

熱控與熱管理

網刊地址：[HTTPS://WWW.TCATMM.COM](https://www.tcatmm.com)

THERMAL CONTROL

協會文件 P1
編輯寄語 P4
熱數字孿生體 P5

周愛軍
魯歐制造

特別策劃

熱數字孿生體
系列報告

2022年02月號
總第2期



目 錄

封面人物：周愛軍（魯歐制造）

P 1 協會文件

P 4 編輯寄語

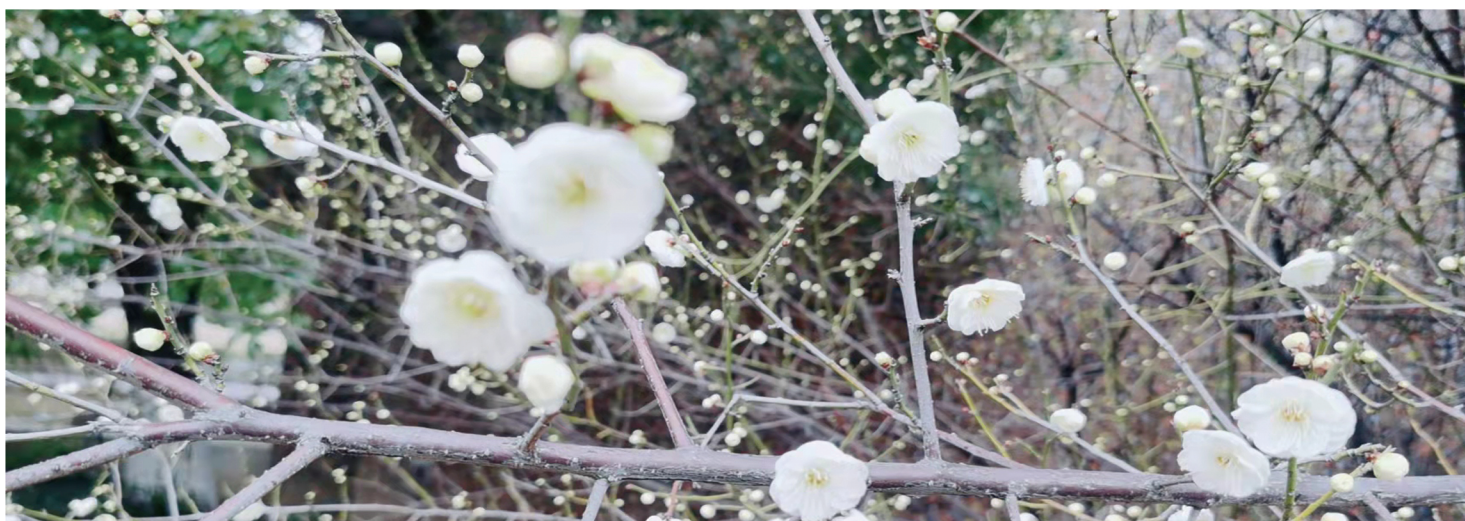
P 5 熱數字孿生體

P 1 4 數字孿生技術及企業的智能化一

P 2 2 數字孿生技術及企業的智能化二

P 2 8 數字孿生技術及企業的智能化三

P 3 5 數字孿生技術及企業的智能化四



熱控與熱管理

主辦單位：

中國電子工業標準化協會

熱管理行業工作委員會

協辦單位：

合肥明睿數據服務有限公司

出版單位：

熱控與熱管理雜誌社有限公司

國際刊號：

ISSN 2789-3731

網址：[HTTPS://WWW.TCATMM.COM](https://www.tcatmm.com)

地址：香港九龍旺角亞皆老街98號富都大廈2樓22室

電話：+86-013721029736

編輯郵箱：SERVICE@TCATMM.CN

中电标协热管理行业工作委员会

热管理〔2022〕001

中国电子工业标准化技术协会热管理行业工作委员会 关于进一步提升会员服务内容通知

各会员单位、企业、高校、科研院所：

随着市场发展，行业的要求，热管理产业方面有了新的需求，热管理产业所涉及的热控产品的需求迅速发展，行业遇到了前所未有的机遇。在机遇与挑战并存今天，热管理行业工委会始终坚持发挥在产业组织、行业自律和政府支撑方面的作用，为热管理行业相关研究、应用、推进工作提供技术、标准、人才等方面的支撑服务；促进企业间按市场规则开展合作，实现优势互补、资源共享、协同推进，服务企业，提升热管理行业水平，共同营造产业做大做强的良好生态环境，带动产业链协同发展。

在过去的2021年里，热管理行业工委会在主管部门的指导下，在理事单位的带领下，在广大会员的共同努力下，不断强化自身建设，努力创新工作方式，一是组织会员单位开展了第一届热管理解决方案征集活动，解决会员单位实际需求；二是发布《导热界面材料行业研报》，为行业发展提供数据支撑；三是创办行业国际期刊创刊，为行业同仁提供优质信息；四是协助制定《锂电池产品平均比热测量方法》团体标准，推动行

业标准化工作；五是组织开展热设计培训，加强行业人才培养等。

2022年，委员会将进一步加强自身建设，持续提高会员服务能力，多渠道为会员企业谋求利益。在2021年的会员活动基础上联合多方开展活动，举办第二届解决方案征集活动、正式运营热管理行业国际期刊、组织参加上交会推广行业标准活动等。同时，经和相关单位协商，会员单位除享受中电标协会员服务外，还将享受热设计网及《热控与热管理》期刊相关服务内容：

中电标协热管理工作委员会网站、期刊服务内容		
推广权益渠道	服务内容	团体会员 部分五选三
热管理工作委员会	1、可参与协会各项活动及享有提议权	享受所有权益
	2、免费获取协会提供的各类市场资讯	
	3、每年协会组织培训活动 1 人次的八折优惠	
	4、每次 1 人免费（仅限会务费）参加协会展会及研讨会（国际交流另计）	
	5、相关热管理产业市场分析报告五折优惠	
	6、展会展位优先选择权及展位费八折优惠	
	7、颁发会员证书与牌匾	
委员会官网	公司宣传及简介	1 次
热设计网	公司宣传及简介	1 次
	新品发布	2 次（五选三）
	技术推广	2 次（五选三）
	散热物料库中展示产品	5 件（五选三）
	网站公开资料免费下载	无限次数
热设计网及委员会公众号	第一栏（技术软文为主）	1 次
《热控与热管理》期刊	论文发布	3 次（五选三）
	精英团队、先锋产品及软文五折	1 次
	封面封底人物及软文五折	1 次（五选三）
热设计招聘网	发布招聘信息	无限次数

为更好地做好会员服务工作，热管理行业工委将于近期与各会员单位及相关单位逐一联系或拜访并进行需求调研，欢迎关心和支持委员会发展的各界人士提出更多的服务需求。

行业的发展离不开会员单位的支持，感谢会员单位对热管理行业工委工作的大力支持。同时期待更多行业内企业、高校、科研院所加入，共同推动热管理行业的健康、快速发展。

联系人：

王女士：15010318780（秘书处联系人）

霍老师：13721029736（《热控与热管理》期刊联系人）

谢女士：13751181982（热设计网联系人）

中电标协热管理行业工作委员会

2022年2月23日

热管理行业工作委员会

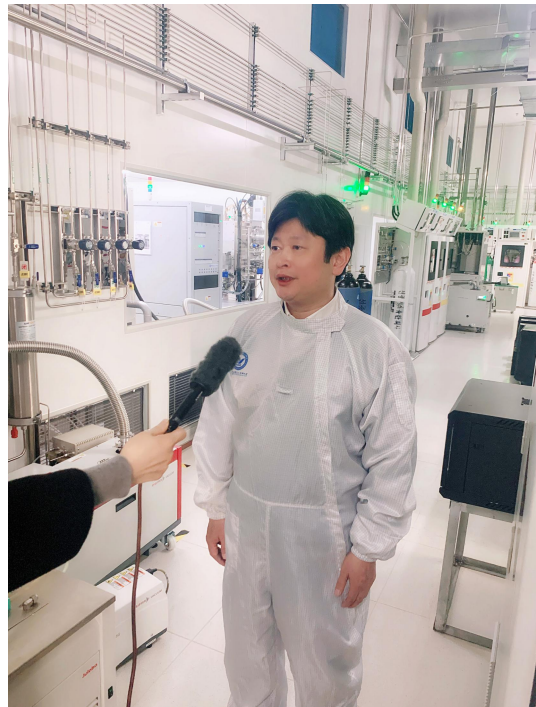
热数字孪生体的专篇

一直听说我们这个行业在理论和制造之间的极差较大，见过周总以后我们的观点多多少少都会改变一些。

工程行业的设计和制造之间一直存在技术上的落差，这种落差即便是在丰田加持了“精益制造”以后，也并未缩短，因为那些实现的主要是自动化和消除浪费而已，围绕客户的系统并没有出现，围绕成本的系统生生不息。

