

节段间“金属接触+高强螺栓”联合受力 钢塔柱的线形控制技术

李军平

(中铁宝桥集团有限公司, 陕西 宝鸡 721006)

摘 要: 钢塔节段间常见的连接方式有“金属接触+高强度螺栓”连接与焊接连接两种, 不管塔段间采用哪种连接方式, 确保钢塔柱的成桥线形非常重要。以塔段间“金属接触+高强螺栓”联合受力钢塔柱为例, 详细介绍了该类钢塔柱的建造难点及确保塔柱线形的技术措施, 可供相关人员参考。

关键词: 桥梁钢塔; 节段; 接口匹配; 线形控制; 预拼装

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)03-0057-04

0 引言

桥梁钢塔柱因自重轻可大大减少基础规模、抗震性能好、施工速度快而得到了快速发展, 自从2005年我国第一桥梁钢塔——南京长江三桥钢塔柱建造以来, 已成功建造了数十座桥梁钢塔项目^[1]。而采用“金属接触+高强度螺栓”连接方式的, 除了南京长江三桥钢塔柱以外, 还有泰州长江公路大桥、马鞍山长江公路大桥、鹦鹉洲长江大桥的钢中塔等, 对于该连接方式的钢塔柱, 其线形控制尤为关键、也有较大的难度。

1 “金属接触+高强螺栓”联合受力钢塔柱的建造难点

(1) 钢塔柱一般由多段组成, 塔段断面通常为矩形, 由壁板、腹板及其加劲肋、横隔板等组成, 所用钢板厚、焊接量大, 不能像钢箱梁一样采用“长线法”匹配制作, 只能严格控制每个塔段的几何精度来保证接口匹配, 因其接口采用的是拼接连接方式, 对匹配精度要求极高, 故如何保证塔段的几何精度是难点之一。

(2) 根据钢塔柱的受力要求, 一般钢塔柱的垂直度要求 $\leq 1/4\ 000$, 如何实现这一较高的精度要求是钢塔柱建造的又一主要难点。

针对以上难点, 制定合理的制造方案和工艺措施至关重要。

收稿日期: 2022-09-28

作者简介: 李军平(1965—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 钢结构大师, 从事钢桥梁施工技术研究工作。

2 钢塔节段焊接变形及几何精度控制技术

为了保证钢塔节段在桥位安装时的良好匹配, 对其几何精度提出了较高的要求, 断面高度、宽度允许偏差 $\pm 2\text{ mm}$; 端口对角线差 $\leq 3\text{ mm}$; 扭曲 $\leq 3\text{ mm}$; 预拼及桥位安装时相邻接口错边量 $\leq 2\text{ mm}$ (个别角点 $\leq 3\text{ mm}$)。

要保证如此高的精度要求, 需制定科学合理的总体方案及焊接变形约束措施。通常采用“板单元→板单元合件→块体→箱体”的分步制作方案, 使得焊接变形分步释放, 并采取了对称施焊、避免仰焊以及焊接变形约束等措施, 达到精度要求^[2,3]。

3 钢塔柱线形控制技术

由于该类钢塔柱的钢塔节段在安装时需要金属接触传力(顶紧), 不能像焊接钢塔一样通过接口的间隙调整线形, 也不能像钢筋混凝土钢塔柱一样通过模板调整线形, 而需要采取多种措施来保证钢塔柱的线形。

3.1 钢混结合段施工精度控制

考虑到土建施工精度受影响因素较多, 对钢混结合段预埋后的标高允许偏差按不大于 $\pm 1\text{ mm}$ 、横桥向和纵桥向倾斜度不大于 $1/5\ 000$ 控制。

3.2 钢塔节段加工精度控制

3.2.1 钢塔节段端面加工及预拼标准要求

为了满足钢塔桥位安装后的线形要求, 参考国外钢索塔制造架设技术标准, 制定了钢塔节段端面加工及两节段预拼装的精度要求:

- (1)端面垂直度(横桥向、顺桥向) $\leq 1/10\ 000$;
- (2)平面度为 0.08 mm/m , 0.25 mm/全平 ;
- (3)粗糙度需 $\leq Ra12.5\ \mu\text{m}$;
- (4)塔段长度为 $\pm 2\text{ mm}$;
- (5)预拼及桥位架设金属接触率为壁板、腹板 $\geq 50\%$;加劲肋 $\geq 40\%$;
- (6)两节段预拼垂直度 $\leq 1.5/10\ 000$ 。

3.2.2 确保端面加工精度的工艺保证措施

一般的钢塔断面都比较大,要达到如此高的精度要求,需采取多种工艺措施:

(1)端面加工工艺基准的确定

用API对节段端面轮廓上的特征点(如图1)及壁板上的3个激光站标进行空间测量,测量完成后在计算机上用测量数据构造节段的三维数据模型MS(如图1)。

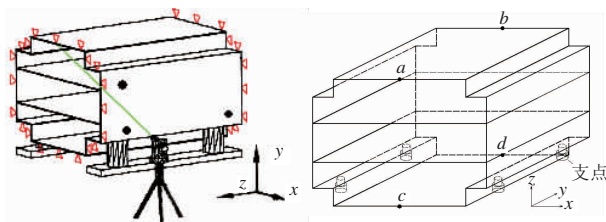


图1 节段端面轮廓上的特征点

根据设计图纸,在计算机上利用节段端面角点的理论数据构造理论节段的三维数据模型ML。用专用优化程序在同一坐标系中将理论节段数据模型ML与实际节段数据模型MS进行最小二乘意义上的拟合(如图2),用最佳拟合状态下理论模型的两个基准面作为实际塔段的加工工艺基准,并用专用工装划出端面加工线和节段轴线^[4]。

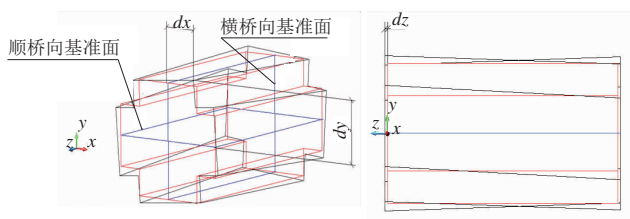


图2 ML与MS拟合

(2)温度管理

在加工过程中对温度进行严格管理。塔段测量划线、最后一道精加工及最终整体检测应在温度稳定时段进行,壁板与腹板温差不能大于 2°C 。

(3)塔段找正及支撑反力管理

在塔段端面加工和水平预拼装时都要对塔段进行找正和支撑反力控制。钢塔节段在自重作用下的微小变形都将在端口反映出来,从而影响水平预拼或桥位架设时端面的金属接触率。由于钢塔节段结

构复杂,不是常规的匀质梁体,难以利用材料力学公式进行计算,必须通过有限元方法进行精密计算,来确定支点位置和支点反力的大小。根据塔柱的线形精度要求,提出以下判据:

$$\begin{aligned} |a_y| &\leq 0.01\text{ mm}, |b_y| \leq 0.01\text{ mm}, |c_y| \leq 0.01\text{ mm}, \\ |d_y| &\leq 0.01\text{ mm} \end{aligned} \quad (1)$$

$$|a_y - b_y| \leq 0.01\text{ mm}, |c_y - d_y| \leq 0.01\text{ mm} \quad (2)$$

$$|a_y - c_y| \leq 0.01\text{ mm}, |b_y - d_y| \leq 0.01\text{ mm} \quad (3)$$

式中: a_y 、 b_y 、 c_y 和 d_y 分别为图1中点a、b、c和d沿y方向的位移。

当计算结果满足上述要求时,即认为结果能够满足精度要求。

根据有限元分析结果确定支点位置(如图3)并对反力进行管理(如图4),用数控液压调整系统进行找正,使各支点反力满足公式(4)、(5)要求,这样钢塔节段的扭曲变形就能控制在可接受的范围之内。

