3D打印在汽车制造中的应用展望

□ 东风汽车公司/崔厚学 高方勇
□ 华中科技大学/魏青松

“中国制造2025-节能与新能源汽车”，从车身制造更优质、高效、柔性化、低成本和安全、节能、环保等方面对连接技术提出了更高要求。本文结合这一新形势，对3D打印技术在中国汽车工业中的应用现状做了详细阐述，对其前景进行了简要分析和展望。

围绕实现制造强国的战略目标，“中国制造2025”提出加快包含节能与新能源汽车在内的十大重点领域突破发展，推进重点行业转型升级和新一代新材料、信息技术、智能制造、增材制造（3D打印），推广应用以绿色、智能、协同为特征的先进制造技术，中国汽车制造面临新的发展机遇和挑战。

汽车制造模式发展进程

在人类文明发展进程中，先后出现了手工操作、机械化、自动化等制造模式。

随着近年来人工智能技术的迅猛发展，制造业的自动化程度获得了显著提升。未来，制造业将在现有基础上细化并拓宽自动化的水平，同时吸收数字化技术、信息技术、网络通信技术等发展成果，逐步演变为智能制造（见图1）。

伴随工业4.0的发展进程，中国汽车和世界汽车制造业也经历了大致相仿的四个阶段。随着转方式调

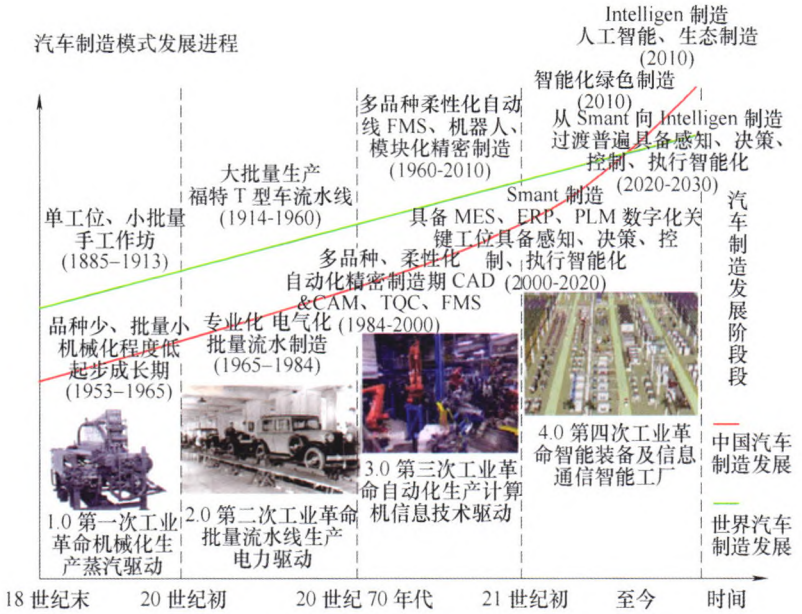

图1 汽车制造模式发展进程

结构进程加快，发展节能与新能源汽车是解决能源、环境问题的重要途径，是我国从汽车大国迈向汽车强国的必由之路。汽车产品向“轻量化、电动化、智能化”转型，生产制造方式向“大规模定制化”转型，新能源、新材料和信息技术加快发展，汽车制造的数字化、模块化、自动化、柔性化、智能化、绿色化特征日趋明显。

3D打印技术及其在汽车制造中的应用

3D打印技术是基于分层迭加的快速成型，又名增材制造，是利用三维设计数据在一台设备上由程序控制快速、精准地制造出任意复杂形状的零件，从而实现设计和制造的数字化及“自由制造”（原理见图2）。3D打印可解决复杂结构零件的成形问题，大大减少加工工序，缩短加工周期，被认为是制造领域的一次重大突破，也被誉为“第三次工业革命“的重要生产工具。

据《Wohlers Report 2015》显示，自1988年以来，全球3D打印技术产值一直保持着25%以上的年均增长率，而2014年这一数字更是高达35.2%，达到41亿美元。其中汽车及运输行业的份额高达31.7%，几乎占据了3D打印市场的三分之一。

目前在汽车行业应用最为广泛成熟的3D打印技术有选择性激光烧结（SLS）、立体平板印刷（SLA）、无模铸型（PCM）、熔融沉积（FDM）、喷墨式粉末粘接（IPB）等。

