

光伏公路：通向绿色智能的“超级路”

本报记者 赵征南

太阳，为地球输送大量的光和热，成为万物生长的源泉。在2000多年前的中国，《周礼》上就有着利用“夫燧”、“阳燧”取明火的记载。近代以来，人们逐渐将太阳能作为一种能源加以利用，特别是在全球性的环境破坏受到重视后，无穷无尽、清洁无害的太阳能产业迎来了大发展时代，太阳能集热器、太阳能热水器、太阳

能空调、太阳能发电板，众多创新产品接连投入市场应用。如果“绿色”的代表“太阳能”和“便捷”的代表“高速公路”走到一起，会发生什么样的化学反应？现在，山东济南一段长度为1080米的高速光伏路面，即将给我们答案。就在记者现场采访之时，仅仅5天的时间里，

这段光伏路面连接“火”了两把。去年12月28日，作为世界首条高速公路光伏试验路段，它在济南正式通车，满足通行的同时，并网发电；略显尴尬的是，2018年1月2日，工作人员在巡查时发现，一块长约1.8米、宽约0.15米的光伏路面遗失了。目前尚不清楚，这次突发事件会给这条旨在未来的“超级公路”带来多大变数。

前沿 透明路面 抗压防滑能发电

深夜，2018年的第一场雪在千呼万唤中悄然降临济南。在绕城高速南线亮白色路灯的映照下，雪片纷飞。齐鲁交通发展集团养护部部长张宏庆说，亮灯的能源，正来自于下方光伏路面白天存放在“光伏银行”中的电。他告诉记者，一直以来，高速公路既是用电大户，又是缺电大户。为了接一条电路，公路企业往往要在电力部门的帮助下，翻山越岭作业，成本极高。若是在偏远路段和隧道桥梁，花费更加高昂。有了光伏路面，高速上路灯、监控、信息提示牌等耗电设施安装的密度增加，安全更有保障。

目前，光伏路面铺设总面积达5875平方米，分布式光伏并网发电装机容量峰值功率817.22千瓦，预计可实现年发电量约100万千瓦时。试验段已经实现为路灯、电子情报板、融雪剂自动喷淋设施、隧道及收费站提供电力供应，余电上网。

“所谓分布式，就和百姓家楼顶的发电项目一样，公路自发自用、多余电量上网，分散布局，就近利用。不仅能够通过增加光伏空间提高发电量，还有效解决了电力在长途输送中的损耗问题，‘垃圾电’变为‘优质电’。”齐鲁交通光伏路面技术负责人、同济大学交通运输工程学院教授张宏超说，“选择并网发电，和建设储能设施一样，都是有了‘光伏银行’。日照充足时将多余电量存进去，夜晚或者不适合光伏发电时利用电网补充公路用电。”

5日上午11时，记者走进齐鲁交通济南南收费站的光伏路面展厅，位于二楼的电子显示屏内，标注着光伏路面的发电效益：当日发电量298.2千瓦时，从元旦累计的发电量达到3543.6千瓦时。除此之外，光伏路面还有更“绿色”的贡献。在显示屏的右上角，一组数据引起了记者的兴趣：发电效益经测算被转换为社会效益，从元旦起累计，利用的太阳能相当于燃烧1417吨标准煤、减排3533吨二氧化碳、等效种植193棵树。如果从通车开始计算，三个数值分别达到4032、10052、549。如此，交通从“耗能”的过程，变为在消耗能源的同时，生产能源，尽可能实现正向补偿。

光伏路面目前铺设在试验段的行车道和应急车道，主行车道宽度3.75米，其中光伏路面占宽3米，两侧约束标线宽度共0.75米；应急车道宽度3米，光伏路面占宽2.44米。

通车的消息传来，济南城中有不少车友来此体验。在他们看来，路面的感觉和平常高速差不多，没有镜面反射，刹车距离也和正常路面近似。

“看起来像玻璃，摸起来像土。”与相邻的超车道相比，光伏路面呈灰白色，颗粒感较强。不过，行车道和超车道的厚度基本一致。原来，光伏路面分三层：最表层为透光混凝土路面，具有高强度和超过90%的透光率；中层为光伏板，可利用路面空闲时间吸收阳光发电；底层为绝缘层，三层结构总厚度不超过3厘米。在光伏路面之下，无需新建路基，仍是原先的沥青混凝土路面。只不过施工人员在两个月内，采用路面改造方案，将原路面结构精铣刨后加铺光伏发电层，用特殊胶水粘连，保持路面总厚度和标高不变，以保证路面承载能力，同时利于排水。

施工方案曾被反复讨论，各方前前后后提出了三种想法。有的希望铺设北幅所有车道，获得更多的试验数据，但考虑交通安全和调度，方案不可能施行；有的希望铺设超车道，交通量小，轴载轻，风险小；后来，综合考虑下，铺设行车道和应急车道。

