

# 诠释潮汐现象

应发宝 曹玉红 郑水珍



## 一、潮汐及其成因

潮汐是海水的一种周期性涨落运动,“潮者,据朝来也;汐者,言夕至也”(葛洪,公元 281~361,东晋),即一昼夜中两次涨起、两次跌落。白天上涨的叫做“潮”,晚上上涨的叫做“汐”,合称“潮汐”。在潮汐涨落的每一周期内,当水位上涨到最高位置时,叫做高潮;当水位下降到最低位置时,叫做低潮。相邻高潮与低潮的水位差叫做潮差。从低潮到高潮的过程中,水位逐渐上升,叫做涨潮;从高潮到低潮的过程中,水位逐渐下降,叫做落潮。

我国钱塘江入海口就是世界两大观潮胜地之一(另一为亚马逊河北河口),惊心动魄的自然界景观很早就引起人们的关注。中国公元前 2 世纪早期的文献已记载月望(满月)之日十分壮观的海潮(枚乘《七发》,公元前 140)。东汉王充在《论衡》中写道“涛之起也,随月盛衰,大小、满损不齐同”,指出潮汐与月球的依赖关系。封演的《见闻记》精确地记述了涨潮时间的逐日变化。其后更有余靖、张君房、燕肃、沈括、郭守敬等人对潮汐观测的精确描述。李约瑟(Joseph Heedham, 1900~1995)曾说:“在近代以前,中国对潮汐现象的了解与兴趣,总的来说多于欧洲”。

近代潮汐的研究,是利用牛顿提出的万有引力定律,后又经伯努利、欧拉及拉普拉斯等人的工作而趋于完善。20 世纪以来,大型电子计算机的应用使潮汐的研究结合实际海陆分布、深海、浅海等不同因素,数据更加精确。根据牛顿的理论分析,潮汐现象是由于太阳、月球的引力在地球上分布的差异产生的。

月球引力对海洋潮汐的影响 如图 1 所示,设  $C$  为地心、 $M$  为月球球心。月球与地球构成地月引力系统,可近似认为二者是以其公共质心  $C$  为圆心做匀速圆周运动,且地球、月球、公共质心始终都在同一直线上。就地月系统来说,存在着两种运动,即地月系统绕其公共质心  $C$  的匀速圆周运动和地球绕自转轴(后称为地轴)的自转运动。

在地球自转运动时,地球表面上任一水质点都

受到地心引力和地球自转产生的向心力的作用。但对于地球上每一点来说,其大小和作用方向都是不变的,所以通常都被包括在重力的概念之中,它们的作用只决定着地球的理论状态,而对潮汐现象没有影响。故在引潮力分析中,可假定地球是不自转的。

图 1  $C$  和  $M$  表示地心和月心,  $C$  为地月质心,水随  $C$  绕  $C$  平动

在研究地月系统绕其公共质心  $C$  的圆周运动时,地球表面任一点都受月球的引力和地月系统绕公共质心  $C$  运动所需的向心力作用。由于地球是一个刚体,所以当地心  $C$  在绕地月系统的公共质心  $C$  进行圆周运动时,地球上其他各点并不是都绕地月公共质心旋转的,而是以相等的半径( $CC$ )、相同的速度作平行移动。即整个地球是在平动,而不是转动。因此,地球上任一质点由于绕公共质心  $C$  运动所需的向心力大小都相等,也就等于地心处相等质量质点绕公共质心  $C$  运动所需的向心力。而地心处的质点绕公共质心  $C$  运动所需的向心力恰好又与月球对它的万有引力相等(万有引力提供向心力),从而地面上任一质点由于绕公共质心  $C$  运动所需的向心力大小,也就等于月球对地心处具有相同质量质点的引力大小,其方向在各地均都与月球对地心处的引力方向相同,这个力用  $f_c$  表示,如图 2(a) 所示。这是地球平动的结果。

只有这样才能保证地球上的每一个质点都随同地球中心同步绕公共质心  $C$  做圆周运动。否则,地球将会被不同方向和大小的月球引力所分裂而不再是一个整体,这个力用  $f$  表示,如图 2(b) 所示。引力  $f$  产生两种效果。一个作用是使诸单位质量水获得各自以  $CC$  为半径作圆周运动的向心加速度;根据前文可知,此力等于月球作用于地心处单位质量物质的力  $f_c$ 。另一作用就是产生月球潮汐力  $F$ 。故月球引潮力定义为:地球表面单位质量体元所受月球引力  $f$  与地心处单位质量物质引力  $f_c$ (平均引

