

面向过程控制的工程变更系统研究*

Engineering Change Management System Based on Process Control

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 张勤 莫蓉 宫中伟

[摘要] 针对工程变更过程中变更传播影响范围难以预测的问题,提出了一种制定变更传播路径的方法。研究分析了跟踪工程变更过程以及在跟踪基础上进行协同感知的策略,有效解决了目前企业工程变更过程中存在的不完整、不可控和不一致的问题。最后创建了一种基于过程控制的工程更改控制系统,实现了信息共享、过程控制、过程分析和协同感知。

关键词: 工程变更 工程变更管理 变更传播 设计结构矩阵 协同感知

[ABSTRACT] To deal with the difficulty of predicting the scope of change propagation, a method of formulating propagation path is presented. Meanwhile, the tactics of tracking the engineering change is analyzed and a collaborative awareness framework based on it is developed, which solves the problem of existing engineering change propagation (incomplete, uncontrollable and inconsistency). Finally, the engineering change management system is implemented driven by process-control, which realizes information sharing, process analysis, process control and collaborative awareness.

Keywords: Engineering change Engineering change management Change propagation Design structure matrix Collaborative awareness

工程变更(EC)是制造企业生产经营活动中的一项重要业务。它是产品创新的源动力,是改正产品缺陷、满足客户新需求的主要方法。有效管理这些变更并加快响应速度,提高企业产品开发过程中的敏捷度,是提高企业竞争力的主要途径。

工程变更管理(ECM)是企业管理者利用计算机辅助工具,通过对EC变更流程、产品变更数据和变更操作人员的有效控制和管理,达到缩小变更影响范围、降低变更成本和缩短交货时间的目的。近10年来,由于其重要性,ECM越来越受到专家学者和企业管理

者的关注。Vildan Kocar^[1]等基于并行工程原理,开发了一种称为ADVCE(Active Distributed Virtual Change Environment)的分布式虚拟协作平台,促进了信息的共享,提高了处理设计变更的效率;何睿^[2]等提出了一种基于设计结构矩阵的预测分析方法,利用图论的知识对设计结构矩阵进行聚类,分析了水波式传播、开花式传播与雪崩式传播的内在机理;Clarkson^[3]等开发了一种变更传播分析方法。

从总体上说,对复杂产品设计变更传播的综合研究和深入程度仍然是十分不够的,原因来自两方面:一方面是涉及因素过多;另一方面是来自复杂产品本身的大规模特性以及所处的研发网络的复杂性。本文的工作是在前人工作的基础上,提出新的方法,创建新的系统,解决现阶段企业工程变更过程中存在的不确定性、不完整性、不可控性和不一致性问题,为企业工程变更管理提供一个切实可行的方法。

1 工程变更管理流程分析

由于变更传播的存在,使得ECM变得异常困难,如何预测并管理变更传播,是正确有效进行ECM的关键。复杂产品的零件数量庞大、涉及面广,在没有制定统一的变更方案之前,盲目进入工程变更实施阶段,只会增加变更的难度和成本。因此,在相关人员提出正式变更请求后,由企业管理层指定本次变更管理人员,并由该管理人员组织专家及相关领域负责人,对本次变更请求进行评估;评估内容包括问题的调查、原因的分析、变更传播影响范围分析以及解决方案分析。解决方案有可能不止一项,从其中选择最优的一项作为本次变更解决方案,并以变更单的形式通知所有参与人员。由变更管理人员组织相关人员按照变更单进行EC实施。在EC实施过程中,随时对实施效果进行监督和评价,并将一些突发状况提交给变更管理人员。如果有必要,由变更管理人员组织进行第2次评估,对变更单进行修改完善。如此循环,直到完成整个变更过程。变更传播管理流程如图1所示。工程变更管理中最困难也是最主要的任务都是为了保证产品数据的正确性、完整性、一致性和可追踪性。

