

DOI: 10.3901/JME.2022.12.270

基于系统动力流图的核电装备智能制造 协同质量价值建模^{*}

徐梦宇¹ 易茜¹ 单玉忠² 熊世权¹ 曹华军¹ 易树平¹

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400030;

2. 中广核工程设计有限公司 深圳 518124)

摘要: 针对核电装备建造过程中各参与主体因经济利益不同各自为战而造成的协同管理成本增加等问题, 亟需解析协同质量价值形成, 为此, 提出一种基于系统动力流图的核电装备智能制造协同质量价值建模方法。界定核电装备智能制造协同质量价值的内涵, 以协同质量管理活动为基础, 分析其协同质量价值形成及增值过程, 通过 Vague 集方法筛选出 34 个协同质量价值关键影响因素; 用价值链方法构建核电装备智能制造协同质量价值链模型, 在此基础上应用 Vensim PLE7.3.5 软件建立其系统动力流图, 利用综合集成赋权法确定流图中各参数权重; 基于系统动力流图分析协同质量价值增值过程的动态行为, 揭示关键管理要素对协同质量价值增值的影响作用, 并据此得出核电装备智能制造协同质量价值增值策略。研究为建立价值驱动的协同质量保障机制、实现核电装备全价值链价值最大化提供新的研究思路 and 方向。

关键词: 核电装备; 协同质量价值; 系统动力流图; 智能制造

中图分类号: TM623

Collaborative Quality Value Modeling for Intelligent Manufacturing of Nuclear Power Equipment Based on System Dynamic Flow Diagram

XU Mengyu¹ YI Qian¹ SHAN Yuzhong² XIONG Shiquan¹ CAO Huajun¹ YI Shuping¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030;

2. China Guangdong Nuclear Engineering Co. LTD, Shenzhen 518124)

Abstract: In view of the problem of increasing collaborative management cost caused by different economic interests of each participant in the process of nuclear power equipment construction, it is urgent to analyze the formation of collaborative quality value. Therefore, a collaborative quality value modeling method of nuclear power equipment intelligent manufacturing based on system dynamic flow diagram is proposed. The connotation of collaborative quality value in intelligent manufacturing of nuclear power equipment is defined. Based on collaborative quality management activities, the formation and increment process of collaborative quality value are analyzed, and 34 key influencing factors of collaborative quality value are screened by Vague set method. The collaborative quality value chain model of intelligent manufacturing of nuclear power equipment is constructed by value chain method. On this basis, Vensim PLE7.3.5 software is used to establish the dynamic flow diagram of the system, and the weight of each parameter in the flow diagram is determined by comprehensive integration weighting method. Based on this system dynamic flow diagram, the dynamic behavior of collaborative quality value increment process is analyzed to reveal the influence of key management factors on collaborative quality value increment, and the strategy of collaborative quality value increment of nuclear

^{*} 国家重点研发计划(2020YFB1711700)和中央高校基本科研业务费专项(2021CDJYJH022)资助项目。20211019 收到初稿, 20220125 收到修改稿

power equipment is obtained. This study provides a new research idea and direction for establishing value-driven collaborative quality assurance mechanism and maximizing the value of the whole value chain of nuclear power.

Key words: nuclear power equipment; collaborative quality value; system dynamic flow diagram; intelligent manufacturing

0 前言

核电是“零碳”能源体系的基荷电源，符合国家双碳目标的重大战略需求，是亟待发展的领域^[1]。但因存在放射性物质释放的潜在风险，其质量与安全问题成为社会关注的焦点。国家核安全局颁布的 HAF003 要求核电装备建造所有参与单位在通过 ISO9001 认证后，还须按其要求建立质保大纲，质量管控严苛程度远高于一般机电装备。

核电装备建造是一个高度复杂的系统工程，涉及数十万级零部件和 800+ 供应商，具有全生命周期跨世纪、参与企业多、业务领域广、信息多源异构等特点。从核安全考虑，HAF003 规定了为使物项达到相应质量要求所必需的基本活动、为保证建立和实施质保大纲所必需的活动、为验证质量要求达成程度并形成相应文件证据所必需的监督活动^[2]。为落实这些要求，我国核电建造行业形成了“凡事有章可循、凡事有人负责、凡事有人验证、凡事有据可查”（简称“四个凡事”原则）的核安全质量文化。由此可见，由于核电终端产品“0 召回”的严酷质量要求，管控活动焦点前移，形成了“多方协作，责任共担”的协同质量管理模式，不同于传统的“谁出问题，谁负责”供应链型质量管理模式^[3]。具体表现为跨领域质量业务协同、跨平台质量信息传递、跨企业质量流程对接（简称“三跨”）的特征。

但在“三跨”协同过程中，企业个体由于经济利益不同，往往采取主观价值取向的自我保护策略，形成各自为战的态势^[4]，造成产品建造过程和谐性降低和协同质量管理难度增加的问题。而企业群体却表现出对协同质量管理的合作理性，要求加大协同质量管理活动和成本投入来达成产品整体质量目标，但当投入超过产出，将造成全价值链经济效益下降。企业个体及群体对协同质量管理认知的不统一，使其容易陷入个体认知有限和群体合作理性冲突，加大了协同管理的难度。因此本文引入“协同质量价值”来表征协

同质量管理的价值创造过程。所提的协同质量价值是指以实现全价值链价值最大化为目标，应用智能制造技术，辅助基本质量活动开展，兼顾各方利益，消除非增值活动，助力“三跨”协同质量管控，实现业主满意度提高、建造过程和谐性提高及协同管控成本降低的价值创造。因此对协同质量价值进行研究，解析其形成及增值过程成为价值驱动下核电装备协同质量管理亟待解决的问题。

近年来，智能制造技术的发展为核电装备协同质量管理提供了新模式、新方法和新手段，国内外许多学者在该领域开展了研究。如 JUN 等^[5]设计了核电装备数字化在线协同设计系统，形成了基于模型和广泛协作的设计范式。GUO 等^[6]搭建了集专业工程、工作协调、知识管理等于一体的数字化核电装备设计平台，解决了多专业协作不便问题。隋阳等^[7]研发了核电厂安全生产标准化管理信息系统，用以解决信息共享难的问题。BENSI^[8]提供了不同数据源融合和模型集成的结构化框架，利用实时信息流进行核电建造在线风险评估和故障诊断。

由于协同效应具有经济性特征，企业参与协作进行质量提升会带来成本与收益的降低或提升，从而使企业感知协同质量管控带来的价值^[9]。而个体有限理性使其在追求个体利益最大化时可能损害其他成员的利益，难以实现全价值链经济效益最大化^[10]。因此，大量研究聚焦如何解决质量管控过程中的利益冲突并发挥协同效应。WANG 等^[11]采用单相静态博弈模型，研究了信息不对称下复杂装备供应商质量投入不足导致机会主义行为的原因。冯良清等研究了复杂产品项目流程模块化分析方法，得出了不同模块化和敏感度情况下的管理策略^[12]。张映锋等^[13]研究了底层制造资源智能化建模及其自适应协同优化方法，用以提升制造系统透明性和高效协同性。张巧可等^[14]认为激励是供应商加强合作、改进质量的内在动力，研究了基于质量意识的复杂产品质量控制激励策略。一些学者充分考虑企业间的价值关系。NG 等^[15]揭示了感知控制授权和

伙伴关系在企业价值关系调整中的作用,对企业间合同模式进行了优化设计。李亚平等^[16]揭示了协同设计的本质是合作利益分配,构建了面向质量的复杂装备多主体协同设计网络模型。WANG 等^[17]研究了企业合作增强机制,用以支持企业同时加入多个利益联盟,实现协同效用最大化。

