

文章编号:1000-582X(2010)05-007-09

## 复杂机电产品质量特性解耦模型

张根保,曾海峰,王国强,张家为

(重庆大学机械工程学院先进制造技术研究所,重庆 400044)

**摘要:**通过对复杂机电产品质量特性的映射机理和复杂产品质量特性敏感性分析发现,产品功能和结构的耦合,以及映射的不确定性是影响复杂产品质量的重要因素。结合公理设计原理,提出复杂机电产品质量特性解耦设计的思想,给出复杂机电产品质量特性映射过程中的解耦控制模型。该模型把复杂产品质量特性的形成过程转换成各功能域间“Z”字形迭代分解及映射,然后通过映射矩阵的分析,帮助设计人员识别复杂产品质量特性间的耦合,减少设计过程和产品的功能及物理结构复杂性。最后将模型应用于国内首台零传动滚齿机传动系统设计中,降低了滚齿机传动系统的复杂性,并有效提高了滚齿加工的精度。

**关键词:**质量特性;耦合;设计公理;质量控制;概念设计;模型

**中图分类号:** TH165.4

**文献标志码:** A

## Decoupling model of quality characteristics for complicated electromechanical products

ZHANG Gen-bao, ZENG Hai-feng, WANG Guo-qiang, ZHANG Jia-wei

(Institute of Advanced Manufacturing Technology, College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Analysis of the mapping and transferring mechanism, and the sensitivity of quality characteristics of Complicated Electromechanical Products (CEP) reveal that the coupling of functionality and structure, and uncertainty in their mapping relations are important factors that influence the quality of CEP. By integrating the principals of Axiomatic Design (AD), this paper proposes a concept of decoupling design for quality characteristics of CEP. A model for decoupling control in the mapping processes of CEP is presented. In the model, formation-process of quality characteristics of CEP is transformed into iterative zigzagging decomposition and mapping between functional-domains. Then mapping matrixes are utilized to facilitate product designers to identify coupled quality characteristics in CEP, and to reduce complexity in function and physical structure and the product development. The model presented is used in the design of the transmission system in the first direct-drive hobbing machine in China, which effectively reduces the complexity of transmission system of hobbing machine and improved gear hobbing accuracy.

**Key words:** quality characteristics; coupling; axiomatic design principles; quality control; conceptual design; models

**收稿日期:** 2009-12-29

**基金项目:** 国家 863 计划资助项目(2009AA04Z119);国家自然科学基金资助项目(50835008);国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2009ZX04014-016;2009ZX04001-013;2009ZX04001-023);数字制造装备与技术国家重点实验室(华中科技大学)开放基金资助

**作者简介:** 张根保(1953-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事现代质量管理、先进制造技术、可重构制造装备和企业信息化等研究,(Tel)023-65111285;(E-mail)gen. bao. zhang@263. net。

复杂机电产品是由机械结构、电器设备、控制装置、检测装置等有机组合在一起的复杂系统,它将机、电、液、控、光、磁、热等物理过程融于载体<sup>[1]</sup>,具有研制周期长、成本投入大、质量要求高等特点。复杂产品质量控制是一个跨学科、复杂、长周期且高度迭代的多阶段实现过程,研制过程中任何细微的质量问题都可能影响产品的最终品质。

随着复杂产品在航天器、飞机、舰船、汽车、制造装备等领域需求的日益增加,国内外对复杂产品理论方面的研究逐年增多<sup>[2-7]</sup>,如 Basem,利用 Boltzmann 熵度量产品设计中的复杂性作为复杂产品设计方案的评价准则<sup>[8]</sup>; MIT 的 Eppinger 等将关联结构矩阵引入复杂产品结构及设计过程规划<sup>[9]</sup>。国内有关大学也开展了一系列复杂产品设计与制造相关的研究,主要集中在需求分析、建模、仿真及优化等方面<sup>[10-13]</sup>。这些研究为复杂产品的质量控制在文献却很少。

美国麻省理工学院的 SUH 于 1990 年正式提出公理设计(Axiomatic Design, AD)理论<sup>[14-16]</sup>,并将设计公理用于各功能域之间的映射和迭代分解。近 20 年来,公理设计法在欧美日等国家得到了极大的发展,已成为现代产品设计的重要方法<sup>[17-18]</sup>。笔者在对复杂产品质量特性的映射机理和复杂产品质量特性敏感性分析的基础上,结合 AD 原理,提出复杂产品质量特性的解耦控制模型。基本思想是通过 AD 准则减少复杂产品质量特性间的耦合,降低设计过程和产品物理结构的复杂性,减少缺陷发生的几率,为复杂产品设计和制造过程的质量控制提供科学依据。

## 1 复杂产品的质量形成机理和敏感性分析

### 1.1 质量特性的映射规律

制造过程是一个由“工序—零件—部件—装配—产品”组成的自下而上的过程。按照 AD 对域的划分(图 1),产品的设计是一个从用户域到功能域、物理域、过程域的逐级映射的过程,这 4 个域及域间的映射关系是设计质量控制的主要内容。

设计阶段确定了产品的功能和结构,如零件的机械结构、装配关系等,而产品的结构设计又受到制造资源的约束,必须考虑制造装配等后续过程中存在的误差及随机影响因素,以保证设计的可实现性,如可制造性、可装配性等。

