QS 9000

参考手册学习与理解

——测量系统分析

王霄锋 编著

清华大学出版社

QS 9000 参考手册学习与理解

——测量系统分析

王霄锋 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书介绍了 QS 9000 的《测量系统分析参考手册》的基本观点和方法，着重对其理论基础进行了简要说明，以帮助读者更好地学习、理解和掌握这本参考手册的基本观点和方法，特别是提高在实际工作中正确、有效地应用它们的能力。本书的主要内容包括：测量过程与测量系统；测量过程变差；测量标准等级体系；被测特性的基准值；测量系统统计稳定性分析；测量系统的偏倚分析；测量系统的重复性和再现性分析；测量系统的线性分析；量具性能曲线；计数型量具研究；破坏性试验的测量系统分析方法。本书适用于工科专业的本科生、研究生以及从事工业生产（特别是汽车制造）的工程技术人员和管理人员。

图书在版编目（CIP）数据

QS 9000 参考手册学习与理解——测量系统分析/王霄锋编著. 北京：清华大学出版社，2004
ISBN 7-302-07976-5

Ⅰ. Q… Ⅱ. 王… Ⅲ. ①汽车工业－质量管理体系－国际标准，QS 9000－学习参考资料 ②汽车工业－测量系统－系统分析－国际标准，QS 9000－学习参考资料 Ⅳ. F407.471.63

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 003858 号

出 版 者：清华大学出版社
http://www.tup.com.cn
社 总 机：010-62770175
地　　址：北京清华大学学研大厦
邮　　编：100084
客户服务：010-62776969
责任编辑：张秋玲
版式设计：肖　米
印 刷 者：北京四季青印刷厂
装 订 者：三河市李旗庄少明装订厂
发 行 者：新华书店总店北京发行所
开　　本：170×230　**印张**：9.75　**字数**：180 千字
版　　次：2004 年 4 月第 1 版　2004 年 4 月第 1 次印刷
书　　号：ISBN 7-302-07976-5/TB・65
印　　数：1～3000
定　　价：15.00 元

前 言

QS 9000 是美国三大汽车公司(戴姆勒-克莱斯勒、福特和通用汽车公司)为了确保零部件供应商能够及时提供满足其质量要求的产品而提出的质量体系的统称，由 QS 9000 质量体系要求以及相关参考手册构成。QS 9000 包括：QS 9000 质量体系要求(Quality System Requirements)；生产件批准程序(Production Part Approval Process，PPAP)；质量体系评定(Quality System Assessment，QSA)；产品质量先期策划和控制计划参考手册(Advanced Product Quality Planning and Control Plan Reference Manual，APQP)；统计过程控制参考手册(Statistical Process Control Reference Manual，SPC)；测量系统分析参考手册(Measurement Systems Analysis Reference Manual，MSA)；潜在失效模式及后果分析参考手册(Potential Failure Mode and Effects Analysis Reference Manual，FMEA)。其中，PPAP 是属于质量体系要求的内容之一，其他 5 本手册作为实施 QS 9000 的参考手册使用。

由于顾客(整车厂，系统、分系统制造厂)要求其供方通过 QS 9000 的审核，我国的汽车生产企业(特别是汽车零部件制造企业)几乎都开展了贯彻 QS 9000 的工作。在此过程中需要做很多有关的培训。作者自从 1997 年以来一直在德尔福-清华汽车系统研究所从事有关 QS 9000 的《统计过程控制参考手册》、《测量系统分析参考手册》以及其他统计技术的培训工作，接受培训的学员都是来自汽车行业以及其他行业的质量经理、质量工程师、制造工程师、设计工程师、试验工程师等，他们当中的很多人都已经有了学习和实施 SPC，MSA 的经历。通过和他们一起学习、讨论，进行案例分析，作者对他们学习、理解和实施 SPC，MSA 等的情况有了一定的了解。

QS 9000 的《测量系统分析参考手册》相当全面、详细地叙述了实施 MSA 的步骤和方法。但是，该手册较少涉及测量系统分析背后的理论基础知识。而培训学员普遍认为，为了正确理解和在企业内部正确、有效地实施 MSA，很需要对测量系统分析的理论基础有必要的了解。作者也深有同感。有鉴于目前在国内尚没有与 QS 9000《测量系统分析参考手册》相对应的著作，因而作者萌发了编写本书的念头。

