基于数字样机的飞机研制项目监控技术

陈畅宇 于 勇 赵 罡

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 由于周期漫长、数据繁杂、并发事件多等特点,飞机研制项目需要高效的管理支撑环境.针对这种需求,提出了一种基于数字样机的项目监控方法.该方法首先在项目管理与产品数据管理集成模型的基础上创建一种面向项目监控的数字样机.通过将样机模型与任务信息进行绑定,实现多视图的项目监控环境.在进行样机模型可视化时,采用双层载入策略以降低系统显示负载.该方法以对数字样机的可视化与交互为基础,向项目管理人员提供一种支持多层面信息展示的项目监控界面,丰富了项目管理用户与企业信息间的交互方式.

关 键 词: 飞机研制; 数字样机; 项目监控; 信息可视化; 人机交互

中图分类号: V 260.5

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)02-0198-06

DMU-based project monitoring technology of aircraft development

Chen Changyu Yu Yong Zhao Gang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Due to characteristics of the long cycle, complex data and concurrent events, aircraft development project demands efficient management environment. To satisfy this demand, a method of project monitoring technology based on digital mockup (DMU) was proposed, and then an integrated model of project management (PM) and product data management (PDM) was developed. The DMU model was proposed to be bound with task information to realize multi-perspective project monitoring environment. Double-layer loading strategy was adopted to reduce system display burden when visualizing the DMU model. Based on the visualization and interaction of the DMU model, this solution provides project managers with a project monitoring interface which is able to display multi-perspective information and thus enriches the interaction between the users and enterprise information.

Key words: aircraft development; digital mockup; project monitoring; information visualization; human computer interaction

飞机研制是一个多阶段、多层面衔接配合的工作过程[1-2].每个阶段包含 1 个或多个基线.在每一个阶段中,按照协同并行设计的要求,由产品设计、工艺设计、工装设计、产品制造、检验检测等各领域共同完成设计迭代.在各阶段任务执行过程中,项目管理(PM,Project Management)监控[3]将项目的实际进展和项目计划结合起来,记录项目的进展和变化,保证即时信息交流,为项目计划的调整决策提供信息上的支持.相较于常规产品研制项目,飞机研制流程具有周期漫长、数据繁杂、并发事件多等特点.另外,飞机研制任务一般需要多家设计或制造单位之间的协作,涉及位置分散、变更频繁的大规模数据,形成了一种复杂的信息环境.如何在该种信息环境下,为飞机研制任务的管理决策者高效地提供管理决策依据,并辅助其发现项目中潜在的风险和问题,一直是航空制造业重点研究的命题之一,也是面向航空制造领域的项目监控技术发展的一个主要目标.

收稿日期: 2013-04-03; **网络出版时间**: 2013-07-02 10:03

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130702.1003.001.html

作者简介: 陈畅宇(1985-),男,云南昆明人,博士生,regulus_ccy@yeah.net.

根据上述飞机研制流程和信息环境特点,适用的项目监控方法应该包含下述功能:①实现大规模任务状态的全局可视化;②支持可定制的任务信息多视图展示;③便于大规模并发事件的情报掌握与快速处理;④提供处理事件所需的任务关联信息并支持信息追溯;⑤便捷高效的人机交互方式.

在传统的项目监控方法中,采用甘特图、资源监控表、任务进展报告等方式统计任务执行状况.将其与上述功能要求比较后可以发现如下缺点:①信息表达方式有限,局限于二维图表或文字描述,要求用户分配一定的理解与分析时间,在出现大规模事件并发时限制了用户的信息处理效率;②反映的信息缺乏联系,难以实现不同阶段间的任务数据追溯,管理人员处理问题时的视角缺乏全局性;③缺乏按照工作领域、资源类型划分的多层次直观视图,不便于快速分析任务关系与资源负载分布.

