

文章编号: 0451-0712(2006)01-0001-05

中图分类号: U446.2

文献标识码: A

# 跨海大桥结构安全自动监测技术研究

姜晨光<sup>1</sup>, 贺 勇<sup>2</sup>, 彭建国<sup>3</sup>, 孙美芬<sup>1</sup>, 忻一平<sup>1</sup>

(1. 江南大学土木工程系 无锡市 214122; 2. 莱阳农学院 青岛市 266109;

3. 湖南省交通规划勘察设计院 长沙市 410011)

**摘 要:** 跨海大桥一般与陆地相距较远, 利用传统的安全监测手段常常因远离基准点而无法对跨海大桥实施有效监控, 针对长大跨海大桥安全监测系统设计的困难, 在模拟实验的基础上提出了解决方案——跨海大桥整体安全性自动监测技术, 结合东海大桥介绍了跨海大桥整体安全性自动监测技术的实施方法、实施要领与实施注意事项。为适应跨海大桥的动态稳定特征提出并采用了动态基站监测技术, 同时还提出并采用了 GPS-RTK 与测量机器人的集成技术, 从而使跨海大桥整体安全性的自动、可靠监测成为可能。

**关键词:** 跨海大桥; 安全监测; 自动监测; 动态基站; 测量机器人; 集成测控系统

目前, 世界上建有许多跨海大桥, 比较著名的跨海大桥有位于波斯湾的巴林—沙特阿拉伯跨海大桥(全长 25 km)、位于丹麦哥本哈根的大贝尔特桥(全长 17.5 km), 连接瑞典和丹麦的厄尔松海峡桥(全长 16 km, 是世界最长的公铁两用斜拉桥, 2000 年通车)、位于加拿大的联邦桥(全长 12.9 km, 是世界上最长的穿过冰覆盖水域的桥, 1997 年通车)、日本连接本州与四国的濑户内海大桥(跨海距离 9.6 km)、我国的东海大桥(全长 32.5 km, 2005 年 5 月 25 日全线合拢, 是目前已合拢的世界第一长桥)、我国的宁波杭州湾跨海大桥(宁波慈溪~嘉兴海盐, 全长 36 km, 双向 6 车道, 设计时速为 100 km/h, 是目前世界上海上里程最长的跨海大桥, 2003 年 6 月正式动工, 预计 2008 年竣工, 建成后将成为新的世界第一长桥)、萧山杭州湾跨海大桥(杭州萧山~嘉兴海宁, 线路全长约 4.5 km, 按双向 6 车道高速公路标准设计, 行车速度为 120 km/h, 大桥将于年内动工)、绍兴杭州湾跨海大桥(上虞沽渚~嘉兴, 大桥跨海约 16 km, 正在酝酿之中), 等等。

跨海大桥一般与陆地相距较远, 利用传统的安全监测手段常常因远离基准点而无法对跨海大桥实施有效监控, 因此, 跨海大桥的安全监控问题就成为不断困扰桥梁界和监测界的重要问题, 针对长大跨海大桥安全监测系统设计的困难, 笔者及科研小组借助长年的大桥监测经验, 在缜密思考与同尺度模

拟实验的基础上, 提出了跨海大桥整体安全性自动监测的解决方案——跨海大桥整体安全性自动监测技术, 结合我国在建的且已全线贯通的东海大桥, 阐述了跨海大桥整体安全性自动监测技术的实施方法、实施要领与实施注意事项。跨海大桥整体安全性自动监测技术, 为适应跨海大桥的动态稳定特征, 提出并采用了动态基站监测技术, 同时还提出并采用了 GPS-RTK 与测量机器人的集成技术, 从而使跨海大桥整体安全性的自动、可靠监测成为可能。

下面介绍笔者及研究小组提出的跨海大桥结构整体安全性自动监测系统构建的基本思想。

## 1 自动监测系统的基本构成

跨海大桥结构整体安全性自动监测系统主要有三维控制基准系统、动态基站系统、桥梁形变测点系统三大部分构成。

三维控制基准系统应该在大桥两端的陆地上至少各设 2 个三维基准点, 桥两端的三维基准点必须通过同一个控制网进行联接, 控制网的精度不得低于国家 2 等控制网, 控制网的平面坐标投影面必须是过桥面平均高程位置的水准面。控制网的投影方式可以是窄带(1.5°)高斯投影(横轴墨卡托投影或通用横轴墨卡托投影—UTM 投影, 特别适用于南北向控制网), 也可以是兰勃特投影(特别适用于东



