

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.09.007

面向齿轮传动系统协同设计的任务规划方法研究^{*}

刘文林, 马雅丽^{*}, 李胜甲, 闫立山
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:在齿轮传动系统的协同设计中,存在任务间耦合关系复杂、返工现象严重、设计流程混乱的问题,针对这一问题,提出了一种基于模糊设计结构矩阵(FDSM)的全局-局部两级任务规划方法。首先,根据任务分解层次结构对设计任务进行了分解,依据设计任务间的输入输出关系构建了FDSM,通过对FDSM的行列变换完成了对耦合设计任务的识别与非耦合设计任务的规划,实现了全局规划;其次,引入了模糊耦合度量化设计任务间的耦合程度,计算了耦合集内各任务的输入输出量,完成了耦合任务集的解耦,实现了局部规划;最后,以齿轮传动系统协同设计为例,阐述了整个规划过程,并对所提出的方法进行了验证。研究表明:规划后FDSM的复杂程度降低了35.32%,减少了设计迭代次数;实现了并行设计任务集的自动识别,优化了设计任务执行次序,缩短了设计时间,可以为协同设计任务分配提供参考。

关键词:齿轮传动;协同设计;任务规划;模糊设计结构矩阵;耦合

中图分类号:TH132.41

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)09-1132-07

Task planning algorithm for collaborative design of gear transmission system

LIU Wen-lin, MA Ya-li, LI Sheng-jia, YAN Li-shan

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The complex coupling relationship among tasks, serious rework, and chaotic design process existed in the collaborative design of gear transmission systems, in order to solve the problems, a global-local two-level task planning method based on the fuzzy design structure matrix (FDSM) was proposed. First, the design tasks were decomposed according to the hierarchical structure of task decomposition, the FDSM was modeled in the light of the input-output relationship between design tasks. The coupled design tasks were identified and the uncoupled design tasks were planned through the transformation of FDSM's ranks to achieve global planning. Secondly, the fuzzy coupling degree was introduced to quantify the strength of coupling between design tasks, and the inputs and outputs of each task in the coupling set were calculated to complete the coupling decoupling of task sets and enable local planning. Finally, taking the collaborative design of gear transmission system as an example, the whole planning process was explained, and the feasibility of the proposed method was verified. The results show that the complexity of FDSM is reduced by 35.32% and the number of design iterations is reduced. The automatic recognition of concurrent design task sets is realized, and the execution order of design tasks is optimized, the design time is shortened, and the basis for collaborative design task allocation is provided.

Key words: gear transmission; collaborative design; mission planning; fuzzy design structure matrix(FDSM); coupling

0 引言

由于具有效率高、结构紧凑、工作可靠、寿命长等

一系列优点,齿轮传动系统被广泛地应用于航空、航天、车辆、船舶等机械领域。齿轮传动系统的工作性能对整个机械系统的影响巨大。

收稿日期:2021-02-21

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB2001701)

作者简介:刘文林(1996-),男,山西吕梁人,硕士研究生,主要从事齿轮传动数字化设计方面的研究。E-mail:1047488100@qq.com

通信联系人:马雅丽,女,博士,教授,博士生导师。E-mail:myl@dlut.edu.cn

随着数字化、智能化技术的快速发展,客户需求呈现多样性、灵活性、定制化的特点。为快速响应客户需求,缩短产品研发周期,协同设计模式^[1]得到了广泛应用。

齿轮传动系统协同设计是指由多个设计人员面向齿轮、轴、箱体等不同设计对象,从构型、结构、性能等方面通过数据交互与特定的协同机制完成齿轮传动系统的设计。齿轮传动系统协同设计的各个任务间存在复杂的交互耦合关系,造成设计流程混乱无序,存在迭代返工等风险。为了有效地组织协同设计,缩短设计流程的执行周期,必须对各环节中的任务进行合理的规划。所谓任务规划,是以减少任务的迭代次数和时间为目的,对协同设计中的各任务进行分解与重组,确定最优的任务执行次序。

