

引用格式: 曹阳华,刘永龄,苏宝华,等.基于工序性能指数的连续批外购件计量抽样检验方案研究[J].标准科学,2025(11):135-142.

CAO Yanghua,LIU Yongling,SU Baohua,et al. Research on Sampling Inspection Scheme of Continuous Batch Purchased Parts Based on Ppk [J].Standard Science,2025(11):135-142.

基于工序性能指数的连续批外购件计量抽样检验方案研究

曹阳华¹ 刘永龄¹ 苏宝华² 李晓彤¹ 冯天毅¹

(1.沈阳航空航天大学 经济与管理学院; 2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 产品检验检测中心)

摘要: 【目的】针对外购件质量难以把控、抽样成本高等问题,本文以GB/T 6378为基准,提出了一种基于工序性能指数的连续批计量抽样检验方案,为企业降低采购风险、实施标准化抽样检验提供理论支撑。【方法】在无法实时对供应商生产状况进行监控的条件下,充分利用历史信息进行正态性检验,并以工序性能指数代替过程能力指数,提出一套抽样检验流程,对供应商生产现状进行判断,以确保外购件质量。【结果】该抽样方案有效解决了难以对供应商生产过程稳定性进行判断的问题,经对比验证确实降低了使用方风险。【结论】新抽样方案较GB/T 6378检验方案更为严格,能够帮助企业较好地实现对外购件的质量把控,为企业确保外购件质量、降低检验成本提供了指导依据。

关键词: 计量抽样检验; 连续批; 正态分布; 工序性能指数

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2025.11.018

Research on Sampling Inspection Scheme of Continuous Batch Purchased Parts Based on Ppk

CAO Yanghua¹ LIU Yongling¹ SU Baohua² LI Xiaotong¹ FENG Tianyi¹

(1.College of Economics and Management, Shenyang Aerospace University; 2. Product Inspection and Testing Center, AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd.)

Abstract: [Objective] In response to the challenges of difficult-to-control quality of purchased parts and high sampling costs, based on the national standard GB/T 6378, a continuous batch metrological sampling inspection scheme based on process performance index is proposed, providing theoretical support for enterprises to reduce procurement risks and implement standardized sampling inspection. [Methods] In conditions where real-time monitoring of supplier production status is not feasible, historical information is fully utilized for normality testing, and the process performance index is used instead of the process capability index to propose a sampling inspection process for assessing the current production status of suppliers

基金项目: 本文受航空基金项目“考虑复杂海洋环境的主承力结构使用寿命精准化评估方法研究”(项目编号: 20230009054001); 中国航发黎明科研课题(项目编号: KT22G044-YIY); 沈阳航空航天大学横向课题“替代检验技术研究”(项目编号: 横20240204)资助。

作者简介: 曹阳华, 博士, 硕士研究生导师, 研究方向为质量控制与可靠性。

刘永龄, 硕士研究生, 研究方向为质量管理

苏宝华, 高级工程师, 研究方向为检验检测技术。

李晓彤, 硕士研究生, 研究方向为精益物流。

冯天毅, 硕士研究生, 研究方向为精益物流。

to ensure the quality of purchased parts. [Results] This sampling scheme effectively addresses the difficulty in assessing the stability of the supplier's production process, and has been verified through comparison to reduce the risk for the user. [Conclusion] The new sampling scheme is more stringent than the inspection scheme of GB/T 6378, helping enterprises better control the quality of purchased parts and providing guidance for ensuring the quality of purchased parts and reducing inspection costs.

