

KE XUE CONG SHU

中国科学院新世纪〈科学丛书〉 主编 何远光



魔摆

——几何形体的动态艺术

徐平 郭慕孙 著

★ 魅力无穷的魔摆
★ 魔摆的奥妙在哪里
★ 设计你喜欢的魔摆
★ 跟我做魔摆



1

内蒙古大学出版社

39.9971

崇尚科学

——寄语青少年

2005.3.17
江总书记在党的十五大报告中号召我们“努力提高科技水平,普及科技知识,引导人们树立科学精神,掌握科学方法”。面向21世纪,我们要实现科教兴国的战略目标,就是要大力普及科技知识,提高国人的科学文化素质。特别是对广大的青少年,他们正处于宇宙观、世界观、人生观、价值观的形成时期,对他们进行学科学、爱科学、尊重科学的教育,进而树立一种科学的思想和科学精神,学习科学方法对他们的一生将产生重大的影响,同时也是教育和科学工作者的重要任务之一。

由中国科学院和内蒙古大学出版社共同编纂出版的“科学丛书”就是基于上述思想而开发的一项旨在提高青少年科学文化素质,促进素质教育的科普工程。该“丛书”具有以下三大特色。

买得起:丛书每辑100册,每册一元。

读得懂:每册以小专题的形式,用浅显的表达方式,通俗易懂的语言,讲述各种创造发明成果的历程,剖析自然现象,揭示自然科学的奥秘,探索科技发展的未来。

读得完:每册字数万余字,配以相应的插图,一般不难读完。

我们的目的就是要通过科普知识的宣传,使广大青少年在获得科技知识、拓展知识面、提高综合素质的同时,能够逐步树立起科学的思想和科学的精神,掌握科学方法,成为迎接新世纪的优秀人才。

最后,真诚地祝愿你们——

读科学丛书,创优秀成绩,树科学精神,做创新人才。



崇尚科学

——寄语青少年

2005.3.17
江总书记在党的十五大报告中号召我们“努力提高科技水平,普及科技知识,引导人们树立科学精神,掌握科学方法”。面向21世纪,我们要实现科教兴国的战略目标,就是要大力普及科技知识,提高国人的科学文化素质。特别是对广大的青少年,他们正处于宇宙观、世界观、人生观、价值观的形成时期,对他们进行学科学、爱科学、尊重科学的教育,进而树立一种科学的思想和科学精神,学习科学方法对他们的一生将产生重大的影响,同时也是教育和科学工作者的重要任务之一。

由中国科学院和内蒙古大学出版社共同编纂出版的“科学丛书”就是基于上述思想而开发的一项旨在提高青少年科学文化素质,促进素质教育的科普工程。该“丛书”具有以下三大特色。

买得起:丛书每辑100册,每册一元。

读得懂:每册以小专题的形式,用浅显的表达方式,通俗易懂的语言,讲述各种创造发明成果的历程,剖析自然现象,揭示自然科学的奥秘,探索科技发展的未来。

读得完:每册字数万余字,配以相应的插图,一般不难读完。

我们的目的就是要通过科普知识的宣传,使广大青少年在获得科技知识、拓展知识面、提高综合素质的同时,能够逐步树立起科学的思想和科学的精神,掌握科学方法,成为迎接新世纪的优秀人才。

最后,真诚地祝愿你们——

读科学丛书,创优秀成绩,树科学精神,做创新人才。



在 我们的生活中,工艺美术品琳琅满目,丰富多彩,它们美化了人们的生活,受到人们的喜爱。但是几何形体的动态艺术品——魔摆,还没有被人们所熟悉。它是一种特殊的艺术品,它的外形不模仿自然界任何动物或植物,而是由一些相似的几何形体利用准确的计算巧妙地结合在一起构成的。魔摆不但是一部立体造型的艺术品,而且是一部会动的艺术品。把它挂在书房、客厅或你喜爱的小天地的屋顶上,借助屋内穿堂的微风,或室内人体走动的气流,甚至是人们谈笑的声动气流,它就会轻盈地旋转、升降。由于它的运动随着启动气流的不同而变化莫测,有的动似起伏的海浪,有的动似羽翼抖动,所以给它起了个名字叫魔摆。

