基于公理设计的产品可靠性要求实现方法

杨德真 任 羿 王自力 肖 静

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对可靠性设计要求难以系统、全面落实到产品设计方案的问题,提出了一种基于公理设计的产品可靠性要求实现方法. 首先,应用公理设计原理进行产品初步设计,从而确定其功能需求,并针对各项功能的保持要求进一步扩展功能保持需求(扩展的功能保持需求构成功能保持域,该域包含于功能域),进而系统导出参数化的可靠性设计方案;其次,根据功能保持需求扩展或优化设计参数,构建考虑可靠性设计要求的域映射模型,并给出应用独立公理进行方案评价的方法. 同时,以温度传感器设计为例贯穿全文,验证了所提出方法的可行性和有效性.

关 键 词: 可靠性; 独立公理; 公理设计; 功能保持域; 温度传感器

中图分类号: N 945.17

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)01-0063-06

Design-in of reliability through axiomatic design

Yang Dezhen Ren Yi Wang Zili Xiao Jing

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To completely meet the requirements of reliability design in the product designing, an axiom-based designing-in reliability approach was proposed. In light of the axiomatic design principles, products were designed preliminarily to establish their functional requirements, so that according to these the preservation requirements were augmented (the functions preserving requirements constitute a functional requirement preserving domain that is included in functional domain), which derived the parameterized solution for reliability design systematically. Subsequently, the design parameters were augmented and optimized to achieve the functions preserving requirements. Mapping model of the augmented functional domain, the physical domain was established. And a solutions evaluation approach based on independence axiom was proposed. Being exemplified by the design of a temperature sensor, the present study demonstrates that all approaches are feasible, efficient, and could be applied in real engineering scenarios.

Key words: reliability; independence axiom; axiomatic design; functional requirement preserving domain(FRPD); temperature sensor

可靠性设计的目的就是要尽可能减少产品潜在的设计缺陷,它可以作为产品设计优化的一种方法. 其核心思想[1]是要渐进理解各级产品承受的载荷和应力,渐进识别可能产生的故障模式及其产生机理,主动消除所暴露的故障模式或降低其发生概率,减少产品潜在的不确定因素,在实现产品功能性能的同时,满足可靠性要求. 然而,传统的可靠性设计手段多依赖于"经验"[2-4],且设计结果相对"隐性",难以直接评价. 因此在产品设计早期,纠正已有产品设计方案中的设计缺陷非常困难,几乎不可能[5]. 目前较为通用的评价方法是可靠性试验与评估[6]. 该方法需在产品样件制造完成后才可进行,时间严重滞后,易造成设计反复. 尽管近年来可靠性技术领域很

收稿日期: 2013-03-15; **网络出版时间**:2013-06-09 10:16

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130609.1016.004.html

作者简介: 杨德真(1984-),女,浙江温州人,博士生,muyidz@126.com.

多专家提出了可靠性仿真试验方法[7-8],但该类方法较适用于设备级简单产品,复杂的系统级产品难以应用.传统依赖于"经验设计—试验验证—设计改进"的可靠性设计模式,可能造成大规模、跨阶段的设计反复,影响产品研制进度,增加研制成本.

面向产品设计过程,文献[9]中提出了公理设计(AD, Axiomatic Design)理论,并得到了普遍认可.该理论为产品设计过程提供了基于逻辑和理性思维的基础理论,其核心是两条设计公理:独立公理和信息公理.基于这两条公理,已推导得到了一系列的定理、推论和方法论.近 20 年来,AD 理论已被广泛应用于大系统设计[10-11]、软件设计[11-12]、制造系统设计[11,13]、人机系统设计[14]、材料及其加工工艺过程[15-16]、产品设计[16-17]、设计决策[16,18]、安全关键系统设计[19]、供应链管理[16,20]等.已有研究成果表明,AD 理论不仅可为新产品设计和已有产品改进提供原理指导,也可为其它设计方法提供概念框架.

然而,如何运用公理设计原理,结合产品设计过程进行全面的可靠性设计,真正将可靠性要求设计到产品中去,还需进行系统的研究.本文基于公理设计原理,提出了一种产品可靠性设计方法.在应用公理设计原理进行产品设计的同时,系统考虑产品的可靠性设计要求及其实现方法,使可靠性设计要求在科学合理的过程中逐步实现.

1 基于公理设计原理的产品设计

1.1 产品设计分解过程

AD 理论将设计领域分为 4 个域:用户域、功能域、物理域和过程域.用户域刻画用户需求(CAs,Customer Attributes),在功能域中,用户需求用功能需求(FRs,Functional Requirements)和约束(Cs,Constrains)来表示.