Keywords: quantitative sampling inspection; continuous batch; normal distribution; Ppk

0 引言

制造业高质量发展是我国经济高质量发展的重中之重,确保产品质量是助力制造业高质量发展的有效举措,特别是在如今许多企业将部分零部件的生产环节外包的情况下,更需要对产品质量严格把关。科学高效的产品检验方案能够有效地确保产品质量,提高企业检验工作效率,进而实现“质量强国”的发展目标。

抽样检验是一种大批量产品检验的重要方法。关于抽样检验的学术探索起源于20世纪20年代,贝尔电话实验室的哈里·弗朗西斯·道奇对该理论体系的建立起到了关键性的推动作用。随着抽样检验技术的日益精进,研究人员按照检验特性值的属性将抽样检验分为计数抽样检验和计量抽样检验两大类并展开相关研究^[1-2]。计数抽样检验较之计量抽样检验更为简单易行,但计量抽样检验能获得较多、较精密的信息,所需样本量更少,可靠性更大^[3-4]。因此,在检验负荷大、检验成本高的场合,特别是在连续供货的情况下,计量抽样检验得以广泛应用。研究人员关注计量抽样检验的可靠性和适用性,从不同视角出发,对计量抽样检验展开研究。于善奇^[5-7]对双侧限量一次抽样检验展开研究,为实际应用提供便利方法;王建琼等^[8]从变异系数的角度研究计量抽样检验方法;仇伟等^[9]提出了使用 σ 法的一次计量抽样检验方案;负来峰等^[10-13]讨论了基于Bayes理论的计量一次抽样检验方法;朱正德^[14]考虑批量生产的偶发原因,提出了更适合在生产中应用的计量抽样检验方法;邓梦君等^[15]针对产品主要质量特性制定了一套基于抽样风险的动态计量型抽样

检验方案,动态调整产品的使用方和生产方风险来改变抽样检验的严格性;赵华等^[16-18]基于使用方风险的角度探讨计量抽样检验的风险评估与方案优化;Ferrell W G等^[19]从检验误差角度探讨了计量抽样验收方案。

通过上述文献梳理可以看出,目前关于计量抽样检验的研究主要从确保产品质量和降低抽样风险两个角度展开,鲜有研究将重点放在检验的前提条件上。由于企业与供应商之间的信息具有不对称性,企业无法对供应商的生产状况进行实时监控,生产过程的稳定性难以判断,给抽样检验工作增加了一定的难度,而生产过程稳定是计量抽样检验展开的重要前提。因此,本文在综合考虑方案易用性和科学性的基础上,提出一种基于工序性能指数的连续批计量抽样检验方法,利用历史信息,通过滚动更新数据进行正态性检验,在无法掌握供应商实时生产质量的前提下,以工序性能指数近似代替过程能力指数,用以反映工序的生产现状。在此基础上,利用GB/T 6378的理论知识进行抽样检验,进一步降低企业对外购件的接收风险。

1 GB/T 6378简介

1.1 GB/T 6378应用前提

GB/T 6378是一种以接收质量限(AQL)为质量指标的抽样系统。该系统包含计量抽样方案和转移规则,适用于连续批的逐批检验。应用该标准需满足以下条件:

(1) 提交检验的批次为连续批次,即产品全部由同一生产方同一生产过程提供;

(2) 仅对产品的单一质量特性进行研究, 该质量特性值需用连续尺度测量;

(3) 产品的生产过程处于统计受控状态, 质量特性服从或近似服从正态分布;

(4) 应规定单位产品质量特性的规格限。

1.2 GB/T 6378使用程序

GB/T 6378的使用程序包括选择检验方式、规定检验水平、规定AQL值、规定抽样方案的严格度、检索抽样方案、提交供检验产品、抽取样本、对抽取的样本进行检查、根据检查结果判断批产品可否接收、对检查批次进行相应处理共计10个步骤。在实际操作过程中, 可根据连续批的接收情况应用转移规则动态调整检验的严格度。

2 基于工序性能指数的计量抽样检验流程

该方法的总体思路是在根据历史数据判断产品质量特性符合正态性分布后, 抽取样本并计算其工序性能指数, 通过将产品在该工序性能指数下的合格率与接收标准相对比, 从而确定其是否具备抽样检验资格。如果允许进行抽样检验, 则按照GB/T 6378进行抽样, 否则进行全数检验。

