

# 渤海海峡跨海通道桥隧方案比选研究

宋克志

(鲁东大学土木工程学院,山东烟台 264025)

**[摘要]** 从对航空及航运的影响、通行能力和行车舒适性、行车安全与气候适应性、施工难度及工程风险等方面对桥梁、隧道方案各自的技术特性进行了分析与比较。从技术角度考虑,桥隧方案皆具有实施的可行性,隧道在航运影响、气候适应性、生态环境等方面明显优于桥梁,而桥梁则在通行能力、施工难度和风险、运营成本、行车安全、行车舒适性、景观效果等方面优于隧道。随后,运用层次分析法建立了渤海海峡跨海通道比较评价的指标体系,并确定了各指标的权重系数。通过专家打分法和隶属度函数取得各定性指标和定量指标的隶属度,最后运用模糊综合评价模型计算全桥梁、全隧道及桥隧组合方案的模糊综合评价价值,全隧道方案评价得分最高,因此,推荐渤海海峡跨海通道采用全隧道方案。

**[关键词]** 桥梁与隧道工程;跨海通道;渤海海峡;方案比选;模糊综合评价

**[中图分类号]** U455 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)12-0052-09

## 1 前言

渤海是我国最大的内海,渤海海峡是渤海的咽喉要道。渤海海峡跨海通道,就是要利用渤海海峡及庙岛群岛的有利地形,以合适的形式,建设一条便捷通道,形成一条连接渤海南北两岸的交通运输干线,全面沟通环渤海高速公路网、铁路网,进而形成一条总长约4 000 km(国内部分)、贯通我国南北的交通大动脉。在项目决策的各个环节中,渤海海峡跨海通道方案比选能为工程论证、决策、规划及建设提供充分的依据,对项目的工程造价、社会效益、环境影响等均具有重大的影响。柳新华、宋克志、王梦恕等曾对国内外跨海通道建设经验、水下隧道技术难题及渤海海峡桥隧组合方案进行了初步研究<sup>[1-4]</sup>,对本文的研究具有较好的借鉴意义。但是,跨海通道桥隧方案的比较评价涉及经济、工程地质、地形地貌、航运、水文、土木工程和环境等学科,方案比选因素众多,过程复杂,需严肃、认真、科学地对待<sup>[1,5,6]</sup>。本文将对全桥梁、全隧道及桥隧组合方案进行系统的综合比选研究。

## 2 各种跨海通道方案的特性比较

目前,从国内外海峡通道建设经验来看,跨海通道主要有铁路轮渡、全桥梁、全隧道及桥隧组合等几种形式。鉴于在烟台至旅顺之间已有铁路轮渡运输线路,在此仅对桥隧方案的特性从以下几个方面进行比较分析。

1)对航空及航运的影响。大型桥梁工程会影响到航空安全,需要在设计时事先与航空管理部门沟通取得资料,并对桥梁高度进行合理设计,设置警示装置。同样,在航运比较繁忙、通航货轮吨级较高的航道上修建桥梁,会对航运造成很大影响,桥墩设置后也会造成阻流,改变水流方向,引起主槽变迁。我国在内河航运尤其是长江航运方面,由于建桥而影响航运,教训深刻。20世纪50年代建成的武汉长江大桥,通航净高只有18 m,60年代建成的南京长江大桥,通航净高为24 m,而近年来建造的芜湖、铜陵长江大桥等均为24 m。长江上未建桥之前,万吨级货轮可直达铜陵甚至武汉,如1931年美国万吨级“加利福尼亚号”油轮就曾到达过武汉,

**[收稿日期]** 2013-10-08

**[作者简介]** 宋克志(1970—),男,山东鱼台县人,教授,主要从事隧道及地下工程方面的教学与研究;E-mail: ytytskz@126.com

而现在连4 000吨级船也过不了长江大桥,近几年只有3 000吨级左右的船舶可以到达武汉。另外,桥孔宽度对过往船队也有很大限制,船队需要解驳,重新编队,不仅耽误自身航程,还阻碍了其他船舶通行。随着船舶通行量的急剧增长,撞船、撞桥事故直线上升。对于跨海通道建设,周边海滩的开发利用、码头建设,在通航方面无疑会提出更高的要求。需要事先和航道管理部门沟通,取得航道资料,根据航道等级确定通航孔净高和跨径,并详细研究论证桥梁防撞设计方案。而海底隧道由于在水下,对航空无任何影响。对于通航方面,若采用沉管法施工应考虑隧道顶面的设计高程,对于钻爆法、盾构法或隧道掘进机(TBM)施工应研究论证顶板厚度和隧道埋深,减少通航干扰,确保施工安全,且要合理选择隧道海上通风口的位置,设置警示和防撞标志。

