

基于挠度监测数据的在役桥梁结构 安全状态评估方法研究

张永平¹, 王润建^{2*}

(1. 嘉兴市交通投资集团有限责任公司, 浙江 嘉兴 314050; 2. 北京公科固桥技术有限公司, 北京市 100088)

摘要:该文从桥梁结构安全评估的需求出发,分析在役桥梁挠度成分特点及信号特征,提出一种结合突变点检测和稳健回归的自适应基线校正方法。该方法提升了监测数据的质量,结构安全评估采用实时监测数据和长期趋势数据相结合,实时监测数据和动态称重数据相融合的方法,对某桥梁上部结构运行安全状态进行了评估。

关键词:桥梁工程;连续箱梁;结构挠度;监测数据;安全评估

在桥梁结构中,主梁挠度能够真实反映桥梁结构的安全状况,它在荷载作用及外界环境的共同作用下可以对桥梁结构的情况做出及时响应,且挠度参数不易被外在环境噪声淹没、对结构损伤敏感等,为此在桥梁健康监测中,把挠度作为关键的监测参数。

桥梁结构挠度是整体响应参数,桥梁结构在各种荷载和环境作用下的性能以及桥梁结构自身材料的变异,都可通过挠度反映出来。建成投入运营后的桥梁挠度变形按其产生的原因主要包括:①混凝土收缩、徐变、材质劣化等内因引起的结构永久挠度变形;②构件开裂、构件间距连接损伤(铰缝损伤、简支转连续的现浇段损伤等)引起的挠度变形;③温度等作用引起的挠度变形;④车辆荷载(包括人群荷载等)作用引起的挠度变形。在上述4个方面挠度成分中,其中第①和第②部分原则上对采样频率的要求很少,通常以小时甚至以天为单位进行采集也可获得较好的数据结果;对于温度引起的挠度变形项,在非极端温度突变的一般情况下,通常以10 min~1 h为单位进行采样,也可测定温度引起的挠度变形成分。车辆过桥过程中,其挠度变形成分包含车辆自重荷载下静态效应分量和车辆激振下动态响应分量,对中小跨径桥梁而言,需要以毫秒为单位进行采集,才能得到车辆过桥真实的变形。

对在役公路桥梁结构挠度变形监测,根据监测的指标特征以及当前在这一领域所用的传感器类别,分为3种模式:①采用静力水准系统,对测试关键部位静态成

分进行测量;②采用测振传感器、仅测试关键部位的动态挠度变形;③采用动静位移传感器(如磁致伸缩位移传感器、差动变压式位移传感器、激光位移传感器等)对包括静态、准静态及动态挠度进行监测。

目前,由于新型实用技术推广的滞后性,大多数在役中小跨径桥梁结构仍采用①的模式进行挠度监测,只采集结构的静态响应。该文针对模式③采集的实时高频监测挠度数据,重点研究在役桥梁结构挠度高频实时监测数据的预处理和基于挠度监测数据的桥梁结构安全评估方法。

1 桥梁挠度监测数据分析方法

1.1 监测数据预处理方法

桥梁结构挠度监测数据是结构在外界环境、车辆荷载等作用下的反映,是进行结构状态分析、评价及异常事件预警的重要依据。在外界因素作用下结构的响应通常是一种非线性非平稳的信号,在信号采集过程中,因受到传感器布设方式、传感器性能、采集电路等方面的影响,往往存在信号基线随机偏移现象,这种随机偏移将不可避免地影响以监测数据为依据的结构状态评价、安全预警等的准确性。基线漂移信号整体上表征为一种混杂于正常采集信号中的低频噪声,这种噪声会影响正确解析采集信号,进而可能导致车辆荷载下评价误判的严重后果。

收稿日期:2020-09-19

作者简介:张永平,男,大学本科,高级工程师。E-mail:229350006@qq.com

*通信作者:王润建,男,硕士,高级工程师。E-mail:591624306@qq.com

针对这一问题,提出一种结合突变点检测和稳健回归的自适应基线校正方法,仅需对桥梁监测信号时间序列数据进行分析,即可识别突变点发生的时间点并形成数据分段;然后,用稳健回归分析确定突变时间段内的基线数据,实现对监测信号基线的自动校正。