2.1 首批产品检验

首批产品检验流程如图1所示。结合流程图对首批产品检验过程简述如下:

(1) 针对首批送检产品, 对所有产品进行全

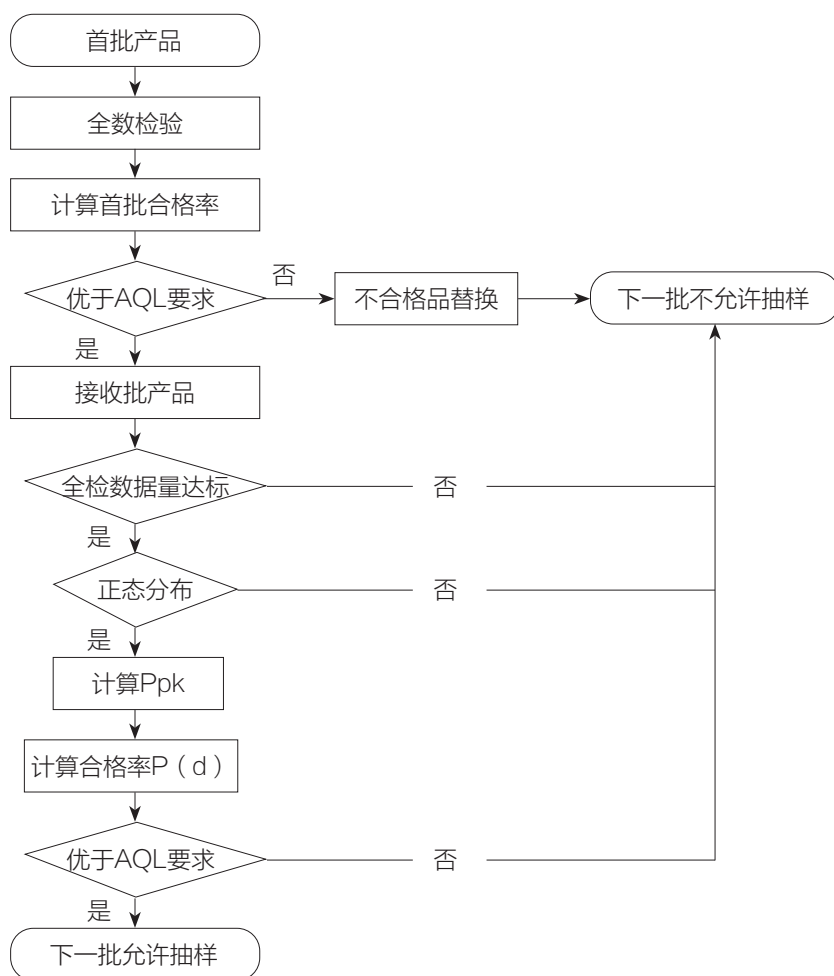


图1 首批产品检验流程图

数检验并计算首批合格率,判断首批合格率是否满足AQL对应要求。若满足,则接收批产品;否则要求供应商替换不合格产品,同时下批送检产品不具备抽样检验资格。

(2) 若首批产品可接收,则判断产品数据量是否达标。首批产品数据量达到统计大样本要求(30件)为达标。若数据量达标,则继续判断其质量特性数据是否符合正态分布;若数据量不达标,下一批继续全检,不允许抽样。

(3) 若质量特性数据符合正态分布,则计算工序性能指数及合格率;若不符合正态分布,则下一批继续全检,不允许抽样。

(4) 若合格率达到AQL对应要求,则下一批产品具备抽样检验资格;否则下一批产品不允许进行抽样检验。

2.2 非首批产品检验

非首批产品检验流程如图2所示。

对非首批产品检验流程简要阐述如下:

