

南京三桥钢塔施工技术

唐 启

(中港二航局南京三桥项目部, 南京 210041)

摘 要:国内第一座钢索塔——南京三桥钢索塔的成功建造,开创了我国桥梁建设的历史先河,标志着我国的桥梁建设事业已经达到了世界先进水平。就钢塔的制作、安装及设备选型、精度控制等施工技术以及裸塔施工期间的抗风措施等作简单的介绍。

关键词:钢塔柱;塔段;横梁;MD3600塔机;精度控制;抗风措施

文章编号:1009-6477(2006)01-0063-08

中图分类号:U443.38

文献标识码:B

Steel Tower Construction Technology of Nanjing No.3 Bridge

Tang Qi

1 工程概况

1.1 工程地理位置

南京长江第三大桥(以下简称“南京三桥”,见图1)是交通部“五纵七横”上海至成都国道(GZ55)主干线的重要组成部分,位于现南京长江大桥上游约19 km处的大胜关,东距长江入海口约350 km。项目南岸起点在绕城公路刘村互通,往东接南京市规划的二环线;北岸终点为浦口境内的宁合高速公路张店互通,往北接宁淮高速公路。全长约15.6 km。

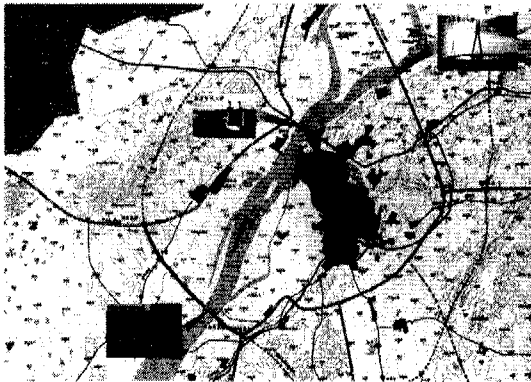


图1 工程地理位置

1.2 结构及设计特点

南京三桥主桥为钢塔钢箱梁双索面5跨连续斜拉桥,其跨径布置为63 m + 257 m + 648 m + 257 m + 63 m = 1 288 m,采用半漂浮结构体系,纵向设弹性约束,限制活载及风载作用下的钢箱梁纵向漂移。索塔为“人”字型结构,塔柱外侧圆曲线部分半径720 m,高215 m,设4道横梁,其中下塔柱及下横梁为钢筋混凝土结构,其他部分为钢结构。下塔柱高

36.318 m,塔柱截面横桥向宽度为6.12~8.40 m,顺桥向宽度为8.00~12.00 m。钢塔柱高178.682 m,钢塔柱共分21个节段,截面为等截面尺寸,横桥向宽5.0 m,顺桥向宽6.8 m。

钢塔柱与混凝土塔柱之间设钢混结合段,通过钢混结合段的PBL剪力键将上塔柱传递下来的荷载分配到混凝土中。

除钢混结合段外,一个钢塔柱共分21个节段,编号从T1~T21,节段长7.70~11.42 m,节段间连接采用端面金属接触磨光顶紧和高强螺栓群连接,优先考虑金属间接触传力,同时考虑高强螺栓连接传力。一个节段设置3~4道横隔板,以及横肋板,设锚箱1~3个。

单节塔段重量125~160 t不等。钢塔柱共设3道上横梁,从下到上为上横梁1、上横梁2、上横梁3。一个钢塔总重约6 000 t左右。索塔结构见图2。

钢塔柱主体结构采用Q370D(14 MnNbq)钢,壁板厚30~48 mm,腹板厚32 mm,壁板加劲肋厚22~24 mm,腹板加劲肋厚24 mm,横隔板厚14 mm,横隔板加劲肋厚10 mm。

为避免钢塔柱在自立状态受风荷载作用下根部出现较大的拉应力,在T1、T2节段外侧设有临时抗风预应力束。

塔柱断面中间室内设有1.486×1.840 m电梯通道,电梯可以直达塔顶。在塔柱壁板及腹板上设有若干人孔,可从桥面钢塔柱根部位置进入塔内,并在塔柱断面上3个室之间相互穿越。在塔柱断面腹板两侧室内设有人行爬梯,可到达塔顶平台。电梯作

