

2017 年 6 月 2 日，中车株洲电力机车研究所有限公司全球首创的智能轨道快运系统首次发布。

从追赶到领跑 创新之车永远在路上

——我国高速列车牵引与控制新技术突破纪实

■本报记者 李芸 ■王越 姜杨敏

11 月 8 日，北京。

被誉为中国工程界最高奖项的“光华工程科技奖”，揭晓了第十三届获奖名单，有 40 位专家和 1 个团体获此殊荣。中车株洲电力机车研究所有限公司（以下简称株洲所）总工程师冯江华名列其中。

众所周知，以“复兴号”高速列车为代表的中国高铁是一张誉满全球的“亮丽名片”，究竟我国高铁制造有哪些独创的领先技术？近日，我们走进株洲所，专访了本次获奖的“交通信息工程及控制”领域代表人物冯江华和他的科研团队，了解他们如何成功研制“复兴号”电力机车牵引控制系统，实现世界最高商业营运速度，并首创自主导向的“智轨”电车等一系列研发成果，在我国轨道交通控制与信息新技术上取得突破。

“永磁牵引”异军突起

人们常说，火车跑得快，全靠车头带。火车能否多拉快跑，取决于机车的牵引能力，其牵引能力是由燃料或者电产生动力并通过复杂的传动装置实现的。

近 400 年来，经历蒸汽机车、内燃机车和电力机车的 3 次大的跨越，铁路运输始终是全球交通运输行业的排头兵与中坚力量。

1879 年，德国第一台可供实用的电力机车投入使用。电力机车虽然问世较早，但受经济基础、供电输电系统建设的限制，发展很慢，直到 20 世纪 60 年代才开始受到重视。

20 世纪下半叶，从全球范围看，我国电力机车发展始终处于引进、消化、吸收的“追赶”地位。1958 年 12 月 28 日，株洲电力机车厂在苏联 H60 型电力机车设计图纸及有关技术、工艺的基础上，研制出国产第一台电力机车 6Y1 型 1 号车样车。

1959 年，中国社会经济建设呈现出热火朝天的局面，给基础薄弱的交通运输业带来巨大压力，铁路运输能力成为了经济建设发展的“瓶颈”。

此时的铁道部决策者认识到，与蒸汽牵引、内燃牵引相比，电力牵引有其显著的特点：一是功率大，运行速度快，运载能力强；二是电力牵引有明显的节能高效优势；三是电力牵引运输成本低；四是电力牵引不但适用于城市运输干线，还适应于缺水、高原、沙漠地区；五是电力牵引没有环境污染；六是能显著改善旅客的乘车条件。大力发展电气化铁路势在必行，我国电力机车研制迫在眉睫。

1959 年 6 月，我国唯一的电力机车研究所在株洲创立。

株洲所成立后，立即全力投入到吸收苏联技术设计的 6Y1 型机车、吸收法国技术的 6Y2 型机车和韶山 1 型、韶山 2 型机车研制中，为电力机车关键设备的研发和高级人才队伍的培养奠定了坚实基础。此后，株洲所的技术创新捷报频传：

第一代电力机车的牵引电机、引燃管整流器和调压开关“三大件”关键技术取得突破；1983 年，韶山 3 型电力机车由株洲厂开始量产；

第二代电力机车大功率半导体器件、桥式全波整流、C0 转向架等多项关键技术整体提升，1989 年取代韶山 1 型电力机车，成为中国电气化铁路的主要牵引动力之一。

1986 年，在参考法国 8K 型电力机车、日本 6K 型电力机车、德国 KM 公司等同类装置，综合各国机车防空转 / 滑行系统优劣的基础上，株洲所研制出适合中国国情的韶山 4 型电力机车防空转 / 滑行系统。4 年 4 次大改进，防空转 / 滑行效果达到法国 8K 型电力机车水平，而且机车牵引力和司机操纵自动化程度明显提高，1992 年后推广应用于我国所有新造的电力机车。

