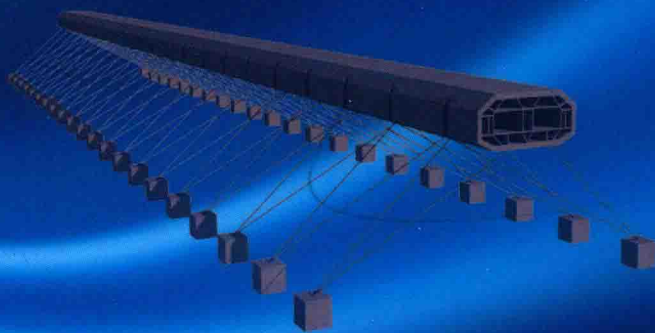




# 一种崭新的水下交通

## ——悬浮隧道

陈健云 孙胜男 李 静 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版  
大连市人民政府资助出版

# 一种崭新的水下交通 ——悬浮隧道

陈健云 孙胜男 李 静 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

悬浮隧道是一种跨越水域的新型结构形式。自悬浮隧道的概念问世至今的几十年里,这种跨越水域的创新方案得到国内外专家的广泛关注。已有大量的可行性研究证实了在世界多个国家建造这种新型结构的可能性,同时指出了悬浮隧道结构形式的特殊性。

本书结合作者近十年来针对这一结构形式在波浪流以及地震动等海洋环境下的隧道、锚索、基础方面的动力响应理论研究及试验研究方面的最新成果进行论述,并针对该结构形式的可行性、作用荷载、总体设计、施工要点等方面进行介绍。

本书概念新颖、内容全面,可供从事桥梁工程、隧道工程、海洋工程、防灾减灾工程方面的研究人员与工程技术人员阅读和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

一种崭新的水下交通——悬浮隧道/陈健云,孙胜男,李静著. —北京:科学出版社,2019.9

ISBN 978-7-03-062249-5

I. ①—… II. ①陈… ②孙… ③李… III. ①水下隧道—研究 IV. ①U459.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 199140 号

责任编辑:牛宇锋 赵晓廷 / 责任校对:樊雅琼

责任印制:吴兆东 / 封面设计:蓝 正

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年9月第一版 开本:720×1000 B5

2019年9月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:260 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

现代社会发展取得了重大成就,主要标志之一就是建成了大量快速、畅通和便利的交通设施。继开辟陆地和空中的快速通道后,如何快速跨越广袤的水域将是人类要实现的下一个梦想。与轮船、桥梁相比,采用水下隧道这种结构形式跨越水域,不易受台风、大雪、浓雾等恶劣天气的影响,有稳定且畅通无阻的通车能力;不会制约航道的发展;有较好的防御灾害的能力和防振抗震性能;对生态环境的影响小。总之,水下隧道是一种比较理想的全天候水下通道。因此,从科技、环保与经济的长远发展来看,水下隧道将成为一种重要的水路交通运输方式。

根据水道条件(水宽、水深、通航状况等)和地质条件的不同,水下隧道的建设有多种施工方法和结构形式,目前常采用的方法主要有矿山法、沉管法和盾构法。其中矿山法主要适用于水下地质条件良好的、不含或少含结构断层及破碎带的、整体性较好的中硬岩层,可以有效降低和避免水下隧道施工中发生涌水和突水的风险。而对水下软土地层而言,水下隧道建设主要采用沉管法和盾构法。

目前,随着海洋平台、沉管隧道、大跨度桥梁、港口工程和水利工程等技术、理论的大力发展,一种新型跨越水域的结构方式——悬浮隧道显示出了极强的竞争力。

自悬浮隧道的概念问世至今的几十年里,这种跨越水域的创新方案得到了国内外专家的广泛关注。挪威、意大利、日本、美国、瑞士等国开展了大量的可行性研究,证实了在世界多个国家建造这种新型结构的可能性,同时指出了悬浮隧道结构形式的特殊性。我国于2000年6月和意大利政府签署了科技合作协议,就金塘海峡建造悬浮隧道进行了可行性分析。此后,双方开始共同致力于首条悬浮隧道的建设。

与跨越水域的传统结构形式相比,悬浮隧道经济、环保,可全天候运营,具有广泛的应用前景。然而,世界上至今仍然没有悬浮隧道建成。究其原因,主要是一些技术难题尚未解决。因此,土木工程界需要有更多的人了解和研究这一方向的有关问题,而目前我国乃至世界上尚未出版一本相关专著。

