

产品开发过程的并行机理及应用研究

胡庆夕

(上海大学 CIMS 及机器人中心 上海 200072)

摘 要 对产品开发过程的并行机理进行了讨论, 系统地阐述了并行工程的 4 种特征, 并进行了定性和定量分析, 为实施并行工程提供了理论依据。在此基础上, 设计并开发了并行设计系统。

关键词 并行工程, 并行机理, 协同设计

0 引言

并行工程 (CE) 是目前机械工程领域中重要的研究方向, 它是一门以集成、并行方式设计产品及其相关过程的系统工程方法, 倍受各国工程界和学术界的高度重视。由于市场竞争的日益激烈, 人们开始认识到有效利用企业资源的重要性, 并希望采用某种有效的工作模式和支持技术来最大限度地提高产品质量, 降低产品成本, 缩短产品开发周期, 满足用户需求。CE 的提出, 大大改变了传统的串行工程的企业组织结构、工作方式及人的思维方式, 强调以“人”为中心的新的生产组织原则, 遵循“尽可能适应人的需要”的观念。在产品开发中, CE 突出人的作用, 主张打破企业内严格的部门界限, 强调多功能小组 (Multifunction team) 有效的协同工作^[1], 这种工作模式不同于常规的设计思想, 要求集成和并行地设计产品及其各种相关过程, 从而体现 CE 的并行性 (Concurrence)、约束性 (Constraints)、协调性 (Coordination) 和一致性 (Consensus) 4 种特征。

实施 CE, 必须深入研究 CE 的内涵, 探讨面向 CE 机理的设计、制造的方法以及它们之间的逻辑关系, 这对于开发面向 CE 的设计、评价及咨询系统是非常必要的。

1 并行设计过程中的并行性

并行性是 CE 的一个重要方面, 它要求同时进行产品及其下游过程设计, 强调所有设计工作要在生产开始前完成, 正如瑞典皇家工学院 G. Sohlenius 教授在 CIRP 年会上做的并行工程主题报告中所述^[2], 尽早开始每一项相关活动, 使所有活动尽量平行进行。图 1 呈现出并行工程与串行工程的时序特性^[3], 由图 1 可见, 对并行工作模式, 其设计过程各阶段/环节重叠, 各阶段/环节在不同的时间点上所起的作用也不相同, 体现了一种宏观的并行性。

产品生命周期中, 任一环节至少应该完成 3 项任务: (1) 对相邻上游环节结果的理解与分析; (2) 实施本环节专属的任务; (3) 为下游环节表达本环节工作的结果。例如图 1 中, 工艺设计先对产品设计文件或图理解消化, 然后完成工艺设计, 最终将工艺设计结果表达为工艺文件。图 2 反映了串行工程与并行工程中两个相邻环节即产品设计和工艺设计的时间特性。

从时间角度看, 对于串行工作模式, 其上游环节的终结是下游环节的开始 (在特殊情况下, 两相邻环节之间可能有一段停顿区), 这给上、下游环节之间的信息交互带来不便, 不利于两相

中国博士后科学基金资助项目 (中博基 [1998] 6 号)。
男, 1959 年生, 博士; 研究方向: 并行工程, CIMS, 面向制造的设计; 联系人。
(收稿日期: 1998-10-16)

邻环节输入、输出信息的正确表达和理解,从而使两者的匹配出现困难,增加了产品的开发时间。并行工作模式则将相邻下游环节的起始时间提前,使对下游的表达与对上游结果的理解同时进行,使下游可以充分理解上游的意图,上游也更易于实现面向下游活动的清晰表达,使环节相互理解与表达的时间进一步缩短,减少了产品的开发时间。

