

文章编号:1000-6893(2007)06-1468-14

基于关键质量特性的产品保质设计

何益海¹, 唐晓青²

(1. 北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100083)

(2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

Design for Quality Based on Product Key Quality Characteristics

He Yihai¹, Tang Xiaqing²

(1. Department of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 在明确质量特性概念基础上,提出了质量特性(QCs)的三层结构及其技术内涵,给出了关键质量特性(KQCs)概念;给出了产品关键质量特性演化模型与演化活动;结合产品设计过程,建立了基于关键质量特性的产品保质设计(DFQ)活动链与模式;基于质量屋给出了完整的关键质量特性提取方法;在产品功能和结构树基础上,应用公理化设计(AD)中功能与结构域映射理论建立了关键质量特性关联树,并在分析噪声因素和统计故障模式的基础上,基于粗糙集理论和模糊逼近于理想的排序方法(Fuzzy TOPSIS)提出了关键质量特性关联树节点的质量关联权重计算方法;提出了关键质量特性关联树节点的关联权重评定方法;将基于三维 CAD 的方案外形评估与基于虚拟样机的方案性能仿真引入保质设计质量评价活动中。最后通过案例应用验证了所提理论与方法的正确性与有效性,为产品保质设计提供了一种可行的系统化的实现方法。

关键词: 保质设计; 关键质量特性; 保质设计活动链; 关键质量特性提取; 关键质量特性关联树; 关键质量特性仿真评价

中图分类号: TB21; TH165⁺.4 **文献标识码:** A

Abstract: Firstly, quality characteristics (QCs) are defined, the three-layer model and technical connotation of quality characteristics are presented, then the concept of key quality characteristics (KQCs) is presented and its evolution process model is created, and the key activities of KQCs evolution are discussed in the context of design for quality (DFQ). The design chain and new approach of DFQ based on KQCs are given. Identification method of KQCs is given by means of the house of quality. Decomposition method of hierarchical tree of KQCs is studied based on functional and physical tree in axiomatic design (AD), and the quality relation weight assessment process of its nodes based on their history data of quality related to noise and fault analysis is discussed in detail by means of rough set and fuzzy technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS). Results of generation, simulation and evaluation implemented quality of assurance plan are studied farther. Finally, case studies of typical mechanical products are offered. Applying the principle of the method presented, the case studies discuss the DFQ mode, the procedures of identifying KQCs, building the hierarchical tree of KQCs and verifying quality assurance plan. The test results of simulation and physical prototype show the validity and promise. Therefore, it provides a new practical approach for design for quality.

Key words: design for quality (DFQ); key quality characteristics (KQCs); activity chain of DFQ; identification of KQCs; decomposition and hierarchy tree of KQCs; simulation and evaluation of KQCs

保质设计(Design For Quality, DFQ)也称“面向质量的设计”,其概念产生于 20 世纪 80 年代末,它是面向质量的产品设计方法学,其基本思

想是:将质量保证措施与设计过程有机地结合在一起,将产品质量需求和质量特征融入到产品设计过程中;在设计过程中准确地把握市场与用户对于产品的质量需求,面向产品全生命周期加以规划与部署;尽早考虑产品全生命周期的众多质量因素,对设计进行评价与优化;预测产品制造与

收稿日期:2006-11-10; 修订日期:2007-04-28
基金项目:高等学校博士点基金(20020006014)
通讯作者:何益海 E-mail: heyihai@263.net

使用过程中可能发生的质量问题并提出预防与解决措施,确保产品设计质量,缩短开发时间,降低失效成本^[1-4]。保质设计目标是发现并解决设计阶段质量问题源,确保设计目标正确、设计实现过程正确和设计方案稳健^[1,3]。

近年来,国内外学者在保质设计领域相继做了研究。M. Morup^[1]博士从产品生产者与消费者的角度提出了两类质量论,把质量分成两类(Q, q): Q代表外部质量,指顾客能感受到的质量,即最终产品所体现的特征、特性; q代表内部质量,指企业内部为实现Q而进行的一切生产活动的质量。在此基础上提出了DFQ的3个基本活动单元:制定目标、质量合成与质量评价。其中:规划单元制定各阶段的质量目标,合成单元采用各种设计方法进行两类质量的融合;评价决策单元以各阶段的质量目标为基准,对各设计方案进行分析对比,对产品的质量进行验证与择优。Julian D. Booker^[2]对DFQ的支持工具质量功能配置、失效模式影响分析、稳健设计与Six Sigma等技术进行了评述,针对这些工具,提出了支持并行产品开发的保质设计工具应用与集成框架。在国外相关研究成果的基础上,国内学者的研究^[3-4]主要集中在DFQ的集成模式、支持工具与软件支持系统的研究。

虽然现有的保质设计方法研究取得了一些成果,但其工程应用仅局限于离散的产品设计阶段和独立的工具,对如何按照质量工程思想,突出重点地实现宏观与微观相结合的系统化的设计质量保证尚缺乏理论和方法支持,对设计阶段的质量保证只是停留在离散的质量工具应用与管理层面上。

随着质量工程实践的不断深入,形成了质量保证过程中抓关键因素的理念,并提出关键特性^[5-6](Key Characteristics, KCs)和关键质量环节^[7](Critical to Quality, CTQ)概念,并分别在波动风险管理^[8](Variation Risk Management, VRM)和6西格玛设计^[7](Design for Six Sigma, DFSS)方法体系中得到应用。因此,这里作者首次将这一理念引入保质设计方法中,明确关键质量特性概念,提出了基于关键质量特性的产品保质设计活动链与模式,并对关键质量特性的提取、分解和合成等关键保质活动的技术实现进行了深入研究,以期为保质设计研究与系统的工程应用提供参考与借鉴。

1 关键质量特性

1.1 质量特性

产品质量是一组固有特性满足要求的程度^[9],它由适用性和符合性两个层次构成^[10]。适用性是指这组特性满足顾客需求的程度,符合性是指这组特性符合标准要求的程度,适用性决定了符合性,符合性使适用性得以实现,符合性只有在适用性前提下才有价值。设计阶段质量保证主要任务是提高其适用性,制造阶段质量保证的主要任务是保证符合性。

为了更加清晰描述产品质量,ISO9000标准引入质量特性(Quality Characteristics, QCs)概念,它们是有关要求的产品、过程或体系的固有特性^[9],具有多维性特点和演化性特点,多维性特点主要体现在产品质量特性集合参数种类和数量上;演化性特点主要体现在产品各级质量特性信息相互传递和反馈过程中。Juran^[11]强调:质量特性是产品质量的载体,它们可以分为设计质量类、符合性质量类、可信性等时间能力类和现场售后服务类等四类。其中设计类质量特性主要体现在产品技术指标中,它们决定着其他三类特性,其他三类质量特性是设计类质量特性在制造、使用和售后阶段的具体体现,为完善设计类质量特性提供有益的反馈,就从质量特性层来保证产品质量提供了理论依据,特别是明确了在产品阶段就应重视质量特性的重要实践意义。

在产品过程中,驱动产品设计方案产生的设计要求分为两类^[12]:功能型需求和技术型需求。功能型需求描述了待设计产品的功能和使用目的,是产品存在的根本;技术型需求以定量或定性的方法描述产品设计方案需要满足的约束条件,是评估产品设计方案质量的首要依据。在产品阶段,产品存在形式为设计方案,而技术型设计需求是设计方案质量的载体,技术需求的主体是技术指标。依据产品质量特性是产品质量载体的道理,可以认为,技术需求是产品质量特性的载体,质量特性约束着技术需求。

为了有效表征产品质量,明确其技术内涵,质量特性需要表达顾客、企业和技术人员对产品质量的多视角的认识与度量,为此,提出如图1所示产品质量特性3层结构的概念模型。如图中所示,质量特性由反映用户需求的质量特性维度(Quality Dimensionality, QD)、反映企业评价与

