

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2017.01.020

并行工程在商用飞机研制中的应用

Application of Concurrent Engineering in Commercial Aircraft Development

李海涛 / LI Haitao

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘 要:

介绍了并行工程的定义及国内外并行工程的应用现状,分析了商用飞机全寿命周期的费用。结合商用飞机研制特点,研究了基于成熟度定义的并行工程方法。通过并行工程的应用,缩短研制周期,降低研制费用。

关键词:并行工程;商用飞机研制;成熟度

中图分类号:F272

文献标识码:A

[**Abstract**] This article introduces the definition of concurrent engineering. The cost of the whole life cycle of commercial aircraft was analyzed, and the application of concurrent engineering in China and abroad was introduced. Combined with the development characteristics of commercial aircraft, the method of concurrent engineering based on the definition of maturity degree is studied. With the application of concurrent engineering, the development cycle was shortened and the development cost was reduced.

[**Keywords**] concurrent engineering; commercial aircraft development; maturity degree

0 引言

商用飞机是一种特殊产品,每个飞机的研制都是复杂的、多元文化的、学习曲线效应明显的庞大的系统工程,具有规模大、周期长、投资强度大、见效慢等特点,不仅承受着较高的技术风险,还承受着较高的商业风险。缩短研制周期、降低研制成本对于飞机制造商来说,是商用飞机取得商业成功的关键要素之一,所以通过使用科学的方法和管理技术实现使用更少经费和更短周期研发出质量优越的商用飞机成为各飞机研发团队的目标,并行工程的开展是实现这一目标的有效途径之一。

1 基本定义

1.1 并行工程的定义

并行工程是一种系统工程方法,用来对一系列相互关联的飞机部件进行综合的和平行的设计、分析和计划,并建立这些部件的配套工装设计和数字

控制的程序。并行工程的重要基础是通用的数据库,所有参与飞机研制的相关人员均可以向数据库输入数据,持续更新数据并共享数据。该通用数据库不仅用于飞机结构和系统的研制,还应包括制造方案、设施和工装夹具的并行研制^[1],并行工程方法就是代表着多职能联合工作团队中人与人之间不停地交换着具备依赖关系的信息流,是加快飞机研制速度的一个重要方法。并行工程原理如图 1 所示。

1.2 基于商用飞机全寿命周期费用(LCC)的分析

商用飞机全寿命周期费用是指飞机从研发—生产—使用—退役处理全寿命周期各个阶段所发生的所有费用总和。民机研制一般分为方案论证阶段、初步设计阶段、详细设计与试制阶段、生产阶段、使用保障阶段及退役处理阶段等。