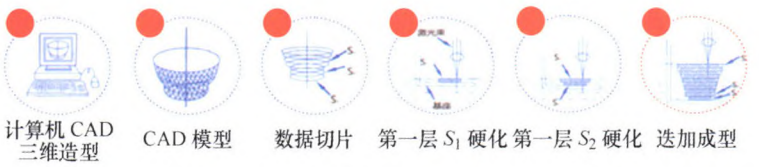

图2 3D打印技术基本原理

1. 3D打印技术在汽车研发和制造领域大有可为

（1）3D打印技术辅助新车型的快速开发，大大缩短开发周期和降低成本。3D打印技术无需制造模具、刀具和夹具，省去零件图形转换、模具设计与制造以及切屑、锻造和铸造等繁琐加工工序，极大减少了人力和物力的投入，并显著缩短周期。在汽车新车型研发阶段，运用3D打印技术可快速验证和优化零部件结构，特别是快速验证和定型复杂功能部件（如发动机、变速器、底盘等）。

（2）3D打印突破了制造局限，可促使产品设计由面向制造工艺的设计转向面向零件性能的最优化设计，从设计源头改善汽车性能。随着汽车轻量化、低排放、节能和新能源等需求的不断提升，汽车零件结构（如自由曲面、内流道、多层嵌套结构、多部件组合等）越来越复杂，尺寸极限要求（如薄壁、变壁厚等）越来越突出，新材料不断涌现，导致传统模具、刀具以及铸锻焊等制造工艺难度越来越大。为了适应加工工艺要求，汽车某些结构、尺寸和材料只能采取一定程度的让步设计或次优设计，从而降低了零部件甚至是整车性能。应用3D打印技术可以制造出高比表面积多孔栅格、复杂内流道甚至是内空结构、复杂自由型面和变壁厚、多组件免组装、以及多材料、梯度材料和梯度结构等难成形的零件结构，应用于汽车发动机、变速器、底盘、三元催化器陶瓷体等功能性零部件。3D打印技术应用在新型电动汽车车身及其零部

件的研发和制造中，不但可以解决复杂零件的制造难题，还可以从设计源头优化零件和汽车整体性能。

（3）3D打印可实现多品种车型的快速开发以及个性化车型的快速低成本订制。随着社会经济和人们生活水平的不断提升，个性化消费需求越来越显著。汽车作为个人和家庭消费品表现得尤为突出，如个性突出的车灯、形状和结构异类的车身、变化多端的内饰等等。3D打印技术可以很方便地满足这些制造需求。例如，利用3D打印可以在车胎表面刻上客户名字或人像，从而在雪地或沙漠里行驶中留下自己的“足迹”。3D打印技术还可以灵活制造适应不同气候和地理条件的轮胎花纹，从而提高轮胎安全系数、耐磨程度以及滚动效率，在彰显个性的同时还赋予特殊的服役性能。

（4）3D打印技术在汽车制造的深度应用可促进汽车低能耗、低排放和绿色化的发展。3D打印技术可以实现最优性能设计的结构制造，从结构上实现最大程度的轻量化。同时，基于3D打印技术，可以设计和制造最优工作性能的发动机缸体、燃油喷嘴、燃烧室、变速传动机构以及底盘等功能性零部件，制造具有最优空气动力学特性的车身等。从零部件的结构和功能优化上提升整车性能，降低燃油消耗，减少排放，实现绿色制造，满足使用需求。

2. 3D打印技术国外研究现状

国外汽车工业发达国家已利用3D打印技术辅助汽车造型和新功能验证以及复杂结构零件、多材料零件、轻量化结构的快速制造。国际汽车知名生产商如奥迪、宝马、奔驰、美洲豹、通用、大众、丰田和保时捷等已经在汽车的研发阶段大量使用3D打印技术。

3D打印在汽车领域中的应用主要集中在设计验证和零件制造上。设计验证包括快速原型、概念模型和功能部件设计。

（1）设计验证。快速原型方面，美国Stratasys公司为宾利定制了汽车轮胎原型，轮胎与轮毂一次性制造完成，与原车的轮胎大小为1∶1；采用Vero Grey材料24 995g，制造时间为188h 28min，支撑材料消耗了27 413g；另外，还制造了具有支撑结构的车垫，汽车垫子下方采用硬的塑料Vero Clear，上面是可以折叠的Tango Black Plus橡胶材料，以1∶1制造原型的尺寸为1 000mm×800mm×500mm，制造时间为11h49min，消耗Tango Black Plus材料4 882g、Vero Clear材料848g，支撑材料消耗了12 936g。

