

# 基于多主体建模的产品质量管理控制的研究

王宇

南昌理工学院机电工程学院, 江西 南昌

收稿日期: 2026年1月24日; 录用日期: 2026年2月14日; 发布日期: 2026年2月26日

## 摘要

本文探索了一种基于主体的建模与仿真(ABMS)的工程管理视角下产品质量控制新方法。针对传统方法在处理多因素耦合及动态变化方面的局限性, 本研究立足工程管理的流程优化与效能提升需求, 构建了一个多主体系统模型, 该模型模拟了人、机、料、法、环等因素对产品质量损失的影响。利用Netlogo仿真平台进行动态分析, 以评估各因素对质量损失的贡献程度, 为工程管理中的质量控制环节提供了全新的视角。此外, 本文基于该模型提出了一种产品结构优化策略, 通过敏感性分析确定关键参数, 为工程管理实践中的性能优化提供科学依据。这项研究不仅丰富了基于主体的建模与仿真在质量控制领域的应用, 还为实际生产工程管理中的质量提升和结构优化提供了有效的工具, 具有重要的理论和实践意义。

## 关键词

基于主体的建模与仿真, 工程管理, 产品质量控制, 多主体建模与仿真环境, 结构优化策略

# Research on Product Quality Management Control Based on Multi-Agent Modeling

Yu Wang

College of Electrical and Mechanical Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang Jiangxi

Received: January 24, 2026; accepted: February 14, 2026; published: February 26, 2026

## Abstract

This study explores a novel product quality control methodology in engineering management through a subject-based modeling and simulation (ABMS) framework. Addressing the limitations of traditional approaches in handling multi-factor coupling and dynamic changes, the research develops a multi-agent system model that simulates the impact of human, machine, material, method, and environmental factors on product quality loss. Utilizing the Netlogo simulation platform for dynamic analysis, it evaluates the contribution of each factor to quality loss, providing a fresh perspective for quality

control in engineering management. Furthermore, the study proposes a product structure optimization strategy based on this model, identifying key parameters through sensitivity analysis to offer scientific basis for performance optimization in engineering management practices. This research not only enriches the application of subject-based modeling and simulation in quality control but also provides an effective tool for quality improvement and structural optimization in practical production engineering management, holding significant theoretical and practical implications. **Keywords:** subject-based modeling and simulation; engineering management; product quality control; multi-agent modeling and simulation environment; structural optimization strategy.

## Keywords

**Subject-Based Modeling and Simulation, Engineering Management, Product Quality Control, Multi-Agent Modeling and Simulation Environment, Structural Optimization Strategy**

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着科技的不断进步和工业的快速发展,复杂系统分析在多个领域,尤其是产品质量控制和结构优化中扮演着越来越重要的角色[1]。多主体建模与仿真(ABMS)方法通过模拟系统中各个具有自主性的主体及其相互作用,揭示复杂系统的内在机制。该方法在供应链管理、生态系统模拟等领域得到了广泛应用,并取得了显著成效。作为一种强大的工具,通过模拟系统中各个主体的行为及其相互作用,能够深入揭示复杂系统的内在机制。在产品质量控制和结构优化领域,多主体系统建模能够提供更为全面、深入的分析视角,为决策者提供科学依据[2]。

## 2. 研究意义

本研究借由多主体建模深入产品质量控制领域,有力拓展了复杂系统分析理论。传统复杂系统分析在应对产品质量相关的多因素耦合与动态变化难题时存在不足,而本研究模拟人、机、料、法、环等多主体行为及其交互,精准揭示产品质量形成与损失的复杂机制,为该理论体系注入新的研究思路与方法,深化了多主体建模理论在产品质量控制这一新领域的应用,验证其有效性与适用性,拓宽理论应用边界,推动多主体建模理论在更多实际场景的拓展[3]。

