产品研制过程动态质量策划

戴 伟 唐晓青 王美清

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 针对动态制造环境下的产品研制过程,为了确保在研制目标、研制状态和研制环境动态变化的情况下实现产品质量目标,提出了以质量活动为单元的产品研制过程动态质量策划模型,在产品研制各个阶段动态识别质量目标,并根据质量目标选择合适的质量措施.分析了产品研制过程中质量特性5个方面的属性,提出基于质量特性的属性对质量目标进行动态识别、对质量措施进行分类的方法.通过将质量目标与质量措施进行动态匹配以合成质量活动,并采用加权0-1目标规划法,充分考虑产品研制目标和各项约束条件,建立优化算法及其数学模型,实现了产品研制各阶段的动态质量策划.通过案例应用验证了所提出理论与方法的正确性与有效性,为产品研制动态质量策划提供了一种系统化的方法.

关 键 词: 产品研制; 质量策划; 质量特性; 质量目标; 质量措施; 动态优化

中图分类号: TP 391; TH 122

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2009) 10-1258-05

Dynamic quality planning in product development

Dai Wei Tang Xiaoqing Wang Meiqing

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

Abstract In order to facilitate product development under dynamic manufacturing environment, methodologies and technologies were developed to support dynamic quality planning. A dynamic quality planning model (DPQM) for dynamic product development was proposed based on quality activities. The attributes of quality characteristics (QCs) were divided into five aspects for analyzing their evolution during the dynamic product development. The quality objectives were identified through the analysis of the specifications and engineering requirements of QCs at a specific product life cycle stage, followed by classification of quality operations according to their effects on the QCs. A dynamic mapping algorithm between quality objectives and quality operations for configuration of quality activities was presented, together with mathematical model of goal programming for quality planning. The framework for the use of the proposed methodology to solve the problem of measurement quality planning in aerospace manufacturing environment was reported, and the resulting optimization in the dynamic quality planning was discussed.

Key words: product development; quality planning; quality characteristics; quality objectives; quality operations; dynamic optimization

产品质量策划是产品研制过程中实施质量保证的重要部分,是开展所有质量控制活动的依据.具体包括制定产品研制各阶段的质量目标并规定必要的作业过程和相关资源以实现质量目标[1].质量策划不但要在质量目标制定及其实现过程上体现顾客要求,还应在产品研制过程各质量控制节点和控制方法上把握各项设计指标和规格,结合企业质量管理的基础环境和体系要素制定切实可行的质量措施.在产品研制过程中,设计人员需要针对各研制阶段的约束条件和产品研制状态,结合产品研制目标和各相关方的需求,充分考虑产品研制的时间、成本、资源等约束条件,确定本

收稿日期: 2008-11-30

作者简介: 戴 伟(1982-),男,山西大同人,博士生, phoenixdw@hotmail.com.

阶段具体的质量目标和保证措施, 并对后继阶段质量保证活动进行有效的组织、指导与控制[2-3], 这是一个重要和复杂的动态决策过程. 目前针对动态质量策划及其质量措施的优化和决策的研究相对较少, 制造企业迫切需要系统的理论方法指导产品研制过程的动态质量策划.

1　动态质量策划模型

质量策划是产品设计方案和工程研制过程之间的纽带, 根据不同的策划准则, 得出的策划结果可能会有很大区别. 传统质量策划的方法包括自顶向下和自底向上两种方法[4-6]. 所谓自顶向下的方法, 即从顾客需求开始进行分解进而得到不同层次的质量目标. 所谓自底向上的方法是根据类似产品研制过程的历史经验反向得出改进新产品的质量目标及其改进措施. 本文结合两种方法的优点, 提出如图 1所示的产品研制过程动态质量策划模型.

