

车身匹配零部件尺寸质量评价浅析

张泽龙 赵金华

长城汽车股份有限公司技术中心 河北省汽车工程技术研究中心

摘要: 本文旨在分析和评估车身外观匹配件的尺寸质量, 深入研究现代汽车制造中尺寸精度的要求, 并结合长城汽车某 MPV 项目外观匹配实际过程和经验, 阐述了一套后期匹配尺寸质量评价综合体系, 用于评估和优化外观匹配件及钣金件的尺寸质量, 旨在提高外观尺寸技术规范 (DTS) 合格率, 以此提升品牌市场竞争力。

关键词: PPAP 工具; 过程能力; 尺寸质量

0 前言

为提升企业品牌竞争力, 企业需要监控成本并确保高质量的产品, 因此, 企业依赖于提供符合客户质量要求的零部件供应商。生产件批准程序 (PPAP) 工具在汽车行业的质量控制过程中应用广泛, 其规定了零部件制造及整改的验证过程。

PPAP 手册开发了一套过程批准程序, 用以规范与供应商的关系, PPAP 过程是与供应商建立信任关系的重要工具, 并且有助于改善内部沟通和供应链效率, PPAP 认证表明供应商已达到或超过客户要求, 并且可以预期其将持续生产合格产品。

1 质量评价和过程能力指数

在零件尺寸质量评价时, 常用过程能力指数进行评价, 该指数数值越大, 说明零件尺寸质量越好。稳定的过程能力指数 C_p (Capability Index of Process) 定义为公差、工序质量规格等过程质量标准除以过程能力, 反映了过程是否能够很好地满足规格要求。

不考虑过程的位置偏移时, 一般表达式为:

$$C_p = \frac{T}{6\hat{\sigma}_c} = \frac{USL - LSL}{6 \times (\bar{R}/d_2)} \quad (1)$$

式中, T 是公差带 (Tolerance), USL 是上规格限 (Upper Specification Limit), LSL 是下规格限 (Lower Specification Limit), $\hat{\sigma}_c$ 是过程标准差 σ 的估计值, $\bar{R}$ 为子组极差的平均值, d_2 为随子组容量变化的一个常数。

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_k}{K} \quad (2)$$

当考虑过程的位置偏移时, 一般表达方式为:

$$C_{pk} = \frac{\min(USL - \bar{X}, \bar{X} - LSL)}{3\hat{\sigma}_c} = \frac{\min(USL - \bar{X}, \bar{X} - LSL)}{3 \times (\bar{R}/d_2)} \quad (3)$$

式中, $\bar{X}$ 表示过程的总均值。

记分布中心为 μ , 公差中心为 M , 则偏移量为 $\varepsilon = |M - \mu|$, 定义 μ 与 M 的偏移度 $k = 2\varepsilon/T$, 则过程能力指数公式为:

$$C_{pk} = (1 - k) \times C_p \quad (4)$$

无偏移情况的 C_p 表示加工过程的一致性, 该能力指数适用于统计稳定的过程, 是过程在受控状态下的加工制造能力, 在 C_p 计算公式中, T 反映了对产品的技术要求, $\hat{\sigma}_c$ 反映了加工过程的质量, C_p 值越大, 表面加工质量越高。但这时对设备和操作人员的要求也高, 加工成本也越大, 所以对 C_p 值的选择应根据技术与经济的综合分析来决定。

有过程位置偏移的情况, 则体现为 C_{pk} , 它考虑了过程位置和能力, C_{pk} 越大, 越接近 C_p , 则过程中心 μ 与公差中心 M 的偏离越小, 是过程的质量能力与管理能力二者综合的结果。

P_p 是一个性能指数, 它将过程性能与公差范围内的最大可允许变差进行比较, 以反映过程是否能够很好地满足要求。 P_p 的一般表达方式为:

$$P_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma_p} = \frac{USL - LSL}{6s} \quad (5)$$

式中, σ_p 为过程总变差, 包括了子组内和子组间两种变差。一般用样本标准差 s 来估计:

$$\sigma_p = s = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6)$$

式中 x_i 是单个读数, $\bar{x}$ 是读数的均值, n 为读数的总个数。

Ppk 是过程性能指数，因为计算不需要工程稳定，所以在 PPAP 手册中要求在产品进行试生产过程不稳定时用 Ppk 衡量过程能力，只有 Ppk 满足要求才能进入量产阶段，所以又把 Ppk 称为初始过程能力指数，一般表达方式为：

$$Ppk = \frac{\min(USL - \bar{X}, \bar{X} - LSL)}{3\sigma_p} = \frac{\min(USL - \bar{X}, \bar{X} - LSL)}{3s} \quad (7)$$

