

火箭发动机试验管道多余物人机环境控制方法

秦永涛, 宋 阳, 苏红芳, 李 荣

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 为消减液氧/煤油火箭发动机试验过程中工艺管道的多余物, 消除试车隐患, 基于人机环境系统理论, 从人机环境综合考虑, 对多余物产生的主要环节进行分析, 探寻工艺管道多余物产生的根源。根据集对理论, 分析影响因素间的同一度、对立度、波动度, 探讨人机环境因素间耦合关系, 确定多余物产生的关键因素。针对多余物的人机环境关键因素, 结合实际工作, 制定液体火箭发动机试验过程的多余物控制及检查方法, 有效减少或消除发动机试验过程多余物的产生, 保证发动机试验过程顺利安全进行。

关键词: 发动机试验; 多余物; 检测

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 06-0080-06

Method of man-machine-environment control over foreign object debris in pipelines used in rocket engine test

QIN Yongtao, SONG Yang, SU Hongfang, LI Rong

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: On the basis of man-machine-environment system theory, the main links to result in foreign object debris are analyzed in the aspect of man-machine-environment influencing factors to search the root of producing the foreign object debris in the process pipes for removing the foreign object debris in the pipes and eliminating the potential danger in the process of liquid oxygen-kerosene rocket engine test. The identity, opposing degree, fluctuating degree of influencing factors are analyzed by means of set pair theory to research the coupling relationship among the influencing factors, and determinate the key factors of resulting in the foreign object debris. The foreign object debris control and inspecting methods were established in accordance with the man-machine-environment key factors and practical work in the testing process of liquid oxygen-kerosene rocket engine, so that the foreign object debris in the pipes were effectively removed or decreased.

Keywords: engine test; foreign object debris; inspection

收稿日期: 2015-08-13; 修回日期: 2015-08-29

基金项目: 航天支撑技术项目(617010417)

作者简介: 秦永涛 (1981—), 男, 博士, 研究领域为液体火箭发动机试验技术

0 引言

液氧/煤油火箭发动机比常规火箭发动机结构复杂,试验系统与试验产品配套大量的液路、气路、测控、工艺、吹除、增压等工艺管道和阀门。其中,工艺管道配套的数量多、接口形式多样,安装工序复杂。由于试车准备工作过程中,部分位置空间窄小,工作人员多,造成操作困难,从而连接产品的管路多余物产生的可靠性增加。有时人为疏忽以及工艺管道交付验收过程中对多余物控制的不严,容易造成多余物随着工艺管道一起带入产品。因此,液氧/煤油火箭发动机试验中试验系统及产品内多余物的控制难度较大。

火箭发动机试验过程中,多余物容易引起试车过程发动机内部燃烧不均匀、零部件磨损加剧、阀门无法正常打开与关闭、参数下降等异常情况,严重时引起重要零部件如涡轮泵等提前失效、损坏,甚至爆炸。多余物造成火箭发动机试验质量问题的概率大幅上升,一些重大的航天试验或发射失败的原因就是由于多余物造成的。因此,液氧/煤油火箭发动机试验中,需要从全过程自始至终严加预防和控制多余物,制定合理科学的检查方法,避免多余物进入发动机内部。

针对多余物的控制与检查,国内外许多专家学者进行了大量的工作,例如 Cui Jinshi, Julius Z. Knapp, 熊涛, 李大南等。目前,液体火箭发动机试验过程的多余物控制已从单纯的以产品为主发展到结合具体工程实际与理论知识综合分析,从直观的控制到防患于未然的提前控制阶段,但是,目前还没有综合考虑人-机环境因素,从人机环境系统工程出发研究液氧煤油火箭发动机试验过程多余物控制方法。

为此,通过分析产生多余物的主要环节,从人机环境等方面出发,探索多余物产生的影响因素间耦合关系,确定工艺管道多余物的产生根源,制定液氧/煤油火箭发动机试验过程的多余物控制方法,进行早期有效预防,避免由于地面试验系统造成的发动机产品损坏,为准确、客观评价液体火箭发动机的固有质量提供保障。