本书的出版,可以让更多的人关注并研究悬浮隧道这一新型结构,抛砖引玉,促进悬浮隧道的发展。对悬浮隧道现有研究成果的比较分析,可以为广大设计人员和研究人员提供真正有用的参考资料。因此,本书对于开辟新型跨海通道、疏通交通、促进经济发展具有重要的理论和现实意义。

本书的部分内容来自大连理工大学建筑设计研究院张俊清等的研究成果,他

们分别在悬浮隧道的风险评估和风险控制、抗拔桩基础特性以及锚索参数振动方面进行了撰写和修订工作；柴健、纪林强等研究生进行了大量的校对、整理工作，在此对他们的辛勤工作表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

本书由大连市人民政府资助出版。

陈健云

2018年12月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 悬浮隧道的概念及特点 .....	1
1.1.1 悬浮隧道的概念 .....	1
1.1.2 悬浮隧道的特点 .....	3
1.2 悬浮隧道的发展 .....	5
1.3 悬浮隧道的可行性 .....	8
1.3.1 悬浮隧道的竞争优势 .....	8
1.3.2 悬浮隧道的风险分析 .....	10
1.3.3 悬浮隧道的风险控制 .....	17
<b>第 2 章 悬浮隧道的组成结构及作用荷载</b> .....	22
2.1 悬浮隧道基础.....	22
2.2 悬浮隧道锚索.....	25
2.2.1 锚索设计要求 .....	25
2.2.2 悬浮隧道支撑形式分类 .....	25
2.2.3 锚索的纵断面布置 .....	26
2.2.4 锚索的横断面布置 .....	27
2.3 悬浮隧道管体设计.....	30
2.3.1 管体形式 .....	30
2.3.2 管体断面 .....	30
2.4 悬浮隧道的接头.....	32
2.4.1 接头形式 .....	32
2.4.2 特殊接头的设计.....	32
2.5 悬浮隧道的作用荷载.....	35
2.5.1 永久荷载 .....	35
2.5.2 变形荷载 .....	36
2.5.3 功能荷载 .....	38
2.5.4 偶然荷载 .....	39
2.5.5 环境荷载 .....	41

<b>第3章 悬浮隧道的整体设计与施工</b> .....	44
3.1 悬浮隧道的选址 .....	44
3.1.1 悬浮隧道的基本调查 .....	44
3.1.2 修建悬浮隧道的环境参数 .....	45
3.1.3 修建悬浮隧道的地形情况 .....	45
3.1.4 选址设计原则 .....	46
3.1.5 适合修建悬浮隧道的地点 .....	47
3.2 悬浮隧道的横断面设计 .....	49
3.3 悬浮隧道的纵断面设计 .....	49
3.3.1 悬浮隧道的管体标高设计 .....	50
3.3.2 悬浮隧道的跨径、纵坡与竖曲线设计 .....	50
3.3.3 悬浮隧道的管段长度设计 .....	50
3.3.4 悬浮隧道的锚索间距设计 .....	51
3.4 悬浮隧道的平面设计及平、纵面线形组合 .....	51
3.4.1 直线 .....	51
3.4.2 平面曲线 .....	51
3.4.3 平、纵面线形组合 .....	51
3.5 悬浮隧道的照明设计 .....	52
3.5.1 照明设计的必要性 .....	52
3.5.2 照明设计的要素 .....	52
3.5.3 照明设计的分区及区段照明设计 .....	53
3.6 悬浮隧道的通风设计 .....	53
3.6.1 通风设计的必要性 .....	53
3.6.2 悬浮隧道的通风设计要求 .....	53
3.6.3 通风量的计算 .....	54
3.6.4 通风方式的选择 .....	54
3.7 悬浮隧道的防火设计 .....	54
3.7.1 防火设计的必要性 .....	54
3.7.2 火灾诱发因素 .....	55
3.7.3 隧道火灾的特点 .....	55
3.7.4 防火设计的技术指标 .....	55
3.7.5 防火系统的设计原则 .....	56
3.7.6 火灾防控措施 .....	56
3.8 悬浮隧道的施工 .....	58
3.8.1 管段施工法 .....	58