综上,现有研究一是通过搭建集成平台、建设信息系统、形成管控框架辅助核电装备协同质量管理,二是通过合同设计、奖惩激励等管理层面的举措,解决质量管控过程中的利益冲突并发挥协同效应。尚未发现有解析协同质量管理的价值创造过程,探索协同质量价值形成机理的研究。因此如何揭示核电装备智能制造协同质量价值形成,构建协同质量价值链模型揭示其增值过程的动态行为是一尚未解决的问题。

核电装备建造过程作为典型的复杂系统,一般方法无法描述其复杂的动态行为。作为政策模拟的实验室,系统动力学采用模拟技术,从系统内部入手,定性与定量地对反馈系统的动态行为进行分析研究^[18]。通过构建系统动力流图研究核电装备智能制造协同质量价值,能够清晰地反映这个具有多个变量、多个回路的多重反馈复杂系统的动态运作过程。

本文首先界定核电装备智能制造协同质量价值的内涵,以协同质量管理活动为基础,分析其协同质量价值形成及增值过程,用 Vague 集方法筛选出协同质量价值关键影响因素;然后用价值链方法构建核电装备智能制造协同质量价值链模型,据此建立系统动力流图,利用专家打分法确定流图中边界点数值,利用综合集成赋权法确定流图中各参数权重;最后基于系统动力流图分析协同质量价值形成及增值过程的动态行为,揭示关键管理要素对协同质量价值增值的影响作用,得出核电装备协同质量价值增值策略。

1 核电装备智能制造协同质量价值及增值分析

1.1 核电装备智能制造协同质量管理

核电装备建造项目参与企业集群庞大,主要包

括总承包商、设计单位、设备供应商、施工单位、专业分包商、监理单位等,各参与方在企业文化、质量目标和利益诉求等方面不一致,极易导致质量行为差异与不规范,进而影响建造项目质量。这意味着开展跨企业质量流程对接,消除企业间质量目标差异对于实现全价值链协同质量管理至关重要。

核电装备建造项目核心业务包括设计、采购、施工和调试等领域,各领域质量标准不统一、质量关注点不一致。如对设计业务活动进行质量控制和监督,是要确保设计输出的文件、图纸满足业主质量需求;对施工过程进行全面管控,是要确保工程质量满足合同、核安全法规的各项规定。各领域质量关注点虽不一致,但具体的质量活动是相互联系的,这意味着局部质量最优不等于价值链整体质量最优,各核心质量业务间衔接合理与否将直接影响核电装备协同质量管理水平。

由于价值链上各类质量信息在多层、异构平台间流动,需经各级黑箱过滤、处理与转化,其间必然造成质量信息损耗、失真或延误。且信息共享成本与信息价值使企业倾向于质量信息私有化,造成质量信息不对称,形成企业间信息壁垒。这意味着为保证核电装备协同质量管理顺利进行,须对建造过程跨平台质量信息集中管理和按需传递。

核电装备智能制造协同质量管理在“三跨”开放式核电建造环境下,以提升业主满意度和全价值链质量效益为导向,围绕核电装备质量,在进行设计、采购、施工、调试等一系列与质量形成相关的活动中,通过智能制造技术及系统的支持,实现质量信息协同化管控。进行“三跨”协同质量管控势必需要加大协同管理活动和成本投入,但投入超过一定量,全价值链经济效益会下降,因此要研究核电装备协同质量价值。为此,本文在某企业实施核电装备智能制造技术及系统的基础上设计了如图 1 所示的一种核电装备智能制造协同质量管理架构图,分析协同质量价值及增值过程。

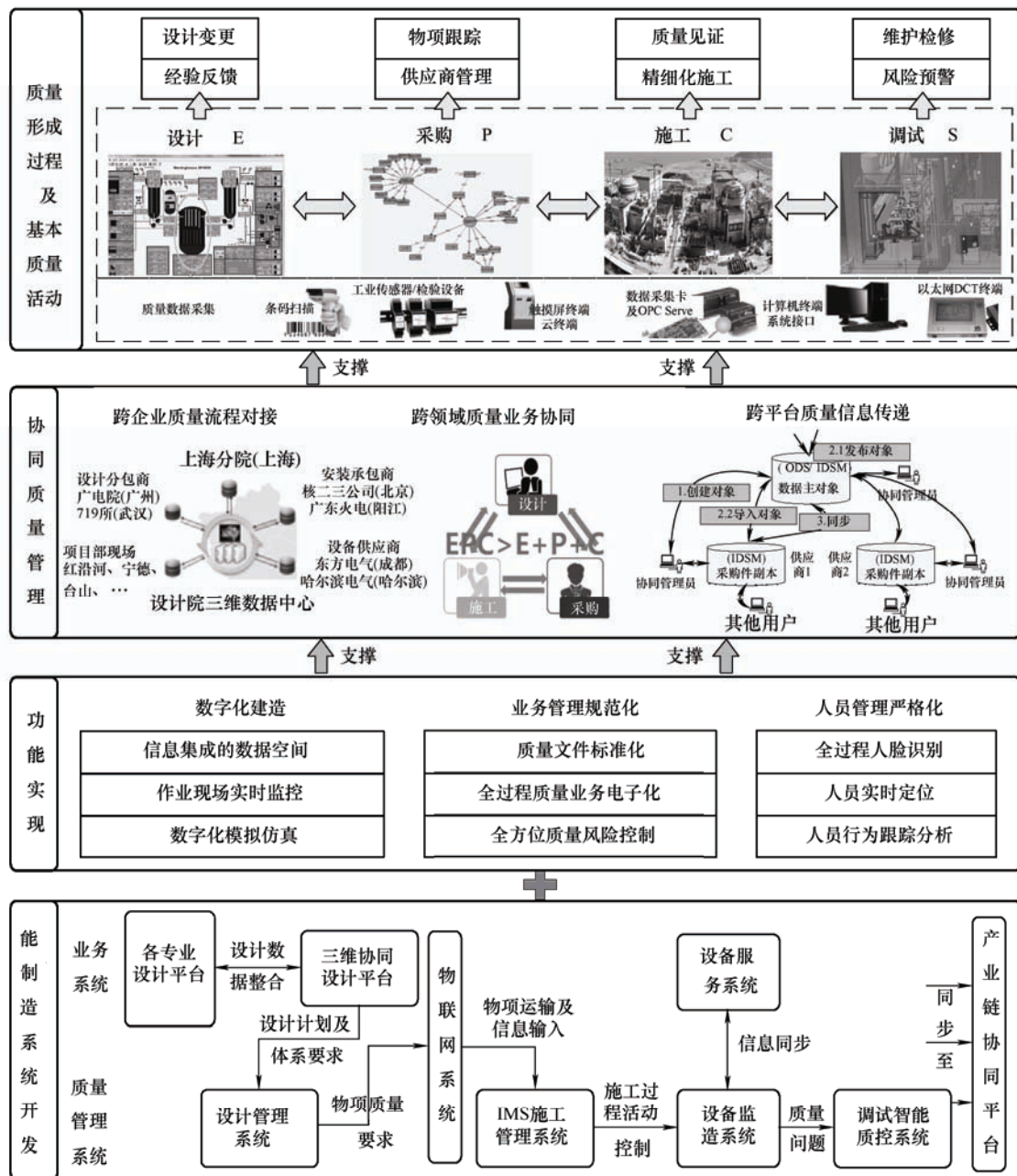


图1 核电装备智能制造协同质量管理架构

1.2 核电装备智能制造协同质量价值及增值

协同质量价值是指在“三跨”开放式核电建造环境下,以实现全价值链价值最大化为目标,应用智能制造技术,辅助基本质量活动开展,兼顾各方利益,消除非增值活动,助力“三跨”协同质量管控,实现业主满意度提高、建造过程和谐性提高及协同管控成本降低的价值创造。

