



Views & Comments

关于面向智能制造的设计的若干思考

David W. Rosen^{a,b}^a The George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA^b Digital Manufacturing and Design Centre, Singapore University of Technology and Design, Singapore 487372, Singapore

1. 引言

随着智能制造能力的提升，人们可能会问，我们是否应该结合这项新技术的优势重新定义面向制造的设计（DFM）。如果答案是肯定的，那么我们将如何定义面向智能制造的设计（DFIM）？此外，云计算、数据分析、人工智能（AI）还有物联网（IoT）等与先进制造技术的集成催生了所谓的新一代智能制造[1]。这种新一代智能制造能力将使转型的新产品和服务具有前所未有的质量、响应能力和效率。

与此同时，产品变得更加智能化。智能手机、自动驾驶汽车、家用智能电器以及许多其他产品彻底颠覆了人们对于产品功能及其交互性的期望。例如，智能手机产品的意义并不仅仅是一款设备；相反，它是设备、用户交互语言、通信基础设施以及计算基础设施的复杂组合。此外，用户不只使用该设备来单纯实现其物理功能，而是基于基础设施的支持使用多样化的服务。

新一代智能制造系统（NGIMS）的开发与转型产品的开发密切相关。两者都利用新技术进行计算与通信。新一代智能制造技术以及对制造能力日益增长的需求推动了技术进步，从而推动了这类产品的发展。这些产品均整合了客户所期望的服务。因此，产品设计将不再仅仅局限于实体设备的设计。相反，设计必须包含设备、基于设备的服务以及支持这些服务的基础设施。因此，本文的目的是探索DFIM的新范式，其中包括产品服务系统（PSS）的设计以及起支持作用的智能制造基础设

计。

传统意义上的DFM与面向装配的设计（DFA）更专注于理解制造过程约束以及如何针对过程能力和这些约束进行设计[2]。相比之下，面向增材制造的设计（DFAM）在DFM/DFA方法的基础上进行了拓展，专注于发挥增材制造（AM）的独特能力[3]。也就是说，我们鼓励设计者创造性地探索新的设计概念，以便设计出不能通过传统工艺经济地生产的产品。DFIM是一种适用于不确定性程度高的环境的整体设计，因为它更类似于DFAM而非DFM与DFA，但又在范围上有着明显扩展。随着DFIM的应用，设计人员可以探索新的服务方式、商业机会，以及全新的设备。然而，他们应当从考虑传统DFM/DFA实践的方式出发，以此来衡量设计过程中用户界面、通信、计算基础设施以及制造过程的局限性。

本文将对我们讨论的新一代智能制造环境进行全面描述，并对转型的新一代智能产品的特点进行介绍。随后关于PSS设计的简介将为我们提供重要的方法论。最终，我们将建立一个DFIM框架，将所有节点链接在一起，融会贯通形成一个整体以总结全文。

2. 智能制造环境

在过去的20多年中，关于智能制造系统的文章已有很多。由于计算能力与功能的惊人增长，同时伴随着网络及人工智能技术的发展，我们在通信、计算机以及人

工智能等技术相互融合的大背景下实现了将现代思维引入制造技术领域。周济等[1]提供了关于智能制造本身及其随时间演变的重要论述。他们确定了智能制造发展的三个主要阶段：数字化制造、数字化网络化制造以及新一代智能制造。

计算机在生产中的广泛应用为制造业开启了新纪元，它见证了数控（NC）和计算机数控（CNC）的发展，而计算机数控技术的成熟则意味着数字化制造时代的到来。当计算机网络与互联网愈加普及之后，智能制造的第二阶段——数字化网络化制造逐渐发展成熟。其中，机器设备、工作单元、工厂车间甚至企业和供应链均可以被集成在一起。随后应运而生的信息物理系统（CPS）概念将信息系统定义为人与机器之间的媒介。而随着时间的推移，信息系统承担了越来越多的任务，实现了一定程度的自动化，这使得人类操作员从大量细枝末节的具体制造工作中被解放了出来。

