

# 发展海洋城市的挑战与构想

徐明毅, 杜晓明

武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉

Email: myxu@whu.edu.cn

收稿日期: 2020年8月17日; 录用日期: 2020年9月1日; 发布日期: 2020年9月8日

## 摘要

在全球气候变暖和发展海洋经济的背景下, 人类到海洋定居将在未来得以实现。本文讨论了建设海洋城市面临的工程结构、居住环境、能源供给、垃圾处理等重要问题的解决途径, 分析了已有海洋城市构想的特点, 并提出了“莲花”漂浮城市、水上圆筒城市、“龙宫”海底城市的构想, 建议了中国结合跨海通道建设逐步发展海洋城市的实施计划。

## 关键词

气候变暖, 海洋城市, 漂浮城市, 海底城市, 跨海通道

# Challenges and Conceptions of Developing Marine Cities

Mingyi Xu, Wanming Du

School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: myxu@whu.edu.cn

Received: Aug. 17<sup>th</sup>, 2020; accepted: Sep. 1<sup>st</sup>, 2020; published: Sep. 8<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Under the background of global warming and developing marine economy, human settlement in the sea will be realized in the future. In this paper, the solutions to the important problems in the construction of marine cities are discussed, such as engineering structure, living environment, energy supply, garbage disposal, etc. The characteristics of existing marine cities concepts are analyzed, and the concepts of "Lotus" floating city, marine cylinder city, and "Dragon Palace" submarine city are put forward. The implementation plan of developing marine cities step by step is suggested in combination with the construction of cross-strait passages in China.

文章引用: 徐明毅, 杜晓明. 发展海洋城市的挑战与构想[J]. 海洋科学前沿, 2020, 7(3): 59-67.

DOI: 10.12677/ams.2020.73009

## Keywords

Climate Warming, Marine City, Floating City, Submarine City, Cross-Strait Passage

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

海洋是生命的摇篮, 资源的宝库, 覆盖着地球总表面的 71%, 占地球总水量的 97%。随着世界人口的不断增长, 开发海洋资源已成为人类生存和发展的战略举措。我国既是陆地大国, 也是海洋大国, 有广泛的海洋战略利益, 已把“提高海洋资源开发能力, 发展海洋经济, 保护海洋生态环境, 坚决维护国家海洋权益, 建设海洋强国”确立为国家战略。2012 年 9 月, 首届世界海洋大会在中国大连开幕。2013 年, 我国设立了国家海洋委员会, 负责研究制定国家海洋发展战略, 统筹协调海洋重大事项。

保护和开发海洋包括多方面的举措, 发展海洋城市是其中的一个重要方面。发展海洋城市, 就是在海上或者海底建立城市, 而非通常认为的靠近海边发展城市。现今许多沿海城市都很繁华, 不断扩展沿海城市面积是一个很自然的思路, 但是, 在当今全球气候变暖的背景下, 南北极冰川融化, 海平面逐年升高, 沿海城市不仅面临淹没危险, 也面临强大台风海浪的侵袭, 用填海造陆的方法简单扩张并非长久之计。因此, 不如反退为进, 将城市直接建立在海洋表面, 或者深藏海底, 一劳永逸地解决海水淹没问题。这样不仅被淹没城市的人口不必往内陆迁移, 而且还可以进一步拓展人类生存空间, 开发利用广袤的海洋资源。

科幻作家凡尔纳在他的作品《漂浮的城市》中, 描述了载客数千人的巨大游轮在海上的经历。航空母舰和大型游轮都可以较长时间在海洋上生活, 基本上具备了城市的所有功能, 成为海洋城市的雏形。而发展真正意义上的海洋城市, 就是建设大规模水上建筑或水下建筑, 还存在很大的技术不确定性, 将面临各种工程技术问题, 已有众多学者和工程师对此进行了大胆探讨和构想, 本文对现有的一些方案进行了讨论, 并尝试提出一些新的思路, 供相关人士参考, 为蓬勃发展的海洋经济提供助力。

## 2. 发展海洋城市面临的挑战

一直以来人们对海洋居住空间的拓展, 还停留在“围海造陆”的陆地拓展思维之上, 这方面荷兰是成功的典型代表。而真正的海洋思维是从海洋的角度出发来考虑问题, 海洋不能仅停留在传统意义的航运通道和渔业资源等功能上, 还可以成为人类长期居住的空间[1]。海洋城市能够充分利用海洋各种资源潜力, 并综合使用各项先进技术, 实现城市系统自给自足地运转, 将打破以往主要通过陆地资源来维持居住空间运转的固定模式。

