

Whitepaper

SynaCore

规模化

从增材制造数字孪生
到数字孪生增强的数字护照
再到产品预认证

明确增材制造产业化技术路线

SynaCore
以数字智能驱动真实制造
www.synacore.net

大脑隐喻：装备智能化进化

🕒 以终为始

世间万事，皆有因果。**洞察因果，方能行稳致远**。十二年前，我从传统机加工行业来到增材制造领域，自然而然的，我倾向于以成熟工业化生产的标准审视增材制造的发展趋势，这让我发现世间规律无不蕴含因果。

当时，我洞察到增材制造终将面临一个具有“黑洞”特性的本质挑战：我们试图以**传统试错法应对增材制造的复杂性**。这种根本性错配的“因”，将使企业在规模扩张中面临规模越大愈加“发展窒息”的结果。

彼时，相较于传统机加工行业已臻极致的设备综合效率（OEE），增材制造仍处于设备缺乏“大脑”的阶段。而且不止于“大脑”——以金属3D打印为例，打印过程中设备仍缺乏“眼”、“耳”、“鼻”等感官系统作用的传感器。

人脑大脑与小脑的协作关系，远比传统“命令-执行”的认知更为复杂且双向。小脑充当“通用协处理器”，动态协调皮层区域间的神经振荡相位差，实现跨脑区信息整合。大脑拥有终极决策权，决定“做什么”与“为何做”；小脑则作为精密优化器，确保“怎么做”达到最高精度与效率，大脑与小脑的双向通信实现了自适应学习，使感知-判断-行动的转化自动化完成。

那么金属3D打印如何实现自适应制造？答案很简单：3D打印机需要如人脑般运作的“大脑”系统。本白皮书将阐述数字孪生与AI如何共同构成3D打印系统的“大脑”。

数字孪生绝非仅仅模拟物理设备，而是构建一个具有无限可扩展性的“虚拟工艺操作系统”。唯有当制造知识在虚拟世界中通过标准化、编码化与可验证性实现“可扩展”进化，现实世界的增材制造方能突破“人类操作系统”的带宽限制，并打破“不确定性随规模递增”的发展诅咒。**当管理复杂性不再随规模指数级增长**，企业便能将资源聚焦于真正决定成败的关键节点——如工艺包的持续优化——而非将大量时间虚耗于**流程摩擦与内部损耗**。

本白皮书旨在阐明这一演进路径，助力您的事业在长期可持续发展中获取实质性收益。

王晓燕 / SynaCore CEO



一览 内容

01 **执行摘要**
三层工业化路径

02 **工业困境**
增材制造工业化路途的“确定性差距”

03 **SynaCore AM-DT数字孪生**
大脑类比

04 **技术架构**
构建三层基础

05 **数字孪生作为企业核心资产**
战略价值与竞争壁垒

● **核心论点：**数字孪生不仅仅是一种技术工具，更是一种可复用、可扩展、可交易的战略资产

执行摘要

三层工业化路径

核心论点

数字孪生不仅仅是一个技术工具，而是一个可重复使用、可扩展、可交易的战略资产。企业首先建立“孪生增强护照预认证”闭环，将形成“脑区智慧”以及后来者难以逾越的竞争壁垒。

三层工业化路径

1 数字孪生

构建物理制造过程的实时、高保真虚拟镜像，实现从“经验试错”向“基于模型预测”的范式转变，从而缩短工艺开发周期并提高良率。

→ 通过反复试错到基于模型的预测

2 数字孪生增强数字护照

通过数字孪生增强的数据重建，建立零件级生命周期数字线程，实现从“难以追踪”到“单件基因映射”的飞跃，为循环再制造奠定基础。

→ 从批次可追溯性到单件基因图谱

3 预认证

基于可信数字孪生模型的“模型认证”系统，实现从“事后检验”（测试认证）到“事前预测”的范式迁移，塑造更稳健的质量基础设施。

→ 从事后检查到事前预测

- 行业拐点：增材制造正处于从“原型工具”向“可规模生产”关键转型期。
行业核心悖论：无限的设计自由与不足的质量确定性之间的矛盾。



工业困境——增材制造工业化中的“确定性差距”