在NGIMS发展的第三阶段，人们利用人工智能和机器学习技术的快速发展，为作为媒介的信息系统添加智能与监督元素。此外我们注意到随着机器学习技术的应用，NGIMS能够随着时间的推移进行学习并调整以提高其自动化能力。周济等[1]如图1所示对NGIMS进行了阐述。其中，信息系统依赖于机器设备以及工厂车间的大量传感器来获得制造系统的实时（或接近实时）视图。而利用该数据流，NGIMS便可以对操作的许多方面进行分析，可以识别与诊断问题，做出一些决策，并对系统施加一定程度的控制，这样就不会因为一些次

要问题而给人类操作员以及管理人员带来困扰。通过机器学习技术的集成，我们期望NGIMS可以随着时间的推移进行学习以提高其性能，并可能承担更多的角色与责任。

众所周知，术语“工业4.0”已应用于这类新兴的NGIMS以及由NGIMS支持的企业实践。对我们而言重要的是要理解未来的制造系统将是混合系统，该系统包含人类与机器人操作员，包含增材制造、减材制造与成型过程，也包含信息系统与物理系统[4]。需要我们注意的一个重要限制因素是物理技术与物理系统（而非信息），因为计算与通信系统相对而言更易扩展。

从DFIM的角度看，最重要的是提高制造系统的能力，提高其可信赖程度和可靠性，并在系统中集成可用于新一代智能产品制造的各种开发技术。为满足NGIMS所需，计算基础设施以及通信基础设施非常重要。NGIMS中信息系统的核心即是数字孪生理念——机器设备、工作单元、生产线或工厂的数字表示。我们可以对这些数字孪生系统进行数据分析与模拟，以便对其状态进行知识获取，对其维护需求以及重大运营问题等进行预测。相同的这些概念与能力可以被拓展到智能产品上面，并为这些产品的设计带来更多的方法与机会。

3. 新一代产品

我们很可能会看到一系列沿袭智能手机模式的新产品——这些产品是由实体产品本身以及大规模的线上系

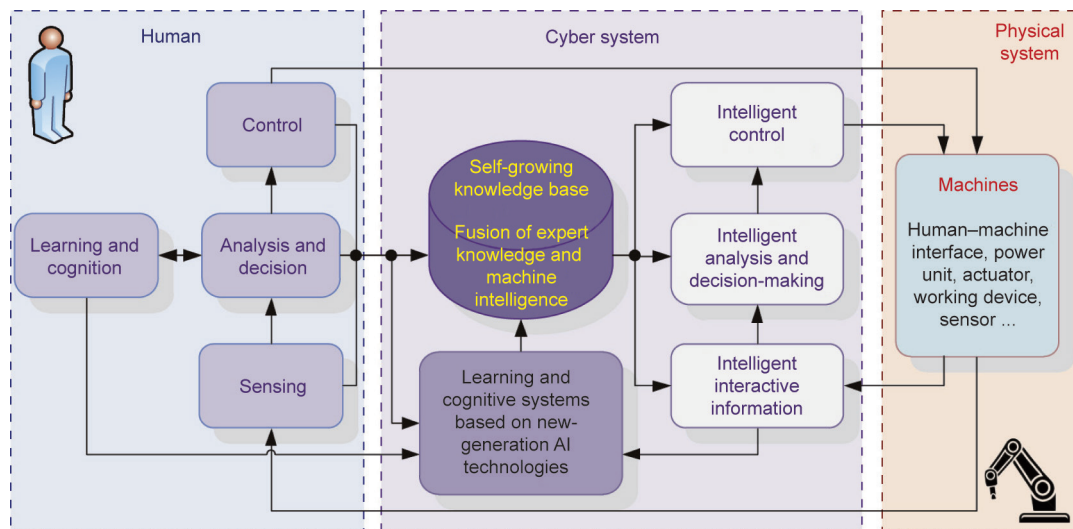


图1. NGIMS示意图[1]。

统组合而成，其线上系统是由信息系统与计算能力相结合而成的，可以提供广泛的服务。新一代产品具有以下特点：

- 对消费者和运营环境的适应性和响应性；
- 集成与物联网相连的嵌入式传感器；
- 存在产品的数字孪生；
- 提供自动更新的软件和基于云端的功能；
- 提供预测性的产品维护；
- 存在实体产品与服务的组合。

