http://qks.cqu.edu.cn

文章编号:1000-582X(2012)02-041-06

协同工作模式下飞机总体布置设计过程建模

王　凯[1],刘毅[2],李文正[1]

(1. 南京航空航天大学 航空宇航学院,江苏 南京 210016;2. 同济大学 航空航天与力学学院,上海 200092)

摘　要:针对协同工作模式下传统飞机设计任务分解和过程建模方法存在任务关联语义不明确和复杂流程分析能力弱的不足,提出了一种基于任务关联 WBS(Work Breakdown Structure)/Petri 网的飞机总体布置设计过程建模方法。在飞机系统 WBS 基础上,采用可选、必选、选择、因果顺序、协调反馈等五种关系建立任务关联 WBS 模型,再映射成基于 Petri 网描述的飞机总体布置设计过程模型,实现飞机总体布置设计任务的静态结构表达和动态流程分析,使得任务分解和过程建模融为一体。通过建立飞机总体布置与协调系统对某飞机总体布置实例进行验证,证明了方法的正确性、有效性和适用性。

关键词:总体布置;Petri 网;计算机支持的协同工作;工作分解结构

中图分类号:V221;TP391　　**文献标志码**:A

A design process modeling method for airplane general arrangement in the cooperative development mode

WANG Kai[1], *LIU Yi*[2], *LI Wen-zheng*[1]

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, P. R. China; 2. College of Aerospace Engineering and Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: To tackle the problems not having explicit semantics and powerful analysis ability of the traditional task decomposition and process modeling methods for airplane design in the cooperative development mode, an airplane general arrangement process modeling method based on task-related WBS and Petri nets is presented. On the basis of airplane system WBS, the TR-WBS model is built by using five constraint relations including optional, mandatory, choice, precedence, and feedback. By mapping the airplane general arrangement process model into a Petri net based model, the static structure description and dynamic analysis of airplane general arrangement design tasks is obtained, and the integration of the task decomposition and the process modeling is realized. The correctness, effectiveness and applicability of the method are verified through the established airplane general arrangement and coordination system.

Key words: general arrangement; Petri nets; computer supported cooperative work; WBS

收稿日期:2011-05-10

基金项目:国家"863"高技术研究发展计划资助项目(2007AAXXX103)

作者简介:王凯(1978-),男,南京航空航天大学博士研究生,主要研究方向为飞机总体设计、CAD/CSCW,(E-mail) uniquewk@hotmail.com。

刘毅(联系人),男,同济大学教授,博士生导师,主要研究方向为飞行器一体化设计、飞行器材料与结构设计、飞行器可靠性工程、计算机技术等,(Tel) 13805164457;(E-mail) liuyi.chine@126.com。

http://qks.cqu.edu.cn

飞机设计作为一项复杂的系统工程，其设计过程是一个涉及总体、气动、结构、控制等多个专业的一体化协同设计过程[1]。飞机总体布置阶段设计更改频繁、布置任务相互耦合，多专业群体协作需求尤为突出。在传统的设计模式下，由于布置任务间耦合关系未被考虑，各专业人员独立确定各自的布置参量，未考虑本专业设计决策对其他专业的影响，不能及时组织协调化解矛盾，必将引起更大跨度的设计返工。因此，建立体现任务耦合关系的飞机总体布置设计过程模型，综合描述任务组织和协调关系、确定合理有序的多专业设计与协调过程，成为建立飞机协同设计系统急待解决的关键问题之一，具有重要的工程意义和学术价值。

近年来，国内外学者对产品设计过程建模予以了高度关注。Dan[2]利用公理化设计矩阵描述子任务与任务属性的关联，Tang[3]运用有向图和设计结构矩阵描述设计活动间依赖关系，Park[4]采用设计路线图建立协同过程依赖关系框架，活动网络图、Petri 网、状态图、有限状态机和标记转移系统等均为常用方法[5]，其中，Petri 网具有严格的数学描述和直观的图形表达能力，支持定量化分析和层次化分解，在复杂过程建模研究中得到广泛应用[6-11]。现有文献对飞机总体布置过程建模研究较少，加之飞机研制中采用的 WBS（Work Breakdown Structure，工作分解结构）[12]和 IDEF[13]方法缺乏明确形式化语义，存在任务耦合关系不明确、复杂流程分析能力弱、任务分解和过程建模相互割裂等问题，急需深入研究。