“从选址开始，试验就以‘最苛刻’为追求：试验段紧接长下坡，位于不设超高的缓和曲线和圆曲线段之间的外侧，对光伏路面的铺设不利，它的平均日交通量约为8万辆，重车和货车比例高达40%，时有超载车辆出现。”张宏超说，高速公路等级最高，其各项性能指标要求最高，而大货车都走行车道，该车道交通流量最大，轴载最重，条件最苛刻，能在高速行车道上通过考验，所有的道路都能使用。



光伏路面已经为路灯、电子情报板、收费站提供电力。

(均齐鲁交通发展集团供图，本期制图李洁)



光伏路面结构示意图

光实能源透光混凝土层

光伏路面发电层

光实能源防水绝缘保护层

光伏路面分三层

最表层为透光混凝土路面，具有高强度和超过90%的透光率

中层为光伏板，可利用路面空闲时间吸收阳光发电

底层为绝缘层，三层结构总厚度不超过3厘米

光伏路面的细节图

在张宏超寻找企业合作之时，在山东半岛，也有一个人正在寻找“他”。

近年来，齐鲁交通发展集团致力于绿色交通的探索。2016年底，我国部分地区雾霾严重，集团党委书记、董事长徐春福注意到网上的一则消息：2006年，美国布鲁索夫妇发明出一种正六边形的太阳能电池，其表面是一种超耐磨的钢化玻璃，承重最高达125吨，铺在路面上后能保证汽车的安全行驶。之前在德州市担任副市长期间，他曾多次调研光伏企业；后来在交通领域的工作，又让他产生了很多关于新能源和公路结合的想法。

“我的天，太阳能公路使用路面空间资源，不额外占用土地，贴近用电需求，缩短输电距离，这不正好解决了光伏发电用地难、输电难的瓶颈吗？”徐春福决定立即飞往美国，和布鲁索夫妇见面。

圣诞节之前，顶着大雪，求贤若渴的徐春福见到了朝思暮想的太阳能公路。但公路领域的经验告诉他，由于正六边形不适合模块化施工，表面材料仍存缺陷，这并非“梦想之路”。

失之东隅得之桑榆。失望的徐春福却在回国没多久遇到了张宏超团队的主动拜访，双方相见恨晚。“只有我们这样的公路企业，能为光伏路面做产业化试验，谁敢让你创开路面？试验中发生路段拥堵、甚至交通事故怎么办？只有我们能

研发 从车库出生，在体系下成长

9年前，张宏超有了研究光伏路面的想法，把“主战场”放在地下车库。那时，碳排放成了热点。张宏超在思考，如何将节能减排和自己的道路研究结合起来。他将目标也锁定在太阳能公路上。当时的多晶硅很贵，价格是现在的100倍，他就买了巴掌大的几片，悄悄地在楼下的联排车库里“捣鼓起来”，每做完一个试件就拿到室外晒。他反复琢磨，如何才能让太阳能部件在发电的同时抗压。

2011年，他将试件带进道路与交通工程实验室验证。这个学科平台是我国交通科技领域重大原创性成果研发的主要基地。“路面研究有一套体系，是同济道路交通工程几十年来，总结了众多前辈的经验，逐渐积累形成的。如果没有这套体系，以及这些价值连城的实验设备，我一个人根本做不出光伏路面的创新。”张宏超说。

日前，记者走进同济嘉定校区，回溯光伏路面在实验室阶段的孕育过程。潜意识里，研究马路可能是一层层地研究，可实际上是从梁状、饼状、柱状形态起步。在压力实验室，借助各种夹具、拉头，可以做多类别的拉、压、扭试验，单向的、轴向的、正弦波、余

弦波、锯齿波，所有力学数据采集后显示在电脑里。“在车库我可做不了类似实验，特别是动态模拟，测试疲劳。有些情况下，路面能经受住静态的强应力，却可能在持续的低应力状态下脆断。”张宏超说。

所有混凝土路面都怕老化，光伏路面也不例外，它们的主要敌人是紫外线。很多材料，特别是高分子材料，吸收紫外线能量后，化学键会断裂，变成小分子，就会老化。在紫外线照设备下，实验人员要研究哪一种紫外光的影响最大。他们还会启用压力老化设备，在高压、高温的环境下，注入氧化剂，加速老化，看看路面多久会变“酥”。

经历重重考验后，试件会被送入CT室“无损探伤”。跟医院的CT相比，工业CT需要穿透金属、混凝土，能量要强得多，分辨率高达500纳米，内部的孔隙、瑕疵、裂缝、气泡都能一览无余。

