引文格式：吴迪军,李剑坤,彭小青. 高速铁路跨海大桥首级GNSS控制网技术研究[J]. 地理空间信息, 2026, 24(6):89-92. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.06.016

高速铁路跨海大桥首级GNSS控制网技术研究

吴迪军，李剑坤，彭小青
（中铁大桥勘测设计院集团有限公司，湖北 武汉 430056）

摘　要：针对高速铁路跨海大桥首级GNSS控制网跨海距离长、卫星定位环境差、测量精度要求高、无相关测量技术标准可循等问题，以通苏嘉甬高速铁路杭州湾跨海大桥为依托，开展高速铁路跨海大桥首级GNSS控制网必要精度、坐标系统、选点布网、野外观测和数据处理的相关技术研究。提出了依据海中桥墩施工允许偏差确定控制网必要精度、使用精密单点定位技术获取基线起算点精确坐标、跨海大桥控制网与高速铁路框架控制网（CP0）精确衔接的数据处理等方法，并通过实测数据验证了其可行性和有效性。研究成果可为其他跨海工程首级GNSS控制网测量和相关技术标准编制提供借鉴。

关键词：高速铁路；杭州湾跨海铁路大桥；首级GNSS控制网；CP0
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）06-0089-04

Research on the Primary GNSS Control Network Technology of High-speed Railway Sea-crossing Bridge

WU Dijun, LI Jiankun, PENG Xiaoqing
(China Zhongtie Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: Aimed at the difficulties of long sea-crossing distance, complex and disadvantageous satellite positioning environment, high accuracy requirements and no relevant surveying technical standard to follow, we carried out the technical study on necessary accuracy, coordinate system, network setting-up, field surveying and data processing of the primary GNSS control networks of high-speed railway sea-crossing bridges, relying on the Hangzhou Bay sea-crossing bridge of Nantong-Suzhou-Jiaxing-Ningbo high-speed railway. Then, we proposed methods of determining the necessary accuracy of control network based on the allowable construction deviations of sea piers of bridge, using precise point positioning technology to obtain the precise coordinates of baseline starting point, and data processing for accurate connection between the control network of sea-crossing bridge and the high-speed railway frame control network (CP0). The feasibility and effectiveness of those methods were verified by the measured data. The research fruits of this paper will be used as reference for the primary GNSS control network surveying of other similar sea-crossing passage engineering, and the development of relevant technical standards.

Key words: high-speed railway, Hangzhou Bay sea-crossing railway bridge, primary GNSS control network, CP0

跨海桥梁首级GNSS控制网是跨海桥梁工程建设的坐标基准控制网，其主要目的是建立高精度和长期稳定可靠的大地测量基准，并在工程建设期间维持基准的高精度及其稳定性和可靠性，具有控制规模大、长短边相差悬殊、卫星定位环境复杂恶劣和测量精度要求高等特点和难点[1-4]。本文在以往技术研究和工程应用的基础上，以新建通苏嘉甬高速铁路杭州湾跨海大桥（以下简称杭州湾跨海铁路大桥）首级GNSS控制网为例，开展高速铁路跨海桥梁首级GNSS控制网测量的技术研究，旨在解决控制网精度设计、坐标系统设计、外业观测和数据处理分析中的技术难题，为超大型高速铁路跨海通道工程高精度坐标基准的建立以及相关技术标准的制定提供参考[5-8]。

1　控制网设计与观测

杭州湾跨海铁路大桥连接嘉兴市和宁波市，建成后将成为全世界最长、建设标准最高的跨海高速铁路桥梁，也将是我国首座长距离高速铁路跨海大桥。该桥位于2008年通车运营的杭州湾跨海（公路）大桥上游约7 km处，北起嘉兴海盐、南接宁波慈溪，桥长29.2 km，包括北、中、南3座航道桥。大桥开工建设前，于2021年7月—2022年1月完成了大桥首级控制网的建网测量。

1.1　选点布网

杭州湾跨海铁路大桥首级GNSS控制网由分布在

项目来源：中国中铁股份有限公司科技研究开发计划重大课题资助项目（2025-重大-01）。
第一作者简介：吴迪军（1964—），博士，正高级工程师，研究方向为工程测量，E-mail：wudi01@163.com。

