

第 1 章 自动累计

1.1 难得如此好管家 点点滴滴勤累加

——自动累计

自动化包括的内容很多，即使单从身边常见的实例上看，也五花八门、形形色色，从哪里说起呢？和居家过日子最有关系的莫过于计量了。特别是一段时间（例如一个月）里某种物质或能量总共消费了多少，这是要心中有数。柴、米、油、盐、酱、醋、茶哪样不需要计量？别以为这些都是鸡毛蒜皮不足挂齿的琐事，这可是培养勤俭持家和锻炼经济头脑的机会。有具体件数的东西好计量，便于用称重法计量的也好办，难计量的是水、燃气、电之类。以前吃井水或河水还可以按桶或罐计量，现在是自来水，龙头一拧哗哗直流，说你用了多少水根据是什么？这就要有公平合理的量具。这个量具显然不能再是桶或瓶瓶罐罐了，这个量具必须连接在管道上，能够精确快速而且自动地把某段时间里总共用了多少水统计出来，这就是我们常见的家用自来水表。

水表的用途是用来自动累计某一段时间里（通常是一个月）总共用了多少水，以便作为收费的依据，所以它是一种自动累计仪表。“累计”就是把过去一段时间里“积

累”的总量“统计”出来的意思。这种统计就是加法运算，把以前流过去的立方米数相加到一起就是累计。在这种仪表上看不出当时的瞬间流量是每秒多少立方米，只能读出曾经流过去的水一共有多少立方米。即使读表的时候水已经不流了，过去累计下来的数据依然存在，不会丢失。也就是说，它不单有进行“加法运算”的功能，还有“记忆”的功能。作为收费依据的自动累计仪表，记忆力是非常重要的，它不会把你已经消费的总量忘掉，否则就没法收费了。

对水来说，如果没有自动累计总消费量的仪表，还勉强可以用已知容积的桶或罐来计量，或用称重的办法计量。燃气的立方米数就没法量了，总不能用已知容积的塑料袋，去一袋一袋地计量吧。其实，只要在管道上装个燃气表，就能把某个时间里总共用了多少气累计出来，这就是家用燃气表。

水和燃气还算有形物质，电就更难计量了，它是看不见摸不着的，等你摸着也就被电着了。何况电费的收取并不单纯按电流的大小，也不单是按电压的高低，而是按电流、电压和用电时间三者的乘积来收费的。太复杂了。这怎么办？更得用专门的量具，这就是家用电度表。在电度表里有“乘法运算”功能、“加法运算”功能和“记忆”功能。

此外还有时间也是无形的，甚至有点抽象，幸而利用钟表计时是尽人皆知的常识，是最熟悉不过的了，我们不妨先从钟表对时间的自动累计谈起。

1.2 光阴胜似无价宝 日夜累计时分秒 ——计时钟表

古话流传到如今，
寸金难买寸光阴；
光阴本就无形迹，
何来长短论寸分？

以上这四句诗的前两句是劝戒后人不可浪费时间，后两句的意思是责怪古人不讲科学，光阴又不是长度，怎么能用寸来计量呢？初看似乎有点道理，但是且慢下结论，看看下文再说。

莫对古人有意见，
铜壶滴漏能示范；
水滴落处浮标起，
时间换成长度算。

嗨！还真是这么回事。我国古代计时用的铜壶滴漏，使水从高度不等的几个容器里依次滴下来，最后滴到最低的有浮标的容器里，根据浮标上的刻度也就是根据最低容器里的水位来读取时间。这样，就把无形的时间改换成有形的尺寸了。

不仅时间是如此，其他很多靠人的感官无法直接感受的物理量及化学量，或虽能感受但难以判断其大小的量，也都要依靠某些技术手段先变成感官能接受的量，然后才便于比较其大小，进行计量。这是常规仪器仪表的一

