DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2024.06.024

**文章编号:**1671-2579(2024)06-0213-06

# 深中通道变截面连续钢箱梁大节段制造参数 的确定方法

# 董创文,陈龙\*,李传习

(长沙理工大学土木工程学院,湖南长沙 410114)

摘要:制造参数的精准计算是连续钢箱梁桥大节段安装高效高精度速成的关键。该文以深中通道变截面钢箱梁为背景,首先,建立施工全过程梁单元有限元模型,获得预拱度;其次,基于各小梁段中性轴高度统计出平均中性轴位置;然后,抓住平均中性轴处梁长不变的变形特征,在平均中性轴处叠加预拱度,给出制造线形;最后,根据受力特征给出大 节段端面倾角,得到完整的钢箱梁制造参数。二期恒载加载前的实施结果表明:钢箱梁顶面线形总体平顺,实测线形 与预测线形吻合良好,验证了该文方法的正确性。

关键词:桥梁工程;钢箱梁;制造线形;大节段吊装;平均中性轴中图分类号:U445.4;U448.215文献标志码:A

# Determination of Manufacturing Parameters of Large Section of Continuous Steel Box Beam with Variable Section in Shenzhen-Zhongshan Passage

DONG Chuangwen, CHEN Long<sup>\*</sup>, LI Chuanxi

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: Accurate calculation of manufacturing parameters is the key to the efficient, high-precision, and rapid installation of large sections of continuous steel box beam bridges. Taking the steel box beam with the variable section in Shenzhen-Zhongshan Passage as the background, this paper first established a finite element model of the beam element in the whole construction process to obtain the pre-camper. Secondly, the average neutral axis position was calculated based on the height of the neutral axis of each beam section. Then, according to the deformation characteristic that the beam length remained unchanged at the mean neutral axis, the pre-camber was superimposed at the mean neutral axis to get the manufacturing line shape. Finally, according to the mechanical characteristics, the dip angle of the large section end face was given to obtain the complete manufacturing parameters of the steel box beam. The implementation results before the loading of the second-phase dead load show that the line shape of the top surface of the steel box beam is generally smooth, and the measured line shape is in good agreement with the predicted line shape, which verifies the correctness of the proposed method.

Keywords: bridge engineering; steel box beam; manufacturing line shape; large section lifting; mean neutral axis

0 引言

与混凝土梁桥相比,钢箱梁具有自重轻、跨越能

力强、适合工厂化制造、方便安装等优点,广泛应用 于现代桥梁<sup>[1]</sup>。当桥位在较深水域时,大跨度连续钢 箱梁桥采用大节段整体吊装施工方法优势明显,可

收稿日期:2023-03-27

- 基金项目:湖南省交通科技项目(编号:202016)
- 作者简介:董创文,男,博士,讲师.E-mail:dcwdd@163.com

<sup>\*</sup>通信作者:陈龙,男,硕士研究生.E-mail:947458228@qq.com

大大减少现场焊缝数量,提高整体质量和稳定性,简 化工序,加快工期<sup>[24]</sup>。但是钢箱梁大节段尺寸在工 厂制造时已确定,现场调节措施有限<sup>[5]</sup>,所以制造线 形的准确计算是大节段连续钢箱梁顺利高质量建成 的关键。

钢箱梁制造参数多基于无应力状态控制理念[6]。 Yiu 等<sup>[7]</sup>提出了确定结构无应力线形的一般方法:单 元解体法、单元CR位移法、结构解体法、切线拼装迭 代法:顾雨辉等[8]在崇启大桥大节段钢箱梁施工监控 时,依据施工全过程计算给出成桥线形预拱度,进行 参数分析找出敏感因素,严格控制钢箱梁无应力制 造和安装过程,取得了良好的实施效果;方远<sup>19</sup>、冼尚 钧<sup>[10]</sup>在港珠澳大桥大节段钢箱梁施工控制时,详细 分析了钢箱梁施工过程的受力状态,给出了制造线 形、架设控制参数,为大桥施工提供了理论数据和参 考。基于简便的一次落架法思想,李传习等[11]给出 了顶推钢箱梁的制造线形、节段制造参数,提出"等高 等邻边梯形法";针对一般的分节段施工钢箱梁,基于 安装时节段间交界面实现平顺对接的思想,汪劲丰 等<sup>[5]</sup>利用有限元位移结果给出了施工过程阶段相对位 置关系,提出了钢箱梁制造参数的通用计算方法。

