

# 基于质量工程方法的信息系统改进

尤建新, 王京航, 尤筱玥

(同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

**摘要:** 以质量功能展开(QFD)为导向, 获取客户对信息系统的关键性能要求, 并以失效模式及后果分析(FMEA)为指导, 在信息系统实施期间对可能产生的失效模式及潜在风险进行预测. 通过结合两模型, 实现客户利益同时最大程度提升企业效益. 随后, 比较了 QFD 与 FMEA 的相似性和互补性, 构建了基于 QFD 与 FMEA 的质量管理联合模型, 分析了联合模型在信息系统质量提升方面的具体应用流程, 并以办公自动化(OA)信息系统为例进行了实例验证. 基于 QFD 与 FMEA 的结合应用, 为信息系统质量的提升提供了一种可参考的方法, 该方法具有可操作性与可行性.

**关键词:** 质量管理; 质量功能展开; 失效模式及后果分析; 信息系统

中图分类号: F27

文献标志码: A

## Information System Improvement Based on Quality Engineering Method

YOU Jianxin, WANG Jinghang, YOU Xiaoyue

(College of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Quality function deployment(QFD) was employed to get customers key function requirements on the information system, and with the help of failure mode and effect analysis(FMEA), potential failure modes and possible risk severity prediction on the process of product life stages in the early development of information systems could be found. The methods met the interests of customers and it maximized the enterprise efficiency at the same time. The similarity and complementarity between QFD and FMEA were analyzed by building a joint quality management model based on QFD and FMEA. A case study was made as well on the OA information system on the basis of the application of the joint model, which improved the information system, and the method was

proved feasible and practicable.

**Key words:** quality management; quality function deployment; failure mode and effect analysis(FMEA); information system

随着企业信息化迅速成熟, 信息系统日益成为企业发展的命脉, 人们对信息技术与信息系统的依赖程度越来越大. 然而, 信息系统纰漏与错误的检测性以及修复性的难度也较高, 产生错误后导致的后果难以预测, 一个微小错误甚至有可能带来不可修复的灾难. 因此, 为保证企业运营的有序性, 信息系统的质量和安全至关重要.

从企业的实际出发, 质量功能展开(quality function deployment, QFD)和失效模式及后果分析(failure mode and effect analysis, FMEA)都是质量管理过程中不可缺少的工具. 一方面, 企业需要借助 QFD 来获取关键的客户需求, 以客户提出的性能作为出发点逐步设计实施信息系统; 另一方面, 企业要借助 FMEA 来了解可能在信息系统安装实施的过程中由于质量缺陷所带来的各类风险和损失. QFD 重在客户的需求, 而 FMEA 重在关注信息系统产生的质量缺陷, 从而调整质量管理的重心.

信息系统的质量不仅依靠初期开发, 而且需要在信息系统开始实施之后借助有效的质量控制方法不断完善, 以客户需求作为信息系统设计规划指导, 实现关键质量问题的快速反应和快速解决, 提高信息系统质量管理的效率. 本文结合 QFD 与 FMEA 两个常见质量管理工具, 对企业信息系统的质量进行评估与完善, 进而为系统运营建设和维护提供有效依据.

收稿日期: 2016-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(71671125)

第一作者: 尤建新(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 管理学博士, 主要研究方向为管理理论与工业工程、质量与创新.

E-mail: yjx2256@vip.sina.com.

通讯作者: 尤筱玥(1991—), 女, 博士生, 主要研究方向为战略管理与财务管理. E-mail: yxyrachel@sina.com.

## 1 相关理论与应用基础

### 1.1 QFD理论与应用构架

QFD是一种建立在客户需求基础上的设计方法,从市场需求的情报出发,采用逻辑推理方式把顾客的语言转换为工程设计人员的语言,通过构建一系列矩阵形成质量屋(house of quality, HOQ)来实现客户需求. HOQ的基本框架和要素如图1所示<sup>[1]</sup>.