下面采用时间概念定量描述并行性对产品生命周期的影响。设串行工程产品中所有环节组成的两个时间点集为:

$$B = \{t_1^b, t_2^b, t_3^b, \dots, t_n^b\} \quad (1)$$

$$E = \{t_1^e, t_2^e, t_3^e, \dots, t_n^e\} \quad (2)$$

式中, t_i^b, t_i^e 分别为第 i 环节的起始时间和终结时间,且 $t_i^b < t_i^e$, n 为系统的环节数目。其串行工程的时间集合为 $T^s = \{(t_1^b, t_1^e), (t_2^b, t_2^e), \dots, (t_n^b, t_n^e)\}$ 。

对于串行工程,设计活动组织方式是顺序型的(如完成概念设计后,进行初步设计,再作详细设计,然后进行工艺设计等,如图 2 所示),那么有 $(t_i^b, t_i^e) \cap (t_{i+1}^b, t_{i+1}^e) = \emptyset$,表示两个相邻环节的持续时间没有公共区;因此,串行工程总时间为:

$$T_s = t_n^e - t_1^b \quad (3) \text{ 串行工程}$$

$$\text{且 } T_s = \sum_{i=1}^n (t_i^e - t_i^b)。$$

对于 CE, 相邻环节的持续时间出现部分重叠(如产品设计要充分考虑工艺设计的所有因素,而工艺设计要充分表达产品设计的要求);因此,一般 CE 的两个相邻环节持续时间存在一个提前期。为更清楚地说明串行工程与并行工程时间特性的关系,还使用 (1) 式和 (2) 式两个时间点集来分析并行工程的时间特性,并假设 t_i^o 为第 i 环节的提前时间,则并行工程的时间集合为:

$$T^c = \left\{ (t_1^b, t_1^e), (t_2^b - t_2^o, t_2^e - t_2^o), \left[t_3^b - \sum_{i=2}^3 t_i^o, t_3^e - \sum_{i=2}^3 t_i^o \right], \dots, \left[t_n^b - \sum_{i=2}^n t_i^o, t_n^e - \sum_{i=2}^n t_i^o \right] \right\}$$

那么,并行工程中任意两个相邻环节之间有 $(t_i^b, t_i^e) \cap (t_{i+1}^b - \sum_{j=2}^{i+1} t_j^o, t_{i+1}^e - \sum_{j=2}^{i+1} t_j^o) \neq \emptyset$, 则并行工程总时间为:

$$T_c = t_n^e - t_1^b - \sum_{i=2}^n t_i^o \quad (4)$$

由 (3) 式和 (4) 式,CE 的产品开发周期比串行工程缩短了 $\sum_{i=2}^n t_i^o$, 从而提高了产品在市场上的竞争力。

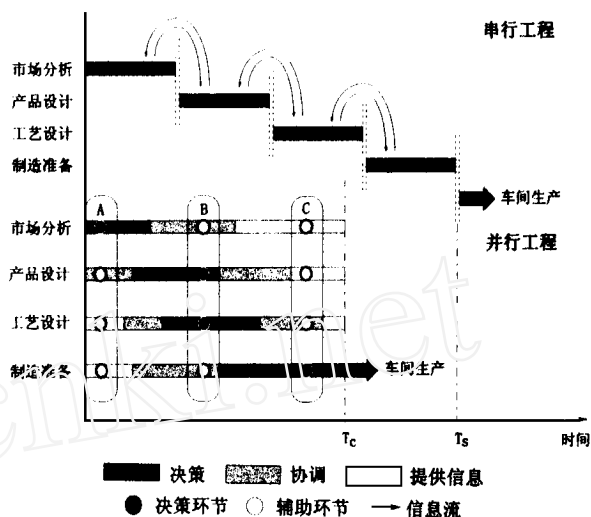


图 1 并行工程与串行工程的时序分析

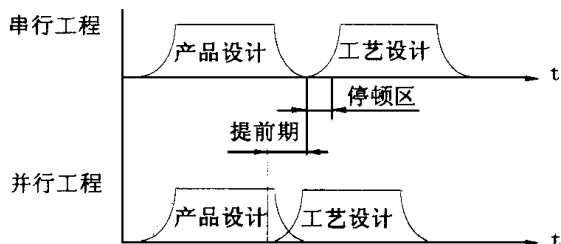
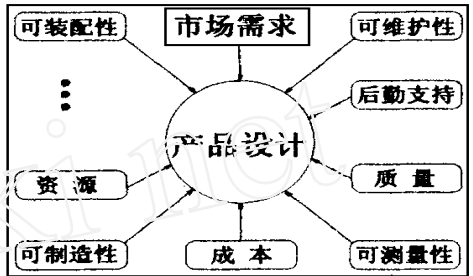


