

量和单位丛书 3

823/153

李慎安 编

42295



空间和时间的量和单位

量 出 版 社

823/153

量和单位丛书(3)

空间和时间的量和单位

李慎安 编

计 量 出 版 社

1983·北京

量和单位丛书(3)
空间和时间的量和单位

李慎安 编

—

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张 $2 \frac{3}{8}$

字数 51 千字 印数 1—31 000

1983年5月第一版 1983年5月第一次印刷

统一书号 15210·269

定价 0.34 元

说 明

为了贯彻1981年7月14日经国务院批准的、由中国国际单位制推行委员会颁布的《中华人民共和国计量单位名称与符号方案(试行)》，“全国量和单位标准化技术委员会”提出了有关量和单位的15项国家标准（即GB3100，GB3101及GB3102.1—13），并已于1982年5月至7月先后经国家标准局批准发布（1983年7月1日起实施）。我们现在组织上述国家标准的起草人员编写了这套《量和单位丛书》，供各有关科学研究、文化教育、新闻出版、国防建设、国内外贸易、工农业生产、经济管理及政府机关人员使用参考。

对本丛书的意见，请寄北京市邮政2112信箱SI办公室。

中国国际单位制推行委员会办公室

1982年11月

ADS 8/1/84

目 录

一、导言	(1)
二、长度	(3)
三、时间	(26)
四、平面角与立体角	(46)
五、空间和时间的其它量和单位	(51)
附 录	(56)
附录1 国际计量大会和国际计量委员会有关空间和时间 单位的决定	(56)
附录2 英制中有关空间和时间的单位	(65)
附录3 本书所用西文机构名称和时标单位名称的缩写表	(68)

一、导 言

在物理学上，空间是宇宙的一种特性，它表示在三个相互垂直方向上的广延性。按牛顿的观点，空间可以包含物质，也可以脱离物质而存在。在习惯上，空间一词往往指外部空间或地球以外的区域。在地球物理学上，空间指地球及大气直接影响以外的那一部分宇宙。这就是所谓外层空间或宇宙空间。我们这里所说的，不只是指这一部分，而且包括微观的部分，即一切经典物理学所指的全部空间。

时间是物理宇宙的量度，是物质存在的基本形式之一。它给出在一个给定地点事件发生的次序。同时，时间也是由这样的次序所确定的瞬间，即所谓时刻，专门术语称之为历元。

空间和时间，在经典物理学中，包括了几何学、时刻、时间间隔和运动学的领域。

为了描述几何学的量，有一个长度作为基本量就够了，从它可以导出面积、体积、平面角、立体角、表面光洁度的参数以及一切几何形状和位置的参数。但它还不只是可以导出几何学的这类量，有一些非几何学的量，例如波数、惯性矩、光学系统的焦度等，也都是从长度导出的量，但本书不去讨论它。时间与长度组合，可以导出运动学的量，例如速度、加速度、角速度、角加速度。但本书也不去讨论运动学以外的那些导出量，例如放射性活度、频率等。

空间和时间这个领域的量并不太多，单位也不很复杂，国家标准GB3102.1—82中所包括的一共才10项，共17种量。但是，在量和单位中却存在不少特点，存在不少特殊的问题。

长度和时间几乎在一切有过的量制中，都列为基本量，国际单位制（SI）亦如此。而且这两个量所涉及的领域，远不只是几何学和运动学，它还涉及声学、光学、电磁学、热学、物理化学、原子物理和核物理、电离辐射等几乎全部物理学领域，成为使用最广泛的量。然而，其它的基本量却并非如此。例如，电流主要用于电磁学；热力学温度主要用于热学；发光强度主要用于光学；物质的量主要用于物理化学和分子物理学等。