概念模型方面，Local Motors率先将直接数字制造（DDM）的概念用于3D打印汽车Strati，由美国橡树岭国家实验室领头研发的BAAM（大尺寸增材制造）设备用于实际生产。Strati的车身主体是一体的，采用碳纤维增强ABS塑料以每小时40磅（1磅=0.454kg）的沉积速率打印，可拆卸的座椅可以让客户方便选择自己喜欢的内饰颜色和材质来打印。与上述的Local Motors的塑料车身不同，超级轿跑Blade的车身及主体部件由铝合金和碳纤维组成，主体部件重量只有1 400磅。汽车底盘由大约70个3D打印的铝节点组成，本身的质量只有61磅。它的加速度比迈凯轮P1更大，功率质量比是布加迪威龙的2倍。它能够在短短2.2s内从0加速至60英里/h（迈凯轮P1的这个数字是2.8s）。

功能部件方面，丰田汽车与Materialise共同设计的汽车座椅质量更轻，舒适感更强。汽车座椅低重力密度区域的镂空处理，创造了更大的散热能力，节省大量的材料。汽车座椅的质量减少了高达72%，比原来轻了18kg。欧洲赛车通过3D打印技术制造发动机气缸盖，显著提高了气缸盖的表面散热面积，减少振动和质量。结果显示，质量减少了66%，体积减少了65%，表面积增加了86%，冷却效果更显著。此外，通过3D打印生产热交换器，与传统减材制造方法相比，不但减少了质量，同时提高了热交换接触效率，提升了热交换器的整体性能。

（2）零件制造。汽车零件的制造包括间接制造和直接制造两种方法。间接制造主要是与铸造、注塑等传统工艺相结合，辅助发动机缸体缸盖以及车灯罩等零部件的快速开发。美国福特公司采用3D打印与铸造结合的方式完成了Eco Boost引擎的气缸盖的制造，省去了对缸盖砂芯模具加工的过程，将制造周期缩短了25%～40%。

直接制造方面，宝马赛车动力系统采用了金属3D打印水泵轮，实现水泵轮的快速迭代和个性化定制，且无需生产模具，零部件修改的成本接近零；丰田22RE发动机采用PLA材料进行打印，消耗约1kg，发动机被分解为80个零件，打印时间为34h，其中引擎顶部的部分就花了20h；宾利在Speed 6概

念车上大胆尝试3D打印技术，车门铰链用金属3D打印，其镂空的结构看起来就像是一面抽象的英国国旗；德国独立汽车设计公司EDAG从叶子中汲取灵感，利用3D打印汽车外壳仿生“骨架”，经拓扑仿生学优化的车骨骼结构在承载力低的地方减少材料密度，在承载力高的地方提高材料密度，从而成为一种轻质、高效的汽车；北美车展上由加州设计团队完成的起亚Telluride，其部分配件采用3D打印技术生产，包括车门、方向盘以及仪表盘等位置的零部件；别克Avista概念车车身采用部分3D打印材料，质量更轻；奥迪采用铝和钛金属材料制造了第一辆3D打印月球车Audi Lunar Quattro，计划最早于2017年发射。

3. 3D打印技术国内研究现状

我国很早就开始应用3D技术辅助新车型的开发，包括快速原型、与铸造等传统工艺结合、金属直接制造等，实现快速定型，辅助发动机缸体缸盖以及车灯罩等零部件的快速开发。

非金属样件方面，东风汽车公司采用选择性激光烧结SLS技术制造了中冷器进气管（塑料管），该样件为中空异形管件，且一端有四个凸起的盲管。若采用CNC工艺，无法整体制作，必须拆分为若干片，再粘接为总成，产品强度差；采用选择性激光固化SLA技术制造进气歧管，样件结构复杂。用其他方式制作原型加工困难且成本高，采用SLA工艺一方面精度完全满足要求，另一方面成本相对较低.结合硅胶模真空浇注工艺，既可以满足设计变更的要求，又能较好地节约试制成本。