魅力无穷的魔摆

要了解魔摆的魅力,还是让我们先看看它的奇妙造型。照片 1-6 展示了六种魔摆的实物造型(见封三)。

照片 1—2 是棒/丝魔摆,它是由等长或相似的棒(丝)组成,每个单元件都水平地或按一定倾斜角度挂在相邻的单元件上。照片 1 起名叫“公正”,一根根棒针刚直挺拔,悬挂于空中,一种抽象的美引人遐思。其实它是由一组铝制毛衣针做成的。照片 2 起名为“对数半旋”,各单元件的长度成对数关系。它可以用市场上出售的成圈的金属丝制作。远远望去,仿佛空间中的声波展现在我们的眼前。照片 3—6 是板/片魔摆,它的单元件是三角形、圆形、环形、月牙形、扇形等。照片 3 起名为“三边攀登”,它是由一组相似三角形自下而上、从小到大相继串联而成的。而这组相似三角形又是由一个大三角形分割而成。当它受到水平气流的推动,将做旋转运动。照片 4 起名为“掩护”,是由相同的三角形按等角度差逐个悬挂组成的,在气流中它将做扭摆运动。照片 5 起名为“蠕”,它是由一个大圆盘切割出的五个偏心环,相继由小而大按相等的倾斜角度差联结而成的。这些倾斜的偏心环对来自任何方向的气流,反应极其灵敏,在轻微的气流推动下,蠕动不已,好似自然界中软体动物在蠕动向前。照片 6 起名为“抖”。先将一个圆盘切割成若干个扇形(等同的、

偏心的、夹角不同的,等等),然后将这些扇形单元件逐级纵横交替,并按一定倾斜角相联结,即可制作出一部极为灵巧的动艺。纵单元件使动艺旋转,横单元件使动艺上下波动。由于动艺的纵横运动,故起名为抖。

仔细看看以上六种魔摆的造型照片就会发现,魔摆的魅力就在于它是抽象的外形、立体的构思和运动设想的巧妙结合。它不同于普通的工艺美术品,不局限于某种事物形态的定格,而是以一种时刻变幻的运动造型给人们独特的艺术享受。它确实是一种精美绝伦的动态艺术品。

魔摆的奥妙在哪里

要设计出精美奇特的魔摆,就需要我们运用所学知识进行立体思维,把直线形、三角形、圆形等几何形体巧妙地结合起来。这种结合是计算出来的,要进行简单的力学分析和数学模拟。

魔摆的联结原理是要保持它的静态平衡。而单元件的静态平衡,取决于两个点,即重心和悬挂点。物体的重心是构成物体所有质点所受重力的合力的作用点。由于魔摆的单元件是由粗细均匀的棒(丝)或薄厚均匀的板(片)制作的,所以它的重心就是它的几何中心。对棒而言,在中点;对圆盘而言,在圆心;对三角形而言,在三边中线的交点;对矩形而言,在两条对角线的交点。

图 1(a)表示单元件的悬挂点 S 与重心 CG 重合,这是一种随遇稳态,单元件可以 $S(CG)$ 为中心转动;图 1(b)表示单元件的悬挂点在重心之下,这是一种不稳态,在这种情况下,单元件将自动倒转 180 度,使 S 位于 CG 之上;图 1(c)表示悬挂点 S 位于重心 CG 之上,这是一种稳态,经过任何扰动,单元件都会回到原位置。如果 S 位于 CG 之上,且与垂直方向成 θ 角,那么单元件将以 θ 角倾斜,如图 1(d)所示。

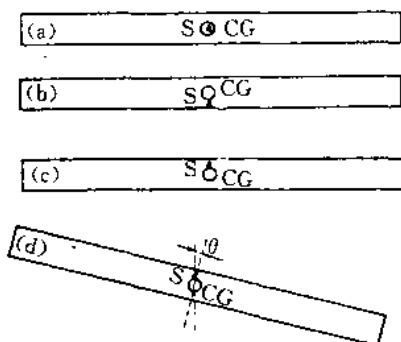


图 1 单元件的静力平衡

一个原来处于平衡位置的单元件,受外力作用移至倾斜角 θ 处,在除去外力后,有一个等于 $lmg\sin\theta$ 的力矩使它恢复原位。这里, l 是悬点 S 和重心 CG 之间的距离, m 是单元件的质量, g 是重力常数。从图 2 可以看出, S 和 CG 之间的距离 l 越远,恢复力矩也越大。所以设计中,

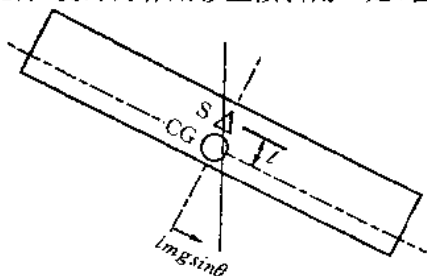
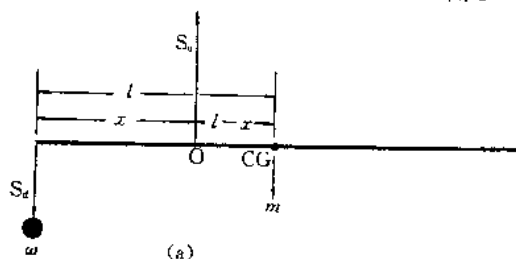


