

和研究机构进行评估,以对德国战后与航空有关的军事研究进行限制.这次,冯·卡门在哥廷根以特殊身份见到了他的老师普朗特.在取消了一些与军事工业有密切关系的研究单位后,他保留了普朗特任所长的以从事基础研究为主的哥廷根 Max-Planck 流体力学研究所的建制<sup>[3]</sup>.

冯·卡门先后发表了超过 200 篇的研究论文,很多成果被广泛地在航空和航天工业中应用.他发起并参与了国际上许多重要航空组织的成立.1946 年,当时国际力学界最重要和最有影响力的 IUTAM 会议举行首届大会,冯·卡门出任名誉主席.在 81 岁的时候,冯·卡门成为美国国家科学勋章的首位获得者.晚年时光,他依然留恋与亚深空气动力学研究所保持密切的关系.1963 年 5 月 7 日,流体力学大师冯·卡门在亚深与世长辞.

附表:在学术论文中被广泛引用的冯·卡门和他合作者的部分研究成果

- \* von Kármán 涡街(圆柱绕流)
- \* von Kármán 积分方程(边界层)
- \* Kármán-Pohlhausen 参数(边界层)
- \* von Kármán-Tsien<sup>1)</sup> 压缩性修正关系(空气动力学)

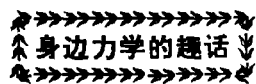
- \* von Kármán 卵形体(超声速空气动力学)
- \* Kármán-Trefftz 变换(翼型理论)
- \* Kármán-Nikuradse 修正关系(黏流)
- \* Prandtl-von Kármán 定律(槽道流的速度)
- \* Chaplygin-Kármán-Tsien 近似(势流)
- \* Falkowich-Kármán 方程(跨声速流)
- \* Born-von Kármán 格子模型(结晶学)

致谢 感谢清华大学档案馆提供的有关历史档案资料.

注 1) Tsien 是钱学森英文名字的姓.

## 参 考 文 献

- 1 Homsy GM, Aref H, Ereuer KS, Hochgreb S, Koseff JR, Munso BR. Multi-Media Fluid Mechanics CD-ROM. Cambridge University Press, November 2000
- 2 庄前鼎. 国立清华大学航空研究所工作报告(1937 年至 1945 年). 清华大学档案馆
- 3 Oswatitch K, Wieghardt K. Ludwig Prandtl and his Kaiser-Wilhelm-Institut. Annual Review of Fluid Mechanics, 1987, 19: 1~25



# 从荡秋千说开去

## ——漫话共振

武际可

(北京大学力学与工程科学系, 北京 100871)

**摘要** 讲述打秋千的原理,引伸到各种各样的共振现象.

**关键词** 秋千, 共振, 摆轮, 振荡器

唐朝诗人王建有一首《秋千词》描写少年女子比赛荡秋千的情景.这首诗说:

长长丝绳紫复碧, 嫋嫋横枝高百尺.  
少年儿女重秋千, 盘巾结带分两边.  
身轻裙薄易生力, 双手向空如鸟翼.  
下来立定重系衣, 复畏斜风高不得.  
旁人送上那足贵, 终睹明璫斗自起.  
回回若与高树齐, 头上宝钗从堕地.  
眼前争胜难为休, 足踏平地看始愁.  
秋千, 大约在战国时代就有了.

据南朝梁代宗懔著的《荆楚岁时记》说:鞦韆(即秋千的古写)本北方山戎之戏,以习轻越者.后中国女子学之.乃以彩绳悬木立架,士女炫服坐立其上,推引之,名曰鞦韆,楚俗谓之施钩,涅槃谓之骨索.

这里山戎是古代中国东北的少数民族,说明秋千是从少数民族传进来的.越(音 qiao),行动敏捷的意思.秋千有许多名称,古时还称为施钩和骨索,据说在汉代人称千秋.现在有的地方称打秋千为打悠游.