Ppk 是在 PT（量产试制车）阶段对一定小批量生产的能力评价，它是一种对整体数据进行预先能力测定的过程，使用的数据为一个统计周期内的全部数据，在 PT~品确车（量产准入）阶段，零部件入库前实施不少于 30 台份批量验证，初始过程研究的接收准则一般要求 $Ppk \geq 1.67$ 。

而 Cpk 是进入大批量生产 SOP 后，为了保证批量生产下的产品品质状况不至于下降，保证与之前的小批生产具有同样的控制能力，所进行的生产能力的评价，此时进行的是小样本组之间数据的比较，量产之后零部件入库接收准则使用稳定过程能力指数，一般要求 $Cpk \geq 1.33$ 。

过程能力指数 Cpk 与过程性能指数 Ppk 计算公式整体上是一样的，唯一的区别是标准偏差 σ 的计算不一样，由于 Cpk 的计算是基于 SOP 批量生产阶段过程处于稳定状态，用子组内变差 σ_c 表示标准偏差，此时子组间偏差应该为 0。在 PT~品确车零部件入库阶段为小批量试生产阶段，其过程不稳定不受控，子组之间会有偏差，此时子组间标准差估计值一般表达为：

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \hat{\sigma}_c / \sqrt{n} \quad (8)$$

在过程不稳定不受控时，由于过程总变差包含了异常波动（子组间变差）和正常波动（子组内变差）的影响，此时过程总变差：

$$\sigma_p = \bar{R} / d_2 + \hat{\sigma}_c / \sqrt{n} \quad (9)$$

在 PT~品确车零部件入库阶段由于零部件数量少，属于小批量试产，所有的样本为一个总体，没有样本子组，这就要求全部的样本数据参与标准偏差的计算。

在 SOP 之后过程处于受控状态时子组间变差趋近于 0，理论上标准偏差只是子组内偏差，用 Cpk 来计算过程能力时需要至少 100 件以上进行估算才能计算准确，在过程处于受控状态时，过程能力会非常接近过程性能，即 Cpk 与 Ppk 相差很小，如果此时两者存在较大偏差，说明有异常波动影响，产生了子组间偏差，

进而导致了结果不一样，通常这类异常波动的因素只要认真查找，一般都可以发现和排查。

管理工程质量，就要及时发现并排除一切引起异常波动的因素，使工程中只剩下正常波动的因素，换句话说讲，当过程能力指数 Cpk 值达到 1.33 以后，管理工程就是严防异常因素的干扰，保持工程稳定。

2 三分之一公差的管理

产品质量是在生产过程中形成的，好的质量是设计、制造出来的，靠 100 % 的事后检查并不能控制好产品质量，需要把以检查为主的事后管理转变为预防为主的事前管理，避免某一工序环节出现毛病造成线体上产品所有劳动都付诸东流。这就需要把注意力从管理产品质量转移到管理工程质量上，转移到生产过程上，为此均值极差（ $\bar{X}$ -R）控制图便应运而生。

根据中心极限定理，无论原始数据是否符合正态分布，当样本数量足够大时，样本均值的分布会趋向于正态分布或接近正态分布。同时如果对原始数据 X 进行管理图统计，检出力（即控制界限以外的面积）是很弱的，不能及时发现异常因素，因此在控制图中，广泛是采用 $\bar{X}$ 平均值的管理图， $\bar{X}$ 均值管理图的主要特点为：

- (1) 对称轴位置不变，即 $\mu_{\bar{x}} = \mu_x$ 。
- (2) 标准偏差缩小了 $\sqrt{n}$ 倍，即 $\sigma_{\bar{x}} = \sigma_x / \sqrt{n}$ 。