图 2 单元件倾斜后的复原力矩

想要复原速度快,就取较大的 l 值。相反,如果要求缓慢地恢复运动,则该采用较小的 l 值,也就是说, S 点紧靠 CG 点之上。

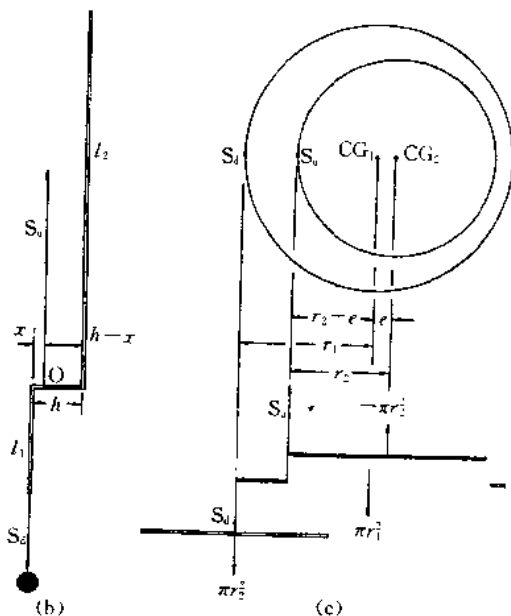


(a)

单元件的静力平衡点是它的重心 CG 。如果在单元件的挂点 S_d 悬有荷重 ω , 如图 3(a) 所示, 为使它继续保持平衡, 其上悬点 S_0 必须满足力矩平衡式

$$\omega x = m(l-x)$$

式中 m 为单元件的重量, l 是挂点 S_d 与重心 CG 间的距离(为选定值), 悬点 S_0 位于 O 点, 距挂点 S_d 的距离为 x , 距重心 CG 的距离为 $l-x$ 。力矩平衡式



(c)

图 3 魔摆单元件的平衡

可改写为

$$\omega/m = (l - x)/x \quad \text{或} \quad x/l = 1/(\omega/m + 1)$$

第一式用长度 l 和 x 的关系来表示无量纲荷重 ω/m 。如果已知道无量纲荷重 ω/m ，即可从第二式算出上悬点 S_0 的相对位置 x/l 。

如果以上单元件需在 O 点附近折成如图 3(b) 所示的 S 形，单元件的总长度为 L ，单位长度的重量为 m/L ，再令 $L = 1$ ，可列出它的力矩平衡式

$$(\omega/m + l_1)x + x(x/2) = l_2(h - x) + [(h - x)/2](h - x)$$

若已知 ω 和 m (或 ω/m)，以及 S 形横条的长度 l_1, l_2, h ，即可计算上悬点 S_0 的位置 O 。图 3(c) 表示如何平衡一个偏心环与其中切割出的圆。环与圆的偏心度为 e ，切割出的圆悬挂在环的挂点 S_d ，环的外半径为 r_1 ，内半径为 r_2 。设计要求偏心环的下挂点 S_d 位于其外缘，上悬点 S_0 位于其内缘。现在我们来求偏心度 e 的值。图中未切割前外半径为 r_1 的圆的相对重量可用其面积 πr_1^2 代表，该重量位于圆心 CG_1 。切去的圆具有相对重量 πr_2^2 ，经转移悬挂在环的外缘 S_d 处，其相对重量为 πr_2^2 。根据力矩平衡条件可得