西向控制网)。控制网应利用一个国家大地控制点和该点与另一国家大地控制点的方位角,然后布设成独立坐标系统。三维控制基准系统的高程应采用国家高程,应利用一个国家高程点将所有三维基准点的高程纳入同一个相对独立的闭合高程系统中。

动态基站系统应在桥面上利用索塔等高耸结构建立空中监测平台(监测平台与索塔牢固联结在一起),监测平台的上方应设置GPS-RTK流动站和360°全向反射棱镜、监测平台内应设置测量机器人(如Leica的TCA2003、TCA1800、TCRA1102-plus、TCRA1101-plus等)。应通过机械加工的手段,保证GPS-RTK流动站强制归心平台中心、同基站测量机器人强制归心平台中心、同基站360°全向反射棱镜中心在同一个铅垂线上(其偏差应小于0.3 mm),这一问题笔者及研究小组已经有了完善的解决办法,成果正在申请国家专利。相邻动态基站间的空间距离不得超过测量机器人有效测程的0.9倍,当这一条件无法满足时,应在2个动态基站间增设动态基站,增设的动态基站必须设置适当高度的钢筋混凝土专用塔架(设计方法已经有了完善的解决办法),专用塔架上建立空中监测平台。

桥梁形变测点系统应根据桥型、承载特征等因素灵活设置。通常两端桥台的内侧、桥墩的顶端、桥面桥跨的中点、桥塔的顶端、桥塔的根部都是应该设置形变观测点的地方。形变观测点也应设置强制归心观测墩,观测墩上可强制归心联结360°全向反射棱镜、GPS接收天线。形变观测点应设置在测量机器人看得到,且不易被盗的地方(必要时可专门设置防护系统)。

## 2 东海大桥结构安全监测系统构建的初步设想

东海大桥是目前已经全线贯通的世界第一长桥。东海大桥工程是上海国际航运中心洋山深水港区一期工程的重要配套工程,为洋山深水港区集装箱陆路集疏运和供水、供电、通讯等需求提供服务。东海大桥的地理位置见图1所示。

### 2.1 东海大桥概况

东海大桥工程是我国第一座真正意义上的跨海大桥。东海大桥全线可分为约2.3 km的陆上段,海堤至大乌龟岛之间约25.5 km的海上段,大乌龟至小洋山岛之间约3.5 km的港桥连接段,总长约为31 km。大桥按双向六车道加紧急停车带的高速公