大约从唐代以后,在文献和文学著作中有大量关于秋千的记载.唐朝的《天宝遗事》中记载宫中每年寒食节,嫔妃们竞赛荡秋千的情景,唐玄宗称为“半仙之戏”.

图 1 是明末小说《金瓶梅》中的插图,而图 2 则是故宫所藏的清朝画.都画的是妇女荡秋千的场景.说明在中国,秋千主要是妇女的游戏.

历代有许多咏秋千的著名诗句.如杜甫的“万里秋千习俗同”,刘禹锡的“秋千争次第,牵掩彩绳斜.”南唐冯延巳的“柳外秋千出画墙”,宋代欧阳修的“绿杨楼外出秋千”等.

中国的秋千一般为妇女玩耍,特别是一些少数民族还有固定的玩秋千的节日,汉族多在寒食节,朝鲜族在每年的端午节.

本文于 2002-10-29 收到.

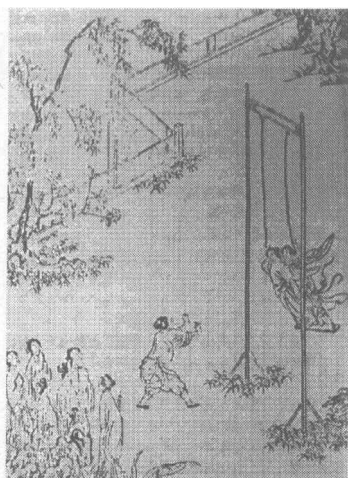


图 1

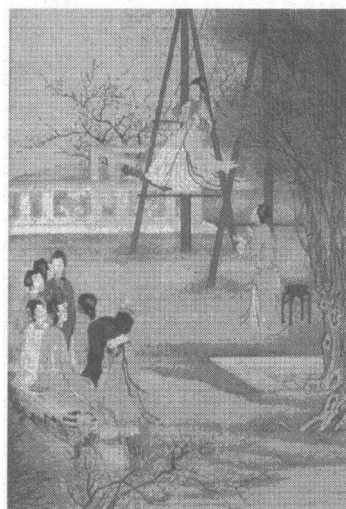


图 2

在西方,荡秋千也很普遍。图3是法国画家弗拉戈纳尔作于1766年~1768年之间的一幅油画(局部)。画中有一个荡秋千的少女,后面在树荫里隐隐可以看到一个男人,可能是一位仆人,不断拉动一根连着秋千的绳子,使秋千荡起来。秋千的正面,有一位年轻小伙子,正在与少女调情。你瞧,大概少女在秋千上想踢一下那位轻薄的小伙子,踢空了,结果不小心把一只鞋子脱落了,飞到了空中。这幅画画出了荡秋千时的生动场面。



图 3

荡秋千有两种方法,一种是荡秋千的人坐在踏板上,由另外的人推或拉,即《荆楚岁时记》上说的“推引之”,也就是秋千在来回摆动到一定的位置,有人顺着秋千的运动方向推或拉一把,这样秋千就荡得越来越高。但是这种方法大多对于比较小的孩子适用。对于荡秋千已经有些本领的人来说,就会像王建诗中说的觉得“旁人送上那足贵”。她们不满足于当“炫服坐其上”由别人“推引”的“士女”,而要自己荡起来。“争胜难为休”,而且要荡得越来越高,直到“回回若与高树齐”才心满意足。

靠自己荡上去是需要有一点技巧的。方法是在一开始登上秋千的踏板时要有一个初始速度,使秋千有一个小的摆动。然后,随着秋千的小摆动,作起立和下蹲的动作。不过这个动作要做得有节律,即当秋千下落时取蹲位,秋千上升时取立位。只要严格遵从这个规则(如图4),秋千就会越荡越高。本领好的荡秋千手,甚至可以在完全没有初始摆动的条件下把秋千荡起来。