$$(r_2 - e)\pi r_1^2 = r_2\pi r_2^2 = (r_1 + e - r_2)\pi r_2^2$$

这种把切出件转移的模拟方法在魔摆制作中广泛应用。

如果单元件的形状特殊，挂点 S_0 悬有荷重，其上悬点 S_0 不易计算，可经过图 1(a) 所示的挂线方法，实测上悬点 S_0 。将挂线

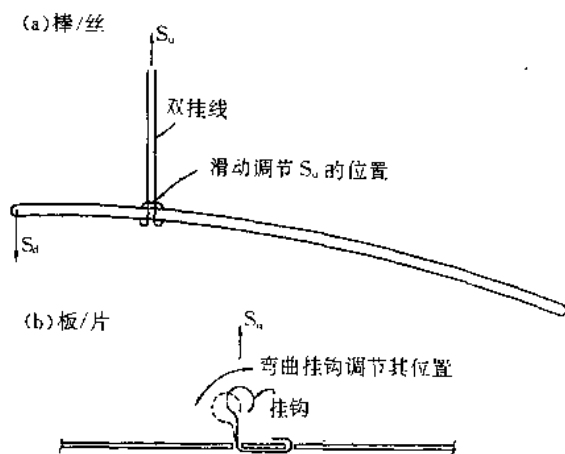


图 1 用扎线法实测和调整点的位置

绕成一个活圈,然后将单元件在圈中随滑随调,直至达到所需的平衡角度,然后用尖针准确划好 S_0 的位置。

单元件的相互联结,如图 5 所示。图 5(a)表示了最简单的联结方法,或称“线性联结”,每一个单元件有两个联结点,一个是联结下一单元件的“下挂点” S_d ,一个是被挂在上一个单元件上的“上悬点” S_0 。“上悬点”和“下挂点”中只能有一个点可以任意选择,另一个点则按力学平衡原理,根据单元件的重心 CG 的位置,通过计算获得。图 5 所示的单元件,可以是棒,也可以是三角形、矩形或圆形。只要能确定其重心 CG ,单元件的联结方法是相同的。图 5(b)的联结原理同上,只是单元件并非悬挂,而由下部承托。因此单元件的编号应为自上而下(见图)。下部承托时,下挂点 S_d 往往是一个针尖,上悬点 S_0 往往是一个凹穴,以接受下一个单元件的承托。为使单元件稳定平衡,单元件在 S_0 点需下折,使之处于 S_d 和 CG 连线以上。图 5(c)表示了“刀口联结法”,位于上单元件挂点 S_d 处有一精磨抛光的曲线形缺口,与下单元件悬点 S_0 处的梨状孔相互联结。

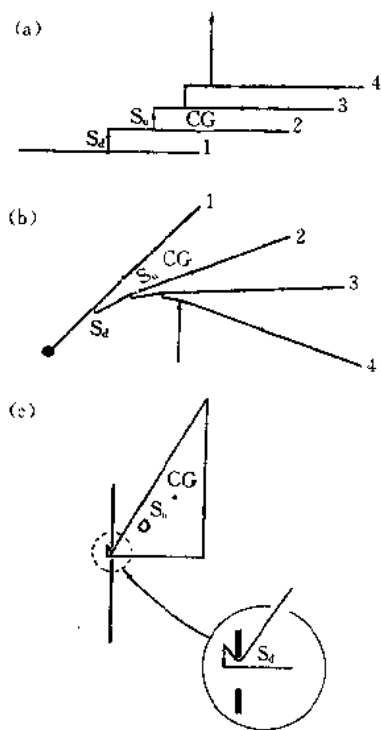


图 5 魔摆单元件的相互联结

设计你喜欢的魔摆

魔摆的单元件是几何形体,如线、三角形、四边形、圆形、环形和扇形。单元件一般在长度、尺寸、形状等方面有一定的关系:相同、相似或

成比例。图 6 给出一些单元件的例子，第一组是相同单元件，它们是长度相同的棒和直径相同的圆盘。第二组是对数增大单元件，棒的长度、圆盘的直径和相似三角形对应边的长度按对数关系增大。第三组是逐级变形单元件。

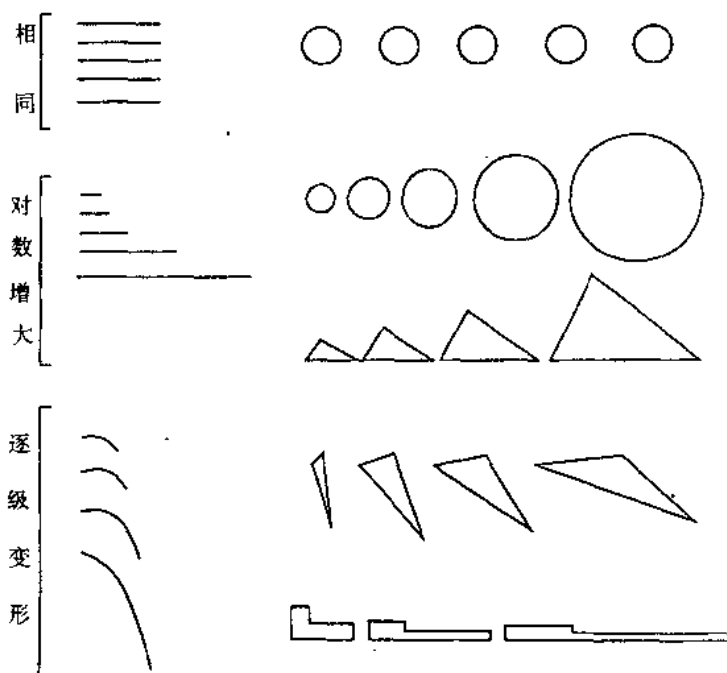


图 6 魔摆单元件的序列

魔摆的单元件首先要从原材料上切割下来，加工工艺上称作下料。为了尽可能不浪费材料，又能得到我们需要的单元件，通常采用“七巧板”式下料方式。举几个板/片魔摆单元件的下料实例。图 7(a)的三角形单元件分别切自原始三角形（等边或不等边）和不同长宽比的矩形。图 7(b)的矩形单元件、L 形单元件、正方形单元件分别切自原始矩形和正方形。图 7(c)的圆形单元件、环形单元件、扇形单元件分别切自正方形和圆。