图 2 并行设计与串行设计中产品设计和工艺设计的时间关系

2 并行设计过程中的约束性

串行工程各设计环节仅考虑相邻上游环节的要求，并未考虑下游环节的制约，因此设计者具有很大的决策空间，设计的不确定性也相当大，造成上、下游环节的脱节，使产品开发过程成为设计、加工、测试、修改设计的多次大循环，不利用缩短产品的开发周期，降低开发成本。

实际上，产品开发过程的各个环节之间存在不可分割的内在联系，相互之间都有不同程度的约束，CE 多功能小组相互协作的工作模式，使相关环节的专家尽早进入本环节，大大增加了本环节的约束，减少了不确定性的、不成熟的决策，增加了设计结果的准确性，缩小了决策空间，实现了对产品设计结果的早期验证，避免了设计反复。例如，在产品设计环节（如图 3 所示），不仅要考虑



市场需求，满足上游环节的约束外，还受到工艺、装配、资源等多维约束，从产品制造、装配、成本以及资源利用等方面进行评价，避免了串行工程中产品设计仅受市场需求约束的弊病，有助于减少产品开发过程中设计反复次数，实现设计面向制造、装配、成本、质量等，对于降低成本，缩短开发周期，保证产品质量起到重要作用。

3 并行设计过程中的一致性

CE 一致性是对产品开发过程中相连环节的供给与需求进行协调，使环节供给与需求关系取得一致。然而，对于串行工作模式，不同环节其工作性质相差较大，对输入、输出的要求也不相同，因而很难进行环节之间的相互协调，造成相邻环节间供给—获取关系的不一致。

产品生命周期中任一环节都可以被抽象为一种特定的映射装置来获取所需求的特定输入和产生所要求的特定输出。由于不同环节之间呈现出异构特性（例如产品设计环节可以将市场需求所获信息映射为产品设计文件，市场分析、产品设计、工艺设计等环节之间的功能及任务大不相同），因此，要使产品从毛坯到成品，必须考虑任意两相邻环节的耦合，以便不失真地将上一环节的输出变为下一环节的输入。

设两相邻环节 A、B（如图 4（a）所示）的输出、输入分别为 A_o 、 B_i ，其接口用于将环节 A 输出的全部或部分信息 A_o 变为环节 B 的全部或部分输入 B_i ，接口中所传播信息为 A_o 、 B_i （如图 4（b）所示），图 4（b）中阴影部分为环节 B 所接收到环节 A 的不完全信息，理想