继港珠澳大桥之后,深中通道又大规模采用110 m跨连续钢箱梁大节段吊装法<sup>[4,12]</sup>。通过参与施工 控制实践,具体分析主梁变截面的特殊性,给出钢箱 梁大节段制造参数的确定方法,为本桥及类似桥梁 大节段吊装的施工控制提供参考。

# 1 工程概况

深中通道北距虎门大桥约30km,南距港珠澳大桥约38km,是连接广东省深圳市和中山市的世界级超大的"桥、岛、隧、地下互通"集群工程。桥梁工程全长17.2km,包括两座主桥:主跨1666m的伶仃洋大桥和主跨580m的中山大桥,其中中山大桥两侧的泄 洪区非通航孔桥均采用110m跨径的钢箱连续梁桥。

中山大桥西泄洪区非通航孔桥如图1所示。其 中,跨径布置为4×110 m,桥面纵坡为-2.0%,里程 K27+628~K28+068,平曲线要素为:直缓点里程 K27+656.117、缓和曲线长度260 m、圆半径2300 m。 采用整墩分幅布置,单幅钢箱梁桥宽20 m,两幅间 距0.5 m,桥面总宽40.5 m。标准钢箱梁截面中心线 处内轮廓梁高4 m。左幅在K27+655~K27+915 区段为超高变化段,钢箱梁横坡由2.5%变化至 -2.5%;断面具体变化方式为:以设计高程点处为 旋转轴,顶板随路线横坡变化,底板保持水平,调整 腹板高度以及横隔板的相关尺寸。支座布置方式 为:中墩曲线内侧设置固定支座、外侧设置横向活动 支座,其余墩内侧设置纵向活动支座、外侧设置双向 活动支座。



图 1 梁段划分图(单位:m) Figure 1 Beam section division (unit:m)

工厂制造时,单幅钢箱梁划分为43个小节段,再 拼成4个大节段,大节段长度分布为133.5m、110.0m、 110.0m、86.5m。工厂小节段连接和现场大节段连 接均采用以焊接为主的栓焊组合方式:除顶板 U 肋 采用栓接连接外,其余均采用焊接连接。

鉴于深中通道中山大桥西泄洪区左幅构造较为

复杂,本文以其为例开展研究。

2 计算模型与预拱度

## 2.1 计算模型

采用 Midas/Civil 软件,建立全桥梁单元有限元 模型,如图2所示。主梁及牛腿共有338个节点,326 个单元。其中,主梁节点布置在小节段端部、横隔 板、横肋板和支座等位置;主梁共设置39种截面类 型,能较好模拟每个小节段的截面参数。施工阶段 共8个,具体见表1。除第1个大节段外,后续大节段 就位和连接借助牛腿来完成,其实物照片见图3。



图 2 模型示意图 Figure 2 Model

表1 施工阶段简表 Table 1 Summary of construction phase

序号	工序内容	序号	工序内容
1	大节段1 <sup>#</sup> 吊装就位	5	大节段2 <sup>#</sup> 、3 <sup>#</sup> 连接
2	大节段2 <sup>#</sup> 吊装就位	6	大节段4 <sup>#</sup> 吊装就位
3	大节段1 <sup>#</sup> 、2 <sup>#</sup> 连接	7	大节段3 <sup>#</sup> 、4 <sup>#</sup> 连接
4	大节段3 <sup>#</sup> 吊装就位	8	二恒加载



图 3 牛腿构造实物照片 Figure 3 Bracket construction object

#### 2.2 预拱度

基于上述全桥梁单元有限元模型,进行施工全 过程正装分析,并进一步考虑活载,获得预拱度。提 取小节段端点处预拱度,如图4所示;需注意的是,两 个大节段交界处两侧节点预拱度不同。