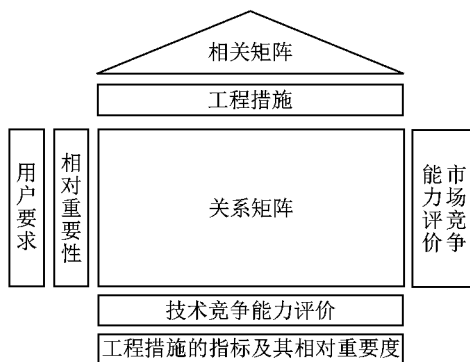


图1 质量屋的要素结构

Fig.1 The structure of the house of quality

建立质量屋的具体步骤如下:

(1)影响因素分析,信息系统客户需求评估. 主要根据信息系统顾客需求评价体系中涉及的指标评价信息系统的适合程度. 设计一份“客户需求重要性程度调查表”,采用7级李克特量表,用1~7分别表示重要度的递增关系<sup>[2]</sup>.

(2)企业信息系统的改进措施,提供改进企业信息系统质量的措施,经过评分和计算后给出最能够满足客户需求的措施分数排序. 该点所对应的两项工程措施间存在的相互加强交互作用表现为很强(“◎”)、一般(“○”)、减弱(“×”)、强烈排斥(“#”)或不存在交互作用(空白)<sup>[3]</sup>.

对于信息系统来说,常用的改进措施可以分为前馈控制、现场控制和反馈控制三种,分别在发生问题前期、中期和后期进行防范. 常用的改进措施包括组织相关人员学习系统常规操作( $M_1$ )、对系统出现的问题制定防范规定( $M_2$ )、实时监控( $M_3$ )、增加信息系统维护人员( $M_4$ )、美化用户操作界面( $M_5$ )、定期检查系统功能是否正常和完善( $M_6$ )、加强加密技术( $M_7$ )、备份重要数据( $M_8$ )等等<sup>[4]</sup>.

(3)关系矩阵建立,方案适应程度表达. 针对HOQ左墙中的每项影响因素,逐一判断该措施方案是否可以有效解决该影响因素对业务的影响,并形成关系矩阵. 其中措施有效性的评判标准可用0,1,3

和9关系度等级表示其递增程度.

(4)改进措施方案优先程度,各方案优劣比较. 通过左墙的影响因素权重矩阵与相关矩阵之间的矩阵计算,得到各措施方案的相对优先程度.

(5)市场竞争能力评估. 提供该信息系统目前状况,未来期望达到的目标和竞争对手的相关数据评分,对比得出需要改进的方面<sup>[5]</sup>.

### 1.2 QFD与FMEA的联合模型

FMEA的核心是通过小组成员的集体讨论研究,使用系统分析方法对产品(包括硬件、软件和服务)的设计、开发、生产等过程进行深入分析,找出系统中所有潜在的失效模式及其对系统造成的所有可能影响,并按照每一个失效模式的严重度(S)、发生度(O)以及检测度(D)予以评测,通过计算乘积作为风险优先数(risk priority number, RPN)从而根据其排序判断失效模式风险的归纳分析方法<sup>[6-8]</sup>.

采用QFD和FMEA两个模型的最终目的均为实现客户满意. 其中,QFD从正面角度出发,对产品的特性展开分析并对应到措施评价,最终达到客户需求;而FMEA则从负面角度切入,通过分析产品可能失效的因素及其原因和后果,从而采取提前预防措施并准备弥补措施,从而消除客户可能产生的不满<sup>[9]</sup>.

传统QFD模型虽然聚焦于客户需求,但市场变化等动态因素可能导致需求信息无法及时反映,并且直接采用序列数字评价也会难以准确反映出质量屋各元素之间的复杂关系,因此,QFD与其他质量改进方法或数学工具的结合成为一种必然的发展趋势. 而FMEA则恰好可以弥补传统QFD的一些局限,这是由于产品的失效模式跟随产品特性,较少直接受到客户需求的影响,从而使分析过程较为稳定,消除由于顾客需求变化所造成的障碍<sup>[10]</sup>. 此外,由于FMEA在列举失效模式时主要采用头脑风暴法,较容易产生遗漏,借助QFD的逐级展开、细化和分解过程,可以确保FMEA尽可能详尽的列举出大量关键的失效模式. 借助于QFD分析判断,挑选出对产品用户需求至关重要的质量特性,而FMEA分析鉴别设计上的薄弱环节,做到从全局出发,使补偿措施的选择更具针对性.

