

# 悬索桥新型吊索的设计及应用

黄子能 冯新宽 邹全 彭春阳 黄家珍 李启富

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

**摘要:** 本文结合南宁英华大桥的实际情况, 针对悬索桥常规销接式吊索和锚头承压式吊索存在的局限性, 研发一种采用新型销接式结构和调节装置的吊索, 来满足南宁英华大桥吊索的使用和施工要求。文中主要介绍了销接结构、新型调节装置和吊索张拉方案的设计过程, 并通过在南宁英华大桥的应用, 证实了新型吊索的可行性。

**关键词:** 悬索桥 吊索 结构设计 销接结构 新型调节装置

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2016.01.003

## 1 工程概况

南宁英华大桥是双塔单主缆悬索桥, 主桥为三跨连续钢箱梁地锚式悬索桥, 主跨410m, 跨径组成为20m+150m+410m+150m+20m, 大桥道路等级为城市主干路I级, 计算行车速度60km/min, 双向6车道, 是南宁市首座悬索桥, 主桥效果图见图1。英华大桥起于西岸凤亭路, 上跨亭江路, 向东跨越邕江, 是连接江南片区和柳沙片区的一条便捷交通要道。主桥效果图见下图1所示。



图1 南宁市英华大桥效果图

## 2 吊索的研究

吊索是悬索桥关键的承重构件, 它将主梁的载荷传递到主缆上, 因此, 悬索桥吊索与加劲梁的连接型式应传力直接, 安全可靠, 检修方便, 施工简单。目前, 悬索桥吊索的常规型式有锚头承压式(如图2)和销接式(如图3); 在实际使用过程中, 悬索桥需要体系转换时, 常规型式的吊索都存在着一一定的局限性。

其中, 锚头承压式吊索(如图2)的局限性体现为: (1) 可以通过球形垫板8和球形螺母9进行微小角度的调整, 且通过锚杯10的螺纹进行长度的调整, 但是受到预埋管和箱梁尺寸限制;

(2) 吊索需在箱梁底下进行张拉, 施工操作不方便, 对施工的设备要求高, 给吊索张拉带来困难。

同样, 常规销接式吊索(如图3)的局限性体现为: (1) 可以通过调节拉杆4、调节套筒5和调节叉耳6进行实现长度的调整, 且没有预埋管的限制, 进行长度调整时, 需要结合螺纹的间隙, 控制张拉设备, 从而操作要求高, 效率低;

(2) 不能进行角度的调整。

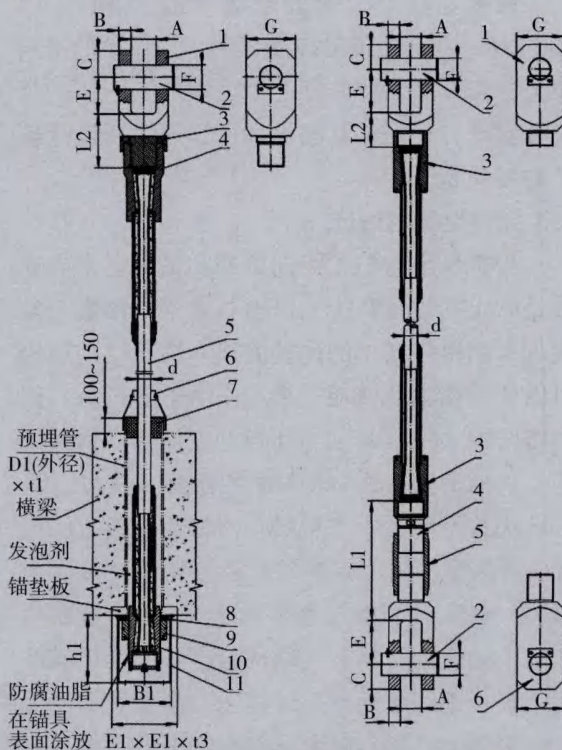


图2 悬索桥吊索锚头承压式结构图

图3 悬索桥吊索常规销接式结构图

根据南宁英华大桥的设计文件,吊索需满足以下四个要求:(1)满足调节量为 $\pm 120\text{mm}$ 的长度调整;(2)可以实现 $\pm 2^\circ$ 左右的小角度调整;(3)与索夹和钢箱梁为销接式连接,销接结构带有自润滑功能,以减小吊索的弯折;(4)体系转换时,吊索张拉简单、方便。