2002 年, 一家美国公司设想建造一座容纳数万人生活的海上城市, 即“自由”号超级游轮, “自由”号的设计船长为 1372 m, 宽度为 229 m, 高度为 107 m, 在主甲板之上的建筑有 25 层楼高[2]。“自由”号的设计目标是可去全球的各大海洋巡游, 是人们向往海洋的体现, 但时至今日, 人们所预期的进展并未出现, 使得“自由”号还停留在纸面规划上。

日本地域狭窄, 有效利用海洋空间的需求十分迫切, 在海洋空间开发研究方面走在全球前列。日本清水公司分别于 2007 年和 2014 年发布了“海上环境未来城市”和“深海螺旋城市”的建设构想[1]。前

者的设想是建造大型海上浮岛型城市, 后者的设想是在深海区域建造一个从海底到海面的构造体, 其主体为漂浮于海面的直径 500 m 的球体, 球体下部连接螺旋状的通道直到海底的矿产资源开发工场。

因为难度较大, 以上的构想都还未成为现实。海洋城市的设计就是要在海洋中形成一个尽量自给自足的居住空间, 将能源、资源的转化利用和城市垃圾的处理问题综合起来, 尽量做到污染的零排放, 形成一个能源、资源的循环系统, 其中需要解决大量的工程技术问题, 一些较为关键的问题如下:

1) 工程结构问题。结构问题是海洋城市首先要解决的问题, 无论是水上建筑还是水下建筑, 如何抵抗风暴、波浪的影响或者巨大的水压力, 保证结构的稳定性, 将成为首当其冲的问题。为了工程的耐久性, 需要选择耐海水腐蚀的材料, 如镁合金或合成树脂混凝土等。为了居住舒适, 整体结构不能有太大的晃动。如在“海上环境未来城市”构想中, 为了应对可能发生的波浪灾害, 浮岛城市的外周海面以下 10 m 处会铺设高强度、高弹性防护膜, 并在防护膜的最外围海面设置防波堤。整个防波堤内的多个防护膜上会形成一个浅海区, 波浪大的时候会成为有效的减振结构。“深海螺旋城市”的主球体可以调节浮力强度, 使球体根据需要露出海面或下沉, 没有风暴时露出海面, 在风暴来临时则沉到海面下, 避免风暴肆虐的影响。参照潜艇沉浮原理的设计方案能很好克服风暴带来的结构强度问题和居住舒适问题, 但操作上有些不便, 上浮和下沉消耗的能源也使得经济性欠佳。而如果采用完全的水下建筑, 虽然避开了风暴和波浪, 但对工程结构的耐压性和耐久性提出了更高的要求。

2) 居住环境问题。如何提供适于人类生存的环境, 如空气、食物、光照等, 也是需要仔细考虑的问题。合适的空气对水上城市来说容易满足, 但对水下城市则需要精准控制。要保持与地球大气成分相近的空气环境, 必须设置足够稳健的空气控制系统, 以保持空气的压力、温度、湿度等, 如在“深海螺旋城市”中, 在球体内部环境的维持上, 计划利用海水和空气的温差形成整个球体内部空气的自然对流, 并利用辐射空调来调节系统内部的温度和湿度。空气维持系统除了短期调节外, 长期还必须维持空气中氧气和二氧化碳的合理浓度。维护空气环境最简单的方法是设置通往海面的通风管, 在海面的一端用浮筒来固定, 通过与大气的交换来自然更新。由于海浪的影响, 管道应具有一定柔性, 对于浅海问题不大, 但对于深海则受到诸多限制, 为了抵抗很大的水压, 对管道的强度要求很高, 这和柔性要求有一定的矛盾。在食物供给的问题上, 可通过深海渔业来获得, 但应避免过度捕捞导致海洋渔业资源枯竭, 同时发展海水养殖和栽培业, 形成所谓的“海洋牧场”来解决, 还可以和陆地资源进行商品交换, 以保证丰富多样的食物品种。淡水的需求一部分由食物中含有的水分提供, 其余则主要通过高效的海水淡化来提供。光照方面, 水上城市问题不大, 水下城市则主要通过室内照明解决, 也可利用光导纤维将阳光引入到城市中, 这可以与通风管道一并综合利用。