目前,国内外有关任务规划的研究主要集中在任务分解、任务流程建模及耦合任务的识别与规划等方面。

杨育等人^[2]针对产品协同设计任务分解及分配的复杂性问题,考虑设计任务间的依赖关系,提出了基于功能-结构-任务映射的层次任务分解模型,并对协同设计中的资源分配问题进行了研究。包北方等人^[3]针对产品协同设计过程中任务分解缺乏定量分析的问题,提出了一种综合定量分析任务粒度、任务耦合度、任务均衡度的任务分解模型。GOLPAYEGANI S H 等人^[4]以设计任务的特征属性为输入,通过模块化神经网络模型实现了项目、功能、关系3个层面的任务分解。焦合军等人^[5]从并发性、伸缩性、协同性、动态性和组合性5个方面分析产品协同设计过程的特点,提出了基于混合 Petri 网三维分布的工作流模型,并从任务分解及冲突等方面对其进行了验证。MEIER C 等人^[6]提出了基于信息流的设计任务规划模型,采用设计结构矩阵(design structure matrix, DSM)来表示设计任务,并将改进的遗传算法应用于信息流模型,从而找到了设计任务的最优规划结果。温跃杰等人^[7]将 DSM 技术应用于航天器研制的设计流程与数据建模,清晰地描述了航天器各设计活动间的数据耦合关系,实现了各个分系统、各个模块、各个学科的数据一致与动态关联更新。郭凯等人^[8]通过对设计过程所转化的有向图及其转置图使用深度优先搜索算法,找出了有向图中的强连通分支,实现了对设计任务中耦合任务集的识别。LIN Jun 等人^[9]基于模糊集理论,建立了 DSM 中相关任务排序的数学模型,解决了任务不确定性依赖关系的问题。李潇波等人^[10]通过 DSM 优化算法实现了对耦合设计任务的顺序规划,并提出了

DSM 复杂度的计算方法。王志亮等人^[11]针对时间是市场竞争的核心这一特征,提出了基于任务期限的耦合设计任务规划模型,实现了对复杂耦合系统设计任务的管理与协调。田启华等人^[12]针对大容量耦合设计任务,提出了基于聚类分析的任务规划新方法,有效缩短了设计任务的执行周期。

以上文献通过对设计任务的分析,用不同的方法提出了任务分解、建模、规划的解决方案,但大都是对耦合任务集本身进行定性的分析,即大部分研究集中在局部规划上,缺少从综合系统的角度并可以进行定量计算的任务规划方案。另一方面,面向齿轮传动系统协同设计任务规划的相关研究也较少。

因此,为解决齿轮传动系统协同设计任务间耦合关系复杂,迭代返工次数多,设计流程混乱的问题,本文提出基于模糊设计结构矩阵(FDSM)的全局-局部两级任务规划方法,并对耦合设计任务间的数据交互程度进行定量计算,可以快速获得最佳的设计任务规划方案;并以齿轮传动系统协同设计为例,对所提的任务规划方法进行验证,获得相应设计任务的最优执行序列。

1 协同设计任务分解与建模

1.1 任务分解

任务分解是齿轮传动系统协同设计的基本问题。任务分解的目的是将一个任务分解成多个子任务,以便多个设计人员协同完成。

复杂产品协同设计可以按照产品-部件-零件的层次关系进行分解,与其对应的任务层次结构为总任务-子任务-元任务,其层次结构如图1所示。

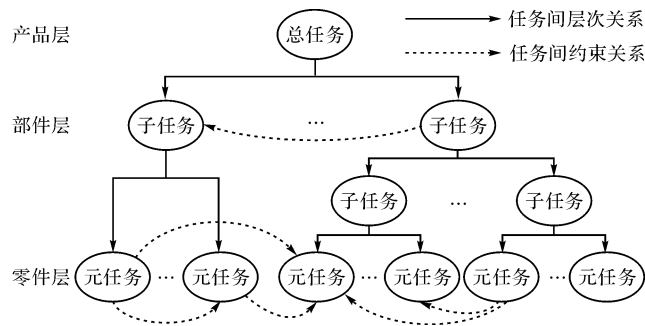


图1 任务分解层次结构图

设计任务不仅包括设计对象、内容,也包括任务所在层次、输入与输出数据以及执行时间等。

为清晰、准确地表示设计任务,本文用集合的方式描述设计任务。

定义1:设计任务。

其形式化描述为 $T_i = \{TN_i, TL_i, TI_i, TO_i, TR_i, TT_i, TC_i\}$ 。

各元素依次表示设计任务的名称、所属层次、输入数据集、输出数据集、关系集合、执行时间、成本。

设计任务间通过输入输出数据形成约束关系,从数据流的角度可以分为并行独立型、串行依赖型、交互耦合型 3 种,即:

- (1)并行独立型。设计任务 T_1, T_2 不存在数据交互,时序上可以并行执行;
- (2)串行依赖型。设计任务 T_2 需要任务 T_1 的输出数据作为输入才可以执行,时序上有先后;
- (3)交互耦合型。设计任务 T_1, T_2 存在双向的数据交互,需要经多次迭代才能完成任务,时序上有重叠。