从 1987 年开始，株洲所在对引进机车的微机控制系统进行消化、吸收的基础上，开发了微机诊断、故障记忆和显示功能，1992 年 1 月由微机控制的韶山 4 型 38 号电力机车在宝鸡—秦岭线上投入运行，机车总体控制性能达到或部分超过设计要求。

2014 年，“沪昆高铁”开通之际，株洲所攻克了车—网稳定性、装备安全等方面难题，有效保障了“沪昆高铁”的顺利开通。兰新线高寒动车组项目期间，由于原进口牵引技术无法满足长大坡道持续高速运行需求，在系统配置固化、无法变更牵引变流器和牵引电机的情况下，采用新的控制技术路线，自主研制并替代原装进口的控制器，实现了在功率提升 20%的同时温升降低 25K，解决了高能效牵引难题。

这些成果集成应用在以“复兴号”为代表的高速动车组上，打造了完全自主知识产权、世界领先的牵引系统产品平台，为“复兴号”在世界最大运营规模和最复杂运用环境下，实现世界最高运营时速、最大单轴异步牵引动力等顶层指标发挥了核心作用。在 2018 年两院院士大会上，习近平总书记指出：“复兴号高速列车迈出从追赶到领跑的关键一步。”

21 世纪，国际上电力机车市场的竞争日趋激烈，特别是进入高速铁路时代之后。

2008 年 2 月 26 日，北京钓鱼台国宾馆。科技部与原铁道部签署了一份《中国高速列车自主创新联合行动计划合作协议》，其核心目标是：在引进技术消化吸收和再创新已取得阶段性重大成果的基础上，加大自主创新力度，突破关键技术，集成创新成果，研制新一代时速 350 公里及以上高速列车，为京沪高铁提供强有力的装备保障。这一科研计划的启动，标志着继“引进消化吸收”和“集成创新”两个阶段后，中国高铁发展开始向“全面自主创新”冲刺。株洲所又一次迎来了发展的历史机遇。

轨道交通车辆的动力主要来源于牵引电机，电力机车的牵引系统被认为是高速动车组等轨道交通车辆的“心脏”，是高速列车动力节能升级的关键部件。世界轨道交通车辆牵引系统技术经历了直流系统、交流系统、永磁系统 3 个阶段。从全球来看，永磁同步牵引系统因其高效率、高功率密度等显著优势，成为新一代列车牵引系统重要方向。

永磁牵引技术属于前瞻性核心技术，为了避免我国牵引传动技术重陷“落后、追赶”的被动局面，冯江华领军的株洲所科研团队加速抢占这一高地，2003 年，他们组建了国内第一个永磁牵引系统研发团队。当时全球尚处于起步阶段，所有研发成员不但没有接触过该系统，就连研究对象也仅是一个概念。开展牵引系统向永磁升级换代的研究，是我国机车牵引技术研发第一次与国外站在同一起跑线上展开较量。

永磁体是一种能够长期保持磁性的磁体。永磁同步电机是通过在制造电机转子时加入永磁体，使电机的性能得到进一步的提升，并能使转子的转速与定子绕组的电流频率始终保持一致（即“同步”）。永磁同步电机具有较高的功率 / 质量比，体积小、重量轻，比其他类型电机的输出转矩更大，电机的极限转速和制动性能优异。但永磁材料在受到振动、高温和过载电流作用时，其磁性会下降，或发生退磁现象，从而降低永磁电动机的性能。

开山不惧拦路虎，功夫不负有心人。2006 年，株洲所设计出中国首台电动汽车用永磁电机。随后，100 千瓦的永磁驱动系统在该所的实验室诞生。2012 年底，永磁牵引系统在沈阳地铁成功装车。