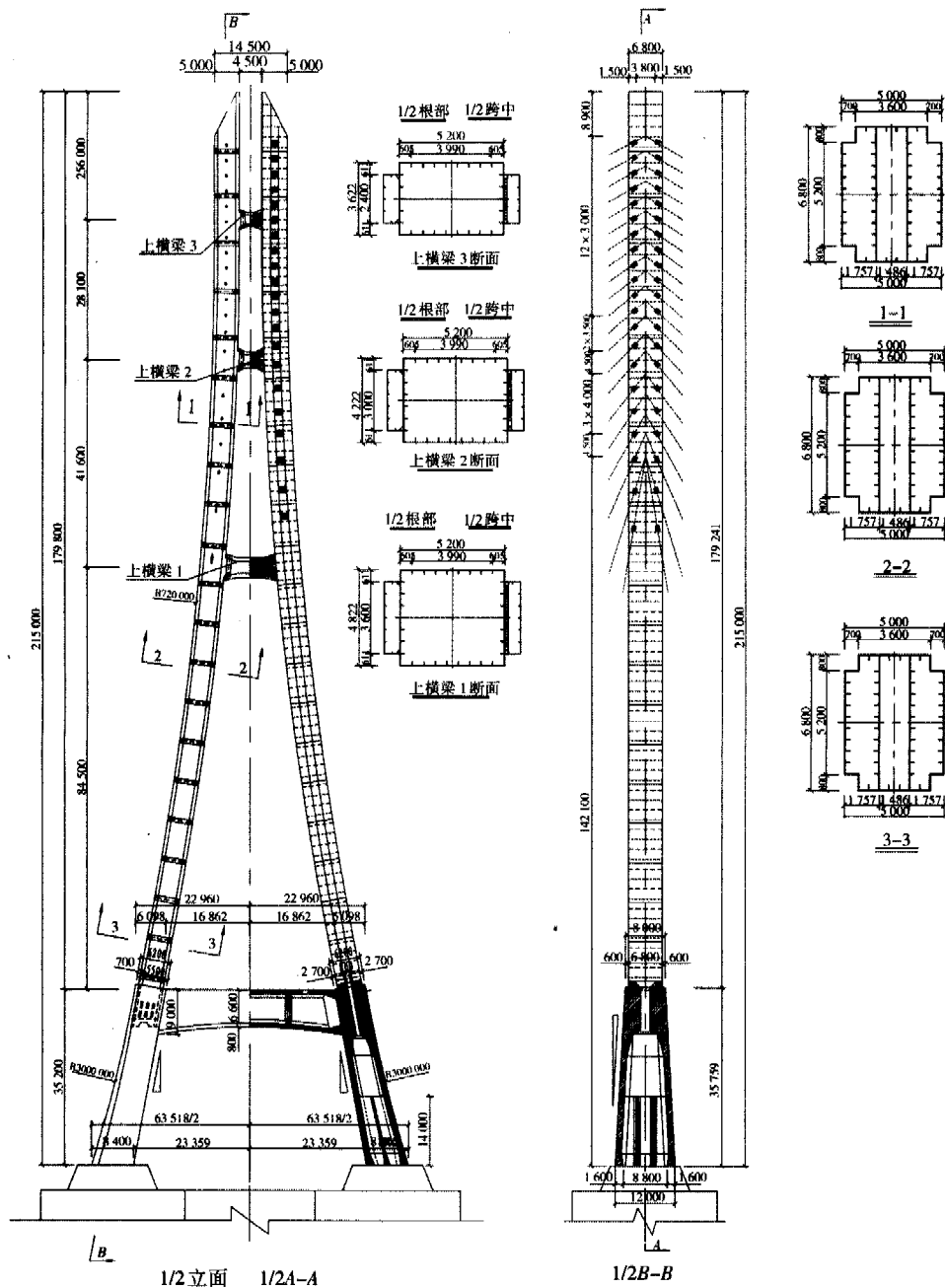


图2 索塔一般构造

为施工期间人员机具上下以及成桥后检修维护人员使用。

1.3 本工程的主要难点及创新点

1.3.1 采用大吨位塔吊安装钢塔柱节段

采用大吨位的塔吊安装钢塔柱节段,为桥梁施工提供了一种新的思路。这种大型塔吊的最大优点在于其技术成熟,安全可靠,有效避免或降低了钢塔柱安装的潜在风险。

1.3.2 裸塔施工期间抗风措施

钢塔柱由于自重轻,刚度小,因此在裸塔施工期间的抗风问题特别重要。本工程首次在桥塔上使用

了TMD和TLD抗风阻尼器,从施工过程来看,阻尼器有效地削弱了钢塔柱的风动摆幅,保证了钢塔柱在裸塔施工期间的抗风稳定。

1.3.3 钢塔柱端面加工及安装精度控制

钢塔柱断面尺寸为 $5\text{ m} \times 6.8\text{ m}$ 。为了保证塔段端面的加工精度,采用了大断面的机加工设备,其不仅能够满足塔段端面加工的精度要求,同时还可以根据已安装塔段的安装误差,调整待安装塔段的端面加工参数,以调整塔段的空中姿态,从而实现控制塔段的安装误差。