(1) 根据上一批次的检验结果判定当批产品是否具备抽样检验的资格。若当批产品具备抽样检验资格,则继续执行抽样流程;若当批产品不具备抽样检验资格,则全数检验。

(2) 对于具备抽样资格的产品,按照GB/T 6378抽取样本后滚动更新数据库,并按照2.1中

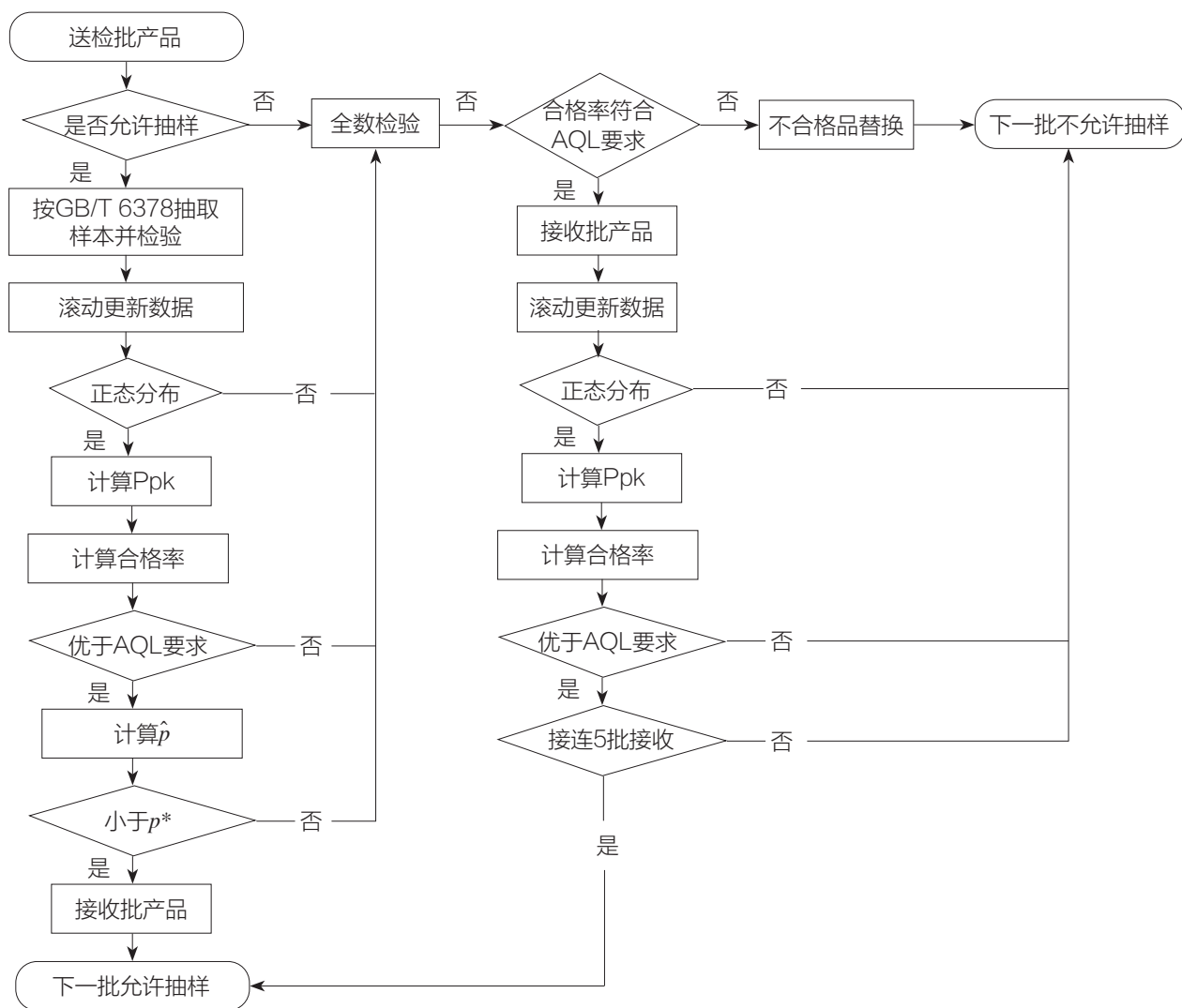


图2 非首批产品检验流程图

(3)~(4)判断是否满足AQL要求。若满足,按GB/T 6378判断是否接收该批,进而判断下一批次产品是否具备抽样检验资格。

(3)若需全数检验,首先根据全数检验结果判定合格率是否符合AQL要求。

1)若符合,则当批产品准予接收,滚动更新数据库,并按照2.1中(3)~(4)判断是否满足AQL要求。如果是,按照GB/T 6378要求,连续5批产品被接收后,下一批产品才具备抽样检验资格。