显然常规销接式和锚头承压式吊索在技术上满足不了英华大桥的文件要求,需要研发一

种新型结构的吊索来满足其使用和施工要求。

### 3 新型吊索的设计

#### 3.1 吊索结构设计

新型吊索的结构如图4所示:吊索上端叉耳与索夹和下端叉耳与主纵梁耳板采用销接结构连接。吊索主要由上端叉耳组件、柔性吊索、调节连杆、调节套筒、球头连杆、连接套、下端叉耳组件构成。

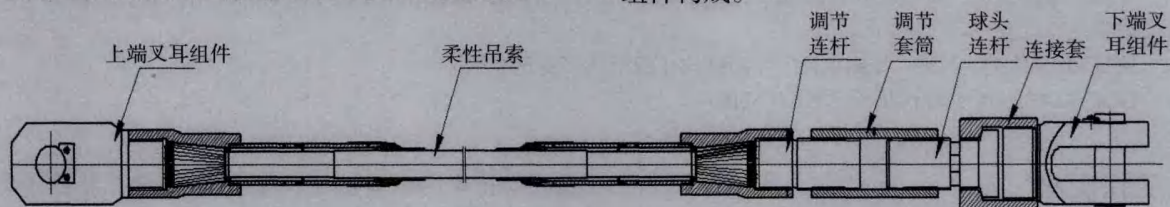


图4 新型吊索结构图

#### 3.2 柔性吊索设计

英华大桥吊索采用直径为 $\phi 7\text{mm}$ 、抗拉强度 $1670\text{MPa}$ 的高强度镀锌钢丝,钢丝根数以设计的拉力和钢丝的排布为依据,本项目的吊索采用91丝 $\phi 7\text{mm}$ 平行钢丝束冷铸锚,吊索的破断力为 $5845\text{kN}$ 。

吊索锚具为OVM的定型产品,锚具采用40Cr材料。根据吊索的破断力和实际梁桥的吊索拉力,以及考虑疲劳性能等因素的影响,进行设计验算,保证锚具的设计符合悬索桥设计规范的相关要求。

#### 3.3 销接结构的设计

为避免吊索与主梁连接处和吊索与索夹连接处产生的往复弯折,吊索与主梁,吊索与索夹均采用销接结构的连接方式。销接结构连接可以依靠销轴的转动,来减小吊索的弯折,但销接结构的吊索销轴与耳板是直接钢对钢接触的,长期的磨损,容易导致接触面的失效。为了解决这个问题,本项目在销轴与耳板之间设计一种新型的SF-1自润滑衬套(又称DU复合材料)。SF-1自润滑衬套是基于粉末冶金技术生产出来的烧结材料,其结构为:基体为低碳冷轧钢板,中间层为球形青铜粉,摩擦表面层为改性聚四氟乙烯;衬套具有自润滑的功能,可以有效的防止销轴和耳板的磨损,增加吊索的使用寿命,如图5所示。

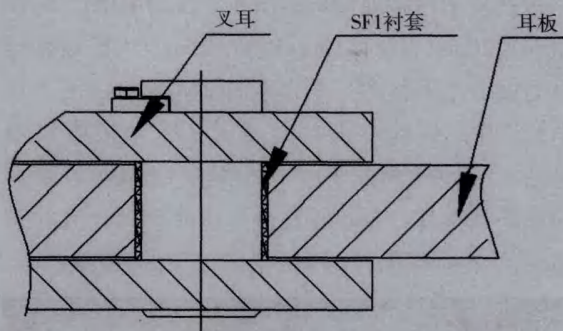


图5 销接结构图

##### 3.3.1 销轴的设计验算

根据销轴的剪力计算公式:

$$\tau = Q/S = 4Q/\pi d^2,$$

进行设计验算,可以得到吊索销轴直径取 $d = \phi 125$ 。

##### 3.3.2 叉耳的设计验算

叉耳是吊索与主梁和吊索与索夹连接的重要部件,根据受力原理及钢结构规范,其耳板破坏形式分三种:孔壁挤压破坏、端部剪断、两侧拉断。如图6所示:

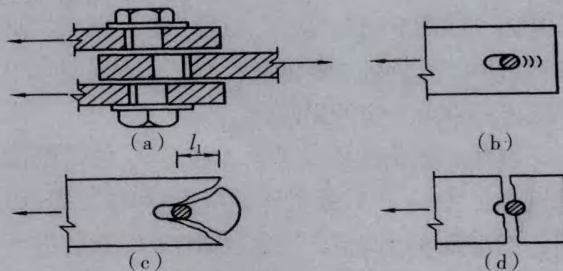


图6 耳板破坏形式图

依据耳板破坏的形式可知：叉耳的危险截面为耳板的顶部和两侧部分，应考虑对危险截面进行应力验算。另外叉耳通过螺纹与吊索的锚杯连接，所以设计时应考虑螺纹连接的螺纹牙强度校核。叉耳采用40Cr材料，通过对危险截面进行应力验算和螺纹强度校核，保证叉耳的设计满足使用要求。

1) 叉耳顶部和两侧应力的验算：

顶部应力计算公式：

$$\sigma_1 = \frac{P_b/2}{2(H-d/2) \times t} \times \alpha_1$$

两侧应力计算公式：

$$\sigma_2 = \frac{P_b}{2(E-d) \times t} \times \alpha_2$$

其中， $\alpha_1$ —应力系数，取1.8

$\alpha_2$ —应力系数，取1.5

$P_b$ —吊索破断力；

$E$ —侧面宽度；

$d$ —销轴孔直径；

$t$ —耳板厚度；

计算得顶部应力 $\sigma_1=337\text{MPa}$ ，两侧应力 $\sigma_2=370\text{MPa}$ ，最大应力不超过叉耳材料的屈服强度 $\sigma_s$ ，满足使用要求；

2) 叉耳的螺纹牙强度校核：

弯应力计算公式：

$$\sigma_w = \frac{3 \times P_b \times h}{K_z \times \pi \times d_1 \times b^2 \times z}$$

剪应力计算公式：

$$\tau = \frac{P_b}{K_z \times \pi \times d_1 \times b \times z}$$

其中： $K_z=0.56$  载荷不均系数

$h=0.5 \times p$  螺纹牙的工作高度 (mm)

$b=0.65 \times p$  螺纹牙根部宽度 (mm)

$z=12$  旋合牙数

计算得螺纹弯应力 $\sigma_w=518\text{MPa}$ ，剪应力 $\tau=225\text{MPa}$ ，最大应力不超过叉耳材料的屈服强度 $\sigma_s$ 和许用剪切应力 $\sigma_\tau$ ，满足使用要求；

### 3.4 新型调节装置的设计

在体系转换过程中，为了保证吊索能够进行

规定长度和微小角度转动的调整，及提高吊索张拉的工作效率，本项目在吊索的下端设计一种新型调节装置，其包括调节连杆、调节套筒、球头连杆、连接套，均采用40Cr材料加工。新型调节装置在南宁英华大桥实际应用中应具有良好的安全性和可靠性，因此，在设计过程中，新型调节装置按照实际桥梁的受力情况进行验算，保证其结构符合机械设计相关规范的要求。

#### 3.4.1 调节连杆的设计验算

调节连杆两端设计螺纹，一端与柔性吊索的连接锚杯固定连接，另一端与调节套筒连接，并通过调整螺纹旋合的长度来实现吊索长度的调节。调节连杆的最小截面为退刀槽位置，直径为 $d$ ，按吊索的破断力为最大载荷，计算退刀槽最小截面的拉应力：

最小截面其面积为：

$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

拉应力： $\sigma = F/A$

计算得 $\sigma=306\text{MPa}$ ，最大应力不超过材料的屈服强度 $\sigma_s$ ，所以调节连杆的结构满足使用要求。

#### 3.4.2 调节套筒的设计验算

调节套筒两端为内螺纹，一端为右旋螺纹，与调节连杆连接，另一端为左旋螺纹与球头连杆。调节套筒的按最小截面为无螺纹段圆环，外圆直径为 $d_1$ ，内孔直径为 $d_2$ ，按吊索的破断力为载荷，计算最小截面的拉应力：