当前增材制造工业化面临的挑战

当前诊断：受“不确定性”限制而无法扩展

质量黑箱

关键的物理过程——熔池动力学、热应力演变、微观结构形成——发生在封闭的构建舱体内。

最终性能在很大程度上取决于工艺工程师的个人经验，质量波动较大。

 新设计或新材料均需重启试错周期

高度复杂的参数维度

包括激光功率、扫描策略和层厚在内的数十个强耦合参数，构成了指数级庞大的优化空间。

当前的实验设计 (DOE) 不仅需要海量样本，且外推能力有限。

参数空间 10¹⁵+

数据孤岛

CAD设计、工艺参数、在线监测、后处理及终检数据分散于不同系统中。

知识难以沉淀复用；每次生产几乎从零开始。

-  CAD设计
-  工艺参数
-  在线监测
-  最终检测

是什么制约了迈向规模化？

凭借几何自由度和材料效率，增材制造已在[航空航天](#)、[医疗植入物](#)及[高端模具](#)等领域掀起革命。然而，其工业化进程面临一个根本性的迈向规模化的“确定性鸿沟”，制约了规模化发展。

根本性矛盾：传统试错法与增材制造复杂性的错配

1 \$ 成本悖论

验证复杂零件的工艺窗口需要多次物理打印。单次金属打印成本高达数千至数十万元，且无法保证找到全局最优解。

平均验证成本	数千至数十万元
成功率	30-60%

2 ⌚ 时间悖论

尽管增材制造具备灵活性优势，但零件工艺认证周期过长又反向消除了这种灵活性的优势，常常使得错失产品上市窗口。传统的“制造-检测-修正”模式已触及根本性局限。

认证周期	6-18 月
市场窗口	3-6 月

3 🧠 知识悖论

关键工艺知识存于个人经验，难以标准化或传承，造成“人才流失、技能断层”风险。

增材制造“工艺即产品”的本质

任何微观工艺波动都会累积为宏观性能偏差。这一根本特性使得传统质量控制方法难以奏效。

🔍 微观层面 / 微观尺度
熔池不稳定性、热梯度波动



🔍 宏观影响 / 宏观效应
孔隙、翘曲、微观组织缺陷

💡 战略当务之急

工业化规模化制造的先决条件在于实现**可控、可靠、可预测**的制造。这要求将质量控制点前移至设计阶段，建立“事前预测”能力——而这正是数字孪生技术的战略价值所在。