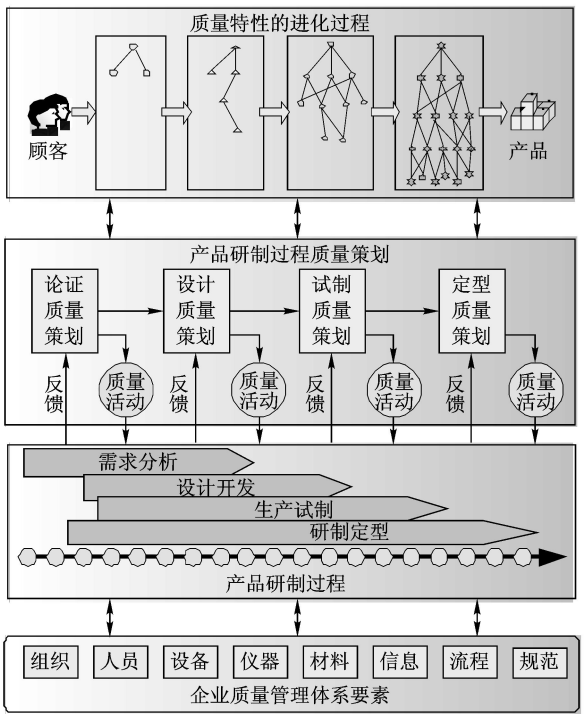


图 1　动态质量策划模型

产品研制过程可以划分为需求分析、设计开发、生产试制、研制定型等几个阶段, 针对各个研制阶段的质量目标设置关键控制点, 并选择质量控制和预防措施. 产品研制过程按照质量计划执行相应的质量活动, 并根据执行结果动态调整质量目标, 同时结合研制状态和研制环境的变化调整质量措施, 从而实现质量策划动态驱动产品研制过程的目标. 在产品研制过程中, 伴随着质量目标识别、质量措施分类、质量活动动态合成、质量策划优化的过程环.

质量策划得到的质量活动是产品研制过程中控制和保证产品质量的重要节点, 是研制过程中具有可验证性的特征测量点. 产品质量计划按照产品设计文件、工艺文件、生产计划、设备配置计划等文件规定和提出合适的关键控制点和质量措施. 质量活动包括: 需求分析阶段的风险分析和评估; 设计开发阶段的设计评审、设计确认、设计定型、新材料、新设备的鉴定等; 生产试制阶段的首件鉴定、工艺评审、检验测量、状态检查以及对特种工艺的确认和控制等; 研制定型阶段的定型评审、定型验证、关键过程、特殊过程的确认、标识、控制和追溯等.

2　质量目标与质量措施

质量目标和质量措施是质量策划的基本构件. 质量目标是按照产品研制质量要求确定的具体实现对象, 其表现形式是对不同研制阶段中产品质量特性的某类属性的保证和控制. 根据质量特性在某阶段的属性要求识别该阶段的质量目标, 并按照影响质量特性波动的程度区分质量措施, 为动态质量策划提供实现基础.

2 1　质量特性的属性分析

在产品研制过程中, 质量特性是影响产品最终顾客满意度的产品属性, 其波动会给产品研制质量目标的实现和设计任务的完成带来较大风险, 对后续制造过程产生较大影响[3-5]. 基于质量特性进行质量保证是质量策划的主要方法, 能够有效控制产品研制的成本和风险[2-3]. 质量特性的属性是质量特性的具体表现, 质量特性的属性可分为以下 5类.

1) 基本属性

基本属性包括质量特性的类别、维度、标准规格及其公差范围. 质量特性按类别可分为几何特性 (形状、位置、公差等), 机械特性 (硬度、强度、粗糙度等), 物理特性 (材料密度、导电性、传热性、磁性等), 化学特性 (耐腐蚀性、耐高温性)[7]; 质量特性按维度可划分到性能、功能、可靠性、符合性、耐用性、适用性、外观和感知性 8个质量维度[8]中, 质量特性的标准规格分为定量的几何尺寸和公差, 以及定性的操作规程和技术要求.

2) 生命周期属性

质量特性隶属于产品研制过程的不同阶段, 伴随产品研制过程形成产生、展开和实现的生命周期. 根据所属不同研制阶段, 质量特性主要分为设计特性和过程特性. 其中设计特性包括产品级

特性、系统级特性、部件级特性、零件级特性、特征级特性等; 过程特性包括制造特性、装配特性、检验特性等[3].

