

决策系统的信息机理

罗雪山

(系统工程与数学系)

摘要 本文从信息与决策的角度,分析了决策系统信息特性的几个侧面,为研究信息对决策系统的作用机理做了一些基础性的定量工作。

关键词 信息,决策系统,决策者,信息处理,优化,信息结构

分类号 N94

决策系统同一般系统一样也是开放的。但它与一般系统不同的是,它的开放着重表现为对信息的开放。因而信息对于决策系统的正常运行起着重要的作用。故研究信息对决策系统的作用机理(或者说信息与系统、信息与决策之间的关系),是一个亟待解决的问题。朝着这个方向,本文做了一些基础性的定量研究工作。

1 决策系统的结构

1.1 决策系统的组成及其结构框架^[1]

决策系统的基本组成单元是决策组织。从现在的认识上来看,决策系统是一个多层次、分布式的节点网,每一个节点是一个决策组织(DO)。每一个决策组织由若干个决策组织成员即决策者(DM)组成。图1便是一个决策组织的示意图。下面介绍一下决策组织结构的表征方法。

决策组织最基本的构成形式主要有三种:并行形式、交替形式以及层次形式(并行/交替形式)。其它复杂的组织构成形式都可以用这三种基本形式加以组合来表示。下面简单介绍一下这三种组织形式。

(1) 并行组织结构^[1,2]

在这种组织结构中,决策有着某些对称的关系:他们不能相互指挥和命令,但可以在工作过程中所有阶段共享信息。输入信息首先被分解,然后分配给各个决策者,每个决策者处理信息的一个分量^[7,8]。图2是其示意图。

(2) 交替组织结构^[1,2]

当输入信息向量不能被分解时,组织的信息结构就基于交替处理方式,其示意图如

图 3。这里需要一种策略，使 DM 们按照一定的顺序处理信息。

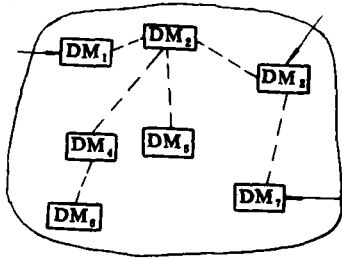


图 1 决策组织结构图

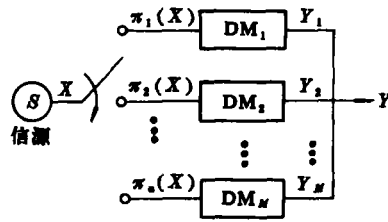


图 2 并行信息结构

(3) 层次组织结构（并行/交替组织结构）^[1]

这种结构综合了上述两种组织形式，见图 4。层次组织结构允许 DM 对其它 DM 施加影响。

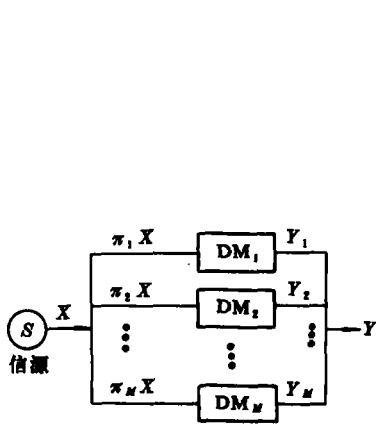


图 3 交替信息结构

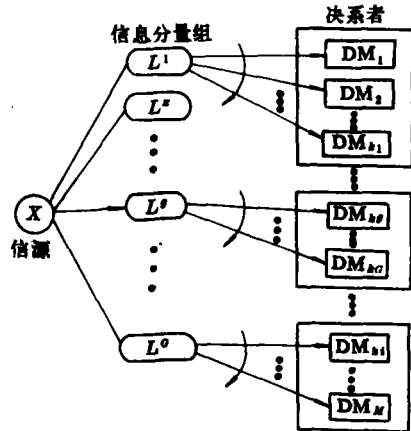


图 4 并行/交替信息结构

1.2 决策系统结构的形式化描述^[6]