突变点检测曼—肯德尔(Manner—Kendall)非参数统计检验方法,适用于非线性非平稳时间序列趋势变化研究和突变点检测。对于具有 n 个样本量的事件序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 构造一个秩序列 r_i, r_i 为 $x_i > x_j (1 \leq j \leq i)$ 的样本累积数,定义样本累积数秩和 s_k 为:

$$s_k = \sum_{j=1}^k r_i \quad (k=2,3,\dots,n) \quad (1)$$

其中:

$$r_i = \begin{cases} +1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j=1,2,\dots,i) \quad (2)$$

在时间序列定义为随机的假定下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{Var(s_k)}} \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

式中: $UF_1=0, E(s_k)$ 和 $Var(s_k)$ 分别为 s_k 的均值和方差,且 x_1, x_2, \dots, x_n 互相独立时,它们具有相同连续分布,可由下式计算:

$$E(s_k) = \frac{n(n+1)}{4}, Var(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (4)$$

由此, UF_k 为标准正态分布,通过正态分布表可得到与给定的显著水平 α 对应的临界值 U_α ,若 $UF_k > U_\alpha$ 则表明时间序列存在明显的趋势变化。

再按时间序列的逆序 $(x_n, x_{n-1}, \dots, x_1)$, 重复上述过程,并且令 $UB_k > -UF_k (k=n, n-1, \dots, 1)$, $UB_1=0$ 。

图 1、2 中挠度监测原始数据在 11:24 产生了突变,基准线上移,在两突变点之间,采用稳健回归分析方法对监测数据进行了拟合。

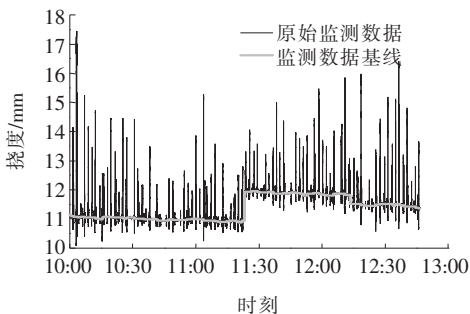


图 1 监测基线数据

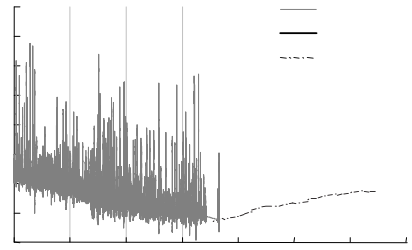


图 2 监测数据作用效应拟合结果

由图 2 可以看出:该种校正算法克服了传统的曲线回归严重依赖波形函数、分析基函数等所带来的结果不确定的缺陷,尤其具有明确的统计意义上的可靠性评价。

1.2 结构挠度监测数据分析利用方法

1.2.1 最大响应值分析

由于实际的运营荷载为随机荷载,所以各测点的位移响应峰值也具有随机性。以位移响应峰值作为参考,判断结构的承载能力。具体形式可用下式表示:

$$f_{\max} < [f] \quad (5)$$

式中: f_{\max} 为运营荷载作用下结构实测位移最大峰值; $[f]$ 为设计荷载作用下结构理论位移值。

1.2.2 监测数据长期变化趋势分析

将桥梁结构的温度效应和劣化效应的历史信息分别构成一个随机过程 $Z = \{Z_0, Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n, \dots\}$, 表示为:

$$Z_i = \mu + \xi_i \quad (6)$$

式中: μ 为过程均值; ξ_i 为随机变化的参量。

如图 3 所示,剔除车辆荷载作用后,当结构处于正常状态时, μ 不变, ξ_i 随温度作用呈随机变化,反映的是温度作用导致的主梁上拱或下挠, Z_i 在一定范围内变化。当结构出现损伤或有安全问题时, Z_i 的变化幅度持续增大,过程均值出现持续的不可恢复的单向变化趋势。因此,通过对这个过程的统计分析,监测这个过程均值是否出现不可恢复的单向变化趋势,即可评价桥梁结构的安全情况。

