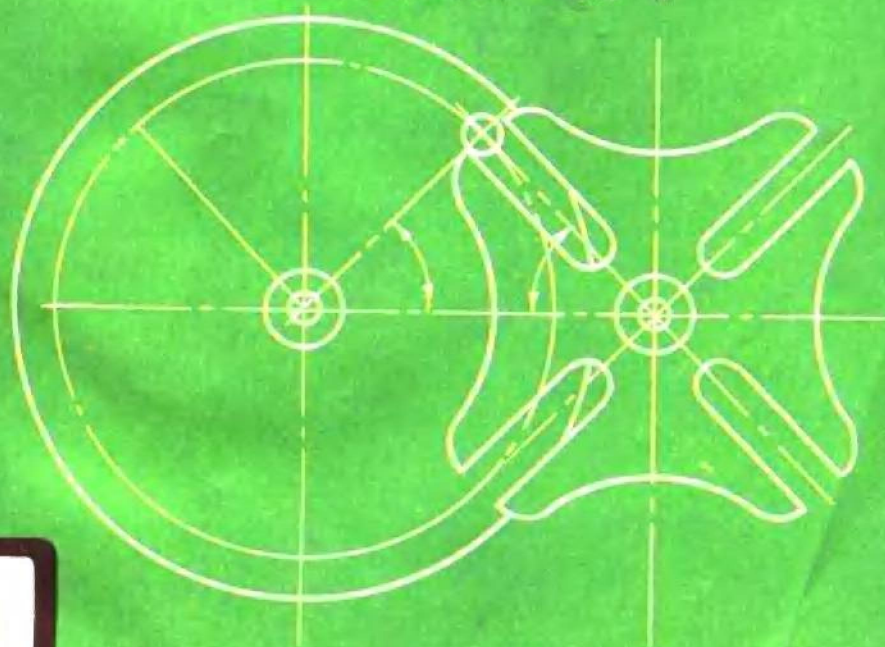


应用工程力学

静力学和动力学

YINGYONG GONGCHENG LIXUE

〔美〕 G. 布什罗伊德 C. 波利 著



机械工业出版社

本书是一本工程力学入门教材。全书由静力学及动力学两大部分组成,共分21章。第1~6章和第12~19章分别介绍了静力学和动力学的基本原理,其余各章则讨论这些基本原理在工程技术中的应用。在内容的叙述方法上,作者没有采取传统教材中常用的、比较抽象的矢量表达式,而是力图通过常见的二维实际工程问题来帮助读者建立物理概念和工程意识,并且结合有工程实际意义的例题和习题来训练、培养综合利用基本原理的解题技巧。使读者在掌握工程力学理论知识的同时,学到许多工程实践知识。除此之外,本书以工科院校的学生为主要对象,也十分注意阅读工程图纸的能力的训练。本书可以作为工科大、中专院校的教材或教学参考书,对于涉及力学知识的工程技术人员,也有一定的参考价值。

Applied Engineering Mechanics

Statics and Dynamics

G. Boothroyd and C. Poli

MARCEL DEKKER, INC. 1980

* * *

应用工程力学

静力学和动力学

〔美〕G. 布什罗伊德 C. 波利 著

张诚文 译

应达之 校

*
责任编辑:钱既佳 版式设计:乔玲

孙慧波

封面设计:王伦 责任校对:张媛

*
机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*
开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $12\frac{1}{4}$ ·字数 267 千字

1989年6月北京第一版·1989年6月北京第一次印刷

印数 0,001—2,510·定价:10.10元

*
ISBN 7-111-00741-7/TB·4111111111

12 02 22

序

本书主要是为工科或工程技术专业的学生编写的，在这些专业的教学计划中，要求学习有关工程力学原理（静力学和动力学）的知识。

大多数现有的工程力学教材都偏重于采用矢量表示法。这可使三维问题的求解在数学上显得简洁而且完善。但本书作者认为：一本力学的入门教材应着重讨论二维问题，在这种情况下，矢量表示方法的益处并不大。事实上，矢量表示方法使学生难以获得合乎工程环境需要的物理“感觉”，而且绝大多数的工程力学实际问题本来就是二维的。象三维机构那样的问题是非常少见的，而三维的航天空间问题在全部工程问题中只占一个很小的百分数。在现有的教材中引入了许多生造的三维问题，仅仅是为了了解矢量数学。但是，这些问题多半是不良设计的实例，它们对于使学生获得鉴别优秀设计的能力是有害的。