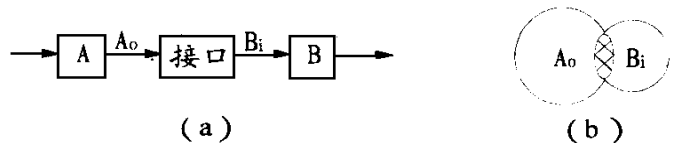


图 4 环节接口及一致性

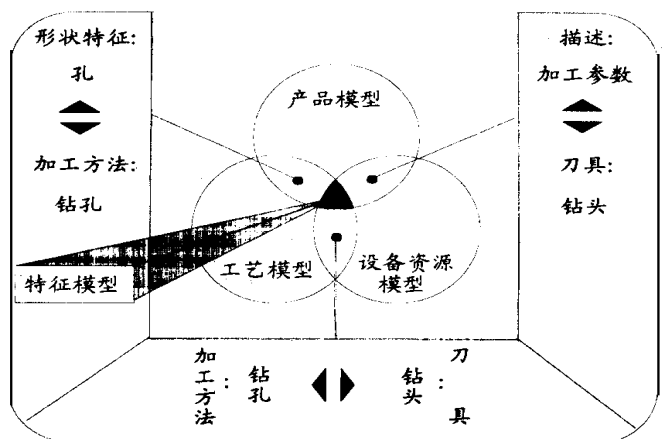


图 5 并行设计系统环节间一致性描述

情况下, $A_o = B_i = A_o = B_i$, 则 A 的输出 A_o 与 B 的输入 B_i 完全一致。而实际情况下, $A_o \neq B_i$, B 所需求的信息未被全部满足, 将会导致在不完全信息下工作所产生的误差向下游传播并放大, 造成设计结果的不正确性。其解决方法是: 提高环节的并行性, 尽早考虑环节 B 所需要的信息, 减少设计反复, 使设计一次成功。例如特征建模技术是一种可以完整地描述产品信息、制造信息及生产管理信息的新技术, 它将产品设计、工艺设计、制造准备、加工、检验等环节联系起来, 使产品的设计意图贯彻到各个下游环节, 并且及早得到下游环节的制造要求, 保证产品结构有更好的工艺性, 而且用计算机可以理解和处理统一产品模型, 使得从设计到制造各个环节可以平行进行, 减少了产品的开发周期, 降低了开发成本。如图 5 所示, 特征模型是产品模型、工艺模型及制造环境模型的公共接口, 能更好地沟通环节之间的信息, 使环节间具有较好的一致性。

4 并行设计过程中的协调性

在产品生命周期中, 任一系统都由若干个环节组成, 各环节在独立完成各自任务或活动的同时, 又存在互相作用和相互制约, 协调多知识源之间的冲突, 使各环节能协同作业。在串行工作模式中, 各环节相对独立, 任一环节对上游的理解和对下游的表达是与其它环节相关的业务, 但是被割裂开来, 各环节的相互作用仅仅反应在其完成各自活动之后再向上游环节反馈信息, 从而造成环节间表达与理解的失配, 这种表达一致性与理解一致性的失配是造成环节不一致性的重要原因。

而 CE 强调从总体上把握对象, 采用综合处理问题的方法来把握各环节本来的联系, 揭示环节在其分割状态下不曾呈现的特征, 这反映了协同理论处理问题的方法。具体上讲, CE 方法学是在设计产品的同时, 同步地设计出与产品生命周期中有关的各过程 (即包括制造、装配和检验等), 力求在产品阶段综合考虑影响产品质量、生产成本和产品交货日期等各种因素, 利用多环节专家的协同解决环节之间的协作、制约或冲突, 促使设计优良性的改善。例如在产品阶段过程中, 设计人员可以通过网络向工艺人员咨询并听取建议, 工艺人员也可以通过网络向设计人员提供有关可制造性、可装配性等方面的知识, 销售人员可以通过网络提供市场需求及以往产品的不足等用户反馈信息, 生产部门可以通过网络提供本企业生产能力的最新状态信息, 使设计人员在零件功能与工艺性、装配性等之间平衡地作出决策, 这样才能设计出集市场需求、企业技术优势和企业制造环境实际状态为一体, 既满足产品功能要求又具有良好工艺性的优良设计方案。

由文献 [1] 可知, CE 的协调性不仅可以降低产品成本, 缩短产品开发周期, 而且可以提高产品质量, 改善综合环境影响 (包括生产环境、资源综合利用、职业健康和安全性等) 和综合柔性 (包括产品的经济制造途径、产品的升级换代等)。

5 并行设计系统的总体设计

根据 CE 设计方法学及上述四种特性的分析, 结合 863 课题和博士后基金项目规定的任务和要求, 我们研究和开发了的回转类零件的并行设计系统 (如图 6 所示), 该系统中的零件数据与工艺数据是以递增方式多次反复迭代产生, 直到完备的零件数据和工艺数据同时生成为止。可见, 所开发的回转类零件的并行设计系统的工作模式是宏观上并行, 微观上串行的。

