

流体力学课程思政讲义

瑞利：伟大精深啊，自然造物之奇妙！研究探索吧，
求得世界的奥秘，乐在其中矣！



单位：内蒙古科技大学

作者：郑坤灿

时间：2022年2月

目录

第一章 流动的美与妙	4
1.1 上善若水	4
1.2 九寨归来不看水	7
1.3 破解蓝天之谜	12
1.4 破解蓝海之谜	17
1.5 流动的星空	24
1.6 《春江花月夜》诗赏析	28
1.7 《春江花月夜》曲赏析	37
1.8 都江堰中国智慧	44
第二章 达芬奇也是流体力学大师?	53
2.1 绝无仅有的天才和全才	53
2.2 蒙娜丽莎画作鉴赏	55
2.3 飞行之父	63
2.4 质能守恒大统一	68
2.5 天才亦是凡人	73
2.6 小原理有大用	82
2.7 三峡巨门水中受压计算	87
第三章 神秘的炼金术士牛顿	92
3.1 为黑暗赐予光明的人	92
3.2 勤奋的炼金术士	96

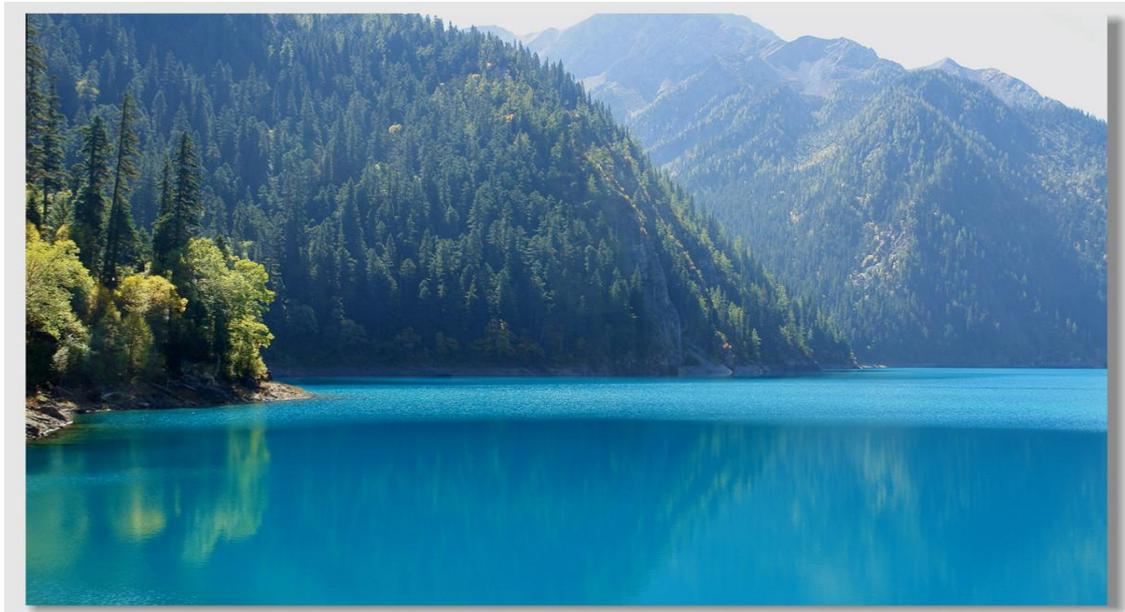
3.3 水桶实验—至今未解之谜	101
3.4 粘性流体力学之父	104
3.5 神奇的非牛顿流体	107
第四章 万能的伯努利原理	113
4.1 伯努利原理及其应用	113
4.2 伯努利原理的本质	120
4.2 公道杯之谜（虹吸效应）	123
4.4 赛车上了天花板	130
4.5 小小气泡撼动钢铁巨无霸	138

第一章 流动的美与妙

同学们好，第一讲请看流动之美与妙。本讲我们将一同移步人间仙境九寨沟、中国智慧都江堰，欣赏梵高星月夜和名诗名曲春江花月夜，让诺奖得主瑞利和拉曼带我们一步步解开蓝天和蓝水之谜团。接下来先认识一下水吧。

1.1 上善若水

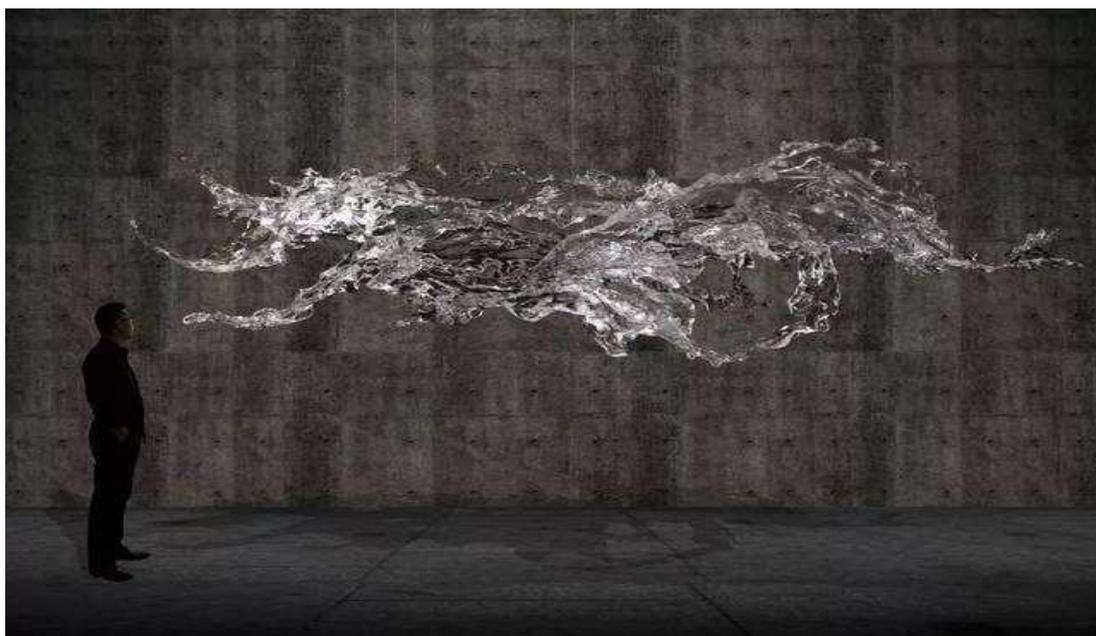
道德经第八章说：“上善若水。水善利万物而不争，处众人之所恶，故几于道。居善地；心善渊；与善仁；言善信；正善治；事善能；动善时。夫唯不争，故无尤。”这应该是古往今来对水的最好赞誉了，水滋养万物不图回报，包容万物不嫌美丑，故能流江河、汇大海、掌控生命万物。



上善若水是说最高的境界、最好的品质就要像水。同时呢水润泽万物不图回报，别人不喜欢的它不嫌弃，所以水更接近于道。那么道是什么，道可道非常道，道家的道是宇宙中至高无上的。



水，至长至短，至长如长江黄河，可以贯通四海；至大至小，深大可如湖与海，能覆盖全球，能弥漫天际；至深至浅，浅小可如霜如雾，能虚化无形；



水，至圆至方，水无形却可为任何形状；至污至净，水是藏污纳垢之所又是清澈澄净之泉；至弱至强至柔至刚，水柔弱能容万物，刚强能断金石。



所以水至善至美，总是那么的纯净柔和、灿烂高洁、绵长深邃而又无坚不摧。

1.2 九寨归来不看水

黄山归来不看岳，九寨归来不看水。领略了吧，有没有想去看看的冲动呢。那么，九寨沟在哪里呢？您没去过一定听过。

九寨沟位于四川省西北部岷山山脉南段的阿坝藏族羌族自治州九寨沟县，系长江支流嘉陵江源头，距离成都市 400 多千米。

集世界遗产、世界人与生物圈保护区、绿色环球 21 三项国际桂冠。传说这三项桂冠均起因于著名的“火花海叩拜”，火花海叩拜究竟是怎么一回事呢？



这就是火花海，怎么样，被惊到了吧，怀疑人生了吧，该膜拜了吧，但光你们拜没有用。

1992 年，世界自然遗产组织官员一行首次造访九寨沟，不巧天降“滂沱”，滂沱打引号，只得冒雨前行。当来到火花海时，天空突然放晴，阳光穿过空中的雾霭，划出了一道美丽的彩虹，妖娆艳丽的火花海呈现在眼前。他们当即酥倒，俯下身跪在海子边上，虔诚的向这大自然的造化叩拜。这就是著名的火花海叩拜，这一拜拜出了九寨三项国际桂冠，这一拜拜出了“人间仙境、童话世界”的美誉。

我们再来看一个海子，海子是老百姓对湖泊的爱称，意为大海的儿子。九寨沟一共 108 个海子，这个可能是九寨沟的五彩池，黄龙还有个五彩池。



看看，枝绽金黄、光影缤纷、水色绚烂、山川辉映、天地绝响。刘禹锡《秋词》说得好，自古逢秋悲寂寥，我言秋日胜春朝。晴空一鹤排云上，便引诗情到碧霄。

对于九寨，我们现在只能管中窥豹，有机会大家一定要亲临其境，细细品味。离开九寨，我们再来一瞥黄龙。

黄龙风景名胜区位于四川省阿坝藏族羌族自治州松潘县。是中国唯一保护完好的高原湿地，与九寨沟相距 120 千米，海拔 1700-5588 米。

黄龙沟钙华景观蜿蜒盘旋于雪宝顶雪山之下，高处眺望宛如一条金色巨龙，故称黄龙。

黄龙以彩池、雪山、峡谷、森林并称“四绝”。其中彩池，更是被誉为“世界奇观、人间瑶池”。



这就是人间瑶池-黄龙五彩池。五彩池是位于黄龙最上端的钙化彩池群，大小形态颜色各异，池水受雪峰滋养绵绵不断。

这是五彩池吗，分明就一种颜色—蓝色，那么静，那么纯，那么翠，绿色都成为了点缀。绿色从来都是生命之色，此间却失去了光辉。

这不是五彩池吗，是的，是数不尽的彩，色彩斑斓，妖娆妩媚，如梦如幻。此景只应天上有，人间哪得几回闻。



清风徐来，涟漪兴起。现在池子里的就是涟漪，发生在水面很微小的波。风乍起，吹皱一池春水。也指的是涟漪，涟漪是表面张力波，在液面产生，表面张

力为变形后恢复力。吹皱是指水面发生了形变，是表面张力最后让水面趋于平静。水中还有声波，压力为恢复力，海浪，重力为恢复力。

同样的五彩池，我们换个位置去看，其色彩和味道就不一样了。



横看成岭侧成峰说的也有这个道理，所以对景物要从不同的空间、不同的时间、不同的层次去欣赏，方能有更多美的发现。

观景如此，观人又何尝不是这样。我们身边的家人、朋友、同学和同事，每个人都有无数张面孔，需要在相处的过程中去发现学习其光亮之身，包容摒弃其晦暗之容。



不同时间有不同的景，每一刻都有其精彩，抓住当下，享受现在，时自精彩要爱惜。同时，春去秋来、斗转星移、逝者如斯不舍昼夜，时不我待要珍惜。

这是雪后的五彩池，我用“枝被酥雪、水肤凝脂”来表达我的感觉，这里被有衣被之意，酥字取其白、也表示柔软酥松之意。水肤一方面指水之皮，即水面，另一方面也指这水如美人之肌肤，而且也确实称得上“肤如凝脂、润泽如玉”。

九寨归来不看水，看水还看九寨水。看了九寨水，每个人心中一定有了水的万千种模样，一万人心中就会有它的万万种风情。

然而，有个共同的东西一定住进了你的心中——就是那能让你心灵歇息又能激情万丈的“水之蓝”。



这是另一种蓝—海之蓝，博大深邃，排山倒海，气势狂野。然而同样的液态水、同样的都在海中、同样的咆哮奔腾、为何却显示不同的色彩？

还有天之蓝，宏阔无限，包容万物。因此最后请思考两个问题：（1）水天为何蓝，浪云为何时黑时白？（2）五彩池的水为何呈现如此迷人的色彩？

1.3 破解蓝天之谜

对于天为什么蓝，许多伟大人物都思考过这一问题。如亚里斯多德、达芬奇、牛顿、瑞利和爱因斯坦，而且达芬奇当时已经窥见了真理的曙光。这节课我们来看看瑞利是怎样破解蓝天之谜的？同时也一窥这位诺奖得主的科研风采。

1.3.1 瑞利如何获得诺贝尔物理学奖？



瑞利勋爵，(1842.12 - 1919.6)，英国物理学家，因和拉姆塞合作发现惰性气体氩而获得 1904 年诺贝尔物理学奖。实际上，最先是瑞利发现的，后来与拉姆塞一起确证。

瑞利以严谨、广博和精深著称。其研究领域几乎涉及了当时物理学的所有方面，被誉为经典物理学领域中最后一个伟大的多面手。

关于这方面，我们后面还会不断的看到，广泛领域的涉猎是所有伟大科学家必须具备的条件。所以我们从这里受到启发：事物是普遍联系的，学科都是相互交叉的，一定不要仅仅把自己局限在某个狭窄的专业领域，否则将会走进死胡同。尤其在学时期，一定要广泛发展自己的兴趣爱好，博学深研，为未来铺好路。

瑞利对科学的追求从他论文集的开篇之词可以看出。他这么说：伟大精深啊，上帝造物之奇妙！研究探索吧，求得世界的奥秘，乐在其中矣！

这里至少可以推测，瑞利一身追求的不是名、利、权，而是探索造物之妙和世界的奥秘，并以此为乐。

于是他的《声学原理》名著至今不仅被声学工作者当做经典巨著，而且被其他物理学者叹服。

由此想想我们自己，所出版的东西能在这个世界存活多久呢？不免惭愧啊。

瑞利名言：一切科学上最伟大的发现，几乎都来自精确的量度。瑞利尤其善于用简单的实验设备来获得十分精确的数据，这才是真正级别的大师，值得我们永远的学习和尊敬。

下面我们从他的诺奖成果去窥探一二。

瑞利十年之功精确测定氢和氧的原子量之比为 1:15.882；然后在反复测定空气分离得到的氮气和化学反应生成纯氮气的密度时发现相差仅为 0.0067g，空气中分离的氮气密度更大了。虽然差别极小，但他相信这绝不是误差，推测发现了新物质；1894 年，与拉姆塞一起确定其原子量为 39.95，在大气中约含 0.93%，并取名为氩，希腊文的原意是“不活泼”的意思。1904 年瑞利获诺贝尔物理学奖，拉姆塞也因之后一鼓作气发现了惰性气体家族而获得了当年的诺贝尔化学奖。这里至少可以想到 3 点：（1）测量技术也可以获得诺奖；（2）实验中微小的差异不能随便忽略，可能隐藏重大发现；（3）发现其一，看看是否还有其二其三，驾轻就熟，乘胜追击。

1879 年，麦克斯韦尔去世，瑞利接任剑桥大学卡文迪许实验室主任。瑞利后来把诺贝尔奖金捐赠给卡文迪许实验室和剑桥大学图书馆。



卡文迪许实验室（Cavendish Laboratory）即是剑桥大学的物理系，麦克斯

韦于 1874 年建成。剑桥大学时任校长威廉·卡文迪许私人捐助 8450 英镑修建。

卡文迪许实验室，从 1904 年至 1989 年的 85 年间一共产生了 29 位诺贝尔奖得主，占剑桥大学诺奖总数的三分之一。

在鼎盛时期甚至获誉“全世界一半的物理学发现都来自卡文迪许实验室。”

瑞利难倒真的不缺钱或者不喜欢钱吗？不可能，钱永远没有够的时候，看那些富可敌国的贪官到死都不收手，所以他有更高的追求。

当然追求钱本身也没有错，只要合理合法即可。不过钱挣多了怎么办，是放于地窖每天看看着呢，还是用于花天酒地的享乐。我想，像瑞利这样，用于投资回报社会才是钱本身最好的归宿。

1.3.2 蓝天之谜

接下来看看蓝天为什么这么蓝？这么傻的问题，那天自古以来就这么蓝着，关你什么事，问这问题有什么意义？

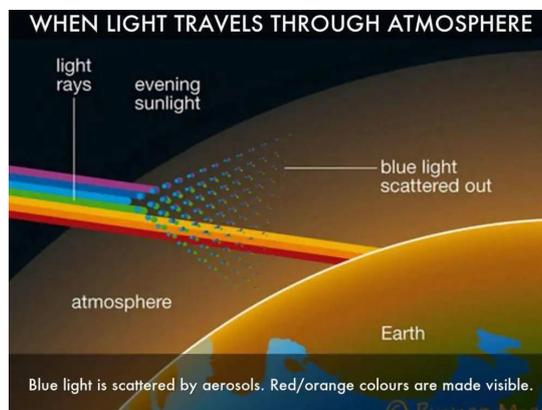
然而一点也不，多问为什么，没有说一定要“高级问题”才问，实际情况也往往相反。

问为什么，就要问那些傻傻的、司空见惯的、熟视无睹的、自以为懂的问题。

学会问为什么，刨根问底的问，直问到自己不懂、书刊不懂、网络不懂、老师不大懂、专家不太懂，那你自己岂不就是这方面的专家了。

因而正是瑞利问了这个为什么而发现了具有重要和广泛应用的瑞利散射。

1871 年，瑞利认为天空蓝色是由于大气分子对太阳光的散射引起。到 1899 年又根据电磁理论推导了散射强度公式，认为当大气中分子或者粒子小于入射光波长的十分之一时，对光的散射强度与波长的四次方成反比，即 $I \propto 1/\lambda^4$ 。公式中 I 为散射强度， λ 为入射光波长。这就是著名的瑞利散射。又称分子散射。



所以如图，白光经过大气介质短波光被散射，透过的为长波的红光和黄光。

正是这瑞利散射使得大气更多的把蓝色散射到天空从而出现了蓝天，这就是蓝天之谜，另外短波的光在早晚被更远距离的散射后进入我们眼睛的就主要是红日了。

不过，您是否看出了一些问题。红橙黄绿蓝靛紫波长逐渐减少，散射逐渐变强，紫光最强，那么散射后的天空为什么不显紫色。

这是怎么回事，看样子瑞利并未彻底破解蓝天之谜。

所以我们继续问：为什么天空不显紫色？答案是什么，留给幸运的您去探求吧。接下来咱们看看瑞利散射有什么用。

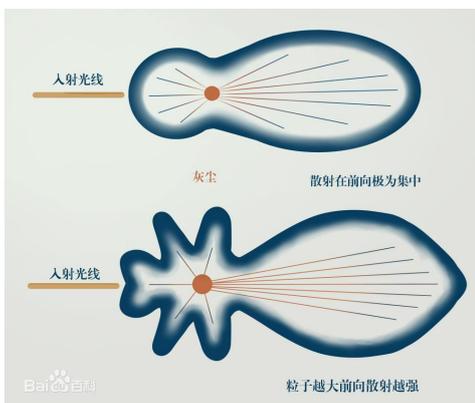


瑞利散射有很多应用，这里就看一个实例你就知道它多有用。交通灯、汽车灯采用红绿黄灯就是因为长波散射少穿透力强而能照得更远。如此重要的应用，还应该再发给瑞利一个诺贝尔奖。

当然瑞利根本不会在乎，他研究蓝天之谜纯粹是为了探索造物之奇妙，也没有功利性的去想将来在交通方面会多有用，但结果比什么都有用。

所以科学研究不要搞得太功利化，需要坐得住冷板凳，需要耐得住寂寞。

我们还是继续去问问天空的云彩为什么有时黑、有时白、有时灰、早晚还带彩吧。这要归功于德国物理学家古斯塔夫·米 1908 年发现的米散射。



如左图，米散射是被尺度接近或者大于入射光波长的颗粒散射，散射与波长无关，但强度在前进方向占优。也称为颗粒散射。丁达尔现象就是米散射。

注意米散射与瑞利散射的区别：由于散射介质尺寸不同，米散射强度与波长无关，但前进方向占优，瑞利散射强度与波长四次方成反比，但各方向均匀。

右图中漂亮的太阳入射光线就是空气中尘埃米散射的结果。还有，生活中太阳光从窗户或者天窗入射到黑屋子会形成一道光路，光路中您能看到粉尘在光路中游弋。又如黑夜中手电筒照射的光路也是由于空气中粉尘的米散射引起。

懂了米散射，请想想云彩为什么白呢，相信聪明的你一定有了答案了吧。



显然，由于米散射与波长无关，所以被反射的、散射的、透射的都是入射光的颜色。

所以当白光或者彩光照射时，如有足够多云的反射光、散射光或者透射光进入眼睛，看到的必然是入射光的颜色白云或者彩云，否则就是灰云或者乌云。

几点感悟与大家分享：

广博和精深是伟大科学家必备的素质；

精确的量度是实验科学的金钥匙；

多余的金钱别随意挥霍而应投资回报社会；

科学发现往往缘于生活中司空见惯的现象和问题；

多问为什么，直到问得谁也不懂；

许多重大科学研究往往始于好奇而非有用。

1.4 破解蓝海之谜

1.4.1 敢于质疑瑞利?

这节课让我们来看看拉曼是如何破解蓝海之谜的?



话说破解蓝天之谜后，瑞利开始思考蓝海之谜。这一天，天气晴朗，瑞利来到海边，仿佛置身仙境。远处白云飘荡，水天一色，哪里分得清是蓝天还是大海。

突然，瑞利疯狂向那蓝色的水天幻境冲去，并高喊“找到了”。瑞利说：“深海的蓝色并不是海水的颜色，只不过是天空蓝色被海水反射所致。”干的漂亮!

从此啊，再也没有人问津这个傻傻的问题了，因为瑞利勋爵已经给出了完美的解答。不过，拉曼例外，也正是这一例外，我们再次纠正了错误，同时还有了意外的大发现。

1.4.2 拉曼何许人?

同学们，这拉曼何许人，竟敢质疑瑞利勋爵。我们来看看。



拉曼，印度物理学家，因拉曼散射获得了 1930 年诺贝尔物理学奖，是第一位获得诺贝尔物理学奖的亚洲科学家。也是大名鼎鼎之辈吧。

拉曼和瑞利一样也是一位教育家，为国家培养了很多优秀人才。我们前面说过，瑞利是经典物理学最后一个多面手，涉猎了物理学的各个领域。

拉曼这方面差点，但是别忘了拉曼曾在财政部供职，并因工作出色被授予了总会计助理的职务，同时业余时间全部用于声学 and 乐器理论研究，很快他就被加尔各答大学聘为物理学教授。

从这里有两点可以启发我们：第一，知之者不如好之者，好之者不如乐之者。兴趣是最好的老师，是学习的持续动力。所以人要广泛发展兴趣，还要培养终身兴趣。

第二，不同人身阶段可能因需要从事多种工作，每种工作都可以尽力做得很好，至少可以认真对待，因为都是一样的时间流逝。同样当你碰到必须要做的事情时，最佳选择就是把它干好。

拉曼从小勤奋努力，才华出众，16 岁就大学毕业。18 岁在《Nature》上发表专业论文。同学们，知道《Nature》是什么样的刊物吗，英国著名杂志《Nature》是世界上最权威的科学杂志之一。杂志以报道科学世界中的重大发现、重要突破为使命。在《Nature》上发文是科研工作者一生的梦想，甚至都不敢想。16 岁就大学毕业，18 岁发《Nature》，想想这是一种怎样的成就。



英国著名杂志《Nature》是世界上最权威的科学杂志之一。杂志以报道科学

世界中的重大发现、重要突破为使命。在《Nature》上发文是科研工作者一生的梦想，甚至都不敢想。

同学们，向拉曼学习，趁年轻，努力闯，博学深研，早出成就。因为年轻人精力旺盛、富有激情、兴趣广泛、好奇心强、敢于挑战权威和破旧立新，所以年轻是学习和创新的最佳时期。

1917年，一条令世界震惊的消息不胫而走，印度加尔各答大学聘请一位业余科研爱好者为教授，很快加尔各答大学因为这位教授成了印度的科学研究中心。

他就是拉曼教授，1930年的诺贝尔物理学奖。拉曼1934年创建了印度科学院并任第一任校长，1947年创建拉曼研究所，为印度科学研究作出了重大贡献。

所以，我们培养的人才一定要同时具备领导管理能力，尤其是高精尖的人才。一方面领导管理能力在生活和工作中不可或缺，另一方面即使不做领导不搞管理至少能够理解或者助力有效管理，再有有领导管理能力的高级人才可以为社会做出更大的贡献。除了拉曼，比如富兰克林、玻尔、费米、朗道等许多顶尖科学家也是卓越的管理者。

1.4.3 旅行闲暇破解蓝天之谜

加尔各答大学果然眼光独到，1917年聘用的业余教授拉曼果然身手不凡。1921年夏天，33岁的拉曼代表这座印度最高学府去牛津参加英联邦的学术会议，还将应邀到英国皇家学会演讲。



这是何等的荣耀。我们来看看蜚声世界的英国皇家学会（The Royal

Society)，全称“伦敦皇家自然知识促进会”，成立于1660年，英女皇是学会的保护人。该学会的宗旨是认可、促进和支持科学的发展，并鼓励科学的发展和使用，造福人类。是英国最具名望的科学学术机构，相当于国家科学院。

英国皇家学会最知名的院士包括爱因斯坦、达尔文、牛顿、霍金等科学家。

2011年10月26日，英国皇家学会宣布重磅消息，将其世界知名期刊实行永久性免费在线开放。70年来的六万份科学论文可以完全被免费公开使用。其中包括牛顿第一篇科学论文、达尔文年轻时期科研作品、富兰克林电学实验报告等珍贵文献。

今天我们将跟随拉曼乘坐“纳昆达”号游轮去破解蓝海之谜团，这是拉曼一直以来的梦想。



看看，游轮已经平稳航行在广阔的海面上，天气晴朗，微风夹着丝丝海腥味儿，朵朵白云飘过天边，蔚蓝色的大海和天空塞满了整个世界。

拉曼，魔术师一样拉开行李箱夹层，取出他总是随身携带的宝贝-尼科尔棱镜、小望远镜、狭缝，甚至还有一片光栅。甲板上人们开始聚集，屏住呼吸。

这是拉曼的移动实验室，可以随时随地开展科学实验。只见他旁若无人，干净利落的在望远镜两头装上尼科尔棱镜用做起偏器和检偏器，用棱镜沿布儒斯特角观察，可消去天空蓝光的反射。

人们瞪大了眼睛，拉曼轻舒一口气。深蓝，这才是海水的本色，比天空蓝更精彩。

大海的蓝色并非天空蓝色的反射，伟大的瑞利错了，别忘了，同学们，是伟大的瑞利错了。

既然不是天空蓝的反射，那大海之蓝究竟来自哪里呢？

拉曼经过研究发文表明海的蓝色其实仍是因为瑞利散射，令人惊奇的发现传遍世界。

瑞利教授肠子都悔青了，为什么当初没有再深入一步，嗨。历史往往如此，好在瑞利此时已经作古不问人间事了。

从这里我们要注意一件事：

要有怀疑精神。怀疑是一种科学精神，怀疑就是不要轻信权威、真理和书本。马克思的座右铭“怀疑一切”成就了自己伟大哲学家和思想家的身份。

当然怀疑不是恶意，也不是不尊重，而是为了推陈出新。

爱因斯坦怀疑牛顿提出了相对论，心中却一直尊牛顿为历史上最伟大的科学家。目前我们国家搞全民创新，创新从哪儿开始，就从怀疑开始。

1.4.4 意外收获诺贝尔奖

蓝海之谜破解，拉曼可以睡大觉了，如果是这样，后面也就没拉曼什么事了，更别说诺贝尔奖了。

拉曼吸取了瑞利的教训，没有就此满足，回到印度后，拉曼立即着手海水散射的有关实验。1923年4月，研究生拉玛纳桑将太阳光经紫色滤光片后照射纯水，从侧面看到了绿光射出。

这是一种反常现象，本来应该在侧面看到蓝紫光。拉玛纳桑不理解，放过了这一现象，认为是水中杂质引起的荧光效应而匆匆毕业了。

拉曼敏锐的觉察到事情可能没有那么简单，如果是杂质的话，很容易改进实验加以验证。

果然，拉曼继续穷追猛打，他的第二位研究生克利希南（K. S. Krishnan）很快利用上述装置证实了绿光并非杂质引起，而是一种全新的散射现象。实际上到此本可以收场了，一种新的东西被发现，已经是非常重大的成果了。

然而拉曼并未停止他探索的步伐。最终65种液体和很多固体被发现都有这样的性质，散射光颜色随物质变化，即不同物质有自己独特的散射光颜色，这就是著名的拉曼散射。而且在实验过程拉曼没有浅尝辄止而是已经在探索其应用了，这就是为什么他要实验65种液体和很多固体的缘故。

发现了拉曼散射，从一开始拉曼就在思考其中的原因。究竟是什么导致了这一现象的发生呢，传统电磁理论没法解释。1924年，拉曼到美国访问，了解到

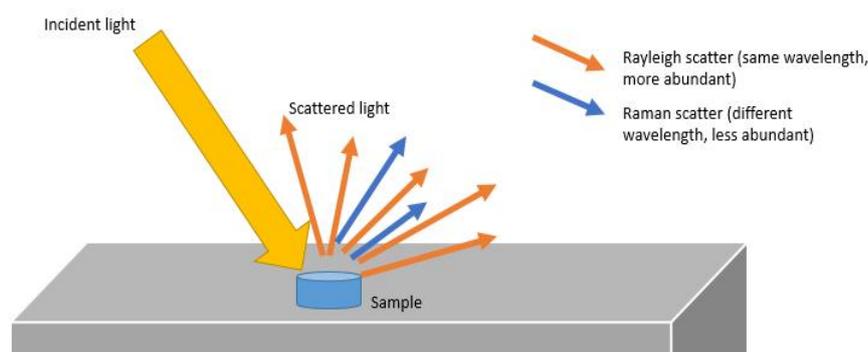
康普顿发现了一种类似的新散射叫康普顿散射，这个散射一样用传统电磁理论没法解释。康普顿散射是这样的，1923年，康普顿用X光投射到石墨上，测得不同方向散射的除了X光外还有其它波长的光。康普顿最后用爱因斯坦的光量子理论进行了合理的解释，即把X射线看做一个个光子，投射到石墨上时，光子与石墨内部的电子发生碰撞，从而改变了光子的能量和动量进而改变了光的波长。拉曼敏锐的觉察到康普顿散射和拉曼散射在本质上的一致性，只不过拉曼散射入射光不是X射线而是普通的光，于是拉曼用同样的理论漂亮完美的解释了拉曼散射。因而可以看出，科学研究不能闭门造车，而要更多的国内国际交流合作，跟踪前沿，激发灵感，互通有无。

海的蓝色也是由瑞利散射引起，这其实并没有创新知识。然而这个过程的副产品却意外具有巨大价值，看看时间，已经是1928年了。

1922-1928年，长达六年之久的研究，一种以拉曼命名的全新散射及其应用就这样尘埃落定。1930年，诺贝尔物理学奖表彰他对光散射的研究和发现拉曼散射。

1.4.5 拉曼散射及应用

那么究竟什么是拉曼散射，如图入射光经过气液固介质后，散射光波长发生改变的现象，称为拉曼散射。而瑞利散射和米散射波长与入射光相同。

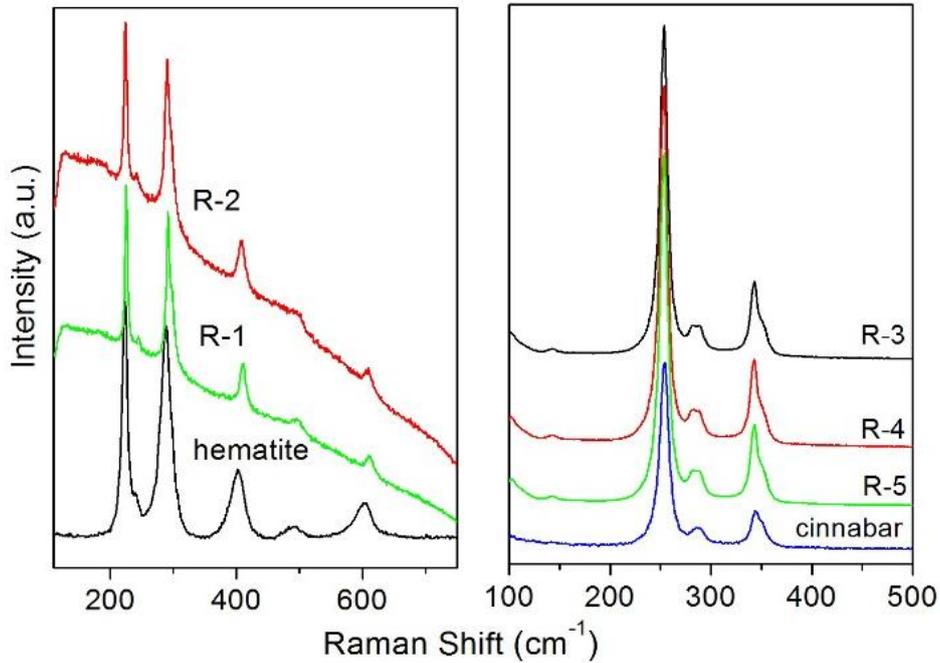


拉曼是印度人民的骄傲，也为第三世界的科学家作出了榜样，打破了西方国家一统天下的局面。

拉曼散射有何用？就因为新就获得了诺贝尔奖吗。实际上拉曼散射有重要应用，拉曼在发现过程中就已经清醒的注意到了。

他为什么要用65种液体和大量固体物质来做实验，就是为了证实每一种物质有对应散射光谱，从而可以根据不同的散射光谱识别对应的物质成分。因而拉

曼散射光谱就是物质分子的身份证。身份证多有用大家比我清楚。



上图左右图分别是赤铁矿和朱砂的拉曼光谱，测出的光谱只需要与每个图最下面那条标准图谱对比就能识别，因而可以用于鉴别艺术品的真假。所以左图样品 R-1 和 R-2 中的光谱峰值与 hematite 赤铁矿几乎完全一致，说明样品中必然含有赤铁矿，而右图样品中 R-3、R-4 和 R-5 一定含有朱砂。