笔者在飞机系统 WBS 的基础上，采用形式化建模理念，提出了基于任务关联 WBS/Petri 网的飞机总体布置设计过程建模方法。首先，采用可选、必选、选择、因果顺序、协调反馈五种关系建立任务关联 WBS 模型，然后映射成 Petri 网描述的协同设计过程模型，将任务分解和过程建模融为一体，实现了飞机总体布置任务的静态结构表达和动态过程分析。并采用 CATIA 二次开发和工作流技术建立飞机协同设计原型系统，支持多专业设计人员按照“布置-协调-布置”的迭代过程参与飞机总体布置设计，有效验证了模型的合理性和可适用性。

1 飞机总体布置任务关联 WBS 模型

WBS 方法是对武器装备研制实施系统工程管理的有效工具[12]，它最早在美国军用标准（MIL-HDBK-881）中提出，后来被写入美国项目管理协会的 PMBOK，我国也颁布了相关国家标准和行业标准[12-13]。WBS 方法清晰明了、易于分解，在武器装备系统研制中得到了广泛应用，飞机系统 WBS 单元代码层次结构如图 1 所示。

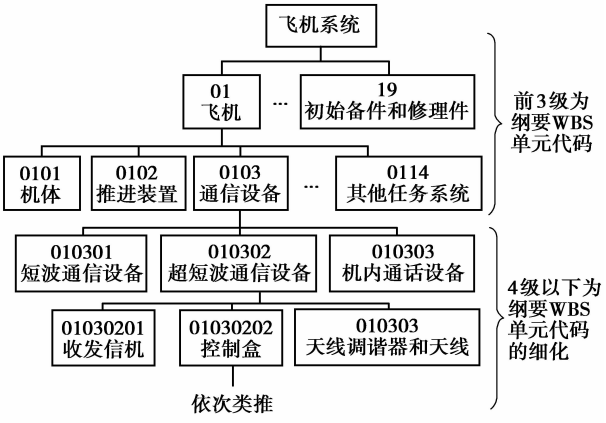

图 1 飞机系统工作分解结构

飞机系统 WBS 的划分以飞机系统为对象自上而下逐级划分形成层次结构体系，前 3 级为纲要 WBS，4 级以下为纲要 WBS 的细化，采用线分类法编码，按照项目群-项目-工作包-任务-活动的顺序构建。

为准确地反映出飞机总体布置任务结点间的结构关系和协作关系，笔者采用可选、必选、选择、因果次序、协调反馈 5 种关系建立任务关联 WBS 模型，如图 2 所示。其形式化描述如下：

定义任务关联 WBS TR－WBS＝$\{V, r_0, E, R\}$；其中有限集 $V=\{v_1, \cdots, v_n\}$ 表示飞机系统 WBS 任务集合，即结点的集合；r_0 表示根结点；有限集 $E=\{(v_1, v_2) \mid v_1, v_2 \in V\}$ 表示任务间实际关系集合，即边的集合；关系集 $R=\{m, o, ch, pre, fb\}$ 表示任务间关系集合，代表必选、可选、选择、因果顺序、协调反馈五种关系，其中 $m, o, fb, pre \in V \rightarrow P(V)$，$ch \in V \rightarrow P(P(V))$，$P(V)$ 是集合 V 上的谓词函数，$\forall x \in V$，$P(x)$ 表示与 x 存在 P 关系的结点集合。

