

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.06.16

装备研制过程中测量策划方法研究

何旋¹, 吴霞¹, 周自力²

(1.航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2.中国航空研究院, 北京 100029)

摘 要: 针对装备研制过程参数体系庞大、测量链长导致的测量策划问题, 分析建立测量模型、设计测量方案、评价测量结果的一般方法, 提出解决装备研制中测量问题的基本思路, 为通用化、流程化、规范化测量解决方案的形成提供参考。

关键词: 计量学; 测量模型; 测量策划; 测量优化; 测量质量

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2022)06-0113-07

Research on measurement planning method in equipment development

HE Xuan¹, WU Xia¹, ZHOU Zili²

(1.Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2.Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China)

Abstract: Aiming at the measurement planning problems caused by the huge parameter system and long measurement chain in the equipment development process, the general methods of establishing measurement models, designing measurement schemes and evaluating measurement results are analyzed, and the basic ideas to solve the measurement problems in equipment development are proposed, which provides a reference for the formation of universal, procedural and standardized measurement solutions.

Key words: metrology; measurement model; measurement planning; measurement optimization; measurement quality

0 引言

在装备制造业, 由于产品结构特殊、参数体系庞大, 导致测量工作量大、测量链条长。同时, 测量活动不仅体现在制造完成后通过测量手段判断与设计指标的符合性, 还体现在制造过程中通过测量手段控制质量, 达到过程参数与成品性能状态相统一、成品性能状态与设计指标相统一的目的。最后, 通过计量赋值, 实现测量与计量相统一。发达国家非常重视产品研制过程中测量问题的解决。随着国际计量建议的颁布和修订, 由量和单位、测量模型、测量不确定度及其在合格

评定中的应用为主要内容的测量理论体系基本健全; 发达国家在飞机制造业建立了一系列标准规范, 用于实现风洞、发动机乃至整机的测量策划、测量实施和测量质量评估。相比发达国家, 我国虽建立了比较完整的量值传递体系, 但工程应用领域量值控制仍存在较多问题, 研究解决装备研制中的测量策划方法对于装备测量活动规范有序开展具有重要意义。

1 装备研制中测量问题分析

测量要实现产品研制过程中成品状态涉及各类参数的定量控制, 测量对象包括性能状态参

收稿日期: 2022-10-09; 修回日期: 2022-11-27

基金项目: 民用飞机专项科研项目(MJZ2-1N21-4)

引用格式: 何旋, 吴霞, 周自力. 装备研制过程中测量策划方法研究[J]. 计测技术, 2022, 42(6): 113-119.

Citation: HE X, WU X, ZHOU Z L. Research on measurement planning method in equipment development[J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(6): 113-119.



数和过程参数, 参数体系庞大。在计量学范畴, 这些参数理论上都属于基本量或导出量^[1-2], 但从建立参数测量链、实施参数测量的角度考虑, 工程实践中的参数与其属于基本量或导出量不直接相关, 与计量学对量的类别划分往往呈两个维度, 其测量过程也比较复杂。

以飞机翼展的测量为例, 按照计量学专业划分, 飞机翼展属于基本量中的长度量。机翼是装配件, 在加工过程中为了控制其精度以满足翼展设计指标要求, 需要对组成机翼的各段部件进行测量以获得几何尺寸。在装配过程中, 需要在不同站位布置测量点以控制装配精度, 保证不同测量点位测量坐标系统一。即使在统一的测量坐标系下, 翼展测量也不意味着各段部件几何尺寸的简单叠加, 装配过程中的温度、重力、各类工艺参数也对翼展的测量产生重要影响。因此, 仅从装配过程而言, 翼展尺寸至少与各段部件几何尺寸、测量点位布置、环境条件、装配工艺有关。考虑到各部件也属于装配件, 其装配过程本身同样存在众多影响因素, 加之组成装配件的零件尺寸、加工工艺由于异地生产导致装配尺寸不匹配, 就构成了由机翼翼展到零件尺寸之间包含众多影响因素的测量链条。在这样一个测量链条中, 每一个过程参数的测量都为翼展的测量做出贡献, 翼展测量质量也与每个参数的测量质量息息相关。