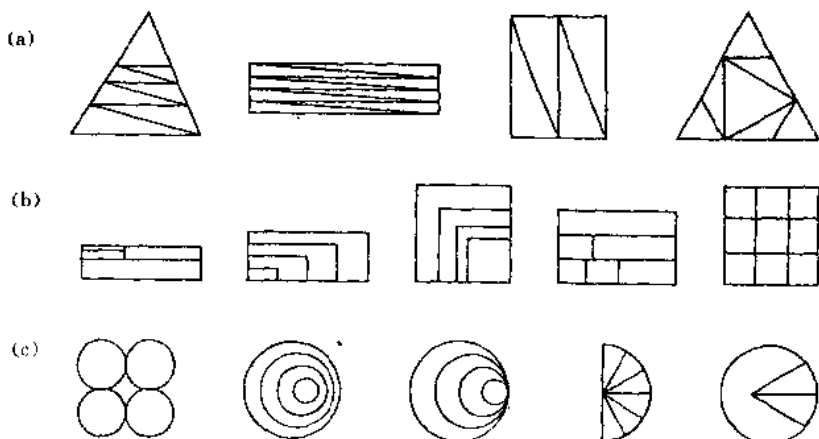


图7 魔摆单元件的下料

选择合适的材料

原则上讲,任何质地均匀的材料都可用于制作魔摆:金属、木料、塑料和纸张。可是,由于魔摆的单元件都属悬臂式,因而强度不够、在连续应力作用下变形和受空气湿度影响变形的材料不适用。

经常采用的棒/丝材料为直径在1.5至3.0毫米的铝焊条,它很直且表面光滑。也可购买优质的毛衣针、自行车辐条等作棒材使用。在制作曲线形单元件时,可购买不锈钢丝。装潢材料商店出售的挤压铝质型材料,线性密度低、刚度高,是制作魔摆单元件的极好材料。

0.2毫米厚的铝板是很好的板/片材料,它容易切割和弯折,不易生锈,且表面便于用手工加工成令人喜爱的纹络。制作小的单元件,可以采用磷铜片,易于回弹,也易于加工。薄三合板也是合适的板材,质轻,受空气湿度影响不太大。

常用于单元件联结的材料是金属丝。黄铜大头针,其尖端可埋入棒端,常用于图5(c)所示的针穴联结。线联结可用尼龙丝,如0.1毫米的钓鱼线或尼龙缝纫线。为了控制整体动艺的过度旋转,最上单元件的悬线可以粗一些。

简单的加工工具

用于制作魔摆一般只需手工工具,但小型高速电钻可提高工效,例如牙医用的电钻,不但可钻孔,还可切割棒(丝),以及磨平、抛光。

制作中要求比较特殊的工具有板/片单元件的切割刀具,用于钻孔的小钻头和绞刀头,用于高光洁度刀口联结的细小锉刀。最适用的是可更换多种刀片的刀。可更换的刀片有两大类,一类是各种形状的利口刀,用于切纸、

卡片、三合板等;另一类是划痕刀,在切割时刨去一条一条细丝材料,待划痕足够深时,用于将切块掰下。这两类刀片的差异表示于图8(a),它们都可用于沿钢板尺

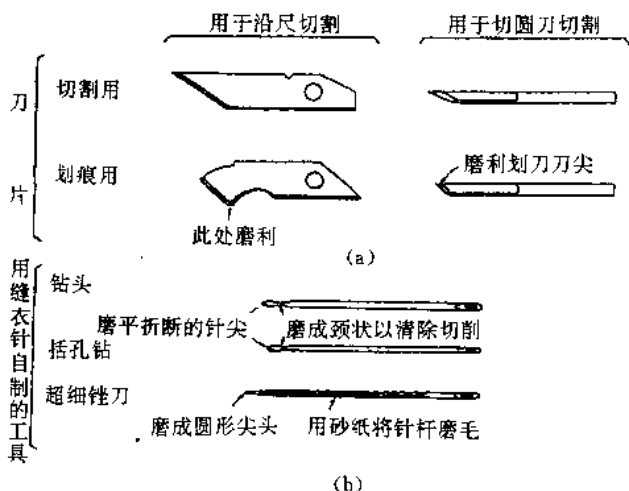


图8 制作室内魔摆的特殊工具

装在切圆刀架上切割圆。

单元件上的孔很小,穿过它的是直径不超过0.4毫米的大头针和直径不超过0.2毫米的尼龙线。用于钻这样小孔的钻头可用缝衣针自己磨制。如图8(b)所示,首先折断针尖,然后将针端在油石上磨成平头钻头,再把小钻头的下部磨成颈状,以便在钻孔时清除切削粉末。

制作“刀口联结”的最后一步是磨平抛光刀口。一般最细的钟表什锦锉,有时还嫌粗。如图5(c)所示,刀口必须是曲径极小的光滑面,以利于联结处的运动。两个刀口在接触点上不允许有相嵌现象,否则会相互咬住,不能圆滑地运动。所需的超细锉刀也可用缝衣针制成;同样是