这里再次说明科学研究往往不是纯粹为了有用才去研究它，拉曼从质疑海为什么蓝开始发现了应用极其广泛的拉曼散射。

几点感悟与大家分享：

人人都会犯错，不断纠正错误过程就是成长，也是事物发展的必然规律；

管理领导能力是人的一种基本素质，应该作为人才培养的基本目标；

怀疑是一种科学精神，怀疑是创新的开始；

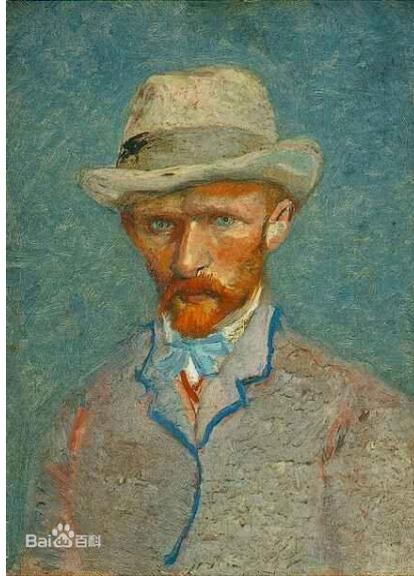
不要迷信大师和权威，敢于质疑，但怀疑不等于恶意和不尊重；

科学研究不要浅尝辄止，有了新发现更要深入挖掘，不留遗憾。

1.5 流动的星空

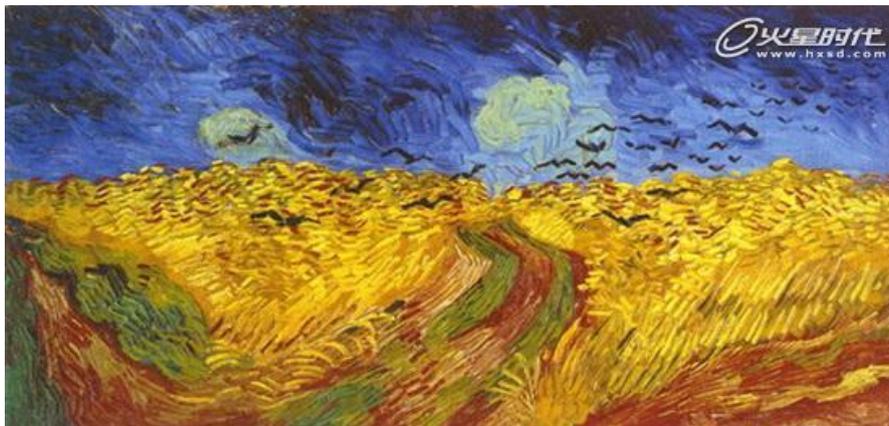
这一节我们将欣赏梵高的星月夜—流动的星空。

1.5.1 梵高的艺术成就



文森特·梵高（Vincent van Gogh，1853年3月30日—1890年7月29日），荷兰后印象派画家。代表作有《星月夜》、自画像系列、向日葵系列等。

27岁才开始自学画画，只用了10年时间就为我们留下了864张油画，1037张素描，150张水彩画。遗憾的是梵高37岁就年纪轻轻离开了这个世界，我们相信他在天国一定有更多更精彩的作品，不过只有神们才能有幸品尝了，也不知道那些高贵的神是否懂得珍惜？



“他生下来。他画画。他死去。麦田里一片金黄，一群乌鸦惊叫着飞过天空。”

这句诗是梵高一身最好的写照，为绘画而生，生的灿烂，为绘画而死，死的辉煌。

麦田、向日葵等农村的一切是他的最爱，但那星星点点的乌鸦，作者究竟想让它们说点什么呢？

科幻片《神秘博士》里奥赛博物馆馆长高度评价了梵高的画作成就，他说：对我来说，梵高是史上最杰出的画家，没有之一，在任何时期绝对都是最知名、最伟大和最受敬仰的。他还说：梵高对色彩的掌控无与伦比，他把生活中的痛苦与磨难转化成画布上激情洋溢的美；痛苦很容易表现，但如何糅合热情与痛苦来表现人世间的激情、喜悦与壮丽，这一点梵高绝对是前无古人，甚至后无来者。

意大利艺术评论家小文杜里评价说：“梵高对后来的野兽派和表现派都有极大影响，他的艺术成就比马奈和塞尚对后继者有更大的作用。”注重色彩应用和绘画的情感表达是他们共同的特点。

然而，梵高一生只卖出了一幅画，《阿尔的红色葡萄园》，而且仅售卖了400法郎。如今啊，梵高哪一幅画作不是无价之宝呢？难怪梵高穿越听到了奥赛博物馆馆长的话后忍不住热泪狂飙，还好，感谢作者这里没让主人公疯掉。此时我忍不住想要质问：在那艺术浪漫的欧洲国度，那些高贵的法国人，怎么就不能低下自己高昂的头颅，欣赏欣赏脚下的、乡村的风景和底层老百姓的情感呢？这么光鲜亮丽的世界，怎么就容不下这样天才的人物呢？

梵高那些曾引起他同时代大多数人迷惘的作品，如今却已印在明信片上，印在挂历上，成了畅销货。企业家们则一窝蜂似地将梵高的名字带进了生意的领域，如梵高领带、梵高圆珠笔、梵高香皂、梵高电影，梵高歌剧，其作品更是国际油画拍卖市场上的遥遥领先者，随便一幅画的拍卖价都在几千万美元。

1.5.2 《星月夜》

《星月夜》更是梵高著名的代表作，网上有估值在2亿美元左右。百度百科说：《星月夜》（The Starry Night）是荷兰后印象派画家文森特·梵高于1889年在法国圣雷米的一家精神病院里创作的一幅油画，是文森特·梵高的代表作之一，现藏纽约现代艺术博物馆；在这幅画中，文森特·梵高用夸张的手法，生动地描绘了充满运动和变化的星空；整个画面被一股汹涌、动荡的蓝绿色激流所吞噬，旋转、躁动、卷曲的星云使夜空变得异常活跃，脱离现实的景象反映出梵·高躁动不安的情感和疯狂的幻觉世界。



上图就是梵高名画《星月夜》，图片来自美国纽约现代艺术馆。我们看看梵高作此画背景：

1889年五月，梵高在法国圣雷米的圣保罗避难所接受治疗。他几个星期都没有离开医院，只是在医院的花园里画画。与他在圣保罗的其他绘画作品以及从那里拍摄的照片进行比较，可以看出，星月夜中的群山就是梵高从医院的窗户可以看到的阿尔卑斯山。

梵高在写给弟弟西奥的信中写道：“今天早晨，我在日出前很长一段时间从我的窗户看到了乡村，除了那颗看起来很大的晨星，什么也没有。”他描述了自己创作《星月夜》（1889年）的灵感，在法国南部，他在继续创作艺术的同时，寻求从情感痛苦中解脱出来。

纽约现代艺术博物馆对作品从几个方面进行了介绍。

(1) 这幅中等比例的油画以满月星空为主。它占据了图像平面的四分之三，看起来很湍急，甚至激动不安，强烈的旋转模式似乎像波浪一样在其表面滚动。它被明亮的球体所覆盖，其中最右边是新月，左边是晨星金星，周围环绕着同心圆的白光和黄光。

(2) 在这片富于表现力的天空下，坐落着一个安静的村庄，周围是一座教堂，教堂的尖塔耸立在背景中起伏的蓝黑色山脉之上。夜景的前景是一棵柏树。像火焰一样，它几乎到达画布的顶部边缘，充当了陆地和天空之间的视觉链接。从象征意义上来说，柏树可以被看作是一座桥梁，连接着以地球为代表的生命和

以天空为代表的死亡，它们通常与天堂联系在一起。柏树也被视为墓地和哀悼树。

(3) 在星光灿烂的夜晚，梵高描绘了法国的圣雷米（他住院治疗的地方），但改变了小镇的一些细节。虽然那个城镇的教堂有一个圆顶屋顶，但他在这里用尖顶（图中黄色虚线处）来表现它，这种建筑特征在法国地区很少见，但在他的祖国荷兰很常见。

(4) 繁星之夜既富于表现力又有高度的结构感。梵高将教堂与柏树在对角线上对齐，给这幅画一种深度感，并将中心星云直接放置在构图消失点的正上方。

(5) 梵高描绘了他整个职业生涯中的夜晚。众所周知，他读过安徒生的童话故事，对“月亮看到了什么”特别感兴趣，在这个故事中，月亮描述了它在下面的世界看到了什么。

(6) 梵高以在画布上涂上厚厚的颜料而闻名，被称为“*impasto*”。*impasto* 是意大利语中“粘贴”或“混合”的一个词，用来描述一种绘画技巧，在这种技巧中，颜料（通常是油）被涂得很厚，以至于笔触或调色刀的纹理清晰可见。

看了前面的介绍，请再来仔细看看这幅画，你们能够看到些什么呢？一幅艺术作品，仁者见仁，智者见智，允许观众自己独特的感受，这才是艺术本身的魅力所在。

说一下我个人体会：

梵高曾写道：“但看到星星总是让我做梦。“为什么，我对自己说，天空中的光点对我们来说比法国地图上的黑点更难接近呢？就像我们乘火车去塔拉斯科或鲁昂一样，我们乘死亡去星星。

再来看这幅图，图中他一直期盼的天堂已经与大地融为一体，村庄里的植被、天边的群山已经与星空一起在运动，月亮和星星被流体环绕，是那樣的迷人和美丽，这是一个生机勃勃的世界，柏树更是激情绽放，展现出动人的生命力。

所以，作者在此应该是描绘了一幅生动绚丽的天堂景象，他似乎渴望完全置身其中并如此安详。

果然，第二年（1890年），他便永远的进入了这个地方。最后，让我们一起祈祷：请在那边好好地，希望金黄的麦田没有乌鸦飞过

1.6 《春江花月夜》诗赏析

1.6.1 近千年等待

《春江花月夜》是唐代诗人张若虚的作品。素有“孤篇盖全唐”之誉。还被誉为：“盛唐第一诗”、“春风第一花”。闻一多先生赞美此诗说：“这是诗中的诗，顶峰上的顶峰。”

列位看官，这样的巅峰之作却近千年不被人待见，岂不是怪事一桩。

该诗为初唐之作，曾经被埋没近千年。

今存唐人选唐诗十种和今传唐人杂记小说未载张诗。卞孝萱教授推断该诗可能记载在已佚的唐人选唐诗十三种里。

宋代文献如《文苑英华》、《唐文粹》、《唐百家诗选》、《唐诗纪事》等书均未载张作。《春江花月夜》记载最早是在《乐府诗集》卷四十七中。

元人《春江花月夜》还不在于“正声”之列。

明万历胡应麟著《诗薮》收藏该诗。胡应麟曰：张若虚《春江花月夜》，流畅婉转，出刘希夷《白头翁》上，而世代不可考。

清末王闿运大胆地指出：这篇作品之于四杰歌行，实乃青出于蓝而胜于蓝，冰生于水而寒于水。

王闿运还说：“张若虚《春江花月夜》用《西洲》格调，孤篇横绝，竟为大家。”

闻一多先生赞美此诗说：“这是诗中的诗，顶峰上的顶峰。”

张若虚（约公元660—约720），唐代诗人。扬州人。曾任兖州兵曹（正师级）。生卒年、字号均不详。事迹略见于《旧唐书·贺知章传》。

曾以“文词俊秀”驰名京都，与贺知章、包融、张旭并称“吴中四士”。

作品两首：《春江花月夜》、《代答闺梦还》。

这里边有诸多谜团：为什么一个文辞俊秀驰名京都、能与贺知章等并称吴中四士的兖州兵曹（正厅），居然生卒年不详，居然只写了两首诗，居然其中一首能誉为“盛唐第一诗”。

这些只有等历史学家、考古学家去揭晓了。

春江花月夜全诗36句，每四句一换韵。全诗诗情、画意、哲理融为一体，意境空明，想象奇特，语言自然隽永，韵律宛转悠扬，洗净了六朝宫体的浓脂腻

粉，具有极高的审美价值。

1.6.2 景为情生

（春江潮水连海平，海上明月共潮生。滟滟随波千万里，何处春江无月明？江流宛转绕芳甸，月照花林皆似霰。空中流霜不觉飞，汀上白沙看不见。）这四句写景，景色如画，人在画中，画却在流动中。



（春江潮水连海平，海上明月共潮生。滟滟随波千万里，何处春江无月明？）看开篇四句，场面阔大，意境深远。寂静的夜里，千江入海，海天相接，明月朗照，春满人间。蒋勋老师说得好，张若虚这首诗拉开了大唐王朝的序幕，一个伟大的时代即将来临，那就是开元盛世。

注意句中“连海平”，是由流体静力学原理决定的，重力场中水面是水平面和等压面，等于1个大气压。当然准确说水面应该是球面，但由于地球太大，局部看来就近似为平面了。

“共潮生”中“共”和“生”两个字表示月亮和潮水一起从海中生长，形象生动，表现出了海、潮和月三者之间密切关系。用“伴”字或“随”字，“升”字、则达不到这样的效果。

滟滟随波千万里，何处春江无月明。

滟滟表示水波动荡的样子，水面波光粼粼，绵延万里。有哪一条春江没有月

光笼罩啊。

注意，作者或是游子只是站在某条河边，即使是江海交接处，那肉眼看到的范围也很小。所以蒋勋老师说只有佛家天眼，才能看得如此高远。我想这里诗人更多用的是慧眼，智慧的眼睛，他的思绪跟随水波到了千万里的地方，何处春江无月明需用推理得到。

因此这四句景足以表现诗人的胸襟、气度和超凡的想象力。



（江流宛转绕芳甸，月照花林皆似霰。空中流霜不觉飞，汀上白沙看不见。）

当一个游子被置于宇宙背景之中，他自然会想到故乡那片神奇的土地。他追随江流进入鲜花盛开的芳甸，月光下，感觉花林似霰（小冰晶），流霜不飞，白沙不见。寥寥几个意象营造出绝美的意境，静谧、纯粹，空灵，让人意犹未尽、流连忘返。

这里“流霜不觉飞”和“白沙看不见”写得很精彩，细腻传神。乍看是矛盾的，明明是流霜，怎么会不飞呢，明明是沙子，怎么会不见呢。仔细思考后又不由得拍案叫绝。你可以尝试用物理学的知识思考为什么会出现这种情况？提示一下用前面讲过的米散射。

这部分反映了作者细致入微的观察和深入的思考，所以细致入微的观察和深入的思考对人文和科学都不可缺少。

1.6.3 理为情说



（江天一色无纤尘，皎皎空中孤月轮。江畔何人初见月？江月何年初照人？人生代代无穷已，江月年年只相似。不知江月待何人，但见长江送流水。）这四句说理，作者在此问出了“千古一问”：江畔何人初见月？江月何年初照人？这一问问得简洁、问得平白、问得质朴、问得深刻和问得永恒。下面来看看原因。

在这明静的霰、霜、白沙甸上，连花都看不到了，您自然只有面对那与人亘古相伴的明月了。此情此景，您和月亮谈些什么呢？江畔何人初见月？江月何年初照人？月亮啊，在这美丽的江畔上，是谁第一眼看到了您，您又是哪一年最早

看到这江畔的人?为什么我称它为“千古一问”呢?原因有如下几个方面:

其一,这一问,是人的欲望本能和原始冲动,是作为人者的意识觉醒。我们的猿人祖先、以及童年时代懂懂的我们自己,当面对此情此景也一定不止一次的这样类似的发问。这是人文之问,也是永恒之问。

其二,这一问,就像在问“我是谁?”、“我从哪儿来?”、“我要去哪里?”,这些问题永远没有盖棺的解答,也称为哲学终极之问。

其三,这一问,又是科学之问,人们一直在前仆后继的用科学手段探索其中的解答。包括宇宙学、人类学、地质学、考古学、物理学、化学、数学等,解这一问会涉及所有的学科门类。

所以这一问是人文之问、哲学之问、科学之问、永恒之问,是千古一问。



(人生代代无穷已,江月年年只相似。不知江月待何人,但见长江送流水。)江畔何人初见月?江月何年初照人?此文发出,一般接下来就应该“感吾生之须臾,羨长江之无穷”,但作者并没有,而是人生代代正如这江中的小舟,不断的转瞬即逝,但也可以和这江月一起被定格为永恒,即使永恒了,我们又哪里知道谁最初哪年看见了月亮,月亮又在等待哪一个人呢?此题无解,唯有长江水无语东流。

一个“送”字,把思绪带入到了离愁别恨的另一种永恒中。该句由说理转入后面的抒情,过渡自然,不着痕迹。

前面写景说理结束，其实景中有理，理中有景，景理交融不可分割。一起为后面的抒情做铺垫，作者下面将为我们展示人间一种美轮美奂的相思之情，这种情和美现在已经难再寻觅了，想想什么原因。

1.6.3 千古深情



（白云一片去悠悠，青枫浦上不胜愁。谁家今夜扁舟子？何处相思明月楼？）
这是由理转情，承上启下的过渡句。

今晚花正好，月正圆，我独自着扁舟一叶，看长江送流水东去，自然想起了江边，白云、青枫的离别之际。谁家扁舟子，何处明月楼，分明是一种相思两处闲愁，暗示作者将从思妇和游子两方面来写这种相思之情。

另外注意：相思是一种闲愁，就是闲得，没有闲就没有这种愁。因而大家将来有一天如果不胜相思之苦，我教大家一个好办法，猜猜是什么。就是找点当紧事干，让自己忙起来，别闲着。

（可怜楼上月徘徊，应照离人妆镜台。玉户帘中卷不去，捣衣砧上拂还来。此时相望不相闻，愿逐月华流照君。鸿雁长飞光不度，鱼龙潜跃水成文。）这里我个人认为是实写思妇怀远，虚写游子思乡，是游子自作多情，想自己的心上人想自己的情形。实写思妇怀远，一种相思，两处闲愁，可以分担一下游子那浓得化不开的愁思，让人读之感觉思极而不悲。如果这些思念完全放在游子身上，读

者和游子可能都会疯掉。



（可怜楼上月徘徊，应照离人妆镜台。玉户帘中卷不去，捣衣砧上拂还来。）句中“月徘徊”让人产生丰富的联想，表达更为深沉的思念。可以理解为拟人，写月儿在楼上徘徊，因为丈夫离家，自己曾经多少次高楼凝望，盼儿不归，后来也懒得甚至不敢上楼了，只剩下空楼夜月；也可以理解为月下人徘徊，该死的，还不回，连封信影子也没有；同时月又代表相思，可以理解为游子的心在徘徊，亲爱的，您感受到了吗，我每个晚上都与明月一道在楼上守护。

句中“离人妆镜台”，一方面表示丈夫走后的妆镜台，是女人的妆镜台；另一方面表示丈夫的妆镜台，表达一种亲近之感，理解为丈夫替我买来梳妆用的，所以是丈夫的；同时这里可能还暗示了古代男女的不对等关系。

句中“卷不去拂还来”表面指月光，远远的，别这么烦人。实际指女人相思之苦，卷和拂两个动作形象生动表达了这种情思的无赖和不甘。

这两句抒情，借物思人，含蓄委婉。

（此时相望不相闻，愿逐月华流照君。鸿雁长飞光不度，鱼龙潜跃水成文。）此时我们只能凭着月光相望，其实只是相互望着月亮，多么希望乘月华来到君的身边。只恨鸿雁长飞，鱼龙潜跃也解不了我心中的急切啊。本来能够相互望着，那该多好啊，但这里的相望，只能望穿秋水，实际上还不如能够听见声音真切。另外本来鸿雁传书、鱼龙传信，哪个离别之人不盼望啊，但这又哪里比得上极速

的光和无限的水呢。这里制造了一系列的矛盾冲突，表达了无法排遣的相思。



此处抒情：大胆直露，激情奔放，更感性和情绪化。

（昨夜闲潭梦落花，可怜春半不还家。江水流春去欲尽，江潭落月复西斜。斜月沉沉藏海雾，碣石潇湘无限路。不知乘月几人归？落花摇情满江树。）这四句是在梦中，梦见花落空潭，春将尽，月将落，人未归。花儿那么绚丽，却空自飘落，无人怜惜。闲潭这个闲字表达了睹物无人，空虚寂寥的心情；可怜是思念之情的直接流露，让人肝肠寸断，难以抵挡。月一旦落下（照应前文），咱们便不能相望，想到你我之间无限遥远的路途，相见无非是一场梦。月儿终于落下了，只留下春水树影，花落满江，而我还在那里痴痴守望。最后，一个“情”字终结全文，却余音袅袅，难以决绝。



传统分析，该段是写游子思归，此梦应是游子之梦。但如果理解为思妇盼归反而觉得前后衔接更加顺畅，作为读者的您是怎样的看法，下去思考思考。

最后，总结一下，整首诗以月为主线，以春夜为故事展开背景。感觉春无处不在，江无处不流，花无处不开，月无处不照，夜无处不现。春、江、花、月、夜五种意向水乳交融，不可分，不偏废，各得其所，交相辉映。

明文学家锤惺曰：将春江花月夜五字炼成一片奇光，分合不得，真化工手。

写景说理抒情不累赘、不矫饰、娓娓道来、恰到好处。

全诗包括标题 257 字，只一愁字引领（青枫浦上不胜愁），一思字字镶嵌（何处相思明月楼），一情字终结（落月摇情满江树），除此，通篇写思不见思字，写情不见情字，但时时处处情思缠绵。最难能可贵居然能做到：思而不悲，念而不怨，愁而不伤。

蒋勋老师赞誉春江花月夜是佛经，作者在用天眼看世界，看人生。我想作者也在用慧眼法眼和佛眼感悟宇宙品味人生，诗中才能情理景相得益彰，张弛有度。

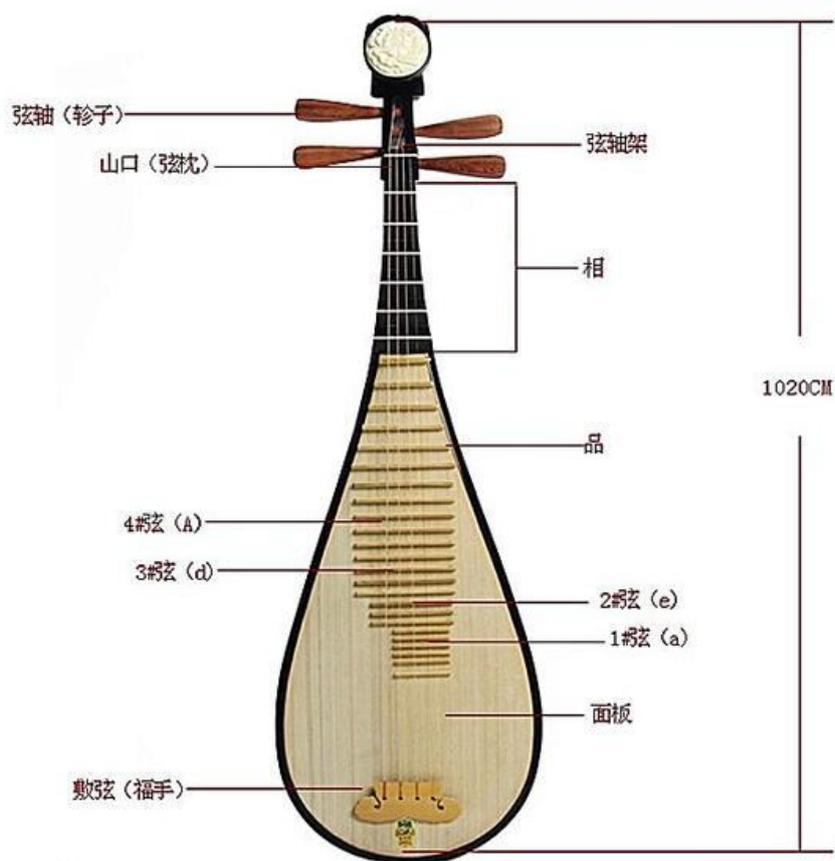
1.7 《春江花月夜》曲赏析

《春江花月夜》简介

《春江花月夜》又称《夕阳箫鼓》、《浔阳月夜》、《浔阳琵琶》，中国古典音乐经典中的经典。主题富于江南水乡情调，是一首典雅优美的抒情乐曲。

欣赏此曲，建议大家重温白居易的《琵琶行》，该诗将写人、叙事、抒情、音乐欣赏完美结合，无出其右者。

春江花月夜是主题富于江南水乡情调。此曲以柔婉的旋律，安宁的情调，描绘出人间的良辰美景：请大家闭上眼体会一下意境。暮鼓送走夕阳，箫声迎来圆月；两岸青山叠翠，花枝弄影，云水深处、水天一色；人们泛着轻舟，荡漾于春江之上……。欣赏之前，咱们了解一下乐器，乐曲演奏分别由下面的不同乐器单独演奏或者组合而成。



琵琶属于弹拨乐器，发音清脆、明亮、富于颗粒性。是可独奏、伴奏、重奏、合奏的重要民族乐器。《琵琶行》中弹奏技法描述：轻拢慢捻抹复挑、声音描述：大珠小珠落玉盘、间关莺语、幽咽泉流等。

古筝：弹拨乐器。音色优美、音域宽广、演奏技巧丰富、具有丰富的表现力。



箫：吹管乐器，竹制。音色恬静，常演奏宁静、抒情的旋律，又称洞箫。



二胡：拉弦乐器。适宜表现深沉悲凉的内容，如二泉映月、梁祝等，也能表现气势壮观的意境，如赛马。



乐器介绍完毕，咱们先来整体听听这首乐曲，由于时间关系，我选了中国国家交响乐团演奏的春江花月夜，时长约4分钟，大家一会儿听听注意有下述感受。暮鼓送夕阳，箫声迎明月；两岸青山叠翠，花枝弄影；云水深处、水天一色；人们泛着轻舟，荡漾于春江之上……



其实原曲一共有十段，取名江楼钟鼓、月上东山、风回曲水、花影层叠、水云深际、渔舟唱晚、回澜拍岸、桡鸣远濼、欸乃归舟、尾声。现在都取舍改编为诸多版本。下面欣赏主要的几节。

江楼钟鼓

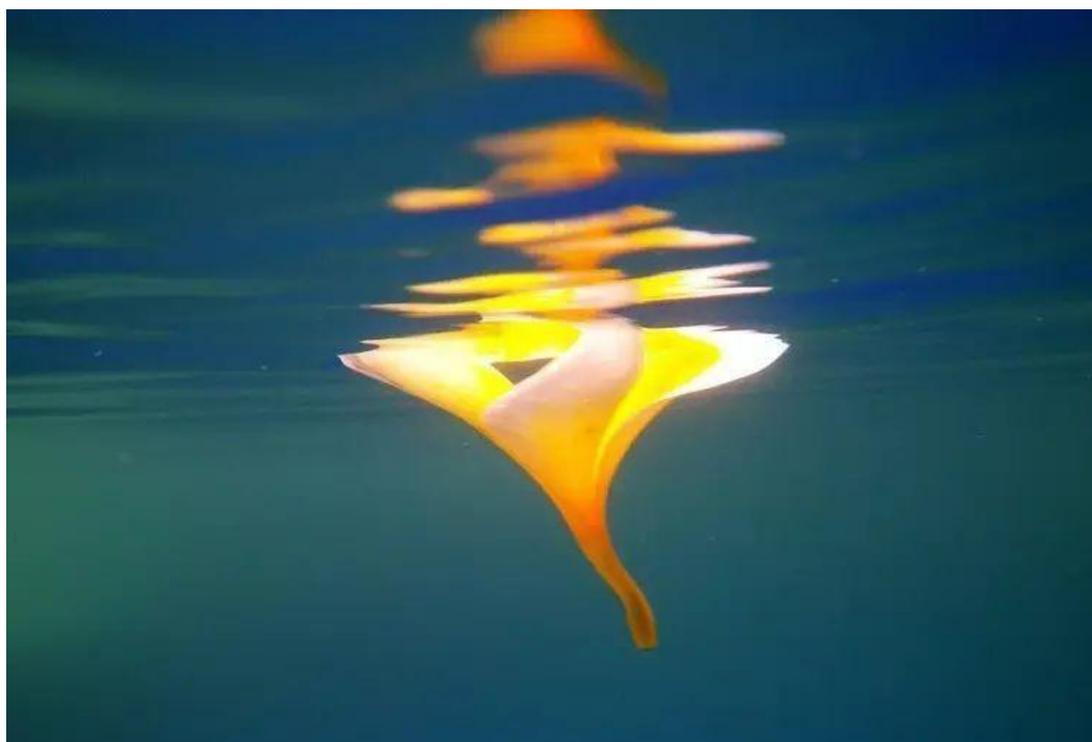


首先看乐曲的第一段“江楼钟鼓”，以琵琶由慢渐快来模拟鼓声由远而近，并和水声相和。随后，一般由箫和琵琶合奏出优美如歌的主题，这里只有琵琶和

鼓声。如江上轻波，优美而流畅的旋律展现出一幅暮色江南，夕阳晚照的安详景色。

花影层叠

花影层叠这一节舒缓的主题变奏表现江流宛转、微风轻拂、月照花林的春江美景，后面四个“鱼咬尾”乐句表达了水中花木摇曳、光影婆娑、层叠恍惚的意境。



这里说说什么是鱼咬尾，是指前一句旋律的结束音和下一句旋律的第一个音相同的结构，也叫衔尾式、接龙式。这是这首乐曲的一个主要特征，在整首乐曲中被反复应用。

上面谱中红色虚线中的两个乐句中相邻的音相同，就是鱼咬尾或者接龙式。

水云深际

水云深际这节用琵琶、在低音区演奏，表现出水波荡漾、云水依依、水天相接的意境。之后高音区泛音奏出江流奔涌的景象。继续欣赏。



渔舟唱晚

渔舟唱晚一节，用箫和琵琶演奏出歌唱性旋律，伴以间断的木鱼声。渔人们互相唱和，表现出满载而归的喜悦心情。先来听听。



注意这里又是主题变奏，方式为换头合尾。什么是换头合尾呢，咱们来看看。

春江花月夜，在第一段江楼钟鼓结尾奏出优美的主题旋律，之后几乎每一段都由主题变奏而来，即把主题的前边乐句进行改变叫换头，但是主题的末尾句始终保持不变叫合尾，因此叫换头合尾。

如上面谱中，前面是主题旋律，后面是水云深际的一部分乐句，前面不太一样，但最后红色虚线框里两小节都是 23212312。

唉乃归舟

唉乃归舟一节为全曲高潮，大家能够听到节奏由慢渐快，由弱渐强，表示轻舟由慢到快行于江面，桨声唉乃；最后高潮部分表现出群舟竞归，浪花飞溅、橹声阵阵的意境。



生动表现了渔民们劳作归来那种舒畅和喜悦的心情，饿极知饭香，渴极知水甜，劳累一天放松后又是何等的轻松愉悦。继续来听。

尾声

尾声，在低音区以舒缓的速度，自由的节奏，奏出悠扬、徐缓、抒情的音调，表现归舟远去，万籁俱寂，江水一片宁静的优美景色。听听最后尾声。



归舟远去， 万籁俱寂

几点感悟与大家分享

音乐更能激发人的想象力，要尝试去懂得它、欣赏它；
音乐首先是对美的追求，音乐美最能安慰我们的心灵；
音乐主要通过声音、节奏、旋律和和音来表达人的情感；
总之，热爱音乐吧，它能陪伴我们好好活着。

1.8 都江堰中国智慧

1.8.1 大禹治水



先说说 4000 多年前的大禹治水。

禹之前鲧：窃天之息壤堵水。什么是息壤呢，息壤就是自己能生长的土壤，只长不消，越挖越多。但堵水没有成功，被杀。

禹后来改变了策略：“治水须顺水性，水性就下，导之入海。高处就凿通，低处就疏导”。因势利导，13 年完成治水大业，因而顺利当了皇帝。

实际中，堵法和疏法都是治水的策略之一，只是依水性和水势应该多用疏法。

后来因势利导不仅是治水方略，也是管理中的经验良方。

1.8.2 都江堰简介

来看看中国智慧都江堰。都江堰坐落在成都平原西部的岷江上，位于四川省都江堰市城西。秦昭王末年（约公元前 256）由李冰父子修建。是全世界迄今为止，年代最久、唯一留存、以无坝引水为特征的宏大水利工程。被誉为“世界水利文化的鼻祖”。属于世界文化遗产、世界自然遗产和国家 5A 级旅游景区。

这就是举世闻名的都江堰。请看岷江从千山万壑里奔涌而出，在这里被金刚堤人为分为外江和内江，外江汇入长江，内江用于成都平原的灌溉。右手边为玉垒山，上有纪念李冰父子的二王庙。



都江堰最值得一看的是什么呢？就是三大主体工程，分别是鱼嘴、飞沙堰和宝瓶口。中国智慧主要体现在这里，下面我们一起来看看。



1.8.3 鱼嘴分水（最早应用质量守恒定律）



主体工程之鱼嘴位于金刚堤头部，将岷江来流一分为二，形成外江和内江，内江经宝瓶口流入成都平原。所以叫鱼嘴分水。

鱼嘴分水伟大之处在于 2000 多年前的李冰父子实现了岷江的四六分水，而且这个分水可以根据水量自动动态调整，冬天水枯季节外四内六（外江四成，内江六成），夏天洪水季节则外六内四。

这样有什么好处呢，可使得成都平原枯水不汗，洪水不涝，保持冬天夏天稳定供水。

能想到中国智慧体现在什么地方了吧。我想主要体现在两个方面：

(1) 世界上最早发现并应用了质量守恒定律，即上游的流下来的水量等于从下游流出的水量，四六分水就是应用。比达芬奇要早 1500 年以上，目前公认质量守恒定律是达芬奇观察河流流动时得出的。

