

# 基于RFLP模型的飞机复杂系统 总装工艺流程设计\*

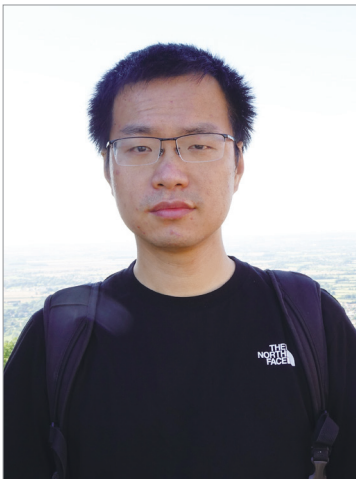
李 涛,叶 波,罗 鑫

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610092)

[摘要] 从新一代飞机复杂系统的典型特点、飞机研制集成验证需求以及飞机总装工艺流程设计的挑战出发,通过系统工程中验证与评估(Verification & Validation)的方法构建了飞机系统产品设计与工艺设计的统一模型,并进一步提出了使用系统工程RFLP(Requirements-Functional-Logical-Physical,需求-功能-逻辑-物理)模型来支持总装工艺设计的方法,实现了飞机系统间交联设计信息与总装工序工作间的双向传递。对该方法进行初步的案例应用,在工艺早期概念设计阶段论证了其可行性。

关键词: 复杂系统; RFLP模型; 飞机总装; 工艺流程设计; 系统交联

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.06.024



李 涛

毕业于英国克兰菲尔德大学(Cranfield University)航空工程研究中心,理学博士,高级工程师,飞机总装专业技术研究带头人,多项科研课题成果主要贡献者。研究方向为飞机复杂系统集成、机载系统机上试验、飞机总装数字化生产线设计。

现代大型飞机机载系统是典型的复杂系统,通常包括了大量来自不同飞机系统的装机设备、管路、线束<sup>[1]</sup>。与飞机结构的复杂性不同,飞机系统的复杂性不仅来自于大量的装机件及其多样的连接方式,更来自于飞机系统间的功能性依赖关系。飞机多个系统协同工作来实现一项功能,比如系统间的热交换、机电系统集成控制、航电信息处理等。对于新一代飞机,由于整机系统集成度高,只有在所有关联的机载系统一起协同正常工作时,飞机的整机设计要求才能实现<sup>[2]</sup>。在本文所研究的范围中,复杂性限定于飞机系统的复杂性。

飞机总装生产线设计是产品工业化过程的一个重要阶段。飞机装配的工艺流程作为桥梁,连接了设计与制造,也将生产资源与安装试验工序进行了集成。因此,总装工艺流程有两项重要角色:第一,集成设计需

求、指标的要求来满足飞机复杂系统功能的实现;第二,集成生产制造活动的需求来实现装配线平衡<sup>[3]</sup>。对于新一代飞机而言,在早期工艺设计阶段,首要的任务是充分理解飞机系统设计的复杂性,即系统的功能、各系统间的主要依赖关系和交联关系,在此基础上将产品设计信息转化为总装生产工序流程。装配线平衡设计、生产能力预测,以及基于工艺流程的建模、仿真验证等工作,需要在得到初步工艺流程结果后,在工艺流程设计的后期才能充分开展。

目前总装工艺流程设计主要基于技术人员对飞机系统设计的个人理解,以及类似研制项目上的工艺流程设计经验。技术人员对于产品设计与工艺设计在飞机功能实现过程中的对接关系不清晰,这主要体现在飞机系统的功能、逻辑在飞机总装集成过程中分解落地、逐步实现的过程不清晰,可能存在功能检查项目在总

\* 基金项目: 国防科研课题研究项目(JCKY2019205A004)。

装及其后续试飞验证中出现重复、遗漏。上述基于经验的总装工艺流程设计方法,对于产品功能实现的机理不清楚,存在较大的产品研制风险。比如,在总装过程中出现某项零件、设备缺件;某项设备更换后,哪些功能性的检查试验需要重新进行,与所拆卸更换的关联系统功能是否受到了影响,是否需要重新试验验证。对于这样的复杂系统的问题,本文尝试使用系统工程的方法、工具,以统一模型架构的方式来解决上述问题,实现基于模型的总装工艺流程设计。

## 飞机系统与总装工艺流程设计

### 1 飞机系统在总装集成过程中的特点

飞机复杂系统一般可以用装配树来表达其多层结构,典型的层级结构可以划分为整机、分系统、子系统、部件。以系统的观点,飞机结构也可以作为飞机的顶层分系统。新一代飞机典型的产品树状结构划分为:飞机结构、飞机系统、任务系统<sup>[4]</sup>。一般来说,系统的集成特性主要可以分为物理性的集成和功能性的集成。对于上述飞机分系统,其集成特性如表1所示<sup>[5]</sup>。

由表1可见,物理性集成特性是飞机系统装配中主要考虑的特性。飞机结构大部件、系统设备、零件都是通过物理连接安装、配合、紧固在一起。而功能性集成通常指飞机不同的动力能源、飞机系统间的信息流、控制流。值得注意的是,飞机系

