

DOI:10.13196/j.cims.2019.02.024

基于系统动力学仿真的国产汽车质量经济性研究

周福礼¹, 王旭², 叶正梗³, 林云², 何彦东⁴

(1. 郑州轻工业大学 经济与管理学院, 河南 郑州 450002; 2. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044;
3. 西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072; 4. 清华大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要:为从全生命周期研究国产汽车的质量经济性,依据整车制造的质量传递及持续质量改进流程建立了闭环流程图,构建了系统动力学仿真模型。通过二维质量总相关成本框架,从“预防—鉴定—损失”质量成本和寿命周期成本两个维度描述了整车的经济性,以千台车维修频次 $R/1000@3MIS$ 和千台车抱怨数 $TGW/1000@3MIS$ 反映部件/整车的质量水平。应用系统动力学建模刻画国产汽车质量经济性指标的交互关系,并仿真质量改进过程中不同质量活动要素投入时,整车质量经济性指标的变化规律,实现对整车的质量经济性评价。仿真结果表明,质量活动投入能够改善产品的质量经济性指标,不同质量活动及投入策略的选择对整车质量经济性提升存在差异;主机厂应通过关键零部件质量投入提升整车质量经济性,为进一步研究整车质量改善计划提供理论支持和实践参考。

关键词:国产汽车;千台车维修频次;千台车抱怨数;系统动力学;质量经济性;仿真

中图分类号:C93 **文献标识码:**A

Economy of quality for Chinese domestic automotive products based on systems dynamics simulation

ZHOU Fuli¹, WANG Xu², YE Zhenggeng³, LIN Yun², HE Yandong⁴

(1. School of Economics and Management, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
2. College of Mechanical Engineering Chongqing University, Chongqing 400044, China;
3. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
4. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: To study the quality of economics of automobile parts and domestic vehicles from total lifecycle perspective, a system dynamic model based on the quality generation of automobile and continuous quality improvement procedure was established. In light of the Two Dimensional Quality Related Cost (2D-QRC), the Prevention-Appraisal-Failure (PAF) cost and lifecycle cost were highlighted to describe the economy of auto products. The maintenance frequency per thousand vehicles ($R/1000@3MIS$) and customer complaints per thousand vehicles ($TGW/1000@3MIS$) indexes were employed to reflect the quality level of key parts and automobile products. To evaluate the quality of economics of automobile product, Vensim PLE was applied to simulate the constructed system dynamics model, which could derive the variation trend of key indicators in different quality investment portfolios of specific quality activities. The simulation results showed that the quality investment could improve the performance of quality of economic indicators, especially by quality improvement of key parts and supplier management, and there existed the obvious discrepancy of improvement performance among different quality activities and improvement strategies. The domestic automotive industry could improve the quality of economics of their products with key outsourcing parts enhancement, which would provide theoretical support and practical reference to the future research on strategic quality improvement plan establishment.

Keywords: domestic automobile; R/1000@3MIS; TGW/1000@3MIS; systems dynamics; quality of economics; simulation

0 引言

目前,日趋增强的消费者购买力和国产汽车创新激励汽车产业蓬勃发展,中国已连续9年蝉联世界第一汽车产销大国。国产汽车以价格竞争优势在国内市场占有一定市场份额,这归功于国产汽车显著的整零关系和低成本战略^[1-2]。汽车行业竞争日趋激烈,随着消费者购买力的增长,汽车产品普及程度和质量需求愈加明显,促使具有成本竞争优势的自主品牌整车企业开始向高质量低成本的竞争战略转移;自《家用汽车产品修理、更换、退货责任规定》实施以来,政府对主机厂售后“三包”服务提出明确要求,三包政策和频繁维修使自主品牌汽车企业的售后维修成本居高不下,从而敦促国产汽车企业从全生命周期视角考虑整车的质量经济性;同时,由于频繁维修导致的机会损失,促使消费者在购买决策时,要综合考虑产品售价和使用过程的质量经济性。产品售后服务和质量投入作为有效的质量管理手段,能够提升国产汽车的顾客满意度和忠诚度,增加国产汽车的竞争实力^[3],自主品牌汽车企业利用质量管理工具和统计质量控制方法实施持续质量改进(Continuous Quality Improvement Procedure, CQIP)^[4]。据J. D. Power新车质量报告(Initial Quality Study, IQS)统计,国产汽车与合资、外资品牌汽车的百辆车问题数(Problems Per Hundred Vehicles, PP100)差距缩小了75%。然而,如何从全生命周期评价国产汽车的质量经济性,并制定科学的质量投入计划,指导改进国产汽车质量,是当前面临的难题。

质量成本模型为产品质量经济性研究提供了思路,受到国内外学者的广泛关注。质量成本指企业为保证和提高产品质量而支付的一切费用以及因质量故障而造成的损失费用之和,即“预防—鉴定—损失”(Prevention-Appraisal-Failure, PAF)框架^[5];质量成本的研究主要集中在定性和定量两方面。Schiffauerova等^[6]认为质量成本能够帮助企业研究产品质量经济性,并系统性描述了质量成本的定义和分类。质量成本的定义和分类虽然不同(Juran和Crosby),但是均强调使用过程中的质量损失成

本;Chiadamrong^[7]基于一维PAF框架提出包括隐形损失的计算方法;Šatanov等^[8]借助设计的调查问卷为中小制造企业提供质量成本量化方法;Zhou等^[9]借助质量成本和寿命周期成本概念,提出PAF-LCC二维质量相关成本框架,为主机厂从质量成本和寿命周期阶段两个角度的资源配置提供指导。可见,不同学者在Juran和Feigenbaum的PAF框架、Crosby的一致性和非一致性(Conformance+Unconformance)框架以及田口玄一的隐形损失成本框架下,通过丰富质量成本理论展开深入研究。

在质量成本理论发展的同时,质量成本模型为产品质量经济性的量化研究提供了理论基础。尚姗姗等^[10]提出基于灰色理论的GM(1,1)质量成本模型,在“预防—鉴定—损失”质量成本框架下探究了质量水平与经济性指标的交互关系;然后利用系统动力学对成本要素的关系进行分析,建立了灰色GM(1,1)与线性回归结合的组合模型。Lim等^[11]在一维PAF质量成本框架下,提出混合整数规划模型对质量投入资源进行优化分配,并分析了产品的质量经济性。

产品的顾客抱怨会影响消费者忠诚度和企业信誉,进而造成无形质量损失^[12],研究国产汽车的质量经济性不仅要关注传统的显性质量成本,还要关注整车的顾客抱怨和顾客满意情况。因此,面向顾客满意度的质量成本模型也是研究热点。辛志高等^[13]对比3种传统质量成本模型的优缺点,以顾客满意度为质量指标,为质量成本模型研究和实证提供了新思路;Zhou等^[14]以关键部件为研究对象,结合4种传统质量成本数学模型分析了外协件的质量经济性,不仅帮助主机厂确立质量改进目标,还为选择外购件供应商提供了借鉴;潘燕华等^[15]应用系统动力学方法构建了基于顾客满意度的质量成本模型,以刻画顾客满意度与质量成本的动态关系。

上述对质量经济性的研究多集中在质量成本模型的静态分析,缺乏对自主品牌整车企业进行全生命周期的动态质量经济性分析;且多数研究没有考虑顾客满意度下降造成的隐性损失。实际生产制造中,整车质量投入具有动态性和不确定性,而且存在多源异