1.4 钢塔柱安装施工工艺流程

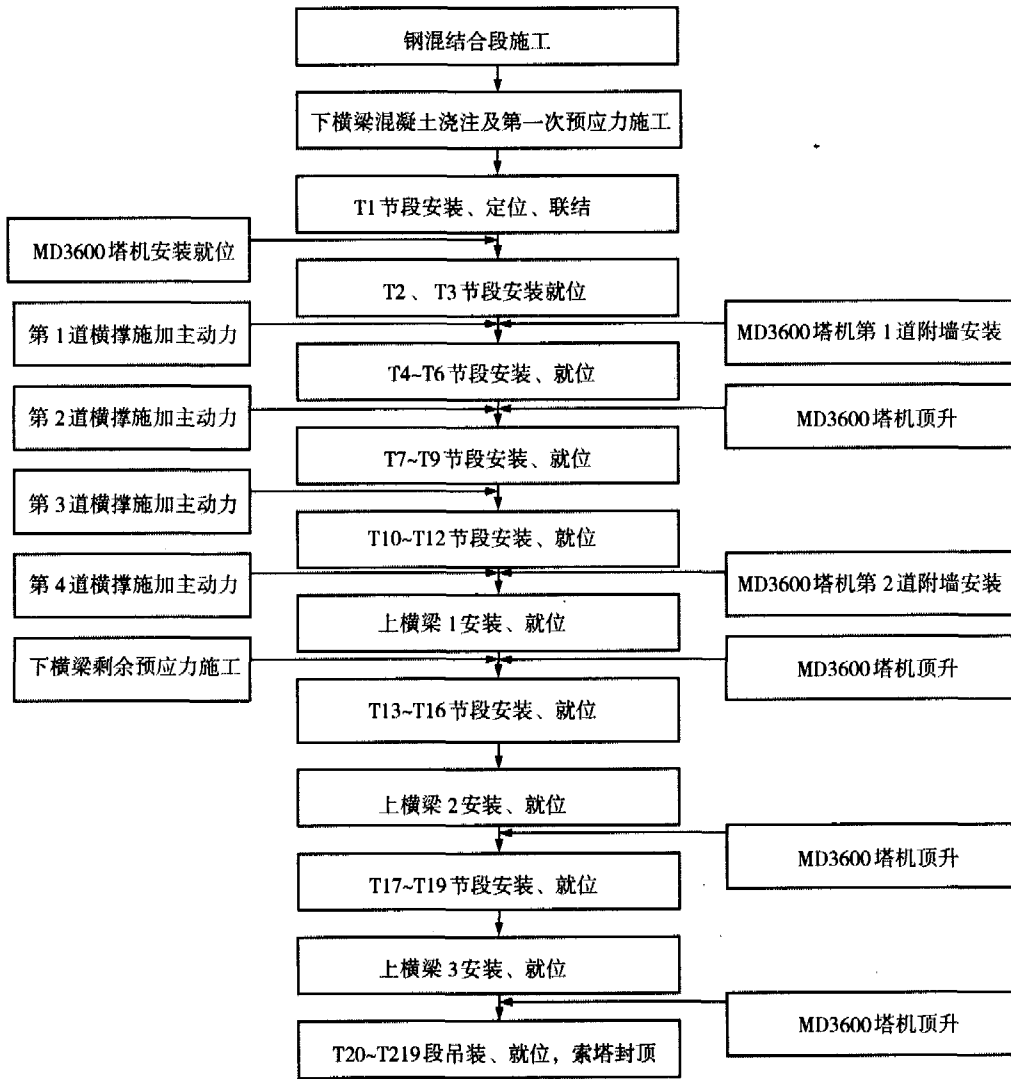


图3 钢塔柱安装施工工艺流程

钢塔柱安装施工工艺流程见图3。

递剪力构件,剪力钉设在锚固箱内外壁板上,将钢塔柱传递下来的荷载分配到混凝土中。

2 钢混结合段

钢塔柱与混凝土下塔柱之间设钢混结合段,钢混结合段中的钢结构部分分为锚固箱(T0)、底座及底座定位件3部分。底座通过M20高强度螺栓与底座定位件连接,底座定位件定位于下塔柱劲性骨架上。底座定位件、底座和一部分锚固箱埋在混凝土中,锚固箱伸出下塔柱顶混凝土外1.77m,与钢塔柱节段连接,该伸出段内,内腔浇筑1m高的混凝土。如图4所示。

钢混结合段通过锚固箱及底座的壁板及腹板的传剪器将上部荷载传递到混凝土内。传剪器包括PBL剪力键和剪力钉两部分。PBL剪力键是指在锚固箱及底座的壁板及腹板上开设Φ60mm圆孔,穿入Φ25mm钢筋与进入该孔的混凝土一起形成的传