图4 节段端点预拱度值



# 3 制造参数的确定

## 3.1 平均中性轴的概念

在自重及二期恒载作用下,大跨度连续梁受弯为主,主要变形是弯曲变形。梁中性轴上的点,既不伸长也不缩短,即纵向长度不变<sup>[13]</sup>,是梁节段重要的不变量,可作为钢箱梁制造的控制参数。但是因相邻小节段相交处会出现顶底板、U肋等钢板厚度突变造成中性轴高度在相接处也发生突变,而钢梁制作单位一般是通过制作线形中给出的基准线进行绘图软件建模,通过平移、旋转等操作,绘制出立体且精准的三维模型,若按照图5中实际中性轴设置基准线,将给制作单位添加巨大的麻烦,且制作线形中也需对任意小节段进行说明,数据繁多,不利于制作。



Figure 5 Neutral axis

本算例各节段中性轴距底板的高度值见表2及 图6。由表2、图6可见:全桥范围内中性轴距底板的 高度为2.4247~2.8083m,数值变化较大且不平顺; 若以实际中性轴位置来给定制造参数,将带来诸多 不便。

将各梁段的中性轴高度进行加权平均,得到"平 均中性轴高度",通过平均中性轴控制制作线形中的 基准线,如图5平均中性轴轴线所示;平均中性轴高 度*h*定义如下:

$$h = \frac{\sum l_i h_i}{\sum l_i} \tag{1}$$

式中:i为梁段序号,取值 1~43; $l_i$ 为梁段i的轴线长度,可近似取梁端里程差; $h_i$ 为梁段i的中性轴高度;h为所有梁段的平均中性轴高度,由表 2数据进行计算,可得h = 2.63 m。

#### 3.2 平均中性轴处的制造线形

在平均中性轴高度处给出预拱度,即可形成相 对简单的制造线形,见表3及图7。基于该制造线形,

Table 2Neutral axis height and length of each beam section										
序号	中性轴高度/m	节段长度/m	序号	中性轴高度/m	节段长度/m	序号	中性轴高度/m	节段长度/m		
1	2.511 8	13.1	16	2.658 9	10.0	31	2.673 4	10.0		
2	2.424 7	10.0	17	2.670 6	13.0	32	2.604 7	7.0		
3	2.426 8	10.0	18	2.682 3	10.0	33	2.639 0	10.0		
4	2.552 1	10.0	19	2.737 2	10.0	34	2.604 7	10.0		
5	2.563 8	13.0	20	2.747 6	10.0	35	2.673 4	10.0		
6	2.575 6	10.0	21	2.558 2	7.0	36	2.679 7	10.0		
7	2.465 2	10.0	22	2.478 5	10.0	37	2.679 7	10.0		
8	2.477 7	10.0	23	2.574 7	10.0	38	2.808 3	10.0		
9	2.481 7	10.0	24	2.785 7	10.0	39	2.808 3	13.0		
10	2.426 1	10.0	25	2.796 1	10.0	40	2.808 3	10.0		
11	2.465 4	7.0	26	2.760 9	10.0	41	2.679 7	10.0		
12	2.442 3	10.0	27	2.771 1	13.0	42	2.679 7	10.0		
13	2.517 7	10.0	28	2.782 9	10.0	43	2.773 6	13.1		
14	2.533 3	10.0	29	2.790 1	10.0					
15	2.648 7	10.0	30	2.679 7	10.0					

表 2 各梁段中性轴高度和长度 able 2 Neutral axis height and length of each beam section



图6 梁段中性轴高度

Figure 6 Neutral axis height of beam section

制造单位根据节段端点处的设计梁高进行几何偏移,即可确定小节段底板长度、顶板长度及小节段之间夹角等梁端制造参数。通过此方法得出的制造线形,既确保了制造精度,又可简化制造难度。

# 3.3 大节段端面倾角

上一节的制造线形,没有给出大节段端面倾角。 大节段端面倾角分两类,第1类:整联钢箱梁首、尾端 面倾角;第2类:大节段之间的端面倾角。

(1) 整联钢箱梁首、尾端面倾角

设计意图为:成桥状态(恒载+1/2汽车活载)