分解后设计任务间以层次关系及约束关系为导向进行数据传递,相应的设计任务完成数据的接收、处理与输出。

1.2 基于 FDSM 的设计任务建模

为了描述和组织设计任务,EPPINGER S D 等^[13]提出了表达多个设计任务之间关系的设计结构矩阵,其定义为:设有设计任务 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ (其中: n —设计任务数量),则其设计结构矩阵为一个 n 阶矩阵 T (其中:矩阵元素 $t_{ij} = 1$,表示任务 T_j 对任务 T_i 有数据输入; $t_{ij} = 0$,表示任务 T_j 对任务 T_i 无数据输入)。

设计结构矩阵如图 2 所示。

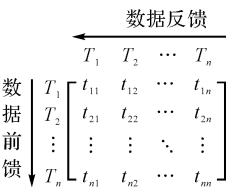


图 2 设计结构矩阵

传统的 DSM 中以布尔值 0,1 来描述设计任务间是否有约束关系,只能进行定性的分析。

为量化设计任务间的耦合程度,在此处笔者引入任务模糊耦合度的概念。

定义 2:任务模糊耦合度。
任务模糊耦合度是用来量化两个任务间输入输出数据交互程度的模糊数。

其计算方法如下:

$$t_{ij} = \frac{card(TO_j \cap TI_i)}{card(TO_j) + card(TI_i) - card(TO_j \cap TI_i)} \quad (1)$$
$$t_{ji} = \frac{card(TI_j \cap TO_i)}{card(TI_j) + card(TO_i) - card(TI_j \cap TO_i)} + \frac{card(TI_j \cap TI_i)}{card(TI_j) + card(TI_i) - card(TI_j \cap TI_i)} \quad (2)$$

式中: $card(TI_i)$ —设计任务 T_i 输入数据的数量; $card(TO_j)$ —设计任务 T_j 输出数据的数量; $card(TO_j \cap$

$TI_i)$ —设计任务 T_j 输出数据与 T_i 输入数据间有映射关系的数据数量; $card(TI_i \cap TO_j)$ —设计任务 T_i 输入数据与 T_j 输出数据间有映射关系的数据数量。

为方便计算,本文将区间 $[0,1]$ 离散化为 7 等份,将式(1,2)计算得到的耦合度近似等效为模糊数 0, 0.1,0.3,0.5,0.7,0.9,1,依次表示耦合程度的极低、非常低、低、一般、高、非常高和极高;并把基于任务模糊耦合度建立的 DSM 称为模糊设计结构矩阵(FDSM)。

设计任务间 3 种约束关系的图形表达及 FDSM 表达如表 1 所示。

表 1 3 种设计任务间约束关系及其 FDSM 表示

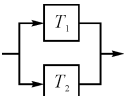
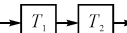
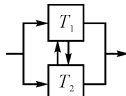
	并行独立型	串行依赖型	交互耦合型																											
图形表达																														
FDSM 表达	<table border="1" data-bbox="827 798 965 937"><tr><td></td><td>T_1</td><td>T_2</td></tr><tr><td>T_1</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>T_2</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>		T_1	T_2	T_1	1	0	T_2	0	1	<table border="1" data-bbox="1020 798 1159 937"><tr><td></td><td>T_1</td><td>T_2</td></tr><tr><td>T_1</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>T_2</td><td>0.3</td><td>1</td></tr></table>		T_1	T_2	T_1	1	0	T_2	0.3	1	<table border="1" data-bbox="1208 798 1346 937"><tr><td></td><td>T_1</td><td>T_2</td></tr><tr><td>T_1</td><td>1</td><td>0.9</td></tr><tr><td>T_2</td><td>0.5</td><td>1</td></tr></table>		T_1	T_2	T_1	1	0.9	T_2	0.5	1
	T_1	T_2																												
T_1	1	0																												
T_2	0	1																												
	T_1	T_2																												
T_1	1	0																												
T_2	0.3	1																												
	T_1	T_2																												
T_1	1	0.9																												
T_2	0.5	1																												

