

数字计量学导论

崔伟群 田锋 李颖 著



中国质检出版社
中国标准出版社

数字计量学导论



策划编辑：高 红

责任编辑：洪 伟

装帧设计：田小萌

销售分类建议：计量科学 / 计量基础



中国质检出版社



中国标准在线服务网

ISBN 978-7-5026-4018-7



9 787502 640187 >

定价：29.00元

数字计量学导论

崔伟群 田锋 李颖 著

中国质检出版社
中国标准出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

数字计量学导论/崔伟群,田锋,李颖著. —北京:中国质检出版社, 2014. 11
ISBN 978 - 7 - 5026 - 4018 - 7

I. ①数… II. ①崔… ②田… ③李… III. ①计量学 IV. ①TB9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 146238 号

中国质检出版社 出版发行
中国标准出版社

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)

北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址:www. spc. net. cn

总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 3.875 字数 124 千字

2014 年 11 月第一版 2014 年 11 月第一次印刷

*

定价:29.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107

序

随着 20 世纪 40 年代以后计算机技术的快速发展,以二进制数字以及由此形成的虚拟世界强烈影响着人类生活的各个方面,自然也影响着计量工作。

人类对计量的认识经历了漫长的过程。从原始社会到封建社会末期,主要以度量衡为主。随着工业革命的开始,科学技术的发展推动着人类对计量的再认识,在资本主义社会初期,计量的基本量由原来的度量衡发展为目前的长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度七个基本量。以这七个基本量为主的计量科学得到了巨大的发展。随着现代信息技术革命的出现,计算机技术的发展必将推动人类对基本量的再认识,成为计量科学再次演进和创新的切入点。

本书基于计量科学发展的内在逻辑性和自洽性,向我们展示了一个全新的数字计量世界。全书从量与计量的历史及现状、人类对量的认识逻辑、信息技术的发展与计量等角度提出了数字计量学这一概念,试图解决计算机世界中计量新问题。

全书围绕二进制数据在计算机世界中占实体空间的比特量和表达人类逻辑思维的软件的量为基础,构建了计算机世界的计量体系,使得计量人员不仅在数量上,而且在逻辑上对计算机世界中的数据、软件进行计量成为可能。

本书告诉我们,计量不仅仅是一门研究量的科学,而且是一门研究质的科学;不仅仅是一门研究客观的科学,而且是一门研究主观的科学。“实现单位统一、量值准确可靠的活动”的定义本身已蕴含了这一思想。

本书重视虚拟世界与现实世界的结合。这种结合使得虚拟世界中的计量问题成为有根之木,有源之水。书中对网络流量及网络带宽速率测量软件的计量、文本相似度软件的计量、声纹识别软件的计量、图像识

别软件的计量、计算机性能的计量、云计算性能的计量、测量软件与计量器具软件的可信度测评的介绍充分体现了虚拟世界与现实世界结合的紧密性。

本书还注意做到通俗易懂,作为一部思考计量新问题的启发式著作,难能可贵!

建议广大计量工作者深入本书,从中汲取营养,不断推陈出新,为发展计量事业贡献力量!

中国工程院院士

张 钟 华

2014 年 4 月

前 言

在实际工作中,很多测量仪器都配有软件,这些软件不但担负着控制测量流程的任务,而且也肩负着计算与输出测得值的任务。许多敏锐的计量人员觉察到了软件对测量结果的影响,脑海中常常产生疑问:软件对计量的影响能评估吗?更加敏锐的计量人员则闪现出了深层疑惑:软件能计量吗?如果能,怎么计量?

带着这样的问题,我将目光转向了计量的根基——七个基本物理量,它们是如何被发现的?缘于什么原因被研究的?量值是如何确定的?进而形成了本书的第1章“量与计量”。

当我漫步在七个基本物理量被发现和研究的过程中时,曾经读过的《实践论》与《小逻辑》跃然而出,七个基本物理量的发现、定义和复现过程不就是客观向主观转化,再由主观向客观转化的过程吗?由此,本书的第2章“量的认识逻辑”水到渠成。