2)若不符合,需进行不合格品替换,下一批产品不具备抽样检验资格。

3 基于工序性能指数的计量抽样检验方法

3.1 数据滚动更新

企业在接收供应商提供的产品时,首批产品的检验结果至关重要。对首批产品进行全数检验,并将尺寸特性数据录入数据库。参考常规过程能力计算GB/T 40681《生产过程能力和性能监测统计方法》,设定数据库容量为30。数据库中的数据在后续检验过程中保持实时滚动更新,更新过程由新数据等量替换掉原数据库中最早的数据。数据滚动更新这一环节既能保证数据量充足,又能实时反映生产现状。

3.2 正态性检验

常见的正态性检验包括K-S检验、A-D检验、S-W检验等。其中,A-D检验是无方向检验^[20],具有检验效率高、受样本量影响较小且具有与舍入误差的鲁棒性等特点。考虑质量控制过程监控敏感性和实际操作方便性的需求,选用A-D正态性检验方法。

AD统计量为:

$$AD=n-S \quad (1)$$

$$S=\sum_{i=1}^n \frac{2i-1}{n} [\ln(F(X_i)) + \ln(1-F(X_{n-i+1}))] \quad (2)$$

其中, n 是样本数量, i 是数据的排秩, $F(X)$ 是

正态分布的累计概率密度函数。

为提高检验的稳健性,使用调整后的AD统计量计算假定正态分布的P值。

调整后的AD统计量为:

$$AD^* = AD(1 + \frac{0.75}{n} + \frac{2.25}{n^2}) \quad (3)$$

由 AD^* 按表1计算P值。若P值小于0.05,则拒绝原假设,说明质量特性不服从正态分布;反之,则说明质量特性服从正态分布。

表1 正态分布P值计算公式表

AD统计值	P值计算公式
$AD^* \geq 0.60$	$P = \exp [1.2937 - 5.709 (AD^*) + 0.0186 (AD^*)^2]$
$0.34 < AD^* < 0.60$	$P = \exp [0.9177 - 4.279 (AD^*) - 1.38 (AD^*)^2]$
$0.20 < AD^* < 0.34$	$P = 1 - \exp [-8.318 + 42.796 (AD^*) - 59.938 (AD^*)^2]$
$AD \leq 0.20 < AD^* < 0.34$	$P = 1 - \exp [-13.436 + 101.14 (AD^*) - 223.73 (AD^*)^2]$

3.3 工序性能指数(Ppk)计算

企业通常使用过程能力指数(Cpk)来评估工序过程能力,应用Cpk的一个重要前提是生产过程稳定,而对于生产过程稳定性的判断是基于时间序列数据的。企业在验收供应商提供的产品时,无法掌握供应商相关产品生产的时间序列数据,而导致无法计算得出Cpk。以工序性能指数代替过程能力指数对生产过程能力进行判断,能近似地解决该问题。工序性能指数能够反映生产现状,并且对生产过程稳定性不作要求,因此在本方案中使用工序性能指数来评估生产现状。

工序性能指数计算公式如下:

单侧上限过程工序性能指数为:

$$Ppu = \frac{USL - \bar{x}}{3s} \quad (4)$$

单侧下限过程工序性能指数为:

$$Ppl = \frac{\bar{x} - LSL}{3s} \quad (5)$$

实际工序性能指数为:

$$Ppk = \min\{Ppu, Ppl\} \quad (6)$$

其中, $\bar{x}$ 代表所有测量值的均值, s 为样本标准差, USL 为规格上限, LSL 为规格下限。

样本标准差 s 计算公式如下:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7)$$

3.4 合格率计算

产品合格率 (fpy) 由以下公式计算:

$$\begin{aligned} P(d) &= P_l + P_u \\ &= P(y < LSL) + P(y > USL) \\ &= \phi\left(\frac{LSL - \bar{x}}{s}\right) + \left[1 - \phi\left(\frac{USL - \bar{x}}{s}\right)\right] \\ &= \phi(-3Ppl) + [1 - \phi(3Ppu)] \\ &= \phi(-3Ppl) + \phi(-3Ppu) \end{aligned} \quad (8)$$

$$fpy = 1 - P(d) \quad (9)$$

其中, $P(d)$ 为不合格品率。

3.5 检验批接收标准

(1) 抽样检验批接收标准

允许抽样检验的产品批按照 GB/T 6378 提供的方法, 分别计算样本均值 $\bar{x}$ 和样本标准差 s , 查 GB/T 6378 对应表格得出所需系数 f_s 的值^[21]。

计算最大样本标准差 $S_{\max}$, 将 $S_{\max}$ 与 s 比较。只有当 $S_{\max} > s$ 时才有后续计算的必要; 若 $S_{\max} < s$, 则直接全数检验。

$$S_{\max} = (USL - LSL)f_s \quad (10)$$

若 $S_{\max} > s$, 则按式 (11) 和式 (12) 计算 Q_u 和 Q_l 的值, 将 Q_u 和 Q_l 分别乘以 $\sqrt{3}/2$ (约 0.866) 后, 查 GB/T 6378 对应表格确定超出上、下规范限过程不合格品率的估计值 $\hat{p}_u$ 和 $\hat{p}_l$, 总不合格品率估计值为 $\hat{p}$ 。

$$Q_u = \frac{USL - \bar{x}}{s} \quad (11)$$

$$Q_l = \frac{\bar{x} - LSL}{s} \quad (12)$$

$$\hat{p} = \hat{p}_u + \hat{p}_l \quad (13)$$

$n=3$ 时, 若超出上规范限或下规范限的过程不合格品率的估计值 $\hat{p}_u$ 和 $\hat{p}_l$ 无法通过查表得出, 也可通过计算直接得到。

当 $Q > 2/\sqrt{3}$ 时, $\hat{p}_u$ (或 $\hat{p}_l$) = 0;

当 $-2/\sqrt{3} \leq Q \leq 2/\sqrt{3}$ 时,

$$\hat{p}_u \text{ (或 } \hat{p}_l) = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\sqrt{(1 - Q\sqrt{3}/2)/2}\right);$$

当 $Q < -2/\sqrt{3}$ 时, $\hat{p}_u$ (或 $\hat{p}_l$) = 1。

若 $\hat{p}$ 不超过最大允许值 p^* , 则接收该批。

(2) 全数检验批接收标准

从接收角度, 若送检批产品不具备抽样检验相关条件, 则对整批产品进行全数检验。在此情况下, 通过计算产品批合格率 $P1$ 来判定是否接收该批产品 ($P1$ = 合格品数量/批量)。

若合格率优于 AQL 的要求, 则接收该批产品; 否则要求供应商进行不合格产品替换。

4 案例应用

以实际案例对比说明本文所述方法相较 GB/T 6378 更能降低使用方风险。

某种产品设计要求为 (12.00 ± 0.04) mm, 产品合格率要求不低于 98.5%, AQL 设定为 1.5。

(1) 首批产品送检情况

下面是首批产品的检验情况, 共计 30 件, 进行全数检验, 符合要求, 数据见表 2。

表2 首批产品尺寸特性数据表

首批送检产品尺寸特性数据/mm					
12.01	11.99	12.00	11.99	12.00	12.00
11.99	12.00	12.01	12.00	12.01	12.01
11.99	11.99	12.00	12.00	12.01	12.03
12.01	12.01	11.99	11.99	12.00	12.01
12.01	12.00	12.00	11.99	11.99	12.00