本书旨在介绍 QS 9000《测量系统分析参考手册》所涉及的基本观点和方法，着重对其理论基础进行说明，目的是帮助读者更好地学习、理解和掌握这本参考手册，提高在实际工作中正确、有效地解决问题的能力。本书的主要内容包括：测量过程与测量系统；测量过程变差；测量标准等级体系；被测特性的基准值；测量系统统计稳定性分析；测量系统的偏倚分析；测量系统的重复性和再现性分析；测量系统的线性分析；量具性能曲线；计数型量具研究；破坏性试验的测量系统分析方法。

由于我国在贯彻执行 QS 9000 的过程中还有许多工作要做，还要考虑结合我国国情，因而本书的介绍和分析还不能完全做到有的放矢、立竿见影。加之作者的经验和能力有限，书中错讹之处在所难免，希望读者不吝赐教。

作　者

2003 年 9 月于清华园

目 录

1 引言

在工业界，需要进行测量的场合多得难以计数，例如，产品的尺寸、强度，材料化学成分的检验，制作用于统计过程控制的控制图，定量表示试验结果等。

测量的结果可以是定量的，例如用游标卡尺测量轴径，可以给出轴径是10.02mm这样的定量结果；也可以是定性的，例如用“通过/不通过”量规测量孔，可以给出该孔合格或不合格的定性结果。

测量的本质是对被测对象赋值，所赋的值称为测量结果。

用来获得测量结果的任何装置都可被称为量具，例如上面提到的卡尺、量规都是量具。但是，上述量具本身并不能给出测量结果，一般都需要由人来按照一定的规程进行操作才能给出测量结果，所以，用来获得测量结果的往往是一个系统——测量系统。

测量系统：用来对被测特性赋值的量具和其他设备、人员、标准（例如基准值）、规程、操作、软件、环境和假设的集合；或者是用来获得测量结果的整个过程。

测量实质上是应用测量系统对被测特性赋值。测量可以认为是一种过程，即用来对被测特性赋值的过程，所赋予的值称为测量值或测量结果。所以，可以把测量看作是一个制造过程，其输出是测量值（数据）。图 1-1 表示测量过程示意图。

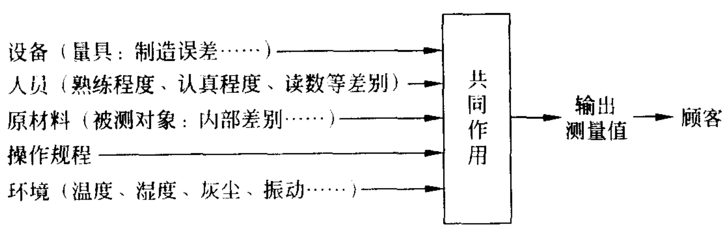

图 1-1　测量过程

分析图 1-1 可以看出，在测量过程中存在大量的随机因素的影响，使得过

程的输出——测量值也是随机变量。从图1-1可以看出，测量过程与一般的工业制造过程在本质上是相同的。所以，在对测量系统进行分析时可以应用在一般工业制造过程中已经得到验证的一些概念、原理和技术，其中统计过程控制的概念、原理、方法在测量系统分析中占有重要地位。本书介绍的测量系统分析方法，主要适用于评价在工业生产环境中使用的测量系统。

2 测量过程变差

2.1 测量过程变差

首先观察用一个测量系统对同一个测量特性进行多次测量所得到的测量值，如图 2-1 所示。从图 2-1 可以看出，这样的多次测量结果之间是有差别的，这种差别便是测量过程变差。测量值是个随机变量。

图 2-1 所示测量结果都是针对同一个测量特性（例如一根轴的外径）进行测量得到的。在假定这个测量特性本身不变化的情况下，测量过程的变差实际上反映了测量过程所引入的误差的变差。所以，测量值可以表示为

