

一种数字孪生快速建模方法

周钊¹, 崔厚学²

1. 东风本田汽车有限公司 湖北武汉 4300561

2. 东风汽车集团股份有限公司 湖北武汉 4300562

摘要: 提出了一种全新的快速建模方式——以自上而下、快速迭代相结合的建模方法, 通过明确数字孪生各阶段的迭代范围、颗粒度以及通过二次开发构造模型骨架具体实现这种建模思想, 同时还利用构造模型库及二次开发等方式实现模型的复用, 最终实现了数字孪生建模效率和质量的提升, 为汽车制造行业构建数字孪生模型提供了一种新的解决方案。

关键词: 数字孪生; 快速建模; CATIA

引言

数字孪生也叫数字双胞胎 (Digital Twin), 2010年NASA (美国国家航空航天局) 在其太空技术路线图中首次引入了数字孪生的表述。随着工业4.0概念的提出, 传统制造企业不断向智能制造转型, 实现智能制造的途径之一就是数字孪生。

数字孪生是真实世界的物理模型在虚拟空间中进行映射, 以及两者之间进行信息交互的过程, 是以设备、生产线、厂房等物理实体的数字3D模型为基础, 融合物理实体的实时采集数据, 仿真现实世界中物理实体的行为。通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段, 发挥连接现实物理世界和虚拟世界的桥梁和纽带作用, 提供更加实时、高效及智能的服务。

数字模型是数字孪生系统的基石, 需要准确表达真实的物理实体, 并且应随着物理实体的改造变更进

行实时快速更新。传统的数字孪生建模方式缺少统一的建模指导思想, 依赖于人工建模, 存在建模效率低且水平不均衡, 后期数模修改困难的问题。不仅造成建模周期长, 同时数字模型无法及时响应车间布局的变化。鉴于此, 本文提出一种全新的高效建模思路和方法, 以期有效解决这一难题。

新型快速建模方法

1. 建模平台

数字孪生建模有多种解决方案, 例如达索公司的CATIA、DELMIA、SOLIDWORKS, 西门子公司的Tecnomatix系列, Epic公司的UE4, Unity公司的UNITY3D, MAXON公司的C4D, 芬兰公司的VC系列以及RB设备商专用的Robotstudio、MotoSimEG等。CATIA软件提供二次开发API接口, 方便根据数字孪生

业务需要定制开发软件功能，进一步提升建模能力，该软件涉及产品设计、设备和建筑类建模、各类仿真（产品、设备、物流等）各领域，其使用逻辑和建模能力得到行业好评，在汽车行业应用广泛。为避免模型在多个软件平台之间格式转换造成消参（模型转格式消参也会导致后期修改困难），数字孪生建模与产品模型建议使用同一软件平台，综合多种因素，本文采用达索CATIA软件平台。

2.迭代更新

迭代更新是一种开发模式，它要求根据业务阶段的不同先做出一个初步的数模，然后随着时间的推移持续改进和优化。企划、建设、投产三个阶段的建模工作是相互联系和依赖的，而不是孤立的。每个阶段的建模都要在前一个阶段的基础上进行修正和提高，以达到更高的精度。

例如汽车涂装车间的喷房，企划阶段先用简单的方块表示汽车涂装车间的喷房的外部尺寸，以便于进行整体布局。然后在建设阶段，在原有的模型基础上添加其他更详细的内部结构，如动静压室、喷房、

气密室、干式或湿式集漆系统、闪干系统及机器人系统等，以便于设计详细施工图样。最后在投产阶段，只需要结合车型数据设置喷涂仿真环境，最终形成完整的数字孪生模型。这种分阶段多次迭代更新的方式降低了工作量和建模难度，以最小的资源投入满足各阶段业务需求，是实现快速构建数字孪生的基础。

3.迭代的模型范围及要求

数字化要把真实物理世界的构成元素映射到虚拟空间，但是这些元素的种类和数量都非常多，比如制造车间，从车间厂房框架到设备紧固螺栓，总数量级在百万以上，如果全部建模，现有水平的工作站/服务器可能无法承受。而且在实际工作应用中也不需要用到所有的元素，所以可以根据业务需求来选择建模的范围、元素和精度，并随着业务进展不断更新和优化模型。图1所示是不同阶段的建模范围及要求。

