

机床精度与测试

《机床译丛》编辑组 编

上海科学技术文献出版社

内 容 提 要

《机床精度与测试》共选译文十篇。内容有数控机床的定位精度及测试；主轴回转精度(包括刀具回转型和工件回转型)的研究；机床热变形与加工精度；齿轮精度测量；齿轮噪声以及精密车削等。

文章提供了较多实测数据或资料,具有一定参考价值。其中双频激光测试机床精度除论述测试原理外,还附有较多图例说明并介绍了使用方法:包括线性测量、角度测量、平直度和垂直度测量,以及进行各种测量时光学元件的选用和安置,同时,还提出产生测量误差的因素及其防止或补偿方法。

本译丛可供大专院校机械专业师生、工程技术人员教学、科研、设计以及测试等有关方面参考。

机 床 精 度 与 测 试

《机床译丛》编辑组 编

*

上海科学技术文献出版社出版

(上海高安路六弄一号)

新华书店上海发行所发行

上海市印刷十二厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 5.125 字数 121,000

1979年11月第1版 1979年11月第1次印刷

印数: 1—23,400

书号: 15192-51 定价: 0.65 元

《科技新书目》137-76

目 录

数字控制机床的定位精度

- (英) C. P. 海明雷 A. 考林 M. 伯德金…………… 1

关于主轴回转精度的研究(一)

- (日) 垣野义昭 山本 谦 石井信雄 奥岛启式…………… 15

关于主轴回转精度的研究(二)

- (日) 垣野义昭 石井信雄 古贺清孝 山本 谦
奥岛启式…………… 29

机床测试的一种实用方法

- (美) J. W. 安德森…………… 43

机床的热变形与加工精度

- (日) 垣野义昭…………… 56

双频激光测试机床精度

- 唐祖诏 庄国华编译…………… 75

齿轮传动精度的自动记录式测量

- (日) 市川 诚…………… 107

齿轮的噪声

- (西德) H·奥帕兹…………… 118

消除机器的噪声

- (美) S. P. 恩格斯特罗…………… 135

精密车削

- (英) A·戴维森…………… 146

数字控制机床的定位精度

(英) C. P. 海明雷, A. 考林, M. 伯德金

一、概 述

本文以航空供应部贸易与工业分部所作试验的结果为根据,对现已定型的鉴定数控机床定位精度的技术规范进行了讨论。

根据实际试验的结果,用统计方法对现有技术规范的优缺点作了分析。在此基础上,还提出了新的建议。

二、前 言

本文只讨论来源于控制系统(与机床结合在一起时)的各种机床误差。这些误差的总和,仅仅是工件误差的一部分,只沿直线进行测量并确定测量结果。测量过程中,机床与环境处在一定的条件下。几何精度、热效应和工件重量的影响都是可以测量的机床特性,不仅影响精度的测量,而且和工艺装备及切削力引起的变形等因素一样,还影响工件的误差。因此,不能认为测到的定位误差能完整地表征工件的精度。

不拟介绍试验方法。实际上,某些试验结果是用标准线纹尺测出,其余是用激光干涉仪测出的。如果注意操作,两种测量

方式的测量误差都不超过 $\pm 1\mu(0.00004'')/1000\text{mm}(39'')$ 。

在最近的试验中，对几种完全不同的数控机床定位精度作了研究。这里引用其试验结果并加以说明。从而揭示了在定位精度问题上，现有各种技术规范尚未涉及的几个方面。对此，本文将着重进行讨论。

三、现有的技术规范

鉴定数控机床定位精度的两个主要技术规范，分别由西德“德国工程师协会”(VDI)^[1]和美国“国家机床制造协会”(NMTBA)^[2]颁发。美国与欧洲的机床制造厂愈来愈多地采用NMTBA规范^[3]，在德国，则愈来愈多地采纳VDI规范。

1. NMTBA 技术规范

NMTBA 提出的“精度”定义是：“任意一点的平均位置与其给定位置之差的代数值与同一点的分散度之和，取其最大绝对值，即为数控系统在该点的定点精度”。

为了得出上述定位精度，以随机方式确定一系列定位点，并在每一点上重复定位若干次。得出每一点的平均位置，并与给定点比较，将所得误差绘成图形，如图1。把理论上误差为零的一点取在两个误差极值的平均值上，每一点的分散度采用标准的统计学公式进行计算：

$$\text{分散度} = 3\sigma = 3 \left\{ \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{N - 1} \right\}^{1/2}$$