3) 能源供给问题。如何满足海洋城市的能源需求, 必须从设计之初就进行细致完善的考虑。充足的电能是主要的能源形式, 除了保证居民的各项活动, 也是维持居住环境的必要支撑条件, 如空气流通、海水淡化等。为了保护海洋的生态环境, 应考虑尽量采用可再生清洁能源。海洋汹涌的波浪、涨落的潮汐、宏大的洋流和海水上下层存在的温差, 都蕴藏着巨大的能量, 因此光伏发电、风力发电、波浪发电、潮汐发电、洋流发电、海洋温差发电等可再生能源将担当能源供给的主力, 若有不足, 可考虑补充一部分核能发电。对于水上城市, 展开面积较大, 因此光伏发电、风力发电、波浪发电可以成为主力, 而对于水下城市, 电力来源较为匮乏, 可考虑温差发电、核电, 也可使用一部分海洋资源如石油、天然气、可燃冰等。

4) 垃圾处理问题。如何对垃圾进行循环利用, 避免污染环境, 建立可循环经济, 构建合理可行的可持续发展模式, 将是建设海洋城市的关键控制因素。如在“海上环境未来城市”构想中, 将城市产生的垃圾分类处理, 实现资源的部分再利用。一类是生活垃圾、污水以及二氧化碳等完全可回收的垃圾, 首先将生活污水处理后提供给植物灌溉, 其次会通过分解技术将生活垃圾转化为植物工场的肥料; 而农、

畜牧区的种植和养殖,除了可以给居民提供谷类和肉制品外,残余的加工品垃圾将进一步加工,提供给浅海区域的水产养殖作为饵料。另一类,可以转化为能源的垃圾,比如废纸屑、塑料、建材等,则通过专门的垃圾处理厂,部分转化为农业、畜牧业、渔业可用的肥料,部分用于再生材料和燃料的生产。但对一些危害大、污染大的少部分垃圾,可能仍需要转运到陆地,进行集中处理或者销毁,在技术提高后和严格的环保措施下,这部分垃圾将会越来越少。

可以看到,海洋城市由于面临环境的复杂性和有效运作的独立性,要满足人类的长期定居要求,除了以上的较为明显的问题外,还有其它大量问题需要重新检视和精心设计,这对现代工程技术是巨大的挑战。因此,建设海洋城市是多学科、全方位的整合体系,需要克服的困难多,提出的方案新,在环保理念下有机融合各项技术,作为一个庞大的系统工程来进行考虑,才能获得较为经济的可行技术路线,持续推进海洋城市的规划和实现。

### 3. 海洋城市的设计构想

#### 3.1. 干阑式建筑

人类发展水上建筑已有较悠久的历史,随着航运的发展,船舶的体型越来越大,船舱载客越来越多,逐渐发展出船屋,直至出现漂浮式水上建筑,而干阑式建筑遗址均建在湖滨或湖中,由插入淤泥中的大量木桩支撑上部建筑而成[3]。从干阑式建筑发展到现代的石油钻井平台,从船屋发展到现代的大型游轮,直至“自由”号超级游轮的构想,都是在现代科技的工程材料和精准设计加持下,建筑规模不断扩大,功能不断完善而自然发生的。

在近海(如水深 50 m 内)可发展干阑式建筑,也就是用巨大的支撑柱将平台托起,平台高过海浪的高度,这样不受风浪的影响,稳定性好。然后在平台上建立永久社区,规划出居民生活区、作物生长区、光伏发电区、风力发电区、休闲娱乐区等。由于平台离陆地边缘不远,除了用航运联系外,还可以用桥梁和陆地相连,以便于物资交换。此类海洋城市,主要依托于陆地,环境安排与陆上城市差别不大,主要的难度在于支撑柱及平台的建造,形式上类似于底部架空的高楼,只是造价稍高,在利于就近开发海洋资源时可优先采用。由于干阑式建筑的支撑柱与海底固定在一起,其最大的缺陷便是易受地震的影响,因此需要选择地质板块稳定的大陆架海域。此类建筑也可在内陆的湖泊、湿地、分洪区等进行建设,以化解人口发展和防洪需求之间的矛盾,平台高度超过最高洪水位,使不能搬迁的人口一劳永逸地免受洪水威胁。

#### 3.2. 漂浮式建筑

干阑式建筑在海深较大时,造价也迅速增大,工程技术要求也更苛刻,这时采用漂浮式建筑将更为有利和经济,如“疆海绿洲 1 号”就是这类漂浮城市[4]。该构想将整个海上城市设计为一个球形,下部基础为密封式中空半球,在球底设一注水孔,使整个建筑重心平衡与稳定。上部为城市建筑主体部分,外轮廓为开闭式穹顶,平时敞开,当遇到极端天气,比如台风、海啸时,则闭合,然后通过注水孔注水,使城市下沉,没入海水深处避难。这与“深海螺旋城市”类似,具有上浮和下沉功能,这虽然提高了漂浮城市的安全性,但也使得造价增加,操作较为不便。