构的质量经济性信息分布,难以利用数学模型研究国产汽车质量经济性。为从全生命周期研究自主品牌整车企业的汽车质量经济性,指导整车质量改进,本文利用系统动力学(System Dynamics, SD)建模方法构建质量经济性动态评估的 SD 模型,分析自主品牌整车企业的产品质量经济性,从全生命周期视角探究产品质量经济性要素的动态交互影响。

1 国产汽车质量改进过程及质量经济性指标

1.1 汽车产品质量传递与持续质量改进过程

作为典型的装配产品,国产汽车中影响整车质量的因素在不同寿命周期阶段有不同的表征指

标。产品质量的内涵主要包括性能、一致性、耐久性、可靠性、功能服务性和感知质量^[16]。汽车产品的质量定位由汽研院设计部门根据市场定位和客户偏好进行质量功能展开,形成可靠性纲领性文件;为保证产品质量和可靠性指标,在进行关键件生产及外协件采购时实现对外购部件的质量管控,同时控制冲压、焊接、涂装及总装 4 大工艺过程的加工水平和装配质量,确保整车的正常性能参数;为了满足顾客需求,通过制定检验策略对全流程的在制品进行质量检验,整车产品是否满足消费者需求,需根据消费者的反馈进行检验,如图 1 所示。

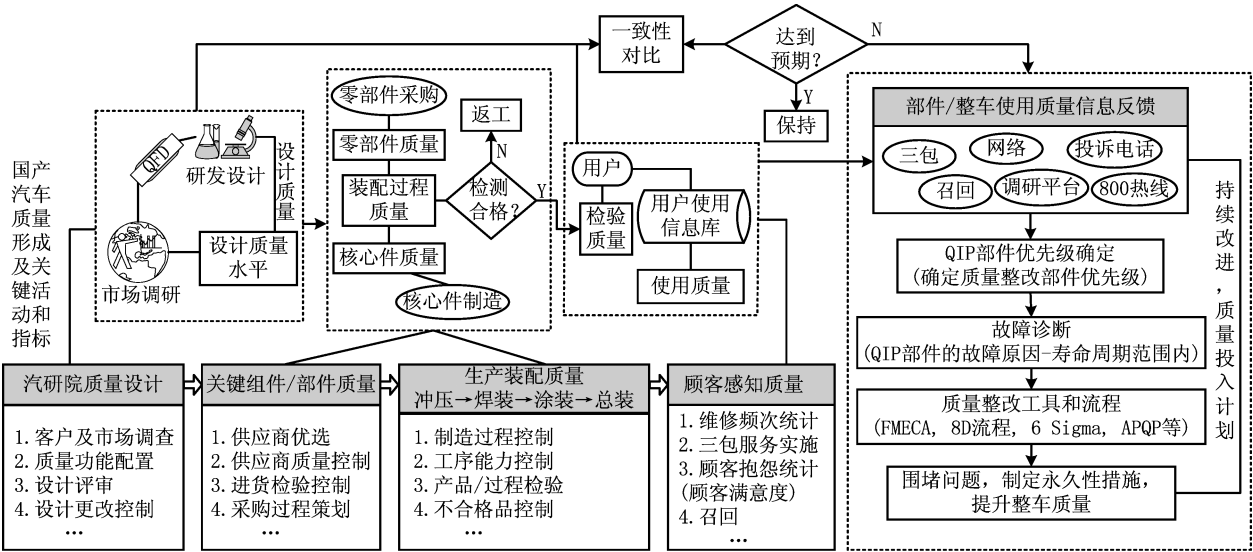


图1 国产汽车质量形成过程及持续质量改善流程

国产汽车质量改进是在产品生产销售后的使用反馈基础上形成的闭环,主机厂根据消费者反馈的使用信息对整车产品的质量进行改进,通过持续质量改善流程和投入计划保障质量的一致性。国产汽车制造集中在四大工艺,整车所需的关键部件和组件常作为外协件由供应商提供,国产汽车质量问题的主要来源为零部件质量问题(80%以上)^[4,17]。因此,对于自主品牌的整车企业而言,基于部件质量改善的整车质量提升计划是主机厂实施持续质量改善项目和问题围堵的关键手段^[4]。

1.2 国产汽车质量经济性指标描述

产品经济性指标除用于功能部件采购决策,还需指导实际中的部门预算分配。本研究借鉴质量成本(Cost of Quality, COQ)、总拥有成本(Total Cost of Ownership, TCO)和寿命周期成本(Lifecy-

cle Cost, LCC)的概念和内涵,构建基于 PAF 分类和寿命周期的二维质量相关成本(Two Dimensional Quality Related Cost, 2D-QRC)框架表征产品的经济性。当前质量成本并无统一认定的概念,但通用的 PAF, Crosby 质量成本模型均强调了由故障或顾客不满造成的质量损失^[6,18-20]。TCO 要求采购过程不仅要关注采购价格,还要关注采购成品的隐性成本;其注重不同场景下的运营成本和服务成本^[21]。产品寿命周期成本指在企业内部及其相关关联方发生的由企业即生产者负担的成本,包括产品从设计、生产、销售、售后服务直到报废全过程发生的成本^[22],从产品生命周期角度度量产品的经济性。本文所述的经济性是产品设计前端至三包期结束范围内的质量相关成本,旨在为外协件采购、工艺、装配等管理决策提供约束,同

时能在实际中指导主机厂的职能部门配置成本预算^[23]。故不仅要关注整车生产过程的质量投入,还需关注生产后产品使用和维修情况,从研发、供应、生产、营销和售后服务的全过程研究国产汽车的质量经济性。

本文借鉴质量成本理论,将全生命周期质量投入和由于质量缺陷造成的机会损失作为衡量汽车产品的经济性指标。PAF 质量成本模型只考虑显性成本,忽视了对企业质量管理、经营活动有重要影响的隐性质量成本。然而随着对隐性损失成本的深入研究,经典 PAF 质量成本模型的损失成本扩展为显性损失成本和隐性损失成本,完善了质量成本的内涵^[24]。基于活动的成本核算(Activity-Based Cost, ABC)也是企业采用较多的质量成本模型,它是基于产品生命周期(市场调研、产品设计、采购、制造、销售、售后)各阶段产生的成本来讨论产品经济性。借助 COQ 和 LCC 概念,本文提出 2D-QRC 指标^[9,25],从 PAF 维度引入隐形成本的概念^[26]来拓展外部损失成本。

本文所研究的质量指标涉及汽车全生命周期阶段,主要从主机厂的质量经济性视角研究质量投入计划。本文借鉴 PP100 指标的统计办法,运用千台车维修频次(R/1000@XMIS, X 表示统计周期, MIS 表示在役期)和千台车顾客抱怨频次(TGW/

1000@XMIX, X 表示统计周期, MIS 表示在役期)反映部件/系统/整车的质量水平,指导质量改善活动。在前期研究基础上,本文采用 R/1000@3MIS, TGW/1000@3MIS 等作为整车/部件的一个统计质量指标^[4,27]。

2 汽车产品质量经济性指标交互的系统动力学模型

系统动力学方法是由麻省理工学院 Forrester 教授^[28]提出的,是以定性、定量相结合,模拟现实系统的仿真方法。该方法根据汽车产品质量形成过程和产品质量经济性指标的分析结果,结合持续质量改善,从“质量设计—采购—制造装配—售后”全生命周期角度构建闭环的汽车产品质量经济性指标交互的系统动力学模型^[27,29]。