因此, 综合考虑各类影响因素, 建立相对完整、准确的测量模型是测量策划的关键。测量活动应依据测量模型中定义的输入量、输出量之间的关系实施, 经过严格质量评价的直接测量结果也应回代入测量模型中实现参数的间接测量以及测量模型的优化。随着测量系统分析理论的提出和应用, 对于直接测量参数而言, 其测量过程的实施流程已趋于标准化, 因此, 主要对测量策划和测量质量评价问题进行讨论。

2 建立测量模型的基本思路

2.1 测量模型的基本类别

测量从来不是仪器作用在被测对象上直接得到测量结果的简单活动, 任何测量都必须在建立测量模型的基础上实施^[3-5]。按照模型复杂程度不同, 测量活动大致可以分为直接测量和间接测量两种。

直接测量即测量模型中输入量与输出量关系非常简单, 甚至输出量等于输入量。例如, 用钢卷尺测量物体的长度, 测量模型为

$$L = F(X) = X \quad (1)$$

式中: L 为输出量, 即被测物的长度; X 为输入量, 即钢卷尺的示值; $F(X)$ 为 L 的测量模型。

间接测量即测量模型相对复杂但已知, 需增加数据二次处理环节。例如, 用卡尺测量两圆形孔的圆心距, 测量模型为

$$D = F(X_i) = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad (2)$$

式中: D 为输出量, 即两圆形孔间圆心距; X_1 为第一个输入量, 即用卡尺测量两圆形孔间最大距离示值; X_2 为第二个输入量, 即用卡尺测量两圆形孔间最小距离示值; $F(X_i)$ 为 D 的测量模型。

2.2 简单测量模型的扩展

式(1)测量模型简单且测量活动不需二次操作, 仪器示值即为测量结果, 但在实际测量活动中, 直接测量是几乎不存在的, 绝大部分测量模型属于式(2)的形式。间接测量大多具有多个输入量且与输出量之间关系复杂, 有时呈非线性关系, 直接测量在考虑多种实际影响因素后, 也会转化为间接测量。例如: 式(1)测量模型是建立在钢卷尺本身准确、测量不受环境条件影响等假设基础上的, 然而这些假设在实际测量活动中不成立, 应利用全部信息得到尽可能准确的测量结果, 对测量模型进行扩展。物体长度的测量结果不仅与钢卷尺示值有关, 还应考虑其他已知因素的影响对钢卷尺的示值进行修正。此外, 还包含众多其他难以量化描述的因素, 如由于钢卷尺拉伸或弯曲造成有效长度变化导致的测量误差、由于磨损造成钢卷尺零刻线无法与被测对象端面对齐导致的测量误差、钢卷尺和被测对象不平行导致的测量误差等。这些因素会对测量结果产生影响, 也需要建立扩展测量模型对其进行分解, 即

$$L = F(X_i) = \sum_{i=1}^n X_i = X_1 + X_2 + X_3 + \cdots + X_n \quad (3)$$

$$X_i = H_i(Y_{ij}) \quad (4)$$

式中: X_1 为观测得到的被测对象的长度, 通过多次重复观察得到钢卷尺示值的平均值得出; X_2 为校准对钢卷尺长度的修正值, 通过查阅钢卷尺的校准证书得出; X_3 为温度变化对钢卷尺长度的修正值,

通过钢的线胀系数参考数据计算得出; X_i 为其他难以量化的输入量 ($i = 4, 5, \dots, n$); $F(X_i)$ 为 L 的测量模型 ($i = 1, 2, \dots, n$); $H_i(Y_{ij})$ 为 X_i 的测量模型 ($i = 4, 5, \dots, n$); Y_{ij} 为 X_i 的输入量 ($i = 4, 5, \dots, n$)。

式 (4) 测量模型的输出量是式 (3) 测量模型的输入量。如有必要, 式 (4) 测量模型中的输入量 Y 也应进一步分解, 直至分解为具有成熟量值溯源路径的计量参量, 从而实现简单原理模型的扩展, 建立相对完整、可控的多级测量模型, 以期得到更为客观的测量结果, 这样才能建立真正完整的含有若干计量标准量、补偿量和控制量等全部量的参数测量链条和量值溯源链条。

