

航空发动机低温壳体设计需求分析与指标确定策略

赵 雷

(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要: 航空发动机的低温壳体在使用时需要满足相应的强度、刚度指标及质量要求。对发动机低温壳体在不同应用环境下进行定量需求分析以明确设计目标。通过 QFD 质量功能展开工具逐层分解客户需求、定位功能和物理参数, 分析功能的重要性。通过模糊数学中的最大隶属度模糊评价原理, 分析多种方案的适应性, 得出定量分析结果, 避免以往依靠经验和类比的不确定性。对优选的概念方案进行风险分析, 识别重点失效模式并采取预防措施, 获得设计关注的技术指标。实例分析结果表明: 采取多种数理分析方法和实用工具对需求分析、方案决策、风险预估 3 个方面进行的方法研究和设计实践, 有利于提高低温壳体的方案设计方法的科学性, 具有一定的参考价值。

关键词: 壳体; 结构; 概念设计; QFD; 模糊评价; 风险分析; 航空发动机

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2017.05.016

Design Requirements Analysis and Indicators Determination Strategy of Aeroengine Cryogenic Shell

ZHAO Lei

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The cryogenic shell of an aeroengine must meet the necessary strength, stiffness and the weight. Quantitative requirement analysis of aeroengine cryogenic shell was performed to clear the design goals in the different engine application environment. Customer requirements were decomposed by the six-sigma design concept in the QFD quality functions tools, functions and physical parameters were positioned, and the importance of the function was analyzed. Through the fuzzy evaluation principle of the maximum membership degree in fuzzy mathematics, the adaptability of the schemes was analyzed, and the quantitative analysis results were obtained, which avoided the uncertainty of experience and analogy. Finally, the risk analysis of the optimal conceptual scheme was carried out to identify the key failure modes and take preventive measures to obtain the technical indicators of design concern. The results of case analysis show that it is helpful to improve the scientific design of the scheme of low temperature shell using a variety of mathematical analysis methods and practical tools to carry out the method research and design practice of requirement analysis, concept decision and risk estimation.

Key words: shell; structure; project design; QFD; fuzzy evaluation; risk analysis; aeroengine

0 引言

壳体结构是航空发动机的典型构件, 在航空发动机各大部件结构中均有大量应用。低温段壳体位于航空发动机的进口处, 随着涵道比越来越大, 其壳体直径也越来越大, 质量也随之显著增加, 低温壳体既是发动机实现大涵道比的通道, 又是叶片的包容主体结构。从用户的角度来看, 既要求低温壳体厚度小来减

质, 又要求有充足的强度、刚性等可靠性指标满足使用要求。以往的设计往往多依靠经验, 对使用需求缺少全面定量的分析, 常常在加工和使用过程中产生问题, 产生很高的维护成本。在壳体的概念设计阶段, 有必要就壳体的用户需求进行详尽的分析, 转化为技术要求, 进而在结构参数、材料选择等方面做出适当的决策。用户需求往往是定性的, 很多要求甚至是模糊的, 有必要转换为设计中可以量化的指标, 参与进行

收稿日期: 2017-03-13 基金项目: 航空动力基础科研项目资助

作者简介: 赵雷(1974), 男, 高级工程师, 从事压气机结构设计工作; Email: niray@sina.com。

引用格式: 赵雷. 航空发动机低温壳体设计需求分析与指标确定策略[J]. 航空发动机, 2017, 43(5): 91-96. ZHAO Lei. Design requirements analysis and indicators determination strategy of aeroengine cryogenic shell [J]. Aeroengine, 2017, 43(5): 91-96.