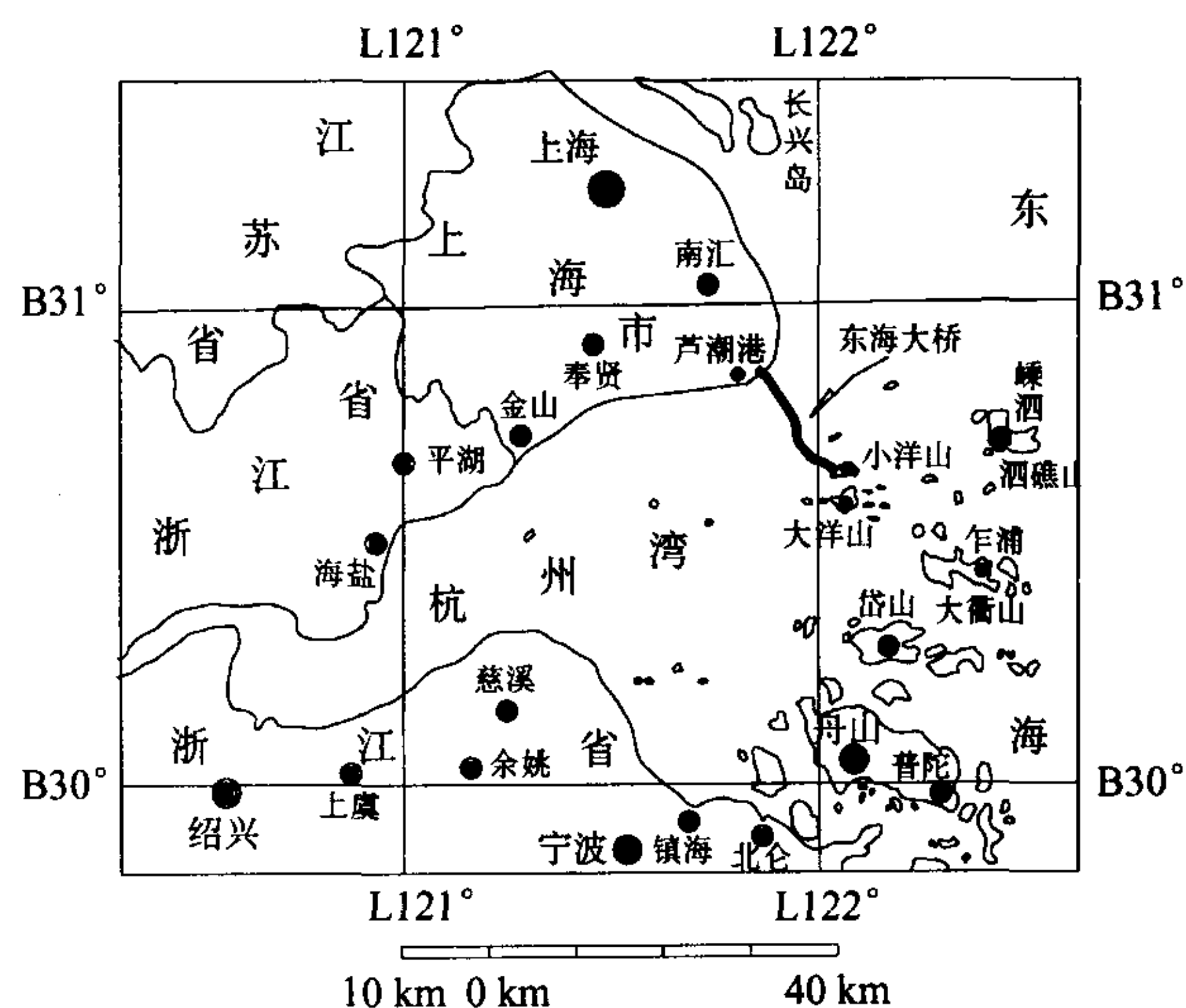


图1 东海大桥地理位置示意

路标准设计,桥宽31.5 m,设计车速为80 km/h,设计荷载为汽车—超20级,挂车—120,并按集装箱重车密排进行校验。全桥设5 000 t级主通航孔一处,通航净高40 m,净宽400 m,桥墩按万t级防撞能力设计;设1 000 t级辅通航孔一处,通航净高25 m,净宽140 m;设500 t级辅通航孔两处,通航净高17.5 m,净宽分别为120 m和160 m。大桥能满足2020年洋山港区集装箱陆路集疏运需求。东海大桥的设计基准期为100年。东海大桥于2002年6月26日正式开工建设,2005年年底建成通车。

东海大桥按施工工艺特点可分为6大部分,即陆上段、浅海段、非通航孔段、主通航孔、辅通航孔和港桥连接段,其中港桥连接段又分为开山路段、海堤段和颍珠山大桥3部分。

陆上段为芦潮港新、老大堤之间约2.3 km的桥梁。桩基采用 $\phi 600$ PHC管桩,桥墩采用现浇混凝土,上部采用跨径为30 m的连续箱梁,用支架法现浇施工。

浅海段由26孔50 m跨连续梁组成。桩基采用 $\phi 1200$ PHC管桩,承台施工为预制套箱加现浇混凝土,上部采用跨径为50 m的连续箱梁,采用移动模架法逐孔现浇。

非通航孔段分为60 m和70 m跨径区段,共333孔。桩基主要采用桩径为1.5 m的钢管桩,承台采用预制套箱加现浇混凝土的施工工艺,上部为简支变连续的多跨等截面预应力混凝土连续箱梁,采用整孔预制,大型浮吊简支安装,墩顶现浇混凝土接头变连续的施工工艺。

辅通航孔基础采用桩径为2.5 m的钻孔灌注



桩,桩长100 m。上部结构分别为主跨120 m、160 m和140 m的预应力混凝土变高度连续箱梁,采用挂篮悬臂浇注施工。

主通航孔为双塔单索面叠合梁斜拉桥。基础采用桩径为2.5 m的钻孔灌注桩,桩长110 m。主塔为倒Y形钢筋混凝土结构,塔高150 m,主跨420 m,主梁采用钢混叠合梁,节段拼装,锚栓连接。斜拉索采用平行钢丝绳。