(2) 利用质量守恒定律设计了四六分水工程，能根据水量多少自动调节。就这个设计，我们现在来精确实现几乎都不可能，我们就简单想想思路。

要让内江多走水，谁都能够想到必须把内江挖宽挖深，但这样显然会出现问题，会导致冬季和夏季走的水量都多，这样夏天洪水期会造成涝灾。怎么办呢？

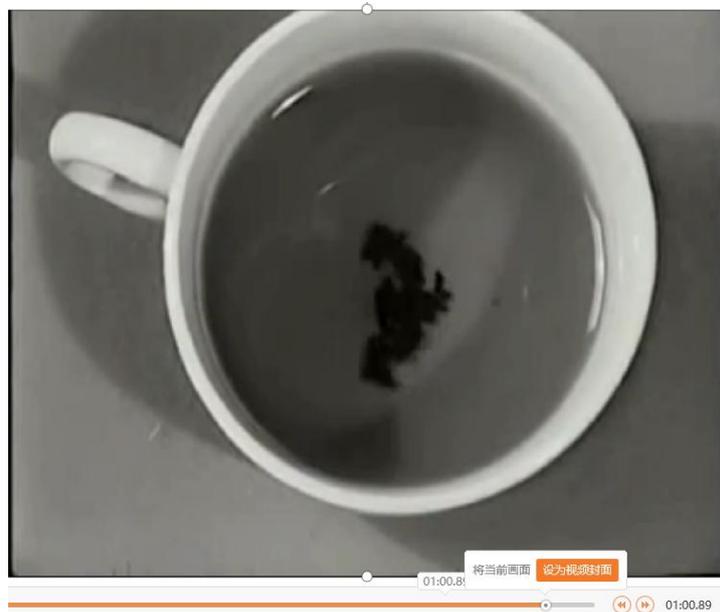
工程最终设计是挖深内江，挖宽外江来解决这一难题。所以都江堰为什么现在来看都是世界伟大的水利工程，这还不算，来看看都江堰排沙设计。

1.8.4 飞沙堰二八排沙（二次流原理的熟练应用）

主体工程飞沙堰位于金刚堤的尾部，实际是通往外江的一道闸门，正是通过它八成（即 80%）的粗沙石从这里被排出，保证内江不容易被堵塞。这一设计来

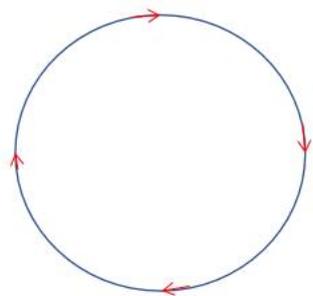
源于对流体力学的“二次流”原理的理解。

什么是二次流呢？先来看一个茶叶实验。

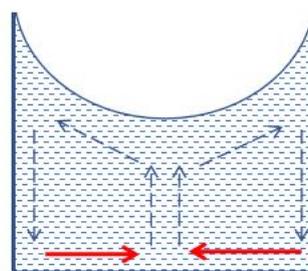


请认真观察茶杯中的茶叶如何运动？首先将茶水倒进茶杯，接着用勺子搅动茶杯中水旋转，茶叶也跟着旋转，但由于茶叶比水重最后沉入杯底继续随水流旋转。我们可能会想到由于离心力的作用，茶叶肯定会被甩到边壁。然而正好相反，茶叶都聚集在了杯中央。这就是著名的二次流。

那么究竟什么是二次流呢？对刚才茶杯实验，看左图，是茶杯的俯视图，勺子搅动水旋转的流动叫主流或一次流，而右图，沿直径的截面，茶叶向中心聚集的流动就叫二次流，二次流一般与主流方向垂直。同时请注意由于流体转动的离心力作用，流体会被甩向壁面，因而在液面造成向壁面的流动，壁面液面升高，最后自由面不再平坦而是成为了抛物面。所以实际上二次流应该是右图所示的环流，请思考，茶叶为什么没有做循环流动呢？显然是重力作用。



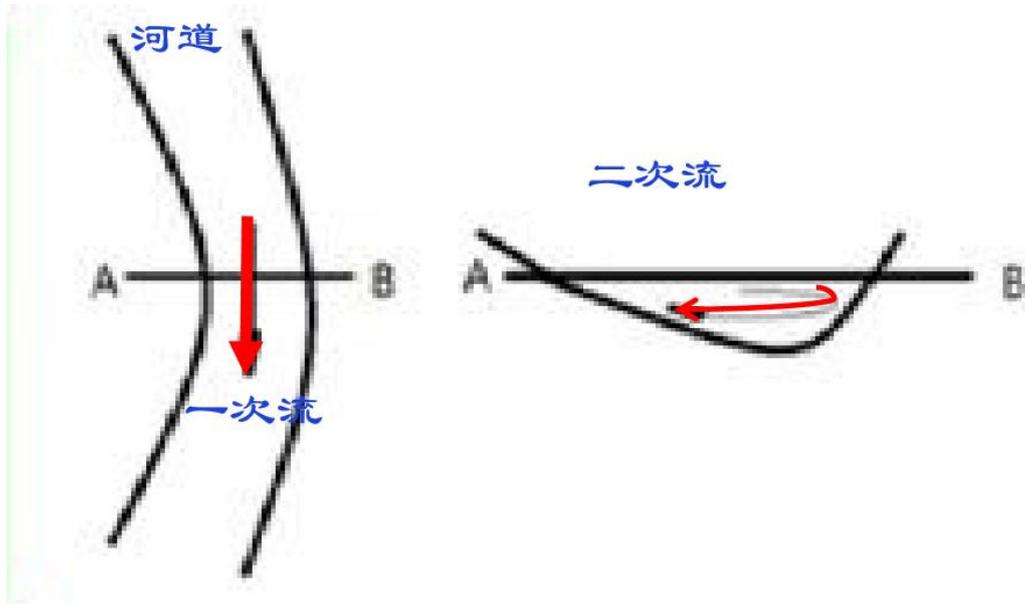
主流或一次流



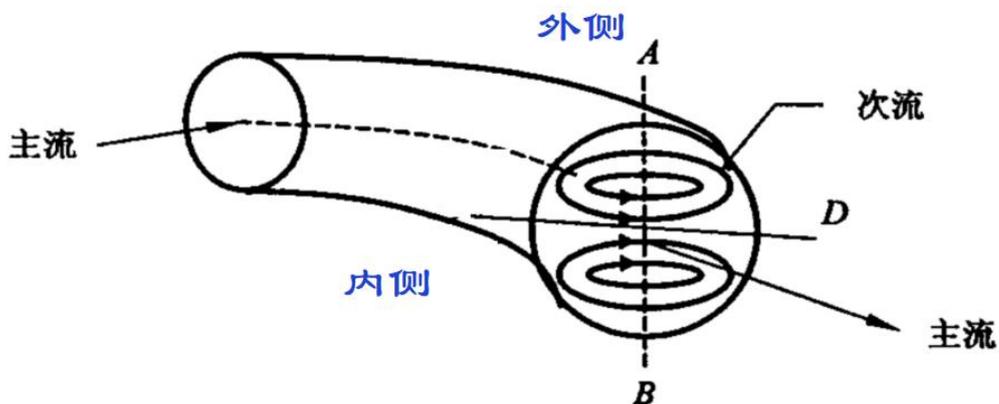
二次流

所以将主流伴有与主流不一致的流动称作二次流现象。主流流动称一次流，伴随流动称二次流。

再看看弯道中的二次流现象。



类似刚才茶杯的流动，流体绕过弯道的流动也是二次流现象。左图是一弯曲河道，沿着弯道轴心方向的流动为一次流。同时由于弯道离心力的作用，越接近外侧 B 岸，离心力越大，所以在水面水会向河道外侧流动，如右图直线箭头，这就对河岸外侧形成冲刷，外侧会被掏空越来越凹。而在河底正好相反，由于河底摩擦作用水流速度会降低导致水流从河流外侧 B 岸流向内侧 A 岸，如右图弯曲箭头，从而形成如右图所示横断面上的环流，即二次流，最终导致河流中的沙石在弯道的内侧堆积，内侧会越来越凸。



弯管中的二次流与弯曲河道道类似，只是这里形成了上下对称的环流，如图

右边的主流出口截面所示。如将管道按水平面切成上下两半，其中一半与弯曲河道的流动完全类似。

弯曲管道流动的二次流能够促进流体间和流体内部反应物的混合，加快传热传质和化学反应。当然凡事有利必有弊，二次流也会增加管道流动的能量损失。

都江堰的飞沙堰就是利用二次流原理



如图中红色箭头所示，洪水期内江河底的粗沙和石块就会流向河道内侧在金刚堤堆积，或从飞沙堰排向外江，据说飞沙堰能把重达千斤的巨石抛向外江。

细沙则在上层水面，从宝瓶口流出，用于灌溉并增加土壤肥力。所以水利工程取水口往往设在河道凹岸侧下游，这就是所谓的“正面取水，侧面排沙”。

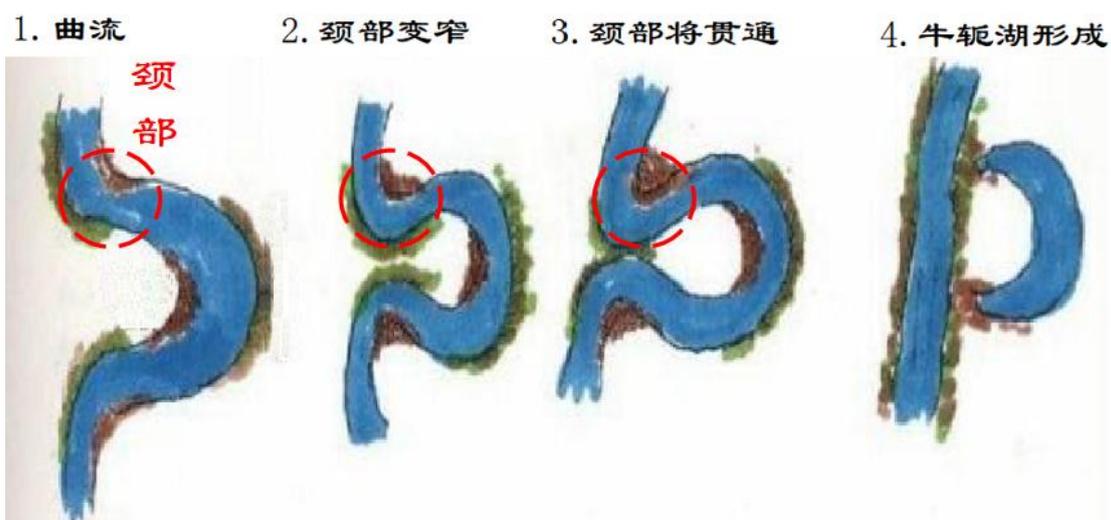
公元 241 年，关中平原引泾河入洛河的郑国渠，也是利用这个原理取水的。

二次流日积月累的冲刷河道外侧凹处，同时日积月累的将泥沙堆积到内侧，所以导致河流总是弯弯曲曲的。

牛轭湖

河流弯曲处随着时日的增加会越来越弯，最后形成牛轭形状的湖泊。如内蒙古巴盟乌梁素海景区就是典型的牛轭湖，由黄河形成。其形成过程如图：1. 河道形成曲流，即弯曲流动；2 和 3. 二次流致使曲流颈部变窄，颈部就是图中红色虚线圈住的部分；4. 颈部连通，以前的曲流部分脱离河道，形成牛轭湖。请根据二

次流思考为什么颈部会变窄且最终连通呢？

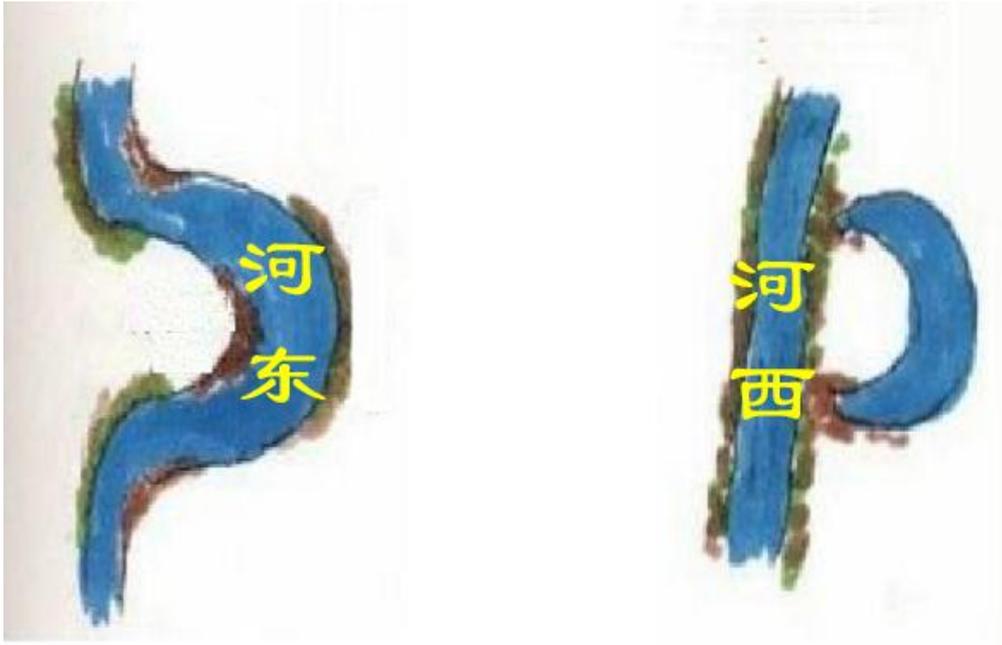


请看牛轭究竟是什么？如图所示，牛轭一般为木制，套在耕牛的脖子上耕地用，形状与牛轭湖相似。

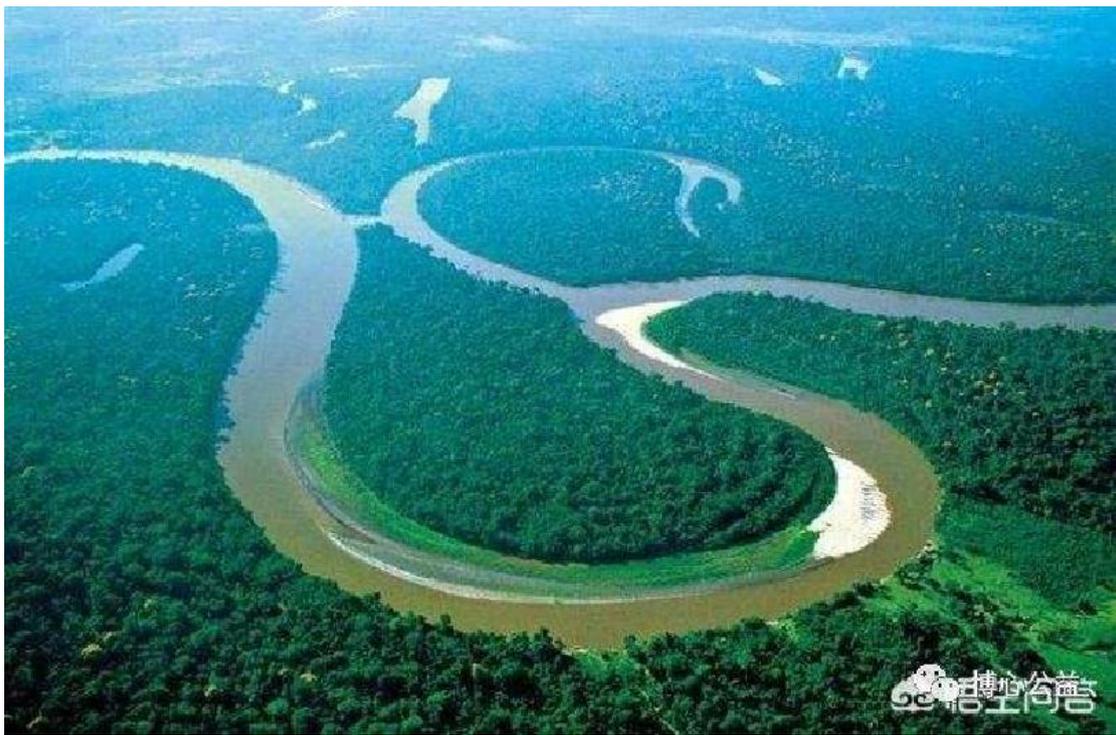


见过这种传统的耕作方式没有，男人赶着牛把地耕开，他的女人在后面跟着将种子撒在地里，翻开的土把上一次的种子给埋住。您家如果是偏远的农村山地，可能还能幸运的看到，不要嫌方法土，反而要珍惜，这是即将消失的珍贵文化遗产，想想怎么保护它。

牛轭湖实际上说明了“三十年河东三十年河西”的道理。左图是三十年前河流从东头绕流，右图三十年后从西边流走了



看看这个图，牛轭湖正在形成中，颈部马上就要贯通。
此图曲流颈部已经完全贯通，即将形成两个牛轭湖。



惊叹大自然的神奇吧！观察大自然你会发现许多美和奥秘，思考大自然你会收获许多惊叹和发现。请静下心来虔诚向大自然学习，它是最好的老师。

1.8.5 宝瓶口（热胀冷缩原理的妙用）

宝瓶口在内江外侧出口处，在现在的离堆和玉垒山之间，采取正面取水，将水和细沙一起带入了成都平原。

宝瓶口是李冰父子在玉垒山开出的一条通道，这在当时是一个不可想象的工程。请猜猜他们用什么办法将巨大的岩石挖开的呢？

火药，是的，火药在我国春秋时就开始应用了。但那时候还远远达不到这个威力。

他们当时用的火烧水激的方法，先用火烧岩石，然后向岩石浇水，岩石最后自然松软裂开。这是热胀冷缩原理的应用。

你该惊叹这鬼斧神工了吧，你该赞叹我们祖先的奇思妙想了吧，中国科学落后不是因为别的，是因为过去一直没有走上这个道。

总结一下：

都江堰是人类治水工程的奇迹；

质量守恒定律的发现至少可以追溯到李冰父子甚至更早；

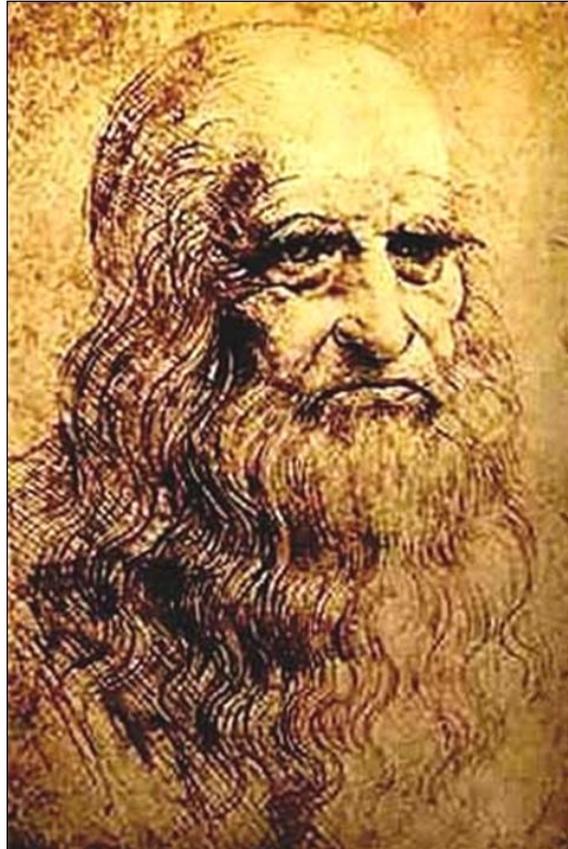
凡事有利必有弊，二次流可强化传热传质和化学反应，但会导致更多的能量损失；

大自然是最好的老师，要虔诚的向大自然学习，要从生活和工程应用中去学。

第二章 达芬奇也是流体力学大师？

2.1 绝无仅有的天才和全才

达芬奇，全名列奥纳多·达·芬奇（1452.4.15—1519.5.2），是意大利文艺复兴三杰之一，欧洲文艺复兴时期的天才科学家、发明家、画家。现代学者称他为“文艺复兴时期最完美的代表”，是人类历史上绝无仅有的全才。



这就是人类历史上绝无仅有的天才和全才，他在他所处时代的所有学科都有重大贡献。前无古人，现无来者，未来不好说。

这里来讨论一个问题，达芬奇是一开始就有如此众多的爱好呢还是后天逐步形成的？

显然是后者，任何人不可能生来就接触如此众多的学科。

达芬奇从小对大自然好奇，喜欢探寻自然之奥秘。

随着后来学习绘画的需要，他开始研究绘画涉及到的各种学科，由于对作品完善和完美的追求，他会尽力去穷尽相关知识甚至发现新知识为己所用，谁知后来偏离初衷形成了新的爱好和追求。

就这样他一身都游离在他那个时代的所有学科之间，成为了人类历史上绝无

仅有的全才。

实际上，由于世界的普遍联系，我们从任何一个兴趣点入手，要把它做到极致，或者要解决一个世界性难题，最后都需要涉入众多学科。因而观念上不要把自己限制在某一领域或者某一学科，要根据需要力所能及的涉猎和跨越。

乔尔乔·瓦萨里(Giorgio Vasari, 1511—1574)与达芬奇几乎同一个时代，是米开朗基罗的朋友，文艺复兴时期意大利艺术理论家，第一次在书中提出文艺复兴一词。

在《艺苑名人传》里他对达芬奇极尽赞美之词“a single person is marvellously endowed by Heaven with beauty, grace and talent in such abundance that he leaves other men far behind, ”一个人被上天赋予了非凡的美丽、优雅和天赋，以至于他把别人远远抛在身后。

“and indeed everything he does clearly comes from God rather than from human skill.”事实上，他做的所有事情显然出自上帝之手而非人类本身。

爱因斯坦认为，达·芬奇的科研成果如果在当时就发表的话，科技可以提前30-50年。

爱因斯坦为何许人，都知道他提出了狭义和广义相对论，但实际上更重要的是他改变了人们的物质和时空观。

统一了质量和能量，将时间和空间与物质运动联系起来。

科学史家丹皮尔则认为：“如果他当初发表了他的著作的话，科学一定会一下就跳到一百年以后的局面。”当我们深入了解达芬奇的科研成果后，就明白这一说法并不为过。

盖茨是一个疯狂的书迷，他家的图书馆中陈列着各种稀有的书籍。

1994年，比尔·盖茨在一次拍卖中以3080万美元（约合1.9亿元人民币）的高价买下了达芬奇72页的“莱斯特手稿”，创下了世界图书交易的最高价。

盖茨曾说二十一世纪将是达芬奇的世纪。盖茨究竟想说什么？我们不能知道。

我们可以推测一下，二十一世纪互联网和人工智能高度发展，人需要并且能够驾驭更多甚至是所有学科和海量信息，世界将需要更高级和完善的人，就是说机器在快速进化，人需更快进化，要有更多达芬奇出现。

2.2 蒙娜丽莎画作鉴赏

列奥纳多·达芬奇首先是为艺术而生，但他一生完成的完整画作只有十多件，不过却件件都是艺术瑰宝。

其中《蒙娜丽莎》更是神一样存在，现被珍藏于法国卢浮宫中，每年 600 多万名游客慕名前往，一睹丽莎“神秘”的微笑。

仔细看看这三幅蒙娜丽莎，她们都差别不大，哪一幅是真迹呢？下面我们来一一揭晓。



2.2.1 蒙娜丽莎身世之谜

达芬奇为后世留下了许多未解之谜，其中蒙娜丽莎的身世一直饱受争议。

瓦萨里传记：大约 1503 年，因为两家是世交，列奥纳多受弗朗切斯科·德尔·焦孔多委托，为他 24 岁的妻子丽莎·德尔·焦孔多画一幅肖像。

权威传记作家沃尔特·艾萨克森：

从银行记录判断，这项委托没有收取过任何酬劳，他带着画作辗转佛罗伦萨、米兰、罗马和法国。

1517 年，阿拉贡军事统帅路易吉的秘书贝提斯到访列奥纳多在法国的工作室，在日记里记录看到了一幅“某位佛罗伦萨的女士”的肖像，是在已故的朱利亚诺·德·美奇授意画的。外界猜测可能是朱利亚诺的情妇。

2005 年，谜团解开，阿戈斯蒂诺·韦斯普奇于 1503 年的笔记中明确提到列奥纳多正在为丽莎·德尔·焦孔多的头部作画。

艾萨克森怀疑列奥纳多想为这位美丽迷人，笑容极有诱惑力，又出生平平的夫人画肖像，因为这样无须迎合赞助人。

所以他可能一开始就打算完成一幅不朽的普世之作，故 16 年不断被完善和修饰，最后如愿以偿。

2.2.2 蒙娜丽莎画作欣赏

下面我们来欣赏欣赏这幅作品，先看看画板的处理。

杨柳树干画板，上面涂了一层铅白色的厚底漆，该漆能更好的反射光线，这样光线可以穿过多层半透明薄釉，从而增强景深、光亮和立体感。

光线穿过釉层照在底漆上反射回来，与釉层表面的反射光线混合产生一种不断变化和难以捉摸的微妙效果，而且随着观看角度而变化。使得画作活灵活现。

达芬奇晕涂法

说到达芬奇的画一定要介绍一下晕涂法。

晕涂是达·芬奇独创的特殊绘画技法。特点是在画中间色调（指明和暗之间）和反光部位时特别注意过渡，在明暗交界处，几乎看不到明显的交界线。

尤其在表现人的脸部和人体转折处，画得十分柔和、圆润，用色很薄，暗部更是干净透明，皮肤的弹性与肉感被表现得极为真切。

晕涂使达·芬奇所描绘的人物形象及物体轮廓变得含糊不清晰，仿佛浮动于薄雾之中，只有体积感呈现在画面上。因此，晕涂法又称薄雾法。

达芬奇在对物体的轮廓进行光学和投影研究时，发现物体轮廓或边界本身是模糊不清的，没有明确的分界线，不能用几何线条来生硬的表达。故在此基础上建立了晕涂法。该法在蒙娜丽莎的肖像画中发挥到了极致。

蒙娜丽莎的脸



对于面部的阴影，他开创性的使用了一种由铁锰混合物制作的焦棕色颜料，

该颜料吸油性很好。

他上色笔触极为细腻，几乎难以觉察，随着时间推移，反复涂抹达 30 薄层。

2010 年 X 射线荧光显示棕色釉料的厚度从只有 2 到 5 微米一直平滑过渡到阴影最深处的 30 微米。

正是这样精致的晕涂手法使皮肤看上去更柔和、圆润、肉感且富有弹性。

列奥纳多一身沉浸在光线、阴影和光学的研究中。

一段笔记中写道：“如果你想画一幅肖像，要选择在天气阴沉或者黄昏的时候。

注意观察此时的男男女女的面庞，看看显得多么柔和和精致。”

这里，他将光线从稍微偏左的高处射入，根据光学规律人为制造光源，光影表达仍然显得自然真实。

蒙娜丽莎的手



请看这双手，温柔润泽，更是叹为观止。

一项底图分析显示：列奥纳多最初把她的左手画成抓住椅子的扶手，让人有正要起身离开的感觉。最终改成双手交叠的现在这个样子，拉近了观赏者的距离。

蒙娜丽莎的秀发

画中垂肩的秀发也是一道亮丽的风景，如轻柔的水波，又似漩涡般卷曲，同样是晕涂法彰显朦胧自然。

达芬奇非常喜欢描述水流的卷曲和漩涡，他把世界上所有曲线的美都融进水流的卷曲和漩涡中，使之展示出更加生动的活力和魅力。

蒙娜丽莎的衣着



尽管丽莎衣着简朴，却经过精心的描绘，还体现出惊人的科学性。

仍然是晕涂法，使衣服褶皱逼真传神，光影有致，身上的纱衣如烟似雾。这些是鉴别达芬奇画作要特别注意的特征。

领口的图案是达芬奇最喜欢的螺旋纹和绳结图案，光照下像浮雕一样呈立体感。

经过高分辨率的图像和红外图像分析，最可贵的是丝绸外衣遮挡的紧身内衣的绣花图案也被细致描绘。

我们可能会想“真是没事儿闲的。”不过，人们尽管看不见的内衣却能从画中感受得到。正是这些更加体现出列奥纳多的伟大。

头上薄纱若隐若现，可是头上有薄纱吗？

确实，如果不是额头上的边缘线，人们根本注意不到。饶是如此，细心的您仍能觉察其色彩和明暗随着位置变化。

蒙娜丽莎的山水背景

来看看山水背景。图中山水之境洪荒但不缺生机，陆地经水冲击沟壑纵横。

山水是达芬奇一生探索的宇宙宏观世界，常把它与生命的微观世界类比。

认为岩石是骨骼、河流是血液、土壤是肌肉，试图建构物质的统一性和普遍联系。当然他并不偏废，也特别注意物质世界的差别和多样性。

蒙娜丽莎的眉

图中丽莎与山水融为一体，山路弯弯连通心房，河水与垂肩的秀发相接，天空远山孕育大脑。象征着生命微观世界与宇宙宏观世界的紧密联系。天人合一，人源于天，是达芬奇的宇宙观。

瓦萨里赞美：眉毛从皮肤中长出，疏密有致，随着毛孔卷曲，再自然不过。

1625 年的记述中就没有眉毛，现在也没有。

一种说法是没有眉毛是文艺复兴时期的潮流，文艺复兴时期的女性流行广额、薄眉甚至无眉，这样的外形在当时被认为是高贵与美丽的象征。还有说是达芬奇故意设置的某种密码。

2007 年，法国艺术品分析专家帕斯卡·科特高分辨率扫描结果发现，眉毛最初的细微痕迹可能在最初清理画作时被擦掉了。

蒙娜丽莎的眼眸

眼为心灵之窗。丽莎的眼睛被认为是世界上最让人着迷的一双。

她仿佛看着一切，无论你在哪儿看，她都在注视着你，看透你心灵里的一切欲望，让它慢慢归于宁静。

据说大名鼎鼎的戴高乐总统每当心绪烦躁时，必驱车前往卢浮宫欣赏《蒙娜丽莎》，出来后便满面春风，原先的烦恼荡然无存。

实际生活中有很多类似的眼睛。

蒙娜丽莎的微笑



“神谜”微笑，这里我用的是加引号的“神谜”，表示神秘、谜团和迷人的意思。

瓦萨里：“笑容如此美好，它似乎来自天上，而非人间”。

为博得这一笑，达芬奇曾聘歌手为丽莎演唱、雇小丑逗她开心。

艾萨克森：微笑神秘之处，当你注视丽莎嘴唇时，笑容一闪即逝。当移动目光，微笑呈现并不断变化，目光离开后，微笑萦绕脑海。这正是列奥纳多作品的试金石。

研究发现：达芬奇通过解剖学和光影学制造了这一终结者的微笑。来具体看看。

列奥纳多在圣玛利亚诺瓦医院的停尸房里度过了许多个夜晚，剥卡皮肉，露出神经，用自己和尸体做实验，研究每块肌肉和神经的关系，以便更准确的表达动作和表情。

这需要何等的热情和激情。



1508年的笔记中，有一副嘴唇张开的怪相，还有一副是崛起的嘴唇。

列奥纳多发现噘嘴主要是下唇的肌肉控制，上唇不能单独噘起。

他还写到嘴唇的其它运动涉及不同的肌肉，包括那些让嘴唇聚拢的、伸展的、卷回的、拉平的、横向扭曲的、恢复原位的肌肉。

笔记上方有一副有趣的草图，如图中红色虚线，但不是很清楚：这是用黑粉笔轻轻描画的线条简单的微笑，丽莎的微笑开始在这里成型。

列奥纳多光学研究发现，光线不是汇聚在眼内一点，而是照在整个视网膜区域。

视网膜中央凹处对颜色和细节敏感，周围区域更易感知阴影和黑白对比。所以直视物体时更清晰。

达芬奇利用科学和绘画技巧制造出了这种永恒的神秘微笑。

当你目光聚焦丽莎嘴唇时，视网膜会更清晰的识别到嘴唇的细节和轮廓，她反而不笑了。

当你移开视线，嘴变模糊后，嘴角的微笑就显现出来，让人欲罢不能。现代科技已经表明低分辨率图像中的笑容更加明显。

蒙娜丽莎真迹之辨



再来看看这三幅蒙娜丽莎，真假就能看出来来了。

最右边的那一幅是从卢浮宫网站上下载下来的，是真迹没有问题。

左边两幅是从著名传记作家艾萨克森的传记上扫描下来的。

可以看出中间这幅与真迹只有颜色之差，应该是在不同光线下拍摄的。

左边这幅是公认最优美的复制品，现存于马德里普拉多博物馆，有人声称是全部或者大部分为达芬奇所作。

但只要比较一下两双手、头发、纱衣和衣服的皱褶，你就立刻能分辨出左边这幅根本不可能出自达芬奇之手。

相比较而言，左边复制品的手线条生硬、光影过渡突然，皮肤缺乏肉感、润泽和弹性，显然没有应用细腻的晕涂法。

同样的原因，那身上披的纱衣厚重没有轻薄如烟似雾的感觉，那垂肩的秀发卷曲生硬没有水波起伏和飘逸感。

刚才从绘画技法也就是形的方面比较，实际上差别最大还是内在的神，就是作品要反映的精神。

左边画让人感觉逼真、亲近，就像某位漂亮的邻居，也是不可多得的上乘之作。

而右边的丽莎似近似远，亦真亦幻，扑朔迷离，人哉？神灾？作品融通了艺术、科学、技术和哲学，表达了一种普遍意义的精神和永恒。

这才是丽莎最大的魅力所在，是任何艺术家无法企及的，也正是列奥纳多毕生追求所在。

2.3 飞行之父

达芬奇鸟类飞行手稿

达芬奇飞行预言：“人本该可以展翅翱翔！如果我无法实现，终将有人实现。”