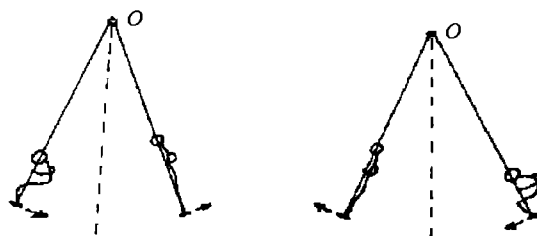


图 4

唐朝人高无际写过一篇《汉武帝后庭秋千赋》,其中有两句形容荡秋千的动作说:“乍龙伸而螭曲,将欲上而复低。”把它翻译为白话,就是说:“随着秋千的一上一下,身体刚刚像龙一样地伸直,却马上又像尺蠖虫一样地卷曲。”这里描写的情景和我们前面所叙述的荡秋千的窍门是完全相合的。这篇赋是一千多年以前写的,说明高无际在当时对秋千的了解就已经很符合现在的力学知识了。

按照以上的方法为什么可以把秋千越荡越高呢?这得从力学上来解释。秋千是一个力学系统,它所受的外力有两个:一个是向下的重力;另一个是在悬挂点 $O$ 作用的约束力,其方向总是沿着秋千绳。我们知道,只有在外力不断对系统做功时,秋千才会越来越高。上述两个外力,约束力作用的方向由于总是和秋千运动的方向垂直,所以是不做功的。只有重力在秋千摆动的每一个来回做功即是由重力在做“推引”。

我们知道,人的重心在取立位时比取蹲位时要高。也就是说,按照上述荡秋千的方法处于上升的秋千比下降的秋千重心要高,而荡秋千时,人的轴线是沿着秋千绳的。这样,作用于重心的重力在秋千上升时对悬挂点 $O$ 的力矩就比下降时为小,所以上一下力矩所做的总功为正。由于系统的每一来回都有能量输入,秋千便自然越荡越高了。

总归不管是哪一种方式荡秋千,都是由秋千系统所受的外力做功。或者荡高或者维持一定高度。不过,外力要对秋千做功,最重要的条件,就是外力推引要和秋千摆动的节奏相合。秋千的摆动有一个节奏,外力的推引有一个节奏,两个



刚才说的是像塔桅、桥之类的大物体。其实小的物体在弹性变形后，一般也会形成往复变形的振动，只不过其频率要高得多。不到米粒大小的石英晶体，它的振动频率是每秒百万次计。这样高的频率，要靠机械的办法来“推引”是办不到的。于是人们想出了用电子振荡的办法来“推引”。也就是用一个巧妙设计的电子线路来实现摆钟上擒纵器的功能。到了 20 世纪 60 年代，利用这个办法代替了原来的摆和摆轮，造出了比原来钟表精确百倍的石英表。瞧，石英表就是秋千的一种发展。

各种各样的乐器，例如小提琴、二胡、钢琴等，都有一个共鸣箱。共鸣箱的箱体和其中的空气，也可以看作一种特别的“秋千”。它是不会自行振荡、即发声的。乐器的发声部分例如钢琴或提琴的弦发出一定音调的声音，如果没有共鸣箱，只靠这根弦扰动周围的空气，我们会觉得声音很小，像蚊子叫。不过，由于向外传出的能量很小，所以响的时间很长，即每奏一个音，“蚊子”嗡嗡叫个没完。这样的“乐器”当然不符合需要。共鸣箱和通常的秋千有一个很大的不同点，是秋千只能和某种频率发生共振，而共鸣箱却可以同许许多多频率发生共振。在有共鸣箱时，发声部分首先对共鸣箱进行“推引”，很快使共鸣箱和琴弦一起振动，然后它们一起扰动空气，便有较大的声音向外传播。由于传播的能量流较大，所以每一个音符所经历的时间也要短。而这正好符合我们对乐器的要求。