统同时表现出了很强的物理性集成和功能性集成特性。这是由于飞机系统或者飞机基础平台的主要功能对其他系统、飞机结构间有很强的物理依赖关系。比如,飞机燃油系统的油液贮存功能的实现强烈依赖于飞机油箱结构的装配,飞机起落架装置的功能、布置也与飞机结构外形与液压气动系统的安装密不可分。从系统集成过程的角度看,物理性集成和功能性集成是互相依赖的,都有特定的集成过程顺序必须遵循,否则产品设计的功能就无法实现或者无法得到正确的验证。

工艺流程是流程建模仿真验证的基础,目前飞机总装工艺流程仿真的输入基本采用了传统的“先结构再系统”的飞机总装工艺流程。一些研究将飞机结构大部件过程对合作为飞机装配线的主要流程<sup>[6-7]</sup>。仅有极少数研究注意到装配线上的系统安装试验工作。然而,这些研究仍然没有清楚地解释飞机系统在总装集成过程中的约束和联系,仅将系统装配工作当作是独立的、附加的工作内容<sup>[8-9]</sup>。实际上,“先结构后系统”的顺序反映的仅是一些项目的顶层工艺流程特点,在空客公司等航空企业的装配流程中,存在大量的 Pre-equipping 系统预装配工作。资料显示,空客 A320 飞机的工艺流程中,系统安装、试验、结构装配的流程间存在着高度的依赖关系<sup>[10-12]</sup>。

### 2 装配顺序约束

装配工艺流程设计中将决定装配任务顺序的工程活动称作装配顺序规划(Assembly Sequence Planning, ASP)。装配顺序规划中存在两种约束类型:绝对约束和优化约束。绝对约束指的是一旦违背该约束条件,装配顺序就无法实现。优化约束指即使违背该约束条件,装配顺序仍然可以实现,但可能造成工作效率降低。绝对约束决定装配线流程中的关键路径、里程碑节

点,而优化约束更多的是应用于工序优化平衡<sup>[13-15]</sup>。在目前应用 ASP 开展的相关研究中,大部分绝对约束是基于物理连接约束,并在此基础上开展装配顺序获取算法研究,比如“Liaison diagram”、“AND/OR graph”、装配分解法等。这些方法由于依赖于产品物理连接关系,并不适用于机电一体化高度融合、系统功能高度耦合的产品,也不适用于以飞机系统功能集成验证顺序为主要关注点的飞机总装安装与试验。

### 3 基于系统工程模型的总装工艺流程设计方法

2015年,李思宁等<sup>[16]</sup>基于系统工程验证与评估(Verification & Validation, V & V)的方法,构建了飞机总装数字化工艺设计的顶层模型。该模型以工艺设计端主要业务活动作为生命周期,在验证与评估过程中集成了主要的工艺设计、流程仿真、装配仿真活动,解决了得到产品设计信息后,总装工艺流程设计内部活动的开展问题(图1<sup>[16]</sup>)。

上述模型完成了基于设计输入信息的工艺设计模型的构建,但飞机系统设计、总装工艺设计、总装生产活动间的关系并未纳入该模型中。从系统工程的基本原理分析,总装与试验过程中的集成验证是飞机研制需求、功能、指标验证的一部分。总装工艺流程设计的本质就是要按照“客户需求-产品功能-控制逻辑-物理产品”的流程逐步进行技术展开,最终落实到飞机系统安装与试验工序中。在引入系统工程 RFLP 模型架构后,飞机系统设计、总装工艺设计和总装生产活动间的关系可以表达为下述统一模型。

RFLP 模型架构拓展了传统的“需求-部件”的产品架构,成为面向多个设计活动的详细专业域,由此提供了一种结构化的方法来使产品实物集成过程更好地符合产品需求。在 RFLP 模型中:“R-需求”将产品

