

从式 (10) 我们可以推出圆轴扭转时的情况, 即当  $a = b = r = \frac{d}{2}$  时

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xz} &= -G\theta y, \quad \tau_{yz} = G\theta x \\ \tau &= \sqrt{\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2} = \frac{16M_t}{\pi d^3} \\ \theta &= \frac{32M_t}{\pi Gd^4} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

这便是我们材料力学中至今沿用的切应力公式. 圣维南得出的扭转在实际应用中应用的精确解的研究报告最终全面地解决了各种截面的扭转转角和切应力问题.

#### 4 21 世纪扭转问题的研究

21 世纪中继续进行着圣维南关于悬臂梁受扭的研究, 并找出几种新截面形状的精确解. 在弯曲问题上, 采用非对称截面确定出不会产生扭转作用的弯曲载荷的作用点. 在半圆形和等边三角形的截面中, 只要将载荷由形心偏移稍许距离便能消除扭矩. 梅拉特 (R. Maillart) 阐明了在薄壁截面内, 这种偏移可以更大些, 并提出了剪切中心这个概念以及求这个方法, 于是它具有了更大的现实意义了.

同时, 关于扭转的端部不能使用圣维南原理的问题, 铁木辛柯通过研究工字钢发现要想得出满意的扭转角数值, 除了要考虑圣维南的扭曲应力外, 还要考虑翼缘的弯曲应力, 而翼缘的弯曲不是局部性的, 并经实验证明其结果和理论值

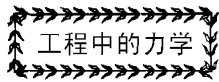
相符. 韦伯 (C. Weber) 在研究槽型截面受扭中以及弗拉索夫 (B. З. Власов) 在他的开口薄壁截面受扭的一般性讨论中都得出了同样的结论. 而穆斯雷里施维里则用复变函数求解圣维南问题, 阐明了几种新截面形状的解析式和由两种不同材料构成的杆件的受扭情况.

此外, 米歇尔和虎勃各自都指出了应力分布可以只用一个应力函数来确定, 并得出了圆锥杆的应力函数. 在具有椭圆体、双曲线体以及旋转抛物线体的各种形状的轴杆中都可以使用同一种方法求解. 仑治提供了一个近似法来计算连接两不同直径的圆柱形杆的小嵌缝处的局部应力.

纵观扭转理论的发展不难发现每一次扭转理论都是在弹性理论的发展促进和实验的检验中得到新进展的. 同样, 正是由于实验研究和弹性理论的并行发展才使得材料力学中的其他问题得以迅速解决的.

#### 参 考 文 献

- 1 铁木辛柯著. 常振铎译. 材料力学史. 上海: 上海科技出版社, 1961
- 2 武际可. 力学史. 重庆: 重庆出版社, 1990
- 3 老亮. 材料力学史漫话. 北京: 高等教育出版社, 1993
- 4 武际可. 科学实验与力学 —— 力学史杂谈之十六. 力学与实践, 2004, 26(2): 78~80
- 5 李欣业, 梁建术, 郝淑英. 材料力学. 北京: 中国铁道出版社, 2006



工程中的力学

## 浅谈都江堰工程中流体力学原理的运用

刘玉泉 朱克勤<sup>1)</sup>

(清华大学航天航空学院, 北京 100084)

**摘要** 分析都江堰工程中 3 大主要设施 (鱼嘴、飞砂堰、宝瓶口) 的 3 大功能 (分水、排砂、引水) 中涉及到的流体力学原理.

**关键词** 都江堰工程, 流体力学

现今 700 余处世界文化遗产中惟一以水利为主题的都江堰, 自兴建以来已逾两千载, 经久不衰, 将四川造就为“水旱从人、不知饥馑、时无荒年”的“天府之国”. 作为世界 4 大文明发祥地中借助灌溉发展起来的硕果仅存的大型水利工程, 都江堰的存在已远远超越了工程技术本身, 而是中华民族智慧与文化的结晶.

作为世界文化遗产和无坝引水的宏大水利工程, 都江堰的成就与影响体现在诸多方面, 这里仅从流体力学的角度窥

视都江堰工程的伟大之处.

### 1 都江堰工程简介

都江堰水利工程位于成都平原扇形三角洲顶部、四川都江堰市 (原灌县) 附近的岷江干流上, 是战国时期蜀郡守李冰在公元前 256-251 年间率领劳动人民修建的. 渠首枢纽的主要工程设施包括: 百丈堤、都江堰鱼嘴、金刚堤、飞砂堰、人字堤和宝瓶口等, 其作用为分水、泄洪、排砂、引水和护岸. 图 1 为渠首工程的示意图.