本研究成果为产品质量控制提供创新工具。传统质量控制方法如SPC、TQM难以应对实际生产中的复杂问题,致使产品质量不稳定。基于多主体建模构建的产品质量损失涌现模型,借助Netlogo仿真平台,助力企业精准识别影响产品质量的关键因素,从而制定针对性改进措施,提升产品质量与市场竞争力。同时,基于多主体系统模型提出的产品结构优化策略,经参数敏感性分析确定关键结构参数,为产品性能优化提供科学依据,利于企业合理调整产品结构参数,降低质量损失,提高生产效率与经济效益。

## 3. 相关概念

### 3.1. 多主体系统建模

多主体系统建模是一种基于分布式人工智能的建模方法,它通过将复杂系统划分为多个具有自主性

的主体(Agent),并模拟这些主体的行为及其相互作用,来揭示整个系统的运行规律[4]。从主体属性来看,不同类型的 Agent 具有差异化的核心特征与状态参数,例如“人员”主体包含技能熟练度、疲劳度、学习能力等核心属性,“机器”主体涵盖运行参数、磨损程度、故障概率等关键指标,“物料”主体则具备材质特性、加工精度要求、存储状态等基础属性;从行为规则来看,各类主体遵循特定的决策逻辑与行为模式,如“人员”主体可采用学习模型量化技能提升过程,通过疲劳模型反映状态衰减规律,进而基于自身疲劳状态与任务优先级做出作业节奏调整、休息触发等决策;“机器”主体则通过故障模型与磨损模型模拟性能退化过程,当监测到磨损量超标或故障预警信号时,自动触发停机检修、参数校准等响应行为;从交互协议来看,主体间通过预设的信息交互规范实现数据互通与协同运作,例如“人员-机器”主体间通过设备操作信号与运行状态反馈实现联动,“机器-物料”主体间通过物料适配性检测数据完成加工流程的衔接,确保各主体行为与系统整体目标保持一致。多主体系统建模具有高度的灵活性和可扩展性,能够处理复杂系统中的非线性、不确定性等问题。

### 3.2. 产品质量控制

当前产品质量控制的主要方法包括统计过程控制(SPC)、全面质量管理(TQM)等。这些方法在一定程度上提高了产品质量,但仍存在局限性,如无法有效应对多因素耦合、动态变化等问题[5]。多主体系统建模通过模拟实际生产过程中的各个环节和主体行为,能够更准确地反映产品质量的影响因素及其相互作用机制,为产品质量控制提供新的思路和方法。

### 3.3. 结构优化

结构优化是指在满足一定约束条件下,通过改变产品的结构参数来优化其性能指标的过程。常用的结构优化算法包括遗传算法、粒子群算法等。然而,这些算法在处理复杂系统时往往难以考虑多个因素之间的相互作用和动态变化。多主体系统建模通过模拟系统中各个主体的行为及其相互影响,能够为结构优化提供更加全面、深入的分析视角和优化策略[6]。

## 4. 多主体系统建模方法

### 4.1. 建模框架

本文采用多主体建模与仿真方法构建产品质量损失涌现模型。依据全面质量管理理论,明确了影响产品质量形成的五个关键因素,即人员、机器、原材料、方法以及环境。其中,人员方面涉及质量意识、行为因素和身体状况;机器因素包括维护情况;原材料涵盖性能与成分配比;方法涉及操作方法、加工工艺和工艺参数;环境则有照明、温度、湿度以及仓储条件等,这些因素对产品质量的具体影响关系如质量影响因子分析图所示。在模型构建过程中,借助 Netlogo 仿真平台,对上述五个因素影响产品质量损失的程度和趋势进行动态模拟,从而深入研究产品质量损失涌现现象,为产品质量控制提供理论和实践依据。质量影响因子分析如图 1 所示。

### 4.2. 建模技术

在建模过程中,经系统机理分析,人、机、料、法、环各主体的质量水平与影响因素间并非简单线性关系(如设备磨损随时间呈加速增长趋势、人员疲劳度随工作时长呈边际递增趋势),因此采用对数或指数函数刻画主体行为的非线性特征,模型理论依据为“复杂生产系统多因素非线性耦合理论”[7],该理论已被广泛应用于生产系统主体建模,其核心观点是主体质量水平与影响因素的交互存在阈值效应与累积效应,适合采用非线性函数描述[8]。

