

基于有向图的综合航电系统结构设计及优化方法

丛伟, 樊晓光, 于宏坤
(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: 结构设计和优化方法关系到航电系统乃至战机可用性、扩展性和可维护性等多方面。分析系统结构设计过程, 明确设计步骤, 用于指导系统结构的构建。基于有向图理论, 提出系统结构有向图的概念, 并给出了数学描述。在此基础上, 进一步阐述了结构优化算法, 对系统结构有向图进行横向和纵向分解, 建立了一种层次化的资源关联结构, 为结构设计提供理论依据。最后, 以实例说明了该方法的有效性。

关键词: 综合航空电子系统; 结构设计; 有向图; 层次分解

中图分类号: V271.4; TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)01-0011-04

Structural Design of an Integrated Avionic System Based on Directed Graph and Its Optimization

CONG Wei, FAN Xiao-guang, YU Hong-kun
(Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The structural design and optimization method is directly relevant to the avionic system as well as the survivability, expansibility and maintainability of the whole aircraft system. The design process is analyzed and the design steps are confirmed to construct system conveniently. A concept of the directed graph of system structure is proposed and the mathematical description is also presented based on directed graph theory. On this basis, an optimization method is further introduced. The structural directed graph of the system structure is decomposed vertically and horizontally, and a hierarchical association structure is set up for the system resources, which may supply a theoretical basis for structural design. Finally, an example demonstrates the effectiveness of the proposed method.

Key words: integrated avionic system; structural design; directed graph; hierarchical decomposition

0 引言

综合航电系统是现代战机的“中枢神经”, 承载着大部分任务功能, 如通信导航识别、目标探测、武器瞄准与控制等, 是决定战机作战效能的重要因素。结构设计是航电系统设计的重要部分, 关系到航电系统乃至战机可用性、扩展性和可维护性等多方面。

但是, 在结构设计初期, 系统资源间的信息交互关系错综复杂, 既有底层资源的横向联系, 又存在上下层资源的纵向关联, 形成了一个纵横交错的结构关系网^[1]。资源关联的复杂趋势带来了两方面问题: 1) 导致系统结构很难适应需求和环境的改变, 一个资源的增

加、删除往往导致整个系统功能的变更; 2) 结构关系网中信息传递路径增多, 会造成数据不一致, 甚至冲突^[2]等问题。因此, 迫切需要研究结构设计和优化方法, 规范资源间的信息交联关系, 保证信息的一致性和可靠性, 从而提高系统结构对资源更改的适应性, 使系统结构能够适应不断变化的功能升级、系统改进等需求^[3]。

基于此, 提出航电系统结构设计和优化方法, 主要介绍3方面内容: 1) 分析系统结构设计过程, 明确结构设计步骤, 用于指导系统结构的构建; 2) 阐述基于有向图的结构优化过程, 将系统功能模块抽象为图的节点, 用图的有向边表示功能模块间的信息关联, 建立系统结构有向图(System Architecture Directed Graph, SADG), 并给出数学描述。在此基础上, 进一步阐述系统结构优化算法, 对SADG进行横向和纵向分解, 建立一种层次化的功能模块关联关系, 为系统结构设计提供参考。最后, 以实例说明该方法的有效性。

收稿日期: 2013-03-06

修回日期: 2013-03-24

基金项目: 航空科学基金资助项目(20101996012)

作者简介: 丛伟(1973—), 女, 辽宁铁岭人, 博士生, 讲师, 研究方向为综合航电、检测技术与自动化装置。

1 系统结构分析

为研究结构设计和优化问题,本文将航电系统抽象描述为:接受输入或激励,产生输出^[4],如图 1 所示。

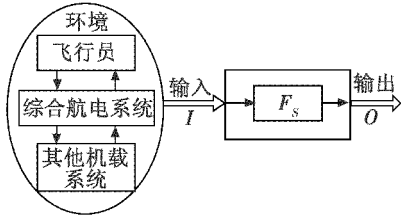


图 1 综合航电系统模型

Fig. 1 Integrated avionic system model

这一行为可表达为^[3-4]

$$O(m) = F_s(I(n)) \quad (1)$$

式中: $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$, 为输入集合; $O = \{o_1, o_2, \dots, o_m\}$, 为输出集合; F_s 为系统功能,表现为系统对外部输入的处理过程。

定义 1 功能模块是具有特定功能的实体,具有接口特征和激励、响应、时限等工程约束。

基于功能模块的定义,可将航电系统的功能 F_s 表述为多个功能模块的非空集合,即 $F_s = \{f_{s_1}, f_{s_2}, \dots, f_{s_n}\}$ 。在此基础上,系统结构可进一步表述为 f_{s_i} 之间的信息依赖关系^[5],如图 2 所示。