一个决策系统可以定义为一个有限集合的四元组 $\langle S, P, T, R \rangle$ ，其中 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 是系统中所有组织的集合； $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 是系统中所有职位的集合； $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$ 是特定时间内系统要贯彻的所有任务的集合； $R = \{R_0, R_1, \dots, R_j\}$ 是 S, P 和 D 中元素之间关系集。

在 R 所含的正式关系中，影响决策的信息与控制的关系如下：

$R_1: P \times P \rightarrow \{0, 1\}$ 是决策系统结构关系中的命令链, $R_1(p_i, p_j) = 1$ 意味着 p_i 是 p_j 的一个上级, 虽然 p_i 可能通过中间职位控制 p_j ;

$R_2: D \times D \rightarrow \{0, 1\}$ 是任务步骤关系, 定义了任务在时间上的顺序;

$R_3: S \times P \rightarrow \{0, 1\}$ 是系统对职位的指派。在标准情况下, R_3 定义了一个一对一的组织 and 职位的对应, 然而, 如果该系统配备的组织过少, 一个组织可能占有几个职位;

$R_4: P \times D \rightarrow \{0, 1\}$ 是任务的分派关系, 它把职位和它直接负责的任务联系在一起;

$R_0: S \times S \rightarrow [0, 1]$ 表示非正式影响关系, 是一个模糊关系。若希望考察某个组织 (或个人) 通过正式和非正式联系对某个职位的影响, 可计算 $M^t = (R_0 \circ M^{t-1}) \cup (M^{t-1} \circ R_1)$, 其中 $M^1 = R_3$, 求 M^t 的极限。

同样还可以类似定义一些关系描述组织结构。通过这样的描述, 决策系统的结构便可知。

2 决策组织的信息论模型^[1]

2.1 信息划分定律与决策组织模型^[1,4,9]

要研究决策组织的信息特性, 首先应考虑信息与系统的关系。信息划分定律在一定程度上揭示了 this 关系。信息论中有两个基本量: 熵和互信息。 N 维情况下的互信息为 $T(x_1; x_2; \dots; x_N)$:

$$T(x_1; x_2; \dots; x_N) = \sum_{i=1}^N H(x_i) - H(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (1)$$

信息划分定律指出, 对一个有 $N-1$ 个内部变量 (记 w_1, w_2, \dots, w_{N-1}) 和一个输出变量 y (也记 w_N) 的系统:

$$\sum_{i=1}^N H(w_i) = T(x; y) + T_r(x; w_1, w_2, \dots, w_{N-1}) + T(w_1; w_2; \dots; w_{N-1}; y) + H_x(w_1, w_2, w_{N-1}, y) \quad (2)$$

上式左边对应系统的总活动量 (Total Activity), 记为 G 。右边每一项都有自己的含义。第一项 $T(x; y)$ 称流通量 (Throughput), 记 G_t , 它为系统输出与输入间相关性的度量; 第二项 $T_r(x; w_1, \dots, w_{N-1}) = T(x; w_1, \dots, w_{N-1}, y) - T(x; y)$ 称为阻塞量 (Blockage), 记 G_b , 它可考虑为不包含在输出中的输入信息量; 第三项 $T(w_1; w_2; \dots; w_{N-1}; y)$ 称为协调量 (Coordination), 记 G_c , 它是系统的 N 维互传输, 亦即系统内部变量相互限制程度的度量; 第四项 $H_x(w_1, w_2, \dots, w_{N-1}, y)$ 记为 G_x , 表示当输入完全确定时存在于系统变量中的不确定性。故信息划分定律可简写为 $G = G_t + G_b + G_c + G_x$ 。

