[文章编号] 1003－4684(2026)04-0139-06

生产过程中的决策问题研究

赵 斌，武 怡

（湖北工业大学理学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 针对生产过程中供应链次品率问题，基于假设检验、目标规划及贝叶斯统计等方法，构建了质量控制和决策优化模型。首先，通过简单随机抽样和序贯抽样，基于二项分布-ICDF 的假设检验模型，确定了不同置信水平下的最小样本量和临界次品数量。对比分析表明，序贯抽样在检测效率上更优，在 95％置信水平下，样本量为 98，次品数大于等于 5 时拒绝该批零件；在 90％置信水平下，样本量为 60，次品数小于 9 时接收。随后，构建了双目标规划模型，综合考虑采购、装配、检测、调换和拆解等成本因素，优化了在不同次品率条件下的质量控制与成本效益策略。通过蒙特卡洛模拟生成随机样本，并结合贝叶斯更新方法估计次品率的后验分布，进一步分析不同情境下的利润率变化。最终，模型有效提升了生产效率、利润率和财务稳健性，验证了其在生产质量控制中的适应性和实用性。

[关键词] 二项分布-ICDF 模型；双目标规划；贝叶斯统计；蒙特卡洛模拟

[中图分类号] TP206 [文献标识码] A

随着全球化和国际贸易的深入发展，各国之间的经济联系与相互依存度不断加强，企业在激烈的市场竞争中要想脱颖而出，必须不断提升核心竞争力，并抢占市场先机。在这一过程中，供应链的有效管理成为提升企业竞争优势和顾客满意度的重要手段。然而，供应链的复杂性也带来了更多的不确定性和潜在风险[1]。数据显示，生产过程中零配件的质量直接影响成品的整体质量和市场竞争力。面对市场需求的不断增长和资源有限的压力，传统的生产方式容易导致次品率上升，严重影响企业的经济效益。

在实践中，企业在产品生命周期的各个阶段都有多种可持续运营策略可供选择，不同企业往往根据自身条件采取不同的策略[2]。因此，如何通过优化生产决策来减少次品率并提高效率成为亟待解决的问题。

目前，已有大量研究针对生产过程中的质量控制问题提出了多种算法，如线性规划、动态规划等。近年来，随着计算技术的进步，遗传算法和神经网络等新兴方法也逐渐被应用于生产决策优化中。虽然这些算法能够快速提供解决方案，但仍存在个别情况下的适应性不足问题，则应开发更适合实际生产环境的优化模型。

1 基于二项分布-ICDF 的假设检验模型

假设检验是利用小概率原理，通过随机样本信息推断事先做出的关于总体某一数量特征的论断是否成立的统计研究方法[3]。对比简单随机抽样方案和序贯抽样两种抽样方案，综合考虑进行决策。已知湖北鼎盛电子有限公司准备从供应商手里收购一批零配件（零配件 1 或零配件 2），针对次品率是否超过某一标称值，分别考虑以下两种情况：情况一，在 95％的信度下认定零配件次品率超过标称值，则拒收这批零配件；情况二，在 90％的信度下认定零配件次品率不超过标称值，则接收这批零配件。

1.1 简单随机抽样

1）建立假设 原假设（H_0）：针对情况一：次品率超过标称值；针对情况二：次品率不超过标称值。

备择假设（H_1）：针对情况一：次品率不超过标称值；针对情况二：次品率超过标称。

2）选择显著性水平与检测方法 当信度为 95％时，显著性水平 $\alpha=0.05$；当信度为 90％时，显著性水平 $\alpha=0.1$。在本问题中，根据中心极限定理，当样本量足够大时，二项分布可以用正态分布较好地近似。因此，在这种情形下选择正态分布近似。

