

## 二、项目简介

### 项目简介（限1000字）

桥梁是城市建设的重要基础设施，结构复杂，投资巨大。但桥体在运行期间会受到行车荷载、风力、温度以及突发的自然灾害等外界因素的影响，以及混凝土收缩徐变、老化、碳化、钢筋松弛、锈蚀、墩台基础沉降等内在因素的影响。在内外因素的影响之下，桥梁将会产生几何、内力和索力变化等。如果这些变化过大，超过了桥梁能够承受的安全范围，将会产生灾难性的后果。为了保障桥梁结构在运营期间的承载能力、耐久性和安全性，对已建成的桥梁进行在线监测有着十分重要的意义。

传统的桥梁安全监测方法有人工光学测量法、连通管法、引张线法等，其主要的缺点是自动化程度低，工作量大，观测易受气候和其它外界条件的影响，容易漏过重要和危险的信号，且数据采集无法在时间上同步等。随着地球空间信息技术的发展，以全球导航卫星系统（GNSS）与地理信息系统（GIS）为代表的集成技术，为桥梁高精度三维变形监测的研究提供了有力的支持。

从2014年7月至2016年12月，武昌理工学院、武汉光谷北斗控股集团有限公司等单位联合进行了基于GNSS/GIS的桥梁高精度三维变形监测技术研究和示范应用。该研究以GNSS和GIS集成技术为主导，融合传统的传感监测技术，加上互联网、大数据、云计算等现代技术，实现了对桥梁数据的全天候采集、自动快速传输、实时解算处理、三维变形监测、阈值预警、信息图形显示以及安全评估等众多功能，实现了对桥梁安全监测“传统技术+现代技术”的完美融合与功能提升，从根本上解决了传统桥梁养护人工巡检方式的工作量大、效率低、以及巡检人员安全难以保证等弊端，也从技术上弥补了桥梁关键支护部位处于人工不易到达地方，以及过于依赖技术人员经验的缺陷。通过对武汉白沙洲长江大桥、知音桥的示范应用，建成了“武汉市桥梁安全监测一期云平台”，极大提高了桥梁安全监测的科学性、实时性、准确性、可靠性及经济性。为武汉市601座桥梁的安全监管探索出科学有效道路，实现武汉从“建桥之都”向“护桥之都”转变，并正逐步向全国推广。

该项目已授权发明专利5项，实用新型10项目，发表论文11篇。2016年12月30日，由湖北省科技厅主持，项目成果通过了由中国工程院院士许厚泽担任主任委员的鉴定委员会的鉴定，委员们一致认为：“该成果整体达到国际先进水平，其中面向桥梁的北斗三维变形监测的时间序列数据综合处理技术处于国际领先”。

## 三、科技创新

### 科技创新（限5000字）

#### 1、立项背景：

桥梁是城市建设的重要基础设施，结构复杂，投资巨大。但桥体在运行期间会受到行车荷载、风力、温度以及突发的自然灾害等外界因素的影响，以及混凝土收缩徐变、老化、碳化、钢筋松弛、锈蚀、墩台基础沉降等内在因素的影响。在内外因素的影响之下，桥梁将会产生几何、内力和索力变化等。如果这些变化过大，超过了桥梁能够承受的安全范围，将会产生灾难性的后果。为了保障桥梁结构在运营期间的承载能力、耐久性和安全性，对已建成的桥梁进行在线监测有着十分重要的意义。

先进的桥梁监测系统能够在突发性损伤发生时，能及时做出判断和警报，以便采取处理措施，防止发生进一步的破坏和引发其它事故；对于累积损伤，也能够定期对损伤状态做出描述，以便根据情况采取相应措施，减少安全隐患。因此，建设智能的桥梁监测系统，可以减少因桥梁安全问题引起的交通事故带来的经济损失，可以减少传统方式对桥梁进行检测和维修时不必要的浪费，更可以减少桥梁坍塌直接造成的经济损失，本项目的立项目的如下：

