

文章编号: 1001- 2486(2010) 05- 0123- 06

基于粒度计算的指控系统效能测度的探索性建模方法^{*}

修保新, 刘振亚, 张维明, 刘 忠
(国防科技大学 信息系统工程重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 分析了探索性分析模型的粒度原理, 建立了基于粒度计算的指控系统效能测度的探索性分析模型, 重点研究了探索性分析模型的建立, 属性函数的构造和探索因子集的粒度获取方法, 并结合多兵种联合作战案例, 对使命完成时间测度进行了探索性分析, 实验表明, 基于粒度计算的探索性建模方法能够通过粒度的转换降低问题的复杂度, 并在不同粒度层次上实现对问题描述的一致性。

关键词: 指控系统; 效能测度; 粒度计算; 探索性分析

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Exploratory Analysis Modeling for the Measurement of Command and Control System Effectiveness Based on Granular Computing

XIU Bao-xin, LIU Zhen-ya, ZHANG Wei-ming, LIU Zhong
(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The granular principles of exploratory analysis model was investigated, a granular computing-based exploratory model was constructed for the measurement of command and control system effectiveness. The paper focused on model construction, granular acquisition and attribute function formation in the exploratory model. For the minimizing of the mission completion time, the exploratory analysis experiment was designed, with reference to cases of multi-branch joint operations. The exploration shows that the exploratory analysis modeling based on granular computing can reduce the complexity by granular conversion and keep consistency of problem description on different granular levels.

Key words: command and control system; measure of effectiveness; granular computing; exploratory analysis

采用探索性分析方法测度指控系统效能是指控系统效能测度研究的一种新思路, 其基础和关键是对探索性分析模型的研究。现阶段探索性分析方法应用中, 主要通过多分辨率建模技术构建问题的探索性分析模型^[1-3]。这种建模方式在指控系统效能测度的探索性建模过程中存在诸多局限性, 主要表现在: 基于多分辨率建模构建探索性分析模型导致指控系统的探索性分析模型缺乏通用的描述与一般性模型, 无法进一步地讨论模型的数学性质与算法优化; 指控系统效能测度涉及大量作战任务与作战资源间的复杂交互, 难以通过单一模型或视图进行描述; 指控系统效能测度现有可重用模型的数量与质量难以满足基于多分辨率建模构建探索性分析模型的需求。这些实际困难限制了传统多分辨率建模技术在指控系统效能测度探索性建模的应用范围。

自 Zadeh 于 1997 年正式提出粒度计算理论之后, 国内外学者对该理论进行了大量研究, 在复杂问题求解等方面取得了诸多研究成果。我们在文献[4]中提出了基于粒度计算的探索性分析模型, 建立了探索性分析模型的一般性数学描述。但针对不同的问题, 该模型的粒化方法及相应的空间分析方法都有不同, 本文将基于粒度计算理论构建指控系统效能测度的探索性分析模型, 开拓指控系统效能测度的探索性分析建模思路。

1 探索性建模的粒度原理

探索性建模的目的, 是通过自底向上的模型聚合与抽象、自顶向下的模型分解与解释, 在不同抽象

^{*} 收稿日期: 2010- 05- 20
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70701038; 70771109)
作者简介: 修保新(1977—), 男, 副研究员, 博士。

层次建立研究问题的一致性描述。从本质上看,探索性建模与粒度计算是殊途同归的,二者都是由粗到细、不断求精的多粒度分析法,避免了计算复杂性。由于观察问题的角度和获取对象的特征信息的不同,对复杂对象可按分析问题的需要将其简练成若干个保留重要特征和性能的点,这种点就是不同粒度的代表。通过等价关系对问题论域进行划分的过程实际上是对问题论域进行简化,把性质相近的元素看成是等价的,把整体作为一个新的元素形成一个粒度较粗的论域,从而将原问题转化成较粗粒度层次上的新问题。下面以商空间理论^[5]为基础,对探索性建模进行形式化描述^[4]。

对于探索性分析问题来说,探索因素集用 T 表示,每个探索因素 $t \in T$ 所对应的水平值论域记为 X_t ,则探索性分析问题的论域空间 X 可表示为 $X = \prod_{t \in T} X_t$ 。设 F 为论域空间 X 上的属性函数,并且可以是多值的,记 $F = (f_1, f_2, \dots, f_M): X \rightarrow Y$, 并满足 $f_i: X \rightarrow Y_i, Y = \prod_i Y_i, i = 1, 2, \dots, M$ 。 Γ 可表示为 X 或 Y 的结构,定义为论域中各个基本元素之间的相互关系。