[收稿日期] 2024－09－13

[基金项目] 湖北省哲学社会科学研究一般项目（24Y092）

[第一作者] 赵 斌（1975－），男，湖北十堰人，理学博士，湖北工业大学教授，研究方向为应用统计学、数据科学与决策、金融统计、质量控制与管理、生物数学。

3)计算样本量和临界值对应的次品数量　样本量和对应的次品数量的计算确保抽样检测方案有效性。为了在满足给定信度(如 95%或 90%)的前提下,将检测次数控制在最低范围内,需要确定能够达到所需检测精度的最小样本量。这涉及构建并求解一个关于样本量的不等式,该不等式考虑了次品率、置信区间以及所需的统计功效(即正确接受或拒绝原假设的概率)。通过解这一不等式,确保在给定的次品率下,具有足够的信度来判断是否拒绝原假设。

4)计算检验统计量　使用样本次品率作为总体次品率的无偏估计,并进一步计算其标准误差。检验统计量为样本次品率与标称次品率之间的差异,除以标准误差,得到检验统计量 Z 。Z 反映样本次品率与标称次品率的偏离程度,用于后续的假设检验决策。

$$Z=\frac{\text{样本次品率}-\text{标称次品率}}{\text{标准误差}} \tag{1}$$

5)判断并做出结论　根据计算结果和决策标准,判断是否有足够证据拒绝原假设。

1.2　序贯抽样

序贯抽样是一种动态抽样方法,其中样本量不是预先固定的,而是根据抽样的结果逐步决定。

1)建立假设　原假设(H_0):针对情况一:累计次品数达到某个阈值时拒绝;针对情况二:累计次品数未达到某个阈值时接受。

备择假设(H_1):针对情况一:累计次品数未达到某个阈值时接受;针对情况二:累计次品数达到某个阈值时拒绝。

2)确定一个停止规则和阈值　这通常通过序贯概率比检验($SPRT$)来实现,但为了简化,可以使用一个简单的规则,例如:如果在抽样的前 k 个样本中发现了超过 11%的次品,则停止抽样并拒绝;如果在抽样的前 k 个样本中未达到 11%的次品,则继续抽样。

3)计算样本量和临界值对应的实际抽样次品数量　具体的最小检测次数需要通过模拟或计算来确定,但通常会比简单随机抽样少。

4)判断并做出结论　根据计算结果和决策标准,判断是否有足够证据拒绝原假设。

1.3　对比结果

序贯抽样在检测次数上会更优,因为它允许在达到决策标准时停止抽样。然而,序贯抽样方案的制定和执行通常比简单随机抽样更复杂。企业应根据其资源、风险承受能力和操作便利性来选择合适的方案。在大多数情况下,序贯抽样会是更经济的选择。

1.4　基于二项分布-ICDF 的假设检验模型建立

1)确定原假设 H_0 和备择假设 H_1。H_0:零配件次品率 $p\leq 0.10$;H_1:零配件次品率 $p>0.10$。

2)选择 $\alpha=0.1$ 和 $\alpha=0.05$ 这两个显著性水平,并且根据标准正态分布表查找单侧检验时 $Z_{0.05}$ 与 $Z_{0.10}$ 的值。

3)计算样本大小 n 。

$$n=\frac{(Z_{alpha}{}^2)\cdot p_0\cdot(1-p_0)}{E^2} \tag{2}$$

其中,Z_{alpha} 是标准正态分布的上 $alpha$ 分位点(当 $alpha=0.05$ 时,$Z_{0.05}\approx 1.645$;当 $alpha=0.10$ 时,$Z_{0.10}=1.282$);$p_0=0.1$ 是供应商声称的次品率上限;$E=0.05$ 是误差范围。

4)计算临界值对应的次品数量 X_c 。

$$X_c=p_0\cdot n+Z_{alpha}\cdot\sqrt{p_0\cdot(1-p_0)\cdot n} \tag{3}$$

5)样本中次品数量为 X_c ,样本次品率为 $\hat{p}$,根据中心极限定理[4],$\hat{p}$ 近似服从正态分布 $N\left(p,\frac{p(1-p)}{n}\right)$,计算 Z :

$$\hat{p}=\frac{X}{n} \tag{4}$$

$$Z=\frac{\hat{p}-p}{\sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}} \tag{5}$$

