

液体火箭发动机工艺与 过程关键特性研究

朱耀龙¹, 李护林¹, 郭国长², 刘军生¹, 许艺峰¹

(1. 西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100; 2. 航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100)

摘 要: 介绍了确定液体火箭发动机制造工艺和过程关键特性的方法。运用 FMECA 法分析和研究了液体火箭二级发动机设计关键特性、工艺关键特性和过程关键特性, 识别出三类关键特性 242 项, 在此基础上总结出了液体火箭发动机工艺关键特性与过程关键特性判别准则, 即策划与甄别准则。该准则可有效推进液体火箭发动机的精细化管理, 为发动机成熟度进一步提升打下了基础。

关键词: 液体火箭发动机; 设计关键特性; 工艺关键特性; 过程关键特性; 精细化管理

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 06-0064-05

Research on key features of liquid rocket engine manufacturing technique and process

ZHU Yao-long¹, LI Hu-lin¹, GUO Guo-chang², LIU Jun-sheng¹, XU Yi-feng¹

(1. Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China;

2. Aerospace Propulsion Technology Academy, Xi'an 710100, China)

Abstract: The methods to determine the features of key manufacturing technique and process for liquid rocket engine are introduced in this paper. The key features in design, manufacturing technique and process of the second stage engine of liquid rocket are analyzed with FMECA method. Based on the identified 242 key features of three categories, the identification criteria (planning and discriminating criteria) for key manufacturing technique features and process features of liquid rocket engine were summarized, which effectively promoted the delicacy management of liquid rocket engine and laid a foundation for the enhancement of engine maturity.

Keywords: liquid rocket engine; key design feature; key technique feature; key process feature; refined management

收稿日期: 2014-07-18; 修回日期: 2014-09-25

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2010JY09)

作者简介: 朱耀龙 (1964—), 男, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机制造技术管理

0 引言

产品设计关键特性、工艺关键特性、过程关键特性是航天产品成熟度定级、数据包建设和精细化管理的基石。产品数据包主要由产品基础数据、产品功能性能数据、产品关键特性数据组成。产品关键特性数据项目由设计关键特性、工艺关键特性、过程关键特性(总称为三类关键特性)组成,是证实和评价产品质量的关键信息,也是随产品成熟度提升不断完善、细化的核心内容。

1 液体火箭发动机构成与制造工艺

液体火箭发动机一般分为主系统、副系统和增压系统3个部分。主系统的作用是提供火箭飞行时所需的推力;副系统的作用主要是保证发动机持续稳定工作;增压系统的作用是向箭体贮箱增压,保证推进剂供应。发动机的主要组合件有机架、推力室、涡轮泵和阀门等,主系统、副系统和增压系统的功能通过结构上相互连接的组合件共同实现。发动机的启动、运行、关机等工作过程通过相关阀门按时间顺序进行控制。

发动机制造涉及锻造、铸造、钣金、导管成型、机械加工、热处理、表面处理、密封件制造、理化试验、无损检测、焊接、装配、液流试验等多种工艺类别。发动机及其主要组合件因结构特点和涉及原材料种类的不同,制造工艺流程也各不相同。

发动机制造的工艺特点:

1) 毛坯件成形以钣金、锻造、铸造为主,多数零件需要进行改性热处理;2) 采用切削加工工艺以保证零、部、组件尺寸精度和形位公差满足设计要求;3) 密封件制造;4) 焊接和螺纹连接是主要装配方法;5) 液压、气密试验检测,以及X射线探伤、超声波探伤等无损检测方法广泛应用。