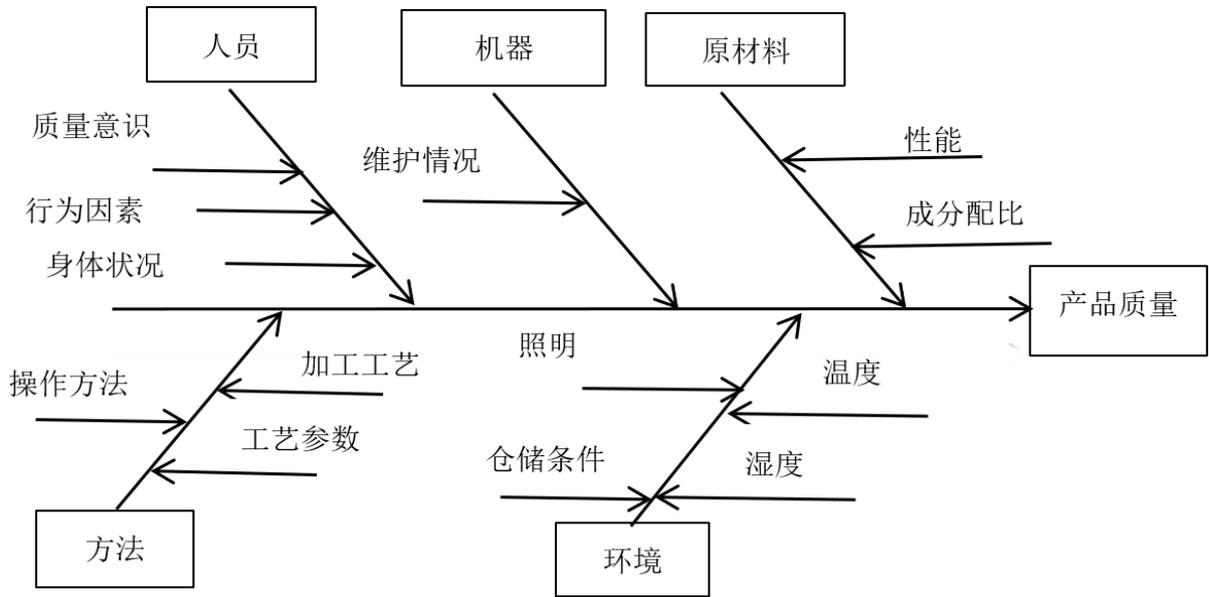


Figure 1. Causal diagram of product quality indicators  
图 1. 产品质量指标的因果图

## 5. 模型构建

### 5.1. 多主体 CGP 建模

1) 设备主体：设备质量水平受设备运行状况、设备保养水平影响，则

$$F(x_i) = \alpha_i \cdot \ln(x_1) + \alpha_2 \cdot x_2^{0.5} + \omega_1 \quad (1)$$

式中： $F(x_i)$ 为设备质量水平； $x_1$ 为设备运行状况； $x_2$ 为设备保养水平； $\alpha_1$ 为设备运行状况对质量水平的影响系数，量化方法； $\alpha_2$ 为设备保养水平对质量水平的影响系数； $\omega_1$ 为余项。

2) 方法主体：方法质量水平受加工工艺、参数设置、操作规程影响，考虑工艺优化的边际效益递减特性，采用指数非线性模型：

$$F(Y_i) = x_1 \cdot (1 - e^{-Y_1}) + x_2 Y_2 + x_3 \cdot \ln(Y_3) + \omega_2 \quad (2)$$

式中： $F(Y_i)$ 为方法质量水平； $Y_1$ 为加工工艺成熟度； $Y_2$ 为参数设置精度； $Y_3$ 为操作规程完善度； $x_1$ 为加工工艺成熟度影响系数； $x_2$ 为参数设置精度影响系数，负号表示偏差越大质量水平越低； $x_3$ 为操作规程完善度影响系数； $\omega_2$ 为余项。