式中 x = 数据值

$\bar{x}$ = 数据平均值

N = 数据的个数

σ = 标准偏差

于是,可对精度进行计算。

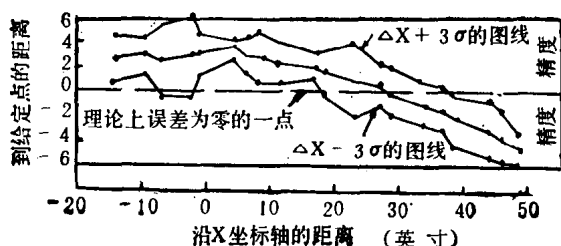


图 1. NMTBA 的精度检验

所述精度有两个数值,一个是双向定位精度(A_b)和相应的分散度($3\sigma_b$),另一个是单向定位精度(A_u)和相应的分散度($3\sigma_u$),其计算方法相同。对于任意给定点,从右面定位和从左面定位时,可分别得出两个平均位置,二者之差称为该点的空程量。我们知道,大约有 99.74% 的测量结果在以平均值为中心的 $\pm 3\sigma$ 范围内,有 95.44% 的测量结果在 $\pm 2\sigma$ 范围内,如果测量值不按正态分布。则得到的概率较小。

下面对几个要点加以说明:

根据每个定位点的测量值和该点平均测量值之差的平方和来计算每一点的分散度。

看来,定位点是随机选择的。

对趋近定位点的方向作了规定。如果没有规定移动方向,就假定单方向趋近定位点。

2. VDI 技术规范

可以参考图 2 来说明 VDI 方法。随机选择一系列定位点,并作若干次定位。(在 VDI 技术规范中,对定位点的数目和重复定位的次数都未作说明,但在图例中,有 14 个定位点,在每点上重复定位 5 次。)根据测量结果,确定每点的平均位置,并与

该点的给定位置作比较, 绘制误差曲线, 如图 2 所示。

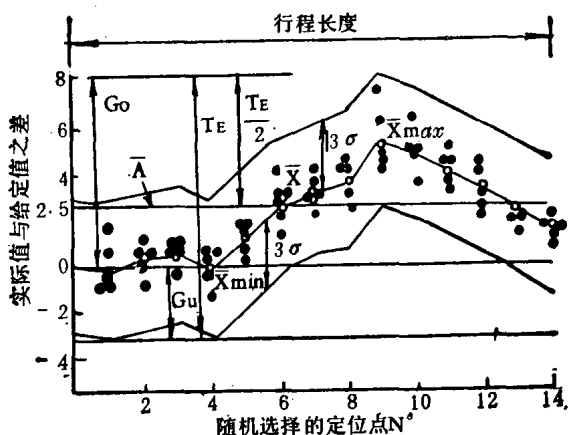


图 2. VDI 的精度检验

$$\text{平均位置偏差 } \bar{A} = \frac{\bar{X}_{max} + \bar{X}_{min}}{2} = \frac{5.3 - 0.2\mu}{2} = 2.55\mu$$

$$\text{误差范围 } G_{o,u} = \bar{A} \pm \left(\frac{\bar{X}_{max} - \bar{X}_{min}}{2} + 3\sigma \right) = (2.55 \pm 5.648)\mu$$

$$\text{定位误差 } T_E = \bar{X}_{max} - \bar{X}_{min} + 6\sigma = 11.3\mu$$

$$\text{位置分散宽度 } R_P = 6\sigma = 5.8\mu$$

然后, 从图中求出“平均的位置偏差”, 它和 NMTBA 技术规范中“理论上误差为零的一点”的概念相似。位置分散宽度 R_P , 是根据每个给定点上测量值的最大变化范围的平均值来计算。 R_P 是分散度的两倍。确定每个定位点的标准偏差时, 只需将该点测量值的极值范围除以一个系数即可。此系数取决于抽样的次数。

$$\text{标准偏差 } \sigma_i = \frac{R_i}{d}$$

式中 σ_i = 第 i 个定位点的标准偏差

R_i = 第 i 个定位点的测量值的极值范围

d = 修正系数

而: $R_p = 6\sigma_{\text{平均}}$

修正系数 $d^{(4)}$ 为

N	2	3	4	5	6	7	8	10	12
d	1.13	1.69	2.06	2.33	2.53	2.70	2.84	3.08	3.26

N 是抽样次数。(原文为: N 是抽样点数——译者注)