- (1) 获取桥梁整体结构信息，实时把握桥梁整体结构的健康状态（如动力特性的变化，获取结构“指纹”），对大桥出现的损伤进行及时报警和定性分析并提出维修建议，做到防患于未然。
- (2) 监测运营中桥梁的一些主要构件如吊杆、拱脚的受力特性，桥墩和桥面结构的变位，以及桥面和拱轴的动力响应等，结合整体结构特征对桥梁有可能出现的损伤情况作出定位和定量的分析。
- (3) 监测车辆荷载和环境荷载的实际状态及其对桥梁的影响，在非常时期（如车辆荷载大幅超标或台风地震）发布预警措施，对突发事件后桥梁的安全性、承受能力和剩余寿命作出评估，为桥梁的运营决策与管理提供科学依据。

#### 2、科技含量：

##### 2.1 总体思路

传统的桥梁安全监测方法有人工光学测量法、连通管法、引张线法等，其主要的缺点是自动化程度低，工作量大，观测易受气候和其它外界条件的影响，容易漏过重要和危险的信号，且数据采集无法在时间上同步等。随着地球空间信息技术的发展，以全球导航卫星系统（GNSS）与地理信息系统（GIS）为代表的集成技术，为桥梁安全监测系统的研究提供了有力的支持。基于GNSS/GIS集成技术，设计了一套桥梁三维变形安全监测系统，该系统能对桥梁变形监测精度实时达到厘米级，事后达到毫米级，可实现对桥梁监测数据的全天候采集、自动快速传输、实时解算处理、监测信息图形显示、阈值预警以及健康评估，为桥梁的管理者提供了决策依据。

##### 2.2 技术方案与创新成果

本研究课题采用的技术路线是：建立指标体系与评价模型，到集成设计监测硬件平台，到研发监测软件系统的三步走策略。从桥梁安全监测的科学性和时效性两个角

度出发,通过GNSS硬件与GIS软件集成的手段,研制开发一套适用于桥梁监测数据处理及预警系统。该系统由GNSS接收机通过一定时间段的监测,可实时获得监测点的高精度三维坐标,然后再通过编制研究的相关软件,对多期的监测数据进行处理分析,判断监测点是否发生显著的变化,并以此为依据做出预测。该系统结合实时的光纤数据通讯,可实现监测数据的实时传输,并由数据处理中心对其进行自动化处理和分析,从而第一时间得到监测点的变形信息。实现对桥梁变形相关信息的无人化采集、快速安全传输、自动解算处理、监测信息可视化预警,达到对桥梁病害潜在发生位置进行有效地预警,创新成果包括:

(1) 探索一种融合桥梁既有监测资料和现场GNSS测试的监测选点技术。

根据桥梁既有监测资料,获取桥梁不同部位的历史变形特征和线性变化特征,为桥梁三维变形监测点选址提供参考;再利用现场GNSS信号测试结果,综合分析卫星信号的可见性、信噪比和多路径等因素,进一步优化与完善预选方案,形成了集历史监测资料分析与现场测试相结合的北斗桥梁监测选点方法。

(2) 设计适应不同监测模式的GNSS桥梁载波相位差分整周模糊度算法。

针对桥梁监测在时间和精度方面的不同侧重需求,在传统周期性重复监测模式的基础上,采用固定连续性监测和实时动态监测两种GNSS监测模式,重点研究与之相适合的双差整周模糊度处理算法,并且同GNSS硬件接收机进行集成,形成适应不同精度等级和时间分辨率等监测需求的GNSS数据解算方法。

(3) 研制面向多种桥梁监测应用场景的GNSS卫星地基增强设备。

为适应GNSS桥梁监测应用需求,提高工作效率和定位精度,研制和开发出一系列基于CORS基准站应用的硬件设备,具体包括GNSS地基增强观测墩,GNSS移动CORS站,桥梁变形监测多模GNSS接收机,基于CORS站的监测数据修正装置,基于CORS站的静力水准仪,基于CORS站的胀冻剂,基于CORS站的分层沉降计等。

(4) 建立面向桥梁三维变形监测的北斗/GNSS时间序列数据处理技术体系。

建立了面向北斗/GNSS时间序列的监测数据综合处理技术体系。针对北斗/GNSS监测时间序列同时存在白噪声和闪烁噪声等多种误差的特点,设计出一种基于小波系数混合消噪方法;在此基础上针对变形监测点的位移预测需要,提出了基于改进分形的北斗GNSS监测点位移预测方法,并引入灰色系统理论来改进现有的模糊综合评判方法,建立桥梁稳定性灰色模糊评价模型,形成了一套完整的面向北斗/GNSS时间序列的监测数据综合处理技术体系,有效地控制北斗/GNSS监测时间序列残存的解算误差在变形预测和安全评价过程中累积与传播。