2 液体火箭发动机制造工艺与过程关键特性

2.1 液体火箭发动机制造工艺流程

按照液体发动机构成特点,其制造工艺流程

可分为发动机装配、组合件制造、零部件制造3大类。图1是液体火箭发动机装配工艺流程框图。

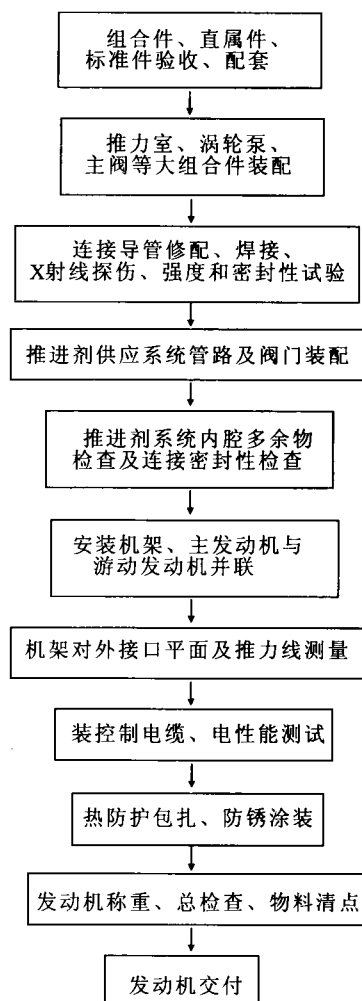


图1 发动机装配工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of engine assembling

2.2 三类关键特性

设计关键特性是指产品设计过程中对产品最终质量与可靠性有决定性影响的特性。其中包括因使用环境变化或制造工艺偏差影响产品功能和性能的设计参数,以及与产品在最终状态下不可测试的关键功能有关的设计参数等。

工艺关键特性是指产品工艺设计过程中对产品最终质量与可靠性有决定性影响的参数项目,其中包括工艺方案中影响产品功能和性能稳定性的工艺参数,以及可能引起制造过程中的不确定性或过程结果不可检测的工艺参数等。

过程关键特性是指产品在生产过程控制中对

产品最终质量与可靠性有决定性影响的参数项目,其中包括产品关键设计参数和关键工艺参数的偏差控制,以及与产品使用时不可测试的功能和性能等有关的一系列制造过程参数的总和。

2.3 工艺关键特性与过程关键特性分析

FMECA 分析是识别和确定工艺关键特性与过程关键特性的主要方法。面向产品的特性分析和“九新”(包括新技术、新材料、新工艺、新状态、新环境、新单位、新岗位、新人员、新设备)分析是辅助分析方法,根据其分析结果对 FMECA 分析得到的关键特性项目进行补充。工艺与过程关键特性分析流程框图见图 2。FMECA 法分析工艺与过程关键特性流程框图见图 3。

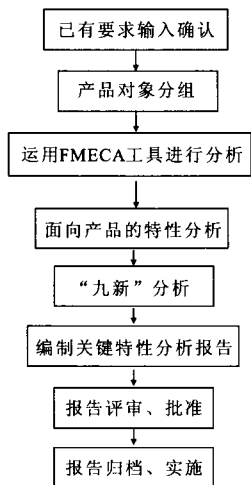


图 2 工艺关键特性与过程关键特性分析流程框图

Fig. 2 Flow chart of analysis for key technique and process features

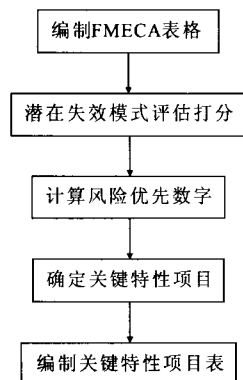


图 3 FMECA 法分析工艺关键特性与过程关键特性流程框图

Fig. 3 Flow chart of key technique and process features analysis with FMECA method

2.3.1 FMECA 法分析工艺关键特性与过程关键特性

1) 输入确认。输入确认内容:产品对象、设计关键特性和工艺关键特性输入确认。产品对象确认的主要工作是建立产品零部件明细表,保证产品范围的全面性。工艺关键特性分析是在设计关键特性的基础之上进行分析、归纳和完成的,即对设计部门提供的设计关键特性项目表进行逐项甄别和分析,以确认属于分析工作范围内的具体设计要求和内容。过程关键特性分析是在设计关键特性和工艺关键特性的基础之上进行分析、归纳和完成的。因此需要对设计关键特性项目表和工艺关键特性项目表分别进行确认和分析,以确保分析工作的完整性。

2) 产品分组。发动机有上千种零部件,按图号将每个产品逐个分析一遍工作量极大,可操作性极差。所以,在实际工作过程中,是按照结构相似、材料类同、工艺方法相同、生产过程一致等特点进行分组的,从中遴选出具有代表性的典型产品进行分析,将分析结果在同组同类产品中进行类比,由此,既有利于节约时间、抓住重点、深入分析,又可保证分析结果的有效性。

