



GUDAIWULISHIJIE

科技普及读物

ZhongguoKejiShihua

中国科技史话

古代物理世界

〈下〉



辽海出版社

中国科技史话

古代物理世界 (下册)

邢春如 主编

辽海出版社

流体力学

静止液面——水平仪（水准）

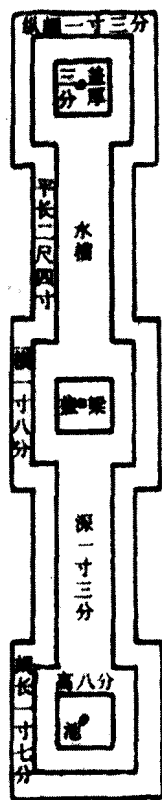
静止的液面，在不太大的范围内，为一个水平面。古人通过观察，对这一点早有认识。《庄子·刻意》说：“水之性：不清则杂，莫动则平。”这里指出了静止的水表面是呈水平的。《庄子·天道》又说：“水静则明，烛须眉，平中准，大匠取法焉。”准就是水准，现在叫做水平仪。这里进一步指出，静止水表面往往可以作为标准平面，作为测量基准。这段文字实际上就是关于工匠以水平仪定水平面的记载。但是水平仪的端倪在《考工记》中早已出现。“舆人为车”条说：“立者中县（悬），衡（横）者中水。”“匠人建国”条说：“水地以县（悬）。”汉代郑玄注：“于四角立植，以水望其高下……”意思就是在四角立四柱，先悬绳以正柱，后用水平仪望四角的高低，以便平地。水平仪也被配置在某些精密的仪器上，例如北魏永兴四年（412）以铁铸成的浑仪，底座上设有“十字水平”，以校准仪器水平。此外唐代李筌的《太白阴经》、宋代许洞撰的《虎铃经》、曾公亮的《武经总要》、李诫的《营造法式》等书都介绍我国古代常用的水平仪，其构造基本相同。清代麟庆著《河工器具图说》，其中所介绍的水平仪较为简单、实用。该书云：“水平之制，用坚木长二尺四、五寸，或长四、五尺，厚五寸，

四、古代计量与力度

宽六寸，中间留长三寸，两边凿槽各宽八分余，宽七分以作外框，两头各留长三寸，亦凿槽宽八分，通身槽深二寸，周围一律相通。再于中央凿池一方，宽长各二寸，深二寸左右，各添凿一槽，其宽深与通身槽同，便于放水，通连槽内，须放浮子一个，浮子方长一寸五分，厚六分，面安小圆木柄一根，高出面五分。其两头各放浮子一个，宽长均与中央同。惟两头之槽仅宽八分，未免浮宽槽窄，必得于两头适中之处开二方池，照中央宽深八寸，名曰三池。用时置清水于槽内，三浮自起，验浮柄顶平，则地亦平。如有高下，即不平矣。但用在五六丈之内尤准，若多贪丈尺，转属无益。”

浮力与水位

静止的流体，对于浸在其中的物体具有一定的浮力。《墨经》已经指出，物体所受的浮力是因为水被物体排开的关系。《考工记》就记载，工匠为了试验一个木轮各部分木材比重是否一样，就把轮坯放到水里，视其各部分浮沉是否均匀。《墨经》与《考工记》对浮力成因的认识是相通的。



《河工器具图说》
中的水准仪

“曹冲称象”的故事是妇孺皆知的，是水浮法的巧妙运用。但据考证：“称象”是从印度传来的佛教故事，是陈寿移植到曹冲头上来的。不过，晋代的《苻子》一书记载这样一个故事：“朔人献燕昭王以大豕，曰：‘养奚若’。……王乃命豕宰养之，十五年，大如沙坟，足如不胜其体。王异之，令衡官，桥而量之，折十桥，豕不量。命水官浮舟而量之，其重千钧。”燕昭王在位时间是公元前311年至前279年。“桥”就是“桔槔”，用它改装成衡器，但屡折屡换，十次都没把豕重称出来，只好用船来称。如果《苻子》的记载真实的话，那么我国利用水浮法称重，已约有2300年的历史了。