此技术规范表明: 在全部测量长度上, 可以假设位置分散宽度 R_p 是近似不变的。同时, 此规范中没有说明定位运动的方向, 以及它对位置分散宽度(或者分散度)的影响。但规范指出, 对于下列试验参数必须详细加以说明: 导轨长度、定位时的进给速度、机床的负荷、环境条件、测量点的数目和随机抽样(即重复定位)的次数, 以及试验持续的时间。

3. 对两个技术规范的比较

显然, NMTBA 规定的“精度”, 是 VDI 所谓“定位误差”的一半。虽然 NMTBA 和 VDI 计算标准偏差的方法不同, 但都声称, 在任意测量点上, 全部测量值的 99.73% 应处在平均值的 $\pm 3\sigma$ 范围内。但 NMTBA 着重认为分散度是沿坐标轴变化的, 而 VDI 认为不然。除去 VDI 规范要求列举出各项参数之外, 其它的重大差别是 NMTBA 倾向以单向定位来确定精度, 而 VDI 则完全没有谈及此事。

四、系统误差的计算

多数西方的标准使用者都知道, 上述两个主要标准在计算重复性和系统误差时, 都要在沿某坐标轴分布的若干点上(通常为 3~15 个点)重复定位若干次(通常为 6~15 次)。如果忽略重

复误差的影响,则观察到的任何一组误差均由两个部分组成。即“周期误差”和“进展性误差”。周期误差可认为是沿机床某坐标轴至少重复出现一次的误差,而进展性误差为“非周期误差”。特别当机床用丝杆定位时,周期误差可能在总的误差中占有主要地位。现举一极端的例子(但并非一点不现实)来说明:假设在总行程为 600mm 的长度上,仅有一种 50μ 的周期误差,周期误差的节距为 100mm。图 3 表明,如果选择等距离的七个定位点,就测量不出任何误差,但若选择等距离的六个点,则测得的误差曲线似乎是规则的系统性误差。目前,对短距离的精度要求特别严格。因此,周期误差比进展性误差性质更为严重。现取一组实际测量结果来说明。图 4 表明了上述两种类型的误差。可以看出,在大约 10mm 的距离内(原文为“100mm 的距离内”——译者注),短周期误差每隔 6.28mm (0.25 英寸)重复出现一次,它在全部误差中占有主要地位。如果以完全随机的方式来选择定位点,将会难以辨别这种周期误差。辨别进展性系统误差及周期误差的简便方法是沿每一坐标轴进行两个试验,第一个试验是在全行程上确定分散度及进展性误差,试验应根据此要求设计。通常选择 10~20 个定位点已很足够,其间距应为任何可能出现的周期误差的周期的整数倍。第二个试验的行程可大为缩短,通常取 25mm 已经足够,定位点的间隔为 0.5mm 左右。

根据捷克机床与金属切削研究协会提出的建议,为了测出周期性误差及累积误差,测量时的位移增量(即定位点的间距)应取决于测量范围的大小,其相互关系推荐如下:

测量范围	增量值
0—0.2mm	0.01mm
0—2mm	0.1mm

0—20mm	1.0mm
0—200mm	10.0mm
全行程	100.0mm

但是,通常不希望采用两种以上的测量范围。

应根据允差和工件尺寸的关系来规定周期误差和进展性误差的大小。通常,工件尺寸越小,允差也越小。这是以 ISO 标准中有关公差及配合的规定(BS—4500,1969 年)为根据的。因此,在确定机床是否达到某个精度等级时,即使周期误差仅为进展性误差的一半,但前者仍然是一个主要因素。所以,某坐标

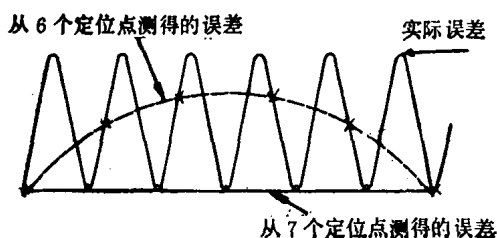


图 3. 测量间隔对测量结果的影响

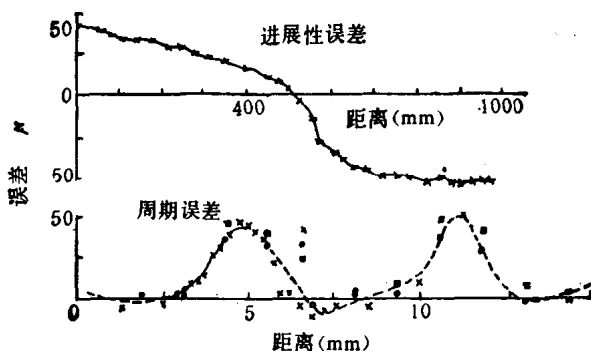


图4. 沿全行程和沿 15mm 长度误差
x—中间 O—右边 □—左边

轴的进展性误差很容易符合精度等级 IT7 的要求, 但周期误差却难以达到 IT9 的规定。

五、位置分散宽度的计算

1. 分散度差别的意义:

按照 NMTBA 规范, 要分别确定每点的分散度。而 VDI 规范是以所有各点分散度的平均值作为测量结果的。在机床试验过程中, 观察到的分散度是随定位点变化的。但变化不大。图 5 是在某机床上, 沿一个坐标测量的结果。按 VDI 规范计算的分散度和按 NMTBA 规范计算的分散度均绘于图中。值得怀疑的是分散度的变化是否仅仅因为抽样太少所致? 采用标准的统计试验^[4], 可以估计任何分散度的变化是否为所测分散度和抽样数量的函数。此试验表明, 在 20 次测量中, 分散度最大变化值的出现次数大于 1 次, 如图 5 所示。根据此试验结果, 可以得出下面结论: 选择 13 个定位点时, 用 VDI 方法算出的分散度(或者位置分散宽度)对被测机床的被测坐标轴是完全适合的。

至今, 对于一些完全不同的机床和控制系统来说, 在试验中并未发现分散度沿坐标轴有显著变化, 故可认为采用一个分散度是十分适当的。在这一方面、VDI 规范得到了确认。

2. 空程量:

在 VDI 规范中忽略了空程量的影响; 而 NMTBA 规范认为, 空程量较大的机床和没有空程量的机床完全可用同样的统计方法来计算精度。如果, 对一台静止区很大的机床进行试验, 并将试验结果绘成概率分布图, 如图 6 所示, 这时显然可见, 标准的统计方法并不真正适用。此时, 在双向定位标准偏差(即前述分散度的 $\frac{1}{2}$)、单向定位标准偏差和空程量之间存在某种确定

的关系,并可简单地表示于下:

$$\sigma_b^2 = \sigma_u^2 + \frac{1}{4}L^2$$

式中, σ_b = 双向定位标准偏差

σ_u = 单向定位标准偏差

L = 空程量

这个公式在 L 比 σ_u 大得多的情况下得到了证实(误差在通常允许的范围之内)。

利用这个公式,可以算出包括 95% 或者 99.7% 的试验结果的分散度,此分散度是双向定位标准偏差(σ_b)与空程量/单向标准偏差(L/σ_u)的函数。所得结果如图 7 所示。可以看出,当 L/σ_u 大于 4 时,按常规理论计算所得的分散度比按上述近似方法计算所得的分散度大 50% 以上。图 6 在某种程度上证实了这一点。在图 6 中,用上述方法进行修正之后,有 4% 的试验结果处在概率为 95% 的范围之外;若不作修正,则全部试验结果均在概率为 95% 的范围之内(虽然,5% 的试验结果应该在此范围之外)。

显然,当空程量很大时,计算双向定位的重复性是并不困难的。只需知道空程量及单向定位重复性就可以进行计算。当然,对于任何机床,都不希望有只许单向定位的规定。因此,在任何情况下,当机床空程量很大时,应该同时给出双向定位分散度的实际数值(需要时,应按图 7 作修正)和单向定位分散度的实际数值。

空程量小于两倍单向定位标准偏差时,一般可以不作上述修正,并根据全部测量结果计算双向定位分散度。

如要使技术规范更为完善,则当空程量大于按 VDI 方法算出的分散度的 50% 时,就可用下述方法来确定双向定位分散

度；如小于 50%，使用 VDI 方法已很合适。提出的修正方法如下：

(1) 计算平均空程量；

(2) 分别计算每个方向的单向定位分散度，然后，取这两个数值的平均值，再除以 3，即得出单向定位的标准偏差 σ_u ；

(3) 确定比值 L/σ_u ；

(4) 根据给定的比值 L/σ_u ，从图 7 上确定适当的修正系数 c ；

(5) 双向定位分散度 $= 3 \cdot c \cdot \sigma_u$

3. 试验结果的精确度：

如前所述，本文并不讨论测量定位精度的方法，然而，对测量方法的精确度是必须加以评定的。这里，就对测量误差作某些说明。测量误差有两个来源。第一种误差来源于检验方法，这种误差只影响测到的位置偏差。若已知道测量仪器的修正值，就可消除由此引起的系统误差（不要忘记温度的影响）。但是，正如机床特性会引起一定的分散度一样，测量中的检验误差也具有一定量的分散度。这两种分散度按下述公式合成：