两个模型的集成方法为将风险优先数值 $R_i$ 转换为故障修正系数 $F_i$ ,并反馈至信息系统改进方案之中. 故障修正系数 $F_i$ 为

$$F_i = 1 + \frac{(R_i - k) \times P}{1\ 000} \quad (1)$$

式中: $R_i$ 表示第 $i$ 项的风险优先数值; $k$ 为不考

考虑进行修正的最低风险优先系数值,且  $k \geq 0$ ;  $R_i - k$  为需进行修正的值,  $R_i \geq k$ ; 若  $R_i < k$  则设为 0;  $P$  为修正的强度系数,可以影响故障修正系数  $F_i$  的敏感度. 因此设计者可根据不同的产品进行  $k$  值和  $P$  值的选择以达到良好的修正效果<sup>[11]</sup>. 在计算信息系统改进方案的权重时,对发生故障的技术方案乘以不同的故障修正系数,使得该方案的权重值发生改变,从而改变最终方案的选择<sup>[12]</sup>. 由式(1)可以看出,若某项失效模式  $R$  值较高,代表风险性较高,对应的改进方案故障修正系数  $F_i$  应该较大,因此该方案的权重值被升高,所以被选择的几率变大;反之,  $R$  值低者,代表风险性较低,因此对应的改进方案被选择的几率也相对降低<sup>[13]</sup>.

## 2 模型应用

上海 T 公司是专业从事建设工程咨询业务的企业, T 公司已有的 OA 办公平台, 实现了统一的管理平台和规范, 统一资源调配, 强化决策和经营考核.

在分析信息系统的失效模式与后果时, 首先结

合层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)对信息系统的失效模块进行挖掘, 将信息系统的风险分为信息传递方面的信息风险、系统支撑方面的系统风险和企业当中的其他风险, 并进一步挖掘失效模式建立层次结构模型(表 1).

表 1 信息系统风险层次分析表

Tab.1 Analytic hierarchy table of information system

信息风险	系统风险	其他风险
数据截获	硬件及环境的安全性	自然及不可抗拒因素
数据篡改	软件的非法侵入	财务风险
数据伪造	介质风险如电磁波等辐射	工作人员的素质与责任心
数据中断		

经过专家小组进行判定, 认为信息系统是安全要求程度很高的产品, 所以不管失效模式的  $R$  值多小, 都应该采取相应行动. 因此, 专家组确定本案例中式(1)中的  $k$  取  $R$  最小值, 即  $k=0$ . 此外, 根据该 OA 信息系统的实际情况, 确定  $P=1$ . 在 FMEA 分析结果的基础上, T 公司的 OA 系统失效模式因果分析表如表 2 所示.

表 2 FMEA 分析表

Tab.2 FMEA analysis table

失效模块	失效模式	失效后果	严重度	失效原因	发生度	过程控制	检测度	风险优先数 R	预防及改进措施
信息风险	数据截获	信息泄露	5	信息传输过程中被截获	3	传输过程检测	8	120	数据加密技术
	数据篡改	信息被非法篡改	7	信息传输过程中被篡改	2	数据来源监测	6	84	数字信封技术 数字签名技术 数字证书技术
	数据伪造	数据库中多出的伪造信息	8	伪造了本来不存在的数据传输	2	数据来源监测	7	112	数字信封技术 数字签名技术 数字证书技术
	数据中断	信息无法传达	3	信息传输未能进行	5	系统反馈	4	60	保证信息传输通道的通畅, 一旦信息丢失立即检测
系统风险	硬件及环境的安全性	系统出现无法响应、漏洞甚至崩溃	7	系统硬件老化或软件不兼容	3	人工检查及安全测试	3	63	工作人员定期检测
	软件的非法侵入	系统无法正常工作甚至数据丢失	8	系统被植入病毒	2	系统维护	5	80	安装并及时升级防火墙和杀毒软件, 使用安全的 IP 协议
	介质风险如电磁波等辐射	信息由于电磁辐射而泄露, 系统无法正常运行	7	数据传输通道容易产生电磁波	2	人工检查	2	28	定期运用无线电接收机检测
其他风险	自然及不可抗拒因素	直接危害信息系统实体安全	9	自然灾害或暴力战争	1	无法控制	2	18	无法预防与改进
	财务风险	影响信息系统开发与维护需要的资金	6	企业资金链断裂	2	企业业务控制	2	24	保持企业的日常运行, 财务危机的预防
	工作人员的素质与责任心	影响信息系统的日常维护	6	工作人员工作态度消极	3	人工检查与顾客反馈	3	54	与工作人员谈话或辞退更换工作人员

