

# 肥皂泡与建筑

## Soap Bubble and Architecture

游少萍 You Shaoping

中图分类号 TU-86

文献标识码 A

文章编号 1003-739X(2008)11-0020-04

**摘要** 在自然界中，肥皂膜和肥皂泡体现了莫佩蒂的最小作用量原理。该文通过研究肥皂膜和肥皂泡的形态构成原则，并分析弗赖·奥托等建筑师的设计实践，来探讨肥皂膜和肥皂泡的形态构成在建筑设计中的应用。

**关键词** 肥皂泡 最小作用量原理 极小曲面 奥托 悬链线 国家游泳中心

**Abstract** In nature, soap membrane and bubble embody P.Maupertuis' Least Action Principle. Through studying their configuration principles and analyzing Frei Otto's and other architects' design practice, this article discusses the application of the form structure of soap membrane and bubble in architectural design.

**Key Words** Soap bubble, The Least Action Principle, Minimal surface, Frei Otto, Catenary lines, The National Swimming Center

我们大多数人都曾吹过肥皂泡，就像法国画家夏尔丹于1739年所作的油画中的男孩一样，通过细管吹出形态各异、色彩绚丽的肥皂泡（图1）。我们每个人都有吹肥皂泡的经验，但是并不是所有的人都知道肥皂泡中蕴含着很深的学问。

观察周围的世界，我们就会发现世界具有一定的规律性。似乎混沌中也有一定的秩序，这些秩序启示我们应该去发现那些在具有种种结构的形态后面的普遍适用性原理。人们通过对自然的观察，发现简单性正是我们所要寻找的原理。1744年法国科学家皮埃尔—路易·莫罗·德·莫佩蒂（Pierre-Louis Moreau de Maupertuis）提出宇宙的总模式，后来被称为最小作用量原理。也就是说：自然界总是使作用量减到最小。而肥皂膜

和肥皂泡正是自然界中这种原则的最好体现。

历史上终身研究肥皂泡的科学家不少，其中最有名的是比利时科学家约瑟夫·安托恩·费迪南德·普拉蒂奥（Jose Antoine Ferdinand Plateau），他从1803年~1843年从事肥皂泡的研究。他将各种金属丝环绕成的线圈浸入肥皂溶液，并移动它们，他意识到不论几何形状如何，由单个封闭金属丝所组成的所有线圈都至少蒙上一层肥皂膜（图2）。这个物理实验所产生的数学问题也被称为普拉蒂奥问题。