条普遍规律。比方说，电流表就是先把眼睛看不见的电流的大小变成容易观察的指针转角的大小，然后靠标尺上的数字读出测量结果。物体的重量虽然用手掂一掂也能初步估计有多重，但是很难估准，把它变成秤杆上的标记位置，就能读出重量了。还有更难靠感官衡量的，例如某种食品酸到什么程度，各人味觉不同，难以客观评测，用了酸度计，指针或数字一目了然，问题就迎刃而解。何况有时根本不能靠人的感官测试，硫酸你敢尝吗？

说到这里，也许有人会想，若是发明一种便携式咸度计和辣度计就好了，省得饭馆里的顾客与厨师争辩不清，如果大家都想办法，也许有一天真会出现。

闲话少说，书归正传。且说那铜壶滴漏最低容器里的水位，是由高处的水一滴一滴流下来，经过长时间的积累而形成的，所以铜壶滴漏的计时原理实质上就是水滴总数的自动累计。

大约与我国使用铜壶滴漏同时，在西方有了沙漏计时的办法。在一个葫芦形玻璃瓶里装半瓶细沙，把瓶子颠倒过来，让沙子经过瓶的细腰慢慢地漏下来，这种方法计时的实质是沙粒的自动累计。依我看，沙漏没有铜壶滴漏好，因为它没有刻度标尺不便读数。但是它小巧轻便，而且简单。

后来出现了机械式钟表，起初是靠重锤，后来多用发条提供动力，都是根据摆的等时性工作的。物理课上说过，已知摆长的单摆，在重力加速度恒定的情况下，其摆动周期是不变的，这叫做“等时性”。这个规律就成为机械式钟表的基础。

机械式钟表里有一个叫做“擒纵机构”的关键部件，它能把重锤或发条里储存的能量一点一点地施加到摆上，使摆不致因能量损耗而逐渐停下来；它又使钟表的指针一点一点地转动，从而将时间一秒一秒地指示出来。所以这类机械式钟表的计时原理，实质上就是机械摆动次数的累计。在手表里为了小巧紧凑，用带弹性“游丝”的摆轮代替单摆，游丝是个形似蚊香的螺旋弹簧。

所谓“擒纵机构”是由一个边缘上有一圈尖角的轮子，和一个与钟摆相连的马蹄铁形钩子组成的，如图 1.1 所示。这个轮子经过若干传动齿轮被重锤或发条驱动，它总想转动，但是因为旁边有个讨厌的钩子把轮缘上的尖角绊住了，它必需等钩子放开的时候才能转动。那讨厌的钩子和钟摆相连，钟摆每摆动一次，左侧的钩子就释放轮边上的一个尖角，让轮子转一个角度。但与此同时右侧的钩子又把下一个尖角挡住，不让它多转。如此反复不已，轮子始终不能痛痛快快地连续旋转，只能一点一点地转下去。不过，这个总在轮子边上绊腿的钩子也有一定的积极作用，每当它释放一个尖角的时候，就会因重锤或发条的力量顺势被推一把，于是通过钩子又间接给钟摆加一把力，免得钟摆停下来。就这样一绊一放地反复工作，钟表就滴滴嗒嗒地走下去。

在古典小说《三国演义》里有一段故事，说诸葛亮在和南方少数民族领袖孟获打仗时，屡次出奇制胜把孟获生擒，但对方不服。诸葛亮便运用攻心战术，明明知道孟获还要反叛却故意放他走，如此七擒七纵，终于使他心悦诚服。据此，人们生动地给上述机构命名为“擒纵机构”。