方案的选择和优化,很多行业把模糊评价原理与工程实践相结合,应用质量功能展开 (Quality Function Deployment, QFD)工具,在方案优选^[1-14]和用户需求分析^[15]方面做出了一定的探索,在航空发动机方面也有一些关注机匣设计方面的研究^[13-14],但都是对后期详细设计阶段的强度分析,缺少在机匣设计初期对结构方案概念的设计方法研究。

本文运用 QFD 质量工具逐层分解用户对壳体结构的应用需求、分析需求的重要性,识别可实现需求的重要结构功能参数。在选材方面,运用模糊评价原理对钛合金、铝合金和复合材料 3 种不同选材的应用方案进行评价,最后对优选方案进行风险分析,为工程设计提供指导。这种层次识别和定量评价方法可在壳体的概念设计阶段提炼此零件族的相似构造特征和分析方法,具有一定的普遍意义。

1 基于 QFD 的需求分析

QFD 是 1 种把顾客需求转化为质量要求的工具,由此决定产品设计质量,并系统地配置到各个环节及过程要素的多层次演绎方法。作为国际著名的产品设计理论之一,得到学术界和工业界的广泛认可,并在一些著名的国际大企业取得成功的实施^[4]。

QFD 实施过程从收集客户需求开始,其需求往往是定性的、叙述性的,甚至是重复性的,因此需要归纳分类,然后将客户需求转化为技术需求,即用定量的技术性描述映射客户需求,同时反映对客户需求的符合度,而技术需求与功能需求的转化,即为了实现特定技术指标需要产品提供的功能,功能需求的再展开就可以反应功能与结构的关系,即进入具体的工程设计。在概念设计阶段,主要目标是需求分析和方案的制订,因此 QFD 的展开到功能层次已经是足够的。遵循需求 - 技术描述 - 功能描述的路径,完成 2 层映射关系分析,即可初步实现概念阶段的需求分析,以工程技术语言解析顾客的需求内涵。QFD 展开的每个阶段都有着共同的转化逻辑,也就是要分析出映射元素间的关联性、重要性和可行性。

对于低温端的壳体结构,经需求收集,主要有以下几个方面,按其重要度列于表 1,按 1~5 数字越大重要度越来越高。

将原始客户需求按 QFD 原理展开为技术需求见表 2,从表中可知,客户需求与技术需求存在一一对

应的相关矩阵,与原始客户需求重要度一起,合成了 QFD 相对重要度算法,可以将每条技术需求重要度进行量化,同时还可以从需求满足度指标判断是否得

表 1 需求收集

需求	重要度	需求	重要度
承力强度够	5	加工维护方便	2
变形小	5	需有易磨涂层	1
叶片不能打穿	4	成本低	1
质量轻	3		

表 2 QFD I 技术需求展开(部分)

客户需求	重要度	强度安全系数 1.5	进口直径变形不超过 1.5 mm	不屈曲	包容
承力强度够	5	9			
变形小	5		9	9	
叶片不能打穿	4				9
质量轻	3				
加工、维护方便	2				
需有易磨涂层	1				
成本低	1				
原始分数		45.0	45.0	45.0	36.0
相对重要度		11.0%	11.0%	11.0%	8.8%

表 3 QFD II 功能要求展开(部分)

技术要求	重要度	包容性	承载能力	损伤容限
强度安全系数 1.5	11.0%	3	9	
进口直径变形不超过 1.5 mm	11.0%		9	
不屈曲	11.0%		9	
包容	8.8%	9	1	
材料比强度、比刚度高、密度小	29.5%	3	9	
抵抗低速冲击	11.0%			9
便于无损检测	5.4%			
机体材料与易磨涂层相容	2.2%			
材料加工性好	6.8%			
材料、工艺、使用、维护成本低	3.4%			
Raw Score 原始分数		2.004878049	5.7073171	0.987805
Relative Importance 相对重要度		20.4%	58.0%	10.0%