港桥连接段中,大乌龟岛和颍珠山岛上为开山路段;大乌龟岛与颍珠山岛之间的1.9 km海堤采用抛石斜坡堤结构,采用塑料排水板进行地基加固;颍珠山岛与小洋山岛之间为约1.66 km桥梁结构,主桥为双塔双索面叠合梁斜拉桥,基础为桩径为2.5 m的钻孔嵌岩桩,主跨332 m,主塔为H形钢筋混凝土结构,塔高100 m。主梁采用钢混叠合梁,斜拉索采用平行钢丝绳;引桥为跨径50 m的连续箱梁,桩基采用桩径为2.5 m的钻孔嵌岩桩和桩径为1.5 m的钢管桩,用移动模架法逐孔现浇。

## 2.2 东海大桥三维控制基准系统构建的优选方法

东海大桥三维控制基准系统建议采用图2的形式,整个三维控制基准系统至少应像图2一样拥有A、B、C、D、E、F、G等7个点,且7个点必须全部为岩基强制归心标志或深埋钻孔式钢筋混凝土强制归心标志(因为上海是一个三角洲型冲积陆地)。

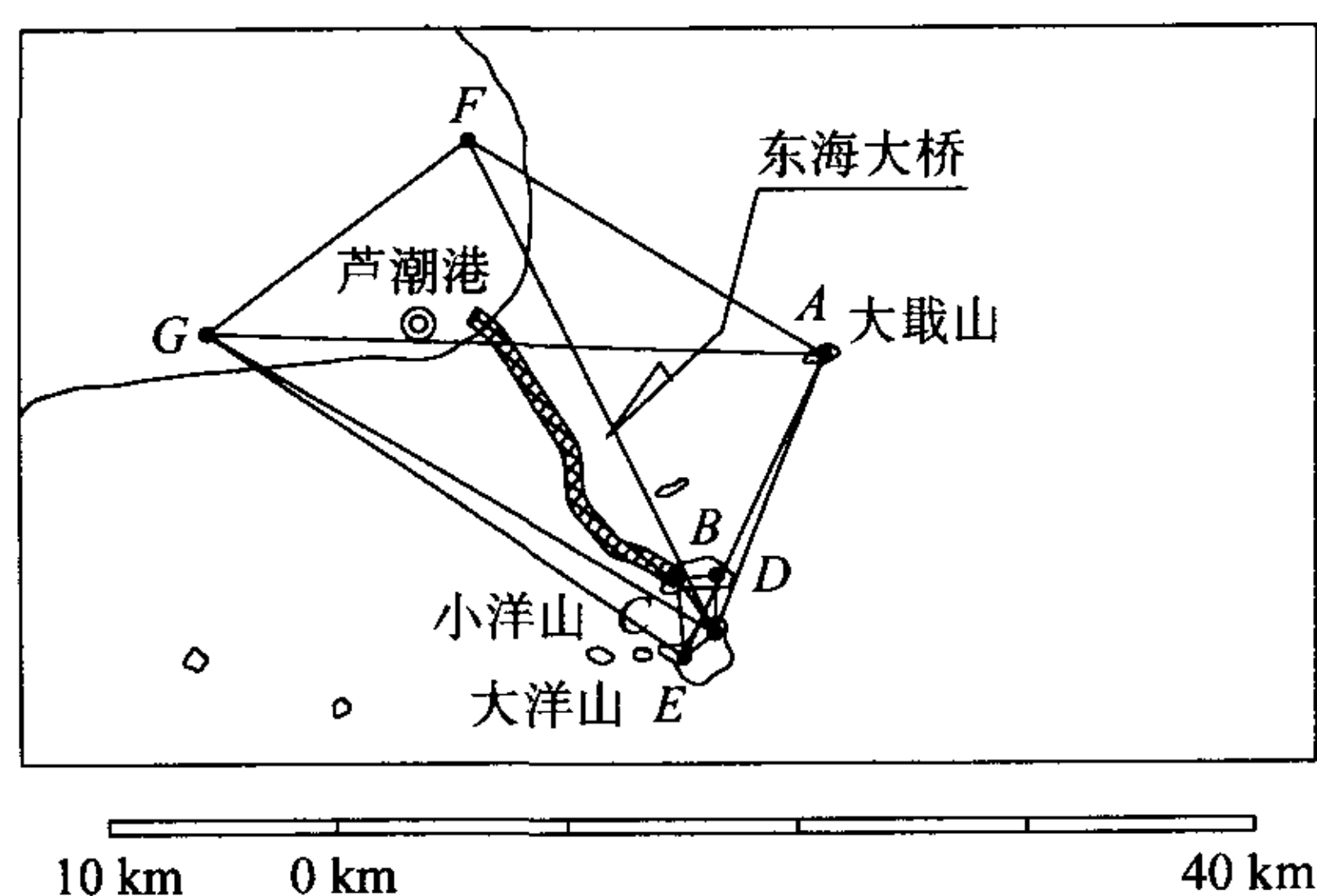


图2 东海大桥监控三维控制基准系统示意

如图3所示,三维控制基准系统的构建应通过GPS静态测量技术实现,GPS静态测量的数据采集时间不得短于1 h,且应采用4机联动同步闭合环抵次推进的形式,GPS静态测量的起点和基准应位于浙江宁波陆地,终点应位于上海的芦潮港陆地,整个推进行动跨越杭州湾。