竞争要求的质量特性要素(Quality Essential, QE)和反映工程师设计要求的质量特性属性(Quality Attribute, QA)所构成,它们构成了产品质量特性的集合。它们从不同层次反映对产品质量的认识与要求为性能(即功能性)、可靠性、安全性、耐用性、可维护性、经济性、环保性及美感性等方面的质量需求和特征。与产品性能关联的质量特性要素是质量特性的核心,其承上启下,是联系顾客和设计人员的桥梁。为了将产品质量特性合成到产品中去,需要和产品设计工程紧密关联,从产品设计数据中构建产品质量特性,实现质量特性维度、质量特性要素到质量特性属性等不同属性的质量需求的依次转化,明确产品保质设计质量目标。

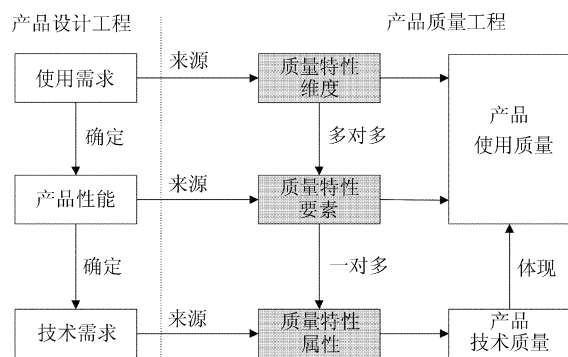


图1 产品质量特性概念模型

Fig. 1 Conceptual model of product quality characteristics

1.2 定义

为了有效地在产品阶段开展质量保证工作,需要从质量工程“关键少数,次要多数”^[1]的角度准确地把握质量保证的重点和对象,为此在质量特性的基础上,提出如下关键质量特性(Key Quality Characteristics, KQCs)的定义:KQCs是影响和决定产品质量的关键的少数质量特性,它们是产品相关性能技术指标及其参数的集合,它们来源于顾客对产品质量的需求。当然,上述需求也包括产品在使用和生产过程中的重大事故和功能进化的需求:例如“挑战者”和“哥伦比亚”号航天飞机的失事对“发现”号航天飞机安全性能的改进。KQCs形成于产品规划阶段的技术规范,在概念设计、结构与详细设计不同阶段可不断传递与细化,产生相关变粒度功能参数和结构设计参数,最后在制造和装配阶段通过检验体现出来,它们具有宏观和微观特性,宏观的质量特性依靠微观的特性参数来保证,微观质量特性起源

于宏观质量特性。关键质量特性是决定和记录产品质量的基本信息单位,是产品质量主要载体,是产品设计与开发阶段质量保证的主要对象。它们能够极大地影响产品的顾客满意度、安全性、相关规定的符合性、一致性、功能性和性能满足程度等,它们需要必要的保证手段来减少潜在的质量问题和失效成本,从而提高产品质量。

1.3 分类与演化

依据具体产品设计与开发过程,关键质量特性可以分为4级,即产品级关键质量特性(Key Quality Characteristics of Product, KQCsP):指决定和影响产品整体质量的少数关键工程技术指标集合;设计级关键质量特性(Key Quality Characteristics of Design, KQCsD):指产品部件、零件和特征级影响产品级关键质量特性的参数集合,包括功能和结构两类;制造级关键质量特性(Key Quality Characteristics of Manufacturing, KQCsM):指制造过程及工夹具参数等影响设计级关键质量特性实现的各级制造参数集合;装配级关键质量特性(Key Quality Characteristics of Assembling, KQCsA):指装配线的特征、工具、夹具和过程等影响设计级关键质量特性实现的装配参数。产品级质量特性决定设计级质量特性,设计级质量特性决定制造级和装配级质量特性,产品设计阶段质量保证的首要任务是识别出产品级关键质量特性,完成设计级关键质量特性的逐级分解,明确质量保证对象;制造级和装配级关键质量特性是生产阶段质量保证的重点,为设计级关键质量特性的有效保证提供反馈与支持。

设计阶段产品关键质量特性演化始于产品设计早期,在需求识别和产品规划阶段,系统分析产品质量特性现状,识别出影响产品质量的少数关键产品定义参数(性能要求、技术规范或重大缺陷等),即实现产品关键质量特性的提取;为了实现将所提取的产品级关键质量特性合成到产品方案中去,实现质量信息的完备演化与映射,需要在产品设计过程中,明确与产品关键质量特性关联的各级功能和结构参数,并落实到具体的组件、零件与特征上,为此,需要为实现产品关键质量特性的分解,即在产品设计过程中更加细化质量保证对象(分解特征);在分解出设计级关键质量特性的各级分解特征,形成关联树后,为了将产品级关键质量特性设计进入产品方案,首先需要对这些分解特征按照其质量风险进行排序,确定其质量保

证优先顺序,进而分别采取质量措施进行质量合成,实现产品级关键质量特性向产品方案的演化与融合,即实现产品关键质量特性的合成。

2 基于关键质量特性的设计活动链与保质设计模式

2.1 保质设计活动链

在现有系统化产品设计流程^[13]基础上,基于关键质量特性的演化分解过程,建立保质设计活动链,如图2所示。该流程与传统的系统化四阶

段设计流程相比,增加了关键质量特性提取与分解活动,该活动承上启下,是保质设计链中的关键一环,主要完成从产品质量需求中提取出具有技术涵义的产品级关键质量特性,明确产品质量保证重点,并且实现关键质量特性关联树的逐级分解与分析。需求分析阶段主要完成质量需求和对应技术指标的收集与分析,为产品级关键质量特性做好准备。在关键质量特性提取与分解活动的支持下,关键质量特性在概念设计、结构设计和详细设计阶段不断地细化与分解,通过质量措施设计进入设计方案,达到保质设计的目的。

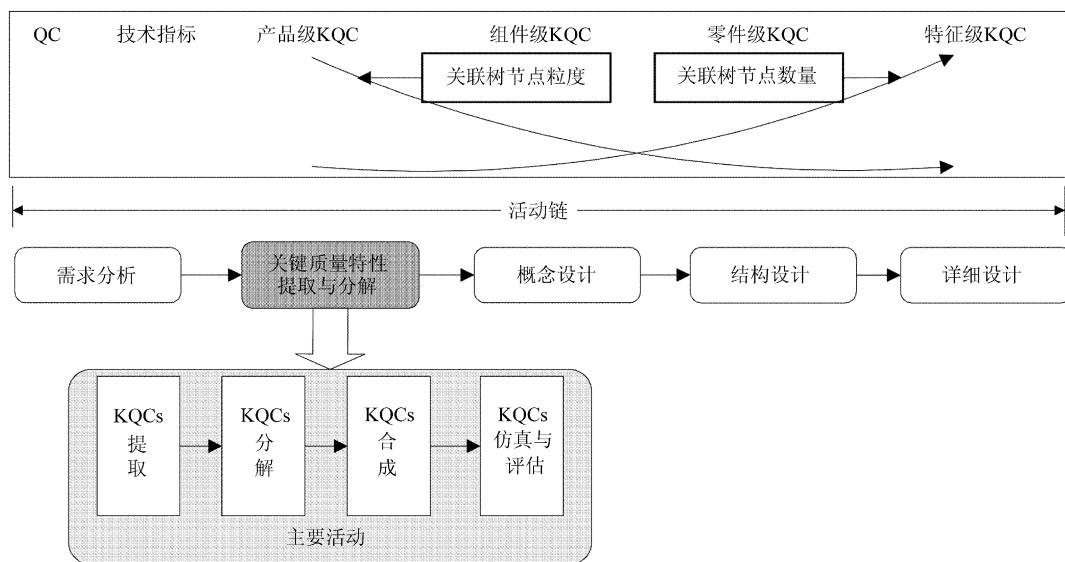


图2 基于关键质量特性的保质设计活动链

Fig.2 Activity chain of DFQ based on KQCs

2.2 保质设计模式

保质设计过程是一个系统化、模块化的过程,应使每一步的输出都满足质量需求。根据文献[1]中提出的保质设计基本活动单元应包括:制定目标、质量合成与质量评价的基本思想,在保质设计活动链基础上,提出基于关键质量特性的产品保质设计模式,详见图3所示。

