

# 土耳其博斯普鲁斯海峡三桥 大偏转吊索定位器的设计

李启富 石伟 华剑平 谢正元

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

**摘要:**土耳其博斯普鲁斯海峡三桥吊索的大偏转角度,要求设计定位器,来保护索体。本文对定位器的选材、结构进行设计,通过理论计算、ANSYS分析来验算定位器的性能,对索体的保护作用。

**关键词:**大偏转角度 定位器 ANSYS分析

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2015.02.002

## 1 绪论

2015年,博斯普鲁斯海峡,这条世界著名的欧亚分界线,也是世界上最繁忙的海峡之一,将矗立起第三座欧亚大桥,它的新名字叫做“苏丹塞利姆大桥”(Yavuz Sultan Selim),也被称为“博斯普鲁斯海峡三桥”。博斯普鲁斯海峡三桥是北马尔马拉高速公路项目的一部分,连接欧洲的Garipce地区与亚洲的Poyrazkoy地区,当新的桥梁完成后,博斯普鲁斯海峡三桥综合产能将达到250000辆/日。

第三博斯普鲁斯海峡大桥,是斜拉-悬索协作体系的公铁两用跨海大桥,斜拉-悬索协作体系能大大增加大跨度桥梁的风动稳定性,桥面荷载主塔附近主要由斜拉索支撑,桥面中间部分主要由悬索系统来支撑,能极大的提高桥梁的整体刚度,有利于桥梁结构的动力稳定性。

第三博斯普鲁斯海峡大桥全长2.16公里,桥设计主跨1408m,设有八个机动车车道以及两个铁路车道,桥宽59m,是世界上最宽的大桥,其322m高的塔是世界上最高主塔。



图1 土耳其博斯普鲁斯海峡三桥效果图

## 2 课题来源

博斯普鲁斯海峡三桥,是由T-engineering sa

civil engineering Geneva Switzerland公司的法国设计师 Michel Virlogeux and Jean-Francois Klein设计<sup>[1]</sup>,由于其跨度大,桥面宽,双线公路车道横挑出主塔,由软件模拟出桥在各种不同的载荷状况及风、温度等影响因素共同作用下,吊索会产生很大的偏转角度,其偏转角度超出一般悬索桥吊杆的偏转角度,因此需要在吊索上设计定位器,以适应在大偏转角度下,吊索索体的安全,及其自身的安全可靠性。

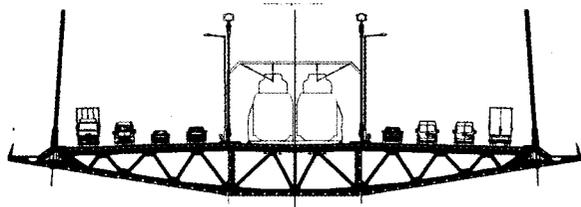


图2 土耳其博斯普鲁斯海峡三桥横截面图

### 2.1 设计吊索参数

BB3桥的吊索采用 $\phi 7$ 镀锌钢丝,强度为1770MPa,规格分别为109、121、127、139、223、349、367共7种规格。吊索两端均采用冷铸锚,一端采用叉耳连接,另一端采用锚杯螺母锚固。

#### 2.1.1 吊索应力

根据土耳其博斯普鲁斯海峡三桥设计文件<sup>[1]</sup>,所给出的参数,吊索在不同组合下的应力如表1所示:

由表可以看出吊索的SLS freq max载荷由7-109的2375kN到7-367的7130kN之间变化。

表1 吊索应力表

吊索编号	规格 $\phi$ 7mm	吊索长度 (mm)	面积 (mm <sup>2</sup> )	恒载P (kN)	SLSmax (kN)	SLS freq max (kN)
H12	223	108764	8582	1895	4828	3354
H13	127	99802	4888	1896	3144	2413
H14	127	90954	4888	1903	3132	2414
H15	109	82252	4195	1900	3028	2375
H16	109	73819	4195	1900	3076	2396
H17	109	65683	4195	1899	3103	2410
H18	109	57883	4195	1901	3106	2416
H19	121	50458	4657	1896	3114	2444
H20	121	43443	4657	1893	3120	2358
H21	139	36892	5349	1893	3209	2526
H22	223	30830	8582	1890	3440	2448
H23	349	25374	13431	5656	8680	6656
H24	367	20849	14124	5661	8849	6875
H25	367	17264	14124	5665	8916	7003
H26	367	14617	14124	5667	8976	7078
H27	367	12903	14124	5668	9002	7114
H28	367	12126	14124	5669	9019	7130