表1 飞机分系统集成特性对比

Table 1 Comparisons of major aircraft systems characteristics

分系统	物理性集成	功能性集成
结构	强	无关
飞机系统	强	中等至强
任务系统	弱	强

需求、客户需求以结构化数据的方式进行描述;“F-功能”回答系统是做什么的;“L-逻辑”回答系统是什么,即系统是如何组成和工作的;“P-

物理”集中展现了系统的三维外形。在RFLP模型中,每一个技术域都是相互关联的,以此来实现不同业务域中项目的互相追踪。在图2的模型

中,顶部是并行工程模式下产品设计的生命周期与装配生产线设计的使用寿命,左侧2个下行箭头分别代表了飞机系统设计和总装工艺设计过

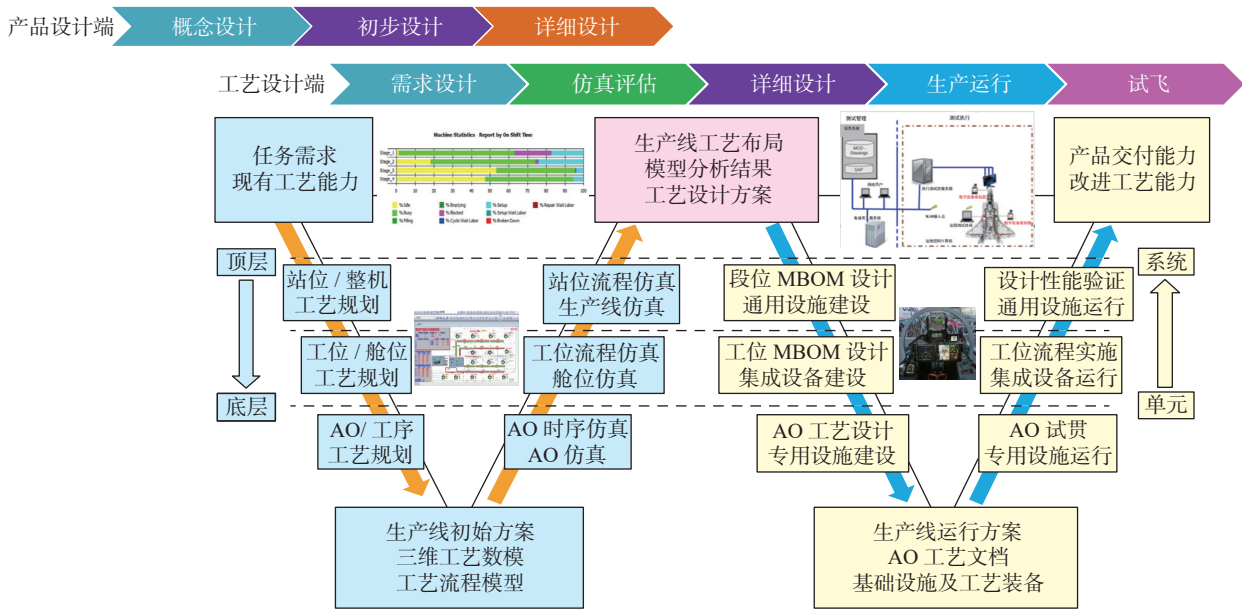


图1 总装集成工艺设计V & V模型

Fig.1 V & V model of aircraft final assembly integration planning

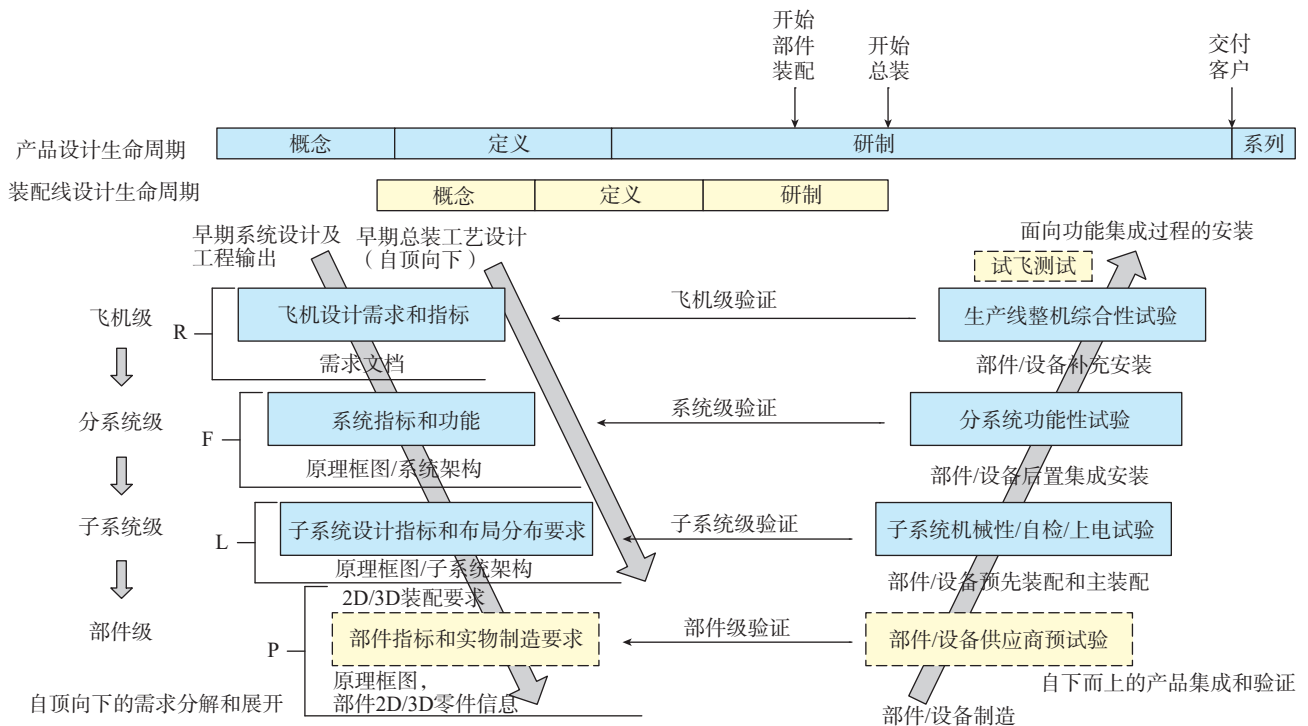


图2 飞机系统产品设计、总装工艺设计与飞机生产制造活动统一模型

Fig.2 Unified model of aircraft systems product design, assembly process design and aircraft manufacturing activities