但是, 仍然存在部分复杂测量问题, 难以找到输出量与各输入量之间的解析关系, 这时需要采用适当方法、通过实验大数据获得输入量、输出量之间的数值模型或逻辑关系^[6-8], 通过实验或历史数据建立起来的数值模型是企业的核心技术秘密。因此, 测量从来不是一项单纯的技术行为, 在考虑其经济性、便利性的同时还应考虑其企业专属技术秘密的特性。建立参数测量模型是解决复杂难题的关键, 属于企业所拥有技术的关键和秘密, 必须引起高度重视。

3 测量方案设计及优化

1) 测量方案分析与设计

测量方案设计是伴随产品设计过程推进的, 设计人员不仅给出产品总体性能参数及其控制要求, 而且要对总体性能指标进行分解, 建立计算总体性能指标的原理模型。按照产品结构构成, 将总体性能参数逐层向下分解, 形成总体性能参数、机体参数、大部件参数、系统参数、子系统参数、部件参数、零件参数以及多种工艺参数构成的产品参数体系。原则上, 每个参数都应在原理模型的基础上, 尽量考虑测量环境、测量方法、测量仪器、测量标准等全部影响因素, 建立扩展测量模型, 形成从零件到总体参数的多层级测量模型体系, 分析输入量对测量结果可能产生的影响, 预估测量能力能否满足该层级的参数控制要求。如果不满足, 则应对该层级参数控制要求进行实验数据的迭代, 修改至建立精准的测量模型。

总之, 测量方案设计应通过多级测量模型使各层级的测得值、测量不确定度通过测量模型体系逐级传递到总体性能参数, 判断测量能力能否满足指标要求。测量方案设计的基本思路如图 1 所