(5) 研发基于北斗/GNSS的桥梁三维变形监测业务化运行服务平台。

研发出基于北斗/GNSS和GIS集成的桥梁三维变形监测业务化服务平台,有效解决复杂天气、地形、河流紊流和大量车辆运行对桥梁影响的综合变形自动化监测和智能预警难题,为桥梁的高效安全运行提供科学辅助决策手段。在基于面向多种桥梁监测应用场景的北斗卫星地基增强设备构建和北斗时间序列数据处理技术体系研发的基础上,采用北斗/GIS/虚拟现实技术的集成开发模式,借助HTML5网络开发技术,在Visual Studio 2010平台上,设计并开发了一套具有“实时监测、智能报警、虚拟漫游

、动态报表”等功能的桥梁三维变形监测业务化运行服务平台，该平台由自动化数据采集子系统、数据通讯子系统、桥梁专属云子系统和桥梁安全监测软件子系统共四大子系统构成，能对桥梁进行桥体宏观三维形变、桥墩沉降、桥面侧倾、挠度、桥塔偏位、振动等6个方面进行实时监测，能对桥梁的变形进行评测，同时能按照用户要求生成报表，并对变形信息进行智能化报警，为桥梁的安全运营提供有效的技术支撑。

### 2.3 实施效果

项目成果已全面应用于武汉白沙洲长江大桥和武汉知音桥，正在对武汉市黄埔大街到金桥大道快速通道高架桥进行实施，建成了“武汉市北斗桥梁安全监测一期云平台”，极大提高了对桥梁安全监测的科学性、实时性、准确性、可靠性及经济性。为武汉市601座桥梁的安全监管探索出了科学有效的道路，实现武汉从“建桥之都”向“护桥之都”转变，并正逐步向全国推广。

### 3、创新点：

该项目特色与创新主要包括：

(1) 提出基于既有监测资料分析与现场测试相结合变形监测选点策略，辅助桥梁变形监测点位的选址。该方法避免了传统单纯依靠现场GNSS信号测试结果选点的片面性与盲目性，解决了导航卫星信号质量与点位变形特征的代表性二者难以兼顾的问题，极大地提高了桥梁GNSS变形监测网布局的科学性。

(2) 考虑到桥梁变形特征在时间和空间的差异性，将实时动态监测和固定连续性监测两种北斗/GNSS监测模式引入到桥梁变形监测预警过程，分别针对突发性（高频低精度）和缓发性（低频高精度）两类桥梁变形，系统地研究与之相适合的双差整周模糊度处理算法，满足了桥梁变形监测在时间和精度方面的不同需求，具有应用范围广、实用性强的特点。

(3) 为适应桥梁监测应用需求，研制和开发出一系列基于北斗CORS基准站应用的硬件设备，从北斗地基增强观测墩，多模GNSS接收机到基于北斗CORS站的监测数据修正装置、静力水准仪、胀冻剂、分层沉降计等，切实提高了桥梁监测工作效率和定位精度。

(4) 针对GNSS监测时间序列结果中多种噪声共存的情况，结合桥梁变形超前预测和安全动态评价的需要，重点研究小波混合消噪、点位趋势分形预测和灰色模糊安全评价建模等关键问题，形成了一套完整的面向GNSS时间序列的监测数据综合处理技术，有利于控制GNSS解算结果中误差累积与传播，切实提高安全监测预警的可靠性。

(5) 采用基于技术集成的GNSS/GIS集成开发模式，面向多层次用户的灾害实时监测与应急预警的需求，设计并开发了一套具有“实时监测、智能报警、虚拟漫游、动态报表”等功能的桥梁实时变形监测预警系统，有效地解决了复杂运营环境和突发性外界因素影响下的桥梁变形监测难题，为桥梁的高效安全生产提供技术上的科学辅助决策手段。