6)比较 Z 与 Z_{alpha} ,当 $Z\geqslant Z_{alpha}$,则拒绝原假设,当 $Z<Z_{alpha}$,则接受原假设。

2　阶段划分

企业在确定收购这批零配件后,需要进行成品装配,整个生产流程则需要经过以下几个步骤,包括检测、装配、拆解等,图 1 为阶段划分流程图。

2.1　零配件检测阶段

在生产过程中,企业首先需要采购两种零配件(零配件 1 和零配件 2)以进行成品装配。此阶段的关键决策是是否对采购的零配件进行检测,以确保次品不进入后续装配环节。企业必须平衡零配件的采购成本、检测成本与次品流入生产的风险。检测与不检测的权衡:

1)选择检测:检测零配件将产生检测成本 d_1 和 d_2,但可以剔除不合格的零配件,防止次品影响成品质量。这有助于降低后续处理不合格成品的成本。

2)选择不检测:不检测可以节省检测成本,但可能导致次品零配件流入装配环节,进而增加成品次品率。这会增加后续成品处理成本和调换损失,影响企业的利润。因此,在检测成本较低或零配件次品率较高的情况下,检测零配件是更优的选择;但如

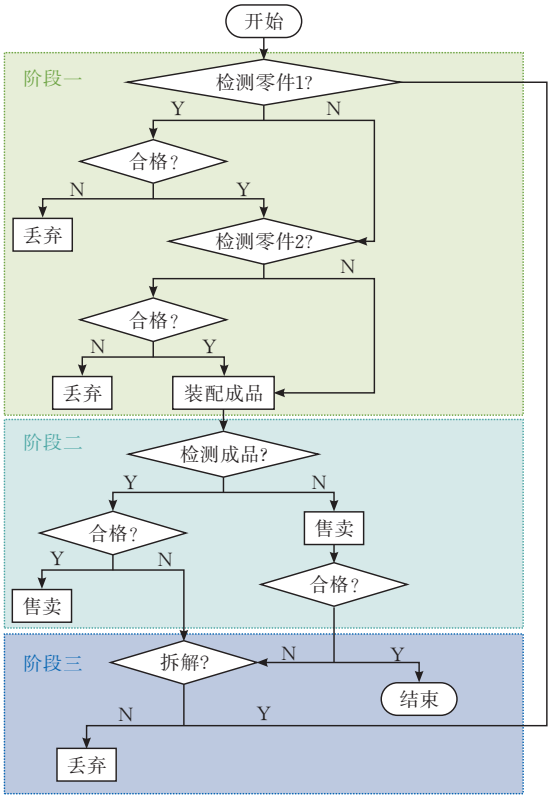

图 1　阶段划分流程图

果检测成本过高且次品率较低,则不检测更为经济。

2.2　成品检测阶段

成品的生产依赖于合格的零配件。经过装配后的成品能否满足市场质量要求是企业盈利的关键。因此,成品是否检测是另一个重要决策点。检测与不检测的权衡:

1)选择检测成品:成品的市场售价较高,检测成品可以减少不合格产品进入市场的风险,降低后续的调换损失(物流成本、企业信誉受损等)。

2)选择不检测成品:如果成品次品率较低,或者调换损失较小,企业可以选择不检测成品,直接进入市场。但在次品率较高或市场敏感的情况下,这种做法可能带来更大的长期成本。

2.3　是否拆解回流阶段

企业在检测成品后可能会发现一些不合格产品。此时,企业需要决定是否对其进行拆解回收,以重复利用零配件。此决策取决于拆解成本与潜在的回收价值,以及不合格成品进入市场可能带来的调换损失。拆解与报废的权衡:

1)选择拆解:拆解不合格成品可以回收部分零配件,减少浪费并降低对环境的负面影响。虽然拆解会产生额外成本 $discost$(拆解费用),但回收的零配件可用于后续生产,降低整体生产成本。在拆解费用较低、不合格成品较多的情况下,拆解不合格成品是更为经济的选择。