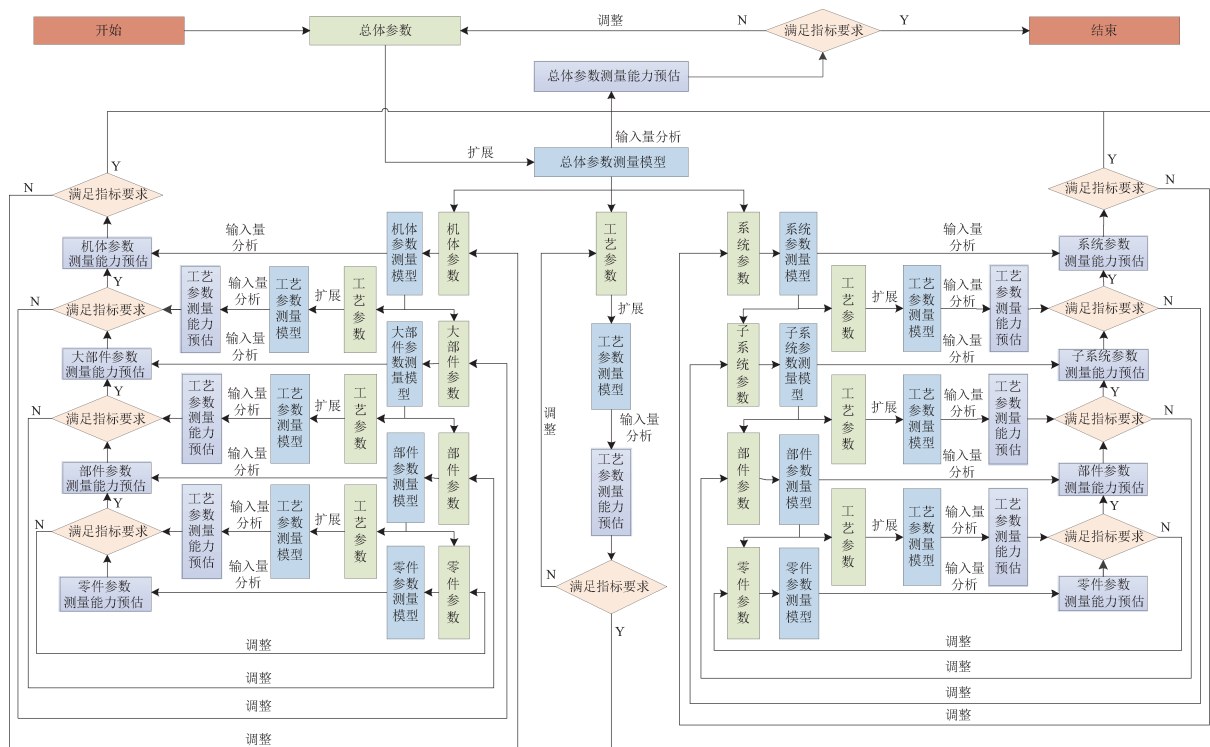


图 1 测量方案设计的基本思路

Fig.1 Basic idea of measurement scheme design

示。需要强调的是,该思路是在计量能力固化的前提下提出的,在实际工作中,当现有测量能力不能满足参数测量需求时,除了修改设计要求,也可以改变测量模型和测量方法、选用准确度等级更高的测量设备、研建技术水平更高的测量标准,达到减小测量不确定度的目的,尽量在不更改设计的前提下使测量能力能够满足指标要求。

2) 测量方案的优化

测量方案设计的基本思路是通过各类过程参数的控制,反推总体参数,期望达到产品制造完成即合格的目的。由于人们认知的局限性,很难完整考虑测量的全部影响因素,在各级测量活动中不可避免地存在误差,误差通过各级测量模型累积到总体性能指标上,将造成测量能力预估不足,由此带来测量策划的不确定性。因此,在研制工作完成后,仍要再次对产品进行测量。研制过程中与研制工作完成后进行测量的区别在于:研制过程中是通过过程参数的控制反推总体参数,

而研制工作完成后的试验测试环节则是尽可能对总体参数进行直接测量或采用测量链最短的方式进行测量。通过比较两次测量结果,分析两次测量结果之间产生差距的原因,从而对研制过程中各类测量模型进行补偿、修正、反复迭代,最终使多次测量结果趋于一致、测量模型基本固化,达到产品测量控制基本确定、按照生产程序流水线作业的产品参数免检的目标,如图2所示。

无论研制过程中的测量还是交付后的试验测试都不是绝对准确的。普遍认为采用交付后试验测试结果作为性能状态评判主要手段的原因是与研制过程中的测量相比,参数测量链条较短,具有较小的累积误差。理论上,应按照产品性能指标的种类建立足够多的测量标准,使产品性能指标都能直接溯源,这会大大降低测量策划的难度和迭代次数。但传统的测量标准往往是通过特定物理规律复现量值,需要耗费大量人力、物力建立标准装置,占用大量空间,且标准装置计量特

