

Method of System Analysis and Design Based on Perceptual Control Theory

Yichun Luan, Hongjun Xue, Bifeng Song

College of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China

Email: zylyc@nwpu.edu.cn

Abstract: Conventional system analysis and design views the operator as an input-output device. The goal is to describe operator inputs, outputs and the rules that relate them. Decomposition of function and task traces top-down. A method of system analysis and design based on Perceptual Control Theory views the operator as a perceptual control system, the goal of the analysis is to determine the variables that the operator is to keep under control and the means the operator must have to affect this control. Decomposition of function and task traces top-down and bottom-top. This new method integrates the analysis, allocation, design of interface and training process. The instance proved that the combination of those processes was better and more logical.

Keyword: perceptual control theory; system analysis; hierarchical goal analysis; man-machine interface

基于感知控制论的系统分析与设计方法

栾义春, 薛红军, 宋笔锋

西北工业大学航空学院, 西安, 中国, 710072

Email: zylyc@nwpu.edu.cn

摘要: 传统的系统分析与设计方法把操作者看作输入输出机器, 采用自上而下的方式进行, 分析的目的是描述操作者输入、输出和两者的关联规则。基于感知控制论的系统分析方法把操作者看作一个感知控制系统, 采用自上而下和自下而上的方式进行, 分析的目的是确定操作者控制的变量, 实现控制所采取的手段, 把系统功能分析、功能设计、功能分配、人机界面设计以及人员培训等集成到一起。最后的实例分析论证了这种方法使各过程的关联更加紧密, 逻辑性更强。

关键词: 感知控制论; 系统分析; 层级目标分析; 人机界面

1 引言

目前随着计算机等智能技术的发展, 系统的复杂化和任务难度的增加, 单靠某个人完成一项复杂的任务是不现实的, 更多的是人与人、人与机器的协作。因此, 关于人与人之间的协同、人与机的匹配的研究被重新重视, 并具备了新的特点。找寻人与人、人与机共同的工作机制, 以此作为系统分析和设计的基础, 才能使设计出的协作方案和系统工作绩效更高。

感知控制论 (Perceptual Control Theory, 简称 PCT) 汲取了信息理论、控制理论和系统论的精华, 把人的有目的的认知简化为具备输入、输出以及处理的信息加工过程^[1]。感知作为输入, 操作行为作为输出, 知觉、注意、记忆、思维与决策等作为加工过程。

资助信息: 国家重点基础研究发展计划资助, 2010 CB734101

外界信息作用于人的感觉器官, 通过肢体等行为对外界环境做出反应, 同时接收到外界的反馈信息, 这一切以目的为导向。感知控制论也可作为机器的工作机制, 两者都包括输入、处理与输出, 人与人之间、人与机之间的协作通过对共同所处的外界环境的作用来实现。因此, 基于感知控制论的系统分析和设计是一种新型的方法, 分析的更全面, 设计出的协作方案和系统工作绩效更高。

2 系统分析与设计过程

系统分析与设计过程一般包括建立目标、功能分析、功能分配、界面设计、系统综合与评价等^{[2][3]}。系统功能分析关系到系统功能设计与分配, 影响系统详细设计、系统软件和操作界面的开发。传统的系统分析方法把操作者看作输入输出机器, 采用自上而下的

方式进行，分析的目的是描述操作者输入、输出和两者的关联规则。功能分析、功能分配与界面设计是分开进行的，往往是一项任务完成，才能进入下一项任务，出现问题时，重新展开分析。

传统的系统分析方法围绕目标进行，即在确定系统目标后，寻求实现该目标的手段，此时可能有多个可行方案，可行方案越多，选择的余地越大，从而需要在一定的限制条件下选出较好的方案，往往采用树状具有关联的功能设计展开法，其核心是从“为什么”到“怎么做”。每一等级中上位是目标，下位是功能。各等级的目标和相应的功能之间，从目标找功能时是“怎么办”，从功能找目标则是“为什么”。

3 感知控制论

感知控制论的核心是所有行为都是感知的控制。人通过采取行为来减少目前状态感知和目标期望（参考）的差异，如果目前状态的感知没有趋向于期望的目标则会改变行动，这个循环称为基本控制单元（Elementary Control Unit，简称 ECU）。如图 1 所示，“感知输入功能”的形式决定或定义了综合环境变量，是外界环境的物理观测量的函数，也是系统的内部变量。感知信号与目标进行比较，差异被认定为误差信号。输出功能将这些误差信号产生分类输出，对环境产生不同的物理作用，在控制有效的情况下，将感知信号的值趋向目标值进行了改变，减少误差。基于目标的分层分析，PCT 成为多层 ECU 构成的层级结构。其组织方式是： n 水平的 ECU 的输出信号影响几个 $n-1$ 水平的 ECU 的目标输入，而 $n-1$ 水平的 ECU 加工的感知信号则服务于 n 水平的 ECU 的感知输入功能的输入，最终最低水平的输出引发肌肉行为。

