基于遗传算法的复杂产品系统项目多目标优化

——以核电站建设项目为例

陈甲华,吴建时①,刘　兵②
(南华大学 核能经济与管理研究中心,湖南 衡阳 421001)

[摘　要]　复杂产品系统项目的目标通常是由多个子系统组成的。这些子系统具相对独立性并具各自的特定功能和运行目标,若片面地考虑其中的某一目标则会导致各子系统之间协调程度降低而产生负效应。文章以核电站建设项目为例,从进度、成本、质量、资源四个方面构建了复杂产品系统协同生产的目标体系;采用模糊决策分析法确定各目标在协调度模型中的优先度;构建了复杂产品系统的进度、成本、质量、资源功效函数和项目目标的协调度模型;提出了基于遗传算法的复杂产品系统项目目标协调度求解方案;并运用该方法对某核电站建设项目进行了实例分析。

[关键词]　复杂产品系统;　多目标优化;　遗传算法;　核电站
[中图分类号]　F407.23　[文献标识码]　A　　[文章编号]　1673－0755(2014)05－0001－06

复杂产品系统项目的多目标体系可以看成一个总系统,该系统又由进度子系统、成本子系统、质量子系统和资源控制子系统等组成。这些子系统具有相对独立性,并具有各自的特定功能和运行目标[1,2]。这些子系统之间是相互作用、相互制约的耦合关系,如果片面的考虑其中的某一目标必将损害另一些目标,导致各子系统之间协调程度降低而产生负效应,降低系统的整体协调度和有序度水平。因此,目标系统协调度的提升是通过多目标优化来实现的。

一　复杂产品系统项目的目标体系

复杂产品系统项目通常以多企业合作为主要管理形式,其项目管理主要采用目标管理方法,因此,复杂产品系统具有明确的目标体系,并且是项目管理过程中的一条主线[3,4]。复杂产品系统项目的目标体系实质上是复杂产品系统所要达到的最终状态的描述。复杂产品系统项目管理的目标有很多,如成本、进度、质量、资源、环境、安全、各方满意度等,它们之间存在协同关系。鉴于环境、安全、各方满意度为不可妥协的目标,本文主要从生产的角度,对进度、成本、质量和资源四个主要控制目标进行研究。图 1 是以核电站建设项目为例的复杂产品系统项目的多层次目标体系[5,6]。

(一)进度目标。进度目标包括建设周期、投资回收期、更新改造或维修周期等。若从全寿命周期来讲,还要考虑系统的设计寿命和服役寿命等因素。

(二)成本目标。成本目标应综合考虑复杂产品系统的全寿命期的相关成本和收益,如建设总投资、运营成本、维护成本等。

(三)质量目标。质量目标追求工程质量、最终项目的功能、产品或服务的质量等各项指标的统一性,着眼于工程技术系统的整体功能、技术标准、安全性等。

二　复杂产品系统项目目标的优先度

本文采用模糊决策分析法来确定各目标在协调度模型中的优先度。

(一)确定目标优先度的基本过程

运用模糊决策分析法确定多目标优先度的步骤如下[7]:

1、对分析的问题构建层次框架,建立单元系统模型;

2、将每个层次的诸因素相对于目标进行两两比较,判断其重要性和优越性,从而确定反映决策目标重要性的权重和反映决策目标优越性的相对隶属度

[收稿日期]　2014－07－18
[基金项目]　湖南省自然科学基金项目“复杂产品系统技术引进与开发的协同机理及实证研究”资助(编号:13JJ6054);湖南省社会科学基金项目“湖南培育与发展战略性新兴产业技术创新问题与对策研究”资助(编号:12YBA269)
[作者简介]　陈甲华(1978－),男,河北东光人,南华大学核能经济与管理研究中心讲师,博士研究生。
①浙江省瑞安市上望街道望东社区干部。②南华大学副研究员。

向量;