程,右侧的1个上行箭头展示了生产制造过程中系统的安装与试验活动。该统一模型按照飞机级、分系统级、子系统级、部件级来划分上述3种设计、工艺、生产过程。同时R、F、L、P分别也对应到设计与工艺过程中的不同系统层级。在该统一模型中,飞机系统设计的活动过程与总装工艺设计的活动过程并行开展,同时对应了相应层级的生产活动过程。比如,在飞机级的验证中,总装生产线整机综合性能试验来自于飞机整机级的系统试验工艺设计,并进一步与飞机系统设计的需求指标相连。这样,利用该模型,总装生产活动中某个层级的试验可以通过对应的V&V映射关系,逆向找到相应的设计活动以及设计要求。

RFLP模型典型的应用常见于产品设计与性能仿真阶段,主要包括:需求分解、系统架构设计、系统行为建模仿真。图3展示了如何将RFLP模型不同技术域的信息扩展运用到装配工艺流程设计过程中。RFLP各个技术域模型中通过关联关系进行信息的追溯。在装配工艺集成过程中,每一项试验工序对应的都是相应需要验证的飞机系统功能,同时每一项试验都能够拓展出需要安装的部件、设备。在这一原则下,通过复用“F”功能、“L”逻辑、“P”物理模型,

分别实现了功能性试验结构树、逻辑结构树、物理结构树的技术展开,进而得到初步的安装与试验工艺流程结构。

### RFLP模型建立与系统集成顺序获取

基于RFLP模型的总装工艺流程设计方法,实现的主要功能有:

(1)设计需求、客户需求、技术规范分解和展开,并最终将需求分解到具体产品的工程信息中,实现需求的完整追溯。

(2)使用集成CAD方法将RFLP各个技术域的模型信息集成在一起,作为工程数据源以支持工艺流程设计。

(3)根据生产线约束条件,适配飞机系统功能,得到初始试验结构树和关联的安装结构树。

根据上述需求,本文提出了一种结构化的工艺流程设计方法(图4)。该方法集成了符合RFLP模型架构的产品设计信息,并通过模型的复用、模型间关联信息的拓展实现了初始安装与试验工艺流程的获取。

该方法包括了3个主要步骤,即RFLP模型的建立、试验结构树的获取、安装任务的结构树扩展。步骤1为飞机产品设计角色,步骤2、3为工

艺设计角色。

RFLP模型的建模要求是后续模型数据能否支持总装安装与试验流程获取的重要支撑。由于目前航空工业主要以达索系统公司的CATIA系列产品为工具进行设计与制造,本研究选取了CATIA V6的系统工程应用环境进行RFLP模型的建立。按照飞机复杂系统的特点,从系统工程的角度对建模要求进行了约定,主要包括:

(1)边界识别约定:按照“系统的系统”(System of Systems)原则,除了传统的结构树划分系统、子系统架构外,还将飞机系统功能类别定义为内部系统功能、外部系统功能。另外,将系统按实施过程的特点,分类为系统输入功能、系统处理功能、系统输出功能。

(2)交联定义约定:按照飞机系统间的主要交联关系,将交联类型定义为信息交互、能源交互与物理交互。同时,根据CATIA V6的软件环境特点进行了类别细分。

(3)追溯定义约定:按照“双向单线程”的模式,约定了RFLP各技术域模型间的关联信息定义方式,只允许按照“R-F, F-L, L-P”或“P-L, L-F, F-R”的模式进行信息追溯定义,以便于数据管理,如图5所示。

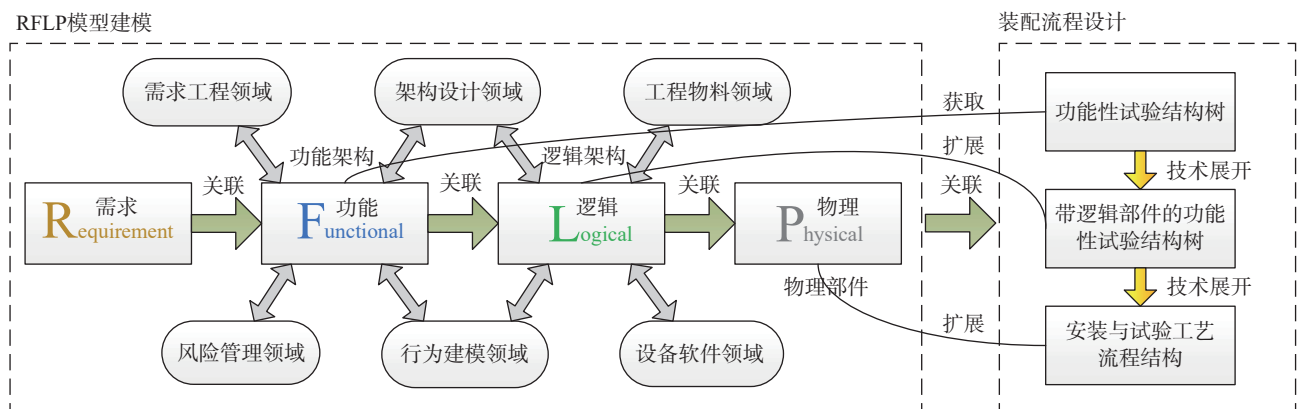


图3 RFLP模型的典型运用与装配流程设计扩展

Fig.3 Typical implementation of RFLP models and assembly process planning expansion