2)通行能力和行车舒适性。大桥视野开阔,行驶车辆的空气环境好,人的心理感觉极佳,比较而言,隧道内的空气环境欠佳,司乘人员有压抑感。在两侧接线畅通和正常天气条件下,同样宽度、相同时间内大桥的交通量相对要大于隧道。

3)行车安全与气候适应性。大桥视线开阔,行车条件较好,发生交通事故时损失也比较小;隧道中视线受限,对司机有压抑感,行车环境相对较差,故对运营管理设施要求高,一旦发生意外事故特别是火灾时损失较大。但大桥方案在雷雨大风或浓雾天气,行车会受到很大影响,甚至要封锁交通。因此渤海海峡跨海大桥必须认真考虑当地气象环境对工程方案的影响。而隧道方案则不受大风、大雪、大雾、暴雨和严重冰冻等气候变化的影响,能做到通道的全天候运营,具有稳定的运行能力,这正是桥梁所不具备的。

4)施工难度及工程风险。海底隧道属于水下、地下作业,水文、地质条件复杂多变,地层透水、涌水、塌方等许多因素具有不可预见性,相对桥梁施工难度与风险较大。需做大量细致的前期地质调查工作,并在施工中采用超前地质预报,采取必要的措施,以降低施工风险。

5)施工周期。一般对同一个场址的桥梁和隧道而言,桥梁工程可以多个工作面平行施工、流水作业,机械设备、周转材料可以得到更有效利用;施工不可预见因素相对较少,施工周期明显短于隧道工程。而许多隧道工程在施工中作业面少,且因地

质条件变化等因素影响工期,施工周期较长。

6)对生态环境的影响。大桥的桥墩施工对渤海海峡生态环境有影响,由于大桥占用海面 and 海域空间,对渤海海峡环境和水动力有一定影响。运营阶段对环境影响小,车辆废气扩散快。隧道在建设阶段和运营阶段对海峡生态环境和水动力基本没有影响,但对开挖过程中产生的弃碴要进行有效的处理和利用。另外,运营期间汽车尾气污染在隧道内集中,需要有完善的通风措施,通风塔集中排出的尾气对环境有一定的影响。

7)接线与拆迁量。大桥需要较长的引桥才能与地面连接,占地面积大,拆迁量大,相比而言,隧道出口可以直接与城市道路结合,拆迁量比大桥小。据此比较,隧道的接线与拆迁费用低于大桥,与路网接线容易,与周边总体规划的协调性好。

8)运营成本及维护费用。海底隧道易于做到一洞多用,可以同时布设电缆、通讯电缆、光缆等,易于检查和维修。而桥梁在此方面受限。桥梁工程建成后,不需通风设备,防灾设备简单,仅需防腐耐久性的维护和一定量的检查维修,工作量较小、性质明确,运营维护费低,尤其用电量明显低于隧道。而隧道工程在运营期间需要较大一笔资金用于通风、照明、通信、监控、报警、消防等多种设备,需配用管理人员多,且维护和管理费用高。但隧道结构耐久性好,在运营期间主体结构基本无需维修。相对而言,从运营成本上分析,桥梁优于隧道。

9)景观效果。桥梁在原来空无一物的空间中,创造了新的构筑物,它与桥位处的自然景观及其他人工构筑物一起,构成整体景观,影响着周围的环境,给生活场所带来变化。同其他建筑物一样,人类在建造过程中不断地将审美的追求和创造渗透到桥梁建筑中。桥梁有别于其他结构的美学特征有通达之美、凌空之美、流畅之美及刚柔之美。隧道基本保持原有海岸和海岛的自然风貌,但不能产生标志性景观。

10)防战能力。渤海海峡是我国重要的海上交通要道,是京津塘的门户。桥梁目标明显,易遭受军事打击,如主桥倒塌不仅影响交通功能,还可能影响主航道的顺畅通航,影响军事防御系统的快速启动和发挥作用;隧道在战争期间隐蔽性好,不易被摧毁,甚至可以继续发挥交通运输作用,即使遭受打击,也不会影响航道安全。

11)岸线资源影响。桥梁占用一定的岸线资源,

对岸线开发利用产生影响,而隧道则基本不影响。

12)运营期间抗灾能力。全桥梁方案运营期间抗灾能力较好,对火灾、水灾和意外交通事故可以实施陆上或海上施救,救援方案安全便捷。而隧道内受交通断面限制,不利于交通疏导,施救工作难以展开,抗灾能力较差,一旦发生灾害,洞内设施、设备损失也很大。

13)抗震能力。由于周围岩土介质的存在,对地下结构有较好的约束,隧道与桥梁的地震动力反应特点明显不同。地震发生时,隧道结构随自由场岩土介质一起运动,惯性较小,因而动应力较小,不宜遭受破坏。而地上结构存在明显的惯性力和动应力,结构容易因地震发生破坏。因此,隧道与桥梁相比具有较好的抗震能力。