$$\frac{|N1 - N2|}{N1 + N2} \leq 0.05 \quad (4)$$

$$\frac{|N3 - N4|}{N3 + N4} \leq 0.05 \quad (5)$$

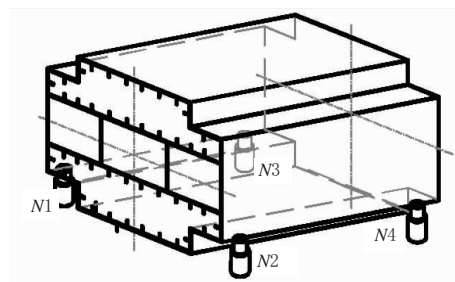


图3 塔段支撑位置示意图



图4 塔段支撑反力调整

(4)合理的塔段端面加工工艺设计

根据塔段所用材质及相关经验合理选择切削刀具、切削参数、走刀顺序等。同时,为了减少加工振动对端面加工精度的影响,设置必要的端面刚性加固工装(如图5)。为了保证机加工精度,端面加工分粗铣、半精铣和精铣三步完成。如果精铣后端面平面度达不到要求,还需进行修整加工。

(5)先进、高精度的配套设备

极高的加工精度要求,除了具有满足要求的大



图5 钢塔端面加工及端面刚性加固

型落地镗铣床(如图5)以外,更离不开高精度的支撑系统和测量仪器。

a. 高精度的塔段数控液压调整支撑系统(如图6),其四点或六点同步顶升精度为 $\pm 0.50\text{ mm}$;单点调整精度为 $\pm 0.15\text{ mm}$ 。



图6 数控液调整系统

b. 高精度的激光跟踪测量检测技术(简称API,图7为塔段端面加工后测量),其精测精度及范围为三维空间测量精度 5 ppm ($5\text{ }\mu\text{m/m}$);坐标重复性需优于 2.5 ppm ($2.5\text{ }\mu\text{m/m}$);测量范围 $>60\text{ m}$ 。



图7 钢塔节段端面加工后测量

3.3 钢塔节段预拼装

钢塔节段预拼装的主要目的是检验塔段接口的匹配情况及端面加工精度,并为钢塔累积精度管理提供资料,同时,对塔段安装的扭转进行控制,并设置桥位的安装基准线等。既然预拼装的主要目的是检验塔段的接口匹配等情况,那不管采用立式预拼装还是水平预拼装,只要采用两两节段预拼装即可达到预拼装目的。

立式预拼装和水平预拼装各有优缺点,选择哪

一种预拼方案,应根据具体的结构特点、厂房及起重设备条件、工期要求等因素而定。南京三桥钢塔采用在室外的立式预拼方案,考虑到温度影响,检测均在凌晨3至5点,温度相对恒定的时段进行(立式预拼装见图8);泰州桥、马鞍山桥钢塔采用了在厂房内水平预拼装方案,为了保证金属接触率要求,与设备厂家研发了水平数控加力系统,以模拟桥位架设时塔段自重对金属接触率的有利影响,从而,保证了水平预拼的顺利实施^[4],见图9。