长度和时间也是人类最早了解并进行计量的物理量。如“布手知尺”、“日中而市”等。

这两个基本量的基本单位，其发展过程也有它独特的地方。而不象千克、安培、开尔文等比较简单。

米和秒这两个单位的值，从它们开始定义到现在，虽然没有变化或变化不大，但随着人类对自然界的认识，其定义不断地在改进，复现的方法有了较大的发展，复现的精度也不断地有所提高。其中特别是秒的复现精度大大地超过所有其它的基本单位。

此外，米与秒之间还存在着特殊的联系，它们通过电磁波在真空中的传播速度 c 而彼此制约。我们说，基本量在量制中是彼此严格独立的量，它们各自有其独立的量纲。但是基本单位之间则不是充分独立的，而是彼此存在着某种影响。例如，千克与摩尔之间；坎德拉与米、千克、秒之间；安培与米、千克、秒之间。只有千克和开尔文在定义中未涉及到其它基本单位。但最早定义千克时，是从 1 dm^3 最大密度的水的质量来的。厘米克秒制，把基本单位定为克就是因为 1 cm^3 最大密度的水的质量当时量出为 1 g 。而后来欧洲大陆所用的米吨秒制，把质量的单位定为吨也就是因为 1 m^3 最大密度的水的质量为 1 t 。当然，在建立一个单位制时，质量的

基本单位与长度的基本单位之间，并不一定要有这样的联系。

二、长 度

1. 概 述

在 GB3102.1—82 中，长度作为一项，也就是一类量。但在这一类中，分成了长度、宽度、高度、厚度、半径、直径、程长或距离共 8 个量。它们分别有不同的量符号：

长度	$l, (L)$
宽度	b
高度	h
厚度	$\delta, (d, t)$
半径	r, R
直径	d, D
程长、距离	s

在 ISO 的有关标准中，厚度符号没有 t ，半径符号没有 R 。

虽然分成了 8 个量并分别给了符号，但它们仍属于一类，它们之间可以相加减。例如，我们计算桌子的边长时，长度就需与宽度相加；我们在计算扇形边长时，半径需与弧长相加。它们一定可以用相同的单位。但是，所有一切单位相同的量，并不一定是同类的量。例如，功与力矩的单位都可以是牛顿米，但它们之间不能相加减，也不是同类的量。

长度在 SI 中以及其它单位制中，都列为第一个基本量。

在 GB3102.1—82 中，对长度的单位除给出了 SI 单位米

以外，还给出了天文单位距离（符号 A）、秒差距（符号 pc）、埃（符号 Å）、海里（符号未定）。在以上这 4 个单位中，前两个单位用于天文学的太阳系和银河系，曾在国际计量局出版的《国际单位制》（1977 年，第三版）中列出，作为与 SI 并用的单位。但是在 1981 年该书的第四版中，已将此两单位取消；后两个单位在该书中列为暂时与 SI 并用的单位。我国于 1980 年 12 月审定通过的由国务院批准经中国国际单位制推行委员会颁布的《中华人民共和国计量单位名称与符号方案(试行)》中，A 与 pc 列为可与 SI 并用的单位；海里与 Å 列为暂时与 SI 并用的单位。

2. 米的第一个定义和米制的起源

计量单位制或者说计量单位，自人类建立了国家形式的社会组织以来，都是由政权机关以法令形式强制加以规定并统一的。因为它与税收、货币、社会公共秩序、人民之间的贸易都有密切关系。制定单位，是国家的权力范围。至于是否能统一，统一到何种程度是另外的问题。从现代来说，单位与单位制所涉及的问题远比过去要大，它更多地涉及到国家管理、国际交往、科学技术、文化教育的发展。有人有偏见地认为，科学技术的发展与单位和单位制无关，可以由科学家本人自己任意规定一个单位，照样可进行研究并取得成果。历史上也曾是这样。但是，人类毕竟已到了 20 世纪，科学技术之间的联系发展了，需要不同学科通力合作的问题越来越多了。人类从小到大要学要记忆的东西也越来越多，为什么人类不能摆脱这种人为的、分明是不合理的杂七杂八的单位并存的局面呢！

