

数字国际单位制

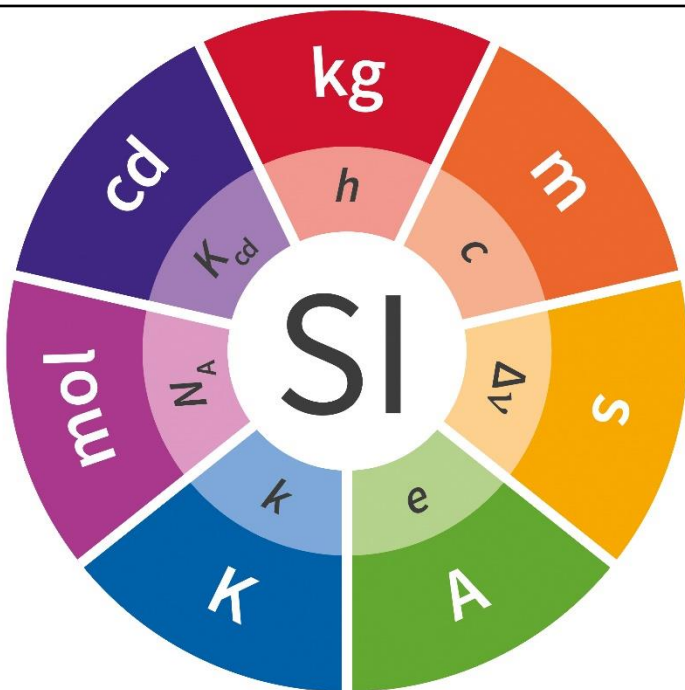
数字校准证书

DCC – XML 模式

D-SI

中文

doi:10.5281/zenodo.4003413



数字国际单位制

D-SI

促进便捷、安全、协调、明确的计量数据数字化传输的计量元数据格式使用指南

版本 1.3-第二版

编者

德国联邦物理技术研究院：

D. Hutzschenreuter, F. Härtig, W. Heeren, Th. Wiedenhöfer,
S. G. Hackel, A. Scheibner

英国国家物理实验室：

C. Brown, A. Forbes, I. Smith, S. Rhodes

捷克国家计量院：

I. Linkeova, J. Sykora, V. Zeleny

斯洛文尼亚马里博尔大学：

B. Acko, R. Klobucar

芬兰阿尔托大学：

P. Nikander, T. Elo, T. Mustapää, P. Kuosmanen

爱沙尼亚塔林国立理工大学：

O. Maennel, K. Hovhannisyan

德国奥斯特法利亚应用科技大学：

B. Müller, L. Heindorf

意大利卡西诺大学：

V. Paciello

本文件包含我们的研究成果，以及与项目所有其他合作伙伴和世界各地的利益相关方进行的富有成效和深入的讨论。

联系： smartcom@ptb.de

Braunschweig 2020 年 6 月

中文译者

中国计量科学研究院：

熊行创，朱艺伟，高蔚，蔡晨光，李进源

德国联邦物理技术研究院：

林珊

联系： smartcom@nim.ac.cn

北京 2020 年 8 月

中方翻译参考 doi:10.5281/zenodo.3816686

目录

1. 引言和动机.....	5
2. 基本导则.....	8
3. SI 单位格式.....	12
4. 元数据模型-实数量	17
5. 元数据模型-常量（常数）	23
6. 元数据模型-复数量和列表.....	25
7. 非 SI 单位量（混合量）	27
8. 奖牌系统.....	33
9. 效益和前景.....	36
10. 参考文献	38
附录 A SI 单位格式的标识符	41
附录 B 常用非 SI 单位	50
附录 C 关于 D-SI 1.3 版使用规则的简述	63

1. 引言和动机

本文档根据**国际单位制(SI)**[1]的规范，为所有传输或需要测量数据的应用程序交换机器可读数据，指定了原则。本文档为协调、清晰、安全、经济地交换数字测量值提供基础，使得数字数据可按本文档所述规范进行传输。

对于计量数据的数字交换，最基本的要点是每个数值都至少与一个相应的单位联系在一起。这两条信息使我们能够根据 SI 单位制来解释一个量值。鉴于其不可分割性和基础重要性，这种表示形式被称为**原子表示**。例如：

1 kg

其中，“1”对应于数值，“kg”对应于指定的 SI 单位千克。两条信息共同表征一个质量的量。

一个被测量的量的完整示值可能包含其他信息，例如，**测量不确定度**的说明和**时间戳**。测量不确定度是分配给测量的量、表征其可靠程度的信息。通常，该信息由一个与指定的**包含因子**对应的**包含区间**来表示。国际公认的《**测量不确定度表示指南**》(GUM)[2]中规定了测量不确定度的评定和表示方法。如果要在更长的时间内解释测量的量或常量，则需要时间戳，因为一些常量，如普朗克常量，在引入 SI 后已多次更改。

在现有的和新的应用程序相互通信的数字网络中，SI 的重要性更为突出。SI 仅使用 7 个基本单位就能描述所有物理过程，其清晰程度前所未有。在新兴的计量数字化进程中，这种清晰度对于安全、协调和经济地交换测量值至关重要。

区分**人与人**和**机器与机器**的接口十分重要。本文档介绍的规范主要与自动化通信有关，对于在创新的数字化价值链中运行的**机器和算法**之间的通信来说是必不可少的。仅用 7 个 SI 基本单位来表述测量数据将是这一发展的基础。

从使用人们熟悉的单位转变到只使用 SI 基本单位进行通信，需要经历一个**过渡阶段**。在此期间，允许使用 BIPM 的《SI 手册》[1]中给出的具有专门符号的 SI 导出单位以及其他单位，如**牛顿**或**帕斯卡**。预计在未来的计量数据机器通信中，这些单位的地位将会下降，因为可以很容易地用 SI 基本单位的组合来表示每一个这样的单位。

国家法律认可的单位，例如，德国的厄克斯勒(Oechsle)，或诸如海里、空里、加仑、英寸等**英制单位**，预计也将继续使用很长一段时间。这种人们熟悉的单位制的使用往往要持续几代人，直到替代单位制的优势完全占据上风。这种情形在 1889 年引入 SI 基本单位米、千克和秒时也发生过。当时，几乎每个城镇都有自己的长度和质量单位，他们不愿意放弃这些特定的单位。然而，随着贸易的普及，统一测量体系的优势日趋明显。

在这一背景下，本文档给出的元数据模型也允许使用人们熟悉的单位。但接受非 SI 单位的限制条件是：并行使用 SI 基本单位表示被测量的量，或者只使用被 BIPM[1]接受的可与 SI 并用的非 SI 单位。以下一般性条件适用于本文档给出的元数据模型：

- **原子**：原子数据至少包含一个**数（数值）**和一个相应的**单位**。作为可选项，还可以指定**（测量）不确定度信息、标签和时间戳**。
- **唯一性**：单位以 **SI 基本单位**表示。这种表示使得数字计量数据能够以清晰、容错和经济的方式交换。
- **数值**：数（数值）以**十进制**表示。允许用指数表示。只能用圆点作为小数位数的分隔符。不允许使用诸如 NaN 和 INF 等数据，因为它们没有计量学的意义。
- **字符表示**：字符以 **UTF-8 格式**[3]表示，允许映射所有官方语言。
- **准确度**：交换数据时，数的准确性至关重要。因此，允许使用一些角度和时间的非 SI 单位。以角度为例，圆闭合可以表示为 360 度 (°) 和 2π 弧度。无论从计量学还是数

学的角度来看，弧度都是一种适当的表示形式。但是，由于 π 是一个无理数，其表示受限于有限的精度，因此可以使用度表示圆闭合，以获得更高的准确度。

- **表示**：计量数据的表示基于现有国际公认的文档。其中最重要的是 BIPM 的《SI 手册》[1]、《测量不确定度表示指南》(GUM)[2]、基本物理常量(CODATA)列表[4]、《国际通用计量学基本术语》(VIM)[5]和 ISO 80000 标准第一部分 [6]。
- **偏离单位**：SI 导出单位或未列入《SI 手册》[1]的单位可规定为与 SI 单位并用的单位。当出现矛盾时，应优先使用 SI 单位提供的信息。
- **责任**：诸如计量内容及其应用等方面的责任由元数据模型的用户承担。
- **元数据模型**：本文档提供了用于测量数据交换的元数据模型，以促进数字化通信中单位的使用。该模型包括强制组件和可选组件的标识符和简单数据类型，这些组件被设计来实现可靠的计量数据交换。没有指定如 XML[7]或其他格式中的参考实现。

本文档提供了用以传输实数量（包括常量），复数量和矢/向量（量的列表）的数据模型。对于每种类型的量必须提供的基本的、最低要求的信息，用原子类型表示。

2. 基本导则

对于在**信息与通信技术(ICT)**所有领域的计量信息交换, 本文档所述格式是必不可少的。在内容方面它考虑了国际计量学导则和标准的要求。

以下按重要性的顺序列出定义交换格式所考虑的计量学导则或标准。

- **SI 手册**: 国际计量局(BIPM)编写的《SI 手册》[1]是使用**SI 单位**的重要指南。手册提供了推荐使用的来自 ISO 80000 标准第 1 部分[6]的量和单位的汇编, 并包括原子常量和自然常量的列表。
- **GUM**: 《**测量不确定度表示指南**》(GUM)给出了代表测得值与理论上准确值之间偏差的要求[2, 8, 9]。因此, **扩展测量不确定度**对于被测量的测得值是最基本的[2, par. 6.2.1 and 5, def. 2.35]。此不确定度表示了与测量值对称的**包含区间**长度的一半, 表征的是在规定的包含概率[8] 下测量值的分散程度。不确定度的值是由(合成)测量标准不确定度乘以包含因子[5]计算得来的。除了扩展测量不确定度外, 非对称包含区间也是可行的。
- **CODATA**: CODATA 组织定期发布包含**基本物理常量**[4]的当前值的列表, 其中包含构成所有 SI 定义基础的自然常量的值。对于每个实际测量结果来说, 其隐含的 CODATA 值都是在**测量之时**有效的值。
- **VIM**: 《**国际通用计量学基本术语**》(VIM)将量的概念定义为物体, 材料和物质的基本可测量特性[5]。每个量用一个量值表示。实际测量结果由一个值表示, 也称为**测得值**[5]。测得值包含一个**数**和一个作为参考的**测量单位**[5]。测量单位也是一个实标量, 通常简称为单位[5]。

- **ISO 80000 系列标准**：ISO 80000 系列标准——本文特指 ISO 80000 标准第 1 部分[6]，定义了量和单位的表示要求。最重要的部分是国际量制(ISQ)和指定给它的国际单位制(SI)的规范[6]。

下面以温度测量值为例说明上述计量规范的应用。

示例 1:

20.1(5) °C ($k=2$ 且 $p=0.95$)

依据 VIM 的要求，测得值的正确示值由数字“20.1”和测量单位“°C”（摄氏度）表示。符号单位“°C”由 ISO 80000 标准和《SI 手册》指定为温度。此外，测得值的准确度由不确定度“(5)”表示，根据 ISO 80000 标准，该不确定度“(5)”表示绝对不确定度值“0.5 °C”。依据 GUM，该不确定度是一个扩展不确定度，并指明其包含概率为“0.95”，由包含因子“2”计算而得。测量单位摄氏度是由 SI 基本单位开尔文定义的，开尔文是由当前 CODATA 的玻尔兹曼常量值定义的。在 2019 年 5 月 20 日之前，温度是用通过同位素纯的水的三相点定义的开尔文来量度的。重新定义前后的温度测量值只有通过转换才能正确比较。在这种背景下，所有的量在显示测得值的同时还显示测量时间就显得非常重要。

下一步，温度的测得值将从人类可读格式转换为机器可读格式。下面的示例将展示如何在 XML 格式中实现这一点。

示例 2:

```
<si:real>
  <si:label>temperature</si:label>
  <si:value>20.1</si:value>
  <si:unit>\degreecelsius</si:unit>
  <si:expandedUnc>
    <si:uncertainty>0.5</si:uncertainty>
    <si:coverageFactor>2</si:coverageFactor>
    <si:coverageProbability>0.95</si:coverageProbability>
```

```
<si:distribution>normal</si:distribution>
</si:expandedUnc>
</si:real>
```

每一个原始的温度值都被封装在一个结构元素中。每个结构元素的名称是唯一的，并根据计量学指南的定义命名。将所有结构元素封装在上级元素“si:real”中表明它是一个实数量的测得值，而用“si”表示所有信息都来自一个基于 SI 的、可控和约定的命名空间。

