基于 HLA 构建液压支架多学科设计优化计算环境

孟晓军[1,2,3]，王国法[2]，王金华[2]，安里千[3]，任怀伟[2]，王建国[2]
（1. 泰山学院 机械与工程学院，山东 泰安 271021；2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部，北京 100013；
3. 中国矿业大学（北京）力学与建筑工程学院，北京 100083）

[摘　要]　为了解决液压支架等重型机械的整体优化问题，开发了基于高层体系架构（HLA）的多学科设计协同优化计算环境。该计算环境封装了相关学科领域的分析优化工具，在单学科优化的基础上寻求整体优化设计；通过构造多学科间一致性约束，实现了最小化学科级设计变量与系统级分配目标值之间差距的目的，实现了学科间的协同优化；基于高层体系架构建立优化模型，将学科间的耦合状态变量映射为相关联邦成员对象类的可发布和订购属性，实现了学科间耦合变量的交互，充分利用学科间的耦合效应，实现了整体优化设计。最后通过某型号液压支架的多学科设计优化过程为例，描述了该计算环境的使用方法并且验证了其有效性。

[关键词]　液压支架；多学科设计优化；高层体系架构；一致性约束
[中图分类号]　TD355.41　　[文献标识码]　A　　[文章编号]　1006-6225（2014）05-0008-05

Constructing Multi-subject Design and Optimized Calculation Environment of Powered Support based on HLA

MENG Xiao-jun[1,2,3], WANG Guo-fa[2], WANG Jin-hua[2], AN Li-qian[3], REN Huai-wei[2], WANG Jian-guo[2]
(1. Mechinery and Engineering School, Taishan Institute, Tai'an 271021, China;
2. Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China;
3. Mechanics & Architecture Engineering School, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve whole optimization problem of heavy machinery such as powered support, multi-subject design collaborative optimization calculation environment based on high-level architecture was developed. This calculation environment encapsulated analysis and optimization implement of related subjects and searched for whole optimization design on the basis of single subject. By constructing consistency constraint of multi-subject, the goal of minimum distance of subject-level variable and system-level distribution value was reached, which realized collaborative optimization of multi-subject. Based on the model, coupled state variables of subjects were reflected as publishable and order attribute of corresponding federal member object classes, interaction of coupled variable between subjects was realized, applying the coupling effect of multi-subject, whole optimization design was realized. Finally, taking the procedure of multi-subject design and optimization for a type of powered support as an example, application method of the calculation environment was introduced and its effectiveness was proved.

Keywords: powered support; multi-subject optimized design; high-level architecture; consistency constraint

多学科设计优化（Multidisciplinary Design Optimization，MDO）作为一种解决复杂系统优化设计的方法，在近 20a 的研究与应用中主要应用在大型飞机[1-2]、运载火箭[3]等航空航天领域，民用机械领域应用较少。煤矿机械等重型机械由于牵涉多学科领域，其设计周期长，耗费钢材多，精度和可靠性要求也越来越高，其设计过程亟需优化。但其设计优化过程往往局限在某单一学科[4-5]，难以达到整体最优效果。

多学科设计优化不是单学科在各自领域优化结果上简单地进行叠加，而是考虑学科间的耦合效应，强调通过充分利用各个学科间的相互作用产生协同效应，从而获得系统的整体最优解[6]。

目前的多学科优化设计计算环境主要有 2 种[7]：一种是基于统一语言的方法[8]，但很少有成熟的商用仿真软件来支持；另一种是基于不同学科仿真软件之间的接口，实现多学科建模，该方法目前有较多的商用仿真软件支撑，应用广泛，但由于各学科仿真软件接口缺少标准性和开放性，扩展困难。高层体系架构（High Level Architecture，

[收稿日期]　2014-04-28　　[DOI]　10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2014.05.003
[基金项目]　山东省优秀中青年科学家科研奖励基金（博士基金）（BS2011ZZ018）；山东省高等学校科技计划项目（J09LG59）
[作者简介]　孟晓军（1972-），男，山东泰安人，煤炭科学研究总院博士后，副教授。
[引用格式]　孟晓军，王国法，王金华，等. 基于 HLA 构建液压支架多学科设计优化计算环境[J]. 煤矿开采，2014，19(5)：8-12，28.