克服固定式和漂浮式缺点而设计的“疆海绿洲 2 号”为软着底式[4],水下结构采用较为稳定的类六棱锥形式,中心的纵杆承受建筑与水面道路下部桁架结构的拉力与压力,水面下有一圈空心浮体管道,支承水面上部结构,在中心纵杆的下端,用绳索与海底连接,形成软着底式结构,相较于全浮式,由于受海底绳索牵引的作用,位置可控制在一定区域内,较为稳定,相较于固定式的干阑式建筑,抗震安全性大大提高,可适应更广泛的海域。

参考“海上环境未来城市”，在此设想一种新的软着底式的漂浮城市，如图 1 所示。采用六边形的浮筒组合作为漂浮城市的基座，每个单体的六边形边长 10 m，高 20 m，能够提供 5000 t 左右的浮力。每个正六边形单体浮筒成型后，推入海中，向其内部灌注一部分水，使得单体浮筒竖立漂浮，再将多个正六边形单体浮筒紧密拼接起来，形成坚实的浮岛地坪。假设城市的核心区为直径 200 m 的圆，则需要 121 个这样的正六边形单体，能提供的有效浮力超过 50 万吨。为了减少风浪的影响，在建造完毕后，将浮岛地坪压入海面以下一定深度，比如 5 m，上部再用桁架或立柱支撑起城市的平台，由于波浪对桁架的作用面积小，故城市平台的稳定性增强，提高了居住的舒适性。同时在漂浮城市核心区周围，将波浪发电设备像莲花花瓣一样环绕布置，消减波浪，化害为利，进一步结合其它防波措施，可使得到达居住核心区的波浪大幅减弱。这样设计后，城市平台的稳定性可与固定式平台媲美，利于保障城市的各项功能正常发挥。为防止城市随洋流漂走，基座浮筒底部用铁链或绳索软固定于海底，使漂浮城市在海洋中有一个相对固定的位置。由于外围波浪发电设施的多重莲花式环绕特点，可将此类水上城市称之为“莲花”漂浮城市。

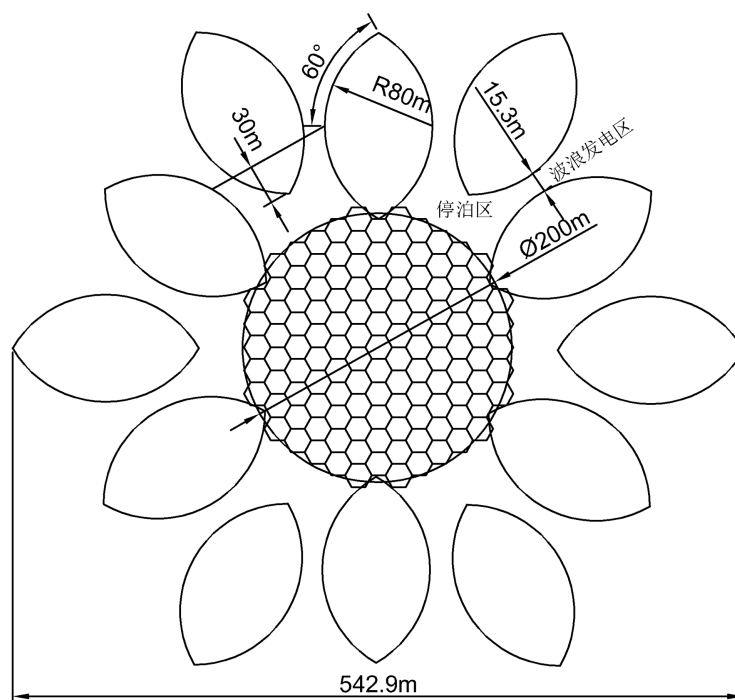


Figure 1. “Lotus” floating city  
图 1. “莲花”漂浮城市

### 3.3. 浸泡式建筑

能否打通水上和水下，以满足居住的各项要求呢？可以设想通常的陆地建筑浸泡在海水中，仍然能够正常使用，可称之为浸泡式建筑。在此提出一个水上圆筒城市的构想，如图 2 所示，类似于底部淹水的筒形高楼。即是在浅海区域放置一个大型的圆筒建筑，比如直径 100 m，直接坐落于海底，其突出海面的部分如同陆上高层建筑一样，可达到 300~500 m 高，远看就如同海里矗立一根巨大的圆柱，也可认为是一个人造的边缘垂直的小岛。圆筒外部在水下部分是封闭防水的，水上部分是开敞通风的，圆筒内部是居住区，按照通常的高层建筑一样设计，可布置上百楼层，容纳数万人口，具有城市的各项功能，布置商场、学校、医院、游乐场等。水上圆筒城市的承力结构和居住结构融为一体，足以抵御很大的风