之后一种苦恼萦绕心头,一组死气沉沉的二进制数组合形成的软件甚至赶不上一部枯燥乏味的三流小说,与其他七个基本物理量相比,实在让人气馁。然而当软件与计算机结合的时候,就像灵魂找到了合适的肉体,绽放出绚烂多姿的生命,涤荡之前一切死寂。这迫使我思考软件生命之所以璀璨的哲学原因。当我脱离这种数非数的哲学思考时,完成了本书的第3章“信息技术的发展与数字计量”。

当硬件成为软件之所以璀璨的物质基础,软件成为硬件终极价值体现的内在动因时,二者之间的生命脐带——二进制数变得如此重要,它将人类无限的思想与世间受限的存在联系起来。构成了形式与量、主观与客观的完美结合,从而诞生了本书的第4章“数字计量学的基础——比特量值的计量”和第5章“数字计量学基础——二进制结构与量的关系”。

“花非花,雾非雾。夜半来,天明去。来如春梦不多时,去似朝云无觅处。”当意识以二进制数表现为软件时,数已然脱离意识主体成为存在。“凡存在之物,必以一定的量存在”(开尔文),因此计算机世界中的软件必然以一定量存在,而人类意识也必然以一定量存在于软件中,且这种量既要蕴含思维逻辑、又要蕴含度量可能,本书第6章“软件自身的量溯源与计量技术”从哥德尔数开始,引出了软件的量的概念。

数字计量学的两大基石:比特量和软件的量完美奠定之后,计算机世界的计量大厦拔地而起。第7章“网络流量及网络带宽速率测量软件的计量”、第8章“文本相似度软件的计量”、第9章“声纹识别软件的计量”、第10章“图像识别软件的计量”、第11章“计算机性能的计量”、第12章“云计算性能的计量”,从不同角度阐述了基于两大基石,如何建立相应计量体系的问题。

第13章“测量软件与计量器具软件的可信度测评”则是数字计量学与传统计量学交叉的产物,从计量的角度评估软件如何保障量值的准确可靠。

本书命名为《数字计量学导论》是由于书中并没有深入探讨技术细节,其原因在于受众知识领域的限制和思想传播的需要。

鲁迅先生说过“世上本没有路,走的人多了便成了路”。数字计量学这一条道路若要成为康庄大道,还需要逻辑学、数学、软件工程学、软件测试技术以及计量学的不断综合和探索。而这一探索过程必然漫长而艰辛!

崔伟群

2014年4月

于中国计量科学研究院

目 录

1 量与计量	1
1.1 量的发现	1
1.2 量、测量与计量	3
2 量的认识逻辑	10
2.1 量由客观向主观转化的过程	10
2.2 量由主观向客观转化的过程	12
3 信息技术的发展与数字计量	14
3.1 概述	14
3.2 模数转换器的原理及二进制测量	15
3.3 计算机世界中二进制的表示方式及测量	17
3.4 数字计量学	19
4 数字计量学的基础——比特量值的计量	21
4.1 二进制数字与信息熵	21
4.2 比特量及比特量计量基准	23
4.3 计算机系统中二进制信息的存储技术	25
5 数字计量学基础——二进制结构与量的关系	27
5.1 概述	27
5.2 硬件条件对二进制数据结构的限制与量的关系	27
5.3 软件与量的关系	31
6 软件自身的量传溯源与计量技术	36
6.1 概述	36
6.2 哥德尔数与软件的量	38
6.3 源代码状态下软件的量传溯源与计量技术	42
6.4 可执行代码文本状态下软件的量传溯源与计量技术	44

6.5 可执行代码运行状态下软件的量传溯源与计量技术	45
7 网络流量及网络带宽速率测量软件的计量	46
7.1 概述	46
7.2 网络流量测量	49
7.3 网络带宽速率测量	51
7.4 网络流量及网络带宽速率测量的计量	52
8 文本相似度软件的计量	54
9 声纹识别软件的计量	55
10 图像识别软件的计量	58
10.1 计算机视觉	58
10.2 图像识别	61
10.3 图像识别软件及其计量	63
11 计算机性能的计量	64
11.1 计算机性能	64
11.2 基准测试与基准测试软件	72
11.3 计算机性能的计量	74
12 云计算性能的计量	76
12.1 云计算	76
12.2 云计算性能的评价	77
12.3 云计算性能的计量	78
13 测量软件与计量器具软件的可信度测评	82
13.1 概述	82
13.2 软件开发过程对量值的影响	82
13.3 测量软件对量值影响的度量指标	83
13.4 计量器具软件的可信度及测评	84
附录 对测量软件计量量值影响的度量指标	88
结束语	116