为了使结构化数据在机器之间准确无误地互换，内容的表示还需要考虑更多的信息与通讯技术（ICT）标准的要求，如下所述。

- **IEEE 754 标准：**用于表示诸如量值或与之相关联的不确定度等数值的数据类型，至少应与 ANSI/IEEE 754 双精度格式中的十进制浮点数兼容[10]。它包含了十进制指数的科学计数法。作为此标准的特殊约定，不允许使用示值 NAN 和 INF。
- **SI 单位格式：**与数值一样，为单位的表示定义了一种可靠的格式。该格式是基于 BIPM 的《SI 手册》[1]中的单位而建立的。构建单位的底层语法部分取自 siunitx[11]，其他语法规则改编自《IEC TS 62720》[16]。
- **ISO 8601 标准：**记录测量数据的日期和时间的表述应参照协调世界时(UTC)。当地法定日期和时间格式应符合 ISO 8601 标准[12]格式，同时给出与 UTC 的差值（例如“2018-01-09T02:42:14.5+01:00”）。
- **语法分析(UTF-8)：**无论将它们保存到文件中还是作为二进制数据包在传感器之间传输，所有测得值及其周围结构的字符串都要求明确的编码规则。本文档使用的是标准 UTF-8（8 位 Unicode 传输格式）[3]，XML 和许多其他软件工具

提供都这种格式。

3. SI 单位格式

任何为计量数据的全球统一的机器交换而设计的格式,如果是基于国际单位制 (SI), 都是具有附加值的。BIPM 的《SI 手册》[1]为这种单位制的使用提供了框架。SI 包括 SI 基本单位和 SI 导出单位, 以及在 SI 之外可以与 SI 一起使用的公认单位。由于《SI 手册》在世界范围获得认可, 因此手册中设定的定义应该是单位格式的起点。

数字格式中 SI 的技术实现要求对单位的语义 (标识符) 和允许的语法 (标识符的组合) 进行唯一定义。这个必需的 SI 单位表示的机器可读定义来自于 Joseph Wright 在 siunitx 软件包[11]中使用的单位的正式语言。Wright 的原始工作被简化到 2019 年版《SI 手册》[1]中表示单位所必需的最小语法元素和单位标识符集。此外, 当以机器可读 SI 单位格式构建单位时, 建议考虑使用《IEC TS 62720》[16]提供的一套全面的附加语法规则。

单位的语法

单位术语的语法如图 3.1 所示。

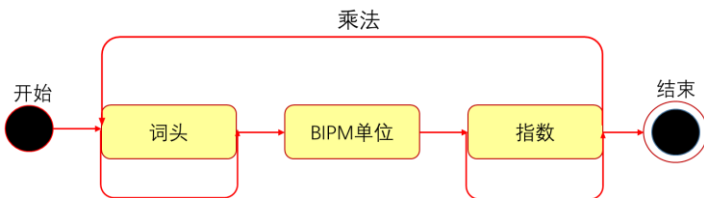


图 3.1 SI 单位术语的语法

每个单位术语指定至少一个 BIPM 单位, 可以是 BIPM 的《SI 手册》中任何具有专门符号的单位。该单位还可以通过指定单位的倍数或分数的词头来扩展。它还可以通过附加指数来形成单位的幂。此外, 几个单位可以通过乘法进行代数相连。

BIPM 单位、词头、指数和运算符的主要语法可用于定义不同类型的（一贯）导出单位术语。值得注意的是，质量的 SI 基本单位-千克是通用方案的一个例外。此单位不能与附加词头结合使用。此外，用于带有纯数的量的单位“一”也不能与词头或指数结合。

在实际应用程序中，单位、词头、指数、运算符等元素由固定字符串指定，并按照图 3.1 中的语法相连。字符的表示格式必须兼容 UTF-8 编码。由于以下字符串语义的定义完全基于 ASCII 符号，因此对于大多数可用的编辑器和开发环境而言，默认情况下都可以实现。

单位的语义

BIPM 单位的标识符被分成三组，列在表 3.1 中。所有标识符都是由《SI 手册》中提供的文本单位名称的组合而成的，以反斜杠作为起始字符。此外，标识符是用小写字母形式书写的，空格已从单位名称中删除。

第一组标识符包括 7 个物理 SI 基本单位：长度（米）、质量（千克）、时间（秒）、热力学温度（开尔文）、电流（安培）、物质的量（摩尔）和发光强度（坎德拉）。通过组合这些基本单位，就可以表示所有目前使用的物理单位。

第二组标识符提供了 SI 导出单位，是具有专门的单位符号（或者类似的单位名称）、在历史上有重要的意义的 SI 导出单位，如力的单位牛顿、温度的单位摄氏度和质量的单位克，等等。

第三组 BIPM 单位包括具有重要历史意义、被接受可与 SI 共用的非 SI 单位，如用于时间和角度实用测量的小时和度等单位。

用于纯数的量的单位“一”也是 SI 单位制的组成部分。在本文中，它被列在 SI 导出单位的组下。

表 3.1 BIPM 单位分组和 SI 单位格式中标识符的示例

单位组	名称	符号	标识符
SI 基本单位 ^a	米	m	\metre
	千克	kg	\kilogram
具有专门符号的 SI 导出单位 ^{b,c}	牛顿	N	\newton
	摄氏度	°C	\degreecelsius
	—	1	\one
允许与 SI 单位并行使用的单位 ^{b,d}	小时	h	\hour
	吨	t	\tonne
	电子伏特	eV	\electronvolt

a: 附录 A, 表 A.1; b: 附录 A, 表 A.2; c: 附录 A, 表 A.3;

d: 附录 A, 表 A.4

词头的语义

词头的标识符提供了 SI 中定义的以 10 为基数的所有倍数和分数[1]。附录 A 中的表 A.5 列出了 SI 单位格式的词头的相应标识符。

示例 3:

单位微米 (符号 μm) 的 SI 单位格式表示为

`"\micro\metre"`

其中, “\micro” 可清晰地识别为词头, “\metre” 是 BIPM 单位。

指数的语义

单位的幂用“\tothe{EXPONENT}”的方式来表示。在标有 EXPONENT 的字段中输入一个表示指数的十进制数。指数值必须按照以下要求来书写:

- 可选“+”或“-”符号之一, 其后跟着
- 一个由“0”到“9”之间的数字构成的整数的指数值(避免前导零)
- 或者用 0.5 表示“平方根”

- 指数中不允许有空格

示例4:

面积的单位平方米（符号 m^2 ）是用幂为 2 的指数运算符写成的。SI 单位格式中的单位术语为，

`"\metre\tothe{2}"`。

单位相乘的语义

单位相乘是通过在 BIPM 单位术语中添加单位序列来实现的，通过以下示例来说明。

示例5:

速度的单位千米每小时（符号 km/h ）是通过以下单位术语来实现的

`"\kilo\metre\hour\tothe{-1}"`

其中，单位 `"\kilo\metre"` 与单位 `"\hour\tothe{-1}"` 相乘。

表 3.2 列出了其他的一贯导出单位的例子，其中进行了多次乘法。

表 3.2 SI 单位中导出单位的示例

测量单位	符号表示	SI 单位格式中的表示
弧度	$\frac{\text{m}}{\text{m}}$	<code>\metre\metre\tothe{-1}</code>
帕斯卡	$\frac{\text{kg}}{\text{ms}^2}$	<code>\kilogram\metre\tothe{-1}\second\tothe{-2}</code>
牛顿	$\frac{\text{m kg}}{\text{s}^2}$	<code>\metre\kilogram\second\tothe{-2}</code>
欧姆	$\frac{\text{m}^2 \text{kg}}{\text{s}^3 \text{A}^2}$	<code>\metre\tothe{2}\kilogram\second\tothe{-3}\ampere\tothe{-2}</code>

关于语法的进一步建议

在构建单位术语时，还应考虑《SI 手册》[1]和《IEC TS 62720》[16]中关于词头、BIPM 单位和指数标识符组合的下列约束条件：

- 每个 BIPM 单位只能有一个词头。
- 千克的倍数和分数用 BIPM 单位克表示。单位克不能与词头“kilo”组合使用。
- 千克、度、摄氏度、分钟、小时、天、秒的倒数，分钟的倒数和单位“一”的单位不得加词头。
- 如果 BIPM 单位有词头和指数，则指数也应用于词头。
- 单位“一”不允许使用指数。
- 如果一个单位是由两个或两个以上的单位相乘得到的，这可以解释为单位的相除，那么它既可以在分子中有一个词头，也可以在分母中有一个词头，还可以在每个分子和分母中各有一个词头。

4. 元数据模型-实数量

实数量的值是在实际应用程序中记录和传输的最基础的数据。它们在工程、贸易、健康系统和校准等重要领域中发挥着重要作用。实数量也是复数量和矢量建立的基础。

本节给出了 D-SI 元数据模型中实数量的一般定义。**原子的量类型**中包含实数量值所需的**最起码的信息**。此外，还引入了一种**扩展的量类型**，在原子实数量的基础上增加**测量不确定度**信息。数据模型实现的方式（如 XML，JSON 或二进制）由用户决定。EMPIR 项目 17IND02 SmartCom 为 XML 用户提供了实数量 D-SI 数据模型的参考实现。XML 实现的最新版本是 1.3.1[17]。本指南中的所有 XML 示例都引用这个版本。

下面详细说明原子的和扩展的实数量类型及其组件。

原子实数量值

原子的实数测得值是表示测量结果的最小实体。其元数据模型结构如图 4.1 所示。

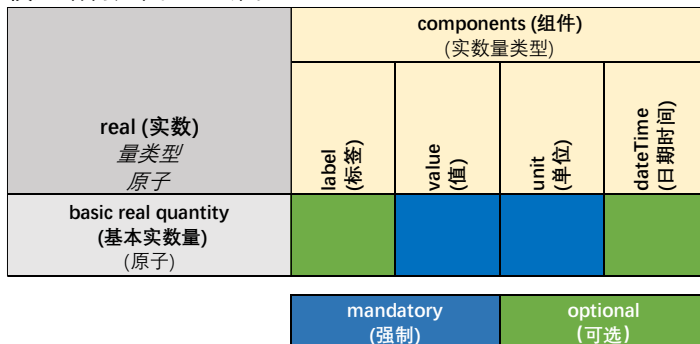


图 4.1 实数量值原子表示的元数据模型

实数量值必须至少由一个数值和指定的单位组成。允许包含下列信息：

- **组件“value(值)”**：必须提供量的数值。它必须以十进制浮点数形式书写，包括符号、尾数、指数分隔符和指数值。符号和指数部分都是可选的。允许使用符号“+”和“-”。尾数由数字“0”到“9”组成。它也可能包含圆点“.”作为小数分隔符。圆点可以在尾数之前，之后或之中的任何地方。指数分隔符为“e”或“E”。指数值是由“0”到“9”之间的数字构成的整数。符号“+”或“-”是可选的。该值不能包含空格，建议尾数和指数书写时不带前导零。

示例 6：

以下情况对于数值的数据类型来说是允许的，：

- 诸如“1.0”或“-0.0045”这样的十进制浮点数，
 - 诸如“1.3e-2”或“2.E-1”等科学计数法表示的十进制数，
 - 诸如“15”或“-0”等整数，。
- **组件“unit(单位)”**：单位必须是用与 UTF-8 兼容的字符串来表示的。仅使用 SI 基本单位和 SI 基本单位的组合可以提高单位的机器可读性。第 3 节中给出适用于此目的的 SI 单位格式。
 - **组件“label(标签)”**：标签对于原子类型的计量数据是可选的，提供测量的种类和/或量的名称的信息。与单位一样，它也必须是与 UTF-8 兼容的字符串。
 - **组件“dateTime(日期时间)”**：该组件用于为量值分配测量的时间戳。所有的时间戳必须以当地法定时间记录，并提供与协调世界时(UTC)的差值（偏差）。采用 ISO 8601 标准（2004）中的扩展 UTC 格式[12]来实现。

示例 7：

扩展的 ISO 8601 标准格式包括日期、时间、所处时区与 UTC 时间的偏差，如下例所示：

“2018-09-05T16:15:03.09-00:01”

日期“2018-09-05”包含年、月、日。日期和时间用字母“T”分隔。时间“16:15:03.09”由小时、分、秒组成。秒可以表示为两位数的整数值，还可以加上一些小数位，如“03.09”。小数的位数不受限制。与 UTC 时间的偏差“-00:01”包含一个正号或负号，后面跟着小时和分钟。示例的偏差为-1 分钟的时间。UTC 中的日期和时间语句用符号“Z”表示，而不是用偏差“+00:00”（即“2018-09-05T16:15:03Z”）。

带有测量不确定度的实数量值

在原子类型的实数元数据模型中加入测量不确定度，即形成扩展类型的实数测量值格式。如图 4.2 所示。

real (实数) 量类型 扩展	components (组件) (实数量类型)					
	label (标签)	value (值)	unit (单位)	date Time (日期时间)	expandedUnc (S) (扩展不确定度)	coverageInterval (S) (包含区间)
Basic real with expanded measurement uncertainty (带有扩展测量不确定度的基本实数)						
Basic real with coverage interval (带有包含区间的实数) (概率对称)						