表 3 平均中性轴处的制造线形 Table 3 Manufacturing line shape at mean neutral axis

					-	-					
大节	距始端/	相对高	大节	距始端/	相对高	大节	距始端/	相对高	大节	距始端/	相对高
段号	m	程/mm	段号	m	程/mm	段号	m	程/mm	段号	m	程/mm
	0.4	0	2	133.5	2 763	3	243.5	4 943		353.5	7 219
	13.5	358		143.5	2 993		253.5	5 173		363.5	7 475
	23.5	621		153.5	3 215		263.5	5 393		373.5	7 717
	33.5	868		166.5	3 484		276.5	5 658		383.5	7 940
	43.5	1 094		176.5	3 674		286.5	5 844	4	396.5	8 196
	56.5	1 358		186.5	3 850		296.5	6 018		406.5	8 364
1	66.5	1 537		196.5	4 015		306.5	6 186		416.5	8 509
	76.5	1 699		206.5	4 174		316.5	6 353		426.5	8 635
	86.5	1 849		216.5	4 337		326.5	6 530		439.6	8 783
	96.5	1 993		223.5	4 462		333.5	6 671			
	106.5	2 141		233.5	4 655		343.5	6 894			
	113.5	2 258		243.5	4 853		353.5	7 125			
	123.5	2 4 4 4									
	133.5	2 636									



Figure 7 Manufacturing line shape of section

下,桥面线形为设计线形。另外,为确保全线路平顺,成桥状态下各联首、尾梁端保持竖直。由于整联 钢箱梁端面为自由端,故端面与梁轴线夹角始终不 变;加之其距离边墩支座很近,故成桥状态局部线形 即设计线形,如图8所示。



图8 一联梁端几何状态

#### Figure 8 Ggeometry of a joint beam end

图 8 中,有几何关系式:

$$\boldsymbol{\alpha}_1^b = 90^\circ - \boldsymbol{\alpha}_1^d \tag{2}$$

$$\alpha_m^f = 90^\circ + \alpha_m^d \tag{3}$$

式中: a<sup>4</sup> 为节段1(一联起始节段)端面处设计纵坡所 对应的水平倾角,从架设前进方向看,上坡时取正 值; a<sup>4</sup> 为整联钢箱梁起点端面倾角,即节段1后方端 面与底板的夹角; a<sup>d</sup> 为节段m(一联末尾节段)端面处 设计纵坡所对应的水平倾角,从架设前进方向看,上 坡时取正值; a<sup>f</sup> 为整联钢箱梁终点端面倾角,即节段 m前方端面与底板的夹角。

对于本文算例,设计纵坡2%,故有:

$$\alpha_1^b = 90^\circ - \arctan(0.02) = 88.854^\circ$$

 $\alpha_m^f = \alpha_{43}^f = 90^\circ + \arctan(0.02) = 91.146^\circ$ 

(2) 大节段之间的端面倾角

待安装大节段吊装就位时,其后端依靠牛腿与 已安装大节段前端临时连接,大节段间环缝两侧的 端面均为自由端,如图9所示。



图 9 大节段环缝处几何状态 Figure 9 Geometry of girth weld of large section

环缝连接完成后,若大节段分段点合适<sup>[10]</sup>(本文 算例满足这一条件),后续大节段及二期恒载在该断 面引起的弯矩均很小,故该断面基本可视为不承担 弯矩或仅承担微小弯矩。基于此,可认为大节段之 间的端面倾角不变。为确保线形平顺,故有几何关 系式:

$$\alpha_j^f + \alpha_{j+1}^b = 180^\circ \tag{4}$$

式中:  $\alpha_j$ 为已安装大节段前端节段 j 前方端面与底板 的夹角;  $\alpha_{j+1}^b$ 为待安装大节段后端节段 j + 1 后方端面 与底板的夹角。

对于本文算例,为方便制造,取:

$$\alpha_i^f = \alpha_{i+1}^b = 90$$

即大节段之间的端面倾角均取值90°。

# 4 成桥线形误差

目前,本桥算例所引实桥已架设完成。二期恒载加载前,钢箱梁顶面高程相对于理论值的误差如图10所示。





由图 10可以看出:实际高程误差在-14~11 mm 之间,线形总体平顺,达到设计目标状态,满足施工 监控预期目标。

# 5 结论

(1)基于梁单元有限元模型,进行施工全过程正装分析,并进一步考虑活载,得出预拱度。

(2)在平均中性轴高度处给出预拱度,即可形成 相对简单的制造线形。

(3)整联钢箱梁端面倾角仅与设计纵坡相关,即 其与底板的夹角为纵坡倾角与直角之和。

(4)当大节段分段点合适,大节段之间的端面与 底板按直角设置即可。

目前,深中通道中山大桥泄洪区非通航孔桥均 已架设完毕,应用本文方法均取得良好的效果,本文 方法可供类似桥梁大节段吊装的施工控制参考。

## 参考文献:

# **References**:

[1] 周荣峰.推进公路钢结构桥梁建设正逢其时[N].中国交 通报,2016-07-11.