可以通过三元组 (X, F, Γ) 表示所要研究的探索性分析问题,探索性建模的聚合、抽象与分解过程即为分析与求解问题 (X, F, Γ) 的过程。在问题求解过程中,同一个粒度世界或不同粒度世界所要求描述的信息含量和相互变换决定了信息粒度的粗细优化。如果从一个较“粗”的角度看问题,即对 X 取粗粒度时,通过给定 X 上的一个等价关系 R (或说一个划分),得到一个对应于 R 的商集,记为 $[X]$, 对应的商拓扑记为 $[\Gamma]$ 。商集 $[X]$ 上的属性函数 $[F]$, 由于不能够通过 (X, F, Γ) 和关系 R 直接确定,因而需要根据问题目标和论域划分进行单独构造。这样讨论原问题 (X, F, Γ) 就转化为讨论新的粗粒度层次上的问题 $([X], [F], [\Gamma])$ 。

2 基于粒度计算的指控系统效能测度的探索性建模

为了说明基于粒度计算的探索性建模方法在指控系统效能测度的探索性分析中的应用,根据探索性建模的粒度原理,本节针对指控系统效能测度问题建立具体的探索性分析模型。

假设针对使命 M 已经得到优化的指控系统,即确立了资源实体与使命间的指控关系:决策实体之间的层次结构关系 R_{DM-DM} 、决策实体与平台实体之间的控制关系 R_{DM-P} 、决策实体和任务的执行关系 R_{DM-T} 以及平台实体与任务之间的分配关系 R_{P-T} 。根据这些指控关系和作战资源实体、任务的参数信息,可以确定使命 M 的执行时间。由于作战资源实体、任务的参数信息是不确定的,因此使命执行时间也是不确定的。而使使命完成时间是测度指控系统效能的重要指标,因此本文选取的研究问题是测度复杂使命环境下使命 M 的实际完成时间。

2.1 模型建立

记探索因子集 T 为使命 M 需要执行的所有单个任务的集合,即 $T = \{T_i\}$ 。由于本文以使命 M 的实际完成时间为测度,因此每个探索因子 $t \in T$ 所对应的水平值论域选取为任务的执行时间误差区间,建立探索性分析的不确定性因素的商空间模型 (X, F, Γ) , 其中: $X = \prod_{T_i \in T} X_{T_i} = \prod_{T_i \in T} e^{T_i}, F: X \rightarrow E^{T(M)}$ 。即论域 X 为所有任务 T_i 的执行时间误差 e^{T_i} 的联合空间, F 为论域 X 到使命 M 完成时间误差 $E^{T(M)}$ 的映射关系,该映射由使命任务图和任务执行的甘特图决定。 Γ 定义为 $F(X)$ 中各个元素之间的相互关系。

通过定义探索因子集 T 上的关系 R , 将 T 划分为互不相交的 N 个部分,记为 $[T] = \{G_i^T, i = 1, 2, \dots, N\}$, 即 $T = \bigcup_{i=1}^N G_i^T, \phi = \bigcap_{i=1}^N G_i^T$ 。 $[T]$ 为该探索性分析问题的新的探索因子集, $[T]$ 中的任意元素 G_i^T 对应新的探索因子。假设 G_i^T 中包含的各元素所对应的原探索性分析问题的论域空间为 $\prod_{s \in G_i^T} X_s$, 而探索因子

G_i^T 所对应的水平值论域记为 $X_{G_i^T}$, 则通过映射函数 $f_{G_i^T}: \prod_{s \in G_i^T} X_s \rightarrow X_{G_i^T}$ 得到 G_i^T 的水平值论域, 并且对 $\forall x_{G_i^T}$

$\in \prod_{s \in G_i^T} X_s, f_{G_i^T}$ 满足:

$$f_{G_i^T}(x_{G_i^T}) = F(x) \quad (1)$$

其中, $x \in X$ 满足在 $\prod_{s \in G_i^T} X_s$ 空间中的分量为 $x_{G_i^T}$, 在其它空间中的分量为 0。因此 $f_{G_i^T}$ 为论域 $\prod_{s \in G_i^T} X_s$ 到使命 M 完成时间误差 $E^{T(M)}$ 的映射关系。