从大约 1490 年开始，二十多年间，达芬奇以少见的勤奋研究了鸟类飞行和飞行器设计，他一共画了 500 多幅草图，写下了三万五千字的笔记。

其中大部分都收在他的《鸟类飞行手稿》笔记中。该手稿作者本想写成鸿篇巨著，但与其它计划的著作一样终未完成。

然而瑕不掩瑜，他在研究中发现了重要的动力学规律。

提出牛顿第三定律（约比牛顿早 200 年）

看看鸟如何停留在空中的呢？亚里士多德曾认为是空气的浮力引起。而达芬奇观察发现，鸟比空气重，如果不动就要掉下来。所以他认为亚里士多德说法是错误的。

经过实验和思考，他最终认为鸟是靠翅膀拍打压缩空气在空中飞行的。这里他得出两条结论：

（1）空气是可以压缩的；

（2）翅膀拍打空气的力和空气对翅膀的反向压力相等，而且还补充，物体施加给空气的力等于空气反作用于物体的力。这正是牛顿第三定律。约比牛顿早 200 年。

提出相对性原理（约早 100 年）和模型实验



达芬奇通过鸟类飞行的观察提出：“物体静止而空气流动，与物体运动而空气静止时效果一样”。这正是伽利略提出的相对性原理，约早 100 年。

他与之前的水流类比：“一根杆子划过静水与水流过一根静止杆类似”。

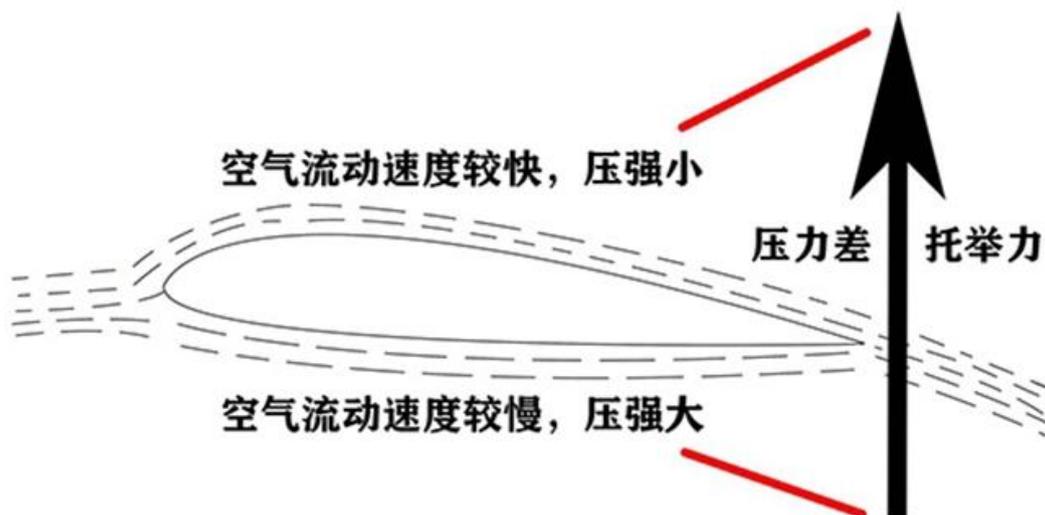
他甚至还明确提出：“要想弄清楚鸟类飞行科学，先要解释风的原理，我们可以水流运动加以验证。”

这正是相似性和模型实验的鼻祖。图中汽车就是在风洞中利用相对性和相似性原理进行流线型、阻力和稳定性等的测试实验。也可以利用水洞中的水来做类似实验。

提出伯努利原理（约早 200 年）

达芬奇在伯努利（1654 年）出生 200 年前就提出了著名的伯努利原理：“空气（或任何流体）流速加快时，它产生的压力会减小。”

他于是通过鸟翅膀截面的气流运行分析解释了鸟飞行的升力，而这也正是现在飞机升力的来源。



他怎么解释的呢？请看图中弓弦形状的是鸟翅膀的截面，与机翼截面完全类似，这里我们也能看出机翼是从哪儿学来的了。上部气流运行较快，因而压强小，下部气流运行速度慢，故压强大，下面压强大于上部压强，从而产生升力。

漂亮正确的解释，所以前面为什么爱因斯坦说科学进程会推进 30 到 50 年，这其实都是保守估计。回顾一下前面：牛顿第三定律，推进约 200 年；伽利略相对性原理，推进约 100 年；这里得到伯努利原理，推进也 200 年，马上我们要介

绍的质量守恒定律，推进至少 250 年。别忘了，这些都是最重要的物理定律啊。

当然伯努利原理我们后面还要详细讨论。

达芬奇飞行尝试

扑翼机



这是达芬奇设计扑翼机的一种，达芬奇一生进行了许多扑翼机的设计，甚至都找到了试验场地。

达芬奇一身的梦想就是想像鸟儿那样在天空自由的飞翔，显然他没有成功，但他的想象却是成功的。

他曾说：一旦尝过飞上云霄的滋味，行走于大地时总是会仰望着天空，因为你曾到过那里，并且总会渴望再次飞翔。

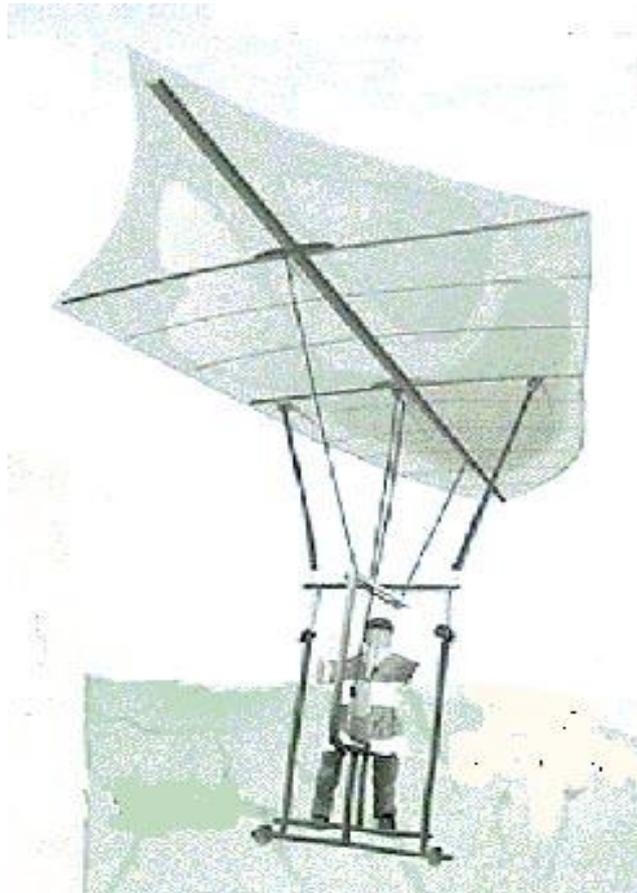
这话倒可以激励我们不断超越一更高更快更强。

滑翔机

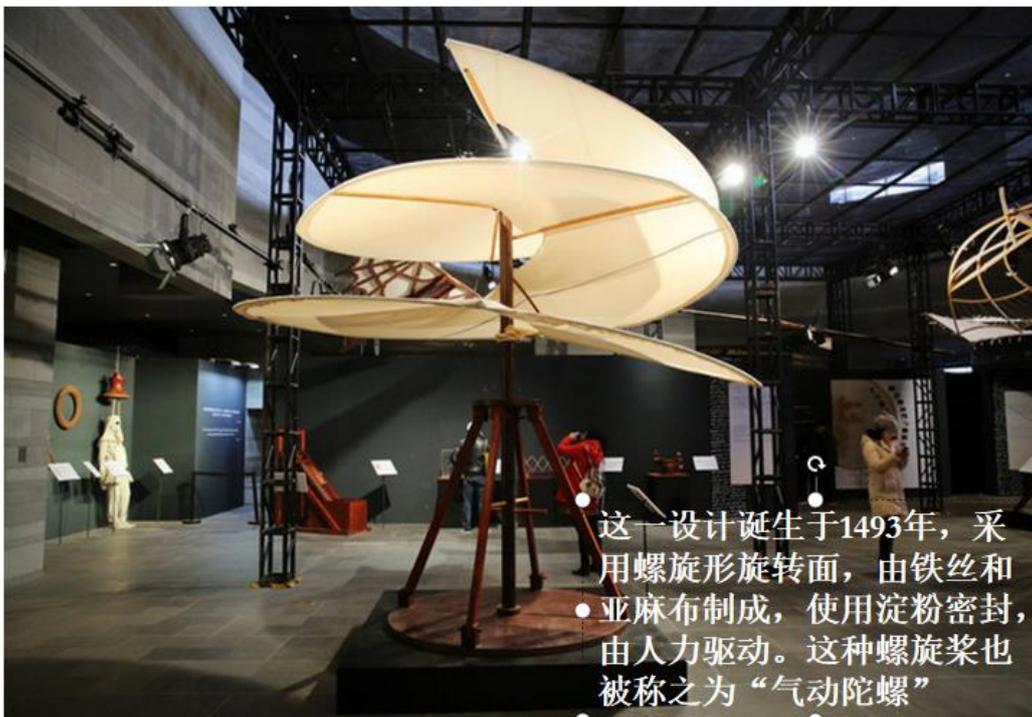
达芬奇执着但从不刻板，扑翼机飞不上天，他决定从风的原理出发，设计飞行器。

他设计了几款滑翔机。其中一款滑翔机设计是用支架承托帆布机翼，只要拉动两端绳子就可控制飞行方向，另设一个可载人的大篮，并配备轮子以供升降。据英国媒体 2003 年 1 月 26 日报道，英国工程师们成功使 500 年前的“梦想机器”

变成了现实。



直升机

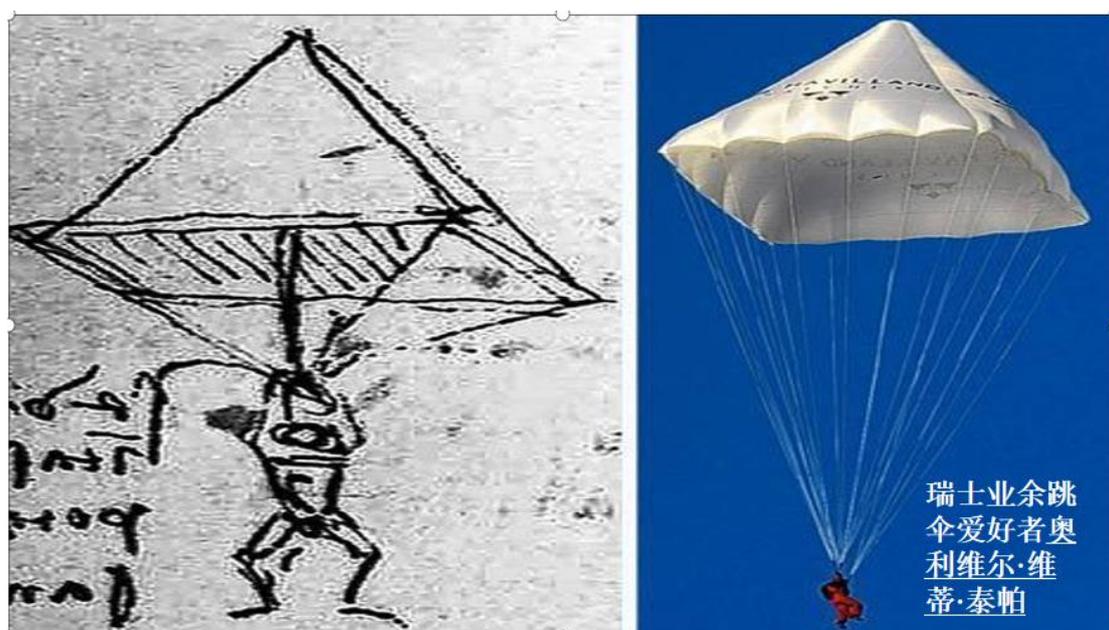


他还设计了如幻灯片中所示的直升机，所以他也被称为直升机之祖。

根据美国纪念飞行百年委员会有关早期直升机技术的报告，这一设计诞生于1493年，采用螺旋形旋转面，由铁丝和亚麻布制成，使用淀粉密封，由人力驱动。这种螺旋桨也被称之为“气动陀螺”，是世界上第一个旋翼飞机设计。

显然，这样的直升机仅靠人力是不可能实现的。

降落伞



左边是达·芬奇于1483年绘制的人类第一个降落伞的设计图。他在这张图旁边写到：“如果有人用一大幅涂上树胶的麻布，每边长12码（约10.97米），高12码，那么不论他从多高处跳下来，都不会受伤”。

这个已在2008年被跳伞爱好者从600米高空成功降落。

从扑翼机、滑翔机、直升机到降落伞，20年的观察、实验和探索，达芬奇是当之无愧的飞行之父。

2.4 质能守恒大统一

达芬奇发现质量守恒定律



达芬奇在 1500 年左右,根据对河流的观察和思考,提出体积流量守恒原理:“沿河流任何一部分,在相同的时间里,应通过相同流量的水,不管河流的宽度、深度、坡度、粗糙度和曲折度如何”,他还发现对“一深度均匀的河流,窄的地方较宽的地方水流速度要快”。

我来翻译一下:请看 PPT,图中就是一条从 1-1 断面流向 4 断面的河流,根据这一原理,流过 1-1 断面、2-2 断面、3-3 断面、4-4 断面的水流量应该相等,而且断面宽的地方水流慢,断面窄的地方水流快。

请思考一下这个翻译有哪些问题或者还存在哪些疏漏?

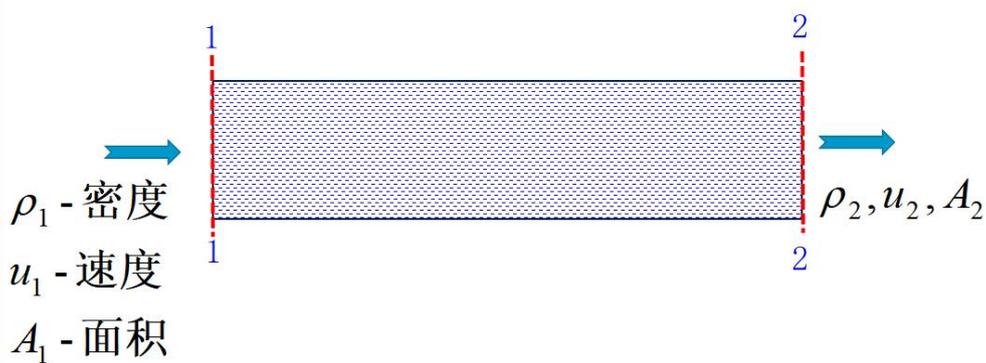
好,非常正确,至少有 3 个地方:

- (1) 河水流动过程不能有蒸发和土壤渗漏,或者可以忽略;
- (2) 必须是稳定流动,不能出现突然 1-1 断面涨水等这样的情况;
- (3) 水流快慢不只由宽和窄决定,还和深和浅有关。而是取决于断面面积,即流过相同的水量,断面面积大水流慢,面积小水流快。

达芬奇这么早发现了这么多重要的定律,对人类科学做出了重大贡献。但是,用西方现代科学观来看,他的发现存在一个重大缺陷,就是量化问题。

达芬奇由于没有接受过正规教育,理论是他的弱项,当然那个年代还没有成熟的理论方法和模式,我们不能跨时代去苛求一个历史人物。

质量守恒定律定量化



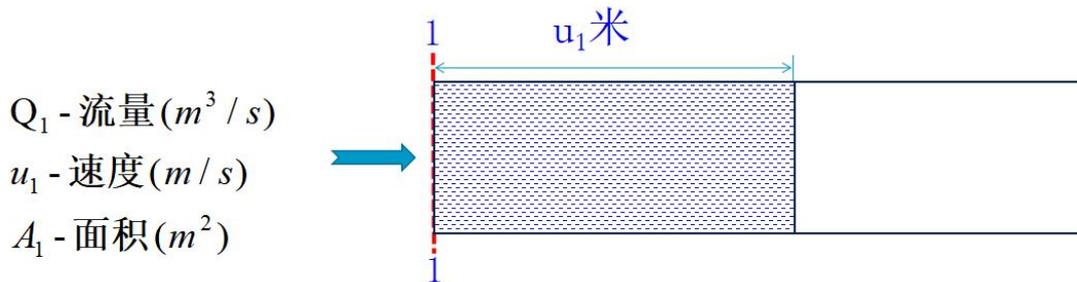
这里我们来将达芬奇的流量守恒定律定量化，以稳定的管道流动为例，请看PPT，水稳定的从1-1断面流入，从2-2断面流出。

流体密度用字符 ρ 、平均流速用 u ，断面积用 A ，下角标 1 表示 1-1 断面，下角标 2 表示 2-2 断面。定量化之前要说一下流量的概念和怎么计算？

流量指 1 秒钟流过某一断面的流体体积，单位一般为 m^3/s 。流量与速度和面积之间是什么关系？

最简单的方式利用单位一致的原理我们即可得出流量计算公式 $Q=uA$ ， u 单位 m/s ， A 单位 m^2 ，两者之积就是流量的单位。

那么物理意义上如何去理解呢？



根据定义，1 断面的流量 Q_1 ，就是 1 秒钟从 1 断面流入管中的流体体积，因为流速是 $u_1 \text{ m}/\text{s}$ ，所以如上图流体 1 秒钟在管内流动的距离为 u_1 米，1 秒钟流入管中的体积就是蓝色管道部分。

那么，问一下，蓝色管道部分的体积怎么算啊？没问题，都会，就等于断面积 $A_1 \times$ 高 u_1 。

因而流量等于断面面积乘以平均流速，即 $Q=uA$ 。知道流量计算，我们马上就可以把达芬奇的守恒原理表达为数学形式了。

即 $u_1A_1=u_2A_2$ ，表示 1 断面流入的流量等于 2 断面流出的流量。显然这里隐藏的条件是，流体稳定流动且不可压缩，不可压缩指流体密度不变化。

从这个等式看出速度和面积成反比，面积越大速度越小，就是达芬奇描述的深度相等的河流越宽速度越小的道理。

这里您可能一直有个疑问，不是质量守恒定律吗，怎么是流量守恒呢？

是的，流量守恒只是质量守恒的特殊形式，两者只差一个密度。因为，质量流量等于体积流量乘以密度，所以 $\rho_1u_1A_1=\rho_2u_2A_2$ 就是质量守恒定律。

注意，这是质量守恒定律的积分形式，其微分形式是要等到达芬奇 300 年后的大数学家欧拉来解决。

能称得上历史最伟大的四大数学家都有些谁？阿基米德、牛顿、欧拉和高斯。正是这位伟大的欧拉推导了流体流动质量守恒定律的微分形式，时间是 1755 年。

该方程左边表示质量的变化率，方程右边表示单位时间流入流出的质量，方程思想就是单位时间流入流出的净质量等于流体质量的变化率。

如果稳定流动，就是变化率为零，表示单位时间，流体流入的质量等于流出的质量。对管流或河流积分后就是 $\rho_1u_1A_1=\rho_2u_2A_2$ 的形式。

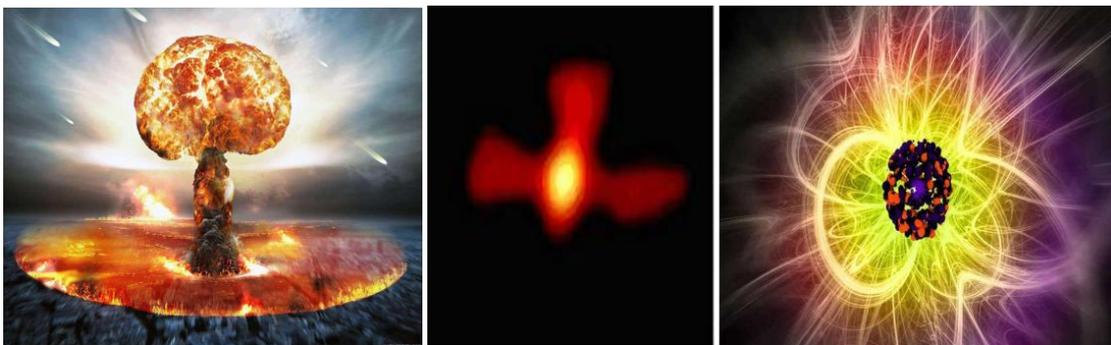
当然这里只是流体流动过程的质量守恒形式，实际上是代表物理变化过程的质量守恒，关于化学变化的形式要等 250 年后的化学家来完成。

化学反应中的质量守恒定律

普遍形式的质量守恒定律是 1756 年俄国 M. V. 罗蒙诺索夫首先在化学反应中发现（锡密闭燃烧），1774 年被拉瓦锡重复得出。

定律内容：在化学反应中，参加反应前各物质的质量总和等于反应后生成各物质的质量总和。这个规律就叫做质量守恒定律。

质量守恒定律的违背



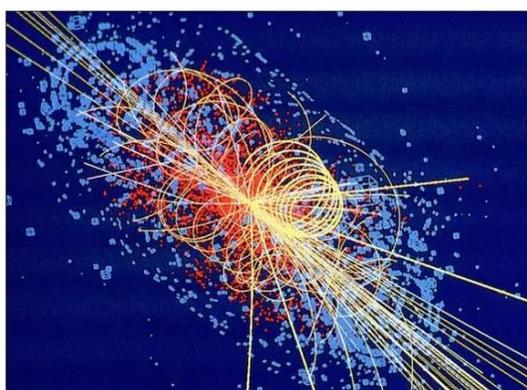
其实这个定律从诞生之日起已经不成立了，反应前后已经有及其微小的质量差异，只是开始人们并未觉察。

最后，在核反应包括裂变和聚变、正反物质湮灭反应中，直接发生了质量亏损，物质不知道去了哪里？还有高速运动的物体质量莫名其妙的增加，质量不知道从哪儿来的？

这些发现震惊了世界，几乎让物理学崩溃。

然而，一波未平，一波又起。

能量守恒定律的违背



在日内瓦附近瑞士和法国的交界侏罗山 100 米深的地下，有环绕 27 公里隧道的世界上最大的质子加速器—欧洲强子对撞机。在这里质子会以世界最大的能量进行碰撞，然后产生大量的新生物质包括希格斯玻色子—号称上帝的粒子。但是问题就出在这里，巨大的能量撞击后居然没了踪影，显然能量也不守恒了。

怎么可能呢？被称为宇宙守恒定律的物质不灭定律和能量守恒定律均先后被违背，科学的信仰该置于何处呢？

守恒定律的回归

好在，科学真理本身就是在不断的违背中保持其迷人的外表和神圣的庄严，就像蒙娜丽莎脸上那神秘的笑容，你永远不知道最终的解答，或者本来就没有终结性的答案。

这么恐怖谜题的破解须有神力，果然伟大的爱因斯坦出现，5 个字符就是全部解答，科学秩序又恢复了，人与自然又和谐如初。

这五个字符是什么，就是谁都应该知道的 $E=mc^2$ ，质能方程。该方程为何如此重要，我想体现在下面四个方面。

(1)质量可以转化为能量，包括化学反应、核反应、湮灭反应甚至可能还有

一些未知的作用。

(2) 能量可以转化为质量，高能加速器、宇宙大爆炸、天体作用等。

(3) 质量和能量是物质存在的两种形式，改变了人类的物质观，能量是物质存在的另一种形式。

(4) 质量和能量相互统一，两个守恒律统一为一个质能守恒律，或者仍统一为物质不灭定律。

所以请记住，真理不是一成不变的，需要不断发展和完善，像达芬奇那样，敢于不断突破藩篱；

宇宙永远都是一个谜，这个谜又似那无边的宇宙，人类解谜过程就像在宇宙中穿越，当你到达天边时，你发现的是更大的天。

这不更大的谜团来了：暗物质和暗能量是什么？我们还能坐得住吗？

那就再出发吧，能够永远在路上就是我们的幸运。

2.5 天才亦是凡人

这一节，我们来看看达芬奇这样的天才是如何造就的。

好奇成就了达芬奇

可能是好奇心决定了达芬奇一身。爱因斯坦也曾给一位朋友写信说：“我没有特别的才能，只有热切的好奇心。”

达芬奇一身似乎对所有的东西都好奇，也就促使他对所有的东西都在学习和研究。



达芬奇记忆自己佛罗伦萨的一次徒步旅行，曾经在一个幽暗的洞口前徘徊，恐惧和渴望折磨着他，最后被无法阻挡的好奇心战胜。

他在山洞里发现了鲸鱼骨的化石，他诗兴大发：“哦，神奇的自然生物，你纵有巨力，终也枉然。”

并在周围写满了对化石层的描述。这次在山洞中的发现促使他一身对化石和地壳变迁的研究。并得到当时来说划时代的结论：高山上的化石是由于海底抬升引起；高山中的水是由于海水蒸发成雨循环产生。

达芬奇之问

达芬奇像一个孩子似的急切的想知道这个世界所有未知的答案，所以他提出了他能遇到的所有问题，并计划用这一身来给以回答。

我把这称为“达芬奇之问”，什么是“达芬奇之问”呢，就是问所有未知问题。

达芬奇观察法

达芬奇是私生子，从小不能进入学校学习，而正是达芬奇之间，正是这无穷的好奇心和求知欲，他更加如饥似渴的向自然学习。为此，他创立了达芬奇观察法。

他对所有感兴趣的东西都深入细致的观察，一只蜻蜓，一群飞鸟，一条小溪，他都能呆呆观察几个小时，他是怎么观察的，他究竟在看些什么呢？

达芬奇在笔记中写道：“如果你想熟谙物体的形态，先从它们细节开始，等一个细节完全印在你的脑海中，再转入下一个细节”，他以书为例，认为一下子看一整页是没有任何意义的，必须逐字逐句的看才能理解内容。

练习观察力

对于提高观察力，他提出了一个“画线游戏”，让朋友在一定远处的墙上画一条线，大家观察后各拿一条秸秆，谁的秸秆与墙上线最接近，谁就是赢家。



正如图中的树叶，当你不经意看时，就是几片红色的树叶。如果采用达芬奇观察法，你就会看到另外一个世界。

我们只来看一下树叶的颜色，至少能看到色彩的明暗度和清晰度差异，不同叶面上，同一叶的不同部位，中心和边缘，有水滴和没有水滴，大水滴和小水滴，大纹路和小纹路，不同的观看角度都呈现不同的色彩。

蜻蜓观察



达芬奇在笔记中记录了观察蜻蜓的最佳地点，那是在斯福尔扎城堡的护城河边。他说“蜻蜓用两对翅膀飞行，前一对抬起的时候，后一对落下。”

仔细看一下，右边图中的蜻蜓在紧急逃生的时候，是两对翅膀同时拍打。

这样的观察我们也能。只是我们经常放弃了这样的观察机会，或者根本没有这种观察意识。

可见我们忽略了多少上天之所赐，放弃了多少向自然学习的机会，从此一定要多留意身边的细节。

达芬奇为什么要这么细致的观察蜻蜓的飞行呢？显然与他从小养成的独特学习习惯和后来绘画的职业习惯有关，另外还有他对飞行的持续兴趣和关注，以及那颗对自然的好奇心。

当然，达芬奇不只是停留在观察上，他还要解剖和实验。

鸟类观察

他对各种鸟类都进行了更为详细的观察，被记录在他的《鸟类飞行手稿中》。他用文字和绘图描述了鸟儿在起动、飞行、悬空、转弯、降落和停止的全部细节，据此设计了扑翼机。

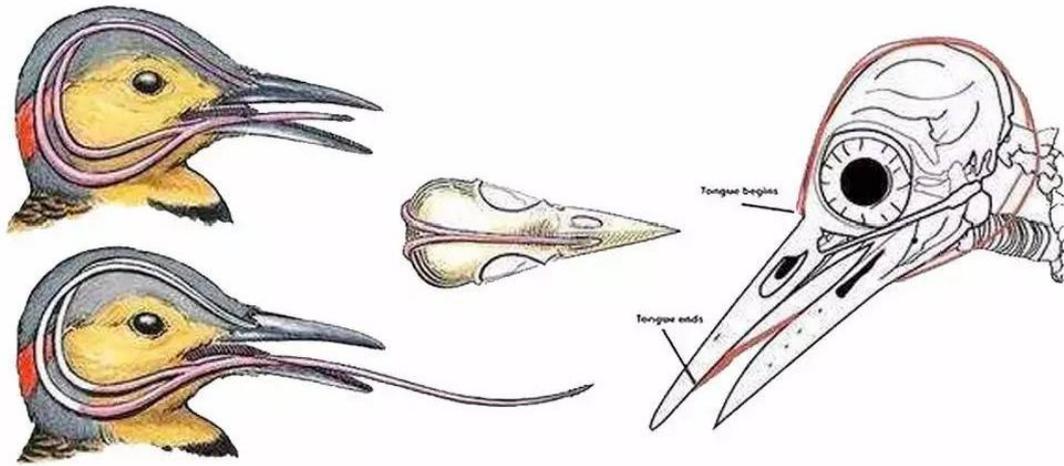
同时他还对鸟进行了解剖，对肌肉和骨骼进行了研究，发现鸟胸部和腿部肌肉占到了体重的四分之一，从而推断人不可能像鸟那样通过翅膀飞翔，必须借助风，于是他的兴趣又深入到了空气动力学的研究中。

在飞鸟的观察中，他总结到，鸽子类鸟翅膀落下的速度要快于抬起的速度，乌鸦类鸟则相反，喜鹊类的则抬起和落下速度相同。是否真的如此，我们以后需要多留意。

观察啄木鸟舌头

观察啄木鸟舌头是达芬奇任务清单中的一项。观察后，他写道：啄木鸟的舌

头可以伸出超过喙长三倍的距离。

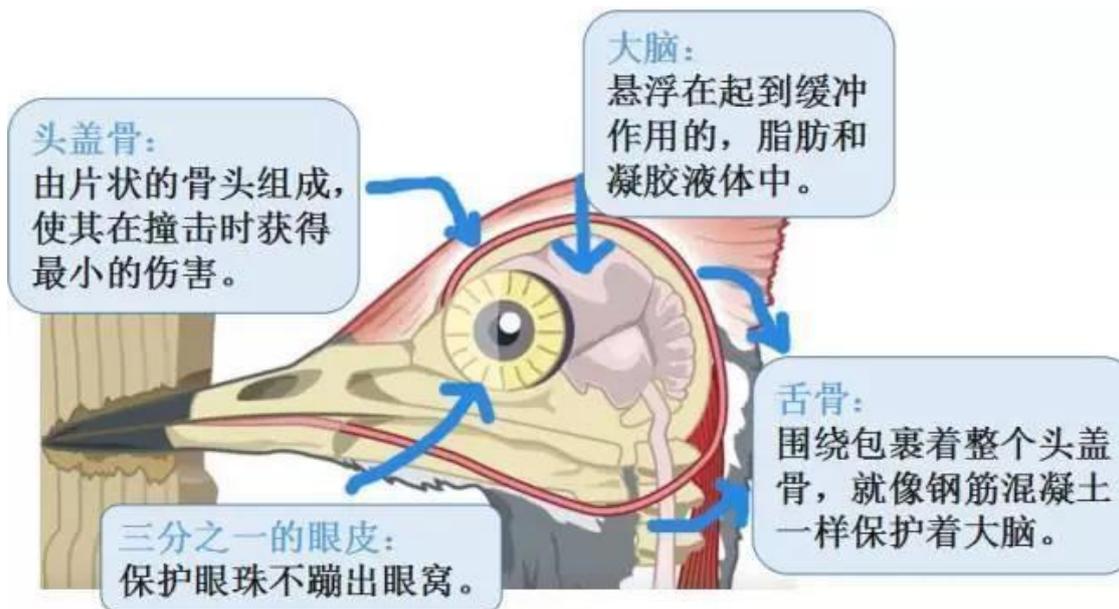


不用时，舌头缩回到头部，像软骨一样的结构穿过下颌，环绕过鸟的头部，然后向下弯曲进入鼻中固定。

除了从树中挖出虫子，还保护大脑，因为当啄木鸟喙不停撞击树皮时，头部承受的冲击力相当于致人死亡强度的十倍。显然他对啄木鸟进行了解剖。

我们忍不住会问，达芬奇研究啄木鸟的舌头有什么用呢？他没有说，不知道有何用，可能仅仅是因为好奇。

到现在，人们对啄木鸟进行了更深入研究，发现起大脑保护作用的还有：大脑悬浮于脂肪和凝胶液体中，头盖骨为片状等。这些保护措施后来用到了汽车座椅和航空敏感零部件的保护上。



所以在这个普遍联系的世界里，没有没有用的东西。

达芬奇探索蓝天之谜

达芬奇在培根、伽利略之前就提出了科学实验方法，他通过观察总结经验规律，然后设计实验，并重复验证，然后应用到实践中进一步修正完善。

比如对于天为什么蓝的问题，前面我们说过达芬奇已经快接近答案了。他对这个问题进行了长期的观察、思考和实验。

达芬奇登上了阿尔卑斯山意大利境内的罗莎峰顶，看到了更加湛蓝的天空。他说这是因为你头顶的大气更稀薄了。



他观察认为，这是太阳光由于被水蒸发成的微粒吸收后在巨大黑暗的天空背景呈现出来的颜色。我们现在知道这是大气分子瑞利散射的结果。

基于这个结论，他进行了实验。

实验一：他用画笔做实验，将朦胧的白色水彩覆盖在黑色背景上，复现出天空蓝色。

实验二：挂一块黑色天鹅绒布，在它前面燃放烟雾，用太阳光照射烟雾，最后发现烟雾呈现优美的蓝色。

实验三：他在暗室里用水雾做了同样的实验，先后用普通水、蒸馏水制造出

了阳光照耀下的蓝色。

达芬奇理论观

如此看来，达芬奇不过就是一个实验员吗？他不需要理论吗？

答案是否定的。最初达芬奇由于没有受到正规教育，只能通过观察和实验获取知识，称自己是实验的信徒。

但从 15 世纪 90 年代后，他开始认真学习书本理论，将理论与实践相结合，理论指导实践，同时用观察和实验检验理论。这种正确的思想理念在当时是不可想象的。

他甚至开始瞧不起只重视实践不懂理论的人，他说：“那些热衷实践却没有理论只是的人，就像船上没有舵或罗盘的水手，永远无法确定自己要去哪里。”