类似的缺点在建筑行业的建设项目管理领域中已经引起了关注[4],在项目计划过程中采用 4D CAD 系统[5]成为一种有效的问题解决途径.该种系统将项目规划和设计信息与 CAD 模型进行紧密结合,帮助项目管理人员更有效地掌握动态变化的项目信息.目前,4D CAD 系统在建设项目管理领域的应用已经比较成熟,证明了模型可视化用于项目管理监控环节的可行性与价值.

针对前述缺点,并借鉴于模型可视化与项目监控相结合的成功经验,本文在飞机研制项目监控中引入了数字样机技术,其出发点在于:首先,三维空间中的几何信息表达较二维图表更加直观;其次,数字样机可以有效地体现飞机产品结构与飞机研制任务的紧密联系.一方面,飞机研制任务一般按照产品结构进行工作结构分解.通过项目监控数字样机建立零部件具体形象与工作结构间的联系,有助于用户对工作任务的快速识别与理解;另一方面,飞机数字样机分级分阶段的构建过程与飞机研制任务的阶段划分相互对应,其成熟度是项目进度的另一种体现;最后,由于数字样机与产品数据管理(PDM,Product Data Management)系统存在紧密关系,为复杂的项目监控功能开发提供了便利.

在将数字样机模型与项目任务进行结合并实现项目监控功能的过程中,首先需要保证数字样机具有明确的创建规则与方法,并实现样机几何模型与任务节点的规则映射.然后在该映射基础上实现项目任务进度、资源分配情况等任务详细信息与样机的绑定显示,以及任务信息多阶段、多视图(不同资源相关性、不同系统功能相关性等)的展示.最后,良好的人机交互性能也是本方法重点考虑的因素.为了实现这些目标,本文首先研究了面向飞机研制的 PDM/PM 集成模型;然后基于该模型提出项目监控用数字样机的创建方法;最后围绕该方法的技术应用,对项目监控的可视化及交互方法进行了研究.该技术在工程实际中得到成功应用.

1　面向飞机研制的 PDM/PM 集成模型

数字样机(DMU,Digital Mockup)是对产品的真实化、集成化的虚拟仿真,用于工程设计、干涉检查、机构仿真、产品拆装、加工制造和维护检测等模拟环境[6-7].飞机数字样机的生成与飞机的研制项目规划、过程控制手段、数据管理方式等息息相关,划分为全机样机、结构样机、系统样机、分区样机、专用样机等类型[8].本文提出的项目监控用数据样机属于专用数字样机.随着飞机研制过程中方案设计、初步设计和详细设计的完成,逐步产生一级、二级和三级数字样机.作为一种任务交付物,数字样机的生成与存储既属于产品数据管理的范畴,又与项目管理的任务结构分解密切相关.可以将数字样机视为在 PM 与 PDM 之间的一种桥梁.为了实现基于数字样机的项目监控系统,必须对其所处的 PM 与 PDM 的集成环境作出清晰的描述,并在该种环境中实现 PM 系统对 PDM 系统的数据管理与工作流功能的有效调用.

在 PDM 与 PM 的集成理论方面,一些学者已经开展了卓有成效的工作.万立等[9]解释了将 PM 与 PDM 进行集成的必要性,并提出了一种 PDM 中面向产品开发全过程的项目组织模型.其主要思路为按阶段将项目划分为不同子任务,在相邻阶段间设置评估过程;对子任务继续进行逐级分解时,保证分解出的子活动能够描述父活动的一项完整的单元功能.何恒等[10]则从产品结构分解角度建立项目任务与产品结构模型间的对应关系,认为复杂产品的研制项目管理实质上可以作为一种系统工程,并建立了一种三级划分的工作分解结构(WBS,Work Breakdown Structure).3 个级别由高至低依次为:基于产品的工作分解结构(PWBS,Product-based WBS),基于交付物的工作分解结构(DWBS,Delivery-based WBS),基于项目活动分解的工作分解结构(AWBS,Activity-

based WBS). 在此基础上,何苗等[11]提出了产品结构分解(PBS, Product Breakdown Structure)与 WBS 间的关系映射,通过交付物实现了 PBS 节点与 WBS 单元项的关联. 实际应用方面,空客在产品(A380,A350 及后续机型)研发过程中全面引入了 cDMU(configured DMU)概念[12],以对产品结构的分解为线索组织和协调全球化的协同研发. 在现有软件系统中,PTC 公司的 Windchill 和达索公司的 V6 系列等主流软件都提供了与 PDM 相关联的 PM 集成方案.