古代对于浮力的应用是多方面的，《宋史·方技传》上的一段记载十分精彩：“河中府浮梁，用铁牛八维之，一牛且数万斤。后水暴涨绝梁，牵牛没于河，募能出之者，真定僧怀丙以二大舟实土，夹牛维之。用大木为权衡状，钩牛，徐去其土，舟浮牛出。”这是利用浮力起重，正是“称象”原理的逆运用。

我国古代对水利十分重视，传说在大约4000年前，就有大禹治水的事。《管子》、《考工记》都有一些关于水力学知识的珍贵记载。《管子·度地》说：“水可掘而使东西南北及高乎？……曰：可。夫水之性，以高走下，则疾至于漂石；而下向高，即留而不行。故高其上，领瓴之，尺有十分之，三里满四十九者，水可走也。乃迂其道而远之，以势行之。”这里指出，水是由水位高处流向水位低处（“夫水之性，以高走下”），当河渠斜度很大时，水流速度就会很大，

四、古代计量与力度

甚至冲动石头（“至于漂石”）。《孙子·势篇》就水冲动石头提出解释说：“激水之疾，至于漂石者，势也。”这里用“势”概念去说明。《论衡·状留篇》进一步说：“湍激之流，沙石转而大石不移。”急流只能推动沙石而不能推动大石，隐指大小一定的水势只能推动大小一定的石块，不能推动过大的石块。这已经有了一点大小上的分析。

上引《管子·度地》一段文字接着讨论，水本身不会自水位低处流到水位高处（“而下向高，即留而不行”），那么又怎样利用水流向下的特性控制水流，使之流向东南西北甚至高地呢？这就需要修筑堤坝以提高上流的水位（“高其上”）。《孟子·告子上》也说，“今夫水，……激而行之，可使上山。”这意思大致是筑坝拦水，阻挡水势，开渠引水，激之使水上山。水位抬高就是使水行至“东西南北及高”的先决条件。上面是关于明渠的情况，亦即两边液面无压强差的情况，属于无压水力学方面的问题。

引水，首先要修筑渠首取水建筑物，“领瓴之”就是说水渠进口，要用砖瓦等物修砌。上游水位抬高后，要顺利引水，最重要的是合理地选择渠道的斜度。斜度太大，水流速过快，会冲坏渠道；斜度太小，水流速过慢，又会造成渠道的淤积。那么，一般选择多大斜度为合适呢？“尺有十分之，三里满四十九者，水可走也。”“尺有十分之”，就是一寸；“三里满四十九”，即三里的距离降落四十九寸，大约相当1‰的斜度。与现在渠道比较，斜度太大了，但当时渠道顺直平整及管理不能达到今天的水平，斜度大些还是需要的。古人对于水流能量的利用也是十分注意的，在水利建设中就

曾总结过“筑堤束水，籍水攻沙”的经验。

更难得的是《管子·度地》还有一段文字恰恰与上引的一段并列，论述水流问题：“水之性，行至曲，必留退，满则后推前。地下则平行，地高即控。”这里指的是有压管流的“水之性”。“行至曲，必留退，满则后推前”描述水通过虹吸管的水流现象。当水从一端流入向下弯曲的倒虹吸管时，必先灌满倒虹吸管。从整个水流来看，这时水流呈现出“退留”现象，当管内水满后，水流才能“后推前”，从另一端流出。当水流通过一段长水管时，因摩擦力等因素必然有能量的损失，因此一定要使倒虹吸的出口低于进口（“地下”即指出口低于进口），水流才会顺利通过，否则就难以流过去（“地高即控”）。