协同质量价值的增值过程如下。

(1) 在经过设计、采购、施工、调试等一系列质量活动后,核电装备最终质量能够充分满足业主需求,这一系列活动形成了协同质量价值的基础,每项活动优化都能带来价值增量;

(2) 智能制造技术及系统的应用支撑了跨企业质量流程对接、跨领域质量业务协同及跨平台质量信息传递等协同质量管控活动的开展,为协同质量价值增值提供了动力。如开发三维协同设计平台,实现了核电厂数字化虚拟建造。搭建产业链协同平台,实现了质量管控流程电子化、质量文件在线审批、集成信息交互。利用智能终端设备采集质量数据,构建全厂质量数据空间整合并处理数据信息,实现了质量信息集中管理及按需传递;

(3) 在产业链协同平台支持下,通过跨企业质量流程对接、跨领域质量业务协同和跨平台质量信息传递,打破企业间壁垒、降低质量业务衔接难度

和协同成本、提升建造过程和谐性,实现协同质量价值增值。通过寻找并消除非增值质量环节,节约管理成本,提升全价值链质量效益;

(4) 协同质量价值增值又会影响企业间合作积极性、各企业对协同的重视度及信息传递意愿,从而为新一轮协同质量价值增值奠定基础,因此核电装备协同质量价值是在协同质量管理周而复始的运行过程中逐渐增加的。

2 基于 Vague 集方法的核电装备智能制造协同质量价值增值影响因素筛选

2.1 影响因素识别

在已有研究基础上,通过调研某核电装备建造企业,结合专家意见,收集了协同质量价值影响因素并归纳整理为“跨企业质量流程对接”“跨领域质量业务协同”“跨平台质量信息传递”3 个核心范畴所涉及的 41 个影响因素,见表 1。

表 1 协同质量价值影响因素清单

类别	核心范畴	主要影响因素
I	跨企业质量流程对接	企业间合作意愿 X1、技术及管理交流互动 X2、利益分配机制 X3、总承包商的沟通协调能力 X4、核安全文化宣贯 X5、质量目标一致性程度 X6、监理单位对规范的理解和执行 X7、检验设备及检验方法的有效性 X8、质量专项组建设 X9、价值链质量契约 X10
		对业主需求理解程度 X11、应对业主质量需求变化能力 X12、质保体系管理力度 X13、设计采购施工调试业务衔接流畅度 X14、人员质量意识及质量文化的培育 X15
II	跨领域质量业务协同	设计图纸的可实施性 X16、设计质量校审程序执行情况 X17、设计人员能力及经验 X18、设计经验反馈制度化程度 X19
		供应商技术水平及管理水平 X20、供应商在工作过程中的配合意愿 X21、供应商准入机制筛选合格供应商 X22、供应商物资供应的合理性 X23
		施工方案合理性 X24、施工技术水平 X25、分包商质量水平 X26、施工过程质量痛点控制 X27、施工质量管理体系的落实 X28、施工人员能力及经验 X29
		调试人员能力及经验 X30、调试程序执行情况 X31、调试作业效率 X32
III	跨平台质量信息传递	质量数据收集 X33、质量数据处理需求和处理能力 X34、质量信息集成管理 X35、质量信息可视化 X36、质量信息可信交互 X37、信息共享机制 X38、平台数据及接口标准化 X39、质量文本标准化程度 X40、质量信息系统开发程度 X41

2.2 关键影响因素筛选

通过实地调研和理论分析初步识别了核电装备智能制造协同质量价值影响因素,为了消除冗余因素对分析结果的影响、提升分析准确度及计算效率,

需剔除非关键因素。Vague 集作为一种处理不确定性问题的数学工具,常被用于对定性评价进行量化。相比其他筛选方法, Vague 集同时考虑专家支持、反对和中立三种意见的影响,能够弥补因素初步识别和专家思维的不确定性,使最终选取因素更具可信性和实践性^[19]。运用 Vague 集方法对上面 41 个影响因素进行重要性筛选,以获得关键影响因素,步骤如下。

邀请 10 位相关领域专家学者,对 41 个协同质量价值影响因素重要度大小进行评价,评价意见分为三个等级,即{重要,中立,不重要}。设 $t_i(a_i)$ 认为第 i 个指标重要的专家人数/专家总人数, $f_i(a_i)$ 认为第 i 个指标不重要的专家人数/专家总人数。

质量价值影响因素排序函数为

$$s_i(a_i) = t_i(a_i) - f_i(a_i) + (\beta - \gamma)\pi_i(a_i) \quad (1)$$

式中, $\pi_i(a_i) = 1 - t_i(a_i) - f_i(a_i)$ 为犹豫度。当 $t_i(a_i) - f_i(a_i) \neq 0$ 时, $\beta = t_i(a_i)$, $\gamma = f_i(a_i)$ 。得到最终各影响因素重要度排序值 $s_i(a_i)$, 如表 2 所示。

表 2 影响因素重要度排序值

序号	$s_i(a_i)$	序号	$s_i(a_i)$	序号	$s_i(a_i)$	序号	$s_i(a_i)$
X1	0.96	X12	0.99	X23	0.33	X34	0.99
X2	0.96	X13	0.96	X24	0.99	X35	0.77
X3	0.99	X14	0.99	X25	1	X36	0.32
X4	0.99	X15	0.96	X26	1	X37	0.96
X5	0.91	X16	0.99	X27	1	X38	0.75
X6	1	X17	0.96	X28	0.96	X39	0.77
X7	0.91	X18	0.99	X29	1	X40	0.56
X8	0.99	X19	0.96	X30	1	X41	0.72
X9	0.56	X20	1	X31	1		
X10	0.72	X21	0.99	X32	0.13		
X11	0.96	X22	0.45	X33	0.96		

选取 $s_i(a_i) > 0.75$ 为关键性指标,根据表 2 可知: X9, X10, X22, X23, X32, X36, X40 这 7 个要素指标重要度小于 0.75, 故将其删除,从而筛选出 34 个影响核电装备协同质量价值的关键因素。

3 核电装备智能制造协同质量价值模型构建

3.1 核电装备智能制造协同质量价值链模型构建

价值链由 PORTER 首先提出,他认为价值链是企业为客户生产有价值的产品而发生的一系列创造价值的活动,是用于表征最终产品或服务的价值创造及转移过程的工具。构建价值链的目的是实现超额收益,即在使整体效益最大化的同时保证价值链上每项活动都能增值^[20]。

核电装备智能制造协同质量价值链是用于表征

核电装备智能制造协同质量价值增值过程的工具。它可被定义为以业主质量需求和“四个凡事”原则为导向，以质量业务流程为基础，以智能制造技术及系统开发应用为支撑，以实现全价值链质量效益最大化为核心目标，通过跨企业质量流程、跨领域质量业务、跨平台质量信息的协同化，质量链与价值链互相融合形成的复杂动态链条结构模型。其要素包括支持协同质量价值实现的设计、采购、施工、调试等质量形成活动，以及助力协同质量价值增值的跨企业质量流程对接、跨领域质量业务协同和跨平台质量信息传递等支持性价值活动。

设计、采购、施工、调试这类基本质量活动形成了协同质量价值的基础，每项活动优化都能提供价值增量；智能制造技术及系统的应用为跨企业质量流程对接、跨领域质量业务协同和跨平台质量信息传递这类支持性价值活动的实现提供了重要支持，能够助力协同质量价值增值；协同质量价值增值又会反过来影响基本质量活动及支持性价值活动，助力新一轮的协同质量价值增值。基于核电装备智能制造协同质量价值分析及关键影响因素筛选，应用价值链理论，构建了协同质量价值链模型，如图 2 所示。