在公理设计中,任意相邻域间的关系均可理解

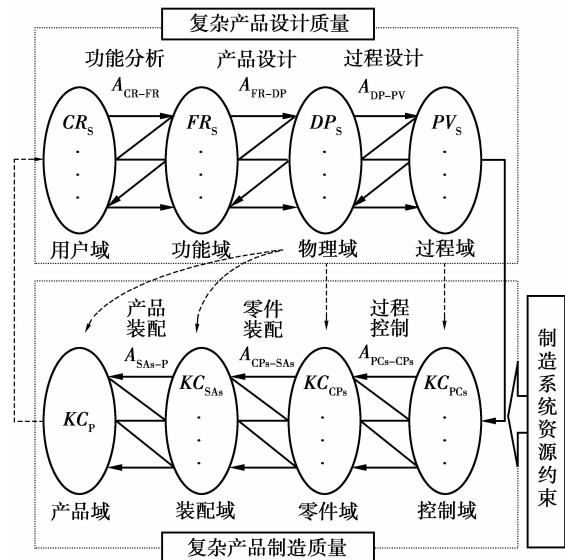


图 1 产品质量的形成过程图

为“需求域”和“实现域”的关系,如产品设计的“需求域”为功能需求  $FR_s$ ,“实现域”为设计参数  $DP_s$ ;而过程控制的需求域为  $KC_{CP_s}$ ,实现域为  $KC_{PC_s}$ 。因而,质量的形成过程,从横向看是质量特性在域间的映射,从纵向上看是各个功能域中质量特性自顶向下的迭代分解。两个相邻域之间的“映射”矩阵则表示了需求是如何实现的。以产品设计为例,“需求域”和“实现域”二者的映射关系为

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ \vdots \\ FR_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & \cdots & A_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n,1} & \cdots & A_{n,m} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} DP_1 \\ \vdots \\ DP_m \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{FR} = [FR_1, FR_2 \cdots FR_n]^T$  为需求域;  $\mathbf{DP} = [DP_1, DP_2 \cdots DP_m]^T$  为实现域。

式(1)用矩阵形式表示为  $\mathbf{FR} = [\mathbf{A}]\mathbf{DP}$ ,其中  $n$  为需求域  $\mathbf{FR}$  的项目数; $m$  为实现域  $\mathbf{DP}$  的项目数;  $A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j}$  表示  $DP_j$  对  $FR_i$  的影响,  $A_{ij} \in \mathbf{A}$ 。这样就可以将产品质量特性的传递和映射表示为每个邻域质量特性映射的迭代。各质量特性经分解后,对应层级的质量特性间存在类似的映射关系,于是在相邻域间形成“Z”形迭代分解和映射关系,而复杂产品的质量特性的形成也转化为映射矩阵的分析问题。

根据映射矩阵  $\mathbf{A}$  的形式,质量特性的邻域映射和传递模式可以分成 3 种情况:当  $\mathbf{A}$  为对角阵时,是无耦合映射(Uncoupled mapping),每一项  $FR_i$  可以用一项  $DP_i$  来满足,改变任意  $DP_i$  调整相应  $FR_i$  时,不会对  $\mathbf{FR}$  的其他项产生影响,这样的映射最为

理想;当  $\mathbf{A}$  为三角阵时,映射是准耦合映射(Decoupled mapping),此时  $DP_i$  的调整必须遵循适当的次序才能保证  $FR_i$  的相对可调性;当  $\mathbf{A}$  为一般矩阵时,映射为耦合映射(Coupled mapping),不满足独立公理,这种情况下质量特性的映射和传递关系复杂,控制困难。

### 1.2 质量特性映射中的耦合敏感性分析

映射矩阵由设计方案的系统特性确定,而不同的映射矩阵的响应特点是不同的。质量控制希望映射输出  $FR_i$  对输入参数  $DP_i$  不敏感,且不受干扰项的影响。根据映射矩阵,利用映射矩阵的差分方程可得到参数的允许波动范围

$$\Delta DP_i = \begin{cases} \frac{\Delta FR_i}{A_{ii}}, & \mathbf{A} \text{ 为对角阵;} \\ \frac{\Delta FR_i - \sum_{j=1}^{i-1} |A_{ij} \cdot \Delta DP_j|}{A_{ii}}, & \mathbf{A} \text{ 为三角阵;} \\ \frac{\Delta FR_i - \sum_{j=1, j \neq i}^m |A_{ij} \cdot \Delta DP_j|}{A_{ii}}, & \mathbf{A} \text{ 为一般矩阵;} \end{cases}$$

其中  $\Delta FR_i$  为  $FR_i$  的设计允许变动范围,相应的参数波幅为  $\Delta DP_i$ ;  $m$  为实现域  $\mathbf{DP}$  的项目数。

显然,对于给定的  $\Delta FR_i$ ,3 种映射方式中无耦合映射的  $\Delta DP_i$  允许公差范围最大,排序为  $\Delta DP_i^{\text{无耦合}} > \Delta DP_i^{\text{准耦合}} > \Delta DP_i^{\text{耦合}}$ ,即无耦合映射的质量稳健性强于准耦合映射,准耦合映射的稳健性强于耦合设计。与无耦合映射相比,准耦合设计的稳健性随  $\mathbf{FR}$  参数数目  $i$  增多而降低,参数的可变动范围减少幅度为  $(\sum_{j=1}^{i-1} |A_{ij} \cdot \Delta DP_j|)/A_{ii}$ 。耦合映射的  $\Delta DP_i$  的允许公差受到其他  $m-1$  个参数的影响,其允许变动幅度小于准耦合设计,而且任何参数调整都将对  $\mathbf{FR}$  其他项同时产生影响,影响幅度和方向需根据耦合项相对作用强弱确定,所以耦合映射的控制比较复杂。对比 3 种情况,无耦合设计最符合质量控制要求。

另外,根据式(1)可推导映射矩阵的系统方差,当映射矩阵  $\mathbf{A}$  为耦合映射时,  $FR_i$  的方差为式(2),当映射为准耦合映射时方差为式(3)。

$$\sigma_{FR_{耦合}}^2 = \sum_{j=1}^m A_{ij}^2 \sigma_j^2 + 2 \sum_{j=2}^m \sum_{k=1, k \neq j}^m A_{ij} A_{ik} \text{cov}(DP_j, DP_k), \quad (2)$$

$$\sigma_{FR_{准耦合}}^2 = \sum_{j=1}^i A_{ij}^2 \sigma_j^2 + 2 \sum_{j=2}^m \sum_{k=1}^{j-1} A_{ij} A_{ik} \text{cov}(DP_j, DP_k), \quad (3)$$