作者也对当前流行的一种教学观点表示异议，这种观点认为：一本给定科目的教材只应探讨本课题的内容而不得涉及其他课题。这种观点的典型实例是教师对于在工程实验报告中出现的拼写错误和拙劣的语法现象视而不见。当然，学生也会为此辩解，说已经有专门教授英语写作的课程了，而工程实验报告的目的是检验学生是否已成功地完成他的实验。这种观点在工程力学教材中也有它自己的表现方式。用图片代替工程制图来表现工程环境似乎已成为当前的一个准

则了。这看来是因为缺少专门的大专教育和训练，工科的学生不能看懂工程图纸，所以必须使用图片——最好是立体彩色图。作者的看法却是：学生必须能够理解工程图纸，掌握投影原理等方面的知识，并且要通过大量的实践来熟练地掌握它们。因此，在这本书中，大多数的图都是用简单的线条绘出的。除此之外，学生还应当学会不依靠图片的帮助而直接把对工程环境的文字叙述翻译成工程图。所以本书后几章的习题都是文字题。

本书有两个主要部分：即静力学和动力学。在这两部分内容中，特别在静力学部分中，前面几章主要探讨理论问题（静力学第1~5章和动力学第12~19章），其余各章则讨论这些理论在工程实际中的应用（静力学第6~11章和动力学第20及21章）。教材内容的这种组织方法与当前大多数力学教材不同。按照这样的顺序，学生首先集中学习基本原理，在一些相当简单的问题中去应用它们，然后再去解决实际的工程问题，从而学会各种综合利用基本原理的技巧。根据本书作者的经验，学生有时能够解在强调或提及某些原理的章节中出现的某种类型的问题，但在书中其他地方遇到同类问题时，又往往不知所措。本书所提供的方法能帮助学生树立必要的信念去处理与教材特定章节没有直接联系的问题。

本书注意遵照国际标准化组织（ISO）对单位和有关定义的最新推荐意见。其中最重要的自然是国际单位制（SI）的基本单位和导出单位。在国际标准化组织的标准1000（ISO标准1000）中说明了国际单位制的基本内容。在国际标准化组织的R31号建议书（ISO建议书R31）中规定了推荐的使用方法，其中包括各种导出单位的标准符号。鉴于美国已经着手进行向国际单位制（米制）过渡的工作，本书全部采用

了国际单位制。

本书所用的教学组织方法，和形成本书的课堂讲稿，都在阿姆赫斯特 (Amherst) 的马萨诸塞大学 (University of Massachusetts) 经过多次试用，并且受到学生的欢迎和赞赏。作者相信本书能使学生在掌握工程力学理论知识的同时，还学到许多工程实践知识。

最后，我们谨对为本书手稿打字的多娜·穆金女士 (Ms. Donna Mouglin) 和简·皮恩女士 (Ms. Jan Peene)，以及为本书准备插图的丽拉·皮尔逊女士 (Ms. Lyla Wilson) 表示衷心的感谢。

G. 布什罗伊德

C. 波利

目 录

序

第 1 章 一些力学的基本概念	1
1.1 前言	1
1.2 长度、时间和质量的基本单位	1
1.3 导出量——速度和加速度	3
1.4 牛顿运动定律和导出量 力	4
1.5 国际单位制 (SI)	7
1.6 其他的基本概念和定义	8
第 2 章 点力、力矩及静力平衡	12
2.1 前言	12
2.2 作为矢量的力	12
2.3 汇交共面力系的合力	13
2.4 力的分解	14
2.5 质点的静力平衡	15
2.6 分离体图	17
2.7 作用在刚体上的力	19
2.8 力对轴的矩	20
2.9 刚体的静力平衡	21
2.10 力偶	23
2.11 共面力系的几个特殊情况	24
2.12 把力分解为力和力偶	25
第 3 章 分离体图	32
3.1 前言	32