图中就是他用学得的光学理论来研究阴影，研究物体在不同大小的光源照射下的投影问题。

其实，他的绘画的主要特征和技法正是将光学、透视学等科学理论和自身实践融合发展的体现。

但他又不盲从理论，他在 1510 年写道：“实践必须永远建立在可靠理论之上。”

这些反映了他在那样的时代就已经正确理解了理论和实践的关系，而我们现在许多人还没有认识到这一点。

达芬奇的一天

由于达芬奇强烈的好奇心和求知欲，需要不断的观察、实验和总结思考，所以他必须借助任务清单来记忆必须要做的和每天要做的事儿。据说这是他向农村一位高效种地的农民伯伯学来的。

幻灯片中是达芬奇笔记本中的一次任务清单，当然这是镜像后翻译过来的。大家都知道达芬奇笔记是用左手从右向左书写，而且是意大利语。

一大早起床梳理当天的重要工作：

上午测量米兰市区和郊区的数据。顺便去找一本探讨米兰和教堂的书，他打了个括号，标注这本书可能在科尔杜索路的文具店找到。然后回家，思考卡斯泰城堡的测量方法。见时间还充裕，达芬奇又加了一条，找一名数学老师，学习如何计算三角形。

下午时间长一些，工作自然安排得非常紧凑：他先找帕维亚大学的一名教授学习身体比例知识。接着去本笃修道院学力学知识。再跟一个桥梁专家交流，费拉拉塔为何如此坚固。向一名意大利商人请教如何在冰上行走。上午测量了米兰的数据，下午要抽时间画出来。找前两天约好的一名水利专家，询问伦巴第人如何修理水闸、磨坊和运河的。

达芬奇思考了一下，忙完这些事情可能要到晚上八九点。他睡觉很晚，又添上两条：去会一名天文学家，了解地球到太阳的距离是如何测量到的。再去帕维亚图书馆，找一本关于光学的书。

这么多的任务，可能不是一天完成的清单，有的需要最近一段时间来完成。

另外清单还说明达芬奇的学习并不只是通过观察和实验，还有与专业人士的交流学习，这能让他始终站在各个学科的最前沿。

这一点非常重要也非常值得我们学习，抓住机会，与顶尖专业人士交流并学习，是最好的捷径。

达芬奇睡眠法

有这么多的工作要做，我们不仅会问，达芬奇能忙得过来吗？显然，时间太不够了。他不得不绞尽脑汁，这不，创造了达芬奇睡眠法。

每4小时睡15分钟，一天只睡1.5小时。现在有部分人在尝试发现短期有效，长期还没有人试验过。

然而，达芬奇虽然创造了睡眠法，但并没有证据表明他长期或者经常使用。这种与正常人格格不入的工作生活习惯可能更大的压力是来自心理上的困难。

达芬奇拖延症

达芬奇有许多未完成的作品，尤其著名的是《博士来拜》、《荒野中的圣杰罗姆》和《安吉亚里之战》三幅作品。

这些作品倾注了他大量的精力却没有完成交付，虽然现在看来仍为艺术中的精品，但当时却让列奥纳多极度伤感和臭名昭著。这究竟是什么原因呢？我们进一步看看。

幻灯片就是《博士来拜》的草图。《博士来拜》是传统的宗教作品，大意是描述耶稣诞生，三位智者（也说是国王）受星星的指引来到伯利恒，献上黄金、乳香和没药作为礼物。



达芬奇一反传统画法，构思了一个宏大的场景和多达六十多个人物，想通过每一个人的动作表情及相互感染来表达这一情景，将科学和艺术完美融合，从草图和笔记上看是如此的微妙和美妙。

但技术上实现却是难上加难，尤其还考虑在这时天空应该有祥光照射，但这些光在六十多位人物上照射、反射和人物间的反射以及周围环境的反射及形成的不同阴影，显然是一个永远无法完成的存在。

达芬奇完成不了，谁也完成不了。

这一幅是《荒野中的圣杰罗姆》草图，和《蒙娜丽莎》一样列奥纳多身前一直携带在身边，也因为想要准确表达所有骨骼、肌肉、运动和心理之间的相互关系而最终搁浅，这需要更深入的解剖学研究。

《安吉亚里之战》是更加雄心勃勃的计划，而且采用了全新的颜料和技法，其原作已经不复存在。不过，从这几幅零星的草稿和摹本中，你仍能感受到战斗

的惨烈程度和血腥味。

可见，达芬奇一身都在追求一种至善至美境界，融通科学、技术、哲学和艺术，从而连通人与自然，意图实现绝对自由。我想“企用人力达天听”来形容比较合适。

因此，他一身只有 10 多幅完整作品存世，也因此才有了无人能逾越的艺术成就和科学成就。

2.6 小原理有大用

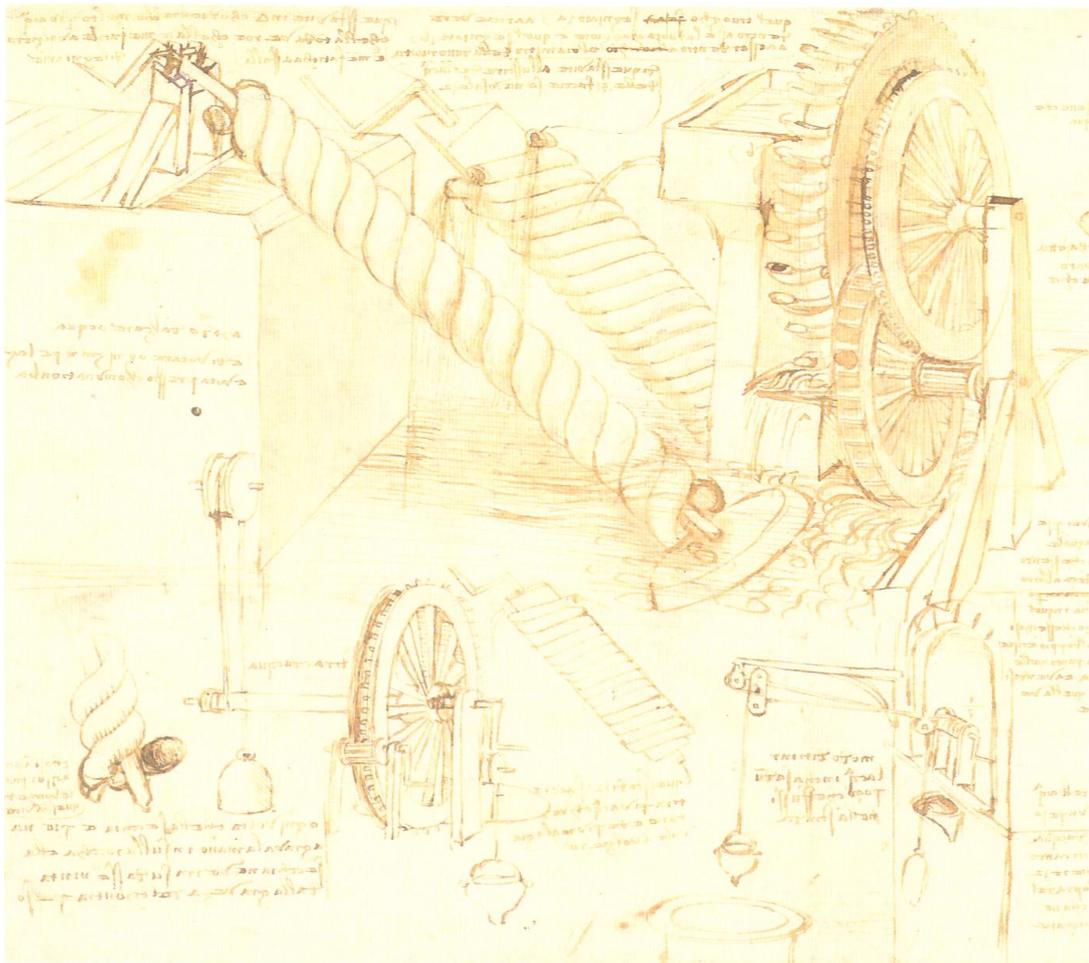
雄心勃勃的《水力学》专著

除了人体，达芬奇最感兴趣的就是水了，对水流的研究投入了巨大的热情。他深入细致的观察、实验，总结水动力学规律、发明水力机械、设计大型水力工程。

所以达芬奇既是流体动力学奠基人，又是水力工程师和设计师，可以称为“流体动力学之父”。

基于他一身的水力学研究和实践笔记，1508年达芬奇又雄心勃勃的整理撰写《水力学》专著，共分十五章，开篇“水自身的性质”，接下来“关于海水”，“关于地下水”，最后是“关于水位上升”和“关于水的侵蚀作用”。最后的结果我们可想而知，也就像他其他大部头计划一样仅仅是计划而已。因为他更多的兴趣和精力要去探索和实践。

迷人的永动机



永动机是从古至今人类追求的梦想，虽然现在热力学第一定律和第二定律已经证明永动机不可能造成，但仍然有不少人在痴心梦想。不过谁知道会怎样呢，宇宙永远是个谜。

至少你在探索中能保持一颗永远的好奇心，能让你保持旺盛的求知欲，没准儿还能发现个什么定律什么的。像焦耳和卡诺等，像这里的主人公达芬奇。

达芬奇从 15 世纪 90 年代以来，用了 28 页笔记来研究永动机的可能性。笔记中他设计了许多永动机包括图中的水力永动机。

他通过水循环流动推动阿基米德螺旋转动，把水带到高处，高处水流下循环，这样就可以实现水永远的循环流动。设计简直称得上完美，但究竟行不行呢？

达芬奇有自己的一套办法，他详细画出草图，根据草图进行思想实验，最终得出结论：高处流下的水不可能被完全带到高处。所以通过各种永动机的尝试，他认为无一可行。

但他认为永动机的尝试对我们的人生是有价值的。

宏伟的水力工程设计

达芬奇为了实现水力工程，设计了用于水力输送的水利机械如：水泵、液压管、螺旋泵、斗轮水车和虹吸装置等

达芬奇负责了几个硕大的水利工程设计工作，包括亚诺河改道、皮翁比诺沼泽排水和罗莫朗坦都城设计。

亚诺河改道的目的是为了截断比萨城海上供给线路，最终因为施工者改动设计计划和资金问题而搁浅。

皮翁比诺沼泽排水涉及到借用海水之力而缺乏可行性。

罗莫朗坦是一个更加雄心勃勃的伟大工程，国王让他设计一座新的城镇和宫殿建筑群，包括建筑、城市规划、水力工程、工程设计和庆典表演。

这个设计中最出色的就是水力工程，他计划建一套运河系统将附近两条河流连在一起解决灌溉和沼泽的问题。同时他认为：水是城镇的血脉，水力设施既要实用又要有装饰效果。

所以达芬奇设想将水用于灌溉、清洁街道、冲洗马厩、清除垃圾和优美的景观装饰及大型水上表演，要有人工湖，每个广场都要有喷泉。

该工程设计始于 1518 年初，1519 年被终止，国王选了另一个地方，同年列

奥纳多逝世。他水利工程建设的梦想最终均未能实现。

然而，事情也还没有那么糟。达·芬奇的草图被继任首席建筑师的德·科尔通参照，建成了卢瓦尔河流域最美丽、最著名的城堡：香波城堡。里面的文艺复兴风格大多源自达·芬奇为罗莫朗坦的宫殿所做的设计。



达芬奇提出连通器原理

最后，我们来看看达·芬奇提出的连通器原理。他指出：在连通器内，同一液体的液面高度是相同的，不同液体的液面高度不同，液体的高度与密度成反比。

显然，这个提法现在来看是有点问题的，您能说出有什么问题吗？

对了，这里面条件除了提到的同种液体、连通外，还要增加平衡状态和质量力只有重力作用才能严格成立。平衡状态就是静止或者匀速直线运动状态。

如果还有其它质量力，比如惯性力，即处于加速运动的液体，液面可能就是倾斜或者抛物面了。这个后面马上就要谈到。

连通器原理，虽然简单，但凡称得上原理二字的，就一定有广泛应用。

如牲畜自动喂水器、锅炉水位计、过路涵洞。还有家中的自来水、抽水马桶、水库出流等的出水动力等。

下面来看一个高精尖的应用。

世界上最大的双线五级船闸

三峡大坝是世界级大工程，大坝上下水面落差通常为 113 米。思考一下，这样高的落差我们的万吨巨轮如何能够通过，您有什么好办法吗？

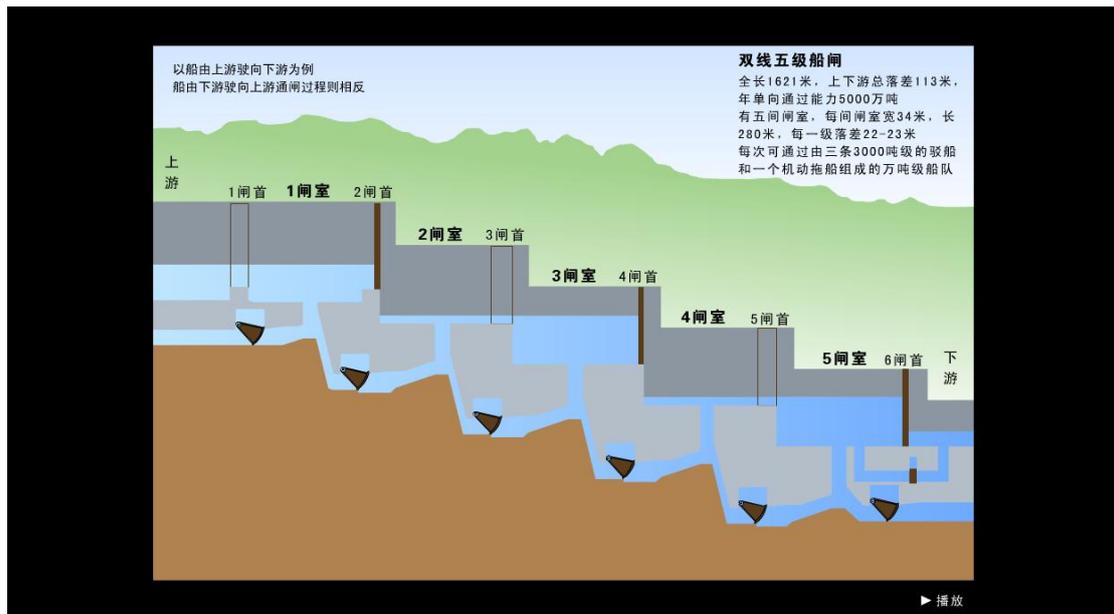
三峡大坝采用了两种过坝方式，一种为升船机，小于 5000 吨的用升船机，粗暴点说就是“提溜过去”。

超过 5000 吨的就得用到另一种装置，世界上最大最先进的双线五级船闸，其原理就是最简单和最原始的连通器原理。惊叹吧！



PPT 就是船闸全景图，双线指的是上行线和下行线，五级指的是把 110 米落差分为五段，每段落差只有 20 米左右。请下去想想为什么要这么做？

下面我们通过一个动画来看看万吨巨轮如何通过船闸的。



看完这个动画，您就全明白了。这就是大巧若拙的道理，最简单的原理却完成了最艰巨的任务。

2.7 三峡巨门水中受压计算

三峡大坝钢铁巨门

上次课说三峡双线五级船闸利用的是简单的连通器原理，并用了 24 扇钢铁巨门。这次课就来看看如何计算这些巨门在水中的压力。



再来欣赏欣赏这个巨无霸。五级船闸共有 24 扇钢铁巨门，每扇门高 38.5 米、宽 40.4 米，厚 3 米，重达 1700 吨，相当于 4 个篮球场大。闸门呈“人”字状开启。

这么大的闸门在水中将会承受多么巨大的压力呀，能用流体力学把它算出来吗？当然，下面请跟我来轻松掌握水中平面的受压计算。

说到流体力学计算，许多人当场蒙圈，这不就是考验微积分水平吗，我睡大觉去也。

别别别，千万等等，听我说完，只用加减乘除，搞定流体静力学最重要的内容——水中物体受压计算。一起来试试吧

压强计算和压力

幻灯片中这个公式很亲切吧， $P = \rho g z$ ，液体深度 z 处的压强计算公式。里面字母都认识吧， P 为压强， ρ 为密度， g 是重力加速度。

对头，液体中任一深度 z 处的压力就是密度 ρ 乘以重力加速度 g 乘以深度 z ，

即 $P = \rho gz$ 。

压强没有问题，都会算了吧。会了压强，压力是不是就是压强乘以面积啊。因而压力=压强×面积，是不是就算出来了，没骗大家，只用到了乘法。

那么复杂的東西呢，有点不信。不信，我们就来试试。



a1, a2, a3, a4 四个容器装满了水，水的密度是 1000kg/m^3 ，底面积都是 1 平方米，液面高都是 1 米，液面是大气压。请注意，液面为大气压的面也叫自由面。大家先看看哪个容器受的压力最小啊，压力多大？

非常正确，四个容器底面受压是一样的。注意不是比胖瘦，不是比水的多少，主要是比高低。那我们就来算一下，分两步走。

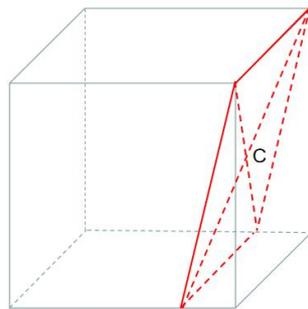
水中平面受压计算

第一步算底面形心 c 处的压强，就是各个底面那个红点。想想为什么选形心，理由（1）形心有代表性；（2）底面上所有点的压强都相同。

所以压强 $P_c = \rho gz = 1000 \times 9.8 \times 1 = 9800\text{Pa}$ ；

第二步算压力 $F = \text{压强} \times \text{面积} = P_c A = 9800 \times 1 = 9800$ 牛顿，力的方向呢，方向就是垂直指向受压面，如图中红色箭头。

算出来了，每个底面都受到 9800 牛顿的压力。是很简单，但你可能会说：“老师，你这计算水平面的压力可以，其他倾斜面总不行吧。”



提得非常好，图中红色倾斜平面，上面各点受的压强都不一样，也就是受压

不均，怎么办？

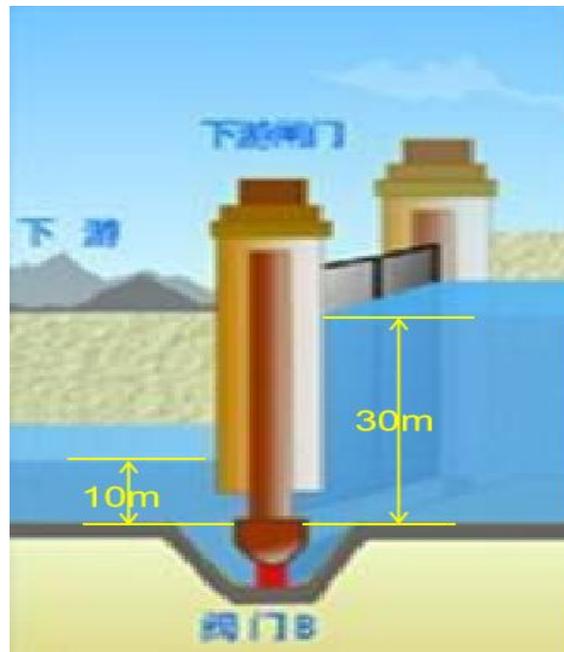
老师告诉你，计算方法完全一样：倾斜平面受压 $F=P_cA$ ，就是受压面的形心处压强乘以受压面面积，还是分两步走，所有平面受压都如此。

所以有的时候，对一个问题无解时，用已知去推测未知是一种有效方法，但可能对可能错，最终需要理论分析和实践检验，而且归根结底是实践检验。

这里你从水平面外推到其他平面就是对的，但如果你再推到所有曲面就会出问题，不过没有关系，此路不通咱们可以换条路。

三峡闸门受压计算

平面压力会计算了，咱们再回到三峡闸门上来，大家就会算了。闸门在水中一般是两边都有水，水位一边高一边低。



如上图，假设闸门上游水位 30 米，下游水位 10，求闸门受水的压力。

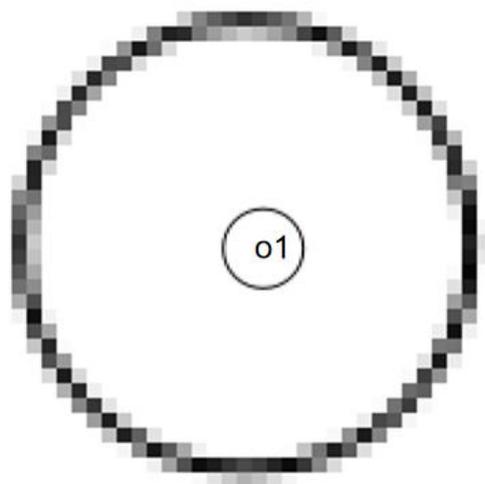
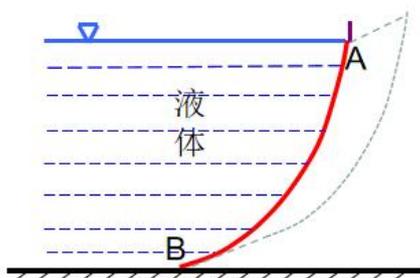
分析一下，右图中闸门受到两个压力，一个是上游水向左的压力 F_1 ，另一个是受到下游水向右的压力 F_2 。我们只需分别求出相减即为合力。

计算很简单，您可以停下来动笔尝试一下，是不是很有成就感呢，将来生活中的平面受压问题居然就这样会了，庆祝一下吧。

给一个小提示：受压面不是指的闸门，是指的闸门与水接触的部分。

水中曲面受压计算

平面受压会算了，再来尝试一下曲面受压。左图液体中右侧有一曲面 AB（在纸面投影就是曲线 AB），计算它受的压力。



刚才说了平面计算方法不能向曲面推广，咱们需另谋出路。

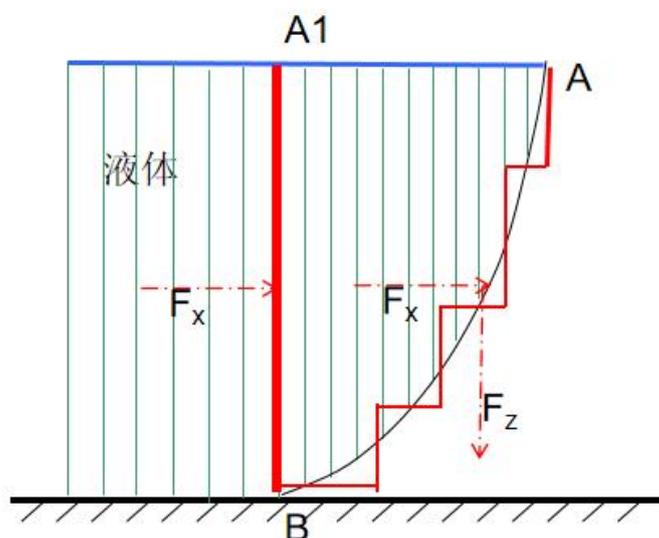
跟大家变一个魔术，将一个光滑小圆 o_1 尽量放大，看看右图小圆的光滑圆周线变成了无数折线相连。说到这里，您可能明白我的意图了吧。

太对了，原来曲线可以由直线构成，当然曲面可以由平面构成，数量越多越接近。

因此有了这个思路，曲面受压就可以变成平面受压了吧，问题是不是就解决了啊。完全正确，加分。

别忙，还是稍稍有点问题，这么多的平面，计算起来是不是很繁琐啊。需要一点小技巧。

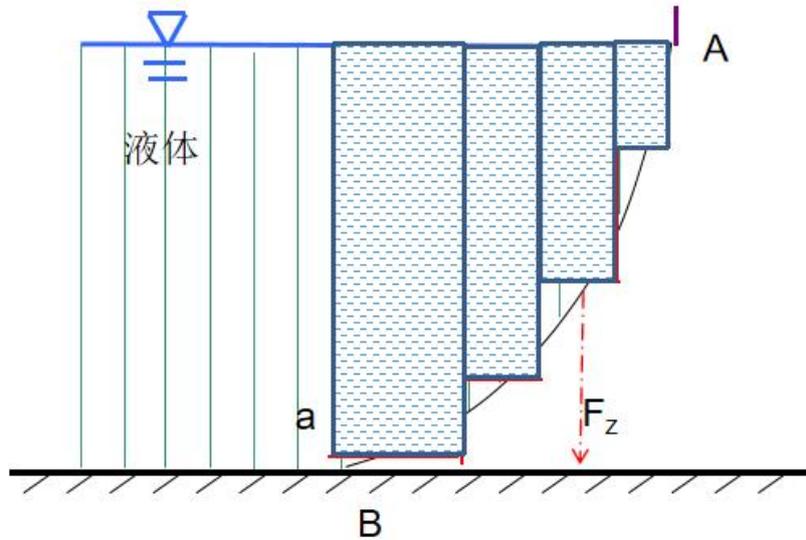
好，现将 AB 分成一系列水平面和竖直面，如图红色折线部分。分别求竖直面 F_x 和水平面受力 F_z 。



(1) 先解决竖直平面受力问题，竖直平面受的是水平方向的力 F_x

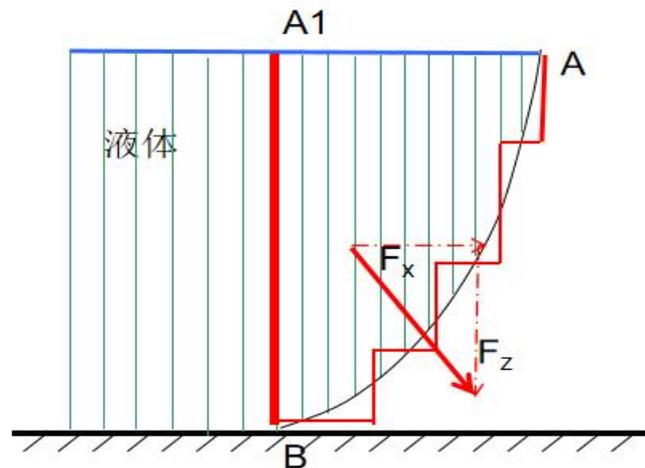
请看图，将所有竖直平面首尾拼接成 A_1B 那样的竖直平面， A_1B 正好是曲面 AB 在竖直面上的投影面，因此曲面受的水平方向力就是平面 A_1B 一侧面受到的压力，这我们会求。

(2) 解决水平面受力问题，水平面受的是竖直方向的力 F_z



请看右图，每一个水平面受压实际上是其正上方到自由面间充满的所有液体的重量，最后把所有水平面上的液体重量加起来，就是曲面受到的竖直方向的力。其实，所有水平面上液体重量加起来就是曲面正上方到自由面间充满液体的重量。

(3) 求水平力 F_x 和竖直力 F_z 的合力 $F = \sqrt{F_x^2 + F_z^2}$ 就得到曲面上受的压力。



第三章 神秘的炼金术士牛顿

3.1 为黑暗赐予光明的人

波普心中的神

今天，我们来欣赏另一位伟大人物牛顿。如果说达芬奇几乎涉猎了当时所有的学科并都卓有建树。那么牛顿则正好相反，仅用了四条定律就解决了他那个时代的所有学科问题，当然需要各学科领域的共同努力。

这完全是两种思路和方法，应该取决于各自伟大的时代背景。

Nature and nature's laws lay hid in night; God said "Let Newton be" and all was light.

亚历山大·波普是 18 世纪英国最伟大的诗人，这个 1.37 米个子的奇才骂人多夸人少。这几句话可以看出牛顿在他心中是何等的地位。

牛顿的辉煌



百度百科里写道，艾萨克·牛顿生于 1643 年 1 月 4 日，卒于 1727 年 3 月 31 日，终年 85 岁；英国著名的物理学家，百科全书式的“全才”。这里的全才应该是主要是物理学和数学领域，还不是真正达芬奇式的全才。

不过这里再次说明博学精研应该并行不悖，博学是基石，是创新之源，更是智慧之门。

牛顿在英国皇家学会连任 24 年终身会长，还是法国科学院至尊的外国院士。无奈，这些荣誉不想都不行，何况还想。生在这个时期的科学家是多么不幸！

出色的造币局长

1696年，牛顿曾任英国造币局督办，以科学研究的方法和热情成功完成了货币改造，并临时兼任经侦队长，出色打击了假币制造，于1699年无可争辩的升任造币局局长。

牛顿刚到造币厂，就发现造币厂管理混乱，厂领导中饱私囊。他于是系统地研究了造币厂两百多年的历史，和与造币相关的一切技术细节、成本核算。蹲在机器跟前，记录每一个班次详细的运转情况，包括使用的银币熔毁重铸的损耗，工人和马匹的工作效率，工序之间的停顿时间。他还抄写了从1059年到1691铸币的质量与数量的记录。在收集了五大口袋数千页资料之后，牛顿用他研究数学和宇宙的天分，从纷繁芜杂的数据中发现了造币厂运转的规律，他向财政部提交了题为《造币厂现状》的报告，并立即成功实施了他的铸币改革。

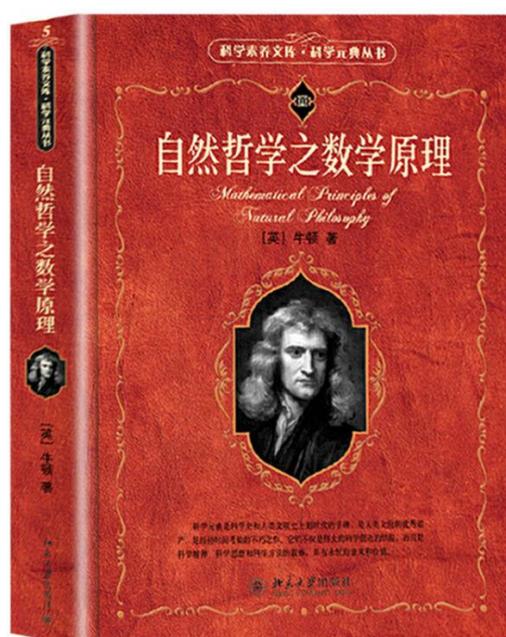
看完这些，您难道不震撼吗，这样的劲头放在哪个行业还不都干得惊天动地。

想想目前国内部分学术型领导，领导事儿不搞，学术荒废了，利益全都要，单位葬送了。认真学学牛顿，大有裨益。

1705年，安妮女王亲自到剑桥大学封牛顿为爵士。1727年3月20日牛顿与世长辞。死后作为自然科学家第一个获得国葬，长眠于威斯敏特教堂，这是历代帝王和第一流名人的墓地。

这是何等的辉煌和荣耀，究竟是什么成就让他受到国人如此的爱戴。

牛顿的科学成就



《自然哲学之数学原理》又称《原理》，是科学史上无可比拟的经典著作。

原理将哲学数学化，形成四大定律成为万物之理，甚至到现在都如此。虽然量子力学和相对论貌似在某些领域打破取代了牛顿力学，只是说明各自描述的对象不同而已。牛顿力学适于确定性和白箱世界，相对论是牛顿力学的拓展。量子力学适于不确定性和黑箱世界。《微积分》是牛顿为《原理》的推广准备的利器。

《光学》是牛顿的另一名著，主要发现了光的色散、牛顿环，提出了光的微粒说，为光子的出世埋下了伏笔。

另外牛顿利用打盹儿的功夫想了想流体力学的事儿，就提出了牛顿粘性定律，奠定了粘性流体力学的理论基础，因此可以称为“粘性流体力学之父”。

牛顿理论极度辉煌时：法国数学家、物理学家拉普拉斯高喊，给我初始条件，我可以告诉宇宙过去和未来；

1900年，威廉·汤姆森·开尔文男爵在回顾物理学所取得的伟大成就时说，物理大厦已经落成，所剩只是一些修修补补的工作。

牛顿肩上的巨人



牛顿有句至理名言，“我之所以能比别人看得远些，是因为我站在巨人们的肩上。”这句话经查证实际是牛顿对胡克的讽刺。但我觉得这句话确实很适合牛顿本人。牛顿生逢其时而且已经做足了准备，前期各个学科领域的分析和小的综合已经完成，大的综合已经在酝酿中，零星的真知灼见已经呼唤着《原理》的出现，可惜很多伟大的科学家均因哲学和数学方面准备不足而错失良机。

牛顿要感谢的第一个巨人非伊萨克·巴罗莫属，巴罗是剑桥三一学院院长，博学多才，独具慧眼。将自己的数学知识，全部传授给牛顿，并把牛顿引向了近代自然科学的前沿。

1669年，巴罗为了提携牛顿而辞去了教授之职，26岁的牛顿晋升为数学教授。这在科学史上一直被传为佳话。

其他巨人最直接的就是这三位，哥白尼、开普勒和伽利略。

哥白尼简化了太阳系模型，让大家看到了真实的太阳系运动，后来才有开普勒三定律为行星运动立法，最后导致万有引力定律的发现，当然这里也有胡克的贡献。

伽利略是现代科学之父，提出了科学研究方法，对惯性、相对性原理和自由落体的杰出研究为牛顿三定律的诞生做足了准备。

最后牛顿以无比的勤奋、深刻的思考和卓越的洞见才有了下面这句话。

我不知道世人怎样看我，但我自己以为我不过像一个在海边玩耍的孩子，不时为发现比寻常更为美丽的一块卵石或一片贝壳而沾沾自喜，至于展现在我面前的浩瀚真理海洋，却全然没有发现。——艾莎克·牛顿