如图1所示，从业务阶段、重要程度这两个维度分析数字孪生建模的范围和要求。业务阶段按照时间顺序分为企划、建设、投产三个阶段，每个阶段的建模范围根据业务重点来确定。

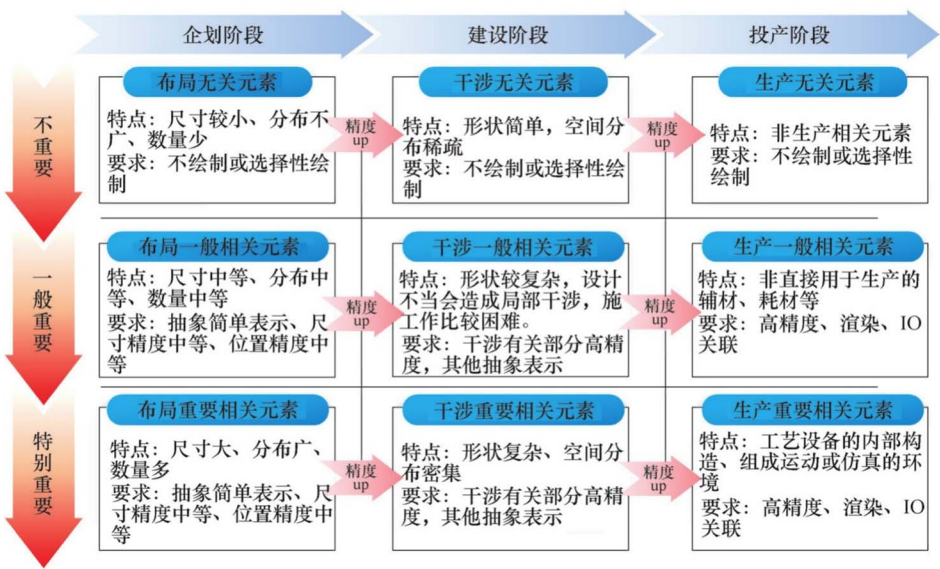


图1 数字孪生的各个阶段建模范围和要求

1) 企划阶段：重点是工厂布局，所以要建模的元素是尺寸大、分布广、数量多的模型，比如作业室体、输送等，这类模型对外观、定位、尺寸精度都没有过高的要求，内部细节可以抽象化表示。

2) 建设阶段：重点是施工干涉，所以要建模的元

素是形状复杂且空间分布密集的模型，比如槽体、风管、机器人系统等，这些模型需要高精度的外部或内部尺寸，其他细节可以抽象化表示。

3) 投产阶段：重点是生产相关，所以要建模的元素是工艺设备的内部构造，比如机器人运动关节、输

送运动机构，工艺仿真环境及关联信号等，这些模型通常不是3D数据，而是由各类参数组成的系统环境。

从重要程度维度进行分析，将建模元素划分为特别重要、一般重要和不重要三个级别，其模型的颗粒度是依次递减的。例如特别重要的元素是数字孪生的主体要优先建模，一般重要的元素用于丰富模型应其次建模，相对不重要的元素一般是点缀作用，则应当免于建模或者根据需要建模。

4.自顶而下的设计理念

汽车制造车间是一个复杂的生产系统，它由建筑、钢构、输送、工艺设备、作业室体、仓储物流及公用动力等元素组成。在企划、建设阶段车间布局变更频繁，在投产阶段也常有技术改造导致布局变化。行业内通常使用平面CAD设计车间的2D Layout，这样修改起来比较简单，只要调整点、线段、块等元素就可以了。但是2D Layout的变化要反映到3D模型上就不太容易了，因为3D模型比2D Layout展示了更多的特征，并且这些特征之间有关联，改变1个特征可能会影响到其他多个特征。所以一旦3D建模成型就很难再修改了。有没有方法可以方便地实现3D模型与2D Layout变化点的同步修改呢？自顶而下设计理念可以为解决这类问题提供思路（见图2）。