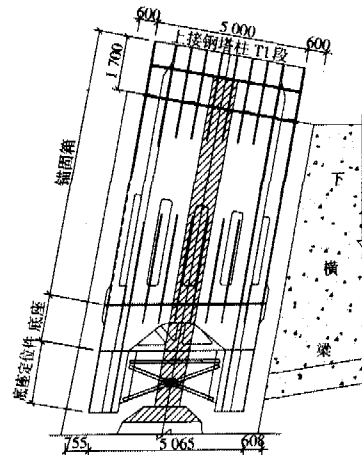


图4 钢混结合段结构

钢混结合段施工完毕后,还需要施工下横梁,下

横梁混凝土的收缩、徐变以及预应力张拉均会造成锚固箱顶端位置偏差,在 T1 段安装到位后仍需调整。

3 钢塔柱安装

3.1 钢塔柱安装设备选择

钢塔柱塔段吊装设备主要有 2 种方案:一是塔吊方案,二是自升式爬架方案。2 种方案比较如表 1。

从表 1 中可以看出,采用塔吊方案明显优于自升式爬架方案。经过多方论证和考察,结合本工程使用的需要,选用法国 POTAIN“MD-3600”塔吊安装塔段和横梁。T1 节段由于吊距较远、重量大,超出塔吊的起重能力,采用“镇航工 818”1 200 t 浮吊吊装。

3.2 塔吊

3.2.1 MD-3600 塔吊

MD-3600 塔吊基础布置在索塔“哑铃”型承台沿桥轴线偏岸 10 m 处,塔吊标准节断面尺寸为 5 m×5 m,高 5.799 m,重约 6 t,起重臂长 36 m,整体自重约 960 t(包括全部标准节)。其起重性能见图 5。

3.2.2 MD-3600 塔吊基础设计

(1) 塔吊基础的位置布置

塔吊基础的布置需要考虑以下 2 个主要因素:

- ① 便于设置能够满足设计受力要求的基础;
- ② 尽量缩短与待安装钢塔柱的距离,以减小对塔吊起重性能的要求。

表 1 塔段安装方案比较

序号	方案	主要优点	主要缺点
1	自爬式爬架安装方案	(1) 经济性好,造价低于塔吊。 (2) 直接安装在塔柱上,不需另设基础。	(1) 目前尚无成熟成品,技术上需要开发。 (2) 属专用设备,推广使用比较困难。 (3) 施工速度慢,占用关键线路较长,装、拆难度均较大。 (4) 作用半径小,需要浮吊将塔段喂到其作业范围内。 (5) 不能兼顾钢塔柱安装其它作业,如主动横撑安装等。
2	塔吊方案	(1) 成熟产品,经适当修改即可投入使用。 (2) 标准设备,适用性强。 (3) 施工速度快,效率高,安全可靠性好。 (4) 作用半径大,覆盖面广,可满足所有钢塔柱施工中所有作业要求。	(1) 一次性投入大,资金回收期较长。 (2) 需要强大的基础。

