

测量不确定度在实际工作中的应用

李爱红

江汉石油钻头股份有限公司 质量管理处 (湖北 潜江 433124)

摘 要 国家校准实验室的认证, 计量标准技术报告的建立, 检定/校准证书的出具等, 都要求检测部门必须提供准确可靠的检测数据, 这些检测数据最终还是用测量不确定度来表示。因此, 在质量管理和质量保证中, 测量不确定度是我们从事计量工作的技术人员必须掌握的理论知识, 并以 4 个实例说明测量不确定度在实际工作中的具体应用。

关键词 测量不确定度 测长仪 轮廓投影仪

Abstract All activities such as the certification of state calibration laboratory, the preparation of technological report on measurement standards and the issue of verification or calibration certificates, require metrological and inspection department to provide accurate and reliable test data, which are eventually demonstrated in terms of the uncertainty in measurement. Therefore, in quality management and guarantee, the measurement of uncertainty is the theoretical knowledge that measurement technicians must acquire. The paper expounds the specific applications of uncertainty in measurement in the practical work by means of four examples.

Key words uncertainty in measurement; length measuring instrument; outline projecting apparatus

在 ISO/IEC 17025《检测和校准实验室能力的通用要求》中指明, 校准实验室出具的每份证书或报告都应包括有关测量结果不确定度评定的说明。ISO 9001 要求, 所使用的测量设备应保证其测量不确定度为已知。国家校准实验室的认证, 检定/校准证书的出具等, 都要求我们检测部门必须提供准确可靠的检测数据, 这些检测数据最终还是用测量不确定度来表示。因此, 在质量管理和质量保证中, 测量不确定度是我们从事计量工作的技术人员必须掌握的理论知识。

在日常检测、校准工作中, 我们经常遇到一些测试件, 这些测试件既无现行标准, 又无检定规程。我们在测试过程中如何保证测量数据的准确可靠? 如何判断测量方法是否满足用户的要求? 我们可以依据图纸上给出的公差或对方给出的参数, 通过分析方法, 列出整个测量过程中各个主要的不确定度分量, 作出合理的评估(B 类评估), 并计算测量结果的总不确定度, 以测试报告的形式给出, 同时应确保测量结果的报告形式不会使用户造成对所给测量不确定度的误解。

实例 1 万能测长仪校准环规

在万能测长仪上测量型号为 CD41059-58, 内孔直径公差范围是 $\phi 50.52 \pm 0.004 \text{ mm}$ 的一个直径校对规。方法是用一个直径为 $\phi 50$ 的标准环规与直径为 $\phi 50.52 \text{ mm}$ 的被测直径校对规在万能测长仪上进行比较测量, 现对万能测长仪测量内孔直径进行不确定度分析。

1 B 类不确定度 (假定不确定度呈正态分布, 包含因子取 3)

(1) 万能测长仪的示值误差及不确定度分量

$$\delta_1 = (2 + L/100) = 2.505 \mu\text{m}$$

L —被检工件的长度

$$U_1 = \delta_1/3 = 0.835 \mu\text{m}$$

(2) 标准环规的检定极限误差及不确定度分量

$$\delta_2 = 0.5 \mu\text{m}$$

$$U_2 = \delta_2/3 = 0.167 \mu\text{m}$$

(3) 仪器分辨率引起的误差及不确定度分量

$$\delta_3 = 1.0 \mu\text{m}$$

$$U_3 = \delta_3/3 = 0.333 \mu\text{m}$$

(4) 内尺寸测量找转折点引起的误差及不确定度分量

$$\delta_4 = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707 \mu\text{m}$$

$$U_4 = \delta_4/3 = 0.236 \mu\text{m}$$

(5) 温度偏离 20℃ 时对测量结果引起的误差及不确定度分量

$$\delta_5 = \phi a \Delta t$$

式中: a 为直径校对规线膨胀系数, 假定被测直径校对规与标准件材料相同, 则 $a = 11.5 \times 10^{-6}$;