到足够展开的技术需求以满足原始需求。

同理,对技术需求进行下一个层次的展开,即功能展开见表 3,获得功能要求和技术要求的关系矩阵,可得展开的功能要求的重要性和充分性。

将功能要求按卡诺分类见表 4。按提升产品质量设计理论中的卡诺模型,可将用户需求分为 3 类,第 1 类是基本特性:当特性不满足时,顾客很不满意,而当特性满足时认为是应该的;第 2 类是一元特性:当特性满足则顾客满意,当特性不满足则顾客不满意,为一元线性关系;第 3 类是魅力特性:当特性不满足时则顾客无所谓,当特性满足时,顾客感到超出期望。按此分析,基本特性包含:包容、承载能力、可检性、易磨性,这 4 个功能是必须满足的特性;一元特性包含:损伤容限、材料工艺性是受客观条件限制的需优先考虑的特性;魅力特性包含:材料成本和轻质,将达到客户期望的最高要求。

表 4 功能要求的卡诺分类			
卡诺特性	基本特性	1 元特性	魅力特性
包容性	√		
承载能力	√		
损伤容限		√	
可检性	√		
易磨性	√		
材料工艺性		√	
材料成本			√
轻质			√

经过功能需求分析清楚后即可进行初步结构方案设计,往往有多套结构方案可实现功能需求,为提高方案优选的可靠性,对可用模糊数学原理进行定量分析。

2 基于模糊评价的方案设计优选

方案设计中材料的选择是很重要的 1 项内容。低温端壳体材料一般为钛合金、铝合金和复合材料。哪种材料能最大程度的满足应用需求,以往凭经验的设计方法并不能提供更明确的决策信息。

模糊数学自诞生以来已广泛用于自动控制、天气预报、商品评价等多种领域中,在工程应用中并不多见^[2]。模糊数学中隶属度的概念比较适合材料的强度“较高、中等、较低”等模糊指标的描述分析,并通过模糊综合评价的最大隶属度原则对材料众多指标进行

综合评判。

常用材料为钛合金、铝合金和复合材料,取备择集合为:

{钛合金,铝合金,复合材料}

取因素集合为:

$U=\{\text{强度高,加工性好,包容性高,质量轻,成本低}\}$

表 5 评判结果					
项目	钛合金				
	好	较好	适中	较差	差
强度高	0.50	0.30	0.10	0.05	0.05
加工性好	0.40	0.20	0.25	0.10	0.05
包容性高	0.15	0.15	0.40	0.20	0.10
质量轻	0.10	0.10	0.10	0.40	0.30
成本低	0.05	0.10	0.15	0.30	0.40
项目	铝合金				
	好	较好	适中	较差	差
强度高	0.05	0.20	0.50	0.20	0.05
加工性好	0.50	0.20	0.10	0.10	0.10
包容性高	0.05	0.10	0.35	0.45	0.05
质量轻	0.55	0.30	0.05	0.05	0.05
成本低	0.30	0.20	0.30	0.10	0.10
项目	复合材料				
	好	较好	适中	较差	差
强度高	0.10	0.35	0.35	0.10	0.10
加工性好	0.10	0.10	0.20	0.50	0.10
包容性高	0.40	0.20	0.20	0.10	0.10
质量轻	0.50	0.30	0.10	0.05	0.05
成本低	0.10	0.10	0.30	0.30	0.20

评判集合为:

