

文章编号: 1000-4882(2002)S-0013-06

跨越水域交通的阿基米德桥

黄国君 吴应湘 洪友士
(中国科学院力学研究所)

摘 要

本文首先介绍一种跨越水域交通的技术概念-水下悬浮隧道(又称阿基米德桥)的形成和发展历史、结构特点以及国际上正在进行概念设计和可行性分析的几个阿基米德桥典型工程概况。然后概括阿基米德桥设计分析中所涉及的几个关键科学技术问题。最后讨论阿基米德桥的设计方法和技术特点,强调现有海洋工程技术如张力腿平台技术等在阿基米德桥中的潜在应用,并对阿基米德桥的发展前景进行展望。

关键词: 海洋结构物; 水下悬浮隧道; 阿基米德桥

(一) 前 言

十九世纪八十年代一位英国议员提出了一个大胆的设想: 在英吉利海峡建设一个悬浮在水中的隧道作为连接英国和欧洲大陆的通道, 这应该是水中悬浮隧道 (Submerged floating tunnel (SFT)) 这一技术概念的最早雏形。尽管英国人提出这一设想主要是出于政治和战略的考虑, 但从当时的科学技术水平和财力来看, 这一设想显然只是一个科学幻想。由于 SFT 主要依靠水的浮力作为支撑且象桥一样从海底上方跨越水域, 所以在意大利又称为阿基米德桥^[1]。

进入二十世纪后, 世界上有关阿基米德桥的概念设计开始出现, 最早的专利出现在挪威(1923 年和 1947 年), 而后 1966 年英国工程师 Mr. Grant 也提出了不同的概念设计, 并申请了专利。1973 年, 挪威公路管理局组织了一个研究小组, 针对 Eidfjord 海峡 (500m 水深、1.3km 宽) 建设阿基米德桥的计划作工程可行性分析, 这标志着阿基米德桥开始从梦想走向研究设计和工程筹划阶段。自此, 以不同的海峡和内陆湖泊为工程背景, 有关阿基米德桥概念设计和可行性分析的研究在欧洲和其它洲开展起来, 引起了学术界和工程界的广泛关注。一些政府机构、公司和大学也积极推进研究和工程立项, 在意大利和挪威还专门成立了三家从事阿基米德桥设计的专业公司。1994-1998 年, 欧盟资助了一个有关阿基米德桥概念发展的多国研究项目。在亚洲, 1990 年日本成立了由一些大学和公司参加的阿基米德桥协会, 其研究工作相当活跃。1989 年开始, 国际隧道协会 (ITA) 设立了专门的 SFT 机构, 并分别于 1993 年和 1996 年发表了阿基米德桥研究进展总结报告^[2-3], 有关阿基米德桥的专题国际会议已召开过两届 (1996 年、2000 年)。

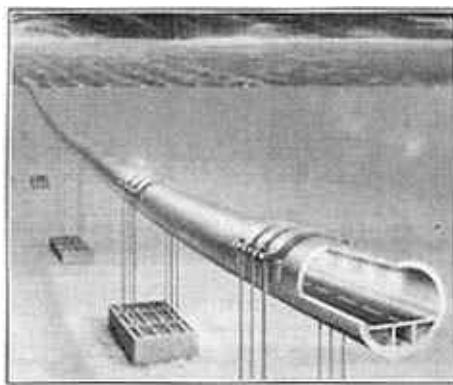
值得一提的是我国也开始加入阿基米德桥研究队伍行列。2000 年 6 月, 中国和意大利政府签署了科技合作协议, 就我国舟山群岛与宁波市之间的金塘海峡建设阿基米德桥进行可行性分析, 意大利阿基米德桥公司、那不勒斯大学 “Federico II” 部和我国的浙江大学、同济大学及浙江省有关科研单位参加了合作研究^[4]。2001 年, 中国科学院与意大利阿基米德桥公司、那不勒斯大学 “Federico II” 部和米兰理工大学等已建立了有关阿基米德桥研究的合作关系; 2002 年, 以洪友士研究员为团长的中国科学院科技代表团 (由笔者三人组成) 应邀访问意大利, 对意大利阿基米德桥的研究和工程状况进行学术交流和现场考察^[5]。意大利、中国、挪威、瑞典和法国将联合向欧盟申请阿基米德桥研究项目。