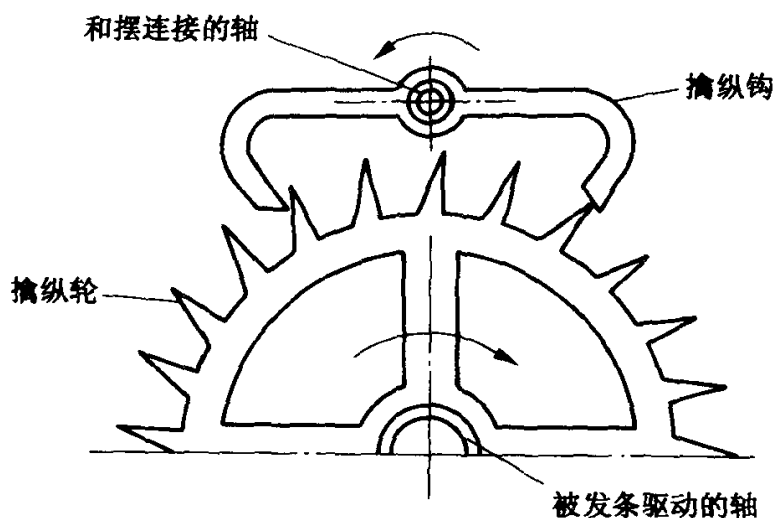


图 1.1 擒纵机构

据《科学技术史》上说，这个巧妙的机构还是我们中国人发明的呢。直到清朝，我国广东的钟表手艺人还造出了许多精美巧妙的自鸣钟，可惜后来的钟表制造技术却让外国人领先了。

现在流行的数字式钟表，不论是数字显示的或是带指针的，都是靠石英振荡元件的稳频特性工作的。用不着复杂的机件，最多不过有带动指针和日历的少数齿轮，所以价格低廉，又不需上发条，因此受到普遍欢迎。

电子线路里的振荡和钟表里的摆轮的机械振荡似乎迥然不同，但你若把电感元件看成惯性物体，就和钟表里的摆轮相当。把电容元件看成弹性物体，就和摆轮旁的游丝相当。这么一来岂不就本质上一样了吗。虽然石英振荡元件里并没有电感及电容，但是理论推导证明，它的作用机理和电感电容是一样的。

无论用什么样的振荡电路构成电子钟表，它实质上

是电振荡次数的累计。

1.3 叶轮带动小指针 用水多少记得真 —— 自来水表

你若掀开自来水表的保护盖，就会看到有沿圆弧排列着的好几个小指针，中央有个红色的小三角形，当龙头拧开有水在流动时，这个小三角就转动起来。至于那些小指针，无论水流不流都几乎纹丝不动。标度盘上还写着“ m^3 ”的字样，即立方米的意思。那就是说，这个表的读数的单位是立方米。但是水费是按用水总量的吨数计算的，不过因为每一立方米的水恰好是一吨重，所以连算都不用算，读数直接就是吨数。

水表的里面是什么样的？能不能打开看一看？这可不行，为了防止用户作弊，盖子上有铅封，不允许打开。那就看看图 1.2 所示拆开的零部件吧。

水表的内部结构从外向里可分为壳体、套筒、内芯三大件。壳体是生铁铸成的，水从进水口进来之后通到壳体的下部环形空间，这里叫做“下环室”。在这个环形空间的上面有“上环室”和出水口相通。

套筒的底部有个带有许多小孔的过滤网，进入水表的水里若有固体杂物就在这里滤除，以免妨碍转动或磨损表内的运动部件。套筒侧面有上下两排圆孔，孔的位置恰好与壳体的上下环室对着，显然，下排是进水孔，上排是出水孔。特别值得注意的是，这两排孔都是沿圆的切线方向斜着打的，其横断面如图 1.3 所示。而且上下两排孔