产品模型的好坏直接影响到并行与集成的成败和效率的高低。特征建模技术被认为是当前最适合系统并行集成的建模方法, 特征模型把特征作为产品模型中的基本单元, 将产品描述为特征的有机组成, 可实现对产品更加详细的描述, 有助于加强产品设计、工艺设计、评价和咨询各环

节间的联系, 更好地将产品的设计意图贯彻到各个后续环节, 并且及时得到评价、咨询的反馈信息, 保证环节的一致性。

在零件/产品设计过程中, 零件属性受到零件功能、性能、加工方法、制造环境、成本及交货日期等多方面的约束, 在系统中设计了一个面向制造的评价模型、咨询模型以及工艺方案的综合评价模型, 来协调这些约束和冲突。

在并行设计系统总体模型中, 零件建模与工艺决策是企业技术的核心, 也是产品开发的关键, 咨询与评价模块是实现 CE 策略的核心, 也是提高产品质量及缩短产品开发周期的关键。各系统或模块的功能可简单地概述如下:

零件建模: 建立满足并行设计、工艺咨询与评价需求的零件信息模型, 不仅能接收咨询信息, 而且可以接收可制造性评价的反馈信息, 并且可以进行零件模型的修改, 设计出既满足功能要求又具有良好工艺性的产品零件; 工艺咨询: 它是从工艺角度分层次(功能—特征—工艺—制造资源)就所设计零件的单一或组合特征的工艺性能进行咨询, 为设计者提供工艺与制造资源方面的知识及经验; 工艺评价: 其功能之一是从工艺角度对所设计零件进行制造工艺性的检查, 指出存在的问题, 并根据检查结果提出修改意见, 功能之二是对所生成的多套工艺方案进行综合评价, 推荐优选方案; 工艺设计: 用于生成同一零件的多套工艺方案, 并可根据评价信息修改工艺方案。

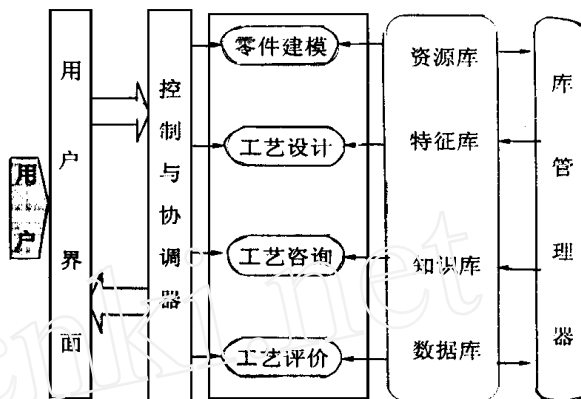


图6 系统的总体模型结构

6 结束语

经过我们长期的探索, 研究并开发了回转类零件的并行设计系统; 在此基础上, 总结出实现并行设计的并行工程机理, 为进一步研究与开发面向企业的基于网络技术的并行设计系统提供了依据。

参考文献:

- [1] Lu S Y. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 1990, 7(3): 263
- [2] Sohlenius G. *Annals of the CIRP*, 1992, 41(2): 645
- [3] 胡庆夕. 回转类零件的 DFM 方法及应用系统[博士学位论文]. 华中理工大学, 1997
- [4] 程小平. 并行工程过程分析及制造决策集成映射体系的研究[博士学位论文]. 重庆大学, 1995

Research on the Concurrent Mechanism of Product Development and Its Applications

Hu Qingxi

(CIMS & Robot Center, Shanghai University, Shanghai 200072)

Abstract

The concurrence mechanism for product development is discussed, and its four features qualitatively and quantitatively. Based on this, an overall scheme of a concurrent design system for rotational parts is proposed, then a concurrent design system for rotational parts is developed.

Key words: Concurrent engineering, Concurrent mechanism, Cooperative design