力)的矢量差,即

$$F = f - f_c。$$

其中,  $f_c$  显然等于  $GM/d^2$ ,  $G$ 、 $M$  和  $d$  分别表示万有引力常量、月球的质量和地心 - 月心距离。地表各处引潮力如图 2(c) 所示。图 2(d) 是以图 2(c) 中的 P 点为例,表明月球引力以及向心力和引潮力间的关系。但各地水质点所受月球对它的引力大小都不相等,因此各地水质点的引潮力是不相同的。现在参考图 3,计算位于地面 P 处单位体元物质所受引潮力,将该力沿径向  $V$  和切向  $H$  投影,得

$$F_V = f_V - f_{cV} = GM \cos(\theta + \phi) / l^2 - GM \cos \theta / d^2,$$

$$F_H = f_H - f_{cH} = GM \sin(\theta + \phi) / l^2 - GM \sin \theta / d^2。$$

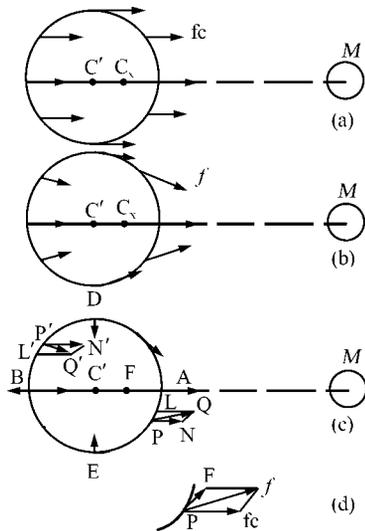


图 2 引潮力形成的图示

(a) 单位质量水或物体受到的向心力, (b) 单位质量物体在地面各处受到月球的引力, (c) 单位质量物体在地面各处受到的引潮力, (d) 用矢量差求引潮力

其中, 竖直力  $F_V$  使海水“涨起、跌落”; 而沿地面的水平分量  $F_H$  造成海水的“潮流”。如图 2(c), 我们计算离月球最近处的 A 点及离月球最远的 B 点的引潮力。两处单位质量物体所受万有引力与向心力在同一直线上, 取地心指向月球心为坐标  $OX$ , 在式 (1) 中,  $\theta + \phi = 0$ ,  $l = d - R$ ,  $R$  为地球半径, 引潮力为  $F_{AX} = GM / (d - R)^2 - GM / d^2 = GM [d^2 - (d - R)^2] / (d - R)^2 d^2 = GM (2d - R) R / (d - R)^2 d^2$ 。由于地月距离远大于地球半径, 所以  $2d - R \approx 2d$ ,  $d - R \approx d$ , 所以

$$F_{AX} = 2GM R / d^3。$$

同理, B 点处引潮力为

$$F_{BX} = GM / (d + R)^2 - GM / d^2 = -2GM R / d^3。$$

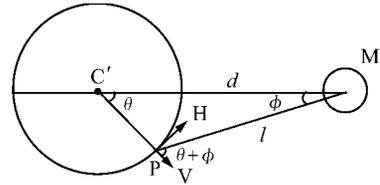


图 3 图中 Z 轴为地面 P 处的竖直方向, PH 则在水平面内

由此可见 (如图 4 所示), A、B 两垂点处引潮力大小相等, 都背离地心向“上”, 海水在引潮力作用下有拉起趋势而“涨起”。在点 A 处, 引潮力 (潮水) 方向与月球引力方向一致, 故称顺潮; 在点 B 处, 引潮力 (潮水) 方向与月球引力方向相反, 故称对潮。在 D、E 两处, 由于  $F_H$  与  $F_V$  相比微乎其微, 故引潮力相等且指向地心向“下”, 迫使海水有下压趋势而“跌落”, 产生落潮, 因而形成了潮汐椭圆, 使得地球表面的海水成一椭球, 且椭球的长轴总与地球球心、月球球心的连线重合。考虑到地球的自转, 这样的表面形状会逆着地球自转方向相对地球表面移动, 造成同一地点每日出现涨落两次的潮汐现象。