平均值的正态分布相比原始数据分布在对称轴不变的基础上，变的更瘦高了，如图 1 所示。

管理界限体现了加工质量正常波动的浮动，用来判断加工过程是否出现问题，工程有无异常。公差界限是设计者提出的设计要求，用来判断产品质量是否

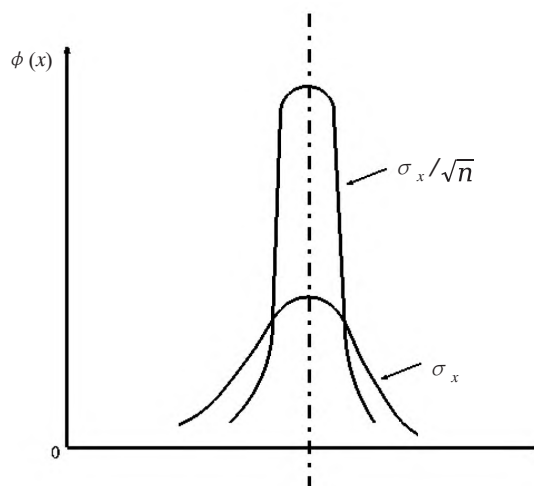


图 1 单值 X 分布与均值 $\bar{X}$ 分布对比

合理,前者主要衡量工程是否稳定,后者主要衡量产品精度。

一般采用 $\pm 3\sigma$ 作为管理图的上下管理界限,即 $UCL = +3\sigma$, $LCL = -3\sigma$, 管理图的任务在于及时发现工程异常,通过管理图告诉我们工程已经出现异常,废品即将来临,赶紧查找原因。判断异常的标志就是小概率事件发生了,而小概率事件的判断需要用到管理图的上下管理界限,通过检出力来衡量 $\bar{x}$ 均值管理图的性能好坏。

假设某零件的标准偏差 σ_x 未变,仅均值移动了一个 σ_x , 在 $n=1$, $n=4$, $n=10$ 时分别衡量检出力。

当 $n=1$ 时, 由于 $UCL = 3\sigma_{\bar{x}} = 3 \times \frac{\sigma_x}{\sqrt{1}} = 3\sigma_x$

$\mu_{2UCL} = 3\sigma_{\bar{x}} - \sigma_x = 3\sigma_x - \sigma_x = 2\sigma_x$, 如图 2 所示。

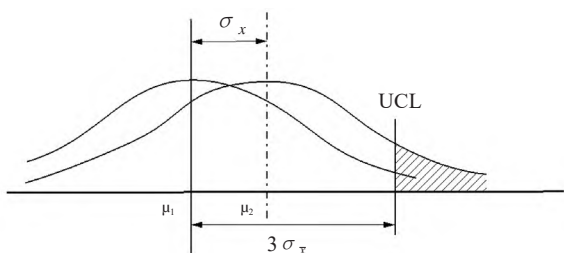


图 2 $n=1$ 时, 均值正态分布偏移图

查表可知, 超出 UCL 的阴影部分面积约为 0.02。

当 $n=4$ 时, 由于 $UCL = 3\sigma_{\bar{x}} = 3 \times \frac{\sigma_x}{\sqrt{4}} = 1.5\sigma_x$

$\mu_{2UCL} = 3\sigma_{\bar{x}} - \sigma_x = 1.5\sigma_x - \sigma_x = 0.5\sigma_x$, 如图 3 所示。

查表可知, 超出 UCL 的阴影部分面积约为 0.31。

当 $n=10$ 时, 由于 $UCL = 3\sigma_{\bar{x}} = 3 \times \frac{\sigma_x}{\sqrt{10}} = 0.95\sigma_x$

$\mu_{2UCL} = 3\sigma_{\bar{x}} - \sigma_x = 0.95\sigma_x - \sigma_x = -0.05\sigma_x$,