我们正见证着以生产为基础的服务业和服务型制造业的整合发展。当下的趋势即是整合发展：公司将辐射出系列的产品与服务。为了设计这一复杂的系统，我们可以利用PSS设计方法。

4. 产品服务系统设计

产品服务系统（PSS）的概念于20世纪90年代末被引入。对于PSS，一个值得我们注意的定义是“PSS是一种比起关注销售产品的实物价值，更关注产品与服务在整个产品生命周期中的效用价值的创新战略。”[5] 根据这一定义，Maussang及其同事[6]指出，PSS系统由彼此相关的物理对象和服务单元组成，其重点是为客户提供功能。他们进一步解释说“物理对象是执行系统基本功能实体，而服务单元是确保整个系统顺利运行的实体（主要是技术层面）”。几种类型的PSS均已被人们所定义。其中，面向使用和结果导向的类别特别引人注目，因为它们专注于交付的使用或服务而非严格依赖于产品本身[7]。而对于以结果为导向的PSS类型，客户购买的是其服务而不是实体产品本身，尽管产品通常是供客户使用的[8]。

非常重要的PSS设计途径是为工程设计人员提供与系统整体要求相关的规范[6]。为了开发出成功的PSS，必须考虑整个系统，包括物理对象与服务单元。功能分析法[9]利用了交互作用图和功能框图，可以用来弥合系统方法与产品实际开发之间的差距。结构化分析与设计技术表示也被用于描述基于一组连续活动的场景。在上述我们提出的设计途径当中，一旦识别出主要的物理对象与服务单元，我们就会应用操作场景来描述系统。上述工具以及功能场景已经被提议用于设计一致的PSS。理论状态参数下的接收器[7]可以捕获客户需求，以刻画客户状态的变化。这种状态的变化代表了客户所

感知到的价值。在第6节中，我们会继续讨论PSS设计相关的主题，其中包含了对于NGIMS设计方法框架的讨论。

5. 面向智能制造的设计的框架

本文提出了一个面向智能制造的设计（DFIM）的框架，可用于一种PSS方案以构建智能产品及相关后端系统，该框架由NGIMS衍生而来。下文将对这个框架进行介绍，对操作视角进行概述并简要介绍PSS与数字孪生的工业应用实例。

5.1. 概述

从较为高层的抽象视角来看，我们可以看到消费者与PSS进行交互，也就是说，消费者通过与物理产品进行交互来请求服务并随后享受这些服务。该过程如图2所示。在PSS中，“服务”部分充当客户与产品之间的无形中介。PSS中的这一部分扮演着产品用户界面的角色，允许消费者请求服务然后接收和使用它们。

在PSS的后端，产品中的嵌入式传感器与基于云端的产品支持环境进行通信，云端通过收集传感器数据来建立与维护产品的数字孪生。数据分析可用于提取重要的使用数据并更新产品状态。随后我们可以对处于当前状态的产品进行模拟，以确定是否需要维护或软件更新。在基于云的产品支持环境能够提供服务的范畴之内，数据分析可以帮助我们确定是否必须升级提供服务的软件。

我们可以清楚地看到在如图2所示的示意图中看到当前PSS（如智能手机）的操作模式。例如，如果客户想要找到新的应用程序，他们会通过手机的用户界面导航找到App Store图标，启动它，然后浏览检索到的应用程序。在PSS的后端，我们需要一个大范围的基于云端的系统来收集、编目、存档、验证以及检索应用程序。然而，当下的大多数PSS缺乏数字孪生以及通过对产品状态持续跟踪来实现的服务。这种情况很快就会得到改善。

5.2. 操作视角

仔细观察PSS的运行将为我们提供更深入的见解。首先我们应当考虑后端基于云端的产品支持环境。正如上文所述，数字孪生是一种产品的表征，传感器的数据流进入该环境使得产品不断更新。而要想更新产品状