方案论证阶段重点工作是根据市场需求及未来发展趋势来确定商用飞机的定位,初步确定飞机需具备哪行功能和性能,初步给出相应的设计指标。

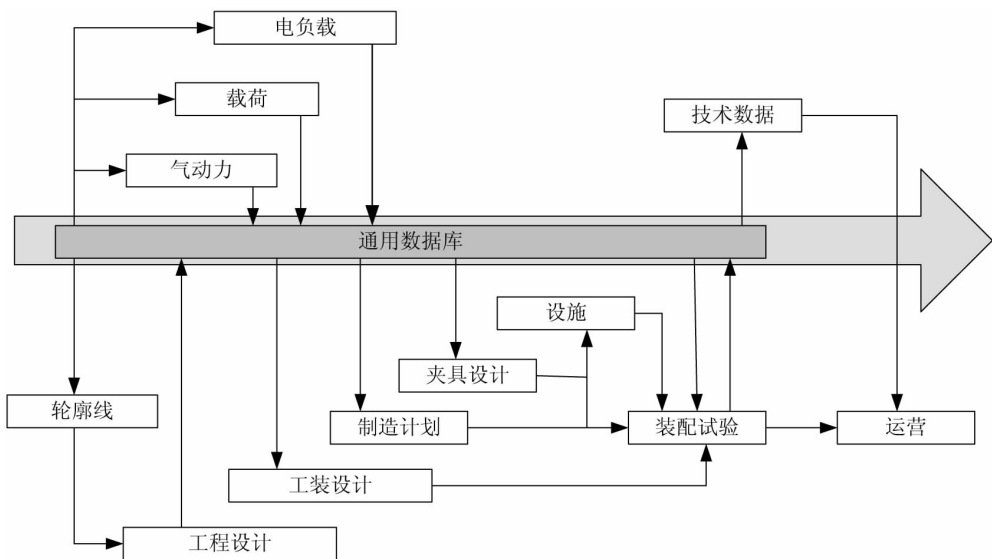


图 1 并行工程原理

初步设计阶段,根据选定产品的定位,开展方案设计,权衡、分析、细化各项指标,并对指标进行分解,给出飞机各系统/子系统的设计要求及设计指标,如重量、布置布局、接口定义等。该阶段虽然实际花费的费用不多,但是该阶段工作对产品全寿命周期费用的影响程度最大,它决定了 85% 左右的全寿命周期费用,因此,在该阶段一定要充分做好方案的分析论证工作和经济性分析工作,合理制定各项设计指标。

详细设计与试制阶段主要包括飞机的详细设计、设计验证试验、试验机制造等工作。该阶段是设计工作量最大、协调工作和问题发现最多、设计费用消费最大的阶段,是落实并行工程理念最重要的阶段;在该阶段中,设计结果将对产品的生产、使用、维护等费用产生重大影响。

方案设计、初步设计、详细设计与试制阶段三个阶段所发生的费用并不多,但是对飞机全寿命周期费用起决定性作用,飞机的生产、使用和保障阶段所使用的息息相关的图纸(数模)、技术文件、各种要求、各种使用维护手册等都是由设计阶段确定的,因此,高度重视设计阶段的各项工作,可以有效降低生产、使用等后续阶段的成本。

从飞机全寿命周期费用的角度分析,美国经过长期研究得出两条重要的曲线:一条是武器系统发展各阶段实际需求的经费占总经费的百分比曲线;另一条是各阶段的决策对总经费影响的百分比曲线,此规律也可应用于商用飞机的费用分析,根据

英国宇航公司的研究报告表明,一种产品的制造成本的 85% 将取决于该产品设计初期所作的决策^[2]。通过对商用飞机全生命周期费用的统计分析,结合飞机各个阶段的主要工作内容,制定了商用飞机的全生命周期费用的影响评估,如图 2 所示。

通过对商用飞机全寿命周期费用分布图可以看出,研制阶段工作对费用的影响程度非常大,随着时间的推移,设计灵活性的影响会很快降低。经验表明,在飞机研制阶段,飞机的总寿命周期单位成本很大程度上已经确定了,所以研制阶段合理的利用并行工程的目的是减少返工及设计更改的风险,继而有效降低研制周期和研制成本,提高商用飞机获得商业成功的机会。

2 国内外商用飞机并行工程应用现状

随着工业的发展,并行工程理论已经很成熟,并在实用化方向有了很好的发展,航空、航天、电子、汽车、机械等很多领域已经通过实施并行工程取得了显著效益。

美国洛克希德导弹与空间公司研制“战区高空领域防御”的新型导弹,通过采用并行工程,产品开发周期缩短了 60%,从原计划 5 年缩短为 2 年完成。美国波音公司在 B777 大型民用客机的研制中,运用并行工程的方法,减少了 50% 以上的工程更改,与 B767 飞机相比,研制周期缩短了 13 个月,实现了 5 年内从设计到试飞的一次性成功^[3]。