浪。施工方法可参照桥梁的桥墩施工,也可开发相应的施工装备,便于水下施工。待圆筒露出水面,水上部分的施工就与通常的高层建筑施工没有太大区别。该圆筒结构的一个扩展用处是可以作为斜拉桥或悬索桥的支撑臂,用于在风浪较小的海峡处建设超长跨距的桥梁。此时桥梁既是沟通大陆和海岛的交通设施,也是水上圆筒城市的交通设施。这样将桥墩“化墩为城,以城建桥”,达到“城、桥”两用,能够充分发挥工程材料的使用效益。

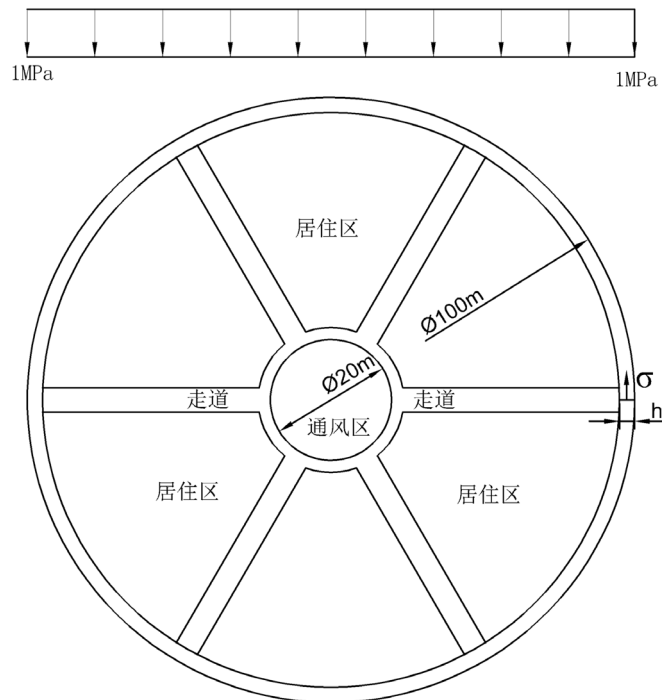


Figure 2. Section of marine cylinder city  
图 2. “水上圆筒城市断面”

初步估算圆筒城市底部的厚度,取其中半圆,列出力的平衡条件有:  $pD = 2\sigma h$ , 得到  $h = pD/2\sigma$ , 其中  $h$  为圆筒厚度,  $p$  为海水的压力,  $D$  为圆筒直径,  $\sigma$  为圆筒应力。假设海水深度为 100 m, 水压力约为 1 MPa, 圆筒直径 100 m, 材料的允许抗压应力取为  $[\sigma] = 20$  MPa, 代入算式得到圆筒厚度为  $h = 1 \times 100/2/20 = 2.5$  m, 在可接受的范围内。在增加圆筒内部联接的情况下,圆筒实际的压应力可望降低,同时也可预计,圆筒由底部到高处,随着海水压力的降低,圆筒所需的厚度也逐渐变薄。另外,也可采用双筒结构分担应力,如采用直径 20 m 的内筒,在辅助承力的同时便于通风和引入日光,这种结构也使得外圆筒厚度减薄后仍可满足要求。若考虑浇筑楼层的刚性支撑,如竹节一样,则外圆筒的厚度计算可简化为两端固支的受弯构件来处理,此时壁厚与圆筒直径并无直接关系,这样圆筒城市的规模可进一步扩大,特别适合于水深较小的海域。

### 3.4. 浸没式建筑

水上城市容易受到风浪的影响,如果建立在水下,形成浸没式建筑,则可避免此问题,但随之而来其它弊端。由于水下城市与大气隔离,不能像潜艇一样上浮和下沉(不包括前述可调节深度的水上建筑设计),因此水下城市要具有空气维持系统、温度调节系统、淡水循环系统等。根据处于海面下的不同位置可分为,一种是在水面以下一定深度,一种是直接坐落于海底。如果水深不大,可直接设置在海底,但若水深过大,为达到结构抗压要求将使工程造价过大,这时可考虑将整体结构悬浮在水面以下一定深度。

