

## 一、项目名称

地下工程穿越高速铁路的精细化控制技术及应用

## 二、提名单位意见

该项目面向我国高速铁路大规模运营安全保障和城镇化建设的重大需求，经过近 20 年攻坚，解决了地下穿越高速铁路的关键技术难题。发明了列车不限速条件下地下穿越高速铁路的设计方法、精细化施工控制技术、智能感知型施工装置，实现了理论方法、控制技术、施工机械的重大技术突破，制订了国际上首部下穿高铁技术规程，进一步突显我国高铁技术在世界的领先地位；并推动我国地下工程领域整体技术水平的大幅提升。

成果成功应用于软土地层首次一次性穿越 26 股道、下穿 300km/h 高铁、高铁咽喉道岔区及高铁群，创造了一次性穿越距离最长、速度最高、高铁线路最密集和下穿高铁咽喉道岔区 4 项国际工程纪录，并在下穿京沪、京广、沪昆、杭深等高铁的数百项工程中得到推广应用。为保障我国高速铁路网的畅通运行和解决下穿铁路这一制约城市规划实现的重要瓶颈提供了关键技术支撑。近三年累计新增产值 90 多亿元，社会经济效益显著。

该项目结合国家需求，循序渐进，创立了“设计、施工、设备”为一体的新的工程技术研发模式，培养了一批高素质人才。提名材料内容属实，填写符合要求。

提名该项目为国家技术发明奖二等奖。

## 三、项目简介

该项目属于土木建筑工程领域。我国有 13 万公里铁路，其中高速铁路超过 2.6 万公里，居世界首位；随着城镇化发展，道路、地铁和市政工程等每年以超过 20 万公里的速度增长，出现了大量地下穿越铁路工程。传统下穿铁路技术仅允许列车以 45km/h 通行，无法适应高速铁路的运行要求。与下穿其它敏感建筑物相比，下穿高铁施工变形控制最严，且存在高速列车动荷载对施工安全的复杂影响，是国际工程界的一大难题；尤其在沿海发达地区，软土分布广、高铁线网多、行车密度大，下穿高铁一度成为技术禁区，亟需攻克这一难题。

在国家、省部级计划及大量工程科研课题支持下，经过 20 余年攻关，逐步提高下穿铁路施工时的列车限速：由 45km/h 最终达到 300km/h，形成涵盖下穿所有不同速度等级铁路的全套技术，并取得多项突破，主要发明点如下：

1. 【设计方法】揭示土体开挖应力释放和变形自锁机理，率先构建“车-轨-路-下穿工程”四要素耦合动力学模型，创立了下穿铁路工程的系统动力学设计理论，解决了下穿施工与行车安全动态评价难题；以控制开挖应力释放为目标，发明了棚架法、刚柔复合结构隔离、地基分区加固等不限速下穿铁路设计技术，形成“三级八类”分类设计模式。突破传统下穿铁路设计须对列车限速的限制，首创了不限速下穿高铁设计方法，制定了《公路与市政工程下穿高速铁路技术规程》行业标准。

2. 【控制技术】基于动态平衡开挖应力释放理念，发明了轨区高精度自动监测（精测）、实时预警（精管）、下穿施工参数精细化自动补偿（精控）三大施工控制技术，实现轨区自动监测精度达 0.5mm，下穿高铁施工产生的变形小于 2mm，达到隧道施工变形控制的国际最高水平。形成了国家级《旋喷桩内插型钢施工工法》、浙江省《超浅埋长距离中管棚下穿铁路微扰动施工工法》和江苏省《城市轨道交通工程盾构法施工指南》等技术体系。

3. 【关键装置】发明了下穿施工开挖应力自动平衡的智能型施工装置，包括盾构机土仓渣土智能感知调控装置、长管棚智能化导向定位纠偏装置、水平循环置换成桩加固装置，填补了国内外空白。率先突破了传统机械施工对铁路线路严重干扰的重大设备瓶颈，推动了隧道施工技术向智能化控制迈进。部分成果纳入中国工程机械工业协会标准《全断面隧道掘进机检验与验收通用规范》。

成果保障了我国高速铁路网的畅通运行，在国内外数百项下穿工程中得到广泛应用。在软土地层首次一次性穿越 26 股道、下穿 300km/h 高铁、高铁咽喉区道岔和连续下穿高铁群，创造了一次性穿越距离最长、速度最高、高铁线路最密集和高铁咽喉区道岔 4 项国际工程纪录。近三年累计新增产值 91.5 亿元。