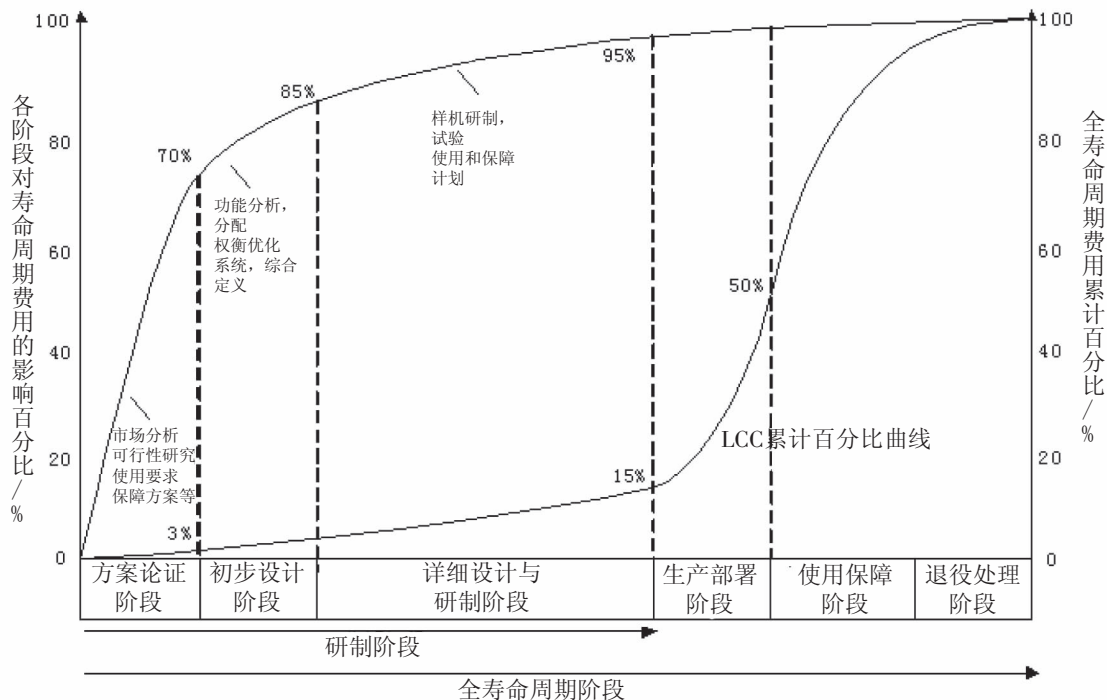


图2 商用飞机全寿命周期费用(LCC)分布图

国内并行工程的研究起步晚,加上中国航空企业传统的管理模式,偏向于串行式的职能化管理模式,实施并行工程的体制基础不同,没有形成适用于商用飞机全寿命周期的有效的并行工程应用方法。但是国内并行工程的应用也取得一定的成果,例如西安飞机工业集团公司研制 Y7 改型飞机时,对于内装饰采用了设计制造并行,研制周期从 1.5 年缩短到 1 年,减少设计更改 60% 以上,降低产品研制成本 20% 以上;同时进行的垂尾尾翼转包生产,采用并行工程,生产周期缩短 3 个月,节约工装引进费用约 370 万美元,工艺设计效率提高了 1.5 倍。

3 基于成熟度定义的并行工程应用

现代飞机制造商大多都是基于主制造商-供应商模式开展飞机设计的,形成多厂所、跨地区进行联合设计制造,必然造成相互之间协调工作复杂,相互传递数据量大,大大增加研制周期和成本。而通过传统的飞机设计流程更加会加大飞机研制周期,通过并行工程的实施可以起到缩短周期的作用,例如,初期图样会对零件尺寸有一个大概描述,在初期图样发出后,便可以利用钢坯按照零件外形进行初加工,不必等最终图样发放,随着图样尺寸

的细化,可以逐步启动加工过程,这样做将比传统的先发出最终图样再进行加工的方式更早实现开工,提前完成加工,缩短加工周期。按照传统工作流程,工装的设计制造应在最终图样下发后方可开始,但是,通过并行工程的应用,在零件工程设计期间就可以开始工装的设计工作。传统方法与并行方法过程如图 3 所示。

按照并行工程的原理,为了缩短研制周期,进度计划中工作任务就需要重叠,意味着一项任务并不是在前置任务完全结束后才启动,各种任务并行交叉;但是任务的并行,并不是也不可能违反产品开发过程必要的逻辑顺序和规律,不能取消或越过任何一个必经的阶段,而是在完成各种任务的基础上,找出各项子任务之间的逻辑关系,将可以并行交叉的尽量并行交叉进行。

但是,由于飞机研制相当复杂,涉及专业多,零部件数量巨大,采用适合的、有效的并行工程方法才能达到预期目标;否则将适得其反,增加涉及方案欠成熟的风险,造成后期大量更改,增加周期和成本。