### 案例研究

本案例研究基于 CATIA V6 和 ENOVIA V6 环境的某商务飞机机头雷达天线设备舱的系统设计。按照

图 4 中的方法进行 RFLP 建模、安装与试验顺序获取。

#### 1 系统 RFLP 模型的建立

首先,在 ENOVIA V6 平台中建立了以文本信息描述的结构化系统

需求模型,再分别按照 RFLP 建模规则约定,进行该雷达天线设备舱中“F”功能、“L”逻辑、“P”物理模型的详细建立。

在建立“F”功能模型时,应用“边

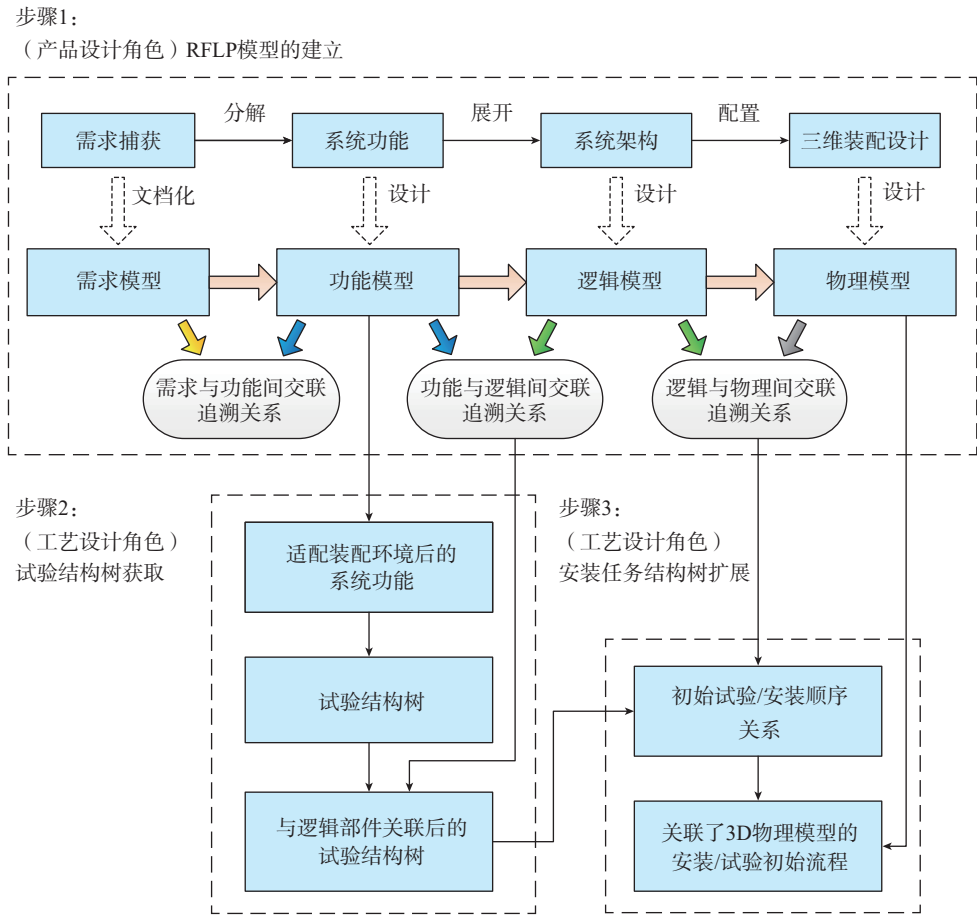


图4 基于RFLP模型的结构化装配集成顺序获取

Fig.4 Structured assembly integration sequencing based on RFLP models

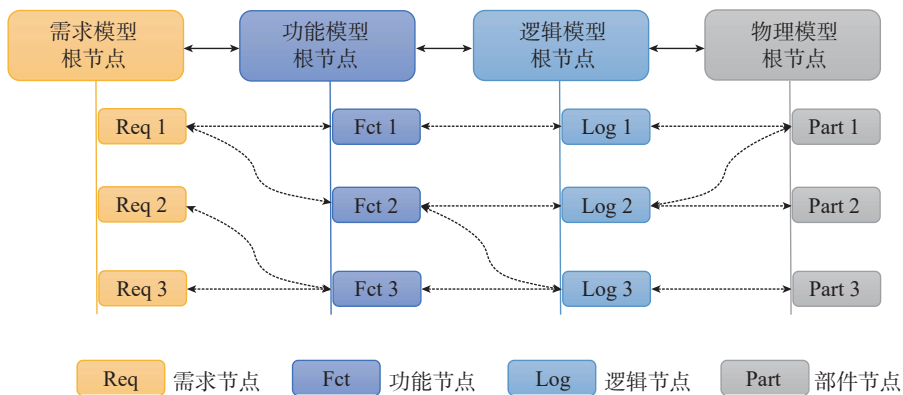


图5 RFLP模型技术域间追溯定义约定示例

Fig.5 Example of tracing definition between different domains of RFLP models

界识别约定”和“交联定义约定”分别建立雷达天线舱中各项功能的子模型和相互之间的交联定义(图6)。在建立“L”逻辑模型时,按照分系统、子系统、部件的关系构建3层逻辑模型,再次应用“交联定义约定”在各个末端逻辑部件之间定义交互交联