其中  $\text{cov}()$  表示协方差,  $m$  为实现域  $\mathbf{DP}$  的项目数。

设  $DP_i$  之间相互独立,且方差为  $\sigma_i^2$ ,则有  $\text{cov}(\mathbf{DP}) = \text{diag}(\{\sigma_i^2\})$ ,耦合映射下  $FR_i$  的方差为  $\sigma_{FR_i}^2 = \sum_{j=1}^m A_{ij}^2 \sigma_j^2$ ,准耦合映射下  $FR_i$  的方差为  $\sigma_{FR_i}^2 = \sum_{j=1}^i A_{ij}^2 \sigma_j^2$ ,无耦合映射下  $FR_i$  的方差为  $\sigma_{FR_i}^2 = A_{ii}^2 \sigma_i^2$ 。整个系统的方差为

$$\sigma_{FR}^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_{FR_i}^2. \quad (4)$$

显然  $\sigma_{FR_{耦合}}^2 > \sigma_{FR_{准耦合}}^2 > \sigma_{FR_{无耦合}}^2$ ,而方差越大,系统误差越大,例如当  $n=m=3$  时

$$\sigma_{FR_{无耦合}}^2 = A_{11}^2 \sigma_1^2 + A_{22}^2 \sigma_2^2 + A_{33}^2 \sigma_3^2 \quad (5)$$

$$\sigma_{FR_{准耦合}}^2 = A_{11}^2 \sigma_1^2 + (A_{21}^2 \sigma_1^2 + A_{22}^2 \sigma_2^2) + (A_{31}^2 \sigma_1^2 + A_{32}^2 \sigma_2^2 + A_{33}^2 \sigma_3^2) \quad (6)$$

$$\sigma_{FR_{耦合}}^2 = (A_{11}^2 \sigma_1^2 + A_{12}^2 \sigma_2^2 + A_{13}^2 \sigma_3^2) + (A_{21}^2 \sigma_1^2 + A_{22}^2 \sigma_2^2 + A_{23}^2 \sigma_3^2) + (A_{31}^2 \sigma_1^2 + A_{32}^2 \sigma_2^2 + A_{33}^2 \sigma_3^2) \quad (7)$$

对比式(5)-(7),无耦合映射的误差最小。根据以上分析得出以下结论:复杂产品的质量与映射模式密切相关,无耦合映射的敏感性最低,质量稳健性最好。所以应避免耦合映射,并尽可能将耦合映射转化为准耦合映射,将准耦合映射解耦为无耦合映射,以提高质量,减少波动。

### 1.3 基于信息公理的质量控制复杂性分析

AD中的信息公理指出,最好的设计是成功概率最大的设计,在满足独立公理的设计中,信息量最小的方案成功的可能性最大。从信息论的角度看,信息量最小说明不确定性及复杂性最小。影响产品复杂度的因素包括零部件、装配数量、层级数目,所采用技术的相对困难程度等,而以上因素的耦合将导致复杂性成几何倍数增长。SUH 提出对于给定的  $FR_i$ ,满足需求时映射的信息量为<sup>[14]</sup>

$$I_i = -\log_2 P_i \quad (8)$$

其中  $P_i$  为满足  $FR_i$  的概率。信息量越小则成功的概率越大,如当  $I=0$  时,  $P_i$  成功的概率为 1。对有  $n$  项功能需求的系统,  $I_{FR_n} = -\log_2 P_{FR_n}$ ,其中  $P_{FR_n}$  为  $n$  项  $FR_i$  的联合概率

$$P_{FR_n} = \begin{cases} \prod_{i=1}^n P_{FR_i}, & \mathbf{A} \text{ 为无耦合映射;} \\ \prod_{i=1}^n (P_{FR_i} | P_{FR_j}), & \mathbf{A} \text{ 为耦合映射;} \end{cases} \quad (9)$$

其中  $(P_{FR_i} | P_{FR_j})$  为条件概率,  $j=1, 2, \dots, i-1$ 。

从式(8)和式(9)可以看出,AD中的信息公理实际上是以产品的复杂度作为产品方案的衡量指标。复杂的系统需要更多的信息来满足其  $FR_i$ ,因

而基于 AD 准则降低设计、制造方案的复杂度,成为复杂产品质量控制的一项重要内容。

## 2 复杂产品的质量特性解耦模型

根据质量特性的映射关系分析,质量控制涉及产品形成的所有阶段,与 AD 域模型相对应,质量特性控制模型分为 4 个阶段(图 2),分别为客户需求分析阶段、工程需求分析阶段、物理结构设计和过程参数设计阶段。