考古发掘证明，殷代的都城殷墟（今河南安阳小屯一带）就有陶制的地下水管道了。水管的长期使用是获得流体力学知识的途径之一，也是发明虹吸之类的先导。

“以气引水”——虹吸

虹吸，汉代叫“渴乌”，后来又有“注子”、“偏掇”、“过山龙”等名称。《后汉书·张让传》说：“又使掖庭令毕岚……又作翻车、渴乌，施于桥西，用洒南北郊路，以省百姓洒道之费。”唐代杜佑的《通典·兵·隔山取水》对此有更详细的叙述：“渴乌隔山取水，以大竹筒雄雌相接，勿令漏泄，以麻漆封裹，推过山外，就水置筒，入水五尺，即于筒尾取松桦干草，当筒放火，火气潜通水所，即应而上。”可见，远在2000多年前的东汉时代，我国已使用虹吸进行取水灌溉。当时的计时器“漏壶”上也配有这种“渴乌”。

四、古代计量与力度

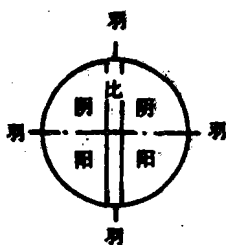
对于虹吸的原理,《后汉书》“注”云:“渴乌,为曲筒,以气引水也。”我们知道,虹吸确是凭借大气压力工作的,从这个角度而论,“以气引水”的说法,确实已初步接触到虹吸的原理;而《通典》指出要“勿令漏泄”,以火烧筒尾,造成部分真空引水上来,归根结底也是“以气引水”的观点。除了虹吸以外,根据“以气引水”原理的还有“唧筒”。北宋苏轼记载说,以竹为筒,“无底而窍其上,悬熟皮数寸,出入水中,气自呼吸而启闭之,一筒致水数斗。”

大气压强的存在,还有不少表现,古人也都用“气”观念加以说明。早在魏晋之际,虞耸在《穹天论》中讨论宇宙结构问题,认为天像是一个浮在水上的倒盖的碗,它之所以不会下沉,就因为其中充满了“气”(“譬如覆奩以抑水而不没者,气充其中故也”),南北朝的《关尹子》一书中也有这方面的论述。“九药篇”云:“瓶存二窍,以水实之,倒泻;闭一则水不下,盖(气)不升则不降。”唐代王冰注《素问》在此基础上又补述了一个现象:“虚管溉满,捻上悬之,水固不泄;为无升气而不能降也。空瓶小口,顿溉不入,为气不出而不能入也。”宋代俞琰的《席上腐谈》记述了另外两个现象:把烧得很旺的纸片放入空瓶中,再把瓶倒盖在盆水里,盆水即涌入瓶中,如将瓶覆盖在人腹上,则能紧紧地贴住。他认定这是“火气使之然也”。把这些说法印证前面谈及的杜佑对虹吸原理解释以及苏轼对唧筒的说明,可以显示出当时对于这类现象确有相当深刻的认识。

弓矢有关的空气动力学知识

远在旧石器时代晚期,我们的祖先已使用原始的弓箭。

到了新石器时代，弓箭使用更趋普遍。弓箭的发明使抛射体获得了徒手投掷所不可比拟的速度和方向性，产生了重要的社会影响。由于弓箭在打猎和战争中起了很大的作用，人们对它的性能的研究也就比较深入。