态，执行数据分析并进行产品状态的模拟，该环境必须具有一定的控制和决策功能。理想情况下，一个智能的支持环境还应该具有一定的监督执行功能，以便它可以随着时间的推移学习，优化其性能及PSS的性能。

同样，PSS应该有了解消费者，以便提供更好、更精准的服务。换句话说，PSS应当拥有有关一个客户的数字孪生，并将此数据表示作为数据分析和模拟的基础。

图3对PSS与客户交互的详细视图进行了更详尽的展示，其中包括了含有“服务”部分和基于云端的支持环境的操作部分。与图1中的操作部分以及学习循环类似，预计未来的智能PSS将具有关于产品以及消费者的更新过的且具有分析能力的数字孪生。传感器的数据对控制、分析和决策活动起支持作用，从而使PSS能够响应并适应消费者需求以及产品的使用环境。此外，PSS将具有随着系统运行而学习的能力。

当然，对于该系统，客户也拥有控制、分析、决策以及随着时间的推移对产品及其服务进行学习的能力（为清晰起见，图中未显示）。

5.3. 实例

下文将介绍把数字孪生技术应用于智能PSS的几个工业实例。通用电气公司将传感器嵌入其涡轮发电机当中，最近还将传感器嵌入其飞机发动机中，以收集实时数据[10]。结合新型检测机器人，公司可以应用数据分析来对维护需求进行预测并向其客户提出建议。在开发新产品时也可以使用这些数据和预测模型。

特斯拉为其销售的每辆汽车构建数字孪生模型[11]。通过分析从汽车收集的数据进行问题识别，并准备软件更新以解决这些问题。企业通过互联网提供软件更新，因此用户即可连续使用汽车而不需要专程检修，这大大改善了用户体验。在未来，随着特斯拉和其他公司对于自动驾驶汽车的继续开发，我们可以很容易想象，对于诸如驾驶条件（即日/夜和天气）、道路状况（如路径曲线和上/下山）的数据，以及驾驶员行为、事故发生等数据，可以进行汇总和分析，以对汽车模型进行优化。此外，车企可以分析来自单个车辆的数据并有针对性地提供性能的微调。对于传统的人类驾驶模式，除了汽车的数字孪生之外，针对驾驶员的数字孪生模型将能