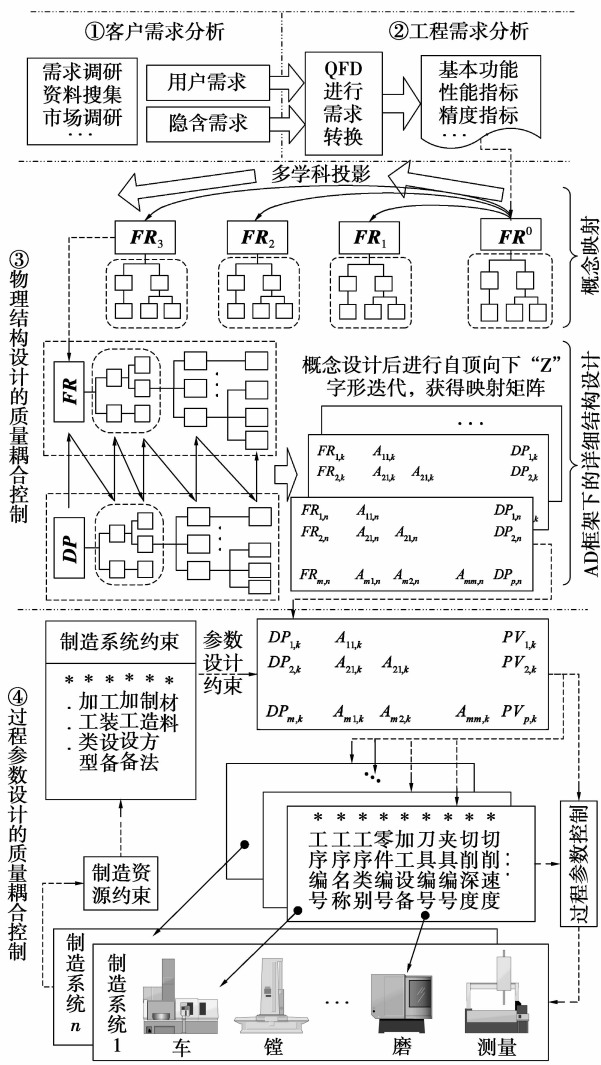


图 2 复杂产品质量解耦模型

### 2.1 客户需求分析

复杂产品的质量特性项目比较多,通常最初的客户需求信息 CR 比较模糊,而且往往存在大量隐含需求。因此,首先必须进行反复讨论调研,明确客户需求。采用 AHP 或粗糙集方法确定客观的需求重要度,可有效消除需求定义的不一致性<sup>[19]</sup>。

### 2.2 工程需求分析

工程需求分析确定产品的基本功能要求,此阶

段并不涉及所采用的具体技术。为便于下阶段物理结构设计,工程需求分析应提供对产品性能参数的具体要求,而且工程需求分析必须在不考虑求解的情况下进行,以免产生不必要的约束。

### 2.3 物理结构设计的质量解耦控制

产品物理结构设计的质量解耦控制对  $FR^0$  进行层级分解,依据 AD 原则减少产品的复杂度和不确定性,确定各对应层之间的映射矩阵  $A_i$ ,具体分为概念映射和物理结构设计 2 个阶段。

#### 2.3.1 概念映射阶段

概念映射将工程需求  $FR^0$  转化为设计需求  $FR$ 。有效的概念设计可以提高质量、减少设计、制造复杂度,从而较准确地满足客户要求。

概念映射无需将客户需求  $FR^0$  完全展开,展开的层级由产品的具体特点决定。为达到质量解耦控制的要求,在概念映射阶段要最大限度地利用设计初始阶段的自由度,将顾客需求进行多学科多领域投影,在整个可行域上生成解集,再根据质量解耦控制原则从方案中寻优,避免陷入局部最优。

#### 2.3.2 物理结构详细设计阶段

按照 AD 原则,以“Z”字型路线在  $FR$  和  $DP$  之间迭代,自顶向下进行产品结构的层级分解。每完成一层分解后,按照设计参数对产品功能要求的敏感度确定功能要求之间的映射关系,建立映射矩阵  $A_i$ 。映射矩阵  $A_i$  尽量是对角阵或三角阵,即产品功能结构应该是非耦合或准耦合。然后,对映射矩阵  $A_i$  分解的有效性进行一致性分析,以保证产品功能结构分解与上层设计决策的一致性<sup>[19]</sup>。通过迭代分解,直到获得整个复杂产品  $DP$  底层设计参数和  $FR$  的无耦合或准耦合设计矩阵。

### 2.4 过程参数设计的质量解耦控制

质量解耦控制方案最大限度上消除了  $DP$  的耦合,降低了参数的敏感度,为过程参数设计提供了较大的容差空间。过程参数设计根据物理结构设计,按照 AD 原则确定  $DP$  与  $PV$  之间的映射矩阵,进一步减少制造过程的不确定性。过程参数设计面向制造和装配,因此必须考虑制造方法和制造过程的约束,如设备、材料以及工艺设计规则和方法等。同结构设计类似,过程参数设计按照“Z”字型路线,在物理参数域和过程参数域之间迭代分解。过程参数设计结果是零件从原材料(半成品)到成品的整个制造过程规划。

### 2.5 耦合质量特性的解耦

在复杂机电产品的设计过程中,往往很难直接获得理想的无耦合或准耦合映射,因此必须进行解

耦。解耦操作反映到设计矩阵上,就是将一般设计矩阵转化成对角阵或三角阵。解耦操作包括解耦规划和解耦割裂。解耦规划是指通过对设计矩阵重排,减少设计中的反馈和迭代,使设计矩阵下三角化<sup>[20-22]</sup>。解耦规划的主要步骤为:1)评价设计矩阵的非零项的里克特(Likert)重要度信息  $w_{ij}$ , 获得判断矩阵  $D, w_{ij} \in D, i, j = 1, 2, \dots, n, n$  为设计矩阵维数;2)归一化判断矩阵  $D$ ;3)利用设计过程优化函数式(10)进行矩阵优化,矩阵规模较大时,利用遗传算法可提高优化效率。

通过目标函数式(10)可以在减少上矩阵三角区非零元素的数目和距离对角线距离的同时尽量使任务依赖关系靠近设计矩阵的左下角<sup>[21]</sup>。尽量使设计矩阵变换为下三角阵。

$$f = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\Omega_{ij} w_{ij}) \quad (10)$$

$$\text{式中 } \Omega_{ij} = \begin{cases} 1 \times [j + (n - i)]^2, & j \leq i; \\ 100 \times [j + (n - i)]^2, & j > i. \end{cases}$$