人们对单位的统一的要求，从一个国家、一个地区，发展到要在世界范围内进行。而其统一，就是最先从长度开始的。

1742年，在欧洲有一个科学家小组，仔细地把当时法国和英国所用的长度与质量的单位做了一次比较。法国的所谓“巴黎单位”Pied 和 Livre 分别比英国当时的英尺和磅大6%和8%。于是开始寻求一个适用于各国的通用单位，并以它为基础得到一种国际性的单位制度。为了考虑易为其它民族所接受而避免采用法文的名称。

对长度单位的选择，提出过两种建议，目的都是要把单位定义到一种不变的自然现象上，以免被毁并易于复制。其一是建议用秒摆的长度；另一是与地球子午线相联系。前者是法国科学家 Mouton (1670) 和 Huyghens (1673) 早就提出的，并受到英国皇家学会的支持。在法国，1790年 Talleyrand 曾就这一问题向国民议会提出建议。但法国科学院未采纳，其理由是因为秒摆的长度受重力加速度的影响，因而在地球上各地不同。科学院赞成另一建议，它推荐以地球子午线作为依据。于是国民议会于1791年通过了只基于一个长度基本单位“米”的计量制度原则。这一原则也成为今天 SI 的一个重要原则，即一个物理量只有一个单位，而其倍数和分数单位均没有另外的名称而是分别利用例如 milli(10^{-3})，centi (10^{-2})，deci (10^{-1}) 和 deca (10)，hecto (10^2)，kilo (10^3) 作为单位的词头置于单位之前构成。

“米”定义为地球子午线长的四千万分之一。

重量(或质量)的单位是 1dm^3 水在密度最大时温度(4°C)下的重量。

这样的计量制度必须是 10 进制。

以上这些原则规定的计量制度，完全以米为基础，因此得名“米制”。也就产生了米的第一个定义。其内容包括长度和质量的单位（必须注意，不是重力的单位），而现在所谓的米制，其含义已有所发展，在英语国家，把用米制单位定

义的单位，也称为米制以区别于英制中的单位。例如米制马力（1 米制马力 = $75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s} = 735.498 \text{ W}$ ），是用 $\text{kgf} \cdot \text{m}$ 来定义的，但它不等于用英尺磅力定义的马力；米制克拉（1 米制克拉 = 200 mg ）；米制吨（metric ton，本来，米制吨是 tonne，等于 1000 kg ，ton 是英吨，用磅定义， $1 \text{ ton} = 2240 \text{ lb}$ ）。但是，并不是所有用米制单位定义的都是米制，例如海里（海里 = 1852 m ）。还有美国于 1959 年起，英国于 1963 年起，连码也都改用米定义了。显然，它们绝非米制。

当时采用的原则（米的定义，10 进以及使用词头），英国和美国认为行不通而决定根据秒摆长度来制定长度单位，而且沿用了每一倍数和分数单位分别命名和不一定采用 10 进的方法。例如 $1 \text{ yd} = 3 \text{ ft}$ ， $1 \text{ ft} = 12 \text{ in}$ （见附录 2）。

法国在作出这样的决定后不久，Delambre 和 Méchain 测量了敦克尔克和巴色鲁纳之间子午线弧长，而 Lavoisier 等人测量了给定体积的水的质量。根据这些测量，用铂制成体现 1 m 的一支标准棒，其两端面之间的距离为 1 m ，同时也制造了一个铂基准千克，并于 1799 年 6 月保存于巴黎的共和国档案局。这两个基准实际上既是米与千克的起点，也是现在 SI 发展的起点。称为档案局米和档案局千克。