产品设计与开发阶段,在基于关键质量特性的产品保质设计流程支持下,首先识别出产品级关键质量特性及其技术指标描述集合,并在产品方案设计过程中,不断建立起功能级、组件级、部件级、零件级和特征级产品关键质量特性的关联树,并根据具体产品设计阶段的不同质量保证要求,以零件节点为基础,按照质量关联权重大小对关联树相应粒度层给予关联节点重要度的排序,对其中需要重点保证的重要参数给出相应的保证

措施,并以质量保证计划的方式给出。

2.3 优点

如图2和图3可以看出,基于关键质量特性的产品保质设计具有如下显著优点:①有利于明确保质设计的重点和主线;②有利于进行常规设计和保质设计流程的融合;③有利于设计人员在产品设计中系统地开展应用。

3 关键质量特性提取

关键质量特性的提取在产品开始阶段,通过实例化产品质量特性三层结构的相关属性,然后构建质量屋(House of Quality),并基于质量屋决策模型,确定它们的重要度与目标值的改进方向,从质量特性属性层中提取最为关键的技术指标作为产品级关键质量特性。对于由重大质量事故引发的关键质量特性已明确的产品改进性修

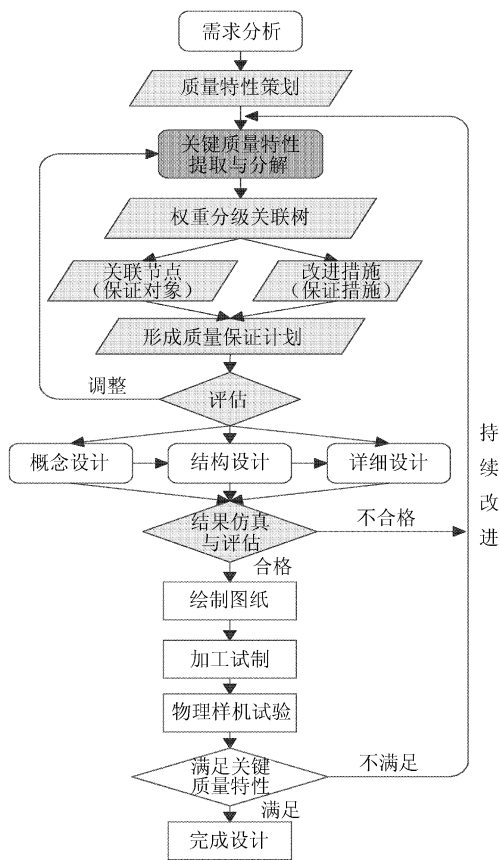


图 3 基于关键质量特性的保质设计模式

Fig. 3 DFQ mode based on KQCs

补设计(像“发现”号航天飞机安全性修补设计), 可以跳过此提取过程。

提取过程如图 4 右下所示:①以质量特性多维框架^[10]为核心从用户需求中可确定:“性能”、“可靠性”、“维护性”、“安全性”、“适应性”、“经济

性”、“环保性”和“认同性”等质量维度所对应的质量要素,明确产品质量现状和存在问题为质量有序改进和保证指明方向;②在质量要素结果集的基础上,对质量要素进行整理、归类、去除冗余和赋予权重等操作,按照 Kano 模型^[14]把质量要素按照顾客满意度和用户需求实现率分为 3 类:基本型、期望型和兴奋型,基于 Kano 模型调查问卷^[14]方法收集用户和市场对质量要素的关注程度,按照 Kano 评估表^[14]统计调查结果,根据结果确定质量要素的顾客满意系数(Customer Coefficient of Satisfaction)CS_S和顾客不满意系数(Customer Coefficient of Dissatisfaction)CS_D,基于它们计算出质量要素权重: $W_{QE} = ||CS_S| - |CS_D||$;③针对每项质量要素,利用头脑风暴法、专家咨询和检索产品设计案例库等手段,提出对应的质量属性,并确定其技术属性(度量单位,当前值,最大值,最小值)。为了更有针对性进行从质量特性中识别关键质量特性,需要进一步确定质量属性的技术竞争性系数、技术难度系数、投资回报率系数、固定费用系数、可变费用系数和改进时间系数等决策系数。在产品开发初始阶段,精确地给出各项质量属性的决策系数不太现实,也没必要,因为只要能给出相对大小即可,以便按序选取备用。上述系数均由管理人员和设计人员根据设计经验在参考以往设计案例基础上评定,本文采用专家组定性评估的办法,按照:很大(0.9)、大(0.7)、一般(0.5)、小(0.3)和很小(0.1)等五级分别给出,最后量化计算其平均值;④根据多属性

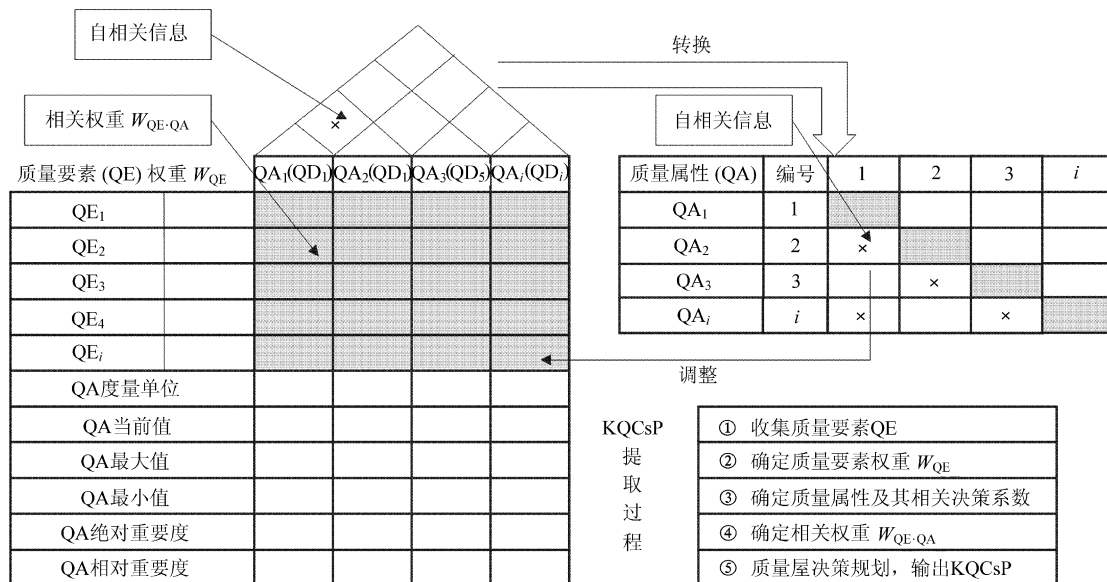


图 4 产品级关键质量特性提取

Fig. 4 Identification of KQCsP

效用分析理论中启发式概率分析方法^[15]确定质量要素与质量属性间的初始相关权重系数 $W_{QE \cdot QA}$, 然后再利用设计结构矩阵 (Design Structure Matrix, DSM) 在分析质量属性间自相关耦合信息的基础上调整相关权重系数^[15]; ⑤考虑到质量属性中存在离散和连续型取值, 为了给出质量保证目标值, 采用支持离散和连续型质量属性的质量屋优化模型^[16]充分利用质量屋信息, 进行优化决策, 输出质量属性的重要度和目标值, 进而输出产品级关键质量特性, 明确设计阶段质量保证重点。

4 关键质量特性关联树

为了实现设计级关键质量特性的有序分解, 形成包括组件、部件、零件和特征的分级结构, 建立产品级关键质量特性与产品结构树之间的映像关系。考虑一个产品的结构树太庞大, 由产品级关键质量特性直接向产品结构树映像分解工作量将太大, 易造成信息丢失, 并不便于在概念设计阶段对功能方案进行质量保证。为此, 在公理化设计^[17]功能域到结构域映像理论基础上, 引入产品功能树作为中介, 帮助产品级关键质量特性向结