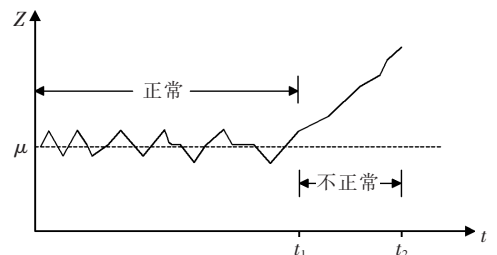


图 3 桥梁结构状态示意图

1.2.3 基于挠度校验系数的结构刚度评估分析

该项目将车辆称重系统监测数据和车辆荷载作用下的挠度响应综合进行分析,通过考察较重车辆作用下的校验系数,分析桥梁整体刚度性能。

(1) 分析监测系统中的主梁挠度响应数据。选取一天监测系统中的主梁跨中挠度数据进行统计分析,得到主梁挠度的实测值。

(2) 计算实际车辆荷载下的主梁挠度响应。在假定车辆不加减速、不变道、不超车的情况下,选取典型车辆的荷载数据,施加到有限元模型上,得到主梁的跨中计算挠度。

(3) 将计算结果和实测结果进行对比,得到校验系数,分析主梁的整体刚度。

2 工程应用

2.1 工程概况

某桥上部结构主桥为(38+2×50+38) m 等截面预应力混凝土连续箱梁。横向布置为 0.5 m(护栏)+11 m(行车道)+0.5 m(护栏),桥面全宽 12 m,桥面净宽 11 m。设计荷载为汽车—超 20 级、挂车—120。该桥于 2008 年 1 月通车运行。主桥挠度监测点布置示意如图 4、5 所示。

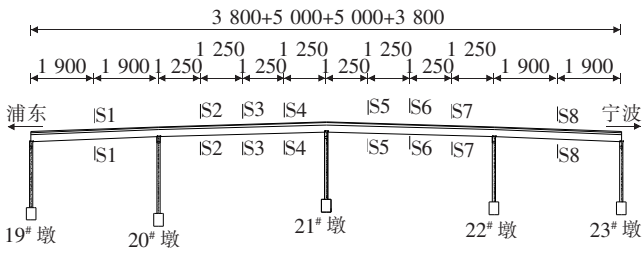


图 4 第 5 联位移测点监测断面示意图(单位:cm)

在桥头附近布设一套两车道动态称重系统,在称重系统后部 20 m 处安装视频监测系统,实时监测全

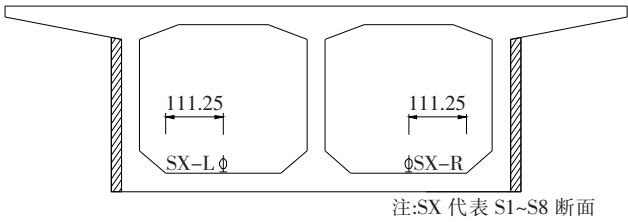


图 5 第 5 联位移测点横向布置示意图(单位:cm)

桥的车辆荷载。

2.2 监测数据分析

2.2.1 数据预处理结果

首先采用 1.1 节的方法对数据进行预处理,剔除异常值、离群点,对车辆荷载效应和温度效应进行分离,结果如图 6、7 所示。

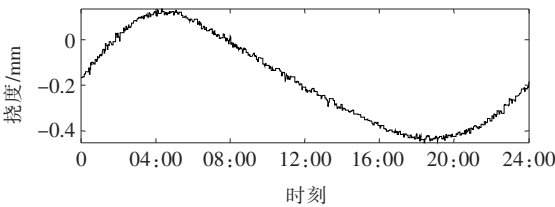


图 6 温度作用响应

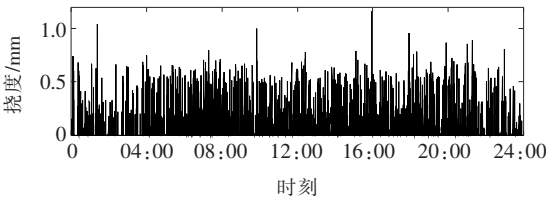


图 7 车辆荷载作用效应

2.2.2 结构安全评估分析结果

(1) 挠度最大响应值实时在线预警

通过对采集的 2019 年 8 月 1 日至 2020 年 6 月 31 日各测点数据进行统计分析,得到上述时段内各测点的挠度最大值,见表 1。

表 1 主梁挠度测点报警次数及峰值点统计

桥跨 编号	测点编号	黄色预警		橙色预警		实测挠度最大值/mm					
		阈值/mm	次数	阈值/mm	次数	1	2	3	4	5	6
第 19 跨	N-19-L	3.33	0	4.44	0	1.96	1.54	1.52	1.46	1.43	1.20
	N-19-R	3.33	0	4.44	0	1.11	1.06	1.06	1.02	1.01	1.00
第 20 跨	N-20-L	3.91	0	5.21	0	3.43	1.78	1.72	1.47	1.45	1.40
	N-20-R	3.91	0	5.21	0	1.83	1.72	1.37	1.28	1.27	1.26

