

# 南京长江第四大桥上部结构施工关键技术

何超然, 潘桂林, 李有为

(中交二航局第四工程有限公司, 安徽芜湖 241007)

**[摘要]** 南京长江第四大桥主桥为主跨1 418 m的双塔三跨连续式钢箱梁悬索桥, 为国内同类型桥梁之最, 居世界第三。本文从索鞍吊装、牵引系统与猫道架设、主缆索股架设、主缆紧缆、索夹及吊索安装、钢箱梁架设和主缆缠丝等方面对南京长江第四大桥悬索桥上部结构安装施工关键技术进行了系统介绍, 可为类似大跨度悬索桥上部结构施工提供参考。

**[关键词]** 南京长江第四大桥; 双塔三跨悬索桥; 上部结构施工; 主缆架设; 钢箱梁架设

**[中图分类号]** U445.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)08-0042-06

## 1 前言

南京长江第四大桥为我国首座超千米跨径的双塔三跨悬索桥, 桥梁结构中引入多项结构创新, 如主缆锚固系统采用新型锚固钢板形式, 钢箱梁在索塔处采用弹性支承体系, 在边跨过渡墩处设置限位吊索等。通过研究实施套接式千斤顶张拉拉杆系统和塔区梁段体系转换等技术<sup>[1]</sup>, 顺利完成南京

长江第四大桥上部结构施工。

## 2 工程概况

南京长江第四大桥主桥采用双塔三跨连续式钢箱梁悬索桥结构形式, 桥跨布置为576.2 m+1 418 m+481.8 m, 全长2 476 m。主缆在成桥状态下的中跨垂跨比为1:9.003, 主缆中心距为34 m。主桥桥型布置如图1所示。

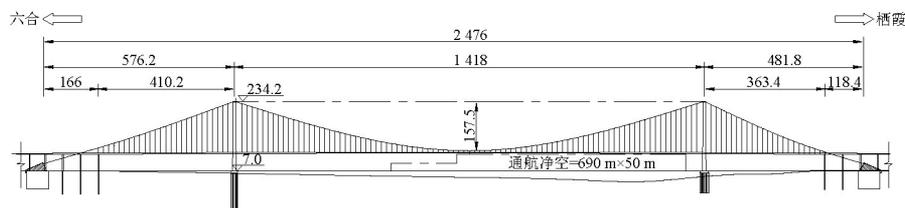


图1 南京长江第四大桥主桥桥型布置(单位:m)

Fig.1 The layout of the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge (unit: m)

主缆采用预制平行钢丝索股(PPWS)法施工。全桥共设两根主缆, 单根长约2 643 m、重约8 259 t, 单根主缆设计拉力约28 000 t。每根主缆含通长索股135根, 南、北边跨分别增设8根和6根背索。每根索股由127根 $\phi 5.35$  mm的高强镀锌钢丝组成, 单根索股重约60 t。

主缆紧缆后呈圆形, 其索夹内直径分别为790 mm(北边跨)、773 mm(中跨)和796 mm(南边跨), 其索夹外直径分别为800 mm(北边跨)、783 mm(中跨)和806 mm(南边跨)。

主桥钢箱梁全长2 189.6 m, 重约35 800 t。梁全宽38.8 m, 为扁平流线型单箱断面结构。钢箱梁

**[收稿日期]** 2013-05-22

**[作者简介]** 何超然(1976—), 男, 江苏南通市人, 高级工程师, 主要从事桥梁施工技术与管理工; E-mail: hechaoran\_001@163.com

共分142个安装梁段。其中标准梁段长15.6 m,重约248 t;最重单梁段重约282 t。主跨跨中设两个联合体梁段,联合体梁段由两个标准梁段在工厂内焊接成整体,现场整体安装,联合体梁段长31.2 m,重约496 t。

### 3 工程特点与难点

1)南京长江第四大桥为国内首座超千米跨径的双塔三跨连续弹性支承悬索桥,结构体系复杂,类似施工经验较少。

2)主缆索股采用锚固钢板锚固形式,因锚固端空间有限,索股张拉涉及“窄小张拉空间、长拉伸距离”的突出要求,须设计特别的索股张拉装置,不同于以往桥梁采用的预应力锚固系统。