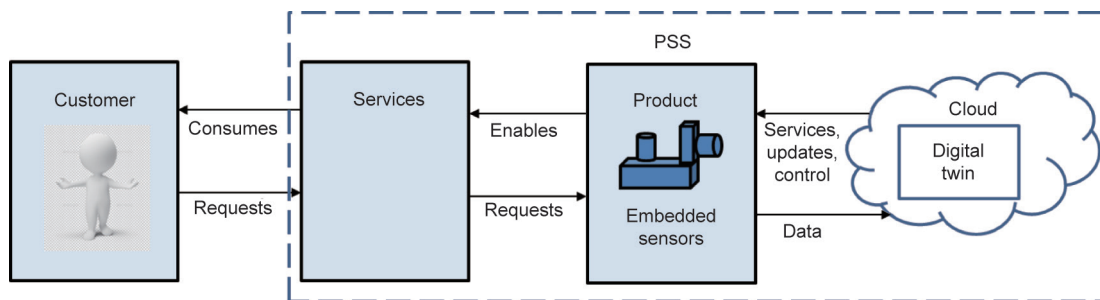


图2. PSS内部交互的高层抽象视角示意图。

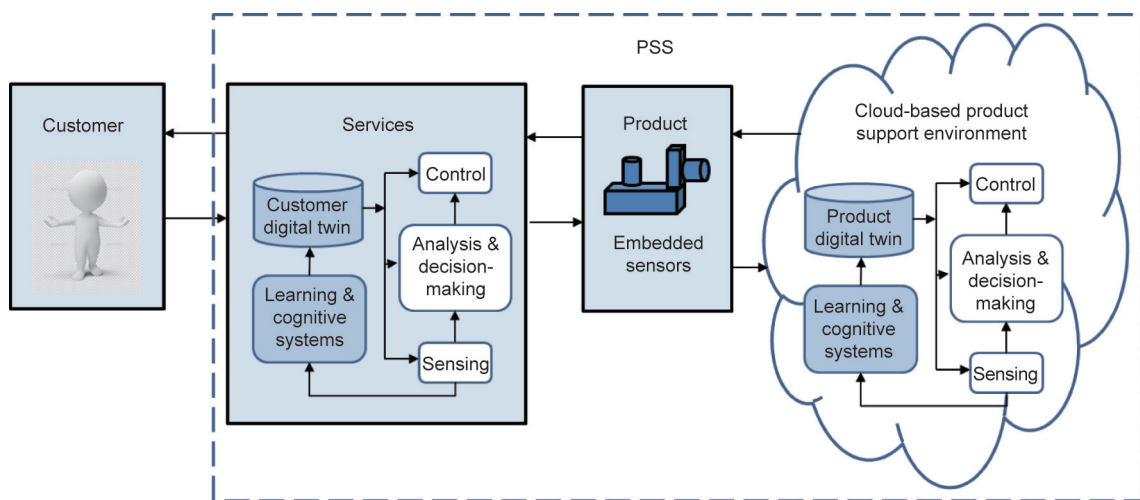


图3. 操作视角下的智能PSS示意图。

够在危急情况下基于典型的驾驶员反应进一步微调汽车的性能。

在新产品的开发过程中，拥有数百万公里车辆数据的公司能够通过数据模拟车辆性能以及驾驶员反应来评估将采用的变更设计的影响。在更广泛的意义上讲，收集产品使用数据以及用户的行为、反应数据将有助于开发模拟模型，这些模型可以为设计决策提供信息，权衡设计备选方案之间的利弊，并对市场接受度水平做出预测。

6. 对面向智能制造的设计的影响

6.1. 基本原则

到目前为止，本文已经解释了智能PSS是什么，并展现了它与智能制造系统共享技术与特征的特点。那么DFIM又如何呢？正如我们所讨论的那样，DFIM与传统的DIF几乎没有相同之处。相较而言，其与DFAM则有更多共同点，因为DFAM的两个主要目标是：探索新的设计空间以利用AM的独特功能，以及以满足制造工艺约束的方式设计物理工件。因此DFIM亦更多地关注如何利用智能制造系统的功能与技术优势，而非将注意力集中在制造约束上。在该视角之下，如图4所示，DFIM由两个不同的部分组成，这两部分的设计是面向更多可能性以及面向机遇的设计，但同时也是一种满足约束的设计。

在随后的章节对这些方面进行进一步探讨之前，我们将介绍DFIM的一些基本原则：

- DFIM包括将由智能制造系统制造的未来智能PSS设计。

- DFIM的任务范围不仅仅是物理产品的设计；除了后端产品支持环境的设计以及物理产品的设计之外，它还包括对以物理设备为载体所提供的服务的设计。

- 由于开发产品支持环境需要非常大的投资，因此设计人员应计划设计多个产品系列和若干代产品，以便摊销投资。

6.2. 面向可能性与机遇的设计

DFIM的第一方面以全新的产品与服务理念还有新技术为基础，侧重于面向可能性与机遇的设计。该方面注重有创造性地探索新兴客户需求的解全新决方案。

我们所提出的DFIM的基础是PSS的相关设计方法。而其他支持PSS设计法的设计方法可以在工程、商业/营销以及工业设计文献中找到。下文强调的三种具体方法非常重要，但其他许多方法也与此相关。

根据PSS相关文献[12]，PSS设计方法涉及由PSS提供的：①面向客户的功能；②客户价值的测量；③使用场景；④PSS的功能结构；⑤产品架构；⑥产品要素的规格。出于我们的目的，我们应当将这种通用方法应用于由重要的产品支持环境所支持的智能PSS。

PSS设计方法的前三个要素强调了识别消费者真正想要与期待获得的服务的重要性，然后开发度量标准来衡量消费者对这些服务的价值感知。其中一个非常重要的考量因素是通过想象消费者在整个生命周期之中不同阶段的切实需求来对多年的PSS生命周期做出规划，同时想象PSS系统随着时间推移通过学习产品和用户能够提供哪些新服务。尽管会存在一些变化，以用户为中心的设计方法[13]当然也可以应用。但设计师应该更着重考虑消费者的期望和要求以及PSS系统的能力将如何随