* 国家自然科学基金“复杂服务型制造网络的建模、分析和优化方法研究”(50805122)项目资助。

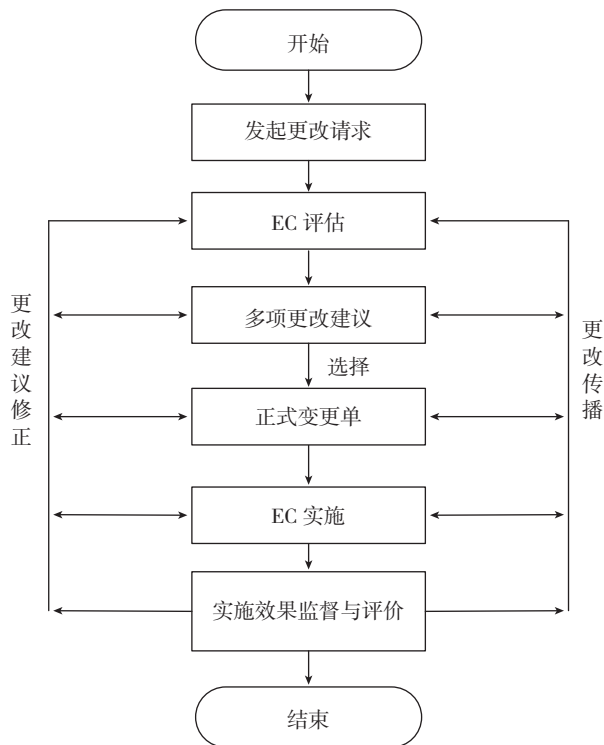


图1 变更传播管理流程

Fig.1 Change propagation management process

2 ECM 过程管理系统关键技术分析

2.1 变更传播路径的制定

变更传播预测是“EC 评估”环节的重要功能。由于复杂产品的大规模特性,使变更传播影响范围变得异常艰难,国内外文献提出的算法有较大的局限性,如 Keller^[4-5]对 Clarkson^[3]提出的算法进行了验证,其预测准确度仅达到 30% 左右。本文不去试图预测复杂产品变更传播过程中所有可能的影响范围而是通过分析产品零件的变更状态,研究短时间内的变更传播路径。

设产品由 n 个零件 a_i ($i=1,2,\dots,n$) 组成,则必然存在与之相关的设计结构矩阵和直接可能性矩阵^[3]。直接可能性矩阵是在设计结构矩阵基础上,描述一个零件的变更对另一个零件影响的可能性的 $n \times n$ 阶方阵,即 $R = (r_{ij})_{n \times n}$,矩阵中的数值应该参考之前的变更设计历史记录和有经验的设计人员的意见得出。经调研发现,大部分企业能够提供该矩阵。下面给出后续算法中用到的几个定义。

定义 1: 在时刻 t , 零件 i 是否正在发生变更称为零件 i 的变更状态,记为 $S_{a_i}(t)$,若零件 a_i 正在发生变更,则 $S_{a_i}(t) \neq 0$,否则 $S_{a_i}(t)=0$ 。产品的所有零件变更状态的集合称为产品的变更状态,记为 $S(t) = \{s_{a_1}(t), s_{a_2}(t), \dots, s_{a_n}(t)\}$ 。 $S(t)$ 中非零元素的个数,记为 $Num(t)$,代表了在时刻 t ,正在发生变更的零件个

数。

定义 2: 单个零件发生变更后,在下一时刻,如果 (1) 有且仅有一个零件被影响,则称此变更为单重变更; (2) 有两个或者两个以上零件被影响,则称为多重变更; (3) 没有任何零件被影响,则该零件为某条变更传播路线的终点。