$V=\{\text{好,较好,适中,较差,差}\}$

由专家对备择集的 3 个因素的评价结果见表 5。考虑低温端壳体的工作环境、承载需求和使用要求,根据前面的卡诺需求分析,确定权重集为

$X=\{0.40,0.15,0.30,0.10,0.05\}$

依据模糊数学理论,将权重集和评判结果表中数据代入综合评判集计算公式,得到 3 种备择材料的综合评判集为

$$Y_1=X_0 \begin{bmatrix} 0.50 & 0.30 & 0.10 & 0.05 & 0.05 \\ 0.40 & 0.20 & 0.25 & 0.10 & 0.05 \\ 0.15 & 0.15 & 0.40 & 0.20 & 0.10 \\ 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.40 & 0.30 \\ 0.05 & 0.10 & 0.15 & 0.30 & 0.10 \end{bmatrix} = \{0.40, 0.40, 0.30, 0.10, 0.05\};$$
$$Y_2=X_0 \begin{bmatrix} 0.05 & 0.20 & 0.50 & 0.20 & 0.05 \\ 0.50 & 0.20 & 0.10 & 0.10 & 0.10 \\ 0.05 & 0.10 & 0.35 & 0.45 & 0.05 \\ 0.55 & 0.30 & 0.05 & 0.05 & 0.05 \\ 0.30 & 0.20 & 0.30 & 0.10 & 0.10 \end{bmatrix} = \{0.30, 0.40, 0.30, 0.40, 0.30\};$$
$$Y_3=X_0 \begin{bmatrix} 0.10 & 0.35 & 0.35 & 0.10 & 0.10 \\ 0.10 & 0.10 & 0.20 & 0.50 & 0.10 \\ 0.40 & 0.20 & 0.20 & 0.10 & 0.10 \\ 0.50 & 0.30 & 0.10 & 0.05 & 0.05 \\ 0.10 & 0.10 & 0.30 & 0.30 & 0.20 \end{bmatrix} = \{0.30, 0.20, 0.40, 0.40, 0.30\};$$

经归一化,得

$$Y_1=\{0.296,0.296,0.222,0.074,0.111\};$$
$$Y_2=\{0.176,0.235,0.176,0.235,0.176\};$$
$$Y_3=\{0.188,0.125,0.25,0.25,0.188\}。$$

根据当前的权重集,评判结果集表明:钛合金材料拥有最高的“好”和“较好”(均为 0.296),是首选最优材料,其次是复合材料的方案(“好”的指标为 0.188)。根据使用条件的变化,可相应改变权重集的指标分配,重新计算得到新的综合评判集来确定最优材料。

3 风险分析

在概念设计阶段应进行初步的功能 FMECA 分析以建立初始可靠性指标,并将风险向下分解,为后期详细设计打好基础。功能的潜在失效模式、影响严酷度、潜在原因及风险优先数 R_{PN} 值分别见表6、7。由表中可见 R_{PN} 值较高的有壳体变形和超重问题,是应该重点防范及早采取措施的项目。

功能的重要度、功能失效的风险度关系如图 1 所示。从图中可见,壳体的强度和刚度指标位于 A 区,是综合重要性和关键性最高的指标;质量限制位于 D 区,是关键性高的指标;控制材料特性保证壳体刚度

是重要性指标。包容性虽然故障严重度高,但综合出现概率指标位于 C 区或 D 区。

表 6 功能 FMECA 分析 1(部分)

要求	潜在失效模式	影响	严酷度
形成流路	流路与设计不符	气动参数不准	6
			6
包容叶片	无法包容	机匣破裂,叶片飞出	10
	包容,但质量过大	超重	5
无损探伤可检	无法检验	壳体是否有缺陷	6
		不可知	6
易磨性	磨损严重	磨损涂层磨损叶片	3
	没有磨损	叶尖间隙大,气动效率低	3
材料工艺性好	局部结构不能加工	重新选择材料或改结构	7
	局部结构虽可加工,但强度不能满足要求。	可靠性差	7
损伤容限高	不能有局部损伤	使用成本高	5
强度 / 刚度足	壳体变形	影响气动性能、叶尖间隙和叶片碰磨。	7
	壳体裂纹	壳体失效	10
			10

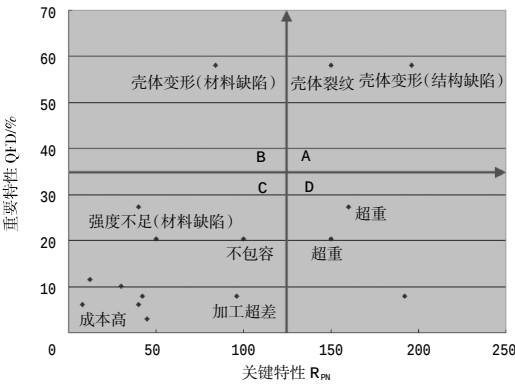


图 1 功能的关键 / 重要性

4 结论

通过 QFD 质量工具对客户需求的分析和逐层分解,可在设计的概念阶段完整地把握设计目的,梳理设计实现的步骤和措施。设计方案的决策采用模糊数学的综合评判集给出定量的结果,是 1 种不同于以往