## 2.1.2 吊索偏移角度

根据土耳其博士普鲁斯海峡三桥设计文件<sup>[1]</sup>, 给出在SLS状态下的最大偏转角 $\theta_x$ 与 $\theta_y$ , 计算出空间转角 $\omega$ 。明细如表2所示, 计算公式

如下:

$$\omega = \arctan (\tan (\theta_x) / \cos (\theta_y))$$

吊索的空间转角在SLS freq max载荷由14.63~36.33mrad之间变化。空间转角较大。

表2 吊索偏角表

吊索编号	规格	SLSmax状态下			SLS freq max状态下		
		x向偏角(mrad)	y向偏角(mrad)	空间转角 $\omega$ (mrad)	x向偏角(mrad)	y向偏角(mrad)	空间转角 $\omega$ (mrad)
H12	223	29.23	16.65	29.23	14.63	10.28	14.63
H13	127	32.15	17.96	32.16	16.09	11.43	16.09
H14	127	35.20	19.04	35.21	17.62	12.35	17.62
H15	109	38.43	19.97	38.44	19.23	13.13	19.23
H16	109	41.76	20.79	41.77	20.89	13.79	20.89
H17	109	45.17	21.47	45.18	22.60	14.32	22.60
H18	109	48.60	21.97	48.61	24.31	14.68	24.31
H19	121	52.04	22.27	52.05	26.03	14.86	26.03
H20	121	55.43	22.21	55.44	27.73	14.71	27.73
H21	139	58.74	21.82	58.75	29.38	14.27	29.38
H22	223	61.91	21.15	61.92	30.97	13.58	30.97
H23	349	63.96	19.67	63.97	32.00	12.44	32.00
H24	367	66.68	17.26	66.69	33.35	10.42	33.35
H25	367	68.89	13.79	68.90	34.46	7.65	34.46
H26	367	70.60	10.91	70.60	35.32	5.40	35.32
H27	367	71.84	8.41	71.84	35.94	4.43	35.94
H28	367	72.62	8.77	72.62	36.33	4.00	36.33

### 3 定位器的设计

#### 3.1 对定位器的技术要求

对于拉索的弯曲疲劳性能试验,标准给出了弯曲疲劳角度,根据acceptance of Stay Cable System Using Prestressing Steels (FIB)标准<sup>[2]</sup>要求的弯曲度10mrad,拉索满足弯曲疲劳性能;本桥拉索在荷载作用下发生偏转时,弯曲角度最大达到36.33mrad,远大于标准要求。

因此本桥要求在锚固段设置定位器,定位器设计应充分考虑拉索在施工和运营期间拉索的最大拉力和夹角所产生的横向应力,定位器尽可能的减少拉索垂度变化和结构变形所产生的横向弯曲应力,尽可能的避免摩擦腐蚀。

#### 3.2 定位器的材料选择及结构设计

(1) 材料选择:定位器的定位块材料经比选采用尼龙,尼龙的主要力学性能如表3:

表3 尼龙的主要力学性能表

项目	数值	项目	数值
密度g/cm <sup>3</sup>	1.14	悬臂梁冲击强度, J/m	40
拉伸强度, MPa	80.0	屈服强度MPa	54.88
伸长率, %	60	热导率, W/m. °C	0.34
弯曲强度, MPa	127	阻燃性UL94	V-2
弹性模量, GPa	28.3	吸水率24h, %	1.3
泊松比μ	0.4	洛氏硬度R	118