HLA）[9-10] 由于支持对各学科分布式优化仿真模型间的异构组合和互操作，其在协同仿真领域得到了较好的应用。

针对液压支架这一典型煤矿机械的设计过程，利用 HLA 支持异构仿真模型间的组合和互操作的特性，将其引入到多学科设计优化领域。并利用一致性约束机制最小化学科级优化结果与系统级分配目标值之间的差距，构建多学科设计优化计算环境，从而优化整体设计方案，加速其研制过程。

1　单学科优化模型

典型非线性单学科优化的数学模型描述如下：

$$\begin{aligned}&\min f(\boldsymbol{x},\boldsymbol{p})\\&\boldsymbol{x}=[x_1\cdots x_n]^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{p}=[p_1\cdots p_m]^{\mathrm{T}}\\&x_{i,\mathrm{LB}}\leqslant x_i\leqslant x_{i,\mathrm{UB}},\ i=1,2,\cdots,n\\&s.t.\ g(\boldsymbol{x},\boldsymbol{p})<0,\ h(\boldsymbol{x},\boldsymbol{p})=0\end{aligned}\tag{1}$$

式中，$f(\boldsymbol{x},\boldsymbol{p})$ 是目标函数，$\boldsymbol{x}$ 是 n 维设计向量，$\boldsymbol{p}$ 是 m 维保持不变的系统参数向量，$x_{i,\mathrm{LB}}$ 和 $x_{i,\mathrm{UB}}$ 分别是设计变量的取值下限和上限，$g(\boldsymbol{x},\boldsymbol{p})$ 和 $h(\boldsymbol{x},\boldsymbol{p})$ 分别是不等式约束和等式约束。相应的单学科迭代循环示意图如图 1 所示。

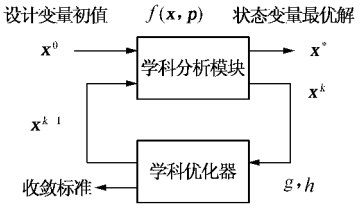


图 1　单学科迭代循环

学科优化器是根据单学科优化数学模型，以学科分析模块的过程结果 $\boldsymbol{x}^k$ 为输入变量，在不等式 $g(\boldsymbol{x},\boldsymbol{p})$ 或等式约束 $h(\boldsymbol{x},\boldsymbol{p})$ 条件下，利用目标函数 $f(\boldsymbol{x},\boldsymbol{p})$ 迭代寻求最优解。

学科分析模块是以设计变量为最初输入，利用本学科领域的分析方法和工具得到学科状态变量最优解 $\boldsymbol{x}^*$ 的过程。此处的分析方法包含解析法、实验方法以及有限元方法等。所谓状态变量是反映该学科性能或者特征的变量，常被应用于目标函数和约束，是设计者进行工程决策的重要信息。例如结构学科的状态变量是极限载荷、应力应变等。

2　基于 HLA 的协同优化计算环境

多学科设计优化强调利用学科间的耦合效应，利用 HLA 可以实现分布式模型间的互操作这一特性，将需交互的变量映射为符合 HLA 标准的联邦成员对象类属性，实现学科之间的相互作用。下面在分析协同优化模型的基础上，阐述如何基于 HLA 构建协同优化计算环境。

2.1　多学科协同优化模型

协同优化方法（Collaborative Optimization，CO）将复杂系统设计问题沿学科领域进行分解，各学科在满足本学科约束的情况下进行优化。系统级优化器利用一致性约束来协调学科级优化结果与系统级设计变量目标值之间的差异，更新系统级设计变量，通过学科级的不断优化和系统级设计变量的不断更新，最终得到满足一致性约束的最优解。

q 个学科优化的系统级一般模型公式为：

$$\begin{aligned}&\min_{j=1,2,\cdots,k} F(f_1(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{y}_{j1},\boldsymbol{p}_1),f_2(\boldsymbol{x}_2,\boldsymbol{y}_{j2},\boldsymbol{p}_2),\cdots f_k(\boldsymbol{x}_k,\boldsymbol{y}_{jk},\boldsymbol{p}_k))\\&\underset{1\leqslant i\leqslant k}{\boldsymbol{x}_i}=[\boldsymbol{x}_1\cdots\boldsymbol{x}_n]^{\mathrm{T}}\\&\underset{1\leqslant i\leqslant k}{\boldsymbol{p}_i}=[\boldsymbol{p}_1\cdots\boldsymbol{p}_m]^{\mathrm{T}}\\&\underset{i,j=1,2,\cdots,k;i\neq j}{\boldsymbol{y}_{ji}}=[y_{1i}\cdots y_{ki}]^{\mathrm{T}}\\&s.t.\ H_i(\boldsymbol{x}_i)=\|\boldsymbol{x}_i^{t+1}-\boldsymbol{x}_i^t\|\leqslant\varepsilon,i=1,2,\cdots q\end{aligned}\tag{2}$$

