

文章编号: 1001-0920(2001)05-0586-05

鲁棒并行设计的模型与算法

李 涛, 熊光楞

(清华大学 国家 C M S 工程研究中心, 北京 100084)

摘 要: 提出一种基于约束网络的鲁棒设计方法, 该方法能用约束网络对并行设计中的一类不确定性参数进行有效的描述和处理。提出了反映该问题需求的数学模型, 设计了通用的一致性求解算法框架, 得到了满足该框架的算法都是弧一致的充分条件以及推论, 并利用区间算法对该框架进行实现。飞行器布局设计实例说明了该方法的有效性。

关键词: 鲁棒设计; 并行工程; 约束网络; 一致性算法

中图分类号: TP 39 **文献标识码:** A

Model and Algorithm of Robust Concurrent Design

LI Tao, XIONG Guang-leng

(National C M S Engineering & Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A robust design method based on constraint network is presented. As opposed to the traditional statistic robust methodology, the proposed method can give a valid description and analysis to a certain kind of parameter uncertainties in concurrent design. The mathematical model is proposed, which reflects the requirement of the robust design. A general consistency algorithm framework is designed by using interval arithmetic to refine the intervals. The filtering algorithm that satisfies the framework is proved to be ARC-consistent if the constraint network is complete. A missile layout design example shows the validity of the method.

Key words: robust design; concurrent design; constraint network; consistency algorithm

1 引 言

在“抛过墙”式的传统串行设计过程中, 下游设计活动是以上游完成的设计为基础的。这样, 每一步的设计任务都是确定的, 在活动上比较容易组织, 但容易在设计后期出现不可调和的矛盾而导致设计失败。并行工程以产品设计过程作为工作中心, 同时充分考虑下游环节(工艺规划、可制造性、可装配性等)的要求, 将问题暴露并解决在产品设计阶段。同串行

设计相比较, 并行化导致设计过程中的不确定性信息大大增加。当前一些 PDM 软件使用电子评审和校核, 在一定程度上缓解了这一矛盾, 但是真正意义的协同设计应在设计方案确定前就考虑各种下游环节约束, 而不是设计方案确定后再进行校验。因此, 如何描述和处理这种不确定性便成为并行设计成功的关键。

通常工程设计领域的鲁棒设计指的是 Taguchi 所提出的基于统计学的模型^[1]。而在实际

收稿日期: 2000-05-31; 修回日期: 2000-08-17

基金项目: 国家 863/C M S 基础研究项目(863-511-9841-004)

作者简介: 李涛(1974—), 男, 黑龙江大庆人, 博士生, 从事并行设计、面向约束的工程设计等研究; 熊光楞(1936—), 男, 江西南昌人, 教授, 博士生导师, 从事系统建模与仿真、计算机集成制造等研究。

设计产品的过程中, 存在的不确定性信息可以分成两类: 噪声和不确定性参数。其中噪声是指设计中带有随机变化规律的信息, 这部分信息可以通过其概率密度函数进行描述。另一类信息的不确定性是随着设计生命周期而变化的, 尤其是在并行设计领域, 许多参数在设计过程中可能的范围是随着设计过程的深入而逐渐确定的, 可见利用统计学模型很难描述和处理这类并行设计中出现的不确定性信息。工程设计的主要特征就是高度的不确定性^[2]。Kusirak^[3]提出一种依照变量间的量化关系来描述约束网络的体系结构和化简算法, 可以计算出一个参数发生微小变化时对其余参数的影响。

如何采用有效的设计工具, 使设计方案对这类不确定性参数具有良好的鲁棒性是实现设计“一次性成功”的前提, 而约束网络则是实现鲁棒设计的工具之一。并行设计方法正处于发展阶段, 目前还没有相应的设计理论来支持。本文提出一套并行鲁棒设计方法, 包括数学模型的确定、通用过滤框架以及算法实现来支持并行设计, 最后以飞行器布局设计实例说明了该方法的有效性。