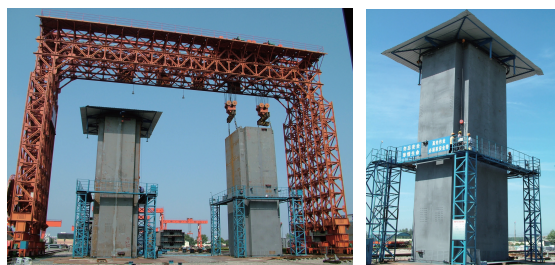


图8 钢塔节段两两立式预拼装



图9 钢塔节段两两水平预拼装

两种预拼方案相比较而言,水平预拼装便于在厂房内完成,对起重设备要求不高、有利于温度管理、且安全性及自动化程度较高,故具有较大的优势。

3.4 钢塔节段累积精度管理

保证塔段的端面加工精度是为了确保钢塔柱线形,然而,由于塔柱线形精度要求极高,即使每个塔段达到较高的允许偏差要求,但几段安装后公差累积可能导致塔柱线形不能满足标准要求。为了克服塔段加工误差积累而导致安装后塔柱高度、线形、扭转等项目超差,对塔段的加工及预拼装进行了累积精度管理。即通过使用高精度的测量仪器,测量单节段的长度、端面垂直度以及预拼装时两节段间的错台量等信息,利用计算机进行钢塔柱的仿真预拼,预测钢塔柱的安装误差,并以预测结果指导待加工节段的端面加工及预拼装时节段扭转的控制,从而实现对钢塔节段制造和安装精度的控制,确保钢塔柱的最终线形^[5]。钢塔柱累积精度管理流程见图10。

钢塔柱参照系和轴线偏移累积误差计算方法分别见图11、公式6。某塔柱的累积精度管理结果见图12。通过累积精度管理,确保钢塔柱能以理论轴线为中心,在一定允许误差范围内摆动而确保最终的钢塔柱线形满足标准要求。

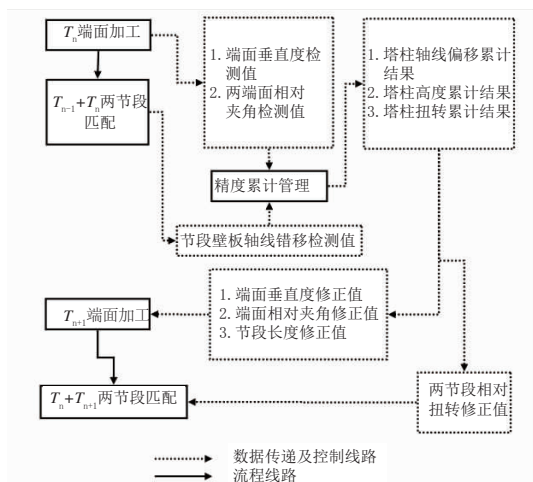


图 10 钢塔累计管理精度流程

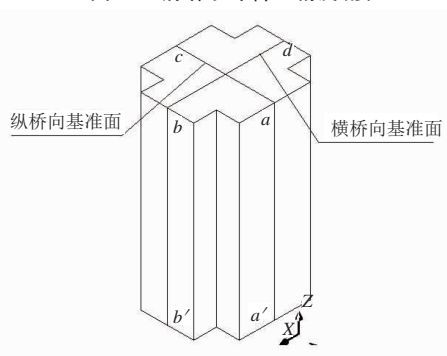


图 11 精度管理参照系

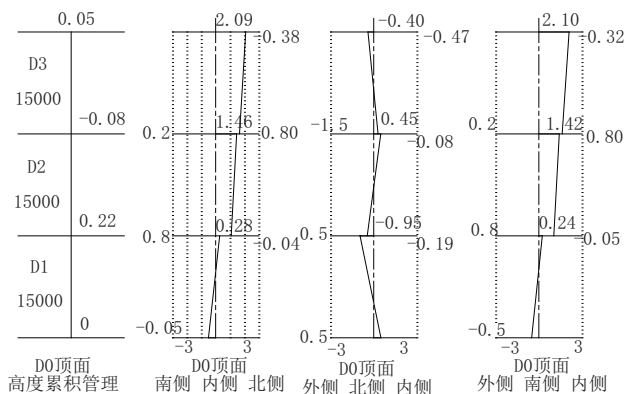


图 12 某钢塔柱的精度管理图(单位:mm)

$$X_i = X_{i-1} + \chi_i + \delta_i + \sigma = X_{i-1} + L_i \sin \theta_i + \delta_i + L_i \times \sum_{n=2}^i \alpha_n \quad (6)$$