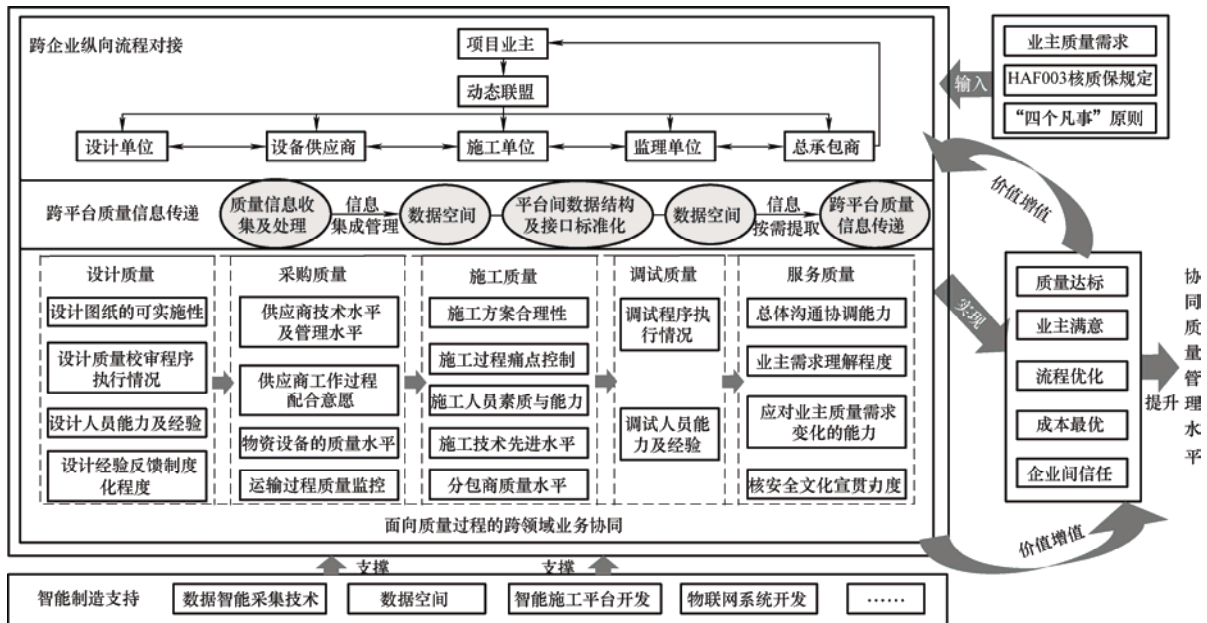


图 2 核电装备智能制造协同质量价值链模型

3.2 协同质量价值链系统边界、系统流图及基本假设

系统有边界，合理界定系统边界是系统动力学建模的基础，界定系统边界就是要确定系统的影响因素、合理划分子系统。前面通过分析核电装备智能制造协同质量价值增值过程及关键影响因素，确定了系统影响因素及相互间关系。

用系统动力学中的系统动力流图研究核电装备智能制造协同质量价值链，能够清晰地反映这个具有多个变量、多个回路的多重反馈复杂系统的动态运作过程。所谓系统动力流图，就是对系统内各因素及相互间关系进行定量刻画和直观呈现，是对协同质量价值增值过程及关键管理因素作用情况进行量化分析的工具。流图中主要包括水平变量、速率变量和辅助变量，通过对变量进行方程建构及参数赋值，形成因素间因果关系。为确保系统有效运行，针对系统动力流图，作出以下假设。

(1) 跨企业质量流程对接、跨领域质量业务协同和跨平台质量信息传递使核电装备质量管理呈现

连续、渐进的优化表现。

(2) 影响核电装备智能制造协同质量价值的因素有很多、且相互间关系复杂，只考虑主要因素，忽略次要因素。

(3) 不考虑突发事件、政府或企业决策等非正常情况造成的系统崩溃。

3.3 系统动力流图构建

图 2 将核电装备智能制造协同质量价值链系统划分为跨企业质量流程对接子系统、跨领域质量业务协同子系统和跨平台质量信息传递子系统。在图 2 基础上，将关键影响因素作为系统的边界点，将跨企业质量流程对接能力、跨领域质量业务协同能力、跨平台质量信息传递能力、设计质量、采购质量、施工质量、调试质量等作为一级因素，并设置为水平变量，用箭头表示因素间关系，将所有因素及关系输入 Vensim PLE7.3.5 软件，构建核电装备智能制造协同质量价值链系统动力流图的数字模型。该系统动力流图的物理视图如图 3 所示。

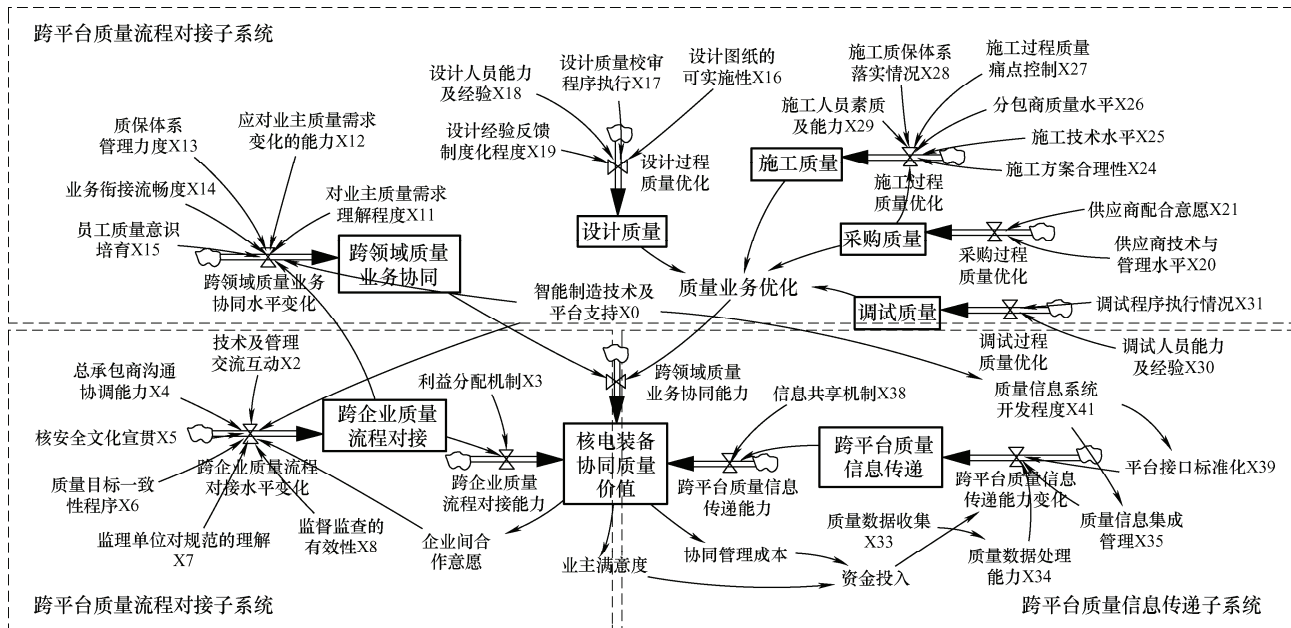


图 3 核电装备智能制造协同质量价值链系统动力流图

3.4 边界点数值求解

边界点是核电装备智能制造协同质量价值链系统流图模型与外部环境的交换点，不受系统内部反馈机制影响，因无法取得直接数据，采用专家打分法对其进行赋值，共邀请 20 位专家。为了确保数据的一致性，规定在 0~1 范围内进行赋值，数值越大代表该因素对核电装备智能制造协同质量价值影响越大。设 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, 24; j=1, 2, \dots, 5$) 为第 i 个被评价对象的第 j 项指标数值。为降低专家的主观意识对打分结果的影响，随机将专家分为四组，每位专家需要对每个边界点的最小值、最可能值和最大值进行打分，将专家评分进行平均 $a_i = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 a_{ij}$ ， $b_i = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 b_{ij}$ ， $c_i = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 c_{ij}$ 。再对每组专家打分进行平均 $x_{ij} = \frac{a_i + 4b_i + c_i}{6}$ ，然后对四组专家的打分求平均 $\bar{x}_i = \frac{x_{ij}}{4}$ ，算得各边界点值如表 3 所示。