2.1 质量经济性指标因果回路图

因果关系图是用于分析复杂系统内部之间变量交互的有向图,由单条因果链(reinforce chain)组成。因果链有正链“+”和平衡链(负链)“-”两种形式,前者表示有向链的始端对末端要素有正面影响,后者反之^[28,30]。选取“采购—制造总装—新车使用”至三包期内产品的质量活动链为研究对象,通过采购和装配过程中可能影响产品质量和质量经济性指标的质量活动,构建全生命周期质量经济性指标交互的因果回路图,如图 2 所示。

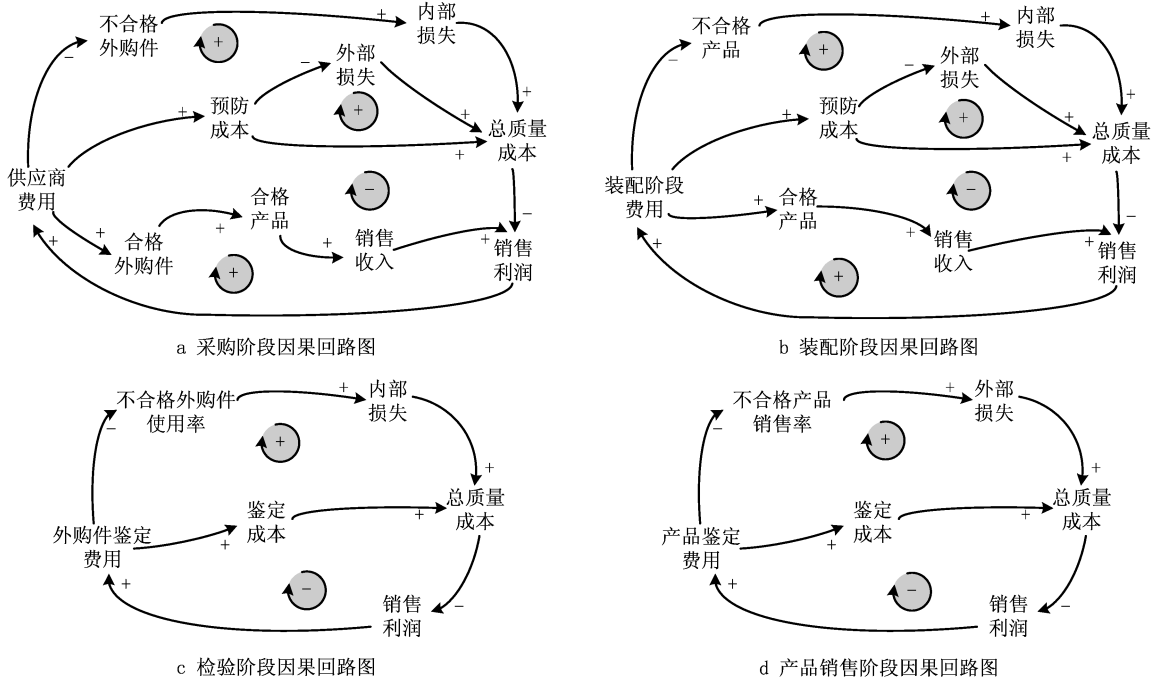


图2 汽车产品全生命周期质量经济性指标交互的因果回路图

2.2 系统边界

本文所构建的汽车全生命周期质量经济性指标交互系统动力学模型具有两层边界。首先本文对全生命周期的研究集中了设计之后的采购、装配和使用过程,主要研究不同质量投入对整车质量经济性的影响^[31];其次本文对全生命周期整车经济性的界定参考 PAF 质量成本框架,不仅考虑传统的质量成本要素,还考虑由顾客抱怨导致的隐形损失^[9],从质量形成过程的关键质量投入活动着手,研究整车产品全生命周期质量经济性指标的交互关系。本文研究包括以下几点假设:①主机厂的利润随着产品质量经济性的提升而增加;②利润计算不考虑非质量经济性提升之外其他(如营销等)活动的影响;③外购件质量性能与供应商费用正相关,即供应商费用越高,外购件质量水平越好;④本文与鉴定成本相关

的产品检验过程不考虑发生两类检验错误的情况;⑤质量经济性包含汽车使用过程中未发生维修但产生顾客抱怨的隐形损失。

2.3 系统动力学流程图构建

根据国产汽车质量活动链和关键指标分析结果,结合因果回路图,构建汽车产品质量经济性指标交互的系统动力学流程图。以整车制造至售后三包期结束(即售出后 36 个在役月)为系统边界,从全生命周期视角研究国产汽车的质量经济性。国产汽车的持续质量改善依赖于质量投入,而主机厂的质量投入计划受销售利润的影响^[32]。为从全生命周期研究国产汽车的质量经济性,本文集成零部件采购子系统、四大工艺系统和售后服务子系统,结合质量改进流程绘制流程图,如图 3 所示。