热数字孪生体把客户需求用触手可及的方式摆在我们面前，将热控热管理行业中早已存在的仿真设计，用另一种更全面和深入的方式嵌入行业的各个领域，从此数字化不再是某一个段落的特色，而是全产业链全利益相关方的平台。

从这一点上看，周总的观点非常准确，热数字孪生体还需要更长的时间和更多的投入，才能为业者带来革命性的改变。



电子热设计的关键技术——“热数字孪生体”

周爱军

00

大家知道电子技术的发展史同时也是一部散热技术的发展史，长久以来，电子器件的散热问题一直伴随电子产品的迭代。如果电子产品的热设计存在隐患，势必会影响到产品的性能和寿命。

整体来看，虽然电子器件功耗的发展方向是越来越优化的，但电子器件和设备的物理尺寸微型化，使得器件周围的热流密度却在越来越高，解决散热问题的需求变得越来越刚性。

在这种强烈的应用市场需求背景下，当前国内所有的大学还没有内涵为“电子散热”或者相关的专业，因此从各个关联学科发展出来的电子散热就成了一个交叉学科，涉及到材料，机械结构，电学，流体力学，传热学等等。

目前的行业现状也是这样，从事电子散热工作的工程师大部分都是通过后来的跨专业学习和实践，去获得支撑电子散热技术所需要的基础知识。

最早计算机产业开始发展的时候，设备的体积大，售价也支撑不够紧凑的布局，相比于电子产品的其他指标，电子散热还不是非常重要。那时候通常是工程师完成产品的功能设计后，再去测试电子产品的热是否遇到问题，而如果遇到问题的话，可以通过升级散热方式解决散热的问题，从而得到符合设计要求的产物。

当然这种设计思路存在先天性的风险。通过升级散热方式来解决

热问题首先是成本过高，或者压根解决不了热问题，那么产品设计就回到了原点，整个方案要推倒重来。而随着产品功率密度越来越高，这种潜在风险就变成了不能不面对的关键问题。

合理的设计思路当然是热电联合设计，在产品研发的开始阶段，就融入仿真技术，用软件去试错，大大降低的未来的设计风险。而用软件能够进行有效试错，必然也对仿真的精度提出了很高的要求。

01

如果作为一个专业，电子散热其实回答了三个和热相关的根本性问题：

✚ 是否有热问题

✚ 热问题在哪里

✚ 如何解决热问题

专业领域 = 电子散热

- 是否有热问题?
 - 产品内部芯片温度是否过高?
 - 需要热测试技术
- 热问题在哪里?
 - 什么原因导致芯片温度过高?
 - 需要热结构分析技术
- 如何解决热问题?
 - 如何进行产品的热设计?
 - 需要热仿真技术



图一 电子散热

回答第一个问题，最直接的办法就是测一下实际的温度。而温度测量有两个要点，第一、温度是无法直接测量的物理量，目前所有测

量温度的方法都是转移测量法，找到温度和某个可测物理量之间的对应关系，通过测量这个可测物理量，然后换算成温度；第二，在整个系统未达到热平衡的状态时，系统内的被测物体的温度是会一直变化的，而这种变化又是连续的。

有了温度测量结果，下一步就需要分析热问题，找到散热瓶颈，便是对第二个问题的回答。基于温度测量的两个要点，不同的测量方法，其分析方法和结果也是不一样的。

最后就是如何解决问题，基于实物样品的试错去解决这个问题，无论是成本上还是时间上都无法保证。所以，如果研发的产品完全是基于正向设计，热仿真的应用几乎会成为必须使用的技术手段。

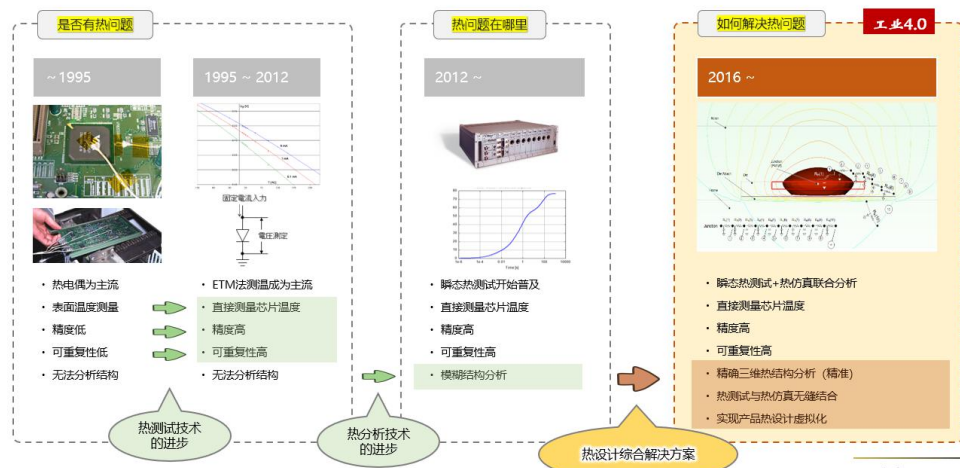
回顾这些手段大家知道：早期温度测量的手段是用热电偶，大概广泛用于 1995 年之前。热电偶测量值是一个点的温度值，在物理上很难描述和定义，当然也就无法知道芯片的结温是多少。1995 年以后，电气法被广泛应用，利用半导体结电压和温度的响应曲线，可以测量结温，但由于测量结电压必须要在感应电流下测量，加热电流必须断开，所以测得的温度值实际上是断电以后某一个时间点的温度值。

对应这两种测量方式，目前尚没有对应的模型去做热结构分析，只能是定性的知道，是否有热问题。

2010 年，结构函数被正式认定，用双界面法去分析系统的热结构，2012 年以后逐步应用到瞬态热测试领域。但是结构函数也只能做模糊的结构分析，结构函数可以理解为从结到环境的一维散热路径，用一维的曲线去描述三维热结构，当然是无法到达预期的精确结果。

数字孪生技术的崛起及实践，给热设计带来新的思路，2016年以后，结合测试和仿真的热数字孪生体技术逐步成为解决热设计难题的重要手段。

热测试/热分析 技术背景



图二 热测试/热分析 技术背景

瞬态热测试是测试系统热本征特性的方法，无法对系统实进行实时温度测量，而仿真受到边界条件等输入因素限制，如果不经过很长时间的优化，仿真的精确性和可应用性也会存在先天不足。

结合测试和仿真技术的热数字孪生体，不仅仅能在稳态的时候和测试的结果保持一致，而且瞬态的结果也同样可以保持较高的一致性，这就给我们的产品虚拟研发创造了非常有利的条件。

02

电子散热的仿真软件主要以流体仿真软件为主，可以仿真传导、对流、辐射及相变传热的等物理现场。这些软件经过几十年的发展，基本上性能也趋于稳定。

尽管对曲面的分析功能是 FLOTHERM 致命的缺陷，但似乎并没有

影响到 FLOTHERM 在电子散热领域的霸主地位。

近几年 FLOEFD, ICEPAK 等软件, 在电子散热领域应用也越来越多, 也是因为以上每个软件既有其独特的优点, 也存在一定的不足。目前使用热仿真软件的工程师这几款软件都同时用, 主要原因是这几款软件都基于有限体积法的计算流体力学软件, 没有本质上的差别。

