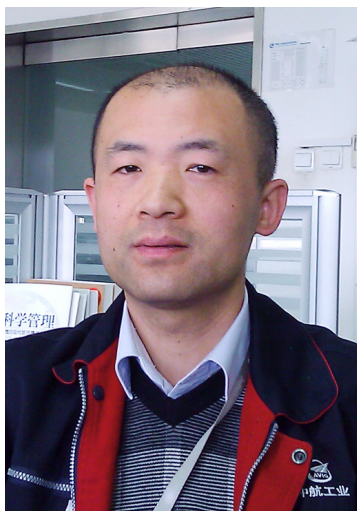


# 航空发动机集成研发技术

## Integrated Research and Development of Aeroengine

金航数码科技有限责任公司 赵大泉 李 涛 孟祥伟  
北京索为高科系统技术有限公司 雷 健



赵大泉

从事复杂工业产品的多学科协同优化及航空产品的集成研发研究工作。

航空发动机研发是一项高度复杂的系统工程,其业务复杂性表现在:包括发动机总体、压气机、涡轮、控制等各分系统和叶片、机匣、齿轮等零部件的多个层次;从专业上讲,包含了结构、强度、气动、燃烧、传热等众多学科,且各专业间相互制约、紧密耦合;要满足航空发动机在高温、高压、高转速的极端工况下的高可靠性工作,需要进行多轮从简至繁的设计循环。

然而,对于这样一种复杂的工程过程,目前的研发方式还是非系统化

的,专业软件工具使用门槛高,设计流程没有打通,缺乏设计规则和方法库引导各个设计环节的工作,造成设计过程的人工重复性劳动较多。

从管理的角度看,航空发动机的研发过程非常复杂,存在任务密集、参与人员众多、组织协调机制复杂、人员沟通不畅、研制进度难以保障等诸多问题。同时型号研制数据分散保存,难以有效共享。产品复杂性及设计手段落后等问题导致航空发动机行业设计过程效率低,设计周期长,质量却不高,远远不能适应现代航空发动机研制任务的要求。

要解决上述问题,需要构建一套综合化、集成化、可持续发展的集成研发平台,使其具有高度开放、灵活和可扩展的特点,并通过综合运用项目管理、流程管理、资源管理、知识工程等技术,提高研发管理效率、资源利用效率、专业设计效率,提高研发工作规范性和质量,从而提高我国航空发动机的产品设计质量及效率,进一步提升行业技术水平。

要解决上述问题,需要构建一套综合化、集成化、可持续发展的集成研发平台,使其具有高度开放、灵活和可扩展的特点,并通过综合运用项目管理、流程管理、资源管理、知识工程等技术,提高研发管理效率、资源利用效率、专业设计效率,提高研发工作规范性和质量,从而提高我国航空发动机的产品设计质量及效率,进一步提升行业技术水平。

### 国内外发展概况

#### 1 国外发展概况

从国外近 30 年的发展过程看,国外集成设计系统技术基本经历了 3 个阶段,目前正处于第二代系统的应用阶段和第三代系统的研发阶段。

第一代系统的代表是 20 世纪 80 年代出现的 FLOPS, ACSYNT 以及 IAI 的 IESP,中航工业成都飞机设计研究所曾于 20 世纪 80 年代引进 IESP 并用于歼十的全程研制。其特征是在应用程序之间开发专用数据转换和处理模块,按设计流程进行“硬”连接,数据分散存储和处理。这种系统结构对于特定的设计流程或设计思想,系统效率高,各专业数据和模型匹配性和协调性好,但系统灵活性和扩展性不好。

到 20 世纪 90 年代,出现了以 FIDO、HSCT4.0-CJOpt、ELVIS 等为典型代表的第二代系统,其特点是数据集中管理和共享访问,各个应用软件只需开发面向数据库的数据转换

程序,同时出现了运行控制系统,用于控制系统的执行逻辑以及数据存取顺序。这种系统的优点是提高了系统的灵活性和扩展性,当设计流程变化时只需改变运行控制系统的内部逻辑。但在这种系统中,数据/模型与流程是分开管理的,不能很好地在各个层次上实现设计关联,大量的模型和数据协调工作需要依靠人工方式进行。

