求，还能达到产品的质量要求和确保安全性。在此基础上通过模块化方法，将复杂过程分割成若干个相互关联的模块，增强过程的柔性自适应能力。

其次操作人员还应该对各种工具、设备仪器、工具量具等都要有一定了解，并且要按照各种质量控制制度来执行。根据各自的工作职责，操作人员要认真负责，熟练掌握其操作方式方法。比如实施“四个清单”，建立总装车间预防错误系统，提炼“工作禁忌清单”和“不良习惯清单”，使员工的工作行为得到切实规范。在此基础上还可采用自动水平调节吊具与柔顺控制技术，通过横向调整式伸缩装置，实现对作业过程中的复杂作业问题的有效处理。

同时检验人员也要有极强的责任感，对总装过程中的各个环节都要有极高的自我规范。检测人员必须熟知检测内容，熟练使用各种检测手段，保证检测结果的准确性。

（六）总装实施阶段优化

运载火箭的总装作业必须按照有关作业规范进行。对作业进行分类管理，按照作业工人的技术等级来安排作业，严禁越界作业。在开始工作之前，必须对所有的

操作者进行测试，通过考试才能进入工作岗位。总装作业时，请操作人员认真阅读技术资料，并按技术文件要求对总装过程进行各项作业。在总装作业过程中，要有明确的分工和清晰的职责划分，操作人员数量适中，以防止在工作现场出现混乱、换岗、串岗等现象。零、组件完成装配后，如需拆卸，须由检验员批准，在组装时须再次做外观检测，并符合紧固件的反复使用规定。

在产品制造厂总装过程设计的实际应用中，从操作规范、人员管理、工艺文件编制等方面，进行了全面的改进。首先工厂进行周密的计划与安排，对各体系进行详细技术说明，确定总装过程中的关键点，识别危险点，对总装过程进行优化。在员工的管理上，采取工作分类体系，按照工作人员的技术等级来安排工作，杜绝越界作业，并且在上岗之前要对员工进行认真评估，确保其具备岗位所需技能。

总结语

综上所述，面对高密度发射和新一代运载火箭的高可靠性要求，研究面向新一代火箭高可靠运行需求的多目标协同优化方法，以提高总装过程的质量控制水平，为推动我国航空航天高质量发展奠定基础。在今后的发展中，通过对数字、智能管理等方面的深入研究，可以使运载火箭的总装过程更加高效、可靠，助力国家航空航天事业再上一个新台阶。

参考文献

- [1] 郭卫华, 曾慧. 全力服务文昌火箭装配项目[J]. 当代电力文化, 2023, (07): 88.
- [2] 马庆丰. 基于机器视觉的运载火箭支架自动装配方法研究[J]. 机电信息, 2023, (13): 1-7.
- [3] 王建刚, 杨帅, 申林远, 李疆, 陶现实. 液体运载火箭舱段铆接装配生产线规划[J]. 航空精密制造技术, 2022, 58(03): 31-36.
- [4] 朱迎新, 马俊平, 张猛, 杭高. 质量检验在新一代运载火箭总装总测质量控制中的作用[J]. 军民两用技术与产品, 2022, (03): 20-23.
- [5] 陈跃彪, 张煜, 张志超. 运载火箭总装全过程全要素质量控制[J]. 中国战略新兴产业, 2018, (40): 157.
- [6] 陈跃彪, 张志超, 张煜. 运载火箭总装过程的质量控制[J]. 科技与创新, 2018, (15): 76-77+79.