3.8.2	逐段制造和下水	58
3.8.3	管段预先制造和逐段下水	59
3.8.4	桥台	59
3.8.5	锚碇点	60
3.8.6	施工期限	61
<b>第4章</b>	<b>悬浮隧道结构分析研究进展</b>	<b>62</b>
4.1	隧道管体结构	62
4.2	隧道锚固系统	63
4.3	作用荷载	65
4.4	模型试验	68
4.5	其他相关研究	70
<b>第5章</b>	<b>悬浮隧道地震响应模型试验</b>	<b>72</b>
5.1	引言	72
5.2	模型介绍	73
5.3	试验设备和仪器	74
5.3.1	地震激励系统	74
5.3.2	传感器和数据采集系统	75
5.4	试验测试内容	78
5.5	模型试验基本情况	80
5.5.1	试验工况	80
5.5.2	试验步骤	81
5.5.3	地震波加载方案	81
5.6	试验结果及分析	82
<b>第6章</b>	<b>悬浮隧道地震响应数值分析</b>	<b>87</b>
6.1	引言	87
6.2	流固耦合的基本理论	87
6.3	模型试验的流固耦合数值分析	93
6.3.1	模型简介	93
6.3.2	数值结果与试验结果比较	93
6.4	悬浮隧道地震响应数值分析	101
6.4.1	模型简介	101
6.4.2	模态分析	101
6.4.3	影响因素敏感性分析	104
<b>第7章</b>	<b>悬浮隧道锚索参数振动研究</b>	<b>111</b>
7.1	引言	111

7.2	锚索垂度效应 .....	113
7.3	锚索参数振动响应——等效弹性模量法 .....	114
7.3.1	锚索-管体耦合振动模型 .....	114
7.3.2	数值算例 .....	116
7.4	锚索参数振动响应——抛物线法 .....	120
7.4.1	锚索-管体耦合振动模型 .....	120
7.4.2	数值算例 .....	123
<b>第8章</b>	<b>悬浮隧道锚索涡激响应分析</b> .....	<b>125</b>
8.1	引言 .....	125
8.2	旋涡泄放机理和涡激振动 .....	126
8.3	悬浮隧道锚索多阶涡激非线性振动 .....	128
8.3.1	振动方程 .....	128
8.3.2	方程求解 .....	129
8.3.3	实例计算和分析 .....	129
8.4	水流作用下悬浮隧道锚索的动力响应 .....	135
8.4.1	锚索-管体耦合非线性振动模型 .....	136
8.4.2	数值分析 .....	137
<b>第9章</b>	<b>悬浮隧道锚索的被动控制研究</b> .....	<b>142</b>
9.1	引言 .....	142
9.2	锚索-黏弹性阻尼器系统的数学模型 .....	143
9.2.1	振动方程 .....	143
9.2.2	方程求解 .....	146
9.3	数值算例及结果分析 .....	147
9.3.1	锚索的最大模态阻尼比及最优阻尼器系数 .....	148
9.3.2	锚索倾角对锚索最优模态阻尼比的影响 .....	150
9.3.3	锚索垂度对锚索最优模态阻尼比的影响 .....	152
<b>第10章</b>	<b>抗拔桩桩土相互作用的有限元实现及实例分析</b> .....	<b>155</b>
10.1	引言 .....	155
10.2	倾斜荷载下基桩的受力特性 .....	155
10.2.1	倾斜荷载下基桩的承载力 .....	155
10.2.2	倾斜荷载下基桩的破坏机理 .....	156
10.2.3	确定地基承载力的标准 .....	157
10.3	有限元模型的实现 .....	157
10.3.1	有限元模型的建立 .....	157
10.3.2	桩土界面的处理 .....	158

10.3.3 初始应力的计算 .....	160
10.4 有限元模型的试验验证 .....	160
<b>第 11 章 斜向抗拔桩静承载力影响因素分析 .....</b>	<b>165</b>
11.1 计算方案的确定 .....	165
11.2 荷载倾角对抗拔桩承载力的影响分析 .....	166
11.2.1 拉压荷载下桩体承载及变形特性对比分析 .....	166
11.2.2 倾角对斜向抗拔桩的极限承载力的影响分析 .....	169
11.2.3 倾斜荷载下荷载的传递机理分析 .....	171
11.2.4 倾斜荷载下桩体的应力分布 .....	171
11.2.5 倾斜荷载下桩周土体的应力应变特性 .....	173
11.3 桩参数对桩的静承载力的影响分析 .....	176
11.3.1 桩长对桩的静承载力的影响分析 .....	176
11.3.2 桩径对桩的静承载力的影响分析 .....	177
11.3.3 桩体模量对斜向抗拔桩的静承载力的影响分析 .....	178
11.4 土体参数对斜向抗拔桩的静承载力的影响分析 .....	179
11.4.1 土体模量对斜向抗拔桩的静承载力的影响分析 .....	179
11.4.2 土体黏聚力对斜向抗拔桩的静承载力的影响分析 .....	180
11.5 各影响因素下极限承载力的归一化比较 .....	180
<b>第 12 章 循环荷载条件下斜向抗拔桩基础的承载特性分析 .....</b>	<b>182</b>
12.1 引言 .....	182
12.2 循环承载力分析方法与研究现状 .....	182
12.2.1 循环强度模型 .....	184
12.2.2 有限元分析方法 .....	185
12.3 循环波浪荷载下抗拔桩基础的极限承载力特性分析 .....	186
12.3.1 静力加载与考虑循环荷载承载力对比 .....	187
12.3.2 荷载循环次数对斜向抗拔桩基础的循环承载力的影响分析 .....	187
12.4 桩参数对考虑循环荷载作用时的承载力的影响分析 .....	188
12.4.1 桩长对斜向抗拔桩的承载力的影响分析 .....	188
12.4.2 桩径对斜向抗拔桩的承载力的影响分析 .....	189
12.4.3 桩体模量对斜向抗拔桩的承载力的影响分析 .....	190
<b>参考文献 .....</b>	<b>192</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 悬浮隧道的概念及特点