综合上述观点和成果,本文认为何恒等[10]提出的"PWBS-DWBS-AWBS"模式符合对飞机研制项目活动的分解与执行应用现状的描述,并有利于在数字样机与多级别的任务之间建立映射. 为了便于对本文方法进行阐述,本文对该模式进行了简化,依然沿用"PWBS","DWBS","AWBS"这 3 个标记. 在该模式中,可以划分出在产品研制的不同阶段、不同模块或系统进行的、不同层面或领域的任务,其基本组织形式如图 1 所示.

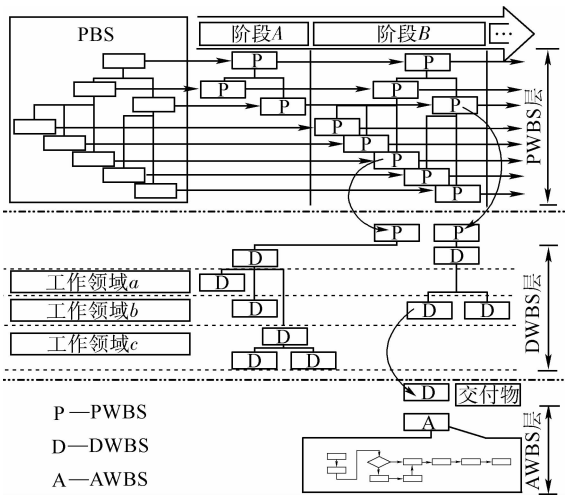


图 1 研制项目管理模型

每一个阶段均按照产品结构或系统功能对飞机研制项目进行多级别分解,分解的功能单元对应于研制的子活动单元(PWBS);该种 PWBS 单元分解为多个领域类别的多层任务单元(DWBS);在每个 DWBS 单元中,由 AWBS 单元驱动工作流实现对交付物的操作与提交. 这 3 种单元可以分别记为式(1)~式(3).

$$U_{\mathrm{P}} = \langle M, P, R_{\mathrm{P}}, U'_{\mathrm{D}}, A_{\mathrm{P}} \rangle \tag{1}$$

其中,U_{P} 表示 PWBS 单元(后文以 u_{P} 表示 U_{P} 的一个实例);M 为 PWBS 单元各工作领域 d 的样机模型的集合(设包含若干个工作领域的集合为 $D = \{d\}$),将特定的 PWBS 单元 u_{P} 在工作领域 d 下对应的 M 记为 $M(u_{\mathrm{P}}, d)$;P 为研制阶段,将特定阶段 p 下的 U_{P} 记为 $U_{\mathrm{P}}(p)$;R_{P} 为 U_{P} 间的关系集合;U'_{D} 为 U_{P} 所对应的 DWBS 单元集合,将 u_{P} 对应的 U'_{D} 记为 $U'_{\mathrm{D}}(u_{\mathrm{P}})$;$A_{\mathrm{P}}$ 为 U_{P} 的其他属性集合.

$$U_{\mathrm{D}} = \langle R_{\mathrm{D}}, L, U'_{\mathrm{A}}, D, A_{\mathrm{D}} \rangle \tag{2}$$