式中: X_i 为 i 节段轴线累积偏差; X_{i-1} 为 $i-1$ 节段轴线累积偏差; L_i 为 i 节段的节段长度; θ_i 为 i 节段下端垂直度误差; χ_i 为下端垂直度误差引起的壁板轴线偏移; δ_i 为 i 节段与 $i-1$ 节段的壁板轴线错台; α_n 为前 $i-1$ 节段的累积角度误差。

3.5 调整接口设置及实施

尽管对钢塔节段采取了端面精确加工、预拼装验证及必要的修正加工、累积精度管理等措施,但考虑到累积精度管理指导节段加工时仍有公差带的限制,而且累积精度管理采用的无应力假设和刚体假

设与实际有一定的差别等,故不能完全保证满足较高的安装精度要求。为了保证高精度的塔柱线形要求,设计时还需预留必要的调整接口,如:南京三桥钢塔柱共 21 个接口,预留了三个调整接口 J1、J11、J17。其中 J1 调整接口的设置和实施尤为关键,由于混凝土施工过程中存在收缩、徐变现象及诸多因素的影响,钢混结合段的实际空间位置会与理论位置有一定偏差。

3.6 塔吊附墙及横梁安装注意事项等

塔吊附墙、钢塔柱横梁的安装,须尽量使钢塔柱处于自由状态,而不应使塔柱产生附加应力而影响塔柱的线形。

另外,钢塔安装不仅要保证塔柱线形,而且还要兼顾受力,为此,在钢塔柱安装过程中,还增设了必要的临时主动横撑。

4 取得效果

通过制定科学合理的钢塔节段制造方案及必要的工艺措施的实施,确保了钢塔节段达到了较高的几何精度要求和桥位的顺利安装;通过多种塔柱线形控制措施的实施,确保了南京长江三桥钢塔柱、泰州长江公路大桥和马鞍山长江公路大桥钢中塔的成桥线形均远优于 1/4 000 的标准要求^[6-8]。说明钢塔节段制造及钢塔柱线形控制方案合理可行、工艺措施得当,可供类似项目借鉴。

5 结论

对于“端面金属接触+高强螺栓”联合受力钢塔柱,通过制定“板单元→板单元合件→块体→箱体”的分步制作方案、对称施焊及焊接变形约束等措施,保证了钢塔节段的几何精度;通过控制钢混结合段施工精度、钢塔节段高精度加工、预拼装、累积精度管理、调整接口设置等措施保证了钢塔柱的线形,其中塔段预拼装主要是检验钢塔节段间的匹配情况,以确保桥位顺利安装,基于这一目的,采用两两节段水平预拼装具有更大的优越性。

近几年,有些大桥钢塔柱的塔段间采用了混合接头设计,即塔段外壁板对接缝采用焊接,内腹板及加劲肋采用“金属接触+高强螺栓”共同传递轴力与弯矩。这类钢塔柱的线形控制难度会更大,既要参照“金属接触+高强螺栓”联合传力钢塔柱进行塔柱线形等控制,还要考虑何时加工焊接坡口及环缝焊接作业等对其线形的影响,值得进一步研究。

(下转第 79 页)

2.2.3 消除桩间液化土后对减隔震桥梁抗震性能影响的对比分析

通过地基处理,可完全消除液化土层,此时桩间液化土层不再折减(以下简称“工况二”)。

现将其与未消除桩间液化土(以下简称“工况一”)的抗震性能结果进行对比,其纵向动力特性对比结果见表 5,其效应值——梁体位移、中墩的墩顶位移、支座位移、墩底弯矩、桩基最大弯矩对比结果见表 6。

表 5 工况一和工况二桥梁动力特性对比			单位:s
项目	纵向一阶振型的周期	纵向二阶振型的周期	
未消除桩间液化土	2.841	0.415	
消除桩间液化土	2.777	0.145	