### 1.1.1 悬浮隧道的概念

悬浮隧道(submerged floating tunnel, SFT),是一种用于跨越海峡、海湾、湖泊及其他水道的新型结构形式,适用于所有需在水中穿行的交通运输工具,可通行火车、汽车、小型机动车和行人,还可作为穿行各种管道和电缆的服务隧道,其概念示意图如图 1.1 所示。悬浮隧道一般由足以适应公路或铁路交通要求的管体结构、水下基础、支撑系统(该系统可防止隧道管体的过大位移)、管体之间的接头及与两岸相连的驳岸结构组成<sup>[1]</sup>。悬浮隧道的稳定原理基于阿基米德原理,因此又被称为“阿基米德桥”。从使用的观点来看,悬浮隧道具有传统隧道的所有特点,而且是密封的,因此被认为是“隧道”而不是“桥梁”<sup>[2]</sup>。

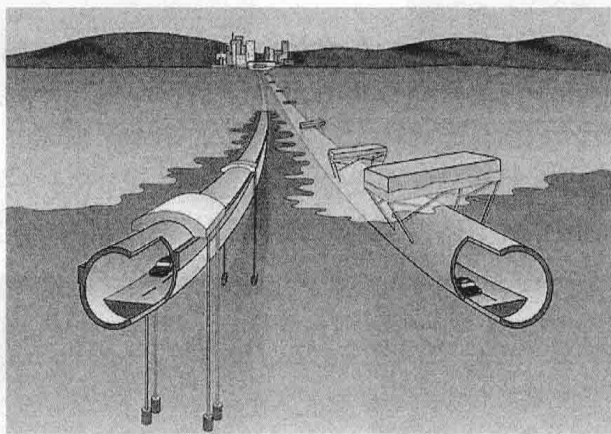


图 1.1 悬浮隧道概念示意图

悬浮隧道代表了一种跨越水域的新概念:隧道管体不是一个埋入结构,而是悬浮在水下一定深度,由支撑系统锚固,如由水面的浮筒固定或者通过张力腿(锚索)锚固到海(河)床上<sup>[3]</sup>。它与传统的沉管隧道或者海底隧道之间的区别是:隧道管体的四周都是水,通过定位系统向前延伸,并由结构的自身能力保持在固定的位置上。

根据锚固方式不同,可以把悬浮隧道分为张力腿(锚索)式悬浮隧道、浮筒式悬

浮隧道和固定支撑式悬浮隧道<sup>[4]</sup>。

### 1) 张力腿(锚索)式悬浮隧道

张力腿(锚索)式悬浮隧道的设计原理是:在设计中调整管体断面使结构的整体密度小于水的密度,在重力和浮力的共同作用下悬浮隧道整体处于上浮状态。隧道管体的固定通过张力腿(锚索)与海(河)床的基础连接而实现,如图 1.2 所示。张力腿(锚索)式悬浮隧道可以在深度变化很大的范围内进行修建,结构形式灵活,可与其他的锚固形式联合使用。因此,根据我国悬浮隧道的研究现状及适合修建悬浮隧道场所的环境条件,若不做特殊说明,本书的研究对象皆为张力腿(锚索)式悬浮隧道。