电机控温难题是研究永磁牵引系统的关键难题之一。如果运行中电机温度过高，永磁系统将处于“罢工”状态。在高铁线路试验时，在大坡度轨道上运行，经历满手柄牵引、制动的“野蛮操作”考验，很快永磁电机就扛不住了。研发团队毫不气馁，继续日夜轮守在气温高达 40 多摄氏度的试验场，记录每一个细节、数据，查找每一个节点问题，经过无数次技术改进，仅用 3 个月时间，设计出最优方案重新装机，最终解决这一关键技术难题。

2015 年 5 月 16 日，长沙地铁 1 号线所需的永磁同步电机成功交付，这是我国首次将永磁同步电机装载在整列地铁车辆投入装车应用。

2015 年 6 月 24 日，安装了株洲所永磁牵引同步电机的高铁列车在北京环铁试验基地通过首次考核鉴定。这意味着我国成为世界上少数几个掌握可应用于高铁的永磁牵引技术的国家。中国具有完全自主知识产权的永磁牵引系统已经迈开产业化步伐。当年年底，永磁高铁技术被两院院士评选为“2015 年中国十大科技进展新闻”。

2018 年，永磁高铁完成 30 万公里运营考核，各项技术指标完全满足需求。如今，永磁牵引技术已在高速列车、地铁车辆、新能源汽车等方面批量应用，其能耗较异步牵引系统降低至少 10%以上。

中国轨道交通的“永磁牵引时代”终于来临。在 2019 年 1 月 8 日举行的国家科学技术奖励大会上，由冯江华主持完成的“轨道交通永磁牵引系统关键技术研究与应用”项目获国家技术发明奖。

“智轨”：城市交通独树一帜

2018 年 11 月 13 日，北京。“庆祝改革开放 40 周年大型展览”在国家博物馆开幕。

众多科技成果展示项目中，一台外形酷似地铁而车轮是胶轮的名为智能轨道快运系统的列车（以下简称智轨）亮相。这种由株洲所制造、采用虚拟轨迹跟随技术、以全电驱动胶轮车辆作为运载工具的中低运量轨道交通制式新产品，兼具有轨电车和公交车优势，拥有路径感知、自主导向、主动安防和智能运控四大核心技术，具备综合造价低、建设周期短、城市适用性强等显著优点，未来可实现自动驾驶，其先进程度让人惊叹：这“黑科技”是真的吗？

新基建是今年的热搜词。3 月 4 日，中共中央政治局常务委员会召开会议，提出要加快新型基础设施建设进度。5G 基站建设、特高压、城际高速铁路和城市轨道交通、新能源汽车充电桩、大数据中心、人工智能、工业互联网七大领域成为新型基础设施建设的重点目标。

从我国城际高速铁路和城市轨道交通的现实情况看，城轨各机电系统注重纵向发展，但缺乏横向拓展，信息及资源共享不够充分，专业融合能力偏弱，无法支撑智慧城轨高质量发展需求。

为此，中国城市轨道交通协会于 3 月 12 日正式发布《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》。可以预料，城市轨道交通将成为未来建设领域的重中之重。

传统的城市轨道列车具有运量大、效率高等优势，但因轨道导向、承载、约束作用与轨道苛刻的平顺性等要求，系统建设与运维复杂、成本高昂。这对于亟须解决公共交通问题但又受制于人口规模和建设成本的中小城市来说，可望而不可即。