ZHOU Rongfeng. It is the right time to promote the construction of highway steel bridge[N]. China Communications News,2016-07-11.

- [2] 张永涛,周仁忠,高纪兵.崇启大桥大节段整体吊装技术研究[J].中外公路,2010,30(6):132-136.
  ZHANG Yongtao,ZHOU Renzhong,GAO Jibing.Study on integral hoisting technology of large section of Chongqi Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30 (6):132-136.
- [3] 陈钊庭,王荣辉.港珠澳大桥深水区非通航孔桥大节段钢 箱梁施工全过程控制[J].桥梁建设,2015,45(5):112-116.
   CHEN Zhaoting, WANG Ronghui. Construction process control of large segment steel box girder of HongKong-Zhuhai-Macao Bridge in deepwater area [J]. Bridge Construction,2015,45(5):112-116.
- [4] 吴玲正.深中通道项目桥梁设计方案及主要技术难点
  [J].中外公路,2021,41(2):189-192.
  WU Lingzheng. Design scheme and main technical challanges of Shenzhen-Zhongshan Bridge project[J].
  Journal of China & Foreign Highway,2021,41(2):189-192.
- [5] 汪劲丰,杨松伟,亢阳阳,等.分阶段施工中钢箱梁制造参数的通用计算方法[J].浙江大学学报(工学版),2022,56
   (3):550-557.

WANG Jinfeng, YANG Songwei, KANG Yangyang, et al. General calculation method for manufacturing parameters of steel box girder in staged construction[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(3): 550-557.

[6] 秦顺全.斜拉桥安装无应力状态控制法[J].桥梁建设, 2003,33(2):31-34.

QIN Shunquan. Control method of stress-free status for erection of cable-stayed bridges[J]. Bridge Construction, 2003,33(2):31-34.

[7] YIU PKA, BROTTON DM. Computation of fabrication dimensions for cable-stayed bridges[J]. The Structure Engineer,1988,66(15):237-243

[8] 顾雨辉,朱浩.崇启大桥大节段钢箱梁施工监控关键技术研究[J].中外公路,2011,31(2):84-88.
 GU Yuhui, ZHU Hao. Research on key technologies of construction monitoring for large-section steel box girder of Chongqi Bridge[J].Journal of China & Foreign Highway, 2011,31(2):84-88.

[9] 方远.大跨连续钢箱梁桥大节段吊装施工控制研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.FANG Yuan. Study on construction control of large-span

continuous steel box girder bridge hoisting[D].Hangzhou: Zhejiang University,2014.

[10] 洗尚钧.大节段钢箱梁线形控制关键技术研究[D].广州:
 华南理工大学,2014.
 XIAN Shangjun. Research on key technology of linear control of large-section steel box girder[D]. Guangzhou:

South China University of Technology,2014.
[11] 李传习,王琛,董创文,等.基于相位变换的顶推曲梁桥自适应无应力构形控制[J].中国公路学报,2014,27(2):45-53.

LI Chuanxi, WANG Chen, DONG Chuangwen, et al. Control of self-adaptive unstressed configuration for incrementally launched curved girder bridge based on phase transformation[J]. China Journal of Highway and Transport,2014,27(2):45-53.

- [12] 中铁大桥勘测设计院集团院有限公司.深圳至中山跨江 通道施工图设计(G05标泄洪区110m非通航孔桥)[Z]. 武汉:中铁大桥勘测设计院集团院有限公司,2019.
  China Railway Bridge Survey and Design Institute Group Co., Ltd.. Construction drawing design of cross-river channel from Shenzhen to Zhongshan (110 m nonnavigable pass bridge in G05 floodway area)[Z], Wuhan: China Railway Bridge Survey and Design Institute Group Co.,Ltd.,2019.
- [13] 张浩森,任九生,张能辉.梁中性轴的若干研究进展[J].力 学与实践,2021,43(6):827-832.
   ZHANG Haomiao,REN Jiusheng,ZHANG Nenghui.Some advances in studies of the neutral axis of beam[J].

Mechanics in Engineering, 2021, 43(6):827-832.