本文主要从海洋工程的角度, 将阿基米德桥作为一个海洋结构物, 介绍和分析其概念的基本特征。第二节将介绍阿基米德桥的基本结构和相比传统桥梁和隧道所具有的优点; 第三节将介绍国际上和我

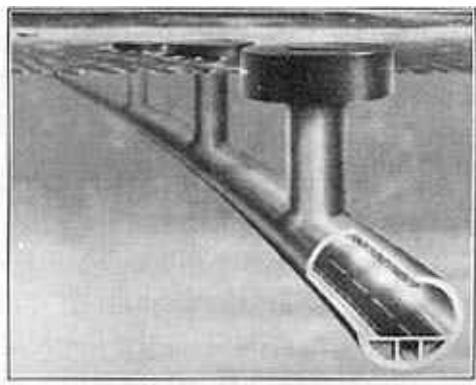
国正在进行概念设计和可行性分析的几个阿基米德桥典型工程。在第四节，将归纳阿基米德桥的模型分析和设计中所涉及的一些基本科学问题。第五节将介绍阿基米德桥的设计方法和技术特点，重点讨论现有海洋工程技术在阿基米德桥中的潜在应用。最后，展望阿基米德桥的前景。

(二) 结构与特点

作为一种交通基础设施，阿基米德桥具有与常规桥梁和隧道一样跨越水域的功能。所不同的是桥梁位于水面以上（如拉索桥）或水表面（浮桥），隧道位于海床以下如海底隧道（subground tunnels）或躺在海床上如沉管式隧道（immersed tunnels）；而阿基米德桥则是悬浮在水中（一般位于水面下方30m左右）。阿基米德桥基本结构形式如图1所示，它主要由分段管体和它们之间的连接部分、管体与两岸的连接部分以及支撑系统组成。从结构内部交通运营方面来看，它类似于隧道，更确切地说类似于沉管式隧道，因为它们都是分段建造、下沉连接；而从抵御外部环境载荷方面来看，它又类似于海洋结构物，两者的结合产生出一种新型海洋结构物。由于主要利用浮力作为支撑，阿基米德桥的支撑系统可以大为简化，除了头部与两岸固定连接支撑以外，采用一般浮式海洋结构物的支撑方式。图1(a)表示利用缆索系统锚固在海底基础上，此时浮力大于结构的自重，缆索承受张力可与海底垂直或呈一定角度，也可以呈交叉状，以对管体的垂直和水平运动进行约束。图1(b)表示水面浮桶撑托的结构形式，此时浮力小于结构的自重，该种方式不能对水平运动进行约束，且浮桶对水面船舶的航行有妨碍，但工程造价低。



(a)



(b)

图1 阿基米德桥的基本结构：(a) 缆索锚固于海底（浮力大于重力）；(b) 水面浮桶撑托（浮力小于重力）。

相比于传统的桥梁、隧道，阿基米德桥具有显著的经济和环保优势。与桥梁相比，它不破坏景观；不影响水面的交通（如采用缆索锚固系统）；单位长度的建造成本不随跨度增加直线上升而是基本保持不变；受台风的影响相对小。与隧道相比，它提供了一个浅水穿越海峡或湖泊的途径和手段，从而减少了与陆地交通连接的过渡隧道的长度或坡度，可降低建造成本并减少机动车爬坡时CO₂的排放量；对于地震灾害，其影响对隧道是直接的，而对于阿基米德桥则是通过基础和应力波在水中的传播间接作用于结构上。对于一些水深的风景名胜水域如高山之间深峡谷形成的湖泊，建桥或修隧道是不允许或不可能的，而阿基米德桥提供了跨越此种水域交通的一种选择，且是唯一的选择。总之，阿基米德桥受水深和跨度的限制较小，其适宜的建造条件为：1) 水深超过50m；2) 跨度超过1000m；3) 水流低于2m/s；4) 有景观保护要求；5) 船舶航行不频繁；6) 潜艇活动少；7) 地震不活跃。阿基米德桥还可用作观光、水渠、流冰控制和港湾连接设施等，具有多种潜在的用途。