有小型试验，还有大型试验。在实验室的一楼，有一个深约2.5米的长方形“无水游泳池”，池内“灌”进路面，下面打50多个桩，这相当于把真实的路面搬到了室内，在室内重建地基、基层、混凝土层。在“游泳池”的周边，

未来 电气化是智能化的基础

和教授一起承担压力。其实，我即便不做这个项目，不承担这种压力，也可以安心做企业负责人，但我始终觉得，这是一条值得投资的未来之路。”徐春福笑着说。试验开展以来，也出现了对光伏路面发展前景的怀疑。

“创新一般从技术特性和经济特性两方面考量。技术上，太阳能路面、汽车无线充电等技术，未来都是值得探索的‘绿色’方向。经济上，也许实现投入产出平衡要有一段很长的路，但绝不能说‘没有当下的经济性，就不能研发’，也不能因为现在不能大规模推广就反过来否定技术。某一技术转化为实际应用，不仅与该技术本身有关，还在于很多技术的集成。”在同济大学交通运输工程学院教授、交通运输规划与管理（国家重点学科）主要学术带头人之一的陈小鸿看来，交通技术创新是一场马拉松，不要走得太急，也不要轻易言弃。创新之路一定要符合科学研究规律，如果为了资本运作等经济目的，技术还未经历反复试验、评估时，就匆匆上马，急于转化，那可能无异于亲手终结自己的生命；同时，不要

在徐春福看来，高速公路电气化是智能化的基础。有了电，才能满足照明、融雪、交通监控、安全设施、无线通讯以及未来智能交通路端设备随时随地的用电需求，智能车辆在电气化公路行驶过程中，同步实现着信息与能量的“握手”，也就是车与路的能量和信息交互，完成了车辆自我校核和车路双向校核，有了上述前提，智能交通将成为现实。

徐春福也谈到国际合作的畅想：“在国外，我们的发力方向是那些最贫穷的国家和最发达的国家。前者，作为重要的能源项目，中国光伏公路延伸到哪里，文明就点亮到哪里；后者，当地对新能源的接受度更高，各种产业配套更成熟，更适合前期推广。”

“急弯处、上下坡等特殊路段，若是有发光的标志标线，有助显著降低事故发生率。”张宏超也表示，试验路段后期会推出电子标志标线、无线网络全覆盖、汽车移动无线充电、大数据集成与分析编组、同速汇流、智能分流、高效率（智能移动充电、智能供电管廊）、高智能（预约出行、即时出行、无人驾驶、车路协同）的绿色、安全、无接触、点对点的全新出行方式。

在徐春福看来，高速公路电气化是

还有深沟，侧向有孔，在孔中埋入传感器，实时监控加载数据。

在实验路面的上方，一台卡车状的橙色大型实验设备发出巨大的轰鸣声，这是中国和南非合作的“mmls-6全尺寸加速加载系统”，设备内部轨道上挂着真实的货车轮胎，通过控制系统给轮胎加载，加到超载50%，期间环形轨道不断转动，通过轮胎给下方的试验路面加载，加载距离为6.6米，最快速率达到6000次/小时。结构验证需要2000万次以上的加载，与使用车辆加载相比，它能验证时间从几年缩短为几个月。此外，在内部密闭的空间内，还能通过附属设备制造出淋雨、加热、低温等模拟室外的气象状况，开展模拟试验。

张宏超的研发之路并不平坦。当时，他不过是一个年轻的副教授，争取项目很难，而且研究在当时看来很难实际应用。2016年之前，他申请了很多次自然科学基金，但都被拒绝，评审专家的回复是“想法很好，但技术路线不可行”。

寻找企业合作时，又连续被十多家企业拒绝，企业负责人的态度是“当面鼓励，但一分钱不给，背地里质疑是‘忽悠’”。

伴随巨大的压力，张宏超在实验室除去站着的时间，每天的走路步数超过20000步，血压飙到200，心脏装有支架，接近崩溃。但兴趣始终支撑着他，一步步将兼顾平整、抗滑、发电、耐久四大基本要求的“承载式光伏路面技术”打磨成熟。

智能化的基础。有了电，才能满足照明、融雪、交通监控、安全设施、无线通讯以及未来智能交通路端设备随时随地的用电需求，智能车辆在电气化公路行驶过程中，同步实现着信息与能量的“握手”，也就是车与路的能量和信息交互，完成了车辆自我校核和车路双向校核，有了上述前提，智能交通将成为现实。

徐春福也谈到国际合作的畅想：“在国外，我们的发力方向是那些最贫穷的国家和最发达的国家。前者，作为重要的能源项目，中国光伏公路延伸到哪里，文明就点亮到哪里；后者，当地对新能源的接受度更高，各种产业配套更成熟，更适合前期推广。”