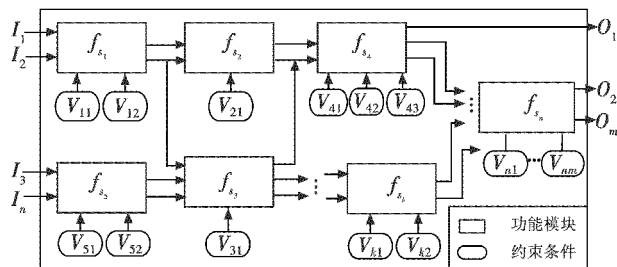


图 2 综合航电系统功能结构

Fig. 2 Functional architecture of integrated avionic systems

由图 2 可知,航电系统结构设计的实质是对系统输入的求解过程,即依据系统输入(如传感器信息、飞行员命令等),合理配置多个功能模块的信息交联关系,得到输出结果(如导航信息、武器攻击信息等)。因此,从功能模块关联的角度看,信息关联程度的强弱(如松耦合、紧耦合等)影响着系统结构的复杂度。

信息关联可用参数传递路径进行描述,后者包括直接路径和间接路径两类。其中:直接路径表现为 2 个功能模块间直接信息关联;间接路径是指 3 个或更多功能模块之间存在的信息关联关系。如图 2 所示, $f_{s_1} \rightarrow f_{s_2}$ 为直接路径, $f_{s_1} \rightarrow f_{s_3} \rightarrow \dots \rightarrow f_{s_n}$ 的路径为间接路径。系统结构求解的目的,不仅要满足将输入 $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ 变换为输出 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_m\}$ 的功能需求,更重要的是,要使解集中间接路径最短,同时尽可能使

直接路径仅存在纵向信息关联,减少横向信息耦合。

2 系统结构设计过程

本文依据系统工程领域的解释结构模型^[6],描述航电系统结构设计过程,如图 3 所示。

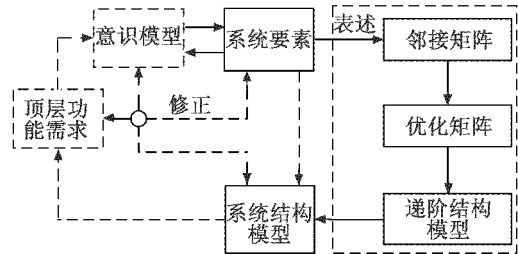


图 3 系统结构设计过程

Fig. 3 Design process of system architecture

系统意识模型分析始于顶层功能需求,意识模型作为功能需求的分析结果,是系统初步的概念模型,也是系统结构设计的驱动因素^[3,6]。在此基础上,实现意识模型的具体化、规范化,即进一步明确系统各要素,判断各要素之间的二元关系,并用矩阵描述系统结构,通过矩阵的优化处理后得到最优的结构描述^[5]。

在系统结构的优化过程中,将系统结构有向图表述为邻接矩阵,通过对邻接矩阵进行分解、缩约和简化等优化处理,得到反映系统递阶结构的优化矩阵,据此重新绘制系统结构的多级递阶有向图,形成递阶结构模型^[4-5],在此基础上,建立反映系统二元关系的结构模型。最后,将系统结构模型与意识模型进行比较,如不符合,可对系统要素及其二元关系进行修正,更重要的是,可用优化后的系统结构模型进一步指导意识模型的构建。

3 系统结构优化方法

系统结构优化方法对结构有向图的节点集进行分层,使得任意层的节点仅能接收其直接相邻下层节点的信息,并将本层处理结果输出至其相邻上层。这种层次形象描述了信息从底层向高层的逐级单向传输的特点,其结果使系统结构设计中信息传递路径最短。

3.1 系统结构有向图

系统结构有向图是将具体系统的各个功能模块抽象为图中的节点,把功能模块的关联关系抽象为连接两个节点的有向边之,从而将具体系统的结构模型化为系统结构有向图,令

$$F_s = \{f_{s_i} | f_{s_i} \in F_s\} \quad (2)$$

式中, f_{s_i} 为功能模块, $i = 1, 2, \dots, n, n \geq 2$ 。

功能模块之间的关系用 R 表示,设 $f_{s_i} \in F_s, f_{s_j} \in F_s$, 两者的关系可表述为 $f_{s_i} = R(f_{s_j}), f_{s_j} = R(f_{s_i})$ 。