根据新的探索因子集 $[T]$ 以及映射函数 $\{f_{G_i^T}\}$, 可以得到使命时间测度的新的探索性分析问题 $([X], [F], [\Gamma])$, 其中: $[X] = \prod_{i=1}^N X_{G_i^T} = \prod_{i=1}^N e_{G_i^T}^{G_i^T}$, $[F]: [X] \rightarrow E^{T(M)}$ 。即论域 $[X]$ 为所有粒化后的任务 G_i^T 的执行时间误差 $e_{G_i^T}^{G_i^T}$ 的联合空间, $[F]$ 为论域 $[X]$ 到使命 M 完成时间误差 $E^{T(M)}$ 的映射关系。 $[\Gamma]$ 定义为 $[F]([X])$ 中各个元素之间的相互关系。

特别地, 如果对于 $\forall x \in X$, 都有 $[F]$ 满足式(2), 则称粒化后的探索因子集 $[T]$ 中的各元素是相互独立的, 即有

$$[F]([x]) = \sum_{i=1}^N f_{G_i^T}(x_{G_i^T}) \quad (2)$$

其中, $x_{G_i^T}$ 是 x 在 $\prod_{s \in G_i^T} X_s$ 空间中的分量。

2.2 粒度获取

式(2)说明了如果粒化后的探索因子集中的各元素是相互独立的, 则可通过 $[F]$ 计算粒化后的探索因子集。这就为我们提供了一个粒化探索因子集的基本原则: 尽量使得粒化后的探索因子集中各元素是相互独立的。但在实际操作过程中将很难满足这条原则, 因此可行的方式是, 在某一有代表性的子空间 $X' \subset X$ 内, 使得粒化后的探索因子集 $[T]$ 中的各元素是相互独立的, 该子空间 X' 代表了绝大部分可能出现的探索因子的不确定范围。

对于优化设计的指控系统来说, 总是使得决策实体间在任务上的协作尽可能的小, 这样决策实体间所执行的任务将尽可能相互独立的。假设一个指控系统的决策实体和任务的执行关系为 R_{DM-T} , 则可以得到探索因子集 T 的一个覆盖, 记为 $T_c = \{C_i^T, i = 1, 2, \dots, N\}$, 即 $T = \bigcup_{i=1}^N C_i^T$, 这个覆盖表明每个 C_i^T 中的任务都由同一个决策实体 DM_i 执行。由于此时可能存在某个任务由多个决策实体同时执行的情况, 因此需要对 T_c 进行处理, 从而得到 T 的划分, 使得每个任务都由不同的决策实体执行。

假设 $\exists T_0 \in C_i^T \cap C_j^T$, 可将任务 T_0 拆分为 T_0^i 和 T_0^j 两部分, 即 $T_0 = T_0^i + T_0^j$, 其中, T_0^i 为由决策实体 DM_i 完成的部分, T_0^j 为由决策实体 DM_j 完成的部分, 则 $T_0^i \cap T_0^j = \emptyset$ 。子任务 T_0 拆分以后得到新的 C_i^T 、 C_j^T 和 T' , 且有 $C_i^T = (C_i^T / \{T_0\}) \cup \{T_0^i\}$, $C_j^T = (C_j^T / \{T_0\}) \cup \{T_0^j\}$, $T' = (T / \{T_0\}) \cup \{T_0^i, T_0^j\}$ 。

由于 T_0^i 和 T_0^j 是由任务 T_0 拆分而来, T_0^i 和 T_0^j 与 T_0 存在时间同步性, 即 $t_s(T_0) = t_s(T_0^i) = t_s(T_0^j)$, $t_e(T_0) = t_e(T_0^i) = t_e(T_0^j)$, 其中 t_s 和 t_e 分别代表任务的开始时间和结束时间。

通过上述拆分方法将覆盖 T_c 的任务交集的所有任务都进行处理后, 可以得到新的探索因子集 T' 的一个划分 $[T'] = \{G_i^T, i = 1, 2, \dots, N\}$, 满足 $T' = \bigcup_{i=1}^N G_i^T$, $\phi = \bigcap_{i=1}^N G_i^T$ 。此时, 针对探索因子集 T 的探索性分析问题 (X, F, Γ) 转化为针对探索因子集 T' 的探索性分析问题 (X', F', Γ') 。