式中，$F(\ )$ 是 q 个学科总体优化的目标函数，$f(\ )$ 是学科级优化的目标函数，$\boldsymbol{x}_i$ 是 n 维学科级设计变量，在本学科范围内起作用，$\boldsymbol{p}_i$ 是 m 维保持不变的学科级系统参数变量，$\boldsymbol{y}_{ji}$ 表示 j 学科到 i 学科的耦合状态变量，$H(\ )$ 是多学科协同优化一致性约束，$\boldsymbol{x}_i^t$ 是系统级分配并传递到第 i 个子系统的设计变量（包括子系统间耦合状态变量）的目标值，$\boldsymbol{x}_i^{t+1}$ 是利用（2）式生成的新的目标点，其原理是根据第 i 个子系统优化后反馈的改进点，构造一致性约束 $H(\ )$，并通过优化使得原问题的目标函数最小。ε 被称之为松弛因子。是为了提高优化迭代效率，而设置的一个很小的正数，从而将系统级一致性约束等式转化为不等式约束。则相应的第 i 个子系统级优化模型为：

$$\begin{aligned}&\min H_i(\boldsymbol{x}_i)=\|\boldsymbol{x}_i^k-\boldsymbol{x}_i^t\|\\&s.t.\\&g_i(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{y}_{ji},\boldsymbol{p}_i)<0\\&h_i(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{y}_{ji},\boldsymbol{p}_i)=0\end{aligned}\tag{3}$$

式中，$g_i(\ )$ 和 $h_i(\ )$ 分别是本学科需满足的不等式约束和等式约束。$\boldsymbol{x}_i^k$ 是本学科优化后的设计变量。子系统优化模型首先在满足本学科自身约束条件的基础上，实现最小化学科级优化结果与系统级分配目标值之间差距的目的。

相应地，以涉及 2 个学科为例的优化模型示意图如图 2 所示。其中，上面部分是系统级优化模型，下面部分是 2 个学科级优化模型。

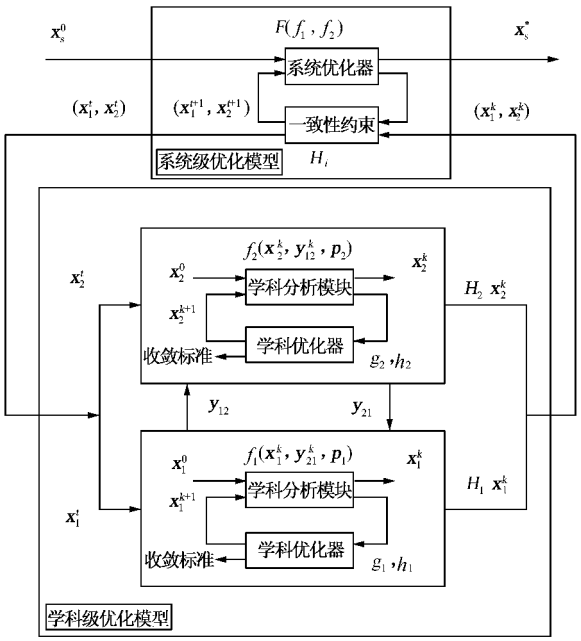


图 2　多学科优化模型

该模型用 t 表示系统级迭代次数，用 k 表示学科级迭代次数。在迭代优化过程中，先由系统级优化器针对学科级设计向量提出系统级设计目标值 x_i^t，其初值是 x_i^0；然后，各分量参加各自学科的优化迭代，根据本学科的优化条件得到本学科的优化结果 x_i^k；再将各学科该次的优化结果 x_i^k 输入到系统级优化模型中；最后，根据学科间一致性约束思想，系统级根据各学科反馈的改进点，构造一致性约束 $H()$，并通过优化生成新的目标值，再分别输入到学科级优化模型中，进行下一步的优化迭代循环。最终得到系统级优化结果 x_s^*。