测量值＝被测特性＋测量误差

测量值的随机性是由测量误差的随机性引起的。测量值的质量可以由测量值的统计特性反映出来。后面将要介绍这些统计特性，如统计稳定性、偏倚、重复性、再现性、线性。

图 2-1(a)所示数据是利用一个稳定的测量系统得到的。这个测量系统的变差处于统计控制状态，其分布规律不随时间发生变化，即测量系统未来的性能是可以预测的。测量系统的这种状态正是所希望的。

图 2-1(b)所示数据是利用一个不稳定的测量系统得到的。这个测量系统的变差不处于统计控制状态，其分布规律（主要是分布的标准差）随着时间发生变化，说明其未来的性能是不可预测的。

图 2-1(c)所示数据是利用一个不稳定的测量系统得到的。这个测量系统的变差不处于统计控制状态，其分布规律（主要是分布的均值）随着时间发生变化，说明其未来的性能也是不可预测的。

图 2-1(d)所示数据是利用一个不稳定的测量系统得到的。这个测量系统的变差不处于统计控制状态，其分布规律随着时间发生具有明显趋势（不断增大）的变化，说明其未来的性能仍是不可预测的。

一般来说，不稳定的测量系统是不可接受的。

由于测量系统分析的理论基础是正态分布，所以有必要介绍一些有关正态

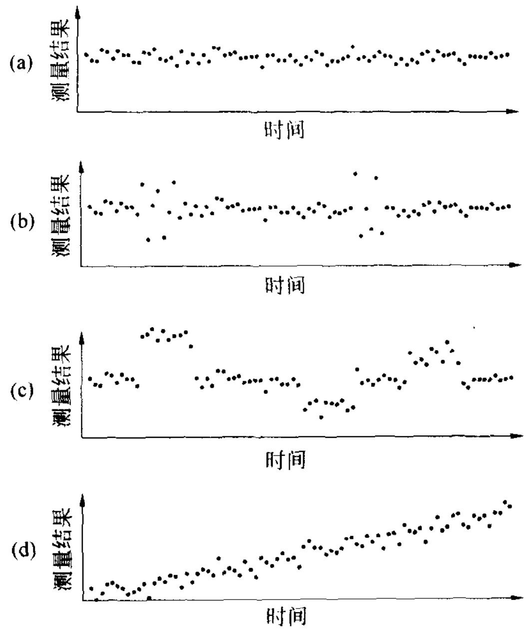

图 2-1 用不同的测量系统对同一个测量特性进行多次测量所得到的测量值

分布的基本知识。

2.2 正态分布简介

分析图 1-1 可以看出，在测量过程中存在大量的随机因素的影响，使得过程的输出——测量值也是随机变量。尽管在过程中存在大量随机因素，在测量过程稳定运行时，每个因素的影响都不大，它们综合作用的结果往往是使得测量值近似表现出正态分布特性。所以，在测量系统分析中，正态分布占有重要地位，是理论基础。在这里简要介绍一些有关正态分布的基本知识。

如果测量值 X 服从正态分布，其概率密度为

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}},\quad -\infty<x<+\infty \tag{2-1}$$

其中：μ——正态分布的均值(数学期望)；

σ^2——正态分布的方差；

σ——正态分布的标准差。通常把 X 服从以 μ 和 σ 为参数的正态分布表

示为 $X \sim N(\mu,\sigma^2)$。

$f(x)$的图形如图 2-2 所示，它具有以下的性质：

(1) 曲线关于 $x=\mu$ 对称，即对任意 $h>0$，有

$$f(\mu-h) = f(\mu+h) \tag{2-2}$$

(2) 当 $x=\mu$ 时，$f(x)$取最大值：

$$f(\mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \tag{2-3}$$

而 x 离 μ 越远，$f(x)$越小。

(3) 如果固定 σ，改变 μ 的值，则 $f(x)$的图形沿 Ox 轴平行移动，而不改变其形状，见图 2-3。由此可见，正态分布概率密度 $f(x)$的位置完全由 μ 所确定。