为了满足 FRs,在物理域中构思了设计参数(DPs,Design Parameters).过程域中则确定实现 DPs 的工艺参数(PVs, Process Variables).设计过程的 4 个域之间是自上而下的 Z 形分解过程,如图 1 所示.以 FRs 和 DPs 分解为例,在分解过程中,低一层次 FRs 应满足其对应的设计参数及其上一层次的 F_R[11].

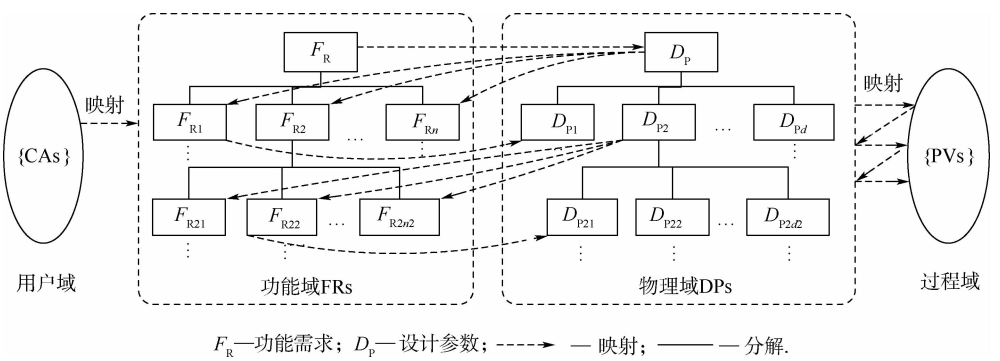


图 1 设计域间的 Z 形分解过程

图 1 所示的功能域与物理域之间的映射存在逐层对应关系,可用式(1)表示:

$$\begin{bmatrix} F_{R1} \\ F_{R2} \\ \vdots \\ F_{Rn} \end{bmatrix} = \boldsymbol{A}_{n\times d} \begin{bmatrix} D_{P1} \\ D_{P2} \\ \vdots \\ D_{Pd} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,$[F_{R1} \quad F_{R2} \quad \cdots \quad F_{Rn}]^T$ 表示第 2 层次的功能需求向量;$\boldsymbol{A}_{n\times d}$表示设计矩阵,矩阵中的每个元素 $A_{ij} = \partial F_{Ri}/\partial D_{Pj}$,表示第 i 个 F_R 与第 j 个 D_P 的关系,n 和 d 不一定相等,即设计矩阵并不一定是方阵;$[D_{P1} \quad D_{P2} \quad \cdots \quad D_{Pd}]^T$ 表示第 2 层次的设计参数向量.

1.2 设计公理

1) 独立公理:FRs 是设计必须满足的独立需求的最小集合.独立公理说明应保持 FRs 之间的独立性[16].为了满足独立公理,设计矩阵 $\boldsymbol{A}_{n\times d}$必须是对角矩阵或三角矩阵.当设计矩阵 $\boldsymbol{A}_{n\times d}$为对角矩阵时,表示每一个 F_R 可以用一个 D_P 来满足,这种设计即为无耦合设计;当设计矩阵 $\boldsymbol{A}_{n\times d}$为三角矩阵时,表示每一个 F_R 是且仅仅是由一个适当的 DPs 序列来满足,这种设计即为解耦设计.这两种设计均能保证 FRs 的独立性要求.

2) 信息公理:当有多个设计方案满足独立公理要求时,应用信息公理进行评价.信息公理为设计方案提供其设计价值的定量度量.

本文主要解决可靠性需求与物理参数的映射问题,仅应用独立公理.

1.3 基于独立公理的温度传感器设计示例

某温度传感器(TS,Temperature Sensor)[21]的

主要功能要求是可实时监测安装环境温度,以避免由于温度过高造成安全事故. 因此,可以分解得到 2 个子功能需求:感知安装环境温度(-55 ~ 125℃)、输出确定温度信息(激励和处理温度电信号). 每个功能要求至少对应一个设计参数. 为了感知所在环境的温度,选用一个热敏电阻,利用电阻值与温度的函数关系感知环境温度,并且能够在规定的温度范围内工作;为了激励和处理温度电信号,设计一个功能电路. 由此,本文建立了温度传感器的一级 FRs 和 DPs 分解结构,如图 2 所示.