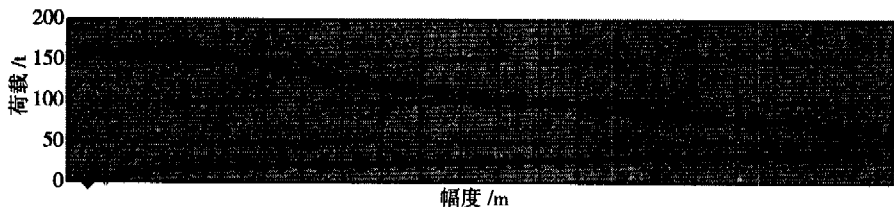


图 5 MD-3600 塔机荷载曲线

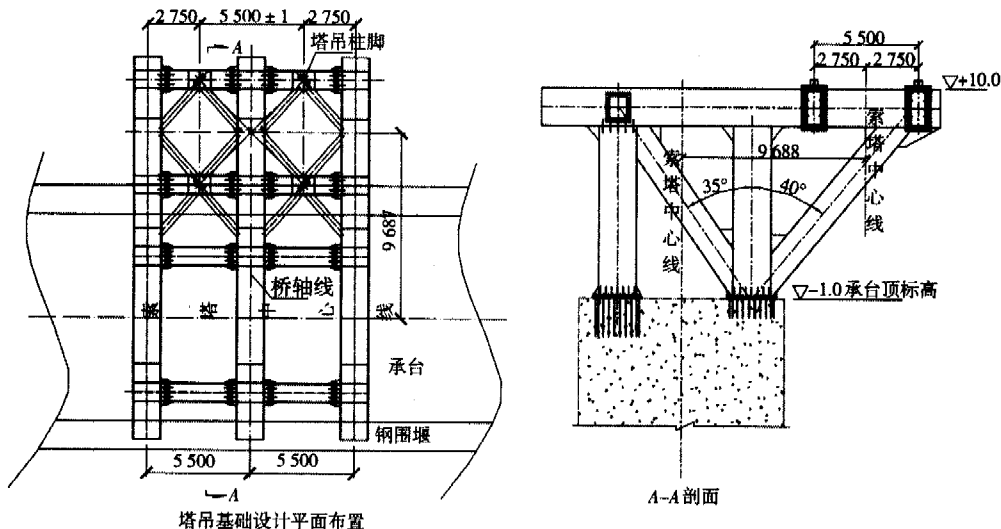


图 6 MD-3600 塔吊基础设计

根据以上2个原则,同时考虑到索塔承台呈“哑铃型”横桥向比较长,将塔吊基础布置在桥轴线上,沿塔中心线偏岸10 m处,如图6所示。

(2) 塔吊基础的受力要求

根据钢塔柱吊装的施工要求,POTAIN公司提出了对塔吊基础的受力要求,最不利工况为塔吊旋转45°时,塔吊标准节柱脚最大拉、压力分别为2 818/6 374 kN。为防止4个塔吊柱脚之间的不平衡沉降产生附加应力,对塔吊基础刚度也提出了要求:

塔吊柱脚两点最大绝对水平位移 $\leq \pm 5$ mm;塔吊柱脚两点最大绝对垂直位移 $\leq \pm 5$ mm。

(3) 塔吊基础设计

根据 POTAIN 公司对塔吊基础提出的设计要求,设计出 MD-3600 塔吊基础,塔吊基础坐落在索塔承台上。

(4) 塔吊附墙

塔吊共设3道附墙,支撑在塔段角壁板处,附墙支撑杆件与塔柱和附墙框之间采用铰接连接。

3.3 T1 节段安装与调节

T1 节段重约 176 t,由于重量和吊装距离超出 MD-3600 塔吊起重能力范围,采用 1 200 t 浮吊安装。由于 T1 段内倾约 10°,采用浮吊的 2 个小钩吊装,可以实时调整塔段的倾角,从而顺利的将其安装就位,与 T0 段(锚固箱)连接。

T0 上端口实际空间位置与理论位置偏差通过调整拼接板上孔群之间的距离来实现,使 T1 达到设计要求位置的目的。即 T1 段安装到位后,需要精确调整其空间位置并临时固定,将与 T0 段连接的拼接板投孔,然后将拼接板运到厂内钻孔,实现 T1 与 T0

段连接。

T1 段调整的工装设备主要包括竖向千斤顶和设置在接口上下的水平千斤顶以及设置在下横梁上的临时支架。T1 段调整工装见图 7 及图 8。

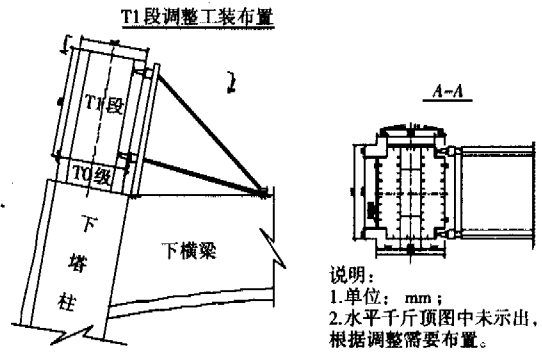


图 7 T1 段竖向调整工装

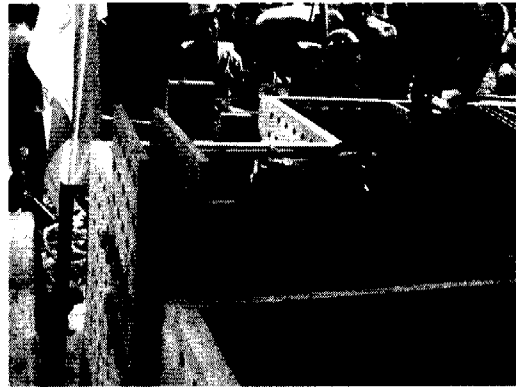


图 8 T1 段水平调整工装

通过上述工装调整,T1 段定位精度如表 2。

3.4 一般塔段吊装方法

3.4.1 塔柱吊装吊具

一般塔段采用塔吊吊装。由于钢塔柱为曲线

表 2 T1 段定位精度

分项	上游 偏差	下游 偏差	简 图
轴 线	Y1	-0.2	
	Y2	-2.0	
	X1	2.2	
	X2	-	
相 对 高 差	AD	0.1	
	BC	-0.5	
	GF	0.7	
	HE	0.2	
	DE	0.5	
	CF	0.7	
	BG	0.5	
	AH	0.4	