其中,U_{D} 表示 DWBS 单元;R_{D} 为 DWBS 单元间的关系集合;L 为 U_{D} 对应的交付物集合,U_{D} 的交付物记为 $L(U_{\mathrm{D}})$;U'_{A} 为 U_{D} 所对应的 AWBS 单元集合;D 为 U_{D} 所属的工作领域 d 的集合,$D = \{d\}$,将特定工作领域 d 对应的 U_{D} 记为 $U_{\mathrm{D}}(d)$;A_{D} 为 U_{D} 的其他属性集合.

$$U_{\mathrm{A}} = \langle R_{\mathrm{A}}, C, A_{\mathrm{A}} \rangle \tag{3}$$

其中,U_{A} 表示 AWBS 单元;R_{A} 为 AWBS 单元间的关系集合;C 为 U_{A} 对应的执行流程;A_{A} 为 U_{A} 的其他属性集合.

在飞机研制过程中,基线是研制阶段划分的依据,基线必须对产品结构或系统功能的研制目标提出明确要求,以便于进行 PWBS 层与 DWBS 层的分解. PWBS 按产品结构分解方式进行分解. 随着研制项目的推进,后续阶段在前面阶段划分的基础上进行细化和补充. 虽然 PWBS 单元在后续研制阶段可以被沿用,但针对 PWBS 单元所执行的研制任务并不相同,故不同阶段中的相同 PWBS 单元所含的 DWBS 不同. AWBS 单元根据 DWBS 的交付物类别调用或创建工作流模板,按模板规则管理任务执行过程.

上述方法使用 PWBS 单元指明了项目计划与产品结构或功能系统的对应关系,建立了项目任务与 PDM 系统管理的产品结构间的关系,形成了 PDM 系统与 PM 系统共同协调管理的数据环境. 同时,DWBS 单元与 PWBS 单元之间的附属关系使所有交付物都可以与产品结构或功能系统相对应,为面向项目监控的专用数字样机理论的提出创造了数据关系基础.

2 项目监控专用数字样机创建方法

数字样机包括所有研制任务成果在三维虚拟空间中的仿真,如外形、物理特性、空间关系、运动控制逻辑等. 相对于运动仿真、干涉检查等应用,面向项目监控的数字样机包含的内容较为简单,仅需要能指明与 PWBS 单元对应关系的外形数据. 该类外形数据来自于与几何设计相关的研制活动.

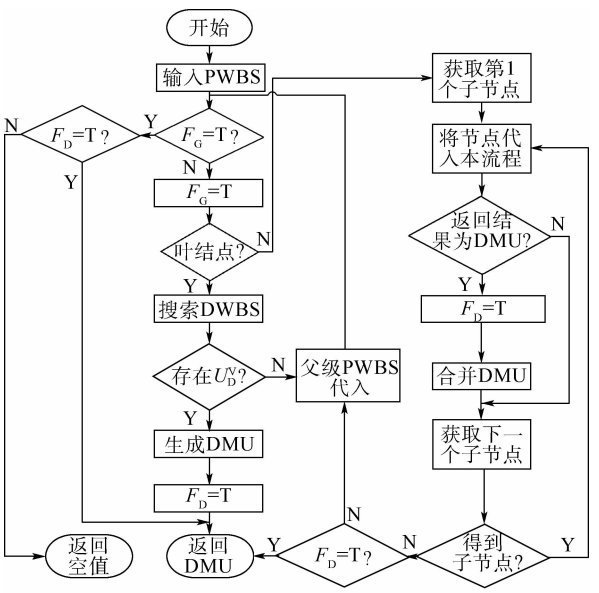
本文将以样机模型作为交付物的 DWBS 单元定义为项目监控用数字样机的可视化支撑单元,记为

$$U_{\mathrm{D}}^{\mathrm{V}} = \{U_{\mathrm{D}} \mid L(U_{\mathrm{D}}) \in M\} \tag{4}$$