2.2　基于 HLA 实现协同优化的联邦设计

高层体系架构是一种分布式体系架构，它使不同领域仿真模型的可重用性、可伸缩性、实时性和协同性得到提高的同时，实现了模型间的互操作。

根据需要，首先将不同学科领域商用仿真软件开发的模型划分成不同的联邦成员，然后针对耦合状态变量，根据 RTI（Run Time Infrastructure，运行支撑环境）接口规范开发需发布/订购的对象类属性。某个联邦成员发送一个交互、登记一个对象类的新实例并更新它的属性，而其他成员则根据需求订购并接收交互、发现新的对象实例并反射一个对象实例的属性新值，从而实现不同学科领域间耦合状态变量的交互。

针对多学科协同优化模型，根据 HLA 规则（Rules）、对象模型模板（Object Model Template，OMT）和接口规范（Interface Specification）设计了 2 类共 4 种联邦。

一类是协同设计优化计算联邦成员，包括 2 种联邦成员：

（1）系统级优化联邦成员　负责实现系统级优化算法，计算系统级目标函数，最终获得系统最优解 x_s^*；并且在迭代过程中不断给出系统级目标值，从而进行学科间一致性约束运算。将系统级目标值 x_i^t 设计为系统级联邦成员发布的相应对象类属性；同时，订购学科级联邦成员对象类发布的本学科优化结果 x_i^k。

（2）学科级优化联邦成员　负责实现学科级优化函数，并在迭代过程中不断得出学科级优化结果 x_i^k。将本学科的优化结果 x_i^k，以及需本学科优化计算出的耦合状态变量设计为本学科联邦成员发布的相应对象类属性；将本学科优化计算所需的由其他学科计算出的耦合状态变量设计为本联邦成员订购的对象类属性。例如，y_{ji} 表示 j 学科到 i 学科的耦合状态变量，在 RTI 环境下表现为第 j 个学科封装成的联邦成员发布的相应对象类属性，同样也是第 i 个学科封装成的联邦成员订购的该对象类属性。另外，订购系统级联邦成员对象类发布的系统级目标值 x_i^t 对应的对象类属性。

另一类属于优化仿真管理成员，也包括 2 种联邦成员：

（1）优化过程监控成员　负责监控整个优化计算过程的状态。为了提高整个系统的效率，减少网络数据冗余，优化过程监控成员仅订购系统级设计变量目标值 x_i^t，对系统优化过程进行监控，及时终止不收敛迭代过程。

（2）优化数据收集成员　负责收集优化计算过程中产生的数据，供事后分析使用。主要包括系统级设计变量 x_i^t、学科级优化结果 x_i^k。

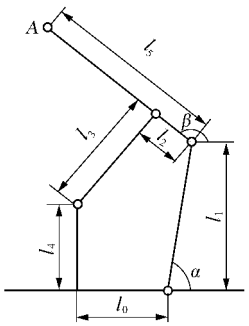
3　多学科设计优化实例

以某掩护式液压支架为例说明如何使用基于 HLA 构建多学科协同优化计算环境。

液压支架掩护梁辅助顶梁一起承担煤层压力，是液压支架中主要受力部件。另外，掩护梁又与底座、前后连杆形成四连杆机构，控制顶梁前端的运动轨迹。对掩护梁一般需进行结构优化设计，确定其长度及截面尺寸，涉及结构力学学科；而四连杆机构的优化目标是使支架在工作时，端点轨迹摆动较小或者单调指向煤壁，涉及运动学学科。而且掩护梁的长度以及铰接点的位置影响到 2 个子系统的优化，可以设为耦合状态变量。所以，该实例是典型的涉及 2 个学科的多学科设计优化问题。

3.1　四连杆子系统运动学优化

如图 3 所示，液压支架顶梁端点（图示未画出顶梁）运动轨迹的最大宽度应不大于 70mm。为了简化模型，本实例转化为控制顶梁尾端与掩护梁前端铰接点的运动轨迹最大宽度，即图示 A 点的运动轨迹宽度。