在完成解耦规划之后,如果设计矩阵仍然是一般矩阵,则需通过解耦割裂操作消除耦合项,使非对角线上元素,特别是上三角区元素变为零。按照解耦割裂操作的难度和特点,总体上可以分为 3 类:近似解耦、替代解耦和创新解耦<sup>[23-25]</sup>。近似解耦先利用模糊分析、网络分析或灰色分析等决策分析手段确定耦合强度,然后按照预先设定的耦合强度阈值,直接忽略低于阈值的耦合项;替代解耦则是通过问题在不同的学科或领域转换,用其他领域的现有技术解耦;创新解耦则利用结构化创新方法,消除耦合和冲突。表 1 对比了 3 类解耦方法的特点,可根据设计要求和耦合的特点结合使用,具体步骤参见文献<sup>[23-25]</sup>。

表 1 耦合质量特性的解耦方法对比

项目	近似解耦	替代解耦	创新解耦	
策略	忽略弱耦合	问题转移,用替代技术解耦	用 SIT 在原技术概念不变情况下解耦	TRIZ 方法进行完全创新方法解耦
方法	用决策分析方法判断耦合项是否可忽略	问题在不同的学科求解,或转换	利用 SIT 工具获得新解,消除耦合关系	应用 TRIZ 技术消除冲突,产生新解
约束	参数空间	无限制	限制的封闭空间	无限制
方案	近似解耦方案	替代技术方案	完全消除耦合关系的创新解	完全消除耦合关系的创新解
特点	方法简单,但无法得到最优解,有时忽略若耦合也会造成不确定性	在现有的技术中寻找替代方案,技术成熟,方案风险性小	结构化的创新方法,在限定的空间求解,减少盲目性;同时将解耦造成的影响限制在封闭空间内	结构化创新方法,求解的自由度最大,新方案有可能对整个方案产生影响,但技术风险相对较大

### 3 应用实例

为适应齿轮加工行业对小模数齿轮制造精度、生产效率及清洁生产的要求,重庆大学成功研制国内第一台基于零传动原理的全数控高精度滚齿机。利用笔者的质量解耦控制模型对该滚齿机的总体方案进行分析,大幅减少了机床的设计耦合,降低了机床的复杂度,提高了机床的加工精度。以下重点介绍利用质量解耦控制模型对样机 YK3610 传动系统进行分析和设计的过程<sup>[26]</sup>。

#### 3.1 滚齿机顾客需求分析

根据市场分析,确定滚齿机设计的市场需求:主要用于模数小于 1.5 mm 的直齿圆柱齿轮、斜齿圆柱齿轮的精密、高效加工,可进行硬齿面齿轮的一次

成形加工或二次对刀成形加工,也可进行模数小于 2.5 mm 的直齿圆柱齿轮、斜齿圆柱齿轮的精密加工,通过闭环的径向控制可进行高精度小锥度齿轮、鼓形齿轮的加工。

#### 3.2 滚齿机工程需求分析

根据顾客需求,确定滚齿机的具体功能和性能要求:最大加工直径 100 mm,最大加工模数 2.5 mm,最大轴向行程 150 mm,加工齿数范围 4~100 齿,滚刀架可转动范围  $\pm 50^\circ$ ,最大滚刀直径 63 mm,滚刀轴转速 550~4 000 r/min,工件轴转速 5~495 r/min,轴向运动快速 5 000 mm/min,径向运动快速 5 000 mm/min,切向运动快速 5 000 mm/min。

把以上性能和技术要求作为约束,确定滚齿机方案为卧式,基本工程需求  $FR^0$  包括:滚刀回转运

动  $FR_1^0$ , 工件回转运动  $FR_2^0$ , 滚刀倾角调整  $FR_3^0$ , 轴向进给  $FR_4^0$ , 径向进给  $FR_5^0$ , 切向进给  $FR_6^0$ 。

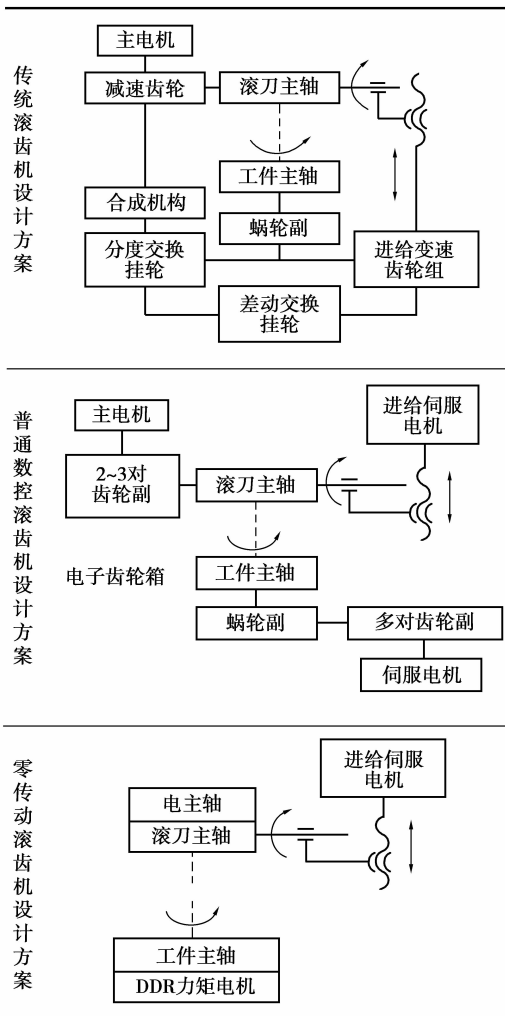
### 3.3 滚齿机结构设计的质量解耦控制

#### 3.3.1 概念映射阶段

概念映射将工程需求  $FR^0$  转换为具体设计需求  $FR_i$ , 不同的概念映射  $FR^0 \rightarrow FR_i$  产生不同的设计方案。随着计算机技术、电子技术和自动控制技术的发展, 利用数控技术解决传统机械领域的问题, 往往可获得满意的方案。