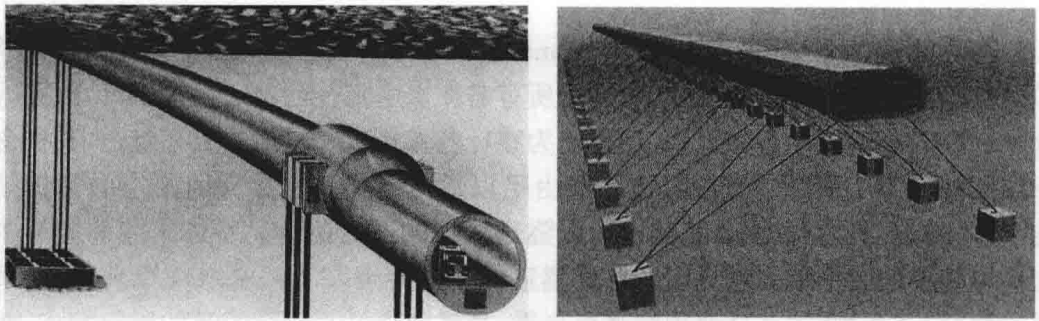


图 1.2 张力腿(锚索)式悬浮隧道示意图

### 2) 浮筒式悬浮隧道

浮筒式悬浮隧道的设计原理是:在设计中调整管体断面使结构的整体密度大于水的密度,在重力和浮力的共同作用下悬浮隧道整体处于下沉状态。悬浮隧道管体的固定通过锚杆与水面的浮筒连接而实现,如图 1.3 所示。浮筒式悬浮隧道适合比较深的水域,浮筒本身可以用来建造水上宾馆,但环境条件不能太恶劣,因为浮筒只能提供竖向约束,不能提供水平约束,而且对航运有一定的影响。

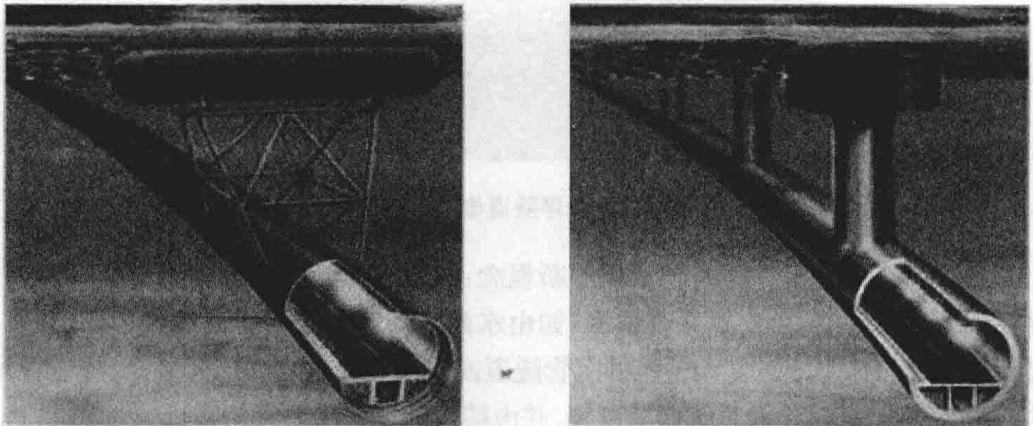


图 1.3 浮筒式悬浮隧道示意图

### 3) 固定支撑式悬浮隧道

固定支撑式悬浮隧道的设计原理是：在设计中调整管体断面使结构的整体密度大于水的密度，在重力和浮力的共同作用下悬浮隧道整体处于下沉状态。悬浮隧道管体通过立柱支撑于设计标高，如图 1.4 所示。固定支撑式悬浮隧道与普通桥梁的结构相似，相当于有固定支撑的水中连续桥梁，适用于水深较小、水底土质良好的水域；支撑刚度大，适合动力荷载较大的载体通过。