四连杆机构几何参数示意

为此优化图示四连杆机构参数，l_0，l_1，l_2，l_3，l_4，l_5 为待优化的 6 个四连杆长度尺寸。其中，l_0 是前、后连杆与底座铰接点之间的水平间距，l_1 是后连杆长度，l_2 确定前连杆与掩护梁铰接点的位置，l_3 是前连杆的长度，l_4 确定前连杆与底座铰接点的高度，l_5 是掩护梁的总体长度。

简化后本学科“分析模块”的目标函数公式为：

$$\begin{aligned}&\min e(\boldsymbol{l},\boldsymbol{p},\boldsymbol{\theta})\\&\boldsymbol{l}=[\boldsymbol{l}_{\text{local}},\boldsymbol{l}_{\text{couple}}]=[l_0,l_1,l_3,l_4,l_2,l_5]^{\mathrm{T}}\\&\boldsymbol{p}=[h_{\min},h_{\max}]^{\mathrm{T}}\\&\boldsymbol{l}_{\text{local}}=[l_0,l_1,l_3,l_4]\\&\boldsymbol{l}_{\text{couple}}=[l_2,l_5]\\&\boldsymbol{\theta}=[\alpha,\beta]\end{aligned}\tag{4}$$

本学科“学科优化器”的目标函数，即该子系统优化目标函数可以设为：

$$\begin{aligned}\min H_1(\boldsymbol{l}_{\text{local}},\boldsymbol{l}_{\text{couple}})=&\|\boldsymbol{l}^k_{\text{local}}-\boldsymbol{l}^t_{\text{local}}\|+\\&\|\boldsymbol{l}^k_{\text{couple}}-\boldsymbol{l}^t_{\text{couple}}\|\end{aligned}\tag{5}$$

“学科分析模块”和“学科优化器”的约束条件都应该满足本学科的约束要求，即：

$$\begin{aligned}&s.\ t.\\&\alpha_{\min}\leqslant\alpha\leqslant\alpha_{\max}\\&\beta_{\min}\leqslant\beta\leqslant\beta_{\max}\end{aligned}\tag{6}$$

以上目标函数和约束条件中，$e(\,)$ 是 A 点运动轨迹的宽度，p 是由最低采高高度 $h_{\min}$ 和最高采高高度 $h_{\max}$ 构成的系统参数向量；$\boldsymbol{l}^k_{\text{local}}$ 和 $\boldsymbol{l}^k_{\text{couple}}$ 分别是本学科级设计变量和耦合状态变量在本学科内的优化结果，$\boldsymbol{l}^t_{\text{local}}$ 和 $\boldsymbol{l}^t_{\text{couple}}$ 则是相应的系统级分配的目标值；θ 是四连杆的角度约束。

采用 ADAMS/View 提供的参数化建模功能，建立液压支架四连杆机构运动学模型。利用其优化分析功能对连杆机构进行优化。在设定的变化范围内，通过优化分析程序自动地调整设计变量，求取最佳设计。并利用学科优化器，根据公式（5）的描述实现多学科间一致性约束。

3.2　掩护梁结构参数优化

液压支架掩护梁采用箱型截面，具有良好的抗弯抗扭能力。一般的优化目标都是假定掩护梁长度确定的前提下，优化其截面尺寸，减小梁体横截面的面积，从而降低掩护梁的重量。本实例考虑四连杆参数的耦合作用来优化其截面尺寸。

以三腔室箱型截面为例，如图 4 所示，借助有限元分析软件 Ansys Workbench 中的 DesignXplorer 多目标优化模块对其截面参数进行优化。

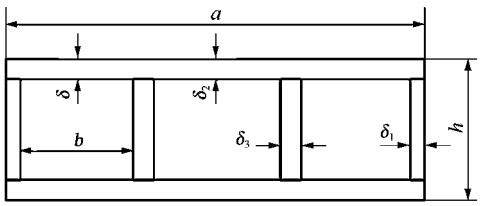


图 4　掩护梁截面参数示意

图中，b 为左、右腔室宽度，δ 为左、右腔室上下盖板厚度，δ_1 为左、右两边竖板厚度，δ_2 为中间腔室上下盖板厚度，δ_3 为中间筋板厚度，h 为截面高度，a 为截面宽度。