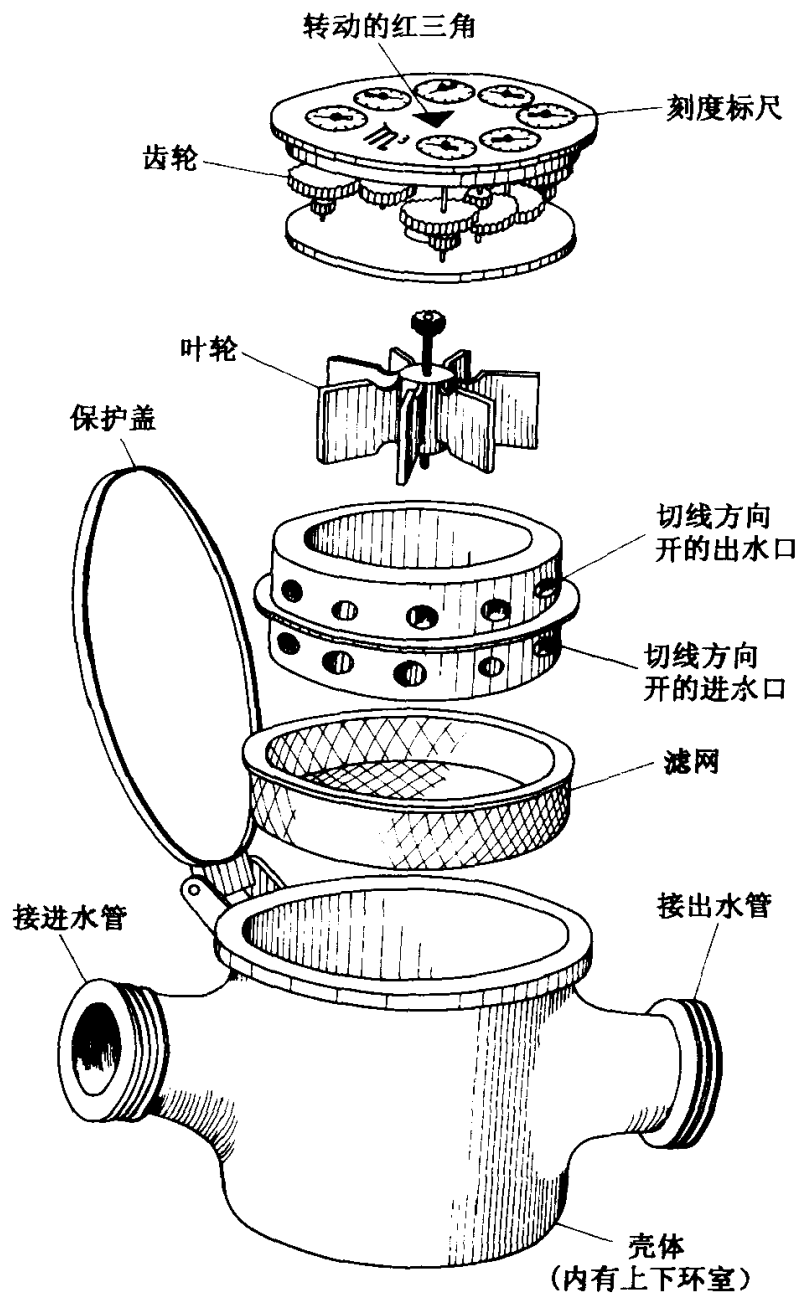


图 1.2 水表的零部件

的方向相反。水从下排孔沿切线方向流进去，势必形成旋

转的水流，这对于水表的工作是十分重要的。

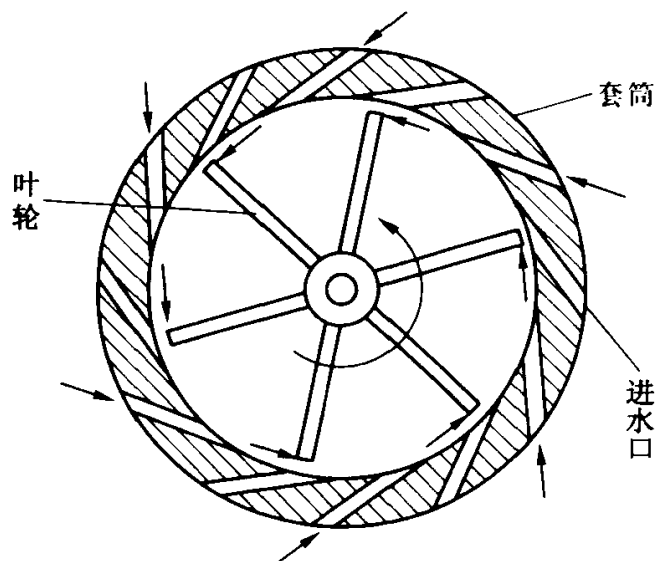


图 1.3 水表的进水口

再来看看内芯，内芯又分上、中、下三层，我们从玻璃窗看到的是上层，只有指针和刻度盘。其实最关键的是下层，这里面有个塑料轮，轮边上有许多塑料叶片，如图 1.4 叫做“叶轮”。

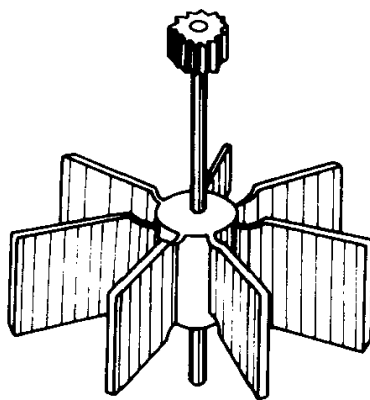


图 1.4 叶轮

叶轮所处的位置正好在套筒下层孔所形成的旋转流里，水流冲击轮周的叶片，产生转矩，使叶轮旋转起来。龙头开得越大，水流越急，叶轮就转得越快。

叶轮的轴垂直向上到达中层，轴上面有个小齿轮，用它和“十进计数齿轮”啮合，达到累计转数的目的。

“十进计数齿轮”的作用是每当个位数齿轮转十圈，十位数齿轮就转一圈。换句话说，个位数齿轮转一圈，十位数齿轮就转十分之一圈。个位数齿轮是主动者，靠它来带动十位数齿轮，把上面所说的传动关系用“传动比”的数据来描述，这个数据就是 0.1。