信息划分定律阐明了系统内的信息关系, 下面我们考虑如何用它建立决策组织模型^[1]。先考虑组织成员模型。可与决策组织中其它成员对话的决策者的完整模型见图 5。

决策者从环境中接收到时间间隔为 τ 的一串信号 $x \in X$, 信号序列先缓冲一下再于状态评估 SA 阶段一起处理。SA 阶段将输入处理成评估后局势 z 的算法, SA 阶段可使用存贮器或内部数据库中的 d_0 值, 即历史信息。评估后的状态可与其它成员共享, 同时也可接收到其它成员的补充评估 z' 。集合 z 和 z' 在信息融合 IF 阶段结合, 产生 z 。IF 阶段的

某些信息 d_i 可存入存储器。从其它成员接收到命令的可能性由变量 v' 表示。命令解释 (CI) 阶段结合 v' 和 \bar{z} 得到选择 \bar{v} 。在响应选择 (RS) 阶段, 由 \bar{v} 得到输出 y , 这是由一些选择算法实现的。图 6 是一个没有缓冲和存储器的具体的 DM 模型。

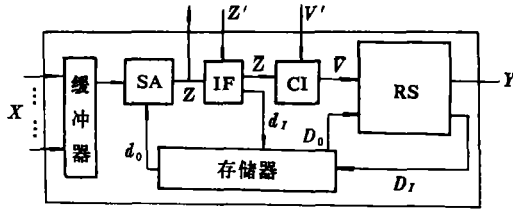


图 5 DM 的完整模型

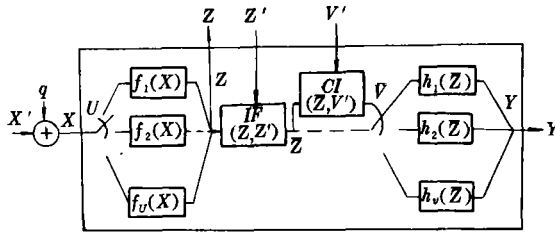


图 6 DM 的详细模型

应用前述的信息划分定律, 可得^[2]:

$$\text{流通量: } G_t = T(x, z', v'; x, y) \quad (3)$$

$$\text{阻塞量: } G_b = H(x, z', v') - G_t$$

$$\text{系统内部产生的信息: } G_n = H(u) - H_z(v) \quad (4)$$

协调量:

$$\begin{aligned} G_c = & \sum_{i=1}^v [p_i g_i^c(p(x)) + \alpha_i H(p_i)] + H(z) + g_i^{IF}(p(z, z')) + g_i^{CI}(p(\bar{z}, v')) \\ & + \sum_{j=1}^v [p_j g_j^c(p(\bar{z}/\bar{v} = j)) + \alpha_j H(p_j)] + H(y) + H(z) + H(\bar{z}) \\ & + H(\bar{z}, \bar{v}) + T_z(x', z') + T_z(x', z'; v') \end{aligned} \quad (5)$$

这个模型的合理性是有限的, 用定量的关系表示即总活动量 G 满足: $G = G_t + G_b + G_n + G_c \leq F\tau_0$ 。 τ_0 是符号的到达时间间隔, F 是最大信息处理率。这个限制表明 DM 必须处理的输入率至少应等于信息到达率。

得出了单个成员模型就可进一步研究组织模型。图 7 是一个三人并行组织的 Petri

Net 图。同样可由信息划分定律列出其信息方程。

2.2 决策组织的效能负荷分析^[1,10]

由上面单个决策者和决策组织的信息模型可进行它们的效能负荷分析, 研究如何确定组织结构才能使决策组织发挥最大效益, 同样可研究整个决策系统结构的优化问题。此处仅介绍其研究思路。

在外部条件给定时, 组织的效能与工作负荷都参数地依赖组织内部的行为策略。信息论意义上工作负荷定义为要达到某一决策而克服不确定性所必须的活动量。组织的效能定义有多种形式, 最简单的为组织产生错误响应的概率。工作负荷与效能都参数地依赖于组织内部的选择策略, 因而