m, o, ch 三种关系描述了任务的组织结构，如 $m(01)=\{0101\}$ 表示 0101 是 01 的必选子任务，$o(03)=\{0301\}$ 表示 0301 是 03 的可选子任务，$ch(02)=\{(0201, 0202)\}$ 表示 0201 和 0202 是 02 的选择子任务；pre 关系描述了任务的前后执行顺序，如 $pre(03)=\{01\}$ 表示任务 03 在任务 01 之前被执行；fb 关系反映了任务间存在迭代设计与协调情况，如 $fb(03)=\{02\}$ 表示任务若 03 被执行那么任务 02 需要根据任务 03 的执行情况迭代地开展协调

http://qks.cqu.edu.cn

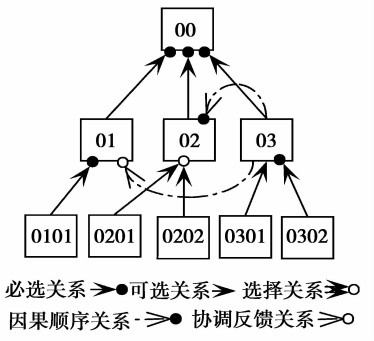

图 2　任务关联 WBS 模型

工作。同时，为保证 TR-WBS 的结构合理性，需满足下列条件

1) $\forall v\in V$，$|\{x\in V|v\in m(x)\}|+|\{x\in V|v\in o(x)\}|+|\{(x,cx)\in V\times V|cx\in ch(x)\wedge v\in cx\}|\leqslant 1$。

2) $\forall(v_1,v_2)\in E$，那么 $v_1\in m(v_2)\cup o(v_2)\cup\cup ch(v_2)\cup pre(v_2)\cup fb(v_2)$。

3) $\forall v\in V$，$|\{x\in V|v\in pre(x)\}|+|\{x\in V|v\in fb(x)\}|\leqslant 1$。

4) $\forall v\in V$，$|fb(v)|\geqslant 1$，那么 $|\{pre(x)|x\in sub(v)\}|=0$，$sub(v)$ 是 v 的所有子任务集合。

5) 任务关联 WBS 中由 V 和 E 构成的网络图是强连接的，不存在孤立结点，若不考虑 pre 和 fb 关系，其表现为无环的树形结构。

任务关联 WBS 模型以资源视图的形式反映了飞机总体布置设计任务结构关系和协作关系，限制条件则保证了飞机总体布置任务关系表达的准确性和合理性。

2　基于任务关联 WBS/Petri 网的飞机总体布置设计过程模型

2.1　Petri 网概念

Petri 网结构是一个三元组 $N=(P,T,F)$，其中 P 是有限库所集合，T 是有限变迁集合（$P\cap T=\phi$，$P\cup T\neq\phi$），$F\subseteq(P\times T)\cup(T\times P)$ 是有限弧集合（也称流关系）。*Petri* 网形式上定义为 $PN=(N,K,W,M_0)$，其中 $K:P\rightarrow Z^+\cup\{\infty\}$ 是 P 上的容量函数，$W:F\rightarrow Z^+$ 是 F 上的权函数，$M:P\rightarrow Z$ 是 P 上的标识向量，M_0 是初始标识向量。如果 $(\forall p_1)p_1\in{}^{\cdot}t\Rightarrow M(p_1)\geqslant W(p_1,t)$ 且 $(\forall p_2)p_2\in t^{\cdot}\Rightarrow K(p_2)\geqslant M(p_2)+W(t,p_2)$，则 t 在 M 下触发，记为 $M[t>$。基本 Petri 网（条件/事件网）的容量函数和权函数恒为 1，记为 $PN=(P,T,F,M_0)$，可达标识集用 $R(M_0)$ 来表示。*Petri* 网的安全性、活性、可达性等详见文献[5,16]。

2.2　飞机总体布置设计过程模型生成算法

由任务关联 WBS 映射生成基于 Petri 网描述的飞机总体布置设计过程模型，算法描述如下：

步骤 1　首先根据任务关系定义任务关联 WBS，得到 TR－WBS＝$\{V,r_0,E,R\}$。构造一个 Petri 网 $PN=\{P,T,F\}$，其中 $P=\{\mathrm{start}_{r0},\mathrm{end}_{r0}\}$，$T=\{r_0\}$，$F=\{(\mathrm{start}_{r0},r_0),(r_0,\mathrm{end}_{r0})\}$，转步骤 2。