(S) subtype(子类型) mandatory(强制) optional(可选)

图 4.2 带有测量不确定度的原子量值类型的扩展元数据模型

值、单位、标签和日期时间的定义与原子类型相同。实数量值的不确定度可从两种子类型中选择：第一种是“expandedUnc”，提供扩展测量不确定度的数据模型。第二种是“coverageInterval”，提供概率对称包含区间的数据。

下面详细说明不确定度子类型的数据模型。

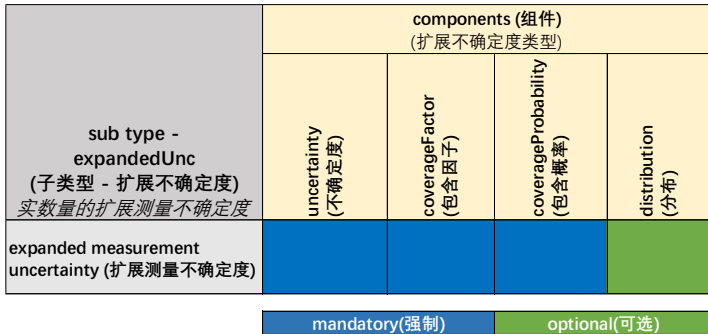


图 4.3 实数量的扩展测量不确定度的元数据模型

扩展测量不确定度规定了一个相对于底层实数测量值对称的区间，该区间覆盖了测量值预期变化范围的某个百分比。这种不确定度类型的 D-SI 数据模型如图 4.3 所示。它需要提供不确定度的值、包含因子和包含概率。该数据是实际应用程序中的扩展测量不确定度的表征。此外，还可以指定量的分布。在 D-SI 数据模型中，扩展测量不确定度的组件定义如下：

- **组件“uncertainty(不确定度)”**：“不确定度”的值提供扩展测量不确定度所定义的包含区间的半宽度。包含区间应按照组件“包含概率”中的包含概率值，覆盖底层实数测量值分布的一部分。“不确定度”值的单位与“单位”组件中定义的底层实数量的单位相同（见图 4.2）。“不确定度”值的类型是正的十进制数，是“值”组件中十进制数格式的一个受限变体，尾数禁止使用负号("-")。
- **组件“coverageFactor(包含因子)”**：扩展测量不确定度（组件“不确定度”）由底层实数测量的标准不确定度与扩展因子相乘计算得到。扩展因子的值由组件“包含因子”提供。包含因子的数据格式是组件“值”的十进制格式。不允许使用小于 1 的值。
注意：用“不确定度”除以“包含因子”得出标准不确定度的值。

- 组件“coverageProbability(包含概率)”：该组件规定不确定度包含被测量分布的包含概率。它是一个基于组件“值”的十进制值。不允许使用小于 0 或大于 1 的值。
- 组件“distribution(分布)”：如果可以获得被测量物分布类型的信息，可以用可选组件“分布”来指定该信息。该组件必须由 UTF-8 编码的字符串编写。如果没有提供组件“分布”，那么，作为默认值，实数量应被解释为具有正态分布（通常称为高斯分布）的随机变量。

sub type - coverageInterval (子类型 - 包含区间) <i>实数量不确定度的包含区间</i>	components (组件) (包含区间类型)				
	standardUnc (标准不确定度)	intervalMin (区间下限值)	intervalMax (区间上限值)	coverageProbability (包含概率)	distribution (分布)
probabilistic-symmetric interval (概率对称的区间)	mandatory(强制)	mandatory(强制)	mandatory(强制)	mandatory(强制)	optional(可选)

图 4.4 用概率对称的包含区间表示的实数量不确定度的元数据模型

概率对称的包含区间定义了实数测量值的不确定度，该不确定度与被测量随机分布的概率密度函数对称。这种不确定度的 D-SI 数据模型如图 4.4 所示。它需要提供相关包含区间的边界值，而这些边界值与实数测量值不一定是对称的。而且，还必须提供测量的包含概率值和标准不确定度值，并可以指定量的分布。在 D-SI 数据模型中，概率对称的包含区间的组件定义如下：

- 组件“standardUnc(标准不确定度)”：该组件提供底层实数被测量的标准不确定度值。不确定度值的单位与测量值的单位（组件“单位”）（见图 4.2）是相同。“标准不确定度”值的类型为正的十进制数，是“值”组件中十进制数格式的一

个受限变体，尾数禁止使用负号("-")。

- **组件“intervalMin(区间下限值)”**：该组件指定测量不确定度的包含区间的下限值。下限值的单位常为底层实数量的“单位”组件下定义的单位（见图 4.2）。它必须与组件“区间上限值”联合使用。它必须小于“区间上限值”的值。由上下限区间定义的区间包含被测量概率“包含概率”的值。该组件的格式是与组件“值”类型相同的十进制值。
- **组件“intervalMax(区间上限值)”**：该组件指定测量不确定度的包含区间的上限值。上限值的单位常为底层实数量的“单位”组件下定义的单位（见图 4.2）。它必须与组件“区间下限值”联合使用。它必须大于“区间下限值”的值。由上下限区间定义的区间包含被测量概率“包含概率”的值。该组件的格式是与组件“值”类型相同的十进制值。
- **组件“coverageProbability(包含概率)”**：该组件指定由区间边界“区间下限值”和“区间上限值”包含的概率密度函数下的面积大小。它是一个基于组件“值”的十进制值。不允许使用小于 0 或大于 1 的值。
- **组件“distribution(分布)”**：该组件与扩展测量不确定度中的定义相同（见图 4.3）。

5. 元数据模型-常量（常数）

CODATA[4]列表中的基本物理常量和类似 π 的数学常数,在许多测量中发挥着重要作用。由于整个 SI 自 2019 年 5 月 20 日起被重新定义在纯粹的自然常量基础之上[1],因此,常量的使用变得更加重要。D-SI 数据模型为表示常量的交换提供了一个数据结构体,如图 5.1 所示。

“常量”的量数据模型与原子“实数量”数据模型的基本结构相同。这包括强制的“值”组件及相关的“单位”组件。

constant (常量) 量类型	components (组件) (常量类型)					
	label (标签)	value (值)	unit (单位)	dateTime (日期时间)	uncertainty (不确定度)	distribution (分布)
constant quantity with an exact value (具有精确值的常量)						
constant quantity with an uncertainty (带有不确定度的常量)						

mandatory(强制)
optional(可选)

图 5.1 表示基本物理常量和数学常数的量的元数据模型

“标签 (label)”组件用于标识常量名称。“日期时间 (dateTime)”组件对于基本物理常量的定义非常重要。CODATA 定期发布基本常量的最新值,通过“日期时间”组件可以识别与常量相关的 CODATA 发布的版本。

常量分为具有精确数值的常量和具有不确定度数值的常量。在常量数据模型中,不确定度值由组件“不确定度 (uncertainty)”表示。不确定度值的单位与测量值单位相同。

“不确定度 (uncertainty)”组件的值应提供 CODATA 值的标准偏差[4]。此外,如果已知不确定度的分布,可以在组件“分布 (distribution)”中提供分布信息。

数学常数起着特殊的作用。像 π 或欧拉数等都是无理数。

在机器表示中，它们需要修约到有限位数。修约会导致舍入误差，应该用以 100% 的概率包含常数真值的矩形分布来表示舍入误差。矩形分布应以值元素中提供的数值为中心。“**不确定度**”组件应给出**矩形分布的标准不确定度值**。

用不确定度来表述舍入误差具有深远的影响。它使得机器能够在测量科学领域已建立和验证数十年的不确定度的通用框架下来理解舍入误差，从而在计算机科学和计量学之间搭建一座桥梁，持久性地支持不同硬件和软件之间的可靠数据交换。此概念不只局限于 D-SI 数据模型中基本常量的交换，而且还可以在实数量和复数量中得以提升。

示例 8:

在常量格式中，常数 π 的值应精确到小数后 8 位。以下给出一个通过五个步骤提供数据的范例。

步骤 1: 把“标签”组件设置为常数名称“ π ”。

步骤 2: 根据“半偶数（四舍六入五成双）”修约规则（也称为“Bankers rounding”），将 π 的值修约到小数点后 8 位，并将它赋予“值”组件。修约后的值为“3.14159265”。

步骤 3: 把“单位”组件设置为单位“一”，这表示 π 的值可以被解释为纯数（量纲为一）的量。

步骤 4: 采用矩形分布的方法计算 π 修约值的不确定度。首先确定舍入误差 $e = 5 \cdot 10^{-9}$ ， π 的真值位于 $3.14159265 \pm e$ 的区间内。通过计算其标准不确定度 $u = e/\sqrt{3}$ ，在此区间之上定义矩形分布。将 u 的值赋予常量数据模型的“不确定度”组件。

步骤 5: 将“分布”组件定义为文本“矩形”，表示矩形分布量的不确定度。

6. 元数据模型-复数量和列表

本版 D-SI 文档提供了矢量元数据模型背后的基本概念。在此，术语“矢量” (vector quantity) 指的是复数量 (二维矢量)，实数量的矢量和复数量的矢量。

元数据模型包括一个复数量值的原子类型定义，如 GUM 附录 2 中所指定的那样[9]，复数量值可以在笛卡尔坐标形式和极坐标形式之间进行选择。

list (列表) 量类型 原子	components (组件) (列表类型)				
	label (标签)	real (S) (实数)	complex (S) (复数)	list (S) (列表)	date Time (日期时间)
basic list of real (实数的基本列表) (原子)		n次			
basic list of complex (复数的基本列表) (原子)			n次		
recursive list of lists (列表的递归列表)				n次	

(S) sub type(子类型) mandatory(强制) optional(可选)

图 6.1 表示矢量数据的原子类型列表的 D-SI 元数据模型

GUM 附录 2[9]中也正式定义了实数量和复数量的矢量。D-SI 元数据模型采用通用列表结构的方式来表示这些量。列表的原子数据模型可以包括一组实数量或一组复数量或一组列表 (见图 6.1)。后者允许通过列表嵌套来对数据的单个结构 (例如矩阵) 建模。

复数量和列表的原子类型可以通过超椭圆包含区域和超矩形包含区域来扩展，以提供有关多元不确定度的信息。在 GUM 附录 2 [9]中定义了所需的结构，该结构已转移到 D-SI。多元不确定度表述的核心要素是协方差矩阵。它量化了底层矢

量的分量之间的随机相关性。

列表扩展数据模型的另一个特点是其结构可以避免冗余数据的经常出现。在实数量列表的情况下，可以指定一个列表单位作为列表中所有量值的指定单位，也可以指定一个一元不确定度值作为列表中所有实数量的不确定度。类似地，可以用上一级的单位和二元不确定度来表述复数量列表的单位和不确定度。

有关上述数据模型和组件的结构和数据类型的更详细信息，请参见 **D-SI** 元数据模型的 XML 参考实现[17]。

7. 非 SI 单位量（混合量）

非 SI 单位的使用增加了混淆和错误的可能性，可能会造成严重的后果。例如，在 1999 年由于软件生成的力的单位是非 SI 单位的磅力而不是 SI 单位的牛顿，导致美国宇航局(NASA)的火星气候探测器丢失了。

在文献[1]中，当使用非 SI 单位时，应提供相应的 SI 单位的定义。对于许多应用程序，当使用非 SI 单位报告量值时附加相应的 SI 单位的值是一个好的做法。

D-SI 数据模型推荐的单位

用于计量数据交换的 D-SI 数据模型建议使用《SI 手册》[1]中的单位。根据国际计量委员会(CIPM)的定义，SI 基本量是长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度。相应的 SI 的**基本单位**是米、千克、秒、安培、开尔文、摩尔和坎德拉[1]。

SI 导出单位是采用基本单位或其他导出单位的幂通过代数方法表示的单位[1]。此外，**SI 词头**可以与 SI 基本单位和 SI 导出单位结合，构成单位的倍数和分数单位[1]。

既不是 SI 基本单位也不是 SI 导出单位（包括 SI 词头）的单位称为**非 SI 单位**。

CIPM 意识到一些非 SI 单位已被广泛使用，并将继续使用多年。常用的非 SI 单位包括：分钟、小时和天（时间测量）、天文单位（长度）、度、分、秒（角度）、公顷（面积）、升（体积）、吨和道尔顿（质量）、电子伏特(能量)和奈培、贝尔和分贝（对数比值数）[1]。

相对于 SI 和非 SI 单位中允许的任何其他单位，仅通过 SI 基本单位的代数组成的单位具有优先使用权。对于高度机器可读的数据表示而言，只需解释 SI 基本单位的单位具有重要的意义。具有这种单位的量值可以很容易地进行比较，无需数据转换即可实现互操作。对于具有专门符号的 SI 导出单位、