3)钢箱梁安装涉及主航道深水区、南北边跨浅水区、主塔无索区、端梁处超低空间荡移等多种施工条件,钢箱梁安装难度大。

4)在边跨主引桥交接部位的过渡墩处设置限

位吊索,以调整主缆边跨段线形,使有吊索区与无吊索区线形平顺过渡。限位吊索为首次使用,张拉力大,张拉空间小,张拉距离长,须特别研究。

5)主缆防护采用“S”形钢丝,对缠丝设备要求较高。

### 4 施工关键技术

#### 4.1 索鞍吊装

全桥共4套散索鞍,单个鞍体重约68 t;共4套主索鞍,每个主索鞍分边、中跨两个鞍体,单件鞍体重约55 t。主、散索鞍均采用门架配卷扬机起吊系统安装<sup>[2]</sup>。

#### 4.2 牵引系统架设

猫道架设阶段采用单线往复式牵引系统,索股架设阶段采用门架双线往复式牵引系统。双线往复式牵引系统主要由2台25 t牵引卷扬机、3根 $\phi 36$  mm牵引索、2个拽拉器、塔锚导轮组、猫道门架及导轮组、放索架、各部位滚轮等组成,如图2所示。

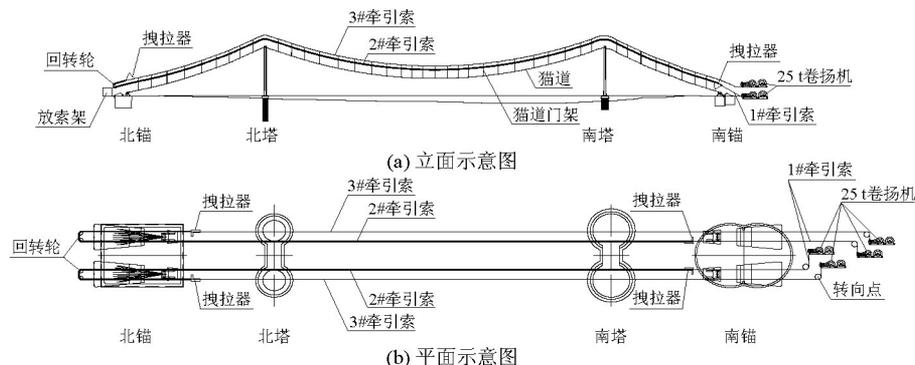


图2 双线往复式牵引系统示意图

Fig.2 The schematic diagram of two-lane reciprocating traction system

先导索过江采用高强轻质纤维绳( $\phi 13$  mm迪尼玛绳)水面过渡法一跨过江技术,过江期间,长江封航约1.5 h。

#### 4.3 猫道架设

南京长江第四大桥上部结构施工猫道采用不设置抗风缆和抑振机构的三跨连续式猫道结构。单幅猫道由8根 $\phi 54$  mm猫道承重索、2根 $\phi 32$  mm扶手索、2根 $\phi 54$  mm门架承重索及面层单元、横向通道和锚固体系等组成。猫道宽4.0 m,猫道面距主缆轴线1.5 m。沿猫道每隔150 m设置一道横向通道,每隔50 m设置一道猫道门架,每隔25 m设置一道扶手立柱,每隔12.5 m设置一道横梁。猫道断面结

构如图3所示。

扶手索作为结构索能够增强猫道总体承载力性能。猫道计算时应考虑“在每侧猫道上放置两根主缆索股,并遭遇20年一遇风载”等不利工况。经计算,在最不利工况下猫道索的安全系数为3.17,满足安全系数不小于3的要求。

猫道索采用托架法架设,托架每隔100 m布置一道。猫道索放索采用带力矩电机的放索架进行,放索过程中始终保持一定的反张力。

猫道面层采用“塔顶逐片拼装、后分段下滑”的安装工艺,下放单元段长度取150 m或300 m。横向通道与猫道面层同步下放,兼作配重。

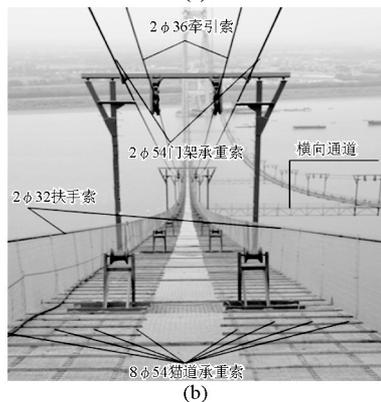
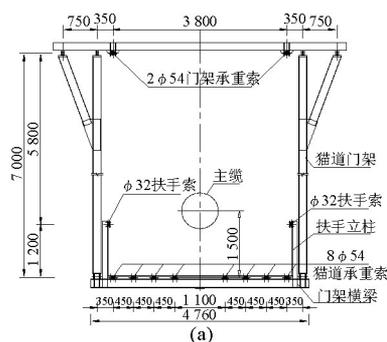