类脑视角：设备智能进化

▲ “黑洞”挑战

试图以传统试错方法解决增材制造复杂性的努力。这种错配将使企业在规模扩张中举步维艰（甚至“窒息”）。

缺失的感官

与机械加工领域极高的设备综合效率相比，增材制造需要突破设备“无脑”阶段，不仅仅需要“大脑”，金属3D打印设备还需可与“大脑”协同的有效监测与控制手段：



眼睛



耳朵



鼻子

关键：正如人类大脑消耗身体20-25%的能量，却无人质疑大脑及眼耳鼻等感官的重要性；设备大脑同等至关重要。

监测与控制

按照技术类别归类的传感器

🌡️ 热成像

• Infrared thermal imaging 红外热成像

基于红外辐射探测的非接触式测温

• NIR Camera 近红外相机

近红外成像技术，增强低光照环境下的可见性

• LWIR Camera 长波红外相机

长波红外探测技术，实现热特征分析

温度场分布监测

热异常实时识别

冷却速率分析

最佳应用

气孔、未熔合、过热检测

⋯ 其他

• 涡流探伤

导电材料检测

• 同步辐射X射线

高分辨率内部结构成像

• 光学相干层析成像

断层成像

• 激光超声检测

非接触超声检测

📷 光学相机

• 工业相机

面向制造质量控制的高精度成像

• 高速摄影技术

超高速帧率采集，用于动态过程分析

• 光谱仪

基于波长的材料成分分析

• CIS相机

用于文档及表面成像的近接触式扫描

熔池形貌成像

飞溅/羽流监测

几何特征分析

最佳应用

表面缺陷、几何质量检测

🔊 声学传感器

• 声发射检测

用于结构健康监测的应力波检测

• 其他被动式传感器

振动和声压测量设备

声发射信号捕捉

频率特征分析

内部缺陷探测

最佳应用

裂纹、气孔早期预警

SynaCore AM-DT 数字孪生

大脑类比

AM-DT For Simulation 仿真

虚拟世界

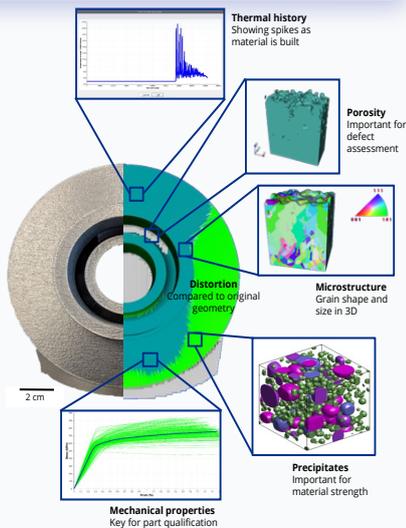
数字孪生创建虚拟复制品，实现物理生产前的仿真、预测与优化。

关键洞察

数字孪生通过物理生产前的虚拟验证实现规模化扩展。

物理世界

通过传感器反馈达成持续优化与质量保证。



SynaCore数字孪生：一站式自进化仿真的优势

SynaCore数字孪生突破传统仿真局限，通过集成持续学习能力，基于实际制造反馈自动优化预测，彻底省却反复的手动校准周期。



多尺度求解器



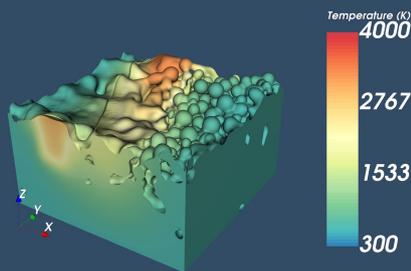
优化算力消耗



API 集成

SynaCore AM-DT 数字孪生

3x 更快的迭代



端到端预测流程

通过多层激光轨迹计算孔隙率、表面粗糙度及微观组织

1

宏观变形预测

翘曲、收缩及变形的分析

2

微观组织进化预测

晶粒生长、相变及凝固建模

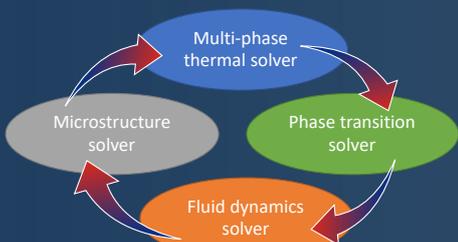
3

机械性能计算预测

抗拉强度、硬度...预测

SynaCore数字孪生用于仿真的独特优势

- ✔ 零件级，局部特定
- ✔ 端到端
- ✔ 多尺度集成
- ✔ 内嵌后加工程序中的热处理预测及优化
- ✔ 内嵌高级Mesher, AI Alloy智能合金, 以及Adaptive ToolPath自适应路径





SynaCore AM-DT 数字孪生

AM-DT 内嵌高级 *Mesh*er: 智能网格生成引擎

核心能力

用于处理复杂的设计

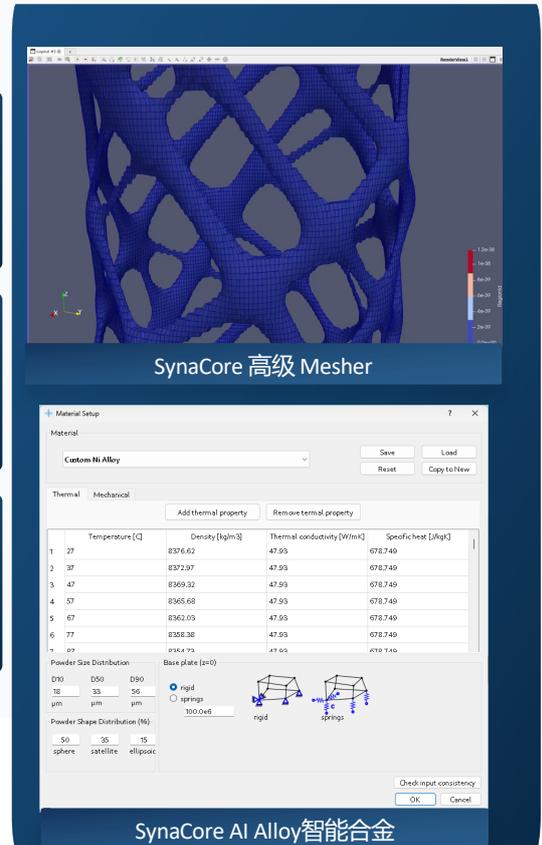
适用于具有内部流道、晶格结构及自由曲面的复杂CAD模型实现自动网格生成

自适应细化

基于应力集中、热梯度及几何复杂度的动态网格密度调整

优化计算速度

优化网格拓扑，在精度与求解器性能之间取得平衡，计算时间缩短



SynaCore AM-DT 数字孪生

AM-DT 内嵌 *AI Alloy* 智能合金设计

颠覆传统经验驱动型粉末材料研发

SynaCore AI Alloy模块从根本上重塑合金设计范式，以AI驱动的计算材料科学取代长达数十年的反复试错实验。该系统借助人工智能，以前所未有的精确度预测成分-性能关系。

