

力学的物理基础

上册

[苏] С. Э. Холмский 著
应知言等译 甫祖猷 校



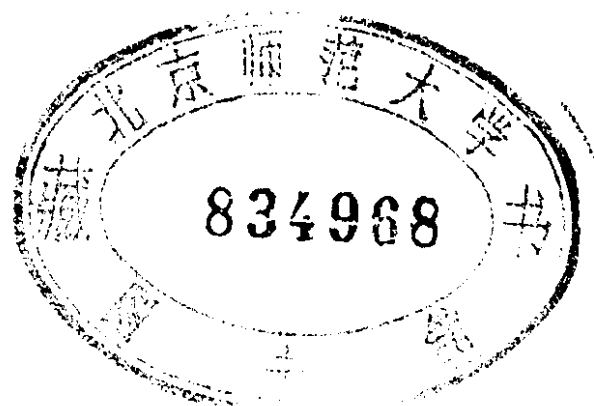
人民教育出版社

力学的物理基础

上册

[苏] С. Э. Хайкин 著

应知言等译 雷祖猷校



人民教育出版社

本书根据苏联国家物理数学书籍出版社（Физматгиз）出版的 С. Э. Хайкин 所著《Физические основы механики》1962 年版译出。

原书共二十章，中译本分上、下两册出版。上册包括前十二章，内容为运动学、牛顿定律、功和能、弹性力作用下的运动、在引力作用下的运动、有摩擦力的运动、带电粒子在电场和磁场中的运动、狭义相对论力学、动量矩、万有引力、非惯性坐标系等。下册包括刚体力学、弹性体力学、流体力学、振动理论等。

上册由应知言、柳涛、孙山根、吴秀芳等译，后由应知言整理定稿。译稿经雷祖猷校订。

本书可作为高等学校理工科普通物理学课程的教学参考书，也可供中学物理教师及有关科技人员参考。

力学的物理基础

上册

〔苏〕С. Э. Хайкин 著

应知言等译 雷祖猷校

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 13.75 字数 325,000

1980 年 8 月第 1 版 1981 年 7 月第 1 次印刷

印数 00,001—14,000

书号 13012·0511 定价 1.20 元

序

本书的研究范围,比力学通常所包括的内容要广得多。首先,书中包含了带电粒子在电场和磁场中的运动问题,即在洛伦兹力作用下的运动问题。这样安排,乃是出于下述考虑。

一本专讲力学的物理基础的书,即把力学当作物理学的一个部分来研究的书,它应该对物体机械运动的各种问题都加以论述,而不管这些问题是来自物理学的哪个部分。物理学各不同部分所产生的机械运动问题,没有任何理由不归于力学而仍然归于这些部分,只要这些问题实质上可以限在力学范围内加以研究,即解决它们不需要用到力学定律以外的任何物理定律。力学定律使我们能够确定物体的运动,只要物体所受的力是已知的。对于确定物体的运动而言,这些力的起源、产生机制都是无关紧要的。仅仅需要具备一种测量力的独立方法(即不依据运动定律本身),用以保证每种具体情形下的作用力能够测定或算出。如果具备了这种方法,利用牛顿定律(或其推论)就能求出物体的运动,这样就能解决力学问题。

力的起源问题超出了力学领域,在力学中一般是不研究的。因此,从引起运动的力的起源着眼,把物体运动问题划分为“力学”和“非力学”两类,这样做在原则上是不对的。要知道,并不存在任何特征,据此可以把弹性力、摩擦力和万有引力划归“力学”,而把洛伦兹力划归“非力学”;事实上,以弹性力的产生为例,晶格上各离子所带电荷间的相互作用力,就起了重大的作用。因此这种分类法,可以说完全是人为规定的,从近代物理概念的观点看来是站不住脚的。

总之,以陈腐过时的“机械力”和“非机械力”的概念为依据,把物体运动问题划分为“力学”和“非力学”两类,这种传统分类法,虽曾通行一时,但从近代物理学观点看来已经毫无意义了。这个分类法人为地限制了力学的研究对象,因而阻碍着人们在力学这一物理学分支的讲述中,正确地反映整个物理学的发展。