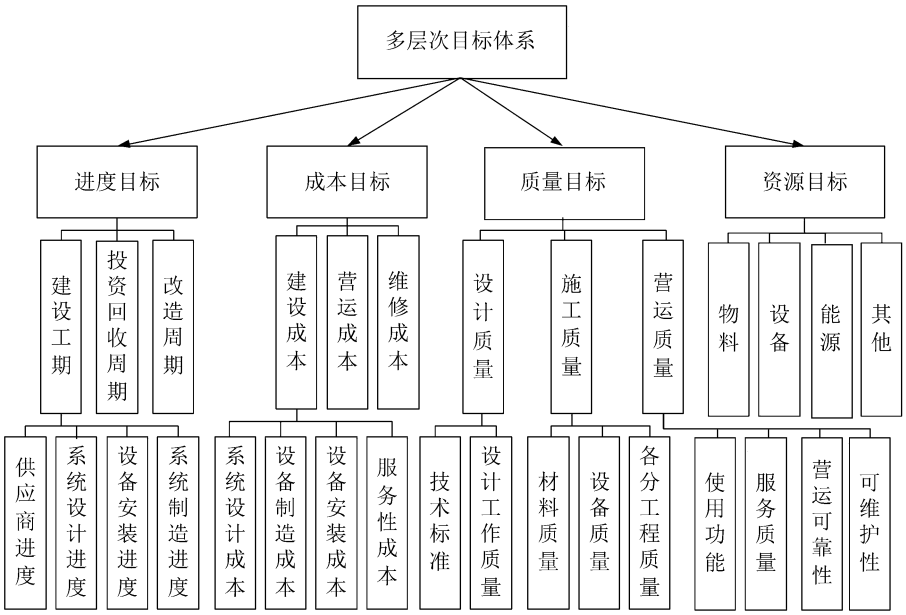

图 1 核电站建设项目的目标体系

3、运用模糊优选模型求出决策集的相对优属度,即目标的优先度。目标优先度的确定作为一个系统,在系统模型中由多层组成。计算从最低层开始。首先,逐步计算出每个基本单元系统的相对隶属度。然后,将得到的第一层系统的输出作为第二层系统的输入,计算第二层系统的相对隶属度。如此依次从低层向高层逐层递进,直到最高层。最终输出即为决策的优先度。

(二)系统目标的相对隶属度的确定

相对隶属度的确定其实就是对决策目标优越性的综合评价。在定性系统中,决策集 $D=(d_j)_n(j=1,2,...,n)$,对系统中所支配它的因素集 $C=(c_i)_m(i=1,2,...,m)$ 中的诸因素来说,相对隶属度向量 $ir=(ir_1,ir_2,...,ir_n)$ 的确定包含决策集的诸因素优越性的定性排序和定量计算。求解过程需要对单元系统中诸因素逐个进行。

对于每个因素 C_i,把决策集的决策 d_k 与 d_1 进行优越性的两两比较。表示优越性的排序标度 ie_{k1} 在 $\{0,0.5,1\}$ 中取值。

若 d_k 比 d_1 优越,取 $ie_{k1}=1,ie_{1k}=0$;

若 d_1 比 d_k 优越,取 $ie_{k1}=0,ie_{1k}=1$;

若 d_k 与 d_1 同样优越,取 $ie_{k1}=ie_{1k}=0.5$。

则决策集的优越性两两比较矩阵为

$$iE=\begin{bmatrix} ie_{11} & ie_{12}\cdots ie_{1n} \\ ie_{21} & ie_{22}\cdots ie_{2n} \\ \vdots & \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ ie_{n1} & ie_{n2} \quad \cdots ie_{nn} \end{bmatrix}$$

矩阵 iE 需要进行排序校验,以确定其能满足优越性定性排序传递性,即以优越性排序的一致性标度矩阵 iE 来实现决策 d_j 关于 c_i 因素的定性排序。

为了在两两比较中给出定量标度,需要建立语气算子和定量标度的对应关系。在“同样”和“无可比拟”之间,加入 9 个语气算子,与 2 个边界语气算子构成了 11 个程度逐级加强的语气算子。同理,在定量标度 0.5 和 1 之间,加入 9 个标度值,如图 2 所示。