(三) 筹划中的典型工程

近三十年来，有关阿基米德桥的学术研究、概念设计和可行性分析在欧洲、亚洲和北美逐步开展起来，其工程背景包括海峡和内陆湖泊，研究的内容涉及：实地环境考察、地质勘察、数值分析和模

型实验、结构设计、建造和安装技术、安全与运行维护措施、标准与规范制定、成本概算、经济、社会和环境影响等, 下面介绍几个计划建造或正在进行可行性分析的阿基米德桥典型工程的概况:

1. 挪威 Hogsfjord 海峡 1987 年, 挪威公路管理局决定该国西海岸的 Hogsfjord 海峡为建造阿基米德桥的首选工程, 图 1 (a) 和 (b) 即为四个候选方案中的两个。现场地理和环境(极限)条件为: 海峡宽度 1400m; 水深 155m; 海流 0.6m/s; 波高 1.5m。桥位于水面以下 25m 深处, 管体横截面直径为 10m, 建造成本概算为 1.285 亿美元(1996 年价格)。计划 1999 年动工, 2001-2002 年建成, 但由于种种原因, 这一计划未能付诸实施。

2. 意大利墨西那海峡 二十世纪八十年代初, 作为意大利轮渡公司总裁的 Elio Matacena 先生就购买了英国人的专利, 组建了墨西那阿基米德桥公司, 开始对西西里岛与意大利本土之间的墨西那水中悬浮隧道进行可行性和设计研究, 至今已持续了近 30 年。1984 年阿基米德桥公司的墨西那阿基米德桥设计通过了意大利船级社的论证^[6], 同时该社发布了阿基米德桥的设计规范。1994 年, 意大利 ENI 集团也提出了三隧道的墨西那水中悬浮隧道设计。现场地理和环境条件为: 海峡宽度 3000m; 水深 350m; 海流 1~2m/s; 波高 9~16m, 桥位于水面以下 35m 深处, 工程造价 25 亿美元(1991 年价格)。但由于环境条件相对恶劣, 水面交通繁忙, 该工程至今未得到意大利议会的批准。

3. 日本 Funka 海湾、Uchiura 海湾、大坂海湾 1990 年开始, 日本阿基米德桥协会资助了三个阿基米德桥总体概念的研究, 其中 Funka 海湾桥和 Uchiura 海湾桥位于北海道。Funka 海湾桥和大坂海湾桥的长度达 30km, 海湾水深分别为 50-90m 和 20-40m, Funka 海湾桥的造价预计为 177 亿美元(1996 年价格), 计划用 14 年建成。Uchiura 海湾桥为公路铁路两用桥, 管体横截面直径为 23m, 海湾水深 100m, 桥距水面 23m。目前, 日本阿基米德桥的研究已由总体概念分析阶段进入全尺度实验研究阶段。

4. 我国金塘海峡 金塘海峡宽度为 3000m, 水深 50m。图 2 为金塘海峡阿基米德桥的结构概念图, 是一双通道隧道, 其横截面的宽度为 28m, 高度为 12m。金塘海峡 50 年一遇的海流速度为 3~4.1m/s, 波高为 5.8m。