尼龙材料的弹性模量为28.3GPa,是钢材弹性模量的0.14倍,是HDPE的35倍。材料在受压时,因为其弹性模量较大,在发生偏转时,定位器在受压状态下不会发生大的位移变化。

索体护套HDPE材料的主要力学性能如表4<sup>[3]</sup>

表4 HDPE材料的力学性能

项目	数值	项目	数值
相对密度	0.942~0.965	冲击强度, kJ/m	≥25
硬度	≥50	拉伸强度, MPa	≥25
成型收缩率, %	2.0	屈服强度MPa	≥15
弹性模量, MPa	800	泊松比μ	0.41

(2) 结构设计:在索体、定位器安装时,要尽量将索体定位器调整至预埋管的中心。考虑定位器的安装,定位器的设计如图3所示。

#### 3.3 定位器的验算及分析:

(1) 拉索发生偏转时定位器受索体压力作

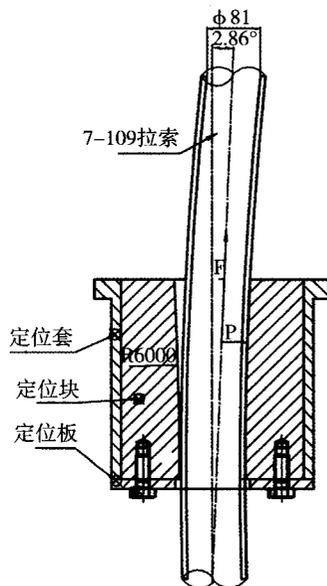


图3 索体发生偏移时定位器的受力分析图

用,其压力大小及产生的应力的受力分析及计算公式如下:

$$\sigma = P/S \quad (1)$$

$$P = F \cdot \sin\theta \quad (2)$$

$$S = L \cdot d \quad (3)$$

式中 $\sigma$ —索体发生偏转时对定位块的压应力。

$P$ —索体对定位器压力;

$S$ —吊索钢丝截面积;

$F$ —索体的拉力(3106kN见表1-[1]);

$\theta$ —索体摆动角度(1.4°);

$L$ —定位器的工作弧长(300mm);

$d$ —索体钢丝束直径( $\phi 81$ );

代入数值算得应力 $\sigma = 3.12\text{MPa}$ 。

计算所得的应力数值远小于索体材料的屈服强度值(索体HDPE材料的抗拉强度大于25MPa,屈服强度大于15MPa(参数详见表4),拉索钢丝抗拉强度1770MPa)及定位器材料的屈服强度值(尼龙其抗拉强度80MPa,屈服强度54.88MPa),材料满足使用要求。

(2) 拉索发生偏转时,所产生的弯曲应力,(索体中钢丝假定是可以相互滑动的),在计算弯曲应力时用单根钢丝模型进行计算<sup>[4]</sup>。计算公式如下:

$$V_m = d/2R \cdot E$$

式中 $V_m$ —弯曲应力;

$d$ —钢丝直径为7mm;

$R$ —弯曲半径为6m;

$E$ —钢丝弹性模量,取 $2.0 \times 10^5$ MPa。

将数值代入公式算得 $V_m=116.7$ MPa。计算所得的应力值远小于索体钢丝材料的抗拉强度值。

3.4 我们利用ANSYS有限元分析软件模拟定位器受带PE拉索压力时的工况,计算其压应力及体系位移数据,本文选取H-18吊索进行分析。

#### 3.4.1 体系ANSYS有限元分析条件

##### a 模型尺寸:

按照计算结果及相关数据建立模型,定位器内孔尺寸取最大值 $\phi 114$ mm,拉索外径 $\phi 97$ mm,钢丝束简化为一整体钢棒形式,钢棒直径 $\phi 81$ mm。

##### b 材料参数:

中心钢棒弹性模量取 $E=200$ GPa,泊松比 $\mu=0.3$ ;钢棒外PE弹性模量取 $E=800$ MPa,泊松比 $\mu=0.41$ 。定位器尼龙材料的弹性模量取 $E=28300$ MPa,泊松比 $\mu=0.4$ 。