2 数学模型

考虑到并行工程中设计的不确定性, 需要提出一种合理的工作模型来支持并行工程。若采用模糊集合描述这类在设计中所遇到的不确定性, 实际上很难刻画出参数变化范围内部的隶属函数特性, 反而使问题复杂化。如设计中存在 m 个不等式代数约束条件, 增加 m 个辅助变量将其化成等式约束条件, 利用区间化模式支持并行设计的约束网络的数学模型可表达为

$$\begin{cases} x & [x^L, x^U] \\ s.t. & \begin{cases} f(x) = 0 \\ f(x) = [f_1(x), \dots, f_{l+m}(x)]^T \\ x & [x^{L0}, x^{U0}] \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $f = [g^T, h^T]^T$, $x = [z^T, \theta^T]^T$, $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]^T$ 为将式中的不等式变为等式所添加的辅助变量, 其区间范围可表示出约束网络中不等式的裕度。 $x \in R^{k+m}$ 为广义约束变量, $[x^{L0}, x^{U0}]$ 为广义约束变量的初始区间, $[x^L, x^U]$ 为经过约束一致性过滤算法后的一致性区间。在工程设计中, 式(1)所描述变量和约束条件总称为约束网络。而式(1)中的每一次约束网络的变化称为工程更改。定义特征关联矩阵 $F^{(l+m) \times (k+m)}$ 为式(1)特征关联矩阵。其中

$$F(ij) = \begin{cases} 1, & f_i \text{ 中包含 } x_j \\ 0, & f_i \text{ 中不包含 } x_j \end{cases}$$

对于特征关联矩阵 $F^{(l+m) \times (k+m)}$ 而言, 其行数和列数分别为约束条件和广义约束变量的个数。定义辅助关联向量 $p^{1 \times (l+m)}$ 与 $q^{(k+m) \times 1}$, 则

$$p_c(i) = \begin{cases} 1, & i = c \\ 0, & i \neq c \end{cases}$$

$$q_c(i) = \begin{cases} 1, & i = c \\ 0, & i \neq c \end{cases}$$

在式(1)中, 称约束函数 f_i 的解函数: 对于一个使 $p_i F q_j = 0$ 的 j , 有

$$x(j) = f_i^j(x_j(w)), \quad 0 \leq j \leq k+m \quad (2)$$

式中 f_i^j 为约束函数 f_i 在变量 $x(j)$ 的投影。

若约束函数 f_i 对每个使 $p_i F q_j = 0$ 的 j 都存在解函数, 则称约束函数 f_i 是完备的; 若约束集中每个约束函数都是完备的, 则称约束集 f 是完备的。若式(2)的约束集是完备的, 则整个约束集对应的解函数个数应为关联矩阵 F 中所有非零元素的个数。

以上的区间变量可以表示不确定性参数的变化范围和设计变量的经验范围, 并能检查区间变量间的一致性关系, 以判断当前区间内是否对每组不确定性参数都存在可行解, 提前预报冲突, 尽量保证设计后期不出现返工。这样该设计模型就反映了鲁棒并行设计的需求。

3 约束网络的一致性算法框架

在约束一致性算法的研究中, 主要研究目标是利用当前的已知信息, 最大程度地预测在设计后期可能出现的冲突。在工程设计中, 很少出现只存在解方程问题中的唯一解情况^[4], 大多数情况要么不存在解, 要么有无穷多的解等待挑选, 这时由于在设计前期得到的信息的局限性, 无法立即逼近某一确定解, 只能将肯定不是解的区间滤掉。为了达到式(1)所描述的功能, 本文构造一个通用的区间过滤算法的框架。定义约束网络的区间变量如下:

定义1 (F 区间) 考虑集合 $F = R \{-, +\}$, 其中 R 为实数集合。对于 $\forall a, b \in F$, 区间 $[a, b]$ 表示 $\{x \in F \mid a \leq x \leq b\}$ 。记 $I(F)$ 为数集 F 上的所有区间。

在定义1中, F 为运算封闭集合。而在实际算法实现中, F 区间中的 $\{-, 0, +\}$ 等元素都不能精确描述, 因此必须从算法本身定义运算的封闭性。为方便起见, 本文以下所指的 F 区间的元素都是浮

点数, n 个 $I(F)$ 区间的 Cartesian 乘积称为区间套, 记作

$$B = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n, \quad I_i \subseteq I(F) \quad (3)$$

定义 2 (区间扩展) $f: R^n \rightarrow R$ 为一个映射, $F: I(F)^n \rightarrow I(F)$ 为映射 f 的区间扩展, 若满足对于 $I_1, I_2, \dots, I_n \subseteq I(F), \forall r_1 \in I_1, \dots, r_n \in I_n \subseteq I(F)$, 下式成立

$$f(r_1, r_2, \dots, r_n) \subseteq F(I_1, I_2, \dots, I_n) \quad (4)$$

由定义 2 可知 f 映射对应的区间扩展不是唯一的, 例如 F 为 f 的一个区间扩展, 则 $F + x - x$ 也为映射 f 的区间扩展. 如何选择合适的区间扩展是区间代数的一个重要问题. 算法框架中有两个步骤: 估计和收缩. 通过这两个步骤, 使各个约束变量的区间收敛到一个稳定的区间套. 称式 (2) 中得到的稳定区间套为一致性区间套. 根据这个要求, 分别定义以下操作:

定义 3 (估计函数) 对于定义在 R 上的关系 ρ , 将 ρ 估计函数记为 $\text{apx}(\rho)$, 若 $\text{apx}(\rho)$ 为包含区间 ρ 的最小 F 区间.

定义 4 (收缩函数) 对于定义在 R 上的关系 ρ , 记 ρ 的收缩函数 $\rho: I(F)^n \rightarrow I(F)$, 且

$$\rho(u) = \text{apx}(\rho \circ u) \quad (5)$$

式 (5) 中, 关系 ρ 可以是一个区间, 也可以是一个映射. 当 ρ 是一个映射时, $\rho \circ u$ 的意义为 u 在映射 ρ 的作用下产生的结果并与 u 取交集. 对于估计函数与收缩函数, 存在下述定理:

定理 1 对于 $u, v, \rho \subseteq I(F)^n$, 以下性质成立

$$\rho(u) \subseteq u \quad (6)$$

$$u \subseteq \rho = \rho(u) \subseteq \rho \quad (7)$$

$$u \subseteq v \Rightarrow \rho(u) \subseteq \rho(v) \quad (8)$$

$$\rho(\rho(u)) = \rho(u) \quad (9)$$

证明略.

定理 1 在 F 区间上说明了估计函数和收缩函数的意义. 下面从设计方面说明上述定理的性质. 性质 (6) 实际上说明了区间的收缩特性, 即运算后的区间一定是缩小的, 它是保证算法收敛的重要性质. 性质 (7) 说明所有有效的解理论上都会落在收缩后的区间内, 在协同设计中, 性质 (7) 保证了冲突预报的必然性, 即当约束系统预报冲突时, 可以确定当前的设计区间内不存在可行解. 性质 (8) 实际上决定了收缩函数的单调性. 性质 (9) 说明了每次估计和收缩算法对于特定的解函数计算一次即可, 其浮点数

的值不会发生变化.

求解约束一致性区间其通用的算法框架可表示如下, 其中 x 的维数为 $k+m$, 而 $f(x)$ 解函数总个

数为 $\sum_{j=1}^{k+m} \text{rank}(F_{q_j}^T F^T)$.

算法 1

Procedure LabelResolve (In {C = [f], x = 0, y}; Out {y})

BEGN

WHILE (y - x > ϵ) DO

x = y

FOR j = 1 to k + m

FOR i = 1 to l + m

IF (p_iF_{q_j} = 0)

y_j = f_i^j(x) (10)

END IF

END FOR

END FOR

IF y = {null set}

Show conflict message

Exit

END IF

ENDWHILE

END

END Procedure

算法 1 对每两次迭代的结果取交集, 实际上是要得到一个稳定收敛的区间套序列. 算法的核心思想是只要有一个区间变量未达到稳定值, 就可能影响到所有的区间, 因此一直要计算到所有的区间均达到稳定值为止. 由于计算机浮点数的限制, 实际上区间可能收敛不到一个精确稳定的区间范围, 这时定义 ϵ 为稳定裕量系数, 它的取值直接影响到整个一致性区间套的计算时间.

定理 2 如果式 (2) 的变量区间通过算法 1 的完备性检查, 则计算后变量区间是弧一致的充分条件为式 (2) 所描述的约束网络是完备的. (证明略)

由定理 2 可得以下推论:

推论 1 若确定解向量能通过算法 1 一致性检查, 则为满足整个约束集的解.

推论 2 若式 (1) 所描述的模型在算法 1 的作用下检测到冲突, 则在当前的区间范围内必无满足整个约束集的解.

若迭代的两次区间套的交集为空集, 则可断定在此区间范围内没有满足所有约束条件的可行解.