型,每节塔段的倾斜角度均不同,因此吊具必须具备调节塔段角度功能,同时考虑到塔段加工的精确性以及吊装变形的控制要求,吊具采用矩形刚性框架,以抵抗吊装水平力。吊具与塔段之间用销轴连接,吊索4根,其中2根吊索上设调整液压油缸,可以在需要的角度范围内任意调整吊装塔段的倾斜角度。吊具构造见图9。

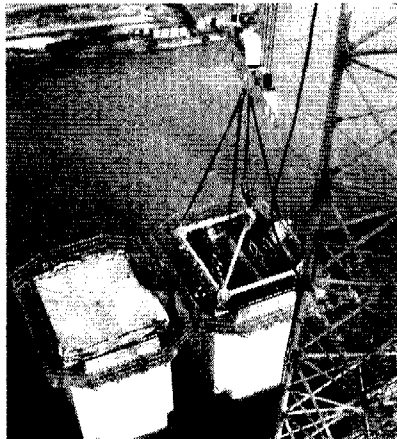


图9 吊具结构构造

3.4.2 塔段匹配及连接

塔段在工厂制作完成后,循环两节作为一个匹配段,测量塔段空间位置及各测量控制指标之间的相互关系,符合要求后安装塔段匹配件。匹配件的设计应能够使塔段安装时最大限度地再现厂内匹配的塔段之间空间相互关系,同时满足现场下一节段能够较容易地安装,从这两点出发设计塔段连接匹配件如图10所示。



图10 塔段连接匹配件构造

节段安装时,已架设节段的拼接板处于敞开状态,此敞开的拼接板通过木制隔块及长螺栓进行固定。塔段顶口拼接板布置见图11。

3.4.3 塔段吊装过程中防转动措施

塔段吊装过程中最大的风险在于塔吊钢丝绳发生扭转,相互缠绕在一起,主要防范措施有以下几点:

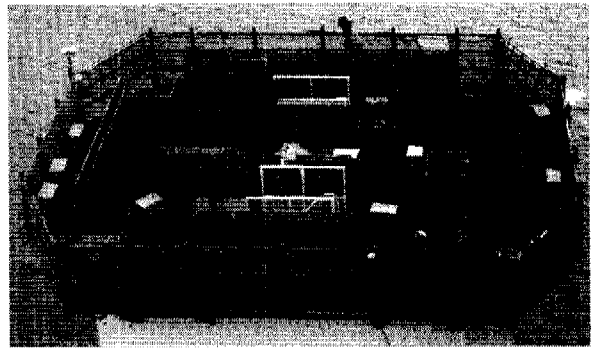


图11 塔段顶口拼接板布置

(1) 塔吊起重钢丝绳采用“不缠绕”钢丝绳,在钢丝绳受到张力的时候,不会由于伸长和钢丝绳股扭角变化而产生旋转。这种钢丝绳的结构是分层缠绕,每层钢丝绳股扭角相同、方向相反,使钢丝绳在受到张力时产生的扭转相互平衡,从而有效地避免了钢丝绳缠绕现象的发生。

(2) 塔吊大钩采用如图12示结构,前后起重钢丝绳组距离很大,而吊钩居中,这样大钩能够抵抗较大的旋转扭矩,从理论上分析,吊钩在中间一个点,不能产生旋转扭矩。即使在塔段吊装过程中突然起风,塔段发生扭转,也不会带动起重钢丝绳一起扭转,造成钢丝绳缠绕现象的发生。

(3) 塔吊吊钩采用电动控制,通电可实现自动旋转,即使发生钢丝绳缠绕现象,也可以通过吊钩的自转实现纠正,这样可以保证在出现问题时能够迅速有效地解决。

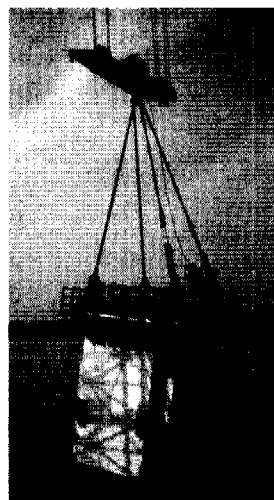


图12 塔吊吊钩构造

4 调节段施工

所谓调节段是指塔段之间不要求磨光顶紧,没有金属接触率的要求,接头仅靠高强螺栓连接、传递

荷载。设置调节段的目的是为了调整塔段空间位置。钢塔柱的现场安装是厂内加工、匹配的再现,现场安装施工中受温度、安装匹配精度以及塔吊附着的影响,塔段的空间位置会与期望值产生一定的偏差。虽然在工厂加工时采用了钢塔柱安装累计精度误差管理,通过实测数据理论分析,对端面进行加工,可以有效控制误差的范围,但对于特殊位置的塔段,安装精度有特殊要求。如 T1 段,必须消除锚固箱的误差,避免误差放大;在有连接横梁位置的塔段,即 T11、T16、T19 段,若这些塔段安装空间位置与厂内和对应横梁匹配时空间位置及相互关系有较大误差,则横梁必然不能匹配上去。