1 量与计量

1.1 量的发现

量的发现是一个从客观到主观、从实践到理论的过程。这一过程推动着人类对自身和世界的量化认识不断深入。因此研究量的发现过程,有助于理解量的本质,推动“新”量的发现。

量的发现和研究,离不开生产实践活动。在生产实践活动中,人类依赖视觉感知空间的广袤、星空的深邃和闪电的艳丽;依赖味觉遍尝酸甜苦辣咸;依赖嗅觉感知香臭刺鼻;依赖触觉感知温度、压力;依赖运动感知时间流逝。并且随着进化,逐步具有了依赖理性对客观世界进行分析和预测的能力。

人类最初的生产实践活动与长度、时间和重量紧密相关,因而历史上人类对长度、时间和重量的研究远远早于对其他量的研究。如我国上古传说中早有皇帝“设五量”、“少昊同度量,调律吕”的记载;原始社会有“布手知尺,布指知寸”、“身为度,称以出”(《史记·夏本纪》)和“一手之盛谓之掬,两手谓之溢”的记载;并在奴隶社会(商朝)开始出现了骨尺、牙尺;春秋中晚期出现了小型衡器(楚国制造)——木衡、铜环权等测量工具。

随着生产实践活动形式的不断拓展,人类发现光、温度、电以及物质的量对生产实践活动的影响越来越重要,于是开展了对它们的研究。

人类对光的研究始于星象研究。1729年P.布给发明了用于区分星等的目视光度计;1760年I. H. 朗伯创立了光度学,建立了光学研究体系。

而1714年,德国物理学家华伦海特(1686—1736)的研究标志着温度研究体系的建立。他将冰与盐混合后,所能达到的最低温度定义为 0°F ,而将人体温度定义为 100°F ,两者间等分成100个刻度,并正式对外公布了该温标。

关于电的记载,最早见于公元前585年的古希腊文献,当时的哲学家塞利斯发现摩擦琥珀能够吸引碎草等轻小物体;在我国,东汉王充《论衡》中载有“顿牟掇芥”、西汉末年文献载有“玳瑁吸”和“矛端生火”、晋

朝载有：“今人梳头，解著衣，有随梳解结，有光者，亦有声”等现象。

对电的系统性研究，最早由英国医生威廉·吉尔伯特进行，他在文章中写到：“随使用一种金属制成一个指示器……在这个指示器的另一端，移近一个轻轻摩擦过的琥珀或者是光滑的摩擦过的宝石，指示器就会立即转动”；1660年，马德堡的盖利克发明了第一台摩擦起电机，用硫磺制成形如地球仪的可转动物体，用干燥的手掌摩擦干燥的球体使之停止即可获得电；1731年，英国牧师格雷在实验中发现，由摩擦产生的电在玻璃和丝绸类物体上可以保持下来，而有的物体如金属，它们不能由摩擦产生电，但却可以用金属丝把摩擦产生的电引出来；1745年，德国牧师克莱斯脱，用一根钉子把电引到了瓶子里；1746年，荷兰莱顿城莱顿大学的教授彼得·冯·慕欣布罗克发现了同样的现象，并发明了莱顿瓶；1752年富兰克林进行了著名的费城实验，他用风筝将“天电”引了下来，并收集到莱顿瓶中，验证了闪电与摩擦生的电相同；18世纪后期，贝内特发明验电器；1785年，库仑发明扭秤，用于测量静电力，并推导出库仑定律，后来将这一定律推广到磁力测量上。科学家使用了验电器和扭秤后，使静电现象的研究工作从定性走上了定量的道路。

1820年9月25日，安培报告了两根载流导线存在相互影响，相同方向的平行电流彼此相吸，相反方向的平行电流彼此相斥的现象，并提出分子电流假说；1821~1825年，安培进行了关于电流相互作用的四个精巧实验，推导出两个电流元之间的相互作用力公式；1827年，安培将他的电磁现象的研究发表在《电动力学现象的数学理论》一书中，标志着电学研究体系的建立。