表 7 功能 FMECA 分析 2(部分)

潜在原因	当前控制 (预防)	概率	当前控制 (检测)	检测度	R _{PN}
加工超差	加强工艺控制	4	检验	4	96
工作中变形	增加壳体刚性	8	检验壳体 易磨涂层是否偏磨	4	192
材料设计包容度不足	加强包容计算	2	包容试验	5	100
材料有制造缺陷	加强冶金控制	1	包容试验	5	50
包容结构不合理	优化结构	6	包容试验	5	150
壳体结构限制	优化结构	2	加强监视	1	12
无损探伤手段限制	改善探伤手段	2	加强监视	1	12
磨耗涂层内径小	改善叶尖间隙	5	叶尖间隙 测量	3	45
磨耗涂层内径大	改善叶尖间隙	5	叶尖间隙 测量	3	45
工艺支持不足	面向制造的设计	2	优化结构 / 换材料	3	42
材料特性不足	优化结构 / 换材料	2	优化结构 / 加强监视	3	42
材料特性不足	换材料	2	加强监视	3	30
结构缺陷	优化结构	7	补加工加 强筋	4	196
材料特性不足	优化结构 / 换材料	3	补加工加 强筋	4	84
结构缺陷	优化结构	3	优化结构	5	150
材料特性不足	优化结构 / 换材料	3	优化结构	5	150

“较好”、“还行”等定性表达的方法,这种方法适合多种因素影响下的综合指标评判,通过对因素的判断矩阵和权重因子,经模糊数学运算法则得到评判结果,在不同时期不同阶段的决策可依据不同权重因子集的变化得到相应的结果集,尤其适用于初始概念阶段的迭代过程。风险分析介入概念设计的时刻越早越可以把握潜在的失效并尽早确立应对方案。通过 FMECA 分析了功能的潜在失效模式及风险度,可以确立各功能指标的关键重要性分布,从中可以抓住关键因素,有针对性的将风险向后期具体设计阶段分解,并合理采取预防和补救措施。

通过低温端壳体的概念设计实例,用 QFD 质量工具建立了壳体的客户需求和 技术、功能需求的关系,量化分析了应用的效果。在对壳体的材料选择方案中建立了基于模糊数学的优选策略,最后通过风险分析,由重要度和风险度指标识别重要失效模式,为壳体进入工程设计提供需要重点关注的设计指标。通过对需求分析、方案决策、风险预估 3 个方面进行的方法研究和设计实践,对其他壳体如高温壳体等具有更复杂需求指标的壳体设计也具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 郝长胜,盛军坤.利用层次分析和模糊数学法优选采矿方案[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,(7):695-700.
HAO Changsheng, SHENG Junkun. Mining method choice by AHP and fuzzy mathematics[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2016,35(7):695-700. (in Chinese)
[2] 许致华,耿宏,孟彩芳.模糊数学在机械工程材料选择中的应用[J].中国民航学院学报,1998,(4):10-14.
XU Zhihua, GENG Hong, MENG Caifang. The application of fuzzy mathematics to material selection in mechanical engineering[J].Journal of Civil Aviation Institute of China,1998,(4):10-14. (in Chinese)
[3] 黄飞,孙伟华. 发动机燃烧室性能综合评估的模糊数学模型[J]. 航空发动机, 2000,26(1):43-48.
HUANG Fei, SUN WeiHua. Fuzzy mathematical model for comprehensive evaluation of engine combustion chamber performance [J]. Aero-engine,2000,26(1):43-48.(in Chinese)
[4] 赵德孜,王厚铨. 航空发动机可靠性目标值的模糊决策[J]. 航空发动机, 2002,28(4):33-37.
ZHAO Dezi, WANG Huokeng. Fuzzy decision for design values of aeroengine reliability[J]. Aeroengine,2002,28(4):33-37.(in Chinese)
[5] 赵德孜,温卫东. 基于模糊综合评判的航空发动机可靠性分配方法[J]. 航空发动机, 2005,31(1):22-27.
ZHAO Dezi, WEN Weidong. An approach to aeroengine reliability index apportionment based on fuzzy synthetic assessment [J].Aeroengine, 2005,31(1):22-27.(in Chinese)
[6] 吕震宙,刘成立,徐友良. 模糊随机可靠性综合方法在涡轮盘可靠性分析中的应用[J]. 航空发动机, 2005,31(4):17-19.
LYU Zhenzhou, LIU Chengli, XU Youliang. Application of fuzzy-random reliability method in turbine disk reliability analysis[J]. Aeroengine, 2005, 31(4): 17- 19. (in Chinese)
[7] 吴学辉,程礼,陶增元. 基于模糊评判方法的涡轮叶片蠕变疲劳寿命预测[J].航空发动机, 2004,30(3):22-25.
WU Xuehui, CHENG Li, TAO Zengyuan. Prediction of creep fatigue life of turbine blades based on fuzzy judgement [J]. Aeroengine, 2004, 30(3): 22-25. (in Chinese)
[8] 付克亚,李本威. 航空发动机维修模糊综合决策方法 [J]. 航空发动