最小截面其面积为：

$$A = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2)$$

拉应力： $\sigma = F/A$

计算得 $\sigma=354\text{MPa}$ ，最大应力不超过材料的屈服强度 $\sigma_s$ ，所以调节套筒的结构满足使用要求。

#### 3.4.3 球头连杆的设计验算

球头连杆一端与调节套筒螺纹连接，并通过螺纹的旋合可以实现吊索长度的调节，另一端通过连接套，与下端叉耳进行连接，下端的球头结构与连接套的球头结构组合可以实现 $\pm 2^\circ$ 左右

的小角度调整。

1) 球头连杆的最小截面为退刀槽位置, 直径为 $d$ , 按吊索的破断力为载荷, 计算退刀槽最小截面的拉应力:

最小截面其面积为:

$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

拉应力:  $\sigma = F/A$

计算得 $\sigma = 306\text{MPa}$ , 最大应力不超过材料的屈服强度 $\sigma_s$ , 满足使用要求。

2) 下端球头强度验算:

球头连杆的下端球头与连接套的球头接触, 已知球头连杆的外径 $d_1$ 和连接套的内孔为 $d_2$ , 按吊索的破断力为载荷, 计算其剪切应力和接触应力:

剪切应力:

$$\tau = \frac{F}{\pi \times d_2 \times t}$$

接触面积:

$$A = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2)$$

最大接触应力:  $\sigma = F/A$

计算得:  $\tau = 135\text{MPa}$ ,

最大应力不超过材料的剪切许用应力 $\sigma_t$ ;

$\sigma = 396\text{MPa}$ , 最大应力不超过材料的屈服强度 $\sigma_s$ , 满足使用要求。

### 3.4.4 连接套的设计验算

连接套的球头面与球头连杆的下端球头面接触, 另一端与下端叉耳进行螺纹连接, 安装到位后, 球头连杆与下端叉耳之间有20mm的间隙, 便于吊索张拉时, 球头连杆的球面与连接套的球头面分开, 从而解决张拉时, 调整装置螺纹卡死的问题。

1) 连接套的球头面与球头连杆的下端球头接触, 已知球头连杆的外径 $d_1$ , 按吊索的破断力为载荷, 计算其剪切应力:

剪切应力:

$$\tau = \frac{F}{\pi \times d_1 \times t}$$

计算得 $\tau = 120\text{MPa}$ , 最大应力不超过材料的剪切许用应力 $\sigma_t$ , 满足使用要求。

2) 连接套的最小截面为退刀槽位置, 外圆直径为 $D$ , 内孔直径为 $d$ 按吊索的破断力为载荷, 计算最小截面的拉应力:

最小截面其面积为:

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

拉应力:  $\sigma = F/A$

计算得:  $\sigma = 237\text{MPa}$ , 最大应力不超过材料的屈服强度 $\sigma_s$ , 满足使用要求。

### 3.5 吊索张拉方案的设计

吊索的张拉是悬索桥体系转换的重要步骤, 南宁英华大桥的新型吊索的张拉结构如图7。在下端叉耳的外螺纹处, 安装哈弗螺母作为下扁担梁的反力点, 并在连接锚杯的顶端设置上扁担梁, 两个扁担梁之间通过张拉杆连接。吊索张拉过程, 通过千斤顶和张拉杆进行张拉, 当球头连杆与连接套的接触球面有间隙时, 通过旋合调节套筒与调节连杆之间和调节套筒与球头连杆之间的螺纹长度, 来达到调整吊索拉力及主缆线形的目的, 现场吊索张拉结构如图8所示。

新型吊索在南宁英华大桥中实施应用, 经现场施工证实: 新型吊索的张拉操作简单, 张拉效果明显, 效率高, 在整个体系转换中发挥很大的作用, 体系转换后的吊索见图9。