图3 猫道断面结构(单位:mm)

Fig.3 Layout of cross section of the walkway (unit: mm)

#### 4.4 索股架设

##### 4.4.1 存放索区布置与放索方式

存放索区布置于北锚碇后方,呈“L”形,如图4所示,由2台80 t龙门吊作为装卸索盘的主要设备。主缆索股采用水平放索方式,放索区细部布置如图5所示。

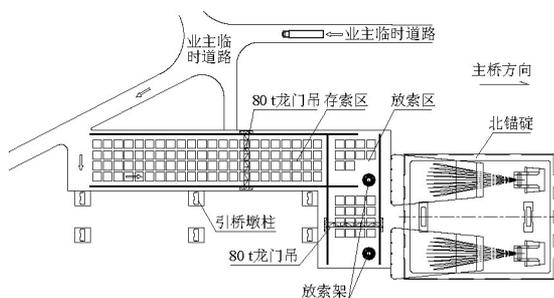


图4 主缆索股存放区总体布置

Fig.4 General arrangement of cable strand storage area

##### 4.4.2 索股牵引

索股经拽拉器自北向南沿猫道牵引。索股牵引时,每隔约300 m设一个小型鱼雷夹具,并安排专人跟踪防止索股扭转。

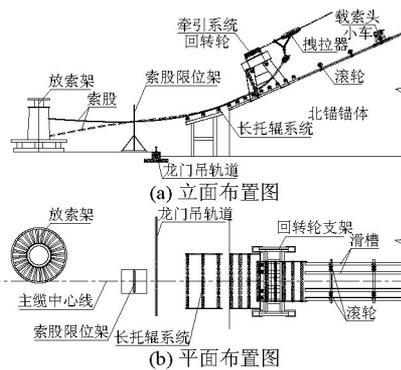


图5 主缆索股放索区细部布置

Fig.5 Detail layout of cable strand storage area

##### 4.4.3 索股上提、横移、整形、入鞍

在塔、锚门架处布置10 t卷扬机与60 t滑车组进行索股上提、横移。上提时采用握索器夹持索股,握索器内镀铜处理,防止损伤索股钢丝。

索股经上提、移位后,采用专门设计的四六边形夹具进行索股整形、入鞍。按“先主索鞍,后散索鞍”的顺序进行。主索鞍处,从边跨端向主跨方向进行;散索鞍处,从锚跨端向边跨方向进行。

##### 4.4.4 索股垂度调整

主缆索股垂度调整分基准索股、相对基准索股及一般索股3种情况进行。

基准索股,即1#索股,采用绝对高程法调整,选择在夜间气温稳定且风速低于8 m/s的时段进行。基准索股线形调整好后,连续进行3天有效的稳定观测。3天连续观测结果误差均要求控制在设计、监控及规范允许范围内(中跨误差为-20~+40 mm,边跨误差为-20~+35 mm,上下游索股相对误差 $\leq 10$  mm),并取3天的平均值作为该基准索股的标高。

当底层主缆索股架设完毕,基准索开始受到其上部索股干扰而无法保持自由状态时,另取相对基准索股作为其他一般索股架设的相对基准。根据实际施工情况,本桥先后选择22#、42#、72#和115#等索股作为相对基准索股。相对基准索股线形采用层距法调索控制,并按照绝对高程法进行复测,确保误差在设计允许范围内。

一般索股采用层距法调索控制,验收标准为与参考索股相对高差( $\Delta h$ ) $\leq \pm 5$  mm。

##### 4.4.5 索股锚固与张拉

南京长江第四大桥主缆索股采用锚固钢板锚固形式,索股锚头锚固于锚固钢板的锚固箱内,通过锚垫板厚度调节索股张力。主缆锚固系统结构如图6所示。

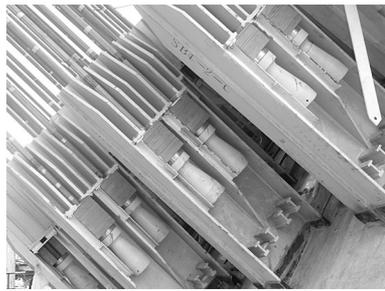


图6 主缆锚固钢板形式锚固系统  
Fig.6 The steel anchor system of the main cable

为解决该锚固系统“索股张拉端空间狭小,常规接长式拉杆系统难以实施”的难题,创新设计了“套接式千斤顶张拉拉杆系统”,以既经济又便捷的方法解决了索股锚固端张拉难题。该拉杆系统采用实心杆和空心杆串联套接的形式,通过实心杆和空心杆间的螺纹连接,以适应由索股锚头拉伸而造成的张拉空间不断缩小的情况。索股锚跨张拉调整用套接式千斤顶张拉拉杆系统见图7,其工作原理见图8。



