

## 支持复杂产品研发的 WBS

## WBS Supporting Complex Product Development

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 何 恒 邓家禔

[摘要] 讨论了系统工程与项目管理的区别和联系,指出系统工程与项目管理融合是复杂产品研发项目的要求。提出一种与这种要求相适应的 WBS(工作结构分解)模型——PDA-WBS 模型,讨论了该模型的特点,并提出了适应系统工程特点的 DWBS 模板;最后介绍 PDA-WBS 模型的软件实现。

关键词: 工作结构分解 系统工程 项目管理 复杂产品

**[ABSTRACT]** The difference and relationship of systems engineering and project management were discussed. It is concluded that the complex product development requires the combination of systems engineering and project management. Therefore, a WBS (Work Breakdown Structure) model, PDA-WBS, is proposed to satisfy this requirement. The characteristic of the WBS is discussed, and a DWBS template which coordinates with the characteristic of the systems engineering is presented. Finally, a software framework to implementing the presented WBS is introduced.

**Keywords:** Work Breakdown Structure Systems engineering Project management Complex product

复杂产品是指产品组成复杂、需求复杂、技术复杂以及过程和管理复杂的一类产品。复杂产品研发过程中涉及的子系统多、学科技术种类多、工具多,系统的组成呈现出分布、交互的特点,且与外界环境存在复杂的交互关系<sup>[1]</sup>。产品的复杂性要求我们采用系统工程的方法进行产品研发项目管理。工作分解结构(Work Breakdown Structure, WBS)是一种将工作按层次分解的工作计划方法。系统工程的引入对传统项目管理的 WBS 提出了新的要求。

本课题首先明确系统工程与项目管理的区别和联系,进而论述在复杂产品研发中系统工程与项目管理的分工与合作,并在此基础上提出了适应系统工程与项目管理融合要求的 WBS 模型——PDA-WBS 模

型;提出了针对复杂产品研发的 WBS 模版;论述了本课题提出的 WBS 模型的特点和优点;最后介绍了 WBS 模型的实现。

## 1 系统工程与项目管理的区别和联系

系统工程定义为:为满足用户需求,用来演进和验证一套集成的、全生命周期平衡的系统解决方案的多学科工程管理过程<sup>[2]</sup>。

项目管理定义为:把各种知识、技能、手段和技术应用于项目活动之中,以达到项目的要求<sup>[3]</sup>。

从定义上很难看出两者的本质区别。前者的目的是满足用户的需求,后者的目的是达到项目的要求,似乎是同样的事情采用了不同的表达方式而已。另外在工程实践中,由于项目大型化和复杂化的趋势加重,项目经理常常要在项目管理中不自觉地承担系统工程的任务,同时不自觉地在本应属于系统工程范畴的任务归为项目管理的范畴。

系统工程与项目管理概念的混淆使得人们在进行复杂产品研发项目计划时,不知道应该在什么情况下运用系统工程或者项目管理。为了构建支持复杂产品研发的 WBS,明确系统工程和项目管理的区别和联系是很有必要的。

Vincent 专门对比了项目管理与系统工程的异同<sup>[4]</sup>。借鉴他的观点,将系统工程与项目管理的区别和联系总结如下:

① 系统工程的研究对象为复杂的系统,力图在纷繁复杂的系统中获得优化的总体性能;它用全局的观点看待系统,强调系统的涌现性,认为系统整体大于系统局部的简单和;它关注系统的需求,通过确定系统需求来定义系统,并最终验证系统需求是否得到满足。

② 项目管理处理的对象主要是已经得到很好理解的问题。它的大部分任务在执行之前就已经被严格地定义;它的观点是系统局部之和等于系统整体;它关注具体的工作成果,通过定义严格的解决方案,提供最终的交付物来实现系统管理。