续表 1

桥跨 编号	测点编号	黄色预警		橙色预警		实测挠度最大值/mm					
		阈值/mm	次数	阈值/mm	次数	1	2	3	4	5	6
第 21 跨	N-21-1/4L	4.38	0	5.84	0	2.45	2.35	2.34	2.30	2.24	2.21
	N-21-1/4R	4.38	0	5.84	0	2.88	2.74	2.60	2.52	2.51	2.44
	N-21-1/2L	6.64	0	8.85	0	3.58	3.49	3.42	3.36	3.35	3.28
	N-21-1/2R	6.64	0	8.85	0	3.92	3.78	3.75	3.67	3.54	3.51
	N-21-3/4L	4.38	0	5.84	0	2.47	2.45	2.30	2.27	2.26	2.25
	N-21-3/4R	4.38	0	5.84	0	3.18	2.99	2.94	2.80	2.76	2.70
第 22 跨	N-22-1/4L	4.38	0	5.84	0	1.92	1.84	1.79	1.60	1.56	1.48
	N-22-1/4R	4.38	0	5.84	0	2.44	2.13	2.09	1.79	1.73	1.66
	N-22-1/2L	6.62	0	8.83	0	3.28	3.22	2.85	2.68	2.44	2.44
	N-22-1/2R	6.62	0	8.83	0	3.28	3.08	2.88	2.35	2.34	2.31
	N-22-3/4L	4.38	0	5.84	0	2.25	2.11	2.11	1.98	1.92	1.86
	N-22-3/4R	4.38	0	5.84	0	2.01	2.00	1.96	1.71	1.67	1.51

由表 1 可知:各监测点的挠度值在正常范围内,未发生影响结构安全或使用功能的变形。

(2) 温度作用下的主梁恒载线形分析

根据桥梁结构监测挠度指标所含温度效应在短时间内基本不变的特点,通过实时监测数据统计过程的分析,判断有无车辆过桥,以无车辆过桥时的监测数据作为温度效应值,该值不包含车辆荷载效应,数据接近真实状态,可以对监测数据进行实时压缩,仅保留温度荷载效应数据和车辆荷载响应数据,节省了系统存储空间,便于后期根据监测信号的时间尺度特点对监测数据进行大数据统计分析,同时也保证了车辆过桥荷载效应数据的准确,为重车过桥实时预警及结构损伤离线预警提供了真实可靠的数据。

根据上述理论对各测点在监测时段内(2019 年 8 月 1 日至 2020 年 7 月 30)随温度变化挠度变化量统计结果见表 2,典型温度效应时程曲线如图 8 所示。

由图 8 可以看出:监测时段内,测点位置随温度变形较小,挠度最大变化量为 2.72 mm,从监测曲线来看无明显的不可逆转的单向变形趋势,故可认为监测时段内该桥主梁恒载线形无明显变化。

(3) 基于挠度校验系数的结构刚度评估分析

选取 2019 年 10 月 11 日 01:15—01:35 和 2019 年 11 月 27 日 06:30—06:50 的车辆信息作为分析对象,该时段内有 1 辆满足条件的车经过,该车为 6 轴车,总重 63.1 t,到达称重系统的时间为 01:23:22。

将选取的 63.1 t 的车辆信息包括车轴距及车轴

表 2 监测时段内测点随温度变化挠度变化量统计

桥跨	测点	挠度/mm	
		变化区间	变化量
第 20 跨	N-20-L	-0.266~2.155	2.42
	N-20-R	-1.440~0.816	2.26
第 21 跨	N-21-1/4L	0.544~2.505	1.96
	N-21-1/4R	-2.446~-0.378	2.07
	N-21-1/2L	-2.761~-0.126	2.64
	N-21-1/2R	-3.362~-0.689	2.67
	N-21-3/4L	1.160~2.589	1.43
	N-21-3/4R	-2.121~-0.744	1.38
第 22 跨	N-22-1/4L	-0.922~0.637	1.56
	N-22-1/4R	-2.641~-0.637	2.00
	N-22-1/2L	1.128~3.839	2.34
	N-22-1/2R	-3.920~-1.558	2.36
	N-22-3/4L	-1.564~-0.171	1.39
	N-22-3/4R	-1.610~-0.165	1.45
第 23 跨	N-23-L	-1.643~0.220	1.86
	N-23-R	-0.660~1.308	1.97