在本文中, R 表示功能模块间的信息关联关系,有

如下要求^[1,6]：

1) 如果存在 aRb , 则不能存在 bRa , 即功能模块不能两两相互关联；

2) 不允许 aRb, bRc, cRa , 即不允许 3 个或更多要素之间循环关联。

由此, 系统 S 可表述为

$$S = \{F_s | R\} \quad (3)$$

即系统 S 可用具有 R 关系的集合 F_s 来表达。

3.2 系统结构层次优化算法

该算法利用邻接矩阵表述系统结构有向图, 若 $SADG$ 中有 n 个节点, 则用 $n \times n$ 邻接矩阵 A 表示, 定义为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{存在节点 } i \text{ 到 } j \text{ 的边} \\ 0, & \text{不存在节点 } i \text{ 到节点 } j \text{ 的边} \end{cases}$$

基于 $SADG$ 的矩阵表示, 结构优化步骤如下：

1) 计算各节点的可达集、先行集和共同集, 若对于某节点 a_i 的先行集和可达集相同, 则 a_i 就是第 i 层节点^[7]；

2) 去掉已经分层的节点和与这些节点相连的边, 得到新的有向图 G' ；

3) 重复 1) 和 2), 直至将所有的节点分层。

若系统分为 m 层, 可将每层节点等效为一个节点集, 用 P_1, P_2, \dots, P_m 表示, 经分层优化后的系统结构如图 4 所示。

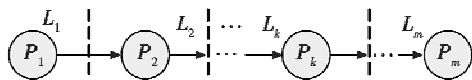


图 4 层次优化的系统结构图

Fig.4 System architecture graph of hiberarchy optimization

4 实例分析

“支持飞行员感受战场环境和状态、支持飞行员发射进攻和防御性武器”^[8-9] 是某战机赋予综合航电系统的顶层功能定义, 其中, 支持飞行员感受的战场环境包括载机环境 (如位置、高度、姿态等) 和威胁环境 (如威胁源位置、类型等), 状态主要指全机设备 (如发动机、电源等) 正常或故障的工作状态。“支持飞行员发射进攻和防御性武器”进一步表述为: 飞行员选择武器时, 系统辅助飞行员识别危险位置/类型、确定干扰方式、制导武器命中目标等。

基于系统顶层功能定义分析, 构造 $SADG$ 见图 5。

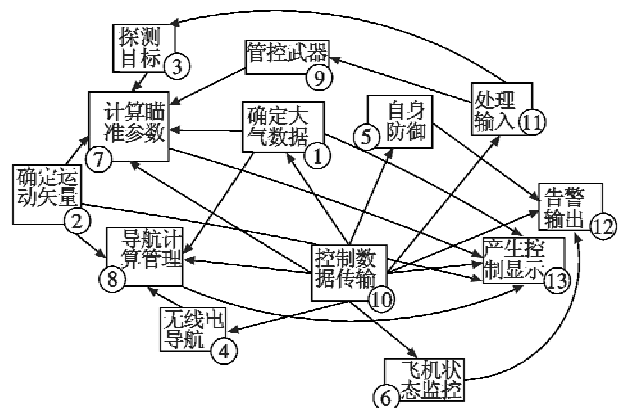


图 5 航电系统结构有向图

Fig.5 Architecture directed graph of avionic system

根据 $SADG$ 可以得出邻接矩阵 A , 将邻接矩阵 A 并上单位矩阵 E , 再利用 Warshall 算法^[10] 计算出可达矩阵 P , 结果为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

可达矩阵的转置就是先行矩阵, 根据可达矩阵和先行矩阵得出 a_i 的可达集 $R(a_i)$ 、起始集 $B(a_i)$ 、先行集 $A(a_i)$, 最后求出两者的交集 $C(a_i)$ 和起始集 $B(a_i)$, 结果如表 1 所示。

表 1 节点可达集、先行集、交集和起始集

Table 1 Reachable set, antecedent set, intersection set and original set

a_i	$R(a_i)$	$A(a_i)$	$C(a_i)$	$B(a_i)$
a_1	1,7,8,13	1,10	1	
a_3	3,7,13	3,10,11	3	
a_4	4,8,13	4,10	4	
a_5	5,12	5,10	5	
a_6	6,12	6,10	6	
a_7	7,13	1,2,3,7,9,10,11	7	
a_8	8,13	1,2,4,8,10	8	
a_9	7,9	9,10,11	9	
a_{10}	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13	10	10	10
a_{11}	3,7,9,11,13	10,11	11	
a_{12}	12	5,6,10,12	12	
a_{13}	13	1,2,3,4,7,8,10,11,13	13	