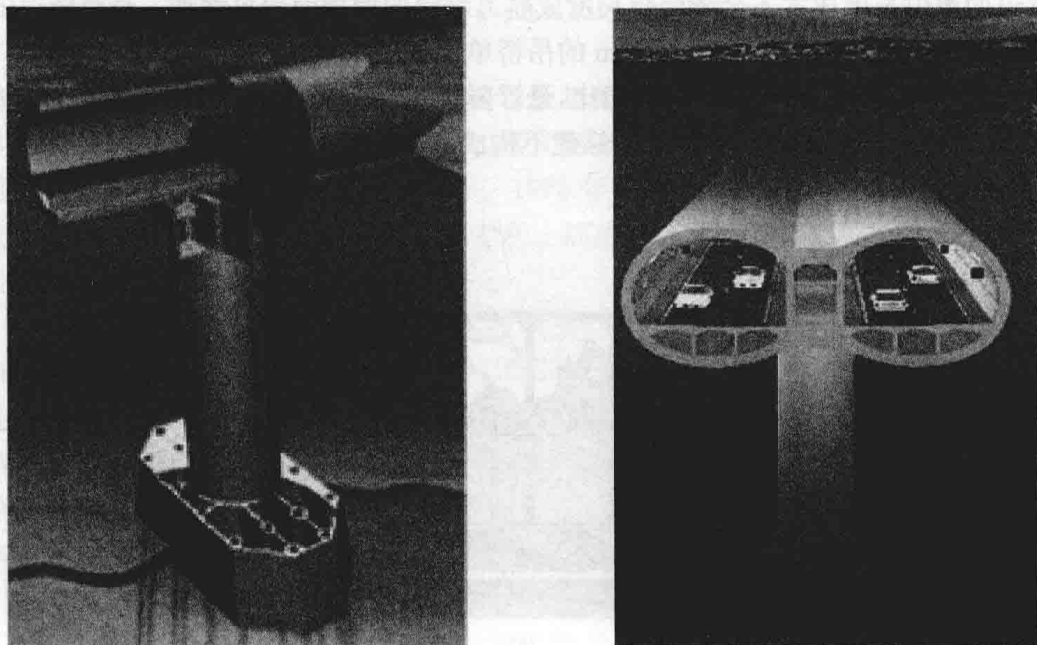


图 1.4 固定支撑式悬浮隧道示意图

#### 1.1.2 悬浮隧道的特点

悬浮隧道不是奇迹工程，也不是一种适用于任何情况的跨越方案。它仅仅是一种在很多情况下有相当竞争力的选择，在不久的将来，它适合用来跨越相当一部分的水道。

悬浮隧道具有普遍意义竞争力的表现如下<sup>[1,5-7]</sup>：

(1) 悬浮隧道在改善交通状况的同时，对周围环境的影响十分有限，不会破坏建造地点的自然景观及产生视觉上的污染。

(2) 悬浮隧道减小了与陆地交通连接的过渡隧道的长度或坡度，改善了道路线形，提高了交通通行质量，使车辆通过悬浮隧道的时间与通过桥梁的时间相近，比通过沉管隧道和海底隧道的时间要少，并远远少于轮渡所需的时间，如图 1.5 所示。

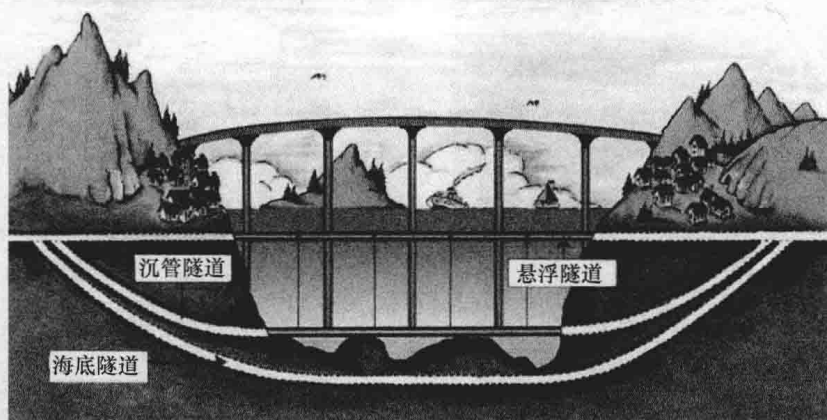
(3) 悬浮隧道不受大风、雨、雪、雾等恶劣天气的影响，可全天候运营，因此能有效地缓解地面的交通堵塞，确保交通的畅通。

(4) 悬浮隧道处于水下一定深度,根据航运部门提供的资料,这样的水深不会对航运产生影响。

(5) 悬浮隧道水下放置位置比沉管隧道和海底隧道高,坡度小,可以节省汽车的耗油量。悬浮隧道可在通风井处集中处理通过车辆所排放的尾气,极大地降低了汽车尾气对大气的污染。

(6) 当超过一定的跨度及水深(一般跨度超过 1000m,水深超过 50m)时,悬浮隧道的单位长度成本不会随跨越长度或航道水深的增加而明显增加。悬浮隧道的单位长度成本与跨度为 800~900m 的吊桥单位长度成本相当。

(7) 与沉管隧道和海底隧道相比,悬浮隧道悬浮在水中,因此水底和海底的地貌、水文地质条件等对悬浮隧道的修建不构成直接影响。



(a)



(b)

图 1.5 悬浮隧道优点示意图

(8) 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,修建桥梁或传统隧道是不允许或不可能的,而悬浮隧道提供了跨越此种水域交通的一种选择。