关系(图7(a))。最后,在图7(b)中进行传统的三维模型设计,即“P”物理模型的建立。在建立各技术域模型的过程中,同时完成了各模型间关联信息的嵌入,如图8所示。

## 2 初始安装与试验工艺流程获取

按照图4中的步骤2、3,首先对

图6(c)中的功能模型信息进行复用,按照一项功能对应一项功能性试验的方式,结合生产线约束条件获取试验结构树。然后,按照RFLP模型中“F-L”间的交联信息,对试验结构树进行第一次逻辑部件信息展开。再根据第一次展开的结果,按“L-P”间的交联信息进行二次展开,得到关联了物理部件信息的试验结构树,即初始安装与试验工艺流程(图9)。根据典型机上试验工艺所需的设备,可以进一步关联到试验测试工艺装备的需求。

## 结论

本文在分析新一代飞机系统集成特点以及前期研究的基础上,按照系统工程RFLP模型架构的方式构建了一种新的飞机系统工程数据源,将飞机设计需求、功能定义、控制逻辑、物理模型进行了信息关联和集成,用于支持飞机复杂系统安装与试验工艺流程获取。初步案例研究表明,该方法可以从飞机系统集成、功能实现的机理上来获取总装生产所需的安装与试验工艺流程。由于RFLP模型各技术域间在建模时同时定义了系统交联关系信息,而初始工艺流程由RFLP模型的复用及技术展开获取而来,这样就实现了RFLP数据源到装配的模式,打通了复杂系统设计信息与工艺设计之间的隔阂。利用内建的双向关联信息,工艺设计人员可以知道安装的零件、设备,或者进行的某一项试验来自于飞机设计的哪些功能、需求,避免出现工艺设计不当造成试验工序设计遗漏、实物工作返工等问题。反之,产品设计可以更好地了解其设计的功能在生产线上的实现过程。这一方法在实际应用中,通过多次迭代,有望加强设计、制造部门的技术理解,改善产品设计的可制造性。由于该方法目前仅进行了初步的案例验证,只涉及了一个舱位内的3个飞机子系统和

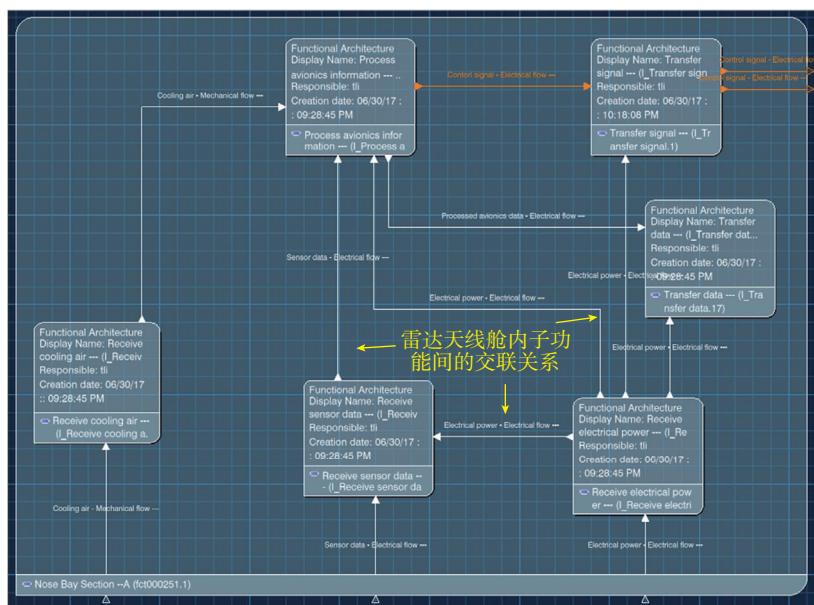
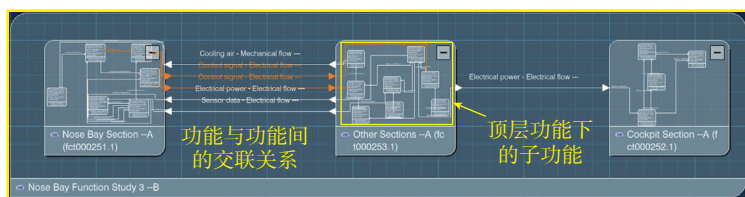
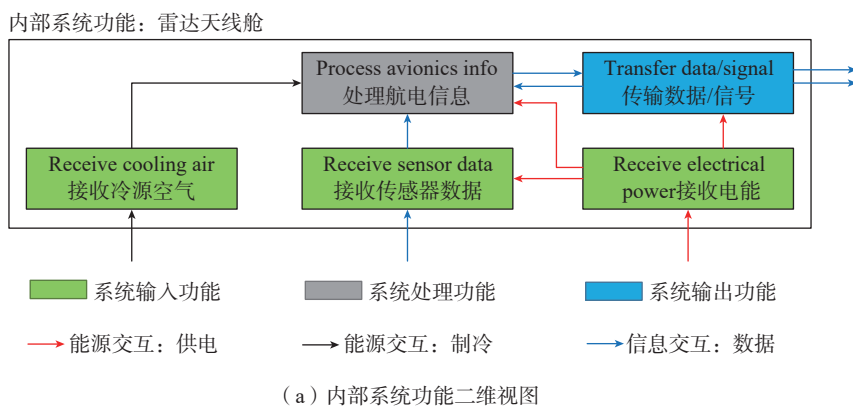
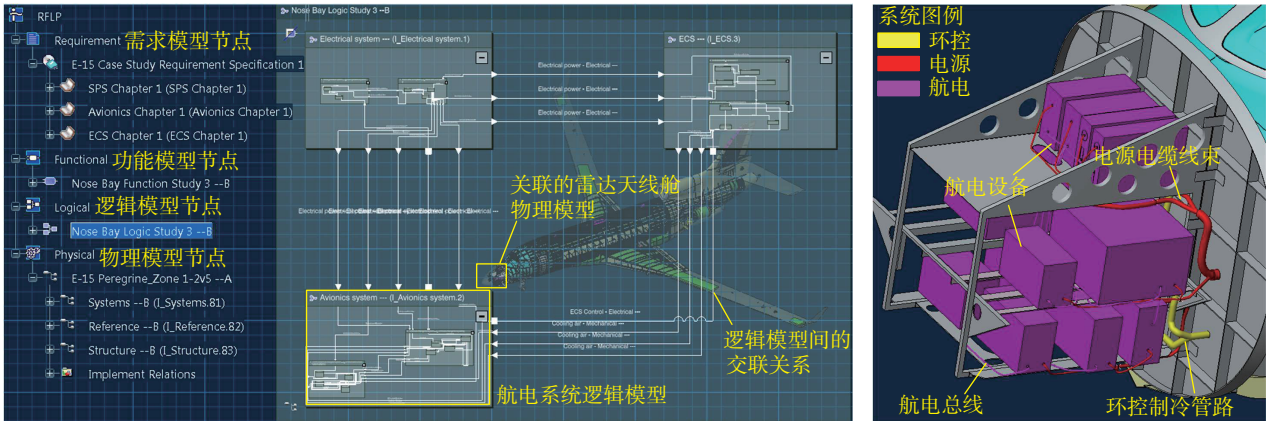