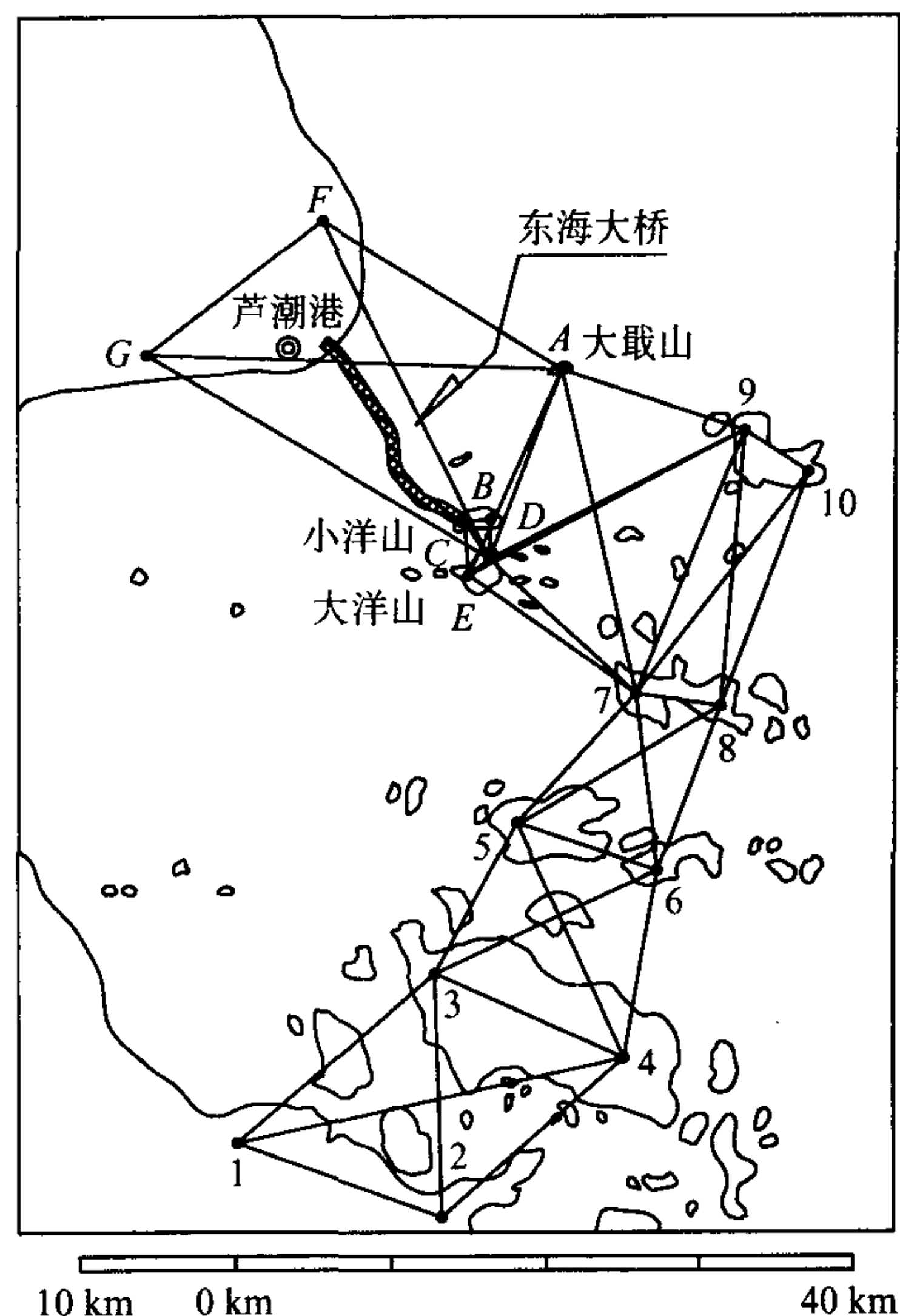


图3 东海大桥监控三维控制基准体系的构建过程示意

## 2.3 动态基站系统的结构

动态基站系统是建在桥塔或专用塔架上的,见图4所示。

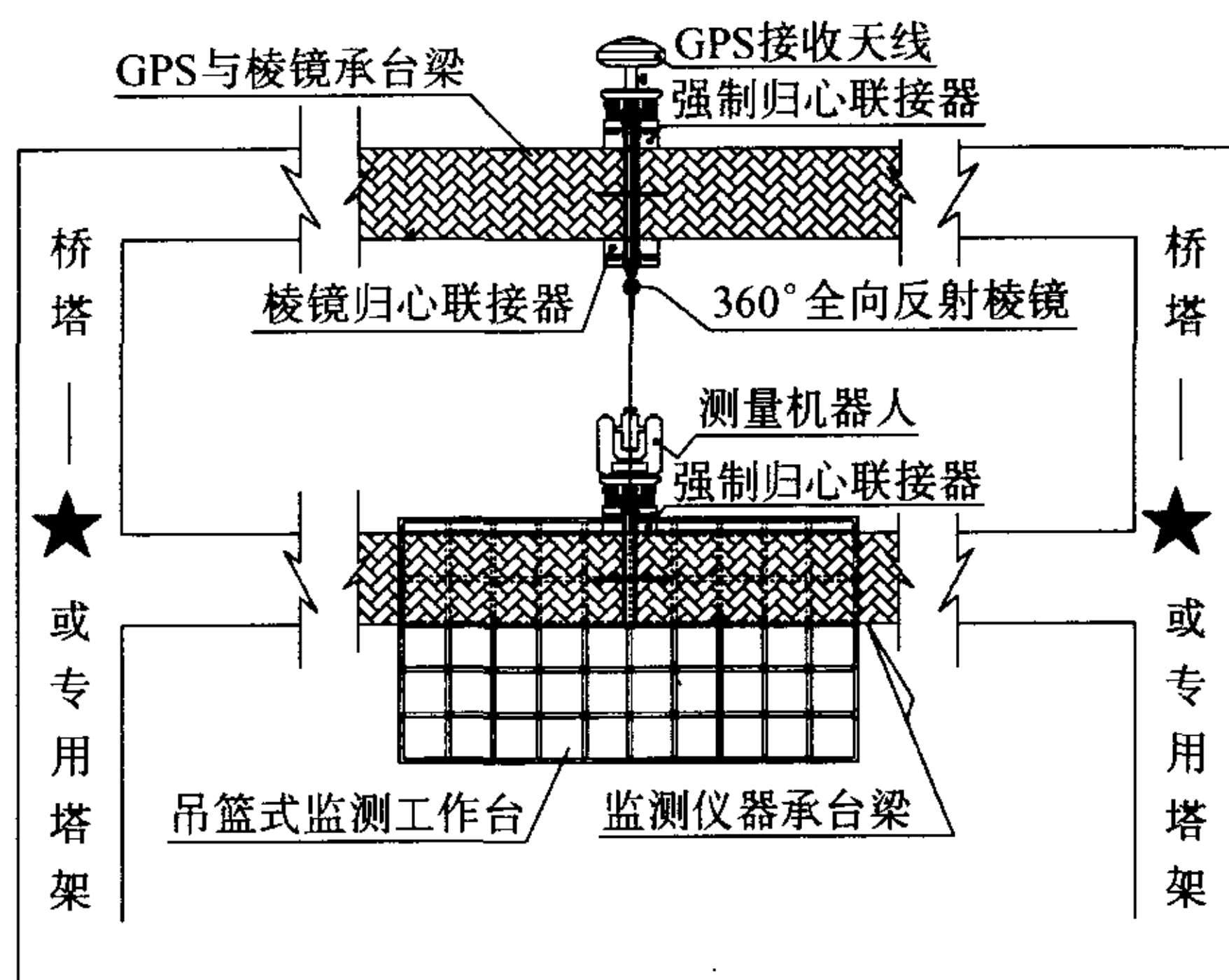


图4 动态基站系统示意

动态基站系统包括监测仪器承台梁和GPS与棱镜承台梁等2个钢筋混凝土联系梁组成,梁的厚度不得小于400 mm,2个梁均与桥塔或专用塔架联为一体,通过钢筋混凝土施工作业实现,利用笔者及研究小组专门研究的预埋式可锯切强制归心系统将测量机器人强制归心连接器、GPS强制归心联接