重等信息加到原桥的 Midas 模型上,得出主梁的计算挠度,将计算挠度与实测挠度进行比较,得出校验系数,见表 3。

由表 3 可知:各跨跨中位置挠度校验系数为 0.36~0.56,均小于 1,说明监测桥跨结构刚度满足要求,桥梁结构整体工作性能良好。

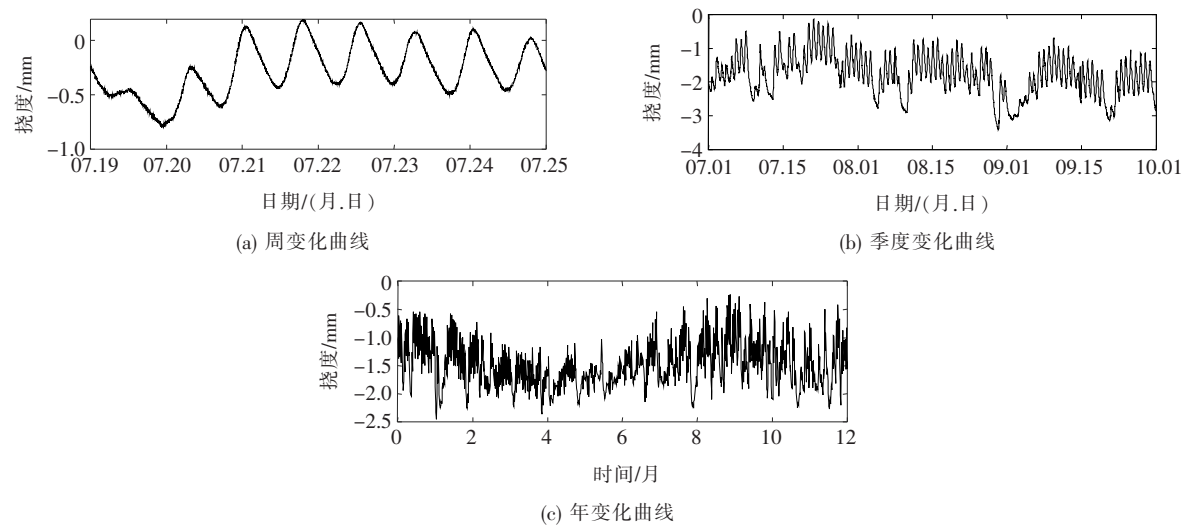


图8 典型测点不同时间尺度下温度效应时程曲线

表3 校验系数计算结果

测点	实测挠度/mm	平均值/mm	挠度理论值/mm	校验系数
N-19-1/2L	0.91	0.97	2.68	0.36
N-19-1/2R	1.02			
N-20-1/2L	0.88	0.97	2.31	0.42
N-20-1/2R	1.06			
N-21-1/2L	1.93	2.05	3.80	0.54
N-21-1/2R	2.16			
N-22-1/2L	1.97	2.12	3.80	0.56
N-22-1/2R	2.26			
N-23-1/2L	0.92	0.97	2.31	0.42
N-23-1/2R	1.01			

3 结语

通过对中小跨径桥梁挠度成分分析,提出了一种结合突变点检测和稳健回归的自适应基线校正方法,

实现了车辆荷载作用效应和温度作用效应的实时分离,能实现重车过桥实时预警及结构损伤离线预警,并综合动态称重数据对桥梁整体刚度进行了评估。该文基于挠度监测数据的分析方法和思路可为类似桥梁结构安全监测数据分析提供借鉴和参考。

参考文献:

[1] Hua Wenlong, Wang Runjian, Hu Jianming, et al. Determination Method for Conversion Sampling Frequency of Structural Deflection Monitoring of Small and Medium-Span Bridges[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering(MSE), 2019.

[2] Li Haiguang, Wang Runjian, Hu Jianming, et al. Frequency Conversion Sampling Technology Based on Vehicle Triggered Bridge Deflection Response[C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (ENS), 2019.

[3] 焦美菊,孙利民,李清富. 基于监测数据的桥梁结构可靠性评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(10): 1452-1457.

[4] 张应华,宋献方. 水文气象序列趋势分析与变异诊断的方法及其对比[J]. 干旱区地理, 2015(4): 652-665.