从力学中排除带电粒子的运动问题,也就从力学中排除了一切接近光速的运动问题;而这类运动却正是研究物理学其他分支的许多问题时常常要遇到的。另外,从力学中排除接近光速的运动问题,还会使相对论力学失去具体内容;结果要么是在讲述力学这一物理学分支时完全撇开相对论不讲(即停留在本世纪初的水平上),要么只能不立足于实验结果,完全形式地讲述相对论力学。如果把带电粒子的运动列入力学,我们不仅能取消对力学领域毫无道理的限制,并且能消除这种纯人为的限制在教学方面所造成的上述困难。

在力学中研究带电粒子高速运动的问题,就能建立起质量对速度的依赖关系这个实验事实,而在这一关系的基础上,不利用洛伦兹-爱因斯坦变换也能讲述高速运动力学。

这样来讲述接近光速的运动的力学,尽管没有反映出狭义相对论产生与发展的历史,但在教学法方面却是完全合理的;因为这一理论产生时,其能据以立论的实验事实几乎还一点没有,所以与讲述其发展史相较,上述讲法更有助于正确理解相对论的内容及其同实验的联系。

当然,要讲述带电粒子的运动问题,尤其是相对论力学,需要克服教学法上的某些困难。但这些是事物本质所固有的困难,不在力学也得在电磁学和光学等部分解决。其实,这些困难在力学中是完全可以解决的,因为初等物理学课程已提供了有关引入洛伦兹力这一概念的预备知识。总之,把带电粒子(包括高速的带电

粒子)的运动问题列入力学部分,并不会在教学方面造成任何人为的困难;以往之所以出现这种困难,倒是由于从力学中排除了这类问题. 因此把带电粒子的运动问题列入力学部分, 不仅从物理学观点而且从教学法的观点来看都是合理的.

既然打破了力学的传统界线,就必须划出新的界线,新的界线不应该还象旧界线那样是人为的,而应该是尽可能自然的. 物体运动问题,凡其求解只需运用力学定律的(具体说来就是牛顿定律及其推论),自然应该归入力学;凡单用力学定律不足以解决,而还需用到其他定律的(例如电动力学或热力学定律),就不应该归入力学. 按照这个标准,力学应该包括带电粒子的运动,其中包括带电粒子的高速运动,但不包括带电粒子的高加速运动,因为在后一情况下,为了求出粒子的辐射场对粒子本身的作用力,必须应用电动力学的定律. 再如,我们还从力学中剔开气体动力学,这是因为气体中接近声速的运动会引起相当大的温度变化,当研究这种运动时,就必须考虑到气体状态随温度而发生的变化,即必须用到热力学定律.

除了带电粒子在电场和磁场中的运动以外,本书还包括许多其他的力学问题,它们因为起源于物理学其他部分,通常是不在力学范围内加以研究的. 这些问题之所以宜于安排在力学的物理基础中讲述,是由于它们在这里可以结合着教材的基本内容系统地加以阐述;而在物理学其他部分里,这些问题是孤立地出现的,因而常常需要离开正题,回过头去讲力学的物理基础.

例如,在研究热容量问题时,就要用到关于原子和分子振动的一些概念. 因此,在力学的物理基础中研究振动的问题时,预先介绍这类必要的概念,那是比较恰当的.

又如,在讲述力学的物理基础时,研究物体从微观不连续过渡到连续,再过渡到宏观不连续的问题(这一问题以种种不同形式出

现于物理学的一切部分), 同样也是得当的。

总之, 为了使力学的物理基础的讲述能够适应物理学发展的现代水平, 讲述的范围应该大大超出通常普通物理学教程中力学的内容, 也大大超出了作者的《力学》^①(其最后一版为 1948 年第二版)一书的内容。所以本书的篇幅当然也就大大地超过了甚至最详尽的物理学教程中力学的篇幅。但把以往照例在普通物理学教程中其他部分里讲述的许多问题移到力学部分里来, 当然并没有扩大教程的总篇幅; 因为这只不过是把教程各章的材料重新分配而已。

上述理由使我们深信, 教材这样的重新分配, 不仅从物理学观点而且从教学法观点看来都是合理的, 就是说, 这样的安排对于普通物理学课程的学习来说, 决不应该有困难, 相反应该更为省力。

但本书的篇幅毕竟太大了; 为了易于阅读, (至少在初次阅读时)可以放过某些章节或章节中的某些部分; 因为这些内容不过是一些用来说明前面一般性原理的特例, 或者所谈问题过于专门, 本来就不能算作学习力学的物理基础时的必读材料。所有这类可以删去而不致破坏讲述连贯性的材料, 都用小号字排印。