### 4、保密方面

无

## 5、国际比较

### 5.1 桥梁变形监测选点方法

国内外情况：（1）仅注重GNSS观测信号的质量，缺少对变形机理考虑，点位无法反映变形趋势；（2）选点数量多，监测工作量大，后期成本高。

本项目情况：（1）采用数值模拟与现场测试GNSS信号测试相结合的方法进行选点，科学性强；（2）选点数量少，剪表性强，节约监测成本。

### 5.2 桥梁变形监测模式设计

国内外情况：（1）单一卫星定位系统，监测可靠性低；（2）对不同类型桥梁变形过程的差异性缺乏考虑，实用性差；

本项目情况：（1）同时接收多个卫星系统的信号，监测可靠性高；（2）考虑到不同桥梁在监测频率和精度的差异，采用实时动态和固定连续两种监测模式，应用范围广、剪表性强。

### 5.3 监测时间序列噪声消除算法

国内外情况：（1）仅注重白噪声的消除，忽略闪烁噪声的影响，降噪效果欠佳；（2）噪声消除程度有限，变形过程无法直观反映。

本项目情况：（1）可同时消除白噪声和闪烁噪声，信噪比提高近5倍，效果好；（2）噪声消除较为彻底，变形过程曲线光滑度显著增强。

### 5.4 桥梁变形趋势预测方法

国内外情况：（1）预测模型较多，缺乏组合运用，精度不高；（2）要求提供大量的实测监测数据，稳定性不足；（3）实测数据的误差对预测结果影响较大，模型的波动性较大。

本项目情况：（1）采用耦合预测模型，预测误差平均缩小40%，精度极大提高；（2）对实测监测数据的数量要求较低，稳定性较强；（3）预测模型抵抗误差干扰能力和抗波动性能力强。

### 5.5 桥梁稳定性评价模型

国内外情况：（1）单纯定性或定量评价，评价方法片面；（2）受数据不确定性的影响较大，评价结果可靠性低；（3）只针对同构监测数据，模型适用性差。

本项目情况：（1）定性与定量相结合，评价方法科学；（2）克服了数据不确定性的影响，评价效果较好；（3）兼容多源异构数据，模型剪表性强。

### 5.6 系统平台

国内外情况：（1）集成性差，系统功能单一；（2）系统交互性差，可视化程度低，操作要求较高。

本项目情况：（1）系统功能丰富，除常规监测预警功能外，还含有设备安全防护功能；（2）系统操作简单，人机交互性好。

本项目成果是将卫星导航和地理空间信息技术进行集成，通过研究桥梁变形监测选点方法、监测模式设计、监测数据消噪和变形趋势预测等关键技术环节，实现了对

桥梁三维变形信息的无人化采集、快速安全传输、自动解算处理与可视化预警等功能，达到对大型桥梁形变进行有效监测和预警的目的，该成果还存在一定的科技局限性，主要表现为：虽然表面线形监测是桥梁变形最为直接的体现，是桥梁变形监测相关规范中最为重要的内容，但是其内部箱梁等部位的位移也是必不可少的监测项。本项目是以接收卫星导航定位信号作为监测的前提条件，而桥梁内部是无法接收到GNSS的信号，也就是说内部的位移无法利用卫星导航定位技术进行监测。因此，在必要时候需要将本项目的卫星导航定位的监测技术同其它内部位移的监测技术相结合，对桥梁的安全性进行综合评价。

地理信息科技进步奖

## 四、推广应用情况

### 1、推广、应用情况及社会评价（限 2000字）

#### （1）武汉白沙洲长江大桥安全监测项目

武汉白沙洲长江大桥全长3586.38米，主桥为双塔双索面栓焊结构钢箱梁与预应力混凝土箱梁组合的斜拉桥，跨径为50米+180米+618米+180米+50米，最大跨度为618米，总投资11亿元，2000年9月8日正式通车。由于多种原因，该桥自从建成后，桥面铺装层陆续出现车辙、开裂、推移、拥包等病害，基本上每年都会进行不间断的维修。据统计，该桥通车10年维修24次，平均不到1年要修两次，尤其是2009年，该桥耗资逾亿元进行大修。期间该桥曾多次出现重大安全隐患，对其进行安全监测，保证其能正常安全运行是非常重要的问题。