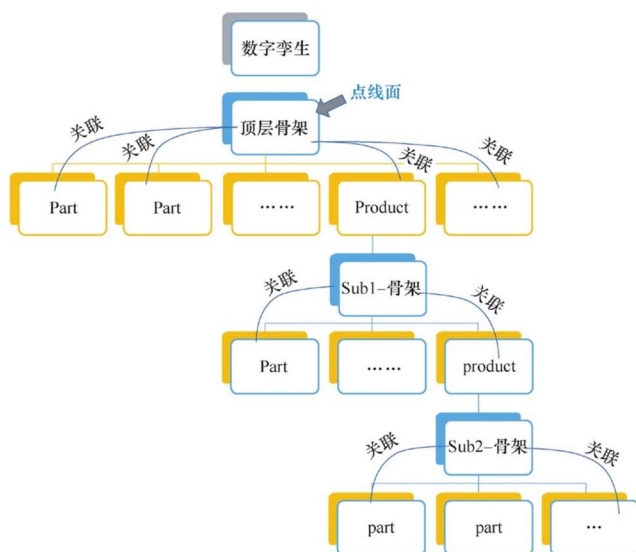


图2 自顶而下的结构拓扑

自顶而下是一种利用关联设计的理念，它的原理是先建立上层骨架，然后将其作为参考关联到下层用

于创建模型。如果发生二维设计变更，只需简单修改上层骨架，就能实现模型的自动或半自动调整。具体操作是：在建模初期科学规划产品的组成结构，并用抽象的点线面表示。然后将这些点线面结构生成一个文件，放在所有部件的顶层形成上层骨架。上层骨架的点线面分别赋予下层各个部件，使上下层之间通过共有的点线面产生关联。只需修改上层的点线面元素，下层部件就会跟随变化。

这种自顶向下、从大到小、从整体到局部的思维方式非常符合人类的思维习惯，具有逻辑清晰的优点。因此，它常用于复杂产品设计领域，如汽车数字样机和飞机机体开发。虽然自顶向下的思想并不罕见，但在工程或工艺设备领域的数字孪生建模中尚未发现应用。本文是行业内首次提出这一观点。

CATIA软件的二次开发

CATIA是一款功能强大的通用建模软件，在航空、汽车、建筑等行业有广泛的应用。这类通用软件为了兼顾各行业的应用，建模功能比较通用，没有专门针对数字孪生的建模进行优化。数字孪生模型的数据量巨大，通用的CATIA命令已经不能满足使用需求，建模效率低，后期修改难。如果多人同时协同建模，还会出现建模质量不一、模型结构不统一、模型复用困难、设计关联混乱等问题，最终影响协同建模的效果。这时候就需要通过CATIA软件二次开发来优化数字孪生建模的命令。

CATIA二次开发就是开发新的软件功能，让它更适合技术人员的使用，更便捷和高效。二次开发人员可以利用软件SDK（Software Develop Kit）中提供的API（Application Programming Interface）接口，访问dll类库文件，并调用或组合其中的函数，实现深层次的定制化命令。比如定制用户界面、控制和编辑几何图形、上传和下载模型属性信息等。新开发的命令可以被封装成exe可执行文件，与他人共享，并且不需要另外配置软件环境就可以运行，非常方便在公司加域的环境中实现成员协作。

二次开发的步骤是先明确建模的思路，提取需要的参数化条件，然后定制软件窗口界面和调用Catia API运行相关函数，实现定制功能（命令），最后将新功能（命令）定制成工具条扩充软件（见图3）。

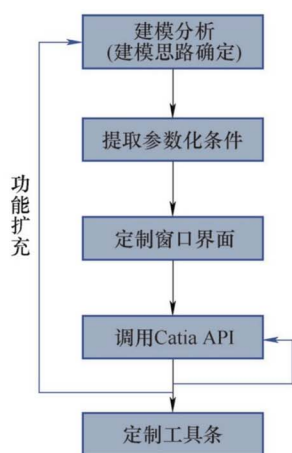


图3 二次开发的一般流程

下面根据笔者的实际应用经验，举例说明数字孪生模型可能用到的CATIA二次开发功能，希望起到抛砖引玉的作用。

1. 批量格式转换

数字孪生模型有多种来源，例如设备商的3D模型、CAD图样生成的3D模型、实物测量数据生成的3D模型、激光点云扫描逆向模型及生产品模型。这些模型来自多个软件平台，数据格式不同，需要转换成CATIA的CATpart、CATProduct专用格式或轻量化处理成CGR等格式，方便统一管理。人工操作格式转换需要先打开零件然后另存为操作，效率较低，数量一旦过多可能需要长达10多天才能完成。如果使用二次开发的批量格式转换功能，则只需几分钟就可以完成操作。

2. 建模框架创建

开发者还可以将数字孪生建模的思路整合进软件，形成建模的框架，让团队成员按照软件框架进行建模，就相当于按照开发者的思路进行建模。这样就可以标准化、流程化原本各自为政的建模方法。有利于厘清模型层次关系，方便模型的维护，形成了团队协作建模的良好环境，提高了建模效率。例如，我们可以将所有实物的楼层、类别、位置信息通过二次开发功能存放在数据库（Excel、Access等）里，将数据库作为数字孪生模型的总的结构框架。对实物建模时只用读取数据库对应行信息即可创建、移动模型或者改变其在结构树上的层次。如果模型发生人为修改，