要想设计一对齿轮，使它们的传动比恰好是 0.1 只要把主动齿轮和被动齿轮两者的齿数比值设计成 0.1 就行了。比如主动齿轮有 10 个齿，被动齿轮就应该有 100 个齿。看起来这不是很简单的事吗？可是如果真的这么设计的话你就会发现读起数来非常不方便，因为两个齿轮互相啮合时，两轮的转动方向是相反的。个位数指针若顺时针转的话，十位数指针就成了反时针转。于是刻度盘上的数字就有不同的顺序，很容易读错。

怎么办呢？只要在中间加一对齿轮把旋转方向掉换过来就行了。因此，实际采用的方案是每一级十进位用两对齿轮完成，一对传动比是 9 : 30，另一对是 10 : 30，这两对串联在一起，总的传动比就是这两个比值的乘积，即 0.099999，完全可以近似地看成是 0.1。

照这样看来，如果要读七位数（小数点前读四位是黑刻度，小数点后读三位是红刻度），就得用 12 对齿轮。再加上别的一些用途，在这个中层小小的空间里要挤进 18

根轴和 34 个齿轮，也可算是高密度安装了。真没想到，一个自来水表里居然还有这么多齿轮呢！

拿这个有七位读数的水表来看，最高位刻度旁写着 $\times 1000$ ，即每一个数代表一吨；下面依次为 $\times 100$ ， $\times 10$ ……直到最末一位读数旁写着 $\times 0.001$ ，即一千克。这个表最多能累计到多少吨呢？那就是 9999.999 吨，也就是一万吨，再走就要“溢出”成零了。但是一般家庭每月最多用几十吨水，如果读数离一万吨还远，你根本用不着担心溢出。