在以上设施中, 鱼嘴、飞砂堰、宝瓶口为 3 大主要设施, 有“都江堰 3 大件”之称. 它们充分利用了流体力学的原理, 将都江堰的引水、分洪、排砂功能有机地结合在一起. 下面对它们作详细介绍.

本文于 2008-05-26 收到.

1) E-mail: zhukq@mail.tsinghua.edu.cn

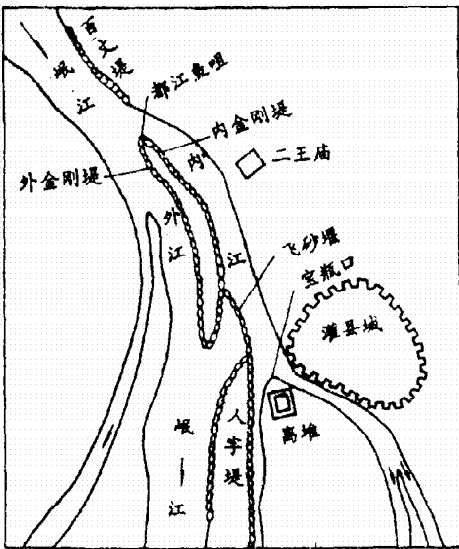
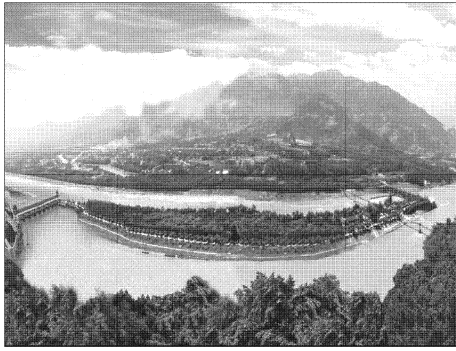


图 1 都江堰渠首工程示意图 [1]

### 2 鱼嘴 —— 分水堤

“鱼嘴”是都江堰的分水工程，因形如鱼嘴而得名。它昂首于岷江干流江心洲上，起第一级分水排砂作用。它把岷江分成内外二江。西边叫外江，俗称“金马河”，是岷江正流，用于泄洪输砂；东边沿山脚的叫内江，将岷江部分水量引导到地势较高的宝瓶口，用于灌溉。

李冰的治水三字经有云：“分四六，平潦旱”，这是指鱼嘴的功用。在枯水季节，鱼嘴将六成的水量引入内江，以满足下游灌区用水需要，仅将四成的水量排到外江；而在洪水季节，鱼嘴使岷江六成的水量进入外江，内江仅引进四成的水量。

从流体力学的观点来看，“鱼嘴分四六”的原理由两个因素决定：主流线位置和过水断面面积。

主流线是河流沿程各横断面中最大垂线平均流速所在点的连线，反映了水流最大动量的所在。都江堰所在河段为天然弯道，主流线的位置随流量的变化而异，具有“低水傍岸，高水居中”<sup>[2]</sup>的特点。

内江位于凹岸一侧，外江位于凸岸一侧，且凹岸一侧河床较深，这使得水位不同时，内外江的过水断面面积关系发生变化。

综合以上两点，我们做以下分析：枯水季节时，水的流

速慢，惯性作用弱，主流线曲率大，主流靠近凹岸，加上内江过水断面大于外江，因此在鱼嘴作用下，大部分水量流入内江(图 2)；洪水季节时，水的流速快，惯性作用强，主流离开凹岸，居于河道中间，加上此时外江过水断面大于内江，因此鱼嘴将大部分水量送入外江(图 2)。