还可以将信息同步到数据库中。通过统一管理建模数据，避免了数据的多源导致的管理混乱，同时数据库可以与2D Layout关联，只要简单的改变数据库数值，3D模型即可进行快速改变，实现数字孪生模型的敏捷设计。

3. 数据模型复用

现实中的实物很多结构类似，只是尺寸和数量有差异，不同尺寸和数量的模型每一个都要单独建模，工作量大且人力资源不允许。而Catia二次开发就可以复用相似模型数据：先创建基础模型和设置可变属性；然后，输入不同的配置信息如尺寸、功能、数量等，改变基础模型的可变属性就可以生成对应同系列3D模型。

数字孪生技术在汽车制造中的应用与展望

1. 在工厂企划阶段的应用

(1) 同步验证 同步验证是指在2D layout和3D layout设计中，保持两者的一致性，及时反映设计变更，验证设计方案的可行性。过往的产线设计中，因为3D建模的效率、准确性、稳定性问题，同步验证往往无法正常开展。现在利用新的建模方式，提高了工作效率，可以实现2D Layout布局设变后的几天内完成3D模型同步修改，更有效地验证2D布局的设计思路，提高企划的质量和效率。

(2) 干涉验证 干涉验证是指在3D图形中，检测出2D layout中容易忽略的干涉问题，例如形状复杂的地下管网系统、消防系统、空调风管、动力桥架支架及车身通过性干涉等。以消防和风道布局验证为例，新能源工厂某工艺车间是在原有厂房基础上进行的大型技改项目，新项目的消防和风道设计可能与原有设施冲突，同时基于成本最小化的考虑，要尽量利用原有土建钢构和地下风道。通过数字孪生建模清晰展示风道、烟道模型，共发现35处干涉点，并提出了更合理的管道布置方案。这样可以加快整体方案的成熟，避免后期干涉对施工的影响（见表1）。

(3) 土建载荷提资 为了保证厂房强度，设备放在楼层板上的载荷需要发送给土建单位进行校验。某

表1 干涉检证

检证项目	问题现状	对策	举例
消防风管	消防规划不合理， 防风管干涉9处	优化干涉、合理 规划消防布局	
空调风管	规划不合理， 空调风管干涉26处	优化干涉、合理 规划风管布局	
地下风道	规划不合理， 空调干涉26处5	优化干涉、合理 规划地下布局	

工艺车间2F楼板上增加了密封胶、上涂、双色存储区等设备，导致载荷增加，需要校核楼板强度。通过筛选数字孪生骨架数据库中的数据，获得设备的型号、质量和数量，精确计算出设备和车身总质量，为设计单位提供校核和设计加强方案的依据。

(4) 设备BOM BOM是材料清单 (Bill of material) 的简称。汽车行业有EBOM、PBOM、MBOM表分别用于设计、工艺、生产环节。类似地，在数字孪生里也可以生成设备BOM表，设备BOM表可以包含模型的种类、型号、数量、功能及质量等属

性。BOM可以导出为Excel发送给专业人员进行预算制定、资产统计、备件采购等应用 (见图4)。

2.在投产阶段的应用展望

(1) 数字孪生的框架 数字孪生的成熟应用是在数字模型的基础上，全面展现和预测各种生产信息，例如在制品、设备、辅料备件的状态，虚拟现实的同步展示等，用来辅助生产稳定进行 (见图5)。