步骤 2　令 $\forall v\in V$，$\hat{v}=\{x\in V|(x,v)\in E\}$，$\bar{v}=m(v)\cup o(v)\cup\cup ch(v)$。使用 Petri 网 $PN=\{P,T,F\}$，若 $T\cap V=\phi$，转步骤 8；若 $T\cap V\neq\phi$，选择 $v\in T\cap V$；若 $\hat{v}=\phi$，使用 dov 代替变迁 v，转步骤 2，否则转步骤 3。

步骤 3　使用子网代替变迁 v，形成新 Petri 网 $PN=\{P',T',F'\}$，令 $P'=\{\mathrm{start}_x|x\in\bar{v}\}\cup\{\mathrm{end}_x|x\in\bar{v}\}\cup P$，$T'=(T-\{v\})\cup\{\mathrm{prepare}_v,\mathrm{check}_v\}\cup\bar{v}\cup\{\mathrm{skip}_x|x\in o(v)\}$，$F'=(F-\{(\mathrm{start}_v,v),(v,\mathrm{end}_v)\})\cup\{(\mathrm{start}_v,\mathrm{prepare}_v),(\mathrm{check}_v,\mathrm{end}_v)\}\cup\{(\mathrm{end}_x,\mathrm{check}_v)|x\in\bar{v}\}\cup\{(x,\mathrm{end}_x)|x\in\bar{v}\}\cup\{(\mathrm{start}_v,x)|x\in\bar{v}\}\cup\{(\mathrm{skip}_x,\mathrm{end}_x)|x\in o(v)\}\cup\{(\mathrm{start}_x,\mathrm{skip}_x)|x\in o(v)\}$，转步骤 4。

步骤 4　若 $pre(v)=\phi\wedge fb(v)=\phi$，转步骤 2；若 $pre(v)=\phi\wedge fb(v)\neq\phi$，转步骤 5；若 $pre(v)\neq\phi\wedge fb(v)=\phi$，转步骤 6；若 $pre(v)\neq\phi\wedge fb(v)\neq\phi$，转步骤 7。

步骤 5　若 $fb(v)=\phi$ 转步骤 4；否则取 $x\in fb(v)$，令 $P=\{f\mathrm{flag},s\mathrm{flag},\mathrm{end}_{co}\}\cup P'$，$T=\{fb,\mathrm{suc},co\}\cup T'$，$F=\{(\mathrm{end}_x,co),(\mathrm{end}_v,co),(\mathrm{fflag},co),(co,\mathrm{end}_{co}),(\mathrm{end}_{co},fb),(\mathrm{end}_{co},\mathrm{suc}),(fb,\mathrm{start}_x),(fb,\mathrm{start}_v),(fb,\mathrm{fflag}),(\mathrm{suc},\mathrm{end}_x),(\mathrm{suc},\mathrm{end}_v),(\mathrm{suc},\mathrm{sflag}),(\mathrm{fflag},co),(\mathrm{sflag},next(\mathrm{end}_v)),(\mathrm{prepare}_{r_0},\mathrm{fflag})\}\cup F'$，$fb(v)=fb(v)-\{x\}$，其中 $next(\mathrm{end}_v)=\{x|(\mathrm{end}_v,x)\in F\}$，转步骤 5。

步骤 6　若 $pre(v)=\phi$ 转步骤 4；否则取 $x\in pre(v)$，令 $P=\{\mathrm{from}_v\}\cup P'$，$F=\{(\mathrm{check}_v,\mathrm{from}_{wx}),(\mathrm{from},\mathrm{prepare}_x)\}\cup F'$，$pre(v)=pre(v)-\{x\}$，转步骤 6。