带有词头的单位或非 SI 单位，这种数据的比较和互操作则需要付出更多的努力。这些单位必须首先通过 SI 基本单位的底层定义来诠释。然后还可能需要进行转换才能实现量值的互操作。

D-SI 数据模型不推荐的单位

未列入《SI 手册》[1]的单位不推荐用于机器可读的数据交换。一些不推荐使用的非 SI 单位主要由特定群体使用，通常是为了满足特殊的要求。例如，在民用航空中广泛使用海里（长度的测量）和节（速度）。虽然这一领域的非 SI 单位的使用最终将被终止，但目前尚未确定“终止日期”[14]。其他不建议使用的单位包括巴和毫米汞柱（压力的测量单位）、埃（长度）、靶恩（面积）和 CGS（厘米-克-秒）单位制。

除了文献[1]中列出的非 SI 单位之外，某些情况下为了满足特殊要求或者在特定的国家中，还有许多非 SI 单位正在使用中。《国际单位制(SI)使用指南》[13]中列出了这些单位与 SI 单位之间的换算因子。

ISO/IEC 80000 系列标准[6]也提供了其他非 SI 单位的完整清单。该系列标准由 14 个部分组成，定义了国际量制 (ISQ) 和相关的 SI 和非 SI 单位。计算机科学应用中的量和单位具有特殊性[15]。这些单位的定义包括计数以及 SI 之外的二进制词头。

本建议有一个例外，即标准物质和参考程序领域的国际公认的单位 and 标尺。关于如何处理这些单位以及像 SI 单位一样将其纳入 D-SI 数据模型的讨论，有待于未来的修订。目前，标准物质和参考程序的单位将按照不推荐的非 SI 单位方式处理。

非 SI 单位的混合数据模型

在 D-SI 数据模型中，推荐的单位可以直接用作实数量和复数量的参考，而非推荐的单位则不允许这样做。

对于那些带有非推荐单位的量，将提供一个适配器以便将它们集成到机器可读的 D-SI 数据模型中。该适配器被标记

为混合数据模型，或简称为“混合（hybrid）”。

混合数据模型的应用需要将带有非 SI 单位的量转换为适合的 SI 单位的量，然后将这两个量一起放到一个数据元素，即混合元素中。混合数据元素必须包含至少一个带有 SI 单位的量。带有其他单位的量的数量可以是一个或多个。

虽然机器将需要和使用混合的 SI 组件来进行安全的数据操作，但人们仍然可以参考惯用的非 SI 单位。

混合数据模型中的实数量包括一个必须用 SI 基本单位表述量值的实数组件。此外，它还可以提供额外的带有 SI 导出单位或非 SI 单位的实数量，并将它们转换为带有 SI 基本单位的实数量。图 7.1 给出了一个使用 XML 结构数据的混合元素的范例。

```

<si:hybrid>
  <!-- A: length from B converted to SI -->
  <si:real>
    <si:value>0.3048006</si:value>
    <si:unit>\metre</si:unit>
  </si:real>
  <!-- B: length with imperial unit foot -->
  <si:real>
    <si:value>1</si:value>
    <si:unit>ft(U.S. survey)</si:unit>
  </si:real>
</si:hybrid>

```

图 7.1 带有不推荐的非 SI 单位英尺 (ft) 的实数量的混合适配器的 XML 示例

对于混合元素中的所有量，测量不确定度的模型必须是相同的。在实数量的情况下，不允许将扩展测量不确定度的表述与概率对称包含区间的表述混合使用。在复数量的情况下，笛卡尔坐标形式不能与极坐标形式混合使用。复数量和量的列表也禁止包含区域类型的混合使用。

图 7.2 展示了包含两个列表的混合元素。标有字母 A 的列表提供了带有 SI 单位的量。列表 B 包含非 SI 单位的量。列表 A 是由列表 B 通过将非 SI 量转换为 SI 量而得到的。因此，两个列表的量数必须相同。列表 A 中的上部实数量是列表 B

中以非 SI 单位加仑的上部实数量的 SI 单位表示。列表 A 和列表 B 下部的实数量值是第二对分别带有 SI 单位和非 SI 单位的等价量。这两个量都标注了扩展测量不确定度,也必须从列表 B 转换到列表 A。因此,不确定度表示的类型必须保持不变,但不确定度的数值必须转换。

```
<si:hybrid>
  <!-- A: list from B converted to SI -->
  <si:list>
    <si:real>
      <si:value>0.00454609</si:value>
      <si:unit>\metre\tothe{3}</si:unit>
    </si:real>
    <si:real>
      <si:label>hardness Rockwell C scale</si:label>
      <si:value>63.00</si:value>
      <si:unit>\metre\metre\tothe{-1}</si:unit>
      <si:expandedUnc>
        <si:uncertainty>1.56</si:uncertainty>
        <si:coverageFactor>2</si:coverageFactor>
        <si:coverageProbability>0.95</si:coverageProbability>
      </si:expandedUnc>
    </si:real>
  </si:list>
  <!-- B: list with non-SI units -->
  <si:list>
    <si:real>
      <si:value>1</si:value>
      <si:unit>gallon(U.K.)</si:unit>
    </si:real>
    <si:real>
      <si:label>hardness Rockwell C scale</si:label>
      <si:value>63.00</si:value>
      <si:unit>HRC</si:unit>
      <si:expandedUnc>
        <si:uncertainty>1.56</si:uncertainty>
        <si:coverageFactor>2</si:coverageFactor>
        <si:coverageFactor>0.95</si:coverageFactor>
      </si:expandedUnc>
    </si:real>
  </si:list>
</si:hybrid>
```

图 7.2 带有不推荐的非 SI 单位加仑的实数量和量值用洛氏硬度(HRC)参考程序表示的实数量列表的混合适配器的 XML 示例

SI 单位与非 SI 单位的一元量换算

在大多数情况下,一个非 SI 单位 U_{NSI} 和相应的 SI 单位 (或 SI 导出单位) U_{SI} 通过一个(无量纲的)相乘换算因子 ρ 相关联。

用数 m 和非 SI 单位 U_{NSI} 的乘积表示的量值 q 可以写成用数 M 和 SI 单位（或 SI 导出单位） U_{SI} 的乘积表示的量值 Q ，即

$$Q/U_{\text{SI}} = \rho q/U_{\text{NSI}},$$

也即，

$$M = \rho m.$$

不确定度的传播遵循《测量不确定度表示指南》(GUM)[2]中描述的不确定度传播定律。如果与量值相关的标准不确定度表示为数 $u(m)$ 和非 SI 单位 U_{NSI} 的乘积，则标准不确定度可以写成数 $u(M)$ 和 SI 单位（或 SI 导出单位） U_{SI} 的乘积，即

$$u(M) = \rho u(m)$$

温度单位的 SI 单位与非 SI 单位换算

温度的量值 t 可以表示为数 t_{F} 和非 SI 单位华氏度（°F）的乘积。单位华氏度（°F）可以通过一个线性转换函数与相应的 SI 单位开尔文（K）联系起来，即：

$$T/\text{K} = \rho_1 t_{\text{F}} + \rho_2$$

其中， $\rho_1 = 5/9$ 和 $\rho_2 = 45967/180$ 分别为线性转换函数中的（无量纲的）相乘项和相加项。

量值 T 可以表示为数 T_{K} 和 SI 单位开尔文（K）的乘积，即

$$T_{\text{K}} = \rho_1 t_{\text{F}} + \rho_2$$

不确定度的传播遵循 GUM[2]中描述的不确定度传播定律。如果量值相关的标准不确定度表示为数 $u(t_{\text{F}})$ 和非 SI 单位°F的乘积，则标准不确定度也可以表示为数 $u(T_{\text{K}})$ 和 SI 单位 K 的乘积，即

$$u(T_{\text{K}}) = \rho_1 u(t_{\text{F}})$$

类似地，SI 一贯导出单位摄氏度（°C）和相应的 SI 单位开尔文（K）通过一个线性转换函数联系起来，即：

$$T/\text{K} = \rho_1 t/^\circ\text{C} + \rho_2,$$

其中， $\rho_1 = 1$ 和 $\rho_2 = 273.15$ 分别为线性转换函数中的（无量纲的）相乘项和相加项。

对于用数 t_{C} 和 SI 一贯导出单位°C的乘积表示的量值 t ，量

值 T 可以表示为数 T_C 和 SI 单位开尔文 (K) 的乘积, 即

$$T_C = \rho_1 t_C + \rho_2$$

不确定度传播遵循 GUM[2]中描述的不确定度传播定律。如果量值相关的标准不确定度表示为数 $u(t_C)$ 和 SI 一贯导出单位 $^{\circ}\text{C}$ 的乘积, 标准不确定度也可以表示为数 $u(T_K)$ 和 SI 单位 K 的乘积, 即

$$u(T_K) = \rho_1 u(t_C) = u(t_C)$$

换算因子

附录 B 提供了对工业应用和经济事务很重要的非 SI 单位一览表。提供了有关应用领域的相关信息、单位的定义和换算因子。此外,《国际单位制(SI)使用指南》[13]的 B.8 和 B.9 节提供了更多非 SI 单位的换算因子表。

8. 奖牌系统

D-SI 数据模型提供的计量数据按机器可读性划分为不同的质量等级。

表 8.1 给出了质量等级概述。

表 8.1 机器可读计量数据的质量等级

要求	质量等级				
	白金	银牌	铜牌	待改进	
SI++单位 (7个SI基本单位和7个允许与SI共用的重要单位)	X	X	X	X	X
混合元素中的SI++单位		X	X	X	X
带有SI词头的SI++单位或SI导出单位 ¹⁾		X	X	X	X
不属于SI++单位的来自BIPM《SI手册》中的非SI单位 ¹⁾			X	X	X
来自以前版本的《SI手册》但在最新版本中被弃用的单位 ^{1,2)}				X	X
不属于SI的单位, 有丢失组件, 错误数据类型, 无效列表,					X

1: 适用于所有单位组件, 包括在混合元素中的单位。

2: 《SI手册》的第九版[1]是现在的版本, 第八版[17]是之前的版本

白金质量等级对应于实现机器通信中计量数据的明确和

安全交换的最强资格，金牌、银牌、铜牌，质量等级的资格依次降低。“待改进”等级传输计量数据是错误且混乱的，所交换的信息是不完整、不明确的。如果没有人为的干预，机器可能无法解释这些计量数据。质量等级还附上了诸如“下一代”或日期等属性。这些属性向用户表示，已建立的数据结构可以在适当的时期内进行转换。建议新用户争取白金级质量等级。只有当所有数字传输的计量数据都满足该质量等级的要求时，才能达到该质量等级。

白金级也被称为“下一代”，是最纯粹的计量数据机器交换形式。在该质量等级中，除了 7 个 SI 基本单位的表示外，还允许使用单位“一”，角的单位“度”、“分”、“秒”，以及时间单位“日”和“分钟”。在 D-SI 数据模型中，这组单位被标记为“SI++ 单位”，并在附录中的表 A.1 和 A.2 中详细列出。另一方面，在白金级中不允许使用词头，因为它们对于量的数值的指数表示来说是冗余的信息。

注意：由于预计将会经历很长一段时间才能过渡到仅依靠 SI++ 单位来进行计量数据通信，因此该质量等级也称为“下一代”。

金牌级，也被称为“2030”，基本上能够实现，根据《SI 手册》[1]的规定，使用 SI++ 单位再加上 SI 词头和 SI 导出单位进行数值的交换。

银牌级，也被称为“2024”，允许使用 SI++ 单位，SI 词头，SI 导出单位和其他允许与 SI[1]一起使用的 SI 之外的单位来进行数值的交换。

铜牌级，也被称为“2020”，通过指定一个测量值和一个以前版本的《SI 手册》[17]中的过时单位，以 SI 单位格式来实现数字测量数据的交换。铜牌级可以使用曾经被允许与 SI 一起使用但在最新版的《SI 手册》[1]中被弃用的非 SI 单位。

待改进级 允许在不遵守上述格式的情况下交换测量数据, 包括测量值的表示中未指明单位, 采用十进制之外的数字系统表示测量值, 或者用逗号或其他不允许的字符作为小数位分隔符。

注 (si:hybrid 环境中的质量等级): SI 混合元素的最高质量等级为金牌级。如果 si:hybrid 中列出的第一个量元素是由 SI++单位, 或者 SI++单位及 SI 词头或 SI 导出单位构成的, 则达到金牌级。如果 si:hybrid 中的第一个量包含一个《SI 手册》[1]允许的非 SI 单位, 且该单位不属于 SI++单位的一部分, 则达到银牌级。如果 si:hybrid 中的第一个量值包含铜牌级单位, 则达到铜牌级。如果 si:hybrid 中的有任何一个量表现出待改进质量等级, 则归类为待改进级。