对于粒子的研究，最初是由古希腊学者留基伯和德漠克利特等提出的。他们认为物质是由许多微小的、不可分割的单个颗粒所组成，这种颗粒称为“原子”。万物的多样性是由于构成物质的原子形式不同、所处状况不同以及它们结合力的不同造成的。在以后物理学和化学发展的基础上，原子说逐步更新为原子分子学说，认为分子原子都是可分的，并进一步发展成为现代的物质结构理论。特别是1811年阿伏加德罗发现了阿伏加德罗定律，即在标准状态（0℃，1个标准大气压，即 $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ），同体积的任何气体都含有相同数目的分子，而与气体的化学组

成和物理性质无关。这一定律对科学的发展,特别是相对原子质量的测定工作,起到了重大的推动作用,奠定了对物质的量的研究基础。

量的发现和研究之间有时相隔很长时间。在某一特定历史时期,由于实践需要或认识能力和手段的有限性,人类对于量的认识并不完全。如古猿只能够通过自身的视觉、听觉、味觉、嗅觉和触觉,感知实践中的各种现象、物体或物质的特性。随着古猿进化为人类,便逐步具备了将自身视觉、听觉、味觉、嗅觉和触觉扩展和提升的能力,从而促进了对量的进一步认识。如光学显微镜和望远镜的发明,使人类对空间的认识有了尺度的飞越;电子显微镜和射电天文望远镜的发明,突破了人类依靠可见光认识世界的局限;超声波探测仪与声波探测仪的发明,突破了人类听觉局限;特别是电磁波的发现,使得人类感知能力突破了视觉的囿圈,实现了对时空中看不见、摸不着、又实际存在的客观现象的感知。

尽管在特定历史阶段,人类对量的认识是有限的,但是从人类实践和感知能力发展的历史长河中来看,人类对量的认识又是无限的,因而人类对量的认识是有限和无限的统一。在原始社会,人类实践涉及星象变化、四季交替、劳动力多少、食物多寡和猎物大小,主要认识的量是时间和长度;到了奴隶社会,随着原始社会生产力的发展,国家权力的出现、贸易的发展,重量作为重要的量被纳入认识范畴;随着工业革命的发展,光强、温度、电流和粒子数目开始进入人类的实践范畴,从而在认识范畴逐步形成了长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度等七个基本量。

1.2 量、测量与计量

量是“现象、物体或物质的特性,其大小可用一个数和一个参照对象表示”;测量是以确定量值为目的的一组操作;计量是实现单位统一,量值准确可靠的活动。

粗略划分,测量可以分为人体测量、机械仪器测量、模拟电子仪器测量和数字电子仪器测量等历史阶段。

人体测量主要出现在原始社会,如通过“布手知尺,布指知寸”、“身为度,称以出”(《史记·夏本纪》)对长度进行测量;通过“一手之盛谓之

掬,两手谓之溢”对体积进行测量。

机械仪器测量出现在奴隶社会到封建社会中期,如我国商朝开始出现的长度约合 16cm、分寸刻划采用十进位的骨尺、牙尺;春秋中晚期出现的小型衡器(楚国制造)——木衡、铜环权;清代逐步引入的温度计、湿度计、机械钟表、测角仪等计量仪器。1785 年库仑发明用来测量静电力的扭秤,也是机械器具的一种。

模拟电子测量萌芽于 1827 年,安培《电动力学现象的数学理论》一书的出版奠定了电子测量器具登上测量舞台的理论基础。1904 年,英国物理学家弗莱明发明了世界上第一只电子管,标志着世界从此进入了电子时代。1923 年,英国邮政部门的工程师 Donald Macadie 发明了一种可以测试电流、电压和欧姆的仪器,被命名为 AVO。也就是说 1923 年之前,模拟式电压表、电流表和欧姆表作为电子测量器具已经被广泛应用于测量。1947 年 12 月,美国贝尔实验室的肖克莱、巴丁和布拉顿组成的研究小组,研制出一种点接触型的锗晶体管。晶体管的问世,是 20 世纪的一项重大发明,是微电子革命的先声,不但成为集成电路诞生的技术基础,也成为数字电子测量器具快速发展和大面积应用的基础。