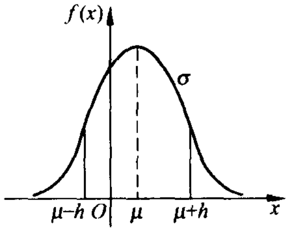

图 2-2 正态分布随机变量 x 的概率密度 $f(x)$

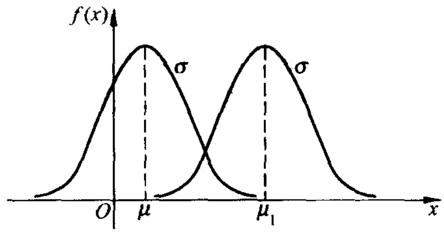

图 2-3 σ 固定，μ 改变时，正态分布概率密度 $f(x)$的改变情况

(4) 如果固定 μ，改变 σ，正态分布概率密度 $f(x)$的变化情况如图 2-4 所示。σ 越小，图形变得越尖；反之，越低平。

(5) 正态分布变量 X 的分布函数 $F(x)$为变量 X 取值小于等于 x 的概率 $P(X\leqslant x)$，即

$$F(x) = P(X \leqslant x) = \int_{-\infty}^{x} f(t)\mathrm{d}t = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{x} \mathrm{e}^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}\mathrm{d}t \tag{2-4}$$

$F(x)$也是图 2-5 中所示阴影面积。当 $x\to+\infty$时，$F(x)\to1$，即 $f(x)$曲线下的总面积等于 1，即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\mathrm{d}x = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{+\infty} \mathrm{e}^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}\mathrm{d}x = 1$$

$F(x)$的图形如图 2-6 所示。当 $x=\mu$ 时 $F(\mu)=0.5$。

(6) 标准正态分布：当 $\mu=0$，$\sigma=1$ 时称 $F(x)$服从标准正态分布，其概率密度和分布函数一般分别用 $\phi(z)$和 $\Phi(z)$表示，即

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{z^2}{2}} \tag{2-5}$$

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \tag{2-6}$$

人们已经编制了 $\Phi(z)$ 的函数值表，可供查用(参见附表 1：标准正态分布函数值表)。标准正态分布概率密度 $\phi(z)$ 的图形如图 2-7 所示。

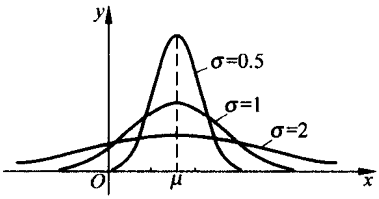

图 2-4 μ 固定，σ 改变时，正态分布概率密度 $f(x)$ 的改变情况

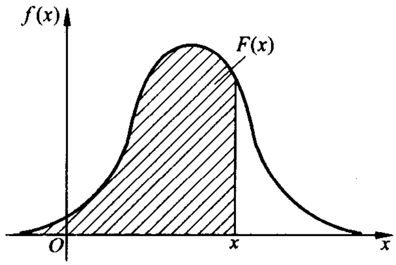

图 2-5 正态分布的分布函数 $F(x)$

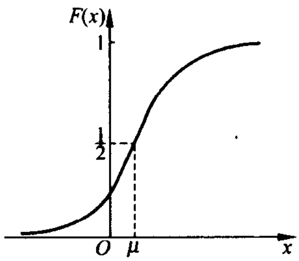

图 2-6 正态分布函数 $F(x)$ 随 x 的变化情况

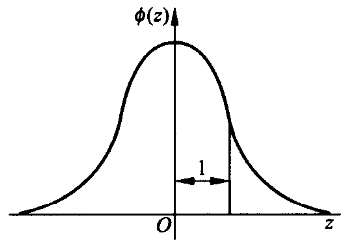

图 2-7 标准正态分布的概率密度 $\phi(z)$

一般，若 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$，即 X 具有下列分布函数：

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \tag{2-7}$$

则通过如下变量变换，可把 $F(x)$ 转化成式(2-6)的标准形式，然后查附表 1，就能求得 $F(x)$ 的函数值。

令

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \tag{2-8}$$

则有

$$Z \sim N(0, 1)$$

令

$$u=\frac{t-\mu}{\sigma} \tag{2-9}$$

则式(2-7)可变换为

$$F(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\frac{x-\mu}{\sigma}}\mathrm{e}^{-\frac{u^2}{2}}\mathrm{d}u=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{z}\mathrm{e}^{-\frac{u^2}{2}}\mathrm{d}u=\Phi(z)=\Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \tag{2-10}$$