首先折断针尖,然后将针杆在砂纸上横向来回磨毛,磨时要不断转动针杆,使四周均匀磨毛。针杆的毛糙度取决于砂纸的粗细,可按所需要的光洁度来选择。

魔摆的基本制作过程

一件好的作品不但出自富有想象力的构思,具有一定数学分析的设计,还需要精湛的手艺。

魔摆制作的第一步是单元件的下料。切割棒材用细齿锯锯断,忌用老虎钳,然后将切端磨平抛光。而对于板/片下料,首先要用钢针(而不能用铅笔)准确地将设计图形按下料方案划在材料上,然后再沿钢板尺或切圆架用切刀切割,忌用剪刀,避免使切割件扭曲不正。切割后,单元件的边缘必须磨平抛光。我们要求的是精细的加工,而不需要份外的装饰。

切割铝件时,在切割处要不断涂上一些润滑剂,这样切割将会省力气,切割断面也将更平滑。润滑剂可以用家用洗涤剂和 water 按 1:100—1000 的比例配制。

下面就可以进行单元件的联结了。通过计算先确定它的下挂点 S_d 和上悬点 S_u 。但联结孔和刀口加工很难做到百分之百准确无误,因此在制作中上、下部件相联必须选择可调的联结方式。

用金属丝钩联结时,在计算好的悬点 S_u 处可插入或焊上一个金属丝钩,如图 4(b)所示。调整此钩的弯度,即可调整单元件的悬挂角度和运动灵敏度,以符合设计要求。钩越高,单元件的运动越稳定,但其灵敏度要减小。

用线联结时,需先量好线的长短,略留余量,然后在尽可能靠近线端处打结,以保证尺寸准确。单元件挂点 S_d 的下挂线可套在本身单元件上悬点 S_u 上,然后经过 S_d 点挂住其下部件,这样联结便于拆卸。

另一个更便于调整单元件平衡的线联结方法是如图 9 所示的可调三角形线环。先在下挂点 S_d 左右两方钻两个横跨 S_d 的小孔 S_{d1} 和 S_{d2} ,然后将挂线穿过这两个孔,在其下方打结,形成一个如图 9(b)所示的

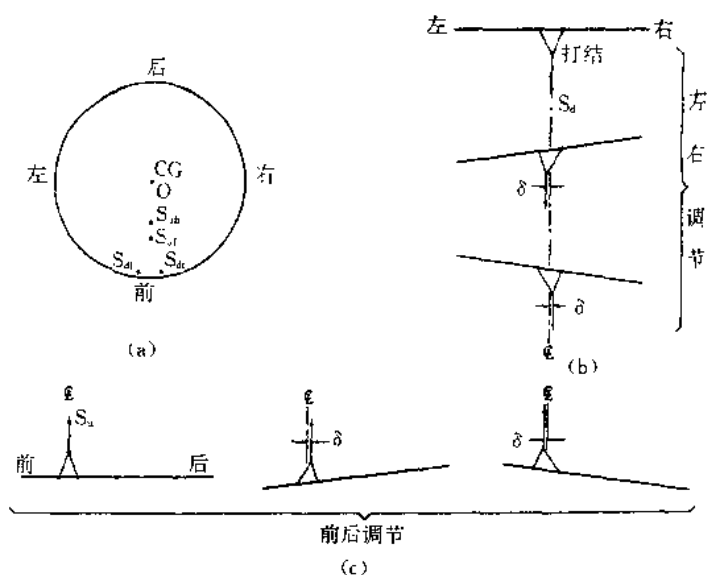


图9 单元件的可调三角形线环联结

三角形线环。从图可看出,如将结下方的挂线拉向左方,三角挂线的左股减短,使挂点 S_u 左移 δ 距离,如此可使单元件向左倾斜;如挂线右拉,可使单元件向右倾斜。同样,在悬点 S_u 的前后方向钻两个小孔 S_{u1} 和 S_{u2} ,也可穿线打结成三角线环。将三角线环上方的悬线拉向后,使后股比前股短,悬点 S_u 后移,使单元件的前方下降;如将悬线前拉,可使单元件后方下降。下挂点 S_u 的付孔 S_{u1} 和 S_{u2} 属左右跨,而上悬点 S_u 的付孔 S_{u1} 和 S_{u2} 属前后跨,两者方向相互垂直。因此左右拉动下挂线和前后拉动上悬线就可以将单元件调整至任何所需的空间角度。在实际操作中,只要将单元件倾斜到略超过所需的空间角度,线环即能在付孔中相应移动,使单元件向所需的方向倾斜。组装在最下面的一个单元件,只有上悬点 S_u 。要调整它的空间角度,可在上悬点 S_u 周围等角、等距离处钻三个付孔 S_{u1} 、 S_{u2} 和 S_{u3} 。将悬线按次序穿过三个孔,穿线方向是:孔1下,孔2上,孔3下,孔1上,孔2下,孔3上;将孔1和孔3的线端打结,剪去余线。然后另用一线,穿过这三个付孔上三个三角线环,打结系住,形成下单元件的悬线。拉动这一悬线可使下单元件相应倾斜。