3) 运用 FMECA 工具进行分析。分析每一个可能的故障模式对所分析产品及上层产品所造成的影响,并确定其后果的危害性,然后把每一个故障模式按其影响及后果的严重程度予以分类,结合故障发生概率与危害程度以评价其风险大小的程度。

4) 编制报告。按照给定的格式编制报告,提供完整的关键特性项目表,经过评审后作为建立数据包的依据,并落实到相关工艺文件和过程记录表格中。

2.3.2 FMECA 分析内容

1) 编制 FMECA 表格。按工序编制典型产品的细节流程表,关键环节细化到工步,以 FMECA 表格的形式,对每个环节进行流程输入、流程要求、流程出错或流程不能满足要求的模式、潜在后果、潜在原因、当前控制方法等进行分析 and 填表,填写完成的表格由校对者和审核者进行补充和完善。分析工艺关键特性时,在填表的同时植入设计关键特性项目;分析过程关键特性

时, 在填表的同时植入设计关键特性和工艺关键特性项目。

2) 评估打分。统计潜在失效模式项目, 分类制定严重度 (SEV)、发生度 (OCC)、探测度 (DET) 评分表, 由评分小组对潜在后果的严重度、潜在原因的发生度、当前控制方法的探测度分别打分。

3) 计算风险优先数字。统计评分小组的打分结果, 按照公式 (1) 计算风险优先数字 RPN:

$$RPN=SEV \cdot OCC \cdot DET \quad (1)$$

4) 确定关键特性项目。将风险优先数字从大到小排列, 提出工艺关键特性项目和过程关键特性项目, 由分析团队会商确认。确定关键特性项目遵循三条原则: 一是结合风险优先数字 RPN 的实际得分, 从得分最多的前 3 项中确定关键特性。二是确定工艺关键特性时, 将风险优先数字 RPN 高的项目列入工艺关键特性, 风险优先数字 RPN 低的给出不列入工艺关键特性的明确意见, 并将设计关键特性全部列入。三是确定过程关键特性时, 除了按照风险优先数字 RPN 的高低排序选择关键特性之外, 还应将设计关键特性和工艺关键特性全部列为过程关键特性项目。

5) 编制关键特性项目表。按照规定的格式, 将关键特性项目逐项列入关键特性项目表, 明确零部件名称及图号、关键特性名称、确定为关键特性的依据和理由、控制要求及关键特性参数范围、产品及其制造过程中的实测值记录格式, 进行校对和审核。

3 准则

产品关键特性的分析与确定一般包括总体策划、系统分析、确定清单、形成记录、确认验证、持续改进 6 个过程, 通过实践, 得出了液体火箭发动机工艺关键特性与过程关键特性的分析准则。

3.1 策划准则

3.1.1 约定产品层次

发动机关键特性分析的初始约定层次为运载火箭, 中间约定层次为发动机单机及直接配套在发动机上的组合件, 最低约定层次为 FMECA 所

涉及到的部件和零件。

3.1.2 组建工作团队

关键特性分析属于典型的团队工作, 必须组建一个全面覆盖产品和技术专业的工作团队。同时, FMECA 分析方法需要以小组的形式开展工作, 因此每个专业也需要一定数量的人员加入进来。对产品及其制造过程熟悉的人员应当作为骨干力量, 主导分析工作。

3.1.3 制订工作计划

工作计划应包含具体的工作过程任务和完成节点要求。合理的分析过程是从技术体系的源头开始, 统筹考虑设计部门和工艺部门的衔接关系, 每个部门按照产品结构树自上而下开展分析工作, 通过严密的工作体系以保证分析效果。