国内的目前研发现状, 这些软件在实际应用过程中, 大部分还是在做趋势性的指导, 能够利用软件做虚拟设计的, 少之又少。

原因很简单, 热数字孪生体并没有被建立。也就是说并没有把测试和仿真有机的结合。而没有很好结合的原因, 还是因为热测试技术不能满足实际应用的要求, 或者是即使得到一些精确的可重复的热测试结果, 也没有很好地和仿真技术相结合。

前段时间走访了一些老朋友, 老客户, 发现都有用瞬态热测试技术去测量结构函数能力, 但是对瞬态热测试的测试数据如何理解和应用, 却是现在大部分企业的短板。

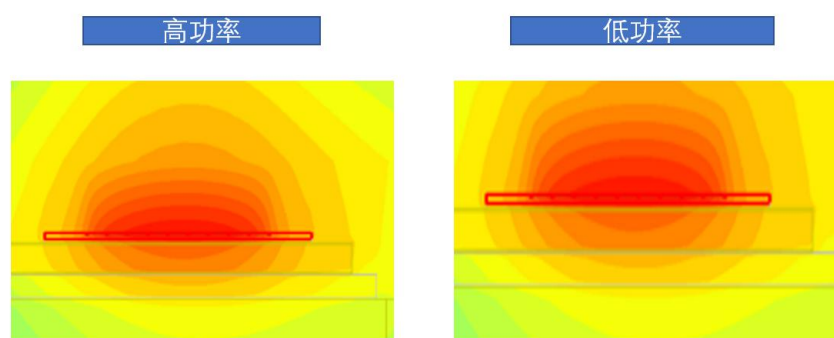
这相当于花费了高额的费用, 购买了昂贵的设备, 只发挥了设备的 15-20% 的功能。大部分企业购买设备的应用, 只是用来测一下产品的热阻, 或者再测一个功率循环。这样可以得到一些结果的数值, 却不能对这些数值进行系统的理解, 无法构真正热数字孪生体。

热阻: 1W 的热量引起的温升, 这个概念被工业界广泛应用。热阻被测试, 也被业界认为是物体的固有属性。实际情况, 工程师一旦测出某热阻值, 便会在实际工业应用中多次重复使用, 却忽略掉了应用这个概念的限制条件。

如果深入思考热阻这个问题，我们应该知道，对于一个材料而言，真正不会变化的是热导率（这里先忽略因为温度而导致的材料热导率的变化），而热阻和材料的厚度及面积有关系，对于一个单一方向的热传导，我们可以认为热阻不会变化，而对于个三维空间的传热，在不同的功率下，某两点之间热阻确实实是发生了变化，因为在不同功率下，物体的散热路径发生了变化。

如果我们用一维曲线去描述系统的散热路径，应该有一个前提，就是通过这个路径上功率的百分比不会变（假定这个功率是可以测量的），而当系统功率发生变化时，整个温度云图就会改变，导致路径上功率的百分比也会发生变化。

不同功率下器件温度云图对比



图三 不同功率的温度云图变化示意图

如上图所示，当功率比较低时，芯片相对环境的温度梯度相对较低，实际散热是三维的，如果假设有总归有上下两个散热方向，那么向上的功率可能是 10%，而向下的功率比率可能是 90%（假定值），而

当功率变大时，向上的功率由于温度梯度升高，百分比可能会增大。从而会导致系统的散热路径及功率分配发生了变化。

JESD51-14 的标准，提供了双界面法，用来测量器件的结壳热阻，实际测试过程中，会发现在不同的功率下，结构函数的分离点位置会发生变化，这种现象在功率器件横向面积比较大的时候，经常会发生，而对于双面散热的器件，甚至会得不到理想的结果。

03

对于热测试数据产生重大影响的，还有一个非常重要的因素要考虑，那就是测试环境。

因为热传递是三维的，如何保证测试环境一致性，是测试数据可比性，可分析性的关键，而这方面主要通过夹具设计来满足测试条件的要求。

我们的实际经验告诉我们一个重要的事实，**理论上所有器件的夹具都需要定制。**



图四 某 IGBT 的定制夹具。

夹具作为测试环境中的一部分，既是器件的导电路径，也是器件的散热路径。对于测试环境的稳定性、可比性能起到至关重要的作用。

电子热测试夹具设计的基本原则：

- 满足使用过程中电子器件定位的稳定性和可靠性；
- 有足够的承载、密封或夹持力度以保证器件在测试环境上进行的全部的测试过程；
- 满足装夹过程中的简单与快速操作，保证测试的高效性；
- 易损零件或者必须是可以快速更换的结构，条件充分时最好不需要使用其它工具进行；
- 满足夹具在调整或更换过程中重复定位的可靠性。

实际应用过程中，要求设计人员既要理解结构设计的基本原理，也要具备电，热测试等等专业的理论基础。

而随着测试环境的复杂性越来越高，比如高低温，震动，湿度，粉尘，日照等因素或者因素的叠加，夹具设计会变得越来越复杂，而且越来越重要。

写在最后

电子散热作为一个专业方向，演变到现在，构建热数字孪生体成为电子热设计在工业 4.0 大背景下的必然发展趋势，企业应该从自己的实际应用出发，重视、投入、培养这方面的专业人才。企业导入热数字孪生体的技术的大致路径，可以参考下图：

热数字孪生体技术

热传递的理论基础——三维热阻模型

瞬态热测试的能力——得到高精度的数据

夹具设计的能力——保证测试环境可靠性和重复性，测试数据的可分析性

软件仿真能力——结合测试构建热数字孪生体

应用于实践——构建智力资产



图五 热数字孪生体技术

而且，这种行为不会是短期的行为，不是购买一个软件或者一个测试设备就能解决的问题。

企业应该从自身的实际出发，合理投入、滚动循环、引入外部资源、高效积累自己需要的能力。

Denso 建立这方面的体系，花了六年的时间，我想中国的企业也必须要付出类似的艰辛，去走出同样的路。

数字孪生技术及企业的智能化（一）

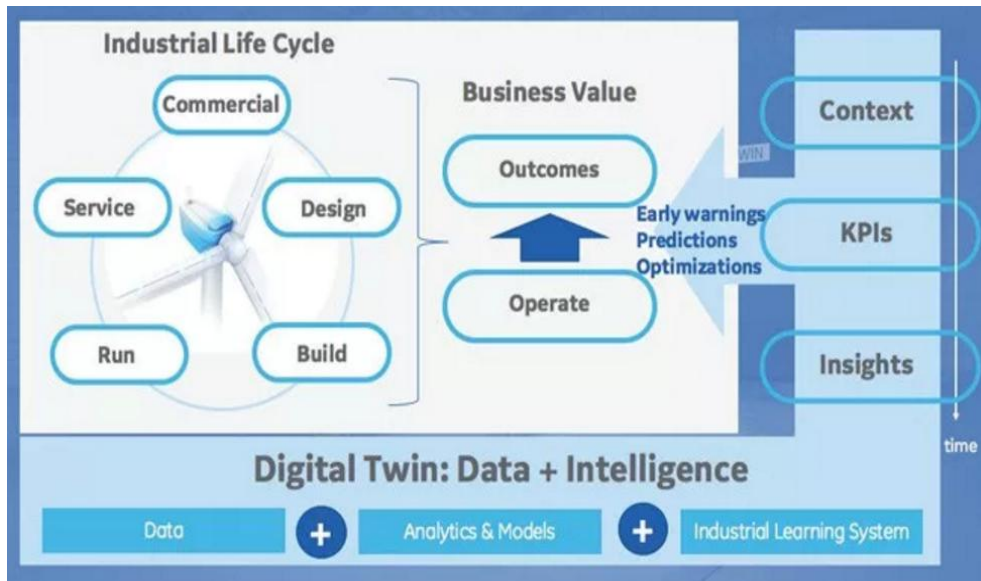
在前面一篇文章中我们为大家介绍了由仿真技术衍生出来的“热数字孪生体”概念，从这篇文章开始，我们将分四个部分为大家介绍一下“热数字孪生技术”和企业智能化的互动关系。