金属样件方面，东风汽车公司采用选择性激光烧结SLS工艺和铸造结合制造分动箱壳体，采用选择性激光熔化SLM 3D打印制造了加油管、盖、锁芯和锁套部件。华中科技大学、西安交通大学以及北京隆源自动成型系统有限公司在2000年左右就开始利用3D打印技术辅助发动机缸体缸盖铸造用砂型和蜡模的快速制造，在缩短关键零部件开发周期和成本方面作用明显。

我国3D打印技术从20世纪90年代起步，经过了二十多年的发展，形成了一批具有一定研究规模和实力的科研单位及基地，并且各单位都发展出各具特色的3D打印技术或装备。华中科技大学在激光烧结/熔化（SLS/SLM）、三维打印（3DP）装备方面，西安交通大学在光固化（SLA）技术与装备、激光近成型（LENS）方面，清华大学在熔融沉积（FDM）、电子束制造(EBM)技术与装备方面，华南理工大学在激光熔化（SLM），北京航空航天大学在激光近成型（LENS）技术与装备，西北工业大学在激光近成型（LENS）技术与装备方面，中航工业航空制造研究所在电子束制造（EBM）技术与装备方面都进行了多年潜心探索，取得了不俗的研究成果。此外，西北有色金属研究院、沈阳自动化研究所、南京航空航天大学、上海交通大学等一批科研院所都在开展3D打印制造理论、工艺及应用研究。

在3D打印高端装备方面，面向国家需求，适应我国应用特点，研发的增材制造技术与装备形成了鲜明特色，部分指标达到了世界领先水平。例如华中科技大学最早研制了0.4m×0.4m工作面的SLS装备，2002年将工作台面升至0.5m×0.5m，已超过当时国外SLS装备的最大成形范围（美国DTM公司，现已并入美国3D Systems公司，研制的SLS设备最大工作台面为0.375m×0.33m）。在2005年，该单位通过对高强度成形材料、大台面预热技术以及多激光高效扫描等关键技术的研究，陆续推出了1m×1m、1.2m×1.2m、1.4m×0.7m等系列大台面SLS装备，在成形尺寸方面远超国外同类技术，在成形大尺寸零件方面具有世界领先水平，形成了一定的产品特色。北京航空航天大学、西北工业大学研发的激光近成型（LENS）装备，其成形效率超过了国外同类水平，在制造飞机、发动机、燃气轮机等重大工业装备大型金属构件方面具有世界领先水平。

目前3D打印在航空航天、生物医疗等具有高附加值的领域有大量的应用案例，例如北京航空航天大学、西北工业大学研发的LENS技术在航空航天获得应用，解决了一批重大问题；西交大3D打印在生物医疗方面获得广泛应用。在汽车领域，一些科研机构及有实力的公司企业也进行了一些探索。例如大型砂型的制造一直是困扰汽车开发的瓶颈。但砂型由于材料的原因实现牢靠拼装都十分困难。图3即为华中科技大学为某柴油发动机企业整体制造的六缸发动机缸盖水套砂芯（外形尺寸约1 100mm×400mm×283 mm，壁厚最薄5mm）。采用传统的砂型铸造试制方法，仅工装模具的设计制造