调节段的空间位置调整通过在接头位置加设薄铁片实现,不需要像 T1 段调整一样采用很多的工装设备。

5 主动横撑施工

钢塔柱主动横撑与一般混凝土塔柱施工基本相同,目的是为了调整索塔上下游塔肢的线形及内力。钢塔柱共设置主动水平横撑 4 道,每道需施加的水平力分别为:第 1 道 900 t、第 2 道 60 t、第 3 道 40 t、第 4 道 20 t。

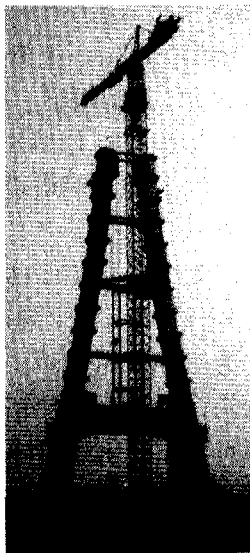


图 13 主动横撑布置

每道撑杆施加水平力时,均对塔柱横向位移和上下游塔柱轴线进行控制,塔柱内应力值为辅助控制指标。水平撑杆设置应力测试传感器,以监测水平力的变化。水平撑布置见图 13。

主动横撑的两端支撑在塔段接头的上下 2 个塔段的角壁板处,用拼接板螺栓连接,主动撑中间断开,留出千斤顶摆放空间,在主动动力达到预控监控目

的后,将主动撑断开处焊接、锁定即可。

6 横梁安装(以第 1 道横梁为例)

钢横梁与钢塔柱之间采用螺栓群连接,连接构造如图 14 所示。横梁安装及匹配的难易程度取决于已安装的对应该位置塔段的安装定位精度,因此,对应横梁位置的塔段设计为调节段。横梁在加工厂内预先与对应塔段经过立式匹配,并建立横梁与塔段的空间位置关系,安装时按照这些关系进行调整。

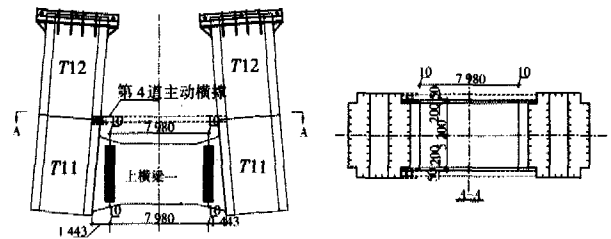


图 14 横梁与塔柱连接构造

6.1 横梁吊装

横梁采用塔吊吊装,由于横梁与塔柱之间只有每边 10 mm 的间隙,因此吊索需要设置调平装置,在横梁进入合拢口后需要精确调平,才能保证横梁顺利进入合拢口。

6.2 横梁安装误差调整措施

钢塔柱安装的精度本身比较高,而且通过逐节塔段累计误差精度管理控制,可以有效控制塔段的安装精度,下述调节措施仅指微量调整,也有备用措施。

(1) 对应塔段设置为调节段,尽可能最大限度地接近工程内匹配的相互空间关系;

(2) 设置主动横撑,可以调整合拢口的间距;

(3) 在合拢口上方对角线位置设置交叉手拉葫芦,以调整上下游塔肢顺桥向轴线的平行度及合拢口间距。

(4) 加大横梁与塔柱连接拼接板螺栓孔径:横梁与塔柱采用 M24 螺栓连接,为消除误差,便于横梁匹配,将拼接板与塔柱连接端螺栓孔径加大 2 mm,这样可以允许塔柱横桥向轴线有 4 mm 的南北错位。

6.3 横梁安装匹配

横梁全部吊装到位后,先匹配一边接口,将顶、底板和腹板拼接板全部安装到位,打入一定数量的销钉,并安装一部分临时固定螺栓,等到太阳落山后 4 h,使塔柱处在一个相对均匀的温度场内。由于日照产生的温度变形全部消除,开始匹配另一个接口,