该批尺寸特性数据直方图如图 3 所示。

同时, 对该组数据进行 A-D 检验, p 值为 0.778, 符合正态分布。

按式 (6) 计算得 Ppk 为 1.334, 对应合格率为

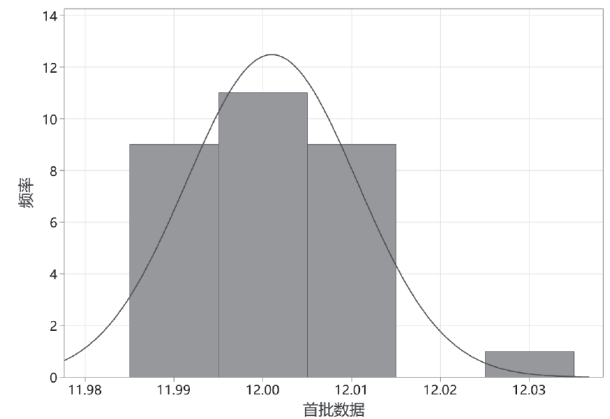


图3 首批送检产品数据直方图

99.996%,符合AQL要求,可以考虑对后续批次进行抽样检验。

(2) 下一批产品送检情况

下一送检批产品共计15件,根据GB/T 6378使用s法进行抽样,从送检批15件产品中抽取3件样品对其尺寸特性进行检验,检验数据见表3。

表3 抽样产品尺寸特性数据表

抽取的尺寸特性数据/mm		
12.03	12.03	12.04

(3) 按本文检验方案进行验收

将抽取的尺寸特性数据加入数据库进行滚动更新,更新后数据库见表4。

表4 滚动更新后的尺寸特性数据表

滚动更新后的尺寸特性数据/mm					
12.01	12.01	11.99	11.99	12.00	12.01
12.01	12.00	12.00	11.99	11.99	12.00
11.99	12.00	11.99	12.00	12.00	12.03
12.00	12.01	12.00	12.01	12.01	12.03
11.99	12.00	12.00	12.01	12.03	12.04

对更新后的尺寸质量特性进行Anderson-Darling检验, $p<0.05$, 不符合正态分布。按本文所述方法,该批产品不具备抽样检验条件,此时应全数检验,检验结果如表5所示(不合格品均以[不]标出)。

表5 送检批尺寸特性数据表

下一送检批尺寸特性数据/mm				
12.02	12.01	12.05[不]	12.03	12.03
12.04	12.04	12.03	12.03	12.05[不]
12.02	12.05[不]	12.03	12.03	12.04

由检验结果可明显看出,其中3个特性值超出规格上限。同时,经计算,该送检批 Ppk 为0.181,没有达到AQL对应的接收要求。

(4) 按GB/T 6378检验方案进行验收

根据表3计算得出 p 值为0.057,表明抽取产品的尺寸特性数据符合正态分布。经计算, $S_{\max}=(12.04-11.96)\times0.18=0.0144$ 。

样本标准差 $s=0.01$, $S_{\max}>s$,根据GB/T 6378要求,需完成进一步计算。

$$\frac{\sqrt{3}}{2}Q_u = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{12.04 - 12.03}{0.01} = 0.866$$
$$\frac{\sqrt{3}}{2}Q_l = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{12.03 - 11.96}{0.01} = 6.062$$

查得 $\hat{p}_u=0.1667$, $\hat{p}_l=0$,故 $\hat{p}=0.1667$,与样本量为3时正常检验过程不合格品率估计的最大允许值 p^* 比较, $p^*=0.1905>\hat{p}$,按照GB/T 6378接收要求,接收该批。

(5) 案例小结

由上述分析对比可知,在验收同一批次产品时,本文所述方案与GB/T 6378的检验方案存在验收结论上的分歧。按照GB/T 6378所给出的检验方法,该批产品被直接接收;但按照本文所述方法,该批产品需要进行全数检验,不合格品应进行产品替换。可见本文所述基于工序性能指数的检验方案更为严格,能进一步降低误收风险。