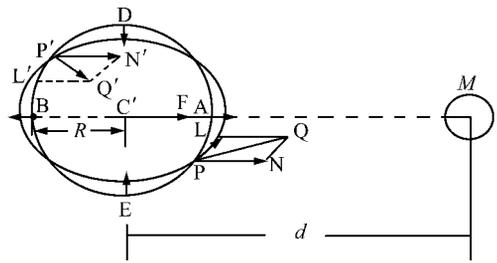


图 4

由以上分析可知, 潮汐的本质是由于地球各处所受天体引力不均匀而形成的, 这种不均匀常用“引力梯度”描述, 故称潮汐源于引力梯度。

太阳引力对海洋潮汐的影响 在一般情况下, 讨论地球绕太阳公转运动时, 由于日 - 地距离比地球半径大得太多, 所以把地球看作一个质点。但当我们分析太阳引力在地球上的分布和与其有关的潮汐现象时, 必须考虑地球的大小和形状。用同样的方法可以讨论出太阳的引潮力定义为: 地球表面单位质量体元所受太阳实际引力  $f$  与地心处单位质量物质引力  $f_c$  (平均引力) 的矢量差, 即  $F = f - f_c$ ,  $F$ 、 $f_c$  和  $f$  分别表示太阳引潮力、向心力和实际引力。法国数学家拉普拉斯 (1749 ~ 1827) 在《宇宙体系论》中曾有一段有关论述: “设想在太阳正下面的地上有一滴水, 它将比地心处受到更大的引力, 因此这滴水分子有离开地面的倾向, 可是它为其重

力所维系使这种倾向减小。半天(注:指12小时)以后这滴水正好位于同太阳相对的地方,在那里它受到的引力比地心处小,因此地面有离开它的倾向,但水分子的重力维系着它,使它的重力仍为太阳的引力所减小”。这段话清楚地表明,地表A、B两处相对方向的两滴水,由于受到太阳方向的引力,都有离心向“上”的趋势。同理:在D、E两处,引潮力几乎指向地心。地球表面附近各处引潮力连续过渡使海水表面成椭球状(如图4所示)。

## 二、潮汐的变化规律(潮汐的周期性)

由于引潮力与天体和地球的周期性变化规律有关,因而潮汐也具有周期性变化。

**潮汐的日变** 当只考虑天文因素(月球)的影响时,潮汐的日变有如下规律:当月球赤纬为零度时,即月球在地球赤道平面内时,海面在一个昼夜将发生两次高潮和两次低潮。两次高潮与两次低潮的时间间隔为12小时25分钟,涨落潮时间各为6小时12.25分钟,而且潮差相等。如图4所示,此时近月点A、远月点B均处于高潮位,点C处于低潮位。因为月球公转角速度仅为地球自转角速度的 $1/30$ ,所以在一昼夜内可简单地认为月球静止不动,即椭球相对于月球静止,只有地球的自转,则地球赤道面上的各点将依次经过B、D、A、E点。一昼夜地球上各点将出现两次高潮和低潮,且潮汐高度从赤道向两极递减,并与赤道对称。当月球赤纬不为零时,地球上各点的潮汐类型和潮差有所不同,但分析方法与上面相同。

**潮汐的月变** 潮汐的月变有两种,一种是半月周期潮,另一种是月周期潮。半月周期潮是由月、日、地三者所处位置不同而产生的。当朔、望月(农历初一、十五)时,月、日、地三个天体的中心大致位于同一直线上。如图5所示,由于月球和太阳的引潮力叠加,因此,它们所合成的引潮力在一个月之内最大,所以潮汐现象特别明显,高潮特高、低潮特低、潮差最大,故称为大潮。“初一、十五涨大潮”就是这个道理。它的变化周期为半个月。当月相处于上、下弦(即初八、二十三)时,太阳、月球、地球三者的位置形成直角,月、日的引潮力相互抵消一部分(因月球而生的涨潮被因太阳而生的落潮部分抵消),故这时合成的引潮力最小,此时高潮不高、低潮不低、潮差最小,称为小潮。它的周期也是半个月。因此在一般情况下,每个朔望月有两次大潮、两次小潮,每

个太阴日有两次涨潮、两次落潮。月周期潮,是由月球绕地球旋转产生的。当月球运行到近地点时,引潮力要大一些,因此潮差也要大一些,这时所发生的潮汐称为近地潮。当月球运行到远地点时,引潮力和潮差都要小一些,这时所发生的潮汐,称为远地潮,它们的变化周期为一个月,故称为月周期潮。