定量标度		0.525	0.575	0.625	0.675	0.725	0.775	0.825	0.875	0.925	0.975
	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
	同样	稍微	略为	较为	明显	显著	十分	非常	极其	极端	无可比拟
相对隶属度	1.000	0.818	0.667	0.538	0.429	0.333	0.25	0.176	0.111	0.053	0
		0.905	0.739	0.600	0.481	0.379	0.290	0.212	0.143	0.081	0.026

语气算子

图 2 语气算子、定量标度与相对隶属度对应关系

首先用语气算子确定定量标度,然后得出决策集因素的相对隶属度向量 $ir = i(r_1, r_2, ..., r_n)$,最终得到相对隶属度矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$。

(三)系统目标权重的确定

权重的确定其实就是对目标重要性进行综合评价。目标重要性的评价包括决策集因素重要性的定性排序和定量计算。

首先把决策集中的诸因素根据重要性进行两两比较,表示重要性的排序标度在 {0,0.5,1} 中取值,得到决策集重要性的两两比较矩阵。然后根据图 2 给出的语气算子、定量标度和相对隶属度的关系,得出因素集对于重要性的相对隶属度向量 w_i',归一化处理后,得出因素集的权重向量

$$w_i = (w_1, w_2, \cdots, w_n), (\sum_{i=1}^{n} w_i = 1)$$

(四)系统目标优先度的确定

由决策因素的相对隶属度矩阵 $R = (ir_{ij})_{m \times n}$ 和权重向量 w_i,运用模糊优选模型,计算求出决策的相对优属度 u_j,即得到目标的优先度。

三　复杂产品系统项目的多目标优化模型

为研究复杂产品系统管理的多目标协同关系,本文引入功效系数和协调度概念,根据复杂产品系统各目标子系统的特点,建立其相应的功效系数,然后构造复杂产品系统目标系统的协调度模型[8,9]。

(一)进度功效系数

设正常进度为 T_n,视为系统稳定临界点上限,即 $T_n = maxT_k$。项目进度子系统优化后得到一系列参数,将其最小值作为系统稳定临界点下限 $optT_n = minT_k$。根据系统协调度设计,进度指标具负功效,其对系统有序度的功效系数模型为:

$$U_T = \frac{maxT_k - T_k}{maxT_k - minT_k} = \frac{T_n - T_k}{T_n - minT_k}$$

$s.t.\ U_T \in [0,1]$

T_n—项目正常进度

T_k—项目第 k 步迭代计算

$T_k \in [minT_k, maxT_k]$

当 $T_k = maxT_k = T_n$ 时,$T_n = 0$。此时,保持原计划进度,进度控制子系统对复杂产品系统多目标优化的贡献为 0;

当 $T_k = minT_k$,即优化进度等于优化后的最短极限进度时,$U_T = 1$。此时,进度控制子系统单目标达到最优,对复杂产品系统多目标优化的贡献为 1。

(二)成本功效系数

记成本子系统的稳定临界点上限为 $maxC_k$,通过复杂产品系统成本子系统优化后得到一系列参数。将其最小值作为系统稳定临界点的下限,记作 $optC_k = minC_k$。根据系统协调度设计,成本指标也具负功效。则其对系统有序度的功效为:

$$U_c = \frac{max\ C_k - C_k}{max\ C_k - min\ C_k}$$

s. t. $U_c \in [0,1]$

$$C_k = \sum_{1}^{m} [c_{nij} + \beta(t_{nij} - t_{ij})] + \alpha_1(T_{pla} - T_k) + \alpha_2 T_k$$