3.2 勤奋的炼金术士

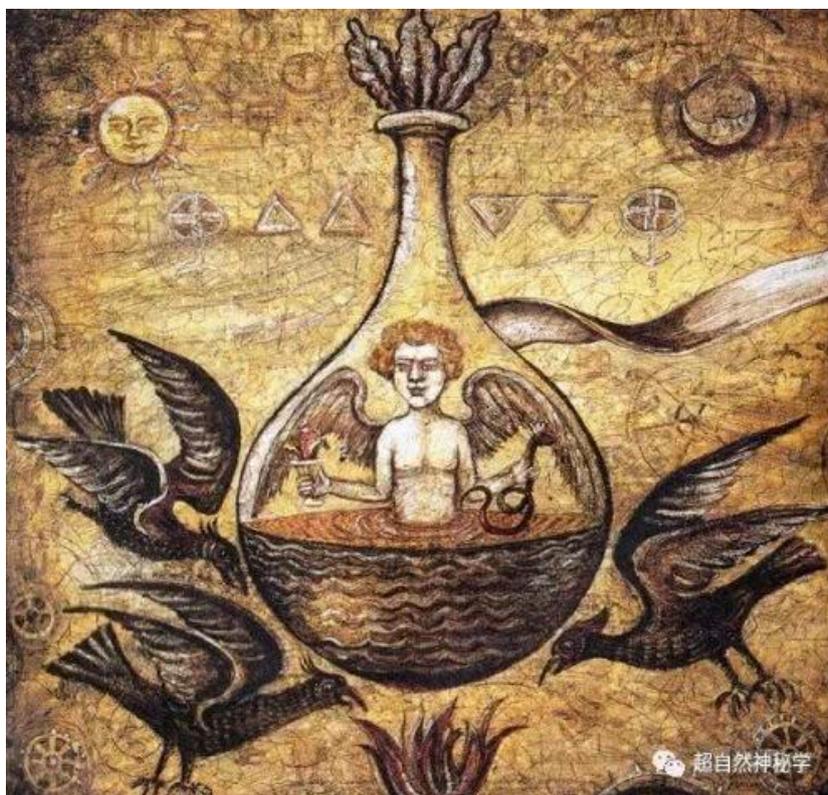
牛顿居然是炼金术士

这一节我们来了解一下炼金术和天才的勤奋。

凯恩斯曾说：牛顿并非理性时代的第一人，却是最后一个魔术师、最后一个巴比伦人和苏美尔人。凯恩斯何许人？百度百科显示，凯恩斯，英国经济学家，他的宏观经济学与弗洛伊德的精神分析法和爱因斯坦的相对论并称为二十世纪人类知识界的三大革命。凯恩斯曾经拍下牛顿的炼金术手稿加以研究。

牛顿是一个大炼金术士，这一点从来不是个秘密，但自从牛顿死后——这时候启蒙时代正在拉开帷幕，炼金术的名声也已经变臭了——学界一直有意无意地忽视牛顿的炼金术手稿，把牛顿塑造成伟大光明的科学理性形象。这批手稿长期被当作没有价值的部分被封存。直到1936年，这部分手稿终于被拿出来公开拍卖，著名的经济学家凯恩斯拍下了其中的小半部分，并着手研究，最后在1946年英国王家学会纪念牛顿诞辰300周年的时候发表了奇文“牛顿其人”，还原了牛顿的这一面相。

炼金术是干什么的？



炼金术的目标：炼黄金、造哲人石（即长生不老药），最高目标是制造万能的人。后来化学证明这些都不可行，炼金术常与巫术同列，臭名昭著。

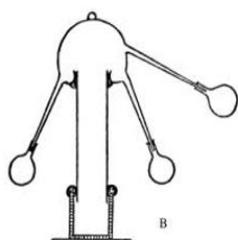
但现在回过头来看，炼金术实际上是人类对物质本源的一个探索过程，对现代化学、药理学、矿物学的诞生起了重要作用。其目标实际也是现代人孜孜以求的梦想，其中人造黄金已经实现。

炼金术哲学思想：就是图中六大法则和黄道十二星座。一与统一体法则，指一生万物，万物归一；二元两级法则指阴阳对立统一；三大要素法则指硫磺-汞（水银）-盐构成世界万物。类似于道教的一生二、二生三和三生万物。这说明世界从不缺乏交流，即使是遥远的古代，当今我们更应敞开怀抱，拥抱世界。

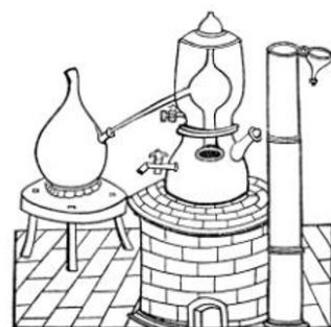
没有炼金术就没有化学



诺顿天平



三臂蒸馏器



1500年左右的蒸馏装置，炉火上水浴加热，侧面有燃烧补给管。

同学们，请看，左图是诺顿实验室用的天平，中间是三臂蒸馏器，右边是水浴加热装置。这都是炼金术士当时必备的工具。



煅烧装置



熔化装置



水浴结晶装置

看看这些，煅烧装置、熔化装置和水浴结晶装置。所以炼金术为现代化学准备好了各种化学仪器和过程方法。

这就促成了炼金术士波义尔向伟大的化学家转变，他的名著《怀疑派化学家》出版年 1661 被化学家确定为近代化学开始的年代。

可以这么说，没有炼金术就没有现代化学。炼金术对现代化学究竟有何贡献呢？可以归结为三个主要方面：（1）为现代化学准备了必备的仪器设备；（2）形成了一套系统的实验方法（包括加热、溶解、融化、蒸馏、分馏等）；（3）发现了众多的金属、非金属、化合物及其反应过程。

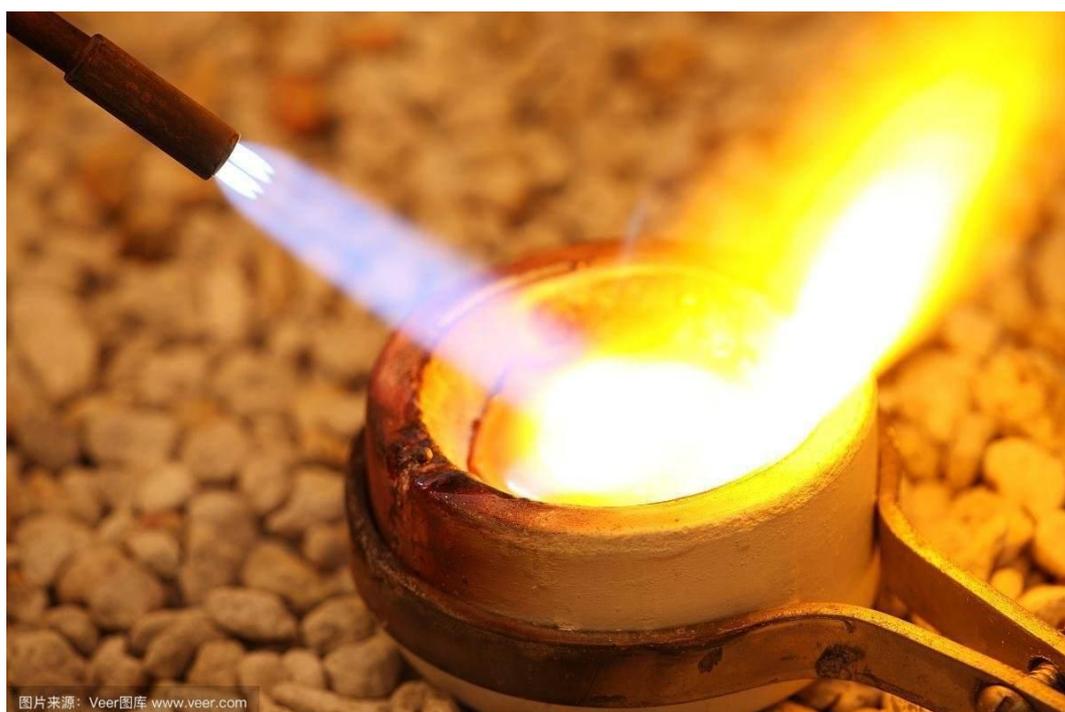
痴迷炼金术

有一句被世人选择性遗忘的名言：“我的一生，就是在为证明上帝的存在而工作。”在牛顿那里，科学、哲学和神学达到了统一，除了著名的《原理》、《光学》著作外，还写有 50 万字的炼金术手稿和 100 万字的神学手稿。

牛顿执着于炼金术，他剑桥的第一位导师就是炼金术士亨利·莫尔，经常与同事波义尔（大化学家）切磋炼金术经验。

甚至有说法，科学研究只是牛顿炼金术的副产品。炼金术也的确为他后来造币局的出色工作打下了基础。

他观察坩埚中物质的运动，从动力上，他认为之所以天体会具有引力这一奇妙的性质，正是因为我们的宇宙正是身处于上帝的巨大而奇妙的坩埚之中。



这让他一身致力于对引力的研究之中。

对于炼金术的勤奋，我们来看看牛顿的助手威金斯曾经的一段描述：“他对他的研究如此专注而认真，以至吃的非常少，经常忘了吃饭……睡觉也很少，有时只躺四五个小时。……炉火日夜不熄。当我忙于它事时，他却整夜工作，直到完成他的化学实验。”可见，人本能的好奇心和对未知世界的探索欲求最能激发研究和工作激情。

执着科学研究

牛顿认为“不花在研究上的时间都是损失”。他常常通宵达旦地学习、思考和研究，进入忘我境界。这里谈谈他的3件轶事，就什么都明了了。

一次请朋友吃饭，饭菜都上了，他还在内屋做实验，于是朋友自己吃了饭走了。牛顿忙完出来吃饭，看桌上一片狼藉，于是自言自语“哦，我已经吃过了”。

还好，朋友没生他的气，不过一般朋友也不敢跟他生气。

还有一次，更糟糕，因为边看书边煮鸡蛋，结果把他心爱的怀表放水里煮了1个小时。

其实这也不算啥，顶多饿一顿再买一块表。

这一次可是要了命，牛顿曾和一漂亮姑娘谈恋爱，约会时，他痴痴看着对方，心理却想着二项式定理，无意中把姑娘的手指头塞进冒着火星的烟嘴里，疼得姑娘落荒而逃。

他于是终身未娶，被封为著名光棍。嗨，还用封，谁敢比他有名。好在啊，这帮科学狂人他爱科学，不太爱美人。

造币也疯狂

牛顿既完成《造币厂现状》考察报告后，开始改造造币工艺。牛顿以他研究宇宙的耐心与细致，制定了流水线上详细的人马分配，力求实现最高效率。他凌晨4点就到工厂工作，他发现，如果造币机每分钟撞击50到55下，工人和机器就可以一口气数小时地连续工作，他提高了整个造币厂的生产能力。所以，原本9年才能完成钱币再造工作3年就完成，英国的经济形势由此得以好转。

成功的秘诀

那么牛顿成功的秘诀是什么呢？牛顿回答：“假如我有一点微小成就的话，没有其他秘诀，惟有勤奋而已。”

几点感悟与大家分享：牛顿的一生给我们许多启示：

牛顿家庭背景并不好，早产儿而且三岁母亲改嫁，所以先天不足并不代表后天不足；

勤奋、专注、坚持与忘我是成就人生的几大法宝；

谦虚不但使人进步，而且让人敬佩；

探索无止境，没有永恒的真理；

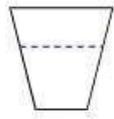
3.3 水桶实验—至今未解之谜

这次课我们来看一个普通的水桶实验，看看那些伟大人物对它的思考。

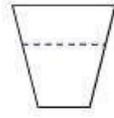
一起做个水桶实验

三百年前，牛顿别出心裁，设计了一个简单的水桶实验，触及到了宇宙中的一个最大的谜团。什么是水桶实验呢？

简单说，就是将装水的水桶转起来，这就是水桶实验。这叫什么实验，能有什么谜团，谁都会做甚至可能都做过。



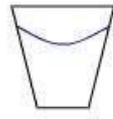
桶未转，水面平



桶开始转，水面仍平



桶长转，水面凹



桶骤停，水仍凹

对了，要不说是大师，您还记得转动时发生了什么吗？记得啊：没转的时候，水是平的，对吧。接着呢？接着桶开始转了，水还是不动，水面还是平的，对，观察蛮仔细的。

再接着呢？再接着水跟着桶一起转起，水面不平了，对对，水面什么形状？当然凹形。

那最后呢？最后桶一停，桶不转了（废话），水还在转，水面还是凹形。最后的最后就是都停下来，水面也平了。非常正确，恭喜答对了。可是这能有什么东东呢？没劲。

嘿，别忙，问你一个问题，知道这是为什吗？这才是关键中的关键。实验谁都会做，现象有心的人也会留意，然而为什么有几个去问呢，别忘了多问为什么，秘密全在这里。

牛顿看出了绝对时空

先看看牛顿如何解？

牛顿老人家是这么说的：离心力的作用导致了旋转水面的凹形，是的我们都知知道啊。但注意，牛顿可不是一般人，继续听，

实验开始时，桶转水不转，别忘了，转不转和动不动都是相对的，所以桶转水不转是相对于一个假想的绝对静止参考系，对吧。

注意玄机就在这儿，如果以桶为参考系，水是不是就是旋转的呢？当然是。对了，关键问题出来了，旋转就有离心力，有离心力就应该有水面变凹啊，可水面此时却是平的，矛盾出来了吧。

是啊，这怎么回事儿？别慌，继续听牛顿老人家的。这说明存在绝对静止参考系，它并非假想。完了？完了，这就是结论，世界存在绝对静止参考系，即绝对空间。我发现的宇宙最大秘密。

而且这个实验后面给出了最好的证明。您看啊，接着水与桶一起转了，水面凹的，这是相对于绝对空间吧，再接着，桶停了，水还在转，水凹形，仍是相对于绝对空间吧。

所以水面凹不凹只需看它是否相对于绝对空间旋转，与相对旋转没有关系。太伟大了！

马赫看出了宇宙之力

200年后，有一个人不乐意了，谁这么大胆，这个人就是天不怕地不怕的马赫。马赫批评牛顿说根本不存在绝对空间，一切都是惯性的结果，惯性是整个宇宙物质的引力作用的结果。什么意思呢？

就是说桶转水不转，是因为惯性让水静止，所以水面是平的，桶骤停水仍转，是惯性让水转，所以水面是凹的。这都是由宇宙全部质量作用在水上造成。

这又是一个脑洞大开的想法，比起牛顿的绝对空间那个存在，要亲民得多了。因为一切惯性都是由宇宙物质引力作用的结果，这就是大名鼎鼎的马赫原理。

这里大伙儿也看出点苗头了吧，牛顿和马赫最后的焦点在哪儿呢？

对对对，就是在于惯性的起源。牛顿是起源于绝对空间绝对运动，马赫是起源于物质相互作用。

遗憾的是，现有实验检验马赫原理失败。根据马赫原理，地面物体的惯性质

量来源于两部分，一部分为宇宙整体的作用，应该是各向同性；另一部分来自最近的银河系，是有方向的。于是 Hages 用核磁测得各向异性 $\delta m/m < 10^{-20}$ ，而 Lvash 用水星进动测出结果 $< 1.57 \times 10^{-10}$ 。均不支持马赫的结论。

爱因斯坦“过河拆桥”

好在，伟大的爱因斯坦曾经坚定的支持了马赫，他根据马赫等原理建立了广义相对论。令人愤愤的是，爱因斯坦过河拆桥，最后不得不抛弃马赫原理。

原因是广义相对论认为质量越大的物体附近空间越弯曲，就像蹦蹦床的小孩儿，体重越大蹦蹦床弯曲就越厉害，也就越偏离惯性系。而马赫原理则说质量越大越接近惯性系。

这马赫真是不好受，跟坐过山车似的。

水桶实验最终的核心是惯性和惯性质量是怎么产生的？

牛顿认为是相对于绝对时空的绝对运动。

马赫和爱因斯坦认为是宇宙的引力，而这又与广义相对论矛盾。

那究竟为什么呢？

革命尚未成功，仍需努力啊，加油，新的发现在等着大家！

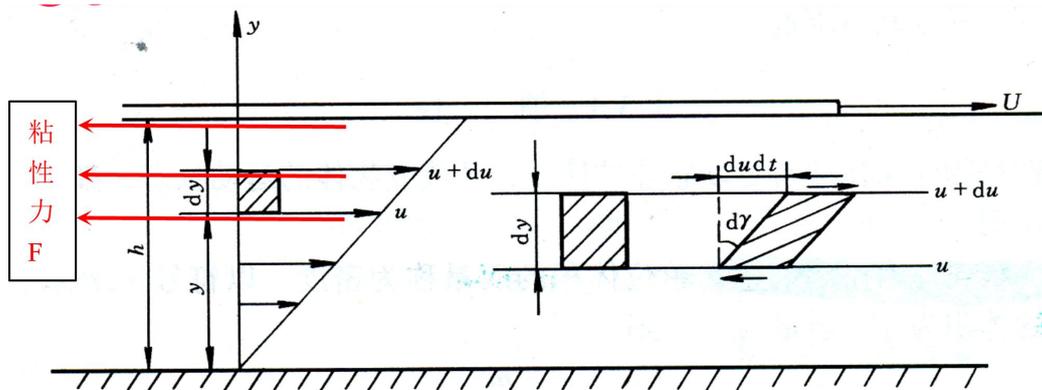
3.4 粘性流体力学之父

牛顿没事儿找事儿-发现粘性定律

我为什么称牛顿为粘性流体力学之父呢？这是有充分的理由的，下面我们来看看。

1687年的一天，牛顿在造币局闲着无事儿，没事就做个实验吧。于是他立刻动手，做了个大水槽，灌满水，又搞了块木板拿绳子在水面拖动。

这牛顿真的没事闲得，前两天水桶实验弄得迷雾重重，跟水叫什么劲。错了，牛顿干的从来都是惊天动地的事，他在试图解决流体力学有关阻力的重大谜团。



他兴奋的拖动木板，看着图中的水一层层被木板带动起来，最上层水与木板接触速度与木板相同，下层水速度要小一点，深度越深速度越小，最下层水因为粘在槽底不动。

突然，他拿出纸笔迅速写下了图下面的公式，这就是流体力学中人人必学的粘性定律。先看看公式是什么意思。

还是牛顿的风格，最简单的也是最美的。 F 为流体的粘性力，与速度梯度 du/dy 成正比，与面积 A 成正比， μ 为比例系数实际上是液体的粘度。尤其注意， u 为 x 方向的速度， y 为深度， du/dy 又称剪切变形速度或者剪切应变率。有了这个公式，你就可以计算水对木板的粘性阻力有多大了。感觉有点意思，但也没有您说得这么夸张吧。

好，我带您来看看这个公式有什么伟大意义。

粘性定律原来这么不简单

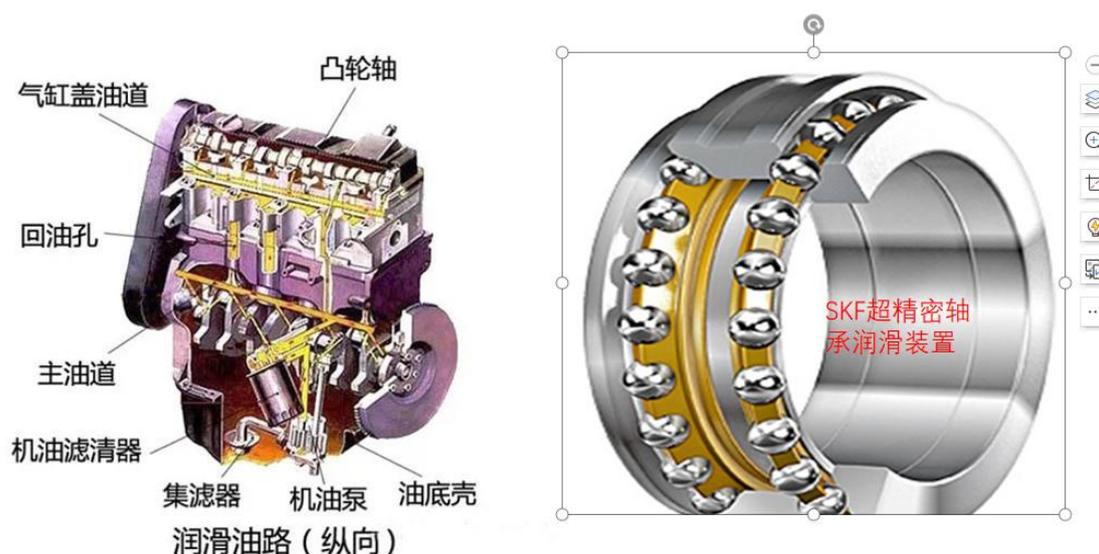
首先粘性定律可以计算流体粘性力，刚才说过，其次定律还可以根据测得的

粘性力计算粘度，也就是说提出了一种测试粘度的方法。

现在普遍应用的粘度计就是这个原理。过去只知道某个液体比较粘稠和对物体粘性阻碍比较大，但这都是定性描述，现代科学需要的是定量。

牛顿粘性定律就能够定量的算出粘性力，测出液体粘度。这已经不简单了吧，不不，远不止这点。

牛顿粘性定律在机械润滑油润滑过程中有着非常广泛的应用，能够预测机械减阻和功率功耗等。

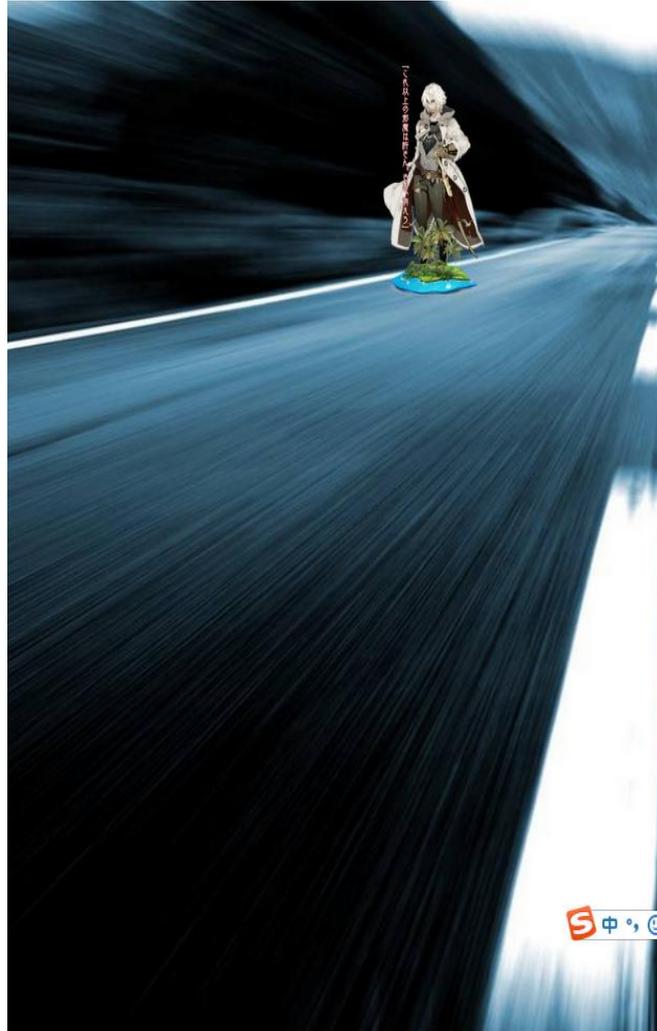


牛顿粘性定律更大意义在于确定了流体应力应变的本构方程，也才有了现在的粘性流体力学，继而才有了普朗特、冯卡门这样伟大的粘性流体力学大师出现。

仅凭这一点，粘性流体力学之父非牛顿莫属。而且后来的非牛顿流体的本构方程也是基于这个定律发展起来的，所以牛顿老人家也是非牛顿流体力学的开山鼻祖。

粘性定律怎么用

了解牛顿粘性定律如此神威后，我们怎么也要拿它来用一用吧。



请看，左图有帅哥在公路上滑板滑行，板下涂润滑液。滑行速度 100 m/s，润滑液的粘度 $\mu = 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$ ，润滑液厚度 1mm，滑板面积为 $1\text{m} \times 1\text{m}$ ，计算滑板受到的粘性阻力和滑行 42km 阻力所做的功。

定律简单，计算起来也不难。把滑板与地板间的润滑液放大，如红色箭头所指。其中润滑液的流动与牛顿水槽实验完全一致。

所以应用定律 $F = \mu A \frac{du}{dy}$ ，粘度和面积都是已知的，关键是 $\frac{du}{dy}$ 怎么算。请看放大图中红色虚线，是 u 随 y 的线性变化。所以 $\frac{du}{dy}$ 其实就是红色虚线的斜率。

$$\text{即 } \frac{du}{dy} = (\text{木板速度 } u - 0) / Y = (100 - 0) / 10^{-3}$$

代入算出粘性阻力 F 为 1 牛顿，方向与运动方向相反。做功 42 千焦。

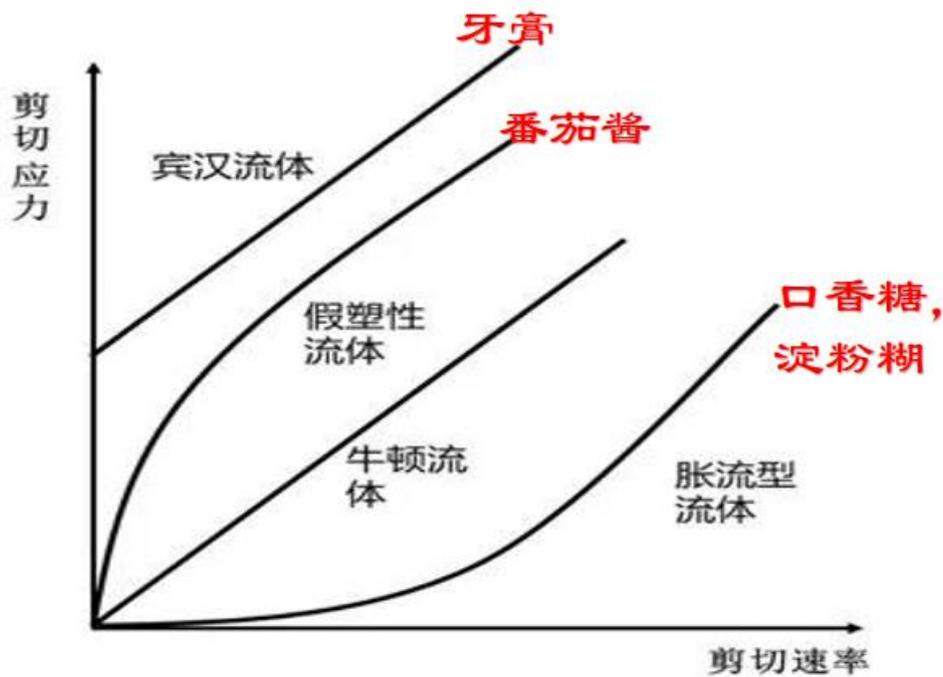
就这样，您就很轻松掌握了牛顿粘性定律，给您点个赞。

3.5 神奇的非牛顿流体

何为非牛顿流体？

非牛顿流体有何神奇之处，我们来看一段视频。

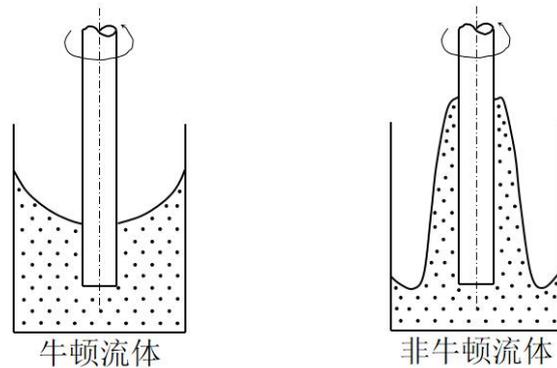
同学们，看完视频有何感受？很神奇的东西吧，那么什么叫非牛顿流体呢？我们再来看看牛顿粘性定律，幻灯片中的公式 $F = \mu A du/dy$ 。还有点印象吧。牛顿粘性定律定义流体粘性力 F 与剪切变形速率 du/dy 成正比，这样的流体被以牛顿命名，称牛顿流体。比如水、酒精、很多溶液都是牛顿流体。那什么是非牛顿流体呢？正好相反，粘性力与剪切变形速率不成正比的流体都叫非牛顿流体，生活中更多的是非牛顿流体，比如血液、稀粥、面糊、蜂蜜、牙膏、果酱等等。



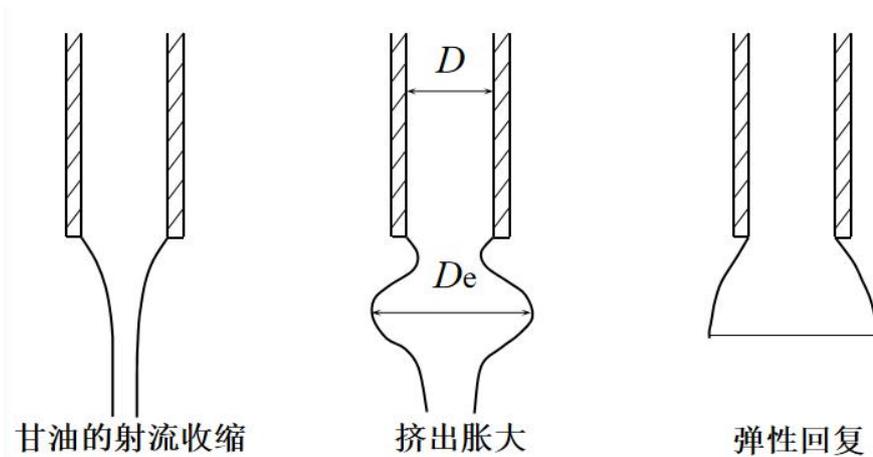
图中为各种流体的剪切应力（即粘性应力） F 随剪切变形速率 du/dy 的变化规律，牛顿流体是过原点的直线。宾汉流体是最上边那条直线，是一种粘塑性材料，在低应力下，它表现为刚体，不流动时就具有切应力，在高应力下，它会像牛顿流体一样流动。牙膏是宾汉流体的典型例子，需要有一定的压力作用才能挤出牙膏。假塑性流体和胀塑性流体都是非线性关系，如口香糖和淀粉糊都是胀流型流体，番茄酱属于假塑性流体。您知道吗，非牛顿流体具有许多神奇的性质，生活中具有非常广泛的应用，下面我们去一探究竟吧。

非牛顿流体四大神迹

第一神奇效应为爬杆效应，您可以回家尝试一下，将一根筷子在面糊中搅动时，面糊会沿着筷子上爬，而牛顿流体水则顺着筷子下降。韦森堡(Weissenberg)于1944年在英国帝国理工学院公开演示了这一有趣的实验，因此，这一现象也被称为韦森堡效应。所以非牛顿流体有着完全不同的流动特征。

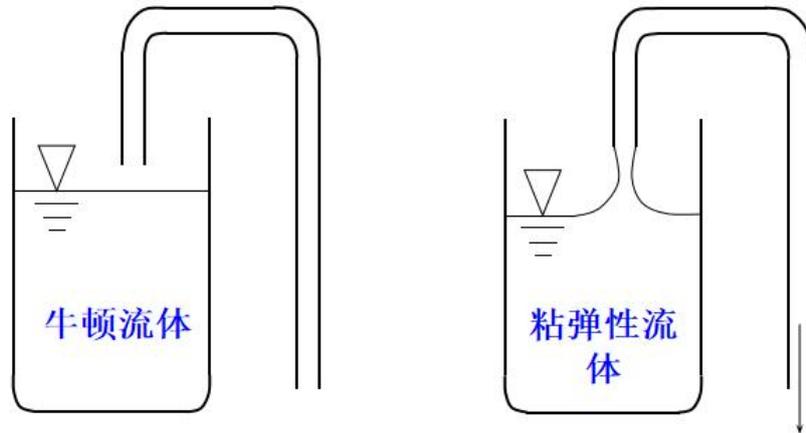


第二个神奇之处为挤出胀大效应。如左图牛顿流体甘油从管中流出后断面会收缩，而某些非牛顿流体却显示出了完全不同的现象，流出后断面胀大再收缩，剪断后会发生回缩。这就是奇特的挤出胀大和弹性回复效应。



第三个神奇之处叫无管虹吸效应。如右图，虹吸管不用接触就能进行虹吸，将流体从容器中吸出来，这不只是神奇，简直就是奇迹。对左图的牛顿流体，这样的现象是永远不会发生的。

无管虹吸效应



第四个神奇之处就是湍流减阻效应，又叫 Toms 效应。Toms 于 1948 年发现高分子聚合物稀溶液比纯溶剂阻力明显减小。这个异常现象称为湍流减阻现象或 Toms 效应。由于 Toms 效应可降低流体机械和流体输送过程的能量消耗，因而已经成为近代流体力学的一个热门研究课题。

研究发现：在水中加入 50mg/L 的聚乙烯氧化物，其结果使湍流条件下的摩擦阻降低 30%；

因此，在消防水中添加少量聚乙烯氧化物，可使消防车龙头出水扬程提高一倍以上。这样高层灭火就要方便许多。



在管道中加入 CONOCO 公司的 CDR102 油相减阻剂百万分之一 (wt) 即能达到 50% 的减阻效率，因此在管道运输行业中被普遍应用。想一想，俄罗斯上万公里

的友谊输油管线 将节省多少成本。

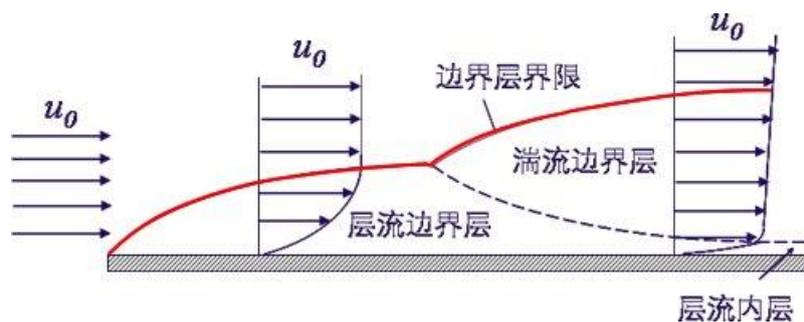


非牛顿流体如何减阻?