2)选择报废:如果拆解费用较高,或零配件的次品率较高、不具备回收价值,企业可以选择直接报废不合格成品,节省拆解成本。

3　目标规划模型的建立与求解

3.1　模型的建立

针对成品检测与否分为两种情况进行目标函数构建[5]。假设成品不检测状态为 0,成品检测状态为 1;成品拆解状态为 1,成品不拆解状态为 0;零配件 1 检测状态为 1,零配件 1 不检测状态为 0;零配件 2 检测状态为 1,零配件 2 不检测状态为 0。

1)成品不检测　成品不检测则后续流程会出现调换,根据排列组合,此时有 8 种情况,如表 1 所示。

表 1　成品不检测时的 8 种状态

零配件 1	零配件 2	成品检测	成品拆解
0	0	0	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	0	1
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	0	0
1	1	0	0

在成品不检测时,根据表 2 的数据可得出 $p_{非次品总概率}$,零配件的总购买单价 $c_{总}$,零配件的总检测成本 $d_{总}$ 以及次品总概率 $p_{次品总概率}$。则目标函数,即最大利润 T:

$$T_{\max}=s_{\cos t}\cdot(p_{非次品总概率})-[c_{总}+d_{总}-(r_{\text{loss}}+d_{\cos t}-(c_1+c_2))\cdot p_{次品总概率}] \quad (6)$$

其中,$s_{\cos t}$ 表示成品市场售价;r_{loss} 表示不合格成品调换损失。

表 2　企业在生产中遇到的情况

情况	零配件 1			零配件 2			成品			不合格成品		
	次品率/%	购买单价	检测成本	次品率/%	购买单价	检测成本	次品率/%	装配成本	检测成本	市场售价	调换损失	拆解费用
1	10	4	2	10	18	3	10	6	3	56	6	5
2	20	4	2	20	18	3	20	6	3	56	6	5
3	10	4	2	10	18	3	10	6	3	56	30	5
4	20	4	1	20	18	1	20	6	2	56	30	5
5	10	4	8	10	18	1	10	6	2	56	10	5
6	5	4	2	5	18	3	5	6	3	56	10	40

2)成品检测　成品检测则后续流程会出现拆解和不拆解,根据排列组合,此时有 8 种情况,如表 3 所示。

表 3　成品检测时的 8 种状态

零配件 1	零配件 2	成品检测	成品拆解
0	0	1	1
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	1	1
0	0	1	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	0

在成品检测时,目标函数,即利润:

$$T_{\max}=s_{\cos t}\cdot(p_{\text{非次品总概率}})-[c_{\text{总}}+d_{\text{总}}-(d_{\cos t}-(c_1+c_2))\cdot p_{\text{次品总概率}}] \tag{7}$$

约束条件同为表 2 中的数据。

3.2　模型的求解

由于细分情况较多且各情况下的计算方法具有相似性,以零配件 1、零配件 2 以及成品均不进行检测的情况作为例进行求解。

在该情况下,总成本为:

$$\text{totalcost}=c_1+c_2+c_3+r_{\text{loss}}\cdot(p_1+p_2+(1-p_1)\cdot(1-p_2)\cdot p_3) \tag{8}$$

总收入为:

$$\text{totalrevenue}=s_{\cos t}\cdot(1-(p_1+p_2+(1-p_1)\cdot(1-p_2)\cdot p_3)) \tag{9}$$

总利润为:

$$T=\text{totalrevenue}-\text{totalcost} \tag{10}$$

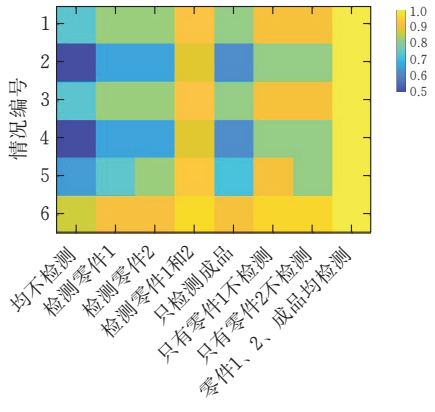

图 2　合格率热力图

由于成品调换和拆解是在成品不合格的情况下才能发生,因此在计算合格率时只用考虑零配件 1、2 和成品是否检测这 8 种情况。上图 2 为 8 种决策方案下的合格率热力图,下图 3 为 16 种决策方案在 6 种情况下的总成本曲线图,图 4 为 16 种决策方案在 6 种情况下的总利润曲线图。