显然无论在哪个历史阶段,测量的目的都是确定量的大小。而量的大小“可用一个数和一个参照对象”表示,由于参照对象的选择是主观的,因而量的大小也具有主观性。相同的量,若选择不同的参照对象,其大小是不同的。但是一旦选定了某一参照对象后,量的大小又是客观的。如在我国原始社会,就出现了“布手知尺,布指知寸”、“一手之盛谓之掬,两手谓之溢”的量的定义;奴隶社会,开始出现长度约合 16cm、分寸刻划采用十进位的骨尺、牙尺,并建立了时间的百刻制和春秋四分历,规定 365.25 日为一年,19 年 7 闰为闰周。而到了春秋中晚期,出现的小型衡器(楚国制造)——木衡、铜环权,其中环权共十枚,分别为一铢、二铢、三铢、六铢、十二铢、一两、二两、四两、八两、一斤。一铢重 0.69g,一两重 15.5g,一斤 251.3g,十枚相加约 500g;封建社会以后,在《汉书·律历志》中记载度“起于黄钟之长,以子谷秬黍中者,一黍之广度之,九十分黄钟之长,一为一分”;《汉书·食货志》记有“黄金方寸而重一斤”。《后汉书·礼仪志》中“水一升,冬重十三两”。清康熙年间规定以金、银

等金属作为长度和重量的标准,后发现金属纯度不高影响标准精度而改用一升纯水为重量标准,使度量衡三者建立在自然基准之上。

即使是科学技术相对发达的近现代,量的大小的这种主观性也是显而易见的。典型的例子如光的强度和温度量值的定义。

1860年,英国规定了发光强度的基本单位量 candel 为采用一支蜡烛的发光强度;1881年,国际电工技术委员会批准烛光为发光强度单位的国际标准,并给出 1 candel 烛光的定义:1 磅鲸脑油制成 6 支蜡烛,蜡烛以每小时约 7.776g 的速度燃烧时,在火焰的水平方向的发光强度为 1 candel。1948 年 1 月 1 日,国际上开始推行第一个统一的发光强度单位“坎德拉”:即在铂凝固点温度下,黑体发生的光亮度为 60 新烛光每平方厘米。新烛光比原来的烛光所复现的单位约小 1.9%,单位名称由 candel 改为 candela。其中 1 新烛光为用一组 45 支碳丝白炽灯定义的国际标准;1967 年,第十三届计量大会对坎德拉的上述定义修改为:“坎德拉是在 101325Pa 压力下,处于铂凝固点温度的黑体的 $1/600000\text{m}^2$ 表面在垂直方向上的发光强度”;1979 年,第十六届计量大会将其修改为:“坎德拉为一光源在给定方向上的发光强度,该光源发出频率为 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 的单色辐射,且在此方向上的辐射强度为 $(1/683)\text{W/sr}$ ”。

1742 年,瑞典天文学家安德斯·摄尔修斯于提出了“冰点为 0°C ,在 1 标准大气压下水的沸点为 100°C 的温标”;1848 年,开尔文利用公式 $Q_2/Q_1 = T_2/T_1$ 定义温度, (Q_2 和 Q_1 是法国工程师卡诺设想的热机所做的功,即温度之比由可逆热机的性质决定),这一温标称为热力学温标。由于水的三相点比冰点的复现准确度更高,将其热力学温度值定为 273.16K。其中 K 是以开尔文命名的温度单位。在 1954 年第十届国际计量大会上正式定义为国际单位,当时叫“开氏度”。1967 年,第十三届国际计量大会决定将其改为开尔文(K)。

由于量的大小定义的主观性,导致不同的国家地区或个体在不同时期对于量的定义会产生差异,这种差异对贸易的开展和技术的共享产生了阻碍,因而需要国家权力强势介入。如在原始社会,贸易基于以物易物,因而自发的以“布手知尺,布指知寸”、“一手之盛谓之掬,两手谓之溢”作为最原始的量的大小的定义。但是随着生产力的发展和贸易的频