“急弯处、上下坡等特殊路段，若是有发光的标志标线，有助显著降低事故发生率。”张宏超也表示，试验路段后期会推出电子标志标线、无线网络全覆盖、汽车移动无线充电、大数据集成与分析编组、同速汇流、智能分流、高效率（智能移动充电、智能供电管廊）、高智能（预约出行、即时出行、无人驾驶、车路协同）的绿色、安全、无接触、点对点的全新出行方式。

在徐春福看来，高速公路电气化是

焦点回应

以空间换能量

争议一：有人说，光伏高速公路试验段在通车仅仅5天后就遭到破坏，这反映了路面并没有先期判断的那么坚固，该技术仍存安全隐患。对此，你们怎么看？此次破坏对道路有多大的影响？

研发团队：此次破坏对行车无影响，但对发电有影响。

在质量上，济南光伏路面设计使用年限15年，已通过山东省公路检测中心的检测。光伏路面抗压、抗酸碱，表面透光保护层的强度是传统沥青混凝土的5倍以上，再加上特殊的保护层，即便是破坏后，路面依然具有极高的强度。

能被切割就说明路面不够坚固？不能这么说。包括传统沥青路面和光伏路面在内的所有混凝土路面都能被切割。切割混凝土是道路行业分析检测常规手段，家常便饭。

争议二：从各国已有的试验段看，光伏路面成本太高了，这样的公路怎么能在实际中大规模应用？

研发团队：现阶段来看，光伏路面成本高于沥青路面。但我们要弄清楚成本高在哪？主要还是研发成本，包括设备和人力等。我们无论是实验室研究，还是现场施工，都苦于没有技术配套和产业配套，很多设备都要自己改造，一颗螺丝钉的位置都要研究半天。

但是，成本下降是有很大空间的。第一，寄希望于产业配套。我国光伏产业引领全球，有更加成熟的产业链，将来在进一步提高光电转换率的同时降低价格，使项目具有经济可行性。

第二，建设、养护成本。过去，沥青路面无论建设还是养护，都需要大量人力，也只能现场铺设。未来光伏路面模块化施工条件已经具备，大型工厂化预制件的作业不仅能提高效率，也会显著降低成本。

目前，济南旧有路面改造为光伏路面的成本，比国外便宜一半。未来新铺光伏路面，我们正研究将沥青混凝土层取消，代为铺设缓冲层，如此一平方米路面成本将会降低600元—1000元，再加上发电效益，以及智能化后第三方服务功能，一定会有人心甘情愿地选择光伏路面。

争议三：光伏路面适合光照条件较好，车辆较少的西部地区。我国东部地区不太适合推广？

研发团队：不能这么说。东部地区发展新能源面临的最大问题是空间不够，将光伏面板铺到路面上，则最大限度地利用了已用空间，解决了这个大难题。同时，在东部，更符合光伏发电适合就近利用而非远距离传输的特点，以空间换能量的目标绝对能够实现。

争议四：光伏路面发电受扬尘、遮挡、照射角度等因素的影响，发电效率会不会太低？

研发团队：没错，传统上看，太阳能发电并非效率最高的发电方式；30—40度的倾角以及向日葵式的接收方式能更高效地利用阳光；单点的遮挡会显著影响光伏面板的发电效率。但对于光伏路面而言，不仅仅是道路技术的创新，还包括光伏发电领域的创新，也就是说，光伏路面使用的已不再是传统组件，而是在材料、布局等方面有了更新。为解决角度影响，我们通过路面结构设计，利用折射等原理，巧妙地增加了透光度；为解决遮挡问题，我们优化了电路设计，提升了发电单元的转化效率。从目前试验段的发电效率看，在一个对光伏发电并不友好的季节，总体上还超出了预期。

但是，由于光伏路面是新生事物，确实有一些问题仍需研究。比如扬尘对我们的养护提出了新要求。行车道，由于车辆较多，可能会“越跑越干净”，但应急车道，长时间下去积攒灰尘是可能影响发电效率的。

再比如遮挡。如果是堵上几公里望不到头，这就是静态遮挡，肯定影响拥堵路段的发电。除此之外，我们现在主要研究动态遮挡，车辆的体积、行驶速度等对发电的影响，之前没人研究，我们要从零起步。

争议五：之前，有些“惊世骇俗”的项目最终不了了之，光伏路面也会面临同样的结局吗？

研发团队：研究光伏路面的国家远远不止我们。世界范围内包括美国、比利时、荷兰、日本和韩国等都在着手这方面的研究。总体上都没有大规模推广，都处于试验研究阶段。

目前，我们的研究完全符合科学研究的规律。此前，研究处于产业化验证前期，经历了室内验证、全尺寸验证、野外验证和实例验证，未来还要制定相应标准，最后才是推广应用。反复验证，反复改进，每一步都急不来，将来仍会循序渐进。



以最严苛为标准，光伏路面试验段选择货车较多的行车道，而非超车道进行铺设。