图7 套接式千斤顶张拉拉杆系统  
Fig.7 The tension system of the socket-typed jack

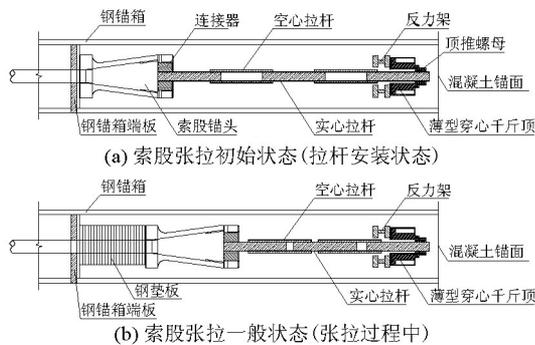


图8 套接式千斤顶张拉拉杆系统工作原理示意图  
Fig.8 Working principles of the tension system of the socket-typed jack

#### 4.4.6 背索架设

南京长江第四大桥南、北边跨均设置有背索,

而放索区场地布置于北锚后,因此,处于南边跨的背索架设面临“自北锚后放索或自南锚后放索”的技术方案比选。若从南岸放索,则须将南边跨背索及放索架转运至南岸,且须在南锚碇大斜面上增设两套索股滚轮装置,施工成本较高。而从北岸放索,仅需要解决背索后锚头与牵引系统的连接问题,施工成本相对较低,因此,实际施工时采用北岸放索方案。

南边跨背索自北锚后放索,其前锚头与牵引系统拽拉器(大拽拉器)相连,后锚头采用小拽拉器(小拽拉器与大拽拉器结构类似,经特别设计而成)与牵引系统相连,如此,通过“大拽拉器牵引与小拽拉器反拉相结合”的工艺,将整根背索连接到牵引系统上,经北边跨、中跨牵引后,至南边跨,后进行塔顶锚固及散索鞍入鞍工艺。

#### 4.5 主缆紧缆

主缆正式紧缆采用4台紧缆机进行,该紧缆机紧固力为 $6 \times 2300$  kN,适用主缆直径650~900 mm。在以往同类设备基础上,该紧缆机增设“直接显示主缆直径”功能,使施工控制更准确、便捷,大大提高了施工功效。

紧缆顺序为“先中跨、后边跨,中跨自跨中向塔顶、边跨自锚碇向塔顶方向”。每隔1 m紧固一道,索夹位置加密至每0.5 m一道。紧缆完成后,捆扎两道镀锌钢带。

#### 4.6 索夹、吊索安装

索夹采用天顶小车运输至设计位置进行安装。吊索采用“猫道下放钢丝绳自船上或梁面上垂直起吊”的方法安装。

#### 4.7 钢箱梁安装

##### 4.7.1 钢箱梁总体安装方案

根据双塔三跨连续式钢箱梁悬索桥受力特点,施工期间通过严密的监控计算,确定钢箱梁吊装顺序,并按照“中边跨对称、南北岸对称”的原则指导钢箱梁吊装。中跨钢箱梁自跨中往主塔方向对称架设,边跨钢箱梁自边跨端梁往主塔方向架设。钢箱梁总体吊装顺序如图9所示。

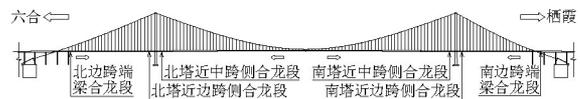


图9 钢箱梁总体吊装顺序示意图  
Fig.9 The installation sequence of the steel girder segments

全桥共设置6个合龙段,分别为南、北塔近塔区中跨侧合龙段,南、北塔近塔区边跨侧合龙段,南、北边跨端梁合龙段。合龙顺序为先合龙近塔区中跨侧合龙段,再合龙近塔区边跨侧合龙段,最后合龙南、北边跨端梁合龙段。