③ 系统工程致力于做正确的事,而项目管理则致力于把事情做正确;系统工程主要通过并行的、迭代演进的方式来定义系统,而项目管理更多的是以单向推进的方式来完成任务。

以上所述两者的区别只是相对的,随着大型复杂项目的不断增多以及现代项目管理和系统工程理论不断发展,项目管理与系统工程将逐渐融合到一起:一方面系统工程所定义的活动需要通过项目管理的方式来落实和执行;另一方面项目管理人员也开始用系统的眼光研究项目,以获得项目的总体最优。

## 2 复杂产品研发中系统工程与项目管理的集成

明确了系统工程与项目管理的关系与作用以后,就可以定义系统工程与项目管理在复杂产品研发中的分工与合作。系统工程更多应用在产品系统研发的早期,处理系统的复杂性,定义需求和系统的上层结构以及对项目进行总体的规划。项目管理的功能主要是在系统工程定义的框架内制定详细计划,将任务细分到可控制的水平,并为任务的运行落实资源。以上具体的工作都是通过 WBS 来表达的,因此我们提出的 WBS 结构要能够体现系统工程与项目管理分工与集成的要求。

系统工程的 WBS 是一种基于系统产品分解来组织系统研发活动的方式<sup>[2]</sup>。项目管理的 WBS 是一种将项目大的可交付物与项目工作划分为较小和更易管理的组成部分的方法<sup>[3]</sup>;若在大型复杂项目中直接通过识别和分解可交付物来建立 WBS,会造成项目任务纷繁复杂、千头万绪,不利于项目的控制。而如果仅仅通过产品分解来组织项目活动又会使得划分项目任务粒度过粗,不利于任务的落实和开展。

## 3 PDA-WBS 构造法

本课题结合以上两种 WBS 构造方法的特点,提出了 PDA-WBS 构造法。如图 1 所示,这种 WBS 由 3 个层次的分解结构组成:第 1 层次为 PWBS,基于产品分解的 WBS;第 2 层次为 DWBS,基于交付物分解的 WBS 结构;第 3 层次为 AWBS,基于项目活动分解的 WBS;在 PWBS 之上是划分的研发阶段,严格来说它不属于 WBS 的范畴。

PDA-WBS 构造法的基本原理是:复杂产品研发的生命周期可以划分为若干个阶段,在每个阶段可以将复杂产品按产品结构进行分解,得到一个 PWBS;

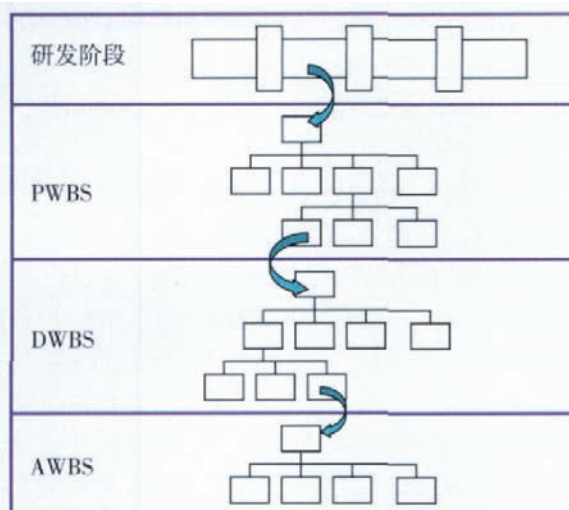


图 1 PDA-WBS 原理图

Fig.1 Principle of PDA-WBS

对于每一个 PWBS 单元,可以按交付物进行分解得到一个对应的 DWBS 结构;同样的对于每个 DWBS 单元,可以按活动分解得到一组 AWBS。这样通过 3 个层次的分解来将产品研发项目分解为具体的活动。以下对每一层次的 WBS 进行详细说明。

### 3.1 PWBS

根据公理化设计理论<sup>[5]</sup>,设计就是把系统分解为子系统,然后分解为部件,再分解为零件,最后分解为零件特征的过程。PWBS 是随着设计阶段的发展而“生长”的。PWBS 单元被定义为在产品设计中已经确定为基线的产品结构单元。尚未确定为产品系统组成部分的产品结构单元只能作为一个设计方案存在于设计草图中;只有当这个设计方案经过评审,以基线的形式固定下来,才能成为一个 PWBS 单元,作为下一阶段更详细设计的基础。