根据所属工作领域的不同,每个阶段中的 U_D^V 均可以被划分到不同工作领域 d 中,记为 $U_D^V(d)$. 组合同一 $U_P(p)$ 下所有 $U_D^V(d)$ 对应的交付物,可以生成 $U_P(p)$ 在领域 d 下的项目监控用数字样机:

$$M(u_P(p),d) = \{l \mid l \in L(U_D^V(d)),\ U_D^V(d) \in U'_D(u_P(p))\} \quad (5)$$

对于不含有 U_D^V 的 PWBS 单元,向其父级 PWBS 单元进行递归搜索,直至找到具有 $M(u_P(p)',d)$ 的祖先级 $u_P(p)'$,将该 $M(u_P(p)',d)$ 视为 $M(u_P(p),d)$. 图 2 给出了创建 $M(u_P)$ 的具体算法,过程中使用了两个标志变量 F_G 和 F_D,(它们在开始处的初始值均为"false"):F_G 为"false"时表示 PWBS 没有执行过 DMU 创建流程;F_D 为"false"时表示 PWBS 对应的 DMU 尚未创建. 创建完成的 $M(u_P(p),d)$ 如图 3 所示.



T—true.

图 2　数字样机创建流程

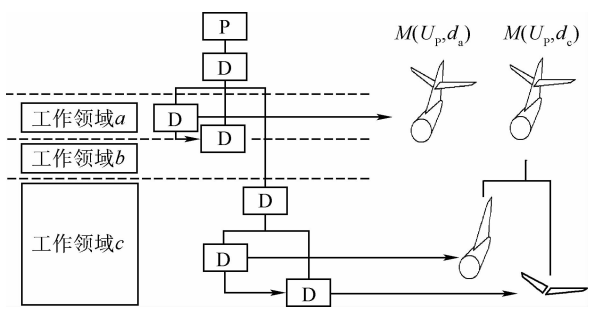


图 3　不同工作领域的数字样机结构示例

在实际项目推进过程中,数字样机的生成是一个动态过程,当所有子 PWBS 单元的 U_D^V 均执行完毕后,才能完成 $M(U_P)$ 的创建. 在阶段 p_i 中,由于 $M(u_P(p_i))$ 是 $U_D^V(u_P(p_i))$ 的交付物,无法在 $U_D^V(u_P(p_i))$ 执行过程中提前给出. 所以,应该采用 $M(u_P(p_{i-1}))$ 作为阶段 p_i 开始时的数字样机,用于标示 p_i 中的 $u_P(p_i)$ DWBS 进展情况(项目开始时,可以采用图片或简化概念模型作为数字样机模型的替代物). 随着 $U_D^V(u_P(p_i))$ 的完成,逐步对 $M(u_P(p_i))$ 进行更新. 以方案设计阶段 p 为例,在达到结构布局基线以前,只能采用没有分离面的概念样机的外形数据作为 $M(u_P(p))$;在划分结构分离面和工艺分离面的各级 U_D 执行过后,会逐步形成结构布局数字样机,对 $M(u_P(p))$ 进行替换升级,逐步采用由分离面定义的外形数据展示.

3　项目信息绑定及多视图监控

利用 $M(U_P(P))$ 与 $U_P(P)$ 的对应关系,可以从数字样机直接查询到以对应 PWBS 单元为根节点的 PWBS 单元树,以及所有依附于各树节点的 DWBS 单元树. 通过对这些 DWBS 单元的属性信息进行抽取与分析加工,有利于管理人员对资源进行有效、合理的调度与分配.