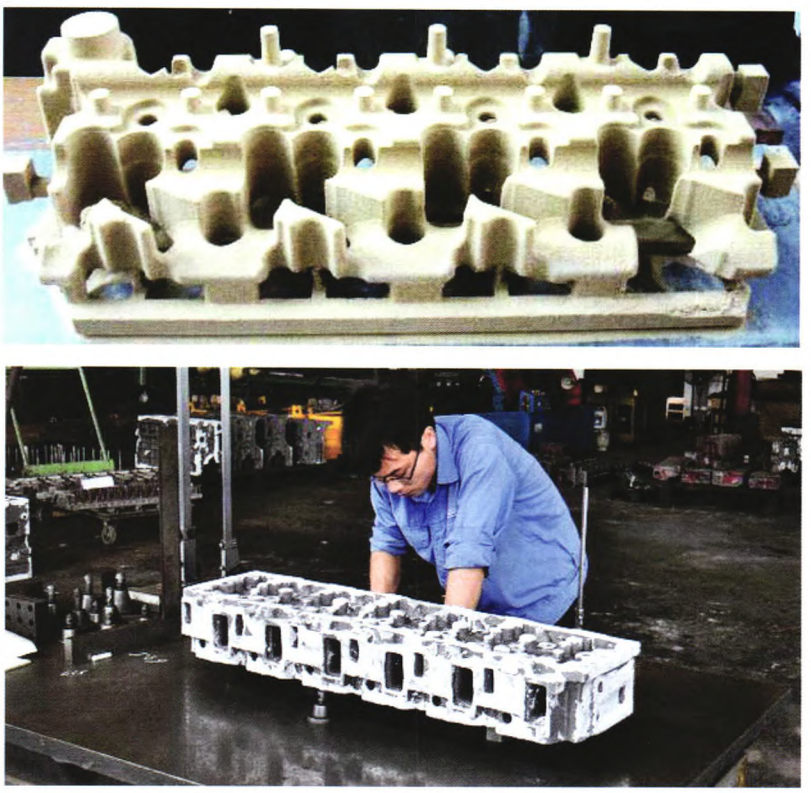

图3 装配后整套六缸发动机缸盖砂芯和蠕铁六缸发动机缸盖

周期通常需要5个月左右，不仅周期长，而且费用高达150～200万元；加上其他开发过程，整个试制过程周期漫长、严重制约了发动机的开发进程。采用了SLS技术，一个星期左右即成形出了整套砂芯，砂芯强度好、精度满足要求，组装合箱后进行浇注，获得合格缸盖铸件。

我国在相关科技计划的持续支持下，研发出一批3D打印装备，形成了华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室、西安交通大学制造系统工程国家重点实验室和快速制造国家工程研究中心以及北京航空航天大学大型金属构件增材制造国家工程实验室等一批国家级研究基地。研究成果已在航空航天产品直接制造、汽车模具和人体植入体个性化制造等方面得到了应用，具备良好研发基础。

在巨大市场的培育下，我国已形成了多个3D打印制造基地，一批专业化的3D打印企业发展迅速，如武汉华科三维、陕西恒通、西安铂力特、中航天地激光等。金属高性能3D打印结构件已经在多种型号的先进军用飞机上获得小批量装机应用，航空发动机新型空心涡轮叶片设计已普遍采用金属激光3D打印技术来显著缩短开发周期（一次技术迭代周期从一年缩短到不足一个月），3D打印铸造砂型已应用于汽车和柴油机行业的复杂发动机缸体缸盖的快速制造和研发设计。但与世界先进水平相比，我国的原始创新不多，技术链不够完整，产业发展（包括3D打印技术本身及工业应用两方面的产业）与美国和德国相比差距十分显著，特别是3D打印在汽车制造中的应用差距尤为明显。

4. 3D打印技术在汽车制造的应用发展趋势和研究课题

汽车行业包含产品研发和工业化生产两个方面。研发阶段就是将先进概念、设计转化为产品的阶段，对制造的要求是在最短的时间里制造出最能满足设计意图的多种方案的产品，并尽可能地减少制造成本。而工业化生产需要满足批量的需求，更加关注生产效率、节拍、单件成本及产品一致性。

（1）基于3D打印技术的汽车快速研发。

汽车研发有其研发流程和体系。在商品概念阶段主要进行样车的设计和外观零部件造型的设计，需要制作模型进行造型评审。在工程设计阶段主要进行人机布置设计和零部件的结构尺寸设计，需要制作样件进行人机工程验证和尺寸验证。这两个阶段一般对产品的外观有较高的要求，但对零件的性能基本没有要求，且零件制造数量较少，一般仅需1～2件即可。而在原型车制造阶段主要进行零部件的试制和原型车的装配。由于该阶段的原型车需要完成各种试验和标定，因此，无论对整车还是零部件都有较高的性能要求，部分零部件亦有较高的外观要求，并且此阶段需要制造的产品数量一般从十几件到几十件不等，属于小批量制造。

基于3D打印技术的特点和目前发展水平，在商品概念阶段和工程设计阶段较适于采用3D打印直接获得产品的方式；而在原型车制造阶段较适于采用3D打印间接获得产品的方式。

仪表板属大型复杂薄壁件，是汽车主要非金属零件之一。由于其尺寸和结构的限制，CNC加工很难一次成型，需要分块加工后粘接打磨成型，其尺寸精度和强度都会受到影响。同时由于结构复杂，加工成本高、周期长，投入简易注塑模具虽然可以一体成型，但由于尺寸较大，模具成本接近百万，在研发阶段产品存在较大设变可能的情况下，风险较高。而采用3D打印工艺制作样件既可以一体成型，确保零件尺寸精度和强度，又可显著降低试制费用。