3) 关联属性

在将顾客需求转化到产品功能、产品结构及过程要求的过程中, 伴随着质量特性的传递、映射和迭代, 质量特性之间的关联关系包括: ①继承, 即复制质量特性; ②进化, 即优化质量特性的属性; ③展开, 即在设计过程中, 将一个质量特性分解为多个以便控制和实现; ④聚合, 即在装配过程中, 多个零件级质量特性合成为一个部件级质量特性.

4) 重要度属性

不同质量特性的波动所造成的影响是不同的, 通过质量特性的重要度属性来描述其波动所造成的影响. 根据影响程度的不同, 质量特性重要度可以分为 4个等级: 非常重要, 重要, 不重要, 非常不重要. 同一个质量特性在不同阶段的重要度是动态变化的.

5) 验证属性

根据设计规格, 不同质量特性的测量和检验要求具有很大区别, 验证属性可用于区分不同质量特性的测量方式和检验方法. 验证属性通常规定了对测量过程的限制, 例如使用接触或非接触的测量方式, 以及对测量特征可见性、测量标准、仪器的量程、精度、不确定度、环境温度、湿度、压力等要求.

2 2 质量目标识别

质量特性的属性要求是确定质量目标的基础. 产品研制过程中, 质量目标是某个质量特性在某个研制阶段的一系列设计规格或工程需求, 产品质量特性从顾客需求逐渐向功能域、结构域、工艺域分解配置和映射转化, 识别质量目标就是为了保证上述质量特性的属性在映射过程中满足设计要求.

如图 2所示, 通过分析产品质量特性在各阶段的分解和传递过程, 动态抽取某一研制阶段的质量目标, 定量评价质量目标 O_x 与质量特性的属性 A_y 之间的相关关系 u_{xy}, 采用 1-3-9表示质量目标与质量特性的属性之间的弱相关、中相关、强相关, 得到矩阵 $\boldsymbol{W}_{OQ}$.

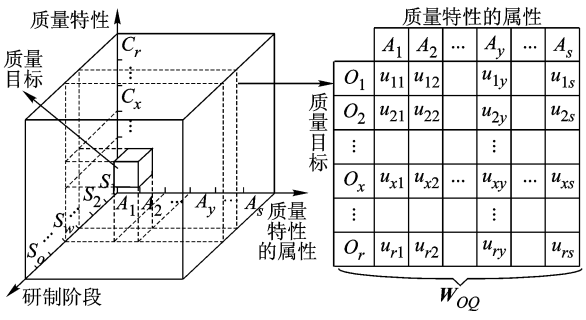


图 2 质量目标动态识别

2 3 质量措施分类

产品研制质量策划的关键是识别产品质量目标并配置相应的质量措施. 质量措施是针对具体质量目标进行的各类质量检验、质量控制和质量改进活动, 包括对质量特性的监控和检验, 对质量数据[9]的记录和收集, 以及为改善某项质量特性而进行的各种操作[4 10]. 质量措施包括执行具体质量活动的硬件设备、分析软件和操作人员, 因此在实际应用过程中存在稀缺性, 即同一阶段可使用的次数是有限的.

如图 3所示, 设计人员在质量策划辅助工具和设计辅助分析工具的支持下, 对已有历史措施信息进行分类与整理, 通过评价历史应用过程当中各个质量措施的使用效果, 抽取产品质量特性与质量措施的映射关系. 质量措施与质量特性之间存在着复杂的作用机制, 从系统的角度对质量特性波动进行分析, 得出质量特性波动属性 A_y 与控制和预防波动属性的质量措施 M_z 之间的定量关系 v_{yz}. 采用 1-3-9表示质量特性的属性与质量措施之间的弱相关、中相关、强相关, 得到矩阵 $\boldsymbol{W}_{QM}$.