大多数产品研发都不是从一张白纸开始的。美国国防部发布的 WBS 军用标准<sup>[6]</sup>就为飞行器系统、船舶系统和导弹系统等 8 个国防领域的系统研发提供了概要性 WBS。概要性 WBS 给出了相关领域产品的前 3 层产品结构,它起到了 WBS 模板的作用。企业可以通过裁剪得到具体研发项目的 PWBS。通过定制 PWBS 模板,规范了企业对于不同类型产品研发活动的管理。企业通过 PWBS 模板容易对特定类型产品的工作量做出统计、分析、估计和控制。

PWBS 中的产品单元应该包括两类产品:最终产品和保障实现产品。最终产品是指提供顾客所需的业务功能的那部分产品;保障实现产品是指能够为最

终产品的研发、制造和保障提供支持与服务的那部分产品。例如,在飞行器系统中飞行器是最终产品,培训服务、数据管理、后勤支持设备、生产设施和备件等属于保障实现产品。

如果采用系统的观点看待事物,产品结构的每一个单元都可以作为一个系统,该系统与其下级组成成分之间的关系是系统与子系统的关系。

产品系统的外部特性是指该产品的功能、技术规格、与相邻产品的接口关系以及与上级产品系统的接口关系。产品系统的内部特性是指产品系统由哪些子系统构成,这些子系统的功能、技术规格、子系统之间的接口关系以及系统与子系统之间的接口关系如何。产品系统的内部特性是子系统外部特性的综合。产品设计实际上是定义产品的内部特性来实现产品外部特性。产品的外部特性是产品系统设计的需求和约束。

产品研发的演进则是由产品系统到子系统,再由子系统到子子系统,由上至下层层推进的。但是产品的演进不是瀑布式的,子系统的设计必然要通过系统级的综合验证才能获得通过。一旦证实系统设计不能满足需求,就意味着设计基线的变更,这时必须启动技术状态管理过程来解决变更对相关系统单元的影响问题。

在复杂产品研发中产品单元具有以下4种状态:

- (1) 开发。产品的内部特性尚未定义清楚,有待进一步开发;
- (2) 外包。产品内部特性的开发由承包商来承担;
- (3) 外购。不需要了解产品的内部特性,因为该产品可以通过购买商用成熟产品来实现,商用成熟产品通过封装屏蔽了产品的内部特性;
- (4) 现有。构成产品系统的产品单元已经存在,不需要研发或采购,但是其他产品与它集成为一个大的产品系统时,必须要考虑该产品的外部特性,这种情况在系统之系统(System Of System, S O S)的研发中最为常见。

通过定义产品单元的不同状态,可以对复杂产品研发采取不同的研发方案来进行优化。例如对于拥有关键性能的产品单元进行自主开发(定义“开发”状态)以保证企业对产品性能的控制;对于研发时间紧任务重的产品单元可以进行对外承包以降低进度风险;而对于技术比较成熟的产品进行外购通常可以使项目在性能、费用和进度3个方面同时得到改善;而合理利用现有设备来构建新系统则可以节省大量

的时间和费用。

### 3.2 DWBS

在这里交付物定义为围绕产品研发而制定并提交的一系列文件、数据或模型等中间工作成果。交付物构成了产品研发的核心,必须认真审核和妥善保存。

每个在研发中要进行评审的工作成果都要用交付物表示出来。应该根据产品单元研发工作的规模将交付物细分到容易控制的粒度,这样DWBS的叶结点就可以作为一个工作包,由这个工作包发起一系列活动,这些活动围绕着如何去完成相应的交付物,构成AWBS。

不同类型的项目可以由不同的交付物分解。企业可以根据项目的特点制订一些符合本企业项目特点的DWBS模板来规范本企业的项目管理。本课题针对复杂产品研发的特点制定了一套反映系统工程原理的DWBS。