经上述综合分析比较,单从技术角度考虑,桥隧方案都具有实施的可行性,隧道在航运影响、气候适应性、生态环境等方面明显优于桥梁,而桥梁则在通行能力、施工难度和风险、运营成本、行车安全、行车舒适性、景观效果等方面优于隧道。

桥隧组合方案是根据自然地理条件,北跨海通道北部修建海底隧道、南北利用庙岛群岛修建大型跨海大桥,兼有桥梁与隧道优点,也兼具桥梁与隧道的缺点。根据渤海海峡的地理位置,渤海海峡跨海通道若要建设桥隧衔接工程,将在渤海海峡北部岛屿进行。桥隧衔接工程建设需要较长的场地,按铁路隧道1.8%的纵坡要求,初步测算桥隧衔接部位需要4~5 km的长度,如丹麦厄勒海峡跨海通道的桥隧组合工程(铁路),中间人工岛长度达4 050 m。庙岛群岛北部北、南隍城岛及大、小钦岛的长度均不满足要求。若要在庙岛群岛北部建设桥隧衔接工程,将需要填海连岛建设桥隧衔接场地,此举施工将会对居民、海岸、植被及生态环境造成极大的破坏。

在进行跨海通道方案比选时,除考虑上述因素外,还应遵循以下几点原则。

1)跨海通道方案与工程技术应遵守确保建设全过程的安全风险最小,应按安全、可靠、适用、经济、先进的次序进行,这样的次序不可颠倒。盲目创新,追求新颖,缺乏科学实例证明的方案和技术是不可采用的。

2)工程规划、修建应遵守环境效益第一、社会效益第二、工程本身效益第三的次序进行评定,确

保建一个工程就给人民和后代留下精品遗产,不要留下让人唾骂的遗憾工程。

3)工程规划、修建应遵守少拆迁、少占地、少扰民、少破坏周边环境的原则。

### 3 渤海海峡跨海通道桥隧方案评价指标体系

对渤海海峡跨海通道3种固定式通道方案(全桥梁、全隧道及桥隧组合)建立比较评价的指标体系并建立比选评价模型进行方案比选及评价。桥隧方案比选涉及面广,影响因素多,依据公共投资项目的理论主要从技术、经济、环境和社会4个方面展开分析。

#### 3.1 评价指标体系的构建

方案比选是由相互联系、相互作用的若干要素构成的有机整体,可称为一个系统。在此,将方案比选这个复杂的问题分解为多个相互联系的组成部分或要素,构成一个有序的递阶层次结构,从而使其概念化、条理化、层次化。这一递阶层次结构包括目标层、准则层和指标层。

在搜集、整理相关文献资料、实地调研和专家咨询基础上,跨海通道全桥梁、全隧道及桥隧组合方案比选从技术、经济、环境和社会4个方面展开,本着科学性、可操作性和重要性等原则,以渤海海峡跨海通道为例构建技术、经济、环境和社会4个方面的指标。各层次的划分及内容见表1。

#### 3.2 评价指标体系指标权重的确定

为了体现各个指标在评价指标体系中的地位以及重要程度,在指标体系确定后,必须对各指标赋予不同的权重系数。下面采用层次分析法确定比较评价指标体系的权重。

依据跨海通道全桥梁和全隧道方案比较评价指标体系和层次分析法确定权重的原理,设计了跨海通道全桥梁和全隧道方案比较评价研究的问卷调查,以专家评分为基础构建两两比较的判断矩阵。在向有关专家和学者发放的28份问卷调查中,回收问卷16份,有效问卷14份。

##### 3.2.1 准则层各因素的权重

准则层包括技术因素、经济因素、环境因素和社会因素,对其进行两两比较构造比较判断矩阵如表2所示,其中 $a_{ij}$ 表示评价值,专家依据重要程度赋值,由14份专家问卷调查得到14个判断矩阵。



表1 跨海通道方案综合比较评价指标体系的递阶层次结构

Table 1 Hierarchical structure of comparative evaluation index system for cross-sea channel plan

目标层	准则层	指标层
跨海通道桥隧方案优选	技术因素	技术可实施性
		施工难度
		工程的耐久性
		工程的安全性
	经济因素	投资回收期
		财务内部收益率(IRR)
		经济内部收益率(EIRR)
		资金筹集难度
	环境因素	工程的景观效果
		对海洋及海洋生物的影响
		对航道及航运的影响
		受气候的影响
	社会因素	对工程周边居民的影响
		与城市规划的协调
		战备效益

表2 比较判断矩阵

Table 2 Comparison matrix

因素	技术因素	经济因素	环境因素	社会因素
技术因素	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$
经济因素	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	$a_{24}$
环境因素	$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$	$a_{34}$
社会因素	$a_{41}$	$a_{42}$	$a_{43}$	$a_{44}$

对所有问卷的专家赋值采用几何平均法进行处理,即令  $\bar{a}_{ij} = \sqrt[14]{\prod_{n=1}^{14} a_{ij}^{(n)}}$ , 最终得到一个综合了所有专家意见的比较判断矩阵  $M$  (见表3)。