非牛顿流体这么神奇的减阻, 究竟原因何在呢? 目前没有完全搞清楚, 但有以下几种理论:

(1) 壁面滑移理论, 认为加入聚合物后导致壁面上流体产生滑移从而阻力减小, 一般牛顿流体由于粘性会粘附在壁面, 这在流体力学中通常称为无滑移壁面条件。

(2) 剪切变稀效应, 指近壁处流体由于大剪切力作用变稀, 粘度急剧下降而减小阻力。



同学们, 近壁处的剪切力为什么要大很多呢? 这是因为固体壁面与流体接触的边界上有一非常薄的一层流体叫边界层, 边界层中速度由壁面的 0 迅速增加到外流中的速度 u , 所以 du/dy 特别大, 而在外流中速度 u 几乎不变, du/dy 为 0, 根据牛顿粘性定律粘性力 F 与剪切变形速率 du/dy 成正比, 故边界层中粘性力或者剪应力特别大。这实际就是流体力学著名的边界层理论。这是德国流体力学大

师普朗特 1905 年提出的，他因此被封为现代流体力学之父。

大家对普朗特可能不太了解，但我说另外一个人，大家可能就清楚了，冯卡门。这个大家都知道吧，美国航空航天之父，他的师傅就是普朗特。如果还不知道，我们国家的钱学森、郭永怀，钱伟长都是冯卡门的徒弟。下去同学们可以了解了解。

(3) 粘性各向异性理论，横向粘性大抑制了湍流脉动和扩散，当然阻力减小。湍流的阻力一般比层流大得多。

这里稍微给大家补充一下层流和湍流的概念，大家看看图中的蜡烛燃烧时烟气流动的现象，当然你们看到的蜡烛燃烧没有这么清晰，因为这是通过流动显示技术呈现出来的。



下部烟气流动看起来很规则，流体之间相互没有纠缠，是一层层分层流动，这就叫层流，是不是很好懂啊。

而上部流动看似一片混乱，流体内部相互纠缠，所以叫湍流也叫紊流。大家一看这么乱，就知道不是什么好东西，是吗？不，湍流可是有大用。

别看乱糟糟，却能给我们生活带来极大的方便，乱糟糟说明容易掺混，那么

流体中各种化学反应就能加快：

水里放点糖，搅合搅合就能快速溶解；热水通过搅拌就能快速变凉；这都是湍流为我们带来的好处。

不过啊，你们刚才怀疑也没有错，湍流也确实干些坏事，乱糟糟的会导致阻力大，会消耗更多的能量。主要原因是乱糟糟导致了湍流各方向脉动加强。

而由于高分子多数是线性的，在流动时会按流向排列，横向的脉动就得到抑制，流动没那么乱了，阻力就被减少了。

(4) 分子拉伸效应，高分子通过拉伸吸收涡旋的能量，然后又以切应波的形式释放，因而减阻。

(5) 转捩延迟理论，转捩指流动从层流向湍流过渡，牛顿流体管流转捩的临界雷诺数为 2300，就是说在雷诺数高于 2300 时，流动才由层流向湍流转变，阻力会增加。但是某些高分子溶液临界雷诺数能推迟到 4440 以后才转捩，因此阻力就会减小。

第四章 万能的伯努利原理

4.1 伯努利原理及其应用

同学们好,这次课我们来了解一下万能的伯努利原理,从圆月弯刀的香蕉球、到流速流量测试仪器、到船吸车吸效应、到叶轮机械的破坏、到几百吨的飞机飞上天空,都被伯努利原理掌控。

那么伯努利是个什么样的三头六臂啊。

神奇的伯努利家族

先了解一下伯努利家族。

伯努利家族 3 代人中有 8 位科学家,众多子孙中至少有一半是杰出人物。后裔有不少于 120 位在数学、科学、技术、工程乃至法律、管理、文学、艺术等方面享有名望。

这种家族的传承靠的是什么,榜样的力量和心理暗示是不可忽视的一个因素,一定还有别的值得我们学习和研究的地方。正如贝聿铭家族富过 15 代的传承,源于 30 字家训:“以产遗子孙不如以德遗子孙,以独有之产遗子孙不如以公有之产遗子孙”。这些都是值得推广和效法的。

另外再说说企业的传承,国外很多知名企业能够传承百年而且能做到全球化标准化流水作业,而我国有许多老字号其实只有其名而已,这是我们需要拿过来借鉴的,同时我们也要发扬我们民族的特色,比如道义、人性、丰富、多样化和灵活性等。

跨界高手-丹尼尔·伯努利



丹尼尔·伯努利，(Daniel Bernoulli 1700—1782)，瑞士物理学家、数学家、医学家。著名的伯努利家族中最杰出的一位。曾当选为柏林科学院院士、法国科学院院士和英国皇家学会会员。曾十次荣获法国科学院的年度奖。

难以想象：酷爱数学，喜欢物理，居然还是医学家，没见过这么跨界的。

丹尼尔父亲尼古拉·伯努利是数学家，为了发财的梦想让丹尼尔经商，可丹尼尔却一心喜欢数学，不料被父亲否决。

丹尼尔于是迂回学医并业余研究数学，结果 1725 年 25 岁时就应聘为圣彼得堡科学院的数学教授。

8 年后回到瑞士的巴塞尔，先任解剖学教授，后任动力学教授，1750 年成为物理学教授。

丹尼尔为了自己的梦想坚持不懈，客串在医学方面也取得了很好的成就，这些优秀品质值得我们仿效和学习。

1738 年，出版经典名著《流体动力学》，是历史上第一步流体力学专著。这曾是达芬奇曾经雄心勃勃的计划之一。

他的论著还涉及天文学、地球引力、潮汐、磁学，振动理论、船体航行的稳定和生理学等。丹尼尔的博学成为伯努利家族的代表。

我想，一个人能够在这个世界上留下一部传世之作，那是多么的荣耀啊。

立德、立功和立言在我国被称为三不朽，也是古圣先贤追求的目标。

希望同学们将来有也能有不朽传世，加油！

1727 年，20 岁的欧拉到圣彼得堡成为丹尼尔的助手，两人建立了深厚友谊。

丹尼尔和欧拉保持了近 40 年的学术通信，在科学史上留下一段佳话。

大名鼎鼎的欧拉与阿基米德、牛顿、高斯并列为数学史上的“四杰”，欧拉在伯努利影响下在理想流体动力学方面做出了重要贡献，提出了描述流体运动的欧拉法，建立了著名的流体力学质量守恒微分方程、动量守恒微分方程等。

所以啊，一位优秀的朋友是多么的重要，他能让你自己也变得优秀起来，当然你自己必须优秀至少也要想到成为优秀。

伯努利原理

1726 年，伯努利通过无数次实验发现，当流速加快时，流体中压力会减小，反之压力会增加。这就是伯努利原理。这哪是什么原理啊，不就一句话，流体流

速增加，流体压力减小，流体流速减小，流体压力就增加吗。这有什么了不起，难道里面深藏什么玄机。那当然，这里面玄机多了，我们一同去体验体验吧。

冲不走的乒乓球



请仔细观察动画，是不是觉得很奇怪啊，乒乓球为什么用水冲反而冲不走，冲走了还会被吸回来呢？

求助伯努利原理，水以一定速度射流而出，射流处空气压力会减小，环境大气会推着乒乓球跟着射流走。

这里乒乓球和气球也是这个道理，只不过由水射流换成了空气射流。

船吸效应

这里说说伯努利原理引起的海上航行事故，又叫船吸效应。

1911年9月20日，奥林匹克号离开南安普敦的海洋码头，开往纽约。在怀特岛东北海域，与皇家海军的霍克号巡洋舰相遇。两艘船靠拢到一起高速并行，导致霍克号的舰首戳进奥林匹克号的船尾。注意，奥林匹克号可是当年的泰坦尼克号的姊妹船，泰坦尼克号首行就因与冰山相撞而夭折，奥林匹克号虽然也命途多舛，但却在二战中立下了汗马功劳最后光荣退役。



2019年2月5日，一艘“提康德罗加”级巡洋舰和海军运补舰在补给操作过程中，两舰船尾相撞，所幸位置在水线以上，损坏也不严重。

军舰在海上补给有三种方式，纵向补给、横向补给和空中补给。横向补给由于两船并行导致船间水流加速，压力减小产生吸力，从而很容易发生碰撞。近年来，美军这样的事故频发。其他国家也要引以为戒。

车吸效应

除了船吸效应导致事故，车吸效应也会引发事故。当火车高速运行时，附近空气高速相对运动，产生较大的吸力。所以车站站台都有安全线，要求大家等车一定要站在安全线外。

而且在站外铁道更要远离火车，因为站外速度更快，吸力更大。

除了船吸效应、车吸效应还有纸吸效应、球吸效应等。怎么样，体会到伯努利原理的神奇之处了吧，要不为什么被称为万能的伯努利原理呢？下面来看看它怎么让那些伟大的球星们如何踢出飘忽不定的香蕉球的？

欣赏足球大师们的香蕉球

接下来看看香蕉球是怎么踢出来的。一会儿仔细观察当代球王梅西和C罗如何对决的。

视频先是梅西在左半场禁区前的任意球，梅西起左脚，用左脚背触球，力量由下向前上稍右，速度快，力度大，球在向前方稍稍靠右飞行同时向前向下旋转，球快速从球门边角进入球门，显然守门员速度没有跟上。



然后是C罗右半场禁区前任意球，C罗用的是右脚内侧轻触球，力量向上向右，速度和力度有所节制，恰到好处，球明显向右前方飞出同时向前向右旋转，

旋转面接近水平面，这种球容易让守门员产生错觉疏于防范，到门边后就来不及反应了。



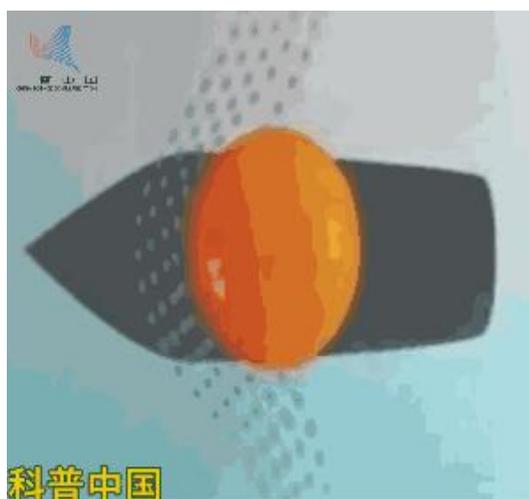
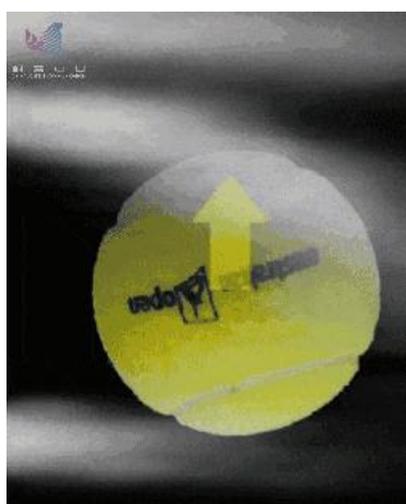
这种任意球反映了球员控球技巧和球感天赋，这是足球的艺术魅力之一，当然这是需要台下持久的刻苦训练。可以说：场上一脚球，场下十年功。

这两个球同学们看看是谁踢的，更体现出了足球的艺术水准，一个精心设置，出其不意，势不可挡，一个信手拈来，仿佛随意而为，但又防不胜防，都是任意球的极品。

伯努利原理详解香蕉球

同学们，看足球时，是不是常常惊叹于这些鬼斧神工的任意球是怎么踢的？自己经常在球场跃跃欲试，可那球就是不听使唤吧。

那么，注意了，掌握了伯努利原理，欣赏或者练习香蕉球您就心中有数了。



请看上图，上图就是模拟香蕉球在空中旋转飞行的样子，只不过这时，你不是在看台看足球，而是站在足球看世界了。

看到什么了，我晕啊，足球转个没完，能不能停下来啊。

还有啊，还有就是风很大，仿佛 10 级大风向我和足球刮来，我都快喘不过

气气来了。

对，看到那风在足球上怎么吹的，是对称流过的吗？

哦，看到了，是完全对称吹过来的，不过流到足球表面时不对称了，球在旋转，与风同向的那边风被加速了，与风反向的那一边风被减速了。

别忙，就这儿关键的地方来了，上伯努利原理：风快了，压力减小吧，风慢了，压力增大，所以球的两边压力不同产生了压差，球就会在原来运动方向上增加新的运动方向，从而变得捉摸不定。

看看图中黄色足球，上边界风速与球旋转方向相同被加速，压力减小，下边界风速与球旋转方向相反被减速，压力增大，因此新增一个向上的压力差。同理图中红色球会新增一个向左的压力差。

这好像没有那么灵活，这个地方我还要提醒您，灵活性完全来自对自旋转面的控制，不同的旋转面会产生不同的运动方向，而我们神奇脚几乎可以控制所有的旋转面。

伯努利原理教你学会香蕉球

下面来看看如何达到随心所欲。

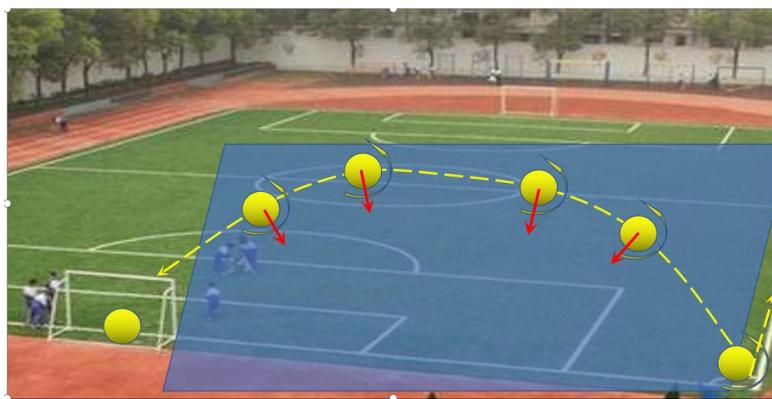


先仔细观看如何练习香蕉球的视频，然后我们再详细分析一下。这个来模拟一下底线角球射门，要将球按如图所示的线路射进球门，就是球在空中从球场里以抛物线方向飞进球门。

注意这个飞行必须让球始终受到一个红色箭头方向的受力，这个力随着行进方向在不断变化，所以只能通过如图所示的旋转方向来实现。

因为又要向里和向上飞行，所以旋转面必须是如蓝色平行四边形的倾斜面，

倾斜角度你可以根据情况确定，大点小点问题不大。



明白了这些，我们可以用右脚内侧触球，力的方向按黄色虚线箭头所示，这样球就会在倾斜面内按如图所示的旋转，根据您控制的力量大小或远一些或者近一些。

只要按此法反复练习，熟能生巧，时间长了，下一个任意球大师非你莫属，加油！

几点启示：

榜样的力量更多的是心理暗示，常常影响人的一身；

人一生能涉入许多学科领域，要从思想上接受它；

多与优秀者交流、共事，核心是学习优秀；

科学原理比技术具有更为广泛的应用。

4.2 伯努利原理的本质

大名鼎鼎的伯努利能量方程

伯努利原理实质是机械能守恒，即势能+动能=常数，当然这里势能要做一个拓展，包括压力势能和重力势能。

动能大家都熟悉吧，等于 $\mu^2/2$ ，就是二分之一质量 m 乘以速度 u 的平方。

重力势能同学们也都知道，等于 mgz ，即质量 m 乘以重力加速度 g 乘以高度 Z ，对吧。

压力势能可能大家不熟悉，但也很简单，等于压强 P 乘以体积 V ，您一下就会计算了。

所以，把这些代入即可得到“万能”的伯努利能量方程， $PV+mgz+\mu^2/2=\text{常数}$ 。引号中的万能只说明其应用很广。

根据这个能量方程，当流体流动高度不变时，重力势能 mgz 就不变对吧，也就是压力势能 PV +动能 $\mu^2/2=\text{常数}$ ，因而速度越快，动能越大，压力势能就越小了，如果体积 V 不变，那压力就减小了。

因此能量方程直接可以推出伯努利原理，漂亮吧，理论和实验完美结合。

有了伯努利原理和能量方程两把利器，你就可以行走天下了。

不过别急，出门前，为师还要送你几样宝贝，这就是通过魔法师变身后的伯努利方程。

如何变身呢，很简单，现在能量方程 $PV+mgz+\mu^2/2=\text{常数}$ ，您知道了吧。这是原始形式，即能量单位是焦耳。现在我们来魔术大变身，将能量由焦耳变成压强和水头形式。

第一步，原始形式除以体积 V 可得变身 1 压强的形式， $P+\rho gz+\rho u^2/2=\text{常数}$ ， ρ 为密度，常数除以 V 后成了新的常数。

第二步，原始形式除以重量 mg 可得变身 2 水头的形式， $P/\rho g+Z+u^2/2g=\text{常数}$ 。水头单位为米，它是什么意思呢？马上告诉大家。

注意了，同学们，不只是用焦耳才能表示能量，压强也可以用来表示能量，水头就是长度也可以用来表示能量，为什么啊，把上述方程看清楚了。

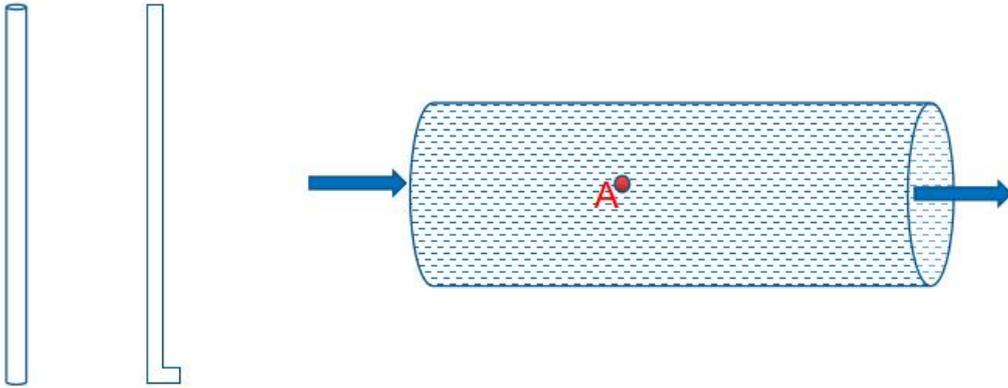
压强等于能量/体积 V ，实际上表示单位体积流体的能量；水头等于能量/重量，实际上表示单位重量流体的能量。

好了，拿好这两个宝贝，关键时刻它比原形还有用。

不过，你还是不能急着走，走之前，为师还得考考你，看看你会不会用啊。

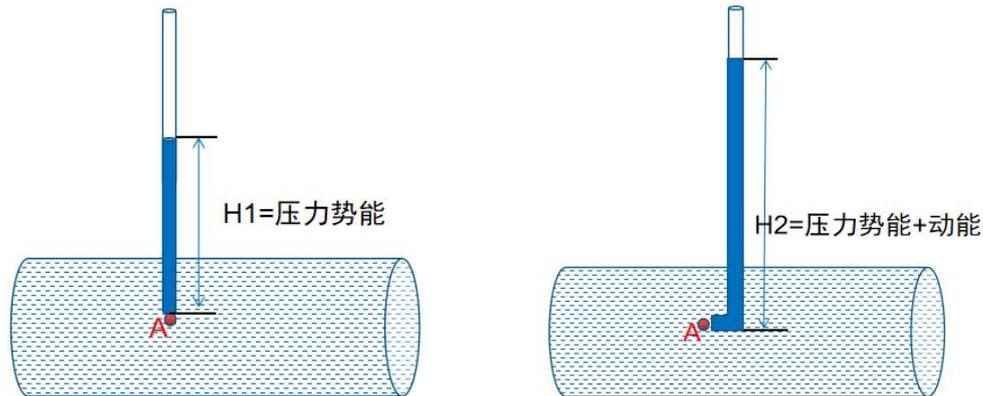
伯努利原理牛刀小试

考题：给你 1 根直玻璃管和 1 根玻璃弯管，请用它们测定管道中 A 点的流速？
(管道中流体从左向右流动。) 拿出你伯努利的利剑来一试身手吧。



怎么样，不会了吧。让我们来看看 17 世纪出生的皮托当时是怎么脑洞大开解决这个问题的。

第一步，如左图，皮托将直玻璃管垂直于水流插入管中，管口正好在 A 点，A 点的压力势能就会将水压入玻璃管。怎么只是压力势能，A 点重力势能呢？在玻璃管最低点不可能把水压入玻璃管，那么动能呢，因为水是水平流动，动能也不可能竖直冲击把水压入玻璃管，所以玻璃管中水的高度 $H_1 = \text{压力势能}$ ；



没错，继续。

第二步，皮托又将玻璃弯管如图放置，管口正好对着 A 点，注意与刚才不同了，刚才是在 A 点上方，现在是对着 A 点。

究竟有什么不同呢？现在液体高度增高了变成 H_2 了。为什么呢？同学们能想出来吗？

想出来了，好了，马上可以出徒了。是的，除了 A 点的压力势能外，还有动能，因为水流动直接撞击管口把水推得更高，所以玻璃管中水的高度 $H_2 = \text{压力势能} + \text{动能}$ ；

注意刚才第一步我们知道 $H_1 = \text{压力势能}$

第三步， $H_2 - H_1 = \text{动能}$ ，对吧。看水头形式的能量方程，动能对应的水头形式是不是应该等于 $u^2/2g$ 啊，代入即可求出流速 $u = \sqrt{2g(H_2 - H_1)}$ 。

很神奇吧，皮托用两根玻璃管，只是改变口子的放置方式，一根垂直水流，一根对着水流，最后就测出水中 A 点的流速了。

这就是皮托管测速方法，是法国数学家兼水力工程师皮托发明的，现在已经被广泛用于生活、实验室和工程中。但测速原理却是伯努利能量方程。

这多好啊，以后测速不用买测速仪了，拿两根不值钱的玻璃管或者透明塑料管搞定，谢谢皮托，谢谢伯努利！

掌握了这个法宝，再补赠你一件宝贝。

其实根据伯努利能量方程，还可以只用两根玻璃直管测出管道中的流量，这就是文丘里流量计，又一个工业神器。想想怎么测呢，也可以下去查阅相关流体力学书籍。

这下，武器有了，也会用了，您可以仗剑走天涯了，下一站去见识一下毕达哥拉斯杯吧。

4.2 公道杯之谜（虹吸效应）

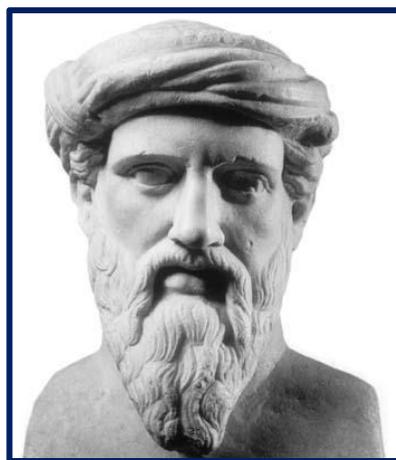
公道杯由来

公道杯又称毕达哥拉斯杯，相传毕达哥拉斯最早发现了此杯。但何为公道杯呢，其原理是什么呢？我们这次课来看看。



这就是公道杯，看完视频，是不是挺佩服毕达哥拉斯啊。那毕达哥拉斯是何许人呢？

毕达哥拉斯(Pythagoras, 572 BC—497 BC)，古希腊数学家、哲学家。毕达哥拉斯出生在爱琴海中的萨摩斯岛（今希腊东部小岛），曾在名师门下学习几何学、自然科学和哲学。



因为向往东方的智慧，经过万水千山来到巴比伦、印度和埃及（有争议），吸收了阿拉伯文明和印度文明。那个年代就开始出国留学且具有全球化视野，我们就更应该啊。

至理名言：万物皆数。毕达哥拉斯学派认为“1”是数的第一原则，万物之母，也是智慧；“2”是对立和否定的原则，是意见；“3”是万物的形体和形式；等等。意思数是万物的本源。

毕达哥拉斯杯，在中国又叫公道杯。同学们知道这公道杯名字的由来吗。

据说公道杯是明朝皇帝朱元璋给命的名。朱元璋建国后，为了犒赏大臣，专门在景德镇定制了一批酒具。

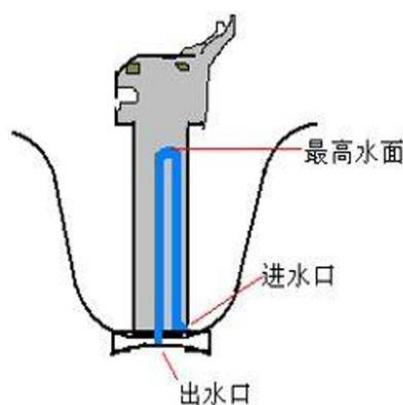
宴会上，朱皇帝命令给最大的功臣们把酒都倒满，其余的倒半杯。结果干杯的时候最大功臣们反而没有喝上一滴酒。

朱皇帝知道缘故后，非常难过，让重新换大杯斟满酒。但转念又哈哈一笑，说“知足者水存，贪心者水尽”，此杯甚为公道，故后人称为公道杯。意为谦受益，满招损。

故事不知道是真是假，但其寓意却很深刻。然而公道杯的玄机究竟在哪儿呢？

公道杯玄机-为什么水能够翻越高处流出？

公道杯玄机在哪儿？表面上怎么看也看不出来。那就只能学学达芬奇了，拿出手术刀，解剖它的内部结构。



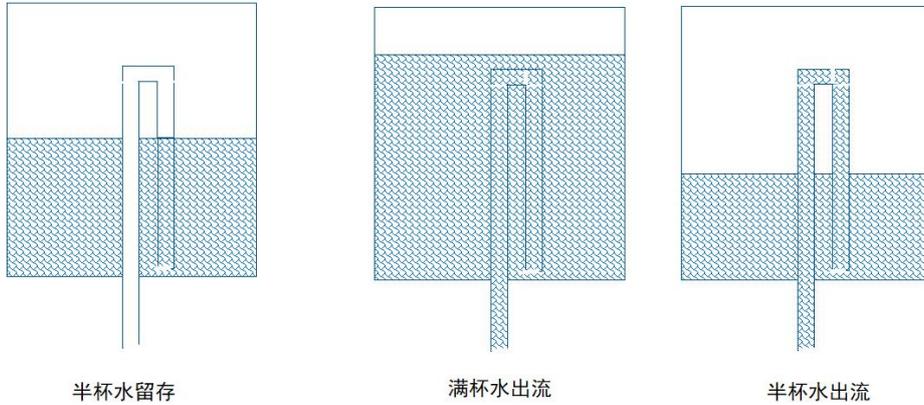
果然好办法，一览无余，其内部结构如右图所示，原来中间是一连通的弯曲通道，进水口隐藏在杯内最下端，出水口却在杯子外部最底端，难怪让人琢磨不透。我们来看看为什么半杯留存满杯流尽呢？

看左图，当在杯中倒上半杯水时，上升通道与杯中水面相平，而出水通道里没有水，所以倒半杯水无论如何也流不出来。这就是半杯留存的道理。

再看中间这个图，当倒入的水面超过上升通道的最高处时，水就开始进入出

水通道，从而水开始出流。

请看右边这个图，当水出流致容器内部水面低于上升通道最高处时，水还在出流，直到最后水被完全流尽。

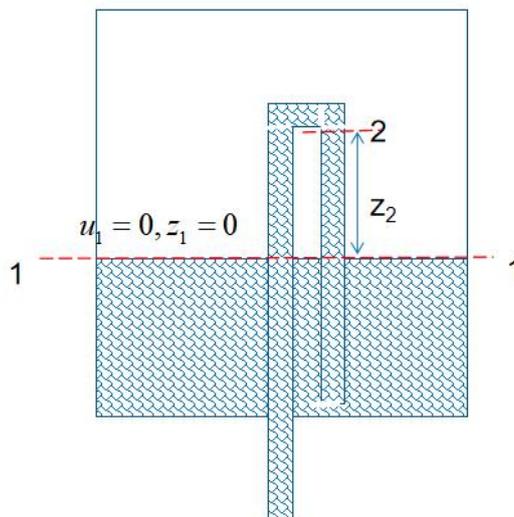


整个这个过程其实就是流体力学的虹吸效应。

看到这里，相信同学们心中一定有些疑问，为什么右边半杯水还能够出流？为什么水没有额外动力能够从低处流向高处？这是不是第一类永动机？

这个问题需要求助我们上次课的万能伯努利原理，其变身 1 压强形式是不是 $P + \rho gz + \rho u^2/2 = \text{常数}$ 啊，还有点印象吧。

咱们今天就拿伯努利原理变身 1 压强形式这把利器来破解这些疑问。其实啊，只要解决了水从低处爬向高处的动力来自哪里问题就全解决了。



好，如图，我们取容器水平面为 1-1 断面，取弯管最高处为 2-2 断面，流体是从 1-1 断面流向 2-2 断面，由于能量守恒，那么 1-1 断面的能量是不是就等于 2-2 断面的能量啊，那是当然。

刚才说了我们用压强形式，那就一定有 $P_1 + \rho g z_1 + \rho u_1^2/2 = P_2 + \rho g z_2 + \rho u_2^2/2$ 。
解一下这个方程，谜团就破解了。

分析一下：直接取 1-1 断面为参考面，1-1 断面的高度 $Z_1=0$ ，2-2 断面高度就是 Z_2 对吧；

然后是压强 P_1 等于多少啊，是不是等于大气压啊，没错；

1-1 断面的速度 u_1 等于多少呢，相比弯管而言，1-1 断面很大，所以 1-断面速度很小吧，对的，可以忽略，即 $u_1=0$ 。

好了，有了这些认识，能量方程左边是不是就剩 P_1 大气压了：所以有 $P_1 = P_2 + \rho g z_2 + \rho u_2^2/2$ ，移一下项 $P_2 = P_1 - (\rho g z_2 + \rho u_2^2/2)$ 。

到这里，同学们是不是就明白了啊， P_1 是大气压， P_2 是不是小于大气压啊。

当然啦，因为减掉的那部分是不是永远都是正的啊。

是不是爬高的动力就有了啊，是什么呢？

您看啊， P_2 小于大气压 P_1 表明是真空吧，也就是说 2-2 断面是真空，那么水是怎么上来的呢，当然是被真空吸上来的了。

而且 1-1 断面越靠下， Z_2 就越大，2 断面真空度就越大，所以吸力就越大。
伯努利真的太伟大了。

公道杯水何时能流尽伯努利管不管？

这个问题解决了，再赠送您一个问题。什么，不要，不要可以跳过去的。

我们所有的计算都是免费自由索取，不想要就跳过，我想谁也不想错过这样的好机会。

上面式子你能轻松的求出水流速度有多快。看看，怎么来求。

刚才第二个方程，单独拿出来，请看，是不是速度就求出来了。是的，将 P_2 ， $\rho g z_2$ 移到左边，两边再除以 ρ 乘以 2，再开平方根，就得到 2 断面的速度 u_2 了。

知道 u_2 当然就能算出流量了，也就能知道容器中的水多长时间能够放完了。是不是很强悍啊。

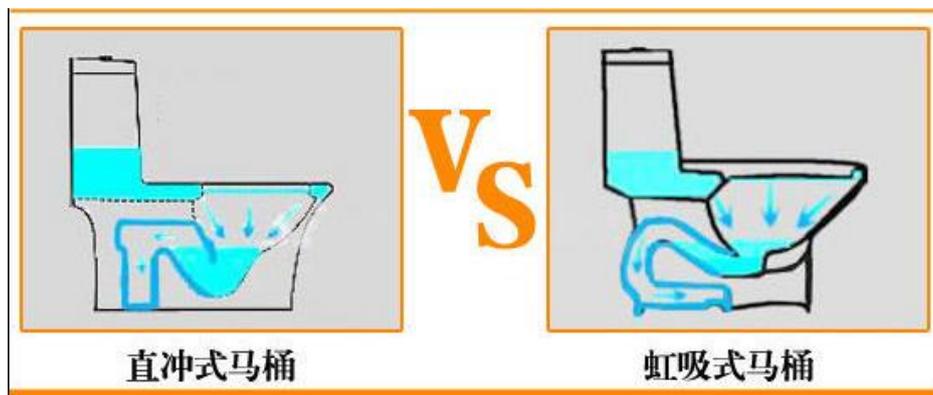
公道杯的妙用

公道杯就是利用的虹吸效应，来看看虹吸效应的应用。除了前面的公道杯，虹吸还有非常广泛的应用。图中给鱼换水就是利用虹吸效应。



注意，学了虹吸效应，给你们家换鱼缸里的水别再傻乎乎的一帮人抬着往出倒了。

马桶也用到了虹吸效应，而且虹吸马桶比直冲式马桶更好。同学们能够想出来好在哪儿吗？



对了，别看右图虹吸马桶下面装了一个弯弯曲曲的管道，冲完水以后水反而会流得一干二净。

同时也正是这弯弯曲曲的管道，还能防止臭味儿直接窜到马桶里。

最后，知道买马桶买什么样的了吧。



还有就是洗菜池的下水管，这曲里拐弯的水能排出去吗，设计者是不是有毛病啊。

学了虹吸就不该问这样傻傻的问题了，也别忘了还具有防臭功能。



不用消耗额外能量

这是利用虹吸现象的引水管道，可以不需要动力就从远处和高处取水，这不是最好的节能方式呀。

同学们，懂了虹吸，我们来问一个傻傻的问题。虹吸水能翻越高处流出，那么它究竟能够翻越多高，能不能无限高？要能无限高该多好啊。

这个问题，大家直接就能给出答案。

还记得前面的结论吗，虹吸能流向高处的动力是什么，是2断面高处的真空度产生的吸力吧。

对了，真空度最多为多少，是不是1个大气压啊，那1个大气压的真空空度是不是最多把水提高到10.33米高啊。如果再考虑真空下水气化，也就7到8米的高度。

这些都是可以根据万能的伯努利原理算出来的，有兴趣的你下去试试吧。

情景体验

学了虹吸，最后给大家出一个荒野求生的题目下去练习。



当你参加一个科考队，来到如图所示的大山脚下，要在这里驻扎一段时间，你的营地周围无饮用水。但有一条小路翻过山可以通往 800m 路程的水库，那里有甘甜的清泉，你们也没有任何取水用具和电动工具，只有用于实验的软管不缺，请用所学虹吸原理解决取水问题。详细写出如何实施？