从 20 世纪 90 年代末开始,西方发达国家发展了第三代系统,其典型代表是美国 Technosoft 公司的 AML,并在美国军方主导的相关项目中进行了尝试。第三代系统的主要特征是采用面向对象技术,通过对象之间的消息机制来实现模型和数据之间的关联。从实际应用看,这一技术可以明显减少模型协调的工作量,并提高设计循环和迭代效率,但不足之处也很明显:由于涉及面向对象的编程以及工程应用的封装,应用开发的难度很大;由于几何建模工具独立于企业 CAD 环境,当设计结果转入 CAD 环境时会丢失所有模型关联性。此外,已发展的系统没有采用流程管理技术。因此,这一代系统当前的应用

几乎全都限于产品的概念设计阶段。

## 2 国内应用现状

在国内,一些大学和科研机构已经开始过程集成、多学科设计优化、综合设计平台等方面的研究,并且有部分研究成果在各种刊物上发表,在航空航天等国防领域的设计实践中也开始了一些应用探讨。但总体看来,这些大都尚处于理论研究阶段,离实际应用还有一定的距离,尤其是在综合设计平台的研究和复杂系统的应用方面,与国外的差距比较大。

未来 10 年,“中国制造”将向“中国创造”转变,其中的关键是产品研发能力和水平的提高。航空发动机的研发是一个集设计、分析、仿真、试验、优化和管理于一体的系统工程,而 CAD、CAE、CAM、PLM 等工程软件广泛用于其中各个环节,直接决定产品研发的能力和水平。虽然中国制造业已经引进了国际上各种先进的工程软件,但却无法达到与国际军工巨头同样的研发能力和水平。究其原因,一方面是由于国内的研发管理体制与国际同行不尽相同,更重要的是我们在集成管理方面还有待加强。

## 集成研发建设构想

航空发动机的研制通常需经历方案论证、验证机研制、原型机研制、设计定型、生产定型及使用发展等 6 个阶段,如图 1 所示。

根据国内航空发动机研发的技术现状及业务需求,规划航空发动机集成研发架构如图 2 所示。

航空发动机集成研发架构可分为基础框架和业务应用 2 部分。

### 1 基础框架

基础框架包括工具集成接口、项目流程管理、过程数据管理、知识应用管理及系统集成接口等 5 部分。

#### 1.1 工具集成系统

航空发动机研发过程中会涉及到各领域的设计分析软件工具,这些工具专业性强,操作复杂,要求使用者具备一定的技术背景知识,因而在一定程度上限制了这些软件应有作用的发挥,同时也由于软件繁琐的操作过多地占用了使用者的精力。而工具集成系统是一个对专业软件进行设计、开发、测试、发布的环境,作为集成研发框架的一个重要组成部分,它提供了开放的二次开发架构以

及丰富的集成开发组件,以实现专业软件包的集成开发。

通过工具集成系统,可以实现航空发动机设计过程中知识工程、软件集成、模块化建模、统一关联模型、多学科优化的融合,与主流 CAD/CAE 软件实现无缝集成,通过设计、分析、优化环境的统一,创造符合工程习惯的软件开发集成设计模式。