大桥工程两岸的9个首级控制点（DQ01~DQ09）构成坚强的网形（图1）。控制网南北方向长约30 km，东西方向宽约6 km；同岸最短边为东岸（DQ05–DQ06）2 989 m、西岸（DQ02–DQ03）1 778 m，同岸最长边为东岸（DQ05–DQ08）3 493 m、西岸（DQ03–DQ04）1 992 m；跨海最长边为（DQ02–DQ09）28 474 m，最短边为（DQ01–DQ05）22 195 m。CP05、CP06、CP07、CP08为大桥首级控制网联测的高速铁路框架网（CP0）控制点，即跨海桥梁GNSS控制网的已知点，其中CP05、CP06、CP08为国家B级GPS控制点，CP07为新建的铁路CP0控制点。控制点均选在远离大功率无线电发射源、高压电线、大型建筑物、海水面且地面基础稳定的地方。9个大桥首级控制点和4个CP0控制点均建造强制归心观测墩。

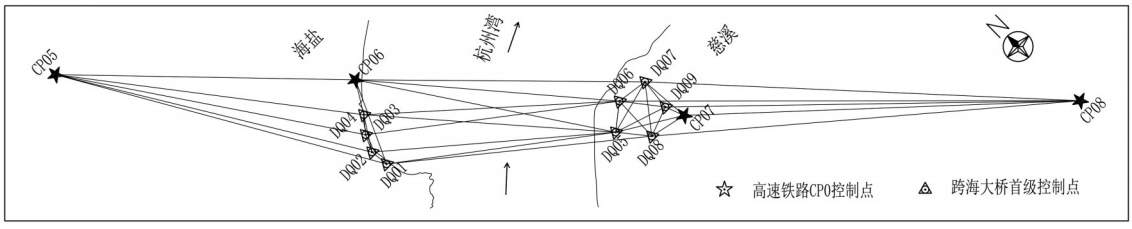


图1 杭州湾跨海铁路大桥首级GNSS控制网示意图

1.2 精度设计

现行《铁路工程测量规范》[9]和《高速铁路工程测量规范》[10]给出了铁路桥梁施工控制网的精度设计方法，但仅适用于长度短于3.5 km的跨江、跨河桥梁。迄今为止，尚无长距离跨海桥梁施工控制网必要精度的相关规定。杭州湾跨海铁路大桥的跨海距离超过28 km，必须根据工程特点和需求进行专项设计。本文以海中桥墩中心施工允许偏差为基础，推算杭州湾跨海铁路大桥首级GNSS控制网的必要精度指标[11]。因篇幅受限，不对估算过程做详细说明，仅给出首级GNSS控制网的精度设计结果：基线边方位角中误差≤0.5″、相邻点间基线水平分量中误差为8 mm、相邻点间基线垂直分量中误差为15 mm、跨海长边边长相对中误差≤1/3 500 000、同岸短边边长相对中误差≤1/250 000。

1.3 坐标系统设计

根据《高速铁路工程测量规范》[10]的规定：高速铁路工程测量平面坐标系统在对应的线路轨面设计高程面上坐标系统的投影长度变形值不宜大于10 mm/km。长距离跨海桥梁对施工定位精度的要求特别高，应根据工程所处地理位置（优选中央子午线）和跨海大桥轨底高程或桥面高程（选择抵偿高程面）设计和建立一种大桥工程坐标系，以最大限度地减小坐标投影长度变形值[12]，原则上变形值应控制在8 mm以内。杭州湾跨海铁路大桥工程采用CGCS2000作为坐标框架，CGCS2000椭球作为参考椭球，中央子午线经度为121°，投影面大地高为20 m，投影方法为高斯正形投影。工程坐标系的位置基准（坐标起算数据）通过联测线路附近国家A、B级GNSS控制点确定。经验算，杭州湾跨海铁路大桥工程坐标系下桥梁全长范围内的投影长度变形值（投影到桥面高度处）均小于8 mm/km，绝大部分区域的变形值小于±5 mm，满足大桥工程建设要求。