用这两个实物复现米与千克，只是从法律上分别给出其值而不是用以定义米和千克。

3. 米制公约和米的第二个定义

米制在法国在被创立之后，很快就传到其它国家。早在 1820 年，欧洲的荷兰、比利时、卢森堡就采用了。接着是西班牙、哥伦比亚、墨西哥、葡萄牙、意大利等相继采用。1864 年，英国也允许米制单位与英制单位并用。过了几年，德国也采用了米制。

由于米制已在不少国家被采用，法国于 1869 年建议，邀请

一些国家派代表到巴黎召开“国际米制委员会”。会议于1872年8月召开，共有24个国家参加。大多数到会代表认为，新的原器应该参考巴黎档案局所保存的米与千克，把所制造的各个复制品分发各与会国。可惜由于法俄战争，这项工作中断。战争结束后，由30个国家代表组成的同一个委员会再次开会，再次肯定了上次的决议。所有这些原器全部用含10%铱的铂铱合金制造。米原器应为X形横截面，不再采用端面距离而改为刻线之间的距离。新的原器的值以法国档案局米和法国档案局千克为准而放弃原来对米的定义。因为在法国档案局的这两个实物制造出不久就发现它们所表示的值偏离了原来的定义。档案局米比地球子午线的四千万分之一短了约0.2mm，而档案局千克等于 $1.000\,028\text{ dm}^3$ 最大密度水的质量而不是 1 dm^3 的质量，大了约 28×10^{-6} 。从而米的定义不再依据于子午线而是国际原器。

20个国家派出政府代表和科学家，他们被授权代表政府批准了国际米制委员会的建议，于1875年5月20日正式签署了“米制公约”。

1889年召开了第1届国际计量大会（CGPM）。在这次大会上，批准了国际米原器，并且宣布这个米原器以后在水冰点温度时代表长度单位“米”。这次大会所确定的米的定义，是它的第二个定义（见附录1.1.1和1.1.2）。这个国际米原器自那时以来，一直按规定条件保存在国际计量局（BIPM）。

当时，同样材料和相同工艺制造了30支与国际米原器一样形状的原器，选出一根最接近于巴黎档案米的尺寸的作为国际米原器，它以花体字母 m 表示，其余则分配给签字国作为国家原器，而且必须定期地与国际米原器进行比对。这样，象至今仍存在的质量单位千克原器检定系统那样，构成了以

国际米原器为最高依据的长度检定系统。

原器所采用的横截面形状，保证了它在同样原材料条件下最为稳定、坚固。用于刻线的平面是中间无应力带（附录 1.1.2 所规定的支承条件），保证了因自重作用原器弯曲而影响的缩短为最小。

在检定时，利用光学读数显微镜在比较仪上进行。由于刻线质量和测量方法的限制，比对的相对不确定度只能达到 10^{-7} 数量级而很难再小。也就是说，用国际米原器来检定国家米原器，只能以大约 $0.1\ \mu\text{m}$ 的准确度进行，而且随时间的推移，这样的准确度也难以继续保持了。此外，利用可见光单色辐射的干涉现象，使得长度测量技术大大地发展了。在 1893 年 Michelson 第一次将谱线的波长，也就是镉元素的红