跟我做魔摆

1、公正 公正属棒/丝魔摆,它由等长的棒或丝组成,各单元件水平挂在相邻单元件的端点

(下挂点 S_d)上,如图 10 所示。以第 n 个单元件为例进行分析,它的挂点 S_d 挂有

$n-1$ 个单元件,它的悬点 S_u 距单元件重心 CG 的长度是

x ,单元件一半的长度是 l , m 为各单元件的重量,那么第

n 个单元件的静态平衡式为

$$(l - x)(n - 1)m = xm$$

或

$$x/l = (n - 1)/n$$

下表列出第 1 至第 10 个单元件的无量纲距离 x/l :

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x/l	0	0.500	0.667	0.750	0.800	0.833	0.857	0.875	0.889	0.900

每个棒上要钻三个孔,在端点的一个钻孔中穿一个固定长度的尼龙丝环,作为挂点 S_d 与下一个单元件相联,另两个孔跨悬点 S_u ,装上图 4(b)所示的金属丝吊钩。将吊钩前后弯动就可调整单元件使之达到平衡。

2、三边攀登 三边攀登属板/片魔摆,用最简单的三角形依靠空间的平衡串联而成。图 11(a)表示从一个大三角形分割出一族相似三角形,分割的步骤如下:

(1)以底边长度为基准长度,即令 $AB=1$ 。

(2)在 A 点作直线 AC,与直线 AB 的夹角是 α (α 角越大,相似三角形逐级缩小越慢,可以切割出更多个单元件)。

(3)定第一个三角形的高度是 h ,得边长 AD,并令其等于 c ($AD=c$)。

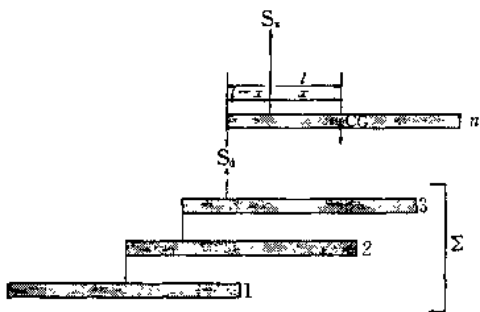
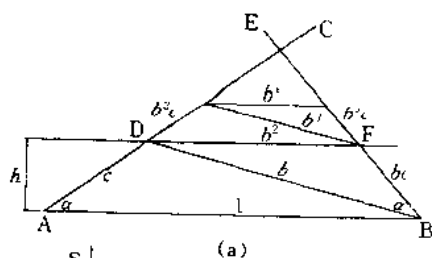


图 10 “公正”单元件的平衡原理

(4)联结 D 和 B。

(5)在 B 点作直线 BE, 使 $\angle DBE = \alpha$ 。

(6)在 D 点作平行于底边 AB 的直线 DF。



由图 11(a)可知:第一个三角形 ABD 的最长边 $AB=1$, 次长边 $DB=b$, 最短边 $AD=c$ 。而第二个三角形 BDF 反转后与三角形 ABD 相似, 其最长边 $DB=b$, 次长边 $DF=b^2$, 最短边 $BF=bc$ 。第二个三角形与第一个三角形的对应边之比为:

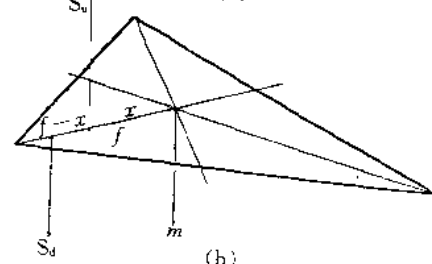


图 11 “三边攀登”单元件的下料及其平衡方法

$DB/AB=DF/DB=BF/AD=b$ 。重复以上作图步骤, 可获得一族三角形(双数三角形需翻转, 使之与单数三角形相似), 其中第 n 个三角形的三边为: 最长边是 b^{n-1} , 次长边是 b^n , 最短边是 $b^{n-1}c$ 。

根据相似三角形面积之比等于其对应边之比的平方以及相似三角形重量之比等于它们的面积之比知: 若第一个三角形的重量是 m , 则第 n 个三角形的重量应是 $m(b^{n-1})^2$ 。由此可将三角形的边长和重量关系列于下表:

n	最长边	次长边	最短边	重量
1	1	b	c	m
2	b	b^2	bc	$m b^2$
3	b^2	b^3	b^2c	$m b^4$
n	b^{n-1}	b^n	$b^{n-1}c$	$m (b^{n-1})^2$