1 多余物产生的因素分析

1.1 试验过程多余物来源分析

根据 QJ2850-96《航天产品多余物预防和控制》,多余物的定义为:产品中存在的由外部进入或内部产生的与产品规定状态无关的一切物质。对于液氧/煤油火箭发动机试验过程来说,在总装交付验收时带有不符合设计图纸、技术文件以及技术条件规定的物质均称为多余物。

多余物的种类是多种多样的,常见的是金属、非金属、人及其排泄物。此外,超过规定的尘埃和介质化学反应的生成物也是多余物。

1) 金属类多余物 这是比较常见的一类,主要有脱落的标准件、加工金属屑、遗忘的装配工具、钢丝头、焊渣、工艺件、铆钉头等。这类多余物是液体火箭发动机试验过程控制的重点。

2) 非金属多余物 这类多余物涵盖的范围广,包括总装使用的非金属(如泡沫、衬带、胶带、镀铝膜、涤纶网、阻燃布等)、材料碎屑、超过规定的尘埃、胶类及胶类固化后的碎渣,这类多余物的控制难度比较大。

3) 其他多余物 主要包括生物化学多余物和有害气体多余物。

1.2 多余物产生的因素关系分析

试验过程的多余物影响因素数量多,涉及范围广,存在相互制约、相互影响的错综复杂关联关系,引起故障的产生、增长、积累和传递,最终可能影响发动机试验成败。因此,需要从错综复杂的影响因素中全面定量确定多余物产生的关键影响因素,从问题的薄弱环节出发,控制工艺管道的安装过程,减低多余物产生的可能性。

人-机-环境系统工程是由我国著名科学家钱学森提出的,通过运用系统工程的思想和方法,揭示人、机、环境之间相互关系的规律,确保系统最优组合的一门综合性学科。人-机-环境系统工程最大特点是把人、机、环境看作是一个系统的三大要素,在深入研究三者各自性能的基础上,着重强调从全系统的总体性能出发研究对象特性。人-机-环境系统工程和 5M1E (Man, Machine, Material, Method, Measure, Environment)

现场质量控制方法相比,人-机-环境系统工程不仅分析组成要素的单独性能,更进一步分析研究系统中各要素的关联关系,并通过人、机、环境间的信息传递、加工和控制,形成一个相互关联的复杂的巨系统,并运用系统工程方法加以分析,使系统具有“安全、高效、经济”的综合效能。

在此以人机环境系统工程为基础,从人-机-环境三个主要方面对液氧煤油火箭发动机试验过程的多余物影响因素进行全面定量识别与分析,其多余物影响因素主要包括:一是人(工作人员)的影响方面,包括如使用经验、检查周期等;二是机器(客观运行实体)的影响方面,包括管道材料、管道酸洗情况、管道探伤、管道清洗等;三是环境(主、客观环境)的影响方面,包括介质温度、压力、流量、环境温度、振动等。

试验过程的多余物影响因素 Q_p 可以表示为:

$$Q_p \Rightarrow PW \cup PM \cup PE$$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \{ps_1, ps_2, ps_3, \dots, ps_m\} \cup \{ps_{m+1}, ps_{m+2}, \dots, ps_r\} \\ &\quad \cup \{ps_{r+1}, ps_{r+2}, \dots, ps_h\} \\ &\Rightarrow \{px_1, px_2, \dots, px_v\} \cup \{px_{v+1}, px_{v+2}, \dots, px_u\} \\ &\quad \cup \{px_{u+1}, px_{u+2}, \dots, px_d\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: PW 为试验过程中人(工作人员)的主要方面; PM 为试验过程中机器(客观运行企业实体)的主要方面; PE 为试验过程中环境(主客观环境系统)的主要方面; px_k 为第 k 个试验过程的多余物的人-机-环境影响事件; $\{ps_1, ps_2, ps_3, \dots, ps_m\}$ 表示有 m 个人员方面的影响事件,例如使用经验、检查周期等; $\{ps_{m+1}, ps_{m+2}, \dots, ps_r\}$ 表示有 $r-m$ 个机器方面的影响事件,例如管道材料、管道酸洗情况、管道探伤、管道清洗等; $\{ps_{r+1}, ps_{r+2}, \dots, ps_h\}$ 表示有 $h-r$ 个环境方面的影响事件,介质温度、压力、流量、环境温度、振动等; h 表示试验过程多余物的人-机-环境影响事件总数, $1 \leq m < h$, $1 \leq r < h$ 。