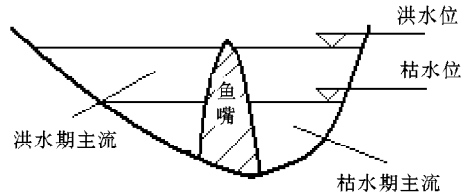


图 2 “鱼嘴分四六”原理示意图

综上所述，只要选定鱼嘴的适当位置，就可以按照需要调节内外江分水的比例。

### 3 飞砂堰 —— 泄洪道

“飞砂堰”的命名源自其显著的泄洪排砂功能。飞砂堰是都江堰 3 大件之一，看上去十分平凡，其实它的功用非常大，可以说是确保成都平原不受水灾的关键要害。

枯水季节时，飞砂堰阻挡内江水流入外江，将其引入宝瓶口；洪水季节时，内江多余的水越过飞砂堰流入外江；如遇特大洪水，它还会自行溃堤，让大量江水回归岷江正流。

而飞砂堰更重要的功用是“飞砂”。岷江从万山丛中急驰而来，挟着大量泥沙、石块，飞砂堰将其大部分引入外江，保证了宝瓶口和灌区的河道畅通。

解释“飞砂”的原理需要先理解“弯道螺旋流”的形成。“弯道螺旋流”是指河流流经弯道时产生的横向环流，这是由横向力的合力矩造成的。单位体积水流流经弯道所受离心力为

$$f_1 = \rho u^2 / r \tag{1}$$

其中  $\rho$ ,  $u$ ,  $r$  依次为水流密度、流向速度分量和河道曲率半径。

由于离心力的存在，水面平衡状态受到破坏，使得凹岸水面升高，凸岸水面降低，产生水面横比降  $J_r$  和侧压力  $f_2$ 。考虑二维定常流，取曲率半径  $r$  处单位底面积、高为  $h$  的微小水柱，分析其横向受力情况，可得  $J_r$  和  $f_2$  表达式如下<sup>[3]</sup>

$$J_r = \alpha_0 \frac{V_{cp}^2}{gr} + \frac{\tau_{r0}}{\rho gh} \tag{2}$$

$$f_2 = \rho g J_r \tag{3}$$

其中  $V_{cp}$  为纵向平均流速， $\alpha_0$  为流速分布系数，可由纵向流速分布求得， $\tau_{r0}$  为河底横向阻力。

对于一般河道，式(2)中  $\tau_{r0}/\rho gh$  相对  $\alpha_0 V_{cp}^2/gr$  可忽略，故式(2)可简化为

$$J_r = \alpha_0 \frac{V_{cp}^2}{gr} \tag{4}$$

由式(3), (4)可知，侧压力  $f_2$  纵向分布均匀，指向凸岸；而  $u$  纵向分布的不均匀导致离心力  $f_1$  由底层向表层逐渐增

大, 指向凹岸.  $f_1$  与  $f_2$  的共同作用在河流横断面内产生一个合力矩 (图 3).

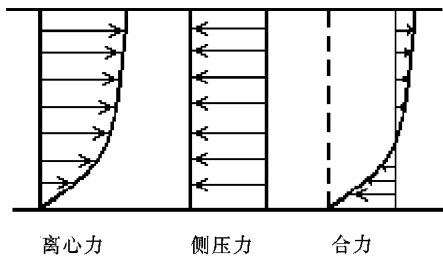


图 3 水流所受横向力示意图

在力矩作用下, 河流在向前流动的同时伴随有横向环流, 即“弯道螺旋流”. 横向环流将泥沙石块由凹岸带向凸岸 (图 4).

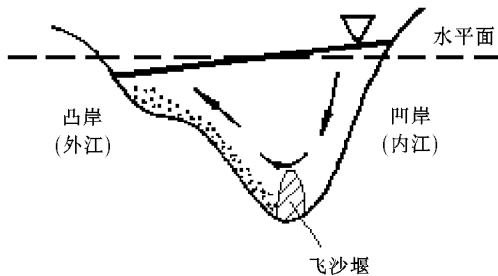


图 4 飞砂堰“飞砂”原理示意图

严格来说, 水流所受的横向力除了离心力  $f_1$  和侧压力  $f_2$  以外, 还有受地球自转影响而产生的科氏力  $f_3$ , 表达式为

$$f_3 = 2\rho\omega_0 u \sin \beta_0 \tag{5}$$

其中  $\omega_0, \beta_0$  分别表示地球自转角速度和河道所处纬度, 它产生附加的水面横比降表达式如下

$$J'_r = -\frac{2\alpha_0\omega_0 V_{cp}}{g} \sin \beta_0 \tag{6}$$

这里的负号是由于科氏力指向凸岸, 与离心力相反, 因此产生的水面横比降符号也相反.