(9) 悬浮隧道可以用于其他目的,例如,用于连接大陆和深水湖中人工岛屿的人行隧道,用于安装各种管路和电缆的服务隧道。

## 1.2 悬浮隧道的发展

在过去的几十年里,由于环保、经济以及良好的抗震性能,悬浮隧道引起了世界范围内专家学者的关注,尤其在挪威、意大利、日本、美国、瑞士等国。其实,悬浮隧道的概念可追溯到1850年或更早<sup>[7]</sup>。1923年,悬浮隧道概念在挪威获得专利,这也是世界上第一个关于悬浮隧道的专利。而后,1966年英国工程师 Grant 也提出了不同的概念设计,并申请了专利<sup>[8]</sup>。

在挪威,Tveit 是为悬浮隧道的发展做出巨大贡献的代表性人物。1954年,Erik 向 Tveit 介绍了悬浮隧道的概念。1968年,Tveit 提出了一种混凝土管体的悬浮隧道方案,该方案为锚索式,未设置伸缩缝。1969年4月,在 Bergen 举行的挪威工程师和技术专家协会会议上,Tveit 提出了另外两种悬浮隧道设计方案,一种隧道管体为下弓形,另一种隧道管体为水平弓形,通过锚索锚固在海床上。1969年6月,挪威工程师成立了一个专门研究悬浮隧道的小组,并于1972年6月发表了他们的研究成果,他们认为悬浮隧道适用于宽度为1200~1400m的峡湾;他们还针对 Bremsnes 峡湾提出了一种悬浮隧道的试验性方案,虽然最终未能实施,但使悬浮隧道的设计水平向前迈进了一大步。后来该小组的大部分成员成立了挪威科技工业研究所,并针对 Vallavik 和 Bu 之间的 Hardanger 海峡设计了一种悬浮隧道方案。1982年,Tveit 设计了一条混凝土悬浮隧道,路面下的大部分混凝土由砂砾代替,以降低造价,减小温度应力<sup>[9]</sup>。此后,Tveit 还提出了一种跨度为1750m的自由式悬浮隧道方案<sup>[10]</sup>。1986年,在挪威 Stavanger 举行的国际海峡穿越会议上,Høgsfjord(赫格)峡湾的悬浮隧道工程第一次被提出。1987~1988年,参加 Høgsfjord 峡湾工程研究的四个挪威工程公司向挪威政府的公路管理部门提交了悬浮隧道设计构想,分别为四组竖向张力腿锚固的混凝土隧道、六个浮筒锚固的混凝土隧道、十个浮筒锚固的钢壳隧道和三个浮筒锚固的混凝土隧道<sup>[11]</sup>。1988~1991年,工程管理机构制定了标件的技术条件,计划1997年向投标人发出招标邀请,1999年开始施工,2001年或者2002年开通悬浮隧道,但由于外部原因,未按计划进行<sup>[12]</sup>。

1969年,工程师 Grant 提出将悬浮隧道作为跨越意大利 Messina 海峡的方案之一。1970年,意大利开始对在 Messina 海峡建造悬浮隧道展开可行性研究。之

后,意大利 Ponte di Archimede 公司购得该悬浮隧道设计方案的设计专利,并于 1984 年进行了悬浮隧道的可行性研究,提出了这种方案在意大利 Messina 海峡连接工程中的设想、需要研究和解决的一些问题及工程应用的可能性。1986 年,又对悬浮隧道设计方案在意大利 Messina 海峡连接工程中的水中最小深度和航运安全问题进行专门研究,提出将隧道管体顶部放置在距水面至少 30m 距离的位置处,才不影响船舶正常安全地通过该海峡,该研究在 1989 年得到了国际海洋组织会议的认可。1988 年和 1992 年由意大利埃尼集团资助,意大利阿基米德桥公司 PDA 研究工作室和意大利船级社先后对悬浮隧道设计方案的截面形状、设计标准和应考虑的一些问题进行了深入的研究和探讨,提出了几种典型的截面形状。意大利船级社还编制了悬浮隧道设计指南,供有关单位和部门作为悬浮隧道设计的参考和技术论证的依据<sup>[5]</sup>。

根据意大利、挪威等国家对悬浮隧道的研究,欧洲联盟(简称欧盟)于 1996 年出资并组织挪威和意大利等的有关部门及专家对悬浮隧道技术的关键问题做进一步的研究,以便为将来悬浮隧道的建设提供设计参考<sup>[12,13]</sup>。