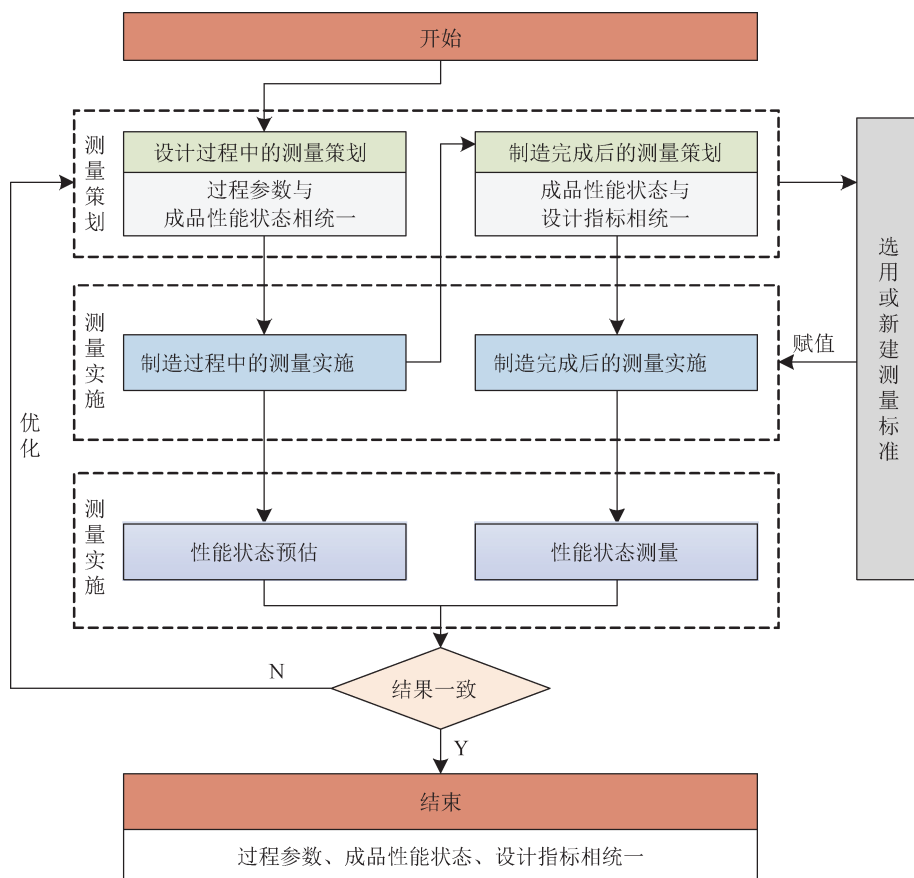


图2 测量方案的优化

Fig.2 Optimization of measurement scheme

性随时间退化,无限制的研建装置是不现实的,这就更为凸显数据的作用。测量标准是经定义的已知量的载体,而参考数据具有同样的作用^[9-10],同时规避了传统测量标准的缺点。应将科研生产中形成的趋于稳定的量值固化形成参考数据,以此作为测量模型优化、测量结果修正、测量策划改进的依据。

总之,建立精准测量模型对于关键参数的控制至关重要,但对于复杂系统而言,关键控制参数在不同阶段测量模型不尽相同,优化测量方案、使各阶段参数测量结果趋于一致,是企业最应关注的事情。在发达国家,技术人员最关注测量方案的优化过程,关注测量数据来源的测量模型和数据链条的溯源性。

4 测量质量评价

1) 检定和校准的适用性分析

长期以来,人们以误差分析作为测量质量评价的手段。由于误差和真值具有绝对客观性,而测量结果体现人们对客观世界的认知程度,具有主观性,采用误差定量表征测量结果质量显然是不合适的。随着统计方法大量应用于生产过程,测量也必然要采用类似的评价方法。测量不确定度理论在认可“测量不准”的基础上,量化描述了测量结果的分散性以及真值可能的取值范围,科学地反映了人们的认知程度,评价了测量质量。测量不确定度在允许误差或目标测量不确定度范围内,成为测量符合性判定的基本逻辑^[11-12]。

得出有效测量结果的必要条件是测量仪器经过检定或校准,二者之间的差别主要是检定给出仪器合格或不合格的判定结论,校准对仪器符合性不做判断,给出校准的修正值和测量不确定度。一般认为,依法管理的计量器具需要进行强制性检定,其他计量器具可以选择校准。但选择检定或校准应有技术依据,这与测量模型直接相关。依法管理的计量器具主要应用于贸易结算、安全防护、环境监测、医疗卫生等^[13],在这些应用场景中,影响量较少、复杂程度不高,测量模型比较简单,或具有将测量模型内置于其中的成熟测量仪器,即测量模型是已知的。在这个前提下,仪器检定合格就基本能够保证测量结果有效。

然而在装备制造业,产品参数体系非常庞大,参数测量链长,往往不具备实现参数直接测量的成熟仪器,只能对各类输入量进行解耦后分别测量,通过扩展测量模型得出测量结果。因此,仅给出仪器合格的结论是不够的,应对仪器进行校准,得出更丰富的信息,将校准结果中的修正值、测量不确定度等信息代入扩展测量模型计算,得出被测量的测得值和测量不确定度,并与允许误差或目标测量不确定度进行比较。