根据文献［11］的分析，其截面尺寸优化，即本学科“分析模块”的目标函数可表示为：

$$\begin{cases}\min\sigma_{\text{eq}V_{\max}}=\sigma(\boldsymbol{v},\boldsymbol{l}_{\text{couple}})\\\min S(\boldsymbol{v},\boldsymbol{l}_{\text{couple}})\end{cases}(v=b,\delta,\delta_1,\delta_2,\delta_3,h)\tag{7}$$

本学科“学科优化器”的目标函数，即该子系统优化目标函数可表示为：

$$\min H_2(\boldsymbol{v})=\|\boldsymbol{v}^k-\boldsymbol{v}^t\|\tag{8}$$

本学科“分析模块”和“学科优化器”的约束条件同样应该满足本学科的约束要求，即：

$$\begin{aligned}&s.\ t.\\&0<b<a/2\\&\delta\geqslant\delta_{\min}(h,[\sigma])\\&\delta_1\geqslant\delta_{1\min}(h,\delta,[\tau])\\&0<\delta_2\leqslant\delta\\&0<\delta_3\leqslant\delta_1\\&0<h<a\end{aligned}\tag{9}$$

式中，$\sigma_{\text{eq}_{V\max}}$ 箱型结构的最大等效应力，$S(v)$ 为箱型结构的体积，$\boldsymbol{l}_{\text{couple}}$ 是耦合状态变量在四连杆子

系统中的优化结果。约束条件的物理意义分别为：左右腔室的宽度 b 小于整个箱体宽度的一半；截面高度 h 小于箱体宽度；左右腔室上下盖板厚度 $\delta \geqslant$ 仅由上下板元承载弯曲正应力而达到材料抗拉屈服极限时求得的最小值；左右两边竖板厚度 $\delta_1 \geqslant$ 仅由4 块竖直板元承载弯曲剪应力而达到材料剪切屈服极限时求得的最小值；δ_2，δ_3 应分别$\leqslant\delta$，δ_1。$\boldsymbol{v}^t$ 系统级分配并传递到该子系统的设计变量目标值，$\boldsymbol{v}^k$ 是本学科级设计变量在本学科内的优化结果。

3.3　系统级优化

系统级总体优化设计的目标是：在满足支撑高度和顶梁前端移动幅度在规定范围内的前提下，优化掩护梁结构及截面尺寸参数，降低各构件的重量，实现经济设计。

如前所述，掩护梁的长度以及铰接点的位置会影响到其截面尺寸的优化取值。所以，掩护梁的长度 l_5 以及确定前连杆与掩护梁铰接点位置的尺寸 l_2 设计为 2 个子系统优化的耦合状态变量。系统级优化目标函数和一致性约束如下：

$$\begin{aligned} &\min F\ (e,\ \sigma_{eqV_{\max}} S) \\ &s.\ t. \\ &H_1\ (\mathrm{l}) \ = \| \boldsymbol{l}^k - \boldsymbol{l}^t \| \leqslant \varepsilon \\ &H_2\ (\mathbf{v}) \ = \| \mathbf{v}^k - \boldsymbol{v}^t \| \leqslant \varepsilon \end{aligned} \tag{10}$$

其中，$\boldsymbol{l} = [\boldsymbol{l}_{local}, \boldsymbol{l}_{couple}]$。

3.4　基于 HLA 的联邦设计

为了节约篇幅，本文省略了优化仿真管理成员，仅描述了协同设计优化计算联邦成员，包括 1 个系统级联邦成员 FedSystem，2 个子系统级联邦成员 Fed4BarL－Adams 和 FedShieldB－Ansys，前者封装了 Adams 软件构建的四连杆优化模型，后者封装了 Ansys 软件构建的掩护梁参数优化模型。其原理如图 5 所示。