1.4 控制网观测

根据精度指标，控制网观测采用静态相对定位模式，按国家B级GNSS网技术要求进行[13]。将13台Trimble R10双频GNSS接收机安置在9个跨海大桥首级控制点和4个CP0控制点上同步进行相对静态测量。该接收机具有良好的多路径抑制功效，能有效消除或削弱路径误差对观测成果的不利影响。主要观测技术指标为卫星截止高度角=10°，观测有效卫星数≥4，有效观测卫星总数≥20，采样间隔=15 s，时段长度≥23 h，观测时段数=4。值得说明的是，考虑到复杂多变恶劣的海洋环境等外界因素对观测质量的影响，对控制网进行了23 h×4时段的长时间多时段观测，以获取大量多余的观测数据，提高观测成果的精度。

2 基线解算与检核

杭州湾跨海铁路大桥首级GNSS控制网长、短基线相差悬殊，联测的已知点之间最长基线（CP05–CP08）约为98.4 km，首级控制网最长跨海基线（CP06–CP07）为31.7 km，而最短同岸基线（DQ02–DQ03）不足1.8 km，跨越海水面长基线受多种误差影响。为提高基线处理精度与可靠性，采用精密星历和高精度的长基线处理软件GAMIT V10.71解算基线，采用武汉大学研制的GNSS数据处理软件CosaGPS V6.0进行网平差。

2.1 基线解算

控制网基线处理采用IGS精密星历，其轨道精度达到5 cm；采用Trimble RTX精密单点定位方法计算

参考测站的初始坐标。研究表明，24 h静态观测数据Trimble RTX-PP的坐标解算精度优于1 cm，而本网96 h观测数据实际处理结果的精度优于5 mm。在该起始精度条件下，当控制网边长为100 km时，星历和起算点初始坐标对基线解算的影响均不超过0.1 mm。本网基线边长均短于100 km，因此精密星历和起算点坐标的精度完全满足基线解算的精度要求。

基线解算中主要参数设定如下：①sittbl表中，参考测站的地心纬度 N 、经度 L 松弛量为0.05 m，矢径 R 松弛量为0.10 m，其余各点松弛量均为1.000 m；②sestbl表中，观测值选项为LC_AUTCLN，实验选项为BASELINE，其余主要选项采用软件推荐的值；③卫星截止高度角为15°，历元间隔为15 s。

2.2　同步图形检核

GAMIT软件采用网解的方式进行基线处理，其同步环闭合差在基线解算时已进行了分配。对于GAMIT软件基线解的同步环检核，可将解的验后标准化均方根中误差（NRMS）作为同步环质量的评价指标，通常要求验后NRMS小于0.5，在0.2左右为优。若NRMS大于0.5，则认为基线解中存在残余周跳、其他相关的附加偏差或模型误差。全网共计算了4个同步图形，验后NRMS均小于0.20，说明GNSS网的整体外业观测质量较高，基线解精度达到优良级标准。

2.3　基线重复性检核

整网重复性精度的计算公式为：

$$\sigma = a + bl \tag{1}$$

式中，a 为固定误差；b 为比例误差；l 为基线长度。

由全网78条重复基线解算得到整网基线长度重复性固定误差为 $a = 0.939\ 30\ \text{mm} \pm 0.164\ 55\ \text{mm}$，比例误差为 $b = 0.031\ 35\ \text{ppm} \pm 0.004\ 84\ \text{ppm}$，说明杭州湾跨海铁路大桥首级GNSS控制网基线经精处理后达到了非常高的精度。

2.4　独立闭合环闭合差检核

基线向量独立闭合环闭合差是检验基线向量网质量的重要技术指标，满足限差要求说明组成基线向量网的所有基线解算质量合格、成果可靠。全网共解算312条基线，66个独立闭合环，按照上述B级标准检核，全部满足《全球定位系统（GPS）测量规范》的要求。