这时在设计过程中的表现就是当前的设计方案或给出的参数范围不可行, 需要重新修改约束网络直至检查通过为止。该特性使得以上算法框架成为冲突检测的一个重要手段。算法 1 的核心思想是将肯定不包含解的区间变量滤掉, 以实现在当前的设计中, 不仅能最大限度地发现潜在的冲突, 而且能利用设计者的经验, 引导设计者找到一个满足其设计意愿的解。

4 区间算法实现

实现上述算法的关键一步是式(10), 即如何由当前的区间估计出新的区间范围。这就要求提供区间计算规则。迭代后的区间计算实际上可转化为最优化问题的求解, 即将最大值最小值分别由优化算法求出, 作为估计后的区间。但从整体上看, 并行设计问题与优化问题是不同的, 主要在于一次设计中的工程更改引起的约束传播需要得到的是当前可行的区间范围, 而不是一个固定的解, 这是实现鲁棒设计最重要的条件, 从求解机制上说是优化模型所不具备的。优化问题只能针对某一具体指标进行优化, 每次优化得到的结果是固定的解, 很难描述设计不确定性的影响, 因为此时各个变量值域是随设计过程而变化的。

考虑到工程设计的特点以及计算时间的可行性, 本文并没有采用优化算法作为区间估计方法, 而是采用区间代数的方法进行一致性区间的估计。这样在算法的结构上比较简单, 但要求被处理的解函

数在初始区间上是单调的, 这也是能够满足大多数工程设计需求的。对于少数不单调的解函数, 可将它们划分成单调的区间, 构造多个约束网络。

定义 F 区间上的基本代数运算如下

$$[a, b] + [c, d] = [(a + c), (b + d)]$$

$$[a, b] - [c, d] = [(a - d), (b + c)]$$

$$[a, b] \times [c, d] =$$

$$[m \min((ac), (ad), (bc), (bd)),$$

$$\max((ac), (ad), (bc), (bd))]$$

$$[a, b] \div [c, d] =$$

$$[m \min((a/c), (a/d), (b/c), (b/d)),$$

$$\max((a/c), (a/d), (b/c), (b/d))]$$

式中 m 和 n 的意义分别表示对于运算结果的强制性 F 区间截取。

5 设计实例

飞行器总体布局问题不能简单地认为是将各个部件组装起来的过程, 因为对各个部件的重量, 设计前估计值与实际值可能会有较大的变化, 很可能出现在设计后期无论如何也不能满足重心要求的情况。这时就要考虑配重, 而重量在飞行器设计中是十分关键的指标。随着产品的不断更新换代, 对整体布局的要求也越来越高, 有效地保证当前设计方案的可行性已成为保证开发成功最重要的手段。

考虑重心调整问题, 各个模块分布如图 1 所示, 其中总体组在设计初期首先进行各个部件的位置、质量规划, 而各个部件的实际重量很难与规划时保

表 1 布局约束网络中变量

| 变量名称 | 变量描述 | 变量性质 | 负责组 | 估计上限 | 估计下限 | 求解上限 | 求解下限 |
|----------------------------|--------------|-------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| J (kg · m ²) | 转动惯量的要求 | 目标变量 | 控制装置设计小组 | 709.00 | 705.00 | 709.00 | 705.00 |
| W_0 (kg · m) | 约束网络内部件的质量 | 目标变量 | 总体组 | 169.00 | 169.00 | 169.00 | 169.00 |
| Θ_{\max} (kg) | 质量裕度 | 临时变量 | 总体组 | 8.37 | 8.37 | 8.37 | 8.37 |
| M_{\max} (kg) | 最大的重量值 | 目标变量 | 总体组 | 10.000 | 0.00 | 0.10 | 0.00 |
| M_y (kg) | 模块 y 的质量 | 目标变量 | 模块 y 设计小组 | 35.00 | 29.00 | 30.00 | 29.00 |
| P_d (m) | 模块 d 的质心位置 | 设计变量 | 总体组 | 2.50 | 2.00 | 2.20 | 2.00 |
| P_y (m) | 模块 y 的质心位置 | 不确定变量 | 总体组 | 1.40 | 1.37 | 1.40 | 1.37 |
| M_g (kg) | 模块 g 的质量 | 不确定变量 | 模块 g 设计小组 | 28.00 | 26.00 | 27.00 | 26.00 |
| P_r (m) | 模块 r 的质心位置 | 设计变量 | 总体组 | 55.00 | 54.00 | 55.00 | 54.00 |
| M_r (kg) | 模块 r 的质量 | 不确定变量 | 模块 r 设计小组 | 2.30 | 2.20 | 2.30 | 2.20 |
| P_z (m) | 模块 z 的质心位置 | 设计变量 | 总体组 | 24.00 | 15.00 | 16.00 | 15.00 |
| M_z (kg) | 模块 z 的质量 | 不确定变量 | 模块 z 设计小组 | 4.00 | 3.52 | 3.76 | 3.20 |
| M_d (kg) | 模块 d 的质心质量 | 不确定变量 | 模块 d 设计小组 | 45.00 | 44.00 | 45.00 | 44.00 |