图6 雷达天线舱功能模型和子模型间的交联定义

Fig.6 Interaction definitions between functional model and sub-models in radar bay



(a) 逻辑模型 (b) 物理模型

图7 逻辑模型及其关联的物理模型  
Fig.7 Logical model and associated model

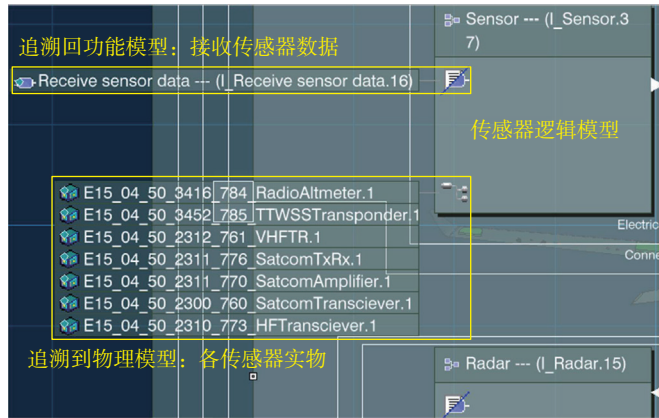
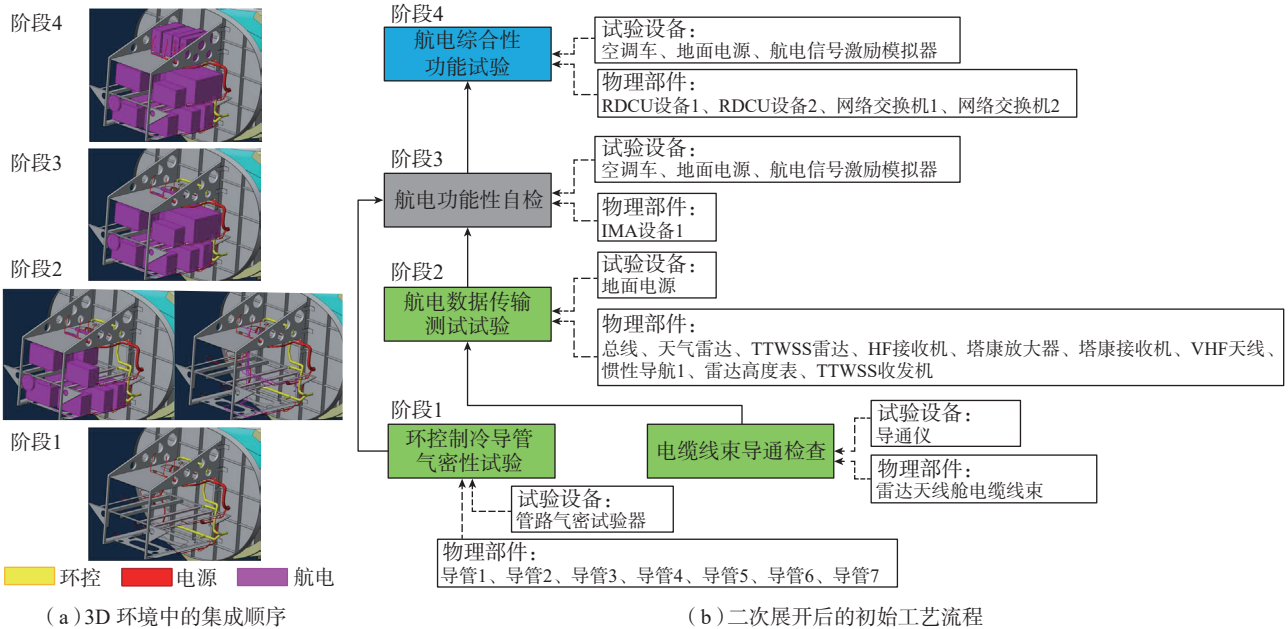