此外还有意大利的 Como 湖桥、瑞士的 Lugano 桥、巴西里约热内卢桥和美国 Washington 湖桥等工程也在研究和酝酿之中。

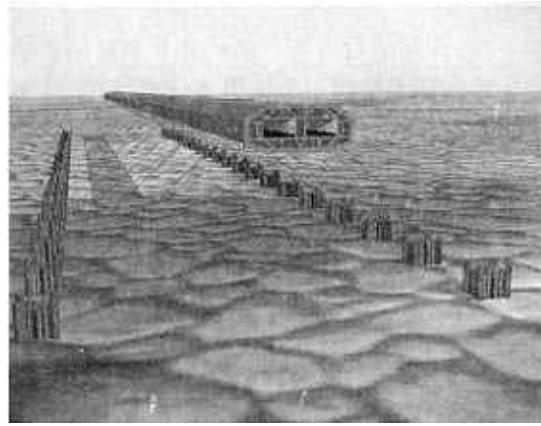


图 2 金塘海峡阿基米德桥

(四) 重要研究课题

作为一种新型海洋结构物的设计基础以及制定相应设计规范的需要, 对阿基米德桥所面临的一些基本科学问题进行理论分析和实验研究是必要的。这些研究课题中既有与隧道和常规海洋结构物一样所共同面临的, 又有阿基米德桥所特有的, 需要专门研究。研究的主线仍然是环境-载荷-结构响应的关系; 人类生产与生活活动对结构的影响也是需要考虑的重要因素。分析中需要考虑的环境要素为台风、波浪、内波、流、潮汐、地震、海啸、地质断层、海生物等。阿基米德桥承受的载荷包括: a) 水

久性载荷：结构自重、静水压力、浮力；b)功能载荷：SFT 运营过程中产生的载荷包括交通、压舱载荷的变化等；c)内应力：蠕变和松弛、预应力、温度变化等产生的载荷；d)环境载荷：波浪载荷、水流产生的静载和涡产生的动载、潮汐变化和流冰以及水密度变化产生的载荷、地震灾荷；e)偶然性载荷：由内部爆炸、燃烧和外部撞击、浮力损失和支撑系统损坏引起的载荷。阿基米德桥分析研究中的一些重要课题可归纳如下：

(1) 结构静、动力学分析：结构静态分析分为总体和局部分析，前者研究结构构件之间的交互作用；后者重点研究应力集中区域，如管体与两岸结合的端部以及与缆索的接头部位等。与沉管式隧道相比，阿基米德桥最显著的一个特点就是其在环境载荷作用下的动态响应。由于其跨度较大，结构系统表现出一定的柔性，在波载、旋涡脱落、地震和火车通行时这些交变载荷作用下将产生振动。因此，需要研究在这些交变载荷以及它们的组合作用下结构的动力学特性^[7-9]，通过动力学设计避免涡激振动时的频率锁定和波浪、地震作用时的共振现象，以控制最大振幅和加速度，并且应采用随机的方法，使得结构系统的固有频率范围避开波浪和地震载荷的主峰频率。

(2) 支撑系统与基础承载特性：缆索支撑系统的形式对于阿基米德桥的动力学响应具有重要影响，采用垂直支撑、斜支撑和交叉支撑对结构的水平和垂直位移将产生不同的约束，反过来又影响到缆索的张力水平。一根缆索的突然折断有可能产生动力学失稳引起其它缆索的连锁破坏，应研究其动力学机制，选择最佳的支撑形式。长期在动载作用下，基础的承载能力会下降，特别是在地震作用下，会发生土的液化，产生动力学失稳导致基础破坏，因此基础的动承载特性也是一个重要的研究课题。

(3) 流固土耦合问题：在动力学分析中考虑流固耦和、固土耦和以及流固土耦和问题是阿基米德桥研究的一个重要发展方向，它可以更为合理地处理载荷与约束，把握结构的动力学特性，近年来，国外已开始了这方面的研究^[10-11]。

(4) 腐蚀与疲劳：阿基米德桥的外壳可由水泥或钢材制成，对于后者腐蚀与防护问题是值得研究的问题。由于阿基米德桥的动力学特性，材料与结构的疲劳问题相比常规隧道尤为突出。并且，结构长期处在水中，腐蚀与疲劳交互作用，产生腐蚀疲劳，对桥的安全造成潜在的威胁。阿基米德桥段的结合处、桥端与两岸的结合部、缆索与管体和基础的接点等应力集中处应是腐蚀疲劳研究的重点部位，缆索材料的选择和研制应充分考虑腐蚀疲劳因素。此外，疲劳损伤对构件刚度亦及结构动力学特性的影响也是值得研究的问题。

(5) 结构对环境的影响：海洋环境对阿基米德桥具有重要的影响，反之，桥的存在也会对周围海洋环境产生一定的作用。日本阿基米德桥协会曾组织研究桥对潮汐斑图(pattern)的影响以及海生物生长的动力学^[2]，后者对水动力有重要影响，在桥的设计中应予考虑。