繁发生,为了使这种交换能够公平公正地进行,部落首领们开始制定相对统一的量,这种统一标识着权力和集体意志的介入。如传说中皇帝“设五量”、“少昊同度量,调律吕”、禹“身为度,称以出”,就是权力和集体意志将测量向计量过渡的标识。随着国家的形成,政治权力的出现和贸易的发展,一部分重要的量被强制纳入了国家权力范畴,标志着国家权力正式登上了量的大小定义的舞台。随着人类迈入了封建社会,如我国在秦始皇统一全国后,国家权力得到了强化,量的大小的定义也向实现单位统一,保障量值准确可靠的目标发展。至于近代,由于资本主义萌芽的发展,国际贸易的兴起,各国之间不同的单位体制导致贸易混乱复杂,阻碍了经济交往和科技交流。例如在欧洲,法国曾通用米-吨-秒制,英美曾通用英尺-磅-秒制,技术领域采用工程单位制,即米-千克力秒制,而物理学则习惯于厘米-克-秒(CGS)单位制。为了便于国际间进行工业技术和贸易的交流,各国在1875年签署米制公约,规定以米为长度单位,以千克为质量单位,以秒为时间单位。从而标识着定义量的大小的国家意志化过程,而这一过程,就是测量向计量转化的过程。

国家权力在确定计量什么的时候,首先要考虑被计量量是否对人们的日常生活、工业、商贸、医疗、国际贸易有重要影响;其次要考虑是否有利于推动本国尖端科学和高新技术的发展;第三要考虑是否有利于引导国家科技、经济活动的发展方向。国家在确定依据什么计量的时候,首先确定现有技术依据是什么,是否能够建立客观的技术依据以支撑其后的计量活动;其次确定法律和行政法规依据是什么,能否按照现行的法律和行政法规执行。基于以上基础,国家权力才组织编制标准和技术规范,确定相应的技术方法和量传溯源体系,最终从法制上解决怎么计量。例如,我国在计量法中规定计量(法)的目的是为了加强计量监督管理,保障国家计量单位制的统一和量值的准确可靠,促进经济建设、科学技术和社会的发展,维护社会经济秩序和公民、法人或者其他组织的合法权益。其中规定国家实行统一的法定计量单位制度,规定国务院计量行政主管部门负责组织建立计量基准和有证基准物质的定级,作为统一全国量值的最高依据,并通过比对和后续研究等方式确保其量值与国际保持一致,在国内则规定通过计量检定、计量校准实现量传溯源。

表 1-1 给出了不同量从测量转向计量的年代表。

表 1-1 量的研究由测量转入计量的近似年代表

量	研究空白	测量活动	计量活动	国际上纳入计量的时间
长度	—	炎黄时期 ~ 公元前 221 年(秦始皇统一度量衡)	约公元前 221 年 ~ 现在	1790 年
质量	—	炎黄时期 ~ 公元前 221 年(秦始皇统一度量衡)	约公元前 221 年 ~ 现在	1791 年
时间	—	炎黄时期 ~ 公元前 720 年(鲁庄公制定天干纪年法)	公元前 720 年 ~ 现在	1967 年
电流	1731 年以前	1731 年 ~ 1960 年	1960 年 ~ 现在	1960 年
温度	公元前 200 年以前	公元前 200 年 ~ 1954 年	1954 年 ~ 现在	1954 年
光度	1729 年以前	1729 年 ~ 1948.1.1 年	1948.1.1 年 ~ 现在	1948 年
物质的量	—	炎黄时期 ~ 1971 年	1971 年 ~ 现在	1971 年

在计量家庭里,特别要提到化学计量。化学计量经过漫长的发展,在 1971 年才被纳入国际计量法制轨道。化学计量的加入,标志着计量活动由以量为主、以质为辅的研究扩展到质量并重的研究范畴。恩格斯在《反杜林论》^①中有一段著名的论述:“碳水化合物的同系列,其中很多已为大家所知道,它们每一个都有自己的代数组成式。如果我们按化学上的通例,用 C 表示碳原子,用 H 标识氢原子,用 O 表示氧原子,用 n 表示每一个化合物中所包含的碳原子的数目,那末我们就可以把这些系列中某几个系列的分子式表示如下:

$C_n H_{2n+2}$ ——正烷属烃系列

$C_n H_{2n+2} O$ ——伯醇系列

^① 《马克思恩格斯文集(第九卷)》,人民出版社,2009 年 12 月。