由于  $R$  值代表了失效模式的风险值,根据表 2 结果进行排序后,再根据式(1)计算失效模式的  $R$  修正系数,已确定各失效模式的风险优先排序(表 3).  $R$  值越高,说明该失效模式越应当优先进行措施分析,并制定相应的改善和弥补方案.

表 3 风险优先数排序

Tab.3 Risk priority ranking

信息系统风险	$R$	修正系数 $F$	$R$ 排序
数据截获	120	1.12	1
数据伪造	112	1.112	2
数据篡改	84	1.084	3
软件非法侵入	80	1.08	4
硬件及环境安全性	63	1.063	5
数据中断	60	1.06	6
工作人员素质与责任心	54	1.054	7
介质风险如电磁波等辐射	28	1.028	8
财务风险	24	1.024	9
自然及不可抗拒因素	18	1.018	10

根据表 3 可以看出,失效模式中数据截获、数据伪造的失效风险损失最大且与其他失效模式的  $R$  值有一定距离,企业应当优先考虑这两项模式失效的

原因与后果,并有针对的制定相应的预防措施和补救措施,从而减少或避免严重后果的产生.

根据 T 公司顾客满意度调查的结果以及 FMEA 分析所获得数据,公司信息系统管理层根据德尔菲法,对信息系统的顾客需求从品质需求、功能需求、服务需求和其他需求四个方面来考察.在征询专家小组成员的预测意见、列出相关指标后,得出各个信息系统指标的权重,如表 4 所示.

根据 QFD 模型建立质量屋,信息系统顾客需求和可选的提高信息系统质量措施之间关系矩阵,表达的是几种备选的措施对左侧信息系统顾客需求的影响程度.在 HOQ 右侧的指标分析栏,“现在需求重要度”描述了目前该对应指标的主观化认识,用 1~9 量表来表示该公司业务具体指标的成熟状况;“目标需求重要度”代表企业希望通过改革措施达到的质量水平;“与竞争对手对比”代表同行业竞争在设备维护外包方面有突出绩效的公司状况作为标杆比较;“改善重点”指该项指标需要提高的力度,也就是需要重点克服的问题,分为 1.5,1.2 和 1.

表 4 OA 信息系统顾客需求权重表

Tab.4 Weight of customer needs of OA information system

需求(权重)	客户需求指标(C)	绝对权重	相对权重
品质需求 (0.3)	(C <sub>1</sub> )该系统拥有最新式的硬件和软件	0.15	0.045
	(C <sub>2</sub> )该系统用户操作界面美观大方又简约	0.10	0.030
	(C <sub>3</sub> )该系统安全可靠,不会经常出现崩溃,更不会有信息泄露	0.45	0.135
	(C <sub>4</sub> )该系统易用易懂,非常实用	0.30	0.090
功能需求 (0.3)	(C <sub>5</sub> )该系统提供的产出是完全需要的	0.25	0.075
	(C <sub>6</sub> )该系统的功能完全符合所有的期望	0.25	0.075
	(C <sub>7</sub> )该系统还有一些意想不到的其他功能,也很有用	0.10	0.030
	(C <sub>8</sub> )该系统提升了原有的工作效率	0.40	0.120
服务需求 (0.2)	(C <sub>9</sub> )该系统的服务回应请求时间非常短	0.35	0.070
	(C <sub>10</sub> )该系统的服务言语得体,主动热情	0.10	0.020
	(C <sub>11</sub> )该系统主动征求客户的改进意见	0.25	0.050
	(C <sub>12</sub> )该系统及时解决了用户的困难	0.30	0.060
其他需求 (0.2)	(C <sub>13</sub> )该系统适应不同国家、地区文化需求	0.20	0.040
	(C <sub>14</sub> )该系统系品牌非常知名的公司开发	0.30	0.060
	(C <sub>15</sub> )该系统维护和更新一直及时	0.50	0.100

通过以下 3 个算式可以计算得出信息系统改革措施权重:①改善比例=目标分值/绩效分值;②初始权重值=客户需求相对重要度×改善比例×改进重点;③信息系统改革措施权重=Σ(信息系统顾客需求评分×相对权重);最后一行信息系统改革措施权重即可以看出各项措施对顾客需求的综合影响程度,数字越大,对顾客需求满意的提升越明显.从而得出合适的提升信息系统质量水平措施的排名.OA 信息系统的完整质量屋结果如表 5 所示.