图8 模型关联信息追溯示意  
Fig.8 Example of tracing information



(a) 3D 环境中的集成顺序 (b) 二次展开后的初始工艺流程

图9 初始安装与试验工艺流程  
Fig.9 Initial installation and test process

有限的系统交联关系定义。下一步工作将重点增加更多飞机系统、更多飞机舱位和交联关系类型、数量,在模拟生产线环境的实物样机上进行技术验证。

### 参考文献

- [1] THOMAS E, THOMAS O, BIANCONI R, et al. Towards enhanced process and tools for aircraft systems assessments during very early design phase[C]//The 11th International Modelica Conference. Versailles, 2015.
- [2] SEABRIDGE A. Integration and complexity[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd., 2010.
- [3] LI T, LOCKETT H. An investigation into the interrelationship between aircraft systems and final assembly process design[J]. Procedia CIRP, 2017, 60: 62–67.
- [4] SEABRIDGE A. Aircraft sub-systems introduction and overview[J/OL]. Introduction and Overview. [2010–11–15]. <http://doi:10.1002/9780470686652.eae461>.
- [5] MOIR I, SEABRIDGE A. Design and development of aircraft systems[M]. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2013.
- [6] RÍOS J, MAS F, MENÉNDEZ J L. Aircraft final assembly line balancing and workload smoothing: A methodological analysis[J]. Key Engineering Mater, 2012, 502: 19–24.
- [7] CAGGIANO A, MARZANO A, TETI R. Resource efficient configuration of an aircraft assembly line[J]. Procedia CIRP, 2016, 41: 236–241.
- [8] GÓMEZA, RÍOS J, MAS F, et al. Method and software application to assist in the conceptual design of aircraft final assembly lines[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2016, 40: 37–53.
- [9] SCOTTH A. Modelling aircraft assembly operations[C]//Proceeding of Winter Simulation Conference, 1994.
- [10] HALFMANN N, KRAUSE D, UMLAUFT S. Assembly concepts for aircraft cabin installation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 3: 1–7.
- [11] LOCKETT H, FLETCHER S, LUQUET N. Applying design for assembly principles in computer aided design to make small changes that improve the efficiency of manual aircraft systems installations[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2014, 7(2): 284–291.
- [12] JUDT D, FORSTER K, LOCKETT H, et al. Aircraft wing build philosophy change through system pre-equipping of major components[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2016, 9(1): 2016–01–2120.
- [13] MARIANR M. Optimisation of assembly sequences using genetic algorithms[D]. Adelaide: University of South Australia, 2003.
- [14] RASHIDMF F, HUTABARAT W, TIWARI A. A review on assembly sequence planning and assembly line balancing optimisation using soft computing approaches[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59: 1–4.
- [15] JONESR E, WILSONR H, CATONT L. On constraints in assembly planning[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 849–863.
- [16] 李思宁, 张世炯, 李涛. 基于系统工程模型的飞机总装数字化集成工艺设计方法浅析[J]. 航空制造技术, 2015, 58(21): 73–76.

LI Sining, ZHANG Shijiong, LI Tao. A digital integration approach of aircraft final assembly process design based on systems engineering[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(21): 73–76.

通讯作者: 李涛, E-mail: christl@foxmail.com.

## Final Assembly Process Planning of Aircraft Complex Systems Based on RFLP Models

LI Tao, YE Bo, LUO Xin

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

**[ABSTRACT]** This paper firstly clarifies the typical characteristics of aircraft complex systems, and the requirements of aircraft integration verification in product development as well as the challenges in aircraft final assembly process planning. With the help of verification and validation method from systems engineering (SE), a unified framework of aircraft product design and process planning is produced. Then, a final assembly process planning method based on SE RFLP (Requirements-Functional-Logical-Physical) models is proposed to support the information exchange and tracking between interactions of product design and assembly processes in two ways. A case study is implemented and tested the feasibility of the proposed method in early conceptual phase of process planning.

**Keywords:** Complex system; RFLP models; Aircraft final assembly; Process planning; System interdependency

(责编 大漠)