随着感知控制论的完善和发展，结合认知心理学中记忆和学习机制，Powers, Hendy 提出了具备记忆和学习机制的感知控制论^{[4][5]}。在进行感知信息获取时，有两种信息，一种是与目标期望进行比较的信号，一种是改变内部记忆的信息。进行记忆和学习时，没有行为输出，不会对外界环境造成改变，但改变了人对外界的认知和记忆，如图 2 所示。

人通过一些变量参数对外界环境施加他们的影响，如同人通过目标来确定不同控制循环的参考点，机器也有系统设计者事先设定的不同的参考值或程序设定的目标。因此感知控制模型能够同时应用于人和机器，被看做是人和具有智能的机器相通的模型，人与人、人与机的协作是这些智能体对他们共同所处的

外界环境的感知、理解和作用。图 3 中人甲与人乙都对他们共同所处的环境做出一些行为，由于行为的多样性他们的控制循环可能存在不耦合。Powers 指出甲与乙的耦合程度依赖于甲与乙试图对同一环境变量做出的行为，以及这些变量经过线性转化形成感知的深度^[6]。耦合程度很低的时稳定性特别重要，目标、感知输入和行为输出的转换必须达到很好的契合。因此为了实现智能体协作的总体稳定性，控制循环必须分层级，并基于共同的目标和相同的智能模型，为每个智能体定义角色和功能分配，是多智能体的协作最重要的。

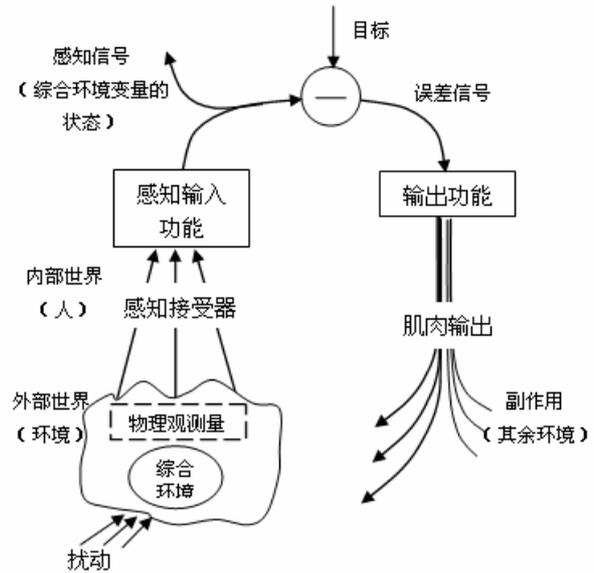


图 1. 感知控制论核心理念

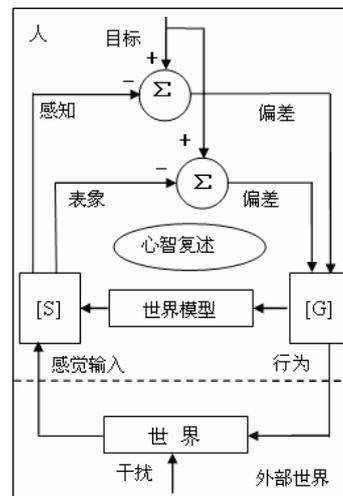


图 2. 具备记忆和学习机制的感知控制论模型

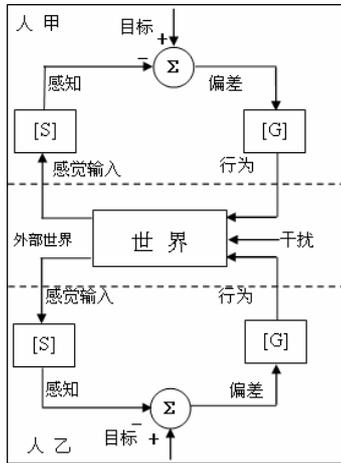


图 3. 基于感知控制论的多智能体协作模型

4 基于感知控制论的系统分析与设计方法

4.1 基于感知控制论的系统分析与设计方法

Hendy 等人建议按照目标层级、网络、次序或其他连接方式连接为逻辑网络来分析系统功能，然后进行建模或预测行为^[5]。基于感知控制论的系统分析方法把操作者看成一个感知控制系统展开分析，操作者可能是人，也可能是机器，目的是确定操作者控制的变量，以及实现控制所采取的手段。基于感知控制论的系统分析方法把系统分析、功能设计、功能分配、人机界面设计以及人员培训等集成到一起，关联紧密，逻辑性强。基于感知控制论的系统分析方法实现包括三个步骤：