根据系统工程原理<sup>[2]</sup>,系统研发的核心过程是系统工程过程(见图2)。系统工程过程不仅应用于产品研发中的每一个阶段,还应用于产品结构的每一个层次。对每个PWBS单元进行的设计可以看作一个子项目,子项目与项目的关系是自治与中央控制的关系。每个PWBS元的第一层DWBS分解为:“计划”、“需求分析”、“功能分析与分配”、“设计综合”和“系统分析与控制”。这5类工作成果构成了DWBS的基本单元(见图3)。DWBS的5个基本单元又可以细分为如图4~8所示的层次结构。图3~5所示的DWBS结构构成了本课题提出的DWBS模板。

DWBS结构模板并不是一个严格的框架,实际运用中应该根据待研发产品和项目的实际情况对它进

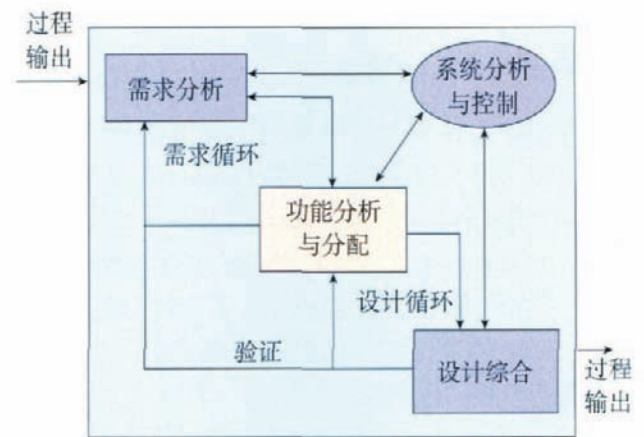


图2 系统工程过程

Fig.2 Systems engineering process

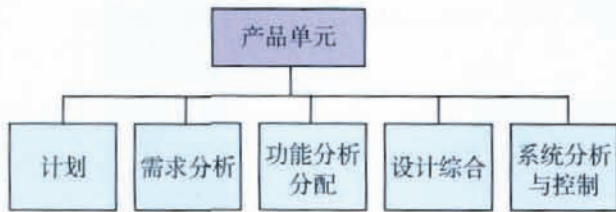


图3 DWBS的5个基本单元  
Fig.3 5 basic elements of DWBS

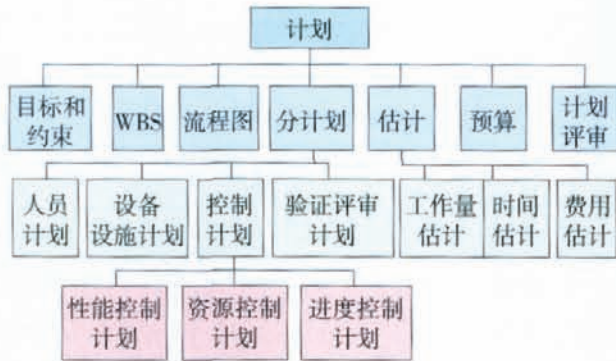


图4 “计划”结构分解  
Fig.4 Breakdown structure of “plan”

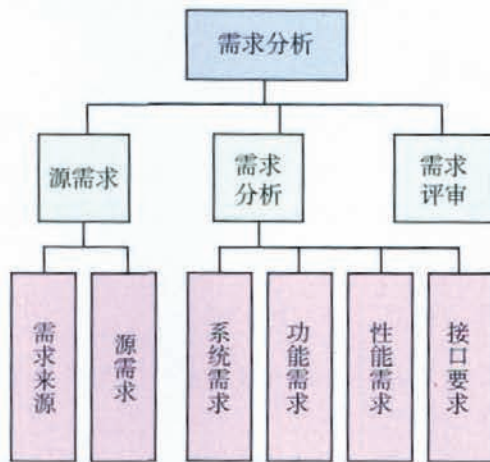


图5 “需求分析”结构分解  
Fig.5 Breakdown structure of “requirement analysis”