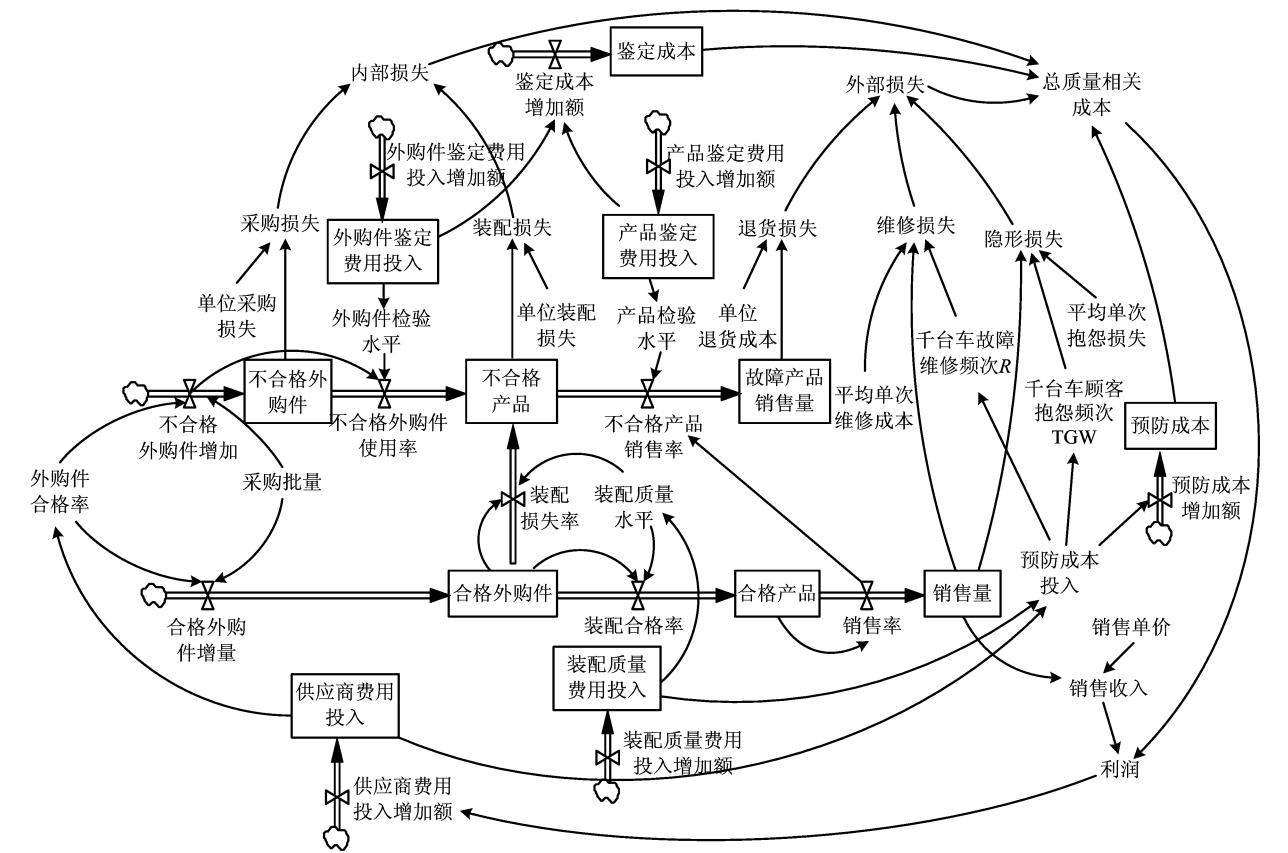


图3 汽车产品质量经济性指标交互的系统流程图

2.4 模型变量及方程式

系统流图主要包括状态变量、速率变量、辅助变量和常量 4 类参数变量,如表 1 所示,其中状态变量

的初值用 N 表示^[28]。本文构建的系统动力学模型中的主要变量和方程式如表 1 所示,主要包括 12 个状态方程、12 个速率方程、17 个辅助方程。

表 1 模型主要变量和方程式

序号	类型	变量名称	缩写	变量方程式	编号
1	状态变量	合格外购件/件	$Hgwgj$	$Hgwgj(T)=Hgwgj(T=1)+T(Hgwgjzl-Zphgl-Zpssl)$	(1)
2		不合格外购件/件	$Bhgwgj$	$Bhegwj(T)=Bhgwgj(T=1)+T(Bhgwgjzl-Bhgwajsyl)$	(2)
3		合格产品/件	$Hgcp$	$Hgcp(T)=Hgcp(T=1)+T(Zphgl-Xsl)$	(3)
4		不合格产品/件	$Bhgcp$	$Bhgcp(T)=Bhgcp(T=1)+T(Bhgwgjsyl+Zpssl-Bhgcpysl)$	(4)
5		销售量/件	Xse	$Xsl(T)=Xsl(T=1)+T\cdot Xsl$	(5)
6		故障产品销售量/件	$Gzcpysl$	$Gzcpysl(T)=Gzcpysl(T=1)+T\cdot Bhgcpysl$	(6)
7		供应商费用投入/(万元/期)	$Gysfytr$	$Gysfytr(T)=Gysfytr(T=1)+T\cdot Gysfytrzje$	(7)
8		装配质量费用投入/(万元/期)	$Zpzlfytr$	$Zpzlfytr(T)=Zpzlfytr(T=1)+T\cdot Zpzltrzje$	(8)
9		外购件鉴定费用投入(万元/期)	$Wgjddfyttr$	$Wgjddfyttr(T)=Wgjddftr(T=1)+T\cdot Wgjddfyttrzje$	(9)
10		产品鉴定费用投入(万元/期)	$Cpjdfytr$	$Cpjdfytr(T)=Cpjdfytr(T=1)+T\cdot Cpjdfytrzje$	(10)
11		预防成本/万元	$Yfcb$	$Yfcb(T)=Yfcb(T=1)+T\cdot Yfcbzje$	(11)
12		鉴定成本	$Jdcb$	$Jdcb(T)=Jdcb(T=1)+T\cdot Jdcbzje$	(12)
13	速率变量	合格外购件增量/(件/期)	$Hgwgjzl$	$Hgwgjzl=Wgjhgl\cdot Cgpl$	(13)
14		不合格外购件增量/(件/期)	$Bhgwaizl$	$Bhgwgjzl=Cgpl(1-Wgjhgl)$	(14)
15		装配损失率/(件/期)	$Zpssl$	$Zpssl=Zppl(1-Zpzlsp)$	(15)
16		装配合格率/(件/期)	$Zphgl$	$Zphgl=Zppl\cdot Zpzlsp$	(16)
17		不合格外购件使用率/(件/期)	$Bhgwgjsyl$	$Bhgwgjsyl=Bhgwgjz(1-Wgjjsyp)$	(17)
18		销售率/(件/期)	Xsl	$Xsl=Hgcp$	(18)
19		不合格产品销售率/(件/期)	$Bhgcpysl$	$Bhgcpysl=Xsl(1-Cpjysp)$	(19)
20		鉴定成本增加额/万元	$Jdcbzje$	$Jdcbzje=Wgjddfyttr+Cpjdfytr$	(20)
21		预防成本投入/(万元/期)	$Yfcbtr$	$Yfcbtr=Gysfytr+Zpzlfytr$	(21)
22		供应商费用投入增加额/(万元/期)	$Gysfytrzje$	与利润及 QIP 管理相关 $Gysfytr=f(QIP)$	(22)
23		外购件鉴定费用投入增加额/(万元/期)	$Wgjddfyttrzje$	与利润及 QIP 管理相关 $Wgjddfyttrzje=f(QIP)$	(23)
24		产品鉴定费用投入增加额/(万元/期)	$Cpjdfytrzje$	与利润及 QIP 管理相关 $Cpjdfytrzje=f(QIP)$	(24)
25		外购件合格率/(件/期)	$Wgjhgl$	与供应商管理费用相关的表函数 $Wgjhgl=f(Gysfytr)$	(25)
26		采购损失/万元	$Cgsscb$	$Cgss=Bhgwgj\cdot Dwcgss$	(26)
27		装配损失/万元	$Zpsscb$	$Zpss=Bhgcp\cdot Dwzpps$	(27)
28		内部损失/万元	$Nbsscb$	$Nbss=Cgss+Zpss$	(28)
29		外购件检验水平/%	$Wgjjsyp$	与外购件鉴定费用投入相关 $Wgjjsyp=f(Wgjddfyttr)$	(29)
30		产品检验水平/%	$Cpjysp$	与产品鉴定费用投入相关 $Cpjysp=f(Cpjdfytr)$	(30)

续表 1

31	装配质量水平/%	$Zpzlsp$	与装配质量费用投入相关 $Zpzlsp=f(Zpzlftytr)$	(31)
32	千台车维修频次	$R/1000$	$R/1000$ =与预防成本相关的表函数	(32)
33	千台车顾客抱怨频次	TGW	与预防成本相关的表函数 $TGW/1000=f(Yfcb)$	(33)
34	退货损失/万元	$Thss$	$Thss=Dwthss \cdot Gzcpysl$	(34)
35	维修损失/万元	$Wxss$	$Wxss=Dwwxcb \cdot R/1000 \cdot Xsl \cdot 10$	(35)
36	隐形损失/万元	$Yxss$	$Yxss=Pjdcbyss \cdot TGW \cdot Xsl \cdot 10$	(36)
37	外部损失/万元	$Wbss$	$Wbss=Thss+Wxss+Yxss$	(37)
38	总质量相关成本/万元	$Zzlxgcb$	$Zzlxgcb=Yfcb+Jdcb+Nbss+Wbss$	(38)
39	预防成本投入/万元	$Yfcbtr$	$Yfcbtr=Gysfytr+Zpzlftytr$	(39)
40	销售收入/万元	$Xssr$	$Xssr=Xsl \cdot Xsdj$	(40)
41	利润	Lr	$Lr=Xssr-Zzlxgcb$	(41)
42	单位采购损失/(万元/万台)	$Dwcgss$	136	~
43	采购批量/万台	$Cgpl$	1.5	~
44	单位装配损失/(万元/万台)	$Dwzpss$	272	~
45	装配批量/(万辆/期)	$Dwpl$	1.28	~
46	单位退货损失/(万元/万台)	$Dwthss$	500	~
47	单位维修成本/(万元/万台)	$Dwwxcb$	46	~
48	销售单价/(万元/台)	$Xsdj$	8.89	~

