

# 基于 LPS 模型的飞行器控制系统故障诊断方法\*

曾庆华, 黄哲志, 贾涛, 陈龙志

(国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**传统故障诊断方法一般针对测量信号而展开,未考虑其实际物理连接特性对故障诊断结果的显著影响。随着专业电气系统设计软件的广泛应用,设计人员容易获取系统的物理连接特性和逻辑连接特性。论文通过对产品层、系统层的信号、物理连接及其互连关系的分析,提出了一种将抽象的逻辑信号和具体的物理连线统一起来的逻辑物理综合(LPS)模型,并研究了基于导线表文件和网表文件的LPS模型实例化方法,开发了一套智能故障检测软件,进行了算例验证,结果表明:基于LPS模型的故障诊断方法能够将系统故障定位到指定产品级别上,具有极大的工程应用价值。

**关键词:**故障诊断;关系模型;控制系统

**中图分类号:**TP206+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)05-0020-06

## A fault diagnosis approach research based on LPS model for flight control system

ZENG Qinghua, HUANG Zhezhi, JIA Tao, CHEN Longzhi

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The traditional fault diagnosis method is generally based on the measuring signal, without considering the actual physical connection characteristics, but these characteristics affect the diagnosis results. With the wide application of professional electric system design software, system designers can easily obtain the physical connection characteristics and logical connection characteristics. By analyzing the signals of product layer or system layer, physical connection and its interconnected relationship, a set of logical physical synthetically (LPS) model, which unifies the abstract signal and the physical connection, was presented to study the LPS model instantiation method based on wire table and net table, and a set of intelligent fault detection software was developed. An example for validation was demonstrated: the fault diagnosis method based on LPS model can isolate the fault to the specified product level, with great value of engineering application.

**Key words:** fault diagnosis; relationship model; control system

随着飞行器控制系统智能化程度的不断提高,对维护保障人员的专家知识水平要求越来越高,目前大部分维护保障工作都离不开领域专家;各种地面测试手段不断完善,测试信息越来越丰富,但其综合分析手段却十分有限<sup>[1-2]</sup>。由于飞行器控制系统是以信号传输为主要特征的机电混合系统,一般由弹载计算机、舵系统、惯性组合等多个层次的产品(在此,产品泛指任何元器件、零部件、组件、设备或分系统,还可指硬件、软件或两者的结合<sup>[3]</sup>)所组成,产品之间通过导线连接成为系统,系统内通过信号的运算、变换、传递来实现特定功能,领域专家的诊断大多基于信号流的故障传播关系而开展<sup>[4]</sup>。因此,基于信号互连的诊断方法在飞行器控制系统的故障诊断中也获得了广泛应用。Koscielny 等对这种基于信号互连关系的图论模型开展过基于诊断矩阵、诊断图、诊

断代数相结合的方法研究<sup>[5-6]</sup>;NG 等将数字和模拟电气设备的结构表述为一种层次化互连模块的语义网络,以此建立专家系统进行故障诊断<sup>[7]</sup>;Lu 等针对运载工具中 CAN 总线结构下的信号互连拓扑结构的故障诊断问题进行了研究<sup>[8]</sup>;Sreenuch 等甚至针对齿轮箱系统的振动信号进行分析,建立其振动信号传递的分布式模型,对其开展健康状态的监测<sup>[9]</sup>;吴灿、唐小峰等<sup>[10-12]</sup>在前人工作的基础上,针对箭载控制系统互连结构模型进行过系统级和组件级诊断方法的应用研究,形成了一套行之有效的方法。该方法包括三个主要步骤:

(1) 针对每个产品,确定其输出信号集  $O$ 、输入信号集  $I$ 、故障模式集  $H$ ;

(2) 针对每个产品,利用先验知识,建立输出信号集与输入信号集之间、输出信号集与故障模

\* 收稿日期:2013-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174120)

作者简介:曾庆华(1966—),男,湖南安乡人,研究员,博士,E-mail: zqhk@ qq. com

式集之间的二元关系集合,生成两个关系矩阵;

(3)利用产品间的信号传递关系,进行产品间关系矩阵的综合运算,形成一个系统级关系矩阵,以此为基础进行故障诊断推理。

但是,这些方法所描述信号实际上是一个逻辑功能的抽象概念,并不是专业电气设计软件中的连接导线,未包含产品物理连接信息。而故障传播往往和产品间的物理连接、测点位置与测量方式紧密相关。因此,必须对信号及其物理连接关系进行分析,对以上方法进行改造,建立一种同时包含信号逻辑功能和物理连接功能的多信息融合模型,将使该方法更具工程应用价值。

另外,自上世纪90年代始,国外航空航天企业,如波音、空客等,已经开始全面采用诸如Mentor Graphic公司产品的专业电气系统设计软件和工具<sup>[13-15]</sup>,这些专业的电气系统设计软件将原理设计、接线设计、线束设计、制造、分析等模块集成在一起,它能够生成完整的系统组成结构信息,其中就包含了详细的信号逻辑关系和物理连接关系。因此,从专业电气设计软件中提取诊断对象的组成结构、产品互连信息、信号网表信息,进行基于信号互连结构的故障诊断,对于解决飞行器控制系统故障诊断知识库的获取难题意义重大。