$$\sigma_u^2 = \sigma_m^2 + \sigma_e^2$$

式中： $\sigma_u = 1/3$ 分散度 = 测量到的标准偏差

$\sigma_m = 1/3$ 分散度 = 真正由机床特性引起的标准偏差

$\sigma_e = 1/3$ 分散度 = 检验系统引起的标准偏差

因此，如 $3\sigma_e = 1\mu$ （典型的数值）

$3\sigma_u = 5\mu$ （典型的数值）

$3\sigma_m = 4.9\mu$ 并非象指望的那样等于 4μ

第二种误差来源于抽样数量太少的影响。在前面讨论分散度的变化究竟多大时，就已在某种程度上看到抽样数量太少的影响了，可以说，分散度的变化不象是偶然产生的。此外，各定

位点的平均位置也并不绝对正确，而是在按下述方法算出的范围之内变化：

$$\pm \frac{2\sigma}{\sqrt{N}}$$

式中， σ = 按选择的方法定位时，所得试验结果的标准偏差
 N = 每个定位点的重复定位次数

严格地说，此公式的计算结果只给出 95% 的概率，也就是说，在 20 次机会中，平均值将有 1 次处在该公式给定的范围之外。但是，这样的误差通常公认是可以接受的。

因此，如果重复定位 5 次，分散度为 5μ ，按上述公式求得平均值的可靠性在 $\pm 1.5\mu$ 范围内；当抽样次数为 7，则可靠性在 $\pm 1.25\mu$ 范围内。

按 NMTBA 方法计算的分散度，其可靠性在 $\pm 2\sigma / (2N)^{1/2}$ 范围内（同样是对 95% 的概率而言）。

采用 VDI 方法计算分散度时，其可靠性难以简单地确定，但可粗略地认为是在 $\pm 2\sigma / N^{1/2}$ 之内。当 $N=5\sim 8$ ，所得结果将比 NMTBA 的大 40%。因此，以 VDI 方法为例，如采用 14 个定位点，每点重复定位 5 次，所得 3σ （即分散度）的可靠性为 $\pm 25\%$ ，若以 NMTBA 方法为例，计算出每点的分散度，所得平均分散度的可靠性为 $\pm 12\%$ （若以 $N=5$ 代入公式 $\pm 2\sigma / (2N)^{1/2}$ ，得 $\pm 21\%$ ——译者注）。有趣的是 NMTBA 和 VDI 都声称全部试验结果的 99.73%（精确到 1/10000）处在分散度为 3σ 的范围之内。实际上，严格说来，两种规范援引的分散度，其精度为 $\pm 12\% \sim \pm 25\%$ ，从而，几乎无疑地只有极少数试验结果（小于 3%）处在分散度的范围之外。

作者个人认为，就计算分散度的方法而言，虽然 VDI 方法

精度略差,但因便于计算。故比 NMTBA 方法更实用。

4. 飘移的影响:

在不止一台机床上发现,定位试验过程中,整组试验数据在半小时后产生了飘移。虽然,产生飘移的原因有时是机床控制系统中零位线路不平衡引起的,但在很多情况下却是不明原因。不管原因如何,飘移的主要影响是增大分散度。图 8 为半小时内典型的飘移过程。图 8 是根据图 5 的数据绘出的。在图 5 中,既有对飘移作了修正的试验结果,也有包括飘移量在内的试验结果。可以看出,在飘移的影响下,重复性从 4.8μ 增加到 15μ 。

计算飘移并不太繁。方法是首先确定每个定位点的平均位置,然后,确定一组试验结果相对平均位置的平均差值,再用同样方法算出各组试验结果相对平均位置的差值(当然,这里忽略了沿坐标轴全长移动一次时的飘移,通常是这样做的)。然后,画出飘移图,并求出平均飘移量,以便象图 5 那样对试验结果进行修正。不要把热膨胀引起的误差和飘移混为一谈。热膨胀将影响进展性误差,一般并不影响分散度。在上述一系列试验中,并未发现有热膨胀的影响。但是,在某些采用液压进给系统以及采用丝杆定位的机床中,很容易出现热膨胀引起的误差。