定义 3: 定义矩阵 $L = (l_{ij})_{n \times n}$ 。 l_{ij} 代表了零件 a_i 发生变更后,单独引起零件 a_j 发生变更,而不影响其他零件的可能性。由直接可能性矩阵,可以得出,

$$l_{ij} = p_{ij} \times \prod_{j=1, j \neq i}^{j=n} (1 - p_{ij}),$$

称矩阵 L 为单重变更直接可能性矩阵。矩阵 L 中第 i 行非零元素所代表的零件的集合称为零件 a_i 的变更区间,记为 $V_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ik}\}$ 。同时记 $B_i = \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ik}\}$ 为矩阵 L 中第 i 行所有零元素所代表的零件的集合,称为零件 a_i 的非变更区间。定义矩阵 $O = (o_i)_{n \times n}$,其中 o_i 代表了零件 a_i 发生变更后,不会影响到任何零件的可能性。同样,由直接

可能性矩阵,可以得出, $o_i = \prod_{j=1, j \neq i}^{j=n} (1 - p_{ij})$,称矩阵 O 为

变更终止可能性矩阵。记 l_i, u_i 分别为零件 a_i 发生变更后,引起单重变更和多重变更的可能性。由定义 3 知

$$l_i = \sum_{j=1}^k l_{iv_{jk}}, u_i = 1 - l_i - o_i.$$

前面章节已经提到,ECM 的主要目的是缩小变更影响范围、降低变更成本和缩短交货时间,则变更传播预测的主要目的便是选定一条简捷、成本低且耗时短的传播路径。如果不考虑产品各零件在变更成本以及变更耗时上的差异,工程变更开始后,在满足各零件间约束的前提下,发生最少的单重变更并达到变更终点是影响范围最小、最简洁的变更传播路径。但在实际的工程变更过程中,零件间约束关系复杂,在变更成本以及变更耗时上差异较大,使得发生多重变更的概率非常大,即 $u_i \gg l_i$ 。在这种情况下,ECM 管理人员就需要组织专家进行讨论,统一各方面的意见,探讨下一步变更传播影响到的零件。以下将具体分析最优变更路径的产生过程,并用二叉树表达该路径。

在工程变更初始时刻,即 $t=0$ 时: $S(0) = \{0, 0, \dots, 1, \dots, 0\}$,其中, $S_{a_i}(0)=1, S_{a_j}(0)=0$ ($j \neq i$)

在下一时刻,即 $t=1$ 时,

(1) 若 $o_i \gg l_i$ 且 $o_i \gg u_i$,则该变更不影响别的零件。

(2) 若 $l_i \gg o_i$ 且 $l_i \gg u_i$,在该时刻, $Num(1) = 1$,经过专家会商后,从 V_i 选择一个零件,作为该时刻的变更零件。

(3) 除了(1)和(2)中所示情况外,在该时刻,发生

多重变更,即 $Num(1) > 1$ 的可能性非常大。在该步变更过程中,被影响的零件可能并不都属于 V_i ,但是多个受影响零件中至少有一个属于 V_i ,这是 Clarkson 算法不准确的根本原因之一。在这种情况下,经过专家会商,从 V_i 中选取 1 个或 1 个以上零件,并从 B_i 中选取零件(零件的个数可能为 0)作为该时刻被变更影响到的零件。

以此类推,在时刻 t , $S(t) = \{s_{a_1}(t), s_{a_2}(t), \dots, s_{a_n}(t)\}$, 假设 $Num(t) = num$ 。依次对 num 个正在发生变更的零件进行上述分析,得到 $(t+1)$ 时刻被影响到的零件。

在上述过程中,需要注意的是:

(1) 若出现“变更传播闭环”的情况,即在某一时刻被影响到的零件在上述过程中已经发生过变更,则在后续的变更传播过程中,有可能发生“雪崩式”传播。工程变更组织者应及时组织专家会商,解决的办法是:修改已经制定的传播路径,或者对该零件进行较小规模修改,把其影响到的零件数量降到最少。