2.3 结构分析

针对使命完成时间的测度, 一个重要的指标是使命完成时间的误差分布情况, 而这种误差分布就是问题 (X, F, Γ) 和 $([X], [F], [\Gamma])$ 的一种特定的结构。

通过属性函数 $F: X \rightarrow E^{T(M)}$ 可以得到 $F(X)$ 上的使命完成时间的误差概率分布, 记为 P 。而对于根据新的探索因子集 $[T]$ 定义的映射函数 $\{f_{G_i^T}\}$, 得到使命时间测度的新的探索性分析问题 $([X], [F], [\Gamma])$, 通过属性函数 $[F]: [X] \rightarrow E^{T(M)}$ 可以得到 $[F]([X])$ 上的使命完成时间的误差概率分布, 记为 $[P]$, 对应的密度函数记为 $[p]$ 。

假设粒化后的探索因子 G_i^T 通过映射函数 $f_{G_i^T}: \prod_{s \in G_i^T} X_s \rightarrow X_{G_i^T}$ 得到对应的水平值论域为 $X_{G_i^T}$, 即 $f_{G_i^T}$ 为

论域 $\prod_{s \in \mathcal{C}_i^T} X_s$ 到使命完成时间误差 $E^{T(M)}$ 的映射关系。通过 $f_{\mathcal{C}_i^T}$ 可以得到 $X_{\mathcal{C}_i^T}$ 上的使命完成时间的误差概率分布, 记为 $P_{\mathcal{C}_i^T}$, 对应的密度函数记为 $p_{\mathcal{C}_i^T}$ 。

特别地, 如果对于 $\forall x \in X$, 都有 $[F]$ 满足式 (2), 即粒化后的探索因子集 $[T]$ 中的各元素是相互独立的, 则密度函数 $[p]$ 可以通过密度函数 $\{p_{\mathcal{C}_i^T}, i = 1, 2, \dots, N\}$ 卷积得到。在进行探索性分析时, 可以尽量使得粒化后的探索因子集中的各元素相互独立, 从而可以通过分析问题 $([X], [F], [\Gamma])$ 的结构来说明原问题 (X, F, Γ) 的结构。

3 探索性分析的验证实验

本节结合多兵种联合作战案例对本文方法进行验证。我们以两种思路实施探索性分析, 分别称之为降维实验和基准实验。所谓基准实验, 是直接对探索因子构建探索性分析模型, 并基于析因实验进行全组合遍历探索。基准实验对问题域没有做任何变换, 对探索空间的每一点都进行探索。所谓降维实验, 是对探索因子采用基于粒度计算的探索性建模方法建立研究问题较粗粒度层次的探索性分析模型, 通过粒度层次的转换降低问题维度。

3.1 案例描述

以某联合作战战役为想定背景, 作战组织的使命目标 M 是登陆抢占机场和港口, 为后续部队向纵深推进扫清障碍。案例的具体数据如平台实体集 P 、任务集 T 等均来源于 A2C2 实验^[6]。

指控系统结构设计的目标是分配合适的平台实体到正确的区域去执行合理的任务, 具体地说, 就是在满足任务的资源需求的情况下提高作战资源的利用率、缩短完成任务过程的时间。验证实验的指控系统结构设计策略采用 OSDBG 方法^[7], 平台实体到任务之间的分配关系如图 1 所示。