01

从业十几年曾和很多客户一起探索如何提升企业研发能力，国外的企业我不知道，但是中国这块土地上，我确信没有一家企业真正的建立起系统的数字孪生技术架构。而当“数字孪生”逐渐成了一个时髦的名词时，也涌现出一大批关于数字孪生的技术专家，写过很多相关的文章，对数字孪生技术的外延和内涵也不尽相同。

数字孪生 (Digital Twin) 最早应该追溯到 NASA 的 John Vickers 对物理实体和其数字镜像的命名。而其概念的来源，业界一般认为，是由密西根大学 Michael Grieves 教授于 2002 年针对产品全生命周期管理 (PLM) 提出的，当初并不叫 Digital Twin，而是叫镜像空间模型 (Mirrored Space Model, MSM)。

工业仿真软件巨头 ANSYS 对数字孪生的定义：“从高层次来说，它是创造物理对象的数字化表达形式；从根本上讲，它是为真实世界的资产设备创建数字模型，并将实际的性能数据与企业所拥有的与该特定资产设备有关的整套数字信息充分结合。”



图一 Digital Twin (图片来源, ANSYS)

ANSYS 趋向用数字化技术去动态镜像真实世界的资产设备，以期预测和优化资产设备的运行状态并提供预警。ANSYS 期望使用数字原型和数字探索技术，不仅仅在产品的研发范畴，更要逐渐扩展到依托仿真驱动的工程领域。CAE 在传统上一直被用于产品开发和虚拟实验，而结合数字孪生技术，CAE 将在整个产品的生命周期过程中，发挥其蕴藏的巨大价值。

2007 年，工业自动化巨头西门子收购了 PLM 软件 UGS，从此一直没有停止并购的脚步，其背后的重要原因之一，也是因为西门子深刻认识到数字孪生的价值。西门子把数字孪生分成三大部分，产品数字孪生，生产数字孪生和设备数字孪生。西门子认为：数字孪生技术是“将带有三维数字模型的信息拓展到整个生命周期中的影像技术，最终实现虚拟与物理数据同步和一致”，它可以“发现潜在问题、激发

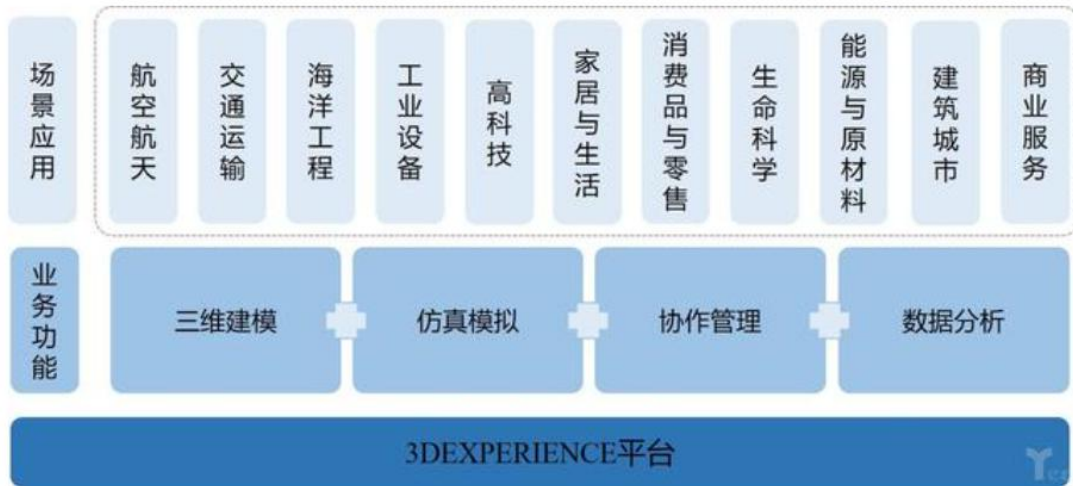
创新思维、不断追求优化进步”。“数字孪生技术帮助企业在实际投入生产之前即能在虚拟环境中优化、仿真和测试，在生产过程中也可同步优化整个企业流程。”



图二（图片来源，西门子）

西门子按照产品的生命周期，从研发，生产及产品使用的角度，去定义数字孪生技术，实际上是沿用信息化的概念，产品数字孪生是把实验室搬进电脑，生产数字孪生是把工厂搬进电脑，设备数字孪生是把产品维护搬进电脑。而原先的这几个系统相对独立，形成信息孤岛，西门子通过系统整合，使得产品相关数据在产品的整个生命周期中保持统一，把原先相对孤立的信息化子系统连接起来，消灭信息孤岛，再辅助云计算，大数据，虚拟现实等技术，从而形成一个完整的闭环系统，使得企业的整体智能化运营成为可能。

而另一个 PLM 软件巨头达索在诠释数字孪生时则更侧重于知识管理。达索认为，无论是什么行业的什么产品，都可以通过数字孪生技术建立虚拟世界的产品模型，从而优化物理世界的产品实体。



图三（图片来源，达索）

达索 3D EXPERIENCE 平台利用知识管理和相应专业技术将所有技术和功能集成到统一的数字化系统当中以应对日趋复杂的创新挑战，实现从概念设计，详细设计，生产制造直至产品维护、回收等产品的全生命周期的数字连续性，企业集成该平台的应用，创建数字孪生，从整个生态系统中获取创新动力和专业知识，从而评估和预测工业资产的绩效，并以智能化的方式帮助企业优化自身的运营。

02

尽管角度不同，概念上也存在一些差异，但是我们可以提取出数字孪生技术的几个重要的关键词：仿真，集成，全生命周期，创新，智能化。

也就是说数字孪生技术最终指向的是企业智能化，在这个点上，所有对数字孪生的定义都是一致的。

而企业智能化的定义和数字孪生一样，也有不同的外延和内涵。我们现在也无法给出企业智能化的一个准确定义，尽管如此，业内在

企业智能化水平决定企业的未来这一论断上都毫不怀疑。

百度上关于制造业的定义：是指机械工业时代利用某种资源（物料、能源、设备、工具、资金、技术、信息和人力等），按照市场要求，通过制造过程，转化为可供人们使用和利用的大型工具、工业品与生活消费产品的行业。随着市场供求关系的演变，企业的创新能力逐渐成为企业核心竞争力的关键甚至是决定性的因素。

而知识积累、知识管理乃至知识工程是企业创新能力提升的最主要的方法。达索的数字孪生技术的解释正是从这个角度切入的。

最早的知识传承是人传人（不是冠状病毒），俗称传帮带。老师傅积累的经验，看着哪个徒弟比较顺眼，倾囊相授，一代一代的积累。即使在现代企业中，这种传帮带依然存在，一些 Know How，不能用言辞表达的技艺，师傅教徒弟还是主要的传承方式。从企业的角度，企业具备行业经验，可以少走弯路，做出高质量的产品。

然而传帮带的效率太低，不易流转，企业开始建立相应的项目文档，希望尽可能的记录企业的各种知识。对具体技术或者产品，分门别类，形成各种各样的技术文档，希望后来人可以学习和借鉴，记得大学里学过一门课叫《文献检索》，主要的技术就是如何快速准确找到需要的信息和知识。

书本或者文献作为知识传承的主要载体，是有很多局限的：

长时间保存困难；

可流传性依然不够理想；

对知识的表达不够完备，会损失很多有效的信息；

人们在学习这些知识的时候，会带上主观的认识，从而不能忠实地重现原知识；

太多的知识，学习也非常困难；

知识都有一定的局限性，很少有文档会记录如何使用这些知识。

于是人们开始用信息化的手段去弥补上述不足，大规模的磁盘阵列不仅仅可以记录结果数据，还可以按照要求记录中间数据。数据库和搜索引擎的开发，提高了文献的有效性和针对性，有一些还有智能学习和自动推送的功能。

信息化、自动化和知识管理，即便全部实现的企业还做不到智能化。若是企业想实现智能化，需要知识管理到知识工程的转变。

什么是知识工程？

“知识工程的主要研究方向包含知识获取、知识表示和推理方法等，其研究目标是挖掘和抽取人类知识，用一定的形式表现这些知识，使之成为计算机可操作的对象，从而使计算机具有一定的人类智能”。