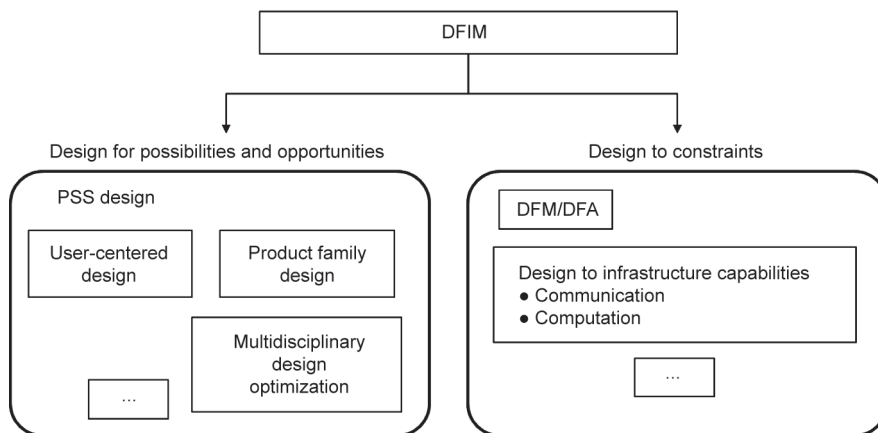


图4. DFIM包括两个方面：面向更多可能性与机遇的设计，以及满足约束的设计。

时间推移而发展。甚至，我们也正在开发让客户参与到自己产品的设计中的方法[14]。

当设计人员考虑最后三个PSS设计元素时，他们需要开发PSS架构，并就如何将功能合理地分配给物理产品、用户界面以及后端环境做出重要决策。他们还需要考虑PSS生命周期内通信与计算基础设施的演变。例如，对于5G无线网络的设计将与围绕4G的设计迥然不同。PSS元素的功能分配也可能随着时间的推移而发展，设计人员也应该考虑到这种潜在的演变。在上文特斯拉公司的案例中，我们突出讨论了这些问题，因为该公司可以通过软件更新识别出所有远程优化车辆性能的机会。制造商应当获得多少访问车辆功能的权限？客户自主调节的范围又应当有多大？通信基础设施又是否能够承担数据收集与软件升级所带来的负担？上述问题以及其他许多相关问题都是我们在设计过程中必须考虑、解决的。

设计方法的相关文献包含了对于产品设计系列的广泛研究，即设计一组功能、能力和（或）尺寸范围广泛的类似产品[15]。该产品系列可能会共享核心技术、功能或组件。例如，汽车被设计为产品系列，其产品系列具有各种尺寸（小型、中型、大型），具有不同款式（轿跑车、轿车、跑车）以及差异化的定价。产品系列设计的方法包括对恰当地提供所需范围的产品体系结构的识别，同时尽可能多地共享技术以及相关组件[16]。识别通用平台以及设计选项组合是设计方法中的重要一步[17]。

另一类产品系列设计的相关文献考虑了产品系列设计对产品代际划分的影响（相关研究详见参考文献[18]）。在这种情况下，我们对产品系列的演变进行提前规划，以便在不同的系列中引入新的功能。这种方法似乎与智能PSS设计高度相关，这可以确保后端环境可以随着PSS的发展支持未来的产品开发。

多学科设计优化（MDO）领域[19]也可能在PSS设计中发挥作用。在MDO环境中，物理产品、服务交付系统和其后端环境可以被视为不同的“规程”。也就是说，它们是待设计的非常不同类型的子系统。在设计的过程中，我们需要解决的重大挑战是：子系统之间彼此耦合，从消费者的视角来看，应当将子系统集成在一起形成紧密耦合的系统。虽然MDO方法最初是为航天工业而开发的，但该方法其实已得到广泛应用[20]。在航空航天领域，耦合竞争的子系统往往包括结构、推进、航空以及有效载荷等几部分。MDO方法涉及了大规模、