通过工具集成系统建立专业软件

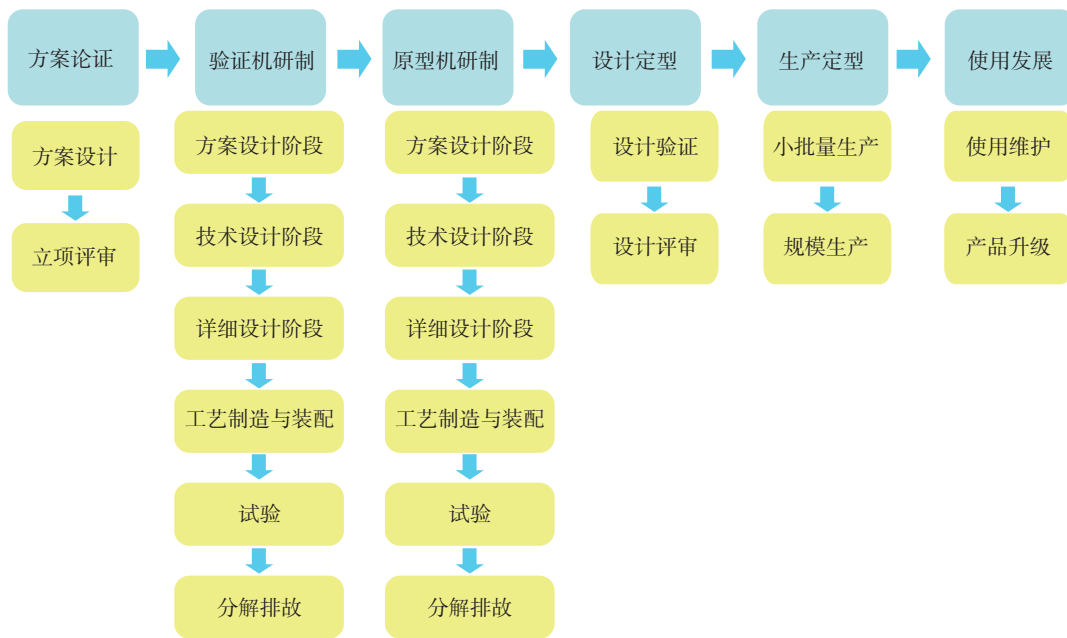


图1 航空发动机研制过程

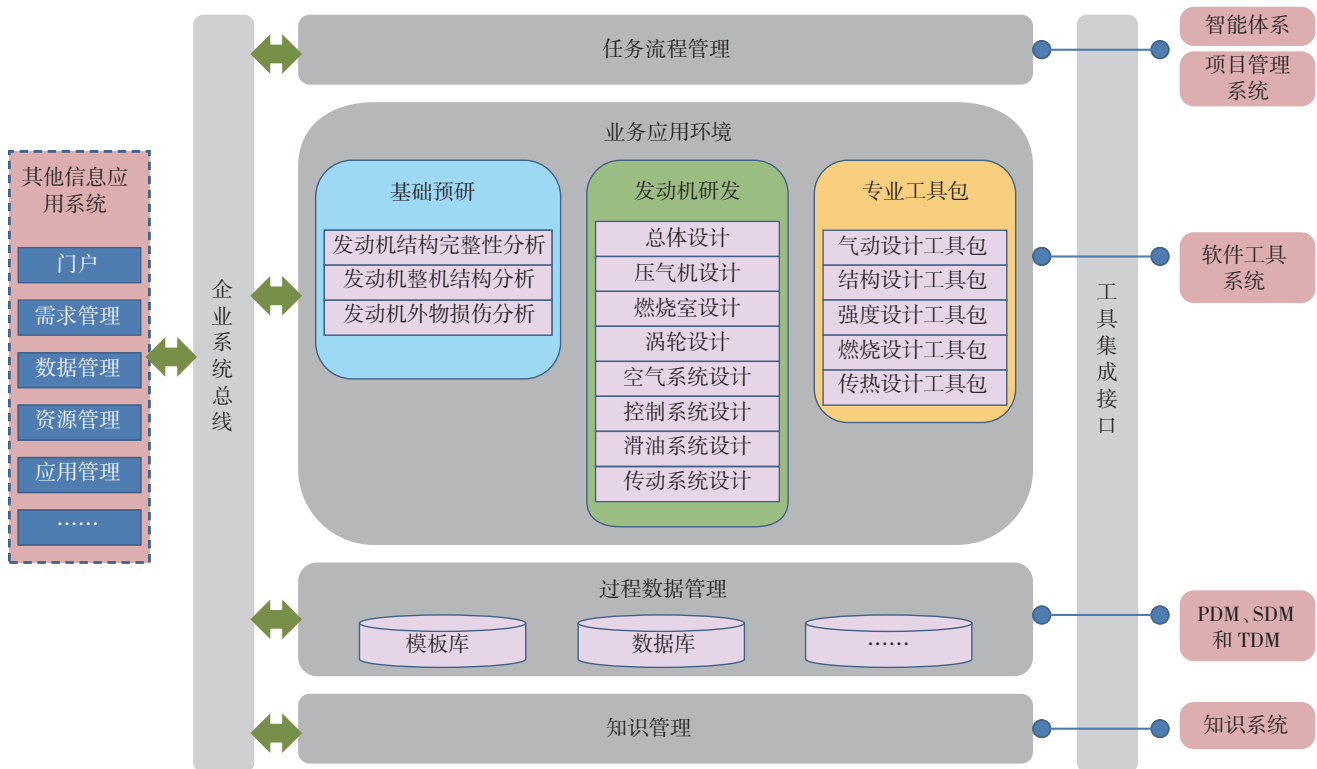


图2 集成研发框架图

包,可以实现对航空发动机设计相关专业领域中涉及的工具、方法、流程及知识的整合,从而构建解决该领域问题的快速辅助工程工具。

通过工具集成系统的构建,可以实现以下功能:

(1)丰富的组件库。

组件,是快速封装设计分析工具及流程的接口,是搭建集成应用流程的最小操作单元节点,用以实现工具操作、逻辑控制、流程驱动等功能。

工程设计过程中往往包含一系列的基础性、普遍性的操作,这些操作构成了各种设计、分析工作的最小粒度单元。根据实际工程需求,工具集成系统提供功能丰富的基本操作单元,包括公式计算、CAD操作(UG、Pro/E等)、CAE操作(Fluent、Ansys、CFX等)、数据库操作、DLL调用、Web服务调用、脚本调用、命令执行、文件解析等。通过这些基本操作单元,用户可以方便地实现对工具、方法的封装与调用,从而降低用户使用这些专业工具的难度,提高方便性和

灵活性。

(2)可视化的设计/仿真流程建立与执行。

工具集成系统可以提供设计分析流程的可视化建立,提供控制逻辑和规则(if/while/for/switch等),用于记录和表达工程设计过程中的控制关系,提供数据映射机制,用于记录和表达组件之间的数据流向关系。控制流和数据流综合的流程定制方式,使得工具集成系统可以处理实际工程中的复杂问题,也使得所定义的流程更加完善、严密。

(3)交互界面定制工具。

通过工具集成系统,用户可以使用界面设计工具方便地开发出友好、丰富的人机交互界面。界面设计工具提供了一些常用的界面控件,包括标签、选项卡、文本框、组合框、单选框、复选框等等,同时还允许用户导入自定义开发的控件。

(4)多学科设计优化。

在工具集成系统中,用户可以通过控制流、数据流的定义将不同学科

的工程组件集成起来,从而形成多学科设计流程。通过优化工具集成接口,可以实现对用户自身开发的优化工具及第三方优化器的集成,从而实现多学科设计优化。

(5)数据类型管理。

工具集成系统支持用户自定义数据类型的功能,以便与不同工具中的数据进行匹配交互。

(6)设计知识的积累和推送。

工具集成系统提供了设计笔记功能,帮助用户在设计过程中快速积累知识和经验,用于航空发动机设计过程中的知识搜索和推送。

### 1.2 过程数据管理系统

过程数据管理系统以数据为中心,统一考虑航空发动机不同设计阶段中各专业软件应用数据的存储、访问和处理,为集成研发提供一个高度统一的数据管理基础,保证航空发动机集成研发过程中数据的同步和协调,满足数据项的可追溯性要求,进而提高数据管理的质量和效率。

过程数据管理主要是对工程设

计、仿真、试验过程中设计参数、设计模型、分析模型、分析结果、试验数据、设计分析报告等过程数据以及产生这些数据的操作和过程进行管理。过程数据管理的核心是统一数据模型,如图3所示。

在航空发动机设计过程中会产生大量的数据,这些数据又散落在各专业的应用系统中。为了维护过程数据的一致性和完整性,解决数据分散失控的管理问题,需要构建一个在这些系统之上的数据虚拟层,作为数据共享和互操作的基础。

数据虚拟层是航空发动机设计过程中所有数据的统一逻辑视图,其对应的物理数据实际位于地理上分布的各专业应用系统中。通过数据虚拟空间可以实现以下几方面功能:

- 数据关联关系管理;
- 数据多视图管理;
- 数据版本权限管理;

- 数据可视化;
- 数据跨系统搜索;
- 数据安全;
- 数据谱系管理。

在数据虚拟空间的基础上,结合标准的 Web 搜索引擎技术,可实现快速的全局数据查询功能,使得用户能够快速检索到跨专业的所有类型的的数据信息,而不需考虑它的具体结构或所处的物理位置。

### 1.3 任务流程管理系统

任务流程管理系统实现了以设计任务为核心,以时间、逻辑、数据、消息等多种因素为驱动机制的航空发动机协同设计任务流程管理系统,支持任务的自动下发与反馈、任务的动态调整、任务的多种触发因素的动态配置,从而提高对具体设计任务的管控效率和精细度,加强专业软件协同工作能力。

任务流程管理系统用于具体设

计任务流程的关系定义、驱动执行及调度监控,其核心是如图4所示的统一任务模型。

任务流程管理系统提供的功能包括:

- 任务 / 流程的协同编制;
- 任务操作权限授予机制;
- 项目 / 任务统计监控;
- 任务沟通协调机制;
- 任务执行日志;
- 任务提醒;
- 任务状态反馈;
- 任务进度修改说明;
- 计划 / 任务审批;
- 任务执行引擎。