$t_{cij} \leqslant t_{ij} \leqslant t_{nij}$

C_k—第 k 迭代步骤的项目成本

c_{nij}— ij 工序正常持续的时间下的直接成本

β_{nij}— ij 工序持续的时间压缩时的成本增加率

t_{nij}— ij 工序正常持续的时间

t_{ij}— ij 工序的当前持续的时间

t_{cij}— ij 工序最短持续的时间

α_1—奖罚系数

α_2—间接费用系数

当 $C_k = maxC_k$ 时,$U_C = 0$。此时成本子系统对系统多目标优化贡献为 0;

当 $U_k = minC_k$,即成本为优化后的最小成本时,$U_C = 1$。此时,成本子系统单目标达最优,对系统多目标优化贡献为 1。

(三)质量功效系数

假设单项工作的实际质量与实际持续时间呈正比。项目正常进度对应的质量 Q_n,视为质量子系统稳定临界点的上限,即 $Q_n = maxQ_k$。通过复杂产品系统进度子系统优化后得到一系列参数。将进度最小值 T_k 所对应的质量参数值作为质量子系统稳定临界点的下限 $minQ_k$。根据系统协调度的设计,项目质量指标具正功效。则质量子系统对系统有序度的功效为:

$$U_Q = \frac{Q_k - minQ_k}{maxQ_k - minQ_k} = \frac{Qk - minQ_k}{Q_n - minQ_k}$$

s. t. $U_Q \in [0,1]$

$$Q_k = \frac{1}{m}\sum_{1}^{m} q_{ij} = \frac{1}{m}\sum_{1}^{m}[1 - r_{ij}(t_{nij} - t_{ij})]$$

$$r_{ij} = \frac{1 - q_{cij}}{t_{nij} - t_{ij}}$$

Q_k—第 k 迭代步骤的质量

r_{ij}— ij 工序赶工时质量降低的变化率

q_{ij}— ij 工序的质量

q_{cij}— ij 工序最短正常持续时间的质量

m —工序数

t_{nij}— ij 工序正常持续时间

t_{ij}— ij 工序的当前持续时间

t_{cij}— ij 工序的最短持续时间

当 $Q_k = minQ_k$时,$UC = 0$。此时,质量控制子系统对项目的多目标优化的贡献为0;

当 $Q_k = maxQ_k$,$U_C = 1$。此时,质量控制子系统单目标达到最优,对项目的多目标优化贡献为1。

(四)资源功效系数

记工程正常工期对应的资源均衡方差为 σ_n^2,视为系统稳定临界点的上限,即 $\sigma_n^2 = max\sigma_k^2$。通过复杂产品系统资源子系统进行优化后得到一系列参数,将其最小值作为资源子系统稳定临界点的下限值 $min\sigma_k^2$。根据系统协调度的设计,工程资源均衡约束指标 σ_k^2具负功效。则资源子系统对系统有序度的功效为:

$$U_{\sigma^2} = \frac{max\sigma_k^2 - \sigma_k^2}{max\sigma_k^2 - min\sigma_k^2} = \frac{\sigma_n^2 - \sigma_k^2}{\sigma_n^2 - min\sigma_k^2}$$

$$s.t.\ U_{\sigma^2} \epsilon [0,1]$$

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{T_k}\sum_1^{T_k} R_t^2 - R_m^2$$

R_t^2 — t 时刻所需资源总和的平方值

R_m^2 —单位时刻所需平均资源的平方值

(五)复杂产品系统项目目标的协调度模型

复杂产品系统目标系统的协调度大小与进度、成本、质量和资源子系统的功效系数密切相关,高协调度和有序度建立在这些目标子系统有效协同的基础上。设 Z 为项目目标系统的协调度函数,则有如下的多目标优化模型:

$$max\ Z = w_T U_T + w_Q U_Q + w_c U_c + w_{\sigma^2} U_{\sigma^2}$$

$$\text{s.t.}\ U_T = \frac{maxT_k - T_k}{maxT_k - minT_k} = \frac{T_n - T_k}{T_n - minT_k}$$