层次化和耦合优化问题的公式化思路以及求解方法。在确定了PSS的体系结构后，我们或许可以采用这些方法对其进行优化。

6.3. 设计约束

DFIM的另一个观点涉及智能制造系统能力的构建，同时应当尽量避免其约束。从这个角度来看，我们主要关注的是物理产品的设计，将利用NGIMS进行制造。我们可以期待NGIMS能够具有稳定、可靠的制造能力，因为该系统将被（使用许多传感器）广泛监控，可能出现的问题将被快速识别，而系统将随着时间的推移而学习以及改进。

此外，在产品的设计当中，我们应当根据相关制造工艺的能力以及约束来进行调整。从某种意义上说，这即是传统的DFM方法。但我们有必要对预期的市场规模、预期的响应时间以及潜在的客制化机会等内容进行深入研究。

将产品的制造分为两类将会非常有帮助：一类是将被大量生产的产品系列；另一类是为单个产品模具、代际产品甚至是客制化产品提供的差异化组件与模块。前一种产品的制造属于传统的DFM，应实施DFM与DFA的标准方法。而后一种情况则由于可能组合情况的爆炸式增长所带来的复杂性而存在一定的挑战。下面我们将针对这两个类别进行进一步探讨。

由于产品系列的设计元素在每种产品中均会得以体现，因此系列中的组件产量一般会比某些独立的产品组件大得多。因此，如果这些部件以大批量生产的方式投产，则传统的制造工艺可能会更适宜。在大批量生产中，可以压力较小地收回前期对于硬模以及基于人力的生产工艺规划的投资。尽管如此，产品开发人员仍然需要选择能够按照预期质量制造零件的制造工艺，同时应当尽量使生产过程经济且快速，以满足消费者要求的交付时间。或者，产品的开发组织可以决定将平台生产任务的部分或全部进行外包，这取决于组织是否认为它可以在产品系列的整个价值链中做出高附加值的贡献。

而对于组件和模块而言，制造过程的决策很大程度上取决于预期的产量。对于小批量的生产而言，不需要太多大规模的硬模投资或是基于人力的工艺流程规划，这将对我们的生产工艺十分有利。为一个单独的产品注射成型几十甚至几百个零件将导致昂贵的单价以及较长的交货周期。相比之下，AM流程的引入可能有很多好处，该工艺不需要硬模，且仅需最低限度的人工干预。

通常，AM的零件成本相对于生产量是恒定的，交货期仅需几天或更少。对于金属件而言，五轴加工或许是一种可取的方法，但前提是加工过程不需要特定零件的夹具，并且过程规划可以自动化。而制造工艺的选择方法已经得到了长足的发展[3,21]，甚至已经被标准化[22]。

当然，设计约束也是源于作为PSS一部分的计算与通信等基础设施系统的局限性。在PSS设计期间，我们应当对这些局限性予以量化和考量。还应当考虑它们在PSS预期生命周期之内可能存在的演变。然而，我们可以预见，由计算和通信系统而造成的约束不会像物理产品的制造约束那样对我们的生产施加那样重大的影响。

7. 总结

本文从新一代智能制造系统的角度对未来智能产品的设计进行了讨论，旨在引起人们对于该问题的关注与思考。如果我们设想智能产品的未来，那么我们可以从设计与制造此类产品需要什么的角度来进行考虑。新一代智能制造的概念、实践以及系统的出现为考虑DFIM可能的需求提供了额外的动力。

在本文之中，我们对如下论点进行了强调：

(1) DFIM始于新一代智能产品的设计理念。

(2) 智能产品可以被看做PSS，也就是说，智能产品是通过与大型计算和通信基础设施（即利用基于云的计算和物联网技术）交互向客户提供服务的物理产品。因此，DFIM与PSS的设计方法密切相关。

(3) DFIM包括两个主要方面：

- 面向可能性与机遇的设计，旨在开发新的设计概念并探索这些概念所开启的全新的设计空间（PSS设计方法是实现这一目标的主要手段）；

- 面向约束的设计，利用传统的DFM和DFA方法，以规避制造过程约束所造成的限制。

(4) 本文未提出全面的DFIM方法，因为这样做还为时过早。在该领域确立可靠的设计方法之前，还需要更多的调查与设计经验的积累。

希望本文的发表将促进DFIM研究者群体的形成，这将是未来开发、研讨和改进包含NGIM的未来智能产品的一支生力军。

Acknowledgements

The author acknowledges support from the Digital Manufacturing and Design (DMandD) Centre at the Singapore University of Technology and Design, supported by the Singapore National Research Foundation.