### 1 肥皂膜与奥托

在建筑界，也有很多人对肥皂泡感兴趣。其中以弗赖·奥托（Frei Otto）



图1 吹肥皂泡的男孩（资料来源：[法]夏尔丹·梅特罗波利坦艺术博物馆）

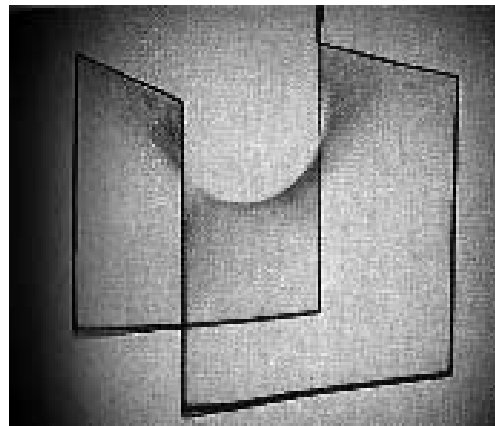


图2 线圈上的肥皂膜（资料来源：斯特凡·希尔德布兰特，安东尼·特隆巴著，恽愔宇宙——自然界里的形态和造型，沈蕊译，上海：上海教育出版社，2004:147）

作者 南京大学建筑学院硕士研究生

邮编 310013

电子信箱 appleoyoc@yahoo.com.cn

收稿日期 2008 05 28



图3 蒙特利尔世界博览会德国馆（资料来源：[德]鲁迪·舒尔曼，基恩·博克斯 著. 城市文脉中的张拉建筑. 谭锋译. 北京：中国建筑工业出版社，2006）

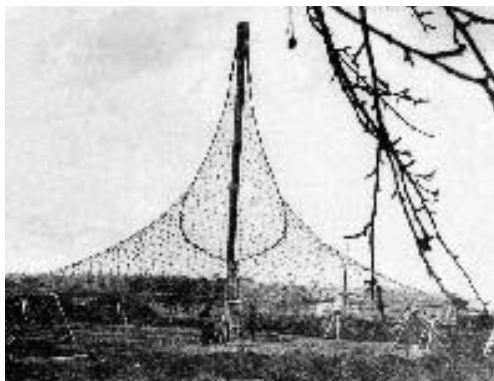


图4 斯图加特轻质结构研究所（资料来源：同图2，209）

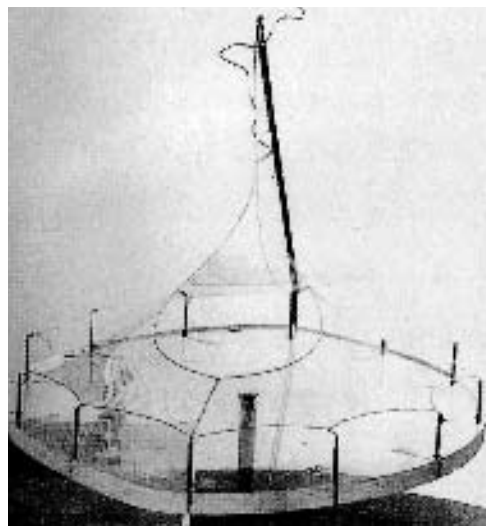


图5 斯图加特轻质结构研究所肥皂膜实验（资料来源：同图4）



图6 斯图加特火车站（资料来源：郭笑平，李纯 著. 膜结构的创造——介绍21世纪斯图加特火车站创作构思. 世界建筑，2000（9）：71-72）

为代表，他自1950年起开始研究索膜结构所具有的结构与形式特性。并且总结出“极小曲面”对索膜结构设计的重要作用。因为当索膜结构处在极小曲面的时候，膜材料在所有方向的受力是均等的，它的形式遵从自己的规律，并不以设计者的意志为转移，形式和结构在此形成了一个不可分的整体，共存于不可变的形体中。

为了找出“极小曲面”，奥托及其合作者将肥皂膜作为研究的主要工具。去寻求合理的索膜结构形式。奥托在实验中采用的材料是毛发和细丝，把它们系在针或细杆的端点，而针或细杆则是钉在有机玻璃板上。如果将这个装置浸入肥皂溶液，再取出，这时肥皂膜的表面积总是最小的，并且各处的表面压力完全相同，用它来模拟索膜结构是十分理想的。他把细丝系在针的不同高度，这样就会形成类似帐篷那样的奇妙状态。奥托为此还特意研制了一种“肥皂泡试验装置”，以便于几何分析和测量这些肥皂泡模型。在装置内的温度控制箱中，这些肥皂膜可以长时间保存，当一束平行光线按比例将它们投影到底板或毛玻璃上时，即可拍照或测量。奥托用他的试验装置研究了各种帐篷形式：帆形、尖顶式、拱形、凸起式、波浪式等，并广泛地应用于设计实践中。

斯图加特轻质结构研究所是奥托为

1967年蒙特利尔世界博览会德国馆（图3）所做的结构试验建筑。它是张拉索轻质结构，中间是采光天篷，四周的屋面也是短木和拉索接成的（图4）。在这栋建筑的肥皂膜模型试验中，外围的线圈是用系在针杆的细线张拉而成，所有的针杆都嵌在一个平板上。在模型的上部设一个吊架，而吸附在肥皂膜中的线圈悬挂在这个吊架上，然后将线圈向上提起就形成所需要的形态（图5）。

弗赖·奥托与德国著名建筑师克里斯多夫·英恩霍文合作设计的斯图加特火车站（图6）以其开创性的空间构想在国际投标中获一等奖。弗赖·奥托的结构协作是该建筑形式成功的基础。1963年由弗赖·奥托通过肥皂薄膜进行了最小面积受力试验，其结果显示：在没有产生张力的情况下，要形成一个单力支撑的薄膜，必须通过一个孔的组合体方可实现，那就是“光眼”（图7）。在火车站的结构构思中，首先想到的便是钢网结构，这一构想要求“光眼”有一个精确的高度。如同肥皂膜模型所呈现：钢网应与混凝土结合，并形成封闭的骨架，构成一个屋顶基础。结构计算的结果是：拉力荷载的悬挂屋顶代替压力荷载的水泥拱顶。这一形状通过模型进行试验，并在悬挂拉力状况下凝固成型。然后旋转180°即成为现在的形态——膜结构