根据人机环境系统工程,试验过程的多余物的影响因素来自于人机环境,并且存在错综复杂的关系,其试验过程的多余物的影响因素相互关系如图1所示。

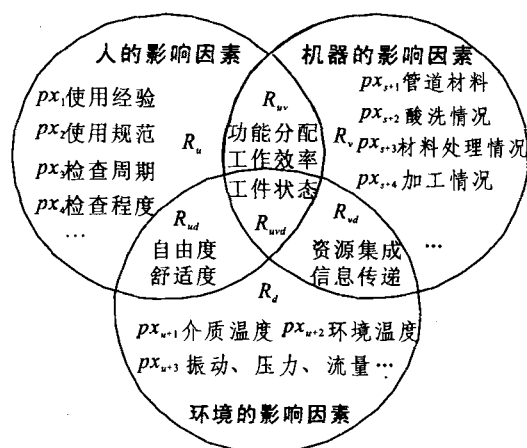


图1 试验过程多余物的人机环境影响因素相互关系

Fig. 1 Mutual relation of man-machine-environment influence factors on foreign object debris in test process

根据试验过程的多余物人机环境影响因素相互关系,试验过程的多余物 P_i 可以表示为:

$$P_i = \{R_u, R_v, R_d, R_{uv}, R_{ud}, R_{vd}\} \quad (2)$$

式中: R_u 为人(工作人员)的因素间相互关系; R_v 为机器(客观运行企业实体)的影响因素间相互关系; R_d 为环境(主客观环境系统)的影响因素间的相互关系; R_{uv} 为人(工作人员)与机器(客观运行企业实体)的影响因素间相互关系; R_{ud} 为人(工作人员)与环境(主客观环境系统)的影响因素间相互关系; R_{vd} 为机器(客观运行企业实体)与环境(主客观环境系统)的影响因素间相互关系; P_i 为第 i 个试验过程的多余物的人机环境影响因素。

1.3 多余物产生的关键因素确定

对于液氧/煤油火箭发动机试验过程的多余物人机环境影响因素间相互关系,根据集对分析,利用因素同一度、对立度、波动度关系,可以分析多余物的人机环境影响因素的紧密程度,确定一个因素与其他因素的耦合程度,有:

$$\{x_i \rightarrow x_j | R_{ij}^{BR} \rightarrow H_i \{a_i, b_i, c_i\}\} \quad (3)$$

定义1: 试验过程的多余物人机环境影响因素的同义度 a_i 。 a_i 表示第 i 个人机环境影响因素波动对其他人机环境影响因素产生波动,从而导致其他人机环境影响因素产生工艺管道的多余物。

定义 2: 试验过程的多余物人机环境影响因素的对立度 b_i 。 b_i 表示第 i 个人机环境影响因素波动对其他人机环境影响因素不产生波动, 从而避免其他人机环境影响因素产生工艺管道的多余物。

定义 3: 试验过程的多余物人机环境影响因素的波动度 c_i 。 c_i 表示第 i 个人机环境影响因素对其他人机环境影响因素产生波动, 可能导致其他人机环境影响因素产生工艺管道的多余物, 或者不产生工艺管道的多余物。