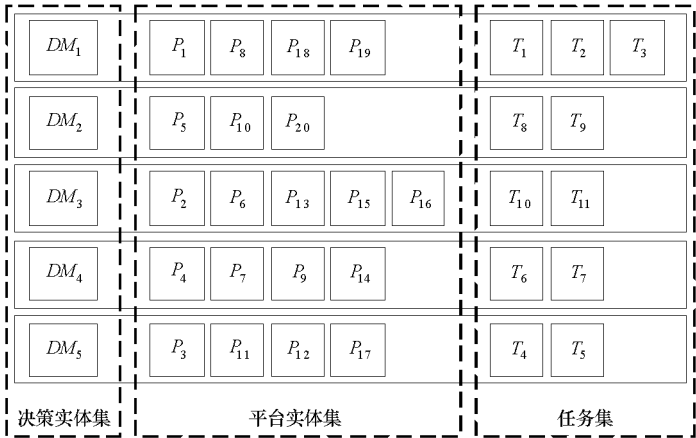


图 1 使命 M 的平台实体-任务分配
Fig. 1 Platform mission assign of mission M

3.2 使命完成时间测度

作战使命 M 分解得到的每个任务 T_i 的开始处理时间 $t_s(T_i)$ 可以表示为

$$t_s(T_i) = \max \begin{cases} t_e(T_k) + \frac{d(T_k, T_i)}{v_m}, & \text{其中, } P_m \in P, T_i, T_k \in M \\ t_e(T_j), & \text{其中, } Ar(i, j) = 1, T_i, T_j \in M \end{cases} \quad (3)$$

其中, v_m 为第 m 个平台实体的移动速度, $t_e(T_k) + \frac{d(T_k, T_i)}{v_m}$ 为子任务 T_i 开始执行前的平台实体等待时间; $t_e(T_j)$ 为任务 T_i 的前驱任务 T_j 的结束时间。任务 T_i 的结束时间为

$$t_e(T_i) = t_s(T_i) + t^0(T_i) \quad (4)$$

其中, $t^0(T_i)$ 为任务 T_i 的预估处理时间。在获取每个任务 T_i 的开始时间与结束时间的基础上, 可以通过求解使命 M 任务图的关键路径的方法测度使命目标 M 的完成时间 $T(M)$ 。复杂使命环境的不确定性因素对使命完成时间的影响, 以不确定性因素造成的使命完成时间误差 $E^{T(M)}$ 进行描述, 其结果应当表现为 $E^{T(M)}$ 的概率分布。

3.3 降维实验

采用图 1 中任务集的分配关系 R , 在对应的探索性分析模型 $([X], [F], [\Gamma])$ 中, 商集 $[X]$ 的子空

间为 $[X]_{C_k}^T$, 称 $[X]_{C_k}^T$ 为探索子空间, 则有 $[X]_{C_1}^T = (\{e^{T_1}\}, \{e^{T_2}\}, \{e^{T_3}\})$, $[X]_{C_2}^T = (\{e^{T_8}\}, \{e^{T_9}\})$, $[X]_{C_3}^T = (\{e^{T_{10}}\}, \{e^{T_{11}}\})$, $[X]_{C_4}^T = (\{e^{T_6}\}, \{e^{T_7}\})$, $[X]_{C_5}^T = (\{e^{T_4}\}, \{e^{T_5}\})$ 。

设 $[X]_{C_k}^T$ 中探索因子处于某种取值时, 其他子空间中探索因子均取 0 值, 该情况下 $[F]([X]) = [F]([X]_{C_k}^T) = E_{C_k}^{T(M)}$ 。当 $[X]_{C_k}^T$ 中探索因子取值保持不变, 其他子空间探索因子取非零值时, 对应的使命完成时间误差为 $E^{T(M)}$ 。当其他子空间探索因子取值区间足够小时, 对 $E^{T(M)}$ 的变化没有影响, 即 $E^{T(M)} = E_{C_k}^{T(M)}$ 。因此, 当所有子空间探索因子取值区间均足够小时, 可近似认为 $[X]_{C_k}^T$ 之间相互独立, 即 $[X]_{C_k}^T$ 所造成的使命完成时间误差 $E^{T(M)}$ 的大小不受其他与其并列的子空间探索因子取值的影响。此时, 若将 $[X]_{C_k}^T$ 所造成的使命完成时间误差 $E^{T(M)}$ 记为 $E_{C_k}^{T(M)}$, 则讨论 $E^{T(M)}$ 的概率密度即为研究 $E_{C_k}^{T(M)}$ 的联合分布问题, 可以通过逐次卷积 $E_{C_k}^{T(M)}$ 的概率密度的方法进行求解。