可由此画出效能/负荷轨迹。用此轨迹可以定性比较不同结构组织的效能, 也可以用来比较组织处理不同不确定性时的有效性。效能/负荷轨迹如图 8 所示。

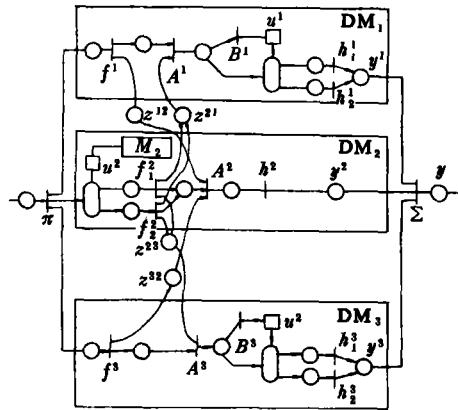


图 7 三人并行组织的 Petri Net 表示图

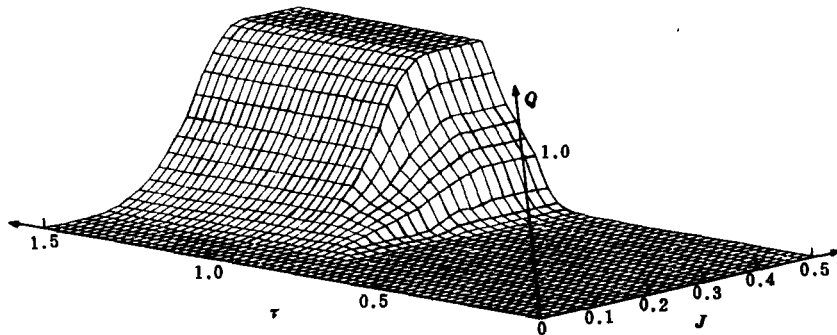


图 8 三人并行组织的工作负荷轨迹

3 决策组织信息处理的效能度量^[7,8]

3.1 决策组织的信息处理能力

定义 1 设处理者 p 处理信息集 X , 其平均信息处理率为 $u = Q_p(X)/t_0$, 其中 $Q_p(X)$ 代表信息集 X 的信息量, t_0 表示 p 处理完 X 所需的时间。处理者 p 处理 X 所得结论的质量为 $\mu_0(X) \in [0, 1]$, 其中 Q 为表征处理质量的模糊集。定义 $f_p = c \cdot u(X) + (1-c)g(\mu_0(X))$ 为

处理者 p 的信息处理能力。上式中 c 为加权因子, $g(\cdot)$ 为质量变换函数^[7]。

定义 2 设一个决策组织 T 由 M 个成员组成, 他们级别平等, 每人处理某一方面的信息。 $A_i (i \in M)$ 为信息集 X 的一组模糊划分, 设 p_i 处理信息 A_i , 模糊信息 A_i 的信息量为

$$Q_n(A_i) = \sum_{x \in X} \mu_{A_i}(x) \log \frac{1}{p(x)} \quad (\text{bits}).$$

定义 3 对模糊信息 A_i 的处理质量定义为

$$Q(A_i) = \sum_{x \in X} \mu_{A_i}(x) \mu_{Q_i}(x) \quad (6)$$

定义 4 上述决策组织 T 在模糊信息划分 $A_i (i \in M)$ 下的总体处理质量为 $Q[T, A_i (i \in M)] = \sum_{i \in M} Q(A_i) I_m(A_i)$, 其中 $I_m: F(X) \rightarrow [0, 1]$ 称为模糊信息 A_i 的重要性因子。

定义 5 设决策组织 T_1 和 T_2 的成员与组织结构完全相同, 用它们处理的信息源及其划分也相同。若在同一时刻 t_0 内 $Q[T_1, A_i (i \in M)] \geq Q[T_2, A_i (i \in M)]$, 则称 T_1 的处理能力优于 T_2 , 记 $T_1 \geq T_2$ 。