步骤 7　若 $pre(v)=\phi\vee fb(v)=\phi$，转步骤 4，否则取 $x\in\mathrm{pre}(v)$，$y\in fb(v)$，令 $P=\{\mathrm{fflag},\mathrm{sflag},\mathrm{endco},\mathrm{from}_{v_x}\}\cup P'$，$T=\{fb,\mathrm{suc},co\}\cup T'$，$F=\{(\mathrm{end}_x,co),(\mathrm{end}_v,co),(\mathrm{fflag},co),(co,\mathrm{end}_{co}),(\mathrm{end}_{co},fb),(\mathrm{end}_{co},\mathrm{sflag}),(\mathrm{from}_{wx},\mathrm{prepare}_x),(co,\mathrm{fromv}_x),(fb,\mathrm{start}_y),(fb,\mathrm{start}_v),(fb,\mathrm{fflag}),$

http://qks.cqu.edu.cn

$(\mathrm{suc}, \mathrm{end}_y)$，$(\mathrm{suc}, \mathrm{end}_v)$，$(\mathrm{fflag}, co)$，$(\mathrm{sflag}, \mathrm{next}(\mathrm{end}_v))$，$(\mathrm{prepare}_{r_0}, \mathrm{fflag})$，$(\mathrm{end}_\omega, \mathrm{suc})\} \cup F'$，$fb(v)=fb(v)-\{y\}$，$\mathrm{pre}(v)=\mathrm{pre}(v)-\{x\}$，转步骤 7。

步骤 8 令库所 start_ω 中托肯数量为 1，其它为 0，将结点临时编号转换为原结点编号，完成 PN 模型的构建。

2.3 飞机总体布置设计过程模型性质分析

由图 2 转化成的 PN 模型如图 3 所示，可以证明该模型有如下性质：

安全性。M_0 的任一可达标识库所的标记数都不超过 1，即 $\forall M \in R(M_0)$，$M(p) \leqslant 1$，该 PN 模型是安全的。

活性。对于任意变迁 t，从 M_0 可达的任一标识出发都可以通过执行某一变迁序列而最终触发 t，该 PN 模型是活的、没有死锁的。

存在唯一的源库所 start_{00} 和唯一的汇库所 end_{00}，即 ${}^{\cdot}(\mathrm{start}_{00})=\phi$，$(\mathrm{end}_{00})^{\cdot}=\phi$。

工作流网。若在汇库所 end_{00} 和源库所 start_{00} 之间增加变迁 t，即 $t^{\cdot}=\{\mathrm{start}_{00}\}$，${}^{\cdot}t=\{\mathrm{end}_{00}\}$，则得到新网是强连通的，所有的库所和变迁都位于从 start_{00} 到 end_{00} 一条通路上，不存在孤立的活动和条件，因此该 PN 模型是工作流网。

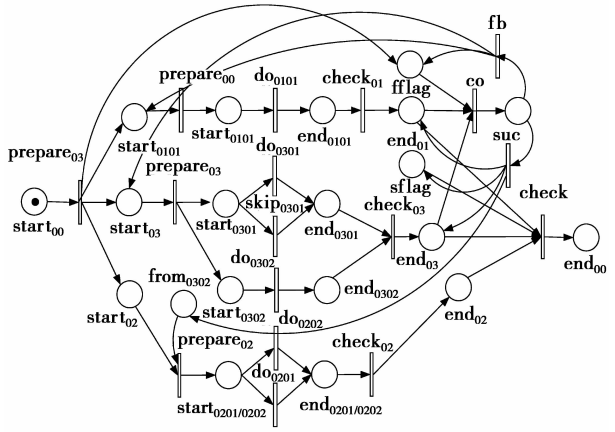

图 3 TR-WBS/Petri 网过程模型

3 飞机总体布置设计应用实例

某飞机电子设备舱总体布置设计 WBS 和权责关系如表 1 所示，其中任务 010302680201 要先于任务 010302680202 和 010302680203 执行，同时需要与任务 010102020103 协调，以满足 L 功放射频前端设备的安装、维修和结构强度等要求。下面按照以上任务结构关系和协作关系制定合理的设计流程进行总体布置设计与协调活动。