获授权发明专利 12 项、实用新型专利 6 项、行业标准 1 部，软件著作权 4 项，国家和省级工法 3 项、技术指南 2 项，专著 3 部，论文 60 余篇。获省部级科学技术一等奖 3 项。业内四位院士认为成果“具有重大的创新与突破，引领了国际地下穿越技术的发展”。

## 四、客观评价

### 1. 与国内外相关技术的比较

与国内外同类技术相比，该项目的研究成果和相关技术具有明显优势，引领了国际地下穿越技术的发展。

主要成果	对比点	国内外现有同类技术（含德、日等）	该项目成果
设计理论和方法	下穿铁路设计计算理论	采用拟静力将列车动荷载等效为静载，开展下穿隧道结构设计，仅能考虑最终状态	率先构建“车-轨-路-下穿工程”四要素耦合动力学模型，创立了下穿铁路工程系统动力学设计理论，可进行实时、动态设计分析及评价
	不限速下穿高铁设计方法	国内传统下穿普通铁路技术需对列车限速 45km/h；国外采取限速或绕行；国内外无统一的下穿铁路设计模式	建立三级行车速度、八类条件的统一设计模式，突破了传统下穿铁路设计对列车限速的限值；首创不限速下穿高铁设计方法，首次实施不限速下穿 300km/h 运营高铁，主持制定行业首部下穿高铁技术规程
控制技术	变形控制原理	未见有“开挖预测-应力自动平衡-变形反馈-自动补偿”的精细化变形控制原理和技术	发明高精度自动监测、实时预警、精细化自动补偿为一体的精细化施工变形控制原理和技术，形成 3 部国家和省级工法、2 项技术指南
	变形控制效果	隧道下穿公路、机场跑道的变形控制为 20mm，古建筑物的变形控制为 1‰（一般取 10mm）	首次实现软弱地基中下穿高铁施工变形小于 2mm，达到国际隧道施工变形控制最高水平
关键装置	土仓渣土智能感知调控装置	未见有渣土性状智能感知调控装置，盾构机掘进前方压力与土仓压力为等效近似平衡，开挖面出现欠压、盈压情况	研发水平单翼式剪切板型土仓渣土性状智能感知装置，可实现渣土分区自动改良，将盾构机土仓压力控制提升为分布式平衡，有效控制掘进面的应力释放

	长管棚智能化导向定位纠偏装置	成管精度为 0.5%L (L 为管棚长度)	可实现 360 度 12 个方向实时纠偏, 长管棚 (长度超过 100m) 施工偏差小于 0.1%L, 精度提升 5 倍, 更利于形成棚架作用和减小开挖变形
	水平循环置换成桩加固装置	国际上最先进的地基加固工法 (日本 MJS) 采用扇形高压摆喷, 水平成桩时所需最小覆土为 2m, 方向偏差为桩长的 0.5%, 成半圆形水平桩	采用循环置换原理, 能在 0.5m 超浅覆土条件下水平成圆形桩, 方向偏差小于桩长的 0.2%, 具有适用性更广、地层扰动更小、成桩精度更高、取芯单轴抗压强度达 10MPa 的优点

## 2. 技术检测报告、验收意见、鉴定结论

(1) 国家铁路局科法司组织全国铁路、公路、地铁、市政等领域的专家和行业代表对第一完成人牵头制定的行业新标准《公路与市政工程下穿高速铁路技术规范》送审稿进行审查, 认为: “提出了下穿运营高速铁路的新建、改建公路与市政工程的设计、施工及监测技术标准。”

(2) 上海铁路局组织专家对成果“道路与盾构隧道下穿工程对高速铁路桥梁影响及防护措施”进行鉴定, 认为: 整体技术水平达到国际先进。

(3) 中国工程院院士、隧道浅埋暗挖法技术的开创者王梦恕等专家对成果“超浅埋下穿铁路、公路长管幕隧道施工关键技术”进行评审, 认为: “总体达到国际先进水平。”

(4) 中国工程院院士、现行《地铁设计规范》主编施仲衡等专家对风险最高的盾构下穿高速铁路路基技术方案给予了高度肯定。

(5) 中国工程院院士、著名岩土工程专家龚晓南等专家对成果“高流变性软土地层地铁盾构隧道修建关键技术”进行鉴定, 认为: “提出土压平衡盾构出土率精细化控制的具体措施, 研究成果达到国际先进水平。”