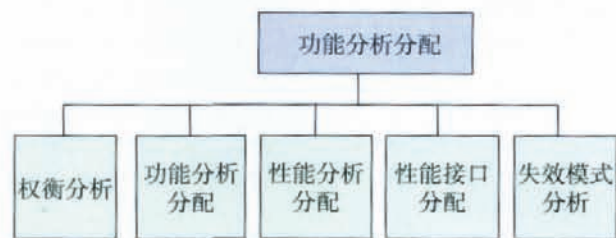


图6 “功能分析和分配”结构分解  
Fig.6 Breakdown structure of “functional analysis and allocation”

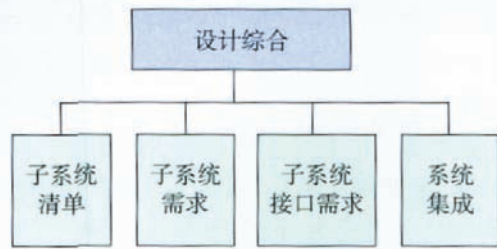


图7 “设计综合”结构分解  
Fig.7 Breakdown structure of “design synthesis”

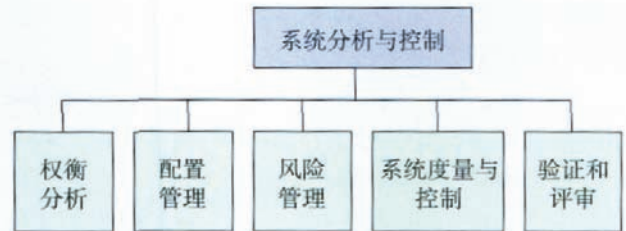


图8 “系统分析与控制”结构分解  
Fig.8 Breakdown structure of “system analysis and control”

行裁剪,包括增加、削减、细分或集成 DWBS 的单元。

根据交付物单元的实现状况,交付物具有 3 种状态:① 待完成;② 已完成;③ 引用。

交付物定义为“引用”状态表明交付物单元可以直接引用其他工作成果,而不需要专门安排活动去实现。例如某子系统产品单元的系统需求可以引用上级系统的产品规格说明书。

采用“引用”交付物避免了重复设计,节约了项目的时间和成本,也可以提高设计文档的一致性和可追溯性。

### 3.3 AWBS

根据交付物的要求,定义一系列活动去实现这个交付物,这些活动就构成了 AWBS。在 AWBS 层面关注的是如何顺利地完成任务。

### 3.4 PDA-WBS 的特点

PWBS 解决的是“对象是什么”的问题; DWBS 解决的是“做什么”的问题; AWBS 解决的是“怎么做”的问题。PWBS 和 DWBS 更多地属于系统工程的范畴,而 AWBS 则属于项目管理的范畴。

PWBS 把任务和资源分配到企业或组织层面; DWBS 把任务和资源分配到组织或角色层面; 而 AWBS 则把任务和资源分配到具体的个人。

从项目计划的功能看 PWBS 是一个基于对象的计划,描述了要开发的产品单元、需求以及开发的规

模和难度; DWBS 是一个基于事件的计划,它描述了主要的任务和要求;而 AWBS 是一个基于日历的计划,它把任务的实现落实到具体的活动。

系统工程是一个反复迭代的过程,所以不同于传统的 WBS,本课题提出的 WBS 节点应该能够反复的进入,每次进入就会更新生成相应交付物的版本。

PDA-WBS 的优点为:

①分层的结构有利于组织对项目进行分层管理。企业管理人员与顾客关注 PWBS;项目经理和系统工程师则需要同时关注 PWBS 和 DWBS;而学科工程师和项目成员只需关注 AWBS。