在 t 时刻, 试验过程的多余物人机环境影响因素的同一度、对立度、波动度分别为:

$$a_i = \sum_{j=1}^k \mu_{ij}(t), \quad b_i = \sum_{j=1}^l \mu_{ij}(t), \quad c_i = \sum_{j=1}^{d-k-l} \mu_{ij}(t) \quad (4)$$

式中: $\mu_{ij}(t)$ 为在 t 时刻第 i 个人机环境影响因素对第 j 个人机环境影响因素的权重系数, 其值根据脆性熵确定。

试验过程的多余物人机环境影响因素的脆性联系函数为:

$$f = a_i + b_i + c_i J, \quad J \in [-1, 1], \quad I \in [-1, 0] \quad (5)$$

试验过程多余物影响因素的耦合度 H_i 定义为:

$$H_i = \alpha a_i + \beta b_i + \gamma c_i J \quad (6)$$

式中: α, β, γ 分别为 a_i, b_i, c_i 的权重系数, $J, I, \alpha, \beta, \gamma$ 其值可以根据具体实际过程情况确定。

根据确定的试验过程多余物的人-机环境影响因素, 通过计算相互关系的同一度、对立度、波动度, 确定试验过程的多余物人机环境影响因素的耦合度 H_i , 从而根据确定试验过程的多余物人机环境影响因素的耦合度 H_i , 可以确定试验过程多余物产生的关键影响因素。

2 试验过程的多余物控制方法

根据人机环境系统工程确定多余物产生的关键因素, 采取相应的措施, 可以从根源上清除试验过程多余物。在长期液氧煤油火箭发动机试验过程中, 为提高效率, 满足试验要求, 结合岗位多年实际, 针对多余物产生的关键影响因素, 研究了多余物改进与控制方法, 其基于人机环境系统工程的试验过程的多余物控制过程如图 2 所示。

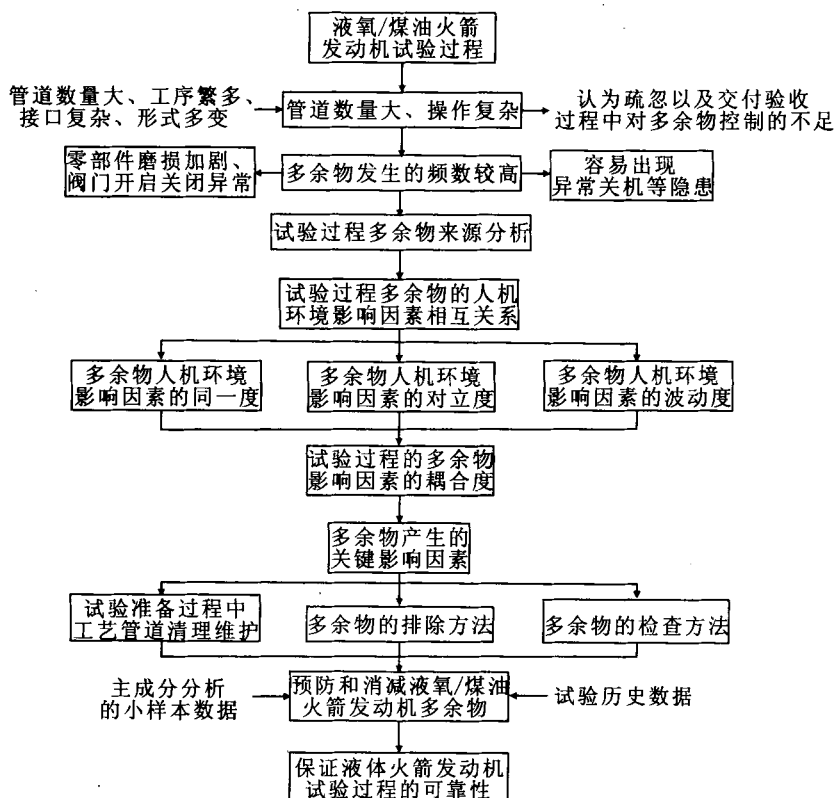


图 2 基于人机环境系统工程的试验过程的多余物控制过程

Fig. 2 Control process of foreign object debris in test process according to man-machine-environment system engineering