## 1 逻辑物理综合模型

### 1.1 信号及其连接特性分析

当利用诸如Mentor等专业电气设计软件完成控制系统电气设计后,一般可以输出两类表征产品间连接关系的文件:(1)从逻辑上表征电气连接关系的网表文件。该文件将具有相同网络标号的连接线放在一起,即这些连接线是等电位点,它是一种“逻辑连接线”。(2)表征实际接线关系的导线表文件。该文件对每一根连接导线都进行了定义,对于具有相同网络标号、逻辑上连通而实际连线又存在分叉的连接线也进行了定义,因此它是一种表征真实物理连接关系的“物理连接线”。

信号实际上是从逻辑连接线上传输的物理参数,用 $S_i$ 来表示。信号和逻辑连接线之间有三种对应关系:(1)单端信号。该类信号为共模信号,其值是相对于某个公共参考点(如信号地)而言

的。因此,该类信号和一根逻辑连接线相对应,可独立检测,其状态和两根逻辑连接线有关,一为信号端,一为公共端。一般情况下,信号测量结果的正确性代表了物理连接通路正确性,但当出现多个共模信号测量异常时,则不仅要检查信号自身的正确性,而且还应重新检查本次测量中参考地的正确性;(2)差分信号。该信号和两根逻辑连接线相对应。一根对应信号正端,一根对应信号负端,正负信号端共同确定了该信号的值。该类信号可完全独立测量,其信号的测量结果与物理连接通路一致,但当出现异常时,应对正向和负向的物理连接通路均进行检查;(3)总线信号。该类信号是通过并行总线或串行总线所传输的数字量信号。从硬件连接线来看,一般只有几根连接线(如:RS232只需3根连接线即可实现双向传输)。通过这几根连接线可以传输成百上千路数字量信号,也就是说,总线信号是通过系统中定义的公共传输通道进行传输的,传输硬件和底层协议软件是公用的,而每路信号和单端或差分信号一样,也存在方向性,用户可以定义其输入、输出特性,故障检测时需要根据其输入、输出特性进行故障追溯。由于总线信号所涉及的互连部件两端均有接收器和发送器硬件,只要某硬件或相应连接线出现问题,将导致与其相关的大量数字量信号异常。

由上可知,各个层次的产品和系统之间、测试数据和信号之间、信号和逻辑连接线之间、逻辑连接线和物理连接线之间有着非常复杂的映射关系,它们在故障诊断推理中非常重要,需要一种有效手段进行处理。

如图1所示,可以采用输入与输出的信号关联对每个产品的传播逻辑进行描述,采用物理连接点与信号的关联对每个产品的信号连接特性进行描述,而系统级的连接关系通过专业电气设计软件产生的网表文件和导线表文件来描述,它们分别形成了系统层的逻辑连接线和物理连接线。由图可知,我们可以针对每个产品建立一个LPS模型,通过它就可以将系统层的导线表文件、网表文件和各个产品的测试数据或信号建立映射,形成一个系统关系矩阵,从而为故障诊断推理奠定基础。