IV

3.2	支点反力	32
3.3	缆索或销接杆件的作用力	34
3.4	其他物体的接触作用力	35
3.5	重力	39
3.6	嵌入或刚性支点的反力	43
第4章 摩擦		55
4.1	前言	55
4.2	阿蒙通定律	56
4.3	滚动阻力	63
第5章 分布力		70
5.1	前言	70
5.2	分布荷载	70
5.3	重心	72
5.4	形心	76
5.5	质心	76
5.6	三维物体的重心	77
第6章 简单机械		86
6.1	前言	86
6.2	简单机械	86
6.3	杠杆	86
6.4	滑轮	88
6.5	轮与轴	91
6.6	斜面	92
6.7	楔	93
6.8	螺杆	94
第7章 桁架与刚架		98
7.1	前言	98
7.2	桁架分析	99
7.3	刚架	107

第8章 机构	118
8.1 前言	118
8.2 例题	116
第9章 梁	127
9.1 前言	127
9.2 弯矩和剪力	127
9.3 惯用符号	128
9.4 剪力图和弯矩图	128
9.5 荷载、剪力与弯矩的关系	133
第10章 摩擦问题	141
10.1 前言	141
10.2 皮带摩擦	141
10.3 圆盘摩擦	146
10.4 楔	150
10.5 螺线	152
第11章 水静力学	162
11.1 前言	162
11.2 液体中的压强变化	162
11.3 浸没平面上的静水压力	164
11.4 二次面积矩	170
11.5 面积的惯性积	174
第12章 质点运动学	181
12.1 前言	181
12.2 直线运动	181
12.3 旋转运动	186
12.4 平面曲线运动	190
12.5 圆周运动	195
第13章 刚体运动学(包括在机构学中的应用)	201
13.1 前言	201

13.2	刚体的平面运动	201
13.3	刚体中的点速度	202
13.4	刚体中的点加速度	203
13.5	瞬时转动中心	204
13.6	速度图和加速度图	209
第14章	质点动力学	221
14.1	前言	221
14.2	运动方程	221
第15章	质点的功、功率和能	237
15.1	前言	237
15.2	功-能方程	237
15.3	能量的守恒	243
15.4	保守力所做的功	245
15.5	非保守力所做的功	248
第16章	质点的动量	254
16.1	前言	254
16.2	质点的线动量守恒	254
16.3	质点群的动量守恒	255
16.4	冲量和碰撞	258
第17章	刚体动力学	269
17.1	前言	269
17.2	刚体的平面运动	269
17.3	惯性矩	271
17.4	刚体的平动	277
17.5	刚体绕定轴的转动	281
17.6	刚体的一般平面运动	286
第18章	刚体的功、功率和能	300
18.1	前言	300
18.2	刚体的平动动能	300

18.3	刚体的转动动能	301
18.4	刚体的总动能	302
18.5	功率	304
18.6	势能	304
第19章	刚体的动量	312
19.1	前言	312
19.2	动量	312
19.3	冲量和碰撞	314
第20章	进一步的应用	323
20.1	齿轮系	323
20.2	旋转质量的平衡	326
20.3	无阻尼自由振动	336
20.4	陀螺效应	344
第21章	火箭弹道学	356
21.1	前言	356
21.2	火箭垂直飞行时的运动方程	356
21.3	发动机特性	359
21.4	空气动力	360
21.5	风洞试验	362
21.6	最大高度的计算	364
附录		371
附录 I	SI制的单位 (基本量和导出量选录)	371
附录 II	平面图形的性质	373
附录 III	均质固体的性质	375
符号说明		377

第 1 章 一些力学的基本概念

1.1 前言

力学是一门自然科学，它可以分为研究静止物体上的作用力（即静力平衡条件）的静力学和研究运动物体的动力学两大部分。动力学又可进而分为两个分支：运动学只研究物体的运动而不涉及使物体产生运动的力；动力学则探讨物体上的作用力及由此产生的运动之间的关系。

本书不考虑物体的变形，也不探讨物体受力后的变形趋势，这些问题属于流体动力学和变形体力学或材料力学所研究的范围。

力学中所使用的基本量是长度、时间和质量。在分析中所用到的一切其他变量都可以由此导出。为此，我们首先给出这些基本量的定义，再求得各导出量，最后以数学的形式来表示这些导出量之间的基本关系。借以获得这些基本关系的基本定律是众所周知的牛顿运动定律。它们实际上是以实验和对自然现象的观察为依据而作出的推论。