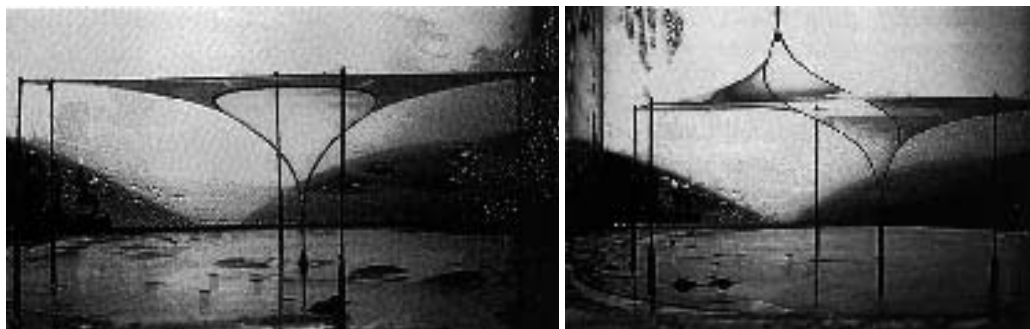


图7 斯图加特火车站肥皂膜实验 (资料来源:同图6)



图8 蛇形画廊临时展厅  
(资料来源: <http://www.oma.nl/>)



图9 肥皂泡的组合 (资料来源: 百度图片)



图10 伊甸园工程 (资料来源: 同图9)

“光眼”。这一理想的形状在连续而适合的边缘条件下发展成型。

## 2 肥皂泡与充气膜结构

在肥皂泡中同样也存在着最小曲面的情况,正如我们所知道的球体是所有给定体积的立体中表面积最小的。肥皂泡本身就是因内外的气压不同而形成的充气式结构。液体表面张力可以抑制肥皂泡的张力。由于肥皂泡内的气压对各向都是相等的,就形成了最小面积的肥皂泡。肥皂泡的几何原理和充气膜结构极为类似。在充气膜结构的设计中,肥皂泡的几何形状是充气膜结构研究的基础,通过对单个和多个肥皂泡的实验观察,不但可以获得对充气膜结构形状的直观印象,还可以归纳出一系列的空间

曲面组合规律。就其表面而言,用肥皂泡形成的各种体形都可以认为是“理想”的充气形状,因为肥皂泡的流动性,总是在薄膜表面每一点的薄膜应力相等时形成这样的形状。当肥皂泡自由悬浮在空中时,它不受任何边界条件的限制,只受肥皂膜分子间的凝聚力和内部空气压力的影响,肥皂膜会变成理想球形。2006年建筑师雷姆·库哈斯和结构师塞西尔·巴尔蒙德所设计的蛇形画廊临时展厅(图8)就是这种形式的体现。

如果肥皂泡的基座不是圆形的话,它会自动形成一个最符合泡内压力及最小面积的形状。如果把一大一小两个肥皂泡放在一起,交界面向大肥皂泡的一方拱出,其交界面为曲面隔膜。如果两

泡大小相等,其交界面会形成一个平面隔膜。对于多个肥皂泡,其组合形式有如下规律:3个气泡只能相交于一条边,而4个气泡只能相交于一点,薄膜的交角永远是 $120^\circ$ ,而四条边形成的角永远是 $109^\circ 28'$ ,只有这样,在相交边或接触点张力才能平衡(图9),这也就是普拉蒂奥所观察到的肥皂泡稳定型规律,它所体现的也是最小化原则。弗赖·奥托曾经在非圆形的地块上成群地使用球形结构以达到最大结构经济性。而尼古拉斯·格雷姆肖在英国康沃尔郡的伊甸园工程(图10)中正是采用了多个肥皂泡的连续相交的形态作为设计的出发点。

## 3 肥皂泡与国家游泳馆

当我们把大量的肥皂泡用两块玻璃板夹住时,就会看到紧密排列的六边形的图案(图11)。这种排列方式非常像蜂窝的排列方式。人所共知蜂窝是一种美妙的六边形结构。古希腊人就已经试图用最优原理解释蜂窝的结构规律。许多科学家都认为蜂窝的结构是出于极小原理:蜜蜂建造起蜂窝,为了使所花费的蜂蜡尽量少,而采用了最经济的方式(图12)。那蜂窝是极小面积吗?1964年匈牙利数学家耶什·托特(Fejes Toth)发现了表面积更小的形状。它的底面由两个六边形和两个斜方形组成。它的表面面积比蜂窝面积减少了0.35%(图13)。

早在19世纪晚期,凯尔文爵士提出这样的问题:“如果我们尝试将三维空间细分为众多的具有相等体积的隔间,那么当细分的表面为最小面积时,这些隔间会是什么形状?”当人们试图去解决



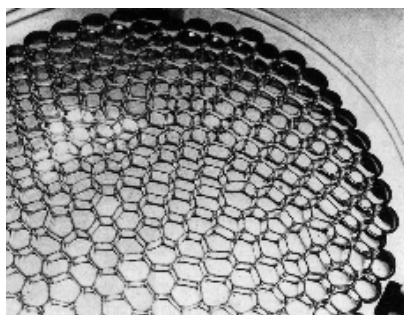


图11 平板间的肥皂泡  
(资料来源:同图2, 225)