假设探索因子 e^{T_i} 在其分布区间内符合均匀分布, 针对本案例数据^[9]可以计算得到 $[X]_{C_k}^T$ 近似独立所要求的下限为 22%, 因此验证实验中主要讨论 $|e^{T_i}| \leq 22\%$ 的情况。将探索因子 e^{T_i} 在区间 $[-22\%, 22\%]$ 中均匀地取 5 个水平值, 对子空间 $[X]_{C_k}^T$ 分别进行探索性分析。由于 $[X]_{C_k}^T$ 的探索因子数量 K 不超过 3 个, 可基于析因设计进行全局遍历探索, 探索结果如图 2(a)~(e) 所示, 其中, x 轴表示 $E_{C_k}^{T(M)}$ 的大小, y 轴表示 $E_{C_k}^{T(M)}$ 出现的概率。

逐次卷积 $E_{C_k}^{T(M)}$ 的概率密度的过程也是探索性分析的过程。该过程中探索因子为 $E_{C_k}^{T(M)}$, 以离散值描述的 $E_{C_k}^{T(M)}$ 的概率密度构成了每个 $E_{C_k}^{T(M)}$ 的不同水平值, 对 $E_{C_k}^{T(M)}$ 的逐次卷积即为当前探索因子不同水平值间的全组合探索, 探索次数为 $26 \times 25 \times 1 \times 4 \times 3 = 7800$ 次(其中 26、25、1、4 和 3 分别是五个分布区间的离散值数量)。通过逐次卷积得到 $E^{T(M)}$ 的近似概率密度如图 2(f) 所示。

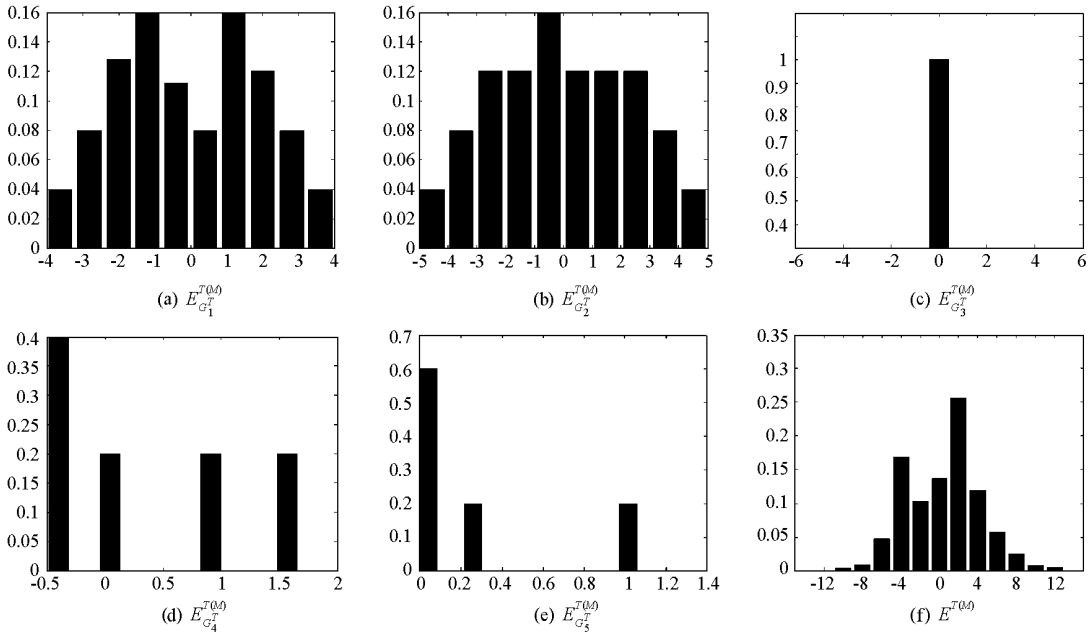


图 2 不同探索空间的概率密度图

Fig. 2 Probability density of different explore space

3.4 基准实验

基准实验共包含 11 个探索因子, 每个探索因子在区间 $[-22\%, 22\%]$ 内均匀地取 5 个水平值, 一共进行 5^{11} 次探索。从计算机仿真的角度看, 基准实验属于同一仿真过程的重复多次运行, 每次仿真的初始化参数具有不同的取值, 且不同的仿真进程之间不存在通信与交互。按 e^{T_1} 的 5 个水平值将基准实验