上述定义清晰表明, 在本系统中, 白金级满足最普遍的互换性要求。相反, 诸如德国的厄克斯勒(Oechsle), 中国的“尺”或美国的“英里”等国家单位, 则不受机器可读性的支持。因此, 这些国家单位被列为“待改进”级。

9. 效益和前景

数字化领域的一个核心挑战是所传输计量信息的可靠性、唯一性、安全性和客观可评估性。本文档所述的方法提供了应对这一挑战的基础。

所提出的元数据模型，在未来近乎全面数字化的世界中，将成为可靠且可信的新技术和新服务的起点，使得任何人在任何地点和任何时间都可以获得计量信息。

大体上，有两种可以使用本文所述元数据格式的方法。可以将其转换到现有的数据交换格式中，也可以成为在新的交换格式中单位使用的基础。数字校准证书是新交换格式的一个例子。在本系列的第二卷中，将给出相应的符合《DIN EN ISO/IEC 17025》（德国工业标准）要求的设计。

在未来，网络传感器将记录生产过程的方方面面，并将记录的信息提供给综合性的质量管理体系。通过这些完整的数据集，可以有效和高效地捕获系统和流程的性能，从而使数据分析方法能够提供系统性能优化的信息。这种活动可以减少停机时间，减少浪费，显著提高质量，并最终获得更大的经济效益。

当前的云存储和服务提供了存储数据的方法，但没有提供关于数据来源或数据诠释的信息。缺乏相应的统一标准和方法程序。本文档提出的基于 SI 的协调一致的数据通信、基于 XML 语言的测量结果表示的验证可能性以及客观的测量结果质量评价的分级体系，将有助于明显提高现有测量结果的可理解性、可靠性和可信用度。

本文档提出的统一的测量结果表示法，对于不久的将来许多工业化国家即将建立的电子政务将有很大益处，大学、研究机构和工业界也将从中获益。智能产品、智能物流、智能电网、智能移动和智能健康将具备通用的、全球协调的通信标准，从而能够可靠地融入日常生活。

在未来，计划扩展 D-SI 数据模型以适用大量数据的结构（例如 CT 测量的笛卡尔坐标）。此外，还计划开发那些并非由

数和测量单位的组合来表示,而是基于诸如标准物质和标准测量方法的量的测量结果的电子传输。

10. 参考文献

- [1] BIPM Brochure, *The international System of Units (SI) 9th edition 2019*, <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/> (accessed August 2019)
- [2] JCGM 100:2008 *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of uncertainty in Measurement*, GUM 1995 with minor corrections, first edition, September 2008
- [3] RFC 3629 UTF-8, *A transformation format of ISO 10464*, <https://tools.ietf.org/html/rfc3629> (accessed November 2018)
- [4] P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor CODATA Recommended values of the Fundamental Physical Constants: 2014, DOI 10.5281/zenodo.22826, June 2015
- [5] JCGM 200:2012 *International Vocabulary of Metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, 3rd edition, 2008 version with minor corrections, 2012
- [6] ISO 80000-1 *Quantities and units- Part 1: General*, first edition, November 2011
- [7] World Wide Web Consortium *Extensible Markup Language (XML)*; version 1.0; fifth edition <https://www.w3.org/TR/xml/> (accessed February 2019)
- [8] JCGM 101:2008 *Evaluation of Measurement Data Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, first edition, 2008; https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf (accessed October 2019)

-
- [9] JCGM 102:2011 *Evaluation of Measurement Data – Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Extension to any number of output quantities*, October 2011; https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_102_2011_E.pdf (accessed October 2019)
- [10] ANSI/IEEE Std 754-2008 *IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic*, electronic ISBN 978-0-7381-5752-8, DOI 10.1109/IEEESTD.2008.4610935, August 2008
- [11] J. Wright *siunitx- A comprehensive (SI) units package*, Version v2.7s, <http://mirrors.ctan.org/macros/latex/contrib/siunitx/siunitx.pdf>, Revision May 2018, (accessed November 2018)
- [12] DIN ISO 8601:2004 *Data elements and interchange formats – Information interchange – Representation of dates and times (ISO 8601:2004)*, September 2004
- [13] A. Thompson and B. N. Taylor. *Guide for the Use of the International System of Units (SI)*. NIST Special Publication 811, 2008 edition.
- [14] Annex 5 to the Convention on International Civil Aviation: *Units of Measurement to be Used in Air and Ground Operations*. International Civil Aviation Organization, 2010.
- [15] IEC 80000-13:2008 *Quantities and units -- Part 13: Information science and technology*
- [16] IEC TS 62720:2017 *Identification of units of measurements for computer-based processing*
- [17] Bureau International des Poids et Mesures, *The international System of Units (SI) 8th edition 2006*

- [18] EMPIR 17IND02 SmartCom, D-SI XML reference implementation v1.3.1, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3826517> (accessed June 2020)

附录 A SI 单位格式的标识符

表 A.1 SI 基本单位及其 SI 单位格式的标识符

量	单位名称	符号	标识符	等级	参考文献
长度	米	m	\metre	白金	[1, Table 2]
质量	千克 ^a	kg	\kilogram	白金	[1, Table 2]
时间	秒	s	\second	白金	[1, Table 2]
电流	安培	A	\ampere	白金	[1, Table 2]
热力学温度	开尔文	K	\kelvin	白金	[1, Table 2]
物质的量	摩尔	mol	\mole	白金	[1, Table 2]
发光强度	坎德拉	cd	\candela	白金	[1, Table 2]

a: 千克不允许与词头一起使用

表 A.2 扩展的 SI 基本单位及其 SI 单位格式标识符

量	单位名称	符号	标识符	等级	参考文献
纯数 (量纲为一的量)	— ^a	1	\one	白金	[1, Sec. 2.2.1]
时间	天	d	\day	白金	[1, Table 8]
时间	小时	h	\hour	白金	[1, Table 8]
时间	分钟	min	\minute	白金	[1, Table 8]
平面角	度	°	\degree	白金	[1, Table 8]
平面角	弧分	'	\arcminute	白金	[1, Table 8]
平面角	弧秒	"	\arcsecond	白金	[1, Table 8]

a: 单位“—”禁止与词头或指数一起使用

表 A.3 SI 导出单位及其 SI 单位格式的标识符

单位名称	符号	标识符	等级	参考文献	基本 SI
克 ^a	g	\gram	金牌	[1, Sec. 3]	10^{-3} kg
弧度	rad	\radian	金牌	[1, Table 4]	m/m
球面度	sr	\steradian	金牌	[1, Table 4]	m^2/m^2
赫兹	Hz	\hertz	金牌	[1, Table 4]	s^{-1}
牛顿	N	\newton	金牌	[1, Table 4]	m kg s^{-2}
帕斯卡	Pa	\pascal	金牌	[1, Table 4]	$\text{m}^{-1} \text{kg s}^{-2}$
焦耳	J	\joule	金牌	[1, Table 4]	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$

a: 单位克禁止与词头 kilo 组合使用

续表见下页

表 A.3 SI 导出单位-续表

单位名称	符号	标识符	等级	参考文献	基本 SI
瓦特	W	\watt	金牌	[1, Table 4]	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$
库伦	C	\coulomb	金牌	[1, Table 4]	s A
伏特	V	\volt	金牌	[1, Table 4]	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-1}$
法拉	F	\farad	金牌	[1, Table 4]	$\text{m}^2 \text{kg}^{-1} \text{s}^4 \text{A}^2$
欧姆	Ω	\ohm	金牌	[1, Table 4]	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-2}$
西门子	S	\siemens	金牌	[1, Table 4]	$\text{m}^2 \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{A}^2$
韦伯	Wb	\weber	金牌	[1, Table 4]	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$
特斯拉	T	\tesla	金牌	[1, Table 4]	$\text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$

续表见下页

表 A.3 SI 导出单位-续表

单位名称	符号	标识符	等级	参考文献	基本 SI
亨利	H	\henry	金牌	[1, Table 4]	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{A}^{-2}$
摄氏度	°C	\degreecelsius	金牌	[1, Table 4]	K
流明	lm	\lumen	金牌	[1, Table 4]	$\text{m}^2 \text{m}^{-2} \text{cd}$
勒克斯	lx	\lux	金牌	[1, Table 4]	$\text{m}^{-2} \text{cd}$
贝克勒尔	Bq	\becquerel	金牌	[1, Table 4]	s^{-1}
希沃特	Sv	\sievert	金牌	[1, Table 4]	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
戈瑞	Gy	\gray	金牌	[1, Table 4]	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
卡塔尔	kat	\katal	金牌	[1, Table 4]	$\text{s}^{-1} \text{mol}$

表 A.4 在 SI 单位格式中具有专门标识符的其他非 SI 单位

单位名称	符号	标识符	等级	参考文献	推荐的 SI 基本单位表示
公顷	ha	\hectare	银牌	[1, Table 8]	m ²
升	l	\litre	银牌	[1, Table 8]	m ³
吨	t	\tonne	银牌	[1, Table 8]	kg
电子伏特	eV	\electronvolt	银牌	[1, Table 8]	m ² kg s ⁻²
道尔顿	Da	\dalton	银牌	[1, Table 8]	kg
天文单位	au	\astronomicalunit	银牌	[1, Table 8]	m
奈培	Np	\neper	银牌	[1, Table 8]	1
贝尔	B	\bel	银牌	[1, Table 8]	1
分贝	dB	\decibel	银牌	[1, Table 8]	1

表 A.5 SI 词头及其 SI 单位格式标识符

词头名称 ^(a)	符号	因子	标识符	等级	参考文献
十 ^(a)	da	10^1	\deca	金牌	[1, Table 7]
百 ^(a)	h	10^2	\hecto	金牌	[1, Table 7]
千 ^(a,b)	k	10^3	\kilo	金牌	[1, Table 7]
兆 ^(a)	M	10^6	\mega	金牌	[1, Table 7]
吉 ^(a)	G	10^9	\giga	金牌	[1, Table 7]
太 ^(a)	T	10^{12}	\tera	金牌	[1, Table 7]
拍 ^(a)	P	10^{15}	\peta	金牌	[1, Table 7]
艾 ^(a)	E	10^{18}	\exa	金牌	[1, Table 7]
泽 ^(a)	Z	10^{21}	\zetta	金牌	[1, Table 7]
尧 ^(a)	Y	10^{24}	\yotta	金牌	[1, Table 7]

a: 所有词头禁止与单位千克, 分贝和单位一组合使用

b: 该词头禁止与单位克组合使用

表 A.5 SI 词头和标识符-续表

词头名称 ^(a)	符号	因子	标识符	等级	参考文献
分 ^(a,b)	d	10^{-1}	\deci	金牌	[1, Table 7]
厘 ^(a)	c	10^{-2}	\centi	金牌	[1, Table 7]
毫 ^(a)	m	10^{-3}	\milli	金牌	[1, Table 7]
微 ^(a)	μ	10^{-6}	\micro	金牌	[1, Table 7]
纳 ^(a)	n	10^{-9}	\nano	金牌	[1, Table 7]
皮 ^(a)	p	10^{-12}	\pico	金牌	[1, Table 7]
飞 ^(a)	f	10^{-15}	\femto	金牌	[1, Table 7]
阿 ^(a)	a	10^{-18}	\atto	金牌	[1, Table 7]
仄 ^(a)	z	10^{-21}	\zepto	金牌	[1, Table 7]
幺 ^(a)	y	10^{-24}	\yocto	金牌	[1, Table 7]

a: 所有词头禁止与单位千克, 分贝和单位一组合使用

b: 该词头禁止与单位贝尔组合使用

表 A.6 SI 单位格式中的其他标识符

类型	标识符	等级	评论
求幂运算符	\tothe{<EXPONENT>}	白金	将运算符左侧的单位按指数中所给的值扩大。在应用程序中，必须用一个十进制值替换表达式<EXPONENT>。

附录 B 常用非 SI 单位

早在国际单位制（SI 单位）被引入之前，非 SI 单位就已经存在了。出于经济、商业和文化的原因，许多非 SI 单位不仅出现在科学，技术和商业文献中，也出现在工业计量中。

本附录列出了海运，航空，船舶工业等工业领域中使用的非 SI 单位。表 B.1 至 B.12 给出了所选非 SI 单位的以下参数：名称、符号、应用领域、定义、简短描述、量、父级 SI 单位、转换为 SI 单位的方法以及 D-SI 单位格式下的单位标识符。