1. 自上而下的目标层级分析，采用目标-手段分析法，从最抽象到与现实世界关联的变量参数。设计每个目标中人或机的功能和任务，定义每个目标对应的操作变量参数；

2. 自下而上的任务分析，尽量充分考虑系统运行期间存在的所有情况，针对每种情况，设计完备的操作序列，与第一步中的目标对应；

3. 设计操作序列列表，以图示的方式描述系统对每种态势的处理和衔接，智能体之间的通信和联系。

基于感知控制论的系统分析与设计方法具有三个特点：

1. 功能分析、设计与分配紧密结合。基于感知控制论的系统分析方法以目标为主线，目标采用手段-目的分析法自上而下展开层级分析，从最抽象到最具体与现实世界相关联的变量参数的目标层级结构，表征了系统生命周期中被激活的控制循环层级，任何不

被循环支持的目标对外界环境没有影响力，也没有行为输出。同样，所有受影响的系统变量都与某个目标有关联。所有的控制循环包含一个或多个影响变量，一个目标必须至少对应一个变量。如果任一水平的反馈中断的话，就没有闭环控制，如果循环不可控的话，也就没有偏差引导。因此，所有的目标必须被分配给人或机，即对人与机进行角色分配和控制权限的划分，这也是基于感知控制论的系统分析方法的独到之处。

2. 最低层目标对应的变量是与现实世界相关联的可直接操作的变量，是人或机通过操作行为控制和改变的变量，亦即交互界面上的操作变量。人与机之间的功能分配不是 0 或 1 的关系，存在多种交互水平，如机为人提供的各种辅助方式，召唤、建议、否决等^{[7][8]}。在进行人机界面设计时，一是获取操作变量，二是设计这些变量改变的方式。通过基于感知控制论的系统分析与设计方法，直接得到人机界面操作变量，从而为人机界面设计提供良好的基础。

3. 在感知控制论中，行为一般是控制感知的“副产品”，而不是有意识的以某种特殊方式行动的结果。基于感知控制论系统功能/任务分析的结果不是描述一组操作者为了实现任务目标必须采取的特定行为，而是操作者在所有可能的外部条件影响下采取的有效行为的范围。依据所有的行为都是感知控制行为这一理论，推出固定不变的结果通过变化的行为得到，固定的行为却得到变化的结果。这种新型的功能分析方法与传统任务分析不同之处在于任务目标的达成，不再是依靠一组固定的行为，而是存在多种方式实现同一任务目标。

4.2 实例分析

对无人机系统任务规划与控制站展开分析。无人机系统参与作战时，通常包括无人机，具有辅助决策性能的任务规划与控制站，操作员和指挥员，无人机又分为长机和僚机等。这些具有智能和自主能力的作战单元之间的协作基于感知控制论的系统分析法实现。

1. 从分析专家讨论议定的作战场景和任务脚本开始，综合各作战单元性能等建立功能库，然后从这些任务或功能中剖析出第一层目标，第二层目标，甚至第三，第四层目标，直到与现实世界相关联的最低一层目标，而与一般任务体系结构相关的功能库在对特定任务场景的剖析和分解过程中重新加以评定，如表 1 所示，包括每项功能操作的参数或变量。

表 1. 自上而下层级功能/任务分析

一级目标	二级目标	三级目标	参数
3 战术任务决策和管理	3.1 任务规划	3.1.1 装载任务	任务信息
	
	3.2 任务决策与管理	3.2.1 任务执行监控	态势信息
	
	3.3 搜索和探测区域	3.3.1 规划搜索区域	经纬度/相对方位
	
3.4 目标的搜索和定位	3.4.1 机载传感器参数调整	传感器参数	
.....	