将与信息系统改进方案有相关性的故障项目的

$F_i$  值反馈到 QFD 表中,若无相关性则填入 1.例如“组织相关人员学习系统常规操作”方案可以对“工作人员的素质与责任心”风险进行改善,故将此栏的故障修正系数 1.054 置于对应项;“实时监控”方案可以对“软件的非法侵入”风险进行改善,故将此栏的故障修正系数 1.08 置于对应项;“美化用户操作界面”无对应的失效模式,则在相应的修正系数项中填 1.

根据表 5 中最后一行修正后的相对权重可以看出,对于上海 T 公司 OA 系统来说,建议最亟待改进

表 5 OA 信息系统质量屋  
Tab.5 HOQ of OA information system

重要性	顾客需求	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>	M <sub>7</sub>	M <sub>8</sub>	现在需求重要度	目标需求重要度	与竞争对手对比	改进重点	改善比例	初始权重	相对权重
0.045	C <sub>1</sub>	0	0	0	0	3	0	3	1	7	8	8	1.2	1.14	0.06	0.036
0.030	C <sub>2</sub>	0	0	0	0	9	0	0	0	6	7	6	1.2	1.17	0.04	0.025
0.135	C <sub>3</sub>	1	3	9	9	0	3	9	3	7	9	7	1.5	1.29	0.26	0.154
0.090	C <sub>4</sub>	9	0	0	1	9	3	0	0	5	7	6	1.5	1.40	0.19	0.112
0.075	C <sub>5</sub>	1	1	0	0	0	9	3	3	5	7	4	1.5	1.40	0.16	0.093
0.075	C <sub>6</sub>	1	1	0	0	0	9	3	3	6	7	4	1.2	1.17	0.11	0.062
0.030	C <sub>7</sub>	1	0	0	0	0	3	1	1	4	6	5	1.5	1.50	0.07	0.040
0.120	C <sub>8</sub>	9	1	1	1	0	3	1	1	7	8	7	1.2	1.14	0.16	0.097
0.070	C <sub>9</sub>	3	0	1	3	0	1	0	0	7	8	6	1.2	1.14	0.10	0.057
0.020	C <sub>10</sub>	3	1	0	0	3	1	0	0	8	8	8	1.0	1.00	0.02	0.012
0.050	C <sub>11</sub>	0	3	1	1	1	0	1	1	6	7	6	1.2	1.17	0.07	0.041
0.060	C <sub>12</sub>	1	1	1	3	0	1	3	3	4	6	7	1.5	1.50	0.14	0.080
0.040	C <sub>13</sub>	0	0	0	0	3	0	3	1	3	6	6	1.5	2.00	0.12	0.071
0.060	C <sub>14</sub>	0	0	0	0	3	1	1	0	5	5	7	1.0	1.00	0.06	0.035
0.100	C <sub>15</sub>	0	0	9	1	0	9	0	3	5	6	5	1.2	1.20	0.14	0.085
改进措施权重		2.5	0.9	2.4	2.1	1.7	3.6	2.6	1.7						1.69	1.000
修正系数		1.05	1.00	1.08	1.00	1.00	1.03	1.06	1.08							
修正后绝对权重		2.63	0.90	2.59	2.10	1.70	3.70	2.76	1.84							
修正后相对权重		0.144	0.049	0.142	0.115	0.093	0.203	0.152	0.101							

和加强的措施是“定期检查系统功能是否正常和完善”,如每月制作信息系统安全定期分析记录表,每半年制作信息系统安全检查报告总结;其次是“加强加密技术”,如优化密钥和加密算法,完善数据信封技术;然后是“组织相关人员学习系统常规操作”,如定期邀请专业人员对信息系统的使用人员进行培训,并定期测试;还有“实时监控”,如实时监控软硬件设施是否正常工作,实时监控防火墙是否被破坏等。所有改进措施的优先排序如表 6 所示。