作者乐于向下列诸位表示深切谢意: Н. Н. 安德列夫院士和 М. С. 拉比诺维奇教授, 他们审阅了本书的手稿, 并且提出了许多宝贵的意见; 还有数理科学博士 М. А. 伊萨科维奇和 С. П. 斯特列尔科夫教授, 他们提出的许多建议已在撰写本书时采纳了。

С. Хайкин

1962 年 2 月于列宁格勒

^① 这本《力学》(中译本于 1954 年由高等教育出版社出版, 李冶钢译——译者注)的基本内容已收入本书, 但有些内容作了较大的改动。

目 录

序.....	I
第一章 绪论.....	1
§ 1. 力学的研究对象.....	1
§ 2. 物理量的测量.....	5
§ 3. 单位制.....	8
§ 4. 物理量的量纲.....	16
§ 5. 物理定律与物理量的量纲.....	18
§ 6. 量纲法则.....	20
第二章 运动学.....	24
§ 7. 时-空参照系.....	24
§ 8. 点的元位移.....	31
§ 9. 速度.....	34
§ 10. 加速度.....	36
§ 11. 角速度和角加速度.....	41
§ 12. 刚体的位移.....	45
§ 13. 刚体的定轴转动.....	47
§ 14. 角速度矢量与角加速度矢量.....	49
§ 15. 刚体作“复杂运动”的几种情况.....	54
第三章 牛顿定律.....	63
§ 16. 参照系的选择.....	63
§ 17. 力.....	65
§ 18. 力的测量.....	71
§ 19. 洛伦兹力.....	74
§ 20. 力和加速度的关系.....	81
§ 21. 在高速情况下力与加速度的关系.....	90
§ 22. 质量 动量.....	93
§ 23. 牛顿第二定律.....	95

§ 24. 高速下的牛顿第二定律·····	101
§ 25. 牛顿第三定律·····	106
§ 26. 动量守恒定律·····	110
§ 27. 惯性坐标系·····	115
第四章 功和能 ·····	122
§ 28. 力的功·····	122
§ 29. 势能·····	130
§ 30. 动能·····	140
§ 31. 能量和质量 能量守恒定律·····	142
§ 32. 绝对非弹性碰撞·····	149
§ 33. 绝对弹性碰撞·····	158
§ 34. 功的传递·····	165
第五章 弹性力作用下的运动 ·····	170
§ 35. 形变的发生·····	170
§ 36. 转动所引起的形变·····	173
§ 37. 产生力时的振动·····	176
§ 38. 弹性力与形变·····	179
§ 39. 绝对刚性约束·····	180
第六章 在引力作用下的运动 ·····	185
§ 40. 地球的引力·····	185
§ 41. 物体的称量·····	187
§ 42. 引力与形变·····	194
§ 43. 失重状态·····	200
第七章 有摩擦力的运动 ·····	206
§ 44. 摩擦力·····	206
§ 45. 干摩擦与湿摩擦·····	209
§ 46. 湿摩擦力与速度的关系·····	210
§ 47. 物体在粘滞媒质中的下落运动·····	211
§ 48. 跳伞·····	213
§ 49. 静摩擦·····	215
§ 50. 滑动摩擦·····	217

§ 51. 干摩擦的作用·····	218
§ 52. 滞留现象·····	219
第八章 带电粒子在电场和磁场中的运动 ·····	224
§ 53. 在电场中的运动·····	224
§ 54. 直线加速器·····	227
§ 55. 在磁场中的运动·····	232
§ 56. 回旋加速器·····	238
第九章 狭义相对论力学 ·····	245
§ 57. 伽利略相对性原理·····	245
§ 58. 伽利略相对性原理和守恒定律·····	256
§ 59. 伽利略相对性原理和高速运动·····	259
§ 60. 光速的作用·····	265
§ 61. 运动时物体尺寸的缩短·····	272
§ 62. 运动时钟的变慢·····	288
§ 63. 洛伦兹变换 间隔·····	306
§ 64. 相对论运动学·····	316
§ 65. 相对论力学中的力·····	324
§ 66. 力学定律的不变性·····	331
第十章 动量矩 ·····	335
§ 67. 力矩和动量矩·····	335
§ 68. 矩方程·····	338
§ 69. 数学摆·····	341
§ 70. 质点系的动量矩守恒定律·····	344
§ 71. 动量矩守恒定律和能量守恒定律·····	348
§ 72. 回旋加速器中粒子的矩方程·····	350
第十一章 万有引力 ·····	353
§ 73. 万有引力定律·····	353
§ 74. 万有引力恒量·····	357
§ 75. 在引力场中的运动·····	361
§ 76. 人造卫星和人造行星·····	372
§ 77. 潮汐·····	376