1.2 长度、时间和质量的基本单位

长度是测定位移或相对位置的尺度。在古代，人们用前臂（肘）作为长度的标准单位。由于各人的前臂长短不一，采用这样的定义显然会产生许多困难。随后，在 1793 年，法国人选用一根保存在巴黎、并受到严密监控的棒，以刻划在棒上的直线线段作为长度的标准单位。这根线段的长度被称为一米，它等于从赤道经过巴黎到北极的距离的一千万分之

一。1889年规定的米长标准是保存在法国瑟弗勒 (Sevre) 国际计量局的铂-铱合金棒上的两条细线 (在 0°C 时) 的间距。而现代的定义[⊖]则是: “米等于氪-86原子的 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射在真空中的 1650763.33 个波长的长度。”这个标准的重复精度据信可以达到 10^8 分之 2 , 但在日常工作中并不使用这个标准。国家标准试验研究所用直接干涉测量法标定的参考标准, 在一米之内的精度可以达到 10^7 分之一。这些参考标准都可以用来标定工业中的各种工作标准。

质量是度量物体内部质量的尺度。一千克的标准参考质量原器 (不是其重量或力) 是保存在巴黎的实心铂-铱圆柱体。这个标准参考质量是1889年第1届国际计量大会 (CGPM) 确定的。在比较不同的质量的物体时必须使用天平。

时间是度量事件连续性的尺度。最初定义的时间单位是秒, 它等于平均太阳日的 $1/86400$ 。而“平均太阳日”的定义则由天文学家去确定。但他们的测量结果表明, 由于地球旋转运动的不规则性, 用平均太阳日不可能得到要求的精度。使用这个早期定义的困难, 在于人们不可能采用和定义秒的时间间隔直接比较的方法来测定秒, 而必须通过长期的天文观测。为了更精确地定出时间的单位, 第11届国际计量大会 (1960年) 采纳了国际天文协会提出的、以回归年为计算依据的定义。然而实验表明, 以原子或分子在两个能级之间跃迁的时间间隔为根据的原子标准, 是可以在很高的精

⊖ 长度的这个定义是1960年第11届国际计量大会 (CGPM) 通过的, 有关这个定义的详细讨论, 可以参考美国国家标准局的“国际单位制 (SI)”, 特刊300号, 华盛顿美国政府印刷局文件管理部有售。

度下实现并重演的。考虑到在先进的国际单位制计量科学中，一个非常精确的时间单位（秒）是不可缺少的。第13届国际计量大会（1967年）确定对秒的定义更改如下：“秒是铯-133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9192631770个周期的持续时间”。

1.3 导出量——速度和加速度

运动学研究长度与时间之间的一般关系。在图1.1 a中，点P代表一个物体沿直线轨迹OS而运动。在某一瞬时 t_1 ，物体与固定参考点O之间有距离 S_1 ；在其后的瞬时 t_2 ，物体与点O有距离 S_2 。因而所考虑的时间间隔为 $t_2 - t_1$ ，并记为 Δt 。即 Δt 表示“时间间隔”。类似地，物体的位移是 $S_2 - S_1$ 或 ΔS 。

一个物体的速度被定义为其位置的变化率。物体在所考虑的时间间隔内的平均速度 v_{av} 可由位移除以时间间隔而得到。即

$$v_{av} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (1.1)$$

如果平均速度是在一极为短暂的时间间隔（即在给定的瞬间）内测定的，从而 Δt 趋近于零（ $\Delta t \rightarrow 0$ ），则此速度就称为瞬时速度 v ，并由 $\Delta S / \Delta t$ 在时刻 t ，取 Δt 趋于零时的极限（记作 dS/dt ）求出。

在数学上可以简短地表示为

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{d(S)}{dt} = \frac{dS}{dt} = \dot{S} \quad (1.2)$$