构树完备映像与分解 (见图 5), 采用关联树的形式进行 KQCs 的分解、权重计算和排序结果。

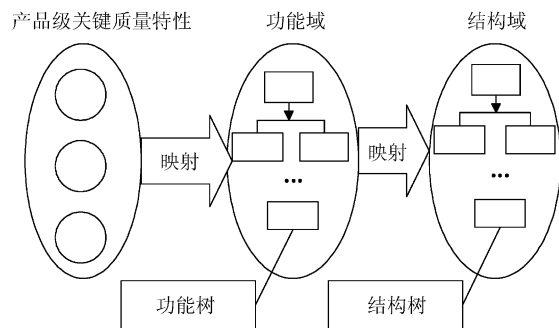


图 5 产品级关键质量特性分解过程

Fig. 5 Decomposition process of KQCsP

关联树建立与节点权重计算过程如图 6 所示, 主要包括如下 5 阶段:

(1) 关联树建立

① 功能分解 参见图 6, 当确定与产品级关键质量特性相关的产品一级功能模块之后, 采用基于功能方法树的设计对象分析方法^[18]对产品一级功能模块逐一进行分解, 形成关键质量特性的功能结构树, 完成关键质量特性的功能分解。

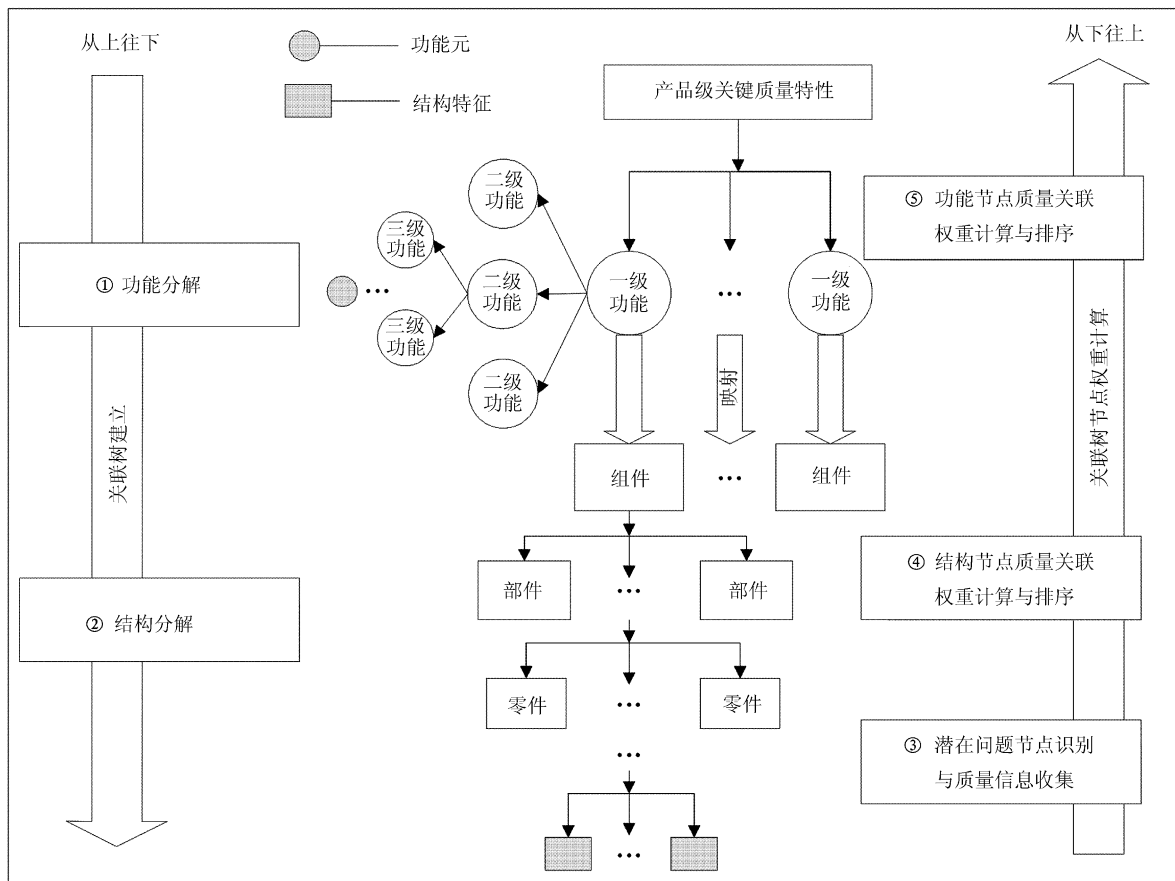


图 6 KQCs 关联树建立与分析

Fig. 6 Establishment and analysis of KQCs relational tree

② 结构分解 在产品设计方案和功能分解的基础上,由设计人员(专家)完成产品一级功能模块向对应结构组件组的映像,然后根据产品组件编码,从产品数据库中检索出对应的组件图和技术文件,实现关键质量特性的结构分解。

(2) 关联树节点权重计算

③ 潜在问题节点与质量信息收集 在关键质量特性关联树基础上,建立起 KQCs 关联树的组件、部件和零件节点的功能与结构映像设计矩阵,根据公理化设计理论判别设计方案优劣的两条公理^[17-18](独立公理和信息量最小公理),识别出可能存在隐患的结构节点及功能节点。为了进一步确定这些节点的质量保证优先级,考虑到结构节点的信息收集比较容易,需要从下到上依次计算出零件、部件和组件结构节点和对应功能节点的质量关联权重(Quality Relation Weight, QRW) W_{QR} ,为此首先需要收集结构节点两方面质量信息:噪声信息和失效信息。噪声信息是引发质量问题的驱动因素,主要包括以下3种类型^[18]:(A)批次差异和制造差异,制造过程的波动与变化直接影响产品单元的符合性质量,造成它与设计规范不一致,可以通过分析尺寸链得到;(B)外部和环境,产品使用条件相关的不可控噪声因素;(C)消耗和磨损,随着使用时间的延长,零部件的性能和尺寸可能发生消耗和磨损,造成产品性能的退化。失效信息是质量问题的主要表现形式^[19],包括已经发生的和潜在的两大类,潜在失效模式是在已经发生的故障基础上分析出的。对上述质量信息进行必要的试验^[18]、分析^[20]和统计分析^[19],挖掘出预测质量关联权重有用的

噪声敏感度、故障模式种类、发生次数和影响分析等信息。

④ 结构节点质量关联权重分析 依照稳健性设计^[17-18]思想和失效模式影响分析^[19-20](Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)思想,在综合考虑到稳健性设计信息和失效故障信息二者存在不精确性和差异性的基础上,提出如图7所示的节点质量关联权重评价指标体系。为了实现对关联结构树中节点质量关联权重的正确计算和排序,按照关联树从下往上的顺序,应用粗糙集^[21]知识挖掘节点质量关联权重的决策规则,然后根据多属性决策方法模糊逼近于理想的排序方法^[22](Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, Fuzzy TOPSIS)对节点质量关联权重从宏观指标和微观特征两方面对节点质量关联权重给予系统全面的预测性评价和排序。计算流程如图8所示,详细说明见文献^[23]。

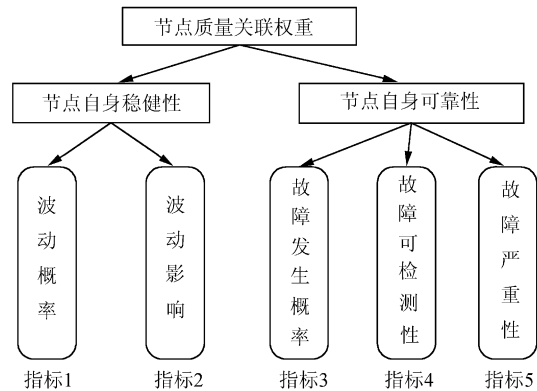


图7 节点质量关联权重评价指标体系

Fig. 7 Quality relation weight evaluation index of nodes

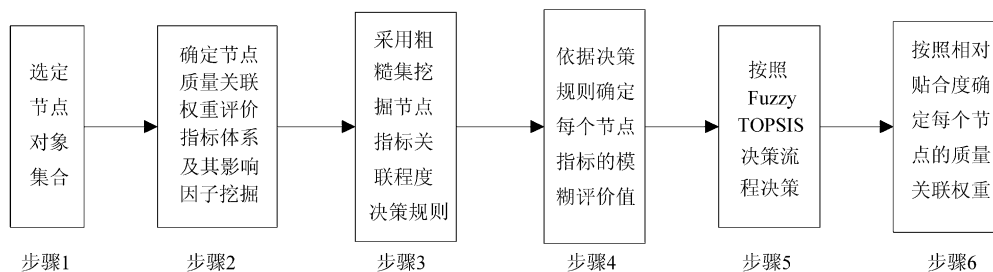


图8 结构节点质量关联权重计算与排序流程

Fig. 8 Quality relation weight computing and sorting process of structural parts nodes