仪表板可采用SLA和SLS技术。SLA技术制作的样件表面质量更好，但强度相对较低，且光敏材料存放后易出现老化变形问题，因此适合造型验证阶段使用；而SLS技术制作的样件表面质量相对较差，但强度高且不易变形，可以满足装车和部分整车实验要求。

3D打印技术在汽车快速研发阶段的主要任务有：结构验证，功能验证，新材料/设计验证，制订检测与标准等。

3D打印汽车零部件快速研发课题主要有：汽车发动机缸体高效随形冷却水道设计方法，高效燃油效率一体化喷嘴结构设计方法，汽车传动机构免组装设计方法，汽车车身、底盘最优性能设计方法，汽车承重结构轻量化设计方法，汽车内饰人体工程学优化设计方法，3D打印工艺的汽车复杂零部件快速定型工艺，汽车发动机缸体缸盖铸造熔模/砂型3D打印技术，汽车复杂锻件、铸件、塑料件模具3D打印技术等。

（2）汽车零部件3D打印间接制造技术。

3D打印技术无需任何模具或金属加工，省去了模具开发、锻造和铸造等繁琐的工序，也减少了中间环节大量的人员、资金和设备的投入。目前，汽车零件生产所需的模具开发周期通常在45天以上，而3D打印技术根据所加工零部件的复杂程度，一般只需1～7天即可完成零件的生产工作。随着汽车朝着轻量化与功能化的发展，很多汽车零部件形状越来越复杂，导致模具制造难度越来越高，传统模具方法无法整体加工型芯和型腔，采用3D打印技术，不仅可以实现整体加工，且缩短加工时间、降低成本、提高寿命。

3D打印技术在汽车零部件间接制造方面的主要任务有：复杂熔模高效3D打印技术，如发动机缸体/缸盖（一般铸造铝合金）、分动箱等大总成壳体（一般铸造铝合金）、悬架安装支架、铰链等（铸钢）；复杂砂型高效3D打印技术，如三角臂/转向节/制动盘（铸铁）、发动机缸体/缸盖（铸铁/一般铸造铝合金）、分动箱等大总成壳体（一般铸造铝合金）；复杂金属模具3D打印技术如：A/B柱/前防撞梁热冲压成型模具（H13等热作模具钢）等。

（3）汽车零部件3D打印直接制造技术。

利用3D打印技术在保证零件性能的同时，可加工镂空结构，降低汽车自重，是提高汽车燃油经济性的一个重要措施；同时利用3D打印的优势，根据空气动力学的各项特性指标优化车身设计，降低汽车的燃油消耗，减少排放，满足绿色化的需求。

3D打印技术在汽车零部件直接制造方面的主要任务有：非金属件制造，如保险杠蒙皮（增韧聚丙烯：PP+EPDM-TD15）、进气歧管（玻纤增强尼龙：PA6-GF30）、灯具（亚克力：PMMA；聚碳酸酯：PC；丙烯氰-丁二烯-苯乙烯共聚物：ABS；聚对苯二甲酸丁二醇：PBT；块状模塑料：BMC）等；金属零件制造如锁芯锁套、喷油器（45#钢、锌合金等）、悬架安装支架、铰链等（铸钢）等；个性化制造；整体制造如电动汽车轻质高强复合材料零部件以及整车外壳的3D打印，新能源汽车用复合材料整体构件的集约式、高效率3D打印制造等；轻量化制造；高端车、概念车应用示范。

汽车功能零部件3D打印直接制造技术研究课题有：如汽车塑料、金属及复合材料零件3D打印直接制造技术，多路管、内流道、自由曲面、多组件等复杂功能零部件3D打印整体制造技术，汽车承重件栅格轻量化结构3D打印技术，汽车梯度材料/结构零件3D打印技术，汽车高性能动力/传动/承重等功能部件直接3D打印技术等。

结语

随着新车型更新换代加快和智能化、绿色化制造的要求，3D打印技术在汽车行业的应用不断加快。

目前3D打印技术在汽车行业的应用存在一定的局限性，主要体现为原材料及设备成本相对较高、打印产品的性能与传统制造工艺产品相比存在一定差距、对于结构相对简单产品竞争力不足等，需要从产学研用系统协同攻关。AUTO1950