数字孪生的成熟框架分为硬件物理层、技术层、应用层。硬件物理层包括物理世界的设备和产品实

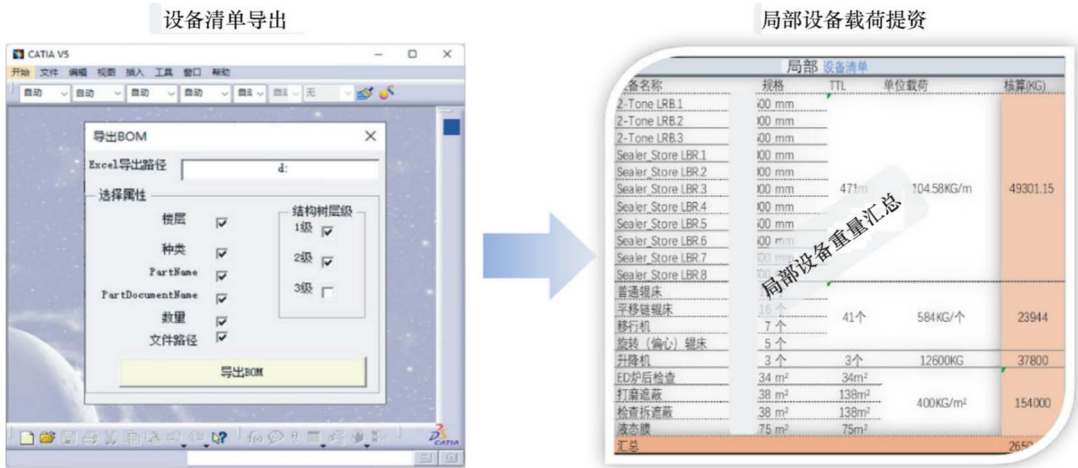


图4 局部设备载荷提资和BOM导出

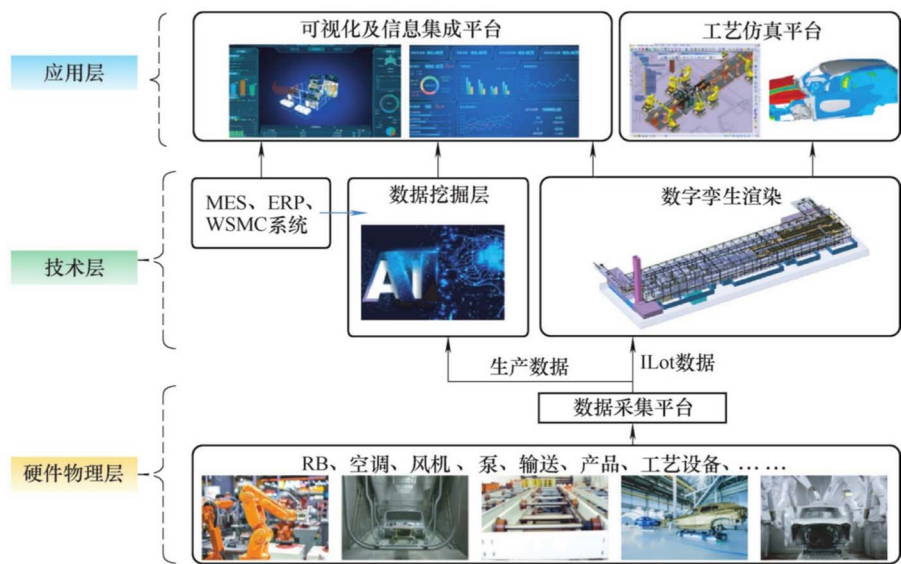


图5 数字孪生的完整框架

体，它们安装有各种工业物联网（IIoT）传感器，将数据上传到技术层；技术层包括生产管理系统（MES、ERP等）、数据挖掘系统、数字孪生渲染系统，数字孪生渲染系统根据数据驱动数字孪生模型运动并进行可视化渲染，数据挖掘系统根据生产管理系统和IIoT数据用机器学习模型预测设备的状态、保养周期、生产瓶颈等；应用层包括可视化信息集成平台和工艺仿真平台。可视化信息集成平台接收生产管理系统、数据挖掘系统、数字孪生渲染系统的数据，利用这些数据进行生产信息、预测信息和虚拟现实的展示。工艺仿真平台在数字孪生模型的基础上对车型的通过性、机器人可达性、人工作业性做运动仿真，对底涂/上涂涂膜

进行CAE分析并输出分析报表。

简而言之，数字孪生的成熟应用是实现上述功能的集成平台。

（2）可视化和信息展示 数字孪生模型可以实现以下三种展示方式：

一是漫游展示和VR展示。漫游展示可以让参观者以第一人称视角在模型中自由行走（见图6），通过鼠标或键盘控制行进路径，或者佩戴VR眼镜感受身临其境的效果。这种展示方式适合那些防尘封闭、空间狭小、不便对外开放的工艺车间，如某工艺车间。