表 3 中,通过模糊设计结构矩阵对设计任务建模,简明地表达了设计任务之间的约束关系及耦合程度,为协同设计任务规划提供了模型基础。

2 协同设计任务规划

协同设计任务规划旨在降低任务间的耦合程度,减少设计过程中的迭代次数,优化设计任务执行序列,以缩短产品的开发时间。

本文提出的基于 FDSM 的全局-局部两级任务规划方法,如图 3 所示。

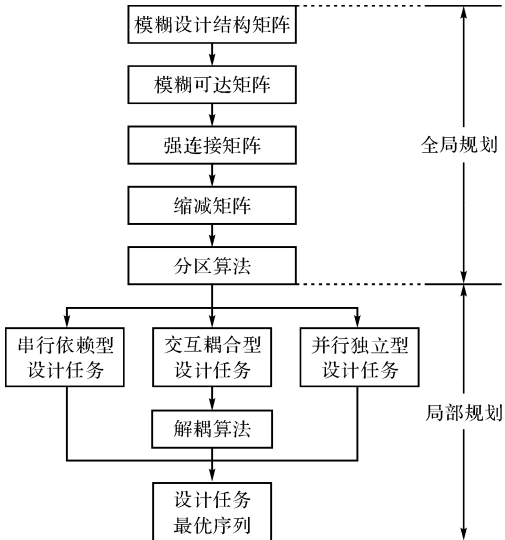


图 3 基于 FDSM 的全局-局部两级任务规划方法

2.1 全局规划

全局规划通过对 FDSM 实施行列变换,识别耦合设计任务并进行归一化处理,使其成为下三角矩阵,实现设计任务迭代数量的减少与影响范围的缩小。

全局规划算法步骤如下:

步骤 1:分离独立型设计任务(表现为设计任务的输入数据或输出数据与其他任务无关,即 FDSM 中的某一行或某一列为零)。

(1)计算 FDSM 中设计任务的行和、列和。

$$\text{设: } R_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}, i = 1, 2, \dots, n。$$

$$C_j = \sum_{i=1}^n t_{ij}, j = 1, 2, \dots, n。$$

$$M, N = \{1, 2, \dots, n\}$$

$$r = 1$$

$$s = 1$$

(2)寻找行和为 0 对应的设计任务并前置、列和为 0 对应的设计任务并后置。即求: $k, m \in N$, 使得 $R_k = 0, C_m = 0$ 。

$$\text{设: } \text{rank}(k) = r$$

$$r = r + 1$$

$$N = N - k$$

$$\text{rank}(m) = s$$

$$s = s + 1$$

$$M = M - m$$

如果 $M, N = \emptyset$, 则停止循环, 计算完成。

步骤 2: 识别耦合任务。

(1)构造模糊可达矩阵 P 。

$$P = (I_n + T)^n, I_n - n \text{ 阶单位矩阵。}$$

(2)构造强连通矩阵 Q 。

$$Q = P \cap P^T = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)^T, q_i - n \text{ 维行向量。}$$

设 q_i 中互不相等的行向量组成的集合为 $\{q'_1, q'_2, q'_3, \dots, q'_u\}, 1 \leq u \leq n$ 。 u' 是 $\{q'_1, q'_2, q'_3, \dots, q'_u\}$ 中有一个以上分量值为 1 的行向量的个数, 则设计任务 T 中, 耦合任务集的数量为 $u' (u' \leq u)$ 。 若 $q'_i (1 \leq i \leq u')$ 是有一个以上分量值为 1 的行向量, 设 q'_i 中所有值为 1 的分量是 $q'_{ij_1}, q'_{ij_2}, q'_{ij_3}, \dots, q'_{ij_{j'}}$, 则子任务集 $\{T_{j_1}, T_{j_2}, T_{j_3}, \dots, T_{j_{j'}}\}$ 为一耦合任务集^[14]。

(3)将识别的耦合设计任务归一, 即将耦合任务集 $\{T_{j_1}, T_{j_2}, T_{j_3}, \dots, T_{j_{j'}}\}$ 整合为一个子任务 T_C 。

步骤 3: 对非耦合的设计任务进行规划。

(1)构造缩减矩阵。

对耦合任务集进行归一化处理后得到的 FDSM 称

为缩减矩阵。

(2)非耦合设计任务的规划。

$$P'E_{l-1} = (o_1, o_2, \dots, o_u)^T$$

$$E_0 = (1, 1, \dots, 1)^T$$

$$E_l = (P'E_{l-1} - E_{l-1}) \cap E_{l-1}$$

其中, $l \geq 1$ 。

对于 $T_i \in T, T_i$ 是 T 的第 l 个设计任务的充要条件是 $o_i = 1$ 。

2.2 局部规划

局部规划是以全局规划后的耦合任务集为对象, 基于任务模糊耦合度, 定量计算设计任务间的数据交互程度, 找出其中耦合程度最小的设计任务, 并以此对耦合任务集进行解耦与规划, 最终确定耦合任务集内部的设计任务执行次序。

局部规划算法步骤如下:

步骤 1: 基于模糊耦合度, 对设计任务数据输入量 DI_i 、数据输出量 DO_i 进行计算。

对于设计任务 T_i , 若与越下游的设计任务 T_j 有耦合关系, 其迭代影响范围越大。 本文以设计任务在 FDSM 中的相对距离, 即从 t_{ij} 到 t_{ii} 的距离 w , 来表征不同设计任务迭代影响范围的大小。 对于对角线上方的元素 $t_{ij} (i < j \leq n)$, 权重 $w_a = j - i$, 对角线下方的元素 $t_{ij} (j < i \leq n)$, 权重 $w_b = 1$ 。

可得设计任务数据输入量与数据输出量的计算表达式为:

$$DI_i = \sum_{j=1}^{i-1} t_{ij} \cdot w_b + \sum_{j=i+1}^n t_{ij} \cdot w_a \quad (3)$$

$$DO_i = \sum_{i=1}^{j-1} t_{ij} \cdot w_a + \sum_{i=i+1}^n t_{ij} \cdot w_b \quad (4)$$

步骤 2: 耦合设计任务集的规划:

$$G_i = DI_i / DO_i \quad (5)$$

DI_i 与 DO_i 之比为耦合设计任务的排序系数, G_i 越小, 表明该设计任务相对所需的输入数据量越小, 输出数据量越大, 即该设计任务在耦合集内应前置; 反之亦然。

为验算规划前后矩阵的复杂程度, 判断规划过程是否合理, 文献[15]提出了 G -value 的概念, 对矩阵的复杂程度进行计算, 其表达式为:

$$G_{\text{value}} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n \frac{(j \cdot t_{ij} - \mu_{ri})^2}{n} \right) + \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^n \frac{(i \cdot t_{ij} - \mu_{rj})^2}{n} \right) \quad (6)$$

$$\text{其中: } \mu_{ri} = \frac{\sum_{i=1}^n j \cdot t_{ij}}{n}; \mu_{rj} = \frac{\sum_{i=1}^n i \cdot t_{ij}}{n}。$$

可见,通过对分解后的设计任务进行全局规划和局部规划,实现了对耦合任务集的识别、解耦及非耦合设计任务的规划,减少了设计的迭代次数,优化了设计流程。

3 齿轮传动系统协同设计任务规划

齿轮传动系统是一种典型的复杂产品,其结构复杂,设计过程涉及多对象、多内容的耦合,按照传统设计方法进行设计,不仅存在周期长、成本高的问题,而且难以保证设计性能最佳。

此处,笔者以齿轮传动系统协同设计为例,对基于 FDSM 的全局-局部两级任务规划方法的可行性和有效性进行验证。

3.1 任务分解与建模

根据齿轮传动系统设计生产实际,并结合有关的参考资料,笔者将齿轮传动系统协同设计任务分解为轮系、齿轮副、轴系、箱体 4 个部件层子任务,下分 20 个零件层元任务,如表 2 所示。

表 2 齿轮传动系统设计任务

部件层	零件层	部件层	零件层
轮系 (1-4)	1 传动方案设计	轴系 (9-17)	11 轴系力学模型
	2 轮系传动比分配		12 轴尺度设计
	3 轮系结构布局模块		13 轴校核
	4 轮系力学模型		14 轴承选型
	5 齿轮尺度设计		15 轴承寿命校核
	6 齿轮强度校核		16 键尺度设计
齿轮副 (5-8)	7 齿轮力学模型	箱体 (18-20)	17 键强度校核
	8 齿轮优化设计		18 箱体设计
	9 轴系方案设计		19 螺栓设计
	10 轴系结构布局		20 螺栓校核

然后通过分析各设计任务间数据交互情况,计算各设计任务间的模糊耦合度。

这里以传动方案设计与传动比分配两个设计任务间的模糊耦合度计算为例进行说明。

通过调研分析得到 $TI_1 = \{\text{输出转速,总传动比,输入、输出轴的轴线关系}\}$, $TO_1 = \{\text{传动级数,第 1 级传动类型,第 2 级传动类型,第 3 级传动类型,第 4 级传动类型,第 5 级传动类型}\}$; $TI_2 = \{\text{总传动比,传动级数,第 1 级传动类型,第 2 级传动类型,第 3 级传动类型,第 4 级传动类型,第 5 级传动类型,传动比分配系数}\}$, $TO_2 = \{\text{第 1 级传动比,第 2 级传动比,第 3 级传动比,第 4 级传动比,第 5 级传动比}\}$ 。