滚齿的关键是实现展成运动, 使刀具和工件的瞬时线相互作纯滚动, 保持两者之间确定的速比关系。要实现高精度、高速度滚齿, 滚齿机刀具主轴与工作轴的高速及高精度同步回转是先决条件。 $FR^0$  向机械、控制领域的多种映射, 可形成 3 类滚齿机设计方案: 传统滚齿方案、普通数控滚齿方案和零传动滚齿方案, 表 2 为滚齿机 3 种传动系统概念设计的简图(只包括滚刀、工件旋转运动和轴向进给运动), 对应的设计需求集分别为  $FR_1 - FR_3$ , 如表 3 所示。

表 2 滚齿机传动系统概念设计方案简图



传统滚齿方案动力全部由 1 个主电机提供, 通过复杂的传动链将运动分配到各轴, 设计的主要任务是通过传动链的设计形成展成运动和进给运动。普通数控滚齿方案和零传动滚齿方案则通过电子齿轮箱控制各种运动, 表 3 为 3 种滚齿概念设计方案下  $FR_i$  与  $DP_i$  的对应关系。

表 3 3 种概念设计工程需求及设计需求对应表

项目	传统滚齿	普通数控滚齿	零传动滚齿
$FR_1$ 滚刀回转运动	滚刀回转运动	滚刀回转运动	滚刀回转运动
$FR_2$ 工件回转速比传动	工件回转运动	工件回转运动	工件回转运动
$FR_3$ 滚刀倾角调整	滚刀倾角调整	滚刀倾角调整	滚刀倾角调整
$FR_4$ 轴向进给速比传动	轴向进给	轴向进给	轴向进给
$FR_5$ 径向进给速比传动	径向进给	径向进给	径向进给
$FR_6$ 切向进给速比传动	切向进给	切向进给	切向进给
$FR_7$ 动力		各向运动速度控制	各向运动速度控制
		伺服控制及多	
$DP_1$ 主传动链多组齿轮	对高精度齿轮副	内置电主轴	
$DP_2$ 分度传动链, 蜗轮蜗杆	伺服控制蜗轮蜗杆及传动齿轮副	内置力矩电机	
$DP_3$ 倾角调整装置	伺服驱动倾角调整装置	伺服驱动倾角调整装置	
$DP_4$ 轴向进给传动链	轴向进给机构	轴向进给机构	
$DP_5$ 径向进给传动链	径向进给机构	径向进给机构	
$DP_6$ 切向进给传动链	切向进给机构	切向进给机构	
$DP_7$ 主电动机	电子齿轮箱	电子齿轮箱	

传统滚齿机  $FR_1$  由主电机回转运动控制由传动链多级减速带动滚刀轴实现;  $FR_2$  由分度传动链及最终蜗轮蜗杆传动副实现。加工斜齿轮或对角滚齿滚刀作切向进给时, 随着工件的轴向运动或切向运动, 通过差动传动链来保证工件的附加转动,  $FR_3$  通过滚刀倾角调整装置实现,  $FR_4 - FR_6$  通过进给交换齿轮组实现, 动力由主电机提供。

数控滚齿机各运动均由单独的伺服电机驱动, 经高精度齿轮副传至滚刀主轴, 由电子齿轮箱控制伺服电机实现展成运动。为了给切削加工提供必要的扭矩和刚性, 增加滚齿加工平稳性, 保留蜗轮蜗杆作为最终传动副。

零传动滚齿机展成运动  $FR_1$  由电子齿轮箱控

制,在工件主轴与滚刀主轴的传动原理上完全取消机械传动副,不仅可以大幅度提高机床加工齿轮零件的精度,还可解决机械传动链中由于磨损造成的机床精度不稳定问题。

根据以上分析确定方案的设计矩阵。表 4 为传统滚齿机和零传动滚齿机概念映射矩阵,各符号含

义见表 3。由于映射矩阵比较简单,直接人工进行三角化/对角化,无需利用解耦规划方法。从表 4 可以看出零传动滚齿方案为解耦设计(可转化为下三角阵),而传统滚齿机由于各运动速比关系必须由复杂的齿轮传动系统维持和调整,存在大量耦合。

表 4 零传动滚齿机和传统滚齿机设计矩阵

	零传动滚齿方案							传统滚齿方案						
	DP <sub>1</sub>	DP <sub>2</sub>	DP <sub>3</sub>	DP <sub>4</sub>	DP <sub>5</sub>	DP <sub>6</sub>	DP <sub>7</sub>	DP <sub>1</sub>	DP <sub>2</sub>	DP <sub>3</sub>	DP <sub>4</sub>	DP <sub>5</sub>	DP <sub>6</sub>	DP <sub>7</sub>
FR <sub>1</sub>	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
FR <sub>2</sub>	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1
FR <sub>3</sub>	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
FR <sub>4</sub>	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1
FR <sub>5</sub>	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1
FR <sub>6</sub>	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1
FR <sub>7</sub>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1

3.3.2 物理结构详细设计阶段

概念设计确定的 **FR** 和 **DP** 需进一步迭代分解直到能完成具体功能,如 **FR<sub>2</sub>** 分解为:**FR<sub>21</sub>** 产生回转力,**FR<sub>22</sub>** 输出回转运动,**FR<sub>23</sub>** 回转精度控制,**FR<sub>24</sub>** 支撑固定各组件。相应满足 **FR<sub>2</sub>** 的 **DP<sub>2</sub>** 分解为:**DP<sub>21</sub>** 工件主轴力矩电机,**DP<sub>22</sub>** 输出轴,**DP<sub>23</sub>** 角度编码器,**DP<sub>24</sub>** 支撑系统。**FR<sub>22</sub>** 和 **FR<sub>24</sub>** 需进一步分解,而 **FR<sub>21</sub>** 和 **FR<sub>23</sub>** 无需继续分解。图 3 为 2 个域间的“Z”字形映射,然后按照表 4 的方法形成设计矩阵,判断设计的公理质量,如果存在耦合则根据具体质量特性进行近似解耦、替代解耦或创新解耦。