3 仿真实验研究

3.1 参数设置

以 C 公司近 3 年(36MIS)的质量改善实践为例验证构建的仿真模型,以 3 个自然月(3MIS)为仿真步长,模拟的时段包括 36 个周期,系统参数从 C 公司的实际数据及与从事质量改善管理的质量专员访谈中获取。

为探究整车全生命周期质量经济性指标的交互关系,在实际仿真过程中参考质量改善实践历史,由于同一周期($T=3MIS$)的质量改善活动并非为同一故障单元,可能存在重叠,为逼近整车企业的质量改善实践,用经验表函数代替质量成本数学模型,来反映质量投入要素对质量指标的影响,包括外购件合格率(如表 2)、外购件检验水平(如表 3)、千台车维修频次(如表 4)和千台车顾客抱怨频次(如表 5)。

表 2 供应商费用投入影响外购件合格率的经验表函数

万元

$Gysfytr$	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	45	50	60	80	100
$Wgjhgsl$	0.800	0.802	0.804	0.806	0.808	0.810	0.820	0.840	0.880	0.920	0.930	0.936	0.940	0.944	0.948

表 3 外购件鉴定费用影响检验水平的经验表函数

万元

$Wgjddfyttr$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$Wgjjsyp$	0.940 0	0.960 0	0.970 0	0.975 0	0.978 0	0.980 0	0.981 0	0.981 5	0.982 0	0.982 5	0.983 0

表 4 预防成本影响千台车维修频次 $R/1000$ 的经验表函数

万元/ 10^3

$Yfcb$	10	20	30	40	45	50	55	60	65	70	80	90	100	110	120	130
$R/1000$	500	495	485	470	450	430	405	340	345	320	280	250	230	220	215	210

表 5 预防成本影响千台车顾客抱怨频次 $TGW/1000$ 的经验表函数

万元/ 10^3

$Yfcb$	10	20	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80	90	110	120	130
$TWG/1000$	8.0	7.9	7.7	7.4	7.0	6.5	5.9	5.2	4.6	4.2	3.9	3.4	3.2	2.8	2.6	2.5

根据刘东才^[33]的研究,装配质量水平受装配质量投入影响,而与检测费用无关,本文假设装配水平受装配费用投入的函数关系为

$$Zpzlfytr = ae^{b \cdot Zpzlsp} \quad (42)$$

式中 a, b 为常数,实际中的装配质量投入具备临界条件,在临界范围内,不同企业的装配质量水平受装配质量费用投入的影响

$$Zpzlsp = \frac{\ln(Zpzlfytr/a)}{b} \quad (43)$$

基于上述分析,本文研究对象企业的装配质量水平与装配质量投入函数的关系如式(44)所示,参数 α, β 和最低装配水平 q_l 取值与行业和对对象企业的实际生产水平有关。

$$Zpzlsp = \begin{cases} q_l, & Zpzlfytr \leq \alpha; \\ \frac{\ln(Zpzlfytr/a)}{b}, & \alpha < Zpzlfytr < \beta; \\ 1 - 3.4 \times 10^{-6}, & Zpzlfytr > \beta. \end{cases} \quad (44)$$

最低质量水平 q_l 为当前自主品牌整车企业装配质量水平 3 Sigma,即 $q_l = 93.32\%$,最高质量水平取 6 Sigma。

3.2 模型测试

为保证模型的有效性和实用性,需对系统动力学模型进行测试,主要包括量纲一致性测试、机械错误测试(逻辑错误)和行为再现能力测试(有效性检验)^[34-35]。本文借助 Vensim PLE 对模型进行仿真实验,从而验证本文构建系统动力学模型的有效性和科学性。在前文变量描述及方程式中已明确说明系统动力学模型中变量的单位,满足量纲一致性要求。利用结构行为验证仿真模型的逻辑性^[36],本文流程图根据“采购、装配及使用阶段”的质量传递和质量形成路径构建,满足随着质量活动投入提升产品质量水平的逻辑。同时,通过对比分析真实值与仿真预测值,并进行单因素方差分析^[35],保证所建模型的科学性和有效性。

3.3 仿真结果分析

本文借助 C 企业的质量改善经验,通过增加供应商费用投入,仿真关键质量经济性指标变量的变化规律。仿真实验采取平稳投入供应商费用以提升零部件质量的质量改善策略,分析预防成本、鉴定成本、内部损失、外部损失、质量相关总成本及 R/1000, TGW/1000 等质量经济性指标的变化趋势如图 4 所示;同时千台车维修频次、千台车顾客抱怨频

次及隐形损失等质量指标的变化如图 5 所示。

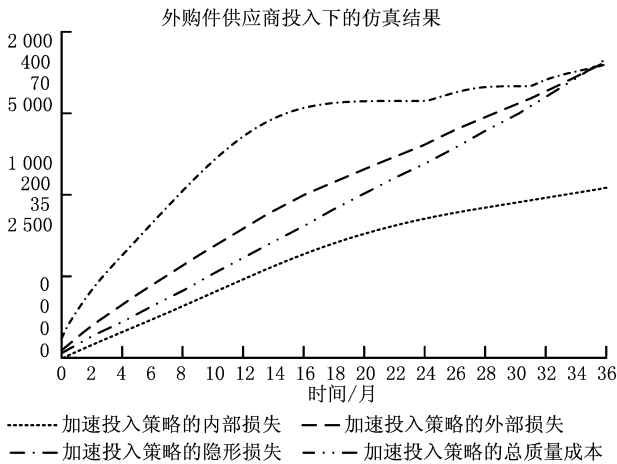


图4 质量经济性状态变量的变化规律

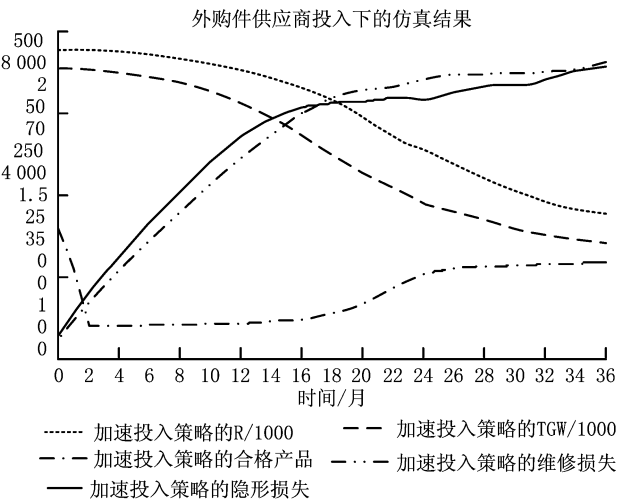


图5 质量经济性指标的变化规律

由于经济性指标为状态变量,呈持续增加变化趋势,其斜率能够表征当期各经济性要素的变化。为了更加清晰地反映图 4 的规律,绘制各期的经济性要素趋势图,总质量相关成本及其关键要素每一期的变化规律如图 6 和图 7 所示。通过图 6 增加供应商费用投入时,损失成本显著降低,并在一定范围内显著降低总质量相关成本,提升产品的经济性;但在持续增长过程中,由于对损失减少难以发挥显著效果,导致供应商费用投入的增加量大于损失的减少量,从而使单期总质量成本增加,降低了经济性。与 Naidu 的数学模型验证^[18]和 Arman 的仿真结论^[37]类似,本文研究结论符合质量管理大师 Juran 和 Feigenbaum 的质量成本模型,图 6 和图 7 中的“总质量相关成本”存在最低点,且在 24T 附近,将其作为质量改善的目标,持续实施质量改善活动。