⑤ 功能节点质量关联权重分析 为了能够对设计方案中存在问题的功能模块进行改进,进行局部结构形式调整,需要在关键质量特性结构树的基础上,可定性给出对应关键质量特性功能树相关节点的质量风险系数,依据公理化设计功

能域和结构域映像矩阵,采取矩阵相乘方式^[19]确定对应功能节点的质量信息,然后按照结构节点质量风险系数计算的相同方法给出对应的质量关联权重。

5 质量保证措施与计划

5.1 形成与实施

在保质设计过程中,为了便于在产品概念设计、结构设计和详细设计阶段逐级针对关键质量特性关联树的指示信息对设计方案采取相应措施,并实现质量合成,需要根据分级排序的 KQCs 潜在质量风险关联树来制定相应保证措施。

质量保证措施与计划形成和实施流程简要描述如下(详细说明见文献[23]):按照功能到结构顺序,采取对质量关联权重 W_{QR} 大的节点优先解决的方法,可依次在 KQCs 权重分级关联树节点中逐步明确质量保证对象即权重节点;然后根据保证对象即分级节点的编号和目的,从产品数据库和质量信息数据中检索出历史质量改进措施信息,特别是工程分析数据、不可控噪声信息^[18]、质量故障的原因信息和故障处理措施信息;在此基础上,设计人员在质量计划辅助工具和设计辅助分析工具的支持下,以设计经验和知识为基础,对已有历史措施信息进行修改与完善,生成相应的质量措施集合;然后利用故障树分析方法^[20],针对节点潜在的质量风险(顶事件),求出质量措施集合(底事件)的最小割集,得到对应最优预防改进措施集合,并将它们分解到具体设计阶段,形成针对此项任务的质量保证计划方案;生成初步质量保证计划方案后,再对该质量计划的正确性和有效性进行评估。

5.2 结果仿真与评估

仿真包括结构外形改变合理性仿真及性能改进有效性仿真,防止质量问题遗留到制造过程和物理样机中。采用三维 CAD 软件建立起设计方案的几何模型,并对有尺寸和外形改动的零部件用不同颜色标出,便于设计工程师进行合理性、可制造性和可装配性等检验。采用虚拟样机技术^[24](Virtual Prototyping)对质量计划的实施效果给予预防性仿真验证,为产品保质设计方法提供必要的反馈,对质量合成效果给予验证,实现持续改进(如图 3 所示)。

质量保证计划实施结果仿真与评估流程简要描述如下^[23]:按照关键质量特性要求和质量保证计划进行对应的外形仿真评价与性能仿真试验,输出仿真试验结果和过程数据;提交由设计专家和质量专家进行有效性评估,分别对仿真试验方案、虚拟样机模型和质量保证计划进行完善,直到通过评估。

6 应用分析

为了验证文章所提出的基于关键质量特性的产品保质设计方法的有效性和正确性,首先从保质设计模式、关键质量特性提取与分解、质量措施生成与仿真三方面结合某大型国家工业研究院系列产品展开应用研究。应用的模式和实例分析主要步骤如图 9 所示进行。结果表明:保质设计模式能够很好地和产品设计流程融合,互相补充;关

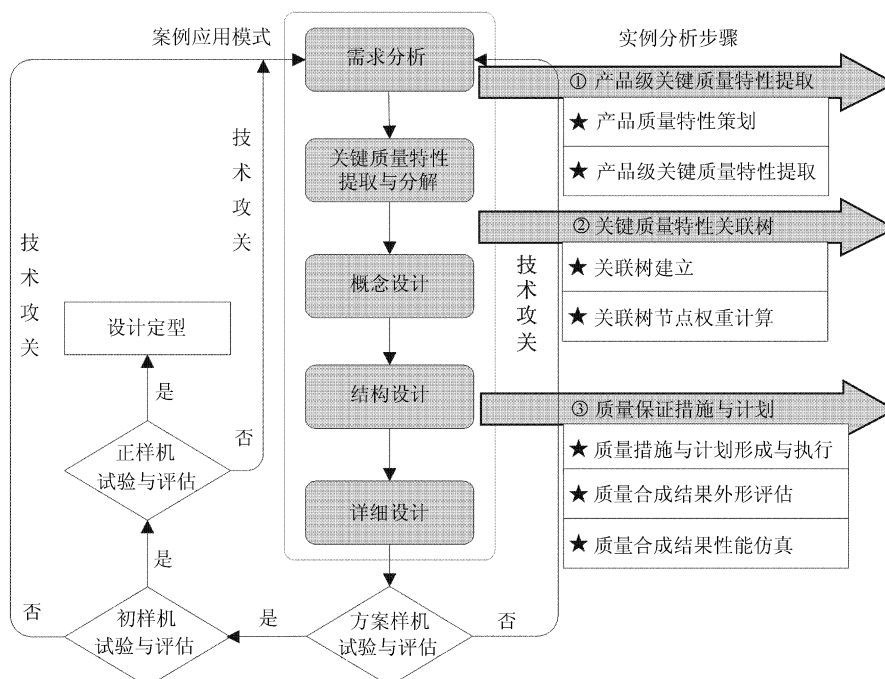


图 9 产品案例的应用模式和实例分析主要步骤

Fig. 9 DFQ mode application and example studies

键质量特性提取与分解方法能够正确地保质设计提供质量保证对象与保质主线;质量措施生成与仿真能够有效地为保质设计提供质量合成和评价手段。从而能够较好地提高产品设计方案质量,达到一次通过物理样机试验的目标。

下面再分别以某型号冰箱为例着重说明关键质量特性的提取过程(案例 1,原始数据参考文献[25]),以某型号车身改型设计为例着重说明关键质量特性的分解与质量措施生成(案例 2,原始数据参考文献[26-28])。

6.1 案例 1——产品级关键质量特性提取

某厂在改进某产品冰箱时,确定了以下质量维度(QD):①可靠性(QD₁);②经济性(QD₂);③环保性(QD₃)。根据上述质量维度,确定以下质量要素(QE):①制冷速度快(QE₁);②耗电量低(QE₂);③容积大(QE₃);④价格低(QE₄)。根据质量要素确定了以下质量属性(QA):①冷冻能力(QA₁);②耗电量(QA₂);③噪音等级(QA₃);④冷却方式(QA₄);⑤价格(QA₅)。

按照 Kano 评估表^[14]对质量要素权重进行处理和统计,结果如图 10 质量屋所示;在确定各项质量属性的基础上,对其各项主要决策系数给予确定,结果如表 1 和表 2 所示。此外,还需要设计人员在上述数据基础上,以质量维度为桥梁,在考虑质量属性自相关影响条件下确定质量要素和质量属性之间的相关权重,确定结果见图 10 质量屋。

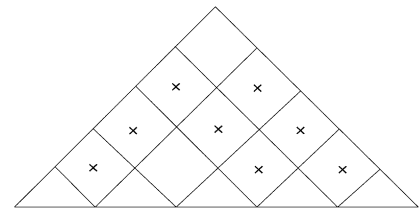
表 1 质量属性决策系数

| Table 1 Decision coefficients of quality attributes | | | | | |
|-----------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| 质量属性编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 技术竞争系数 | 0.90 | 0.80 | 0.80 | 0.95 | 0.95 |
| 技术难度系数 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.9 | 0.9 |
| 投资回报率 | 0.9 | 0.8 | 0.7 | 0.9 | 0.9 |
| 固定费用系数/万元 | 5 | 4 | 3 | — | 5 |
| 可变费用系数/万元 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | — | 1.0 |
| 改进时间系数/月 | 1.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 |