表3 综合专家意见的比较判断矩阵

Table 3 Comparison matrix after experts' advice

因素	技术因素	经济因素	环境因素	社会因素
技术因素	1.000 0	0.514 8	0.724 2	2.536 3
经济因素	1.942 1	1.000 0	1.762 7	3.758 1
环境因素	1.380 7	0.567 3	1.000 0	2.761 6
社会因素	0.394 2	0.266 0	0.3620	1.000 0

矩阵  $M$  的特征值所对应的特征向量  $v$  的计算采用方根法:a. 求出矩阵  $M$  每一行的几何平均数,得

到  $\bar{v}_i = \sqrt[4]{\prod_{j=1}^4 a_{ij}}$ , 由于是4阶矩阵,所以  $n=4$ , 由此得到一个特征向量  $v = (\bar{v}_1, \bar{v}_2, \bar{v}_3, \bar{v}_4) = (0.986 1, 1.893 9, 1.212 7, 0.441 4)$ ; b. 将该向量归一化,即将向量中每一个元素除以  $\sum_{i=1}^4 \bar{v}_i$ , 由此得到一个新的向量  $v = (v_1, v_2, v_3, v_4) = (0.217 4, 0.417 6, 0.267 4, 0.097 3)$ , 且  $\sum_{i=1}^4 v_i = 1$ ,  $v_i$  表示一致性检验之前第  $i$  个元素在相应准则下的权重。向量中4个数值分别代表技术因素、经济因素、环境因素和社会因素在通道方案优选目标下的权重。通过权重可以看出,专家的综合意见为经济因素最重要,环境因素次之,再次是技术因素,最后是社会因素。

矩阵  $M$  最大特征值的计算采用公式  $\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^4 \frac{(Mv)_i}{nv_i}$ , 其中  $(Mv)_i$  表示向量  $Mv$  的第  $i$  个分量,  $v_i$  表示向量  $v$  的第  $i$  个分量。计算得到  $\lambda_{\max} = 4.015 4$ 。然后依据最大特征值计算出一致性检验指标  $CI$  为 0.005 1 和随机一致性指标  $RI$ , 得出一致性比例  $CR$  为 0.005 7。由于  $CR < 0.1$ , 可见判断矩阵具有较好的一致性。由此确定了准则层中4个方面的比较权重。

### 3.2.2 指标层各指标的权重

经计算,技术因素中各指标的权重及一致性检验结果如下:指标权重向量为  $u_1 = (0.217 0, 0.108 4, 0.328 6, 0.345 9)$ , 矩阵最大特征值  $\lambda_{\max} = 4.070 3$ ,  $CR = 0.026 < 0.1$ , 因此通过一致性检验。通过指标的权重可以看出,技术因素中各指标的重要性依次为工程的安全性、工程的耐久性、技术可实施性、施工难度。

经济因素中各指标的权重及一致性检验结果如下:指标权重向量为  $u_2 = (0.078 1, 0.253 3, 0.457 3, 0.211 1)$ , 矩阵最大特征值  $\lambda_{\max} = 4.101 2$ ,  $CR = 0.037 < 0.1$ , 因此通过一致性检验。通过指标的权重可以看出,经济因素中各指标的重要性依次为 EIRR、IRR、资金筹集难度、投资回收期。

环境因素中各指标的权重及一致性检验结果如下:指标权重向量为  $u_3 = (0.077 5, 0.313 7, 0.335 5, 0.273 1)$ , 矩阵最大特征值  $\lambda_{\max} = 4.02$ ,  $CR = 0.007 < 0.1$ , 因此通过一致性检验。通过指标的权重可以看出,环境因素中各指标的重要性依次为对航道及航运的影响、对海洋及海洋生物的影响、受气候的影响、工程的景观效果。

社会因素中各指标的权重及一致性检验结果如下:指标权重向量为 $u_4=(0.184\ 3, 0.483\ 6, 0.332\ 0)$ , 矩阵最大特征值 $\lambda_{\max}=3.059$ ,  $CR=0.051 < 0.1$ , 因此通过一致性检验。通过指标的权重可以看出, 社会因素中各指标的重要性依次为与城市规划的协调、战备效益、对工程周边居民的影响。

### 3.2.3 各指标的综合权重

由以上准则层相对于总目标的权重和指标层相对于准则层各指标的权重, 得出最后一层指标相对于总目标的权重, 如表4所示。

表4 跨海通道方案综合比较评价指标体系的权重  
Table 4 Weights of comparative evaluation index system for cross-sea channel plan