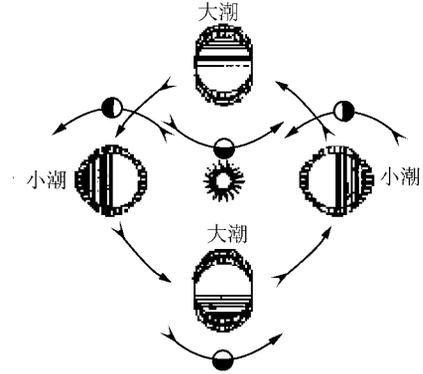


图5

**潮汐的年变** 地球绕太阳公转,当地球运行到近日点时产生的潮汐,要比远日点产生的潮汐大10%左右。它的变化周期为1年。多年内月球的轨道在其长轴方向上不断地变化着,近地点也在不停地向东移动,其周期约为8.85年,因此潮汐也有8.85年的长周期变化。此外,由于黄白(黄指黄道,地球绕太阳的公转轨道;白指白道,月球绕地球的公转轨道)交点的不断移动,其周期约为18.61年,故潮汐还有18.61年的长周期变化。

**潮汐受其他因素的影响变化(自然因素)** 地球上的潮汐变化除了与天文因素有关,还受气流、洋流、海水深度和沿岸地形等多种因素影响。如加拿大芬地湾和地中海都在同一纬度上,但前者在世界上以潮差最大而著称,其潮差高达19.6米,而后者潮差还不到40厘米。又如北部湾和墨西哥沿岸一些港口同在北回归线附近,应属于每天两涨两落的半日潮区,然而那里却出现了一涨一落的全日潮。世界上一些喇叭形河口区,由于受地理形势的影响,常出现涌潮或暴涨潮(由于河槽变窄,河底迅速升高,大量的水拥入河道,潮波的能量高度集中,使潮峰传播速度大于潮谷传播速度,当潮峰追上潮谷时,潮波前坡壁立,波顶倒卷而破碎,水位暴涨,流速迅疾,即出现波涛澎湃的涌潮)。这些地区历史上的最大潮差曾达8.93米。再如理论上的大潮应该出现在朔日和望日,但实际上却要延迟1~3天。每天的高潮应该出现在月球上中天和下中天时刻,但实际

上,高潮到来的时刻往往要推迟几个小时。

### 三、产生潮汐的动力 ——

#### 引潮力与天体间的万有引力的差别

首先,潮汐现象的成因,不是天体引力本身,而是天体引力在地球上的不均匀分布造成的(用引潮力表示)。如果地球是质点,地球上就无所谓受力不均的问题,也就无所谓潮汐现象。事实上,地球是一个平均半径为 6371 千米的巨大球体。球体的不同部分,由于对天体的距离和方向各不相同,受到大小和方向不同的引力。在这样的引力作用下,地球由正球体变成橄榄球体。地球上所受天体引力分布不均,是地球产生潮汐现象的直接原因。根据受力分析,实际引力可分为平均引力(地心处单位质量物质引力)和引潮力(如图 2(d)所示)。前者是天体相互绕转的原因,后者是地球潮汐变形的原因。天体的相互绕转和地球的潮汐变形,是天体引力的双重效果。因此,天体的引力和它的一个分力——引潮力,是合力与分力的关系,遵循力的平行四边形定则。

其次,天体潮汐现象的动力——引潮力比天体引力小得多。在地球的正反垂点 A 和 B,见图 2(c),其单位质量体元所受天体引潮力最大,为  $F = F_{AX} = 2GM/R/d^3 = F_{BX} = (GM/d^2) \times (2R/d)$ 。而天体对地心单位质量物质引力大小为  $F_0 = GM/d^2$ ,因此  $F_0/F = 1/2(R/d)$ 。因月地距离( $d_{\text{月地}}$ )是地球半径( $R$ )的 60 倍;日地距离( $d_{\text{日地}}$ )是地球半径的 23400 倍,故正反垂点所受的月球引力和引潮力之比为 30:1;所受的太阳引力和引潮力之比为 11700:1。毫无疑问,对于月球或太阳来说,引力和引潮力大小悬殊是理所当然的。因此,从它们的大小来看,引力和引潮力也是有区别的。