科氏力在平直和弯曲河道中都会产生水面横比降, 进而产生横向环流. 而通过下面的量级分析可知, 在都江堰处弯曲河道中, 科氏力的影响相对离心力可忽略. 都江堰河道的曲率半径约为 800 m, 水流密度  $\rho \sim 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 代入式 (1) 有

$$f_1 \sim u^2 \tag{7}$$

而都江堰处纬度约为  $31^\circ$ ,  $\omega_0 \sim 10^{-4} \text{ rad/s}$ , 代入式 (5) 有

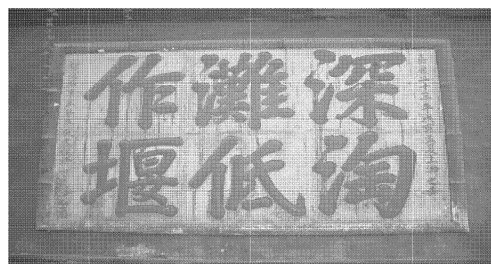
$$f_3 \sim 10^{-1}u \tag{8}$$

根据式 (7), (8), 都江堰枯水季节时  $u \sim 1 \text{ m/s}$ , 有  $f_1 \sim 10f_3$ ; 洪水季节时  $u \sim 10^2 \text{ m/s}$ , 有  $f_1 \sim 10^3f_3$ . 因此考虑弯道螺旋流时, 可以忽略科氏力.

李冰的治水三字经有云: “深淘滩, 低作堰”, 这里“低作堰”旨在说明飞砂堰高度的选取很重要. 从引水的角度, 飞砂堰不能过低, 否则宝瓶口的引水量无法满足灌溉要求; 而从排砂的角度, 飞砂堰也不能过高, 否则环流无法形成, 泥沙无法越过飞砂堰 (图 4). 选择适宜的堰顶高度, 才能协调引水与排砂的矛盾. 近代的经验一般规定, 飞砂堰堰顶高程只需高出河床 2 m 左右.

### 4 宝瓶口 - 引水口

宝瓶口起“节制闸”作用, 能自动控制内江进水量, 是前山 (今名灌口山、玉垒山) 伸向岷江的长脊上凿开的一个口子. 它是人工凿成控制内江进水的咽喉, 因它形似瓶口而功能奇特, 故名宝瓶口.



合理安排宝瓶口与飞砂堰的位置, 即可实现都江堰第二级分水排砂的功能. 在重力作用下, 表层水流含泥沙较少, 底层水流含泥沙较多; 而在横向环流作用下, 表层水流流向凹岸, 底层水流流向凸岸 (图 5). 处于凹岸的宝瓶口正对表层水流, 以“正面取水”之势将较清澈的河水引到下游进行灌溉; 而处于凸岸的飞砂堰正对底层水流, 以“侧面排砂”之势将较浑浊的河水引入外江.

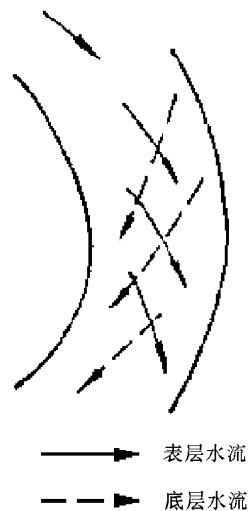


图 5 河流弯道处表层与底层水流流向示意图

### 5 结 语

为了说明清晰起见, 前文将分水、排砂、引水 3 大功能分开对应鱼嘴、飞砂堰、宝瓶口 3 大设施进行陈述, 实际上, 这 3 大功能在时间和空间上都是统一的. 鱼嘴除了分水, 也

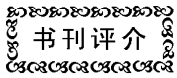
因弯道螺旋流作用而使表层含砂少的水流入内江，底层含砂多的水流入外江；而飞砂堰与宝瓶口除了排砂引水，其位置的设定也有同于鱼嘴的分水作用。然而在现代水利工程中，为解决这相互对立、相互影响的 3 大功能，大多采用设置引水闸、分洪闸和冲砂闸的方法，在时间和空间上分开控制。相比之下，两级分水排砂、无坝引水的都江堰工程，延续大禹治水的思想，因地制宜，因势利导，确为古今中外水利工程中的奇葩。