根据式(1,2)可以计算得到 $t_{12} = 0, t_{21} = 0.85 \approx$

0.9。其他设计任务间模糊耦合度的计算这里不再赘述。

最终构建的 FDSM 如图 4 所示。

设计任务	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}	T_{13}	T_{14}	T_{15}	T_{16}	T_{17}	T_{18}	T_{19}	T_{20}
T_1 传动方案设计	T_1																			
T_2 轮系传动比分配	0.9	T_2																		
T_3 轮系结构布局模块		0.9	T_3																	
T_4 轮系力学模型	0.7	0.7		T_4																
T_5 齿轮尺度设计	0.5	0.9	0.1	0.3	T_5		0.9													
T_6 齿轮力学模型	0.5			0.3	0.7	T_6														
T_7 齿轮强度校核	0.5	0.7		0.5	0.9	0.7	T_7	0.7												
T_8 齿轮优化设计	0.5	0.7		0.3	0.9			T_8												
T_9 轴系结构布局	0.7		0.7						T_9											
T_{10} 轴系方案设计				0.3				0.3	0.7	T_{10}										
T_{11} 轴系力学模型				0.1	0.9		0.3	0.7	0.9	T_{11}	0.9									
T_{12} 轴尺度设计			0.5	0.1			0.1	0.7		T_{12}	0.9	0.5					0.3			
T_{13} 轴校核			0.5						0.7	0.9	T_{13}									
T_{14} 轴承选型			0.3						0.9	0.7	0.5		T_{14}	0.9				0.1		
T_{15} 轴承寿命校核			0.3						0.7			0.9	T_{15}							
T_{16} 键尺度设计				0.7			0.7							T_{16}	0.9					
T_{17} 键强度校核			0.3											0.9	T_{17}					
T_{18} 箱体设计		0.5	0.5	0.3			0.5		0.5	0.5	0.5	0.5					T_{18}			
T_{19} 螺栓设计																		T_{19}	0.9	
T_{20} 螺栓校核																			0.9	T_{20}

图 4 齿轮传动系统协同设计任务初始 FDSM

3.2 任务规划

3.2.1 全局规划

具体的步骤如下:

- (1)分离独立型设计任务;
- (2)识别耦合任务;

根据 2.1 节中提供的方法,经计算可得到模糊强连接矩阵 Q 及 4 个耦合任务集 $T_{C1} \sim T_{C4}$,如图 5 所示。

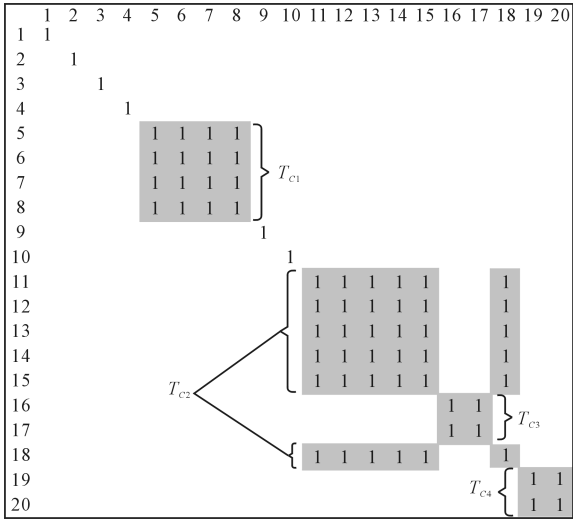


图 5 强连接矩阵 Q

- (3)非耦合设计任务规划。

将耦合任务集归一化后,得到缩减矩阵与排序矩阵,如图 6 所示。

由此可以得到全局规划后的设计任务序列: $T_1 \rightarrow$

$$\left\{ \begin{matrix} T_2 \\ T_3 \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} T_4 \\ T_9 \end{matrix} \right\} \rightarrow T_{C1} \rightarrow T_{10} \rightarrow T_{C2} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} T_{C3} \\ T_{C4} \end{matrix} \right\}.$$

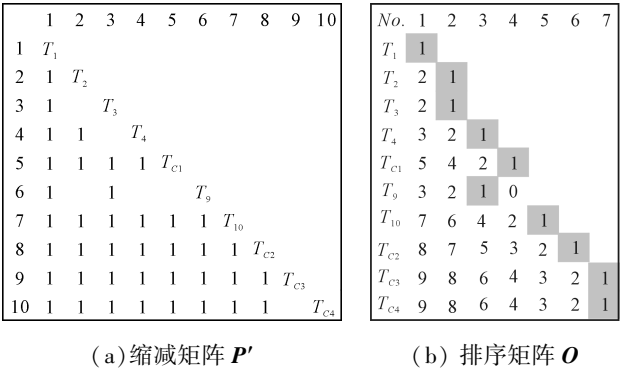


图6 非耦合设计任务规划

3.2.2 局部规划

此处以图4中的耦合任务集 T_{C2} 为例进行说明。根据FDSM中设计任务的模糊耦合度,结合2.2节权重确定规则,计算 T_{C2} 中各设计任务的数据输入量、数据输出量及其比值,结果如表3所示。