目标层	准则层	指标层	权重
跨海通道方案比选	技术因素 (0.217 4)	技术可实施性(0.217 0)	0.047 1
		施工难度(0.108 4)	0.023 5
		工程的耐久性(0.328 6)	0.071 4
		工程的安全性(0.345 9)	0.075 1
	经济因素 (0.417 6)	投资回收期(年)(0.078 1)	0.032 6
		IRR(0.078 1)	0.105 7
		EIRR(0.457 3)	0.190 9
		资金筹集难度(0.211 1)	0.088 1
	环境因素 (0.267 4)	工程的景观效果(0.077 5)	0.020 7
		对海洋及海洋生物的影响(0.313 7)	0.083 8
		对航道及航运的影响(0.335 5)	0.089 7
		受气候的影响(0.273 1)	0.073 0
社会因素 (0.097 3)	对工程周边居民的影响(0.184 3)	0.017 9	
	与城市规划的协调(0.483 6)	0.047 0	
	战备效益(0.332 0)	0.032 3	
1	1		1

因而得出跨海通道方案比较评价指标体系的权重集矩阵为

$W=(0.047\ 1, 0.023\ 5, 0.071\ 4, 0.075\ 1, 0.032\ 6, 0.105\ 7, 0.190\ 9, 0.088\ 1, 0.020\ 7, 0.083\ 8, 0.089\ 7, 0.073\ 0, 0.017\ 9, 0.047\ 0, 0.032\ 3)$ 。

## 4 渤海海峡跨海通道桥隧方案评价方法

跨海通道方案的优选存在许多模糊问题, 主要有:a. 各评价指标权重具有模糊性, 指标权重表示各指标的相对重要程度, 它的确定是通过专家的主观判断而定的, 而人的判断不自觉地采用模糊判断;

b. 各指标评分值具有模糊性, 指标的评分也是评价者通过主观判断而定的, 因而也具有模糊性;c. 评价结果具有模糊性, 评价结果不仅反映了被评价对象的排序情况, 而且反映了评价者对评价对象的认可程度, 由于各评价者对评价对象的认可程度的差异, 所以评价结果不应是一个唯一的量, 而应是一个模糊的量;d. 评价过程具有模糊性, 评价是对评价指标的评分值进行综合分析, 得到评价对象的综合评价的过程, 由于指标评分值及评价结果均是模糊量, 所以评价过程不能采用确定的方法, 而应是模糊的方法。针对上述问题, 采用模糊综合评价的方法对跨海通道方案进行比较评价<sup>[6]</sup>。

### 4.1 模糊综合评价

模糊综合评价就是以模糊数学为基础, 应用模糊关系合成的原理, 将一些边界不清, 不易量化的因素定量化, 进行综合评价的一种方法。它的特点是:a. 能定量地处理那些影响分析和决策的种种模糊因素, 使分析的结果更符合客观实际, 提高决策的科学性与准确性;b. 能充分考虑事物的中介过渡性质, 浮动地选取阈值, 从而能给出一系列不同水平或指标下的分析结果, 为人们的决策提供广泛的选择余地。该方法的缺点是在某些情况下, 隶属函数的确定有一定困难, 尤其是多目标评价模型, 要对每一个目标, 每一个因素确定隶属函数, 过于繁琐。

### 4.2 隶属度的确定

隶属度的确定是模糊综合评价的关键之一。由于部分指标难以定量确定隶属度值, 所以将评价指标分成两大类, 即定性指标和定量指标。当然, 能定量就最好用定量的方法。定性指标隶属度的推求采用模糊统计法; 定量指标的隶属度用模糊数学方法推求, 即用最大、最小隶属函数模型, 来模拟部分定量指标的隶属函数曲线。

#### 4.2.1 定性指标隶属度的确定<sup>[2]</sup>

本项目以问卷调查的形式请桥梁、隧道方面的专家对备选方案中技术因素、经济因素、环境因素和社会因素中的定性指标进行打分, 打分时并不要求给出具体的分值, 而是在5个评语级别“很好, 较好, 一般, 较差, 很差”上认为最合适的某一级别上打勾即可。打分时要求参阅具体资料, 力求打分客观、公正。然后依据隶属度赋值标准(见表5), 对各专家的评语集进行统计分析从而得出定性指标的隶属度。

表5 隶属度赋值标准

**Table 5 Assignment criterion of membership grade**

	很好	较好	一般	较差	很差
效益型指标	1.0	0.8	0.5	0.2	0
成本型指标	0	0.2	0.5	0.8	1

4.2.2 定量指标隶属度的确定

各定量指标可能存在正逆不同、量纲不同、性质不同,需要通过制定评分标准对指标数据进行标准化处理。根据国内外同类型项目的最先进的指标值或有关客观标准为评价标准,项目采用最大、最小隶属函数模型来模拟部分定量指标的隶属函数曲线,即采用升半梯形分布隶属函数曲线和降半梯形分布隶属函数曲线。对越大越好的定量指标,采用升半梯形分布隶属函数曲线确定其隶属度;对越小越好的定量指标,采用降半梯形分布隶属函数曲线确定其隶属度。