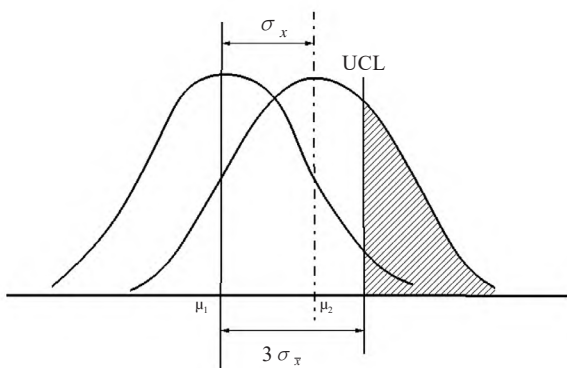


图 3 $n=4$ 时, 均值正态分布偏移图

如图 4 所示。

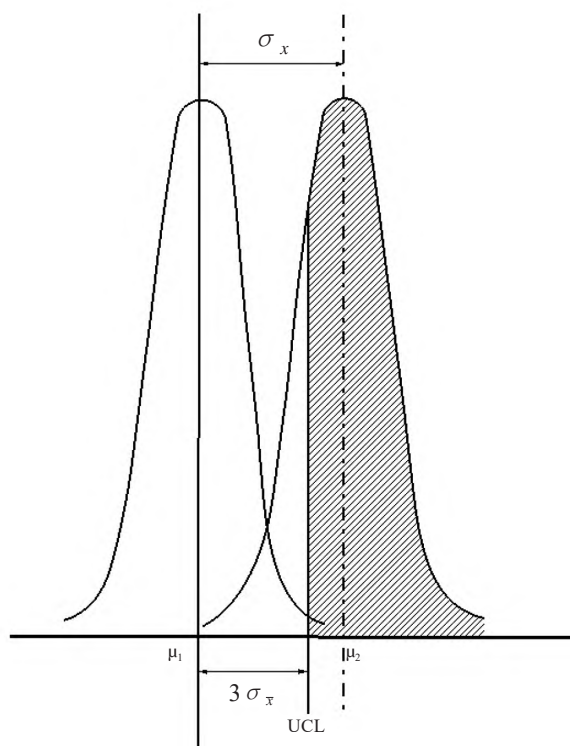


图 4 $n=10$ 时, 均值正态分布偏移图

查表可知, 超出 UCL 的阴影部分面积约为 0.52。

由上述计算结果可知, 当均值偏移不变的时候, 随着 n 的增大, 超出 UCL 的阴影部分面积变大, 即管理图的检出能力增强。

由于管理图的上下界限 UCL、LCL 是通过极差平均值来确定的, UCL\LCL 表达为 $\bar{x} \pm A_2 \bar{R}$, 使用 $A_2 \bar{R}$ 代替了 $3\sigma_{\bar{x}}$, 由于通过极差平均值来估算 σ , 当 $n=2$ 或 $n=3$ 时, 样本子组中所有数据基本都参与了运算, 当 $n=10$ 时, 样本子组中有 8 个数据未参与运算, 所以估算出来的 σ 误差就会比较大。根据方开泰在《质量控制》文章中的阐述, 一般 n 建议取为 5。

当过程能力指数 $C_p=1.33$, 同时取 $n=5$ 时, 则:

$$T = 6\sigma_x \times 1.33 = 6\sigma_x \times \sqrt{5} \times 1.33 = 8\sqrt{5}\sigma_x$$

此时 $T/3 = 8\sqrt{5}\sigma_x \times 1/3 = 5.97\sigma_x \approx 6\sigma_x = \pm 3\sigma_x$ 即 $\pm 1/3 \times \frac{T}{2} = \pm 3\sigma_x$, 此时 $\pm 1/3$ 公差 (公差带的一半) 即为上下控制界限, $1/3$ 公差带即为控制极差范围, 如图 5 所示。

当过程能力指数 $C_p=1.0$, 同时取 $n=5$, 此时:

$$T = 6\sigma_x = 6\sigma_x \times \sqrt{5} = 13.44\sigma_x$$

如果此时仍以 $1/3$ 公差作为管理界限, 则如图 6 所示。

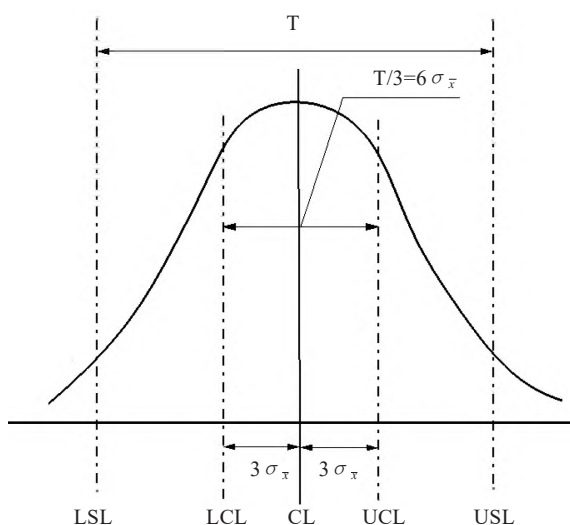


图5 1/3 公差控制界限示意

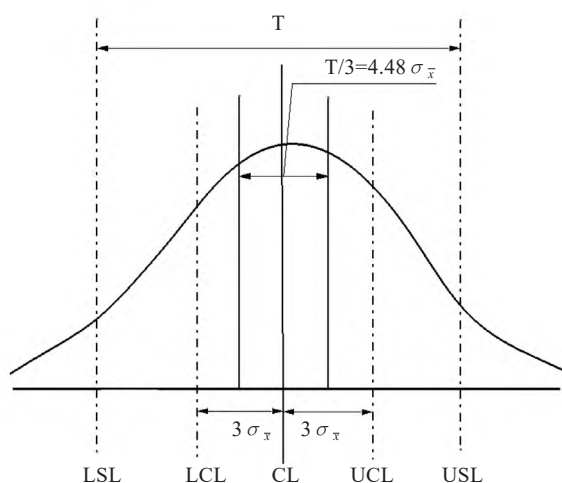


图6 $C_p=1.0$ 时, 1/3 公差控制界限示意

$$T/3 = 4.48\sigma_{\bar{x}} = \pm 2.24\sigma_{\bar{x}}$$

由图可知, 当 $C_p=1.0$ 时, 此时 $T/3$ 小于 $6\sigma_{\bar{x}}$, 如果此时以该 $T/3$ 作为管理范围, 就会造成虚拉警报, 本来数据在管理界限 $\pm 3\sigma_{\bar{x}}$ 之内是正常的, 现在根据该 $T/3$ 的界限判定认为过程出现异常, 导致线体停止生产去查找原因, 但是又找不到, 如果这种次数多了, 就会影响人们查找过程异常的热情。

进一步的, 以 $C_p=1.0$ 时为例, 取 $n=5$, 当数据都落在 $T/3$ 管理界限以内, 判断能否认为该零件合格。

假设 USL/LSL 与 $T/3$ 控制界限重合, 此时:

$$T/3 = \pm 2.24\sigma_{\bar{x}} = \pm 2.24 \times \frac{\sigma_x}{\sqrt{5}} = \pm \sigma_x$$

查表可知, 在上控制界限时, 超差率为:

$$1-0.8413=0.1587=15.8\%$$

同理查表可得在下控制界限时, 超差率为 15.8%。

总超差率为上下控制界限超差率之和, 即: $15.8\% \times 2=31.6\%$

可知: 虽然 $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4 \dots)$ 都落在了 $T/3$ 管理界限之内, 但是原始样本数据 $(x_1, x_2, x_3 \dots)$ 已经有 31.6% 的超差率, 同理可推导出 $C_p=1.33$ 时, 超出 $T/3$ 控制界限的超差率为 18%, 如图 7 所示。

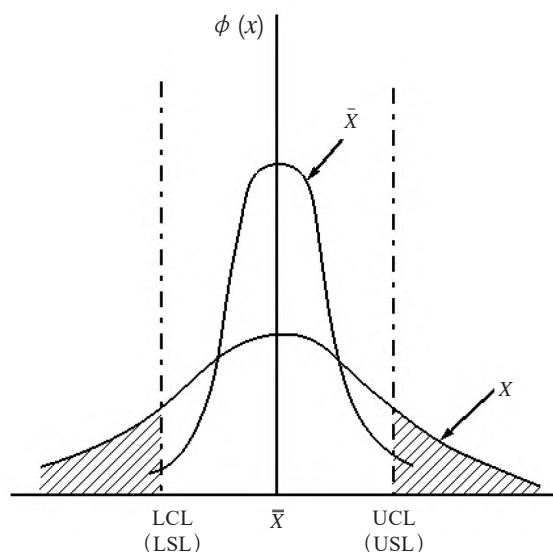


图7 X 与 $\bar{x}$ 数据超差对比示意

所以可得出结论:

(1) 平均值点落在 $T/3$ 控制界限内时, 产品未必全部合格。

(2) 在 $C_p < 1.33$ 时, 不建议采用 $T/3$ 作为控制界限, 采用其作为公差控制的管理图意义不大。

根据 PPAP 要求, 在 PT~ 品确车零部件入库前, 初始过程研究的接收准则使用性能指数, 要求 $Ppk \geq 1.67$, 同时控制图符合判异原则。由于 Ppk 计算时, 样本标准差 s 采用是过程总变差, 反应了样本所有差异的大小, 包括了子组内变差和子组间变差, 只有在过程受控时, 子组间偏差为 0。而 Cpk 计算时采用的是子组内变差, 没有考虑子组间变差, 因此一般来说 $S_{Ppk} \geq \sigma_{Cpk}$, 即 $Ppk \leq Cpk$ 。