由图 5 可知,当供应商费用投入增加时,产品的合格率提高,能够降低 $R/1000$ 和 $TGW/1000$,而且关键部件质量的提升不仅显著影响产品质量,还影响顾客满意(顾客抱怨)与质量成本。通过上述分析可知,随着供应商费用投入的增加,在一定范围内能够改善整车质量经济性。

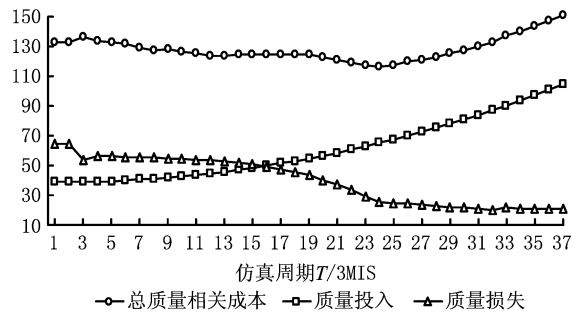


图6 每一期总质量相关成本及质量成本要素变化规律

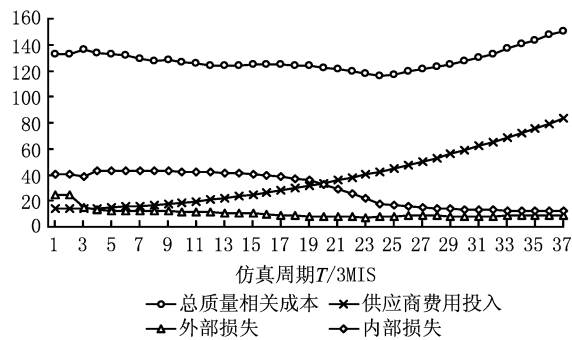


图7 每一期关键经济性指标变化规律

3.4 质量改善投入策略

为辅助自主品牌汽车企业的整车质量改进和质量投入计划的科学制定,通过情景设置和灵敏度分析,仿真不同质量投入参数对整车质量经济性指标的影响规律^[33],指导企业质量改善投入决策。

(1)不同质量活动投入下质量经济性指标变化的对比分析

本文系统动力学模型中的主要质量活动投入包括供应商费用(P_1)、外购件鉴定费用(A_1)、装配质量费用(P_2)投入和产品鉴定费用(A_2)投入,为了探究不同质量活动对整车质量经济性的影响,仿真不同质量投入策略下,关键质量经济性指标的变化规律,如图 8~图 10 所示。

图 8 和图 9 分别对比采购和装配制造过程中,在预防成本要素和鉴定成本要素投入条件下,整车质量经济性指标的变化规律;图 10 对比同类别质量成本要素在不同阶段投入时,质量经济性指标的

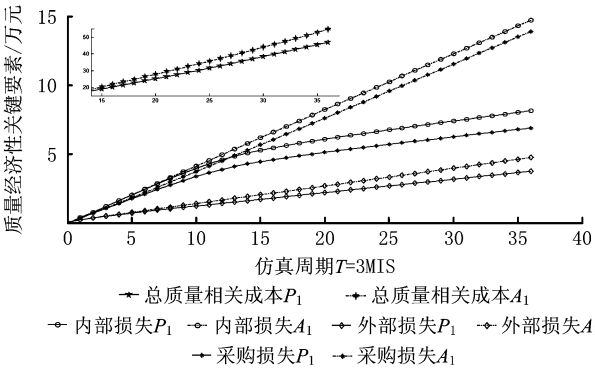


图8 采购阶段不同质量活动下质量经济性关键指标的变化规律

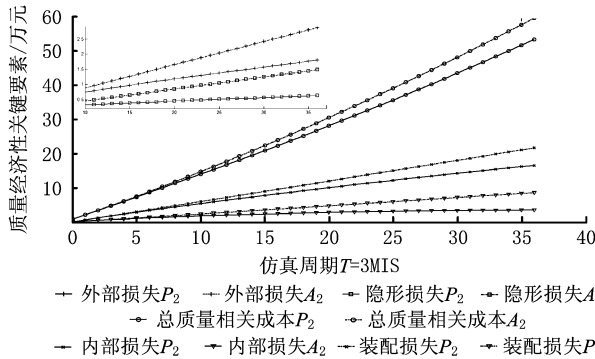


图9 装配制造阶段不同质量活动下质量经济性关键指标的变化规律

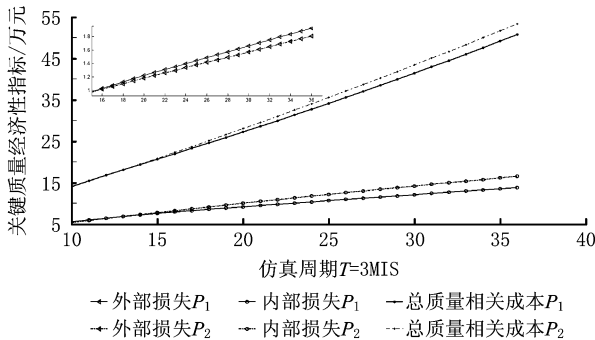


图10 不同预防质量活动下关键质量经济性指标的变化规律

变化规律。由图 8 可知,相比外购件鉴定费用投入的质量活动,增加外购件供应商费用投入,即选择高质量水平的零部件,能够显著改善总质量相关成本。图 9 显示了类似结论,即相比装配产品鉴定费用投入,装配质量投入对提升整车质量经济性更加有效。零部件性能和装配水平的提高能够显著提升产品的质量经济性,因此主机厂在制定质量改善投入计划时,相比外购件和产品检验投入策略,优先从提高外购件供应商质量和制造总装水平入手。图 8 和图 9 表明,相比鉴定成本的投入,预防成本投入能够有效改善整车质量经济性,这与质量大师戴明博士^[11]的“质量是生产,而非检验出来”的质量管理结论一致。

从图 10 可知,相比装配过程的质量投入,采购过程的质量活动投入能够更有效地提升整车的质量经济性,该结论与 Zhou 等^[38]研究的结论“制造系统中前端工作站对系统可靠性具有更加显著影响”一致,本研究通过系统动力学仿真实验将该结论从制造系统推广至供应链,这要求主机厂在实施质量活动投入时要从源头控制,将质量缺陷控制在源头,强调了质量设计的重要性。