表 2 离散质量属性 QA₄ 各离散量以及对应费用

| Table 2 Values and costs of discrete QA ₄ | | | |
|------------------------------------------------------|-------|-------|--------|
| 质量属性离散值 | 1(直冷) | 2(风冷) | 3(风直冷) |
| 对应费用/万元 | 1.3 | 1.4 | 1.5 |

在考虑质量属性自相关性的基础上确定质量的绝对权重和相对权重。完整质量屋分析最终结果要素与质量属性间的相关权重,并计算出质量属性如图 10 所示。



| 质量属性 QA | | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| 质量要素 QE | QA ₁ | QA ₂ | QA ₃ | QA ₄ | QA ₅ | 权重 |
| QE ₁ | 0.29 | 0.9 | -0.6 | -0.2 | 0.6 | 0.8 |
| QE ₂ | 0.18 | -0.6 | -0.9 | -0.1 | 0.2 | 0 |
| QE ₃ | 0.13 | -0.6 | 0.8 | 0.1 | 0 | 0.4 |
| QE ₄ | 0.31 | -0.5 | 0.3 | -0.5 | 0 | -0.9 |
| 质量属性度量单位 | kg/24h | kW · h/24h | DB | 等级 | 100 ¥ | |
| 质量属性当前值 | 10 | 0.63 | 48 | 2 | 15 | |
| 质量属性最小值 | 9 | 0.5 | 42 | 1 | 14 | |
| 质量属性最大值 | 15 | 0.8 | 52 | 3 | 20 | |
| 质量属性绝对重要度 | -0.080 | -0.139 | -0.218 | 0.210 | 0.005 | |
| 质量属性相对重要度 | 0.123 | 0.213 | 0.334 | 0.322 | 0.008 | |

图 10 质量保证的质量屋

Fig. 10 House of quality of quality assurance

在总时间约束 2 个月,总成本约束 10 万元的前提下,利用质量屋中的信息,采用支持离散和连续型质量属性的质量屋优化模型^[16]建立产品级关键质量特性提取决策模型,并利用 Lindo^[29]软件辅助求解,其结果如表 3 所示。

表 3 质量属性规划的最优质量保证目标

Table 3 Programming results of house of quality

| 质量属性编号 | QA ₁ | QA ₂ | QA ₃ | QA ₄ | QA ₅ |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 质量属性改变量 | 0 | -0.09 | -0.1 | 1 | 0 |
| 布尔变量 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 质量属性特征目标值 | 10 | 0.57 | 43.2 | 3 | 1 500 |

由表 3 规划结果布尔变量为 1 的 3 项可知,质量属性 QA₂, QA₃ 应该减少,而 QA₄ 应该增加,其他保持不变,根据市场部门统计预测结果表明,这种质量保证方案能够在一定时间和成本的约束下,使顾客满意度有 58% 的明显提高(即指对产品的质量特性的改进,能够极大地提高顾客满意度,该数字是基于质量屋决策模型的输出结果而定的)。

最后确定冰箱产品级关键质量特性如表 4 所示。这样就为开发阶段质量保明确目标,开发阶段质量保证重点是保证噪声、耗电量和冷却方式等技术指标达到目标值,并将这些关键质量特性设计进入冰箱改进方案。

表 4 产品候选产品级关键质量特性

Table 4 Candidates of KQCsP

| 质量特性编号 | 质量属性编号 | 相对权重 | 当前值 | 目标值 |
|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|
| QC ₁ | QA ₃ | 0.334 | 48.00 | 43.20 |
| QC ₃ | QA ₄ | 0.322 | 2.00 | 3.00 |
| QC ₂ | QA ₂ | 0.213 | 0.63 | 0.57 |

6.2 案例 2——关键质量特性关联树

某型号轿车改型设计过程中,按照关键质量特性提取方法,确定了车身声振特性(Noise Vibration Harshness, NVH)为其关键质量特性,其属性详细说明如表 5 所示。

表 5 车身 NVH 属性

Table 5 Car body NVH

| 指标名称 | 计算公式 | 当前值 | 目标值 |
|---------------------|------------------------------|-----|-----|
| 触觉指标 R _T | R _T =8.19-4.34lgv | 7.0 | 8.0 |
| 听觉指标 R _S | R _S =13.6-0175SPL | 7.5 | 8.0 |

表 5 中 v 为测点速度,单位为 mm/s;SPL 为测点的声压级,单位为 dB。根据其计算公式反算得知,在车身改型中要求将测点 v 从 1.9 降低到 1.1;将测点 SPL 从 34.9 降低到 32.0。

(1) 关联树建立

针对 KQCs 提取结果(表 5),按照关键质量特性分解方法(KQCs→功能树→结构树),首先建立该车的功能模型,建立影响声振特性的一级功能集合,实现关键质量特性到功能的分解;然后建立一级功能模块对应的结构组件,利用功能树方法和产品结构编码对功能模块和结构组件进行逐一分解,直至分解到底层功能元和结构特征元,为此可建立该车完整的声振特性关联树,其构成如图 11 所示。

(2) 关联树节点权重计算

按照公理化设计方法分别建立起该车身 NVH 关联树上的组件、部件和零件节点层功能和结构映射设计矩阵,以 FR1 功能节点和 DP1 结构节点为例,该矩阵为

$$\begin{Bmatrix} \text{FR1.1 支撑承载} \\ \text{FR1.2 覆盖遮蔽} \\ \text{FR1.3 乘坐} \\ \text{FR1.4 调温通风} \\ \text{FR1.5 人员进出} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{DP1.1 车体} \\ \text{DP1.2 蒙皮} \\ \text{DP1.3 座椅} \\ \text{DP1.4 空调} \\ \text{DP1.5 车门} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

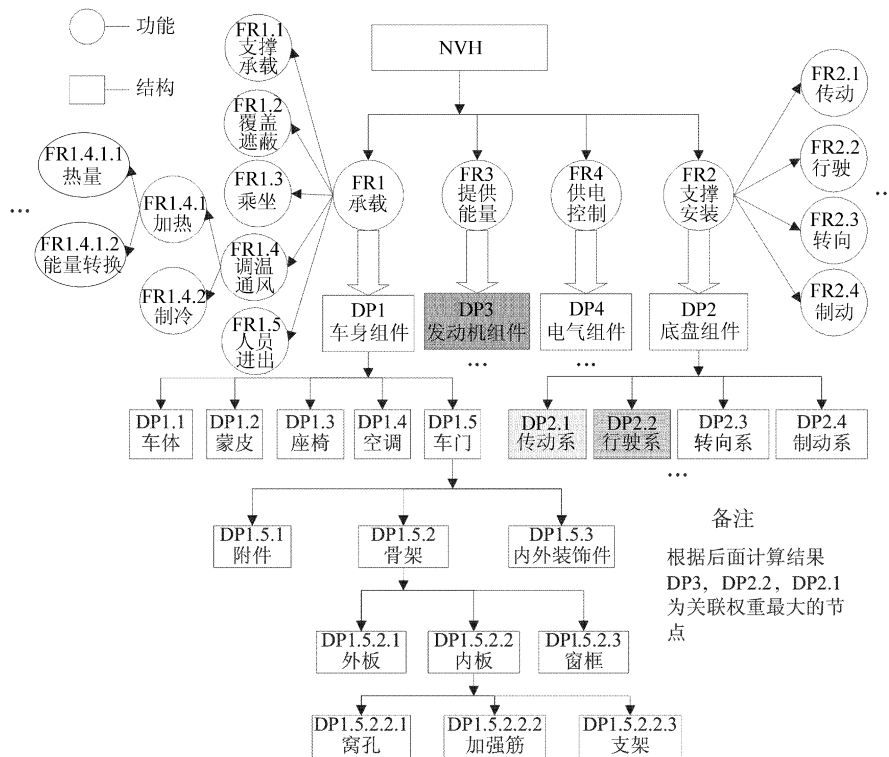


图 11 车身 NVH 关联树

Fig. 11 Relational tree of car body NVH

按照独立公理和信息量最小公理对每个设计矩阵进行分析,找出各潜在问题功能节点和结构节点,在确定潜在问题节点的基础上,收集结构类节点的不可控噪声信息(表 6)和相关失效信息(表 7),并按照质量关联权重计算方法分别计算出零件节点、部件节点和组件节点的权重评价指标体系影响因子(表 8)及节点质量关联权重数值($DP3(W = 0.786) > DP2.2(W = 0.578) > DP2.1(W = 0.435)$),位置见图 11);然后根据设计矩阵和结构节点噪声信息与故障信息映射矩阵,建立起对应功能节点的噪声信息和故障信息的对应关系,确定功能节点质量信息,按照结构节点同样方法计算出不同功能节点的质量关联权重。