2) 4:1原则的适用性分析

测量质量评价问题对测量设备的选取原则提出了质疑,一般认为,最大允许误差与测量不确定度的比不小于4:1,即可认定测量结果可信^[14]。在图3中,将产品性能参数1分解为 m 个过程参数,每个过程参数都有其控制要求。设性能参数1用 Y 表示,与其相关的过程参数用 X_i 表示,并限定以下合格判定条件

$$\begin{aligned} Y'_0 - T_Y < Y_a - U_Y \leq Y_0 \leq Y_a + U_Y < Y'_0 + T_Y \\ X'_{i0} - T_{Xi} < X_{ia} - U_X \leq X_{i0} \leq X_{ia} + U_X < X'_{i0} + T_{Xi} \end{aligned}$$

$$P = \prod_{i=1}^m p_i$$

式中: X_{ia} , Y_a 分别为 X_i 和 Y 的测得值, Y_a 由 X_{ia} 计算得出; X_{i0} , Y_0 分别为 X_i 和 Y 的实际值; X'_{i0} , Y'_0 分别为 X_i 和 Y 的标称值; U_X , U_Y 分别为 X_i 和 Y 的测量不确定度, U_Y 由 U_X 计算得出; $\pm T_{Xi}$, $\pm T_Y$ 分别为 X_i 和 Y 的最大允许误差; p_i , P 分别为 X_i 和 Y 满足对应控制要求的概率。

在对 X_i 的测量结果进行评价时,取包含因子为2,则认为 $X_{i0} \in [X_{ia} - U_X, X_{ia} + U_X]$ 的概率为95%。在此基础上,进行如下假设:① X_i 的测量设备选择满足 $(T_X:U_X) \geq (4:1)$;② $[X_{ia} - U_X, X_{ia} + U_X]$ 落在 $(X'_{i0} - T_{Xi}, X'_{i0} + T_{Xi})$ 之内的概率为100%;③经计算可得 $(Y'_0 - T_Y) < (Y_a - U_Y)$, $(Y_a + U_Y) < (Y'_0 + T_Y)$;④ $m = 10$,且 $p_1 = p_2 = \dots = p_m$ 。得到 $p_i = 95\%$, $P = p_i^{10} \approx 60\%$ 。

也就是说,在每个过程参数按照4:1原则选用设备进行测量、过程参数可实现直接测量的前提下,过程参数满足控制要求的概率为95%,而相关性能指标参数满足控制要求的概率仅为60%,产品满足合格判定要求的概率则更低。因此,在多数情况下,4:1原则更适用于测量模型简单、层级单一的参数测量问题。对于参数体系庞大的装

备测量而言, 4:1原则难以保证测量质量, 只能认为是一种测量风险控制工具, 既不能对测量质量进行量化表达, 又可能对某些测量方法成熟、测量质量稳定的参数选用不必要的高技术水平测量设备, 导致“过度测量”。因此, 应在测量方案设计的基础上, 分析参数满足控制要求的概率, 量化评价测量质量, 才能对被测量进行合理估计。

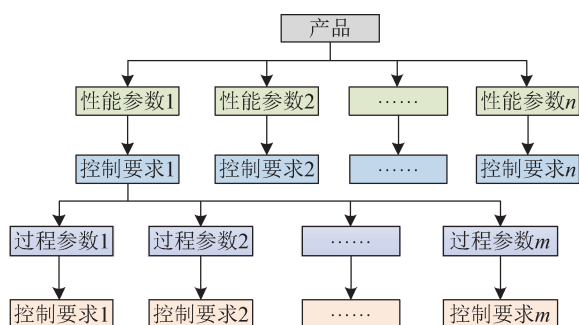


图3 产品参数体系示意图

Fig.3 Schematic diagram of product parameter system

5 结论

测量模型定义了输出量与输入量之间的关系, 是连接未知量和已知量的纽带, 也是解决测量问题的先决条件, 在此基础上, 选用合适的测量仪器、测量方法、测量标准才有意义。测量结果的修正、测量不确定度是获得合理测量结果的工具, 也是被测量符合性评价、精确控制系统输出的手段。解决了这两个关键点, 就把握住了测量需求和测量结果相统一的核心, 也把握住了利用已知信息探索未知世界的钥匙, 具体的测量过程控制、测量系统分析应是在这个前提下进行的^[15-16]。因此, 必须在装备研制的测量问题中加强测量建模、测量方案设计和测量质量评价手段的应用。