升半梯形分布函数为

$$\mu(u) = \begin{cases} 1, & u \geq b; \\ \frac{u-a}{b-a}, & a < u < b; \\ 0, & u \leq a \end{cases} \quad (1)$$

降半梯形分布函数为

$$\mu(u) = \begin{cases} 1, & u \leq a; \\ \frac{u-a}{b-a}, & a < u < b; \\ 0, & u \geq b \end{cases} \quad (2)$$

式(1)~式(2)中,  $a$ 、 $b$  分别是隶属度函数的上、下界。上、下界的选取对隶属度函数值的确定有一定的影响,在实际工作中应结合工程项目及评价指标

的具体情况研究确定。

4.3 跨海通道方案的模糊综合评价

4.3.1 给出备择的对象集

根据渤海海峡跨海通道实际情况,确定的全桥梁、全隧道及桥隧组合3个方案构成的备择集为

$$X = \{\text{全桥梁 I, 全隧道 II, 桥隧组合 III}\}$$

4.3.2 确定方案评价的因素集

根据前面所述的跨海通道方案比选的影响因素和构建的评价指标体系,确定方案比较评价的因素集为

$$U = \{\text{技术可实施性, 施工难度, 工程的耐久性, 工程的安全性, 投资回收期, IRR, EIRR, 资金筹集难度, 工程的景观效果, 对海洋及海洋生物的影响, 对航道及航运的影响, 受气候的影响, 对工程周边居民的影响, 与城市规划的协调, 战备效益}\}$$

4.3.3 确定评价集

根据渤海海峡跨海通道要求和条件确定的几个可行方案构成方案评价的备择集为

$$V = \{\text{很好, 较好, 一般, 较差, 很差}\}$$

4.3.4 确定隶属度

1) 定性指标的隶属度。定性指标共有12个,其隶属度以问卷调查的方式请专家直接给出。在有关专家和学者发放的28份问卷调查中,回收问卷16份,其中有效问卷14份。通过对各专家的评语集进行统计分析可以得出定性指标的隶属度。全桥梁方案、全隧道方案、桥隧组合方案中定性指标的专家评价及指标的隶属度见表6~表8。

表6 全桥梁方案中定性指标隶属度评分

Table 6 Scores of membership grade for qualitative index of full bridge plan

全桥梁方案	14位专家确定的隶属度值														隶属度平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
技术可实施性	0.8	0.8	1	1	0.8	0.8	1	1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.857 1
施工难度	0.5	0.8	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	1	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	0.642 9
工程的耐久性	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	0.5	0.5	0.5	0.2	0.5	0.2	0.5	0.2	0.2	0.392 9
工程的安全性	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.8	0.5	0.8	1	0.8	0.642 9
资金筹集难度	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2	0.5	0.2	0.5	0	0.5	0.5	0.2	0.5	0.2	0.335 7
工程的景观效果	0.8	0.8	0.8	0.8	1	1	1	1	0.8	1	0.8	1	0.8	0.8	0.885 7
对海洋及海洋生物影响	0.2	0.2	0.2	0	0.2	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.171 4
对航道及航运的影响	0.2	0.5	0.2	0	0.2	0.2	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.192 9
受气候的影响	0	0.2	0	0	0	0	0	0.2	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.100 0
对工程周边居民的影响	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.5	0.5	0	0.2	0.5	0.2	0.2	0.357 1
与城市规划的协调	0.5	0.2	0.2	0	0.2	0	0	0.5	0.5	0	0.2	0.5	0.2	0.5	0.250 0
战备效益	0	0.2	0	0	0	0	0.2	0.2	0.5	0.2	0.2	0.2	0	0.5	0.157 1

表7 全隧道方案中定性指标隶属度评分  
Table 7 Scores of membership grade for qualitative index of full tunnel plan

全隧道方案	14位专家确定的隶属度值														隶属度 平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
技术可实施性	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.8	0.8	0.5	0.5	0.5	0.2	0.8	0.5	0.564 3
施工难度	0.5	0.2	0.2	0.5	0.2	0.5	0.2	0.2	0.5	0	0.2	0.2	0.2	0.5	0.292 9
工程的耐久性	0.8	0.8	1	1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1	1	0.8	0.857 1
工程的安全性	0.2	0.2	0.5	0.2	0.5	0.2	0.5	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	0.2	0.5	0.328 6
资金筹集难度	0.5	0.8	0.5	0.5	0.8	0.8	0.8	0.5	0.2	0.8	0.5	0.5	0.5	0.8	0.607 1
工程的景观效果	0.2	0.5	0.2	0	0.2	0	0.2	0.2	0.5	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.200 0
对海洋及海洋生物的影响	0.8	0.8	0.8	1	1	1	1	0.8	0.8	1	0.5	0.8	0.5	0.8	0.828 6
对航道及航运的影响	0.8	1	1	1	1	0.8	1	0.8	0.8	1	0.8	1	0.8	0.8	0.900 0
受气候的影响	1	0.8	0.8	1	1	0.8	1	1	0.8	0.8	0.8	1	0.8	0.8	0.885 7
对工程周边居民的影响	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.5	0.2	0.5	0.478 6
与城市规划的协调	0.8	0.5	0.5	0.8	0.5	0.8	0.8	0.8	0.2	0.5	0.5	0.8	0.8	0.5	0.628 6
战备效益	0.5	0.8	1	1	1	1	0.5	0.5	0.8	0.8	0.8	1	0.5	0.8	0.785 7