##### c 加载:

在PE上端面取一小面积,在这个小面积上加钢丝拉索分力 $P=75.88$ kN。

有限元分析模型如图4:



图4 单元划分后的定位器模型示意图

#### 3.4.2 体系ANSYS压应力分析

体系所受的应力分布图,如图5、6所示。

通过上述的计算所得出的应力值,图5中最大应力值(18.195MPa)位置位于索体钢丝上,而索体HDPE所受应力值如图6所示,通过图5、6可以说明索体发生偏转时作用在定位块材料和

HDPE材料上的应力值都小于材料的屈服强度值。说明在索体发生偏转时索体HDPE材料与定位器材料都不会产生破坏,索体与定位器都满足使用要求,定位器能够很好的起到保护吊杆的作用。

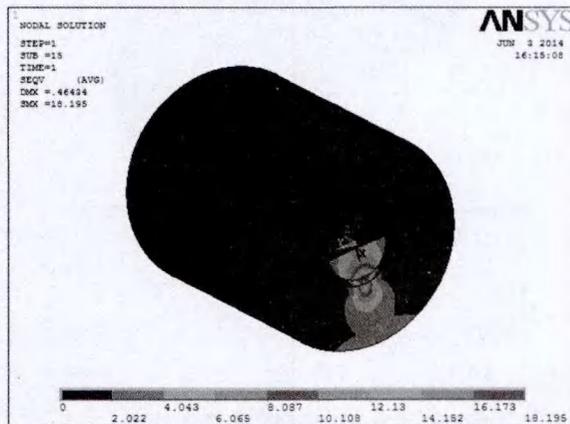


图5 结构所受Mises应力云图

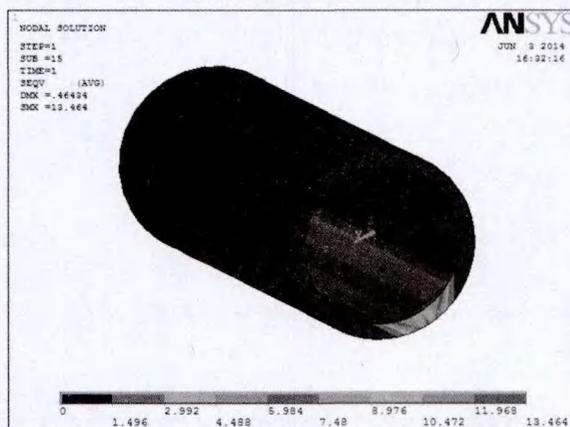


图6 结构中PE所受Mises应力云图

#### 4.3.3 体系ANSYS位移分析

通过ANSYS建模计算出,索体发生偏转时,定位块、索体PE的位移变形量如图7、8所示。

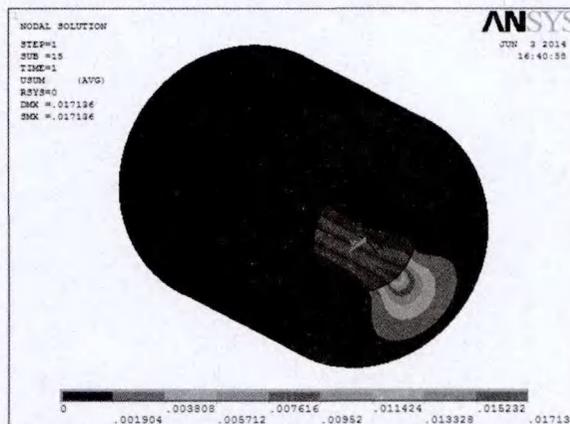


图7 结构中定位块位移云图

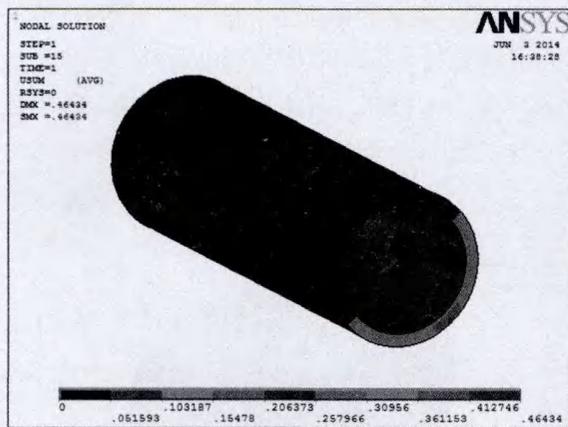


图8 结构中PE位移云图

由图可以说明在索体发生偏转时定位块的最大位移为0.017mm,设计的定位板与定位块距离7.5mm,因此索体发生偏转时索体不会碰到定位板;PE的最大位移0.46mm,在PE变形收缩量的范围内;因此索体发生偏转时,PE材料不会因为变形位移而受破坏,定位块材料的变形量不大,索体不会碰到定位钢板避免摩擦腐蚀,因此定位器能起到很好的保护索体的目的。

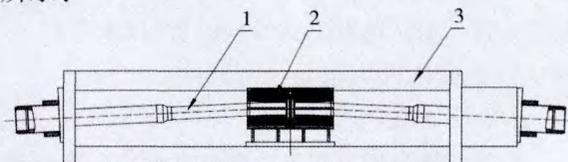
#### 4 吊索定位器的试验方案设计

通过上面的理论计算,定位器能够满足使用要求,能很好的起到保护索体的作用,但还需要

进行试验进一步验证理论计算的可靠性。

#### 4.1 静载试验

吊索静载试验以验证吊索在SLSmax状况下吊索及定位器的安全性能,建议采用H28吊索进行试验,(吊索H28 SLSmax力最大(9019kN),空间转角最大(72.62mrad)),试验布置如图9所示:



1、试验φ7-367cable 2、deviator 3、静载试验架

图9 PES7-367吊索定位器静载试验安装结构图

#### 4.2 疲劳试验

##### 4.2.1 试验参数确定

根据土耳其博士普鲁斯海峡三桥设计文件,对定位器的附加试验。试验时吊索的拉力取恒载与SLS freq max的平均值。即:

$$\sigma = \frac{P(\text{恒载}) + SLSfreqmax}{2 \times S}$$

S为吊索钢丝截面积。

对全桥吊索的试验拉力及偏转角度如表5所示:

表5 吊索的试验拉应力σ及试验转角α

吊索编号	规格	空间转角ω(mrad)	恒载(kN)	SLS freq max(kN)	试验拉应力σ	σ/σ <sub>GUTS</sub> 比值	试验转角α
H12	223	14.63	1895	3354	305.81	0.17	14.63
H13	127	16.09	1896	2413	440.77	0.25	16.09
H14	127	17.62	1903	2414	441.59	0.25	17.62
H15	109	19.23	1900	2375	509.54	0.29	19.23
H16	109	20.89	1900	2396	512.04	0.29	20.89
H17	109	22.60	1899	2410	513.59	0.29	22.60
H18	109	24.31	1901	2416	514.54	0.29	24.31
H19	121	26.03	1896	2444	465.97	0.26	26.03
H20	121	27.73	1893	2358	456.41	0.26	27.73
H21	139	29.38	1893	2526	413.07	0.23	29.38
H22	223	30.97	1890	2448	252.74	0.14	30.97
H23	349	32.00	5656	6656	458.34	0.26	32.00
H24	367	33.35	5661	6875	443.78	0.25	33.35
H25	367	34.46	5665	7003	448.46	0.25	34.46
H26	367	35.32	5667	7078	451.18	0.25	35.32
H27	367	35.94	5668	7114	452.49	0.26	35.94
H28	367	36.33	5669	7130	453.09	0.26	36.33

根据表5的计算结果,其中吊索 H15-H18的试验拉应力 $\sigma/\sigma_{GUT}$ 最大,对定位器的疲劳试验的影响最大。因此建议按吊索H18的吊索参数进行试验(吊索H18是吊索H15-H18中试验转角最大)。即试验吊索按H18,规格为7-109,试验拉力为 $0.29\sigma_{GUT}$ ,试验转角 $\alpha_{max}$ 为 $24.31\text{mrad}$ ,试验角度为 $(-\alpha, \alpha)$ ,按200万次疲劳试验后对索体及定位器进行外观检查。