第十二章 非惯性坐标系.....379

§ 78. 惯性力.....379

§ 79. 在非惯性坐标系中的加速度.....383

§ 80. 在作直线运动的坐标系中的惯性力.....394

§ 81. 惯性离心力.....398

§ 82. 科里奥利惯性力.....403

§ 83. 在地球表面上的运动.....411

§ 84. 非惯性坐标系与守恒定律.....416

§ 85. 惯性力与引力的等价性.....420

§ 86. 广义相对论的一些知识.....424

第一章 绪 论

§ 1. 力学的研究对象

力学是物理学的一个部分，它所研究的是物质运动的最简单形式——机械运动，即一些物体(或物体的一些部分)相对于另外一些物体(或物体的另外一些部分)的位置变动。这种运动的产生，是由于某物体(或物体的某部分)受到了其他物体(或物体的其他部分)的力的作用。力学的任务在于对各种运动进行实验研究，并把所得实验资料总结成运动定律；而根据这些定律，就能进一步对每种具体情形，预言所发生运动的特性。为此，在研究物体的运动时，不仅要了解物体的性质；而且要了解在一些具体情形下作用力的特性。但关于引起机械运动的力的本源问题，已超出了力学领域。力学无法回答这类问题；物理学的其他部分——电动力学、分子物理学等等，才是研究这类问题的。所以不论引起机械运动的力究竟本源如何，对这些运动的研究都应该看作是力学的课题。要想以引起运动的力的本源所关联的任何特征为依据，在物理学中划出力学这一部分的界线，那是不可能的；因为那样的划定法，总会带有一定程度的任意性。

无论是物体在弹性力、摩擦力和万有引力作用下所发生的运动，还是带电物体在其他(静止的或运动的)带电体的力作用下所发生的运动，都有同样理由可以列为力学课题。但把关于带电体运动的一切问题都划归力学则是不行的，因为那些问题中有一些不能单用力学定律来解决，即其求解尚需用到物理学其他部分的(特别是电动力学的)一些基本定律。

在一定情形下,带电粒子的运动会引起电磁辐射,建立起电磁场,这电磁场对产生它的电荷又有一定的力作用.电磁辐射的过程以及辐射电磁场的特性,为电动力学的定律所决定.要同时利用力学定律和电动力学定律,才能解决有电磁辐射的带电体运动问题.

若将上述问题列入力学,其求解势必牵涉到电动力学^①.所以根据这一点就可以很自然地划定力学与电动力学之间的分界线,即电磁辐射不起重大作用而可忽略的那些带电体的运动问题应划归力学.当然,由于作了这种近似处理,问题的解仅仅是近似正确的了,然而这样的解还是能为许多(包括实用上重要的)问题提供足够精确的答案.

要想解决力学问题,首先必须研究运动的描述方法.力学中只研究运动描述方法而不需要用到运动定律的那个部分,称为运动学.运动定律及其在个别具体问题中的应用,则由动力学加以研究.研究物体静止条件的静力学,作为一种特殊情形包含于动力学之中.根据运动物体的性质、运动特性和欲解问题的内容,力学可分为质点力学、刚体(不变形物体)力学和弹性体力学^②(弹性体力学包含液体气体力学).

为了理解这种分类法的物理意义,让我们来看下面的具体例子.用一圆柱弹簧固结于金属圆片的中心,把圆片水平地悬挂起来(图 1, a).若使圆片在竖直方向上振动起来——譬如说,抓住圆片向下拉,然后突然放手,就会发生这种运动(图 1, b),则实验表明,振动周期主要决定于圆片的质量,而与圆片的尺寸和形状没

① 又从后文(§ 24)可知,假如把有电磁辐射的带电体运动问题划归力学,那么力学中某些定律就会改变性质.