实际工程应用中近似解耦和替代解耦运用较多,而创新解耦因为风险较高,过多应用可能拉长设计周期。在概念映射阶段利用零传动方案代替传统传动方案消除耦合就属于替代解耦的范畴。其他各功能分解方法与 **FR<sub>2</sub>** 类似,因篇幅关系无法逐一展开。

3.4 控制结果的分析及验证

按照质量解耦原则,采用零传动方案简化了机床的机械结构,图 4 为项目组研制的 YK3610 样机,图中 1-6 分别对应表 3 零传动方案的物理结构。由于取消了传动中的机械传动环节,从根本上消除了机械传动副本身的传动误差,机械传动误差造成的伺服控制误差,减少了机械传动环节惯量和弹性造成的跟随误差,提高了滚齿精度。

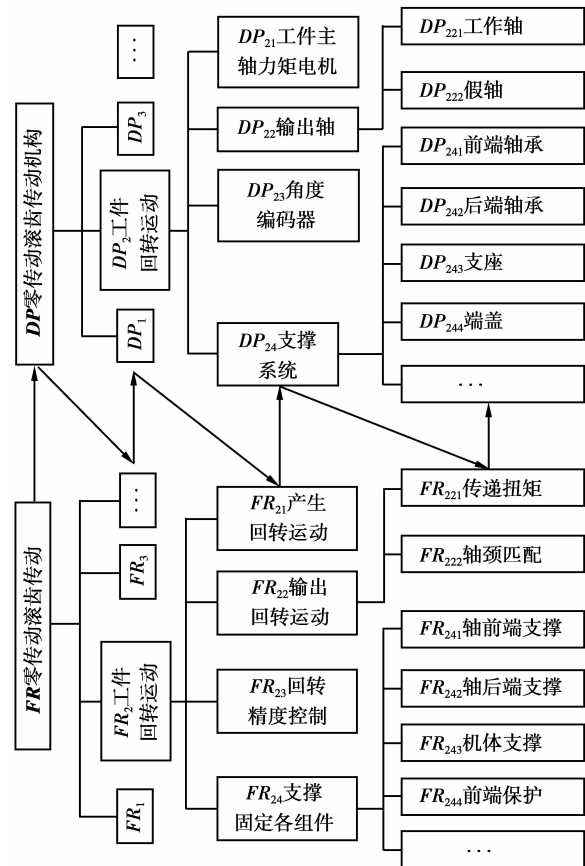


图 3 零传动滚齿传动“Z”字形映射

利用样机进行了切削加工精度试验<sup>[27]</sup>。实验

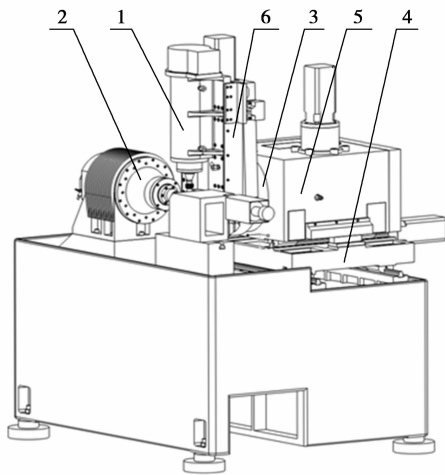


图4 YK3610 样机结构示意图

参数如下:模数  $m=1.25$  mm,齿数  $z=62$ ,压力角  $\alpha=20^\circ$ ,螺旋角  $\beta=20^\circ$ 。采用日本小笠原公司硬质合金 A 级滚刀,滚刀转速 900 r/min,轴向进给速度 0.15 mm/r,径向两次进刀,进刀深度分别为 2.6、0.2 mm。机床预热后连续滚切 8 个试件,滚切后试件齿距误差见图 5。计量结果显示:所有试件的该项精度均等于或优于 4 级,被切试件的齿距累积精度、齿距精度和接触线精度达到 5-4-4 级,高于预定的 5-6-6 级,证明了笔者理论的有效性。

表5 样机切削加工精度试验 mm

试件	左齿距 累计误差	右齿距 累计误差	左齿距 误差	右齿距 误差	左接触 线误差	右接触 线误差
1	0.004 2	0.009 1	0.002 2	0.003 7	0.003 3	0.003 8
2	0.011 1	0.015 3	0.002 7	0.003 4	0.003 8	0.002 8
3	0.017 1	0.017 6	0.002 9	0.003 7	0.002 2	0.003 1
4	0.017 2	0.018 1	0.003 2	0.003 2	0.006 4	0.004 7
5	0.016 6	0.014 3	0.002 9	0.002 6	0.003 5	0.004 2
6	0.015 8	0.014 6	0.002 4	0.003 3	0.002 8	0.003 6
7	0.009 5	0.011 1	0.002 1	0.002 2	0.004 4	0.004 5
8	0.010 0	0.014 5	0.001 8	0.002 8	0.013 1	0.009 1

## 4 结 论

1)通过复杂产品质量特性映射机制及质量敏感性分析,发现不确定性、耦合等造成的复杂性是影响产品质量的重要因素。而笔者提出的质量解耦控制模型,以 AD 的独立性公理为产品功能-物理结构分析的理论依据,有利于建立符合质量要求的功能