此时需要克服的问题是水下悬浮城市可能随着洋流缓慢飘移, 因此需要一定的固定装置, 可以用锚链系牢于海底, 也可以用推进装置来对抗漂移。通过定位系统的协助, 水下悬浮城市用推进装置进行无锚固定的方法非常类似于潜艇, 灵活性好, 在需要的时候还可迁移到不同的海域, 但这需要增加推进系统和消耗一些能量, 造价上和控制要求上都有所提高。海底城市控制上很简单, 但需要克服巨大的海水压力, 如果不能解决抗压材料的问题, 建设的困难较大。但是, 较深的海底城市可利用深海低温优势来发展计算中心或数据中心等设施, 可以在很大程度上减少散热费用, 提高能源的使用效率。还可利用海底城市的高寂静性和高安全性来安置静音制造工厂、安全等级苛刻的博物馆和实验室等, 此时主要利用高智能机器进行自动操作, 常驻人口较少, 运行维护经验也可为大型空间站建设所用。

另外, 还可结合海底隧道来建设海底城市, 一般海底隧道作交通之用, 是否可将隧道作为海底城市使用呢? 此处提出一种构想, 如图 3 所示, 在浅海海底修建半圆型的拱形建筑, 利用拱形来抵抗水压, 拱形和海底地面构成的断面内一部分作为隧道, 而其余部分就可作为居住区, 提供各类生活设施, 为人口常驻创造条件。可初步估算拱壁厚度, 假设海水深度为 100 m, 拱形建筑的最高点为避免碍航, 离海面 30 m, 因此拱高即为圆半径为 70 m, 水平宽度则为圆直径为 140 m。与水上圆筒城市的壁厚计算类似, 若材料的允许抗压应力仍取为 $[\sigma] = 20 \text{ MPa}$ , 底部拱壁厚度则为  $h = (1 + 0.3)/2 \times 140/2/20 = 2.275 \text{ m}$ , 也在可接受的范围内。该类型海底城市在水下如同一条大型隧道, 呈长条式分布, 可形象称之为“龙宫”海底城市。由于与陆地相通, 因此维持城市运转所需的空气、食物、能源、交通等问题都容易解决, 发展困难较小。在城市断面规划时, 可在其中一侧留 10 米作为铁路交通之用, 再留 10 米作为内部公路交通之用。剩下 120 米宽度的中间位置, 可预留 20 m 的人行步道和休闲广场, 其余宽度可布置居住区。在居住区的顶部可设置观光人行步道, 也同时作为安全通道。

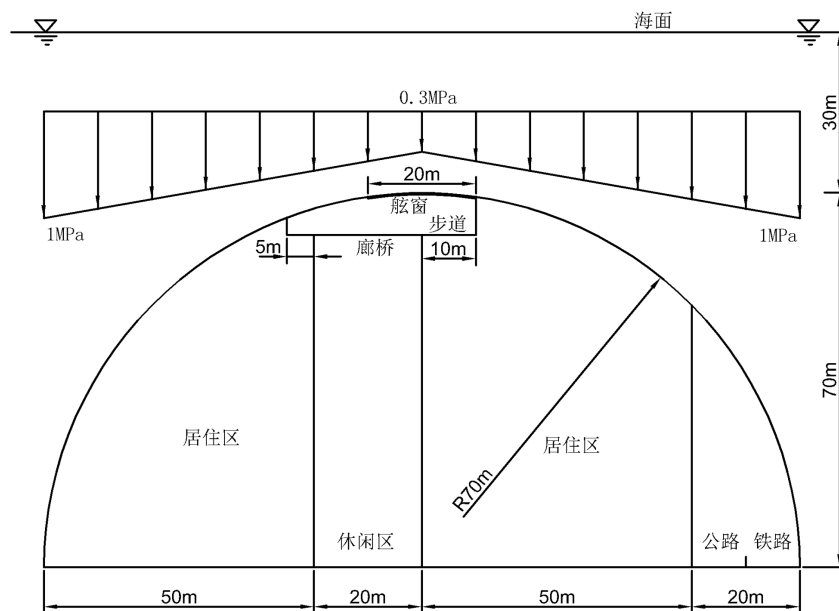


Figure 3. Section of “Dragon Palace” submarine city

图 3. “龙宫”海底城市断面

#### 4. 结合跨海通道发展海洋城市

随着我国沿海地区经济快速发展、人口密度集聚, 对交通的需求越来越高, 如全长 36 km 跨越杭州湾通道, 跨越 4 个岛屿连接宁波和舟山岛屿的舟山连岛工程, 以及采用桥梁与隧道连接并重的港珠澳通

道等, 这些通道桥梁的建设基本上选择在水深 50 m 以内。正在规划的有渤海海峡通道、台湾海峡通道、琼州海峡通道。这些通道特点是: 跨越海峡线路长、局部水域非常深、超越现有桥梁最大的跨越能力、海洋地质及气候复杂、深基础施工和隧道开挖工程非常艰巨[5]。在可预见的未来, 由于沿海经济发展的强烈需求, 这些跨海通道的建设具有重大的战略价值[6]。