全桥共配置4台跨缆吊机用于钢箱梁安装作业,其中中跨南、北段各配置一台400 t起吊能力的液压提升式跨缆吊机,南、北边跨各配置一台300 t起吊能力的卷扬机提升式跨缆吊机。

#### 4.7.2 深水区梁段安装技术

深水区一般梁段采用“跨缆吊机自运梁船上直接垂直起吊”安装技术。运梁船将相应梁段运送至理论起吊位置,并于江中抛锚就位。钢箱梁吊装施工区域由海事部门配合采取局部限航措施,确保作业安全进行。深水区两片重约500 t的大节段梁采用两台400 t液压提升式跨缆吊机抬吊安装。

#### 4.7.3 浅、无水区梁段安装技术

南、北边跨大部分区域处于长江浅滩或陆地浅、无水区,该部分区域运梁船无法抵达,采用“临时栈桥提前存梁、后由跨缆吊机垂直起吊安装”施工技术。

南、北边跨各设两幅栈桥,栈桥顶面设小车轨道,栈桥端头连接到长江深水区。钢箱梁正式吊装前,将浅、无水区相关梁段由运梁船运送至栈桥端头,经跨缆吊机起吊并荡移至栈桥桥面上,后由栈桥上运梁小车运送至理论起吊位置,并用钢支墩临时支撑存放于栈桥上。待钢箱梁开始正式吊装后,按照设定的吊装顺序从栈桥上逐片垂直起吊钢箱梁,从而完成浅、无水区钢箱梁吊装。

#### 4.7.4 主塔区无吊索梁段安装技术

南、北主塔区各设3片无吊索梁段,采用临时支架法安装。钢箱梁经跨缆吊机荡移吊装至临时支架顶面,根据监控计算的无吊索梁段焊接线形,在支架顶面完成3片无吊索梁段的位置调整,并焊接成整体。钢箱梁合龙前进行塔区无吊索梁段体系转换,将3片无吊索梁段与邻近有吊索梁段焊接连接,后通过千斤顶辅助解除无吊索梁段与临时支架间的支撑,实现无吊索梁段由临时支架承载转为永久吊索承载。无吊索梁段体系转换示意如图10所示。

其具体步骤:a.依次安装无吊索梁段B、A、C,支撑于临时钢支架上(见图10a);b.调整无吊索梁段(A、B、C)线形,并焊接成整体(见图10a);c.吊装相邻有吊索梁段D、E(见图10b);d.将邻近有吊索

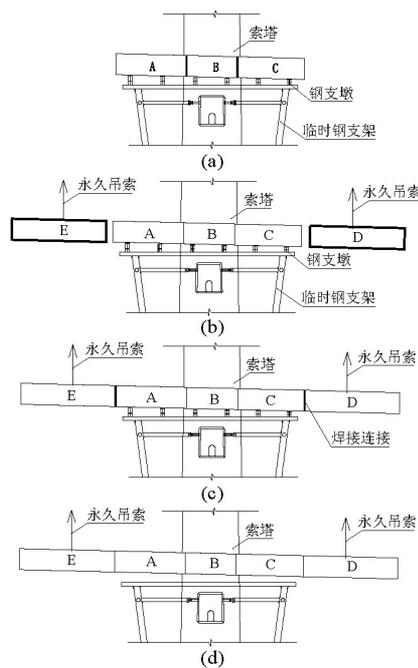


图10 塔区无吊索梁段体系转换示意

Fig.10 The system transfer of the girder near the tower without suspender cables

梁(D、E)与无吊索梁(A、B、C)匹配连接,并焊接成整体(见图10c);e.通过无吊索梁段下方设置若干千斤顶,逐步卸除支架与钢箱梁间荷载,拆除钢支墩,如此实现“支架承载→吊索承载”的体系转换(见图10d)。

#### 4.7.5 边跨端梁安装技术

南、北边跨端梁均为无吊索梁段,设置临时支架存梁。端梁经栈桥上运梁小车运送至过渡墩附近,后经卷扬机提升式跨缆吊机起吊安装。因端梁处主缆高度很低,而端梁水平荡移距离相对较大,为减小荡移力并确保跨缆吊机安全,采取“双向荡移方式”<sup>[3]</sup>进行端梁安装,如图11所示。