表3 齿轮传动系统设计任务

设计任务	DI_i	DO_i	G_i
T_{11}	0.9	2.6	0.346 1
T_{12}	3.1	2.8	1.107 1
T_{13}	1.6	0.9	1.777 8
T_{14}	2.3	2.4	0.958 3
T_{15}	1.6	0.9	1.777 8
T_{18}	1.5	1.1	1.363 6

根据 G_i 值的大小排序,可得到耦合设计任务集 T_{C2} 中各任务的执行顺序为: $T_{11} \rightarrow T_{14} \rightarrow T_{12} \rightarrow T_{18} \rightarrow T_{13} \rightarrow T_{15}$ 。

同理,笔者对其他耦合设计任务集进行局部规划,得到规划后的设计任务执行次序为: $T_1 \rightarrow \left\{ \begin{matrix} T_2 \\ T_3 \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} T_4 \\ T_9 \end{matrix} \right\} \rightarrow T_{5,6,7,8} \rightarrow T_{10} \rightarrow T_{11,14,12,18,13,15} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} T_{16,17} \\ T_{19,20} \end{matrix} \right\}$ 。

根据式(6)进行计算,可得到规划前后FDSM的复杂程度 G -value分别为318.847 3、206.203 1,复杂程度降低了35.32%;且规划后设计任务执行次序得到优化。该结果验证了全局-局部两级任务规划方法的合理性。

重组后的FDSM如图7所示。

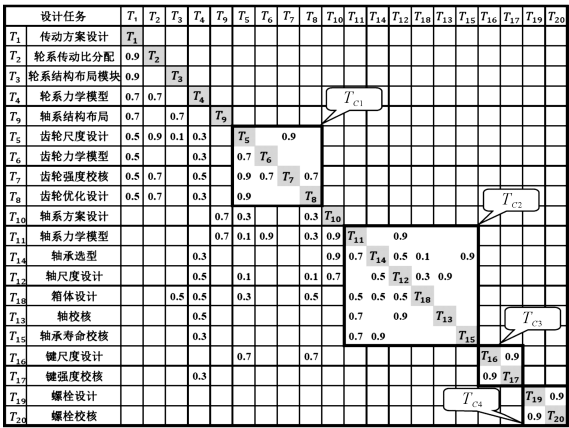


图7 规划后 FDSM

4 结束语

本文面向齿轮传动系统协同设计中的任务规划问题进行了研究,为合理配置设计任务、缩短设计周期,提高齿轮传动系统协同设计效率提供了一种新方法。

本文的主要结论(贡献)如下:

(1)基于任务层次分解结构将设计任务划分为相应的任务子集,通过任务模糊耦合度量化任务间的数据交互程度,再结合DSM实现了设计任务建模,为协同设计任务规划提供了模型基础;

(2)提出了基于FDSM的全局-局部两级任务规划方法,并给出了相应的算法步骤,实现了对耦合设计任务的识别与解耦、非耦合设计任务的规划;

(3)以齿轮传动系统协同设计为例,阐述了整个规划过程,规划后FDSM的复杂程度降低了35.32%,设计流程得到了优化,验证了所提方法的可行性与有效性。

在接下来的研究中,笔者将对任务规划后的任务分配问题进行研究,主要考虑分配过程中时间、成本、复杂度等资源的协同,最终得到任务的分配方案。

参考文献(References):

[1] 邵天巍,魏巍,张瑜,等. 协同设计驱动的产品创新设计发展[J]. 机械设计,2019,36(6):1-6.
[2] 杨育,李云云,李斐,等. 产品协同创新设计任务分解及资源分配[J]. 重庆大学学报,2014,37(1):31-38.
[3] 包北方,杨育,李斐,等. 产品定制协同开发任务分解模型[J]. 计算机集成制造系统,2014,20(7):1537-1545.

(下转第1159页)

本文引用格式:

- edge-based Systems, 2017, 116(1):1-12.
- [6] 李可,熊檬,宿磊,等.基于改进深层极限学习机的故障诊断方法[J].振动.测试与诊断,2020,40(6):1120-1127,1232.
- [7] 王一宾,李田力,程玉胜,等.基于核极限学习机自编码器的标记分布学习[J].山东大学学报:工学版,2020,50(3):58-65.
- [8] LEI Y G, JIA F, LIN J, et al. An intelligent fault diagnosis method using unsupervised feature learning towards mechanical big data[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2016, 63(10):3137-3147.
- [9] 贾文娟,张煜东.自编码器理论与方法综述[J].计算机系统应用,2018,27(5):1-9.
- [10] 陈是扞,彭志科,周鹏.信号分解及其在机械故障诊断中的应用研究综述[J].机械工程学报,2020,56(17):91-107.
- [11] 胡芑庆,陈徽鹏,程哲,等.基于经验模态分解和深度卷积神经网络的行星齿轮箱故障诊断方法[J].机械工程学报,2019,55(7):9-18.
- [12] 吴雅朋,王吉芳,徐小力,等.基于小波分析的FastICA联合降噪方法在滚动轴承故障诊断中的应用研究[J].中国机械工程,2017,28(18):2183-2188,2197.
- [13] 涂志松.基于小波包和支持向量机的滚动轴承故障诊断[J].机电工程技术,2020,49(12):4.
- [14] 李宇恒,蒋章雷,梁好,等.基于EEMD对称差分能量谱的行星齿轮箱故障诊断[J].组合机床与自动化加工技术,2020(10):122-125.
- [15] 池永为,杨世锡,焦卫东,等.基于EMD-DCS的滚动轴承伪故障特征识别方法[J].振动与冲击,2020,39(9):9-16.
- [16] 朱艳萍,包文杰,涂晓彤,等.改进的经验小波变换在滚动轴承故障诊断中的应用[J].噪声与振动控制,2018,38(1):199-203.
- [17] GILLES J. Empirical wavelet transform[J]. **IEEE Transactions on Signal Processing**, 2013, 61(16):3999-4010.
- [18] 姜正申,刘宏志,付彬,等.集成学习的泛化误差和AUC分解理论及其在权重优化中的应用[J].计算机学报,2019,42(1):1-15.
- [19] 乔美英,汤夏夏,闫书豪,等.基于改进稀疏滤波与深度网络融合的轴承故障诊断[J].浙江大学学报:工学版,2020,54(12):2301-2309,2422.
- [20] SHAO H D, JIANG H K, ZHAO K W, et al. A novel tracking deep wavelet auto-encoder method for intelligent fault diagnosis of electric locomotive bearings[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2018, 110(9):193-209.
- [21] 张永峰,陆志强.基于集成神经网络的剩余寿命预测[J].工程科学学报,2020,42(10):1372-1380.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

赵凡超,戴石良,房华伟,等.基于改进集成多隐层小波极限学习神经网络的滚动轴承故障识别研究[J].机电工程,2021,38(9):1152-1159.

ZHAO Fan-chao, DAI Shi-liang, FANG Hua-wei, et al. Fault identification of rolling bearing based on improved ensemble multiple hidden layers wavelet ELM network[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2021, 38(9):1152-1159.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第1137页)

- [4] GOLPAYEGANI S H, EMAMIZADEH B. Designing work breakdown structures using modular neural networks[J]. **Decision Support Systems**, 2007, 44(1):202-222.
- [5] 焦合军,张璟,李军怀,等.协同设计中基于混合Petri网的云工作流表示模型[J].应用科学学报,2014,32(6):645-651.
- [6] MEIER C, YASSINE A A, BROWNING T R. Design process sequencing with competent genetic algorithms[J]. **Journal of Mechanical Design**, 2007, 129(6):566-585.
- [7] 温跃杰,赵晟.基于DSM的航天器信息建模方法及应用[J].航天器工程,2012,21(1):83-88.
- [8] 郭凯,王仲奇,付广磊.深度优先搜索在耦合任务集识别中的应用[J].科学技术与工程,2010,10(14):3340-3343.
- [9] LIN Jun, QIAN Yan-jun, YASSINE A A, et al. A fuzzy approach for sequencing interrelated activities in a DSM[J]. **International Journal of Production Research**, 2012, 50(23):7012-7025.
- [10] 李潇波,赵亮,许正蓉.基于改进的DSM耦合任务规划方法的研究[J].中国机械工程,2010,21(2):212-217.
- [11] 王志亮,张友良.复杂耦合系统设计过程动态规划[J].计算机工程与应用,2005(13):117-120.
- [12] 田启华,梅月媛,杜义贤,等.基于聚类分析的大容量耦合设计任务规划的研究[J].中国机械工程,2018,29(5):544-551.
- [13] EPPINGER S D, WHITNEY D E, Smith R P, et al. Organizing the tasks in complex design projects[J]. **Lecture Notes in Computer Science**, 1991, 492:229-252.
- [14] 李慧,欧阳鑫玉.基于动态图的复杂系统建模方法[J].计算机时代,2019(8):49-52.
- [15] CHEN Li, DING Zhen-dong, LI Si-mon. A formal two-phase method for decomposition of complex design problems[J]. **Journal of Mechanical Design**, 2005, 127(2):184-195.

[编辑:李辉]