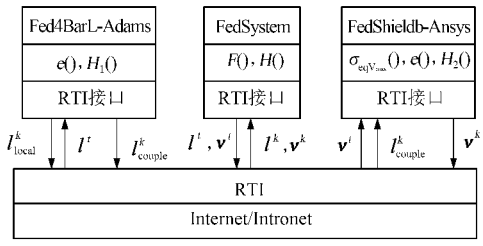


图 5　基于 HLA 的联邦设计

其中，向量 $\boldsymbol{l}_{couple} = [l_2, l_5]$ 是 2 个子系统优化模型的耦合状态变量，可以视作前者的输出和后者的输入。在 RTI 环境下表现为：四连杆优化模型对应的联邦成员对象类可发布属性，掩护梁优化模型对应的联邦成员对象类订购属性。$\boldsymbol{l}^k_{\mathrm{local}}$，$\boldsymbol{l}^k_{\mathrm{couple}}$ 和 $\boldsymbol{v}^k$ 分别作为四连杆优化模型和掩护梁优化模型每次的迭代优化结果，设计成对应联邦成员对象类可发布属性，并且与系统级联邦成员 FedSystem 的订购属性相映射。$\boldsymbol{l}^t_{\mathrm{local}}$，$\boldsymbol{l}^t_{\mathrm{couple}}$ 和 $\boldsymbol{v}^t$ 分别是系统级分配并传递到子系统的目标值，是系统级联邦成员 FedSystem 的可发布属性，与 2 个子系统联邦成员的订购属性相映射。

3.5　协同优化结果

本实例最低采高高度 $h_{\min} = 1200\mathrm{mm}$，最高采高高度 $h_{\max} = 2600\mathrm{mm}$。考虑有利于矸石下滑，而且防止支架后部冒落岩石卡住后连杆等因素，本实例各连杆角度约束取值如下：$\alpha_{\min} = 25°$，$\alpha_{\max} = 85°$，$\beta_{\min} = 118°$，$\beta_{\max} = 155°$ 各子系统一致性约束 ε 取值 10^{-4}。经过 14 次迭代循环，优化过程停止，表 1 和表 2 分别给出了 2 个子系统考虑耦合关系后的优化结果。图 6 描述了子系统一致性约束的迭代曲线，随着系统和子系统之间的协调，目标函数得到优化，同时一致性约束也逐渐得到满足。

表 1　四连杆参数优化结果

设计变量	l_0/mm	l_1/mm	l_3/mm	l_4/mm	l_2/mm	l_5/mm
原始参数	420	983	995	360	295	1340
优化结果	475	991	1105	270	265	1150

表 2　掩护梁截面尺寸优化结果

设计变量	b/mm	δ/mm	δ_1/mm	δ_2/mm	δ_3/mm	h/mm
原始参数	430	30	25	30	25	430
优化结果	390	32	26	29	24	415

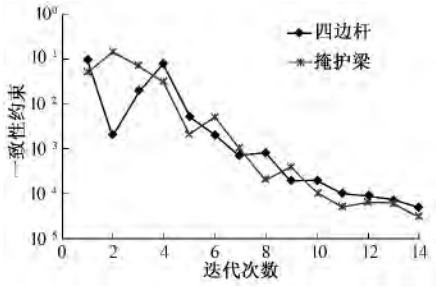


图 6　一致性约束迭代曲线

4　结论

利用 HLA 可以实现不同学科分布式优化仿真模型间的互操作这一特性，将耦合状态变量设计为相应联邦成员对象类发布和订购属性，构建了多学科协同设计优化计算环境，并以某型号液压支架为例介绍了多学科协同设计优化计算环境的使用方法。基于 HLA 实现了涉及结构力学和运动学 2 个

（下转 28 页）

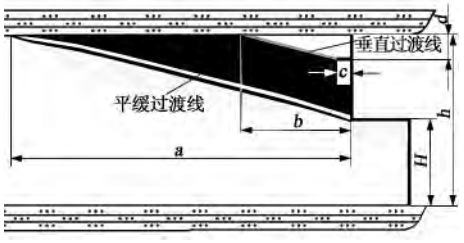


图 4　综采工作面端头顶煤回收示意

$$S_1 = 1/2 \times a \times (h - H) \quad (1)$$

式中，S_1 为平缓过渡段所遗留顶煤截面积，m^2；a 为大采高综采工作面两端头平缓过渡段距离，m（一般取 30m）；h 为综采工作面采高，m；H 为综采工作面两巷高度，m。

$$S_2 = 1/2 \times d \times (b - c) + cd \quad (2)$$

式中，S_2 为垂直过渡段所遗留顶煤截面积，m^2；b 为综采工作面两端头垂直过渡段距离，m（一般取 10m）；c 为综采工作面支架宽度，m；d 为垂直过渡工艺在煤机行走到过渡架前所降的采高，m（6m 以上采高一般取 0.5～0.8m）。

$$Q = (S_1 - S_2) \times L \times \gamma \quad (3)$$

式中，S_1 为平缓过渡段所遗留顶煤截面积，m^2；S_2 为垂直过渡段所遗留顶煤截面积，m^2；L 为综采工作面推进长度，m；γ 为密度，t/m^3。

根据上述公式计算补连塔煤矿 22306 大采高工作面长度 311.8m，推进长度 4614.3m，采高 7m，巷道高度 4.5m，密度 $1.29t/m^3$。两端头使用垂直过渡工艺比使用平缓过渡工艺多回收煤炭资源约 417kt。