4.4 赛车上了天花板

同学们，实际上啊，赛车上天花板和飞机在天上飞差不多是同一回事，注意是差不多，肯定还差点了。

所以我们首先来了解一下飞机是如何飞起来的？

冯卡门傻傻之问



这是空客 A380 的飞机参数，长度 73 米，翼展 79.8 米，高度 24.1 米，机翼面积 845 米^2 ，空机重量 280 吨，最大起飞重量 560 吨。看看，这么一个巨无霸，怎么能像鸟一样在天空自由飞翔呢？

这个问题曾经难倒了著名飞行动力学家冯卡门。



前面我们介绍过，冯卡门，美国航空航天之父，居然在年轻时问出了这么傻

傻的问题。

冯卡门，是 20 世纪最伟大的航天工程学家，被誉为“航空航天时代的科学奇才”，钱学森的导师。居然在年轻时问出了这么傻傻的问题。

然而同学们可不要小瞧这傻傻一问，正是这一问，成就了他空气动力学一身的辉煌。

百度百科载：莱特兄弟试飞成功的消息传到欧洲，法国掀起一股“飞行热”。1908 年的一天，冯·卡门亲眼目睹了亨利·法尔芒又一次打破飞行记录。飞行结束后，冯·卡门有过一段精彩的对话。

冯·卡门问法尔芒：“我是研究科学的。有一位伟大的科学家用他的定律证明了比空气重的东西是绝对飞不起来的，怎么……”。

法尔芒幽默地回答：“是那个研究苹果落地的人吗？幸好我没有读过他的书，不然，今天就不会得到这次飞行的奖金了。

我只是个画家、赛车手，现在又成了飞行员。至于飞机为什么会飞起来，不关我的事，您作为教授，应该研究它。祝您成功，再见！”

在回家的路上，冯·卡门坐在疾驶的车里久久地沉思。他对陪他一起来的一位记者说：“看来伟人的话也不一定都对。现在我终于决定我今后的一生该研究什么了。”

冯·卡门拉住记者的手伸出车窗外，立刻有一股风吹过手面，他说：“我要不惜一切努力去研究风以及在风中飞行的全部奥秘。总有一天我会向法尔芒讲清楚他的飞机为什么能上天的道理的。”

正是这次参观，也正是这傻傻一问，把冯·卡门引上了毕生从事航空航天空气动力学研究的道路。

机翼上的玄机

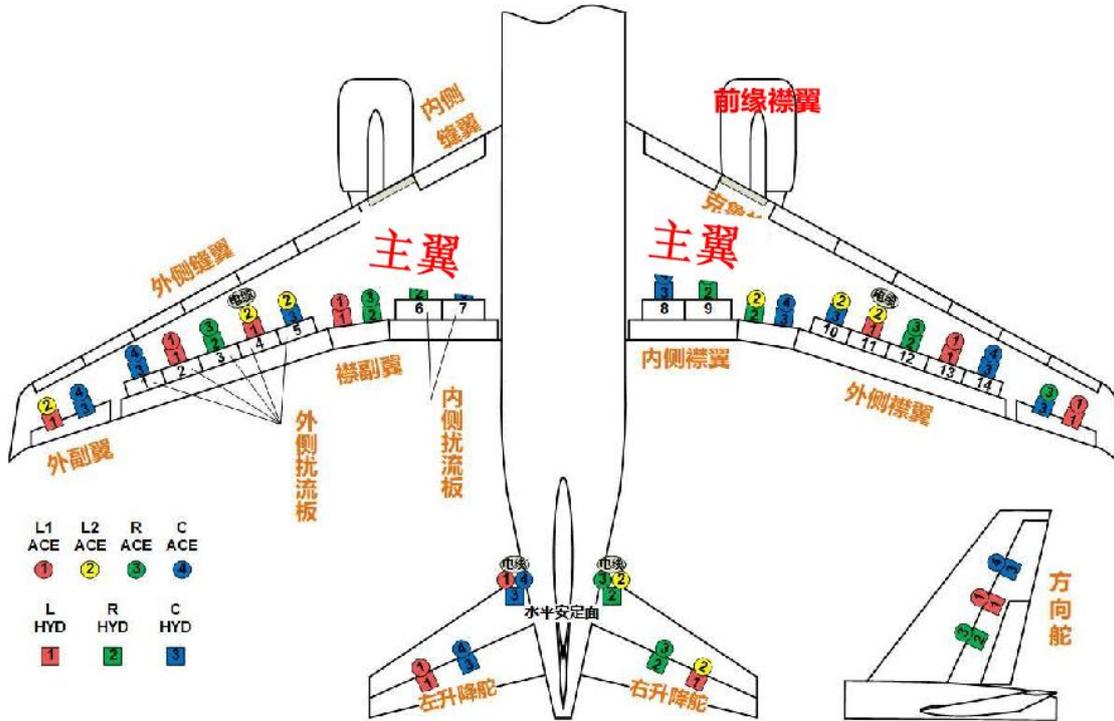
同学们来看看飞机如何起降的视频，尤其注意观察头部的抬升和机翼前缘后缘的变化，注意细节。

显然，飞机是从鸟儿那儿学会飞翔的，靠的都是翅膀，只不过飞机上叫机翼。是吗，就是看起来像两块薄铁皮的那个家伙吗。

是的，不过飞机机翼不是您看上去的那么简单，它有着特殊的形状和复杂的结构，一起来看看吧。

机翼组成

先看看您说的薄铁皮都有哪些部分构成的。机翼是由中央主翼、前缘缝翼和襟翼、后缘襟翼和副翼及扰流板构成。请大家在图中找到这些名称。

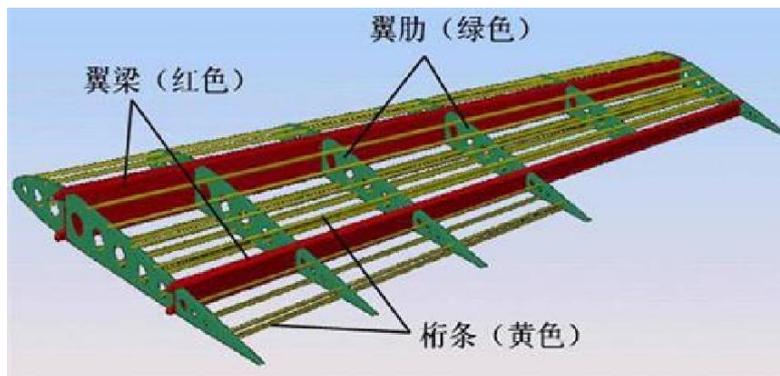


先看机翼前缘即图中机翼前端有内侧缝翼、外侧缝翼和前沿襟翼，是吧；再看机翼后缘即图中机翼后端有内侧襟翼、外侧襟翼、襟副翼和外副翼，看到了吧；

最后看看内侧外侧扰流板，能找到吧，在襟翼前端相邻处。

这些东西有什么用呢，把个飞机搞这么复杂。那当然大有用了，谁没事撑得啊。咱们先看整个机翼是如何产生升力的？

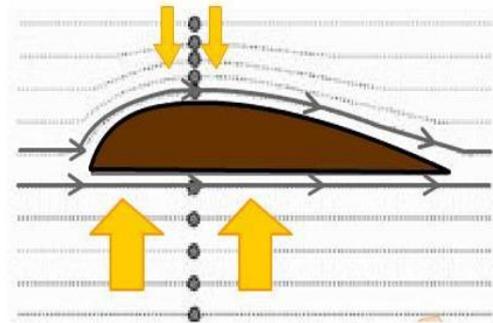
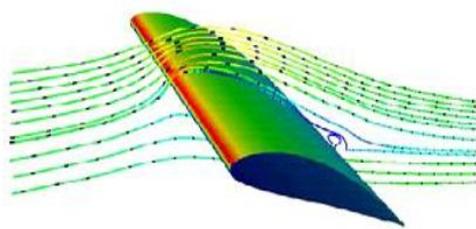
刚才只是机翼的外貌特征，现在学达芬奇对机翼进行解剖，就可发现机翼的内部结构。有绿色的翼肋、红色翼梁和黄色桁条构成。



注意看看绿色翼肋呈弓弦形状，实际上就是机翼横截面形状，是升力产生最关键的的地方。我们来看看。

机翼升力的产生

上图是风在机翼表面运动情况，风从机翼前缘分上下两股绕过机翼，在机翼后缘汇合，因为机翼上部形状凸起，显然相同时间内上面的风要走更远的距离，即上面风速要快于下面。万能的伯努利原理告诉我们，速度越快压力越小，即上部压力小于下部压力故产生了升力。



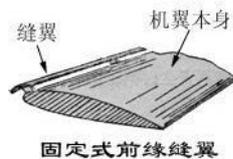
这个容易理解，因为前面达芬奇已经在 200 年前用它解释鸟为什么能够在空中飞翔了。

但同学们可能看出图中的问题了，机翼上面那个小箭头是否是真的朝下？这个我们后面要继续讲。

总之，就这样，靠着这弓弦截面的薄大机翼。飞机就上了天了。

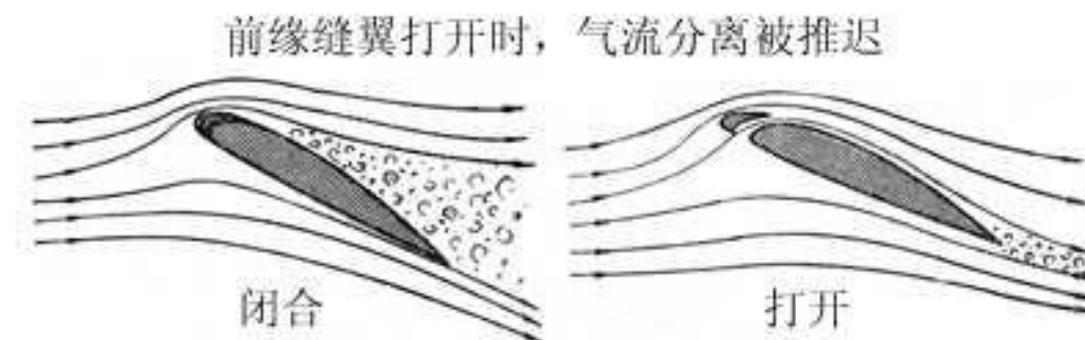
机翼上的小翼大用途

按理说，上了天就没有其它什么襟翼、缝翼、副翼等什么事儿了吧。不，恰恰相反，您在飞离地面后看到的那些机翼上的小动作全是这些小东西搞出来的。



请看上图中前缘缝翼，装在机翼前缘的活动翼面。打开时，向前推出与机翼形成一条缝隙，用于增加升力和阻力。一般在飞机起降时应用。

其原理见下图，起降时，前缘缝翼未打开，容易造成流线过早脱离飞机形成涡流致使升力下降。

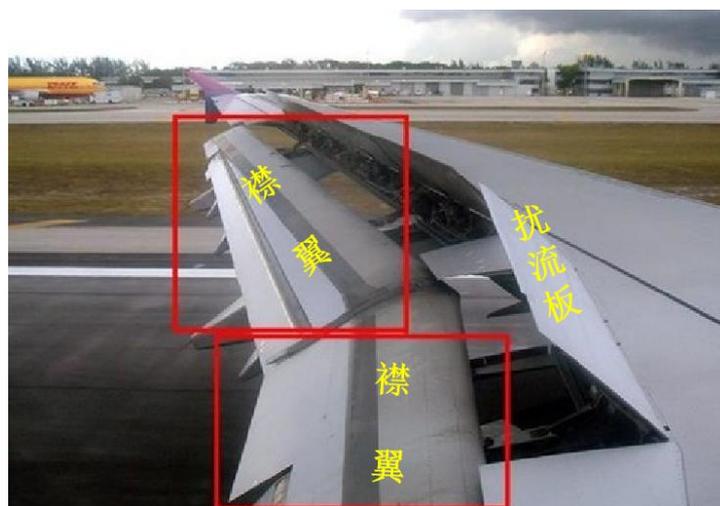


这时如果打开缝翼，一部分气流从缝中流到机翼上面把涡流推迟到机翼尾部从而增加升力。

其最终目的是为了保持飞机的流线型或者说流线始终贴着飞机流动。

再仔细看看襟翼、扰流板和主翼的关系。

这是降落后在跑道滑行的襟翼和扰流板，降落抬起的扰流板和放下的襟翼还没有收回。那它们又起什么作用呢？



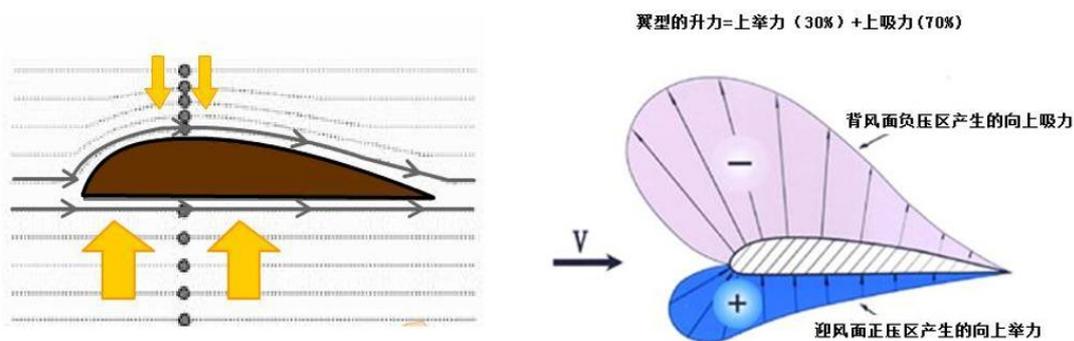
后缘襟翼是在机翼后缘安装的活动翼面，平时紧贴在机翼下表面上，起降时向后下方伸出。增大机翼面积而增加升力，飞机起降时用。

扰流板的作用增大阻力减小升力，所以在飞机降落时和着地后用于减缓飞机速度。

其它前缘襟翼主要是起降时增加升力，副翼是用于飞行过程飞机转向。

同学们，了解了这些后，我们再来看一遍飞机起飞降落高清视频，您就应该别有一番滋味了。

看视频时继续关注飞机头部抬升情况和机翼前后缘襟翼、缝翼和扰流板的变化。



了解了机翼，一起再来详细看看升力的产生情况，前面同学们看出左图上表面的压力可能不对。

确实，当流速加快压力减小后，实际上表面的压力应该小于大气压，为真空才对。因而应该在上表面不是箭头向下的压力而应该是箭头向上的吸力。

而右图的实测结果正是如此，上表面负压产生很大的吸力，下表面迎风产生向上的正压力。当然具体情况与飞机的攻角或者叫迎角有关。

攻角对升力的影响

攻角不同时升力会有很大差别，甚至还会产生负升力，也就是向下的升力，当然也就不叫升力了。

请问同学们，什么叫攻角啊？有兴趣的同学已经了解，非常好，要不说兴趣是最好的老师。

攻角就是气体来流方向与机翼弦线所夹的锐角，也叫迎角。

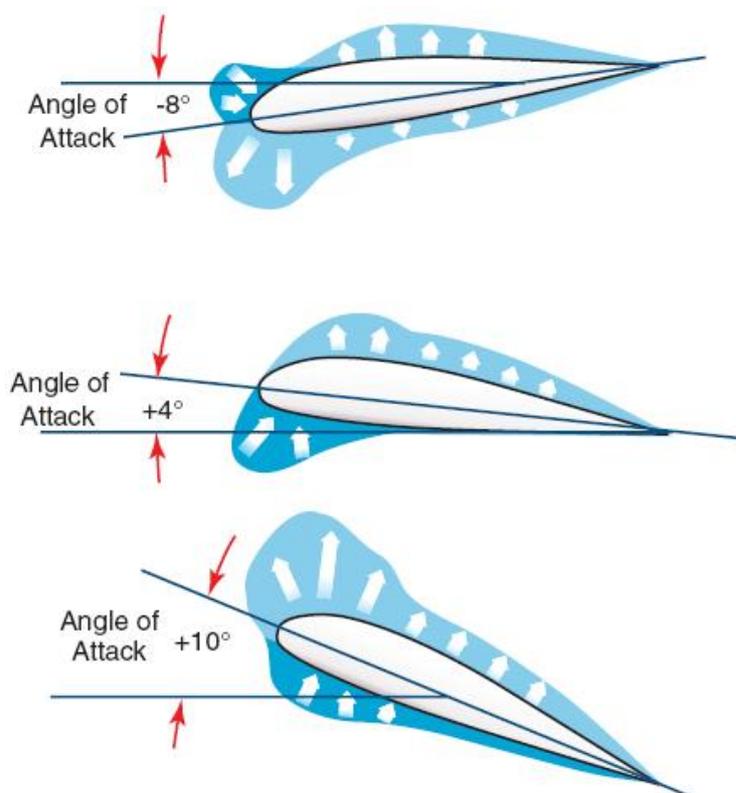
三个图是不同攻角下的压强分布图。

可以看出最上边攻角为负时，由于驻点移动到上表面，反而导致驻点分流后下表面产生吸力，即产生了负升力。所以飞机降落时先要低下头来就是这个道理。

下面两个图都是正攻角，且随着角度增大升力在增加。这就是飞机起飞时要昂着头的的原因。

不过攻角超过某个临界值后升力反而会降低，飞机不升反降，称为失速。这

些都是在操控飞机时必须注意的地方。



赛车究竟如何能上天花板

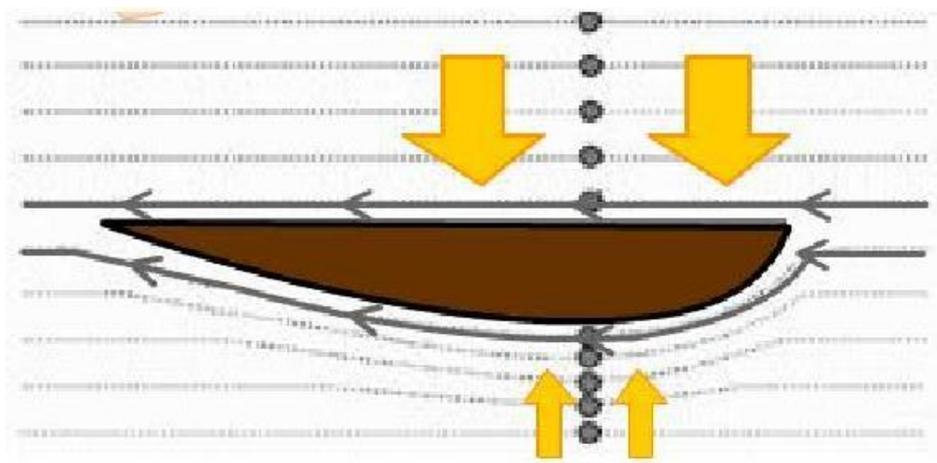


最开始我们说过赛车上天花板和飞机上天差不多，都是万能伯努利原理决定，但是又差点，差点是什么呢？

差点的是指飞机上天需要的是升力，而赛车上天花板不是升力而是抓地力，也可以叫负升力或者反向升力。它究竟是如何实现的呢？

同学们再回顾一下机翼升力产生的原因可能就找到答案了。

看一看下图，所以只需把机翼上下表面颠倒一下，升力就立刻反向了。而实际赛车的翼型正是如此。



这是法拉利 248f1 几层轻微的勺状前翼，正是颠倒过来的机翼形状，保证其在高速行驶下的抓地能力。



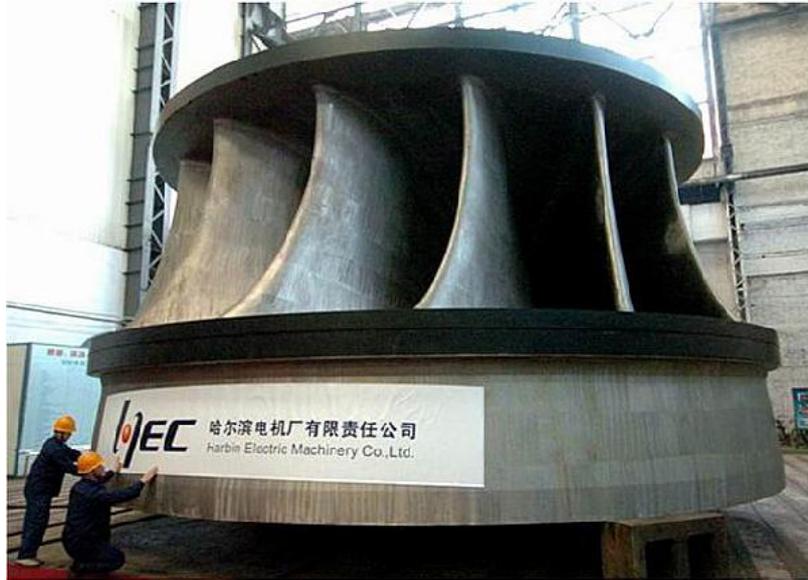
法拉利248f1前翼 法拉利在蒙扎保留了比雷诺更多的前部空气动力学部件，其中前翼主板近乎平直，中间只有轻微的勺状痕迹(下方的为土耳其站使用的版本)。在鼻锥上新增的小翼于将赛车前部的下压力向后转移。 ©/dando piron 2/11/13

当然，同学们也知道，所有赛车几乎都没有顶棚，这绝不是为了耍酷，其原因也是为了减小升力。

好了，理解了天花板上赛车的原理，请大家来欣赏视频：赛车上了天花板。

4.5 小小气泡撼动钢铁巨无霸

气泡的危害



同学们好，水中空化会形成大量气泡，气泡会对水中机械造成严重破坏，这个现象叫空蚀。空蚀能使很多巨型机械不堪一击，比如图中 450 吨的三峡大型水轮机照样被认怂，这究竟是因为什么呢？这次课我们来看看



离心泵空蚀



水轮机空蚀



水轮机磨蚀

首先来看看空蚀的危害，空蚀对水力机械表面危害非常大和非常普遍。左图是离心泵空蚀，红色箭头部分的凹坑是由气泡溃灭引起，绿色圆圈部分是溃灭过程形成的冲击波引起。

中图水轮机被严重空蚀，已经报废了，足见空蚀危害之严重。

这是一首舰船在一次穿越大西洋后，螺旋桨被空蚀后的结果。

右图水轮机磨损，呈现鱼鳞状金属光泽，磨损一般机械某部位整体被磨耗，表面较平滑。

右图水轮机械表面颜色发生改变，同时呈现大小形状各异的凹坑和锯齿状破坏，称为磨蚀，是空蚀和冲蚀甚至可能还有腐蚀产生的。

因此空蚀经常对水力械造成巨大破坏，并且引发机械和厂房噪音，轻则降低设备性能和效率，重则引发事故，对国民经济造成巨大损失和给人民生活带来极大的不便。

接下来我们去认识认识什么是空化和空蚀。

空化及其成因

同学们，什么是空化呢？空化一般指流体中，由于压力变化产生气泡的生成、发展和溃灭过程。

我们知道液体中气泡产生需要两个条件：一是压力足够低，越接近流体饱和蒸气压，越容易空化；二是流体内有微气泡空化核。

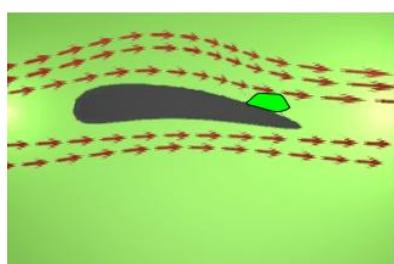


左图是螺旋桨在水下旋转时产生游离性气泡，指气泡脱离浆叶进入水体，同时部分气泡从旋转叶片尖端甩出呈螺旋状运动，这叫漩涡型兼游离性空化。

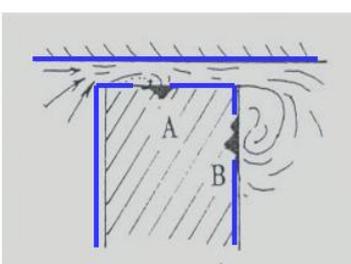
右图是在固体壁面产生大量附着性气泡，称为附着性空化。

这里几种情况是由于固壁形状变化导致流速加快，从而产生低压区形成空化。

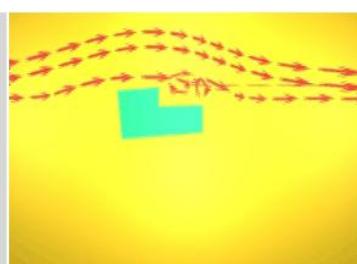
这仍然是万能伯努利原理决定的，所以伯努利原理也不是都干好事，科学是双刃剑，用时要当心了，要用它造福人类而不是毁灭人类。



翼型绕流



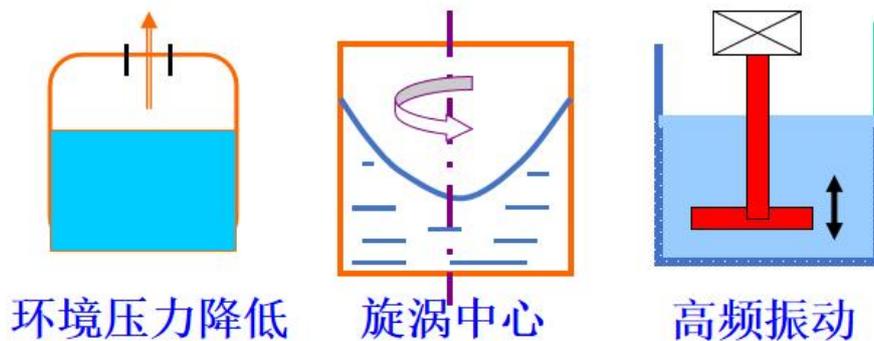
狭小间隙



局部脱流

图中三种情况，左图翼型上部流速会加快、中间图由于流体流过狭缝被加速（注意此处用到达芬奇提出的流量守恒定律还记得吧，越窄处流速越快，严格说是针对不可压流体）、右图因为流体从固壁分离导致尾流漩涡处压力降低。

刚才这是由于流速加快导致的压力降低，有些时候也会由于其他原因致使压力降低形成空化。



比如左图中如果环境压力降低，液体也会快速气化甚至发生沸腾形成空化。

另外中间图流体漩涡中心通常由于旋转离心力作用形成中心低压区。

还有像右图那样的机械上下高频振动也会形成低压区。

什么是空蚀

当空化发生在固体表面及其附近，会使材料受到破坏。这种由空化引起材料破坏的现象，称为空蚀。

空蚀与空化的主要区别是空化不一定导致材料破坏，而空蚀一定破坏了材料。

空蚀能够使各种固体受到损害。

所有金属，不论是软的硬的，脆性的延展性的，在化学上是活泼的惰性的，都有遭受过空蚀破坏的实例。

空蚀危害很大，那么空化过程究竟怎么产生空蚀的呢？下面我们看看空蚀机理。

空蚀机理

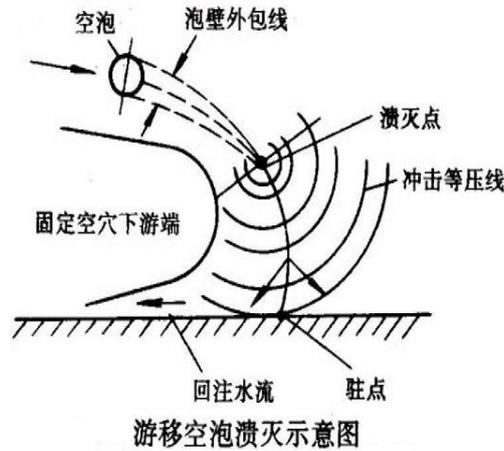
空蚀机理包括机械破坏作用、化学破坏作用和热力融化等，主要为机械破坏。

那么什么是机械破坏呢？

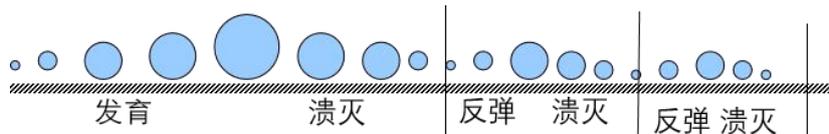
空泡溃灭时，强大的冲击压直接作用于过流表面，形成机械破坏作用。而且长期反复的机械破坏会形成疲劳破坏。

机械破坏可以分为两种作用方式：冲击压力波模式和微射流模式。

(1) 冲击压力波模式：如图所示，空泡溃灭时，溃灭点辐射出来的冲击压力波可达几十甚至几百个大气压，从而产生空蚀，破坏水力机械。

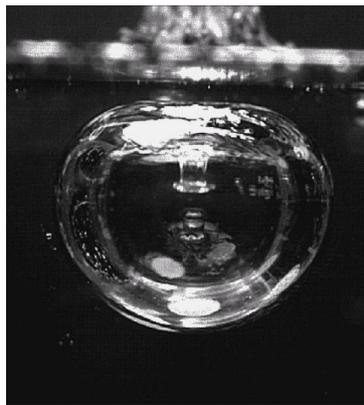


空泡溃灭的过程往往周期性发作。空泡一个周期经过产生、发育和溃灭，正如人的生老病死。



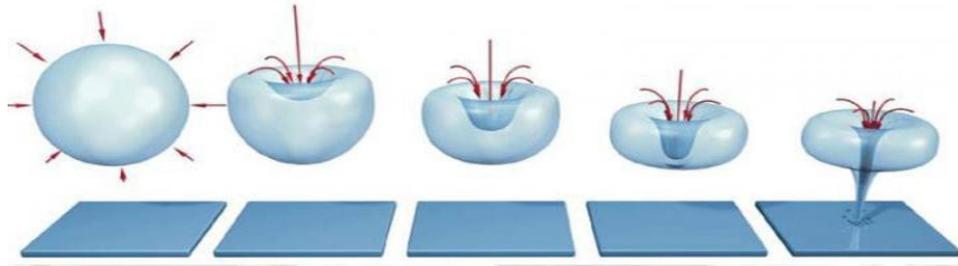
不过空泡溃灭后，会不断反弹，即再生长、发育和溃灭。这导致破坏会更加严重。

(2) 微射流模式：空泡溃灭时形成微射流造成空蚀。



动画可以看出，空泡溃灭前首先发生变形，变形导致了速度很大的微型射流的形成，显然气泡破灭时和高速微射流都会继续形成空化。

变形程度随压力梯度的增加和距壁面距离的减少而增大，所以在固体壁面更容易引发气泡变形形成微射流。



这个图更清楚的再现微射流形成过程，从顶部变形凹陷到凹陷加深、气泡变扁到最后破裂形成微射流。

微型射流速度可以很高，通常可达 100—300m/s。

学者库克对该射流产生的射流冲击压力进行了估算（水）： $p=1.4VMPa$ （ V —射流速度），若 $V=200m/s \Rightarrow p=280MPa$ 。

该脉冲压力足以破坏材料的晶粒，同时也导致材料的疲劳破坏。

（3）化学破坏作用：通过化学应对水力机械产生破坏。包括电化学作用和氧化腐蚀。

气泡使金属材料表面局部出现高温是发生化学作用的主要原因。高温可以产生氧化腐蚀和热电化学腐蚀。

高温产生原因可能是气泡在高压区被压缩后，汽相高速凝结，从而放出大量的热，或者是由于高速射流撞击过流部件表面而释放出的热量。

高温下还会导致（3）热力融化破坏作用，即高温使材料表面融化造成破坏。

然而，根据对汽蚀现象的观测，空化和空蚀破坏主要是机械破坏，化学和电化作用是次要的。化学和电化的腐蚀加速了机械破坏过程。

空蚀的防护

最后看看空蚀如何防护。因为空蚀是由空化引起，首先减少气泡生成，可以通过以下两方面：

（1）设计加工精良机械：设计合适的水力机械形状，减少翼型加速，同时设计机械为流线型形状减少尾流空化，还有表面加工平整，不要出现凹槽和凸起的形状，避免加速和尾流空化。

（2）降低安装高度和阻力，可以减小机械内部真空度，从而减小空化。

（3）通过表面涂层增加材料抗空蚀性能目前已经被普遍应用。如图所示，可以在水力机械表面涂环氧金刚砂、聚氨脂橡胶以及纳米材料等等。



环氧金刚砂



聚氨脂橡胶



纳米高硬度碳化钨粉末

同学们，这下知道为什么小小气泡撼动巨型钢铁机械了吧。空化形成的小小气泡，溃灭时形成的高压冲击波和高速微射流，可以破坏任何金属。到此万能的伯努利原理就要给您说再见了，希望同学们还能在闲暇之余、生活中、工作时偶尔想想他的好和不好，关键时刻他会助您一臂之力。