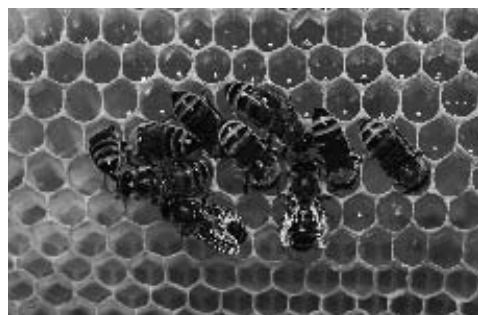
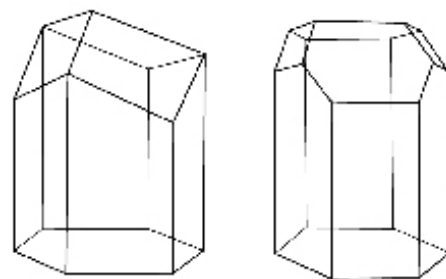
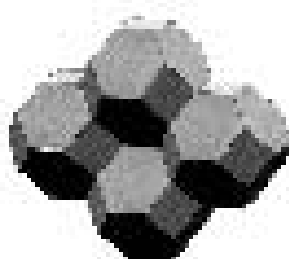


图12 蜂巢(资料来源:同图9)

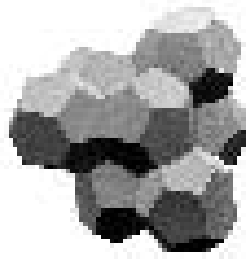
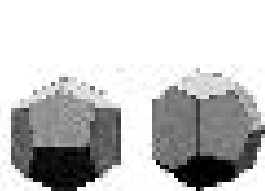


蜂巢结构

13



凯尔文爵士肥皂泡



国家游泳馆采用的结构形式

14

(资料来源:日本A+U杂志社编著.结构与材料.曹文燕译.宁波出版社,2005:126)



图15 国家游泳馆(资料来源:同图9)

凯尔文爵士的挑战时,肥皂泡的研究恐怕是一个恰当的出发点。早在1873年普拉蒂奥就已经对肥皂泡进行了观察,他发现当肥皂泡聚集时,它们总是相遇而形成3个互成 $120^\circ$ 的正交面,而相交面之间则形成4条从一点出发互成约 $109^\circ 28'$ 的交线。1887年,凯尔文爵士对自己提出的关于由8个正八面体和6个正方形组成的十四面体的问题进行了解答。这个图形可以通过切除一个正八面体的角来得到。正方形的内角是 $90^\circ$ 而六边形的内角是 $120^\circ$ 。两者都与普拉蒂奥所观察到的理想的 $109^\circ 28'$ 的角度有一定差距。一个规则五边形的内角是 $108^\circ$ ,但将规则五边形组成的十二面体链接起来却无法生成密闭的空间——因为这些多面体之间总是会出现细缝。

有一段时间人们认为,由五边形和六边形组合而成的多面体比凯尔文爵士的肥皂泡具有更高的效率。直到1993年这个假说才得以证实。两名爱尔兰教授——维埃尔和费兰成功造出了两种不

同单体构成的肥皂泡:一种是十四面体(由2个六角形和12个五边形构成),另一种是十二面体(全部都由五边形构成)。它们都比凯尔文爵士的肥皂泡具有更小的表面积。维埃尔·费兰肥皂泡至今仍然是分割三维空间的最优方案(图14)。北京国家游泳中心(图15)正是以维埃尔·费兰肥皂泡的形式为基础进行设计。尽管这种结构有着有机的形式,其外观看起来相当复杂,但实际上却是建立在高度的重复的基础上的。在此结构中只是用了三种表面、四种交线和三种交角或节点。北京国家游泳中心是建立在世界上最伟大的数学挑战之上、高度反复的有机空间构架。这种形式在自然界中普遍存在,是一种将社会、技术和绿色相融合的解答。

### 结 语

肥皂泡问题一直都是建筑学特别是仿生建筑学所关心的问题。因为肥皂泡体现了一种最小化的原则,它非常符合

仿生建筑所追求的以最小最经济材料消耗而得到最有效的空间的原则。现在我国正面临着可持续发展问题,笔者认为肥皂泡可以给我们带来启迪。

### 参考文献

- 1 愷宇宙——自然界里的形态和造型.沈菡译.上海:上海教育出版社,2004:176-177,202-211,225-230.
- 2 1998(4):70-73.
- 3 日本A+U杂志社编著.结构与材料.曹文燕译.宁波:宁波出版社,2005:125-129.
- 4 郭笑平,李纯.膜结构的创造——介绍21世纪斯图加特火车站创作构思.世界建筑,2000(9):70-72.