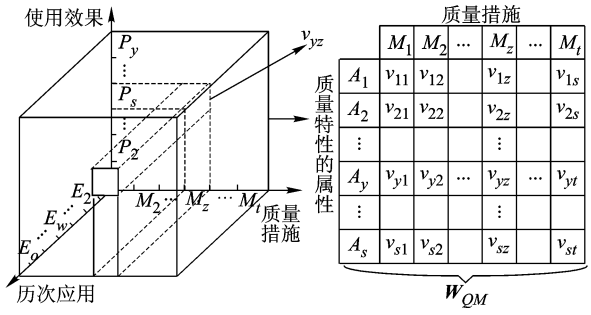


图 3 质量措施分类

3 动态质量策划

产品研制过程是一个动态过程, 动态质量策划是在产品各个研制阶段, 根据研制目标、研制状态和研制环境的变化调整质量目标和措施, 动态合成质量活动. 并针对产品研制过程中时间、成本、规范等各项约束进行决策, 调整质量措施及其执行序列, 从而保证与控制整个研制阶段的产品质量.

3 1 质量活动动态合成

质量活动动态合成是针对动态识别的质量目

标采取相应措施, 具体方法是将上述分析过程得到的矩阵 $\boldsymbol{W}_{OQ}$与 $\boldsymbol{W}_{QM}$相乘, 得到表示质量目标和质量措施相关关系的矩阵 $\boldsymbol{W}_{Q}$.

$$\boldsymbol{W}_{Q} = \boldsymbol{W}_{OQ} \times \boldsymbol{W}_{QM} \tag{1}$$

矩阵 $\boldsymbol{W}_{OQ}$是动态抽取的某一研制阶段的质量目标与质量特性的属性之间的定量关系, 矩阵 $\boldsymbol{W}_{QM}$是质量特性的属性与质量措施之间的定量关系, 得到的新矩阵 $\boldsymbol{W}_{Q}$中的元素 w_{xz}表示某一研制阶段的质量目标 O_x与质量措施 M_z的匹配程度. 在矩阵 $\boldsymbol{W}_{Q}$中, 任一个横向数组表示一个质量目标与各个质量措施的匹配程度. 将该数组中的元素以降序进行排列, 即可得到针对这一质量目标的优选质量措施序列.

3 2　优化算法

产品质量策划还是一个多目标决策过程, 要求在满足各个质量目标的同时, 综合考虑成本、时间、规范等因素, 合理分配质量资源, 因此需要对质量措施执行序列进行优选, 以获得最优的产品研制质量.

以产品研制过程某一阶段为例, 采用加权的 0-1目标规划法对上述质量活动动态合成的结果进行决策优化[10- 11]. 优化算法的一般数学模型表达如下:

$$\min \sum_{x=1}^{r} \left(\omega_x \cdot \left(\sum_{z=1}^{t} d_{xz} \cdot (1 - \overline{w}_{xz}) \right) \right) \tag{2}$$

满足:

$$\overline{w}_{xz} = \frac{w_{xz}}{\max\limits_{1<i<r,\ 1<j<t} (w_{ij})}$$

$$d_{xz} = 0 \text{或} 1$$

$$\sum_{x=1}^{r} d_{xz} = R_z \qquad z = 1, 2, \cdots, t$$

$$\sum_{x=1}^{r} \sum_{z=1}^{t} c_z^k \cdot d_{xz} \leqslant C_k \qquad k = 1, 2, \cdots, m$$

式中, ω_x表示质量目标 O_x ($x = 1, 2, \cdots, r$)的相对重要度; d_{xz}为 0-1变量, 当 d_{xz}取值为 1时表示针对质量目标 O_x采取了质量措施 M_z; w_{xz}表示质量目标 O_x与对应质量措施 M_z的匹配程度; $\overline{w}_{xz}$表示对 w_{xz}归一化处理的结果; R_z表示质量措施 M_z实际可使用的数量; c_z^k表示当采取质量措施 M_z时需要使用的第 k种定量约束的定量值; C_k表示研究阶段所允许使用的第 k种定量约束的最大值.