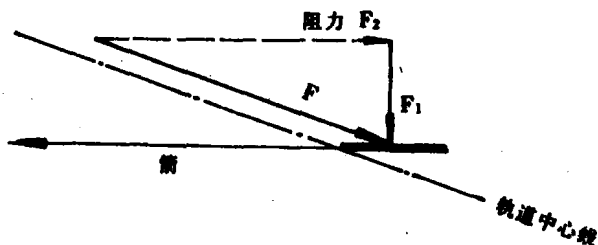


箭干后视图

《考工记》的“矢人”条说：

“夹其阴阳，以设其比；夹其比，以设其羽。三分其羽，以设其刃。则虽有疾风，亦弗之能惮矣。”这里的“其”指“箭干”。这一段是考虑箭矢飞行的稳定。

除了整枝箭的重心对飞行轨道有影响外，当箭飞速前进时，假使头部偏向左方（或右方），箭矢由于惯性仍沿原来的方向往前飞，于是迎面而来的空气阻力 F 与垂直的箭羽间便形成了角度，垂直于箭羽的分力 F_1 向左（或向右）推箭羽，使箭矢向右（或向左）转。所以垂直的箭羽有横向稳定作用。同理，水平箭羽有纵向稳定作用。



羽箭横向稳定作用示意图

“矢人”条又说：“羽丰则迟，羽杀则趯”（“杀”，凋

四、古代计量与力度

落；“趯”同躁，不安静）。这段指出箭羽大小失当的后果。按空气动力学常识，箭矢所受的摩擦阻力、压差阻力和诱导阻力跟箭羽的大小有关。若箭羽过大，则阻力增大，使飞行速度降低，这就是所谓“羽丰则迟”；而箭羽零落或过少，箭的纵向或横向稳定作用较差，飞行时容易偏斜，这就是“羽杀则趯”的含义。

《考工记》的“矢人”还就箭干提出一些很有道理的要求。

材料力学

弓的刚度测量

明《天工开物·佳兵》说：“凡造弓视人力强弱为轻重：上力挽一百二十斤，过此则为虎力，亦不数出；中力减十之二、三；下力及其半。彀满之时，皆能中的。但战阵之上，洞胸彻札，功必归于挽强者。而下力倘能穿杨贯虱，则以巧胜也。凡试弓力，以足踏弦就地，秤钩搭挂弓腰，弦满之时，推移秤锤所压，则知多少。”“亦不数出”意思是为数不多，“彀满”，即把弓拉满弦。洞，贯穿的意思；札，重铠甲上的铁片；“洞胸彻札”的意思就是“射穿敌人的胸膛或铠甲”。“穿杨贯虱”的意思是“射穿杨叶和射中虱子”。这一段“试弓定力”很明确表示如何用杆秤来测量弓的刚度。如果追溯到更远，春秋至战国初期的《考工记》中的“量其力，有三钩”似与弓的刚度测量有关。

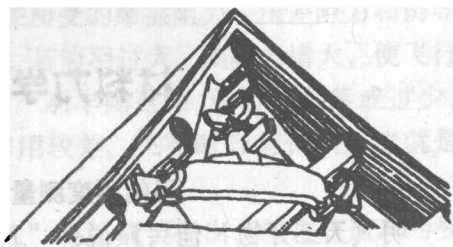
《天工开物》初版于1637年，与伽利略的《两种新科学的对话》同时期，比1678年胡克发表的“胡克定律”为早。当然《天工开物》中涉及力与形变关系的测量只限于弓，还不能说对材料性能规律的普遍研究，但这毕竟是物体刚度测量的先河。

梁的截面

宋代李诫主编《营造法式》（1100）中的《大木作制

四、古代计量与力度

度》曰：“凡梁之大小，各随其广分为三分，以二分为其厚。”也就是说：无论何种类型的建筑梁，其截面的高宽比都应为3:2。对这条规范的科学价值，国内外评价很高。因为按材料力学理论进行计算，如果从一根圆



梁

木中截取具有最大强度的矩形梁，截面的高宽比应该为 $\sqrt{2}$:1=1.41:1。《营造法式》规定的1.5与之相近的程度，决非是偶然的。有人认为这个比例不但考虑了强度因素，而且考虑了刚度因素。当然，这个结果如何得到，已无从考证。笔者提出这样的可能：古代工匠们也许通过大量的圆木取梁实验，用定量的破坏性手段选择了这一“最佳”比例。《营造法式·取径围》一节，曾列出圆中取方和方中取圆的数据，说明以前的工匠曾对取材之法有过定量研究；至于称重的天平与杆秤则早已有之。因此，破坏性实验获得这一结果是完全有条件的。