第三,太阳引力大于月球引力,而月球的引潮力大于太阳的引潮力。太阳、月球对地球球心处单位质量的引力决定于  $GM/d^2$ ;而两者对地球正、反垂点的引潮力决定于  $2GM/R/d^3$ 。因此,太阳和月球的引力之比为  $f_{\text{日}}/f_{\text{月}} = (M_{\text{日}}d_{\text{月地}}^2)/(M_{\text{月}}d_{\text{日地}}^2) = 288:1$ ;太阳和月球的引潮力之比为:  $F_{A\text{日}}/F_{A\text{月}} = (M_{\text{日}}d_{\text{月地}}^3)/(M_{\text{月}}d_{\text{日地}}^3) = 1/2.2$ 。这就是说,太阳对于地球的引力远远大于月球的引力;反之,月球对于地球的引潮力却比太阳的引潮力大两倍多,因此,由月球造成的潮汐——太阴潮是主体;由太阳引潮力造成的潮汐——太阳潮是陪衬。地球上的潮涨潮落正是它们两者合成的结果。

### 四、潮汐对地月系的影响

潮汐能把巨大的船只推向上游、能将坚固的海堤冲垮。根据能量的转化与守恒原理知,这是由消耗地球自转的能量得来的。潮峰总是逆着地球自转的方向自东向西推赶,潮水必然与海底发生磨擦,损耗地球自转能量,减慢地球自转速度,从而使地球上的“日”逐渐变长。由于海水有滞性,所以地球潮汐形变的产生总是被推迟。这样,高潮的潮峰并不正好对着和背着月球,而是如图 6 所示,有一定角度的偏转。潮峰延迟,必然产生一对与地球自转方向相反的力偶  $a$  和  $b$ ,它对地球的自转起着经常的减缓作用。地球自转减慢速度非常微小,以至长久以来人们一直把地球自转看成完美和谐的匀速圆周运动,并以此作为计时的基准。直到 200 年前德国哲学家和天文学家康德提出潮汐摩擦理论,他认为月球公转加速的现象是地球自转长期减慢引起的。

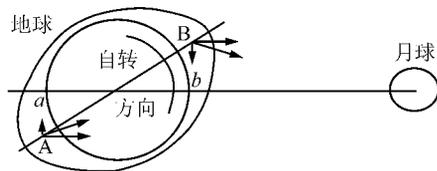


图 6

这种现象可以运用物理学中旋转物体的角动量守恒定律来解释:在外界对物体产生的合力矩为零时,物体的转动惯量  $J$  和角速度  $\omega$  的乘积保持不变,即  $J\omega$  是恒量。式中转动惯量  $J$  为表征转动物体惯性的物理量,它由转动物体的质量、质量分布及转动轴位置决定。若物体质量和转轴的位置一定,而质量分布发生改变,转动惯量则会发生改变。如果质量向转轴远离,转动惯量  $J$  就会增大,则根据  $J\omega$  是恒量可得,物体旋转角速度会减小。所以,花样滑冰运动员在旋转过程中,将手臂和腿收拢时会引起转动惯量  $J$  减小,从而使旋转角速度  $\omega$  加快。对于潮汐,海水质量远离地心,会使地球的转动惯量变大,地球自转速度会略有减慢,地球自转周期  $T$  会变长(一天的时间  $T = 2\pi/\omega$ ),即每天时间会变长,但变化很小。直到本世纪 30 年代发明了走时非常稳定准确的石英钟,才通过实验测出地球自转速率的细微变化。

目前认为,地球自转长期减慢的速度大约是每 100 年自转周期增长 1~2 毫秒(一般取 0.0016 秒)。科学家通过近些年对古代珊瑚化石的研究,还发现古时候的 1 天比现在短得多。珊瑚在生长过程

中,每天分泌的碳酸钙,在其躯体上留下一条条宛如树木年轮一样的日纹。人们惊奇地发现,6500 万年前珊瑚化石上的每个年带中有 376 条日纹,4 亿年前有 400 条日纹,这表明那些年代的 1 年分别是 376 天和 400 天——这现代推算的数值基本一致。

另外,引潮力不但对海水,对地球大气层乃至地壳都有作用,形成“大气潮”“固体潮”。由于引潮力将本是球形的星体拉成长球形,如超过一定限度就有可能被拉断。休梅克-列维 9 号彗星就是在木星引潮力作用下解体的。