结合商用飞机研制的特点,按照现在模块化设计的理念,基于产品数字化设计及虚拟仿真技术,我们将飞机每个模块进行成熟度定义,依据成熟度开展并行工程。

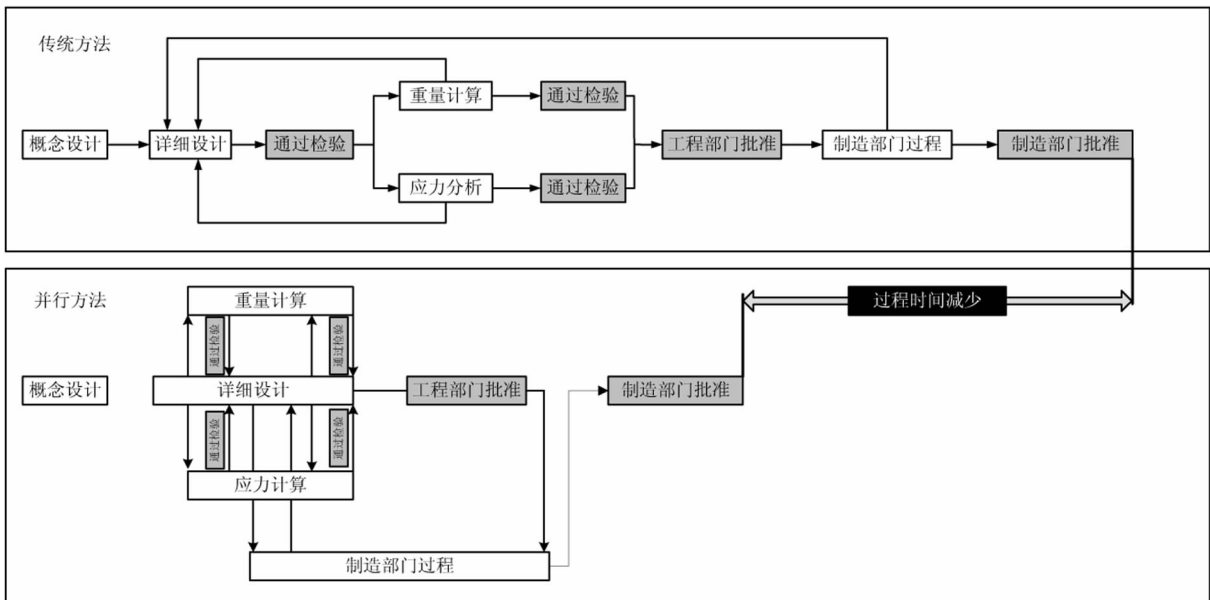


图 3 传统方法、并行方法生产数据设计和发放过程比较

3.1 通用成熟度管理技术

成熟度定义 (Maturity Degree, 简称 MD), 是对产品定义数据完成情况和详细程度的描述, 并且将达到一定技术状态的定义数据(包括产品结构信息、几何信息、工艺信息、分析结果、技术说明和检测结果等)提供给用户, 以便于下一步工作顺利地开展。在数字化飞机产品研制的业务流程中, 为产品定义数据的对象和关系赋予成熟度标识, 以反映该对象从设计到发布的进展情况, 为相关工作的协同提供依据。

产品数据成熟度按照产品数据的信息完整程度, 按设计和制造工作的共同需求, 以模块为单位, 针对初步设计到详细设计阶段工作, 按照成熟度定义, 模块分为 MD0 到 MD6 七个成熟度阶段。以结构设计和制造为例, 结构设计工作成熟度见表 1。

表 1 设计工作成熟度定义

成熟度等级	设计工作内容
MD0	1. 初步设计总方案
	2. 主结构布置、剖面形状、典型剖面参数等明确
	3. 内部结构布置
	4. 传动装置布置
	5. 结构对接方式明确
MD1	1. 确定产品结构模块及零组件编号规则
	2. 材料规范、材料规格, 材料制品形式
	3. 零件成型工艺要求、加工工艺
	4. 零件热、表处理

续表 1

成熟度等级	设计工作内容
MD2	1. 零件与系统界面确定
	2. 重要尺寸及公差
	3. 关重件特性
	4. 装配关系明确
	5. 紧固件选择完成
	6. 飞机理论外形冻结
MD3	1. 零件强度初步校核
	2. 重量初步验证
	3. 运动机构仿真完成
	4. 零件数模细节完善
	5. 确定互换替换要求
MD4	1. 连接补偿设计明确
	2. 装配技术条件
	3. 零件公差配合明确
	4. 完整的产品结构(标准件、成品件)
MD5	1. 强度分析最终验证
	2. 总体分析最终验证
	3. 重量指标最终验证
	4. 零件细节标注完成
MD6	1. 密封区域及密封方式明确(仅含防腐蚀密封、油封)
	2. 结构喷漆要求明确(仅含面漆)