分为 5 个部分在不同的节点上分别探索。每个部分中 e^{T_1} 均为某个固定的水平值, 每个节点所运行的探索性分析模型中实际包含 10 个探索因子。在基准实验的每个节点我们均使用 DELL 的 Optiplex755 商用台式机, 其中 CPU 为 Intel Pentium Dual E2160, 内存为 2G DDR II。在基准实验中, 每个节点的实际探索时间在 20~21h, 使命完成时间误差的概率密度如图 3 所示, 其中 y 轴表示误差出现的概率, x 轴表示误差的大小。

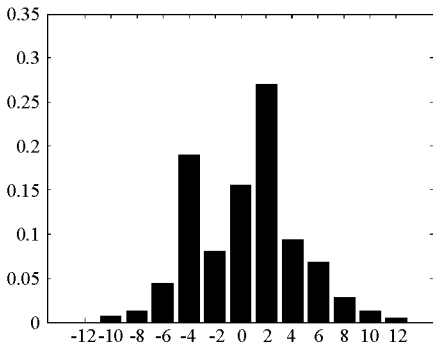


图 3 基准实验的使命完成时间误差的概率密度图

Fig. 3 Probability density of mission completion time of datum experiment

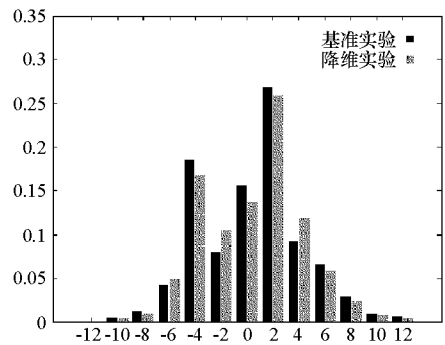


图 4 基准实验与降维实验对比图

Fig. 4 Reduce dimension experiment and datum experiment

3.5 实验结论

降维实验通过粒度转换将研究问题划分在问题论域的若干子空间中分别探索, 由于每个子空间所包含探索因子数量远远少于原论域中的探索因子数量, 因此探索性分析的复杂度大大降低。从具体实验来看, 探索规模从 5^{11} 次减少到 $5^3 + 5^2 + 5^2 + 5^2 + 5^2 + 7800$ 次。

从实验结果分析, 降维实验是研究问题的近似求解。相对于精细求解的基准实验而言, 探索规模的差距导致了降维实验的结果包含的信息量较少。结合具体的实验结果, 降维实验求得 $E^{T(M)}$ 分布区间为 $[-9.61, 11.8]$, 未能完全拟合所有 $E^{T(M)}$ 可能出现区间(基准实验求得分布区间为 $[-9.76, 11.74]$), 且分布曲线没有基准实验平滑。但是, 降维的结果已经近似地反映了 $E^{T(M)}$ 的概率密度(见图 4)。可以认为, 降维实验以略微牺牲结果精度为代价大幅度地提高了探索性分析的效率。

4 结论

本文基于粒度计算理论提出了指控系统效能测度的探索性分析模型。根据不同的问题论域和目标, 属性函数的构造方法和探索因子集的粒度获取方法都有不同, 本文仅对指控系统效能测度中较为关键与复杂的使命完成时间测度指标进行了探索性分析及讨论, 并没有完成完整的指控系统效能测度分析。在以后的研究中, 我们将进一步对其它测度指标进行探索性分析, 并对指控系统的设计策略进行验证与分析。

参考文献:

- [1] 曾宪钊, 蔡游飞, 黄谦, 等. 基于作战仿真和探索性分析的海战效能评估[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(3): 763-766.
- [2] 周少平, 李群, 王维平. 支持探索性分析的主动元建模[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(2): 237-243.
- [3] 李兴兵, 谭跃进, 杨克巍. 基于探索性分析的装甲装备体系效能评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(9): 1496-1499.
- [4] 刘振亚, 修保新, 张维明, 等. 基于粒度计算的探索性分析建模研究[J]. 模糊系统与数学, 2009, 23(6): 139-144.
- [5] 张钹, 张铃. 问题求解理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [6] Levchuk G M, Levchuk Y N, Luo J, et al. Normative Design of Organizations Part I: Mission Planning [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A 2002, 32(3): 346-359.
- [7] 修保新, 张维明, 刘忠, 等. 基于粒度计算和遗传算法的 C2 组织结构设计方法[J]. 自然科学进展, 2007, 17(5): 662-671.