表8 桥隧组合方案中定性指标隶属度评分  
Table 8 Scores of membership grade for qualitative index of bridge and tunnel plan

桥隧组合方案	14位专家确定的隶属度值														隶属度 平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
技术可实施性	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.8	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5	0.585 7
施工难度	0.5	0.2	0.5	0.5	0.2	0.5	0.2	0.2	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.328 6
工程的耐久性	0.5	0.8	0.5	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5	0.8	0.5	0.5	0.8	0.607 1
工程的安全性	0.5	0.2	0.5	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	0.5	0.5	0.8	0.5	0.500 0
资金筹集难度	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	0.5	0.8	0.5	0.2	0.5	0.5	0.2	0.5	0.5	0.457 1
工程的景观效果	0.8	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.8	0.5	0.2	0.8	0.5	0.585 7
对海洋及海洋生物的影响	0.5	0.8	0.5	0.8	0.8	0.8	0.5	0.5	0.8	1	0.5	0.8	0.5	0.8	0.685 7
对航道及航运的影响	0.8	1	0.5	0.8	0.5	0.8	1	0.8	0.8	1	0.8	1	0.8	0.8	0.814 3
受气候的影响	0.5	0.8	0.2	0.5	1	0.8	1	0.5	0.8	0.5	0.8	1	0.8	0.2	0.671 4
对工程周边居民的影响	0.5	0.2	0.5	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.5	0.2	0.5	0.5	0.2	0.5	0.414 3
与城市规划的协调	0.2	0.5	0.5	0.8	0.5	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5	0.500 0
战备效益	0.5	0.8	0.2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5	0.8	0.8	0.5	0.8	0.585 7

2)定量指标的隶属度。项目中定量指标有投资回收期、IRR 和 EIRR,采用升半梯形分布函数和降半梯形分布函数确定定量指标的隶属度。隶属

度函数中上、下界依据基础设施项目的特点和国内同类跨海通道工程的实际情况以及社会各行业的平均水平确定。定量指标隶属度如表9所示。

表9 定量指标的隶属度  
Table 9 Membership grade of quantitative index

定量指标名称	隶属函数	参数 $a, b$	隶属度		
			全桥梁	全隧道	桥隧组合
投资回收期(年)	降半梯形分布函数	$a=5, b=25$	0.510 0	0.709 0	0.610 0
IRR	升半梯形分布函数	$a=4\%, b=15\%$	0.285 4	0.726 3	0.450 1
EIRR	升半梯形分布函数	$a=12\%, b=25\%$	0.535 3	0.347 6	0.449 2



#### 4.3.5 单因素模糊评价

单因素模糊评价是指单独从一个因素出发进行评判,以确定被评价的方案对评价集元素的隶属程度。将各单因素按评判集各单因素模糊集的隶属函数式可分别换算出各单因素的隶属度 $r_{ij}$ ,可得到对应的经归一化处理的隶属度矩阵

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

#### 4.3.6 模糊综合评价

单因素模糊评价仅反映了一个因素对评价对象的影响,局限性很大;而多因素模糊综合评价可考虑所有因素的影响,得出相对正确的评价结果。考虑各个因素权重以后的评价矩阵要通过模糊矩阵合成运算推求,若以 $B$ 表示合成运算后多因素模糊评价集矩阵,则有

$$B = W \cdot R \quad (4)$$

或

$$(b_1, b_2, \dots, b_m) = (w_1, w_2, \dots, w_n) \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式(4)~式(5)中, $W$ 为权重集矩阵; $R$ 为单因素评价矩阵;“ $\cdot$ ”表示模糊运算符。将采用加权平均型算法。模糊评价集矩阵 $B$ 表示方案多因素的综合评价,它的大小表明方案综合评价的优劣,作为方案优选的依据。