图1.1 b表示了这个关系。由图可见当 Δt 趋近于零时，瞬时速度 v 就是按时间 t 点绘的距离曲线的斜率。

物体的瞬时加速度被定义为速度的变化率。即

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{d(v)}{dt} = \frac{dv}{dt} = \dot{v} \quad (1.3)$$

由于 $v = dS/dt$, 所以

$$a = \frac{d^2 S}{dt^2} = \ddot{S} \quad (1.4)$$

图 1.1 c 表示了
这个关系。当 Δt 趋
近于零时, 瞬时加速
度就是按时间 t 点
绘的速度曲线的斜率。

1.4 牛顿运动 定律和导出量力

动力学研究有限
质量物体的运动规
律, 质点是这项研究
工作中的一个有用而
方便的概念。质点是
一个具有有限质量的
物体, 但是它的尺寸
和用来确定其位置或
运动的距离或长度相
比极其微小。例如, 在

研究地球围绕太阳运动时, 就可以把地球看作是一个质点。因为尽管地球的直径约为 $13 \times 10^6 \text{ m}$ (8000 mile), 但地球与太阳之间的距离却有大约 $150 \times 10^9 \text{ m}$ (93000000 mile)。

如果一个质点处于静止状态或以恒定的速度运动, 除非有外力作用其上, 它将持续保持这种状态。这就是牛顿第一

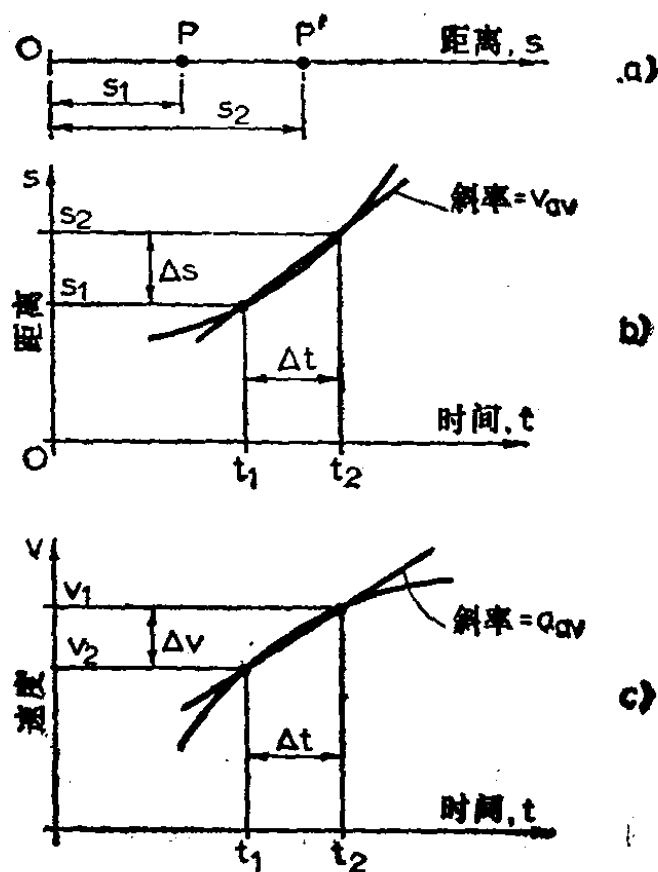


图1.1 直线运动中, 距离、
速度和时间的关系

运动定律。由此我们引入了力的概念。从直观上说，为使一个物体运动或静止，必须推动或拉住这个物体。这个推拉作用就是外界的作用力。

在牛顿第二运动定律中，力是用质量来定义的。第二定律的提法如下：“一个质点受到力的作用后，将以一与力成正比且有相同方向的加速度进行运动”。对于给定的质点，力 F 与加速度 a 的比值是一个常数。这个恒定的比值就是质点的质量 m 。

因此，我们有

$$\frac{F}{a} = m \quad (1.5)$$

或

$$F = m a \quad (1.6)$$

这就是牛顿第二运动定律的数学表达式。由此可以看出：第一定律乃是第二定律的一个特例。因为如果没有外力作用在质点上，质点将保持静止状态或继续以恒定的速度运动。力的单位是N，其定义为使1kg的质量获得 1m/s^2 的加速度所需的力。