$$U_Q = \frac{Q_k - minQ_k}{maxQ_k - minQ_k} = \frac{Q_n - Q_k}{Q_n - minQ_k}$$

$$U_c = \frac{maxC_k - C_k}{maxC_k - minC_k}$$

$$U_{\sigma^2} = \frac{max\sigma_k^2 - \sigma_k^2}{max\sigma_k^2 - min\sigma_k^2} = \frac{\sigma_n^2 - \sigma_k^2}{\sigma_n^2 - min\sigma_k^2}$$

$$Q_k = \frac{1}{m}\sum_1^m q_{ij} = \frac{1}{m}\sum_1^m \left[1 - r_{ij}(t_{nij} - t\ ij)\right]$$

$$C_k = \sum_1^m \left[c_{nij} + \beta(t_{nij} - t_{ij})\right] + \alpha_1(T_{pla} - T_k) + \alpha_2 T_k$$

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{T_k}\sum_1^{T_k} R_t^2 - R_m^2$$

$$r_{ij} = \frac{1 - q_{cij}}{t_{nij} - t_{ij}}$$

$$t_{cij} \leqslant t_{ij} \leqslant t_{nij}$$

$$w_T + w_Q + w_c + w_{\sigma^2} = 1$$

w_T、w_Q、w_C、w_{σ^2} 分别为进度、质量、成本和资源子系统功效的权重。其他参数意义同前。

四 基于遗传算法的复杂产品系统多目标优化求解

复杂产品系统项目目标的协调度模型涉及的参数通常较多,需对其全局求解。经典的优化算法容易陷入局部最优,难以解决全局最优问题。遗传进化算法根据生物进化的原理,基于群体寻优策略,经过选择、复制、交叉、变异、插入、迁移算子的迭代计算,适合复杂优化问题的求解。故本文采用遗传算法进行求解[10,11]。

在运用遗传算法优化过程中,每一代临时存储一组 Pareto 解,并按代更新。由于优化过程中包含 4 个目标函数,Pareto 解集合理存在 4 个极限点。本文利用精华保留策略,将 n 个解直接放入下一代种群。设 N_{pop} 表示种群规模,N_{elite} 表示要保存的精英解数量。具体的优化算法步骤如下:

第一步:初始化。随机产生包括 N_{pop} 个个体的初始种群;

第二步:评价。对每个个体计算 q 个目标函数值,更新临时 *Pareto* 解集合;

第三步:选择。重复下面的步骤选出 $N_{pop} - N_{elite}$ 对父代,计算适应度和被选择的概率,为杂交操作选出一对父代个体;

第四步:杂交。对选出来的每对个体执行杂交操作以产生后代;

第五步:变异。对杂交操作产生的每个个体执行变异操作;

第六步:最优化策略。从临时 *Pareto* 解集合中随机选择 N_{elite} 个个体。将选出的个体添加到第三步产生的 $N_{pop} - N_{elite}$ 个个体中,以构成 N_{pop} 个个体种群;

第七步:终止迭代。若事先指定的停止条件得到满足,则终止迭代过程,否则返回到第二步。

本文采用二进制 *Gray* 编码,基于轮盘赌法的非线性排名选择,均匀交叉和变异。

五 某核电站建设项目多目标优化实例

某核电站建设主要采用以项目部为主体的项目管理体制。业主的工程部负责对参加项目建设的各承包商按承包任务实行矩阵管理,实现进度、成本、质量控制,并协调各接口的问题,如图 3 所示[12]。

本文以该项目的一个子工程示例多目标协调度模型的优化过程。项目初始网络计划如图 4 所示:

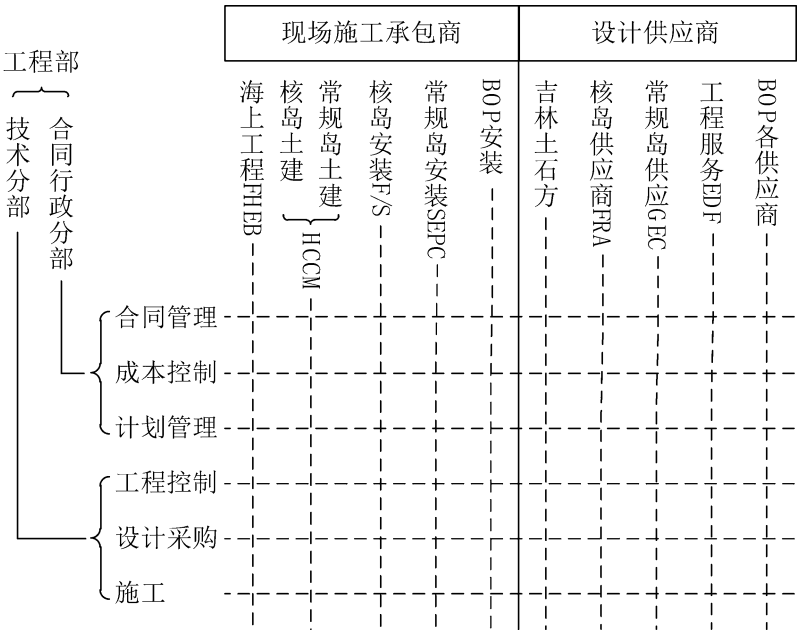

图 3　某核电站建设项目管理矩阵

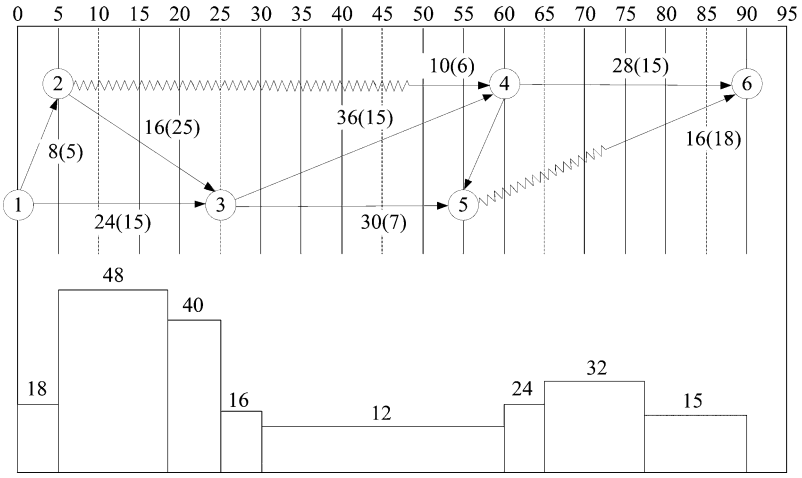

图 4　工程优化前的网络计划图

通过统计分析建立了工程前期初始数据统计分析表和工程总进度与成本关系表,如表 1、表 2 所示[13]。项目根据进度、成本、质量、资源均衡协同优化的原则施工。

运用上文介绍的方法确定了进度、成本、质量、资源四个均衡目标的偏好权重为 $w = [w_T, w_Q, w_C, w_{\sigma^2}] = [0.20, 0.28, 0.37. 0.15]$。

表 1　工程前期初始数据统计分析表

工序		1－2	1－3	2－3	2－4	3－4	3－5	4－6	5－6
历时	t_{nij}	8	32	16	10	36	30	28	16
	q_{nij}	1	1	1	1	1	1	1	1
极限历时	t_{cij}	4	20	10	8	22	18	16	10
	q_{cij}	0.8	0.85	0.7	0.8	0.9	0.75	0.91	0.81
b_{ij}		250	100	125	125	143	58	57	62.5
资源		5	15	25	6	5	7	15	8
关键路线			*			*		*	

表 2 工程的总进度与间接成本(美元)