通过 $M(U_P(P),D)$ 与 $U_P(P)$ 及 $U_D(D)$ 之间的关系,可以标示不同 PWBS 单元在阶段、空间、层次方面的关系,从产品结构视角快速锁定相关的任务活动,并按照工作领域划分查看不同领域的任务情况,实现了飞机研制过程中各阶段的统一管理. 结合任务本身具有的丰富属性,项目监控用数字样机允许对项目信息按如下方式进行多角度地观察:①指定研制阶段,查看相关的项目信息;②指定 PWBS 单元,查看其在全生命周期中的项目信息;③指定工作领域,查看与该领域相关的项目信息. 如图 4 所示,虚线为被选择的元素. 用户查看了阶段 $P(A)$ 下的 PWBS 根节点在工作领域 d_3 下的 $M(u_P(P(A)),d_3)$. 以该 DMU 为基点,可以查询 PWBS 在该工作领域下的 DWBS 树,进而可以查看各任务的详细信息和进展情况. 用户也可以在不同阶段与工作领域的 $M(u_P(P))$ 间进行快速切换.

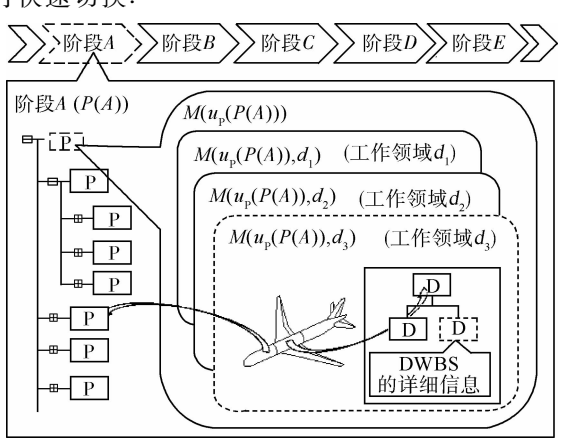


图 4　数字样机与任务信息的绑定示例

4 数字样机双层模型载入策略

数字样机模型来自于专业设计软件的精确建模,将参数化的实体模型转换为表面模型后,如果维持原有模型精度,全机模型将变得非常巨大.故按照行业标准建议,数字样机在应用时应该经过一定程度的简化[8]. G. Sun[13]认为数字样机的可视化系统应该在符合应用精度需求的前提下能够载入所有需要的模型,并且具备好的显示性能与效果.除了进行模型面片的简化,在可视化阶段还可以采用细节层次(LOD,Level of Detail)的实时自适应绘制、模型分割、可见性剔除、动态存储调度、光线跟踪等技术提高系统的显示效果和性能[14].

相对于其他数字样机应用系统的需求,使用面向项目监控的数字样机时,样机模型仅仅作为任务活动的标示物,对模型可视化的精度要求很低,仅要求保证模型的外观不会使用户在辨别 PWBS 时产生歧义.在使用过程中,用户需要在不同阶段、不同层次的 $M(U_P(P))$ 间进行切换,要求系统实现对模型的批量载入和可视化.除了前述的可视化优化手段,为了减轻显示设备的运算负担,本文提出了 $M(U_P(P))$ 展开时的双层模型载入策略,如图 5 所示.

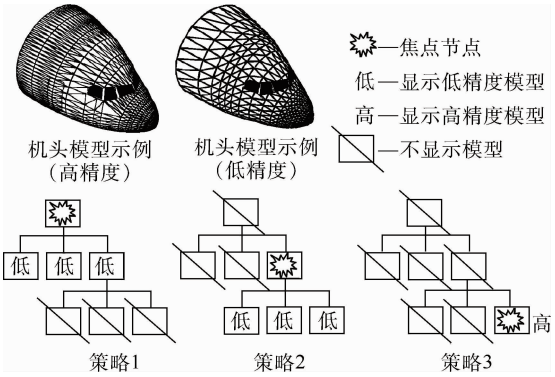


图 5 双层模型载入策略

该策略中,为每一个 DMU 预定一个低精度模型.所谓低精度,是指仅维持该样机轮廓外观的精度,剔除所有细节性的内容,以及被遮挡的不可见部分.设 $M(u_P(p))$ 在 DMU 树中为非叶节点.当用户观看 $u_P(p)$ 的内容时,由 $M(u_P(p))$ 的子级的低精度模型组成当前的 DMU 模型.当焦点转换为其中一个子级 DMU 时,系统首先将卸载当前场景中的模型,然后,如果该子级 DMU 为非叶节点,则重复低精度载入的模式,载入该子级 DMU 所有子级的低精度模型;如果该子级 DMU 已经是叶节点,则载入精度较高、适于显示的模型.