② 这里的“弹性体力学”应该理解为广义的弹性体力学,通常称为连续介质力学,也相当于变形体力学.至于狭义的弹性体力学,通常称为弹性力学或弹性理论.

——译者注

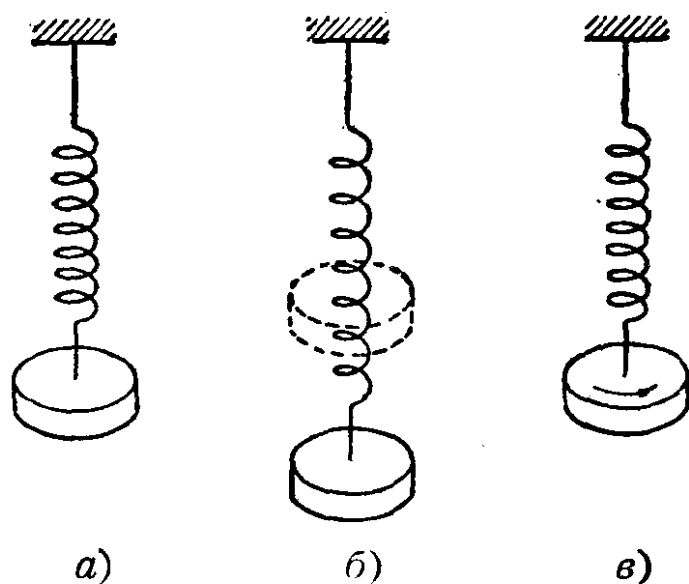


图 1

有什么明显的关系。而若圆片系统绕竖直轴作扭转振动——譬如说,把圆片绕竖直轴扭转某个角度,然后突然放手,就会发生这种运动(图 1, *б*),则实验表明,振动周期主要依赖于圆片的尺寸、形状和质量,而实际上与其弹性无关。最后,如果我们研究圆片被击时发出的声的振动周期,我们就能用实验证明,这种周期不仅与圆片的质量、尺寸和形状有关,而且还与其弹性有关。这样,实验表明,同一实在客体(圆片)的不同性质,将在不同的运动中起决定作用。圆片竖直振动的周期只决定于圆片的质量而与其尺寸和弹性无关。所以,在这种情形下可以用质点,即用只有质量而无大小的物体来代替圆片。在这种情况下,用质量跟圆片相同的质点去代替圆片,我们就已正确地反映出实在客体在所研究运动中唯一起决定作用的性质。

扭转振动的周期依赖于圆片的质量和尺寸;所以,在这种情况下,要把圆片当作刚体,才能正确地反映出实在客体在所研究运动中起决定作用的性质。最后,声振动的周期不仅依赖于圆片的尺寸,而且依赖于制造圆片所用材料的弹性与密度;所以,这时要正确地反映实际圆片在所研究运动中起决定作用的那些性质,只有

把实际圆片当作这样一个弹性体,其尺寸、弹性和密度三者皆与实际圆片相同。

可见,根据所研究运动的不同特性,同一物体有时应该当作质点,有时应该当作刚体,有时又应该当作弹性体。所以,我们要解的相应课题,就应该分别划归质点力学、刚体力学或弹性体力学。

然而,把圆片当作弹性体,即同时考虑其质量、形状和弹性,却仍未能概括实在客体的全部性质。任何一块金属都具有内摩擦,弹性振动能量会有一部分在克服内摩擦的过程中转变为热能而消耗掉,结果振动就会逐渐衰减。但只要内摩擦很小,它实际上将不会影响声振动的周期,于是把圆片当作完全弹性体(即没有内摩擦的物体),即可正确地求出声振动的周期^①。但如我们感兴趣的是这振动衰减的快慢问题,那么仍把圆片当作完全弹性体就不能正确求解了。

上面这个具体例子足以说明把力学分为质点力学、刚体力学和弹性体力学的意义。实际上,自然界中是既不会有理想质点,也不会有绝对刚体和完全弹性体的。这一切都不过是科学上所不得不使用的抽象概念,用来把实在客体中那些在解决所给问题时务需考虑的性质正确地反映出来。采用抽象概念永远不可能完全地反映出实在客体的全部性质。但是,既然抽象概念未反映的那些性质对所研究运动的特性并无明显影响,当然没有必要去反映客体的全部性质;何况,抽象概念的应用还能使一切课题的求解大为简化。在研究物体的运动时,假如企图把该物体的全部性质都考虑进去,问题就会复杂得实际上无法解决。所以总是应该力求采用这样一些抽象概念,它们只反映在所研究运动中起决定作用的那些客体性质。