表 3 核电装备智能制造协同质量价值影响因素边界点值

因素	得分	因素	得分	因素	得分
X2	0.575	X13	0.588	X24	0.559
X3	0.575	X14	0.729	X25	0.650
X4	0.504	X15	0.600	X26	0.604
X5	0.387	X16	0.671	X27	0.634
X6	0.575	X17	0.317	X28	0.496
X7	0.317	X18	0.650	X29	0.563
X8	0.317	X19	0.350	X30	0.650
X11	0.500	X20	0.629	X38	0.509
X12	0.629	X21	0.367		

3.5 关键方程及参数权重分析

在多参数和多重反馈机制下，系统的结果主要由内部结果和反馈机制来决定。主观赋权法运用评价者的主观判断，容易受主观因素影响，客观赋权法运用比较完善的数学理论，有过强的客观性。本文采用综合集成赋权法将 G1 法得到的主客观权重和熵值法得到的客观权重进行有机耦合，来确定核电装备智能制造协同质量价值各关键影响因素最终权重，具体步骤如下。

(1) G1 法确定主客观权重。发放专家调查问卷，由 10 名专家进行影响因素两两对比分析。将关键影响因素指标 x_1, x_2, \dots, x_n 按重要程度排序，得关系式 $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$ ， x_i^* 为 $\{x_i\}$ 按序关系排定顺序后的第 i 个评价指标。设专家关于影响因素指标 x_{i-1} 与 x_i 的重要性程度之比 w_{i-1}/w_i 的理性判断为 r_i ($i=n, n-1, \dots, 2$)。 r_i 的赋值如表 4 所示。

表 4 r_i 赋值参考

r_i	取值说明
1.0	指标 x_{i-1} 比 x_i 同等重要
1.2	指标 x_{i-1} 比 x_i 稍微重要
1.4	指标 x_{i-1} 比 x_i 明显重要
1.6	指标 x_{i-1} 比 x_i 强烈重要
1.8	指标 x_{i-1} 比 x_i 极端重要

根据专家给出的 r_i 值，计算权重 w_i

$$w_n = \left(1 - \sum_{i=2}^n \prod_{j=i}^n r_j \right)^{-1} \quad (2)$$

$$w_{i-1} = r_i w_i \quad i = n, n-1, \dots, 3, 2 \quad (3)$$

(2) 熵值法确定客观权重。基于上文中边界点赋值, 进行熵值法计算第 j 项因素的熵值

$$e_j = \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

式中, p_{ij} 表示对第 j 项因素第 i 个评价对象的特征

比重, 由 $x_{ij} / \sum_{i=1}^m x_{ij}$ 计算获得。

第 j 项因素的熵值法权重为

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (5)$$

式中, $g_j = |1 - e_j|$ 表示差异系数。

(3) 综合集成赋权法确定最终权重。运用综合集成赋权法将两个权重有机耦合, 提高数据的可靠

性。由上面两步得到主观权重 w_j 和客观权重 W_j , 综合权重

$$P = aw_j + bW_j \quad (6)$$

式中, a 、 b 分别根据式(7)、(8)确定

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j x_{ij}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j x_{ij}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_j x_{ij}\right)^2}} \quad (7)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_j x_{ij}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j x_{ij}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_j x_{ij}\right)^2}} \quad (8)$$

根据式(6)及标准化处理得到综合权重 P 如表 5 所示。

表 5 关键影响因素综合赋权法权重表

序号	一级因素	二级因素	主观权重 w_j	客观权重 W_j	综合权重 P
1	跨领域质量业务衔接水平	1.1 应对业主质量需求变化的能力 X12	0.160	0.201	0.180
		1.2 质保体系管理力度 X13	0.102	0.198	0.149
		1.3 业务衔接流畅度 X14	0.381	0.201	0.293
		1.4 员工质量意识培育 X15	0.133	0.199	0.165
		1.5 智能制造技术支持 X0	0.224	0.201	0.213
2	跨企业质量流程对接水平变化	2.1 技术及管理交流互动 X2	0.174	0.169	0.172
		2.2 总承包商沟通协调能力 X4	0.210	0.166	0.189
		2.3 核安全文化宣贯 X5	0.075	0.164	0.117
		2.4 质量目标一致性程度 X6	0.124	0.169	0.145
		2.5 监督监查的有效性 X8	0.082	0.159	0.118
		2.6 智能制造技术支持 X0	0.335	0.172	0.258
3	跨平台质量信息传递能力变化	3.1 质量数据处理能力 X34	0.440	—	0.440
		3.2 质量信息集成管理 X35	0.293	—	0.293
		3.3 平台接口标准化 X39	0.267	—	0.267
4	质量业务优化	4.1 设计质量 X01	0.288	—	0.288
		4.2 采购质量 X02	0.169	—	0.169
		4.3 施工质量 X03	0.402	—	0.402
		4.4 调试质量 X04	0.141	—	0.141
5	设计过程质量优化	5.1 设计图纸的可实施性 X16	0.282	0.252	0.268
		5.2 设计质量校审程序执行 X17	0.176	0.248	0.210
		5.3 设计人员能力及经验 X18	0.395	0.252	0.327
		5.4 设计经验反馈制度化程度 X19	0.147	0.248	0.195
6	施工过程质量优化	6.1 施工方案合理性 X24	0.157	0.167	0.162
		6.2 施工技术水平 X25	0.307	0.168	0.238
		6.3 分包商质量水平 X26	0.095	0.166	0.130
		6.4 施工过程质量痛点控制 X27	0.143	0.168	0.155
		6.5 施工质保体系落实情况 X28	0.079	0.164	0.121
		6.6 施工人员素质及能力 X29	0.219	0.168	0.194
7	采购过程质量优化	7.1 供应商技术与管理水平 X20	0.615	0.502	0.560
		7.2 设供应商配合意愿 X21	0.385	0.497	0.440
8	跨领域质量业务协同能力	8.1 质量业务优化 X05	0.583	—	0.583
		8.2 跨领域质量业务衔接 X06	0.417	—	0.417
9	跨平台质量信息传递能力	9.1 跨平台质量信息传递 X07	0.630	—	0.630
		9.2 信息共享机制 X28	0.370	—	0.370
10	跨企业质量流程对接能力	10.1 跨企业质量流程对接 X08	0.615	—	0.615
		10.2 利益分配机制 X3	0.385	—	0.385

(4) 确定模型主要方程及参数。基于上述常量及参数权重计算结果,对流程图中的水平变量、速率变量和辅助变量进行方程建构及赋值。各水平变量为速率变量的积累,各速率变量为相关前一