（施荣明 赵敏 孙聪 著 《知识工程与创新》航空工业出版社，P25）

而“数字孪生技术”是知识工程最完备的知识表现形式。

简单总结数字孪生技术的特点：

数字孪生技术对物理实体各类数据进行集成，数字模型是物理实体的忠实镜像；

数字孪生技术作用于物理实体的全生命周期，与其共同进化，并不断积累；

数字模型不仅仅是物理实体的数字化描述，而且能够基于数字模

型优化物理实体，从而提高创新的效率，提升产品的性能。

可以看出，数字孪生技术的核心，是 CAE（这里的 CAE 泛指包含结构，流体电磁等各物理场和多物理场的数字仿真技术）和 V&V 技术。通过仿真建立物理实体的数字模型，通过 V&V 保证数字模型的精度，我们用仿真来做虚拟实验，而只有在精度可控的前提下，仿真才有其实际的物理意义。

而 V&V 技术又包含几个条件：

统一的测试标准和精准的测试设备——保证测试结果的重复性；

稳定而鲁棒性好的工具软件——保证仿真结果的重复性；

对物理实体的原理性的理解——保证仿真流程的合理性；

理解各种边界条件和仿真结果之间相关性——快速得到可重复，可再现的等效参数。

在 V&V 的过程中会需要和产生大量的高附加值的知识，我们用数字孪生技术将这些知识封装在数字模型里面，使这些动态的数据能准确预测物理实体的未来。到那个时候，我们才算揭开了数字孪生技术所蕴藏的巨大价值的面纱。



图四 Digital Twin 的实际应用

数字孪生技术的道路很漫长，我们需要做大量的 V&V 项目，建立不同等级的数字模型，把确认的流程的知识编成程序，最终用知识工程技术去挖掘、流传、重组这些知识，逐步实现企业的智能化。

（后续进入第二部分）

数字孪生技术及企业的智能化（二）

03

接着第一部分的内容，我们先讲一个案例：

某汽车零部件（T1）提供商的销售人员跟踪某车型配套的空调项目的竞争，前期做过多次交流，基本上确定了空调箱系统的相关参数和价格。该销售人员再次拜访主机厂，目的自然是想一举拿下这次的配套。

就在这个关口，主机厂项目人员提出要更改风道的要求，原因是从整车设计上要增加一组车用的控制器来进一步提升整车的性能。销售人员随即打开电脑，按照更改要求在原有的设计上更改了相关参数，生成了更改后的三维效果图，销售人员又连接到公司的服务器上，远程打开公司的空调仿真程序，在更改后的几何上进行相应设置，并递交了仿真请求……

40 分钟后，仿真完成。

根据仿真的结果，销售人员提醒主机厂项目人员，如果按照他们的要求更改，压降可能会增加 5.6%，均匀性也存在隐患，需要增加风机的功率，并且可能要换成柔性更好的管道。这样，总项目成本要上升 10%左右。

以上的案例是一个虚拟的案例，但如果真的想达到这样的场景，需要几个关键技术：

远程办公系统（这个不难，现在很多 IT 公司都能实现）

参数化绘图程序

定制的仿真程序（只要经过数小时的培训就能学会的仿真程序）

风道模型被 V&V 的仿真计算

虚拟现实

成本计算程序

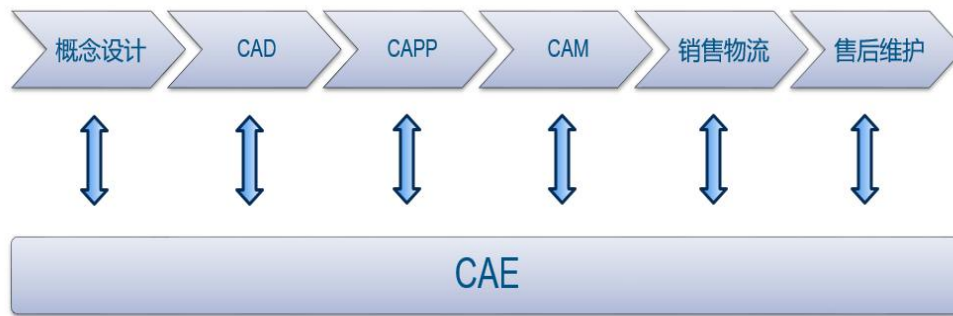
且不说销售人员这种眼花缭乱的操作对客户心理冲击，如果某供应商面对客户要求的响应速度能提升到如此之迅速，对于其他供应商来说，竞争游戏无疑已变成了降维打击。我想这样的系统，大多数企业可能是无法拒绝的。

CAE 和 V&V 结合，使得数字模型不仅仅是物理实体现状的数字表达，同时也能高精度的预测物理实体的状态在时间轴上的变化。数字模型不仅仅有物理实体的现状参数（质量，长度，速度，场等物理量），还封装了相应的科学定律和等效或近似的科学公式等知识，使得数字模型和物理实体实现同步。数字孪生的价值在于它不仅仅能准确表达物体的根本属性，还可以根据自然界的规律和逻辑去演绎，从而可以预测系统随着时间变量而变化的各种参数。仿真和 V&V 使得数字孪生技术为企业产生巨大价值，从而彻底颠覆企业原有的运营方法和运营流程。

企业运用 CAE 技术的形式是不断变化的，最早的 CAE 是一项专门的技术，能熟练运用的人才不过，CAE 部门是一个专业部门为设计部门服务，企业的流程大致是这样的。



CAE 是研发的一个环节，可以减少物理试错，提供正确的设计方向。随着企业对 CAE 的运营和理解，发现 CAE 不仅可以为产品的 CAD 设计阶段提供帮助，同时也可以在企业运营的各个环节提供指导意见，于是企业流程发生了巨大的变化。



由于 CAE 的试错成本极低，而且通过工具软件和数字孪生技术，甚至可以找到超出企业的知识和经验的更优的设计方案。于是在企业的每一个环节，CAE 和原有的工作交互迭代，虚拟空间探索，物理世界验证。

理论上这样的架构很不错，实践操作是却发现有一些问题。

由于 CAE 工作具有一定的技术壁垒，CAE 的人员成本相对较高，企业在 CAE 软件和人力资源的投入方面，必须谨慎；

产品复杂多样，客户要求也瞬息万变，而 CAE 人员不可能对所有的产品都能有深刻的理解，即使能熟练掌握 CAE 技术和工具，也不能满足企业的仿真需求；

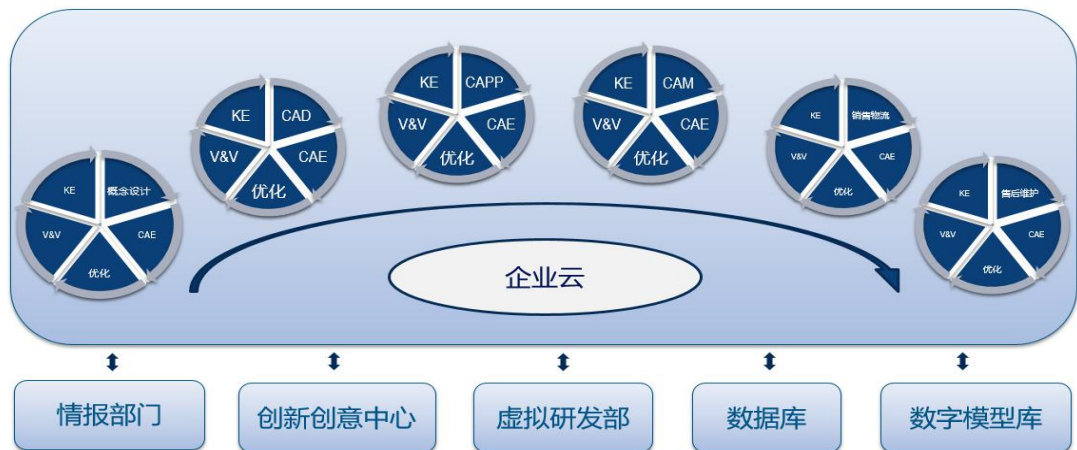
CAE 的工作频率和其他的部门也不一样，在企业资源协调和分配上，也是一个头疼的问题；