下面利用查标准正态分布函数表求产品的不合格品率。假定机床生产的轴外圆直径 X 服从正态分布：$X\sim N(10.04,\ 0.01)$，即 $\mu=10.04, \sigma^2=0.01, \sigma=0.1$，而直径的规范为 10.00 ± 0.15，参见图 2-8。

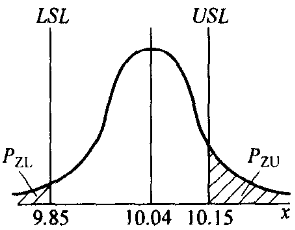

图 2-8　外圆直径 X 的概率密度 $f(x)$ 及规范下限 LSL 和上限 USL

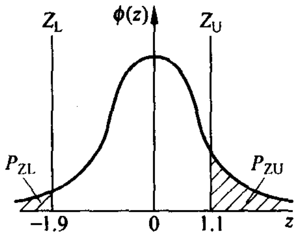

图 2-9　标准正态分布概率密度 $\phi(z)$ 及规范限对应值 Z_L, Z_U

不合格品率 $P=P(X\leqslant 9.85)+P(X\geqslant 10.15)$，即图 2-8 中所示两块阴影面积之和。为便于求出 P，首先按式(2-8)进行变换：

$$Z=\frac{X-\mu}{\sigma}\sim N(0,1)$$

Z 服从标准正态分布，图 2-9 表示其概率密度 $\phi(z)$，与 LSL 和 USL 对应的 Z 值分别为 Z_L 和 Z_U：

$$Z_L=\frac{LSL-\mu}{\sigma}=\frac{9.85-10.04}{0.1}=-1.9$$

$$Z_U=\frac{USL-\mu}{\sigma}=\frac{10.15-10.04}{0.1}=1.1$$

与 $P(X\leqslant 9.85)$ 对应的面积为 $P_{ZL}=P(Z\leqslant Z_L)=P(Z\leqslant -1.9)=P(X\leqslant 9.85)$，与 $P(X\geqslant 10.15)$ 对应的面积为 $P_{ZU}=P(Z\geqslant Z_U)=P(Z\geqslant 1.1)=P(X\geqslant 10.15)$，查标准正态分布函数表(附表 1)可直接查得 P_{ZL} 和 P_{ZU}。

(7) 若 $X_1\sim N(\mu_1,\sigma_1^2), X_2\sim N(\mu_2,\sigma_2^2), \cdots, X_n\sim N(\mu_n,\sigma_n^2)$，且它们相互独立，则 $Y=X_1+X_2+\cdots+X_n\sim N(\mu_1+\mu_2+\cdots+\mu_n, \sigma_1^2+\sigma_2^2+\cdots+\sigma_n^2)$。

(8) 正态分布的数学期望 $E(X)$ 和方差 $D(X)$

$$E(X)=\int_{-\infty}^{\infty}xf(x)dx=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{+\infty}x\mathrm{e}^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}\mathrm{d}x=\mu \tag{2-11}$$

数学期望也简称为均值，反映的是随机变量 X 大量取值的算术平均值。

$$D(X)=E[(X-E(X))^2]$$

$$=\int_{-\infty}^{\infty}(x-E(X))^2f(x)\mathrm{d}x=\int_{-\infty}^{\infty}(x-\mu)^2f(x)\mathrm{d}x$$

$$=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{\infty}(x-\mu)^2\mathrm{e}^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}\mathrm{d}x=\sigma^2 \tag{2-12}$$

方差反映的是随机变量 X 与其均值 $E(X)$ 的偏离程度。方差 $D(X)$ 的平方根 $\sqrt{D(X)}=\sigma$ 称为标准差或均方差。正态分布的标准差即为 σ。