器、反射棱镜强制归心联接器安装预埋到位,实现测量机器人强制归心联接器、GPS 强制归心联接器、反射棱镜强制归心联接器 3 个归心线的共线(在同一铅垂线上,笔者关于这一问题的解决方法可保证 3 m 范围内 3 归心线最大偏差小于 0.2 mm)。

监测仪器承台梁上悬挂有吊篮式监测工作台,以便于监测人员进行监测作业。

监测仪器承台梁上测量机器人强制归心联接器联接测量机器人(或电子全站仪)。

GPS 与棱镜承台梁上方安置 GPS-RTK 流动接收机、无线数据信号发射与接收器、太阳能蓄电池。GPS 与棱镜承台梁下方安置 360°全向反射棱镜。

为提高监测系统的可靠性,可以在监测仪器承台梁和 GPS 与棱镜承台梁内配置动力供电和有线通讯。以便更好地对 GPS-RTK 流动接收机和测量机器人实施遥控控制。

#### 2.4 动态基站系统对桥梁形变点的监测过程

在三维控制基准系统(图 2)中选择 1 个岩基强制归心标志(图 2 中 A、B、C、D、E、F、G 等 7 个点中的某一个)作为 GPS-RTK 永久性基站,以该基站的三维坐标(平面直角坐标 X、Y;GPS 大地高 H)为永久的起算数据,使各动态基站及各形变点的三维坐标归一化,即各动态基站及各形变点的平面直角坐标永远与永久性基站统一、各动态基站及各形变点的高程永远与永久性基站统一(采用相对于永久基站的 GPS 大地高差系统),从而实现计量尺度的统一,将计量尺度误差最大限度地削减。

GPS-RTK 永久性基站的稳定性,通过三维控制基准系统中的其他点进行检验。当 GPS-RTK 永久性基站的稳定性出现问题时,应根据检验结果对所有的动态基站及形变点三维数据进行常数修正。

动态基站测量机器人横竖轴交点的瞬时三维坐标数据通过自己基站上的 GPS-RTK 流动接收机获得,因为每个动态基站上测量机器人横竖轴交点、360°全向反射棱镜中心、GPS-RTK 流动接收机相位中心间的位置关系是基本恒定的。同样,360°全向反射棱镜中心的瞬时三维坐标也可以随时获得。测量机器人在每次全程监测时,必须采用一个固定的三维坐标(即起测时的瞬时三维坐标)。

测量机器人每次全程监测时,都必须以某个相邻的动态基站(基站应保持固定,不能一会儿用这个,一会儿用那个)的 360°全向反射棱镜中心为后视方向。然后,对周边各变形点进行自动监测,并将数

据实时传回地面管理中心办公室。

每个动态基站上的测量机器人在安装到位后首先必须进行学习测量,即利用人工的手段将测量过程操作一遍,测量机器人就会在自学习功能的引导下掌握全程测量的工作程序(全程测量各点的三维坐标概值就会永久储存在测量机器人的内存中,当这些点位发生小的移动时,测量机器人仍可以利用自动追踪、自动识别功能找到它并观测它)。当你给测量机器人设置好各种参数后(比如观测时间间隔、通讯格式、传输速率、接收新数据时刻等),测量机器人就可按设定的时间间隔、规定的测量顺序(通过初始自学习获得)进行自动定向、自动全程形变点观测、自动数据传输与接收了。

整个自动监测过程中 GPS-RTK 系统和测量机器人系统始终都处于工作状态。因此,可以实时了解每一瞬间桥梁的形变情况,实现桥梁的动态、全程、实时、可靠、自动监测。海量监测数据源源不断地输入总控室计算机终端,在自动绘图、自动模拟、自动分析软件的支持下,桥梁的健康状态也就一目了然了。当监测显示桥梁出现异常时可以及时发现与处理,从而确保跨海大桥的安全。

当然,也可以采用定期监测的方式(比如 1 个月一次、1 个季度一次等)进行桥梁监测,这样,永久性基站、动态基站、形变点上的全部测控仪器与设备都可以在不测时取走,监测时再安装,以降低仪器装备被盗的风险。