4　实例研究

在某飞机制造企业某型号飞机的试制装配阶段, 现场需要采用激光测量设备对多个质量特性进行测量和检验, 选择了 8个质量特性的属性来识别质量目标并对质量措施进行分类, 这些属性包括测量的量程、精度、不确定度、执行成本、操作时间、是否可接触、技术成熟度等级以及对环境因素的要求, 通过属性集合 $\{A, B, C, D, E, F, G, H\}$进行表示.

针对 6个质量特性识别得到的测量质量目标集为: $O = \{a, b, c, d, e, f\}$. 装配现场有 9台测量设备, 其中包括 7台激光跟踪仪和 2台激光雷达, 供测量阶段质量策划过程进行配置.

根据产品研制过程动态质量策划方法, 该阶段动态质量策划具体过程如下.

1) 按照质量目标动态识别方法确定质量目标和质量特性属性之间的相关关系, 得到矩阵 $\boldsymbol{W}_{OQ}$.

$$\boldsymbol{W}_{OQ} = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 7 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 8 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 4 & 7 & 0 & 0 \\ 9 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 3 & 0 & 0 & 7 \end{bmatrix} \tag{3}$$

2) 按照质量措施分类方法确定质量特性属性和质量措施之间的相关关系, 得到矩阵 $\boldsymbol{W}_{QM}$.

$$\boldsymbol{W}_{QM} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 0 & 6 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 1 & 3 & 0 & 7 & 3 & 1 & 3 \\ 0 & 7 & 1 & 2 & 3 & 3 & 0 & 5 & 1 \\ 0 & 2 & 3 & 0 & 0 & 2 & 3 & 1 & 0 \\ 5 & 0 & 4 & 2 & 2 & 4 & 6 & 0 & 5 \\ 2 & 3 & 7 & 0 & 3 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 4 & 6 \\ 2 & 1 & 0 & 7 & 0 & 2 & 0 & 9 & 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

3) 动态合成质量活动, 按照公式 (1)计算得到质量目标和质量措施的相关关系矩阵 $\boldsymbol{W}_{Q}$, 并对该矩阵进行归一化处理得到矩阵 $\overline{\boldsymbol{W}}_{Q}$.

$$\overline{\boldsymbol{W}}_{Q} = \begin{bmatrix} 0.18 & 0.26 & 0.44 & 0.19 & 0.04 & 0.44 & 0.40 & 0.29 & 0.09 \\ 0.10 & 1 & 0.46 & 0.24 & 0.57 & 0.35 & 0.01 & 0.68 & 0.12 \\ 0.68 & 0.30 & 1 & 0.25 & 0.43 & 0.54 & 0.49 & 0.25 & 0.43 \\ 0.18 & 0.46 & 0.40 & 0 & 0.79 & 0.10 & 0.40 & 0.03 & 0.26 \\ 0.35 & 0 & 0.09 & 0.26 & 0 & 0.62 & 0.26 & 0.09 & 0.26 \\ 0.43 & 0.21 & 0.19 & 0.84 & 0.13 & 0.43 & 0.26 & 1 & 0.24 \end{bmatrix} \tag{5}$$

4) 采用模糊评价法[12]对质量目标的重要程度进行比较, 质量目标的重要程度分别为 (4, 9, 3, 7, 1, 5), 归一化处理后得到 6项质量目标的相对重要度 $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6)$ = (0.14, 0.31, 0.10, 0.24, 0.04, 0.17). 同时, 以成本约束为例进行考虑, 对质量活动合成的结果进行优化, 要求该阶段采用的质量措施总成本不超过3000元. 表 1列出了每一个激光跟踪测量设备的单次使用成本 c_z和在该阶段最多可使用次数 R_z.

表 1 各测量设备使用成本及可使用次数

参数	设备编号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
c_z/元	200	300	500	600	300	100	300	500	1 000
R_z	1	1	1	2	1	2	1	1	2

5) 按照式 (2)给出的数学模型构建加权 0-1目标规划模型, 求解数学模型得到如图 4所示的质量策划结果.