Δt 为温度偏离 20℃ 时的温度差, $\Delta t = \pm 1^\circ\text{C}$

$$\delta_5 = \phi a \Delta t = 50.52 \times 11.5 \times 10^{-6} \times 1 = 0.58 \mu\text{m}$$

$$U_5 = 0.58/3 = 0.193 \mu\text{m}$$

2 合成不确定度

$$U_c = (U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2)^{1/2}$$

$$= (0.835^2 + 0.167^2 + 0.333^2 + 0.236^2 + 0.193^2)^{1/2}$$

$$=0.964\mu\text{m}$$

3 扩展不确定度

由正态分布可得: $K=3, P=99.73\%$

$$U=KU_c=3\times 0.964=2.892\mu\text{m}$$

4 检测结果表达式

$\phi 50.52\text{mm}$ 直径校对规检测结果表达式为:

$$\phi 50.52\pm 0.0029\text{mm}。$$

检测结果在其公差范围 $\phi 50.52\pm 0.004\text{mm}$ 之内, 满足工件要求, 可以开展校准工作。

实例 2 轮廓投影仪测试牙轮倒模

在 QL-30 轮廓投影仪上测量牙轮半精车内孔滚柱槽圆弧半径 R 时, 公差范围是 $R5.541\pm 0.038\text{mm}$ 。方法是采用轮廓投影仪的自动寻边功能, 在牙轮倒模的圆弧轮廓上均匀采点直接测量。现对仪器测量圆弧半径进行不确定度分析。

1 B 类不确定度 (假定不确定度呈正态分布, 包含因子取 3)

(1) 仪器的纵向示值误差及不确定度分量

$$\delta_1=4\mu\text{m}$$

$$U_1=4/3=1.333\mu\text{m}$$

(2) 仪器的横向示值误差及不确定度分量

$$\delta_2=4\mu\text{m}$$

$$U_2=4/3=1.333\mu\text{m}$$

(3) 仪器放大倍数引起的误差及不确定度分量

$$\delta_3=0.4\mu\text{m}$$

$$U_3=0.4/3=0.133\mu\text{m}$$

(4) 圆弧投影成像引起的误差及不确定度分量

$$\delta_4=5\mu\text{m}$$

$$U_4=5/3=1.667\mu\text{m}$$

(5) 温度偏离 20°C 时对测量结果引起的误差及不确定度分量

$$\delta_5=Ra\Delta t$$

式中: a 为倒模的线膨胀系数, $a=10.0\times 10^{-6}$;

Δt 为温度偏离 20°C 时的温度差, $\Delta t=\pm 1^\circ\text{C}$

$$\delta_5=Ra\Delta t=5.541\times 10.0\times 10^{-6}\times 1=0.055\mu\text{m}$$

$$U_5=0.055/3=0.018\mu\text{m}$$

(6) 仪器分辨率引起的误差及不确定度分量

$$\delta_6=1.0\mu\text{m}$$

$$U_6=1.0/3=0.333\mu\text{m}$$

2 合成不确定度

$$U_c=(U_1^2+U_2^2+U_3^2+U_4^2+U_5^2+U_6^2)^{1/2}$$

$$=(1.333^2+1.333^2+0.133^2+1.667^2+0.018^2+0.333^2)^{1/2}$$

$$=2.542\mu\text{m}$$

3 扩展不确定度

由正态分布可得: $K=3, P=99.73\%$

$$U=KU_c=3\times 2.542=7.626\mu\text{m}$$

4 检测结果表达式

$R5.541\text{mm}$ 圆弧半径检测结果表达式为:

$$R5.541\pm 0.0076\text{mm}。$$

检测结果在其公差范围 $R5.541\pm 0.038\text{mm}$ 之内, 满足工件要求, 可以开展测试工作。

实例 3 直角尺检定装置检定直角尺

宽座角尺是长度计量器具的一种, 主要用于制件直角的检验和划线, 在安装和调修设备时, 检验零部件有关表面的相互垂直度, 宽座角尺的内外角误差直接影响被测工件工艺尺寸的准确性, 严重影响产品质量。因此, 正确选用检定装置, 检定装置的测量不确定度计算都是非常重要的工作。

宽座角尺外角的检定目前普遍采用的是与圆柱角尺比较测量法, 该方法是在被检直角尺长边与圆柱角尺母线之间试塞量块, 在全部受检范围内, 可塞入量块尺寸的最大差值即为受检直角尺的外角垂直度误差。

1 B 类不确定度

(1) 主标准器圆柱角尺的不确定度分量

0 级圆柱角尺的角度误差为 $\delta_1=6\mu\text{m}$, 由于误差分布为均匀分布, 包含因子 $K=\sqrt{3}$, 其标准不确定度 $U_1=\frac{6}{\sqrt{3}}=3.464\mu\text{m}$ 。

(2) 0 级检验平板的不确定度分量

规格为 $(1000\times 750)\text{mm}$ 、0 级检验平板的平面度误差为 $\delta_2=9\mu\text{m}$, 由于误差分布为均匀分布, 包含因子 $K=\sqrt{3}$, 其标准不确定度 $U_2=\frac{9}{\sqrt{3}}=5.196\mu\text{m}$ 。