3) 原料主体：原料质量水平受原辅料成分，包装材料成分以及产品种类特征影响，采用对数非线性模型：

$$F(S_i) = \gamma_1 \ln(S_1) + \gamma_2 \ln(S_2) + \gamma_3 \cdot \omega_3 \quad (3)$$

式中： $F(S_i)$ 为原料质量水平； $S_1$ 为原辅料成分合格率； $S_2$ 为包装材料成分达标率； $S_3$ 为产品种类适配性； $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 为成分合格率影响系数； $\gamma_3$ 为适配性影响系数； $\omega_3$ 为余项。

4) 人员主体：人员质量水平受质量意识、行为因素以及身体状况影响，考虑人员疲劳的累积效应，采用指数非线性模型：

$$F(W_1) = \beta_1 \cdot W_1 + \beta_2 \cdot (1 - e^{-W_2}) + \beta_3 \cdot \ln(W_3) + \omega_4 \quad (4)$$

式中： $F(W_i)$ 为人员质量水平； $W_1$ 为质量意识评分； $W_2$ 为违规操作频次； $W_3$ 为身体状况评分； $\beta_1$ 为质量意识影响系数； $\beta_2$ 为违规操作影响系数； $\beta_3$ 为身体状况影响系数； $\omega_4$ 为余项。

5) 环境主体：环境质量水平受温度、湿度、照明度和仓存条件影响，采用线性与对数结合的非线性模型：

$$F(D_i) = \delta_1 \cdot |D_1 - D_{10}|^{0.5} + \delta_2 \cdot |D_2 - D_{20}|^{0.5} + \delta_3 \cdot \ln(D_3) + \delta_4 \cdot D_4 + \omega_5 \quad (5)$$

式中： $F(D_i)$ 为环境质量水平； $D_1$ 为实际温度； $D_{10}$ 为标准温度； $D_2$ 为实际湿度； $D_{20}$ 为标准湿度； $D_3$ 为照明度； $D_4$ 为仓存条件评分； $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 为温湿度偏差影响系数； $\delta_3$ 为照明度影响系数； $\delta_4$ 为仓存条件影响系数； $\omega_5$ 为余项。

## 5.2. 产品质量损失

质量损失在质量成本管理中解释为在整个产品生命周期内，由于产品质量不满足规定要求，而对生产者、消费者乃至社会造成的全部损失之和，涉及多方面的利益[9] [10]。进一步分析显示，产品质量损失的发生可归因于多个方面，包括设备、方法、原料、人员以及环境质量水平影响。考虑各主体质量水平对质量损失的非线性耦合影响采用指数非线性模型：

$$P = d \cdot e^{-k_1} F(x_i) + f \cdot e^{-k_2} \cdot F(Y_i) + g \cdot e^{-k_3} \cdot F(S_i) + h \cdot e^{-k_4} \cdot F(W_i) + j \cdot e^{-k_5} \cdot F(D_i) + p \quad (6)$$

式中： $P$ 为产品质量损失(量化方法：统计因质量问题导致的返工、报废、售后等费用总和)； $d$ 、 $f$ 、 $g$ 、 $h$ 、 $j$ 为各主体质量水平对质量损失的基础影响系数； $k_1 \sim k_5$ 为衰减系数，表示主体质量水平每提升1级，质量损失的衰减速率； $p$ 为余项。

## 6. 结构优化模型

### 6.1. 模型优化

在已构建的多主体系统模型基础上，进一步细化各主体的内部结构和交互机制。特别是针对影响性能的关键结构参数，明确其在模型中的表示方式和作用路径。

1) 参数敏感性分析：初始阶段，实施初步模拟实验，旨在甄别出对系统性能具有显著影响的若干关键结构参数。继而针对这些参数，开展敏感性分析，详尽探究其于不同取值区间内，对各项性能指标所施加影响的程度及变化趋势。