2.场景的每时每刻，都有指挥员、操作员、无人机在执行最底层的任务目标。每个时间点只有一项功能或任务发生，但同一项功能或任务却可以在场景中不同时间发生，且具有一个不同的、独一无二的任务号。除了最底层的任务，还包括任务执行等级，执行者，与自上而下的任务对应的序号。任务执行等级包括 0 手动，1 召唤，2 准许，3 否决，4 自动。建议与否决是介于自动与手动之间过渡的操作方式，在自动的可靠性无法完全被验证之前，采用建议与否决的方式，即减轻了操作人员的负担，又能掌握无人机的执行能力，当无人机执行能力下降，或者说任务执行的可靠度降低时，操作人员能够超控或进行调整^[7]。某些任务是随机的，可能发生，也可能不发生，比如说系统报警，威胁报警等。

表 2. 自下而上功能/任务分析

序号	任务描述	执行等级	对应自上而下任务
14	空空数据链测试	4	1.2.1
15	测试完好消息	4	5.2.13
16	无人机状态确认	0	5.1.1.5
17	下达任务开始执行指令	0	5.1.1.1
18	接收到任务开始指令	0	5.1.1.1

3.操作序列图基于任务活动时间，使用图标来图示化动作、检查、数据处理（比如传输，接收，存储）时间延迟，决策等，展示系统整个信息流和操作员功

能，图形化地解释任务想定进行中操作员任务的逻辑互联和信息流。如图 4 所示。这种视觉表征很适合层级目标分析和网络模型的构建，特别用在高度复杂系统，多个人员一起完成时间紧急的信息感知、处理、决策、执行等功能和任务。

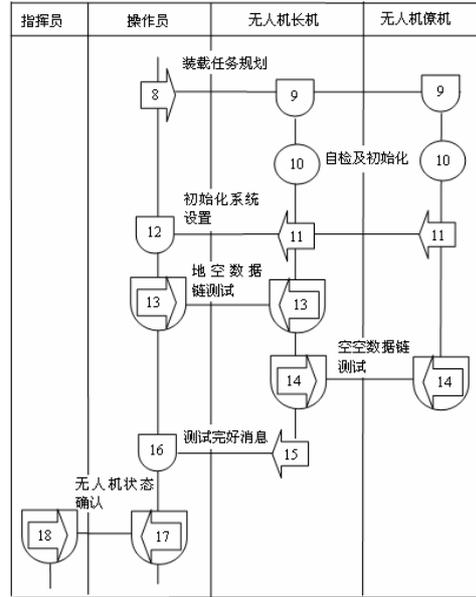


图 4. 操作序列图

5 结论

基于感知控制论的系统分析与设计方法将功能分析、功能分配与人机界面设计集成到一起进行。与传统的系统分析设计方法相比，这种方法支持任何时间段的功能或任务的自上而下和自下而上的扩展分析；所有的目标必须被分配给人或机，即对人与机进行角色分配和控制权限的划分，充分考虑了人与人的协同、人与机的协作；通过分析，直接获取操作变量，为人机界面设计提供了强有力的支持；更易于实现多智能体交互的系统的分析和设计。

致 谢

在薛红军老师的帮助下完成了论文的撰写工作，在此表示感谢；除了国家重点基础研究发展计划的资助，论文的工作内容还基于与某研究所的合作项目，在此也一并表示感谢。

References (参考文献)

[1] Powers, W.T. Feedback:beyond behaviorism, Science,179(4071),

- 351-356.
- [2] MIL-HDBK-46855A, Human Engineering Program Process and Procedures, Washington, DC, USA:Department of Defense.
 - [3] IEEE-1220. Application and Management of the Systems Engineering Process. Piscataway, NJ, USA: Institution of Electrical and Electronic Engineers.
 - [4] Powers, W. T. Learning and Evolution. In W. T. Powers, Ed. Living Control Systems II, Gravel Switch, KY: The Control Systems Group. 1992, pp 233-240.
 - [5] Hendy, K. C., Beevis, D., Lichacz, F., and Edwards, J. L., Analyzing the cognitive system from a perceptual control theory point of view. In, Cognitive systems engineering in military aviation environments: Avoiding cogminutia fragmentosa: A report produced under the auspices of the Technical Cooperation Programme Technical Panel HUM TP-7 Human Factors in Aircraft Environments. Human Systems IAC, Wright-Patterson AFB, OH. 2002.
 - [6] Powers, W.T. CT psychology and social organizations. In, G. Williams (Ed.) Living Control Systems II-Selected Papers of William T.Powers, Gravel Switch, KY: USA: The Control Systems Group. 1992, pp 91-127.
 - [7] Parasuraman R, Sheridan T B, Wickens C D.A model for types and levels of human interaction with automation[J]. IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics, 2000, 30(3): 286-297.
 - [8] LUAN Yi-chun , XUE Hong-jun, SONG Bi-feng, *et al.* Experiment on levels of decision aiding inUCAV system. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(5): 222-224.
栾义春, 薛红军, 宋笔锋等. 无人作战飞机系统的辅助决策等级实验研究. 计算机工程与应用, 2009, Vol.45, No.5, pp 222-223.