5 结语

GB/T 6378的应用前提是生产过程稳定,企业对外包产品进行进货检验时,由于与供应商之间的信息不对称,仅从当前批抽样检验数据判断生产过程是否处于统计受控状态风险较大。本文提

出了基于工序性能指数的连续批计量抽样检验方法,基于数据的滚动更新对质量特性数据的正态性和稳定性进行判断,能提高抽样检验的准确性,降低使用方风险,对企业的进货检验工作具有积极意义。

参考文献

- [1] 冯士雍,倪加勋,邹国华.抽样调查理论与方法[M].第2版.北京:中国统计出版社,2012:6-11.
- [2] LAWSON J. An Introduction to Acceptance Sampling and SPC with R[J]. Journal of Quality Technology, 2021, 54(3): 364-365.
- [3] 周玲玲,俞春花.计量调整型抽样检验系统的设计与实现[J].统计与决策,2004(2):20-21.
- [4] 金勇进,刘晓宇.大数据背景下的抽样调查[J].系统科学与数学,2022,42(1):2-16.
- [5] 于善奇.双侧限量一次抽样检验方法与应用(以不合格品率为质量指标,方差已知)[J].质量与可靠性,1992(3):32-35.
- [6] 于善奇.双侧限量一次抽样检验的理论与应用:以均值为质量指标,方差已知[J].北京工业大学学报,1992(3):33-40.
- [7] 于善奇.双侧限量一次抽样检验理论的应用[J].标准科学,2012(6):54-57.
- [8] 王建琼,肖怀谷.以变异系数为质量指标的计量一次抽样检验[J].数量经济技术经济研究,2001(3):117-119.
- [9] 仇伟,任志俊,赵飞飞.计量抽样在齿圈零件质量检验中的应用[J].轻工机械,2019,37(5):102-106.
- [10] 贡来峰,缪云飞,王国平,等.一种新的弹药产品密集度计量型抽样检验方法[J].弹道学报,2020,32(2):50-55.
- [11] LIANG T. Simultaneous variable sampling inspection for finite populations[J]. Communications in Statistics-Theory and Methods, 38(10): 1589-1606.
- [12] 张士军,刘志国.基于贝叶斯理论的小批量产品抽样检验方法[J].统计与决策,2017(11):24-27.
- [13] MOSKOWITZ H, KWEI T. Bayesian Variables Acceptance-Sampling Plans: Quadratic Loss Function and Step-Loss Function[J]. Technometrics, 1992, 34(3): 340-347.
- [14] 朱正德.计量型抽样检验在汽车发动机质量控制中的应用[J].中国计量,2014(6):48-49.
- [15] 邓梦君,梁健瑶,王喜利,等.动态计量型抽样检验在企业质量管理中的应用研究[J].橡胶工业,2021,68(8):615-620.
- [16] 赵华,许迪.喷微灌产品计量与计数抽样方案比较分析[J].排灌机械工程学报,2010,28(4):358-363.
- [17] 贡来峰,张士军,缪云飞,等.一种改进的二次抽样检验使用方风险公式[J].兵工自动化,2019,38(6):52-56.
- [18] 王宏涛,王汉斌,陈晓怀,等.测量不确定度引起的批量产品检验误判风险评估[J].计量学报,2017,38(5):559-562.
- [19] FERRELL W G, CHHOKER A. Design of economically optimal acceptance sampling plans with inspection error[J]. Computers & Operations Research, 2002, 29(10): 1283-1300.
- [20] 刘金东,王天铨,陈永红,等.基于Anderson-Darling正态性检验的改进方法及应用[J].数学的实践与认识,2023,53(4):184-193.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 6378—2002 不合格品率的计量抽样检验程序及图表(适用于连续批的检验)[S].北京:中国标准出版社,2002.