表 B.1 –重要的非 SI 单位的相关信息

名称 符号	量 应用领域	定义	描述	父级 SI 换算为 SI	D-SI 单位 父级 SI 的 D-SI 单位
海里 (国际) mni, nq	长度 船舶工业, 海洋	长度 1852 米	海洋领域中距离的通用单位	m 倍数 1852	未定义 \metre
海里 (英国) M, NM, nm, mni, nq	长度 船舶工业, 海洋	长度 1853.2 米	等于地球椭圆子午线上纬度 1 分 (1 度等于 60 分, 1 圆周为 360 度) 所对应的弧长	m 倍数 1853.2	未定义 \metre
英尺 ft	长度 距离 (垂直), 海拔, 高度, 垂直速度	长度 0.3048 米	0.3048 米长度的英制单位	m 倍数 0.3048	未定义 \metre

表 B.2 - 重要的非 SI 单位的相关信息- 续表

名称 符号	量 应用领域	定义	描述	父级 SI 换算为 SI	D-SI 单位 父级 SI 的 D-SI 单位
英寸 ", in	长度	1/36 码 或 1/12 英尺	0.0254 m	m 倍数 0.0254	未定义 $\backslash\text{metre}$
千分之一 英寸 mil, thou	长度 印刷电路板设计 (微电子工业)	1/1000 英尺	0.0000254 m	m 倍数 0.0000254	未定义 $\backslash\text{metre}$
升 L, l	容积 船舶工业	1 立方米的 1/1000	边长为 1 分米的立方体 的容积的单位, 通常称 为 1 升 (升), 也可称为 1 立方分米。	m ³ 倍数 0.001	$\backslash\text{litre}$ $\backslash\text{metre}\backslash\text{tothe}\{3\}$

表 B.3 -重要的非 SI 单位的相关信息- 续表

名称 符号	量 应用领域	定义	描述	父级 SI 换算为 SI	D-SI 单位 父级 SI 的 D- SI 单位
公顷 ha	面积 农业	10000 平方米	100 m x 100 m 的面积	m ² 倍数 10000	\hectare \metre\tothe{2}
小时 h	时间 时间	3600 秒	3600 秒 (60 分钟) 的时 间段	s 倍数 3600	\hour \second
分钟 min	时间 时间	60 秒	60 秒的时间段	s 倍数 60	\minute \second
英制加仑 gal	容积 购买燃料	容积 4.54609 升	0.0045 m ³ , 不要与美国 加仑混淆, 在英国和许 多前英国殖民地使用	m ³ 倍数 0.0045469	未定义 \metre\tothe{3}

表 B.4 - 重要的非 SI 单位的相关信息- 续表

名称 符号	量 应用领域	定义	描述	父级 SI 换算为 SI	D-SI 单位 父级 SI 的 D- SI 单位
美国加仑 gal	容积 石化行业, 购买燃料	3.785412 L 的容积	0.003785 m ³ , 不要与英制加仑混淆, 美国使用	m ³ 倍数 0.003785412	未定义 $\backslash\text{metre}\backslash\text{tothe}\{3\}$
桶油 bbl	容积 石化行业	42 美国加仑	1 标准油桶的容积	m ³ 倍数 0.1589873	未定义 $\backslash\text{metre}\backslash\text{tothe}\{3\}$
立方英尺 ft ³	容积 石化行业	边长为 1ft 的立方体的容积	0.0283 m ³ , 用于测量天然气的体积	m ³ 倍数 0.02831685	未定义 $\backslash\text{metre}\backslash\text{tothe}\{3\}$
磅(常衡(以磅为基本单位的衡制)) lb	质量 飞机燃料量	0.45359237kg 的质量	具有历史重要性的质量单位。	kg 倍数 0.45359237	未定义 $\backslash\text{kilogram}$

表 B.5 -重要的非 SI 单位的相关信息- 续表

名称 符号	量 应用领域	定义	描述	父级 SI 换算为 SI	D-SI 单位 父级 SI 的 D- SI 单位
盎司(常衡) oz	质量 印刷电路板 设计 (微 电子工业)	1/16 磅 (常衡)	在印刷电路板设计中, 使用盎司来测量电路板上铜层的厚度。如果 1 oz 的铜被压平并均匀地分布于 1 ft ² 的表面上, 此时铜的厚度就被定义为 1 oz 的厚度, 等同于 1.37 mil 或 4.79 μm 的厚度。	kg 倍数 0.02834959	未定义 \kilogram
磅每小时 PPH, lb/h	流量 燃料流量	质量流量 0.4535927 kg/h = 126.00 mg/s		kg 倍数 1.259979E-4	未定义 \kilogram \second \tothe{-1}

表 B.6 - 重要的非 SI 单位的相关信息- 续表

名称 符号	量 应用领域	定义	描述	父级 SI 换算为 SI	D-SI 单位 父级 SI 的 D- SI 单位
度 deg, °	角度 航空航天, 船舶工业	平面中全旋转的 1/360	1度是一个整圆的360分之一。 1度等于 $\pi/180$ 弧度	弧度 倍数 $\pi/180 \approx 0.01745329$	$\backslash\text{degree}$ $\backslash\text{metre}\backslash\text{metre}\backslash\text{tothe{-1}}$ 或 $\backslash\text{radian}$
(角) 分 ,	角度 航空航天, 船舶工业	平面中全旋转的 1/21600	1分是一个整圆的21600分之一 1分等于 $\pi/10800$ 弧度。	弧度 倍数 $\pi/10800 \approx 0.0002908882$	$\backslash\text{arcminute}$ $\backslash\text{metre}\backslash\text{metre}\backslash\text{tothe{-1}}$ 或 $\backslash\text{radian}$
(角) 秒 "	角度 航空航天, 船舶工业	平面中全旋转的 1/1296000	1秒是一个整圆的1296000分之一。 1秒等于 $\pi/648000$ 弧度。	弧度 倍数 $\pi/648000 \approx 4.848136\text{E-}06$	$\backslash\text{arcsecond}$ $\backslash\text{metre}\backslash\text{metre}\backslash\text{tothe{-1}}$ 或 $\backslash\text{radian}$

表 B.7 –重要的非 SI 单位的相关信息- 续表

名称 符号	量 应用领域	定义	描述	父级 SI 换算为 SI	D-SI 单位 父级 SI 的 D-SI 单位
摄氏度 °C	温度 通用	$T/K = t/^\circ\text{C} + 273.15$ t 是单位为°C的温度 量的值	摄氏度是温度测量 的一个标尺和单 位, 在 1948 年以前 被称为 centigrade。	K 高级计算 $T/K = t/^\circ\text{C}$ + 273.15	\degreecelsius \kelvin
华氏度 °F	温度 通用	$T/K = (t/^\circ\text{F} +$ $459.67)/1.8$ t 是单位为°F的温度 量的值	在华氏温标中, 水 的冰点是 32°F, 沸 点是 212°F (标准大 气压下)。	K 高级计算 $T/K = (t$ $/^\circ\text{F} +$ $459.67)/1.8$	未定义 \kelvin

表 B.8 - 重要的非 SI 单位的相关信息- 续表

名称 符号	量 用途	定义	描述	父级 SI 换算为 SI	D-SI 单位 父级 SI 的 D- SI 单位
吨 (tonne), 美国 公吨	质量 船舶和航空工 业	1000 kg	大质量的单位	kg 倍数 1000	\tonne \kilogram
节 kt	速度 船舶工业, 海 洋	1 海里每小时	船速单位	m/s 倍数 0.5144444	未定义 \metre\second \tothe{-1}
毫米汞柱, 约定的 mmHg	压力 医学, 航空	1 mmHg = 133.322387415 Pa	精确定义为 133.322387415 Pa	Pa 倍数 133.322387415	未定义 \kilogram\metre \tothe{-1} \second \tothe {-2} 或 \pascal

表 B.9 –重要的非 SI 单位的相关信息- 续表

名称 符号	量 应用领域	定义	描述	父级 SI 换算为 SI	D-SI 单位 父级 SI 的 D-SI 单 位
托 Torr	压力 计量, 高真空物 理和能源	101325 Pa 的 1/760	精确定义为 1 个标 准大气压 (101325 Pa) 的 1/760。	Pa 倍数 133.3224	未定义 $\backslash\text{kilogram}\backslash\text{metre}$ $\backslash\text{tothe{-1}}\backslash\text{second}$ $\backslash\text{tothe{-2}}\backslash\text{or}\backslash\text{pascal}$
标准大气压 atm	压力 航空工业	101325 Pa	标准大气压是国际 参考压力, 定义为 101325 Pa。	Pa 倍数 101325	未定义 $\backslash\text{kilogram}\backslash\text{metre}$ $\backslash\text{tothe{-1}}\backslash\text{second}$ $\backslash\text{tothe{-2}}\backslash\text{or}\backslash\text{pascal}$
巴 bar	压力 汽车工业, 液 压系统	100000 Pa	十万帕斯卡	Pa 倍数 100000	未定义 $\backslash\text{kilogram}\backslash\text{metre}$ $\backslash\text{tothe{-1}}\backslash\text{second}$ $\backslash\text{tothe{-2}}\backslash\text{or}\backslash\text{pascal}$

表 B.10 – 重要的非 SI 单位的相关信息- 续表

名称 符号	量 应用领域	定义	描述	父级 SI 换算为 SI	D-SI 单位 父级 SI 的 D-SI 单 位
安培小时 Ah	电荷 电池	1 小时内 1 安培的恒定电流传送的电荷。	电荷单位, 常用于测量大型电池的电荷量。	C 倍数 3600	$\text{ampere}\backslash\text{hour}$ $\text{ampere}\backslash\text{second}$
毫安培小时 mAh	电荷 电池	1 小时内以 1 毫安的恒定电流传送的电荷。	电荷单位, 常用于测量小型电池的电荷量。	C 倍数 3.6	$\text{milliampere}\backslash\text{hour}$ $\text{ampere}\backslash\text{second}$
千瓦时 kWh	能量 电能消耗	1 kW 的恒定功率消耗 1 小时所消耗的能量。	3.6 MJ	J 倍数 3600000	$\text{kilo}\backslash\text{watt}\backslash\text{hour}$ $\text{metre}\backslash\text{tothe}\{2\}$ $\text{kilogram}\backslash\text{second}\backslash\text{tothe}\{-2\}$

表 B.11 – 重要的非 SI 单位的相关信息- 续表

名称 符号	量 应用领域	定义	描述	父级 SI 换算为 SI	D-SI 单位 父级 SI 的 D-SI 单位
奈培 Np	对数比率 声学, 船舶工业, 航空工业	$\ln(a/b)$ a, b 是相同单位的 值	对数标尺上功率量 或场量值的比率。	独立 高级计算	\backslash neper 独立的
贝尔 B	对数比率 声学, 船舶工业, 航空工业	$\log(a/b)$ a, b 是相同单位的 值	对数标尺上功率量 或场量值的比率。	独立 高级计算	\backslash bel 独立的
分贝 dB	对数比率 声学, 船舶工业, 航空工业	$10 \log(a/b)$ a, b 是相同单位的 值	对数标尺上功率量 值或场量值的比 率。	独立 高级计算	\backslash decibel 独立的

表 B.12 - 重要的非 SI 单位的相关信息- 续表

名称 符号	量 应用领域	定义	描述	父级 SI 换算为 SI	D-SI 单位 父级 SI 的 D-SI 单 位
英国热值 单位 Btu, Btu _{IT}	能量 石化行业	将 1 lb 的水加热 1°F 所需的能量。	英制中传统的热值 单位, 用于测量各 种燃料的能量含 量。	J 倍数 1055.056	未定义 $\backslash\text{metre}\backslash\text{tothe}\{2\}$ $\backslash\text{kilogram}\backslash\text{second}$ $\backslash\text{tothe}\{-2\}$
马赫 Ma	流速 高速飞行	越过边界后的流速 与局域声速的比率	局域流速 1 Ma 等 于声速。	m/s per m/s 倍数 1	未定义 $\backslash\text{metre}\backslash\text{second}$ $\backslash\text{tothe}\{-1\}\backslash\text{metre}$ $\backslash\text{tothe}\{-1\}\backslash\text{second}$ 或 \one

附录 C 关于 D-SI 1.3 版使用规则的简述

本附录总结了 D-SI 元数据模型第 1.3 版的使用规则，此外，还包括参照 1.3.1 版本[18]的 XML 参考模式实现细节的概述[17]。

所有的 D-SI 使用规则都有一个唯一的标识符（以字母‘R’开头），并附有简短的描述和所有必要的技术细节。XML 的参考实现文字用斜体书写。

除规则一览表外，本附录还补充给出由 D-SI 用户负责的数据需求列表（标识符以字母‘D’开头）和 D-SI 中所有数据模型列表（标识符以字母‘M’开头）。

通用规则

R001

必须提供 D-SI 元素的所有强制组件。在原子表示中，最起码的要求是提供一个值和一个单位。数据模型 M01 - M13 中列出了强制的元素。

XML: XML 模式定义并可以验证所要求的强制组件，但带有实数量和复数量的列表中单位的组合是例外，这种情况无法验证（见规则 R048 和 R049）。

R002

D-SI 元素的组件按照 D-SI 数据模型图中定义的顺序提供，从左侧第一个组件开始，然后向右。数据模型 M01 - M13 中列出了正确的组件顺序。

XML: XML 模式定义了正确的组件顺序。

R003

数值应采用由数字“0-9”构成的十进制格式，前置符号（“+”或“-”）是可选的，圆点作为小数分隔符，并且可选一个指数，以标识符“e”或“E”开头，后跟一个指数值（数字“0-9”及可选的符