(6) 全国工程勘察设计大师史玉新等专家对成果“南京地铁车站浅埋暗挖法施工对沪宁铁路行车影响及安全措施研究”进行鉴定, 认为: “全面解决了既有铁路线下设计和施工遇到的难题。该成果达到国际先进水平。”

(7) 辽宁省建设科学研究院有限责任公司对管棚施工偏差的现场检测表明: 管棚长度 110m, 最大偏移量 105mm, 施工精度达到 0.1%L 以上。

## 3. 重要科技奖励

编号	获奖年份	获奖等级	获奖名称	附件编号
1	2016	上海市科技进步一等奖	地下工程穿越快速铁路的创新技术及其应用	30
2	2013	浙江省科技进步一等奖	复杂环境地段盾构掘进施工控制技术	30
3	2016	中国岩石力学与工程学会技术发明一等奖	长距离、大跨度、不限速下穿国铁既有线技术	31
4	2013	中国施工企业管理协会科学技术一等奖	不停航机场跑道下大断面隧道修建技术	31
5	2013	中国铁建科技进步一等奖	机场跑道不停航条件下超长管幕保护超浅埋大断面暗挖隧道技术	32
6	2013	中国铁建优秀工法一等奖	超浅埋长距离中管棚下穿铁路微扰动施工工法	32

## 4. 院士评价

中国科学院院士、车辆-轨道耦合动力学理论创始人翟婉明在专著《轨道交通

轮轨噪声机理、预测与控制》第三章“轮轨相互作用”中，肯定了该成果创立的下穿铁路工程系统动力学设计理论方法，指出：“周顺华在研究穿越快速铁路工程时，将列车、轨道、路基和下穿工程纳入一个整体大系统，研究下穿工程施工变形对列车运行安全和舒适性的影响”。并在论文中多次引用相关成果。

## 5. 用户和社会媒体评价

(1) 中国铁路上海局、济南局、南昌局、哈尔滨局等集团有限公司高度评价了该成果对保障京沪、京广、杭深、哈大、沪昆、沪汉蓉等“四纵四横”高铁主干线畅通运行做出的重大贡献。

(2) 杭州市地铁集团、上海申通地铁集团、南京地铁集团等高度评价了该成果对解决各地地铁贯通瓶颈（地下穿越高速铁路）做出的重大贡献。

(4) 中铁上海设计院集团有限公司：下穿铁路工程系统动力学设计理论方法，从根本上解决了依靠工程类比的经验设计法存在的问题。

(5) 中铁隧道集团有限公司：国内首例盾构下穿高铁咽喉道岔区道岔，填补了国内同类施工空白，累计沉降不到 1mm。

(6) 人民网、中国新闻网、中国日报网等主流媒体报道了“国内首次穿越营运高铁”；人民网、东方网等主流媒体报道了“国内首例盾构下穿高铁咽喉道岔区道岔”；央视新闻直播间报道了国内首次地铁盾构隧道在大埋深、高富水、小半径、小净距叠落多重复杂工况下对运营高铁的下穿施工，沉降控制在 0.3mm 内。

## 五、推广应用情况

本项发明技术成果在我国广大区域不同地质条件数百项地下工程穿越普速和高速铁路中获得应用，并已推广应用于下穿机场、高速公路和“一带一路”的海外工程中，有力解决了轨道交通、道路、市政设施等建设与铁路运输运能保障之间的矛盾，为保障铁路运营安全、运输正点率发挥了重大作用。见表 2 和附件 4 至 18。

项目整体技术已在投入运营的杭州地铁 1 号线（应用时间：2007 年 6 月～2012 年 8 月）穿越运营速度 300km/h 的沪杭高铁和下穿艮山门编组站 26 股铁路线路中首次成功应用（应用时间超过三年），其区间工程竣工验收报告见附件 19。