传统试错法

- ✘ 数年的开发周期
- ✘ 基于专家经验
- ✘ 试验成本高
- ✘ 探索空间受限

AI Alloy 智能合金设计

- ✔ 缩短开发周期
- ✔ 数字驱动优化
- ✔ 压缩开发成本
- ✔ 全成分空间

SynaCore AM-DT 数字孪生

AM-DT 内嵌 Adaptive ToolPath 自适应路径

基于热历史的策略

SynaCore Adaptive ToolPath技术通过分析制造过程中的热区段，生成智能加工策略。该系统基于累积热分布动态调整激光路径，减少开裂、防止变形等缺陷发生。

热监测

连续温度场计算与热累积追踪

内嵌于数字孪生软件

动态路径调节

基于热梯度的自适应路径调整

Adaptive ToolPath无缝集成于SynaCore数字孪生平台，获取预测性能与实际性能的闭环反馈。

热损伤预防

自动冷却暂停与速度调整，防止过热

SynaCore 数字孪生内嵌 Adaptive Toolpath 自适应路径

1 性能优化

兼顾强度、延展性与成本的多目标优化

3 相预测

热力学稳定性与相变建模

2 性能预测

力学性能预测

4 工艺参数关联

集成式增材制造工艺窗口优化



技术架构——“三层跃迁” 工业化路径

增材制造工业化是通过三层渐进架构实现质量基础设施的重构。

第一层

基态：增材制造数字孪生（AM-DT）

增材制造数字孪生（AM-DT）的核心差异化优势

🕒 时间特征	解析多模式传感器数据，持续提升预测精度
↔ 数据流	双向闭环(物理 ↔ 虚拟)
🔄 物理连接	通过传感器实现持续优化
🔄 自进化能力	持续更新
💎 价值定位	资产（激活数据的价值）

三层技术进化阶梯

1 机理内核：基于多物理场仿真

超高精度多物理场仿真（CFD、热力学、固体力学），通过多尺度的求解器预测温度场、应力-应变场及缺陷形成——为每一次操作配备“前瞻性透视透镜”。

2 自适应参数优化

请参考 Chapter 3.3

3 闭环反馈与模型自进化

集成实时传感数据实现“持续优化”。捕获偏差并动态修正模型，实现持续进化。



数字孪生与可视化软件 的本质区别：

不同于工艺监测可视化软件，增材制造数字孪生必须处理动态演化的物理实体——零件在几何形状、热状态和材料性能方面逐层、逐秒生长。

第二层

中间状态：数字孪生增强型产品数字护照（DT-Enhanced DPP）

增材制造数字护照AMDPP

零件最终性能与数字定义——包括构成“数字主线”的三维模型、工艺参数、扫描路径及材料信息。

传统质量追溯系统仅能追溯至“批次”级别，无法定位“每一个激光熔池、每一层的打印轨迹”。

监管趋势：欧盟ESPR 2027

欧盟《可持续产品法规》（ESPR）已明确规定：到2027年，重点工业产品必须配备数字产品护照（DPP）。

- ✓ **全生命周期合规：** 满足国际环境及数据披露法规要求
- ✓ **快速缺陷定位：** 从“批次召回”升级至“单件追溯”
- ✓ **碳足迹透明化：** 量化并优化环境效益
- ✓ **数据主权：** 在保护企业核心数据的前提下实现国际流通

核心升级：数字孪生增强数字护照

核心升级在于将数字孪生预测数据内嵌为护照的增强组成部分：

技术实现

直接零件标记将唯一标识符（数据矩阵码或二维码）嵌入零件实体，关联至数字孪生增强型护照。

👁️ 用户扫描零件，即可访问允许披露的“数字基因图谱”。

护照数字组成

- 3D 模型与设计
- 工艺参数
- 过程预测与监控
- 后处理及检测技术
- 材料批次和供应商信息...