2) 优化目标设定：根据敏感性分析结果，明确优化目标。即确定需要最大化或最小化的性能指标，以及这些指标与关键结构参数之间的定量关系。

3) 优化模型构建：基于优化目标和关键结构参数，构建具体的优化模型。该模型应能够描述系统在不同结构参数组合下的行为，并预测相应的性能指标值[6]。

鉴于 Netlogo 仿真平台在处理随时间动态演变的复杂系统建模方面展现出独特优势，可借助该平台构建产品质量损失涌现模型，用于系统分析影响产品质量损失的各主体属性。在基准模式设定下，深入观测各因素在微观层面的交互模式，以及其对宏观层面产品质量损失涌现现象的影响机制。

### 6.2. 仿真结果

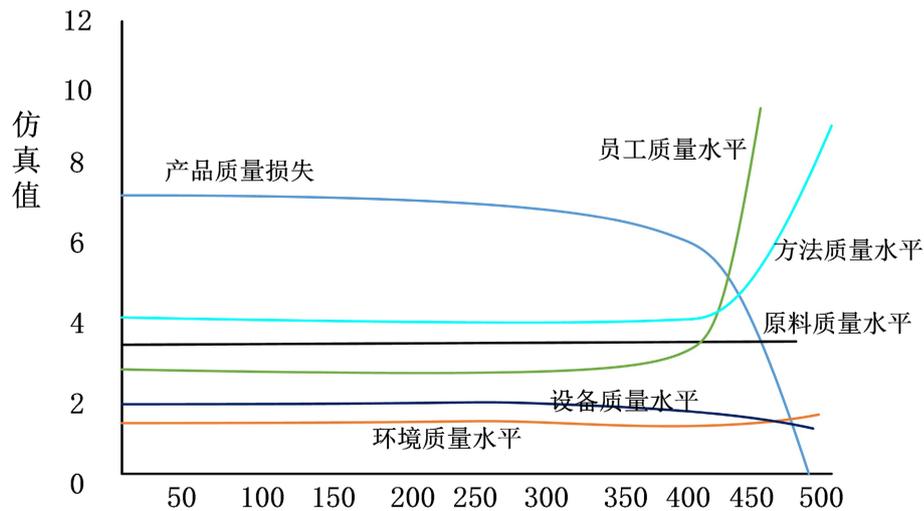
#### 仿真参数设置

本研究基于 Netlogo 6.4.0 版本开展仿真，核心参数设置如表 1 所示，所有参数取值均参考实际生产数据与行业标准确定

**Table 1.** Detailed list of simulation parameter settings  
**表 1.** 仿真参数设置明细表

参数类别	参数名称	参数取值	单位	设置依据
人员主体参数	初始质量意识评分	80	分	企业员工问卷调查统计结果
	员工学习率	0.03~0.08	1/天	参考[3]中人员学习率取值范围
	日均违规操作频次	0~2	次/天	现场监控历史数据统计
设备主体参数	初始运行时长	100	小时	设备台账记录
	设备维护频率	1~5	次/周	GB/T 30240-2013 标准要求
	初始保养水平	3	级	企业设备维护记录
环境主体参数	标准温度	25	°C	生产工艺文件要求
	标准湿度	60	%RH	生产工艺文件要求
仿真全局参数	仿真步长	500	步	确保系统达到稳定状态
	步长对应时间	1 步 = 1 小时	小时/步	匹配实际生产时间尺度
	重复仿真次数	30	次	降低随机误差影响

为评估结构参数对系统性能的影响，我们进行了严谨的仿真分析。首先，根据优化需求设定仿真参数，包括结构参数取值、仿真时长等。仿真结果如图 2 所示。随后，利用仿真工具执行仿真，实时记录系统状态和性能指标。数据收集后，进行严格校验，确保数据准确无误。最后，通过仿真和数据分析揭示参数与性能间的关系，并提出优化建议。