项变量的综合计算,其大小决定了水平变量变化的方向与快慢。本文构建的流程图包含 8 个水平变量、10 个速率变量和 7 个辅助变量。主要方程设置如表 6 所示。

表 6 主要方程设置

变量类型	变量	方程
水平变量	核电装备协同质量价值	INTEG(跨企业质量流程对接能力+跨平台质量信息传递能力+跨领域质量业务协同能力, 0)
	跨企业质量流程对接	INTEG(跨企业流程对接水平变化, 0)
	跨平台质量信息传递	INTEG(跨平台质量信息传递能力变化, 0)
速率变量	跨企业质量流程对接能力	$0.615 \times \text{跨企业质量流程对接} + 0.385 \times \text{利益分配机制}$
	跨领域质量业务协同能力	$0.583 \times \text{质量业务优化} + 0.417 \times \text{跨领域质量业务衔接}$
	跨平台质量信息传递能力	$0.630 \times \text{跨平台质量信息传递} + 0.370 \times \text{信息共享机制}$
	设计过程质量优化	$0.268 \times \text{设计图纸的可实施性} + 0.210 \times \text{设计质量校审程序执行} + 0.327 \times \text{设计人员能力及经验} + 0.195 \times \text{设计经验反馈制度化程度}$
	采购过程质量优化	$0.560 \times \text{供应商技术及管理水准} + 0.440 \times \text{供应商配合意愿}$
	施工过程质量优化	$0.162 \times \text{施工方案合理性} + 0.238 \times \text{施工技术水平} + 0.130 \times \text{分包商质量水平} + 0.155 \times \text{施工过程质量痛点控制} + 0.121 \times \text{施工质保体系的落实情况} + 0.194 \times \text{施工人员素质及能力}$
	跨企业质量流程对接水平变化	$0.172 \times \text{技术及管理交流互动} + 0.189 \times \text{总承包商沟通协调能力} + 0.117 \times \text{核安全文化宣贯} + 0.145 \times \text{质量目标一致性程度} + 0.118 \times \text{监督监督的有效性} + 0.258 \times \text{智能制造技术支持}$
辅助变量	跨领域质量业务衔接水平变化	$0.180 \times \text{应对业主质量需求变化的能力} + 0.149 \times \text{质保体系管理力度} + 0.293 \times \text{业务衔接流畅度} + 0.165 \times \text{员工质量意识培育} + 0.213 \times \text{智能制造技术支持}$
	跨平台质量信息传递能力变化	$0.440 \times \text{质量数据处理能力} + 0.293 \times \text{质量信息集成管理} + 0.267 \times \text{平台接口标准化}$
	业主满意度	LN(核电装备协同质量价值+2)
	质量业务优化	$0.402 \times \text{施工质量} + 0.288 \times \text{设计质量} + 0.169 \times \text{采购质量} + 0.141 \times \text{调试质量}$

4 案例分析及讨论

4.1 模型有效性分析

模型有效性运行对于判断模型运行结果的准确性和有效性十分重要。因此,通过 Vensim PLE7.3.5 软件对以系统动力流程图数据模型表征的核电装备智能制造协同质量价值链模型进行系统运行,设定步长为 1,单位为月,步长为 100。结果如图 4 所示。

从图 4a 运行结果可以看出,在跨企业、跨领域、跨平台环境下,核电装备智能制造协同质量管理初期,由于员工质量意识宣贯、产品合格率等指标存在延迟设置,协同质量价值在初期增长不明显。随着建造过程推进,在智能制造技术及协同质量管控机制的作用下,跨企业质量流程对接、跨领域质量业务协同、跨平台质量信息传递能力提升使得核电装备智能制造协同质量价值获得改善和提高。

业主满意度是核电装备智能制造协同质量价值的一种评价方式,从图 4b 结果来看,业主满意度从第 1 个月到第 20 个月都在以较高的速度增长,从第 20 个月之后,业主满意度趋于一种稳定的态势。这是因为核电装备建造前期,业主的质量需求和期望不高,很容易被核电装备建造过程质量行为所满足。当核电装备建造趋于成熟时,随着智能制造技术的

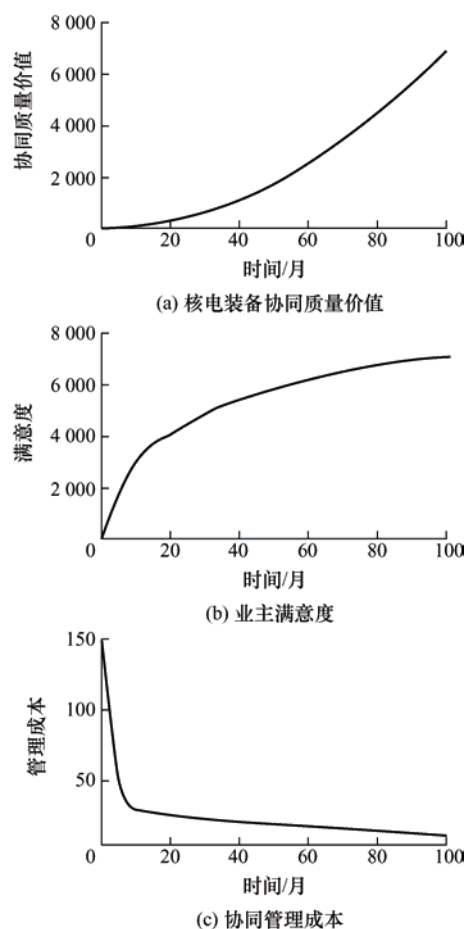


图 4 系统有效性检验

应用及推广，质量监测有效性和质量数据透明化程度提高，使得业主对质量现状不再满足，并且有针对性地提出了更高的质量要求，此时业主满意度随着建造项目的推进以极缓的速度增长。

协同管理成本是核电装备智能制造协同质量价值的重要评价指标，图 4c 显示核电装备建造过程协同管理成本初期时很高，从第 1 个月到第 10 个月大幅下降，从第 10 个月之后，协同管理成本趋于一种稳定的态势。这是由于核电装备智能制造协同质量管理运作初期，信息化建设、企业间沟通、员工培训等相关一次性投入累加，协同管理成本很高。随着建造过程推进，协同质量管理达到稳定状态，效益提升远大于成本增加，协调管理成本明显下降并趋于稳定。但由于协同质量管理过程不确定因素多，仍存在协同管理体系运转维护成本增加的风险。核电装备协同质量管理在带来利润增长的同时，相关管理部门人员需要加大对风险因素的管控，预防协同过程中维护成本增长的风险。

4.2 协同质量价值增值策略研究

通过模型灵敏度分析来揭示跨企业质量流程对接、跨领域质量业务协同和跨平台质量信息传递三大能力的价值增值动态行为特征，并检验智能制造技术应用、企业间合作意愿、质保体系管理力度等关键管理要素因素对协同质量价值增值的影响。并据此分析得出协同质量价值增值策略。

(1) 跨企业质量流程对接、跨领域质量业务协同、跨平台质量信息传递能力的动态行为特征。对跨企业流程对接能力、跨领域质量业务协同能力、跨平台质量信息传递能力进行运行分析，得到图 5。可以看出三大能力随着核电装备建造的推进逐渐提升。它们对于核电装备智能制造协同质量价值存在明显的正向促进作用，且影响程度大小为：跨领域质量业务协同能力>跨企业质量流程对接能力>跨平台质量信息传递能力。

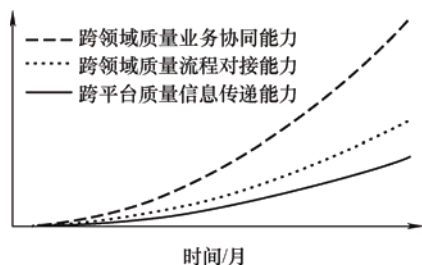


图 5 三大协同能力的动态行为特征

不难发现，核电装备智能制造协同质量价值增值的核心依附在基本质量活动中，跨领域质量业务流畅衔接可以为协同质量价值增值提供最大程度地

支持，增加该过程的关注力度与成本投入，有利于加快协同质量价值增值，助力实现全价值链价值最大化。可以通过搭建多领域质量业务协作平台，加强各业务板块间接口管理，增强设计、采购、施工、调试过程质量业务衔接能力，提高对整个质量形成过程的控制力，在满足业主质量需求的同时，使协同质量价值链运行更为高效。