表 2 主要应用单位情况

应用单位名称	应用技术	应用的起止时间	应用单位联系人/电话	应用情况
中铁二十四局集团有限公司	发明点 2、3	2004-2017	杜伟 /13012869226	控制技术、施工装置，新增利润 11533 万元
宏润建设集团股份有限公司	发明点 2、3	2007-2017	许文明 /13764079698	控制技术、施工装置，新增利润 4914.4205 万元
杭州市地铁集团有限责任公司	整体技术	2007-2012	李崇旦 /13516805680	整体技术首次在杭州地铁 1 号线穿越沪杭高铁及艮山门铁路线路中应用
上海申通地铁集团有限公司	发明点 1、2、3	2002-2017	刘加华 /13801951189	上海地铁 7、9、10、11、12、15、17、18 号线穿越铁路工程
南京地铁建设有限责任公司	发明点 1、2、3	2001-2017	黎庆 /13016930263	南京地铁 1、2、4 号线穿越铁路，南京至高淳城际穿越高铁群
上海东华地方铁路开发有限公司	发明点 1、2、3	2003-2017	李晓龙 /18817308304	在中国铁路上海局集团有限公司管内下穿铁路工程中得到广泛应用

中铁第四勘察设计院集团有限公司	发明点 1	2012-2017	刘炜 /18986023018	设计技术在穿越京沪、合福、沪宁、沪杭等高铁工程中获得应用
中铁上海设计院集团有限公司	发明点 1	2003-2017	赵旭伟 /13761252443	设计技术在穿越京沪、杭深、沪宁、沪杭等高铁工程中获得应用
中铁隧道股份有限公司	发明点 2、3	2015-2017	李发勇 /18626453861	控制技术、施工装置在宁波地铁 3 号线一期下穿高铁道岔获得应用
中国中土工程集团有限公司沙特阿拉伯分公司	发明点 2	2008-2010	宁波/0099-11-4608288	控制在沙特利雅得国王大道下穿工程获得应用
中铁二十二局集团有限公司	发明点 2	2014~2015	曹同来 /18811051158	控制在韩黄铁路、昆玉宝峰隧道穿越铁路获得应用
中交一公局厦门工程有限公司	发明点 2、3	2009~2016	王禹 /13599921619	控制技术、施工装置在广东莞惠城际铁路、沪昆高速铁路中获得应用
中铁十四局集团隧道工程有限公司	发明点 2、3	2015~2017	耿传政 /18363080905	控制技术、施工装置，新增利润 2017.62 万元
中铁建大桥工程局集团第二工程有限公司	发明点 2、3	2009~2015	严冬 /189 7424 2343	控制技术、施工装置，应用于东北、华东、华南、西南等地区的多项城市轨道交通下穿铁路工程的施工
中国水电建设集团国际工程有限公司新加坡分公司	整体应用	2013~2017	姚永丁 /13758216119	整体技术，应用于新加坡汤申地铁线龙比亚站及隧道建设项目、滨海南站及隧道建设项目

## 六、主要知识产权证明目录

知识产权类别	知识产权具体名称	国家(地区)	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人	发明专利有效状态
发明专利	一种确定下穿铁路工程刚度匹配的方法	中国	ZL201510460192.9	20170405	2436800	同济大学;中铁上海设计院集团有限公司	周顺华;刘建红;陈翰;宫全美;赵忠成;肖军华;季昌	有效
发明专利	隧道下穿铁路的安全联动控制方法及系统	中国	ZL201510459238.5	20161228	2319803	同济大学;中铁上海设计院集团有限公司	周顺华;刘建红;肖军华;车风;庞晨睿;季昌	有效
发明专利	单圆盾构土仓渣土流动特性可视化观测试验系统及方法	中国	ZL201510318977.2	20170524	2492052	同济大学	季昌;周顺华;宫全美;贺腾飞;陈翰	有效
发明专利	大漂石地层中盾构施工滞后沉降的监测与预警方法及装置	中国	ZL201510319449.9	20171110	待公开	同济大学	周顺华;梁文灏;季昌;黄建丹;张润来;肖军华	有效
发明专利	管棚或小导管静压顶入方法	中国	ZL201110065737.8	20121205	1092749	同济大学	石景山;周顺华;王炳龙;贾剑	有效
发明专利	一种列车脱轨报警系统及其应用方法	中国	ZL201210582624.X	20150819	1760307	中铁二十四局集团有限公司;中铁二十四局集团福建铁路建设有限公司	钱寅星;许伟书;吴健美	有效
发明专利	泡沫发生装置和泡沫发生方法	中国	ZL200910247212.9	20130410	1173180	宏润建设集团股份有限公司	王卫东;李涵军;胡震敏;王志信;汤烨楠;阎海成	有效
发明专利	可视化单圆盾构同步注浆浆液扩散模式研究平台及其应用	中国	ZL201510319475.1	20170524	2491266	同济大学	周顺华;季昌;卿袁奇;王炳龙;周俊宏	有效
软件著作权	下穿铁路变形摩擦效应有限元计算软件 V1.0	中国	2017SR672680	20160223	2257964	同济大学	吴迪;肖军华;周顺华;梁文灏	有效