3　控制网平差与精度评定

基线检核合格后，本文采用武汉大学CosaGPS平差软件对基线向量网进行三维无约束平差、三维约束平差和二维约束平差。

3.1　起算点坐标计算

高速铁路控制网按逐级控制的原则布设，控制网等级由高至低依次为CP0、基础平面控制网（CPⅠ）、线路平面控制网（CPⅡ）和轨道平面控制网（CPⅢ）。CP0由国家A、B级GNSS控制点和部分新建的CP0控制点（必要时新建）共同构成，起算点为IGS站点和国家A、B级GNSS控制点。通常铁路CP0控制点是CPⅠ控制点和路线中特大桥施工控制网的坐标起算点。然而，作为杭州湾跨海铁路大桥最高等级的坐标基准控制网，首级GNSS控制网按照国家B级网精度施测，其精度显然高于铁路CP0控制网，因此不能简单采用较低等级的CP0控制点作为坐标起算基准点。本文提出了一种既能最大限度维持跨海大桥首级GNSS控制网内部高精度，又能保证跨海大桥控制网与全线CP0控制网精确对接的起算点坐标计算方法。具体做法为将杭州湾铁路跨海大桥首级GNSS控制网观测数据并入高速铁路全线CP0控制网进行整体联合平差，求解跨海大桥两端CP0控制点（CP05、CP06、CP07、CP08）的CGCS2000坐标，并以此作为杭州湾跨海大桥首级GNSS控制网的起算坐标。为验证该方法的有效性，采用秩亏网平差法对并入跨海大桥高精度GNSS观测数据前后解算得到的4个CP0控制点的新旧坐标进行兼容性分析[14]，结果见表1，可以看出，并入跨海大桥观测数据后4个CP0控制点的坐标残差明显小于未并入数据的坐标残差，说明并入数据后坐标精度和兼容性显著提高；并入数据后固定4点对首级GNSS控制网进行约束平差的单位权精度（±6.8 mm）也明显高于并入前（±23.0 mm）。

表1　CP0控制点新、旧坐标秩亏网平差的坐标残差/mm

点号	旧坐标残差		新坐标残差		新旧坐标较差	
	δx_1	δy_1	δx_2	δy_2	δx_3	δy_3
CP05	10.2	−0.5	−0.7	6.8	14.8	1.1
CP06	−3.5	1.7	0.7	−2.6	2.5	−6.1
CP07	0.2	−11.8	−0.7	1.2	4.9	−15.8
CP08	−6.4	10.3	1.0	−5.1	0.0	0.0

3.2　三维无约束平差

以CP06的CGCS2000三维空间直角坐标为起算数据，对基线向量网进行三维无约束平差，求解各工程控制点的三维空间坐标。三维无约束平差后全网312条基线向量各分量的残差均小于《全球定位系统（GPS）测量规范》[12]中B级GPS网的规定限差，3个方向基线分量残差的最大值均不足限差的1/10，充分说明本网的内符合精度较高，基线向量没有明显的系统误差和粗差，基线向量网的质量可靠，可以进行约

束平差。三维无约束平差基线向量残差最大值统计结果见表2，$v_{\Delta X}, v_{\Delta Y}, v_{\Delta Z}$ 为 X 、Y 、Z 方向基线分量残差的最大值；三维无约束平差基线向量残差区间数量见表3。

表2 三维无约束平差基线向量残差最大值统计表/cm

基线名	$v_{\Delta X}$	$v_{\Delta Y}$	$v_{\Delta Z}$	限差
CP008–DQ05	–1.45	0.93	0.43	13.49
CP005–DQ03	0.87	–1.89	–0.72	9.22
CP005–DQ03	–0.73	0.94	0.98	9.22

表3 三维无约束平差基线向量残差区间个数统计/cm

统计项目	0.0~0.4		0.4~0.8		>0.8	
	+	–	+	–	+	–
X 方向残差	124	123	31	23	4	7
Y 方向残差	109	107	37	24	17	18
Z 方向残差	130	121	27	26	4	4

3.3 三维约束平差

经检验分析，4个CP0已知点坐标的兼容性良好，可作为首级控制网坐标起算点。由于CP05、CP08远离跨海大桥工程区域，因此选取大桥工程区域内的CP06、CP07作为跨海大桥首级GNSS控制网的坐标起算点进行三维约束平差，计算跨海大桥首级控制点的CGCS2000三维空间直角坐标和大地坐标。三维约束平差后跨海大桥首级控制网中最弱点（DQ03）坐标和点位精度为 M_X =0.29 cm、M_Y =0.37 cm、M_Z =0.26 cm、M_P =0.51 cm。最弱边（DQ02—DQ03）的边长精度为 S =1 778.248 m、M_S =0.09 cm、M_S/S =1/1 890 000、ppm=0.58。