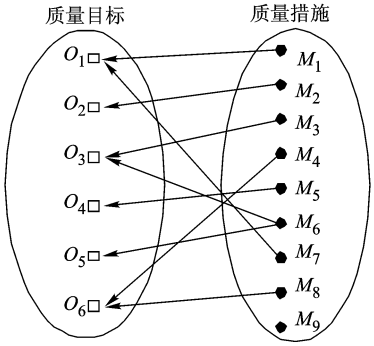


图 4 某研制阶段动态质量策划结果

从策划结果可以看出, 为了保证测量和检验目标的成功, 针对质量目标 O_1, O_3和 O_6同时使用了多个质量措施, 而质量措施 M_6在可使用次数允许的情况下被使用 2次. 同时, 为了满足成本等约束要求, 放弃了对质量措施 M_9的使用. 通过动态质量策划, 该阶段实际需要总成本为 2900元, 满足成本约束, 并且得到了最佳的资源利用率和可行性.

5 结束语

本文建立了面向产品研制过程的动态质量策划模型, 为产品研制动态质量计划的制定提供了一种系统化的方法. 该方法主要包括: ①根据具体研制阶段的质量特性的动态需求识别和定义质量目标; ②按照对质量特性波动的控制能力对质量措施进行分类; ③动态匹配质量目标和质量措施合成质量活动; ④提出数学算法对该质量活动合成结果进行决策优化. 实例研究表明, 该方法有效地利用企业资源满足了产品研制质量目标, 有效保证了在动态变化的研制环境下实现产品研制目标.

参考文献 (References)

[1] ISO 9000-2000. Quality management systems-Fundamentals and vocabulary[S]

[2] Tang Xiaoqing, Wang Meiqing, Wang Shuchun. A systematic methodology for quality control in product development process [J]. International Journal of Production Research, 2007, 45 (7): 1561-1576

[3] Thornton A C. A mathematical framework for the key characteristic process [J]. Research in Engineering Design, 1999, 11 (3): 145-157

[4] 何益海, 唐晓青. 基于关键质量特性的产品保质设计[J]. 航空学报, 2007, 28(6): 1468-1481
He Yihai, Tang Xiaoqing. Design for quality based on product key quality characteristics[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2007, 28(6): 1468-1481 (in Chinese)

[5] Raharjo H, Xie M, Brombacher A C. Prioritizing quality characteristics in dynamic quality function deployment[J]. International Journal of Production Research, 2006, 44(23): 5005-5018

[6] 刘子先, 姬升启, 郑永强. 基于特征映射的产品制造成本与保证成本的优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13 (4): 822-826
Liu Zixian, Ji Shengqi, Zheng Yongqiang. Optimization of cost structure based on feature mapping[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(4): 822-826 (in Chinese)

[7] Zheng L Y, McMahon C A, Li L, et al. Key characteristics management in product lifecycle management: a survey of methodologies and practices [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Engineering Manufacture, 2008, 222(8): 989-1008

[8] Garvin D A. What does 'product quality' mean? [J]. Sloan Management Review, 1984, 26(1): 25-43

[9] 唐晓青, 胡云, 王雪聪. 面向产品生命周期的质量数据模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(10): 1135-1140
Tang Xiaoqing, Hu Yun, Wang Xuecong. Quality data model in product life cycle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(10): 1135-1140 (in Chinese)

[10] Zhou M, Zhao C. An optimization model and multiple matching heuristics for quality planning in manufacturing systems [J]. Computers & Industrial Engineering, 2002, 42(1): 91-101

[11] Karsak E E, Sozer S, Alptekin S E. Product planning in quality function deployment using a combined analytic network process and goal programming approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 2003, 44(1): 171-190

[12] Kahraman C, Ertay T, Buyukozkan G. A fuzzy optimization model for QFD planning process using analytic network approach [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 171(2): 390-411

(编 辑: 文丽芳)