由表6~表9可以得出跨海通道全桥梁、全隧道及桥隧组合方案指标体系中各因素的评价矩阵 $R^0$ 为

$$R^0 = \begin{pmatrix} 0.8571 & 0.5643 & 0.5857 \\ 0.6429 & 0.2929 & 0.3286 \\ 0.3929 & 0.8571 & 0.6071 \\ 0.6429 & 0.3286 & 0.5000 \\ 0.5100 & 0.7090 & 0.6100 \\ 0.2854 & 0.7263 & 0.4501 \\ 0.5353 & 0.3476 & 0.4492 \\ 0.3357 & 0.6071 & 0.4571 \\ 0.8857 & 0.2000 & 0.5857 \\ 0.1714 & 0.8286 & 0.6857 \\ 0.1929 & 0.9000 & 0.8143 \\ 0.1000 & 0.8857 & 0.6714 \\ 0.3571 & 0.4786 & 0.4143 \\ 0.2500 & 0.6286 & 0.5000 \\ 0.1571 & 0.7857 & 0.5857 \end{pmatrix}$$

结合层次分析法确定的指标体系权重集矩阵 $W$ ,全桥梁、全隧道及桥隧组合方案的模糊综合评价

为

$$B = W \cdot R^0 = (0.3909, 0.6215, 0.5512)$$

因此,全桥梁方案、全隧道方案及桥隧组合方案的模糊综合评价值依次为0.3909、0.6215及0.5512。依据最大隶属度原则,全隧道方案为最优。因而运用模糊综合评价法得出的结论是建议在渤海海峡跨海通道采用全隧道方案。

## 5 结语

1)单从技术角度考虑,桥隧方案都具有实施的可行性。全隧道的优点是不侵占航道净空、不破坏航运、对海域生态环境影响小、利于环境保护、岸线资源占用少、接线与拆迁量少、气候适应性好、可全天候运行、抗震性好、具有较强的抗战争破坏和自然灾害的能力,在这些方面明显优于桥梁。而桥梁则在通行能力、施工难度和风险、运营成本、行车舒适性、景观效果等方面优于隧道。桥隧衔接工程建设需要较长的场地,初步测算桥隧衔接部位需要4~5 km的长度。庙岛群岛北部北、南隍城岛及大、小钦岛的长度均不满足要求。

2)按照公共投资项目比选理论,运用层次分析法建立了渤海海峡跨海通道比较评价的指标体系,构建了渤海海峡跨海通道的模糊综合评价模型。

3)充分发挥桥隧专家智慧,采用专家咨询和调查问卷的方式获得了渤海海峡跨海通道方案比较评价的基础数据(包括指标体系中各指标的权重系数和模糊隶属度),运用模糊综合评价模型对渤海海峡跨海通道方案进行了比较评价。全桥梁、桥隧组合及全隧道方案的综合评价值依次增大,渤海海峡跨海通道采用全隧道方案为最优。

### 参考文献

- [1] 魏礼群,柳新华.渤海海峡跨海通道若干重大问题研究[M].2版.北京:经济科学出版社,2009.
- [2] 宋克志,姜爱国,王梦恕.渤海海峡跨海通道“南桥北隧”方案初步研究[J].隧道建设,2011,31(5):536-542.
- [3] 宋克志,王梦恕.国内外水下隧道修建技术发展动态及其对渤海海峡跨海通道建设的经验借鉴[J].鲁东大学学报:自然科学版,2009,25(2):182-187.
- [4] 王梦恕.水下交通隧道发展现状与技术难题——兼论“台湾海峡海底铁路隧道建设方案”[J].岩石力学与工程学报,2008,27(11):2161-2172.
- [5] 刘鸿雁.宁波象山港跨海通道桥隧方案技术经济评价及比选研究[D].杭州:浙江大学,2007.
- [6] 张敏.跨海通道桥梁和隧道方案比较评价研究——以青岛胶州湾口跨海通道为例[D].青岛:青岛科技大学,2008.



# Study on scheme comparison of bridge and tunnel for Bohai Strait cross-sea channel

Song Kezhi

(School of Civil Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China)

**[Abstract]** Aspects of bridge and tunnel are analyzed and their characteristics are compared, such as aviation and shipping, traffic capacity and driving comfort, road safety and climate adaptability, construction difficulty and project risk, etc. Technically, schemes of bridge and tunnel are both workable. Tunnel scheme is privilege to bridge scheme on aviation, shipping, climate adaptability, ecological environment and so on. While bridge scheme has advantages over tunnel scheme on traffic capacity, construction difficulty and risk, operating costs, driving safety, driving comfort, landscape and so on. Comparative evaluation index system for Bohai Strait cross-sea channel is structured by analytic hierarchy process. And weight coefficients of every index are calculated. Membership grade of every qualitative index is calculated by experts scoring method and membership grade of every quantitative index is calculated by membership grade function. Finally, model of fuzzy comprehensive evaluation is used to calculate comprehensive evaluation value of full bridge scheme, full tunnel scheme and combination scheme of bridge and tunnel. Comprehensive evaluation value of full tunnel scheme is maximum and the full tunnel scheme is the recommended scheme for Bohai Strait cross-sea channel.

**[Key words]** bridge and tunnel engineering; cross-sea channel; Bohai Strait; scheme comparison; fuzzy comprehensive evaluation