(6) 模型试验：实验室模型研究和现场中试验对于阿基米德桥从概念走向实际应用是必要的环节。由于阿基米德桥结构新颖，所处的环境复杂，仅靠理论分析研究无法准确把握结构特性，必须开展充分的实验研究，考察各种极限环境下桥的安全状况。

(7) 突发事件对安全的威胁：对于沉船和潜艇的撞击、内部爆炸和火灾、缆索的折断、管体部分进水等突发事件进行仿真模拟分析和模型实验研究是非常重要的，它有助于制定合理的安全防范措施，消除公众的疑虑。此外，恐怖活动的威胁也应考虑。

(五) 设计方法和技术特点

目前阿基米德桥的设计方法主要借鉴海洋工程的方法，采用半概率极限状态方法，对载荷和材料强度都使用部分安全系数^[12]。设计中考虑如下极限状态：1) 可服役极限状态 SLS (超过该状态，功能和运行要求不能满足)；2) 最终极限状态 ULS (超过该状态，强度要求不能满足)；3) 连锁破坏极限状态 PLS (超过该状态，安全要求不能满足)；4) 疲劳极限状态 FLS (超过该状态，耐久性要求不能满足)。对于每一个极限状态，将根据可靠性方法确定其部分(partial)安全系数，它考虑了不同参数的随机特点如材料抗力、几何和载荷等的不确定性。首先根据社会和经济可接受性标准给定一个极限状态目标，一般它低于结构整体的安全目标；然后给出构件和结构整体的极限状态方程(物理模型)

以及参数的随机模型；估计理论模型的不确定性；最后给定设计参数的不确定性，由安全目标定出部分安全系数。

尽管阿基米德桥技术从整体上来看是新颖的，但其分项技术基本上可以从现有的海洋工程、隧道工程和船舶工程技术中获得，如：张力腿平台的支撑系统和桩基或浅基础技术；沉管式隧道的分段建造、运输和下沉安装与连接技术等、隧道内部的结构设计和运行管理等；船舶金属外壳的防腐技术等。当然，阿基米德桥端部管体与两岸的连接技术是独特的，需要专门研究，外部动载在端部连接部位产生高度集中的载荷可通过滑动装置的设计来消除；端部连接部位的设计应该防止该部位的破坏导致整个结构系统的破坏或管体的淹没。阿基米德桥技术最显著的特点也是其难点是安全保障技术，如钢壳对撞击能量的吸收、双壳结构设计和横向可移动隔水壁的采用以避免进水的蔓延、部分缆索折断导致的动力学失稳的主动或被动控制等。此外人员逃离措施、安全检测和监测技术也需要研究发展。因此，相关技术的集成与新技术的创新是阿基米德桥成为现实的关键。

(六) 前景展望

作为一个科学梦想，阿基米德桥出现在人们的脑海里已有一百多年的历史，至今这一梦想还未能变成现实。不过，应该注意到：阿基米德桥作为一个工程来酝酿，着手概念设计、可行性分析、工程规划等却只有三十多年的时间，从一些重大基础设施发明和产生的历史来看，这一时间并不为长，因此还需人们的耐心和孜孜不倦的追求精神，许多有识之士、科学家和工程师已经为此付出了长期的努力。现在，世界上还未有一个阿基米德桥工程批准上马，这一方面是出于技术上的原因，另一方面则是由于公众和政治家在接受一个新技术时所持的谨慎态度。因此，阿基米德桥变成现实不仅是一个研究和技术问题，还需社会的理解和支持。所以，今后一方面需要加强对阿基米德桥的进一步研究，特别是对安全防范措施的研究，完善相关技术；另一方面需要开展舆论宣传和科学普及，逐步消除人们的疑虑。