由于海南岛已被设立为自贸区, 而琼州海峡最小宽度只有 19.4 km, 因此建设跨海通道具有迫切性和现实性。根据国家铁路局科技研究计划, 琼州海峡铁路通道采用中线盾构隧道方案过海[7], 线路全长 61.95 km, 隧道长 30.1 km, 过海段长度约为 22.4 km, 结构最大水压约为 1.21 MPa, 水深大于 50 m 的地段长约 12.3 km。同时, 琼州海峡通道也有桥梁方案[8], 也有学者研究了悬浮隧道方案[9], 甚至也有人提出直接用堤坝进行填筑。这些方案都有一定的可行性, 但也有各自的难点或劣势。堤坝方案在深水中填筑, 工程量很大, 而且阻碍航道和洋流, 对海洋生态保护不利; 桥梁方案则水深超过 50 m 的深水基础复杂, 经济跨径需要达到 2000~5000 m, 而现今世界上跨径最大的日本明石海峡大桥只有 1991 m, 超过 3000 m 跨径的技术条件还不够成熟; 地下盾构方案面临长距离隧道通风和超高水压施工的风险, 其最大埋深达到 121 m, 盾构独头掘进长度为 12 km [7]; 而悬浮隧道则还处于理论研究阶段, 世界上未有先例, 面临洋流作用下的复杂工况风险。

琼州海峡跨海通道不管是采用较为推荐的隧道方案还是其它方案, 都造价不菲, 也会遇到中国工程建设史上未曾有过的难点。如果在跨海通道的建设过程中能与海洋城市的建设结合起来, 将增加跨海通道的用途。比如在琼州海峡建设一座“龙宫”海底城市, 可兼作海底隧道沟通大陆和海南岛, 便于通行高速列车, 即使为降低噪音考虑, 采用 120 km 的时速, 那么通过琼州海峡也只需要约 10 分钟, 将极大方便大陆和海南岛的联系。采用隧道兼城市的方案, 能达到一物两用的目的, 从某种意义上提高了跨海通道建设的经济性, 不失为一个可供考虑的比选方案。

该海底城市由于在海底的表面建设, 结构海水承压比深挖隧道小, 抗渗要求低, 施工风险小。城市最高点可设定距离海面 30 m, 不影响大型船只的通行, 也可以避免台风的影响, 可全天候通行隧道列车。为增强城市运行的安全性, 在海峡最深可采用沉管隧道的方式连接, 在万一出现城市破损漏水的情况下, 可采用紧急封闭措施, 提供足够的逃生空间, 保障人员安全。该海底城市在大陆和海南岛两端有开口, 由于断面大, 空气流通性好, 可自然通风, 也可用通风机补充通风。同时在城市内栽种绿色植物, 在浅海光照下进行光合作用, 自我更新一部分空气, 使城内居民生活无忧。所需能源可方便从大陆或海南岛引入, 也可在不碍航的周边海域使用洋流发电或风能发电等可再生清洁能源, 符合环保要求。城市用水可通过海水淡化提供无缺水之忧。生活垃圾可通过铁路运输集中处理, 当然最好是减少外运垃圾, 发展循环经济。因此, “龙宫”城市在提供一条便捷跨海通道的同时, 还可容纳数万人口, 成为一座海底旅游城市。城内空气流通, 温度恒定, 不受风暴、高温、海水淹没影响, 能提供良好的海底观光旅游功能, 建成后将为海洋城市的发展提供宝贵经验。

琼州海峡海底城市建设成功后, 成熟的工程经验和运行模式可方便运用到台湾海峡上。修建便捷的台湾海峡跨海通道将促进海峡两岸的经济贸易协调发展, 加快两岸经济一体化进程。台湾海峡最窄处宽度约为 130 km, 位于海岛白沙岬与福建省海坛岛之间。现今倾向性较大的台湾海峡通道仍然是隧道方案, 虽然长度超过已有工程实例, 但无不可克服的实质性技术问题。如 1993 年贯通的英法海峡隧道长度为 49.6 km, 水深最大 60 m, 埋深最小 21 m, 采用盾构法施工。世界上已建成的最长海底隧道为日本的青函隧道, 总长 53.85 km, 其中 23 km 在海底, 水深最大 140 m, 埋深最小 100 m, 采用钻爆法施工。台湾海峡跨海通道有学者研究了铁路隧道方案, 得出平潭 - 新竹的北线线位方案较优[10], 隧道长 135 km, 最大水深约 67 m, 施工水深并没有超过青函隧道, 但这项世界级的特大型工程建设项目, 其修建技术与