2.1 试验准备过程中工艺管道清理维护

在与产品对接的工艺管道安装前,应选取合适型号的不锈钢管子,对管子进行一对一的制作,因对接口形式一样,可防止管道接错。制作时对管道进行标记,焊接时应对管道接口检查,防止对接口有多余物。焊接完接头酸洗、清洗、吹除、打压、清洗、吹除,避免制作过程产生多余物。与发动机对接前包白布,采用高压气体吹出,确保干净。

2.2 多余物的排除方法

对于液氧煤油火箭发动机试验过程多余物,主要应从人机环境方面(人员、设备、环境、配套库房、工艺、操作、检验等)各方面进行排查,从关键因素入手认真剖析各环节,具体可以从以下方面展开:

1) 擦 用海绵对管子内壁做活塞往复运动(或用白绸条清洗)。

2) 吹 用经过净化的洁净氮气,对沉积在发动机内部的多余物进行吹除。

3) 洗 对管道进行酸洗去除氧化物质,对产品金属表面及可触及部位,用布块擦拭或沾酒精(T3)等有机溶剂清洗。

4) 振动排除 将发动机敞口部位置于最下方,用橡皮榔头在产品上适当敲击、振动排除多余物。

5) 吸 用磁铁对管道铁屑多余物进行吸取与收集。

试验过程的多余物人机环境影响因素的同一度、对立度、波动度分别为:

$$a_i = \sum_{j=1}^k (\text{擦, 洗, 吹}), b_j = \sum_{j=1}^l \text{振动}, c_l = \sum_{j=1}^{d-k-1} \text{吸}$$

式中:同一度 a_i 包括了白绸条体积、质量、往复次数、往复力、洗的清洗剂、次数、吹除气体压力、流量等;对立度 b_j 包括了振动强度与频率;波动度 c_l 包括了吸的磁铁磁场、距离、次数等。

试验过程的多余物人机环境影响因素的脆性联系函数为:

$$f = a_i + b_j + c_l, J \in [-1, 1], I \in [-1, 0]$$

式中: I, J 与权重系数分别为 1, 取相同重要性

等级。

2.3 多余物的检查方法

在液氧/煤油火箭发动机试验过程中,除了根据主要人机环境因素进行有效的清除,还需要早期进行检查,早期消除隐患。针对液氧/煤油火箭发动机试验过程实际情况,结合实际工作,对试验台可以采取的多余物的早期检查方法进行了总结。

2.3.1 系统检查

在新配制相关管道中进行系统改造时,系统与外界接口不用或者人员不在现场时,应快速将试验系统对接口敞口部位盖好,确保试验系统无多余物。产品安装和关键岗位严格按照规定的品种、规格、数量领取物品(螺栓、密封垫、工具等),安装完并进行清点。工作现场如有丢失,少装零件,必须立即停止工作,保持现场及时报告,直到有可靠结论方可继续工作,做好工作记录。

2.3.2 关键部件检查

对于液氧/煤油火箭发动机试验过程管道中的关键部件,应重点检查,例如密封件发生挤压变形,对接口安装不正确等,容易使密封件部位产生碎屑等多余物,应加以控制。

2.3.3 管道清洗

目前液氧/煤油发动机试验台与发动机连接管路的管径大小从 DN2 到 DN300 不等,为此提出不同的防治方法。例如针对小口径管道(小于 DN6),首先进行酸洗去除氧化物质,然后采用 T3 清洗剂清洗去除清脂,采用 1 MPa 以上氮气进行吹除,并立即封口;针对大口径管道(大于 DN6),首先进行酸洗去除氧化物质,然后采用 T3 清洗剂清洗去除油脂,并采用钢丝捆绑白绸布进行管道内壁的擦洗,保证白绸布无多余物,最后采用 1 MPa 以上氮气进行吹除并立即封口。