3.1.4 明确分析要求

分析要求包括工作目标和原则要求, 分析程序, 报告格式和分析结果。分析结果应按规定的格式进行表格化管理。

3.2 关键特性甄别准则

准确甄别关键特性项目对分析结果的正确性与合理性, 以及在产品制造过程中进行数据采集和管理有重要作用。关键特性甄别应遵照 6 项准则进行。

3.2.1 设计关键特性是基础

产品设计关键特性对工艺关键特性和过程关键特性分析起重要的引导作用, 有利于识别特性的主次关系, 既能保证设计关键特性的落实, 又能有效防止出现方向性偏差。

3.2.2 区分薄弱环节与关键特性

不论采用哪种分析方法, 都能将薄弱环节与关键特性同时识别出来, 区分二者之间的差异特别重要。一般而言, 在技术文件中已经有明确要求的内容应确定为关键特性; 由于过程能力不足、技术手段缺乏、试验验证不充分造成产品特性参数不稳定, 以及后续计划补充的技术要求内容等, 应当列入薄弱环节项目进行研究和治理。

3.2.3 以产品为中心确定关键特性

在分析产品的制造过程时, 难免会发现制造设备、工艺装备、工艺配方、半成品状态、过程管理方面存在不足, 由这些问题衍生的技术参数

不能混淆到关键特性项目中，应当严格按照约定的产品层次确定关键特性。

3.2.4 准确命名关键特性项目

项目名称是准确识别和理解关键特性的灵魂，应当根据具体的特性参数对象，采用准确的概念和规范的术语合理命名，为了便于区分同一专业类别中的多个关键特性项目，可以在项目名称中适当加入产品名称及图号以便管理。常见问题是将工序名称作为特性项目名称，以工艺规范代替某具体工艺参数，以精度代替数值偏差和尺寸符合性，以强度代替力学性能指标和硬度指标，用密封性代替气密性指标、裂纹和缺陷，用多媒体记录代替拍照片等等。

3.2.5 结果优先原则

如果反映产品特性的参数能够代表产品的实际状态，并且可以通过检查得到量化结果，应优先确定为关键特性。应尽量避免在产品关键特性参数已经明确的同时，将众多的工艺参数、过程参数同时确定为关键特性，以便突出关键，简化管理。反之，应按照“四不到四到”的次序（测试不到要验收到、验收不到要工序检验到、工序

检验不到要工艺保证到、工艺保证不到要人员保障到），逐次推移确定关键特性。

3.2.6 分析结果审查通过原则

为保证关键特性设置正确、合理，并能够在产品制造过程中实施管理，最终分析结果应经过审查或评审，得到验收代表、设计、工艺、检验、管理各方人员的认可。

4 二级发动机关键特性分析

二级液体火箭发动机是火箭系统配套的典型单机产品，其工艺关键特性和过程关键特性分析研究是由工艺师系统 12 个专业小组完成的，该团队在 112 项设计关键特性的基础之上，编制了分析研究报告 89 份，分析确定了发动机三类关键特性 242 项，对每项参数提出了量化控制要求。下面以涡轮转子部件为例简要介绍关键特性的分析过程。

涡轮转子是涡轮泵的关键部件，由主轴、一级叶轮、二级叶轮等主要零件组成。锻造、热处理、无损检测、电加工、表面处理、切削加工、装配等 7 个专业小组参加了分析研究工作。

表 1 涡轮转子三类关键特性简表

Tab. 1 Key features of three categories of turbine rotor

所在工序	零部件名称	关键特性名称	关键特性类别	控制并记录的参数
5	一级叶轮	一级叶轮高温力学性能	设计	800℃力学性能 5 项
9	一级叶轮	一级叶轮超声波灵敏度校验	工艺	检查轮缘及中心部位时，标准平底孔的反射波高度
10	一级叶轮	一级叶轮第一次热处理工艺参数	工艺	热处理温度、时间、介质
14	一级叶轮	一级叶轮叶片尺寸	过程	叶厚、弦宽、边距、叶根圆尺寸
5	二级叶轮	二级叶轮高温力学性能	设计	800℃力学性能 5 项
9	二级叶轮	二级叶轮超声波灵敏度校验	工艺	检查轮缘及中心部位时，标准平底孔的反射波高度
10	二级叶轮	二级叶轮第一次热处理工艺参数	工艺	热处理温度、时间、介质
14	二级叶轮	二级叶轮叶片尺寸	过程	叶厚、弦宽、边距、叶根圆尺寸
29	一级叶轮	一级叶轮轮毂处尺寸	设计	轮毂处过度圆角、辐板厚度尺寸
39	主轴	主轴上回流孔直径	设计	主轴上回流孔直径
49	涡轮转子	涡轮转子剩余不平衡量	设计	剩余不平衡量

