

# 谢友柏设计科学研究基金项目 年度报告

项目名称：基于差异化功能认知的广义功能概念体系构建研究

负责人：武春龙

依托单位：河北工业大学

通讯地址：天津市北辰区西平道 5340 号

邮政编码：300401

电子邮件：[wuchunlong@hebut.edu.cn](mailto:wuchunlong@hebut.edu.cn)

电话：15822618624

## 1、本年度原定研究计划主要包括以下四个方面：

- 1) 调研复杂数字孪生技术在智能产品服务系统中的虚实交互过程中应用；
- 2) 基于 MBSE 与流分析的数字孪生功能模型构建方法的创建，建立一套基于 MBSE 与流分析的功能模型构建框架；
- 3) 分析并改进传统 RFLP（需求-功能-逻辑-物理）模型存在的局限性；
- 4) 利用改进后的新方法解决实际问题。

## 2、本年度研究工作中取得的重要进展：

本年度以中汽研（天津）汽车工程研究院、中国兵器工业集团中国北方发动机研究所等企业为对象进行了调研。

以面向智能产品服务系统（SPSS）的数字孪生功能建模方法所用的基础理论，包括数字孪生理论，数字孪生五维模型，基于模型的系统功能（MBSE）和流分析模型等，提出面向智能产品服务系统的 SMFA（SysML-Flow Analysis）建模方法，该方法使用 SysML 建模语言、依托于 MagicGrid 以及 M-design 软件设计平台。数字孪生及其五维框架为后续进行 SPSS 的功能建模，实现虚拟和物理世界集成交互提供了五个维度的建模视角，MBSE 为 SPSS 的全方位功能建模引入了系统化的设计和分析流程，流分析模型通过识别物料、能量和信息流，为设计提供了系统分析和改进机制。

之后，为了客观评价提出的 SMFA 建模方法的建模结果，提出了基于多维综合权重评价法。基于多维综合权重评价法在制定评价指标时遵循全面性、客观性、可行性这三大原则；评价时通过提取数据中最重要的特征来减少数据的维度，从而简化了数据结构，减少了分析的复杂性，而且能够保留关键信息，使分析更加高效准确；为了降低甚至消除主观性判断导致对结果的影响，基于多维综合权重评价法还使用熵权法计算各评价指标的权重，进而得出整体评分。

最后，以发动机智能产品服务系统为对象，使用 SMFA 建模方法搭建车用发动机智能产品服务系统功能模型，从物理实体维度、虚拟实体维度、服务系统维度、孪生数据维度分别进行功能建模。在物理实体维度上，细化需求收集、构建系统用例、分析系统结构、功能分解，最后进行物理结构的集成与模型图完善；

在虚拟实体维度上，进行上下文系统用例及功能分析、功能流建模仿真、建立追溯矩阵；在服务系统维度上，进行需求识别与模型化、用例场景建模以及最重要的服务功能划分与服务功能内部建模；在孪生数据维度上，实现数据收集功能，数据处理功能，数据分析功能，数据应用，数据存储功能。搭建好以后，使用之前提到的多维综合权重评价法来客观评价建模结果，分别计算面向 4 个维度的 29 个指标并建立权重系数表，实现了数据降维与客观化的判断矩阵处理。最后的结果表明 SMFA 建模方法具有良好的评价效果。

传统的需求-功能-逻辑-物理模型（RFLP 模型）通过将整个产品开发分解为需求层、功能层、逻辑层、物理层这 4 个层级，帮助设计和工程团队以结构化的方式思考和解决复杂的设计问题，从而实现从需求向物理实现的转化，确保最终物理产品能够满足既定的需求和功能。然而针对数字孪生建模上，传统的 RFLP 模型无法进一步深入分析各功能的实现所需的系统行为和行为变化，不能提供足够的灵活性来满足这些需求；忽略了功能内部的具体实现细节以及内部所需数据等关键要素的详细分析，进而限制了所构建的数字孪生模型在响应实时数据变化方面的有效性；功能层向逻辑层的转换过程中未能充分考虑所需的映射深度，未能捕获功能实现的全貌，特别是在系统行为的多样性和系统运作的连贯性方面，使得最终构建的数字孪生模型缺乏必要的细节。

面对以上这些问题，将 RFLP 模型进行改进，提出了需求-功能-行为-逻辑-物理模型（RFBLP 模型）。RFBLP 模型由 5 个层级组成，分别为需求层、功能层、行为层、逻辑层以及物理层，每一层级都是下一层级的基础，通过分解系统设计和分析的复杂过程，从抽象层级为开发和理解数字孪生模型提供详细的结构化方法。针对每一层级，都提供了对应的详细建模方法。

最后利用该方法对涡轮增压器进行了数字孪生模型构建。在涡轮增压器数字孪生模型需求层建模上，将原有的数字孪生模型的需求进一步总结，归纳为面向涡轮增压器数字孪生模型的具体需求，并采用层次分析法中的一级指标对目标层的权重分配和一致性检验对各个需求的重要性进行评价，全面了解不同利益相关者对于涡轮增压器数字孪生模型的期望和需求。在涡轮增压器数字孪生模型功能层建模上，以涡轮增压器数字孪生模型的需求层模型为起点，利用该模型来定义系统的用例并推导出涡轮增压器数字孪生模型的顶层功能，从而完成从需求层向

功能层的映射，并对顶层功能进行分解以及对顶层功能对应的子功能之间的交互关系进行分析，从而构建出功能架构模型。在涡轮增压器数字孪生模型行为层建模上，从行为层面深入分析各个子功能的实现方式，实现从功能层向行为层的映射，包括子功能行为映射、行为架构建模与行为架构模型集成。在涡轮增压器数字孪生模型逻辑层建模上，以行为层的分析结果作为输入，对行为层定义的行为进行结构化分析，根据结构化分析方法，将整个涡轮增压器数字孪生模型的逻辑系统分为数据采集子系统、数据传输子系统、数据存储子系统和模型更新子系统，最后基于以上结果进行逻辑架构建模。在涡轮增压器数字孪生模型物理层建模上，根据涡轮增压器数字孪生模型逻辑子系统划分以及构建的逻辑架构模型，物理层将对其中各个逻辑子系统进一步深入分析，并将各个逻辑子系统映射为物理实体，并分析各个物理实体的端口类型以及各物理实体之间的交互关系，构建涡轮增压器数字孪生模型的物理架构。在完成 5 个层级的建模工作以后，依据物理层建模中物理架构模型，进行数字孪生平台的选择、数据采集与存储机制的设计、涡轮增压器 3D 静态模型的构建以及数据驱动的涡轮增压器动态模型的实现与验证。最终结果验证了所提数字孪生建模方法的可行性。