二是虚实同步展示。数字孪生模型根据工业物联网设备或机器人的信号，驱动模型和现实设备同步运

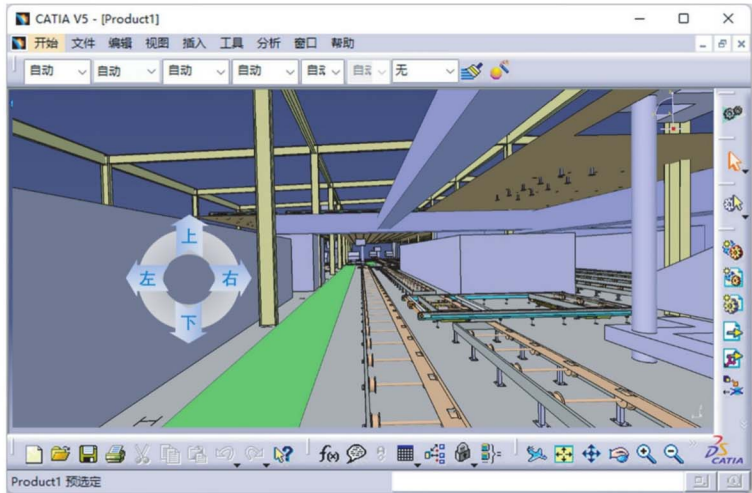


图6 CATIA软件内的数字孪生漫游

动，例如车身、AGV小车和机器人等。

三是信息展示。BI风格的可视化信息看板集成了以下信息：设备的运行信息，在设备图例上方用不同颜色、形状的气泡图标实时显示相关参数，监控设备状态和处理报警信息；生产相关系统的信息，可以查询在制品状态、品质信息等，方便品质的回溯分析；物流和仓储（备件、仓储）的监控信息，在库存不足时提前预报并自动生成采购单据。

(3) AI预测 利用大量工业物联网的数据，建立AI预测模型，包括输入层、中间层和输出层。输入设备运行的参数，模型可以预测设备的健康状态和保养建议；输入生产数据，模型可以预测生产瓶颈和工时平衡。AI预测模型需要大量的正向、反向的反馈数据学习才能提高精度。

新机种仿真及产线Loss仿真

1.新机种导入仿真

在新机种导入中，数字孪生的仿真功能可以实现三个方面的检证：

- 1) 车身通过性。让搭载车身在车间内流动，并生成搬送动画，发现并报警干涉问题。
- 2) 机器人可达性。设置仿真环境和编程轨迹，模拟机器人的运动和干涉情况。
- 3) 人工作业性。结合Most系统工时，在系统内模拟人工作业，确认生技性和工时精度。

2.产线LOSS仿真

生产仿真仿真又称为离散事件仿真，是先导入数

字孪生模型，再建立生产流程和边界条件，然后输入生产要素如人数、休息时间、物流频率等，从第1台车进线开始，模拟生产情况。常用于分析生产线的理论瓶颈，输出仿真结果的产线LOSS，为精益生产、智能制造提供决策依据。

参考文献：

- [1] 柳林燕，杜宏祥. 车间生产过程数字孪生系统构建及应用[J]. 计算机集成制造系统，第25卷第6期。
- [2] 郑守国. 基于数字孪生的飞机总装生产线建模[J]. 浙江大学学报 第55卷第5期。
- [3] 黄凤山. 基于CATIA二次开发的风电叶片三维建模[J]. 机械设计与制造，2016（9）：180，187。
- [4] 基于CATIA二次开发的无人直升机油箱优化方法[J]. 直升机技术，2022（2）：11-15。
- [5] 靖芯，徐晶，陆国民，等. 基于CATIA的三维参数化建模方法及其应用[J]. 机械设计，2003，20（8）：48-50。
- [6] 卢阳光. 面向智能制造的数字孪生工厂构建方法与应用[D]. 大连理工大学。
- [7] 张冰. 从数字孪生到数字工程建模仿真迈入新时代[J]. 系统仿真学报，第31卷第3期。
- [8] 李华峰，崔建华，甘明，等. BIM技术在绍兴体育场开合结构设计中的应用[J]. 建筑结构，2013，43（17）：144，148。
- [9] Eckard Eberle. How digital twins help simulations[J]. ProQuest Journal.
- [10] Leng Jiewu; Wang Dewen. Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review[J]. Elsevier Journal. **AUTO1950**

汽车工艺师 2023年 第6期 广告目次 Advertisement Catalogue

单位名称	查询编号	位置
汽车工艺师		封面
SMALLEY钢圈有限公司	8086	封二
《汽车工艺师》杂志订阅	0001	封三
2023新能源汽车先进制造技术高峰论坛	8000	封底
易格斯（上海）拖链系统有限公司	1298	1
马波斯（上海）商贸有限公司	0152	2