通过采用基于人机环境系统工程的试验过程的多余物控制,液氧/煤油发动机试验近百余次,工艺试验管道多余物得到有效控制,满足了试车要求,提升了试验水平,保证了发动机研制要求。

3 结论

通过分析产生多余物的主要环节,基于人机环境系统理论,从人机环境综合方面出发,寻找工艺管道的多余物产生的根源,并根据集对理论,定义了影响因素间的同一度、对立度、波动度,探寻了其人机环境因素间耦合关系,分析了多余物产生的关键影响因素,确定工艺管道多余物产生的根源;并针对多余物的人机环境关键因素,结合实际工作,研究液体火箭发动机试验过程的多余物控制方法,为编制多余物预防和控制标准提供了一种方法指导与参考。

参考文献:

- [1] LIU Song, YAO Bin. Adaptive robust control of programmable valves with manufacturer supplied flow mapping only[C]// The 43rd IEEE Conference on Decision and Control. [S.l.]: IEEE, 2004: 1117-1122.
- [2] LIU Kun, ZHANG Yulin. A study on versatile simulation of liquid propellant rocket engine systems transients, AIAA 2000-3771[R]. USA: AIAA, 2000.
- [3] 李进, 赵宇, 李文钊, 等. 基于权重系数的液体火箭发动机可靠性验证方案 [J]. 航空动力学报, 2011, 26(4): 931-934.
- [4] ZHANG Hui, WANG Shujuan, ZHAI Guofu. Test condition discussion of particle impact noise detection for space relay[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(1): 35-39.
- [5] 张青松, 张振鹏, 杨雪, 等. 液体火箭发动机试验台气液管路系统故障仿真及分析[J]. 航空动力学报, 2006, 21(2): 403-409.
- [6] 李琦芬. 低温推进剂管道输送系统特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [7] CUI Jinshi, ZHA Huangbing. Fusion of detection and matching based approaches for laser based multiple people tracking[C]// Proceeding of IECON. [S.l.]: Industrial Electronics Society, 2004: 2566-2572.
- [8] KNAPP J Z. Particle detection method for detection of contraction particle in seal containers: US, 5694221[P]. 2011-11-22.
- [9] 熊涛. 航天器总装多余物控制方法探讨[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(5): 277-280.
- [10] 李大南. 航天型号产品多余物及其预防和控制标准的实施检查[J]. 航天标准化, 2006, 1: 17-20.
- [11] 唐虎, 张敏贵, 张金容. 液体火箭发动机汽蚀管堵塞仿真研究[J]. 火箭推进, 2012, 38(3): 46-58.
TANG HU, ZHANG Mingui, ZHANG Jinrong. Simulation study on jamming of liquid rocket engine venturi[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2012, 38(3): 46-58.
- [12] 陈静. 复杂背景下器件多余物城乡检测若干关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [13] BOSNYATSKIJ G P, BARINUD V B, PARSADANOV G M, et al. Optimization of inter-relations of man-machine-external environment-reserve of reliability of system[J]. Gazovaya Promyshlennost, 2001 (12): 35-40.
- [14] 龙升照. 钱学森与人机环境系统工程[C]. 第八届中国-机-环境系统工程大会, 深圳: 2007: 3-10.
- [15] MA L H, YAN H Z. Comprehensive evaluation of fully mechanized mining face security based on unascertained-Information entropy model [C]// Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology. Beijing: IEEE, 2009: 268-271.
- [16] QIN YT, ZHAO LP, YAO YY. Dynamic quality characteristics modelling based on brittleness theory in complex manufacturing processes [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2011, 24 (10): 915-926.
- [17] 金鸿章, 李琦, 吴红梅. 基于脆性因子的复杂系统脆性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(6): 739-744.
- [18] 荣盘祥. 复杂系统脆性理论及其理论框架的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [19] RONG P X, JIN H Z, WEI Q. Brittleness research on complex system based on brittle link entropy[J]. Journal of Marine Science and Application, 2006, 5(2): 51-54.

(编辑: 陈红霞)