号“+”或“-”)。十进制数字的位数不受限制,并且不得包含空格。这个规则适用于“value (值)”、“intervalMin (区间下限值)”、“intervalMax (区间上限值)”、“valueReal (实值)”、“valueImag (虚值)”、“valueMagnitude (值大小)”、“valuePhase (值相位)”组件以及协方差值(协方差矩阵元素中的非主对角值)。*XML: 十进制值基于 XML 规范提供的双精度浮点数的格式。不允许使用诸如 NaN, INF 和 null 的表式。*

R004

不确定度的数值应为规则 R003 中定义的通用十进制格式的正(或零)值。这些值应大于或等于零。此规则适用于组件的‘uncertainty (不确定度)’、‘standardUnc (标准不确定度)’和方差值(协方差矩阵中的主对角线值)。

XML: 正确的类型是由 XML 规范中的双精度浮点数格式约束定义的。

R005

包含因子的数值应为规则 R003 中定义的通用十进制格式的、大于或等于 1 的正值,并且不能用指数形式书写。此规则适用于所有的“coverageFactor (包含因子)”组件。

XML: XML 中所有包含因子组件均使用来自 XML 规范的双精度浮点数格式,约束条件是值大于或等于 1,并使用正则表达式。

R006

包含概率的数值应为规则 R003 中定义的通用十进制格式的、大于或等于 0 且小于或等于 1 的值。不允许使用指数表示。此规则适用于所有的“coverageProbability (包含概率)”组件。

XML: 正确的类型是由 XML 规范中的双精度浮点数格式约束定义的。

R007

所有单位都应采用《数字国际单位制(D-SI)手册》(doi:10.5281/zenodo.3816686)中的正规单位语言(SI 格式)表达的 SI 单位。它们必须写成 UTF-8 编码的小写字符串,不能有空格,制表符或回车符。这个规则适用于组件‘unit (单位)’、‘unitPhase (单位相位)’、‘listUnit (单位列表)’、‘listUnitPhase (列表单

位相位) '。当使用'hybrid (混合)'元素时, 该规则只适用于混合元素中第一个元素中的单位。

XML: XML 中使用的单位字符串不应破坏对有效 XML 结构的要求。XML 应使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R008

SI 格式中单位的基本结构必须由 BIPM 的《SI 手册》(第 8 版和第 9 版) 中列出的单位构成。允许在每个 BIPM 的 SI 单位之前加一个词头, 在每个 BIPM 的 SI 单位之后加一个指数。通过多个 BIPM 的 SI 单位 (包括相关的词头和指数) 的算术相乘可以创建组合的单位表达式。规则 R009 至 R020 给出单位使用的细节。

XML: XML 中使用的单位字符串不应破坏对有效 XML 结构的要求。XML 应使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R009

每个 BIPM 的 SI 单位不能有多于一个词头和多于一个指数。双词头和其他多个词头 (如\milli\kilo), 或双指数和其他多个指数 (如\tothe{2}\tothe{3}) 是禁止的。

XML: XML 中使用的词头和指数字符串不应破坏对有效 XML 结构的要求。XML 应使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R010

在单位\kilogram、\one、\decibel、\degrecelsius、\mmhg、\minute、\hour、\day 之前不得使用任何词头。带有单位\second\tothe{-1}和\minute\tothe{-1}的旋转量也不允许使用词头。

XML: XML 中使用的词头和单位不应破坏对有效 XML 结构的要求。XML 应使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R011

不允许将单位\gram 与词头\kilo 组合使用, 应使用\kilogram。

XML: XML 中使用的词头和单位不应破坏对有效 XML 结构的要求。XML 应使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R012

不允许将单位\bel 与词头\deci 组合使用，应使用\decibel。

XML: XML 中使用的词头和单位不应破坏对有效 XML 结构的要求。

XML 应使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R013

不允许使用指数为非整数值以及非特定值“0.5”、“+0.5”和“-0.5”（用以构建单位的根）的单位。

XML: XML 中使用的指数不应破坏对有效 XML 结构的要求。XML 应

使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R014

单位\one 禁止使用指数。

XML: XML 中使用的指数不应破坏对有效 XML 结构的要求。XML 应

使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R015

带有正（或零）的指数的单位组件可以被解释为单位分数的分子，所有带有负指数的单位属于分母。在这种情况下，它只允许在分子中不超过一个词头，在分母中也只允许不超过一个词头。

XML: XML 中使用的词头和单位不应破坏对有效 XML 结构的要求。

XML 应该使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R016

只有角度的 SI 单位才能使用“unitPhase（单位相位）”和“listUnitPhase（列表单位相位）”组件，它们是：\metre\tothe{0}、\metre\metre\tothe{-1}、\metre\tothe{-1}\metre、\radian、带有 SI 词头的\radian、\degree、\arcminute 和\arcsecond。

XML: XML 中使用的单位不应破坏对有效 XML 结构的要求。XML 应

使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R017

白金质量等级中的 BIPM 的 SI 单位是：\kilogram、\metre、\second、\ampere、\kelvin、\mole、\candela、\one、\degree、

\arcminute、\arcsecond、\day、\hour、\minute（不得使用词头）。

XML：XML 中使用的单位不应破坏对有效 XML 结构的要求。XML 应使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R018

金牌质量等级的 BIPM 的 SI 单位是：\gram、\radian、\steradian、\hertz、\newton、\pascal、\joule、\watt、\coulomb、\volt、\farad、\ohm、\siemens、\weber、\tesla、\henry、\degreecelsius、\lumen、\lux、\becquerel、\sievert、\gray 和 \katal。白金级单位（规则 R017）如果使用以下 SI 词头也将归为金牌级：\deca、\hecto、\kilo、\mega、\giga、\tera、\peta、\exa、\zetta、\yotta、\deci、\centi、\milli、\micro、\nano、\pico、\femto、\atto、\zepto 和 \yocto。

XML：XML 中使用的单位不应破坏对有效 XML 结构的要求。XML 应使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R019

银牌质量等级的 BIPM 的 SI 单位（SI 允许的非 SI 单位）是：\hectare、\litre、\tonne、\electronvolt、\dalton、\astronomicalunit、\neper、\bel 和 \decibel。

XML：XML 中使用的单位不应破坏对有效 XML 结构的要求。XML 应使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R020

铜牌质量等级的 BIPM 的 SI 单位（第 8 版 SI 手册中允许与 SI 并用的非 SI 单位）是：\angstrom、\atomicunittime、\atomicmassunit、\bar、\barn、\clight、\electronmass、\elementarycharge、\knot、\mmhg、\naturalunittime、\nauticalmile、\hartree、\bohr 和 \planckbar。

XML：XML 中使用的单位不应破坏对有效 XML 结构的要求。XML 应使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R021

时间戳的格式必须符合 ISO 8601 标准中带 UTC 偏差的法定当

地时间格式。时间戳按“YYYY-MM-DDThh:mm:ss.k...kOhh:mm”的方式提供（Y-年，M-月，D-日，h-小时，m-分，s-秒，k-秒的小数位，“.”和k是可选的，O-符号“+”或“-”）。此规则适用于所有“日期时间（dateTime）”组件。

XML：采用 XML 规范中的日期时间类型来实现。XML 类型允许所要求的格式和不兼容 D-SI 要求的其他格式。XML 应使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R022

“label（标签）”字符串的内容不受 D-SI 的控制，长度任意。

XML：标签字符串不应破坏对有效 XML 结构的要求。XML 应使用 UTF-8 编码。

R023

组件‘distribution（分布）’的内容应该是一个非空的 UTF-8 格式的字符串。长度任意。

XML：分布组件的内容不应破坏对有效 XML 结构的要求。XML 应使用 UTF-8 编码。需要外部验证。

R024

所有“complex（复数）”元素的数据或者以笛卡尔坐标形式（原子组件“valueReal（实值）”、“valueImag（虚值）”和“unit（单位）”），或者以极坐标形式（原子组件“valueMagnitude（值大小）”、“valuePhase（值相位）”、“unit（单位）”和“unitPhase（单位相位）”）提供。在一个“complex（复数）”元素内两种形式组件的混合是不允许的。

XML：在 XML 模式中实现了此规则。

R025

如果组件‘distribution（分布）’用于常量类型的元素中，那么就必须提供‘uncertainty（不确定度）’组件。

XML：在 XML 模式中没有额外的约束。需要外部验证。

关于一元不确定度的特定规则

R026

当使用一元不确定度表达时，它应是“expandedUnc（扩展不确定度）”子类型或“coverageInterval（包含区间）”子类型，但不能同时使用两种类型。此规则适用于“real（实数）”元素和“listUnivariateUnc（列表一元不确定度）”元素（列表中）中一元不确定度的使用。

XML：在XML参考模式中实现了此要求。

R027

当使用“coverageInterval（包含区间）”子类型时，“intervalMin（区间下限值）”组件的值必须小于或等于“intervalMax（区间上限值）”的值。

XML：在XML模式中没有额外的约束。需要外部验证。

R028

在实数元素列表中，“listUnivariateUnc（列表一元不确定度）”组件不允许与“ellipsoidalRegion（椭圆区域）”或“rectangularRegion（矩形区域）”元素同时使用。

XML：在XML模式中没有额外的约束。需要外部验证。

R029

在实数元素列表中，当定义的“real（实数）”类型元素少于2个时，就不允许使用“listUnivariateUnc（列表一元不确定度）”组件。

XML：在XML模式中没有额外的约束。需要外部验证。

R030

在列表中，当列表包含“complex（复数）”或“list（列表）”元素时，就不允许使用“listUnivariateUnc（列表一元不确定度）”组件。

XML：XML模式实现了此规则。

R031

“listUnivariateUnc (列表一元不确定度)”组件始终须与“listUnit (列表单位)”组件一起使用。

XML: 在 XML 模式中没有额外的约束。需要外部验证。

关于多元不确定度的特定规则

R032

当使用多元不确定度表述时, 它应是“ellipsoidalRegion (椭圆区域)”子类型或“rectangularRegion (矩形区域)”子类型, 但不能同时使用两种类型。此规则适用于“complex (复数)”元素、“listBivariateUnc (列表二元不确定度)”元素 (列表中) 和“list (列表)”元素 (列表中所有组件的多元不确定度) 中多元不确定度的使用。

XML: 在 XML 参考模式中实现了此要求。

R033

多元不确定度协方差矩阵的维数必须总是 $n \times n$, 其中 n 是底层元素的维数。对于单个复数元素, n 必须等于 2。对于包含 m 个实数元素的列表, n 必须等于 m ; 对于包含 m 个复数元素的列表, n 必须等于 $2m$ 。此外, 这些值应构成一个对称矩阵。

XML: 在 XML 模式中没有额外的约束。需要外部验证。检查对称性时应考虑数值的有限算术精度。

R034

协方差矩阵所有协方差值 (不在主对角线上) 的绝对相关值应小于或等于 1。

XML: 在 XML 模式中没有额外的约束。需要外部验证。因此, 应考虑数值的有限算术精度。

R035

协方差矩阵中方差值和协方差值的单位应该是来自底层矢量的单位的乘积。也就是说, 假设[A,B,C,D]为一个具有 4 个分量

的矢量（包含 4 个实数或 2 个复数的列表）的单位矢量，那么，单位的顺序就是实数或复数列表以及复数元素中分量的顺序。协方差矩阵中的单位应是以下乘积：

$$\begin{bmatrix} A^*A & A^*B & A^*C & A^*D \\ B^*A & B^*B & B^*C & B^*D \\ C^*A & C^*B & C^*C & C^*D \\ D^*A & D^*B & D^*C & D^*D \end{bmatrix}.$$

对于笛卡尔坐标形式的复数元素，'unit（单位）'组件被使用两次（[unit,unit]）。对于极坐标形式的复数元素，顺序为 [unit,unitPhase]。

XML：单位的顺序是指列表中自上而下的实数元素和复数元素的顺序。XML 模式中没有额外的约束。需要外部验证。

R036

在复数元素列表中，当列表的某处使用了“ellipsoidalRegion（椭圆区域）”或“rectangularRegion（矩形区域）”组件时，就不允许使用“listBivariateUnc（列表二元不确定度）”组件。