通常,只在短时间内出现飘移。建议对飘移进行修正之后再计算分散度,但必须说明飘移量的大小。如果,象曾经观察到

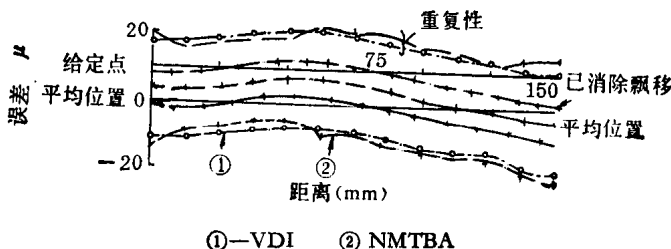


图 5. 计算重复性的实例

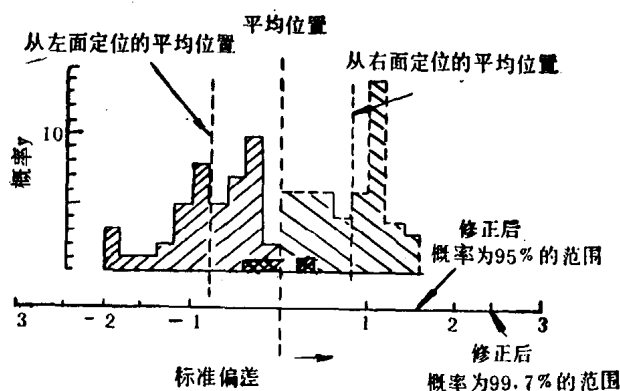


图6. 在同一点上, 定位 102 次的概率分布图

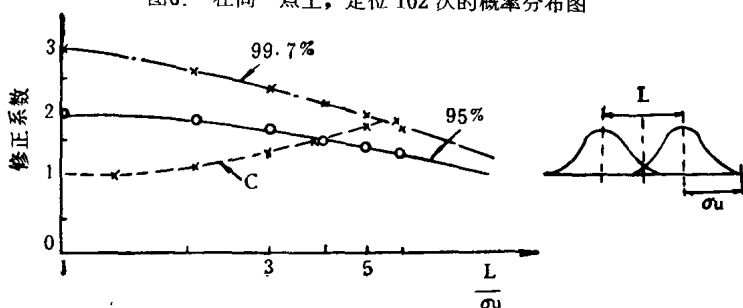


图7. 空程量的修正系数

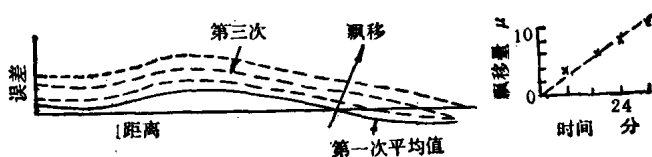


图8. 飘移图

的那样, 飘移是连续不停的, 则分散度应表达为时间的函数。为了观察飘移的情况。以确定飘移对分散度的影响, 试验至少进行半个小时。

六、结 论

可以看出,目前使用的两个技术规范,均未对实际中遇到的各种误差给出恰当的概念。已观察到空程量、周期误差和飘移都会影响机床的定位精度。但所有技术规范对此都未作适当的处理。还可以看出,两个方法所能得到的试验精确度,都达不到在各自的规范中只草率加以解释的假定值。因此提出以下建议:

1. 对任何被测量的机床坐标轴,均应分别测量进展性误差、周期误差(包括其重复周期)、空程量、飘移(假如有的话)、热膨胀(假如有的话)和单向定位分散度。当空程量足够大时,应按第 5.2 所述方法,根据空程量和单向分散度来确定双向定位分散度。

2. 应根据 VDI 的方法来计算整个坐标轴的分散度。

3. 为了计算每个坐标轴的单向定位分散度、空程量和进展性误差,至少应作 100 次定位。建议最少取 10 个定位点,并往返分别测量 5 次。分别计算出两个运动方向的单向定位分散度以及空程量。

4. 在测量分散度的试验中,位移增量值应是周期误差的周期的整数倍。应在机床全行程上选择一段适当的长度来测量周期误差,建议采用 25mm。

5. VDI 推荐的大部分参数,即导轨长度、定位速度(如有关系的话)、环境条件、定位点数目、重复测量次数以及试验持续的时间等,在每次试验中均应记录下来。并建议把测量直线(沿该直线测量坐标精度)相对机床坐标系统的位置也记录下来。

(参考文献略)

苏瑶荪译 张秉谦校

译自 12th «Machine Tool Design and Research» 1971