(2) 经过有限步的变更传播,在满足所有零件约束的前提下,终止本次工程变更。

(3) 在后续的变更实施过程中,工作人员对变更传播路径提出异议时,可以对该路径进行改动。

图 2 用多叉树的方式表达了某个产品的变更传播路径。

2.2 变更传播跟踪与协同感知

在工程变更过程中,分析、设计和制造过程并行,形成了多学科、多专业的协同工作。计算机支持的协同制造和协同设计为工作者提供了一个虚拟的工作平台,克服了时空限制,但阻碍了工作者之间面对面的交流,人们本能的感知和被感知能力受到制约。正确有效的解决方法便是对变更传播进行跟踪,使之处于受控状态,同时利用协同感知技术,实现信息的实时共享,指导变更参与者高效完成变更任务。对变更传播的跟踪从根本上说是对变更实施人员的实时监控,而协同感知是实时共享变更实施过程中产生的信息。

因此,本文提出了基于发布/订阅模式的 EC 跟踪与协同感知模型,如图 3 所示,图中箭头方向表示了信息流向。变更参与者利用发布/订阅机制,使用消息建立协作关系。发布者将消息发布到一个特定的主题空间而不需顾及谁是订阅者、何时订阅。订阅者根据自己的需求进行订阅,利用该模型可以实现对正在进

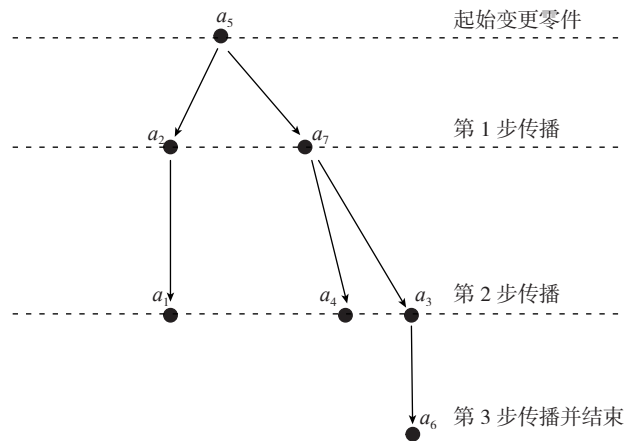


图 2 工程变更传播路径示例

Fig.2 Example of engineering change propagation path

行的事件和过去事件的感知。由于每个参与者的任务、目标和兴趣不同,所以每个成员需要感知的内容和关注点也不同。当成员所关心的对象发生变化时,启动消息触发机制,利用电子邮件通知程序,以“主动推送”的信息处理方式对变更参与者下一步所执行的任务进行及时提醒。

整个模型由 ECM 组织人员通过对信息空间的管理达到对 ECM 实施人员的实时监控,进而实现对变更进程的跟踪和变更信息的实时共享。模型采用定时反馈制度与申报制度相结合的策略对变更进程进行跟踪和信息收集,由 ECM 组织人员对这些信息进行综合处理,并以实时推送和信息定制的方式把信息发送给相关参与者。