按照并行工程原理, 结合结构设计每个成熟度阶段所达到的状态, 为了确保相应制造工艺技术状态的有效衔接和控制, 以及工艺数据的完整和准确, 结合工厂制造需求, 对每个阶段可以并行开展的制造工作进行了定义, 制造工作对应成熟定义见表 2。

表 2 制造工作成熟度定义

序号	制造工作内容	开始阶段	完成阶段
1.	工艺总方案	MD0	MD0
2.	质量保证大纲	MD0	MD0
3.	提出标准协调工装项目	MD0	MD0
4.	完善标工装项目	MD0	MD0
5.	标准协调工装设计	MD2	MD5
6.	标准协调工装制造准备	MD4	-
7.	工艺技术验证	MD1	MD6
8.	编制长周期材料采购清单	MD1	MD2
9.	长周期材料采购计划	MD1	MD2
10.	标准件和系统件等采购计划	MD2	MD4
11.	长周期材料采购订货	MD2	-
12.	标准件和机载成品的采购订货	MD3	-
13.	飞走材料的采购订货	MD6	-
14.	刀具、量具及专用工具的制造或采购	MD4	-
15.	部件制造工艺方案、协调方案	MD2	MD4
16.	部件生产线规划、工艺布置	MD2	MD4
17.	编写 MBOM	MD2	MD4
18.	各部件供应商产品交付规范 SPS	MD2	MD6
19.	编制部件的生产计划	MD2	MD6
20.	装配工艺设计	MD2	MD5
21.	装配仿真分析	MD2	MD5
22.	装配公差分析	MD2	MD5
23.	装配工装设计	MD2	MD5
24.	装配（型架）工装框架制造开工	MD4	-
25.	装配工装详细定位件制造开工准备	MD5	-
26.	部件装配投产	MD6	-
27.	编制零件的生产计划	MD2	MD5
28.	零件制造公差分析	MD2	MD5
29.	零件制造工装设计	MD2	MD5
30.	长周期零件的工装设计	MD2	MD5
31.	长周期加工零件开工准备	MD5	-
32.	零件投产开工准备	MD5	-

3.2 成熟度升级工作流程

传统基于职能分工的串行工作流程也被称为“抛过墙法”：生产图样从设计部门传到制造部门，操作相当简单，严格按照设计流程和精细分工开展，设计部门数据不完善，制造部门就不开工，所以研制周期相对较长。如果遇到设计更改，工作周期会反复叠加。随着专业分工越来越细，产品集成程度越来越复杂，设计人员已无法保证全面完整地掌握后续工艺工装的要求，如果仍然按照传统串行方法开展工作，设计周期和更改优化周期将会非常长。

并行工程的实施，就是将设计部门和制造部门结合在一起同步开展工作，强调系统集成和整体最优化，所以要求相关人员之间进行大量的沟通协调，并使用统一数字样机通用数据库。对于每一个成熟度阶段都需要设计人员和制造人员共同对产品数据进行检查，并进行阶段性冻结。每个阶段生产数据的冻结，每一个设计阶段都要经过仔细的规划，确保设计工作能够无错误地顺利进行，确保咨询和沟通的渠道畅通；而且每一次冻结和每一个阶段都产生自己的工作流程图、结束文件和进展报告^[4]。

根据设计成熟度的定义和制造单位开展工作的需求，对于 MD0 ~ MD3 阶段的生产数据由设计部门内部进行确认升级；由 MD3 升级到 MD4 时，将需要有制造部门对产品数据的相关数据进行并行工作，包括材料审核、装配仿真、强度分析、初步重量计算、工艺性分析等，并行工作内容达成一致后，相应生产数据才可以升级到 MD4 成熟度；由 MD4 升级到 MD5 阶段，该阶段工作内容不影响制造部门开展工作，数据的升级由设计部门内部确认；由 MD5 升级到 MD6 阶段，需要制造部门开展并行工作，确保制造部门所开展工作的正确性，包括强度最终验证、接口定义冻结、重量指标确定、零件制造及装配公差分析等，并行工作内容达成一致后，相应生产数据才能升级到 MD6 成熟度。成熟度升级工作流程见图 4。