复杂条件下轻轨预制箱梁架设关键施工技术

刘琳¹, 黄峰², 刘勇³

(1. 江苏联合职业技术学院 南京工程分院, 江苏 南京 210000; 2. 中建八局第三建设有限公司基础设施公司, 江苏 南京 210036; 3. 南京市市政工程质量安全监督站, 江苏 南京 210036)

摘要:南京至高淳城际轨道 DS7-TA04 标段内高架预制钢筋混凝土箱梁架设施工存在小半径曲线、大纵坡、变跨度以及单双线交替等难点,常规的架桥机及架桥施工方法已经无法满足工程施工要求。为此,对常规 JQXD320 t-31 m 单导梁架桥机进行系统改造,同时调整施工方法,研究应用大纵坡、小半径曲线预制箱梁运输及架设关键施工技术和轨道预制箱梁单双线交替架设关键施工技术,成功解决架梁施工中存在的难点问题,确保工程的顺利完成。

关键词:城市轻轨;小半径曲线箱梁;大纵坡箱梁;单双线交替架梁;单导梁架桥机改造

当前,大量兴建的城市轨道交通工程成为缓解大中型城市快速增长的地面交通压力的重要方案。轻轨高架预制箱梁因其具有独特的优越性,而被广泛应用于轨道交通高架中。在城市土地资源日益紧张的情况下,轻轨高架往往需要选择较小的曲线半径来减少用地^[1-3],与此同时,也会采取单墩、变跨、单双线交替^[4]、立体交叉等措施降低对地下管线和既有道路、建筑等障碍物的影响。这些因素使得工程施工复杂性越来越高,施工难点不断变化。

现阶段,已有部分关于小半径曲线、大纵坡公(铁)路桥梁预制箱梁架设施工的相关文献。邵志元^[5]介绍了如何采用 DJ180 公铁两用单导梁架桥机完成天津南港铁路 1 标万万下联大桥小曲线半径(325~400 m) T 梁架设施工;田启军等^[6]选用双导梁 CJLY40 m-150 T 型架桥机完成了广西那望大桥预制 T 梁架设施工,该桥预制 T 梁跨度 40 m、最大重量 60 t,处于小半径 $R=153$ m 左偏圆曲线和缓和曲线上,桥面纵坡 3%;邹芒^[7]采用 GCLQ40/160 型拼装式双导梁架桥机完成了湖南省吉怀高速公路太阳冲大桥 6~12 跨预制箱梁架设作业,桥梁平面曲线半径 $R=650$ m,纵坡 4%;苗宝栋等^[8]采用 JHQ700 型双导梁架桥机在西安地铁三号线成功实现了 30 m 跨度大吨位预应力简支箱梁(自重 506 t)在 400 m 小半径曲线条件下的架设施工。但是,有关小半径曲线、大纵坡、变跨度以及单双线交替等多因素复杂施工条件下轻轨高架预制箱梁架设施工的实践研究成果尚少,该文结合南京至高淳

城际轨道工程,介绍复杂施工条件下轻轨预制箱梁运输及架设施工技术。

1 工程概况

1.1 工程简介

南京至高淳城际轨道禄口机场至溧水段土建工程施工 DS7-TA04 标,起止桩号为 YDK4+620~YDK12+848,主要由一站两区间和出入段线组成。

工程 90% 的区间高架上部结构均采用预制箱梁形式,预制箱梁标准跨度为 30 m,配跨采用 25、29、31 m 等跨度。由于车辆进出站和出入段线的缘故,存在单双线交替变化,在 YDK7+526、YDK12+658 等处,高架轨道梁存在单双线变化(图 1),常规的双线箱梁梁面总宽为 8.9 m,而单线预制箱梁梁面宽仅为 5.4 m。同时,出入段线双线简支高架桥曲线半径及纵坡分别为 300 m 和 2.5%,而一般铁路曲线半径往往要比其大得多;机场东站至柘塘站主线单线简支高架桥曲线半径为 650 m、纵坡为 1.5%。

1.2 工程施工重难点

1.2.1 大纵坡、小半径曲线箱梁架设施工

(1) 施工难度大。该工况下架桥机的布置以及过孔行走线路控制难度系数较高;预制箱梁在桥面上的运输和喂梁作业精度标准很高,桥面运输通过性能较差,可用架梁空间狭小。

(2) 安全风险大。小半径曲线上架梁施工时,架