#### 4.7.6 主缆限位吊索安装技术

主塔区梁段合龙后,进行过渡墩处限位吊索张拉,将主缆下拉至设计、监控线形,使边跨梁段顺利与端梁靠拢,便于最后进行端梁合龙。

南过渡墩处限位索张拉距离为1.2 m,北过渡墩处限位索张拉距离为1.6 m,最大张拉力约280 t。限位索张拉通过在限位装置底座安装的4根张拉杆( $\phi 40$  mm精轧螺纹钢)和4台120张拉千斤顶进行。分两个阶段进行张拉:第一阶段自安装初始状态张拉至耳座底面距离底座顶面约60 cm位置,中间4根接长杆连接限位上下座板,在第二张拉阶

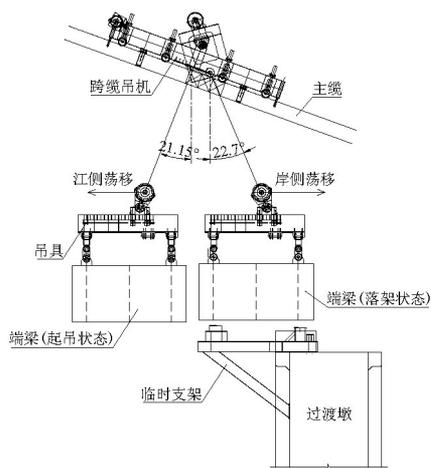


图11 端梁双向荡移安装示意图

Fig.11 The installation of the end beams with two-way swing

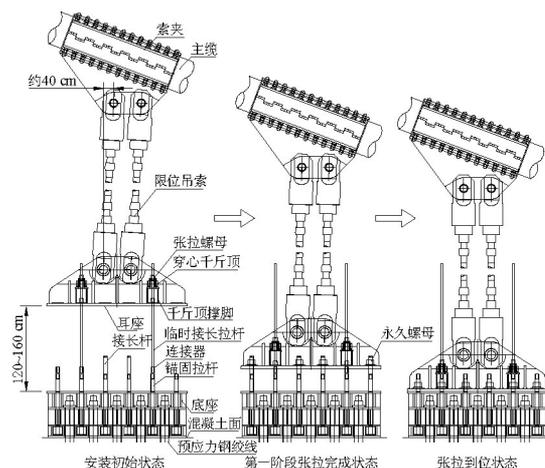


图12 限位索张拉过程示意图

Fig.12 Tension process of the displacement limited cable system

段起保险作用;第二阶段边张拉边上紧保险拉杆螺母,直至张拉到位。限位索张拉过程如图12所示。

#### 4.8 主缆缠丝

主缆采用“S”形缠绕钢丝。主缆缠丝按照先中跨后边跨顺序进行,中跨自塔顶往跨中缠丝,边跨自锚碇往塔顶缠丝。

#### 5 结语

南京长江第四大桥于2011年1月18日顺利架设过江先导索,至2012年1月10日完成全桥钢箱梁架

设,通过轻质迪尼玛先导索、套筒式索股张拉杆及塔区、端部钢箱梁架设和体系转换等技术,为南京长江第四大桥上部结构施工的顺利进行奠定了基础。

#### 参考文献

- [1] 周昌栋, 谭永高, 宋官保, 等. 悬索桥上部结构施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 喻胜刚, 沈良成, 牛亚洲, 等. 润扬大桥悬索桥索鞍吊装施工技术[J]. 桥梁建设, 2004(4): 21-24.
- [3] 卢伟, 邓亨长, 龙勇, 等. 西堠门大桥钢箱梁安装[J]. 公路, 2009, 1(1): 59-65.

## Key construction techniques for superstructure of the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge

He Chaoran, Pan Guilin, Li Youwei  
(CCCC SHEC Fourth Engineering Company Ltd., Wuhu, Anhui 241007, China)

**[Abstract]** The Fourth Nanjing Yangtze River Bridge, the longest suspension bridge in China, as well as the third one in the world, is a two-tower three-span suspension bridge with the main span of 1 418 m. The key construction techniques for the superstructure, including lifting and installation of the cable saddles, erection of the traction system, walkways and main cables, rearrangement of the main cables, installation of the suspender cables and the cable clamps, erection of the steel box girders and wrapping of the main cables, are discussed in detail in this paper. It can provide some references for the construction of the superstructures for the similar suspension bridges in the future.

**[Key words]** the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge; two-tower three-span suspension bridge; superstructure construction; main cable erection; steel box girder erection