将遇到的工程难题是极其复杂、困难和带综合性的, 而其前期的调研和筹划工作也将是长时间的[11]。因此, 采用海底城市兼隧道的建设方案, 也可作为比选方案之一, 以使台湾海峡跨海通道建设达到最优。

对方兴未艾的海洋城市建设, 遵循从易到难的步骤进行长远规划, 结合跨海通道需求, 可初步考虑将我国的海洋城市发展分为六个阶段: (1) 在浙江舟山群岛建立试验基地, 探索海洋城市的各种方案和施工方法, 为解决海洋城市的各项技术难题提供可行思路; (2) 建设琼州海峡海底城市兼跨海通道, 为海洋城市建设提供可资借鉴的案例, 摸索海洋城市运行模式和经济价值; (3) 建设台湾海峡海底城市兼跨海通道, 使人类逐步向海洋发展, 方便开发各类海洋资源; (4) 建设山东半岛通往朝鲜半岛的海底城市兼跨海通道, 方便中国大陆与朝鲜半岛的经济联系, 进一步开发海洋; (5) 提供成熟的工程技术, 辅助建设朝鲜半岛通往日本列岛的海底城市兼跨海通道, 以紧密整合东亚经济圈, 加强各国科技合作, 发展海洋经济; (6) 建设南海诸岛的各类海洋城市, 包括水上建筑和水下建筑, 对抗海平面升高的消极影响, 增加各个海岛的居住人口, 并使南海容纳更多的永久海洋居民, 以发展南海经济圈, 共同保护和开发海洋资源。以上各个阶段的划分并非绝对, 主要原则是依据技术进步和经济发展需要, 使宏大的海洋城市建设规划能够循序渐进地稳妥展开, 以便实施一个成功一个, 不断积累工程经验。

## 5. 结语

建设海洋城市具有重要价值, 一是拓展人类生存空间, 二是便于海洋资源开发利用, 三是有效抵抗全球气候变暖引起的海平面升高问题。但是, 要建立有效运作的海上或海底城市, 还面临大量的工程技术问题。本文试提出一些方案构想, 以便于抛砖引玉, 为实现人类到海洋定居的梦想出谋划策。相对于在太空中或者在火星上建造居住空间的想法, 海洋居住空间的开发不论是从城市系统的维系上, 还是在技术可行性上都相对较高, 能够以较低的经济代价滚动试验开发, 直至形成较为满意的方案。我国有广阔的海岸线, 发展海洋城市和海洋经济具有得天独厚的优势, 依托现今的科技进步水平和制造技术, 实现的可能性已大大提高。期望有更多的科研人员和工程力量向此方向努力, 积极探索, 勇于实践, 攻克系统性和复杂性兼具的各项技术难题, 使人类逐步融入浩瀚的蓝色海洋。

## 参考文献

- [1] 童德琴. 人类与海洋的新连接: 未来海洋城市及启示[J]. 中国海洋经济, 2018, 5(1): 213-227.
- [2] 关海山. “自由”号——一个海上城市的构想[J]. 海洋世界, 2007(3): 42-45.
- [3] 马成, 陆邵明. 水上建筑研究初探[J]. 新建筑, 2014(4): 107-111.
- [4] 黄岚, 陈正鹏, 林东富. 水面建筑的设计探索和研究——以疆海绿洲建筑结构模型制作为例[J]. 江苏建筑, 2014, 163(4): 5-7.
- [5] 项贻强, 杨赢. 中国沿海跨海峡通道建设挑战与技术构想[J]. 中国市政工程, 2016(5): 1-5.
- [6] 李靖宇, 张晨瑶. 渤海海峡跨海通道建设的区域开发战略价值[J]. 经济研究参考, 2017(9): 60-72.
- [7] 宋超业, 贺维国, 吴钊君. 高水压过海盾构隧道建设关键技术可行性初探[J]. 隧道建设, 2020, 40(5): 717-726.
- [8] 李江山, 柯桂灵. 琼州海峡跨海大桥联络桥方案介绍[J]. 广东公路交通, 2002(1): 28-30.
- [9] 李波, 杨吉新, 熊金波. 琼州海峡索桥式悬浮隧道方案的可行性研究[J]. 中国水运, 2009, 9(10): 253-255.
- [10] 谭忠盛, 王梦恕, 葛先飞. 台湾海峡自然条件及隧道方案初步研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(s1): 1-7.
- [11] 孙钧. 对兴建台湾海峡隧道的工程可行性及其若干技术关键的认识[J]. 隧道建设, 2009, 29(2): 131-144.