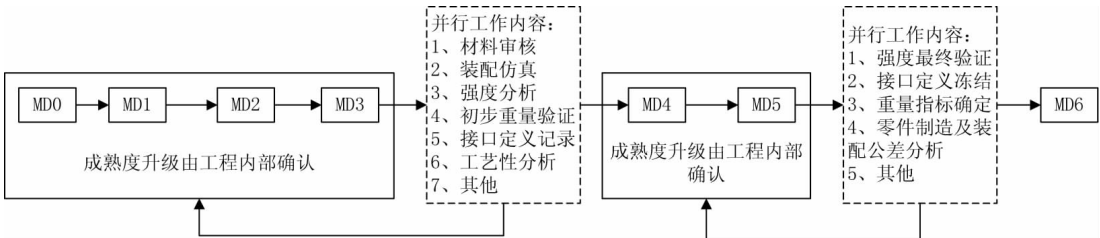


图 4 成熟度升级工作流程

商用飞机的所有产品数据均可以参照结构成熟度的定义开展并行工作,让供应商及早地介入研制工作,开展联合设计。通过供应商的加入,主制造商与供应商可以相互取长补短,从而有效地控制生产成本,缩短研制周期。

4 并行工程的应用

并行工程的实施,是建立在上游信息不完整的情况下开展下游工作的,所以相应工作必然存在返工的风险,这大大增加了飞机研发人员的负担;只有在整个研发团队之间加强沟通,才能克服信息不完整的内在弱点,保证这些信息的安全使用。所以要求研发团队中的每一个成员都要不断探寻应用并行工作的时机,寻找这些时机可以从以下几个方面进行:

- (1)开始下步工作所需要最少输入是什么;
- (2)在上一步工作中最快什么时候产生这些输入信息;
- (3)为了不再需要得到这些信息我可以做点什么;

(4)为了保证这些信息在很高的几率上足够准备可以用于当前工作,能围绕这些信息做一些假设吗;

(5)做错了后果会有多严重? 如果做错了需要花多大代价才能回到现在所在的地方;

(6)能够通过提早开支工作节省出足够的时间,使我即使做错事也能提早技术任务;

(7)什么信息能使我进行另一个步骤;

(8)哪些人可能使用我掌握的信息使他们可以进行下一个步骤。

通过有效沟通和协调,可以充分明确下游专业的工作前置条件,从而准确定义成熟度,确定每个成熟度阶段的工作内容和可开展的后续工作。

从图 5、图 6 中可以看出,传统串行工作需要 20 个月才可以完成该项目,但是通过有效地并行工程的开展,可以缩短 13 个月工作周期,从而只花费 7 个月就完成了该项目,大大缩短了研制周期,提高了工作效率,降低了人力成本。