部门之间的协作也是一个问题，因为工作是交互迭代的，工作界

限划分也很难完全清晰，工作成了皮球，在部门之间，被踢来踢去。

CAE 部门不得不根据自己的喜好，公司的压力等因素去选择性地做一些 CAE 工作，这样数字孪生的价值无法充分释放。

而“两 C 融合”提出了一个新的概念，常规的 CAE 工作，由原部门自己完成。



图三 企业智能化系统

如上图所示，每一个环节内部做循环，形成“方案-仿真-优化-验证-知识工程”这样的一个数字孪生闭环，数据在企业云中无缝链接、流传、重用、优化、验证、逐步增强。

概念设计阶段：数字孪生闭环可以一次性完成产品的技术规格书，提供系统的合理性。

详细设计阶段：数字孪生闭环可以在大幅降低实验次数的情况下，得到更合适，更优化的方案。

工艺设计阶段：数字孪生闭环可以解决工艺的可行性和稳定性的问题。

生产制造阶段：数字孪生闭环可以模拟生产时的边界条件及生产

设备的稳定性、减低制造成本、提升产品的可靠性。

销售物流阶段：数字孪生闭环可以推送全方位的信息、提升客户反馈速度、增强客户信心（如文章开始的案例）。

售后维护阶段：数字孪生闭环可以监控产品的运行状态、优化产品的使用寿命、甚至改变销售模式、有卖断转向更灵活的租用。

以上介绍的只是数字孪生技术的冰山一角，随着数字孪生技术不断应用、仿真技术不断发展，未来的应用将超出现阶段我们的想象。

同时企业云平台又会有一些功能系统不断拓展企业的知识管理。

情报部门会关注新技术，保证企业的知识有源源不断的活水。

创新创业中心，会从技术驱动和市场驱动两个维度，预测未来的市场需求，从而定义适度超前的产品研发，为企业确立有性价比的竞争优势。

虚拟研发中心是数字化企业的核心部门，也是知识工程的实施部门。

对知识进行数字化、标准化、层次化、结构化；

定义各种数字模型和流程，既有的数字模型可大大提高仿真效率；

开发简单易用的仿真程序，规范仿真流程并保证仿真结果；

知识挖掘来源有多种，外部的、企业内部的创新和过程数据、大量的创新活动数据分析后的结果等等；

数据库和数字模型库的维护和更新。

数据库用来存储和重用企业的知识，开发搜索引擎或者主动知识推送系统

数字模型库用来管理和维护数字孪生体，同样也可以开发搜索引擎或者主动模型推送系统。

数字孪生技术还有一个重要的特点：尽管系统看上去非常的庞大，但不是不可拆分。每一个环节独立运行，也能发挥一定的价值。

事实上，这个庞大的系统，正是从多个子系统发挥作用开始的，后期人们发现如果打通子系统之间的壁垒，可以几何级数增长其应用价值，最终才形成目前这个庞大的系统。我们建设该系统的立足点，也应该是长远规划，逐步实施。

数字孪生技术将影响企业的决策流程，依托强大的智能化系统，决策来源于可靠的数据预测，从而减低企业的风险。

数字孪生技术将影响企业的运作方式，从前无法做的，或是需要高成本才能实现的企业应用，未来都将变成可能。

数字孪生技术能充分了解客户需求，有的放矢地满足客户的独特需求，创新性的改变运营和服务的方式，提升用户体验。

数字孪生技术使得企业可以和外部环境进行充分的交流和沟通，企业自身也是环境的一部分，企业和客户，企业和企业，企业和行业，企业和世界之间的距离缩短为零，从而使得社会资源能得到更合理的利用。

大家可以进一步想象一下，如果文章开头故事中那个销售人员是一个机器人，未来的运营管理将是什么模样。

未来已来，我们准备好了吗？

（后续进入第三部分）

数字孪生技术及企业的智能化（三）

04

小时生活的地方是一个初中校内，由于学校专业是农业中学，当然有很多农作物包括水果蔬菜。院子里最南边有一个公厕，屋顶上面长了很多丝瓜，而爬上屋顶摘丝瓜的任务一般都是我的，回想起来，那种长到刚刚好细长的丝瓜味道最妙。

如今菜场到处都是那种长长细细的丝瓜，但吃起来早已没有以前的味道。看来当初只要是长长细细的就美味的观点不大对头，实际上，只有在特定的条件都具备的情况下，长长细细才能等同于美味。

数字模型也是一样，数字孪生体通过工程参数等数据来表达模型，一个数字模型会包含很多工程参数，模型的功能和工程参数之间的映射需要从工程原理出发，使用科学和工程技术对数字模型进行演绎，从而展示和预测数字模型能表达的物理意义，并在物理世界去验证。

比如水银或者酒精温度计，用来测量温度，我们看到的是液体体积的变化，利用的是液体的温度和体积膨胀的对应关系，如果这个对应关系不成立（用水银温度计去测量低温，或者用酒精温度计去测量高温），那么结果就不对了。

从这个角度看，数字孪生体是知识的封装方式，建立数字孪生体实际上就是知识管理。虽然我们在实践中运用这些数字孪生体的时候，并不会关注这个数字孪生体背后封装的知识，但我们在建立数字孪生体的方法论上，就必须首先尊重科学和技术。

这里面有几个层面的知识，第一种是工程技术，直接用来改造物

理世界的知识；第二种是技术科学，是提炼一些共性工程技术的理论；第三种就是基础科学了，这也就是任总说的，企业研发要砸数学家、物理学家、化学家等等。

举个例子，我们设计某一个特定功能的电路图，这个是工程技术，而应用的技术科学是电工学，对应的基础科学是物理。

问题来了，既然数字孪生体是知识的封装方式，那么如何封装不同层次、不同技术领域的知识？封装后的数字模型之间是什么关系？企业又是如何运用这些数字孪生体为企业创造何种价值？

这些问题是企业导入数字孪生体将要面对的难题，不解决这些问题，数字孪生体永远是飘在空中的一些时髦的概念而已。

在尝试探索这些问题背后的逻辑之前，我们先回到企业智能化这个命题上。

企业智能化转型已经成为世界的共识，无论是德国的工业 4.0，还是美国的 AMP（Advanced Manufacturing Partnership，先进制造合作体），或者是中国的制造业 2025，其核心目标都是企业智能化。

智能化的进化轨迹大概是机械化-电气化-自动化-智能化，机械化解解决的是手工劳动中的问题，从作坊到工厂；电气化解解决的是机械化生产组织无序凌乱的问题，实现了产品和零部件分离；自动化是应用的电子信息技术，实现了大规模的自动控制，生产效率、良品率、分工协作、以及设备的使用和维护等都得到了前所未有的提高；按照这个逻辑，智能化显然是为了解决自动化不能解决的问题，那么自动化还存在什么问题？