基于如上可视化策略,提出以数字样机模型为对象的基本界面交互功能:①围绕模型进行的视角平移、旋转与缩放;②对模型的选择和拾取;③在 DMU 树中的漫游.

5 飞机研制项目监控原型系统

为了验证本文理论的可行性,设计并实现了功能较为简单的原型系统.如图 6 所示,该原型包括 PDM 系统、PM 系统、监控服务器、监控客户端、协同工具服务器等部分.其中,PDM 系统采用的是 PTC 公司的 Windchill PDMLink.监控服务器根据 PDM/PM 集成模型的定义从 PDM 与 PM 系统中抽取数据;在客户端利用封装了 WebGL 的 three.js 库和 ExtJS 库生成项目信息监控页面;协同工具软件选择了思科公司的 WebEX,提供了远程协同常用的短消息、视频会议、电子白板、远程桌面等功能.原型采用 B/S 架构,支持 PDM,PM 及 DMU 数据层服务器的灵活部署.

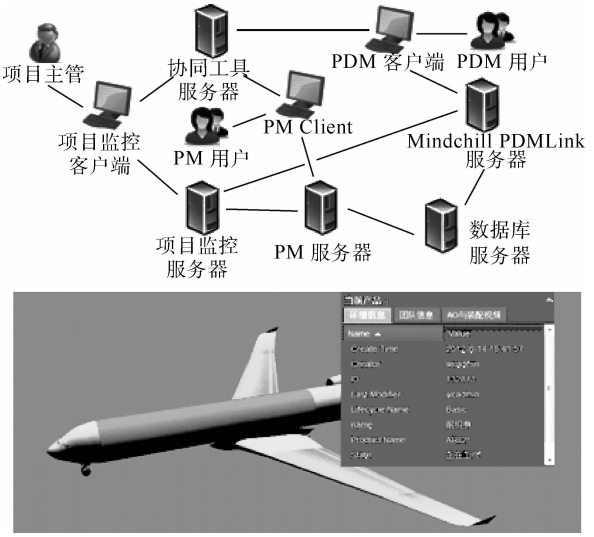


图 6 原型系统结构及界面示例

该原型实践了数字样机的双层模型动态载入与可视化;实现了第 4 节中所述的交互功能;允许用户通过样机模型查看相关的项目任务信息;利用样机模型的颜色标示任务进展状况;用户可以通过样机模型快速定位任务相关角色并利用协同工具发起远程协同讨论.

6 结 论

本文针对飞机研制项目监控需求,通过对 PDM/PM 集成模型的研究,建立了项目任务与 DMU 模型间的关系模型.基于该关系模型,提出了一种使用数字样机辅助进行项目监控的方法,并研究了相关的可视化与交互技术.通过原型系

统对理论进行了成功实践. 面向飞机研制项目监控的数字样机使项目管理人员能够全局性地、多角度地、沉浸式地漫游于项目信息中.

本文工作虽然完成了简单的原型系统,但仍然需要在如下几个方面进一步开展工作:①虽然"PWBS-DWBS-AWBS"模式符合对飞机研制项目活动的描述,但在诸如 MS Project 这样的通用项目管理软件中并没有提供与产品结构分解对应的任务分解功能,只能人工进行工作结构分解与产品结构分解间的映射,故需要进一步研究自动化实现该种映射的方法;②本文实现的原型系统,其人机交互形式仍然以传统的 WIMP(Windows,Icons,Mouse,Pointer)为主,限制了用户与项目信息之间的交互效率. 可以考虑结合人机自然交互界面和虚拟现实交互设备进行研究,使面向海量数据的项目监控能够真正受益于三维用户界面环境,提高系统的易用性与使用效率;③由于飞机零部件形状与尺寸差异较大,可能导致同一层级对应的数字样机可视化尺寸差异过大,需要进一步研究用于辅助的信息提示与模型交互方法. 另外,对于随着监控需求而出现的大规模的、结构化的、非几何的信息,其可视化方法也应该作为进一步研究的重点.