阿基米德桥的科学原理简明、一些关键的分项技术已经成熟，由此我们有理由相信世界上第一个阿基米德桥的建设只是时间上的问题。从目前世界各地不断出现的阿基米德桥工程规划来看，阿基米德桥的时代已经到来，梦想成真的时刻为期不远。一旦它诞生并能经受住实际运行的考验，阿基米德桥就会像雨后春笋一样在世界各地涌现出来，其经济和社会价值将不可估量。我们高兴地看到中国科学家和工程师已经加入了阿基米德桥研究的国际合作，相信通过这种国际合作，中国科学家和工程师能够为世界上第一个水下悬浮隧道的早日建成作出中华民族应有的贡献。同时，通过国际合作使我国能够分享阿基米德桥的技术成果，从设计、建造、安装到安全运行等方面系统地掌握该项技术，成为该技术的开拓国家之一，载入阿基米德桥发展的史册。

参 考 文 献

- [1] Proceeding of the seminar on ARCHIMEDE'S BRIDGE-SUBMERGED FLOATING TUNNELS-, Organized by Ponte di archimede nello Stretto di Messina S. P.A. and Norwegian Public Roads Administration, Villa Monastero di Varenna, Lecco, Italy. 24 Oct. 2000.
- [2] ITA Working Group on Immersed and Floating Tunnels. Tunneling and Underground Space Technology, 1993, 8(2): Special Issue on Immersed and Floating Tunnels.
- [3] Ahrens, D. Submerged floating tunnels - A concept whose time has arrived. Tunneling and Underground Space Technology, 1997, 12(2): 317-336
- [4] ARCHIMEDES BRIDGE IN THE JINTANG STRAIT. Interim Report on Sino-Italian Protocol on Scientific and Technological Cooperation of 20th Jun 2000. 2001.
- [5] 洪友士、吴应湘和黄国君，中国科学院科技代表团访问意大利总结报告，2002.4
- [6] RINA (Italian Classification Society) report on verification of the basic design called Archimedes Bridge for the

- company Ponte Di Archimede Nello Stretto Di Messina S.p.A., 1984
- [7] Kunish H., Mizuno S., Mizuno Y. and Saeki H. Study on submerged floating tunnel characteristics under the wave condition. Proceedings of the Forth International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, April 10-15, 1994: 27-32
- [8] Morita S., Mizuno Y. and Mineta M. and Kurosaki K. Earthquake response analysis of submerged floating tunnels considering water compressibility. Proceedings of the Forth International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, April 10-15, 1994: 20-26
- [9] Venkataramana K., Yoshihara S., Toyota S. and Aikou Y. Current-induced vibrations of submerged floating tunnels. Proceedings of the Six International Offshore and Polar Engineering Conference, Los Angels, USA May 28-31, 1996: 111-118
- [10] Remseth S., Leita B. J., Okstad K. M. Mathisen K. M. and Haukas T. Dynamic response and fluid/structure interaction of submerged floating tunnels. Computers and Structures, 1999, 72: 659-685
- [11] Fogazzi P. and Perotti F. The dynamic response of seabed anchored floating tunnels under seismic excitation. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29: 273-295
- [12] Copello S. Submerged floating tunnel- certification-assessment of the design- design guidelines. RINA report, 2002

Transportation of crossing Waterways via Archimede's Bridge

HUANG Guo-jun WU Ying-xiang HONG You-shi
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

A technical concept of the transportation of crossing waterways –submerged floating tunnel (Archimede's Bridge)- is presented, including the history of the concept formation and advance and the feature of the structure. Some typical Archimede's Bridge projects in the world are described which are under the concept design and feasibility investigation. Then some pivotal issues involved in the design study of Archimede's Bridge are summarized. The design method and technical feature of Archimede's Bridge are also discussed and the potential applications of the existing offshore engineering technology in Archimede's bridge are addressed such as tension leg platform technique. Finally, the prospect of Archimede's Bridge is given.

Key Words: offshore structures; submerged floating tunnels; Archimede's Bridge

作 者 简 介

黄国君 男, 1962 年 9 月生, 副研究员, 中国科学院力学研究所工程科学部。主要研究方向: 固体与结构力学; 海洋工程力学。通讯地址: 北京中国科学院力学研究所工程科学部, 100080; email: ghuang@imech.ac.cn。

吴应湘 男, 1956 年 3 月生, 研究员, 中国科学院力学研究所, 工程科学部副主任。

洪友士 男, 1951 年 7 月生, 研究员, 中国科学院力学研究所所长。