牛顿第三运动定律表明两个物体之间的作用力和反作用力总是大小相等，方向相反，作用在一条直线上。这就是说，如果一个物体受到力的推动，那末物体将以一个等值反向的力推回来。

由于牛顿对天文学的兴趣，使他发表了万有引力定律^①。这个定律可以用来计算两个质点之间的相互引力（图1.2），并可用数学的形式表述如下：

① 这个定律是牛顿在开普勒（Kepler）发表的行星运动三定律的基础上得出的，而开普勒的定律则是根据蒂休·布拉埃（Tycho Brahe）对行星运动的观察资料推导出来的。

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \quad (1.7)$$

式中 F 是相互吸引力, m_1 和 m_2 是两个质点的质量; r 是质点之间的距离; G 是万有引力常数。

第一个用实验确定 G 值的科学家是亨利·卡文迪什(Henry Cavendish), 他在 1797 年测定了两个铅球之间的引力。现在我们确定的 G 值为 $6.67 \times 10^{-11} \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$ 。

可以用这个式子来计算地球表面的静止物体所受到的地心引力的大小。这个引力被定义

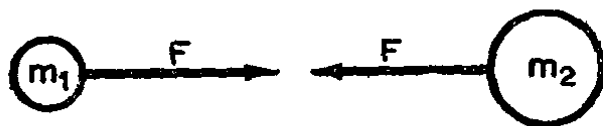


图1.2 两个质点之间的引力

为物体的重量 F_w 。在计算中可以把地球看作是一个具有相同质量 ($5.976 \times 10^{24} \text{kg}$) 且位于地球中心的质点。如果用地球的质量 m_e 表示 m_1 , 物体的质量 m 表示 m_2 , 并且用地球的半径 r_e (等于 $6.371 \times 10^6 \text{m}$) 表示 r , 我们将有

$$F_w = \left(\frac{Gm_e}{r_e^2} \right) m = 9.824 m \quad (1.8)$$

这就是说, 一个位于离地心为 $6.371 \times 10^6 \text{m}$ 的半径所构成的地球表面上的物体, 将受到由式 (1.8) 给出的地心引力的作用, 这个作用力就是物体的重量。数字 9.824 具有和加速度一样的单位, 它实际上就是这个物体在真空中 (没有空气阻力), 并且不受约束地向地心降落时的加速度。

这个加速度 (用符号 g 表示) 的大小是变化不定的, 因为地球并不是一个理想的球体。不过, 对于在地表纬度为 45° 处的物体所测定的值等于 9.807m/s^2 , 我们用它作为国际标准。因此,

$$F_w = mg \quad (1.9)$$

式中 $g = 9.807 \text{ m/s}^2$ 。

美国国会在 1866 年通过的一个法案中，规定一磅质量 (1lbm) 等于 0.4536kg。因为按照定义，1 磅力 (1lbf) 等于 1 磅质量在重力加速度等于 9.81 m/s^2 的地方所具有的重量，所以由式 (1.9) 可知：

$$1\text{lbf} = 0.4536(\text{kg}) \times 9.81(\text{m/s}^2) = 4.45 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

或

$$1\text{lbf} = 4.45 \text{ N}$$

1.5 国际单位制 (SI)

在 1960 年的国际计量大会上正式通过的 单位制叫国际单位制 (SI)。这个单位制已经为世界上 绝大多数国家所接受，目前也将被美国采纳。国际单位制在实用中非常方便，因为它消除了在方程中引入的换算因子和在其他单位制中出现的意义不明确的符号。它的主要量是已经介绍过的长度、质量、时间和一些导出量。

附录 I 汇总了本书中引用的各种力学量，其中也包括国际标准化组织 (ISO) 推荐的表示 这些量的符号。在国际单位制中，用词冠表示单位的倍数和分数。例如，千克中的千就代表 1000 或 10^3 。给牛加上这个词冠即为 千牛，表示 1000N。表 1.1 中给出了常用的词冠。但应注意：

表1.1 国际单位制 (SI) 的词头

量	因 数	词 头	词 头 符 号
1000000000	10^9	吉	G
1000000	10^6	兆	M
1000	10^3	千	K
0.001	10^{-3}	毫	m
0.000001	10^{-6}	微	μ
0.000000001	10^{-9}	纳	n