表 1 某分区总体布置任务的 WBS 权责关系表

WBS 编码	工作任务描述	责任人	角色	部门
010102	二区总体布置协调	赵	区长	总体
01010202	总体结构设计布置协调	钱	组长	结构
0101020201	设备舱结构布置直协调	孙	协调员	结构
010102020103	机身结构框设计	李	设计师	结构
01010242	起落架舱结构布置协调	周	设计师	结构
01030268	电气系统设计与布置	吴	组长	电气
0103026802	电子设备舱布置与协调	郑	协调员	电气
010302680201	L 功放射频前端设计	王	设计师	外协
010302680202	收发组合装置设计	刘	设计师	外协
010302680203	功放电源设计	叶	设计师	外协

3.1 建立任务关联 WBS 模型

按照任务关联 WBS 的定义，将上述总体布置设计任务建立形式化的任务关联 WBS 模型，如图 4 所示。TR-WBS$=\{V, r_0, E, R\}$，

$V=\{A,B,C,D,E,F,G,H,I,J\}$，$E=\{(B,A),(C,A),(D,B),(E,B),(G,D),(F,C),(H,F),(I,F),(J,F),(H,G),(H,I),(H,J)\}$，

$fb(H)=\{G\}$，$pre(H)=\{I,J\}$，$r_0=A$。

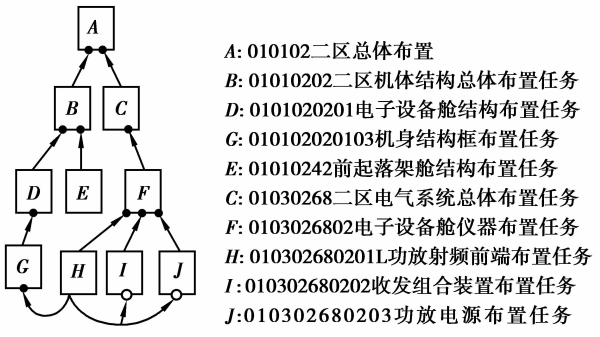

图 4 某飞机总体布置设计任务关联 WBS 模型

3.2 生成飞机总体布置设计过程模型

由任务关联 WBS 映射生成飞机总体布置设计过程模型见图 5。$PN=\{P,T,F;M_0\}$，其中

变迁集合 T 中的元素对应于具体的总体布置执行任务，有如下含义：任务关联 WBS 中任一任务结点 $x \in V$，$\mathrm{prepare}_x$ 代表下发任务 x 的执行指令并准备相关技术资料，do_x 代表任务 x 被执行、co 代表对总体布置任务间耦合的设计要求开展协调工作，fb 代表协调后执行反馈指令并按照协调结果进行修改准备再次协调，suc 代表协调成功并反馈给参

http://qks.cqu.edu.cn

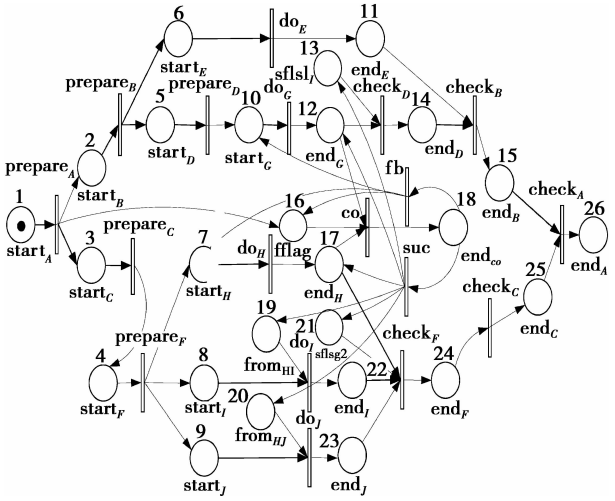

图 5　飞机总体布置设计过程模型

与双方执行后续任务，check_x 代表完成任务 x 并验证相关技术材料。库所集合 P 中元素代表飞机总体布置任务所必需信息和执行条件，如 from_{HI} 表示在执行任务 I 之前所需得到的任务 H 相关信息。流关系集合 F 中元素则反映了飞机总体布置任务的执行顺序和设计信息的流向。按照第 2 节的 Petri 网性质可以验证，该 PN 模型是 1 有界、安全的、活的、无死锁的工作流网，其可达标识图如图 6 所示。