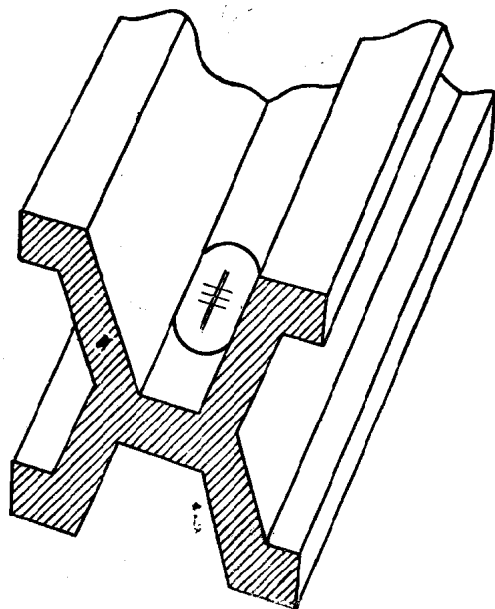


图 1 国际米原器的一端

色光谱区的谱线与米作了比较。

这样，就有了把米从有可能变化的实物基准器的尺寸改变为一种不变的以自然常数定义的量的可能。过去，曾经一度怀疑，是否国际米原器在1889至1957年间缩短了 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ ，这种怀疑有时似乎很有根据，有时又似乎根据不足，没法搞清，将来也可能再发生这样的怀疑。但如放弃而改用自然常数来定义米就再也不会产生这种说不清的怀疑了。

4. 米的原子定义及其复现

建立国际计量局的主要理由之一是统一长度计量单位。因此，做了大量工作对米原器和对高精度比对的方法进行了研究。差不多四分之三个世纪以来，用国际米原器统一了各国的原器尺度。该局还不断改进了原器的比对方法，研究用较便宜的合金制造高精度的刻线尺，测定米原器与刻线尺的膨胀特性，以及研究用于大地测量的基线尺（一般都在24m以上）和在工业上广泛使用的端面尺寸标准、量块的测量方法等。

1895年，对几种镭辐射谱线的波长的测量，开创了一个新时代。早在1827年，法国物理学家 Babinet 就认为，必须从可见波长中而不是从实物尺寸中来寻找长度基准。然而由于光辐射的特性极为复杂，当时无法使这一设想实现。但对光辐射的研究，又导致了一门新学科的产生——光谱学。

1859年，Maxwell 曾建议选用钠的黄色谱线的波长作为长度的自然基准，只要将少量的钠加进开始几乎是无色的火焰中，就能产生这种谱线。但当时观测到，这种光包含有两种辐射，其间隔约为平均波长的千分之一。

以后又考虑过自然水银的绿色谱线。由于有了分辨力更好的分光镜，很快就查明这是一组极为复杂的邻近谱线，覆

盖的范围达到其平均波长的万分之一。

到了1890年，美国物理学家 Michelson 发现自然镉辐射的红色谱线的清晰度和复现性在当时是最好的。1892—1893年，他在国际计量局相对于国际米原器测量了这一谱线的波长。1906年，利用法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 标准具（一种由两片相互平行的半透明平晶所构成的长度标准具，其间的距离十分稳定，而且光线可在其间进行反射和透射）的方法证实了他的结果。在15℃的干燥空气中，其波长

$$\lambda_{cd} = 6438.4696 \times 10^{-10} \text{ m}$$

根据1927年的国际协议，同意将自然镉的红线作为光学的长度标准，长度单位是埃（符号Å），由 $\lambda_{cd} = 6438.4696 \text{ Å}$ 定义。因此，即使用米对 λ_{cd} 进行新的测量得到稍有不同的结果，用Å表示的波长值也不受影响。

干涉测量方法的使用包括详细地研究适用于这一方法的修正，主要是对空气折射率的修正，这样就可以计算在测量条件下（如温度、压力、湿度等的变化）的辐射的真实波长值以及在标准条件下（如15℃、标准大气压、干燥空气）的波长值。

A. Perard在1921年开始系统地研究镉、水银、氦、氖、氮、锌和铊的辐射。他指出，如果采用不同距离进行测量，则所研究的每种辐射的波长看起来稍有些变化。对于镉辐射的蓝线和绿线以及水银的辐射来说，由于原来就知道很复杂，所以这一效应完全是意料中的事。而镉红线也显示了这种变化，尽管其变化程度较小。在Perard证明了其复杂性之后，他当然反对采用镉红线作为米的新定义的基础。