### 1.4 知识管理系统

知识管理系统通过不断对航空发动机设计过程中的规范、经验、最佳实践等的总结、积累、挖掘,建立并完善知识库,然后用于指导辅助后续的型号设计,以提高设计活动的一致

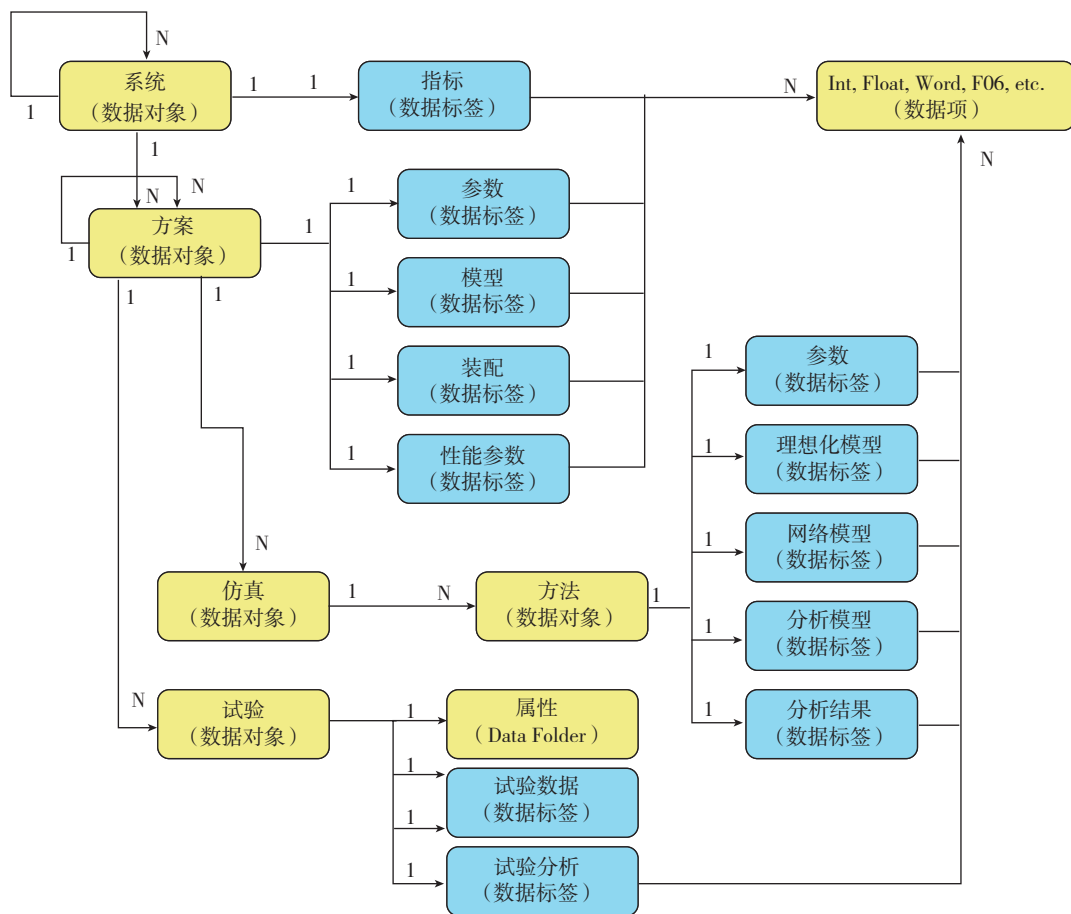


图3 统一数据模型

性,少走弯路,持续性地提升航空发动机设计能力及水平。

为了更好地对航空发动机设计过程中的知识进行管理,知识管理系统提供了如下功能。

(1) 知识库。根据流程、学科、专业 3 个维度将有用、正确的数据和信息组织在一起,以便于知识的检索和使用。知识库的组织管理方式包括:

- 知识词条管理;
- 知识文库管理;
- 基础数据库管理;
- 流程模板库;
- 工程模板库。

(2) 知识社区。知识社区是一个用于知识编辑、查看的企业社区网络,是企业知识共享、交流、协作的网络化平台。

(3) 知识地图。为查阅企业知识提供了一种非常方便的形式,包括主题知识、部门知识、过程知识等知识地图。

(4) 知识搜索。根据与用户输入的关键词相匹配的程度在知识库中自动搜索,并依次将搜索到的知识条目展现给用户。

(5) 知识在线使用。知识管理系统与任务流程管理系统、工具集成系统紧密连接起来,实现用户在使用任务流程管理系统进行任务编制时,或者在使用工具集成系统进行工程

设计时,可以通过与知识管理的接口,以检索或推送方式方便快速地了解应用知识。

### 1.5 系统集成

在航空发动机研发过程中,除了上述专业应用系统外,还需要设计单位的需求管理、科研项目管理、PDM、SDM、TDM 等信息系统的外围支撑,因此需要通过 ESB 实现与这些信息应用系统的集成,在企业层面上打通流程和数据通道,通过企业内各部门的通力合作来提高航空发动机的研发水平和管理水平。

## 2 业务应用

在航空发动机集成研发环境中,通过对各种基础工具软件的调用,在底层计算硬件的支持下,在相关信息系统的管理下,高效优质地完成航空发动机的研发任务,包括以下方面。

### 2.1 基础预研

为航空发动机研发提供相关基础技术研究,包括发动机结构完整性分析、发动机整机结构分析、发动机外物损伤分析等,构建相应 COR。

### 2.2 航空发动机研发

立足于各设计专业及学科,结合专业的仿真分析工具,建成具有自主知识产权,全面支撑航空发动机设计的集成研发平台,支持航空发动机研发任务,从型号立项开始,到方案论证、初步设计、技术设计直至详细设

计,完成航空发动机总体设计、压气机设计、燃烧室设计、涡轮设计、空气系统设计、控制系统设计、传动系统设计等专业业务。

### 2.3 专业工具包

针对航空发动机研发过程中特定的业务需求,结合具体的业务流程,将相关的软件工具加以组合,并融合相关的知识及数据,从而构成特定目标的,综合性的快速专业设计分析工具包,以支撑基础预研及航空发动机研发的高效进行。

## 建设效果预期

通过航空发动机集成研发平台的建设,可以建立一个航空发动机研发的数字化设计分析的集成应用环境,涉及多个专业、多个系统,涵盖各个设计阶段,以航空发动机设计流程为主线,以各种研发工具软件的集成化封装为手段,以全部过程数据有效管理为支撑,最终实现航空发动机研发过程的规范化、智能化、自动化、模块化及专业化。实现航空发动机各类设计分析流程、各部门 / 专业间任务 / 数据协同交互,整体上提升航空发动机的研发效率和技术水平。

在近期,可以提升航空发动机总体以及各部件、各专业的数字化研发能力,实现各软件工具系统的集成,满足总体及各部件、气动、结构及强度等专业设计、分析要求。实现航空发动机研发知识的有效管理及对产品创新的支持。

在远期,将集成研发扩展到涵盖全部航空发动机各种型号、发动机公司全部参研单位,建立具有先进水平的、能够形成自主知识产权的技术创新体系及开放式的创新平台,建立完善配套的航空发动机设计能力体系,具备高性能先进发动机产品的研发能力和与世界同步的创新能力,在部分优势领域达到或接近世界先进水平,为我国航空发动机技术的持续和长远发展提供支持。(责编 亦非)

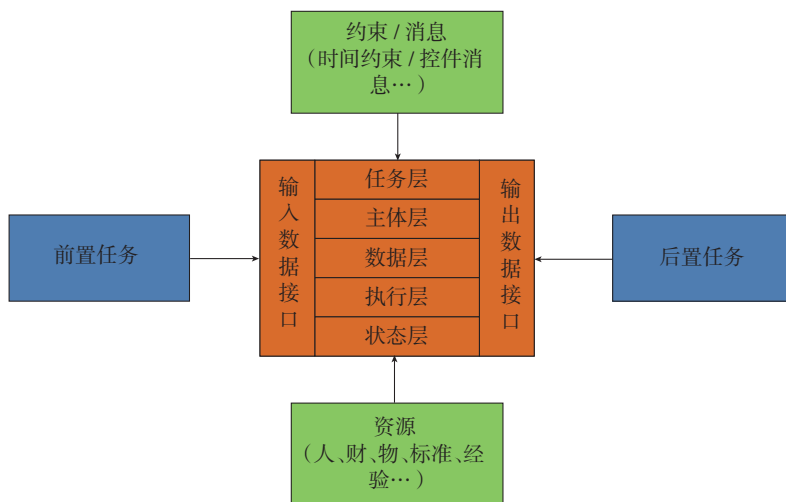


图4 任务流程管理系统—统一任务模型