表 6 信息系统改进措施优先级排序  
Tab.6 Priority ranking of information system improvement measures

信息系统改进措施(M)	优先级排序
(M <sub>6</sub> )定期检查系统功能是否正常和完善	1
(M <sub>7</sub> )加强加密技术	2
(M <sub>1</sub> )组织相关人员学习系统常规操作	3
(M <sub>3</sub> )实时监控	4
(M <sub>4</sub> )增加信息系统维护人员	5
(M <sub>8</sub> )备份重要数据	6
(M <sub>5</sub> )美化用户操作界面	7
(M <sub>2</sub> )对系统出现的问题制定防范规定	8

### 3 结论

以信息系统作为研究对象,结合 QFD 与 FMEA 模型为信息系统质量安全提升这一亟待解决的论题提供了有效参考。首先运用 FMEA 分析了信息系统运行过程中可能出现的失效模式、风险以及带来的

损失;然后运用 QFD 借助矩阵演绎分析,根据顾客需求,定量地得出了信息系统质量提升措施的重要程度,结合 FMEA 修正结果得到了信息系统改进措施的优先排序,验证了 QFD 与 FMEA 对企业信息系统质量提升的有效性,为系统运营提供了有意义的建设和维护依据。

此外,QFD 模型也可以在信息系统设计、开发等各个阶段运用,从而在系统建设阶段研发出更符合客户需求的界面;而 FMEA 的应用目前仅考虑了风险优先数的排序,以后将继续讨论不同风险因子组合产生相同风险优先系数值的问题,细化对信息系统风险的研究。

### 参考文献:

[1] 尤建新,周文泳,武小军,等. 质量管理学 [M]. 第 3 版. 北京: 科学出版社, 2014.  
YOU Jianxin, ZHOU Wenyong, WU Xiaojun, et al. Quality management [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2014.

[2] 邵鲁宁, 尤建新. 基于 QFD 的生产性服务外包关系决策研究 [J]. 管理评论, 2008(9): 33.  
SHAO Luning, YOU Jianxin. Research on relationship of the production service outsourcing decision making based on QFD [J]. Management Review, 2008(9): 33.

[3] 王霆. 信息系统评价模型比较分析与整合 [D]. 济南: 山东大学, 2012.  
WANG Ting. Comparative analysis and integration of information system evaluation model [D]. Ji'nan: Shandong University, 2012.

- [4] 梁周扬, 曲懿恒, 何嘉鹏. 模糊层次分析法在信息系统质量评价中的应用[J]. 中国集体经济, 2008, 18: 52.  
LIANG Zhouyang, QU Yiheng, HE Jiapeng. Application of fuzzy analytic hierarchy process in quality evaluation of information system [J]. China Collective Economy, 2008, 18: 52.
- [5] 赵建平, 许利亚, 段慧芬, 等. 基于 QFD 的质量保证方法在指挥信息系统开发中的应用[J]. 兵工自动化, 2012(7): 59.  
ZHAO Jianping, XU Leah, DUAN Huifen, *et al.* The application of quality assurance method based on QFD in the development of command information system [J]. Ordnance Industry Automation, 2012(7): 59.
- [6] LIU Huchen, LIU Long, LIU Nan. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: a literature review [J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40: 828.
- [7] 尤筱玥, 黄志明. 基于 FMEA 的业务外包风险评估研究[J]. 上海管理科学, 2014(5): 45.  
YOU Xiaoyue, HUANG Zhiming. Research on outsourcing risk assessment based on FMEA [J]. Shanghai Management Science, 2014(5): 45.
- [8] LIU Huchen, YOU Jianxin, YOU Xiaoyue, *et al.* A novel approach for failure mode and effects analysis using combination weighting and fuzzy VIKOR method [J]. Applied Soft Computing, 2015, 28: 579.
- [9] 何桢, 赵燕, 邹峰. 产品设计阶段 QFD 与 FMEA 的集成研究与应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007(4): 97.  
HE Feng, ZHAO Yan, ZOU Feng. Integration research and application of QFD and FMEA in product design stage [J]. Combined Machine Tools and Automatic Processing Technology, 2007(4): 97.
- [10] 郭基联, 王卓健, 朱绍强. QFD 与 FMEA 相结合的需求重要度确定方法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2009(6): 10.  
GUO Jilian, WANG Zhuojian, ZHU Shaoqiang. Method for determining the importance degree of the demand of QFD and FMEA [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2009(6): 10.
- [11] 王凯, 潘尔顺. 模糊 QFD 与 FMEA 整合模型及应用[J]. 工业工程与管理, 2008(3): 59.  
WANG Kai, PAN Ershun. Integration model and application of fuzzy QFD and FMEA [J]. Industrial Engineering and Management, 2008(3): 59.
- [12] 白晓丽. QFD 与 FMEA 集成模型在汽车仪表板中的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.  
BAI Xiaoli. Application of integrated model of QFD and FMEA in automotive instrument panel [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [13] 王沙婷, 梁工谦. 面向产品再制造的改进 QFD 和 FMEA 的集成研究[J]. 软科学, 2011(5): 61.  
WANG Shating, LIANG Gongqian. Research on the integration of QFD and FMEA for product remanufacturing [J]. Soft Science, 2011(5): 61.