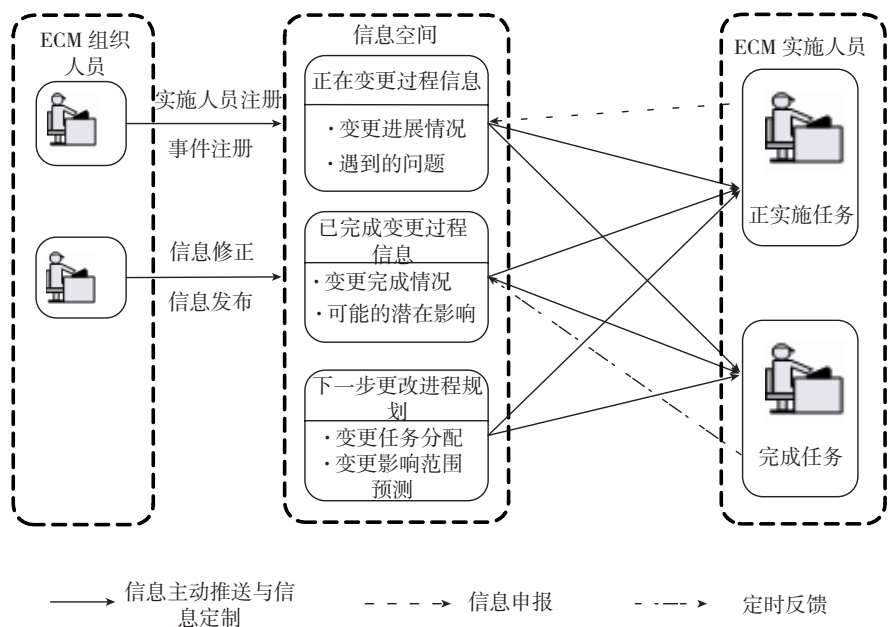


图 3 跟踪与协同感知模型

Fig.3 Tracking and collaborative awareness model

通过以上感知模型,保证了更改过程的可控性。当数据库中某一数据发生变更后,遍历产品开发网络中所有与该数据相关的信息,并进行相应的修改,保证了产品数据的完整性和一致性。

3 系统实现

3.1 系统总体结构

根据以上工程变更路径制定方法及协同感知模型,构建了基于过程控制的 ECM 系统,使更改过程处于受控状态,同时保证了信息的充分共享,并对更改过程进行监控、评价,保证了更改过程的正确性以及更改传播路径的最优化。

系统总体结构如图4所示。系统主界面如图5所示。

3.2 系统重要功能

(1) 对过程的控制。

更改请求被接受之后,根据变更产品信息,利用上述算法,制定变更传播路径。变更实施开始后,给相关人员分配任务,并从数据库中提取信息,按照主动推送或者信息定制的方法,将信息发送给工作人员。