省部级工法	超浅埋长距离中管棚下穿铁路微扰动施工工法	中国	/	/	/	中铁二十四局集团浙江工程有限公司	许伟书、杜伟、周顺华、梁文灏、蒋孝云	有效
-------	----------------------	----	---	---	---	------------------	--------------------	----

## 七、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目技术创造性贡献:
周顺华	1	/	教授	同济大学	同济大学	项目负责人, 对发明点 1、2、3 做出了创造性贡献, 构思了下穿铁路施工的技术途径和方法, 发明了“下穿铁路刚度匹配设计方法、安全联动控制方法和土仓渣土可视化试验系统等”。
梁文灏	2	/	院士	中铁第一勘察设计院集团有限公司	中铁第一勘察设计院集团有限公司	对发明点 1、2、3 做出了创造性贡献。提出了下穿铁路施工的设计思路和精细化变形控制的思想。
肖军华	3	系主任	教授	同济大学	同济大学	对发明点 1、2、3 做出了创造性贡献, 负责设计计算软件和施工控制软件功能的设计, 研发了环境噪声过滤及奇异点自动搜索、擦除技术, 发明了“下穿铁路工程实时监控管理信息系统”。
许伟书	4	副总经理、总工	教授级高工	中铁二十四局集团有限公司	中铁二十四局集团有限公司	对发明点 2、3 做出了创造性贡献。提出了管棚钻进自动纠偏设想, 实现了长距离管棚的高精度施工; 改进了管棚回拖施工工艺, 实现管棚施工的毫米级变形控制; 参与了下穿施工三级预警管理模式的构建, 发明了“列车脱轨报警系统”。
王炳龙	5	/	教授	同济大学	同济大学	对发明点 1、2、3 做出了创造性贡献。提出高精度监测网布置原则和方法; 发明了“变形阻隔设计方法和管棚静压顶入方法”。
胡震敏	6	/	教授级高工	宏润建设集团股份有限公司	宏润建设集团股份有限公司	对发明点 2、3 做出了创造性贡献。提出了灌注桩-旋喷桩刚柔复合结构逐阶隔断施工变形的施工工艺, 形成了国家级工法, 发明了“发泡改良装置和近距离下穿变形控制方法”。



## 八、完成人合作关系说明

序号	合作方式	合作者	合作时间	合作成果
1	共同获奖	周顺华、肖军华、许伟书	2016	上海市科技进步一等奖
2	共同获奖	许伟书、周顺华、梁文灏	2016	中国铁建股份有限公司优秀工法
3	共同知识产权	周顺华、梁文灏、肖军华	2015	发明专利【大漂石地层中盾构施工滞后沉降的监测与预警方法及装置】
4	共同知识产权	周顺华、王炳龙	2011	发明专利【管棚或小导管静压顶入方法】
5	共同知识产权	胡震敏、周顺华、梁文灏、肖军华、王炳龙	2017	实用新型专利【盾构浆桶浮动密封式轴承包】
6	共同知识产权	许伟书、周顺华、梁文灏	2016	浙江省 2016 年度省级工法【超浅埋长距离中管棚下穿铁路微扰动施工工法】
7	共同知识产权	胡震敏、周顺华	2016	浙江省 2016 年度省级工法【地铁盾构隧道冰冻法进洞施工工法】
8	共同知识产权	肖军华、周顺华、梁文灏	2017	软件著作权：下穿铁路变形摩擦效应有限元计算软件 V1.0
9	产业合作	周顺华、梁文灏	1997	技术服务：南疆铁路布谷孜大桥桩-土共同作用下的地震反应研究
10	产业合作	周顺华、胡震敏	2003	技术开发：管棚法修建软土隧道技术研究
11	产业合作	周顺华、许伟书	2007	技术服务：长距离大管幕（棚）下穿交通干线施工关键技术研究