更为可贵的是，古人在完全没有流体力学系统知识的状况下，通过实地考察和经验累积，从河水流动的整体出发，重自然调节而非人工控制，以简单应对复杂，使得不同功能

间的矛盾在水沙运动中得到平衡和统一。都江堰工程中所蕴涵的朴素而深刻的中国式智慧，永远值得我们中国人传承和发扬！

### 参 考 文 献

- 1 胡振鹏. 都江堰工程分水排沙的系统科学原理初探. 南昌大学学报 (工科版), 1991 (2)
- 2 长沙水利电力学院“河流泥沙工程学”编写组. 河流泥沙工程学 (上册). 北京: 水利电力出版社, 1983
- 3 张红武, 吕昕. 弯道水力学. 北京: 中国水利电力出版社, 1993
- 4 谭徐明. 都江堰史. 北京: 科学出版社, 2004



### 书刊评介

## 大众力学丛书《创建飞机生命密码》

### 序 言

戴世强<sup>1)</sup>

(上海大学, 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

当我们看到飞机翱翔在蓝天时, 心里会升起种种疑问: 这样的庞然大物是怎样上天的? 它们为什么能在乱云飞渡之中平稳飞行? 它们为什么能高速驰骋于万里云天? 它们为什么在频繁的起降运行中不散架子? ……如果把飞机比作人, 我们会问: 它们为什么有如此俊俏的外貌? 为什么它们多姿多彩、神态各异? 它们有什么样的皮肤和骨架? 它们的心脏(发动机)为什么如此强有力? 飞机的长寿秘诀在哪里? 总而言之, 创建飞机生命的密码何在? 科学家和工程师们为此付出了多少艰辛的劳动? 力学在创建飞机生命的密码发挥了多大的作用?

翻开这本薄薄的书吧! 我们可以从中轻松地得到上面这些问题的答案。

《创建飞机生命密码》是一本有趣的力学科普读物。与常见的科普书不同, 作者虚构了两个人物——虚心好学的大学剑青和充满好奇心的中学生夏雯, 为了探寻航空的奥秘, 他们认真读书, 四处求教, 深入思考, 逐渐懂得了创建飞机生命的密码, 了解了力学在航空事业发展中的不可或缺的作用。航空界业者的循循善诱, 使他们大大地长了见识; 读者跟随他们足迹也窥见了有关飞机的秘密。

由于这是一本力学科普读物, 作者扣住力学在航空发展的作用这一主题, 浅显生动地娓娓道来, 不经意间涵盖了力学的几乎所有分支学科: 流体力学、固体力学和一般力学(动力学与控制)。大体说来, 前半本书主要涉及流体力学(空气动力学), 告诉读者: 升力怎样产生(也就是说, 飞机怎样上天), 航行中的飞机要承受哪些气动力, 怎样产生足够的推

力, 人类怎样突破“音障”等深层次的原理; 而后半本书主要讲述固体力学和一般力学(弹性力学、气动弹性、结构力学、飞行力学、振动力学等)的作用, 阐释飞机飞行的轨迹、总体架构及其稳定性、部件材料的疲劳损伤断裂、颤振和抖振的产生和预防、优质复合材料的使用等等。全书涉及了许多深奥的力学知识及其应用, 但读来相当容易而有興味。

本书作者是航空界的资深专家, 从事航空教学、科研、型号设计已近半个世纪, 他深深热爱航空事业, 所带领的不少学生已成为业内的领导和业务骨干。他全过程地参加了我国第一种飞机——“运十”的设计、试验、制造、试飞过程, 因此, 就能得心应手地描述设计和制造飞机的种种诀窍。他以十年的深刻感受, 深知必须掌握、运用力学知识, 才能创造自己的飞机, 才能真切掌握飞机的根底, 才能拥有自己的知识产权, 才能掌握自己飞机的生命; 他确信中华民族完全能掌握自己大飞机的知识产权。正是在这种信念驱动下, 他以古稀之年, 夙兴夜寐, 精心构思创作了这一力学科普著作。这种精神令人钦佩。

不久前, 我国已正式做出决策, 将设计制造有自主知识产权的大飞机, 相应的公司已然成立。这给我国航空业的迅猛发展创造了新的契机, 也为我国力学工作者开辟了更大的用武之地, 这本书的推出可谓正当其时。

最后, 用本书的结束语的最后一段话做小结: “青年朋友们, 天高任鸟飞, 海阔凭鱼跃, 创建飞机生命密码是一个极为广阔的舞台, 充分发挥你们的聪明才智, 趁年青, 打下扎实的基础, 厉兵秣马, 艰苦奋斗, 在这个舞台上大显身手吧。”

本文于 2008-06-19 收到。

1) E-mail: sqdai@126.com