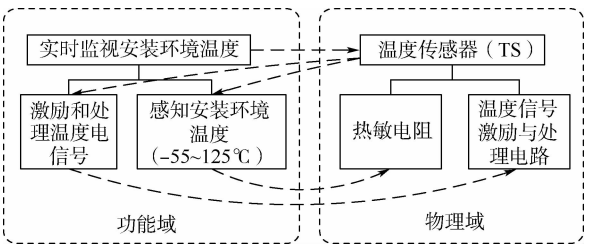


图 2　温度传感器的 FRs 和 DPs 一级分解结构

该分解结构对应的数学模型可用下式表示:

$$\begin{bmatrix} F_{\mathrm{RR1}} \\ F_{\mathrm{RR2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{X} & 0 \\ 0 & \mathrm{X} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{\mathrm{P1}} \\ D_{\mathrm{P2}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中,F_{RR1} 表示感知环境温度;F_{RR2} 表示激励和处理温度电信号;X 表示非 0 数;D_{P1} 表示热敏电阻;D_{P2} 表示温度电信号激励与处理电路.

公理设计中的分解过程是一个理想过程. 在产品的实际设计过程中,由于隐性需求、系统复杂性、不确定性因素等方面影响导致需求分析不充分,致使产品的初步设计通常是耦合的[14]. 而公理设计原理并未给出充分分析功能需求的方法. 如果功能需求分析不充分,即使通过独立公理判定当前设计是独立的,也未必是一个好的设计. 正如前例,只是满足了最基本的温度测量功能需求,并未考虑稳定、准确测量的需求.

2　考虑可靠性要求的功能域扩展

2.1　功能域扩展过程

在公理设计原理中,功能域是一个统一的概念. 为了系统体现可靠性设计需求,功能需求可以进一步划分为功能实现类需求和功能保持类需求. 相应地,可以将功能域细分为功能实现域(FRRD, Functional Requirement Realization Domain)和功能保持域(FRPD, Functional Requirement Preserving Domain).

1)功能实现域:为了满足用户需求所设计的产品功能,一般体现产品常规设计要求.

2)功能保持域:使功能实现域中的各项功能,在各种因素影响下得以保持的需求(本文仅考虑产品设计本身的功能保持需求,不考虑外部系统提供的功能保持能力).

一个功能实现需求可能对应一个或多个功能保持需求,同理一个功能保持需求也可以支持一个或多个功能实现需求. 功能域的扩展分解结构如图 3 所示.

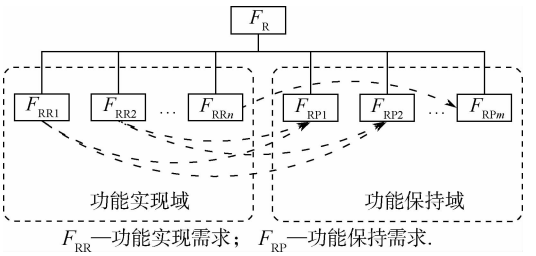


图 3　FRs 的扩展分解

针对每一项功能保持需求,也应确定相应的设计参数. 结合公理设计原理中 FRs 和 DPs 的层次结构树,可进一步得到如图 4 所示的 DPs 分解与功能保持域的对应关系. 在此过程中,为了确保功能保持需求的实现,可对应地扩展或优化设计参数,即

$$[D_{\mathrm{P1}} \quad D_{\mathrm{P2}} \quad \cdots \quad D_{Pd}]^{\mathrm{T}} \subseteq [D_{\mathrm{P1}} \quad D_{\mathrm{P2}} \quad \cdots \quad D_{\mathrm{P}d'}]^{\mathrm{T}}$$

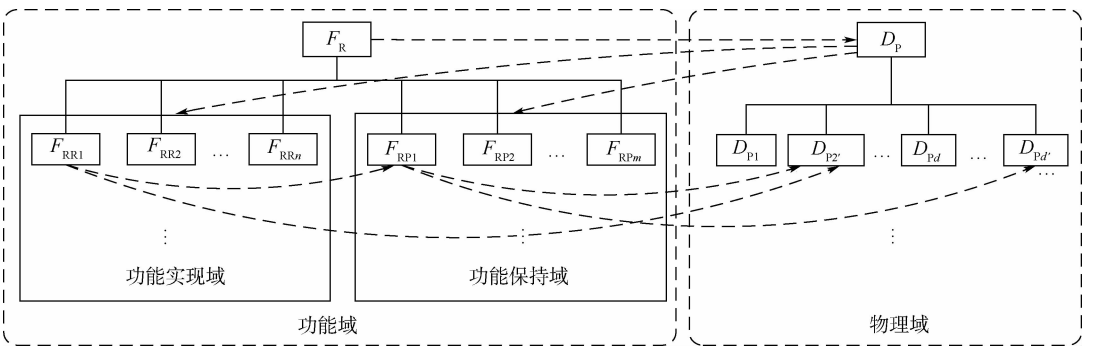


图 4　FRs 和 DPs 的对应分解过程

结合式(1)可建立上述分解过程的映射关系数学模型,如下:

$$\begin{bmatrix} F_{\mathrm{RR1}} \\ F_{\mathrm{RR2}} \\ \vdots \\ F_{\mathrm{RR}n} \\ F_{\mathrm{RP1}} \\ F_{\mathrm{RP2}} \\ \vdots \\ F_{\mathrm{RP}m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_{n\times d'} \\ \boldsymbol{A}_{m\times d'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{\mathrm{P1}} \\ D_{\mathrm{P2}} \\ \vdots \\ D_{\mathrm{P}d} \\ \vdots \\ D_{\mathrm{P}d'} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{A}_{n\times d'}$ 表示在$[\boldsymbol{A}]_{n\times d}$的基础上扩展得到的设计矩阵;$[F_{\mathrm{RR1}} \quad F_{\mathrm{RR2}} \quad \cdots \quad F_{\mathrm{RR}n}]^{\mathrm{T}}$ 表示第2层次功能实现需求向量;$[F_{\mathrm{RP1}} \quad F_{\mathrm{RP2}} \quad \cdots \quad F_{\mathrm{RP}m}]^{\mathrm{T}}$ 表示第2层次功能保持需求向量;$\boldsymbol{A}_{m\times d'}$ 表示功能保持矩阵,表示功能保持域和物理域之间的关系.

功能保持需求也是功能需求,根据独立公理规则,如果扩展矩阵 $\begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_{n\times d'} \\ \boldsymbol{A}_{m\times d'} \end{bmatrix}$ 是对角矩阵或者三角矩阵,则认为设计满足独立公理要求.

2.2 考虑可靠性要求的温度传感器设计

对于案例中的温度传感器,为了使其准确感知环境温度和精确处理温度电信号,需要扩展如下功能要求:

1)保持电阻温度特性的稳定;

2)保持电信号的稳定.

可根据温度传感器的工作环境,对上述功能保持要求进一步分解.

1)为保持电阻温度特性的稳定,首先要确保电阻的物理特性不能改变,其次要消除电阻自身阻值与温度的非线性影响,因此要实现:①避免电阻自身的非线性影响;②电阻表面避免沾染多余物或碰撞变形.

2)为保持电信号的稳定,一方面要避免热场微小波动带来的信号影响,另一方面要考虑外界干扰信号可能带来的影响,因此要实现:①过滤温度信号的杂波;②屏蔽外界干扰信号.

综上所述,可得温度传感器的功能域扩展分解结构,如图5所示.

针对温度传感器的功能保持需求,逐一确定其设计参数.

1)校准电阻阻值非线性变化带来的误差:考虑增加线性电路矫正热敏电阻温度与阻值的非线性关系.

2)防止表面沾染多余物或碰撞变形:整个电路增加外壳部件和密封片,避免多余物进入电阻,也避免电阻被碰撞变形.但是,必须保证电阻仍能实时感知外界温度,且不能带来电阻的自热效应.因此,选择不锈钢作为外壳材料.

3)过滤温度信号的杂波:为电路增加滤波电容过滤温度信号的杂波.

4)屏蔽外界干扰信号:为电路增加屏蔽层,避免外界干扰信号.

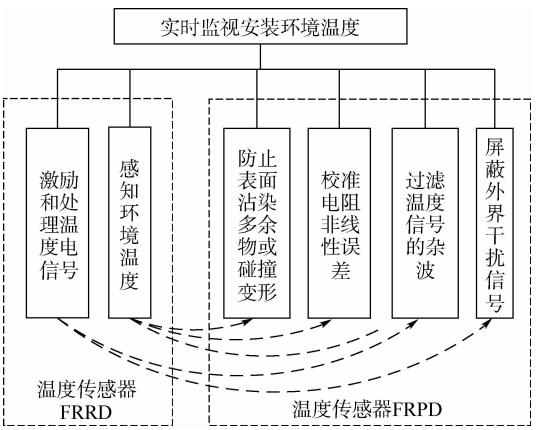


图5 温度传感器的功能域扩展

因此,可得温度传感器的功能域与设计域扩展分解结构如图6所示.其对应的映射关系模型如下:

$$\begin{bmatrix} F_{\mathrm{RR1}} \\ F_{\mathrm{RR2}} \\ F_{\mathrm{RP1}} \\ F_{\mathrm{RP2}} \\ F_{\mathrm{RP3}} \\ F_{\mathrm{RP4}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{X} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathrm{X} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathrm{X} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathrm{X} & \mathrm{X} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathrm{X} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathrm{X} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{\mathrm{P1}} \\ D'_{\mathrm{P2}} \\ D_{\mathrm{P3}} \\ D_{\mathrm{P4}} \\ D_{\mathrm{P5}} \\ D_{\mathrm{P6}} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中,F_{RP1}表示屏蔽外界干扰信号;F_{RP2}表示防止表面沾染多余物或碰撞变形;F_{RP3}表示过滤温度信号的杂波;F_{RP4}表示校准电阻非线性误差;D'_{P2}表示增加屏蔽层的处理电路;D_{P3}表示不锈钢外壳;D_{P4}表示密封片;D_{P5}表示线性电路;D_{P6}表示滤波电容.

根据独立公理规定,温度传感器的设计矩阵是三角矩阵,因此满足独立公理要求.且通过上述改进设计后,已分析得到的潜在威胁均已消除.当然,增加了不锈钢外壳等设计参数后,将给测量的精度造成影响,需要对电路的功能设计作进一步调整,可在下一层次功能设计时进行.过程同上,不予赘述.

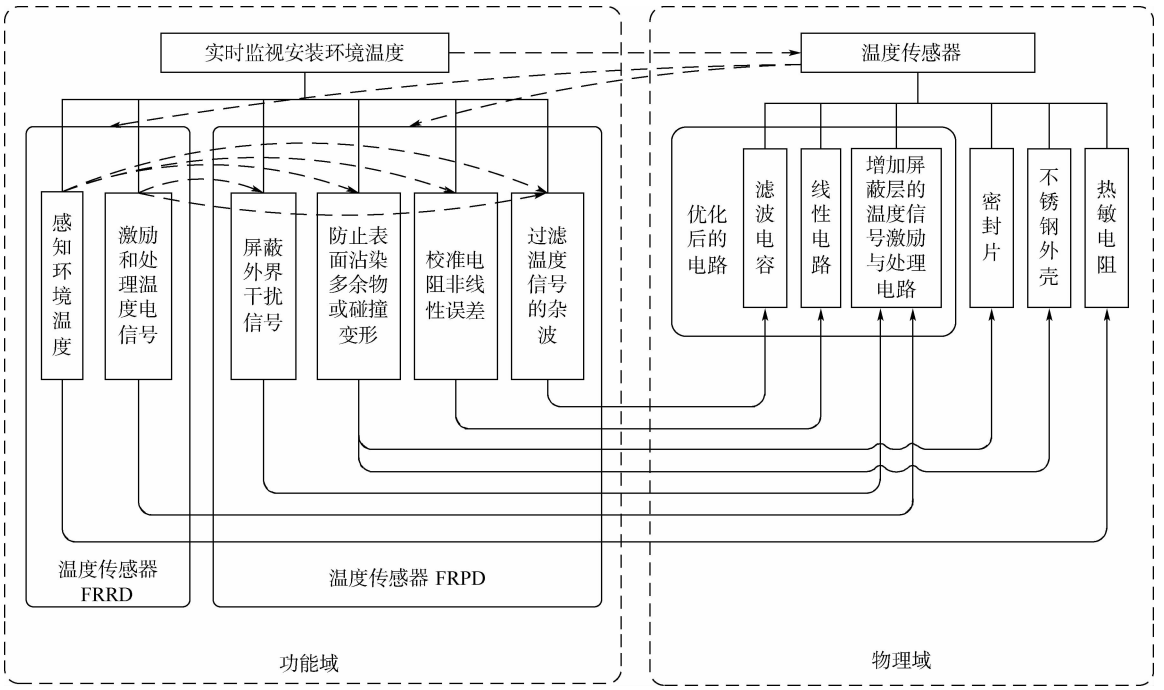


图 6　温度传感器 FRs 和 DPs 优化分解

3　结　论

综上所述,可以得到以下结论.

1）针对工程设计中可靠性设计要求难以全面系统落实的问题,本文基于公理设计原理给出了在产品设计过程中“显性”设计其可靠性要求的办法,从而科学全面地确定产品可靠性设计方案.