有没有一种既保持大运量优势，又兼顾低成本、灵活穿行的城市公共交通工具？

2013 年，冯江华带领团队从零起步，开启了胶轮智轨的原始创新之路。经过 4 年攻关，首款智轨电车研制成功；2018 年，首条智轨试验示范线在株洲试运行；

2019 年 1 月 20 日，由株洲所自主研发的智轨电车试验车亮相哈尔滨，该车采用虚拟轨迹跟踪技术，无需铺设钢轨，以全电驱动胶轮车辆行进。

2019 年 12 月，智轨迎来新的里程碑，四川省宜宾市全球首条智轨商业运行线开通，宣告城市公共交通“智轨时代”的到来。

智轨的出现，彻底摆脱了轨道交通工具对实体轨道的依赖，开创了城轨装备新制式。究竟智轨有多“智慧”呢？

“高度智能化是智轨最大的优势之一，它智在轨道、智在安全、智在体验、智在运营、智在交管、智在维保。”湖南中车智行科技有限公司总经理彭忠红表示，智轨独创“智轨控制系统”，可实现列车在智能控制下的“类轨道”运行；在安全方面，采用“主动安防”技术来保障智轨的安全，安全性能更高；利用物联网技术，使乘客从有出行需求到到达目的地都有真实“智能”感受，体验感更强；在运营上，对相关运营数据进行采集、预处理、深度集成以及历史数据的对比分析与决策，实现智轨车辆在正线、折返段及车辆段的灵活调配、准时运行；交通管制方面，智轨主动融入交警交通监控平台，助力优化交通组织方案，提升智能信号控制水平，可实现全路段智能交通管控；在维保方面，智轨构建了集车辆、车辆段、线网等于一体的健康监测、智能诊断、设备运维、车辆检修等智能协同管理平台，降低运维管理成本，保障运营安全。

同时有别于其他城市公共交通产品，智轨还具有四大“新”特点，即立项审批门槛低、建设成本低、绿色环保等级高以及示范效应好，综合起来就是“六智四新”。

随着以地铁为代表的高投资成本城市轨道交通建设日趋放缓，智轨这一兼顾运量和经济性的新型中运量轨道交通制式，将为城市交通出行问题提供新的解决方案。目前，除宜宾外，智轨在西安、哈尔滨等 30 余个城市进行了项目跟进，成功推进的项目近 20 个，其中海外项目 1 个、已落地项目 5 个。

“低成本、周期短、高智能的独特优势，有利于智轨在城市公共交通领域抢占市场先机。而随着宜宾智轨项目的推进示范，不仅将有效提升宜宾的城市形象和交通效率，也为智轨产业带来新的发展契机。”冯江华表示，期待智轨产业的发展，为城市轨道交通产业升级提供新的助力，为解决城市交通难题，提供一套行之有效的解决方案。



◀冯江华（左 2）指导 400 千米 / 时高速动车组用永磁牵引系统研制。



▶我国首条全线采用永磁牵引系统的线路——长沙地铁 5 号线。

“智能制造”花开满园

党的十九届五中全会提出，坚持创新在我国现代化建设全局中的核心地位，把科技自立自强作为国家发展的战略支撑。

发展战略性新兴产业必将推进尖端技术的自产化。智能制造是建设制造强国的关键，实现“数字化、网络化、智能化”，是制造业发展的新趋势，也是新一轮科技革命和产业变革的核心所在。

60 年前，株洲所立所受命于经济建设高潮之急需，国外技术封锁的特殊环境使其自主创新“与生俱来”。而在建设社会主义现代化强国的新时期，株洲所人因拥有一系列自主知识产权的创新成果而“自信满满”。

仅在“十三五”期间，株洲所荣获国家、省部级科技奖励 60 余项，其中国家技术发明奖 3 项、国家科技进步奖 2 项。中国专利金奖 2 项；获授权专利 2900 余件，其中发明专利授权 1600 余件，获得国外专利授权 57 件。由十大国家级技术研发平台构建起一个强大的技术创新支撑体系。5 年中，包括国家重点研发计划、“863”计划、科技支撑计划、科技重大专项等 51 个国家级科研项目在内的 270 项科研任务的实施，为科研队伍提供了明确的攻关目标和强大动力，不断巩固和提升了该所在轨道交通领域的领先地位，推动着一批应用基础理论创新和关键技术的突破，更为株洲所“智能制造”奠定了坚实的基础。

“智能制造”包括智能制造技术与智能制造系统，是制造业与信息化相结合的必然结果。

株洲所的“智能制造”主要从两方面发力。一是从智能产品、智能生产、智能物流、智能服务四个维度推进智能制造，推进高铁核心技术产品的生产环节智能化蜕变；二是推进新技术新装备在新材料、新能源、半导体制造、海洋与矿山、现代物流等多个领域延伸。