表 6 节点噪声信息

Table 6 Noise factors of nodes

| 节点编号 | 类别 | 参数 |
|------|------|---------------------|
| DP1 | 制造 | 车体强度、车体硬度、蒙皮厚度、车门缝隙 |
| | 使用环境 | 路面、负载、天气 |
| | 磨损 | 密封条磨损、车门铰链磨损 |
| DP2 | 制造 | 轴距、轮距、减振器特性、车轮悬挂尺寸 |
| | 使用环境 | 路面、负载、天气 |
| | 磨损 | 弹簧磨损、轮胎磨损 |
| DP3 | 制造 | 活塞顶直径、连杆长度、曲轴旋转半径 |
| | 使用环境 | 路面、负载、天气、润滑油性能 |
| | 磨损 | 曲轴腐蚀、气缸磨损、干摩擦 |
| ... | | |

表 7 节点故障信息

Table 7 Failure modes of nodes

| 节点编号 | 故障模式 | 故障比/% | 最高严重度等级 |
|------|----------------------------------------------------------------|-------|---------|
| DP1 | 发动机盖开关电路不良、车门开关电路不良、密封圈松动、空调电机颤动 | 1 | III |
| DP2 | 轮盘损伤、轮毂损伤、轮胎异常磨损、离合器发抖、传动轴振动、驱动桥异响、转向盘抖动、车架变形、悬架弹性件失效、减振器失效 | 2 | IV |
| DP3 | 活塞碰缸盖、活塞漏气、火花塞突爆、进气门弹簧折断、气门挺杆敲击、起动机爪松动、曲轴齿轮破损、曲轴折断、连杆弯曲、飞轮固定不良 | 5 | VI |
| ... | | | |

表 8 NVH 关联树潜在问题节点质量关联权重指标体系影响因子

Table 8 Impact factors of evaluation indexes

| 指标编号 | 指标 1 | 指标 2 | 指标 3 | 指标 4 | 指标 5 |
|------|------|------|--------|--------|-------|
| 指标名称 | 波动概率 | 波动影响 | 故障发生概率 | 故障可检测性 | 故障严重性 |
| 影响因子 | 0.15 | 0.25 | 0.15 | 0.15 | 0.30 |

6.3 案例 2——质量保证措施与计划

(1) 形成与执行

在分级排序 NVH 关联树的基础上,需要依次对质量关联权重大的节点按照质量保证计划生成方法提出明确的保证措施,并利用故障树分析质量措施集合(如图 12 所示),形成质量保证计划,部分结果如表 9 所示。

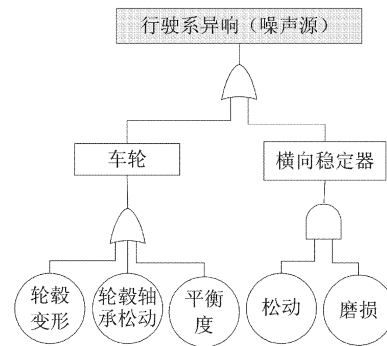


图 12 故障树分析质量措施

Fig. 12 Application of fault tree analysis to quality measures

表 9 质量保证计划

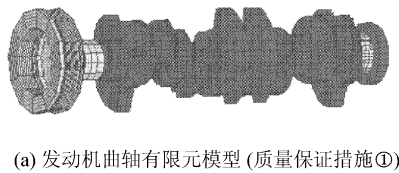
Table 9 Proposed quality plan of body NVH

| 措施编号 | 措施 | 对象编号 | 设计阶段 |
|------|-----------------|-------|-----------|
| ① | 进行发动机结构噪声仿真分析 | FR3 | 概念设计、结构设计 |
| ② | 进行发动机表面辐射噪声屏蔽分析 | FR3 | 概念设计、结构设计 |
| ③ | 优化悬架系统橡胶元件 | DP2.1 | 结构设计 |
| ④ | 优化发动机支承元件 | DP3 | 结构设计 |
| ⑤ | 优化发动机油底壳 | DP3 | 结构设计 |
| ⑥ | 更换发动机罩材料 | DP1.2 | 详细设计 |
| ⑦ | 车顶增加两根车顶横梁 | DP1.1 | 结构设计 |
| ⑧ | 车门增加密封条 | DP1.5 | 详细设计 |

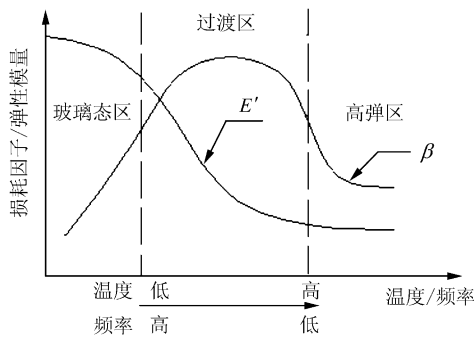
在该轿车方案样车开发过程中,按照质量保证计划要求,分别在概念设计、结构设计和详细设计

计阶段给予落实,形成新的方案样车方案,实现质量合成。

措施执行示例:针对表9中质量措施①,在概念设计阶段以HYPERMESH软件建立发动机的整机有限元模型,包括缸体、缸盖、梯形框架、油底壳和曲轴部分。然后通过发动机的整机模态分析,验证有限元模型的正确性,并且为以后的结构修改提供有效的依据,达到减振降噪目的;针对质量措施②,利用一维弹性波理论和板壳振动理论建立发动机表面噪声局部屏蔽模型,为后续噪声屏蔽结构的设计提供理论依据。上述执行过程数据如图13所示。



(a) 发动机曲轴有限元模型(质量保证措施①)



(b) 屏蔽阻尼材料的动态力学特性(质量保证措施②)

图13 措施执行过程数据

Fig. 13 Implementation data of quality measures

(2) 质量合成结果仿真

利用ProE Wildfire建立起该车的三维模型,利用该软件自带分析工具对方案样车外形进行可视化评价,并用不同颜色标识出应改进的零部件(如图14所示),结合NVH关联树和对应质量保证措施,对改进后的几何外形正确性和有效性评估,使NVH特性的保证措施符合产品开发总体技术要求。

在生产物理样车之前,通过汽车虚拟样机技术^[30]和汽车噪声预测方法^[20]的支持,利用MSC ADAMS/Car^[30]软件,建立起面向NVH特性的仿真试验的车身虚拟样机(如图15(a)所示),按照该车身声振设计方法,计算测点的振动速度 v 和声压级SPL,试验过程数据如图15(b)和(c)所示。