人们知道，声音是空气产生振动的结果，我们为什么能够听见声音，是我们耳内有一层薄膜，称为鼓膜。声音的波

动传到耳内，推引鼓膜，使鼓膜产生共振，然后再牵动附近的听神经，我们才能听到声音。看，鼓膜也是“秋千”。要使人能够检测到各种特别的波动就得要设计各种特别的“秋千”，地震仪就是检测地震波的特殊的“秋千”。

各种各样奇奇怪怪的“秋千”是举不胜举的，不过还有许多更为奇特的“秋千”。我们前面列举的，无非是摆动、振动，都是和系统的位置或形状的周期变化有关的。其实，自然界所有能和周期变化的现象产生共振的对象都可以看作“秋千”。

我们知道，电磁波是周期变化的，所以人们发明了电磁波的接受器和放大器，这些接受器和放大器都可以看作精细设计的荡“秋千”的装置。我们每天看电视、听广播、打电话、发电报，每一个环节都在和这种“电磁秋千”打交道。

光线是一种特殊的电磁波，原子内的电子做跃迁时也要以一定频率放出能量，要检测或放大它们，就要精细地设计能和这些频率共振的特殊装置。正是在这种思考的指引下，人们造出了照射强度为地球上太阳光亮度  $10^{10}$  倍、其粗细仅  $1\mu\text{m}$  直径的激光，最近人们造出了一亿年误差不超过  $1\text{s}$  的原子钟，等等。由于这些新的利用共振原理的发明非常精细和奇特，所以在 20 世纪中，有不少基于共振原理的发现和发明获得了诺贝尔奖。

人类社会前进了，科学技术发展了，可是在许许多多新技术、高技术中却包含着人类最早、最朴素的认识。看到以上这形形色色的“秋千”之后，你会觉得“万变不离其宗”，确实如此。

## 说 雨

周道祥

(安徽建筑工业学院, 合肥 230022)

**摘要** 阐述雨、云形成的原因和过程，及与风的关系。

**关键词** 雨，云，风

唐朝徐浑的诗说“山雨欲来风满楼”，很生动地刻画出雨和风之间的关系，然而要准确地揭示雨和风间的内在联系则要借助于力学知识。

下雨是整个地球上水循环的一个环节。海洋和大地上蒸发的水蒸气形成暖湿气团上升而成为云团，在一定的条件下产生降水就是我们常见的雨，正所谓“天上无云不下雨”。

一般情况大气中水含量约 1.1% 左右，而在暖湿气团中水的含量可达 3%~4%，甚至更高。尺度很大的含有大量水蒸气的气块被地面加热后体积会膨胀而形成上升的暖湿气块。由于距地面较远的空气接受地面的热量较少温度较低，所以在湿气上升的过程中不仅周围的大气压力逐渐下降，而且温

度也逐渐降低，研究表明：海拔高度每升高 100 m 大气温度就下降  $0.6\sim 1^\circ\text{C}$  左右。气块在上升的过程中由于压力下降体积会发生膨胀。空气是热的不良导体并且气块尺度宏大上升速度较快，往往来不及进行热交换，所以暖湿气块的体积膨胀几乎在绝热的情况下进行。根据热力学原理，在绝热的条件下气体体积膨胀温度迅速下降，加上周围温度的下降，暖湿气块上升到一定高度时所含的水蒸汽会达到饱和状态，水蒸汽便围绕着空气中的凝结核结成小水滴，即云滴。如果高空的温度低于冰点则水蒸汽会结成冰晶。

暖湿气块继续上升，云滴在上升的途中相互合并，也会由于布朗运动中相互碰并，同时还会有其他的水分子凝聚过来，云滴体积迅速增大。一般把半径  $R < 0.1\text{mm}$  的水滴称作云滴， $R > 0.1\text{mm}$  的水滴称为雨滴。而标准云滴半径为  $0.01\text{mm}$ ，标准雨滴的半径为  $1.0\text{mm}$ ，两者的半径相差 2

2002-08-29 收到第 1 稿，2003-01-23 收到修改稿。