随着信息可视化与人机交互技术的进一步发展,数字样机在项目监控中的应用途径必将得到进一步发展.

参考文献(References)

[1] 邓玉东. 沈飞公司 ARJ21 项目分层进度计划体系的构建与应用[D]. 长春:吉林大学,2010
Deng Yudong. The establishment and application of multi-tier schedule management system for ARJ21 program in SAC[D]. Changchun:Jilin University,2010(in Chinese)

[2] 宋斌. XL 飞机研制项目管理研究[D]. 成都:电子科技大学,2008
Song Bin. Research on project management of XL aircraft[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2008(in Chinese)

[3] 丁玉霞,邓家褆. 项目管理监控及可视化的研究[J]. 中国制造业信息化,2007,36(7):65 - 68
Ding Yuxia,Deng Jiati. Research on project management monitoring and representation[J]. Manufacturing Information Engineering of China,2007,36(7):65 - 68(in Chinese)

[4] Russell A D,Chiu C,Korde T. Visual representation of construction management data[J]. Automation in Construction,2009,18(8):1045 - 1062

[5] Koo B,Fischer M. Feasibility study of 4D CAD in commercial construction[J]. Journal of Construction Engineering and Management,2000,126(4):251 - 260

[6] 郑朔昉,王俊彪. 飞机数字样机研制规范化解决方案[J]. 航空制造技术,2003(9):67 - 71
Zheng Shuofang,Wang Junbiao. Solution of the standard system for development of airplane dgital mckup[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2003(9):67 - 71(in Chinese)

[7] Zorriassatine F,Wykes C,Parkin R,et al. A survey of virtual prototyping techniques for mechanical product development[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part B:Journal of Engineering Manufacture,2003,217(4):513 - 530

[8] CN-HB 7757—2005 飞机数字样机通用要求[S]
CN-HB 7757—2005 The general specification of airplane digital mockup [S](in Chinese)

[9] 万立,陈性攀,刘清华. 面向产品开发的项目管理在产品数据管理中的研究[J]. 计算机集成制造系统,2007,13(1):126 - 131
Wan Li,Chen Xingpan,Liu Qinghua. Project management oriented to product-development process in PDM[J]. Computer Integrated Manufacturing System,2007,13(1):126 - 131(in Chinese)

[10] 何恒,邓家褆. 支持复杂产品研发的 WBS[J]. 航空制造技术,2009(12):74 - 78
He Heng,Deng Jiati. WBS supporting complex product development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2009(12):74 - 78(in Chinese)

[11] 何苗,杨海成,敬石开. 基于产品分解结构的复杂产品工作分解技术研究[J]. 中国机械工程,2011,22(16):1960 - 1964
He Miao,Yang Haicheng,Jing Shikai. Decomposition method of WBS based on PBS for complex products[J]. China Mechanical Engineering,2011,22(16):1960 - 1964(in Chinese)

[12] Garbade R,Dolezal W R. DMU@ Airbus-evolution of the digital mock-up (DMU) at Airbus to the centre of aircraft development[M]. Krause F. Heidelberg:Springer,2007:3 - 12

[13] Sun G. A digital mock-up visualization system capable of processing giga-scale CAD models[J]. Computer-Aided Design,2007,39(2):133 - 141

[14] 谈敦铭. 飞行器大数据量 CAD 模型实时绘制[D]. 北京:北京航空航天大学,2013
Tan Dunming. Real-time rendering of massive aircraft CAD models[D]. Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2013(in Chinese)