进度(天)	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
成本(美元)	21960	22860	23220	24660	25560	27360	27660	27660	29760	30060

由初始网络计划图可知,工程原计划为 88 天,总成本为 110340 美元,工程原计划质量为 1。则计算得平均资源需要量为:$R_m = 20.41$;初始网络计划的方差为:$\sigma_k^2 = 285.75$。

根据已知条件可知,项目进度最短为极限工期下关键工序(1 - 3 - 4 - 6)持续时间为 58 天,即项目进度子系统的下限值为 58;项目总工序在极限工期下对应的平均质量作为工程质量子系统的下限值。根据前文中公式计算得:$Q_C = 0.814$。

根据以上参数,运用上文中的方法建立多目标的协调度优化模型。

通过 Matlab 编程,运用遗传算法求解,迭代 1000 次得到优化方案为:工期 78 天,成本 103630 美元,质量为 98.8%,资源均衡约束指标为 235.8;进度的功效系数为 0.47,成本的功效系数为 1.0,资源均衡约束功效为 0.29,质量功效系数为 0.92,四个子目标的协调度为 0.76。工程项目协调程度较好。

[参考文献]

[1] Hobday M. The project-based organization: an ideal form for managing complex products and systems? [J]. Research policy, 2000, 29(7): 871-893.

[2] Gann D M, Salter A J. Innovation in project-based, service-enhanced firms: the construction of complex products and systems[J]. Research policy, 2000, 29(7): 955-972.

[3] 邹树梁,吕玉航,陈甲华. 复杂产品系统创新组织模式探析[J]. 技术与创新管理,2009(3):324-327.

[4] 盛 亚,尹宝兴. 复杂产品系统项目的组织与技术创新管理研究现状[J]. 科技进步与对策,2009(5):157-160.

[5] 程平东,孙汉红. 核电站工程项目管理[M]. 北京:中国电力出版社,2006:11.

[6] 陈甲华,邹树梁,黄建美,刘兵. 复杂产品系统协同生产体系框架及多视图概念模型[J]. 南华大学学报:社会科学版,2010(3):35-40.

[7] 孙 力. 基于模糊理论的化工过程多目标优化集成研究[D]. 大连:大连理工大学,2004.

[8] 吴绍艳. 基于复杂系统理论的工程项目管理协同机制与方法研究[D]. 天津:天津大学,2006.

[9] 隋忠庆. 我国公路建设项目多目标优化方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.

[10] 周正武, 丁同梅, 田毅红, 等. Matlab 遗传算法优化工具箱(GAOT)的研究与应用[J]. 机械研究与应用, 2007, 19(6): 69-71.

[11] 陈秋莲, 王成栋. 基于 Matlab 遗传算法工具箱的优化计算实现[J]. 现代电子技术, 2007(2): 124-126.

[12] 郭爱华. 大亚湾核电站施工管理与技术[M]. 北京:中国建材工业出版社. 1992:8.

[13] 陈济东. 大亚湾核电站系统及运行:中册[M]. 北京:原子能出版社,1994:1.

Multi-objective Optimization of CoPS Project Based on Genetic Algorithm ——The case of NPP project

CHEN Jia-hua, WU Jian-shi, LIU Bing

(*University of South China*, *Hengyang* 421001, *China*)

Abstract: The target of CoPS project is usually made up of several subsystems which alway have relative independence and play a special role to the target . If some subsystems are one-sided emphaszed on, it would cause the coordination degree reduce between subsystems and even produce negative effect. In this paper, the target systems of CoPS were constructed from the schedule, cost, quality and resources. The priorities of the targets in the coordination model were identified by fuzzy decision method, with NPP as example. The effect function of progress, cost, quality, resources and coordination model of the CoPS are constructed. And, a solution of the model was proposed based on genetic algorithm. Finally, a NPP project was analyzed as a case, using the method of this paper.

Key words: CoPS; multi-objectiveoptimization; geneticalgorithm; NPP