增加约束以提高木塔刚度

《梦溪笔谈·技艺》说：“钱氏据两浙时，于杭州梵天寺建一木塔，方两三级，钱帅登之，患其塔动。匠师云：‘未布瓦，上轻，故如此。’乃以瓦布之，而动如初。无可奈何，密使其妻见喻皓之妻，赂以金钗，问塔动之因。皓笑曰：‘此易耳。但逐层布板讫，便实钉之，则不动矣。’匠师

如其言，塔遂定。盖钉板上下弥束，六幕相联如肱篋。人履其板，六幕相持，自不能动，人皆服其精练。”

梵天寺木塔，建于916年，重建于964年。“六幕”指前、后、左、右、上、下六面。“肱篋”本指“撬開箱子”，此处沈括误指箱篋。喻皓是我国10世纪一位著名建筑匠师，著有《木经》，已佚。他用“布板”、“实钉”来加强木塔的刚度（整体性）的办法，以及沈括所作“六幕相联如肱（箱）篋”的解释，表示他们在900年前就初步认识到增加结构各部的相互约束可以提高其刚度的道理。

五、声 学

乐器的制作与使用

乐器的起源

自然界的发声是随机的，风啸雷鸣、鸟啼蛙噪，都是人类无意也无法控制的声响。但是，一旦人们试图驾驭声响，并以此怡情悦性、鼓奋兴致，就随之产生了乐器。

音乐界通常认为：乐器，就是作为娱乐或特殊用途的专用鸣声器。按照这样的观点，乐器的起源可远溯到大约中石器时代之初。（日·田之尚雄：《中国音乐史》，上海书店，1984年）茹毛饮血的远古人类，在食用动物的骨髓时无意之中吹吸出声响，进而学会了制作骨哨。这是狩猎的信号源，同时，又是最为原始的娱乐发声器，也许，它可称为乐器的鼻祖。新石器时期的河姆渡遗址中发现的骨哨达160件之多，吹出的音响近似于鸟鸣，可作诱捕鸟群之用。最早用陶制作的吹声器具是陕西西安半坡遗址出土的陶哨，形似橄

榄。骨哨、陶哨的出现，确立了吹奏乐器在我国乐坛上的重要地位，为发展笛、箫等管乐器奠定了基础。

击物发声，是人们生活中较为普遍的现象。石器时代的古人，每天以石为工具，进行田耕、狩猎等劳动，也经常“以石击石”，制作更多更好的石器工具。击石生产的音响固然是一种杂声，一开始，并没有任何音乐的价值。但是，这种撞击迸发的响声，却能驱除冷寂感觉，因而这样的石器在漫长的岁月中渐渐从劳动工具中分化出来，演变为专供击声娱乐的乐器。《吕氏春秋》记载：“尧命夔拊石击石，以象上帝玉磬之音，以舞百兽。”这样的传说生动地描述了原始社会的先民们作为万物灵长向大自然鸣声示威的浩大声势。在这里，古代的击石乐器有了一个固定的名称——磬。关于磬的传说，在《尚书》、《山海经》中都有详细记载，从历史演化的过程来看，击石乐器的出现不会很晚，因为碰撞发声的机会远远多于其他发声方式，磨石为磬的发明，肯定在新石器时代就已产生。

与吹奏乐器、击打乐器相似，弹弦乐器的雏形也是在劳动实践中产生的。为了捕猎，古人发明了弓箭。这种有效武器的结构是在弓上安弦，而使用方式则是拉弦射箭，在箭头离弦飞出的同时，弦的自身也发生了振动，引起了“弦外之音”。对于一个射箭猎手来说，这样的响声也是一种特殊的信息反射，因为弦音的高低可以说明弓的张弛程度。这种反应的不断重复，便使古人逐渐将弦移至专设的架上，作为一种弹击发声的乐器。事实上，商朝的甲骨文出现的“𪛗”字为“乐”，其含义是木架上设着丝弦，所以作为专门的弦乐