2）公理设计原理应用的有效性很大程度上取决于产品功能需求分析的充分性,然而公理设计原理本身并未给出充分分析功能需求的方法.对于此,本文提出了一个新的概念——功能保持域,从保持功能实现需求的角度分析用户需求中隐含的其他需求,由此扩展和完善功能域.

3）本文从避免功能保持需求的保持能力消失或下降的角度出发,确定功能保持需求所需的设计参数,使产品可靠性设计落实到物理域.

4）以温度传感器设计为例贯穿全文,验证了本文所提出方法的可行性及有效性.

然而,文中仍遗留一些问题需要进一步的研究.

1）当存在多个设计方案的设计矩阵均独立时,需要进一步应用信息公理进行评价,以确定较好的设计方案.本文所扩展的功能保持需求大部分为定性需求,其定量评价方法需要进一步的研究.

2）本文所提出的方法是否应用于物理域到过程域的映射过程尚需继续研究.

参考文献（References）

[1] GEIA-STD-0009 Reliability program standard for systems design, development, and manufacturing [S]

[2] Pecht M. Product reliability, maintainability, and supportability handbook [M]. 2nd ed. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2009

[3] Yan Chuliang, Liu Kege. Theory of economic life prediction and reliability assessment of aircraft structure [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(2): 164 – 170

[4] Zhao Changxiao, Chen Yao, Wang Hailiang, et al. Reliability analysis of aircraft condition monitoring network using an enhanced BDD algorithm [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(6): 925 – 930

[5] Akay D, Kulak O, Henson B. Conceptual design evaluation using interval type-2 fuzzy information axiom [J]. Computers in Industry, 2011, 62: 138 – 146

[6] Yao Jun, Xu Mingge, Zhong Weiqiang. Research of step-down accelerated degradation data assessment method of a certain type of missile tank [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(6): 917 – 924

[7] Gong Qi, Zhang Jianguo, Tan Chunlin, et al. Neural networks combined with importance sampling techniques for reliability evaluation of explosive initiating device [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(2): 208 – 215

[8] Li Jinghui, Mosleh Ali, Kang Rui. Likelihood ratio gradient estimation for dynamic reliability application [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2011, 96(12): 1667 – 1679

[9] Suh N P. The principles of design [M]. NY: Oxford University Press, 1990

[10] Suh N P. Design andoperation of large systems [J]. Journal of Manufacturing Systems, 1995, 14(3): 203 – 213

[11] Suh N P. Axiomatic design: advances and applications [M].

NY:Oxford University Press,2001

[12] Suh N P,Do S H. Axiomatic design of software systems[J]. CIPR Annuals-Manufacturing Technology,2000,49(1):95 - 100

[13] Kulak O,Kahraman C. Multi-attribute comparison of advanced manufacturing systems using fuzzy vs crisp axiomatic design approach[J]. International Journal of Production Economics,2005,95:415 - 424

[14] Helander M G. Using design equations to identify sources of complexity in human-machine interaction[J]. Theoretical Issues in Ergonomics Science,2007,8(2):123 - 146

[15] Nakaol M,Kobayashi N,Hamada K,et al. Decoupling executions in navigating manufacturing processes for shortening lead time and its implementation to an unmanned machine shop[J]. IRP Annals-Manufacturing Technology,2007,56(1):171 - 174

[16] Kulak O,Cebi S,Kahraman C. Applications of axiomatic design principles:a literature review[J]. Expert Systems with Applications,2010,37:6705 - 6717

[17] Tang Dunbing,Zhang Guangjun,Dai Sheng. Design as integration of axiomatic design and design structure matrix[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2009,25(3):610 - 619

[18] Celika M,Cebib S,Kahramanb C,et al. Application of axiomatic design and TOPSIS methodologies under fuzzy environment for proposing competitive strategies on Turkish container ports in maritime transportation network[J]. Expert Systems with Applications,2009,36(3):4541 - 4557

[19] Ahmed R,Koo J M,Jeong Y H. Design of safety-critical systems using the complementarities of success and failure domains with a case study[J]. Reliability Engineering and System Safety,2011,96:201 - 209

[20] Schnetzler M J,Sennheiser A,Schonsleben P. A decomposition-based approach for the development of a supply chain strategy[J]. International Journal of Production Economics,2007,105:21 - 42

[21] Field M O,Anderson G W. Development and testing of a multiplexed temperature sensor[M]. New Jersey:Proquest,Umi Dissertation Publishing,2012