3.3　飞机总体布置设计流程的执行

采用 CATIA 二次开发和 jBPM 工作流技术建立协同设计原型系统，飞机总体布置设计过程模型的执行情况如图 7 所示，根据上述过程模型定义，多专业设计人员在工作流技术的支持下开展异步的布置与协调工作，在 CATIA 协作工具的支持下开展同步的布置与协调工作，由此形成“布置-协调-布置”的迭代设计过程，设计更改与协调信息以技术协调单、设计更改单的形式反馈给相关设计人员，并记录设计技术状态。通过自上而下分解、自下而上综合的全局过程控制机制增强了飞机总体布置任务间设计信息交流，提高群体协作效率。同时，协同设计系统还提供灵活的自定义接口，对突发的布置与协调需求提供柔性支持。

M_0 [1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
↓
M_1 [0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
↓
M_2 [0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
↓
M_3 [0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
↓
M_4 [0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
↓
M_5 [0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
↓
M_6 [0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
↓
M_7 [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0]
↓
M_8 [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0]
↓
M_9 [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0]
↓
M_{10} [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1]

图 6　可达标识图

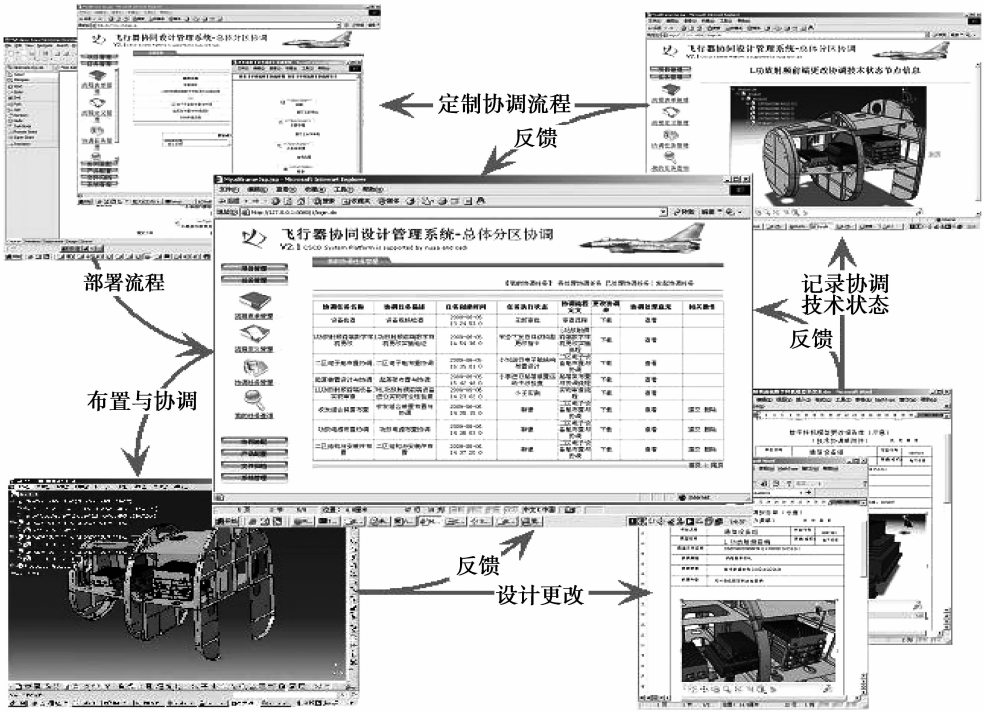

图 7　“布置-协调-布置”的迭代设计过程

http://qks.cqu.edu.cn

4 结 论

提出了基于任务关联 WBS/Petri 网的飞机总体布置设计过程建模方法，在协同工作模式下采用该方法进行过程建模有以下优点：

1)任务关联 WBS 模型通过可选、必选、选择、因果次序、协调反馈五种关系定义，清晰地反映出飞机总体布置设计任务的总体结构和协作关系，有利于从全局视角进行任务分解与调度。