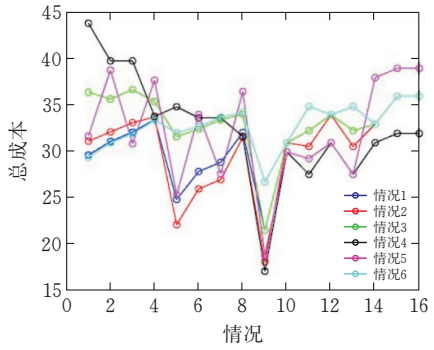

图 3　16 种决策方案在六种情况下的总成本曲线图

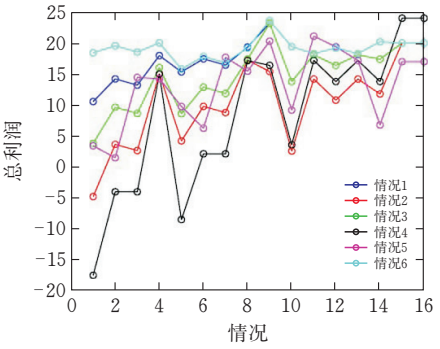

图 4　16 种决策方案在六种情况下的总利润曲线图

根据所定义目标函数利用 matlab 编程完成利润率 T 的求解。所得六种情况的详细结果如表 4 所示。

表 4　六种情况下的最优方案

情况	决策方案	利润率/%
情况 1	1101	63.94
情况 2	1101	35.49
情况 3	1101(1111)	47.85
情况 4	1111	63.12
情况 5	0011	71.34
情况 6	0000	73.46

综上所述,在各种生产环境下,当零配件的次品率较高或成品的调换成本较大时,进行检测是减少后续成本并提升利润的有效方法。此外,对于不合格的成品,通常通过拆解来回收部分成本,但当拆解成本过高时,直接处理掉这些不合格产品可能更为经济。最终六种情况的决策方案为 1101,1101,1101(1111),1111,0011,0000,利润率分别为 63.94%,35.49%,47.85%,63.12%,71.34%,73.46%。

4　设计决策方案

4.1　模型的准备

现在已知企业生产过程中涉及 m 道工序和 n 个零配件,企业的次品率分布于零配件、半成品和成品各个阶段,数据如下表 5 所示。因此,需要重新构建目标规划模型,对各阶段的成本与收益进行建模,

进而得到生产过程中最佳组合的检测/拆解决策。

表 5　企业零配件次品率分布的各个阶段

零配件	次品率	购买单价	检测成本	半成品	次品率	装配成本	检测成本	拆解费用
1	10%	2	1	1	10%	8	4	6
2	10%	8	1	2	10%	8	4	6
3	10%	12	2	3	10%	8	4	6
4	10%	2	1					
5	10%	8	1	成品	10%	8	6	10
6	10%	12	2					
7	10%	8	1		市场售价		调换损失	
8	10%	12	2	成品	200	40		