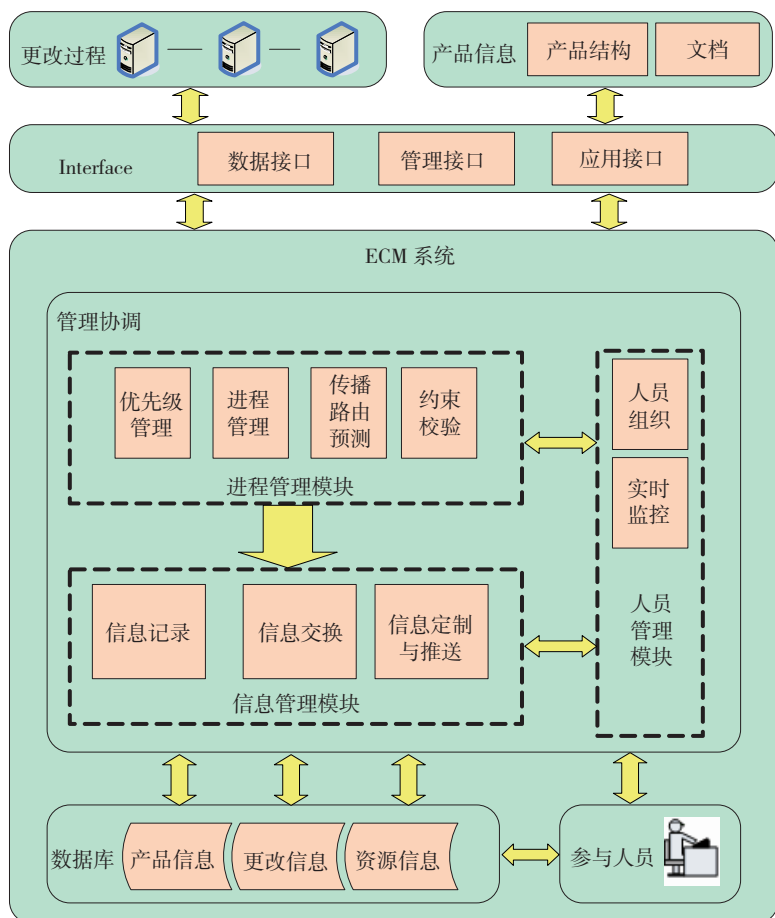


图4 系统总体结构

Fig.4 Overall structure of system

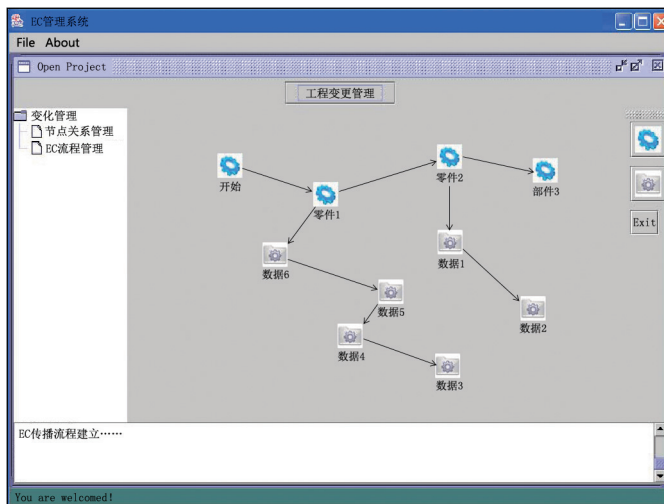


图5 系统主界面

Fig.5 System main interface

(2) 对数据的控制。

工程变更信息包括产品的原始信息、变更过程中产生的信息和可用资源信息。这些信息以一定的格式存放于系统数据库中。随着更改进程的实施,随时准备存储更改产生信息。同时,当数据库收到协调管理人员的调用信息指令后,以一定的格式将所需信息发送给相关人员。

(3) 对参与人员的控制。

工程更改参与人员是完成更改实施的主题。协调管理人员以产品开发网络为基础组织本次更改的实际参与人员,包括供应商、部门领导、专家、工作人员、用户等。所有人员均有唯一的ID,并由协调管理人员统一设置系统使用权限。

工程变更开始后,由协调管理人员将变更传播路径、各人现阶段的任务等主动推送到工作人员面前;工作人员按照系统访问权限访问相关信息,并将任务完成情况反馈给系统。实现所有参与人员的信息共享与协同感知。

4 结束语

近年来,国内外学者在预测变更影响的研究上进步不大,现有预测方法的准确度也不高。在这种情况下,本文为企业制定变更传播路径提供了一种切实可行的方法。提出的对更改实施过程的跟踪和协同感知技术,有效地解决了现在企业工程更改过程中普遍存在的问题。

(下转第95页)

本构 ElastoPlas (DMATEP)模型,该材料本构模型具有双线性性能,破坏准则采用最大塑性应变失效模式,即撞击过程中风挡材料的塑性应变达到失效塑性应变时材料破坏。

3.2 优化结果和分析

以某飞机风挡为对象,基于上述风挡抗鸟撞可靠性设计优化模型,利用超拉丁方法进行试验设计,建立初始数据库,以 Kriging 方法构建近似模型,优化算法采用全局寻优的多岛遗传算法和局部寻优的可行方向法形成的组合算法,保证了在对设计空间进行寻优和可靠性分析求解最可能失效点(M_{pps})时能快速得到最优解。建立整个分析流程后即顺利实现了风挡抗鸟撞的可靠性优化设计。优化结果如表 2 所示,在满足风挡抗鸟撞性能可靠度约束的前提下,通过优化设计,风挡质量由初始的 20.51kg 下降到 17.87kg,下降幅度为 12.87%,优化效果明显。

表1 随机量分布指标

随机量	分布类型	均值	变异系数
风挡厚度 d/mm	正态	(10, 20)	0.05
鸟体半径 $/mm$	正态	53.6	0.05
鸟体密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	正态	930	0.05
鸟撞速度 $/(m \cdot s^{-1})$	正态	150	0.1
鸟体体积模量 $/MPa$	正态	2.2e3	0.01
风挡弹性模量 $/MPa$	正态	3130	0.01
风挡泊松比	正态	0.314	0.01
风挡屈服应力 $/MPa$	正态	55	0.01