#### 3 结语

笔者及研究小组曾按上述做法,在蒙岱山区 40 km 直长窄条状(宽 200 m)区域内模拟过桥梁形变的动态基站监测过程,模拟结果非常理想,三维形变监测的平均精度优于 1 mm,完全可以满足各种大桥(包括跨海大桥)安全监测的要求。同时,笔者及研究小组将本文所述方法在数个斜拉桥安全监测中进行应用,也取得了令人满意的效果。

本文介绍的方法,可以有效降低跨海大桥的监测成本,切实保障跨海大桥的监测质量,建议大家在跨海大桥监测工作中采用。

当然,限于水平,文中缺陷与谬误一定存在,请大家在实践中予以修正,并请大家多多提出批评。

本研究对象得到湖南省交通科研基金(XJT01-012)、四川省交通科研基金(C99-007)、江南大学 211 建设基金(2004012)的支持,在此一并表示感谢!



## 参考文献:

- [1] Abe M, Fujino Y, Kajimura T, et al. Monitoring of long span suspension bridge by ambient vibration measurement[A]. Proceedings of the 2nd international workshop on structural health monitoring [C]. Stanford; Stanford University, 1999.
- [2] Casas J R. Full-scale dynamic testing of the Alamillo Cable-Stayed Bridge in Sevilla[J]. Earthquake Engrg and Struct Dyn, 1995, (24).
- [3] Chueng M S, Tadros G S, Brown T G, et al. Field monitoring and research on performance of the Confederation Bridge [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1997, 24(6).
- [4] Sohn H, Czarnecki J A, Farrar C R. Structural health monitoring using statistical process control[J]. Journal of Struct Engrg, ASCE, 2000, 126(11).
- [5] 陈保平, 苏木标, 樊可清. 大型桥梁健康监测远程数据采集系统设计[J]. 石家庄铁道学院学报, 2001, 14(4).
- [6] 符欲梅, 朱永, 陈伟民, 等. 桥梁远程状态自动监测系统的研究、开发及实际应用[J]. 土木工程学报, 2003, 36(2).
- [7] 韩大建, 谢峻. 大跨度桥梁健康监测技术的近期研究进展[J]. 桥梁建设, 2002, 146(6).
- [8] 秦权. 桥梁结构的健康监测[J]. 中国公路学报, 2000, 13(2).
- [9] 史家钧, 项海帆, 许俊. 确保大型桥梁安全性与耐久性的综合监测系统[J]. 同济大学学报, 1997, 25(增刊).
- [10] 宋顶利, 吴世民, 李卫. 远程数据库技术在大型桥梁健康监测中的应用[J]. 计算机系统应用, 2004, (8).
- [11] 邬晓光, 徐祖恩. 大型桥梁健康监测动态及发展趋势[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(1).
- [12] 吴坚. LonWorks 现场总线技术在桥梁健康监测中的应用[J]. 世界桥梁, 2004, (1).
- [13] 徐爱敏, 张立超, 叶昌勇. 应凌云. 招宝山大桥主桥运营期健康监测方案[J]. 桥梁建设, 2002, (5).
- [14] 张启伟. 大型桥梁健康监测概念与监测系统设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(1).
- [15] 左云, 陈明宪. 赵跃宇. 桥梁健康监测及传感器的优化布置[J]. 公路, 2004, (4).

## Research on Automatic Monitoring Techniques for Structures Safety of Bay Bridges

*JIANG Chen-guang<sup>1</sup>, HE Yong<sup>2</sup>, PENG Jian-guo<sup>3</sup>,  
SUN Mei-fen<sup>1</sup>, XING Yi-ping<sup>1</sup>*

(1. Department of Civil Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi 214122, China;

2. Laiyang Agricultural College, Qingdao 266109, China;

3. Communication Plan and Investigation and Design Institute of Hunan Province, Changsha 410011, China)

**Abstract:** Usually, bay bridges are far away from continents. It is difficulty to monitor the safety of bay bridges by traditional ways, because there is a limit in survey range of ETS (Electronic Total Station) or GPS. A new automatic monitoring way of structures safety of bay bridges by the monitoring technique of dynamic base station is put forward to resolve the difficulty of structures safety monitoring of bay bridges. The new way is based on the bridge monitoring experience and simulated test in the same scale. The new way uses the integrated technique of ETS and GPS-RTK. In this paper, for the example of Donghai Bridge (the overall length more than 32.5 kilometres), the monitoring process, monitoring essentials and monitoring points for attention of dynamic base station monitoring technique are expounded.

**Key words:** bay bridge; safety monitoring; automatic monitoring; dynamic base station; surveying robot; integrated surveying system