定义 6 设两个决策组织 T_1 和 T_2 中各自成的级别相等, 但人数不等。对相同的信源 X , 它们对应的信息划分分别为 $A_i (i \in M)$ 和 $B_j (j \in N)$ 。若在相同的时间 t_0 内, 有 $Q[T_1, A_i (i \in M)] \geq Q[T_2, B_j (j \in N)]$, 称 T_1 的处理能力优于 T_2 , 记 $T_1 \geq T_2$ 。

3.2 决策组织的最优信息划分原理^[7, 8]

本小节研究的问题是: 对于给定的决策组织, 如何分配给每个成员信息才能使总的处理状态达到最佳。为了描述这个问题, 需要一种效能准则定义什么是最佳。此处主要考虑两点^[7, 8]。设等级别的组织有 M 个成员, $T = \{p_1, \dots, p_m\}$ 信息集 X 的最优模糊划分 $A_i (i \in M)$ 应满足以下条件:

(1) $\forall i, j \in M$, 有 $t_i = t_j$ (t_i 为第 i 个成员完全处理任务所需时间), 即 $t_1 = \dots = t_M$ 。由 $u_i(A_i) = Q_n(A_i)/t_i$, 可得, 对 $\forall i, j \in M$, 有 $Q_n(A_i)/u_i(A_i) = Q_n(A_j)/u_j(A_j)$, 即

$$\left[\sum_x \left(\mu_{A_i}(x) \log \frac{1}{p(x)} \right) \right] / u_i(A_i) = \left[\sum_x \left(\mu_{A_j}(x) \log \frac{1}{p(x)} \right) \right] / u_j(A_j) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} (2) Q[T, A_i (i \in M)] &= \max_{A_i (i \in M)} \left\{ \sum_{i \in M} [Q_n(A_i) I_m(A_i)] \right\} \\ &= \max_{A_i (i \in M)} \left\{ \sum_{i \in M} \left[\sum_{x \in X} \mu_{A_i}(x) \mu_{Q_i}(x) \right] I_m(A_i) \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

4 决策组织成员的信道模型^[5]

4.1 信息流的排队论模型

本节研究给定一个决策者, 如何配给他信息处理率才能使其工作状态最佳。信息流通过人机界面类似于一个排队论问题。设信息流的基本单位为一个 item, 按 item 划分可以把连续的信息流视为一个离散流。每一个 item 视为一个顾客, 则这样的流一般满足流的普通性、无后效性和平稳性。item 的定义应使下述命题为真:

命题 以 item 为单位的离散化的普通、无后效及平稳的信息流为 Poisson 流。

假定决策者处理一个 item 信息所需的时间服从指数分布, 即 $f(t) = \mu e^{-\mu t} (t > 0)$, 则每个决策者的人机界面就可以看成是一个单通道等待制 ($M/M/1$) 排队系统。用排队论分析这个界面, 可得:

- (1) 系统内队列长度 (item 数) 的数学期望 $L_{\text{系}} = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$;
- (2) item 在系统中平均逗留时间 $w_{\text{系}} = \frac{1}{\mu - \lambda}$;
- (3) 队列中 item 平均数 $L_{\text{队}} = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$;
- (4) item 的平均等待时间 $w_{\text{队}} = \frac{\rho^2}{\lambda(1 - \rho)}$, 其中 λ 为 Poisson 分布常数, $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$.

4.2 决策组织成员的信道特性

文献 [5, 7] 中近似导出人的信息处理数量与质量的关系模型 $\frac{Q_s^2}{a^2} + \frac{Q_i^2}{b^2} = 2ct$. a, b, c 为常数, Q_s 为信息处理数量, $Q_i = g(\mu_Q(x))$ 为处理质量. 上节得出人机界面系统中 item 的平均数为 $\frac{\lambda}{\mu - \lambda}$. 对于某个特定的人, 假设 μ 是一定的, 他处理每 item 信息所需时间的期望值是 $\frac{1}{\mu}$, 故处理 $\frac{\lambda}{\mu - \lambda}$ item 所需时间期望值为 $t_0 = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$. 在 t_0 时刻上 Q_s 与 Q_i 的关系为 $\frac{Q_s^2}{a^2} + \frac{Q_i^2}{b^2} = 2ct_0$. 考虑信息处理数量 $Q_s = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$ 个 item, 即人不闲的情况下处理所有已到达了的信息. Q_s 与 t_0 是相对应的, 此时处理质量