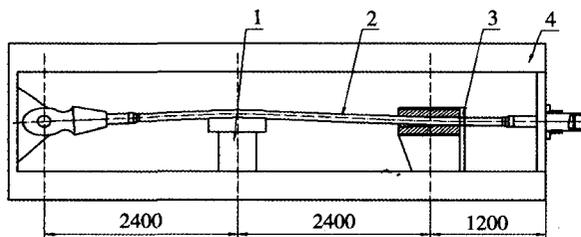
#### 4.2.2 试验方案的选择

##### (1) 推荐方案

根据CIP第6.2.3.2(60-61页),在触动器的位置转向处<sup>[5]</sup>(如图10所示),其 $\omega = 2 \times 24.31 = 48.62\text{mrad}$

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= 2\omega\sqrt{E\sigma} \\ &= 2 \times 48.62 \div 1000 \times \sqrt{200000 \times 0.29 \times 1770} \\ &= 985\text{MPa}\end{aligned}$$

其外层钢丝的应力幅不小于 $985\text{MPa}$ (0.557),再加上拉应力 $513.3\text{MPa}$ (0.29),其最大应力达 $1498.3\text{MPa}$ (0.846),对索体钢丝绳为不利,在实桥中也不会出现在索体中部产生较大的外作用力。



1、触动器 2、试验 $\phi 7-109$ cable 3、deviator 4、疲劳试验架

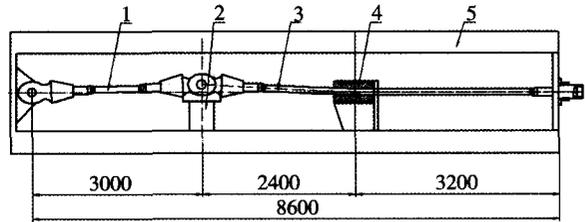
图10 PES7-109定位器弯曲疲劳试验安装结构图

##### (2) 建议方案

为减小索体在疲劳试验中先行破坏的风险,建议按以下方案进行试验布置,以消除触动器转向造成吊索钢丝的超大拉应力如图11所示,此外在实桥中吊索所产生的偏角是由吊索两端锚具的相对位移而产生,该试验结构较为接近实桥结构。

## 5 结论

博斯普鲁斯海峡三桥,跨度大,桥面宽,在



1、辅助吊索 2、触动器 3、试验 $\phi 7-109$ cable  
4、deviator 5、疲劳试验架

图11 PES7-109定位器弯曲疲劳试验安装结构图

不同载荷及其它影响因素下,吊索发生较大的偏移角度,远超出吊索标准试验的疲劳弯曲角度。在吊索上设置定位器,以保障在索体发生大的偏转角度时,吊索能满足疲劳性能要求。本文通过对定位器结构、选材、受力进行分析得出以下结论:

(1) 选择尼龙做定位器材料,能够很好的满足定位器的使用要求;

(2) 通过对吊索定位器的计算,桥在发生大偏转时,定位器的选材及结构能很好的起到保护索体的作用,能够满足使用要求;

(3) 通过ANSYS分析可以知道吊索在发生偏转时,定位器的结构能够满足使用要求,很好的起到保护索体的作用;

(4) 定位器的实际使用状况,将在进一步的试验中来验证。

## 参考文献

- [1] Third Bosphorus Bridge Design report Hangers-rotations at level.REPUBLIC OF TURKEY Ministry of Maritime Affairs And Communication, 2013.03.04
- [2] FIB .acceptance of Stay Cable System Using Prestressing Steels [M]. FIB:[S.n.], 2005
- [3] GB/T 18365-2001 斜拉桥热挤聚乙烯高强度钢丝拉索技术条件[S].
- [4] 徐栋. 桥梁体外预应力设计技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2008.10
- [5] SETRA.Cable Stays Recommendations of French Interministerial Commission on Prestressing[S].Paris:SETRA,2002