(下转第 73 页)

4 开闭式泵试验系统的应用

作为应用, 本系统选用一个大流量泵作为样例。该泵设计流量 $634 \text{ m}^3/\text{h}$, 设计扬程 143 m , 设计汽蚀余量 5 m 。

分别进行了 4 次设计流量 $634 \text{ m}^3/\text{h}$ 下的汽蚀试验, NPSHr 分别为 3.55, 3.59, 3.54 和 3.6, 误差值 $<1.5\%$, 大大高于开式泵试验系统汽蚀试验的精度 (原来开式循环的精度约 10%)。同时连续进行 2 个小时设计流量 $634 \text{ m}^3/\text{h}$ 下的运行试验, 储水罐温升 $<10^\circ\text{C}$ (原闭式循环大约 20 min 温升 10°C)。分别对水温变化前后水的密度 ρ , 和饱和蒸汽压力 P , 计算, 两个值相差很小, 对水力计算的影响可以忽略不计。

5 结论

开闭式泵试验系统的试验表明, 系统操作控制灵活、测试精度高、自动化程度高、试验工况扩充性强。解决了闭式试验系统温升较快的问题, 使得泵的试验精度不受温升的影响, 为测试和分析各种新型泵的特性, 不断完善设计参数提供了可靠的试验手段。

参考文献:

- [1] 关醒凡. 现代泵设计手册[M]. 北京: 宇航出版社, 2005.
- [2] 杨源泉. 阀门设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [3] 廖常初. S7-300/400 PLC 应用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

(编辑: 王建喜)

(上接第 68 页)

涡轮转子的设计关键特性有 5 项。在分析研究涡轮转子工艺关键特性和过程关键特性过程中, 细化的工序流程为 50 个, 对 50 个工序流程进行 FMECA 分析, 将 5 项设计关键特性作为相关工序的输入条件, 然后按规定程序分别就工艺关键特性和过程关键特性进行分析, 对每道工序包含的潜在故障模式分析、评估和打分。评分等级为 1~10 分, 选取置信度为 0.9, 则风险优先数字 RPN 的门限值为 100, 低于此值的潜在故障模式不作评估。经分析评估, 涡轮转子工艺关键特性在风险优先数字 $\text{RPN} \geq 432$ 情况下有 4 项; 涡轮转子过程关键特性在风险优先数字 $\text{RPN} \geq 270$ 情况下有 2 项。涡轮转子部件确定的三类关键特性有 11 项, 见表 1。

5 结论

通过研究液体火箭发动机工艺关键特性与过程关键特性分析和确认方法, 运用 FMECA 分析工具对其进行研究和归纳, 得出了液体火箭发动机工艺关键特性与过程关键特性评判准则, 即分

析工作策划和关键参数甄别工作准则, 将该准则用于液体火箭发动机制造, 可提高发动机制造工艺水平和精细化管理能力, 推进发动机制造数据建设和发动机成熟度快速提升。

参考文献:

- [1] 袁家军. 航天产品工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [2] [美] STAMATIS D H. Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution[M]. 2 ed. 陈晓彤, 姚绍华, 译. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [3] 袁家军. 航天产品质量与可靠性数据包及其应用[J]. 中国质量, 2009 (4): 8-10.
- [4] 张根保. 复杂机电产品关键质量特性提取模型[J]. 重庆大学学报, 2010 (2): 8-14.
- [5] 唐文斌. 产品关键特性量化鉴别与分解方法应用研究[J]. 计算机集成制造系统, 2011 (11): 2383-2388.
- [6] 张根保. 面向制造过程的产品多关键质量特性优化模型[J]. 计算机集成制造系统, 2010 (6): 1286-1291.
- [7] 刘志存, 邹冀华, 范玉青. 框类组件制造关键特性分析研究[J]. 宇航材料工艺, 2006 (6): 56-60

(编辑: 王建喜)