5　结束语

大采高综采工作面两端头割煤工艺的优化在提高综采工作面煤炭资源采出率的同时，也降低了工作面采空区遗煤，大大降低了采空区煤炭自燃的发生概率，不仅给煤炭企业创造经济效益，而且也带来了安全效益。

在应用大采高综采工作面两端头割煤新工艺时，要结合过渡支架性能综合考虑，控制好过渡台阶的高度，否则可能造成工作面咬架、倒架，甚至是顶板冒顶事故。

[参考文献]

[1] 王金华. 我国大采高综采技术与装备的现状及发展趋势[J]. 煤炭科学技术，2006，34（1）：66－68.
[2] 闫丰坝. 提高大采高综采工作面端头三角顶煤采出率[J]. 内蒙古煤炭经济，2013（2）：112－113.
[3] 代贵生. 采高 7m 的大采高工作面应用技术[J]. 山西煤炭，2012（8）：50－55.
[4] 刘　涛. 厚煤层大采高综采技术现状[J]. 煤炭工程，2002（2）：88－90.
[5] 郭宝华. 浅谈我国大采高综采技术[J]. 中国矿业，2003（10）：33－35.
[6] 程　骏，张严敬，荣和芳，等，7m 大采高综采液压支架设计及配套[J]. 煤矿开采，2013，18（1）：25－27.
[7] 南清安，顾大钊. 7.0m 超大采高工作面配套设备关键技术[J]. 神华科技，2011（5）.

[责任编辑：周景林]

（上接 12 页）

学科优化模型间耦合变量的交互，并且根据系统级设计向量期望值构建一致性约束，从而实现了系统整体最优解。

[参考文献]

[1] Ghoman S S，Kapania R K，Chen P C，et al. Multifidelity，multistrategy，and multidisciplinary design optimization environment[J]. Journal of Aircraft，2012，49（5）：1255－1270.
[2] Diez M，Iemma U. Multidisciplinary conceptual design optimization of aircraft using a sound－matching-based objective function[J]. Engineering Optimization，2012，44（5）：591－612.
[3] Balesdent M，Berend N，Depince P. Stagewise multidisciplinary design optimization formulation for optimal design of expendable launch vehicles[J]. Journal of Spacecraft & Rockets，2012，49（4）：720－730.
[4] 王国法，刘俊峰，任怀伟. 大采高放顶煤液压支架围岩耦合三维动态优化设计[J]. 煤炭学报，2011，36（1）.
[5] 张银亮，刘俊峰，庞义辉，等. 液压支架护帮机构防片帮效果分析[J]. 煤炭学报，2011，36（4）：691－695.
[6] Yao W，Chen X，Ouyang Q，et al. A surrogate based multistage－multilevel optimization procedure for multidisciplinary design optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization，2012，45（4）：559－574.
[7] 吴宝贵. 基于仿真分析的复杂机械产品多学科设计优化方法研究[D]. 大连：大连理工大学，2008.
[8] 熊光愣，郭　斌，陈晓波，等. 协同仿真与虚拟样机[M]. 北京：清华大学出版社，2004.
[9] Eyisi E，Bai J，RileyD，et al. NCSWT：An integrated modeling and simulation tool for networked[J]. Simulation Modelling Practice and Theory，2012，27（9）：90－111.
[10] Pedrielli G，Sacco M，Terkaj W，et al. An HLA－based distributed simulation for networked manufacturing systems analysis[J]. Journal of Simulation，2012，6（4）：237－252.
[11] 任怀伟，王国法，范　迅. 基于有限元分析的支架箱型截面几何参数优化[J]. 煤炭学报，2010，35（4）：680－685.

[责任编辑：王兴库]