从所有的指针全指 0 开始，必须等最低位 ($\times 0.001$) 的指针转了 10^6 ，即一百万圈之后，才能出现各指针全指向 9 的状态。而最低位指针的轴也不是直接由叶轮带动，它是通过传动比为 0.0034 的齿轮带动的。因此，每用一吨水叶轮要转 29423.88，即将近三万圈。从叶轮到最高位 ($\times 1000$) 的总传动比就更吓人了，居然达到 1 比 2 亿 9 千 4 百多万。也就是说，你若是用手拨动叶轮，想让最高位指针转一圈的话，你得把叶轮拨动 2 亿 9 千 4 百多万圈。就算你每秒钟转一圈，要不吃不睡一连转上九年零四个月呢！真是“不说不知道，世界真奇妙”！

既然有这么多轴和齿轮，转起来岂不是很费力吗？这倒不见得，因为叶轮是主动的，整体是个减速系统，带动减速系统不费力，但是要多转很多圈。反之，带动加速系统转的圈数少，可就要费很大的力。你能说出道理何在吗？

还有一点值得注意，水表里所有的轴和齿轮几乎全是塑料的，这不光是为了防锈，也为了减轻重量，如果轴

和齿轮的密度跟水一样大（比重等于 1），那就能悬浮在水里，转动起来岂不更省力吗。

水表在检验以后，加了铅封就不能随便打开了。但是里边的工作情况又看不见，怎么知道它的工作是不是正常呢？虽然从上面的玻璃窗能看见指针，但是在一般用水量不很大的情况下各个指针都转得很慢，难以看出它们是不是在转动。为了便于观察，将靠近叶轮的某个轴做长些，让它一直穿过刻度盘到达上层。并且在轴的上端装一个红色小三角，它没有别的用处，仅供观察，看叶轮是否处于灵活转动的状态。如果龙头稍开一点就能使小三角标记飞快地转动，那就说明工作正常。

你也许认为自来水表这东西没什么新技术，无非是些叶轮和齿轮类的机械零件，现在都进入 21 世纪了，为什么不改用电子技术呢？用电子技术甚至用计算机技术自动累计流量的办法并不是没有，都用到工业或科研上去了。因为一般家用水表要求简单价廉，能在潮湿环境里长期使用而无需维护，而且不用电源，停电也不影响工作。所以上面所介绍的这种水表受到家家户户的欢迎，不单我国在使用，全世界也都广泛使用着这种表。

关于水表的介绍结束之前，不妨小结几句顺口溜如下：

龙头一拧水自来，男女老少乐开怀；
人人须知水宝贵，点点滴滴莫浪费。
要知用水共多少，家家户户装水表；
表里有个塑料轮，轮边叶片分布匀。

水流冲动叶轮转，流速决定快和慢；
齿轮带动小指针，十进读数按位分。
内部零件看不见，只要红色三角转；
单位本是立方米，当成吨数也合理。

1.4 你家用了多少气 薄膜风箱来统计 ——燃气表

使用天然气或管道煤气的人家，都要有自动累计用气量的燃气表，并按照每月消耗燃气的立方米数缴费。

1. 滚轮计数器

从燃气表的外面只能看到小玻璃窗里有个带数码的滚轮，滚轮上也有七位数字，小数点前四位黑色，后三位红色。用气的时候能看到最低位的数字轮慢悠悠地转动。当最低位从 0 转到 9 时，它前面的那一位数字轮就转一下，使读数增加一个数，这就是进位。显然，这也是一种十进位的计数装置，叫“滚轮计数器”。其外形如图 1.5。