自2016年底，该桥安装完成基于GNSS/GIS的桥梁三维变形监测业务化运行服务平台，有效解决了复杂天气、地形、河流紊流和大量车辆运行对桥梁影响的综合变形自动化监测和智能预警难题。该平台能对桥梁进行桥体宏观三维形变、桥墩沉降、桥面侧倾、挠度、桥塔偏位、振动等6个方面进行实时监测，并对桥梁的变形进行评测，同时能按照用户要求生成报表，并对变形信息进行智能化报警，监测精度能达到实时厘米级，事后毫米级，为桥梁的高效安全运行提供了科学辅助决策手段。2017年，该平台预警了重大安全隐患2次，一般安全隐患16次；2018年，预警了重大安全隐患1次，一般安全隐患12次；2019年，预警了重大安全隐患2次，一般安全隐患9次。借助该平台的全自动在线实时预警信息，使桥梁管理人员能提前采取相应的防御措施，避免了可能的灾难事故发生，保障了国家和人民生命财产的安全。

应用该监测系统前，白沙洲大桥年均用于安全监测的费用约为830万元，应用该系统后，年均监测费用降为154.8万元（2017年1月到2026年1月整个10年监测服务费共计1548万元，年均154.8万元），实际每年节支约675.2（830减去154.8）万元，2017年到2019年三年共计节支约2025.6万元，预计整个10年监测期总计节支约6752万元，经济社会效益显著。

#### （2）武汉知音桥安全监测项目

武汉知音桥全长566.2米，主跨为135米，桥面宽26米，设四车道，桥面铺设沥青路面。主跨采用预应力钢筋砼T型悬臂钢构挂孔结构。由于桥体在运行期间会受到行车荷载、风力、温度以及突发的自然灾害等外界因素的影响，以及混凝土收缩徐变、老化、碳化、钢筋松弛、锈蚀、墩台基础沉降等内在因素的影响。在内外因素的影响之下，桥梁将会产生几何、内力和索力变化等。如果这些变化过大，超过了桥梁能够承受的安全范围，将会产生灾难性的后果。

该桥2017年前所采用的监测方法是利用全站仪和水准仪对桥梁关键点分别进行水平和垂直位移的测定，然后对测量的数据进行分析。但这种测量的方式不仅工作量大，过程复杂，并且具有一定的局限性，很难满足桥梁预警管理的要求。自2016年底，该桥安装了由武汉光谷北斗控股集团等单位联合研发的一套基于GNSS/GIS的桥梁健康监测系统，该系统可以为桥梁健康监测、预警评估、大数据分析等提供数据源，并能根据后台数据库对海量形变监测数据进行数据呈现、趋势分析、阈值预警，为桥梁的



建成后的系统通过对使用阶段的桥梁结构及其工作环境进行实时监测，取得分析结构健康状况、评价桥梁承受静、动荷载能力及结构耐久可靠性的基本数据，为运营、维护、管理提供决策依据。结果表明，该监测系统能够实现传统监测方法难以实现的全自动、高精度、全天候、三维立体式形变监测，监测精度达到实时厘米级，事后毫米级，该系统的应用显著提高了桥梁安全监测的准确性和预测评估的可靠性，使我们能提前发现该桥可能存在的安全隐患。据统计，2017年该系统发现重大安全隐患1起，发现一般安全隐患9起，2018年发现重大安全隐患2起，发现一般安全隐患15起，2019年发现重大安全隐患1起，发现一般安全隐患12起。由此可见，该系统对提早发现桥梁的安全隐患，并采取相应的应急措施起到了非常重要的作用。

2017年前该桥平均每年用于安全监测的费用约为450万元，2017年后，年均监测费用降为98.82万元（10年监测费总计988.2万元，年均98.82万元），监测费年均节支约351.18（450减去98.82）万元，2017年到2019年三年共计节支约1053.54万元，预计整个10年监测期总计节支约3511.8万元。另外，利用该系统，并结合桥上的视频监控设备，根据系统预警的时间点，可以全天候抓拍卡车超载事件，使执法的准确性、可靠性和便利性得到了很大提高。