4.2　模型的求解

图 5 为 16 种决策变量的排列组合分别对应的利润分布图,图 6 为 16 种决策变量的排列组合分别对应的成本分布图。

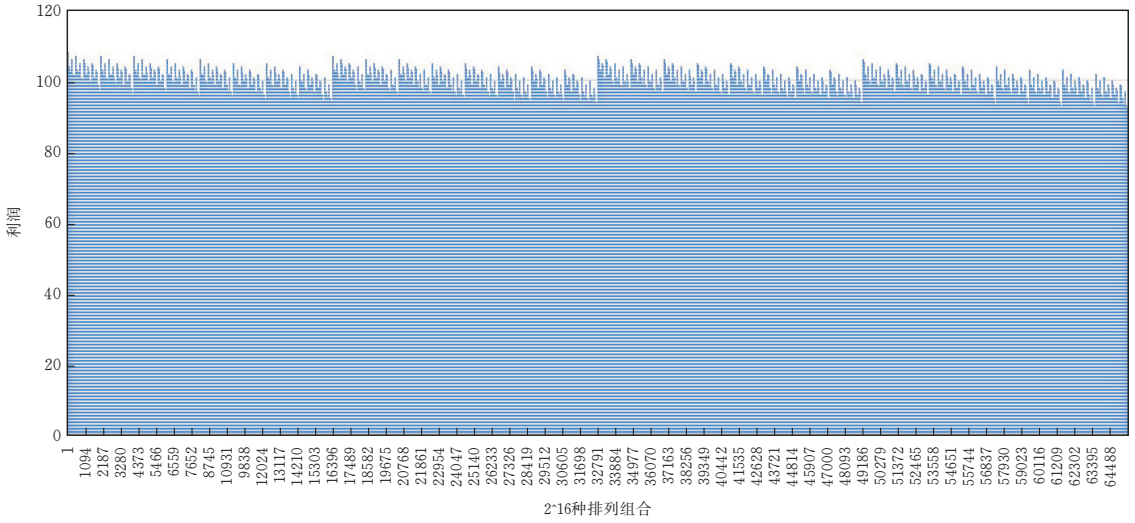

图 5　16 种决策变量分别对应的利润分布图

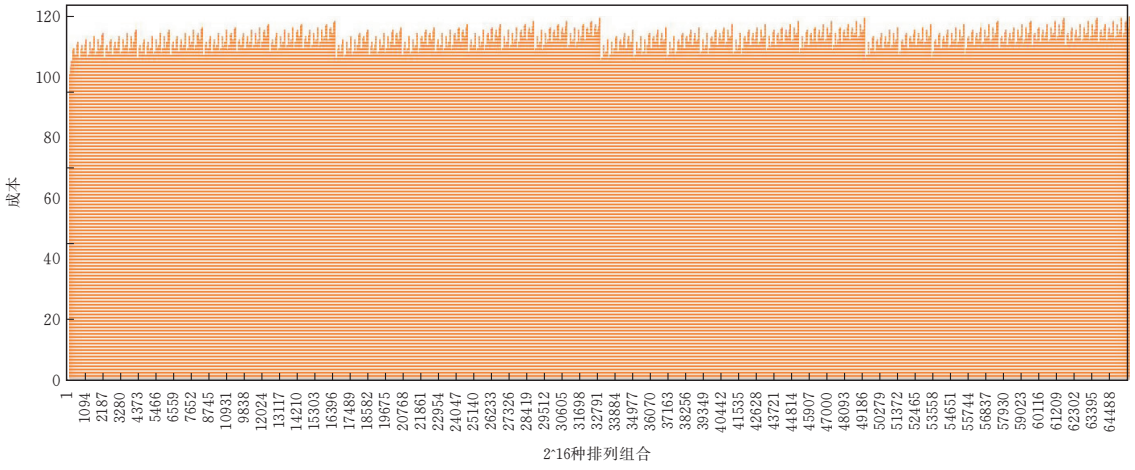

图 6　16 种决策变量分别对应的成本分布图

最终,得出最佳组合的检测/拆解决策:1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 1;最大利润率为:34.68%[6-8]。

5　分析与结论

1)抽样方案对比:基于二项分布 - ICDF 假设检验,序贯抽样效率更高,95% 置信水平样本量 98、临界次品 5,90% 置信水平样本量 60、临界次品 9,可快速判别批次质量,但流程复杂,适用于高价值、高质控要求零部件;简单随机抽样操作简便,适合低成本小批量零配件,企业可结合自身资源与风险偏好选用抽样方式。

2)多阶段检测成本收益:生产包含零配件检测、成品检测、次品拆解三大决策节点。零配件次品率高、售后赔付大时,前置检测可压缩综合成本;若检

测费用高、次品率低，则无需抽检零配件。成品检测可规避市场赔付与品牌损失，仅低价低售后损失产品可免检；拆解回收仅在拆解成本低于配件重置成本时划算，否则直接报废次品更经济。