日本的悬浮隧道研究始于 1990 年<sup>[14]</sup>。1990 年,日本在北海道成立了悬浮隧道研究协会,该协会与日本北海道大学和北海道发展局组成一个研究小组,针对悬浮隧道的规划、设计、施工和其他技术进行研究。第一阶段为对悬浮隧道整体概念的研究,于 1995 年公布了研究报告。报告总结了两个拟建悬浮隧道工程的研究成果:一个是穿越喷火湾、连接北海道和本州岛的悬浮隧道;另一个是跨越内浦湾、穿越 Muroran 断层带的悬浮隧道。北海道大学的研究人员对悬浮隧道可能造成的环境影响进行了技术模拟,主要模拟由悬浮隧道引起的潮汐模式的变化、生物的动态生长过程,以及驾驶员通过悬浮隧道行车时的感受等<sup>[1]</sup>。

美国针对无水流的内陆湖,提出了静水悬浮隧道(still-water submerged floating tunnel, S-WSFT)的概念(图 1.6),以期通过悬浮隧道穿越 Washington 湖,形成 Seattle-Bellevue 环路<sup>[15]</sup>。

瑞士计划采用悬浮隧道来穿越 Lugano 湖。20 世纪 90 年代初,瑞士联邦铁路公司计划修一条苏黎世至意大利边境的新铁路。为减小对环境的影响,选择悬浮隧道这种结构形式穿越 Lugano 湖。隧道位于 Vico Olivella 和 Brusino-Arsizio 之间,相邻海底隧道间的距离约为 1055m。该隧道为 5 跨的混凝土墩柱式悬浮隧道,单跨长 186m。隧道管体横断面为圆形,内径为 10.6m,壁厚为 85cm,墩柱附近壁厚为 150cm,其整体示意图如图 1.5(a)所示<sup>[16-17]</sup>。

20 世纪 80 年代末,国际隧道协会(International Tunnelling Association, ITA)开始积极促进世界各国在悬浮隧道技术上的交流与合作。1989 年,国际隧道协会成立了悬浮隧道工作小组,以便让世界上更多的人注意到这种类型的隧道工程。1993 年,国际隧道协会发表了悬浮隧道研究现状报告。1996 年 4 月,国际

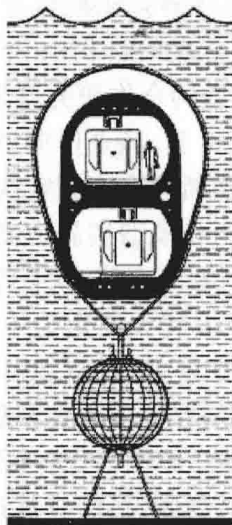


图 1.6 静水悬浮隧道示意图

隧道协会被推举为悬浮隧道的研究协调机构,同年5月,挪威公路管理局主持了第一次专门以悬浮隧道为主题的国际会议,会议在位于挪威西部海岸的桑内斯市召开,此处靠近挪威工程师拟修建第一座悬浮隧道的现场——Høgsfjord 峡湾<sup>[18]</sup>。会议详细讨论了悬浮隧道设计准则和 underwater 施工等方面的问题。很多关于 Ponte di Archimede 公司穿越 Messina 海峡和日本穿越喷火湾的文章对悬浮隧道的发展做出了重要贡献。在此之前,1986年在 Stavanger 召开的第一届 Strait Crossing 会议,就有专家表达了对悬浮隧道的兴趣。该会议认为悬浮隧道是一种可实现的、有发展空间的方案,世界各地悬浮隧道工程间的合作有助于首座悬浮隧道工程的实现。此外,1990年的 Trondheim 会议和 1994年的 Ålesund 会议对悬浮隧道的发展也起到了重要作用<sup>[19]</sup>。

1999年我国针对舟山大陆连岛工程曾提出过“悬浮隧道”方案的设想,以连接连岛工程中难度最大、长度最长(2900m左右)、海水水深平均在 50m左右、最大水深达 70m的金塘海峡。2000年6月,我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悬浮隧道进行可行性分析。意大利阿基米德桥公司、那不勒斯大学和我国有关科研单位参加了合作研究。2001年,中国科学院与意大利阿基米德桥公司、那不勒斯大学和米兰理工大学等建立了悬浮隧道研究的合作关系<sup>[8]</sup>。2001年,由浙江省科学技术厅牵头,舟山海峡大桥发展有限公司、浙江省交通规划设计研究院、国家海洋局第二海洋研究所以及有关高等院校联合组团前往意大利,与有关学者、专家就悬浮隧道的截面设计、设计标准及其他关键性技术问题进行了探讨。同年底,意方回访了中方,双方专家、学者又针对金塘海峡悬浮隧道的结构设计、设计理论、施工工艺和经济分析评价进行了交流