(3) 量块的不确定度分量

4 等量块的中心长度测量极限误差为 $\delta_3=\delta_4=0.2\mu\text{m}$, 该误差两次被引入测量结果中, 由于误差分布符合正态分布, 包含因子 $K=3$, 其标准不确定度 $U_3=U_4=0.2/3=0.067\mu\text{m}$ 。

(4) 直角尺检定规程规定, 温度要求保持稳定, 受检角尺在检定室内的平衡温度的时间不少于 1h, 标准温度允差没有规定, 在此忽略不计。

2 合成不确定度

$$U_c=(U_1^2+U_2^2+U_3^2+U_4^2)^{1/2}$$

$$=(3.464^2+5.196^2+0.067^2+0.067^2)^{1/2}$$

$$=6.246\mu\text{m}$$

3 扩展不确定度

由正态分布可得: $K=3, P=99.73\%$

$$U=KU_c=3 \times 6.246=18.738 \mu\text{m}$$

4 检测结果

该直角尺检定装置的不确定度为 $18.738 \mu\text{m}$ 。

《JJG7-2004》直角尺检定规程规定:对于长边大于 125mm 的 2 级直角尺,其外角垂直度最大误差为 $16 \mu\text{m}$,由此可见,目前的检定装置,在检 2 级以下的直角尺时可以保证测量精度,对精度要求比较高的测量直角尺其准确度就不能保证,应对检定装置进行改进。

5 改进后的不确定度

(1) 将主标准器圆柱角尺的精度由 0 级提高为 00 级, $\delta_1=3 \mu\text{m}, U_1=\frac{3}{\sqrt{3}}=1.732 \mu\text{m}$ 。

(2) 将检验平板的精度由 0 级提高为 00 级, $\delta_2=4.5 \mu\text{m}, U_2=\frac{4.5}{\sqrt{3}}=2.598 \mu\text{m}$ 。

(3) 合成不确定度

$$\begin{aligned} U_c &= (U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2)^{1/2} \\ &= (1.732^2 + 2.598^2 + 0.067^2 + 0.067^2)^{1/2} \\ &= 3.124 \mu\text{m} \end{aligned}$$

(4) 扩展不确定度

$$U=KU_c=3 \times 3.124=9.372 \mu\text{m}$$

由此可见,改进后的检定装置测量准确度大大提高,满足检定规程的要求,可实现高准确度的测量。

实例 4 FARO GAGE 测量臂 检测牙掌偏移值

在 FARO GAGE 测量臂上测量 $8\frac{1}{2}"\text{SKF517G}$ 牙掌,偏移值公差范围为 $6.06 \pm 0.25\text{mm}$ 。方法是:测量牙掌定位孔,将定位孔中心投影到牙掌 120 度面交线上记为 C 中心点;通过空间任意一点、C 中心点、定位孔等 3 个元素构建拟合平面;测量牙掌轴颈将其投影到拟合平面上记为轴倾中心线;计算 C 中心点到轴颈中心线的距离即为偏移值的实测结果。现对 FARO GAGE 测量臂检测牙掌偏移值进行不确定度分析。

1 B 类不确定度(假定不确定度呈正态分布,包含因子取 3)

(1) FARO GAGE 测量臂的示值误差及不确定度分量

$$\delta_1=(5+8L/1\ 000)=5.048 \mu\text{m}$$

L —被检工件的长度

$$U_1=5.048/3=1.683 \mu\text{m}$$

(2) 牙掌被测表面的形状误差及不确定度分量

$$\delta_2=5.0 \mu\text{m}$$

$$U_2=5.0/3=1.667 \mu\text{m}$$

(3) 仪器分辨率引起的误差及不确定度分量

$$\delta_3=1.0 \mu\text{m}$$

$$U_3=1.0/3=0.333 \mu\text{m}$$

(4) 构建拟合平面、投影计算等方法引起的误差及不确定度分量

$$\delta_4=1.0 \mu\text{m}$$

$$U_4=1.0/3=0.333 \mu\text{m}$$

(5) 探针校准引起的误差及不确定度分量

$$\delta_5=0.2 \mu\text{m}$$

$$U_5=0.2/3=0.067 \mu\text{m}$$

(6) 测量取点时人为因素对测量结果引起的误差及不确定度分量

$$\delta_6=2.0 \mu\text{m}$$

$$U_6=2.0/3=0.667 \mu\text{m}$$

(7) 温度偏离 20°C 时对测量结果引起的误差及不确定度分量 FARO GAGE 测量臂对工作环境温度没有特别要求,且内部设有温度自动补偿,对标准温度允差没有规定,一般 $0\sim 46^\circ\text{C}$ 均可使用,在此可忽略不计。