② PDA-WBS 同时将产品结构、交付物和项目活动的信息以层次化的形式显示出来,使项目信息在全项目范围内得到很好的沟通。

③ DWBS 模板使得系统工程具有了更为形式化的模型,增强了系统的可操作性。

④ PDA-WBS 采用统一的形式化表达有利于项目管理的规范化,提高了项目计划的可靠性和项目的可控性。

#### 4 PDA-WBS 的实现

根据 PDA-DWBS 基本原理提出了复杂产品研发平台的设计方案(见图 9)。该平台主要由 3 大模块组成:系统工程管理模块、项目管理模块和产品数据管理(PDM)模块。系统工程管理模块负责产品研发过程中的上层需求定义、项目规划、系统分析和控制等功能, PWBS 和 DWBS 均位于该模块; AWBS 位于项目管理模块,由项目管理模块安排活动,分配资源和监控运行;产品数据模块负责产品数据管理以及提供

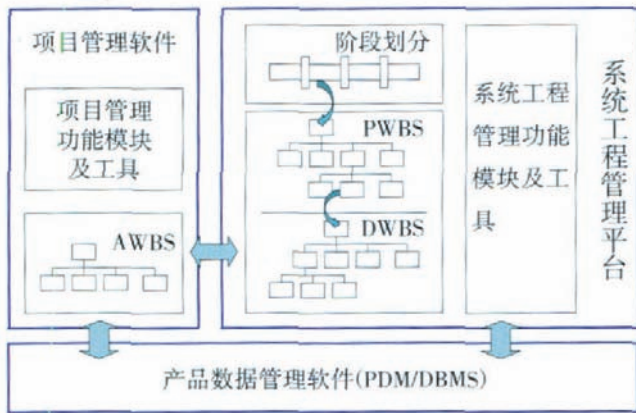


图 9 复杂产品研发平台功能模块图  
Fig.9 Functional blocks of complex product development platform

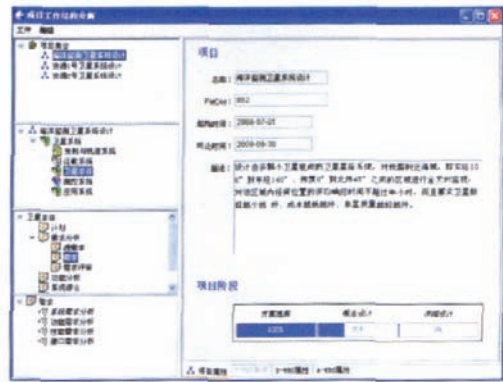


图 10 复杂产品研发 WBS 界面  
Fig.10 WBS interface for complex product development

流程管理、组织管理和设计工具集成等服务。

对系统工程管理模块采用了自主开发的方案。对项目管理模块和产品数据管理模块则采用商业的项目管理软件和 PDM 软件(本课题采用的是 PTC 公司的 Windchill ProjectLink 和 Windchill PDMLink)。3 个模块通过 PDM 软件提供的 API 函数进行集成。图 10 为系统工程管理模块的 WBS 子模块界面。

#### 5 结束语

PDA-DWBS 解决了复杂产品研发中系统工程与项目管理的分工与合作的问题。层次化的信息组织形式降低了系统的复杂性,对降低项目风险和项目的稳定性起到了促进作用。

#### 参 考 文 献

[1] 王永坡. 工程系统综合智能产品模型研. 北京:北京航空航天大学,2007.  
[2] Defense System Management College. Systems Engineering Fundamentals. DSMC press, 2001.  
[3] Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide), Third Edition. Newtown Square, Pennsylvania USA, 2004.  
[4] Vincent Considine. Systems engineering and strategic project management. Systems Engineering in Strategic Management Planning (Digest No: 1997/141), IEE Half Day Colloquium. London: The Institution of Electrical Engineers, 1997: 2/1-2/4.  
[5] 朱龙英,朱如鹏,刘正垠. 公理化设计理论研究及其应用进展,机械设计与研究,2004,20 (4): 43-47.  
[6] Department of Defense. MIL-HDBK-881 Department of Defense Handbook Work Breakdown Structure. Washington: Department of Defense, 1998.

(责编 侧卫)