现在制造业四大关键部门：研发、生产、市场、销售，我们可以以每个部门的角度先罗列一下。

研发部门面临的挑战，可以分为几大类。

战略问题：

研发战略不清晰，是否有技术路线图？

技术进化方面研究很少，无法准确预测未来的技术；

知识产权战略，如何屏蔽竞争对手，如何规避专利风险？

客户端的问题：

难以理解客户需求；

难以发掘和引导客户潜在需求；

市场反应速度不强；

能力问题：

需求定义难以转化为工程参数；

关键技术突破缺乏有效的方法，主要依靠试错，但是试错法效率低；

解决问题是为了应付销售或者其他部门，没有解决所有问题，没有从根本上解决问题，甚至没有系统的分析，存在潜在风险；

研发团队缺乏降本意识，降本也是依靠试错，缺乏方法论；

缺少资源分析，或者没有把资源分析提升到公司层面。

知识管理方向：

数据整理，方案评价，数据重用等还比较初级，甚至融入感情因素；

企业知识来源比较单薄，存在思维定式；

团队协作问题：

实验室到生产的科技成果转化过程中成本偏高，且效果不可控，甚至无法按照计划达成量产；

缺乏系统思考，研发团队内部存在资源冲突；

技术尤其是优势技术的产品化，缺乏横向推广的方法。

生产部门面临的问题：

如何编制工艺方案；

如何从技术经济角度去评价现有工艺方案，缺乏有效的改进方法；

原材料物流控制和损耗控制；

生产排程；

生产计划执行，质量管控；

人员培训，考核和激励；

人机交互；

设备运行状况监控，预测与维护；

安全管理。

市场部门面临的问题：

变成职能部门，受限于日常事务，缺乏创造力；

对外的窗口展示陈旧老套，缺乏有冲击力，创造力的企划方案；

客户需求的理解和引导，受限于技术瓶颈；

停留在显性信息的收集和整理，缺少对未来预测的能力；

缺乏市场应变能力；

缺乏综合处理来自各方面信息的能力。

销售部门面临的问题：

缺乏系统的理论支撑；

关系型销售，未来将面临前所未有的挑战；

很难制定公平的销售激励机制，开拓性不强；

缺乏全局视野，销售行为短期目的性太强；

缺乏构建双赢或者多赢结果的能力；

销售模型缺乏，过程管理不科学；

缺乏量化的监控指标，销售结果难以预测；

自我积累缺乏，跨部门运作能力不够；

企业的自动化实际上已经解决了生产部门大部分的问题，但自动化不能完全替代人，在生产过程中很多和人相关的问题，还是没有办法得到有效的解决，而研发的问题肯定是自动化无法解决的，市场和销售的问题，其中的大部分也是智能化现阶段也不能完全解决的问题。

数字孪生技术是企业实现智能化的基础

数字孪生 (Digital Twin) 最早应该追溯到NASA的John Vickers对物理实体和其数字镜像的命名。而其概念的来源，业界一般认为，是由密西根大学Michael Grieves教授于2002年针对产品全生命周期管理(PLM)提出的，当初并不叫Digital Twin，而是叫镜像空间模型 (Mirrored Space Model, MSM)。



图一，企业智能化

自动化聚焦于生产，着眼于管理，用信息化技术通过流程定义实

现自动化，解决的是效率的问题。智能化聚焦于研发，着眼于创新，用数字化技术通过数字孪生体实现智能化，解决的是能力的问题。

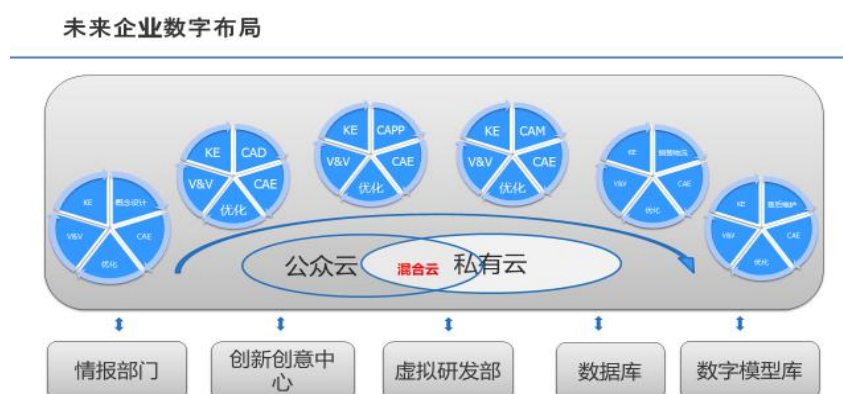
智能制造的核心是研发。

我们可以预期一个巨大变化将会发生。

现在企业的研发工作主要集中于研发部门，研发部门的员工相对于其他部门，学历更高，薪酬也更高。由于研发工作产出的不确定性，大家都把研发比做“烧钱”的部门，这也使得众多企业在投入研发的时候，态度并不积极。

未来的企业，有可能不需要这样一个专门的研发部门，研发工作融入到企业的设计，生产，销售，维护等其他部门中，研发将变得无所不在。

对未来企业的数字布局做了一些修改，企业私有云和公众云之间不断有数据交互，甚至有合作形成混合云，而企业的数据中台支持企业的所有的运作部门，知识在企业活动中被产生、挖掘、规范、存储、流转、推送、重用，并不断组合成新的知识。



图二 未来企业数字布局

整个企业的数字架构，也不是突然形成的，而是循序渐进的。

企业准备做数字化转型，必须面对如何处理企业自身的数据，而这些数据大概可以分为几类。

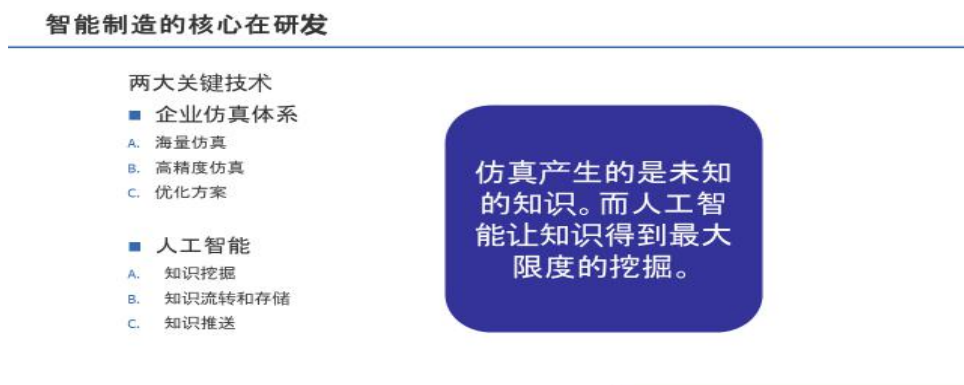
历史数据，知道其来源，也知道其去向(知道是什么，也知道怎么用)

历史数据，知道其来源，不知其去向，或者不完全知道其去向(知道是什么，不知道该怎么用，或者不知道如何把这些数据用好)

历史数据，不知道来源，不知道去向；

未知数据，企业未来解决问题，需要从哪里采集，并送到那里去。

而这些数据之间的关联和逻辑，就很少有人去关心这些问题了。而数字孪生体的作用，就是可以把这些数据规范化，结构化，这样便可以在企业的实际活动中，运用这些数字孪生体去解决自动化不能解决的问题。而构建这些数字孪生的两大关键技术，就是仿真和人工智能。



图三 数字孪生体的两大关键技术

因为仿真产生的是未知的知识，而 AI 可以让知识得到最大限度的挖掘。

(后续进入第四部分)

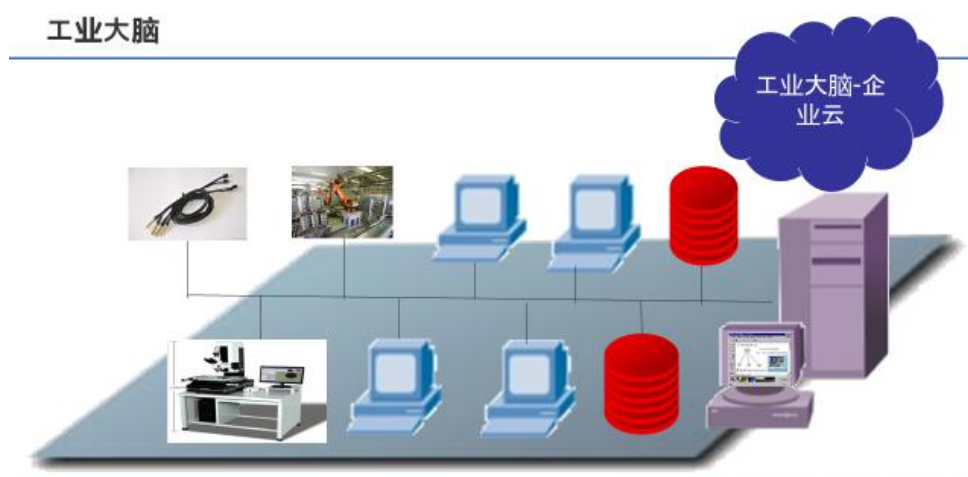
数字孪生技术及企业的智能化（四）

05

列举数字孪生技术所包含的技术类别，可以粗略的分为物联网、云计算（包括雾计算，边缘计算等）、工业软件、人工智能、虚拟现实技术、知识管理（工程技术，技术科学，基础科学）、传感器技术、高精度测量设备、智能化工业设备等等。