2)采用任务关联 WBS 和 Petri 网建立飞机总体布置设计过程模型，有利于应用 Petri 网理论对飞机总体布置与协调过程进行静态结构检查和动态性能分析，避免飞机总体布置与协调流程在执行阶段出现死锁或不可达等情况，有助于进一步对复杂设计流程进行重组和优化。

3)将飞机总体布置设计过程通过数字化手段进行组织和管理，充分利用分散的人力、时间和设备等资源，增进群体交流与协作，提高飞机设计质量和技术状态变化的可追溯能力，从而达到缩短研制周期、降低研制成本的目的。

参考文献：

[1]《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册[M]. 第 4 册. 北京：航空工业出版社，2005.

[2] DAN B. Partitioning tasks to product development teams[C]// Proceedings of the DETC'02 ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences, September 29-October 2, 2002, Montreal, Canada. [S. l.]: IEEE Press, 2002:1-12.

[3] TANG D, ZHEN G L, LI Z, et al. Reengineering of the design process for concurrent engineering [J]. Computers & Industrial Engineering, 2000, 38(4): 479-491.

[4] PARK H, CUTKOSKY M R. Framework for modeling dependencies in collaborative engineering process[J]. Research in Engineering Design, 1999, 11(2): 84-102.

[5] VANDER A W, VANHEE K M. Workflow management: models, methods and systems [M]. London: The MIT Press, 2002.

[6] KLEIJN J, KOUTNY M. A Petri net model for membrane systems with dynamic structure[J]. Natural Computing, 2009, 8(4): 781-796.

[7] 王志坚，蔡自兴. 基于 IDEF0 模型的 Petri 网间接建模方法研究[J]. 系统仿真学报，2008，20(15)：3915-3919.
WANG ZHI-JIAN, CAI ZI-XING. Indirect modeling method by translating IDEF0 model into Petri net model[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(15): 3915-3919.

[8] JENSEN K, KRISTENSEN K M, WELL S L. Coloured Petri nets and CPN tools for modelling and validation of concurrent systems [J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2007, 9(3): 213-254.

[9] VANDER A W. On the automatic generation of workflow processes based on product structures[J]. Computer in Industry, 1999, 39(2): 97-111.

[10] JØRGENSEN J B, LASSEN K B, VANDER A W. From task descriptions via colored Petri nets towards an implementation of a new electronic patient record work?ow system[J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2008, 10(1): 15-28.

[11] LU Y H, ZHANG L, SUN J G. Using colored Petri nets to model and analyze workflow with separation of duty constraints [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(1): 179-192.

[12] 陈禹六. IDEF 建模分析和设计方法[M]. 北京：清华大学出版社，1999.

[13] 国防科学技术工业委员会. GJB2116. 武器装备研制项目工作分解结构[S]. 北京：中华人民共和国国家军用标准，1994:1-70.

[14] 国防科学技术工业委员会. HB7758. 飞机系统工作分解结构及代码[S]. 北京：中华人民共和国国家军用标准，2004:1-29.

[15] 宋李俊，杨育，杨洁，等. 多规则产品协同设计任务动态排序[J]. 重庆大学学报，2008，31(1)：1-4.
SONG LI-JUN, YANG YU, YANG JIE, et al. Research on task dynamic scheduling for product collaborative design based on multi-rule[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(1): 1-4.

[16] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京：电子工业出版社，2005.

（编辑 张小强）