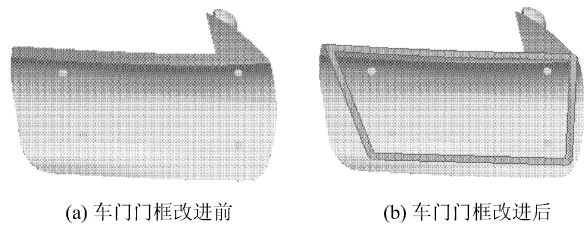


图14 外形仿真与评估

Fig. 14 Appearance simulation and evaluation

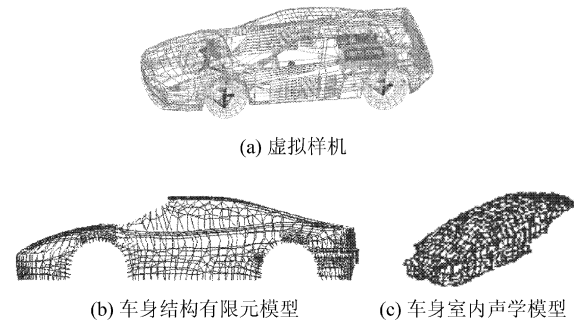


图15 车身NVH虚拟样机仿真

Fig. 15 Simulation of body NVH based on virtual prototype

仿真结果表明,设计方案的样车的NVH特性达到了质量保证目标,证明了上述质量保证对象识别和质量保证措施生成方法的有效性和正确性。

7 结论

面向保质设计提出了产品关键质量特性概念,并给出对其提取和分解的方法,得出以下结论:

(1) 质量特性和关键质量特性的提出,有利于建立保质设计链,为产品设计过程提供了质量驱动因子,理清了产品保质设计过程的重点对象和主线,便于从宏观及微观上物化产品设计质量载体,对于深入开展保质设计及质量工程研究具有重要意义。

(2) 关键质量特性关联树的建立有利于推进产品设计质量的持续稳定的改进和功能扩展,是有效地开展设计阶段质量保证的基本框架,为开发或研制新产品提供了质量保证的可能途径。

(3) 质量保证计划执行结果中仿真思想的提出,有利于促进质量工程向设计工程的融合,使产品设计质量保证工作的成效可通过设计方案体现出来,并使质量保证工作能够很好地和设计活动集成。

提出的方法对于非新产品设计质量保证十分有效,而对于创新产品的设计有一定的局限性,因

为对于创新产品设计过程,支持该方法的基础决策信息的产品数据和质量数据不完善和不成熟,缺乏前期产品质量数据的积累与支持,将会影响当前产品关键质量特性的提取与分解,继而影响质量保证对象和质量保证措施的正确性。因此,下一步工作需要在不断完善该方法的基础上研究针对创新产品设计的保质设计方法。

参 考 文 献

- [1] Morup M. A new design for quality paradigm [J]. *Journal of Engineering Design*, 1992, 3(1): 63-80.
- [2] Booker J D. Industrial practice in design for quality[J]. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 2003, 20(3), 288-303.
- [3] 吴昭同. 保质设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
Wu Zhaotong. Design for quality [M]. Beijing: China Machine Press, 2004. (in Chinese)
- [4] 段桂江,唐晓青. 保质设计的集成化过程与方法模型研究[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(19): 1743-1746.
Duan Guijiang, Tang Xiaoqing. Research on the integrated process and methodology model of DFQ[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(19): 1743-1746. (in Chinese)
- [5] Thornton A C. Using key characteristics to balance cost and quality during product development[C]//*Design Theory and Methodology Conference, ASME Design Technical Conferences*. Sacramento, CA:[s. n.], 1997.
- [6] Srinivasan V. On interpreting key characteristics[C]//*ASME Design Engineering Technical Conferences*. Las Vegas, Nevada:[s. n.], 1999.
- [7] 乔杜里. 6西格玛设计:实现6西格玛的惟一途径[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
Chowdhury S. Design for six sigma: the evolutionary process for achieving extraordinary profits [M]. Beijing: China Machine Press, 2003. (in Chinese)
- [8] Thornton A C. Variation risk management: focusing quality improvements in product development and production [M]. Hoboken, NJ: Wiley, 2004.
- [9] Reid R D. Characteristic management [J]. *Quality Progress*, 2003, 36(11): 71-73.
- [10] 林志航. 产品设计与制造质量工程[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
Lin Zhihang. Product quality engineering in design and manufacturing [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)
- [11] Juran J M. *Quality control handbook*[M]. 5th ed. New York: McGraw Hill, 1999.
- [12] 宋慧军. 机械产品概念设计方案生成方法与关键技术研究[D]. 西安:西安交通大学, 2003.
Song Huijun. Research on methodology and key techniques of scheme generation in conceptual design of mechanical products [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003. (in Chinese)
- [13] Pahl G, Beiz W. *Engineering design: a systematic approach*[M]. London: Springer Verlag, 1996.
- [14] Matzler K, Hinterhuber H H. How to make product development projects more successful by integrating Kano's model of customer satisfaction into quality function deployment[J]. *Technovation*, 1998, 18(1): 25-38.
- [15] Kaldate A, Thurston D. Decision matrix reduction in preliminary design[C]//*ASME 15th International Conference on Design Theory and Methodology*. Chicago:[s. n.], 2003.
- [16] 杨明顺,林志航. 具有离散和连续型技术特征的质量屋优化模型[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(3): 111-114.
Yang Mingshun, Lin Zhihang. Optimization model of HOQ considering continuous and discrete technical characteristics [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(3): 111-114. (in Chinese)
- [17] Suh N P. Designing-in of quality through axiomatic design [J]. *IEEE Transactions On Reliability*, 1995, 44(2): 256-264.
- [18] Engelhardt F. Improving system by combining axiomatic design, quality control tools and designed experiments [J]. *Research in Engineering Design*, 2000, 12: 204-219.
- [19] Arunnajadai S G, Uder S J, Stone R B, et al. Failure mode identification through clustering analysis[J]. *Quality and Reliability International*, 2004, 20: 511-526.
- [20] Arcidiacono G, Campatelli G. Reliability improvement of a diesel engine using the FMETA approach [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2004, 20: 143-154.
- [21] Geneto A M, Redonodo A. Rough sets and maintenance in a production line [J]. *Expert Systems*, 2003, 20(5): 271-279.
- [22] Braglia M. Fuzzy TOPSIS approach for failure node, effects and criticality analysis[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2003, 19: 425-443.
- [23] 何益海. 基于关键质量特性的产品保质设计研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2006.
He Yihai. Research on design for quality based on product key quality characteristics [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [24] Zorriassatine F, Wykes C, Parkin R, et al. A survey of virtual prototyping techniques for mechanical product development [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2003, 217(4): 513-530.
- [25] 刘强. 面向MC的客户群体需求倾向模型构建方法的研究与应用[D]. 广东:广东工业大学, 2003.
Liu Qiang. Tendency model of customer groups requirement for mass customization[D]. Guangdong: Guangdong University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [26] 靳晓雄. 汽车噪声的预测与控制[M]. 上海:同济大学出版社, 2004.
Jin Xiaoxiong. Forecasting and controlling of vehicle noise

- [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2004. (in Chinese)
- [27] 刘春玲. YD01 型轿车车身结构分析研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2005.
Liu Chunling. Study on body structure analysis of car model YD01 [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2005. (in Chinese)
- [28] 曾金玲. 发动机结构噪声的仿真分析[D]. 吉林:吉林大学, 2004.
Zeng Jinling. Simulative analysis of noise of engine structure [D]. Jinlin: Jilin University, 2004. (in Chinese)
- [29] 王美清, 唐晓青. 产品设计中的用户需求与产品质量特征映射方法研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(5): 136-140.
Wang Meiqing, Tang Xiaoqing. Mapping customer requirements to product quality characteristics[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(5): 136-140. (in Chinese)
- [30] 时培成. 基于虚拟样机技术的汽车整体操作稳定性研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2005.
Shi Peicheng. The study on handling stability of a full ve-

hicle based on VP technology[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2005. (in Chinese)

作者简介:



何益海(1976—) 男, 博士, 讲师。主要研究方向: 产品保质设计理论、方法和计算机集成质量系统等。

Tel: 010-82313000

E-mail: heyihai@263.net



唐晓青(1953—) 女, 北京航空航天大学副校长, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 先进制造技术与系统、工业工程、企业信息化、集成质量管理系统等。

E-mail: tangxq@buaa.edu.cn

(责任编辑: 蔡斐)