跨企业质量流程对接对协同质量价值增值有积极作用，但是这种积极作用并不是无条件的，只有通过良好协调管控机制的中介效应，协同战略才能发挥其增值作用。这主要是因为跨企业质量流程对接虽能降低制造和交易成本，但为了达到协同，会花费协调和妥协成本。这些成本的大小因企业间信任度、合作意愿和制度约束强度而异。如果协调管控机制不能与协同目标匹配，使协调与妥协成本超过跨企业质量流程对接收益，那么跨企业质量流程对接就不能发挥其增值作用。因此，可以通过建立企业战略联盟，加强技术交流与资源共享，补足各自的弱项；通过实施利益分配机制、激励机制等协调管控机制，保证跨企业纵向质量价值链正常运行，充分发挥跨企业质量流程对接对协同质量价值增值的积极作用。

跨平台质量信息传递为核电装备跨企业质量流程对接和跨领域质量业务协同提供了重要辅助，但就运行结果来看，目前对质量信息利用率重视度仍不够、质量信息未能充分发挥其增值作用。可以建立核电工业信息共享系统平台，通过一体化管理加强综合分析及利用质量数据的能力，消除由于“信息孤岛”带来的质量数据损耗、失真及延误等问题，提高质量信息利用率，提升核电装备协同质量管理水平。

(2) 智能制造技术应用的动态影响。在其他条件不变的情况下，改变智能制造技术支持因素的赋值，得到图 6。

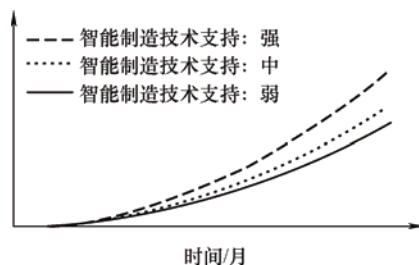


图 6 智能制造技术应用对协同质量价值的影响

可以看出，智能制造技术支持作用对核电装备协同质量价值有显著的正向影响关系。智能制造技术的应用为协同管理活动开展提供了很好的支撑，

开发的质量信息和业务智能化集成平台,实现了资源聚集和价值链企业的有效联结,通过资源整合和优化配置帮助协调各业务领域的进度和价值链上各企业间的关系,促进了核电装备协同质量价值的提升。但智能制造技术的投入并不是越多越好,超过一定值会造成成本负担、降低企业效益。

为了促进可持续发展,核电行业应积极吸收智能制造技术在工业领域的创新应用,通过增强其与传统业务的结合,促进核电数字化、智能化业务的发展,推进“智慧核电”的建设,实现核电装备质量价值提升和创新发展。在实际技术应用时,各企业也应考虑自己实际业务状况和运营环境,在不造成成本负担情况下,适当选择智能制造技术开发力度,避免造成整体效益下滑。

(3) 企业间合作意愿的动态影响。在其他条件不变的情况下,改变企业间合作意愿的赋值,得到图 7。

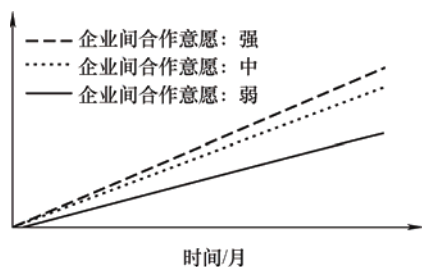


图 7 企业间合作意愿对跨企业质量流程对接能力的影响

不难发现,企业间合作意愿对于跨企业质量流程对接能力有明显的正向作用。在核电装备建造过程中,价值链上各企业的核心能力和拥有的资源不同,借助于搭建的信息平台,在核安全质保体系的约束下进行合作。通过合作意愿的增强,能减少企业间矛盾,促进各企业对自身工作的控制和管理,有利于形成和谐共赢的产业生态,提升企业间流程对接能力,进而提升核电装备协同质量水平。

信任是合作的基础,核电装备建造各参与方可以通过定期沟通、阶段性汇报,加深对彼此的了解,提高信任感。总承包商可以通过激励或奖惩措施降低合作单位的投机行为及其影响,加强各企业对整个产业价值链的信任和依赖。

(4) 质保体系管理力度的动态影响。在其他条件不变的情况下,改变质保体系管理力度的赋值,得到图 8。

可以看出,提高质保体系管理力度、强化质保体系运行控制的符合性和有效性对跨领域质量业务协同能力的提升有明显的正向作用。在核电装备实际建造过程中,总承包商以核电装备质量安全为基

础,系统地编制各级质保大纲及具体的质量管理程序文件,将质保体系贯穿至全业务流程和全价值链企业中去,有利于形成统一的质量目标、提升跨领域业务协同能力和企业协同努力程度,进而提升核电装备智能制造协同质量价值。

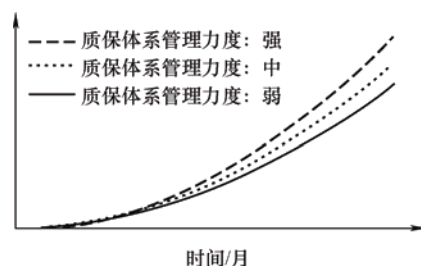


图 8 质保体系管理对跨领域质量业务协同能力的影响

HAF003 明确规定必须定期对所有大纲进行评价和修订,质保体系的修订和完善可以是多样化的,价值链上各企业的管理方法存在差异,必须根据各企业的实际情况,在满足核电法律法规的基础上,进行质量管理创新,只要有益于提高核电装备质量的管理方法,均可以引入质保体系,以此来提高质保体系的适用性和有效性。

4.3 核电装备协同质量价值增值策略

仿真结果对于建立价值驱动的协同质量保障机制具有一定借鉴意义,如何实现协同质量价值增值、助力协同质量管理,在实践中可从以下 4 个方面展开。

(1) 完善信息共享体系,促进质量信息高效传递。目前核电企业已分别针对人力资源、物资采购、文档管理和设备管理等重要的领域建立了不同的信息共享系统。应考虑搭建统一架构的协同质量信息管理平台,推动各参与企业对质量信息的协同整合,扩大信息共享范围,提高质量信息利用率,并基于此对协同质量管理业务流程进行优化设计,实现信息资源向协同管控绩效的转化。

(2) 促进企业间合作与战略统筹,发挥多企业协同效应。企业利用与利益相关者的合作来获取资源,保持持续的竞争优势,强化企业间合作关系是实现协同质量管理目标的重要举措。通过形成统一的质量战略目标,统筹协调各参与企业的优势资源和能力,促进核电装备建造过程组织管理模式的优化升级。

设计科学合理的利益分配激励机制,在遵循“合作共赢,个体合理以及利益与风险相匹配”的原则下,针对不同企业采用不同的利益分配模式,在共担风险的同时使各方收益最大化,充分调动各参与企业协同质量管控的积极性。

(3) 优化技术路径, 提高协同质量管控的效率。为了促进核电行业优质高效地可持续发展, 需要推动新兴智能制造技术在核电建造过程协同质量管控中的创新应用。通过数字化工程体系建设, 探明各参与企业之间复杂的接口关系, 降低信息传递的不对称, 并将过程数据集成起来, 实现实体核电站和数字化核电站的建设过程有效同步; 通过建立三维模型、二维图纸数据间关联关系, 使用户可以高效地查看三维模型、二维图纸以及多维度质量业务数据, 大大减少数据查询的时间; 通过形成标准化技术数据库, 健全经验反馈体系, 为后续项目提供参考, 从而为核电项目数字化移交提供保障。