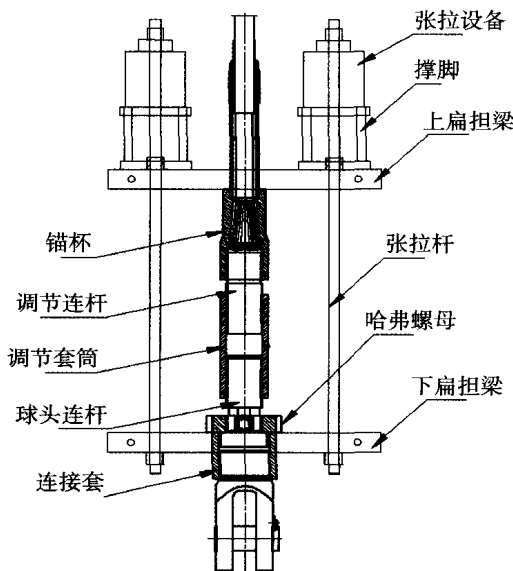


图7 张拉结构示意图 (下转第40页)

祥地。一大批学贯中西、诲人不倦的杰出名师，培养和造就了以中国现代桥梁之父茅以升、世界预应力混凝土先生林同炎、一代水利工程大师黄万里为代表的著名学者。在高铁、磁浮、土木、材料等诸多科学领域、工程领域创造了百余项中国第一和世界第一，为民族振兴和国家富强，特别是为我国轨道交通事业的发展 and 壮大做出了卓越贡献！

“欧维姆奖学金”是北京詹天佑土木工程

科学技术发展基金会欧维姆预应力技术发展专项基金里设立的一个奖项，自2002年在东南大学设立“徐百川OVM预应力奖教、奖学金”以来，已延续了14年，目前设立了“欧维姆奖学金”的学校有清华大学、西南交通大学、东南大学、哈尔滨工业大学、长安大学公路学院等知名院校，多年来共有500多名优秀学生（教师）获奖，奖励金额达105万余元。

（技术管理部陆劭红供稿）

（上接第22页）

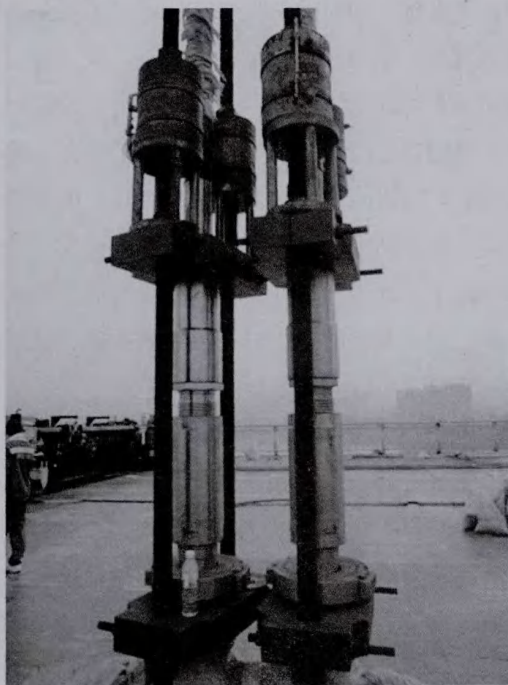


图8 现场吊索张拉图



图9 完成体系转换后的吊索

#### 4 结论

新型吊索的研发成功，弥补了悬索桥常规销接式吊索和锚头承压式吊索存在的局限性，满足了南宁英华大桥吊索的使用和施工要求。新型吊索具有以下优点（1）吊索结构简单，安全性和可靠性高；（2）吊索可以实现小角度的转动调整；（3）吊索可以实现长度调整，从而保证体系转换的成功；（4）张拉操作简单，解决了常规销接式吊索因张拉设备操作不协调，而产生调节套筒螺纹卡死的问题，提高吊索张拉的效率；（5）销铰结构中安装用SF-1自润滑衬套，可以实现微转动功能，从而减小了吊索的弯折。目前南宁英华大桥已经顺利完成验收通车，新型吊索发挥了极其重要的作用。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部. GB 50017-2003钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.10.
- [2] 中华人民共和国交通部. 公路悬索桥设计规范(报批稿)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [3] 中华人民共和国交通部. JT/T 449-2001公路悬索桥吊索[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [4] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2004.8.
- [5] 南宁市英华大桥缆索系统施工图说明.
- [6] 吉林, 李洪涛(编译). 来岛大桥吊索与索夹设计[J]. 公路交通科技, 2000.4.
- [7] 李新春, 彭春阳等. 新型空间大角度长调节量吊索在天津富民桥上的应用[J]. 预应力技术, 2008(05).