注:表中均值项(a, b)中的 a 和 b 分别对应随机设计变量的上下限,均值固定的量为随机参量。

表2 从挡抗鸟撞化前后比较

参数	优化前	优化后	相对变化
风挡厚度 $/mm$	16	13.94	
风挡质量 $/kg$	20.51	17.87	↓ 12.87%
风挡抗鸟撞的可靠度	1	99.989%	满足约束

4 结论

本文综合考虑鸟撞飞机风挡过程中不确定性因素的影响,建立风挡抗鸟撞可靠性优化设计模型,通过双循环策略组织整个分析过程,引入近似技术,在保证模型精度的前提下提高了计算效率。在此基础上对某风挡进行基于可靠性的优化设计,由优化结果和分析可知,与传统的风挡设计方法相比,在保证风挡抗鸟撞性能的可靠度前提下有效降低了风挡质量。实例分析说

明了本文所建风挡抗鸟撞可靠性优化设计框架的可行性,对工程设计有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 张志林,姚卫星. 飞机风挡鸟撞响应分析方法研究. 航空学报, 2004, 25(6): 577-580.
- [2] 李磊, 虞跨海, 毛坤, 等. 多学科设计优化在飞机座舱透明件设计中的应用. 机械设计, 2010, 27(11): 69-72.
- [3] 王富生, 岳珠峰, 冯震宙, 等. 鸟撞飞机风挡动态响应数值模拟方法研究现状. 飞机设计, 2008, 28(5): 39-46.
- [4] 屈滋培. 可靠性工程. 北京: 原子能出版社, 2000.
- [5] Chen X G, Hasselman T K, Neill D J. Reliability based structural design optimization for practical applications// 38th the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASE Structural Dynamics, and Materials Conference, Hyatt Orlando, Kissimmee, FL. AIAA-97-1403, 1997.
- [6] Du X, Chen W. Sequential optimization and reliability assessment for probabilistic design. ASME Journal of Mechanical Design, 2004, 126(2):225-233.
- [7] Du X P, Sudjianto A, Chen W. An integrated framework for optimization under uncertainty using inverse reliability strategy[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2004, 126: 562-570.
- [8] Perez R E, Liu Hugh H T, Behdinan K. Evaluation of multidisciplinary optimization approaches for aircraft conceptual design. AIAA 2004-4537.
- [9] Turcotte J, Trepanier J Y, Tribes C. Integration and multidisciplinary design optimization of a simplified gas turbine model using perl and insight. AIAA 2004-4425.
- [10] 原薇. 基于可靠性的多学科设计优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- [11] 袁亚辉. 多学科设计优化及其不确定性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [12] 李磊, 李元生, 于明, 等. 船用大功率柴油机涡轮增压器多学科设计优化. 北京: 科学出版社, 2011. (责编 良辰)

(上接第 85 页)

参考文献

- [1] Kocar V, Akgunduz A. A virtual environment for engineering change management. Computers in Industry, 2001, 61 (1): 15-28.
- [2] 何睿, 唐敦兵, 薛建彬. 基于设计结构矩阵的工程变更传播研究. 计算机集成制造系统, 2008, 14 (4): 656-660.
- [3] Clarkson L, John P, Simons, et al. Predicting change propagation in complex design. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2004, 126(5): 788-797.
- [4] Keller R, Eckert C M, John P, et al. Change propagation analysis in complex technical system. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2009, 131: 1-14.
- [5] Keller R, Eckert C M, Clarkson P J. Multiple views to support engineering change management for complex products. London Proceedings of the Third International Conference on Coordinated & Multiple Views in Exploratory Visualization (CMV '05), 2005, 33-41. (责编 深蓝)