3.4 二维约束平差

以CP06、CP07的二维工程坐标为起算数据进行二维约束平差，得到各点的二维工程坐标。二维约束平差后各首级控制点的坐标中误差与点位中误差见表4，可以看出，二维约束平差后首级控制点的点位中误差为0.14~0.16 cm。

表4 二维约束平差坐标精度统计表/cm

点号	M_x	M_y	M_p
DQ01	0.11	0.11	0.15
DQ02	0.11	0.11	0.16
DQ03	0.11	0.12	0.16
DQ04	0.11	0.11	0.16
DQ05	0.11	0.11	0.15
DQ06	0.10	0.10	0.14
DQ07	0.10	0.10	0.14
DQ08	0.11	0.11	0.15
DQ09	0.11	0.11	0.15

由表5可知，首级GNSS控制网的基线边方位角精度、同岸短边和跨海长边边长相对精度均显著优于设计的精度指标。

表5 二维约束平差边长精度统计表

项 目	最弱边	边长/m	平差精度
基线边方位角中误差	DQ02–DQ03	1 778.248 1	0.13″
同岸短边边长相对中误差	DQ02–DQ03	1 778.248 1	1/1 719 000
跨海长边边长相对中误差	DQ01–DQ05	22 194.882 2	1/15 551 000

4 结 语

以杭州湾跨海铁路大桥工程为依托，研究了复杂海洋环境下高速铁路跨海大桥首级GNSS控制网测量中的若干关键技术问题。提出了依据跨海桥长及海中桥墩施工允许偏差确定控制网必要精度，建立工程独立坐标系，以精密单点定位替代IGS联测获取基线起算坐标，将跨海桥梁控制网观测数据并入线路CP0进行整体平差等创新技术方法，并通过实测数据进行了验证。

参考文献

[1] 王智燏.跨海大桥工程控制网布设技术方案研究[J].世界桥梁,2004,32(增刊1):50-52

[2] 杨一挺.杭州湾跨海大桥首级GPS控制网的设计与施测[J].测绘通报,2005(10):33-36

[3] 丁克良,杨一挺,陈义,等.舟山陆海连岛大型桥梁GPS控制网的建立与数据处理[J].工程勘察,2006,34(6):53-56

[4] 阳凡林,曾旭平,杨晓滨,等.GPS精密定位技术在青岛海湾大桥首级平面控制网中的应用[J].山东科技大学学报(自然科学版),2006,25 (1):25-27

[5] Wu D J,Xiong W,Guo J M. Establishment and Repetition Survey of Primary GNSS Control Network of Hong Kong-Zhuhai-macao Bridge[J]. Journal of Surveying Engineering,2022,148(1):5021006

[6] 郭际明,周命端,吴迪军,等.高精度GPS大型桥梁工程控制网数据处理与质量评估方法研究[J].测绘通报,2012(2):18-22

[7] 成益品,董理科,韩战伟,等.深中通道工程高等级首级控制网复测技术设计要点[J].中国港湾建设,2021,41(5):37-41

[8] 李剑坤.长距离跨海大桥施工控制网测量[J].铁道勘察,2013,39(2):1-3

[9] 铁路工程测量规范:TB 10101-2018 [S].

[10] 高速铁路工程测量规范:TB 10601-2009 [S].

[11] 吴迪军.跨海长桥首级GNSS平面控制网精度设计方法[J].测绘工程,2021,30(6):46-49

[12] 黄俊伟,陈海春,白世晗,等.结合高斯投影和抵偿高程面建立GPS控制网[J].地理空间信息,2022,20(8):69-73

[13] 全球定位系统(GPS)测量规范:GB/T 18314-2009[S].

[14] 吴迪军.秩亏自由网平差的GNSS控制网已知点兼容性检验[J].测绘科学,2019,44(8):120-125