数学期望的几个重要性质：

① 设 C 是常数，则有

$$E(C)=C \tag{2-13}$$

② 设 X 是一个随机变量，C 是常数，则有

$$E(CX)=CE(X) \tag{2-14}$$

③ 设 X，Y 是任意两个随机变量，则有

$$E(X+Y)=E(X)+E(Y) \tag{2-15}$$

可以推广为

$$E(X_1+\cdots+X_n)=E(X_1)+\cdots+E(X_n) \tag{2-16}$$

④ 设 X，Y 是两个相互独立的随机变量，则有

$$E(XY)=E(X)\,E(Y) \tag{2-17}$$

方差的几个重要性质：

① 设 C 是常数，则有

$$D(C)=0 \tag{2-18}$$

② 设 X 是一个随机变量，C 是常数，则有

$$D(CX)=C^2\,D(X) \tag{2-19}$$

③ 设 X，Y 是两个相互独立的随机变量，则有

$$D(X+Y)=D(X)+D(Y) \tag{2-20}$$

可以推广为

$$D(X_1+\cdots+X_n)=D(X_1)+\cdots+D(X_n) \tag{2-21}$$

2.3 总体、样本及其分布

（1）总体：被研究对象的全体。例如，用一个测量系统对一个零件的一个特性进行多次重复测量，所得到的所有测量数据就构成一个总体。

(2) 个体：组成总体的每个单元。在上例中，每个测量数据就是上述总体的一个个体。

(3) 简单随机抽样：总体中每个个体被抽到的机会均等，并且在抽取一个个体后总体的成分(分布规律)不变，这样的抽样称为简单随机抽样。所抽得的一些个体能很好地反映总体的情况(分布规律)。

(4) 样本观察值：如果表征总体的随机变量为 X，第 i 次简单随机抽样的结果为 x_i，则 n 次简单随机抽样的结果是一列数，即 $x_1,x_2,\cdots,x_n$，这就是总体 X 的一组样本观察值。例如，用一个测量系统对一个零件的一个特性进行多次重复测量，所得到的所有测量数据就构成一个总体 X，如果对其进行 n 次简单随机抽样，抽出 n 个测量数据 $x_1,\cdots,x_n$，它们构成一组总体 X 的样本观察值。利用它们可以很好地估计总体 X 的分布规律。

(5) 样本(简单随机样本)：设 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 为总体 X 的一组样本观察值，由于抽样的随机性与独立性，每个 x_i 都可以看作某一个随机变量 $X_i(i=1,2,\cdots,n)$所取的观察值，这里 $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 相互独立，并且 X_i 与 X 具有相同的分布，它们称为总体 X 的容量为 n 的简单随机样本，简称样本。它们的观察值 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 称为样本的观察值或一个实现。

(6) 统计量：设 $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 为总体 X 的一个样本，$g(X_1,\cdots,X_n)$为一个连续函数，如果 g 中不含任何未知数，则称 $g(X_1,X_2,\cdots,X_n)$为一个统计量。如果 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 是样本 $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 的观察值，则 $g(x_1,x_2,\cdots,x_n)$是 $g(X_1,X_2,\cdots,X_n)$的一个观察值。

例如，设总体 $X\sim N(\mu,\sigma^2)$，$X_1,X_2,\cdots,X_n$ 为 X 的一个样本，则 $\overline{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i$ 是一个统计量，$\overline{X}$ 称为样本均值。

(7) 抽样分布(统计量的分布)

设总体 $X\sim N(\mu,\sigma^2)$，$X_1,X_2,\cdots,X_n$ 是它的一个样本，统计量(均值) $\overline{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i$ 服从正态分布，并且其数学期望和方差分别是

$$E(\overline{X})=\mu \tag{2-22}$$

$$D(\overline{X})=\frac{\sigma^2}{n} \tag{2-23}$$

亦即

$$\overline{X}\sim N\left(\mu,\frac{\sigma^2}{n}\right) \tag{2-24}$$

注意，$E(\overline{X})$与总体均值 μ 相等，但 $D(\overline{X})$只等于总体方差 σ^2 的 $1/n$。这就是说，n 越大，$\overline{X}$ 越向总体均值 μ 集中。

(8) 设总体 $X \sim N(\mu,\sigma^2)$，$X_1, X_2, \cdots, X_n$ 是 X 的一个样本，样本数字特征 $\overline{X}$(样本均值)、S^2(样本方差)分别用来估计 μ 和 σ^2，即

$$\hat{\mu} = \overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i \tag{2-25}$$

$$\hat{\sigma}^2 = S^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2 \tag{2-26}$$

实际上 $\overline{X}$ 和 S^2 往往利用样本 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 的一个观察值 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 来估计，即

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{2-27}$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \tag{2-28}$$