- 机, 2007, 33(4): 55-58.
- FU Keya, LI Benwei. Fuzzy comprehensive decision method of aero-engine maintenance[J]. Aeroengine, 2007, 33(4): 55-58. (in Chinese)
- [9] 谭巍, 李冬, 樊照远, 等. 基于模糊信息熵的航空发动机性能评估和可靠性分析[J]. 航空发动机, 2011, 37(5): 45-48.
- TAN Wei, LI Dong, FAN Zhaoyuan, et al. Aeroengine performance synthetic estimation and reliability analysis based on fuzzy information entropy[J]. Aeroengine, 2011, 37(5): 45-48. (in Chinese)
- [10] 徐健. 基于 RCM 和模糊综合评判的航空发动机附件维修决策分析[J]. 航空发动机, 2015, 41(4): 98-102.
- XU Jian. Maintenance decision analysis based on RCM and fuzzy comprehensive evaluation of aeroengine accessories [J]. Aeroengine, 2015, 41(4): 98-102. (in Chinese)
- [11] 高雅娟, 陆山. 试飞阶段可靠性评估方法及试验方案设计[J]. 航空发动机, 2014, 40(3): 66-70.
- GAO Yajuan, LU Shan. Reliability assessment method and test scheme design during flight test [J]. Aeroengine, 2014, 40(3): 66-70. (in Chinese)
- [12] 胡殿印, 胡丹, 霍枫, 等. 面向方案设计阶段的发动机质量评估方法[J]. 航空发动机, 2016, 42(2): 27-33.
- HU Dianyin, HU Dan, HUO Feng, et al. Estimation method for aeroengine weight at concept design stage [J]. Aeroengine, 2016, 42(2): 27-33. (in Chinese)
- [13] 于连超, 陈伟, 关玉璞, 等. 多层机匣包容性数值仿真研究[J]. 航空发动机, 2009, 35(4): 33-35.
- YU Lianchao, CHEN Wei, GUAN Yupu, et al. Numerical simulation of multiple layer casing containment [J]. Aeroengine, 2009, 35(4): 33-35. (in Chinese)
- [14] 王海涛. 带预紧力螺栓连接的机匣刚度分析 [J]. 航空发动机, 2010, 36(3): 33-35.
- WANG Haitao. Casing stiffness analysis of pretightening force bolt joint[J]. Aeroengine, 2010, 36(3): 33-35. (in Chinese)
- [15] 张居凤, 汪玉, 方志刚. 基于 QFD/SPA 的武器装备需求分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, (09): 2016-2021.
- ZHANG Jufeng, WANG Yu, FANG Zhigang. Requirements analysis of weapons and equipment based on QFD and SPA methods [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2012, (9): 2016-2021. (in Chinese)

(编辑: 张宝玲)