#### (上接第 346 页)

- [7] 宋克志, 孙谋. 复杂岩石地层盾构掘进效能影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2092.  
SONG Kezhi, SUN Mou. Analysis of influencing factors of shield tunneling performance in complex rock strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2092.
- [8] 廖少明, 徐意智, 陈立生, 等. 穿越不同建(构)筑物的地铁盾构选型与控制[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(1): 47.  
LIAO Shaoming, XU Yizhi, CHEN Lisheng, *et al.* Shield type selection and its control on tunneling across various structures [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(1): 47.
- [9] 代仁平, 宫全美, 周顺华, 等. 土压平衡盾构砂卵石处理模式及应用分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增 2): 292.  
DAI Renping, GONG Quanmei, ZHOU Shunhua, *et al.* Processing model and application of sand and gravel of earth pressure balance shield [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S2): 292.
- [10] 吴迪, 周顺华, 温馨. 砂性土层泥水盾构泥浆成膜性能试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增 1): 3460.  
WU Di, ZHOU Shunhua, WEN Xin. Laboratory test and application of filter cake formation in sand during slurry shield construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3460.
- [11] 代仁平, 周顺华, 宫全美, 等. 盾构越江隧道囊状沼气爆炸风险的事故树分析[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 19(5): 30.  
DAI Renping, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei, *et al.* Fault tree analysis of Biogas explosion in shield tunneling [J]. Urban Mass Transit, 2010, 19(5): 30.
- [12] 霍军帅, 王炳龙, 周顺华. 地铁盾构隧道下穿城际铁路地基加固方案安全性分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5): 71.  
HUO Junshuai, WANG Binglong, ZHOU Shunhua. Safety analysis of foundation reinforcement scheme for shield tunnel under-passing intercity railway [J]. Chinese Railway Science, 2011, 32(5): 71.
- [13] 孙王永, 周顺华, 向科, 等. 近距离下穿既有隧道的盾构施工参数研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(1): 54.  
SUN Yuyong, ZHOU Shunhua, XIANG Ke, *et al.* Study on the construction parameters of shield tunnelling in short-distance undercrossing the existing tunnel [J]. Chinese Railway Science, 2010, 31(1): 54.
- [14] 孙谋, 刘维宁. 软土地层盾构近距离穿越老式建筑区掘进参数分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12): 170.  
SUN Mou, LIU Weining. Parameters analysis for shield tunneling under old buildings in soft ground [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(12): 170.
- [15] 张治国, 张孟喜. 软土城区土压平衡盾构上下交叠穿越地铁隧道的变形预测及施工控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 2): 3428.  
ZHANG Zhiguo, ZHANG Mengxi. Deformation prediction of subway tunnel induced by EPB shield in soft clay during above and down overlapped traversing process and its construction control [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3428.
- [16] ZHOU Shunhua, JI Chang. Tunnel segment uplift model of earth pressure balance shield in soft soils during subway tunnel construction [J]. International Journal of Rail Transportation, 2014, 2(4): 221.