参考文献

- [1] BIPM, IEC, IFCC, et al. International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms: JCGM 200: 2012[S]. 2012.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. 通用计量术语及定义: JJF 1001-2011[S]. 北京: 中国质检出版社, 2011.
State Administration for Market Regulation. General measurement terms and definitions: JJF 1001-2011[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2011. (in Chinese)
- [3] BIPM, IEC, IFCC, et al. Guide to the expression of uncertainty in measurement—Part 6: Developing and using measurement models: JCGM GUM - 6: 2020[S]. 2020.
- [4] BIPM, IEC, IFCC, et al. Evaluation of measurement data - Supplement 2 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Extension to any number of output quantities: JCGM102: 2011[S]. 2011.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1 - 2012[S]. 北京: 中国质检出版社, 2011.
State Administration for Market Regulation. Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement: JJF1059-2011 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2011. (in Chinese)
- [6] 何旋, 吴霞, 周自力. 对计量内涵及其发展重点的思考[J]. 计测技术, 2022, 42 (3): 79 - 85.
HE X, WU X, ZHOU Z L. Understanding of metrology connotation and thoughts on development focus [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(3): 79 - 85. (in Chinese)
- [7] 周自力, 李太景, 于娅楠. 计量性及计量性设计[J]. 计测技术, 2018, 38 (5): 1 - 4.
ZHOU Z L, LI T J, YU Y N, et al. Metrological characteristics and design of metrological characteristics [J]. Metrology and measurement technology, 2018, 38(5): 1 - 4. (in Chinese)
- [8] 梁志国, 张大治. 复杂系统的计量性设计与评估[J]. 计测技术, 2017, 37 (5): 1 - 6.
LIANG Z G, ZHANG D Z. Metrological characteristics design and evaluation of complex systems [J]. Metrology and measurement technology, 2017, 37(5): 1 - 6. (in Chinese)
- [9] 114th Congress of U. S. Public Law[Z]. 1968.
- [10] 徐文见, 秦艳, 刘军. 美国标准参考数据法美国法典第15卷第7A章标准参考数据项目[J]. 中国计量, 2021 (3): 81 - 82.
XU W J, QIN Y, LIU J. American standard reference data act 15 U. S. C. chapter 7A standard reference data items [J]. China metrology, 2021(3): 81 - 82. (in Chinese)
- [11] BIPM, IEC, IFCC, et al. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement: JCGM 100: 2008[S]. 2008.
- [12] BIPM, IEC, IFCC, et al. Evaluation of measurement data - The role of measurement uncertainty in conformity assessment: JCGM 106: 2012[S]. 2012.
- [13] 国家市场监督管理总局. 关于调整实施强制管理的计

- 量器具目录的公告[OL]. 2020. 10. 26. https://gkml.samr.gov.cn/nsjg/jls/202010/t20201026_322641.html
- State Administration for Market Regulation. Announcement on adjusting the catalogue of measuring instruments subject to compulsory management [OL]. 2020. 10. 26. https://gkml.samr.gov.cn/nsjg/jls/202010/t20201026_322641.html. (in Chinese)
- [14] 中国人民解放军总装备部. 装备计量保障通用要求检测和校准: GJB 5109-2004[S]. 2004.
- General Equipment Department of the Chinese People's Liberation Army. General requirement of metrology support for military materiel test and calibration: GJB 5109-2004[S]. 2004. (in Chinese)
- [15] 韩东宏. 测量设备测量能力指数值计算的探讨[J]. 同煤科技, 2007 (1): 30, 32.
- HAN D H. Discussion on calculation of measuring capacity index of measuring equipment [J]. Tongmeiscience and technology, 2007(1): 30, 32. (in Chinese)
- [16] 孙英奇. 试论计量确认过程的计量要求导出[J]. 中国计量, 2011 (3): 41-42.
- SUN Y Q. On the derivation of metrological requirements in the metrological confirmation process[J]. China metrology, 2011(3): 41-42. (in Chinese)

(本文编辑:朱俊真)



第一作者: 何旋 (1987—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 高级工程师, 主要从事脉冲力、冲击加速度、转速等动态参数校准技术研究, 大型试验设施计量保障、计量数字化等综合性技术研究, 以及计量政策制度研究。先后参加 20 余项计量顶层制度设计、计量校准装置研建、航空行业计量测试技术课题。