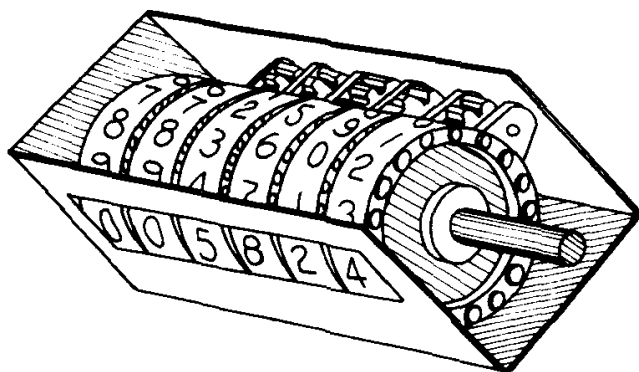


图 1.5 滚轮计数器

滚轮的外表虽然光溜溜的只有数字，实际上每一位数字的两侧都有一圈齿（有的是藏在数字轮里边的），相邻的两位旁边还有一个小齿轮和两个数字轮啮合。但是小齿轮的形状特殊，平时是打滑的，只在进位的时候带动比它高的一位一起转。虽然原理不算复杂，说起来却一言难尽，而且不容易用图形描述它的动作。考虑到它只不过是燃气表里的一个附件，现在把它放在一边不说也罢。

滚轮计数器也常用在其他需要累计的仪表里，比如家用电度表、汽车里程表、加油站的油量表等。

滚轮计数器也是靠齿轮进位的，但是它比水表里用的那种由许多小指针构成的齿轮计数器先进一些。首先，它的尺寸小，更为紧凑；第二，它进位时前一位的动作是一步到位，比如从 3 到 4 的进位时不会出现处于 3 和 4 之间这种“不三不四”的局面。而水表里的齿轮计数器就不然，它的每个指针都是连续转动的，常常指着两数之间。第三，滚轮式读数也方便，在小小的窗口里多位数字紧靠在一起，一目了然。

但是滚轮计数器也不是尽善尽美的，它有一个最大的缺点使它不能用到水表里去，就是当它进位的时候要同时带动高位轮一起转，所以要克服很大的摩擦阻力才转得动，尤其是有好几个 9 同时变成 0 的时候阻力更大。如果用在水表里，这时叶轮肯定转不动了。

那么你也许会问，既然有这个缺点，为什么在燃气表里却能用呢？这个问题问得好，听我告诉你燃气表的特殊结构吧。

2. 气缸、活塞与风箱

燃气表里面是怎么工作的当然外观看不出来，又不许随便拆开，壳体也是有铅封的。这倒不仅是为了防止作弊，也是怕燃气泄漏出来引起事故。因为燃气易燃、易爆特别危险，你可千万别出于好奇而乱动它。想要知道它的工作原理也不难，只需仔细看下面的介绍。

为了克服管道、阀门、仪表等的阻力，把燃气顺畅地送到每家每户的灶具上，并且要燃烧得足够旺盛，燃气在进到各家之前，在管道里时是有一定压力的。工程上通常说的“压力”就是物理课里讲的“压强”。这个压力也不能太大，以免泄漏出来发生危险。一般情况下燃气压力在 $100\text{mmH}_2\text{O}\sim 200\text{mmH}_2\text{O}$ 之间。

此处的 mmH_2O 代表压力的一种计量单位，叫做“毫米水柱”。每一个毫米水柱的压力，相当于横断面为 1cm^2 而高度为 1mm 的水柱重量（仅仅是 0.1g ）压在 1cm^2 的面积上一样。所以 $100\text{mmH}_2\text{O}\sim 200\text{mmH}_2\text{O}$ 的压力就等于每一个平方厘米面积上有 $10\text{g}\sim 20\text{g}$ 的力。虽然看起来这个力不算大，但还不能让燃气把全部压力用在喷火上，因为直接用这个压力燃烧的话，足够把火焰喷出几尺高，很有可能把你的头发烧焦。