DT-数字孪生增强数字护照

- + 数字孪生预测零件性能信息



第三层 终极状态：标准嵌入式产品预认证

未来资格认证变革

制造商向监管机构或客户提交的不再仅仅是有限的物理测试报告，而是支持零件制造的高置信度数字孪生模型，以及这些模型历史预测准确性的验证证明。

通过审查数字孪生的完整性与准确性，结合部分物理验证，面向量产的快速、低成本“预认证”成为可能，并可作为关键参考依据。

预认证与实物认证：辩证统一

传统认证

- 法律效力确认
- 依靠物理测试
- 抽样检测
- 强制且最终

基于数字孪生的预认证

- 工艺性能预测
- 基于模型和数据
- 覆盖全部
- 灵活且前瞻



它们共同构成“预测+确认”的双轨质量保证体系。预认证缩短认证周期；实物认证赋予预认证社会公信力。

发展趋势

1 初期

预认证：设计优化与风险筛查的辅助工具



2 中期

监管机构在特定场景下有条件采信预认证结论



3 长期

形成“仿真优先、测试验证”的新工艺流程

核心机制

- ✦ **设计阶段合规：** 自动验证材料规格、几何公差及无损检测标准的符合性
- ✓ **先验认证：** 打印作业前的虚拟测试，验证预测性能是否满足要求
- **预认证即服务：** 数字孪生作为“可认证代理”，具备可查询的置信区间

数字孪生为何是资产而非费用？

数字孪生软件应被确认为战略性资产的五大依据维度

👑 战略溢价

不可预测性 → 可设计性

增材制造饱受高打印失败率与狭窄工艺窗口之困。数字孪生技术将缺陷解决前移“虚拟打印”阶段，将“沉没成本”转化为“溢价利润”。

成功率提升

🏢 资产杠杆

设备资产折旧 → 数字资产增值

通过实时优化，数字孪生可将设备综合效率（OEE）从40-55%提升至70%以上，并随数据积累持续改进——相当于“不增设备却增值效率”。

不断提升的OEE

🕒 时间杠杆

线性开发 → 并行开发

数字孪生使设计、工艺、供应链及维护能够在同一虚拟模型上并行迭代，缩短设计周期并加速产品上市。

缩短交付周期

🧠 知识杠杆效应

个人经验 → 企业资产

工艺参数、缺陷库及补偿算法封装为孪生模型，形成可复用、可交易的“数字资产”。

复用性

🛡️ 风险规避

不确定性成本 → 可计算溢价

数字孪生为供应链、质量及维护提供“情景模拟”能力，将不可预测的风险转化为可管理、可计算的溢价

降低风险敞口

🏆 第一性原理

数字孪生软件将“事后补救”的生产模式升级为“事前制胜”的增益模式，使边际收益逐年持续放大。



结束语

让我们共同迎接智能制造的新时代。

迈向不久的未来： "生于数字，验于预测，成于实体"

每个零件皆可追溯，每次制造皆可预测，每件产品均经预先“健康检测”
增材制造工业化本质上就是将不确定性转化为可计算的风险。

数字孪生

对物理实体进行预测的能力

数字孪生增强数字护照

将预测结果固化为可追溯的数字资产

预认证

基于可信预测的质量基础设施

这不仅是技术升级，更是质量理念的根本性变革——从“事后补救”到“事前制胜”，从“经验艺术”到“数据科学”，从“实物验证”到“数字信任”。

附录：术语表

- AM: 增材制造
- DPP: 数字护照
- P-S-P: 工艺-组织-性能
- OEE: 设备综合效率
- Model-to-Qualify: 基于模型的认证，区别于传统的“测试-认证”模式

法律免责声明：本白皮书不构成任何证券、投资产品或金融工具的要约、招揽或认购邀请。本文件所载内容不得被解释为投资建议、金融推广或建议从事涉及数字资产或相关服务的任何交易。本文件包含有关增材制造数字护照及产品预认证的前瞻性陈述。所有信息均“按现状”提供，不作任何明示或暗示的担保，包括但不限于适销性、特定用途适用性、不侵权或准确性的担保。



SynaCore

Drive physical manufacturing with virtual intelligence
www.synacore.net

Singapore Office:
02-22, Blk 73 Ayer Rajah Crescent
Singapore, 139952

上海公司地址：
上海市闵行区望汇路260弄上海工业智能中心3号楼701室
邮编：201109