由层次优化方法可得第一层节点为节点 10,进一步依据层次优化方法可将 SADG 的节点分为 4 层,如图 6 所示。

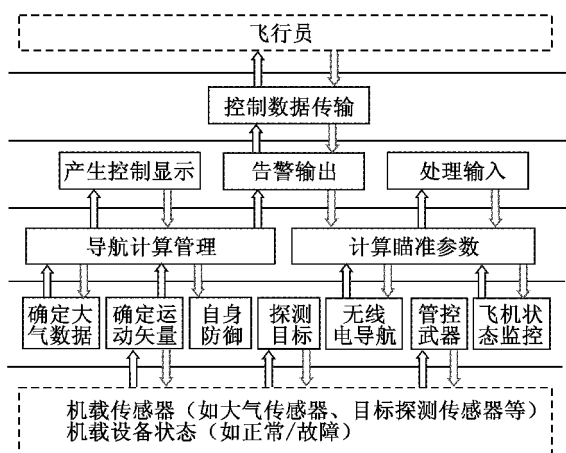


图 6 航电系统层次结构

Fig. 6 Avionic system hierarchy

经层次优化后的系统结构具有如下 2 个特点。

1) 层与层之间仅存在两类信息传输关系:①自顶向下的控制信息(比如飞行员的命令);②自底向上的数据(如探测目标功能模块输出的目标信息等)和状态信息。下层功能模块仅与其直接上层功能模块存在信息交联关系,各层之间不能“越级”传输控制、数据和状态信息。系统信息的单向传输,缩短了数据间接传递路径,简化了数据交联关系。

2) 同层功能模块之间不存在信息耦合关系,一个功能模块的修改并不影响同层内其他模块。功能模块独立性便于层内功能升级和维护。此外,只要层间接口不变,某层功能模块的改变并不会对其他层造成影响,从而保证结构的稳定性,也提高了结构的功能适应性。

5 结束语

战机的任务使命决定了航电系统的功能需求,任务使命不同,赋予航电系统的功能也不同,如歼击机的战斗任务决定了航电系统具有空空、空地作战功能,而协同作战任务则要求航电系统要有陆、海、空的互连互通能力。航电系统功能的多样性和综合性也给系统结构设计带来了新的挑战:一方面要从系统体系出发,依据自上而下的顶层设计思想,从系统整体出发,考虑结构要素及其交联关系;另一方面要尽可能减小资源耦合,缩短信息传输路径,保持系统结构的开放性,以适合不断变化的功能以及作战需求。

本文提出了综合航电系统的功能模型,明确了影响系统结构复杂度的主要因素。在此基础上,综合应用系统工程和图论建模理论,构建了 SADG,并利用层次分解算法,对结构设计中的信息传递路径进行优化,

最终得到递阶层次模型。本文方法可为综合航电系统结构设计提供参考,但是,系统结构优化的定量判定方法是需进一步研究和解决的问题。

参考文献

- [1] 李勇,吴庆鸣,周超. 广义模块参数关联结构有向图表示方法研究[J]. 计算机集成制造系统,2009,15(12):2312-2318.
LI Y, WU Q M, ZHOU C. Representation of parameter association structure for generalized modular by directed graph [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(12):2312-2318.
- [2] FANG S L, SHEN Z H. Parameters transfer structure for complicated product variant design [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(12):1934-1938.
- [3] SCHULZ M, ZERBE V, YANG K, et al. Optimization of avionic system architectures [J]. CEAS Aeronaut Journal, 2011, 2:289-294.
- [4] 卢捍华,张顺颐,王亚石,等. 系统体系方法与软件系统功能形式分解[J]. 通信学报,2010,31(12):131-139.
LU H H, ZHANG S Y, WANG Y S, et al. System of systems method and formal function decomposition for software systems [J]. Journal on Communications, 2010, 31(12):131-139.
- [5] 李国喜,吴建忠,张萌,等. 基于功能-原理-行为-结构的产品模块化设计方法[J]. 国防科技大学学报,2009,31(5):75-80.
LI G X, WU J Z, ZHANG M, et al. Approach to product modular design based on FPBS [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(5):75-80.
- [6] 汪应洛. 系统工程[M]. 4版. 北京:机械工业出版社,2011:23-30.
WANG Y L. System engineering [M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2011:23-30.
- [7] 陈侃,李昌禧. 故障传播有向图的故障定位研究[J]. 自动化仪表,2011,32(4):14-17.
CHEN K, LI C X. Research on the Fault localization based on directional graphic of fault propagation [J]. Process Automation Instrumentation, 2011, 32(4):14-17.
- [8] CARCENAC F, BONIOL F. A formal framework for verifying distributed embedded systems based on abstraction methods [J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2006, 8(6):471-484.
- [9] SHEIKH A A, BRUN O, HLADIK P E, et al. Strictly periodic scheduling in IMA-based architectures [J]. Real-Time Systems, 2012, 48(4):359-386.
- [10] 郭志军. Warshall 算法的 C 语言实现 [J]. 长沙大学学报,2008,22(5):69-71.
GUO Z J. C language realization of warshall algorithm [J]. Journal of Changsha University, 2008, 22(5):69-71.