自此，发现了光辐射这种复杂特性的物理原因。一方面，自然元素通常是几种同位素的混合物。而镉红线由于偶然的一致而显得简单。另一方面，某种同位素的原子核的磁

特性，使其所发射的辐射，具有另一种称为超精细的结构，即由于核磁矩与电子磁矩之间的耦合所引起的能级和谱线的微小分裂。理想的标准只有在单一同位素的辐射中才能找到，而且，这种同位素的核没有磁性。理论预言，这种单核必须具有偶原子数和偶质量数。

1950年，人们知道如何分离同位素以后不久，苏联的门捷列夫计量研究院、美国标准局、西德物理技术研究院提出了三种核素可用来产生没有超精细结构的标准辐射。即 ^{114}Cd ($Z=48$)， ^{198}Hg ($Z=80$) 以及 ^{84}Kr 或 ^{86}Kr ($Z=36$) (Z : 质子数)。要对这三种核素进行选择，需要进行一些研究。

1957年，在米定义咨询委员会上，国际计量局能够给出 ^{114}Cd 的红线， ^{198}Hg 的绿线和 ^{86}Kr 的橙色谱线的“半宽度”的测量结果。

所有以上对各种谱线的研究结果，导致了1960年举行的第11届国际计量大会决定采用新的米定义。这一方面是由于过去的定义不再能满足计量学上的精度要求，另一方面，自然基准将来不至有被破坏或发生变化的危险。新定义的全文见附录1.1.3。

为了不至与过去产生不协调，以及为了在将来可能再进行测量，原来的国际米原器仍继续以所规定的条件保存在BIPM。

为了使得米定义不至受到人为的或设备条件上的影响，在这个新定义中，对辐射产生的方式未加任何说明。因此，这一定义的条文有以下优点，即可以采用其它更好一些的这一谱线的复现方法而不必去改变定义。尽管如此，至今也还没有比下述所谓 Engelhard ^{86}Kr 波长标准灯更好的复现方法。为了对实际工作给予指导，CGPM 要求CIPM 提出一个

按照这一定义复现米的实际工作规则，而且建立用于干涉测量长度的次级波长标准及其使用规则。

因此，CIPM 在 1960 年作出了建议（见附录 1.1.4）。

在米制公约组织的讨论中，对于谱线所具有的最大干涉距离，还有待澄清： ^{86}Kr 的辐射为 80 cm 左右； ^{198}Hg 的一条谱线可能到 50 cm 左右；而 ^{114}Cd 只约有 25 cm，十分接近下列关系式

$$\{\text{轮廓米宽度}\}_{\text{m}}^{-1} \times \{\text{干涉距离}\}_{\text{m}} = 1$$

上式中，花括号表示该量的数值，而下角标表示所用的单位。

适用的谱线必须尽可能窄，而谱线的轮廓与外界条件以及原子构造都有关。作为外界条件来说，光谱灯的激发类型和原子的扰动都是，使得谱线轮廓变宽甚至变形、偏移。作为原子结构引起的，有在相同元素中存在不同质量数的同位素时，核质量的影响，使得谱线变宽；磁场和电场引起的变宽；当原子核具有磁矩以及磁交变作用于原子壳时，可能产生多分量而造成谱线分裂。而采用具有偶数的质量数以及偶数核电荷数（核自旋）就可以避免。

这样一些要求，都导致光谱灯应尽可能地冷，导致采用尽可能重的原子以及尽可能小的电流。所有这些要求，在 Engelhard ^{86}Kr 波长标准灯的设计中都考虑了。这种灯采用了直流气体放电灯管，其中装了热阴极和阳极。其放电通过一个直径为 2 mm 长为约 80 mm 的毛细管（见图 2），所发射的光线在毛细管两端是最强的。

灯管的下部连同毛细管可以浸在冷液中冷却。在室温（20℃）下以高丰度的 ^{86}Kr ，以 700 N/m² 至 1300 N/m² 的压力充入。由于在灯管中加压地充入 Kr，在冷却到 77 K 时 Kr 即凝结。在所有的灯管中，饱和蒸汽压只与温度有关而