此时需要调整的误差已经非常清楚,采用对应的措施即可调整到位,打入顶、底板和腹板拼接板销钉,完成横梁的匹配。

整个索塔3道横梁的匹配均非常顺利,每次匹配仅用几h就全部匹配到位,所有螺栓全部一次安装到位,没有出现需要二次投孔现象。

7 钢塔柱施工抗风措施

钢塔柱由于本身刚度较小,在施工过程中由于风振产生的摆幅很大,其中最不利的工况是钢塔柱安装到第10、11段前后,第1道横梁安装前。根据日本长大咨询公司提供的风洞试验报告,在此工况下风速达到10 m/s左右时,钢塔柱的摆幅将近1 m。为了有效控制钢塔柱施工过程中的摆动,确保钢塔柱安装施工安全,采取了以下几项抗风措施。

(1) 安装 TMD 减振阻尼器

TMD 是一种“钟摆式”减振阻尼器,在 T10 塔段安装完成后,安装 TMD 减振阻尼器,TMD 减振阻尼器位于 T10 节段的上、下游侧,每侧一个,其主要结构如图 15 所示。

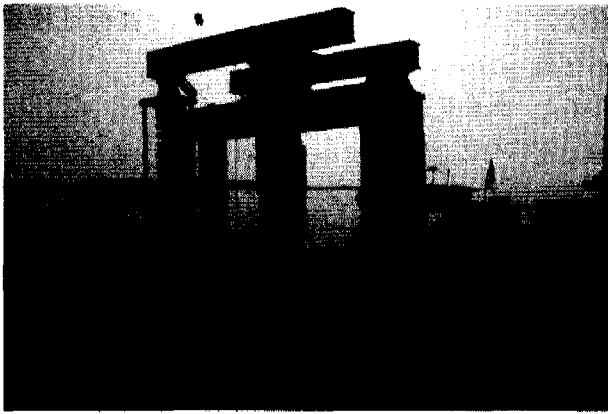


图 15 TMD 减振阻尼器结构构造

TMD 减振阻尼器是一个消能装置,在安装之前需要对钢塔柱的频率进行测量,然后调整 TMD 减振阻尼器的频率,使其最大限度地发挥消能作用。在 T15 塔段安装完成后,将 TMD 减振阻尼器转移到 T15 塔段上下游侧。TMD 的布置见图 16。

(2) 安装 TLD 减振阻尼器

TLD 是一种装有液体的“箱式”减振阻尼器,安装在第 2 道钢横梁上,箱内可以装水或其他液体,考虑到施工方便和冬季防冻要求,箱内填充防冻液。TLD 减振阻尼器箱体分为 2 层,每层 2 个,可以根据需要调整每个箱体内液体的容量,达到消能效果的

目标要求。

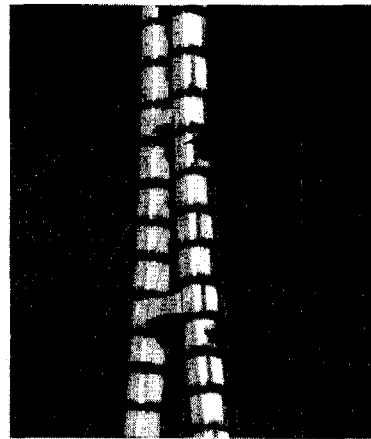


图 16 TMD、TLD 布置

(3) 平台护栏抗风减振

实际上在整个钢塔柱安装过程中,风振幅度非常小,最大振幅不超过约 5 cm,除了上述抗风减振措施起作用外,还有一个重要影响因素,就是 MD-3600 塔吊,塔吊的附墙支撑在钢塔柱上,在得到其需要的约束反力的同时,也给钢塔柱施加了一个很大的约束,这一点可能是非常重要的。

8 钢塔柱安装施工工效分析

钢塔柱总高度 179.8 m,一个索塔包括 45 个塔柱节段,其中 42 个塔段,3 道横梁。从 2004 年 9 月 8 日安装 T1 段开始,至 2004 年 12 月 6 日索塔封顶,整个钢塔柱安装共历时 91 d(包括塔机顶升、主动横撑安装及主动力的施加等全部所有工序)。总平均安装速度为 1.976 m/d,约 0.5 节/d。标准节段安装速度为 2 d/节(2 个塔段),横梁安装速度为 1 d/道。索塔最高施工速度为 10.471 m/d。

由于本工程是首次安装钢塔柱,摸索经验、分析数据以及其他不可预见因素影响约占用了 36 d,占 40%,若扣除这部分时间,正常情况下全塔施工总平均速度将达到 3.26 m/d。

9 结语

南京三桥钢塔的成功建造汇集了国内最优秀的设计、监控、科研、知名高校、施工以及国外咨询公司等数十家单位的智慧结晶,为桥梁建设提供了更大的选择空间,也为钢塔的设计、监控、制造加工、安装等提供了宝贵的经验。