三角形的重心位于三边中线的交点。为了便于平衡, 可将挂点 S_d 和悬点 S_0 定于某一中线上, 图 11(b)表示的是第 n 个三角形, 其挂点上悬挂第 $n+1$ 至第 N 个三角形(这里设定一族三角形的总数是 N), 挂点距重心 CG 的距离定为 f 。设悬点距重心的距离为 x , 可由力矩平

衡式得

$$(f-x) \sum_{k=n+1}^N m(b^{k-1})^2 = xm$$

或

$$x/f = \sum_{k=n+1}^N (b^{k-1})^2 / [1 + \sum_{k=n+1}^N (b^{k-1})^2]$$

联结时,最小的单元件在最下面,最大的单元件在最上面,依次串联。每个单元件在悬点 S_0 处装有一个金属钩,在挂点 S_d 处有一个孔。通过孔将挂线联结在下一个单元件的悬点,挂线的另一端套在本单元件的悬点挂钩上。另一种联结方法为图 9 所示的双孔平衡联结法。各个单元件可调至水平或逐级倾斜位置(倾斜有利于魔摆的运动)。

3、虚抓 虚抓属板/片魔摆,图 12 表示从圆盘的一个点切割出一族逐渐缩小的开口偏心环,形状好似爪,所以取名“虚抓”。如果将一族偏心环串联悬挂,挂点 S_d 选在圆盘的外圆宽边处,任何一个圆盘的挂点承担其下面全部圆盘的重量。其悬点 S_0 位于距外圆中心 CG_2 的 x 处,可按图 3(c)所示的平衡方法写出力矩平衡式

$$x\pi r_2^2 - (r_2 - r_1 + x)\pi r_1^2 = (r_2 - x)\pi r_1^2$$

简化得

$$x/r_2 = (2 - r_1/r_2)(r_1/r_2)^2$$

当选定内、外圆半径比 r_1/r_2 ,根据上式可计算出用 x/r_2 表示的悬点 S_0 的位置。下面给出一组计算数值:

r_1/r_2	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
x/r_2	0.637	0.703	0.768	0.831	0.891

以上数值表明,内圆越大,悬点 S_0 越靠近外圆。

一个比较容易制作的方案是采用一个固定的内、外圆半径比,即 $r_{n-1}/r_n = \alpha$ 。如果共有 N 个组件,第 N 个组件最大,其半径为 r_N 。则第 n 个圆的无量纲外半径为 $r_n/r_N = \alpha^{N-n}$,内半径为 $r_{n-1}/r_N = \alpha^{N-n-1}$ 。由简化平衡式可得 $x_n/r_N = (2 - \alpha) \alpha^{N-n-2}$ 。下表列出了 $\alpha = 0.75$ 时,具有 5 个组件的虚抓的计算数值:

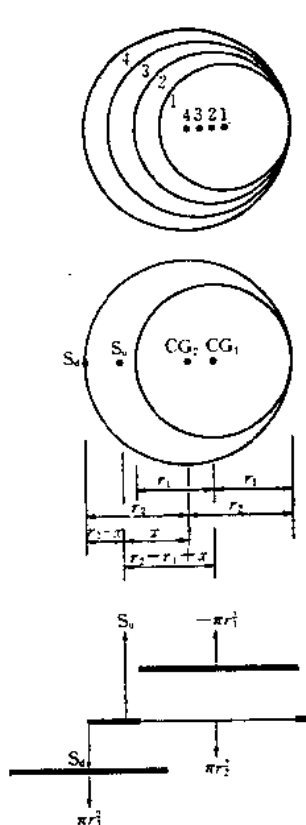


图 12 “虚抓”单元件的平衡
及其下料方法

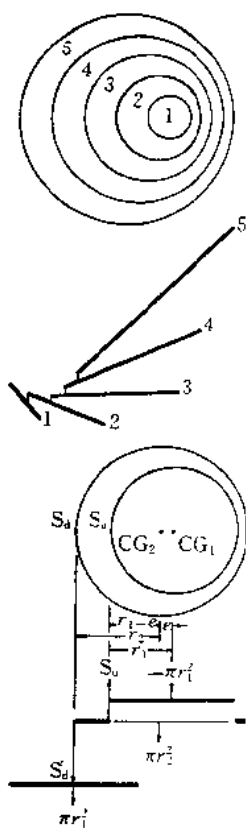


图 13 “蠕”单元件的下料及其
平衡和联结方法

n	5	4	3	2	1
r_n/r_5	1	0.750	0.563	0.422	0.316
r_{n-1}/r_5	0.750	0.563	0.422	0.316	0.237
x_n/r_5	0.703	0.527	0.396	0.297	0.222

4、蠕 蠕属板/片魔摆,它是由一个圆盘切割出的五个偏心环,相继按相等倾斜角度差联结而成的。如图 13 所示,挂点 S_d 位于环的最宽