不过你也别害怕，有了燃气表之后，完全能避免这种事故，因为燃气通过表以后压力就减小了很多。压力是怎么损失掉的呢？是燃气对外做功的结果。

大家都知道，古老的火车头是用蒸汽机工作的，高压蒸汽推动汽缸里的活塞，通过连杆和曲柄使车轮旋转起

来，把长长的一列火车拉着飞奔。为什么它有那么大的力气呢？除了蒸汽压力高之外，还利用了活塞面积大的因素。比方说，蒸汽压力是 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ ，活塞面积是 1000cm^2 ，那么，活塞杆上就会产生 10t （吨）的推力。在蒸汽机里做完功的蒸汽直接排到大气，就没有压力了。把同样的原理用在燃气上也可以靠燃气的压力对外做功，不过并不是让它拉火车，而是让它推动滚轮计数器罢了。虽然说燃气的压力比起高压蒸汽来小多了，但是推动滚轮计数器更比拉火车容易多了，可以说不费吹灰之力。这真是一举两得，既降低了燃气压力，免得火苗太高，又能自动累计耗气量，使得收费有据。这个主意真妙！

具体怎么做呢？难道在燃气表里也要装像火车头那样的汽缸、活塞吗？这倒不必了，可以把结构大大地简化一番，用“风箱”代替汽缸，用“薄膜”代替活塞。所谓“风箱”不过是用金属做成的空盒子而已，盒子由两半拼起来，中间夹一张柔软而不透气的薄膜，像图 1.6 所画的那样。

薄膜的中间部分有金属片夹着，是硬梆梆不能弯曲的“硬芯”，但周围的薄膜十分柔软，使硬芯可以在盒子里左右运动。图中每一个六角形代表一个风箱，5 和 7 代表薄膜，6 和 8 代表硬芯。薄膜把盒内空间一分为二，各形成两个“气室”即图中的 I、II、III、IV。每个气室都有通气口，可经过这个口进气或排气。当左室的口进气，右室的口排气时，燃气的压力作用在薄膜上，使硬芯向右运动。反之，若右边进气，左边排气时，硬芯就向左运动。可见，如果把盒子看成气缸，把薄膜和硬芯看成活塞，这不就和

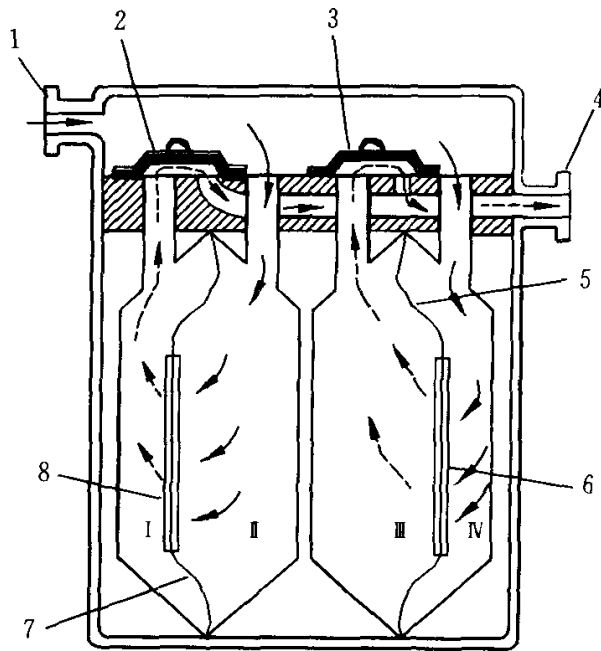


图 1.6 燃气表的风箱和滑阀

蒸汽机一样了吗？

你也许要问，当薄膜和硬芯运动到最左边或最右边，到了头走不动了，还怎么办？其实这问题不难解决，只要看看蒸汽机是怎么连续转动的，从没听说哪列火车因为活塞走到头动不了了请旅客下车帮着推的吧？

原来蒸汽机的活塞不仅带动车轮，还同时带动进、排汽的阀门，使蒸汽轮番从汽缸的两端进入，使之循环不已。更重要的是，火车头的左右两侧各有一台蒸汽机，它们的曲柄相差 90° ，也就是故意让两个活塞的动作差半步。换句话说，当左边的活塞运动到头使不上劲的时候，右边的活塞正好处在汽缸的中间是出力最大的时候，这样一来，随时随地启动，永远不会出现动不了的状况。