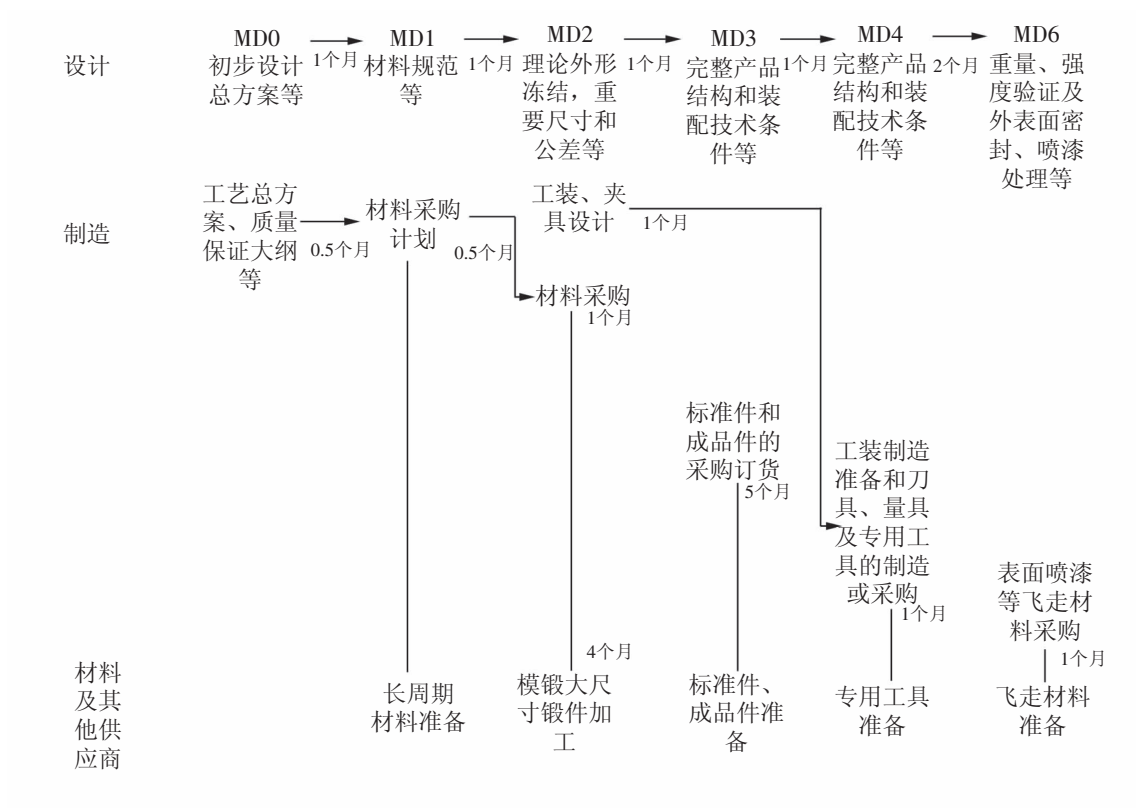
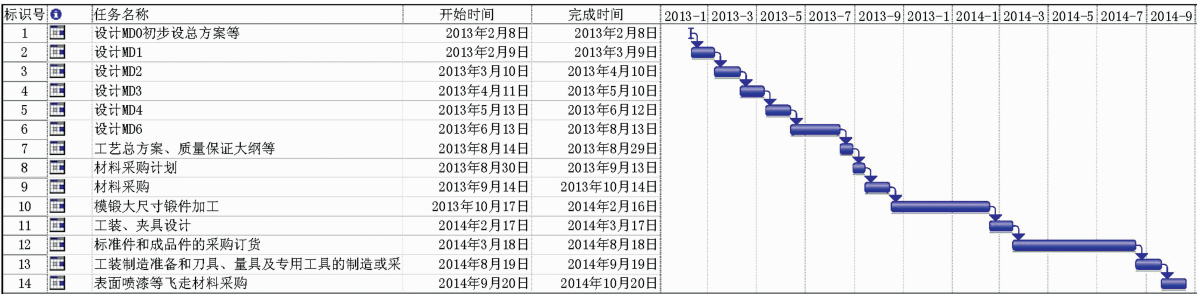


图 5 某项目设计制造基于成熟度定义的并行方案



(a) 串行设计制造工作流程



(b) 并行设计制造工作流程

图 6 某项目串行与并行设计制造工作流程对比

5 结论

并行工程的有效实施跟产品数据管理平台和项目工作团队的建立还有紧密地关联,本文对商用飞机研制过程中使用并行工程方法进行了研究,对基于成熟度定义的并行工程进行了分析,初步制定了基于成熟度定义的并行工程方法的工作定义和 workflows,后续将结合实际型号研制、研制团队、数据管理平台等,进一步完善客服工程、试飞工程、供应商管理及适航管理等方面工作的成熟度定义和基于其并行工程的工作流程。

参考文献:

[1] 汉斯-亨利奇·阿尔特菲尔德. 商用飞机项目[M]. 北京: 航空工业出版社,2013.

[2] Smith, P. G. and Reinertsen, D. G. . Developing Products in Half the Time [M]. 2nd Edition. New York: John Wiley&Sons, 1998.

[3] 耿汝光. 大型复杂航空产品项目管理[M]. 北京:航空工业出版社,2012.

[4] Sabbagh, K. 21st Century Jet; The Making of the Boeing 777[M]. London: MacMillan Publishers, 1996:64.