结构层次映射关系,避免耦合设计造成的复杂性和不确定性。

2)提出了利用质量解耦模型进行产品质量控制的步骤,同时提出利用设计初始阶段的最大自由度,通过概念映射将顾客需求进行多学科多领域转换的复杂产品质量早期求解策略。

3)将复杂产品质量解耦控制思想应用于滚齿机传动系统设计,实现了零传动滚齿机的高速、高精度切削,表明此方法有效、实用,可作为指导复杂机电产品质量控制的系统化方法。

## 参考文献:

- [1] 钟掘. 复杂机电系统耦合设计理论与方法[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [2] JOHNSON C W. What are emergent properties and how do they affect the engineering of complex systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(12):1475-1481.
- [3] SWIDER J, WSZOLEK G. Analysis of complex mechanical systems based on the block diagrams and the matrix hybrid graphs method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 157/158:250-255.
- [4] ZHU X W, HU S J, KAREN Y, et al. Modeling of manufacturing complexity in mixed-model assembly lines [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the Asme, 2008, 130(5): 1-10.
- [5] PAPAKOSTAS N, EFTHYMIU K, MOURTZIS D, et al. Modelling the complexity of manufacturing systems using nonlinear dynamics approaches[J]. Cirp Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(1): 437-440.
- [6] HUATUCO L H, EFSTATHIOU J, CALINESCU A, et al. Comparing the impact of different rescheduling strategies on the entropic-related complexity of manufacturing systems [J]. International Journal of Production Research, 2009, 47(15):4305-4325.
- [7] CHO S, ALAMOUDI R, ASFOUR S. Interaction-based complexity measure of manufacturing systems using information entropy[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2009, 22(10): 909-922.
- [8] EL-HAIK B, YANG K. The components of complexity in engineering design [J]. IIE Transactions, 1999, 31(10):925-934.
- [9] SOSA M E, EPPINGER S, DROWLES C M. A network approach to define modularity of components in complex products[J]. Journal of Mechanical Design,



- Transactions of the ASME. 2007, 129 ( 11 ): 1118-1129.
- [10] 高一聪,谭建荣,冯毅雄,等.复杂机械产品性能意图优化研究[J].浙江大学学报(工学版),2008,42(9):1549-1596.
- GAO YI-CONG, TAN JIAN-RONG, FENG YI-XIONG, et al. Performance intention optimization for complex mechanical products[J]. Journal of Zhejiang University ( Engineering Science ), 2008, 42 ( 9 ): 1549-1596.
- [11] 段桂江.基于归零模式的复杂产品研制质量问题处理[J].计算机集成制造系统,2008,14(1):138-145.
- DUAN GUI-JIANG. Quality problem processing model based on zero-remains principle for complex product development[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(1):138-145.
- [12] 祖耀,肖人彬,刘勇.具有迭代特征的复杂机械产品概念设计模型[J].机械工程学报,2006,42(12):197-205.
- ZU YAO, XIAO REN-BING, LIU YONG. New iteration-based conceptual design model of complex mechanical products[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12):197-205.
- [13] 赵嵩正,殷茗,梁工谦,等.大型复杂航空产品质量评估模型研究[J].航空学报,2006,27(4):588-593.
- ZHAO SONG-ZHENG, YIN MING, LIANG GONG-QIAN, et al. Study on evaluation model for quality of large complex aeronautic product[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2006, 27(4):588-593.
- [14] SUH N P. The principles of design[M]. England: Oxford University Press, 1990.
- [15] EL-HAIK B. Axiomatic quality : integrating axiomatic design with six-sigma, reliability, and quality engineering[M]. [S. l.]: John Wiley, 2005.
- [16] SUH N P. Complexity in engineering[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2005, 54(2):581-598.
- [17] 肖人彬,蔡池兰,刘勇.公理设计的研究现状与问题分析[J].机械工程学报,2008,44(12):1-11.
- XIAO REN-BING, CAI CHI-LAN, LIU YONG. Current research situation and problem analysis of axiomatic design [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12):1-11.
- [18] HISSCHI N W, FREY D D. Cognition and complexity: an experiment on the effect of coupling in parameter design[J]. Research in Engineering Design-Theory Applications and Concurrent Engineering, 2002, 13(3):123-131.
- [19] 邓超,马晓彬,吴军,等.基于粗糙集理论的质量屋顾客需求分析技术[J].计算机集成制造系统,2007,13(6):1191-1195.
- DENG CHAO, MA XIAO-BING, WU JUN, et al. Analysis technique of customers' requirements in HOQ based on rough set theory [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(6):1191-1195.
- [20] SU J C Y, CHEN S J, LIN L. A structured approach to measuring functional dependency and sequencing of coupled tasks in engineering design[J]. Computers & Industrial Engineering, 2003, 45(1):195-214.
- [21] 曹鹏彬,肖人彬,库琼.公理设计过程中耦合设计问题的结构化分析方法[J].机械工程学报,2006,42(3):46-55.
- CAO PEN-BING, XIAO REN-BIN, KU QIONG. Structural analytical approach to coupled design in design with axiomatic design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3):46-55.
- [22] 何家勇,刘伟,徐晓刚,等.设计迭代管理策略的分析[J].重庆大学学报(自然科学版),2002,25(6):13-15.
- HE JIA-YONG, LIU WEI, XU XIAO-GANG, et al. Management for design iteration [J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2002, 25(6):13-15.
- [23] 于学军,罗振璧,朱立强.公理设计中确定交互作用程度的方法[J].机械工程学报,2007,43(4):39-52.
- YU XUE-JUN, LUO ZHEN-BI, ZHU LI-QIANG. Method of determining the interaction strength among functional requirements in axiomatic design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43 ( 4 ): 39-52.
- [24] DEO H V, SUH N P. Mathematical transforms in design: Case study on feedback control of a customizable automotive suspension[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2004, 53(1):125-128.
- [25] 蔡池兰,肖人彬.公理设计下基于系统创新思维的解耦方法[J].机械工程学报,2006,42(11):184-191.
- CAI CHI-LAN, XIAO REN-BIN. Structured approach to decouple coupled design in axiomatic design based on SIT[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(11):184-191.
- [26] 刘润爱.零传动滚齿机关键技术研究与应用[D].重庆:重庆大学,2006.
- [27] 黄强,张根保,张新玉.机床位姿误差的敏感性分析[J].机械工程学报,2009,45(6):141-146.
- HUANG QIANG, ZHANG GEN-BAO, ZHANG XIN-YU. Sensitivity analysis of the pose error of machine tool [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6):141-146.

(编辑 王维朗)