XML：在 XML 模式中没有额外的约束。需要外部验证。

R037

在复数元素列表中，当定义的“complex（复数）”类型元素少于 2 个时，就不允许使用“listBivariateUnc（列表二元不确定度）”组件。

XML：在 XML 模式中没有额外的约束。需要外部验证。

R038

在列表中，当列表包含‘real（实数）’或‘list（列表）’元素时，不允许使用组件‘listBivariateUnc（列表二元不确定度）’。

XML：XML 模式中实现了此规则。

R039

组件“listBivariateUnc（列表二元不确定度）”始终必须与以下组件之一一起使用：a)“listUnit（列表单位）”，如果它指的是笛卡尔坐标形式的复数元素；b)“listUnit（列表单位）”和“listUnitPhase（列表单位相位）”，如果指的是极坐标形式的复

数元素。

XML: 在 XML 模式中没有额外的约束。需要外部验证。

R040

对于包含少于 2 个实数元素的列表、包含少于 2 个复数元素的列表以及列表的列表, 不允许使用“ellipsoidalRegion (椭圆区域)”和“rectangularRegion (矩形区域)”子类型来表述多元不确定度。

XML: 在 XML 模式中没有额外约束。需要外部验证。

R041

如果使用“listBivariateUnc (列表二元不确定度)”组件, 则列表中所有的复数元素必须是相同形式的 (要么是笛卡尔形式, 要么是有极坐标形式)。

XML: 在 XML 模式中没有额外的约束。需要外部验证。

关于列表的附加规则

R042

列表必须至少包含“real (实数)”、“complex (复数)”或“list (列表)”元素中的一个。

XML: XML 模式中实现了此要求。

R043

列表不应混合“real (实数)”、“complex (复数)”或“list (列表)”元素。

XML: XML 模式中实现了此要求。

R044

只有当列表包含 2 个或更多实数元素 (或者包含 2 个或更多复数元素) 时, 才允许使用“listUnit (列表单位)”组件。

XML: 在 XML 模式中没有额外的约束。需要外部验证。

R045

只有当列表包含 2 个或更多复数元素时，才允许使用“listUnitPhase（列表单位相位）”组件。

XML：在 XML 模式中没有额外的约束。需要外部验证。

R046

如果使用列表组件“listUnitPhase（列表单位相位）”，那么列表中所有的复数元素都必须是极坐标形式的。

XML：在 XML 模式中没有额外的约束。需要外部验证。

R047

在复数元素列表中，“listUnitPhase（列表单位相位）”组件只允许与“listUnit（列表单位）”组件一起使用，而不能单独使用。

XML：在 XML 模式中没有额外的约束。需要外部验证。

R048

实数元素列表允许定义“listUnit（列表单位）”组件。如果使用“listUnit（列表单位）”的话，列表中所有的实数元素则不应提供“unit（单位）”组件。

XML：如果指定了“<si:listUnit>”，则不要在列表的实数元素中写入“<si:unit>”元素。需要外部验证。

R049

复数元素列表允许定义“listUnit（列表单位）”和“listUnitPhase（列表单位相位）”组件。如果使用“listUnit（列表单位）”和“listUnitPhase（列表单位相位）”的话，列表中所有的复数元素则不应提供“unit（单位）”或“unitPhase（单位相位）”组件。

XML：如果指定了“<si:listUnit>”或“<si:listUnitphase>”，则不要在列表的复数元素中写入“<si:unit>”或“<si:unitPhase>”元素。需要外部验证。

R050

实数元素列表允许定义“listUnivariateUnc（列表一元不确定度）”组件。如果使用“listUnivariateUnc（列表一元不确定度）”的话，列表中所有的实数元素则不应提供“expandedUnc（扩展不确定度）”或“coverageInterval（包含区间）”子类型。

XML：如果指定了“<si:listUnivariateUnc>”元素，则不要在列表的实数

元素中写入“<si:expandedUnc>”或“<si:coverageInterval>”元素。需要外部验证。

R051

复数元素列表允许定义“listBivariateUnc (列表二元不确定度)”组件。如果使用“listBivariateUnc (列表二元不确定度)”的话，列表中所有的复数元素则不应提供“ellipsoidalRegion (椭圆区域)”或“rectangularRegion (矩形区域)”子类型。

XML: 如果指定了“<si:listBivariateUnc>”元素，则不要在列表的复杂元素中写入“<si:ellipsoidalRegion>”或“<si:rectangularRegion>”元素。需要外部验证。

关于混合元素的特定规则

R052

每个混合元素应包含“real (实数)”、“complex (复数)”、“constant (常量)”或“list (列表)”中至少一种类型的元素。

XML: 在 XML 模式中实现了此要求。

R053

混合数据模型中的第一个元素应遵循 R001 - R051 所有的规则。

XML: 在 XML 模式中的实现，请参见 R001-R051 规则中的描述。

R054

混合数据的质量等级与混合中的第一个元素相关联，但不能优于金牌级。如果未满足规则 R055，质量等级可以进一步降低。

XML: 在 XML 模式中没有额外的约束。需要外部验证。

R055

混合中的所有元素必须具有相同的元素类型，即均为“real (实数)”、“complex (复数)”、“constant (常量)”或“list (列表)”类型。

XML: XML 模式中实现了此要求。

D-SI 数据模型总结

在下列数据模型的标记中，添加符号“(o)”表示可选组件，符号“(m)”表示强制元素。数据模型元素的组件，按照规则 R002 的要求，从左到右依次书写。对于某些元素，从几个备选组件中进行选择是可能的。这类备选项由“or”隔开（即：“A”or“B”）。

如果一个组件被重复 n 次，则在组件名称之后添加符号 “[1..n]”。

M01

实数元素的数据模型是：

‘label (标签)’(o)、‘value (值)’(m)、‘unit (单位)’(m)、‘dateTime (日期时间)’(o)、‘expandedUnc (扩展不确定度)’或 ‘coverageInterval (包含区间)’(o)。

M02

扩展不确定度 (expandedUnc) 元素的数据模型是：

‘uncertainty (不确定度)’(m)、‘coverageFactor (包含因子)’(m)、‘coverageProbability (包含概率)’(m)、‘distribution (分布)’(o)。

M03

包含区间 (coverageInterval) 元素的数据模型是：

‘standardUnc (标准不确定度)’(m)、‘intervalMin (区间下限值)’(m)、‘intervalMax (区间上限值)’(m)、‘coverageProbability (包含概率)’(m)、‘distribution (分布)’(o)。

M04

常量元素的数据模型是：

'label (标签)' (o)、'value (值)' (m)、'unit (单位)' (m)、'dateTime (日期时间)' (o)、'uncertainty (不确定度)' (o)、'distribution (分布)' (o)。

M05

笛卡尔坐标形式下的复数元素数据模型是：

'label (标签)' (o)、'valueImag (虚值)' (m)、'valueReal (实值)' (m)、'unit (单位)' (m)、'dateTime (日期时间)' (o)、'ellipsoidalRegion (椭圆区域)' 或 'rectangularRegion (矩形区域)' (o)。

M06

极坐标形式下的复数元素数据模型是：

'label (标签)' (o)、'valueMagnitude (值大小)' (m)、'valuePhase (值相位)' (m)、'unit (单位)' (m)、'unitPhase (单位相位)' (m)、'dateTime (日期时间)' (o)、'ellipsoidalRegion (椭圆区域)' 或 'rectangularRegion (矩形区域)' (o)。

M07

椭圆区域元素和矩形区域元素的数据模型是：

'covarianceMatrix (协方差矩阵)' (m)、'coverageFactor (包含因子)' (m)、'coverageProbability (包含概率)' (m)、'distribution (分布)' (o)。

M08

协方差矩阵元素的数据模型是：

'column (列)' [1..n] (m)

这里列元素的数据模型是：

'covariance (协方差)' [1..n] (m)

协方差元素的数据模型是：

'value (值)' (m)、'unit (单位)' (m)。

M09

实数元素列表的数据模型是：

'label (标签)' (o)、'dateTime (日期时间)' (o)、'listUnit (列表单位)' (o)、'listUnivariateUnc (列表一元不确定度)' (o)、'real (实数)' [1..n] (m)、'ellipsoidalRegion (椭圆区域)' 或 'rectangularRegion (矩形区域)' (m)。

M10

笛卡尔坐标形式下的复数元素列表的数据模型是：

'label (标签)' (o)、'dateTime (日期时间)' (o)、'listUnit (列表单位)' (o)、'listBivariateUnc (列表二元不确定度)' (o)、'complex (复数)' [1..n] (m)、'ellipsoidalRegion (椭圆区域)' 或 'rectangularRegion (矩形区域)' (o)。

M11

极坐标形式下的复数元素列表的数据模型是：

'label (标签)' (o)、'dateTime (日期时间)' (o)、'listUnit (列表单位)' (o)、'listUnitPhase (列表单位相位)' (o)、'listBivariateUnc (列表二元不确定度)' (o)、'complex (复数)' [1..n] (m)、'ellipsoidalRegion (椭圆区域)' 或 'rectangularRegion (矩形区域)' (o)。

M12

列表元素列表的数据模型是：

'label (标签)' (o)、'dateTime (日期时间)' (o)、'list (列表)' [1..n] (m)。

M13

混合元素的数据模型是：

'real (实数)' [1..n] 或 'complex (复数)' [1..n] 或 'constant (常量)' [1..n] 或 'list (列表)' [1..n] (m)。

D-SI 内的数据由用户负责

D-SI 数据模型仅提供一种用于数字格式下计量数据通用交换的具有最少必要信息的数据结构。它帮助用户交换完整的计量信息，而用户负责在模型中填入正确的数据。例如，在一元不确定度的情况下，用户须确保所提供的 uncertainty、包含因子、包含概率和统计的值从数学角度而言代表了正确的信息。

以下列出了帮助用户理解其职责范围内的数据的详细信息。

D01

用户可以利用每个 D-SI 数据模型元素中的标签组件，根据自己的需要来标识 D-SI 元素的底层量（例如，使用自己的术语或有关量的受控词汇）。因此，用户应确保数据元素提供的单位是底层量范围内的有效单位。

D02

“unit (单位)”组件是“value (值)”、“valueImag (虚值)”、“valueReal (实值)”、“valueMagnitude (值大小)”、“uncertainty (不确定度)”、“standardUnc (标准不确定度)”、“intervalMin (区间下限值)”和“intervalMax (区间上限值)”组件所提供数值的参考单位。在列表的情况下，如果提供了“listUnit (列表单位)”组件的话，它将取代“unit (单位)”作为参考。

D03

“unitPhase (单位相位)”组件是“valuePhase (值相位)”组件所提供数值的参考单位。在列表的情况下，如果提供了“listUnitPhase (列表单位相位)”组件的话，它将取代“unitPhase (单位相位)”作为参考。

D04

如果一个单位带有指数，那么该指数适用于该单位，以及，如有定义的话，单位之前的词头（如 $\text{kilo\metre\tothe\{3\}}$ 等于 10^9 m^3 ）。

D05

所有的数值都是绝对值。不应提供诸如相对不确定度等相对的信息。

D06

用户必须确保带有扩展不确定度和包含区间的实数量的数值从数学角度看是正确的。

D07

对于多元量（复数、实数列表和复数列表），用户必须确保多元不确定度（椭圆区域和矩形区域）的数值从数学角度看是正确的。

D08

协方差矩阵内的分量必须按照底层量的正确顺序填写（复数、实数列表和复数列表）。

D09

协方差矩阵中应填入正确的方差值和协方差值，且无标准不确定度。

D10

如果协方差矩阵中的单位（两个单位的乘积）不符合 BIPM 的《SI 手册》中有关单位的规则（即不满足规则 R015），则用户有责任对底层量内的单位进行标准化。它可以包括对复数元素中的“unit（单位）”和“unitphase（单位相位）”组件，列表中实数元素的“unit（单位）”组件，列表中复数元素的“unit（单位）”和“unitphase（单位相位）”组件，以及列表中的“listUnit（列表单位）”和“listUnitPhase（列表单位相位）”组件的标准化。对单位的标准化操作意味着通过调整相应数值的指数从而将单位表达式中的 SI 词头去除。

D11

混合元素内的量应是相等的量，因此，用户应确保用非 SI 单位表示的数值与用 SI 单位表示的数值之间的转换足够准确（正确）。用户的职责还包括，混合元素中列出的元素应与混合元素中的第一个元素（SI 元素）的数据结构相同。因此，用户应该提供具有相同量纲、不确定度模型和坐标形式的数据（在复

数情况下)。

所展示的内容是在欧盟资助的 SmartCOM 项目“物联网中智能数据的通信和验证”的框架内开发的，得到了来自科学和工业领域的国际合作伙伴的支持



<https://www.ptb.de/empir2018/smartcom>
(核定于 2020 年 8 月)



The EMPIR initiative is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating States

中文版翻译工作得到了来自中国计量科学研究院 2020 年度基本科研业务费重点领域项目 (AKYZD2001, AKYYJ2006) 的支持。

doi:10.5281/zenodo.4003413