^① 空气具有“内摩擦”(粘滞性),因而在圆片周围的空气中就有能量损失,这种能量损失所引起的振动衰减,也可以忽略不计。

但是,一开始研究某种运动时,我们还不能确切知道,究竟客体的什么性质在这种运动中起决定作用. 因此,在所给情况下,究竟应该采用怎样的抽象概念,这是我们所无法预先知道的. 只有通过实验,我们才能看出客体的各种性质在我们感兴趣的运动中所起的作用大小,从而得知,哪些性质必须加以考虑. 但有时,虽然没有关于所研究运动的直接知识,也并不需要直接进行实验,因为根据先前积累的关于其他类似运动的知识,我们会有一定程度的把握来判断:为了正确地解出所给课题,必须考虑到的客体性质是哪些. 但无论如何,在任何情况下,当课题解出后,所得结果必须与实验相比较. 当然,理论结果与实验数据比较起来,两者决不会完全吻合,原因在于:一方面,任何理论都只是近似的(任何抽象概念都只是部分而又近似地反映着客体的性质,这一条就足够了),另一方面,因为任何测量都只能以一定的准确度进行,所以任何实验数据也只能是近似正确的(可达的最高准确度取决于测量技术水平;而在解决实际问题时,往往较小的准确度就行). 如果在测量的准确度范围内,所得数据与理论结果没有什么出入,那就应该认为理论与实验是一致的. 只有当理论与实验一致时,我们才能够确信,所用的抽象概念已把实际系统那些特征全部地足够准确地反映出来了,这些特征在我们所研究的运动中起着决定性的作用. 无论多么合乎逻辑和有连贯性的物理理论,都采用了不能反映客体全部性质的抽象概念. 而这些抽象概念的采用是否合理,理论本身并不能作出结论. 只有理论与实验的一致才能提供这种证明. 所以,同一切实验科学一样,在物理学(包括力学)中,一切理论与实验相较,实验总处在起决定性作用的一方.

§ 2. 物理量的测量

进行物理量的任何测量(量度),就是把被测量与标准器作直

接比较或间接比较,由此而得该物理量的值。例如,要确定一物体的长度,我们就用尺——长度标准器去靠着这物体进行比较。标准器沿被测物体截量的次数,就表示这物体的长度。同样,为了确定一物体的重量,我们就在等臂杠杆上用重量标准器(砝码)来平衡这物体。在等臂杠杆上平衡一物体所需的重量单位(标准器)的数目,就表示这物体的重量。

为了能用数值来表示某一物理量的测量结果,我们首先应该选定这物理量的标准器(即被当作这种物理量的单位的样品),其次,要定出这种物理量同标准器的比较方法,最后,还需要定出各标准器的相加方法。例如,在上述测量重量的方法中,就已含有物体重量的比较法和各标准器的相加法:如果两个物体在等臂杠杆上互相平衡,它们的重量就相等;放在一秤盘中的几个标准器的合重量,等于这些标准器单个重量的算术和。

同理,如果我们选取保持一定伸长量的弹簧,用来作力的标准器,那么我们就应该规定,当两个弹簧标准器互成一定角度而作用于同一物体时,应怎样求出作用在这物体上的合力(这力不等于各个标准器所施力的算术和,而等于它们的几何和)。

物理量的比较法与标准器的相加法绝不是可以任意规定的,因为测量的结果应该满足完全确定的要求:可重复性、单值性等等。例如,假定我们认为,两个弹簧作用在一物体上的合力,等于每个弹簧所施力的算术和而不是几何和,那么力的测量结果就不会是单值的了:改变两弹簧间的夹角,就会得到同一被测力的不同测量值。只有弹簧标准器所施力的几何加法,才能保证测量结果的单值性。在规定任何物理量的测量法时,情形也都是这样。

为了满足可重复性、单值性等等要求,所用的测量方法必须能够反映被测物理量的本性。弹簧所施力的几何加法,反映了力的矢量性;标准器重量的算术加法,反映了质量的可加性,等等。物