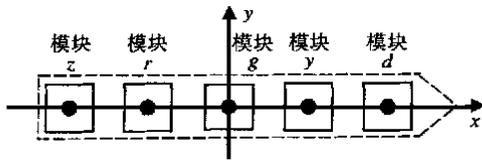


图1 总体布局示意

持一致,为不确定性变量,并由相应的部门对其参数进行监控。这些变量以区间方式表示,各个设计部门不断地对各自部件进行重量估计,若其范围发生变化则提交给约束网络。相应的部件位置由总体组确定,在设计时留有一定的变动余地,也以区间形式表示。设计目的是为了保证其重心在 y 轴上,而建立起来的约束网络如果发生冲突,则表示所监控的布局设计在给定的区间位置上无论如何调整也不能满足所有约束条件,此时布局方案则应做出相应的调整,直至约束网络再次通过一致性检查为止。若所有的变量均可由区间确定为固定值而此时无冲突发生,则此时的设计方案必能满足所有的约束条件。将以上问题抽象成约束网络,其中对变量的描述如表1所示。

表1中的数据只是一次计算得到的结果。随着不确定性参数的逐渐确定,设计参数的区间将变小,直到设计参数完全确定为止。由以上分析可知,布局设计是一个典型的协同设计问题,在约束网络的支持下,可以考虑这些不确定性参数对设计指标的影

响,从而保证设计的一次成功。

6 结 论

本文提出一种基于约束网络的鲁棒设计方法,它能利用约束网络对并行设计中的一类不确定性参数进行有效的描述和处理。提出反映该问题需求的数学模型,设计出一个通用的一致性求解算法框架。还得到了满足该框架的算法都是弧一致的充分条件,并利用区间算法对该框架进行实现。最后以飞行器总体布局的设计问题验证了该方法的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] 陈立周,翁海珊 工程稳健优化设计[J]. 机械设计, 1998, 8(8): 6-9
- [2] E Ronald, E Robert, A Roggatz A methodology for reduction of imprecision in the engineering process[J]. European J of Operation Research, 1995, 100(4): 277-292
- [3] A Kusiak, W Juite Dependency analysis in constraint negotiation. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1995, 25(9): 1301-1313
- [4] F Goualard, F Benhamou, L Granvilliers An extension of the WAM for hybrid interval solvers[J]. J of Functional and Logic Programming, 1999, 6(1): 1-34

第四届全球智能控制与自动化大会(WCICA 02)征文通知

时间地点: 2002年6月10~14日 上海

征文范围: 1 智能控制, 2 神经网络, 3 模糊系统与模糊控制, 4 遗传算法与进化计算, 5 人工智能与专家系统, 6 智能调度与生产计划, 7 学习控制, 8 系统理论与控制理论, 9 建模、辨识与估计, 10 自适应控制, 11 变结构控制, 12 非线性系统与控制, 13 鲁棒控制, 14 优化控制与优化方法, 15 大系统理论与方法, 16 故障诊断, 17 CMS与控制系统, 18 仿真与控制系统CAD, 19 智能信息处理系统, 20 混合系统与DEDS, 21 分布式控制系统, 22 传感与测量, 23 运动控制, 24 智能机器人, 25 电力系统, 26 环境与生物工程, 27 人机系统, 28 智能仪表, 29 智能交通系统, 30 各种应用。

论文要求: 1. 来稿一式三份,中英文均可; 2. 请

在首页注明论文题目、作者姓名、单位、通讯地址(包括电话、传真和Email)、摘要和关键词(3~5个),并注明来稿属“征文范围”的哪一类文稿; 3. 专题分会的建议应包括分会主题、报告者名单(至少5个)及其论文题目,并按上述要求提供论文全文。

论文出版: 被录用论文将由正式出版社出版论文集

截稿日期: 2001年10月31日

联系地址: 200030 上海交通大学自动化系 WCICA 02 秘书处

电 话: (86)-21-62932114

传 真: (86)-21-62932045

E-mail: secretariat@wcica.sjtu.edu.cn

WWW: <http://wcica.sjtu.edu.cn>