### 五、潮汐能

潮汐能主要来自海洋潮汐摩擦作用消耗的地球自转动能。设地球的自转动能  $E_K = C/T^2$ , 式中  $T = 8.64 \times 10^4$  秒;  $C = 1.65 \times 10^{30}$  焦耳·秒,为一常数。据天文测算,地球自转周期大约每 100 万年增加 16 秒,据此估算潮汐的功率:100 万年 ( $t = 1 \times 10^6$  年 =  $3.15 \times 10^{13}$  秒)内,地球自转周期增加量  $\Delta T = 16$  秒。在  $T$  时间之前,地球的转动动能  $E_{K_1} = C/T^2$ ;经过  $T$  时间之后,地球的自转动能  $E_{K_2} = C/(T +$

$T)^2$ 。地球减少的动能  $E_K = E_{K_1} - E_{K_2} = C[2T \cdot T + (T)^2]/[T^4 + 2T^3 \cdot T + T^2(T)^2]$ 。由于  $T \gg \Delta T$ ,  $2T \cdot \Delta T \gg (\Delta T)^2$ ,  $T^4 \gg 2T^3 \cdot \Delta T + T^2(\Delta T)^2$ , 所以  $E_K \approx (2C \cdot \Delta T)/T^3 = 8.2 \times 10^{25}$  焦耳。潮汐摩擦功率  $P = W/t = 2.6 \times 10^{12}$  瓦。

如此巨大的潮汐功率,说明潮汐能是一种高效、无污染、可再生的资源。为此,可合理选择海湾拦海筑坝,建立潮汐发电站,充分利用每一次涨潮和落潮后产生的水位差而放水发电。如图 7(b),落潮时,堵住通道,当潮落至最低点时,放水发电;待内外水面高度相同,再堵住通道,直到下次涨至最高点,打开通道,又进水发电,如图 7(c)所示。

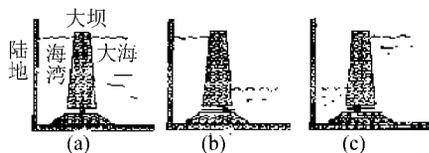


图 7

(应发宝、郑水珍,江西省景德镇市昌江一中 333400; 曹玉红,江西省景德镇市浮梁县景光学校 333400)

## 科苑快讯

### 西班牙开发出可供盲人自主使用的新型键盘

西班牙巴塞罗那自治大学 (Universitat Autònoma de Barcelona, UAB) 和西班牙盲人协会 (Organization of the Blind, ONCE) 的研究者开发出用于个人电脑的多用途盲人专用键盘。这项工作自始至终都是在视力正常人士的协助下进行的。

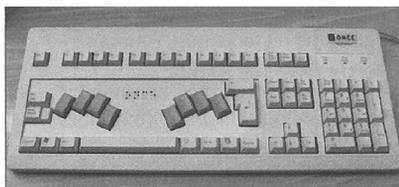


图 1 新型键盘有 8 个盲人专用键,可以用任何一种语言打字

新型键盘通过 USB 接口连接个人电脑,习惯于盲文打字机的盲人使用它将更为容易,因为它是第一种结合常规键盘功能键和操作键的盲人专用键盘,有 8 个盲人专用键,这 8 个键允许用户以任何语言在计算机上写作。用户也可以在持续写作模式和修正写作模式之间做出选择。持续写作模式中,盲文符号的点通过一个接一个地按键显现出来;修正写作模式中,这一过程通过单独按压强制键来实现。

18 卷 4 期(总 106 期)

该项目最初是在西班牙盲人协会 2004 年 3 月的提议下,由巴塞罗那自治大学微电子学系与电子系统方面的研究者朱迪·罗伊 (Jordi Roig) 协作完成的。朱迪·罗伊患弱视已 3 年,现在是西班牙盲人协会的会员。西班牙盲人协会位于萨瓦德尔市 (Sabadell) 的工程学院和计算机学院的教师也参与了研究工作。

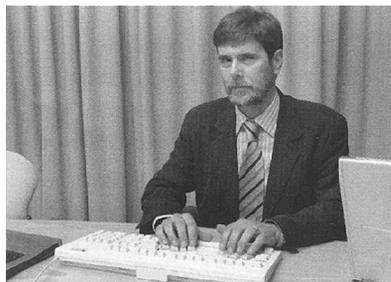


图 2 朱迪·罗伊教授正在使用新型盲人专用键盘

西班牙盲人协会目前正致力于其他能够让盲人自主工作的应用技术项目。这些项目包括开发专门用于网页的自动转换工具,因为盲人目前还无法感知网页中的内容;还有能够产生凹凸感的触摸屏,使盲人能够触摸到屏幕上的信息。

(高凌云译自 CERN Courier, 2006 年第 5 期)