表 6 工况一和工况二地震效应结果对比					
项目	梁体位移 / mm	中墩墩顶位移 / mm	中墩支座位移 / mm	中墩墩底弯矩 / (kN·m)	中墩桩基最大弯矩 / (kN·m)
未消除桩间液化土 S1	150	30	120	2 320	1 677
消除桩间液化土 S2	125	5	120	1 845	219
(S1-S2)/S1	16.7%	83.3%	0.0%	20.5%	86.9%

分析可知,消除桩间液化土可以有效提高下部结构的刚度。但对于实体花瓶墩,桥墩与支座的串联刚度主要由刚度较小的支座刚度控制,所以对于全桥等效刚度的影响较小,全桥的纵向一阶振型周期只略微减小。

同时消除桩间液化土后,下部结构的刚度提高,使得墩顶位移明显减少。并根据全桥等效阻尼比公式可知:

$$\zeta_{ep} = \frac{2 \sum [Q_{d,i}(d_i - \Delta_{y,i})]}{\pi \sum [K_{eq,i}(d_i + d_{p,i})^2]}$$

式中: $d_{p,i}$ 为桥墩顶部水平位移。墩顶位移的减小,提高了支座变形耗能的比重,使得全桥等效阻尼比增大,桥梁下部结构的地震效应减小。特别对于桥梁桩基,非液化土还能对桩基提供有效支撑,对于减小桩基的地震效应效果显著。

但对于工程项目来说,地基处理不仅会增加工期,而且会增大项目投资。在满足规范抗震验算要求的前提下,是不消除桩间液化土增加构件尺寸或配筋,还是消除桩间液化土减小结构地震效应,需要根据不同项目的特点酌情选择。

3 结 语

- (1)高烈度区液化场地连续梁桥宜采用减隔震设计,可以大幅改善地震作用下制动墩墩身及其桩基的受力。
- (2)采用了减隔震设计后,结构基本周期较长、非线性特征较强,更宜采用时程法进行分析。
- (3)消除桩间液化土后,提高了支座变形耗能的比重,改善了地震作用下桥梁下部结构的受力。同时,非液化土能对桩基提供有效支撑,对减小桩基的地震效应效果显著。

参考文献:

[1] JTG/T 2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].

[2] 郭红梅,周燕,张凯,等.大跨连续梁桥桩基础的减隔震分析[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(1):70-74.

[3] 范立础,王志强.桥梁减隔震设计[M].北京:人民交通出版社,2001.

[4] 张西丁.基于修正反应谱法的简支桥梁减隔震性能研究[J].工程与建设,2021,35(3):547-552.

[5] JT/T 852—2013,公路桥梁摩擦摆式减隔震支座[S].

(上接第 60 页)

参考文献:

[1] 李军平,刘治国,车平.我国钢桥梁制造技术的发展及展望[J].桥梁,2020(2):42-47.

[2] 李毅,李军平.南京三桥钢塔节段焊接变形及几何精度的控制[J].钢结构,2006(3):89-91.

[3] 戴永宁,林鸣,武焕陵,等.南京长江第三大桥钢索塔技术[M].北京:人民交通出版社,2005:251-261.

[4] 张永利,顾碧峰.钢塔节段水平预拼装关键技术研究[J].中国工程科

学,2010(4):48-52.

[5] 张永利,吉敏廷.南京长江三桥钢索塔制作精度管理系统研究[J].钢结构,2008(1):56-60.

[6] 李军平,李毅,成宇海.南京长江第三大桥钢塔柱制作与安装技术[J].桥梁建设,2006(2):61-61,66.

[7] 戴书学.泰州长江公路大桥钢塔柱吊装施工[J].中国港湾建设,2011(2):51-54.

[8] 吴义龙.马鞍山长江公路大桥钢塔线形控制技术[J].世界桥梁,2014(6):21-25.