$$Q_i = b \sqrt{2ct_0 - \frac{Q_s^2}{a^2}} = \frac{b}{a} Q_s \sqrt{2ca^2(t_1 - t_2) - 1} \quad (9)$$

上式中 $t_1 = \frac{1}{\lambda}$ 为 item 到达系统的平均时间间隔, $t_2 = \frac{1}{\mu}$ 为人处理一个 item 所需的时间期望值, $t_1 > t_2$. 令 $\frac{dQ_i}{d\lambda} = 0$, 可得 $\lambda = \lambda_0 = \frac{ca^2\mu}{ca^2 + \mu}$ 时, Q_i 取极大值, 称 λ_0 为处理能力为 μ 的人的额定信息流. 人只有在处理与他匹配的额定信息流时, 质量和效率才最高.

上面导出的人的信道特性与文献 [6] 的实验结果相符, 其应用我们在另文中做了研究.

5 结束语

本文为揭示信息对决策系统的作用机理做了一些基础性的定量工作. 文中研究了决策系统结构与效能间的作用关系, 从而提出了决策系统信息结构的优化原则. 研究的重点放在了决策组织信息结构的优化问题上. 文中首先阐述了决策系统的结构及其描述方法, 而后从不同的方面研究了信息与决策系统各层次的结构间的关系问题. 虽然这样研究是初步的, 但随着研究的进一步深入, 必将有重要的应用价值.

参 考 文 献

- [1] 罗雪山. 描述决策组织的信息理论模型综述. 全国信息论与通信理论学术会议论文, 青岛, 1989-10 (国防科技大学论文报告资料 89-7058)
- [2] Levis A H and Boettcher K L. Decisionmaking Organizations with Acyclical Information Structures. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, May/June, 1983, SMC-13(3)
- [3] K. 亚伯拉罕, C.L. 塞缪尔著, 楼世博译. 模糊开关和自动机理论和应用. 上海科技出版社, 1984
- [4] Conant R C. Laws of Information Which Govern Systems. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 1976, SMC-6; 240~245

- [5] 罗雪山. 人信息处理的排队论模型及人的信道特性. 系统工程与电子技术, 1989, (8)
- [6] Pattipati K R and Klienman D L. Analysis of Human Decision—making in Multi—task Environments. Univ. of Conn. Tech. Report, 1979, EECS—TR—79—15
- [7] 罗雪山. 信息处理的模糊性描述与评价理论及其在决策系统中的应用. 大自然探索, 1990, (2)
- [8] Luo Xueshan. The Fuzzy Descriptions of Information Processing in Human Decisionmaking Process. Advancement of Fuzzy Theory and System in China and Japan, International Academic Publishers, 1990
- [9] Luo Xueshan. Fuzzy Laws of Information for the Fuzzy Valued Systems. Proc. of the First International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis. IEEE Computer Society Press, December, 1990
- [10] Mileta M. Tomovic. On the Design of Organizational Structures for Command and Control. Lab. for Information and Decision Systems, MIT

Exploring the Information Mechanism in Decision Systems

Luo Xueshan

(Department of System Engineering and Mathematics)

Abstract

From the viewpoint of the relationship between information and decisions, several information characteristics of the decision systems are discussed. The aim of this research is to do some fundamental studies for the purpose of revealing that the information affects the decisions in proper way. In this paper the relationship among the information and the structures and the performances of decision systems are explored in detail.

Key words information, decision systems, decisions, information processing, optimization, information structure