五、声 学

器的出现应不迟于殷商时代。当然，神话传说中往往会出现更早的丝弦乐器的记载，如“伏羲氏作二十五弦之琴，神农氏作五弦之琴”（《续史记·三皇本纪》），“泰帝使素女鼓十五弦瑟，悲，帝禁不止，故破其瑟为二十五弦”（《史记·孝武帝本纪第十二》）。但这些在缺乏实物考证的情况下是难以作为定论的。

这样，由于生产劳动的实践，乐器的始祖在石器时代已基本形成。

与纯粹研究音乐史相比，物理学史的研究应当更重视乐器在产生过程中声响的物理特性的改善。可以肯定，最早的乐器尽管也能用于娱乐，却缺乏对于“音高”的认识，也就是说，它们的振动并没有较为确定的主音频率，所以也无法成为音乐旋律中的某个单音。这种过渡，是在古人千百万次的偶遇与探索后实现的。这是因为能奏出较为单纯音高的乐器必须有一定的结构特点及材料构成，无论是吹奏乐器的气柱振动、击打乐器的体振动或弹弦乐器的弦振动，要发生较为悦耳的单频乐音，都要经过长期的摸索和总结，而决不会雷同于神话传说中的发明那样不费吹灰之力。

再者，我们今天所说的音乐都离不开旋律构成，而旋律不过是许多单音在时间尺度上的组合与排列。但远古时代的乐器，并不是一开始便专供演奏旋律性音乐的，从无规则的发声到产生有音高的乐音是声律认识史上的第一个飞跃，而从单音高乐音的独奏到多个单音高乐音的组合构成旋律则是第二个飞跃。仰韶文化时期出现的陶埙，是新石器时代中期石埙的类形体，但是，它们都具有两个音孔，据现代测音设

备测定，其双音音程是以小三度为间隔的。氏族社会解体、奴隶社会萌生的交替时期，出现了甘肃火烧沟的三音孔陶埙。而在长江下游的浙江河姆渡文化遗址中出土有骨哨，最多达到6个音孔，其发展之早，制作之精，都胜于前例，更令人惊叹。现代著名笛子演奏家赵松庭曾用这根六音骨哨运用一定的指法演奏出优美的音乐旋律。在这个特例中我们也许可以窥见到我国古代旋律性音乐发展的最早历程，虽然我们对于古人吹奏的方式和效果已无法重现。

第二个飞跃其实已经孕育了我国古代律学的萌芽，因为一种旋律的演奏，总是要求其演奏者培养良好的音乐和谐感，而和谐感不足又将促进古代乐器制作者作进一步改进。这种改进如果建立在算术计算运用于乐器的度量衡制度的基础上，那就意味着声律认识过程中的第三个飞跃——律学体系成为乐器制作的基础和指导。这时，我国的乐器制作便进入了初步的成熟时期。

乐器制作的初步成熟期

商周时期，我国的乐器制作相当繁荣，基本框定了我国古代乐器的类型。仅《诗经》一书就已提及29种乐器。各类乐器形成了颇具规模的“大家族”，如打击乐器有钟、磬、鼓、缶、铃、簧等等，总共21种；吹奏乐器则有箫、管、簫、埙、篪、笙6种；弹弦乐器较少，有琴、瑟两种。及《诗经》以外，乐器种类的总和达六七十种，可谓琳琅满目。在制作材料的选择上，也是应有尽有，《汉书·律历志》以“八音”论之，谓土、匏、革、竹、石、金、木、丝，它们的代表分别是埙、笙、鼓、管、磬、钟、祝、瑟等乐器。