References

- [1] Zhou J, Li P, Zhou Y, Wang B, Zang J, Meng L. Toward new-generation intelligent manufacturing. *Engineering* 2018;4(1):11–20.
- [2] Bralla JG, editor. *Design for manufacturability handbook*. New York: The McGraw-Hill Companies; 1999.
- [3] Gibson I, Rosen DW, Stucker B. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. 2nd ed. New York: Springer-Verlag; 2015.
- [4] Wang B. The future of manufacturing: a new perspective. *Engineering* 2018;4(5):722–8.
- [5] Tan AR, McAloone TC, Gall C. Product/service-system development—an explorative case study in a manufacturing company. In: Bocquet JC, editor. *Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design*; 2007 Aug 28–31; Paris, France; 2007. p. DS42_p_334.
- [6] Maussang N, Zwolinski P, Brissaud D. Product-service system design methodology: from the PSS architecture design to the products specifications. *J Eng Des* 2009;20(4):349–66.
- [7] Tomiyama T. Service engineering to intensify service contents in product life cycles. In: *Proceedings of the Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*; 2001 Dec 11–15; Tokyo, Japan. Piscataway: IEEE; 2001. p. 613–8.
- [8] Yang X, Moore P, Pu JS, Wong CB. A practical methodology for realizing product service systems for consumer products. *Comput Ind Eng* 2009;56(1):224–35.
- [9] Normes NF X50-151. *Expression fonctionnelle du besoin et du cahier des charges fonctionnel*. AFNOR standards. Paris: AFNOR Group; 2007. French.
- [10] Digital twin [Internet]. Boston: General Electric Company; c2019 [cited 2019 Mar 18]. Available from: <https://www.ge.com/digital/applications/digitaltwin>.
- [11] Schleich B, Anwer N, Mathieu L, Wartzack S. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Ann Manuf Technol* 2017;66(1):141–4.
- [12] Vasantha GVA, Roy R, Lelah A, Brissaud D. A review of product-service systems design methodologies. *J Eng Des* 2012;23(9):635–59.
- [13] Garrett JJ. *The elements of user experience: user-centered design for the web and beyond*. 2nd ed. Berkeley: New Riders; 2010.
- [14] Risdiyono PK. Design by customer: concept and applications. *J Intell Manuf* 2013;24(2):295–311.
- [15] Simpson TW, Bobuk A, Slingerland LA, Brennan S, Logan D, Reichard K. From user requirements to commonality specifications: an integrated approach to product family design. *Res Eng Des* 2012;23(2):141–53.
- [16] Ulrich K. The role of product architecture in the manufacturing firm. *Res Policy* 1995;24(3):419–40.
- [17] Kuang J, Jiang P. Product platform design for a product family based on Kansai engineering. *J Eng Des* 2009;20(6):589–607.
- [18] Jiao J, Simpson TW, Siddique Z. Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review. *J Intell Manuf* 2007;18:5–29.
- [19] Balling RJ, Sobieszcanski-Sobieski J. Optimization of coupled systems—a critical overview of approaches. *AIAA J* 1996;34(1):6–17.
- [20] Ferguson S, Kasprzak E, Lewis K. Designing a family of reconfigurable vehicles using multilevel multidisciplinary design optimization. *Struct Multidiscipl Optim* 2009;39(2):171–86.
- [21] Ponche R, Hascoet JY, Kerbrat O, Mognol P. A new global approach to design for additive manufacturing. *Virtual Phys Prototyp* 2012;7(2):93–105.
- [22] ISO, ASTM 52910:2017. *Additive manufacturing—design—requirements, guidelines and recommendations*. ISO standards. Geneva: International Organization for Standardization; 2017.