(2)不同投入策略下的质量经济性指标变化规律分析

通过上述仿真结论,相比外购件鉴定费用和装配质量费用投入,供应商费用投入能够高效提升产品的质量经济性指标,而且对外购件质量的源头控制是改善关键部件及整车质量经济性的主要途径。实际中存在不同的供应商费用投入策略,而且投放策略与企业的质量改善目标和盈利状况相关;为了验证不同供应商费用投入策略下的指标变化,通过对比实验,对平稳投入、加速投入、减速投入 3 种策略下关键指标的变化规律进行仿真,如图 11 所示。

由图 11 可知,3 种投入策略均有效改善了整车质量指标($R/1000$ 和 $TGW/1000$),通过增加供应商费用提高外购件质量经济性能改善整车的质量经济性指标,且不同质量投入策略下整车质量改善的效率不同。通过图 6 可知,在质量改善投入 $t=24T$ 时,总质量相关成本最低;不同投入策略下由于为等额投入,总质量相关成本的改善效果变化不大。但是通过灵敏性分析可知,减速投入和加速投入分别会促进(19T)和延迟(27T)最佳质量经济性区域的逼近,因此质量管理部门可以依据企业需求和市场环境选择不同的投入策略来促进产品质量经济性的提升。

4 结束语

本文结合自主品牌整车质量改善实践,运用系统动力学建模方法,从全生命周期视角研究国产汽车质量经济性及质量投入策略,利用 2D-QRC 框架反映了整车的经济性,构建了质量经济性指标交互的系统动力学模型,分析了质量投入时整车质量经济性指标的变化规律。本文提出的主要质量经济性指标包括 $R/1000@3MIS$ 、 $TGW/1000@3MIS$ 、总质量相关成本和 2D-QRC 的相关成本要素指标。通过仿真实验,得出以下结论:

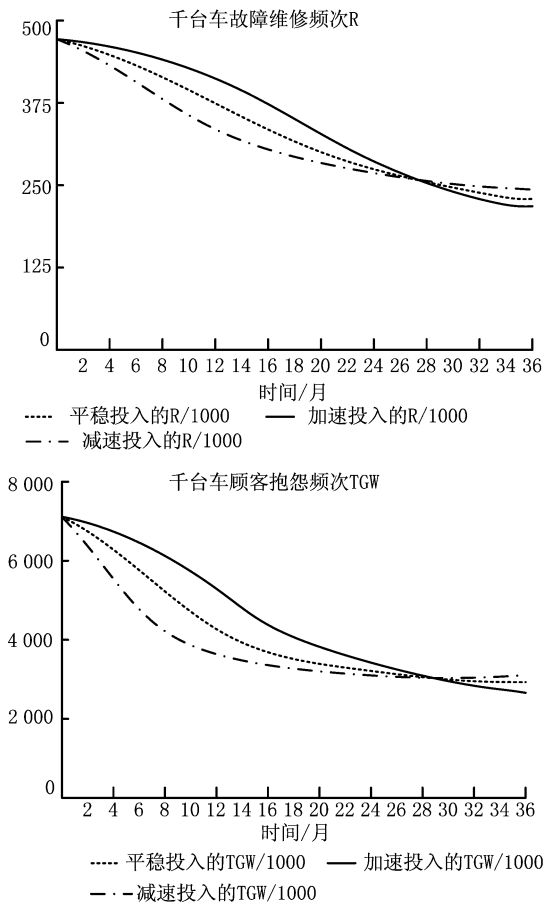


图11 不同供应商费用投入策略下关键指标的变化规律

(1)通过供应商费用投入选择高质量的零部件,能够改善整车 $R/1000@3MIS$ 和 $TGW/1000@3MIS$,而且总质量相关成本保持相对稳定甚至下降。可知,在一定程度内的质量活动投入可以有效改善整车的质量经济性,并通过最优总质量相关成本质量改善目标区域。

(2)不同质量活动对质量经济性指标的改善效率不同,相比鉴定成本要素,预防成本的持续投入有更高的改善效率。

(3)质量形成过程前端的质量活动投入比后端的质量投入更加有效,相比通过装配质量投入提升装配质量,提升外购件质量水平能够更加高效地改善整车质量水平。

(4)通过供应商费用投入提升关键部件质量水平,进而改善整车的质量经济性,是一种高效的质量活动,而且不同投入策略能够以不同效率达到计划最优质量经济性区域,主机厂可依据企业需求选择合适的投入策略,促进产品质量经济性的改善,提升整车竞争力。

然而,本文的研究是有边界和一定假设前提的,

文中以 2D-QRC 要素和统计指标 $R/1000@3MIS$, $TGW/1000@3MIS$ 作为反映整车质量经济性的关键指标,实际中的质量总相关成本最低并非意味着产品的质量经济性最高,当质量相关总成本增加对应的价值增量大于成本增量时,对主机厂而言仍然是经济的,这是由于缺乏规范的质量经济性指标导致的。质量经济性不仅与成本有关,还与顾客价值和质量收益相关;因为顾客抱怨会造成企业的隐形损失,而且顾客抱怨往往会潜在影响潜在消费者,所以从微观视角研究顾客抱怨的传播规律对质量经济性的研究十分必要。下一步将围绕质量收益的质量经济性指标扩展本文系统动力学模型,借助疫病传播模型描述顾客抱怨的传播,以多智能体建模仿真抱怨群体的行为和顾客抱怨的传播,构建带多智能体的混合系统动力学模型,并拓展应用 Anylogic 仿真实验(包括智能体建模和系统动力学建模的混合模型),弥补 Vensim PLE 无法处理智能体模型的局限,进而研究更加贴近生产实践的质量投入策略。

参考文献:

- [1] CHEN Caiyuan. A research on Chinese auto parts industry upgrading based on industry convergence[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2016(in Chinese). [陈才源. 基于产业融合的中国汽车零部件产业升级研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2016.]
- [2] ZHOU Fuli, WANG Xu, LIM M K, et al. Sustainable recycling partner selection using fuzzy DEMATEL-AEW-FVIKOR: a case study in small-and-medium enterprises (SMEs) [J]. Journal of Cleaner Production,2018,196:489-504.
- [3] GUJARDO J A, COHEN M A, NETESSINE S. Service competition and product quality in the U. S. automobile industry[J]. Management Science,2016,62(7):1860-1877.
- [4] ZHOU F, WANG X, LIN Y, et al. Strategic part prioritization for quality improvement practice using a hybrid MCDM framework: a case application in an auto factory[J]. Sustainability,2016,8(6):559-570.
- [5] JURAN J M, GODFREY A B. Quality handbook[J]. New York, N. Y., USA: Republished McGraw-Hill, 1999: 173-178.
- [6] SCHIFFAUEROVA A, THOMSON V. A review of research on cost of quality models and best practices[J]. International Journal of Quality & Reliability Management,2006,23(6): 647-669.
- [7] CHIADAMRONG N. The development of an economic quality cost model[J]. Total Quality Management & Business Excellence,2003,14(9):999-1014.
- [8] ŠATANOV A, ZAVADSKY J, SEDLIČIKOV M, et al. How Slovak small and medium manufacturing enterprises maintain quality costs: an empirical study and proposal for a suitable model[J]. Total Quality Management & Business Excellence,2015,26(11/12):1146-1160.
- [9] ZHOU F, WANG X, WU N, et al. Quality cost framework based on lifecycle theory and PAF model[C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Project Management. Sydney, Australia: Aussino Academic Publishing House,2016: 730-735.
- [10] SHANG Shanshan, YOU Jianxin. Modeling research on the relationship between quality cost and quality level[J]. Statistics & Decision,2010(7):72-75(in Chinese). [尚珊珊, 尤建新. 质量成本与质量水平关系及其模型研究[J]. 统计与决策, 2010(7):72-75.]
- [11] LIM C, SHERALI H D, GLICKMAN T S. Cost-of-quality optimization via zero-one polynomial programming[J]. IIE Transactions,2014,47(3):258-273.
- [12] AŽMAN S, GOMIŠČEK B. Functional form of connections between perceived service quality, customer satisfaction and customer loyalty in the automotive servicing industry[J]. Total Quality Management & Business Excellence,2015,26(7/8):888-904.
- [13] XIN Zhigao, ZHAO Xu. Quality cost optimization model based on customer satisfaction[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications : Social Science Edition,2010,12(2):57-60(in Chinese). [辛制高, 赵旭. 基于顾客满意度的质量成本优化模型[J]. 北京邮电大学学报: 社会科学版,2010,12(2):57-60.]
- [14] ZHOU F, WANG X, CHEN S, et al. Research on quality cost model (QCM) based on quality improvement procedure (QIP) in an auto-factory[J]. International Journal of Database Theory and Application,2017,10(1):14-21.
- [15] PAN Yanhua, XIAO Jing. Quality cost model based on customer satisfaction[J]. Systems Engineering,2015,33(1):74-80(in Chinese). [潘燕华, 肖静. 基于顾客满意的质量成本模型[J]. 系统工程,2015,33(1):74-80.]
- [16] MURTHY D P, BLISCHKE W R. Warranty management and product manufacture [M]. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media,2006.
- [17] HOYLE D. Automotive quality systems handbook[M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier,2000.
- [18] NAIDU N V R. Mathematical model for quality cost optimization[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2008,24(6):811-815.
- [19] TSAI W H, HSU W. A novel hybrid model based on DEMATEL and ANP for selecting cost of quality model development[J]. Total Quality Management & Business Excellence, 2010,21(4):439-456.
- [20] PIRES A R, COCIORVA A, SARAIVA M, et al. Management of quality-related costs. the case of Portuguese companies[J]. Total Quality Management & Business Excellence,

- 2013,24(7/8):782-796.
- [21] BHUTTA K S, HUQ F. Supplier selection problem: a comparison of the total cost of ownership and analytic hierarchy process approaches[J]. Supply Chain Management, 2002, 7(3):126-135.
- [22] LIPMAN T E, DELUCCHI M A. A retail and lifecycle cost analysis of hybrid electric vehicles[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2006, 11(2): 115-132.
- [23] TUOMINEN V. Cost modeling of inspection strategies in automotive quality control[J]. Engineering Management Research, 2012, 1(2): 33-45.
- [24] GAO Nini, LIU Zixian. A review on implication, estimation method and control method of hidden costs[J]. Science Research Management, 2014, 35(9): 69-78 (in Chinese). [高妮妮, 刘子先. 隐性成本含义、估测方法和控制方法研究述评[J]. 科研管理, 2014, 35(9): 69-78.]
- [25] HE Ting, ZHAN Jieting, ZHAN Dechen, et al. Quality costing method based on business rules in enterprise[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(2): 381-386 (in Chinese). [何霆, 詹婕婷, 战德臣, 等. 基于业务规则的企业质量成本核算方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(2): 381-386.]
- [26] SNIESKA V, DAUNORIENE A, ZEKEVICIENE A. Hidden costs in the evaluation of quality failure costs[J]. Engineering Economics, 2013, 24(3): 176-186.
- [27] ZHOU Fuli, WANG Xu, CHEN Shan, et al. COQ math model case study for self-brand automobile industry[C]// Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Washington, D. C., USA: IEEE, 2015: 1392-1396.
- [28] LI Jian, ZHANG Wenwen, BAI Xiaoyun, et al. System-dynamics-based factor analysis for the speed of emergency materials transportation[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2015, 35(3): 661-670 (in Chinese). [李健, 张文文, 白晓昀, 等. 基于系统动力学的应急物资调运速度影响因素研究[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(3): 661-670.]
- [29] ZHOU Fuli, WANG Xu, LIN Yun, et al. Priority establishment of quality improvement procedure part based on fuzzy-VIKOR method[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(12): 2809-2818 (in Chinese). [周福礼, 王旭, 林云, 等. 基于 F-VIKOR 的质量改善部件优先级确定[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(12): 2809-2818.]
- [30] ZHANG Junrong, WANG Zidan, TANG Ling, et al. The simulation of carbon emission trading system in Beijing-Tianjin-Hebei region: an analysis based on system dynamics[J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(3): 1-8 (in Chinese). [张俊荣, 王孜丹, 汤铃, 等. 基于系统动力学的京津冀碳排放交易政策影响研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(3): 1-8.]
- [31] ZHOU Fuli, WANG Xu, CHEN Shan, et al. Quality improvement procedure (QIP) based on 8D and six sigma pilot programs in automotive industry[J]. Advances in Economics, Business and Management Research, 2016, 16: 275-281.
- [32] ZHOU Fuli, WANG Xu, GOH M, et al. Supplier portfolio of key outsourcing parts selection using a two-stage decision making framework for Chinese domestic auto-maker[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 128: 559-575.
- [33] LIU Dongcai, LUO Zheng, ZHANG Wenhua. Research on optimal quality-cost model[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(5): 160-161 (in Chinese). [刘东才, 雒征, 张文华. 最佳质量成本模型的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(5): 160-161.]
- [34] LIU Pei, MU Dong, XIA Hui. System dynamics model for coordination among stakeholders of regional freight systems[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(3): 859-869 (in Chinese). [刘沛, 穆东, 夏辉. 基于系统动力学的区域运输多主体利益协调[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(3): 859-869.]
- [35] XU Y, SZMEREKOVSKY J. System dynamic modeling of energy savings in the US food industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 165: 13-26.
- [36] YAN Haiyan, LIU Hui, XU Bo. Research on dynamic integration capability in cross-border merger and acquisition based on system dynamics[J]. Journal of Systems Science, 2016, 24(1): 70-74 (in Chinese). [阎海燕, 刘慧, 徐波. 基于系统动力学的企业跨国并购动态整合能力研究[J]. 系统科学学报, 2016, 24(1): 70-74.]
- [37] SADREDDIN A, SAWAN R, SCHIFFAUEROVA A. Using system dynamics approach to model cost of quality in the procurement process of the construction industry[EB/OL]. [2017-07-14]. <http://j-s-d.jp/en/2014APCProceedings/papers/P1012.pdf>, 2014.
- [38] ZHOU Fuli, WANG Xu, LIN Yun. Production effectiveness-based system reliability calculation of serial manufacturing with checking machine[J]. Journal of Computers (Taiwan), 2016, 27(3): 201-211.

作者简介:

周福礼(1991—),男,河南洛阳人,讲师,博士,研究方向:汽车质量管理、工业工程、大数据商务分析,E-mail:deepbreath329@outlook;

王旭(1963—),女,四川南充人,教授,博士,博士生导师,研究方向:质量管理、电子商务、现代物流工程等;

叶正梗(1989—),男,河南商丘人,博士研究生,研究方向:质量可靠性、工业工程等;

林云(1976—),男,四川成都人,副教授,博士,研究方向:现代物流管理、电子商务、工业工程等;

何彦东(1988—),男,河南周口人,博士研究生,研究方向:城市物流、工业工程、优化算法等。