3）最优检测方案具有场景差异：六种生产场景对应不同 0-1 检测组合。高低损场景 1-3 优选零配件全检、成品检测并拆解次品，利润率 35.49%～63.94%；场景 4 全流程检测最优，利润率 63.12%；场景 5 仅成品检测拆解收益最高，利润率 71.34%；场景 6 各项检测成本高、次品少，全流程不检利润率 73.46%。多配件复杂生产线采用全检加选择性拆解，稳定利润率 34.68%。

4）模型应用价值：本文整合假设检验、目标规划、贝叶斯更新与蒙特卡洛模拟，量化各方案次品率、成本与利润，改变传统经验式质控模式。模型适配电子装配企业，可根据采购、检测、售后、拆解等参数灵活调整，助力企业优化质量管控、压降成本、稳定经营效益[9-11]。

综合上述分析可知，生产质控无通用最优方案，零配件次品率、检测、售后及拆解成本是决策核心要素。企业应当结合自身生产数据定量测算收益，动态调整抽样、检测与次品处理策略，平衡质量风险与生产成本。

[参考文献]

[1] 董方. 电子产品制造业供应链韧性评价研究[D]. 淄博：山东理工大学，2023.
[2] 董朝晖. 考虑以旧换新的制造企业全生命周期运营决策研究[D]. 长春：吉林大学，2024.
[3] 王军虎. 基于假设检验的区间估计必要样本容量确定[J]. 统计与决策，2023，39(21)：29-33.
[4] 茆诗松，程依明，濮晓龙等. 概率论与数理统计教程. 第 4 版[M]. 北京：高等教育出版社，2021.
[5] 姜启源，谢金星，叶俊. 数学模型.第 4 版[M]. 北京：高等教育出版社，2021.
[6] 田晓. 电子产品生产过程中质量影响因素及应对策略[J]. 大众标准化，2022，27(04)：14-17.
[7] 鲍贵，席雁. 统计显著性检验：问题与思考[J]. 南京工程学院学报(社会科学版)，2010，10(04)：27-32.
[8] 刘庆武，胡志艳. 如何用 SPSS、SAS 统计软件进行正态性检验[J]. 湘南学院学报，2005，07(03)：56-58.
[9] 刘小虎，李生. 决策树的优化算法[J]. 软件学报，1998，43(10)：78-81.
[10] 朱昊，房庆祥. 选课管理系统多目标 0-1 规划模型研究[J]. 电脑编程技巧与维护，2024，32(04)：80-84，143.
[11] 佟珈锐，刘政. 抽样技术与方法在抽样检验中的应用[J]. 电声技术，2023，47(09)：114-117.

Research on Decision-making Issues in the Production Process

ZHAO Bin，WU Yi

(*School of Science*, *Hubei Univ. of Tech.*, *Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: This paper addresses the issue of defect rates in the supply chain during the production process by constructing a quality control and decision optimization model based on hypothesis testing, goal programming, and Bayesian statistics. First, using simple random sampling and sequential sampling, a hypothesis testing model based on the Binomial Distribution ICDF was applied to determine the minimum sample size and critical defect quantity at different confidence levels. Comparative analysis showed that sequential sampling is more efficient. At a 95% confidence level, a sample size of 98 was required, and the batch was rejected if the number of defects was greater than or equal to 5. at a 90% confidence level, a sample size of 60 was required, and the batch was accepted if the number of defects was fewer than 9. Subsequently, a dual objective programming model was developed, considering factors such as procurement, assembly, inspection, replacement, and dismantling costs, to optimize quality control and cost efficiency strategies under different defect rate conditions. Using Monte Carlo simulation to generate random samples and combining Bayesian updating to estimate the posterior distribution of the defect rate, the model further analyzed profit rate variations under different scenarios. Although the profit rates fluctuated, the optimal decision strategy remained unchanged. Ultimately, the model effectively improved production efficiency, profitability, and financial stability, demonstrating its adaptability and practicality in production quality control.

Keywords: binomial distribution ICDF model; dual objective programming; Bayesian statistics; Monte Carlo simulation

[责任编校：闫品]