**Figure 2.** Trend of product quality loss with simulation step size  
**图 2.** 产品质量损失随仿真步长变化趋势图

由图 2 可知，产品质量损失的峰值是 7.2，仿真前期呈现稳定状态，中后期迅速降低。在仿真初始阶段(步长 0~150)，其值约 7，保持稳定。步长从 150 增至 400 时，数值开始缓慢下降，步长超 400 后急剧降低。

仿真初期，人员、机器、物料、方法、环境和测量主体的质量水平平稳。员工质量水平仿真值在 2~2.5 波动，设备约 1.8，环境约 1.5，方法约 4，原料在 3.5~3.8。随着时间推移，因管理水平提升和学习能力

增强, 员工、方法等主体质量水平上升。从步长 150 起, 员工质量水平仿真值逐步增长, 步长 500 时达约 9.5; 方法质量水平仿真值从约 4 增长到约 9。这些主体水平提升促使产品质量提高, 质量损失快速下降。

企业质量管控措施不变时, 原料质量水平仿真值全程稳定在 3.5~3.8, 生产环境质量水平仿真值稳定在 1.5~1.8。而生产设备因随步长增加磨损老化, 其质量水平仿真值从初始约 1.8 逐渐降至步长 500 时的约 1.2。多主体的动态变化, 展现了产品质量损失变化的内在驱动机制。

## 7. 结论与展望

### 7.1. 结论

基于多主体建模与仿真(ABMS)方法, 根据产品质量损失影响因素指标体系, 构建产品质量损失涌现模型[11]。利用 Netlogo 仿真平台, 动态模拟人、机、料、法、环、五个方面的不确定因素对产品质量损失涌现程度和趋势的影响, 分析得到不确定因素间的函数交互规则。

### 7.2. 展望

1) 融合先进技术: 未来应深化多主体建模与仿真方法与大数据、AI 技术的融合, 通过数据挖掘优化模型参数, 提升预测精度与鲁棒性, 并利用 AI 技术实现模型自动化与智能化, 推动方法在复杂系统中的应用。

2) 加强跨学科合作与实际应用: 促进计算机科学、系统工程、管理学等多领域合作, 解决研究难题, 深化理论研究。同时, 与企业、行业合作, 将研究成果应用于实际生产, 验证其有效性, 提升社会价值与经济效益, 为复杂系统分析优化提供实践支持。

## 基金项目

本文得到了南昌理工学院社会科学一般项目(项目编号: NLSK2412)的支持。

## 参考文献

- [1] 张梅, 赵静萍, 孙永丽. 高校图书馆数字资源质量控制与结构优化[J]. 西安文理学院学报: 自然科学版, 2008, 11(4): 120-122.
- [2] 袁姗姗, 张战国, 王永新, 等. 食品质量控制与管理标准体系构建与框架设计研究[J]. 中国标准化, 2025(5): 71-76.
- [3] 王宇星. 基于多主体建模与量词约束满足的产品质量控制研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2019.
- [4] Helbing, D. (2012) Agent-Based Modeling. In: Helbing, D., Ed., *Social Self-Organization: Agent-Based Simulations and Experiments to Study Emergent Social Behavior*, Springer, 25-70. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-24004-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24004-1_2)
- [5] 赵晨辉. 工业产品质量控制策略分析研究[J]. 中国质量监管, 2024(1): 82-83.
- [6] 张鹏. 基于多主体建模的品牌市场演化模型及其仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2007.
- [7] 文新宇. 复杂系统多干扰抵消与抑制理论及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2011.
- [8] 刘怡君. 基于多主体的舆论建模与仿真研究[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(4): 331-336.
- [9] 程国平, 袁付礼. 质量管理学[M]. 第 2 版. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2011.
- [10] 王宇星, 朱伏平, 曹婷婷. 基于多主体建模的药品质量损失涌现模型[J]. 西南科技大学学报, 2019, 34(2): 83-91.
- [11] 焦志倩, 张伟光, 王红瑞, 等. 基于多主体建模工业废水污染控制模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(4): 486-492.