这些技术用来构建企业的智能化平台，解决智能化平台所需要的数据采集、传输、算力和算法等问题。

一个企业就好比是一个大型的智能机器：工业大脑是企业的核心，工业大脑需要从数据采集终端得到企业运行的即时数据，并指挥企业内部分布在相应位置的具有算力的计算单元（包括工业大脑本身），实时对企业的现状进行计算、评价、决策、并发布执行指令，由机器或者通过人机交互系统，转而由人来执行。



图一 数据驱动的工业大脑

工业大脑是企业算力的总和，运行并协同企业的全部算力。

计算中心

企业核心算力，处理大型复杂的计算

各种专业服务器

通信：如 IoT、LAN/WAN 等，管理系统：如 ERP、MES 等，设备运行和监控：如 PLC、工业机器人等，工业软件：CAD、CAE 等，检测设备：检测温度、压力、电参数等，虚拟现实：AR/VR 等，人工智能，知识管理，数据安全，以及其他应用服务等等

各种智能终端

手机、平板、手持设备、智能穿戴设备、智能传感器等等。

数据库存放海量数据，标准化、规范化、知识化，彼此关联

传感器采集的实时数据

原始数据，处理以后变成企业需要的标准化规范化的数据。

可直接获得或者间接获得的数据

文献，行业数据，专家系统，材料数据，历史文档，实验数据，情报。

工业软件运行相关数据

标准化数据，数字孪生体，标准化的流程，算法，定制软件。

工业软件产生的新数据

虚拟实验数据，人机交互，决策。

算法是企业智能化水平的集中体现

管理算法

企业管理系统。

运营算法

企业运作系统。

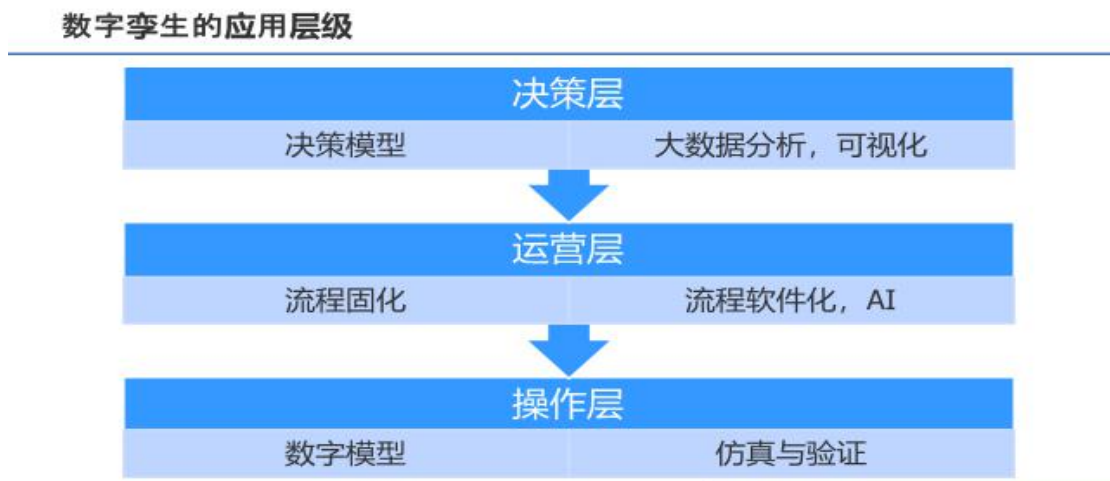
操作算法

设备，检测，设计，研发，生产，维护，销售，市场。

智力资产

知识挖掘，传输，标准化，关联，存储，重用，推送。

所以数字孪生体也可以分为多个层次，依赖不同的技术。



图二 数字孪生体的应用层次

需要强调的是，管理信息系统关心的是业务、是纵向的，底层数据并不完全需要关联。和以前信息化系统 Top-down 相比，智能化系统变成了 bottom-up，操作层的形成的数字模型是企业知识管理的基石，而数字模型依赖于仿真和验证。

我们需要重新审视仿真这个关键技术，这里的仿真已经不是某一个工程师应用一个仿真软件，去做一个不确认的仿真结果，得到几张彩色的图片。

未来的仿真模型首先应该是被 V&V 的虚拟实验，仿真结果是可以信赖的。特定仿真的流程是被固化的，对应是企业各个环节需要解决的问题模型。以设计工程师为例子，设计工程师执行的应该是：“初始设计” - “仿真” - “优化” - “验证” - “知识管理”这样一个研发闭环。仿真不再是小部分 CAE 工程师的行为，而是公司内部需要利用虚拟实验来解决问题的所有工程师必须经过的研发环节，长期海量仿真和大量优化后的设计方案将为企业积累惊人的智力资产。

更复杂的是，为了实现企业智能化的目标，系统不仅仅是以上一种技术的单一使用，很多是两种甚至多种技术的复合应用。数据驱动的内涵应该是数字孪生体封装知识支撑企业研发，具体落地时，应该具备几个方面的特点：

自身已经积累了一些知识，有一些直接可以应用的数字孪生体；

有足够的吸力，不断获得新的知识，转化为新的数字孪生体；

知识图谱关联所有知识，基于某种逻辑，建立企业知识通道；

系统具有智能特性，依据待解决的问题，知识图谱自动向人推荐合适的数字孪生体；

当人去使用这些数字孪生体时，会产生大量的未知的知识，数字孪生体被高效的使用，并不断优化和迭代，同时产生大量的新的数字孪生体；

依据人工智能技术，知识被自动挖掘，并关联到相应知识图谱；

工业大脑可以自我训练，深度学习。

什么是知识图谱

■ 人脑的思考方式

- 神经元的连接，连接越多越聪明
- 大脑是一种分布式的系统，对新激励的反馈通过记忆碎片拼接、整合而成



■ 知识图谱

- 人脑仿生系统，图谱越大能力越强
- 按需创造知识



图三，知识图谱（图片来自于智通云联）

野中郁次郎被称为知识管理之父，他的观点：“知识才是企业创造最大价值的源泉，知识能力是企业不确定环境下保持创新的关键”。

我的理解，知识能力就是获得知识，创造知识，并且利用知识的能力。

按照上面企业运作流程，仿真产生的大量的新的数据和知识，如果依赖于工程师自觉的对工作过程中的知识进行处理，是不现实的，也是不可能的。人工智能、语音识别、语义识别、图像识别等等技术结合工业软件，对人的行为进行智能化处理，并依据企业的知识图谱进行存储和重用。

企业的智能化平台，将是：

员工学习平台：定制培训和实际解决问题的过程中，加速员工成长；

人机交互平台：结合机器和人的优点；

知识挖掘平台：人工智能帮助知识积累；

知识管理平台：数字孪生体驱动企业创新；

业务运作平台：智能化的运作，使得企业能高效，低成本运转；

智能创新平台：应对不断升级的市场环境。

这样的智能系统应该可以解决上面文章提到的研发当中绝大部分问题，随着系统的不断自我进化，更多的问题也会逐步一一解决，系统呈螺旋上升的趋势。当然，若是希望搭建这样的一个智能系统，还是需要非常多的技术攻关，其中涉及到的每一项技术都存在一定的难度，成功的道路一定是用脚踏实地的脚印连接起来的。

文章快要结束的时候，我们需要面对一个原点的问题，究竟是为
什么企业要花那么大的精力去搭建一个智能化的平台？

前几天微信里的消息，特斯拉又降价了，降到了 25 万以下，可能以后还要降，而特斯拉的车主们都认为，一旦开上特斯拉，就很难再开回到传统车了，智能手机也是如此，用了智能手机也不会再回到普通手机。可以得出一个结论：智能化的产品不是来竞争的，而是来消灭所有竞争对手的。

这就是智能产品的可怕之处。

企业智能化的转型，决不是用智能化的手段去生产以前的产品。其真正原因：企业若要生存，就必须生产智能化的产品，而智能化的产品必然需要智能化的系统来支撑。

企业智能化，势在必行。

(全文完)