智能产品包括由智能芯片—智能传感—智能控制—智能动力构建的高铁牵引系统和网络控制系统，这个全流程产品体系为高铁车辆安全运行提供原动力和控制保障，堪称高铁的“心脏”和“大脑”。

在智能生产上，中车株洲所 8 英寸 IGBT 生产线，配备 203 台（套）一流的 IGBT 制造、封装测试、可靠性试验设备，多道核心工艺实现自动化操作和信息流控制，提高生产效率，保证产品质量，减少人工劳动量、降低作业危险性。

变流模块智能制造样板线，通过信息化和自动化手段升级，对 6 个关键要素进行全面质量管理，成功实现 23 种功率模块产品混流共线的柔性生产，一次交调合格率 99%以上，效率提升超过 30%。

大型结构件机器人智能磨抛系统，突破了多机器人协同加工关键技术，可实现大型复杂型面的高可靠、低成本和高柔性智能化制造，填补国内同类装备空白。一节高铁车身的涂层工序，采用机器人作业，效率可提高 10 倍以上，质量优于人工作业，粉尘排放降低，且可降低成本 30%。

在智能物流上，通过搭建 AR/RS 自动立库系统 +VNA 仓储系统 + DPS 快速拣配系统三位一体的智能仓储系统，大幅度提升仓库存储密度，缩短仓库订单周转时间，降低作业复杂度，满足多品种、少批量、快节拍及不同制造模式下的物流配送需求。

除此之外，还有智能服务。大数据是智能服务的技术基础，株洲所已建成涵盖轨道交通及工业领域大数据存储管理与分析挖掘业务体系，可支持海量工业设备数据接入“数据大脑”，有效管理轨道交通等行业装备的实时运行状态，评估其健康指数，提供数字化的检修、维修指导。实现打通设计、制造、物流、售后、质量等各个领域的关键数据，并形成“闭环”，使服务价值倍增。

在技术延伸方面，以轨道交通为重点目标的集成创新包含了物联网、传感网、智能制造、人工智能、大数据等多行业共性技术，有很强的延伸、辐射能力，可带动其他领域及产业的技术发展，例如空天基控制与指挥、运能可配置、公共路权导向运输、多栖可配置导向运输、超高速陆地运输等，对保障国家安全意义重大。

在新能源领域，以风力发电、新能源乘用车电驱电控系统为代表的智能产品，为人类绿色出行、低碳生活带来新的突破。在新材料领域，以桥梁支座、空气弹簧、聚酰亚胺膜为代表的减震降噪、高分子复合材料，为众多世界级工程、高精尖科技产品提供优质的供应链保障。在海洋装备领域，以深海 ROV、挖沟犁为代表的海工装备，为全球深海资源探索开发提供更大可能。在自动驾驶领域，株洲所对矿卡无人驾驶采用“地面控制系统（控制中心）+ 车地无线通信 + 车载系统”方案，填补了机车自动驾驶和矿卡无人驾驶空白，闯入了货运“无人区”。

在采访结束前，冯江华说：“国家‘十四五’规划和 2035 年远景目标，增强了工程科技人员的使命感和紧迫感。中国工业的现代化要从制造、速度、产品向智造、质量、品牌转变，创新的路上不能停歇，技术的追求永无止境。为交通强国、科技强国战略贡献力量，是株洲所科技人的终身使命。一个人不管在什么位置，都要关心社会的发展，并结合自己的专长，为行业进步和企业发展作贡献。”



和谐 1 型八轴 9600 千瓦机车在大秦线牵引 2 万吨重载列车。

社址：北京市海淀区中关村南一条乙 3 号 邮政编码：100190 新闻热线：010－62580699 广告发行：010－62580666 62580707 传真：010－62580899 广告经营许可证：京海工商广登字 20170236 号 零售价：1.20 元 年价：238 元 工人日报社印刷厂印刷