(4) 制定长期战略计划, 实现技术与管理的协同创新。以创新驱动产业发展、提高产业竞争水平逐渐成为共识, 而质量创新是解决核电装备制造面临复杂多变的质量环境的有效应对方式。结合国家方针政策和不断变化的市场环境, 需通过不断优化核电装备协同质量管理的技术和管理协同创新体系。为快速响应需求变化, 将战略、管理、技术、质量和文化等全要素创新理念引入协同质量管理范式中, 通过多企业、多领域质量活动的协同创新, 实现核电装备建造过程质量维度的延伸和扩展、过程的持续改进和全价值链经济效益的提升。

5 结论

核电的高风险性给其建造过程协同质量管理提出了更为严苛的要求, 为满足三跨环境下协同质量管理要求, 需加大成本投入, 但投入超过一定量, 全价值链经济效益会下降, 因此本文对核电装备协同质量价值进行研究, 提出了一种基于系统动力流图的核电装备智能制造协同质量价值建模方法。

(1) 在分析核电装备智能制造协同质量管理活动基础上, 界定了其协同质量价值的内涵, 分析了价值形成及增值过程。并通过 Vague 集方法筛选出了 34 个协同质量价值关键影响因素。

(2) 用价值链方法构建了核电装备智能制造协同质量价值链模型, 在此基础上应用 Vensim PLE7.3.5 软件建立其系统动力流图, 利用综合集成赋权法确定了流图中各参数权重。

(3) 基于系统动力流图分析协同质量价值增值过程的动态行为, 揭示了关键管理要素对协同质量价值增值的影响作用, 并据此得出了核电装备协同质量价值增值策略。

本文研究为建立价值驱动的协同质量保障机

制、实现核电全价值链价值最大化提供了新的思路 and 方向。但由于所建模型中影响因素最初的选择存在一定主观性, 且忽略了不同业务场景对影响因素权重设置的影响, 模型还有进一步挖掘和完善的空间。后续将从业务角度出发, 研究影响因素设置及更多管理行为可能导致的核电装备协同质量价值动态变化的复杂行为。

参 考 文 献

- [1] 国家能源局. 推动能源转型, 赋能绿色发展 [N/OL]. [2022-01-14]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/14/c_1310424510.htm.
National Energy Administration. Promote energy transformation, enabling green development [N/OL]. [2022-01-14]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/14/c_1310424510.htm.
- [2] 国家核安全局. HAF003 核电厂质量保证安全规定 [S]. 北京: 国家核安全局, 1991.
National Nuclear Safety Administration. HAF003 safety regulation for quality assurance of nuclear power plants [S]. Beijing: National Nuclear Safety Administration, 1991.
- [3] XU Qian, YE Heting, SONG Huaming, et al. Research on supply chain product quality decision considering quality coordination contract[C/CD]//2018 15th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM), 2018.
- [4] 侯光文, 薛惠锋. 复杂产品系统产业集群协同创新演化博弈分析[J]. 求索, 2016(4): 102-106.
HOU Guangwen, XUE Huifeng. Evolutionary game analysis on collaborative innovation of industrial clusters in complex product system[J]. Quest, 2016(4): 102-106.
- [5] JUN Shentu, ZHENG Mingguang. Framework and data management of digital design system for nuclear power[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 124(2): 418-425.
- [6] GUO Chao, ZHANG Yu, XU Xinwei, et al. Development and application of intelligent platform for collaborative electrical design of nuclear power[C]//International Symposium on Software Reliability, Industrial Safety, Cyber Security and Physical Protection for Nuclear Power Plant (ISNPP), Singapore, Nov, 2019: 149-161.
- [7] 隋阳, 丁睿, 王汉青. 运行核电厂安全生产标准化管理信息系统的研发[J]. 核动力工程, 2018, 39(4): 152-156.
SUI Yang, DING Rui, WANG Hanqing. Running nuclear power plant safety production standardization management information system development[J]. Nuclear

- Power Engineering, 2018, 33(4): 152-156.
- [8] BENSI M T, GROTH K M. On the value of data fusion and model integration for generating real-time risk insights for nuclear power reactors[J]. Progress in Nuclear Energy, 2020, 129: 103497.
- [9] 孙大鹏, 赵全超. 企业集团协同效应创造机制与战略并购经济条件研究[J]. 科技进步与对策, 2007, 24(6): 94-96.
- SUN Dapeng, ZHAO Quanchao. Research on synergistic effect creation mechanism and economic conditions of strategic merger and acquisition of enterprise groups[J]. Science and Technology Progress and Countermeasures, 2007, 24 (6): 94-96.
- [10] 赵焕焕. 面向复杂产品协同研制的主制造商[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- ZHAO Huanhuan. Main manufacturer for collaborative development of complex products[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [11] WANG Nan, WANG Bangjun, YAN Yujie, et al. Research on the governance mechanism of aviation complex product manufacturing supply chain based on dynamic game theory[C]// 2016 International Conference on Mechatronics, Manufacturing and Materials Engineering, 2016, 63: 02037.
- [12] 冯良清, 黄大莉, 何桢, 等. 复杂产品研制项目的流程模块化分析方法[J]. 工业工程, 2018, 21(3): 1-10.
- FENG Liangqing, HUANG Dali, HE Zhen, et al. Modular process analysis method for complex product development projects[J]. Industrial engineering, 2018, 21(3): 1-10.
- [13] 张映锋, 郭振刚, 钱成, 等. 基于过程感知的底层制造资源智能化建模及其自适应协同优化方法研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 1-10.
- ZHANG Yingfeng, GUO Zhengang, QIAN Cheng, et al. Research on intelligent modeling and adaptive collaborative optimization of bottom manufacturing resources based on process awareness[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 1-10.
- [14] 张巧可, 陈洪转. 基于质量意识的复杂产品质量控制激励策略[J]. 中国管理科学, 2021, 29(6): 105-114.
- ZHANG Qiaoke, CHEN Hongzhuan. Incentive strategy of complex product quality control based on quality awareness [J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(6): 105-114.
- [15] NG I, DING D X, YIP N. Outcome-based contracts as new business model: The role of partnership and value-driven relational assets[J]. Industrial Marketing Management, 2013, 42(5): 730-743.
- [16] 李亚平, 刘思峰, 方志耕. 面向质量的大型复杂产品总体参数多主体协同设计 ESTA-HoQ 网络模型[J]. 机械工程学报, 2014, 50(20): 195-204.
- LI Yaping, LIU Sifeng, FANG Zhigeng, et al. Multi-agent collaborative ESTA-HoQ network model for quality-oriented design of large-scale complex products with population parameters[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(20): 195-204.
- [17] WANG Bo, WANG Lihong, CHANG Weiling, et al. Incentive cooperation enforcement based on overlapping coalition formation game framework for Ad Hoc networks[J]. Springer, Cham, 2020, 905: 173-181.
- [18] AZAR A T. System dynamics as a useful technique for complex systems[J]. International Journal of Industrial & Systems Engineering, 2012, 10(4): 377-410.
- [19] ZHANG Qingchuan, ZENG Guangping, XIAO Chaoen, et al. A rule conflict resolution method based on Vague set[J]. Soft Computing, 2014, 18(3): 549-555.
- [20] HUŇKA F, ŽÁČEK J, ZDENĚK M, et al. REA value chain and supply chain[J]. Faculty of Economics and Administration, 2011, 16(21): 68-77.
-
- 作者简介: 徐梦宇, 女, 1998 年生。主要研究方向为智能制造、质量管理。
E-mail: 202007041087t@cqu.edu.cn
- 易茜(通信作者), 女, 1986 年生, 博士, 讲师。主要研究方向为绿色制造、生产系统与管理、智能制造。
E-mail: yiqian@cqu.edu.cn