$Cpk \geq 1.67$ 时, 采用 $T/3$ 公差控制界限时, 此时:

$$T/3 = 6\sigma_x \times 1.67/3 = 1.67 \times 2\sigma_x \times \sqrt{5} = 7.48\sigma_x = \pm 3.74\sigma_x$$

查表可得, $T/3$ 上控制界限的超差率为: $1-0.999908=0.0092\%$

同时 $T/3$ 下控制界限的超差率为: 0.0092%

$$\text{总超差率为: } 0.0092\% \times 2=0.018\%$$

据此可以得出在 PT~品确车零部件入库阶段, 可以采用 $T/3$ 的公差管理界限来衡量零部件的工程稳定, 即均值 $\leq 1/3$ 公差 (公差带的一半), 极差 $\leq 1/3$ 公差带。

当进入 SOP 量产阶段之后, 此时零部件生产过程处于稳定受控状态, SPC 检查要求 $Cpk \geq 1.33$, 此时如果要求仍采用 $T/3$ 的控制界限, 根据前述计算可知, 零部件会有 18% 的超差率, 所以此时采用 $T/3$ 的管理界限是没有意义的, SOP 量产后只需监控 $Cpk \geq 1.33$ 即可。

3 零部件尺寸数据的采集

如何准确地提取样本的有效信息, 以真实反映零部件的实际制造情况, 诊断尺寸偏差来源, 是不容小觑的一个问题。根据 UCL/LCL 的表达式 $\bar{\bar{X}} \pm A_2\bar{R}$, 可知样本的极差均值直接反映了控制的上下界限, 以此作为零部件生产过程是否异常的依据。而样本数据的采集方法、采集频率、随机抽取还是连续抽取、采集数据是否最新等, 都会影响最终极差均值的计算。

有研究表明, 每批次连续取样得到的极差平均值很小, 使得计算出来的 $A_2\bar{R}$ 很小, 导致控制界限偏严。

如果采用随机抽取的方法, 取代连续抽取测量, 计算出来的 $A_2\bar{R}$ 较之前的大, 可以更准确反应零部件整体的真实工程状态。

通常情况下零部件上的测点不止一个, 而尺寸质量评价有时不仅只针对一个测点进行评价, 这时就需要分析每个测点的过程能力, 需要为每个测点单独收集样本数据。比如一个零件上有 5 个测点, 每个测点均需要 125 个样本数据, 那么整体的数据量就会变成 $5 \times 125 = 625$ 个样本数据。

如果希望综合分析这 5 个测点的总体过程能力, 可以将这 5 个测点的数据混合并采集 125 个测点数据, 但这在实际中很少使用, 因为不同测点的波动性和重要性可能不同, 混合分析可能会导致结果不准确。

4 结语

本文通过统计过程技术的运用, 对零部件尺寸精度要求进行深入研究, 阐述了一套后期匹配尺寸质量评价体系, 用于评估和优化外观匹配件及钣金件的尺寸质量, 通过对生产过程中产生的异常能够得到及时的识别并做出控制措施, 起到了过程质量的预警管理, 为生产过程能力保持稳定并能持续改进提供了有效的手段, 并最终提升外观品质合格率, 为企业的质量能力提供了保障。

参考文献

- [1] 俞吉长, 金隼, 朱新民, 等. 车身零件 PPAP 中的尺寸质量评价方法 [J]. 机械制造, 2006. 48(500): 67-70.
- [2] 陈乐心. 汽车零部件可靠性评估的小样本方法 [D]. 南京航空航天大学, 2008.
- [3] 池文慧. 基于 FANUC G31 高速跳转功能的 CNC 加工中心过程能力提升 [J]. 制造技术与机床, 2017(04): 142-147.
- [4] 彭颖. 基于外部过程能力的 S 公司抽样检验方案的优化 [D]. 南京理工大学, 2017.
- [5] 潘兆云. 六西格玛设计在新产品链条开发过程的研究 [D]. 上海交通大学, 2011.
- [6] 张金华. HT 公司车用发动机电控单元开发项目质量控制研究 [D]. 江苏大学, 2018.
- [7] 万应桥, 叶春明, 等. 生产件批准程序 (PPAP) 在供应商品质改善中的应用 [J]. 物流科技, 2014.04(10): 04-07.
- [8] 李轩, 胡雨时, 杨楠. 浅谈统计过程控制在汽车制造白车身关键尺寸控制中的应用 [J]. 中国战略新兴产业, 2017(08): 121-123.