(8) 检验平台震动对测量结果引起的误差及不确定度分量

FARO GAGE 测量臂对工作环境震动没有特别要求,在此忽略不计。

2 合成不确定度

$$\begin{aligned} U_c &= (U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2 + U_6^2)^{1/2} \\ &= (1.683^2 + 1.667^2 + 0.333^2 + 0.333^2 + 0.067^2 + 0.667^2)^{1/2} \\ &= 2.506 \mu\text{m} \end{aligned}$$

3 扩展不确定度

由正态分布可得: $K=3, P=99.73\%$

$$U=KU_c=3 \times 2.506=7.518 \mu\text{m}$$

4 检测结果表达式

$8\frac{1}{2}"\text{SKF517G}$ 牙掌偏移值检测结果表达式为: $6.06 \pm 0.0075\text{mm}$ 。

检测结果在其公差范围 $6.06 \pm 0.25\text{mm}$ 之内,满足工件要求,可以开展检测工作。

结 论

以上是测量不确定度在检定、校准、测试上的应

(下转第 68 页)



图 8 高温回火滑动磨损



图 9 黏着磨损粒

(上接第 30 页)

力腐蚀试验结果及可靠性计算结果,为了使井口装置在较高的应力环境下具有良好的抗应力腐蚀性能,可以在设计流程中选用适当的安全系数以使井口装置具有较高的可靠度,保证设备的安全运行,延长其使用寿命。

[参考文献]

- [1] 闫红彦,许艺萍.焊接接头的应力腐蚀开裂及防护[J].洛阳工业高等专科学校学报,2007,17(2):16-19.
- [2] 杨传健,江楠.压力容器应力腐蚀开裂的预防分析法准则[J].腐蚀与防护,2007,28(2):105-107.
- [3] 吴庆华.化工设备中应力腐蚀的机理及防护[J].化学工程师,2006(12):47-48.
- [4] 刘惟信.机械可靠性设计[M].北京:清华大学出版社,1996.

(上接第 47 页)

用。而不确定度在校准上的应用更广泛,根据导则 25《校准和检测实验室能力的通用要求》指明:校准实验室出具的每份证书或报告都应包括有关测量结果不确定度评定的说明。

校准在国际上已成为量传体系中的主要方式,是市场经济发展的必然选择,广泛应用于工业生产领域。我们要取得国际经济和市场竞争中的优势地

结 论

根据设备状态监测数据和程序实现设备维修维护管理,实现从被动的定期维修到视情维修的跨越式转变。通过定期或连续地对设备进行状态监测,并根据状态监测和故障诊断的结果,查明设备有无劣化或故障征兆,安排在必要时进行修理。它能在设备失效前检测和诊断出所存在的故障,并可较准确地估计出连续运行的可靠时间,因而设备使用寿命最长,意外停机事故最少,还有因过剩维修受到控制,从而减少了备件消耗和维修工作量,也可防止因检修而出现的人为故障,从而最终导致使维修费用最低。状态监测与视情维修,对确保机械设备的运行,有效降低企业的生产成本,提高企业的经济效益均起到重要作用。

[作者简介]

顾克江,男,1958 年生,江苏人,江苏石油勘探局钻井处高级工程师。

本文编辑:吴文桢

收稿日期:2008-11-18

- [5] 周家泽.机械零件强度可靠性设计方法探讨[J].武汉工业学院学报,2004,23(4):27-29.
- [6] Y.Y. Chen, Y.M. Liou, H.C. Shih. Stress corrosion cracking of type 321 stainless steels in simulated petrochemical process environments containing hydrogen sulfide and chloride [J]. Materials Science and Engineering, 2005, 407: 114-126.
- [7] NACE TM0177-1996, Laboratory Testing of Metals for Resistance to Specific Forms of Environmental Cracking in H₂S Environments[S].

[作者简介]

裴峻峰,男,1954 年生,江苏宜兴人,江苏工业学院机械与能源工程学院教授、博士,发表论文 50 余篇,获中国石油天然气总公司科技进步二等奖 1 项,获国家发明专利 1 项。从事石油及石化设备的可靠性及故障诊断的研究工作。

本文编辑:黄永场

收稿日期:2008-11-18

位,就必须在各方面与国际接轨。在出具检定证书、校准证书、检测报告等多种形式文件时,有关测量结果和测量不确定度的报告,都应与国际的表示方式一致。

[作者简介]

李爱红,生于 1966 年 11 月,从事精密测试、计量技术与管理工作,现任江钻股份质管处计量工程师。

本文编辑:王栓琴

收稿日期:2008-11-18