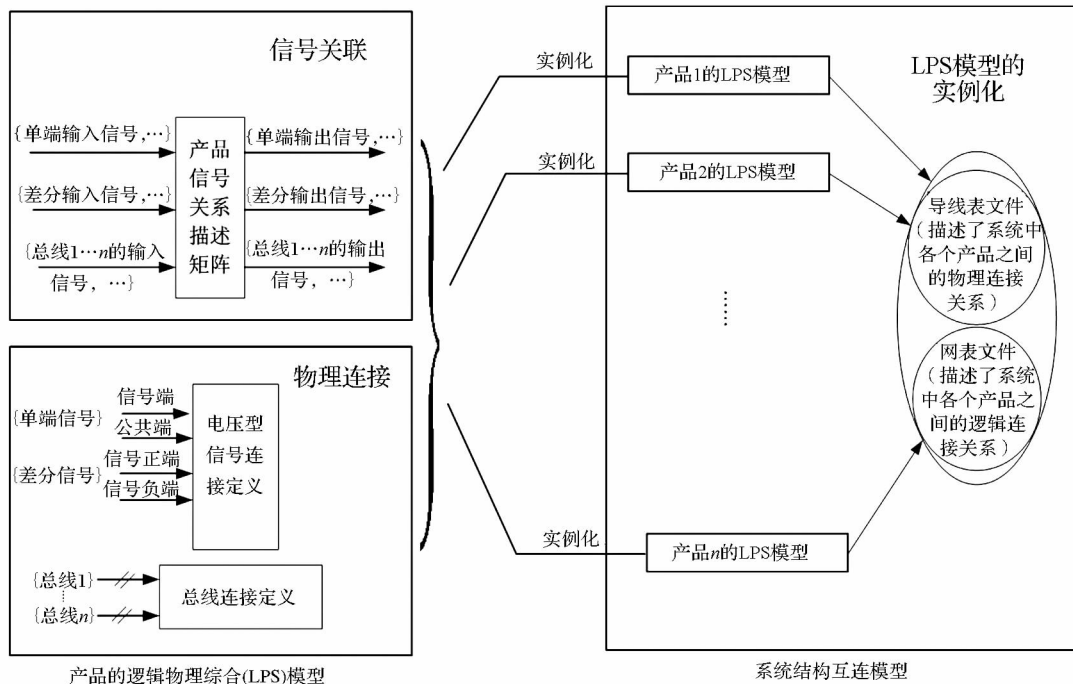


图 1 产品互连关系分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of product interconnection relationship analysis

### 1.2 LPS 模型结构

LPS 模型是一个将抽象信号和具体物理连线统一起来的综合模型。它既要从逻辑层面定义产品信号关联关系和故障关联关系;又要从物理层面建立信号和产品连接点(一般为电连接器的引脚)的实际连接关系。

LPS 建模过程大致为:先针对产品进行信号层知识定义和关联关系分析,接着进行产品连接点知识定义和关联关系分析,然后进行产品的故障模式及其关联关系分析,最后针对系统层的逻辑连接线和物理连接线知识进行定义及关联关系分析。

#### 1.2.1 信号逻辑层

信号逻辑层主要针对每个产品定义其所属信号集合、每个信号详细信息、输入输出信号关联信息。首先可假设:

输出信号集

$$O = \{O_i | i = 1, 2, \dots, a\} \quad (1)$$

输入信号集

$$I = \{I_i | i = 1, 2, \dots, b\} \quad (2)$$

信号集合是由输入信号集合和输出信号集合所组成,即

$$\begin{aligned} S &= O \cup I \\ &= \{O_i | i = 1, 2, \dots, a; I_i | i = 1, 2, \dots, b\} \\ &= \{S_i | i = 1, 2, \dots, a + b\} \end{aligned} \quad (3)$$

每路信号  $S_i$  应按照如下内容组织信号详细

信息的存储:

$S_i = \langle \text{标示码, 名称, 方向, 信号类型, 总线标识, 健康评估规则, } \dots \rangle$

其中,标示码是信号的唯一数字代号,可以根据一定规则进行编码;名称为信号具有一定物理含义的名字;方向表示对产品而言该信号的流向,有输入和输出两种状态;信号类型为单端信号、差分信号或总线信号;总线标识指系统分配给每一类总线数字代号,缺省时为 0,表示当前信号为非总线信号。如:用 1 表示 1553 总线,2 表示网络总线,3 表示第一路 RS232 总线,4 表示第二路 RS232 总线等;健康评估规则是信号层健康评估知识库的正异检测规则标识码。

建立输入输出信号二元关系集合,即

$$\begin{aligned} R_{oi} &= O \times I \\ &= \{ \langle O_k, I_i \rangle | O_k \in O \wedge I_i \in I \wedge O_k \mathbf{R} I_i \}_{\substack{k=1, \dots, a \\ i=1, \dots, b}} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $O_k \mathbf{R} I_i$  为输出信号  $O_k$  与输入信号  $I_i$  的关系,表示  $O_k$  受  $I_i$  影响。

根据二元关系集合可以很方便地建立对应的关系矩阵和关系图<sup>[16]</sup>。

#### 1.2.2 产品连接层

产品连接层针对每个产品定义其对外物理连接点集合以及每个连接点与信号的关联信息。

产品连接点集

$$L = \{L_i | i = 1, 2, \dots, c\} \quad (5)$$

每个产品连接点描述信息:  $L_i = \langle \text{标示码, 名称, 类型, 物理信息, 总线标识} \rangle$

其中, 标示码、名称和总线标识定义与前述的  $S_i$  类似; 类型指单端信号、差分信号、数字信号; 物理信息是指针对三类信号进行信号端、公共端、信号正端、信号负端或总线信号复用线的定义码。

至此, 可建立当前产品关联信号集  $R_{PS}$ 。

进一步, 建立产品连接点集与产品信号集之间的二元关系集合, 即

$$R_{LS} = L \times S \\ = \{ \langle L_k, S_i \rangle \mid L_k \in L \wedge S_i \in S \wedge L_k \mathbf{RS}_i \}_{k=1, \dots, c} \\ i=1, \dots, a+b \quad (6)$$

其中,  $L_k \mathbf{RS}_i$  为物理连接点  $L_k$  与信号  $S_i$  之间存在二元关系, 即表示  $L_k$  与  $S_i$  有关。

### 1.2.3 健康层

健康层主要针对产品建立各种信号和产品健康状态的相关知识。

信号健康层知识描述了信号测量值和信号正常或异常状态之间的关系, 限于篇幅, 在此不再赘述。下面仅对产品健康层知识进行阐述。

对于产品而言, 应通过可靠性分析, 建立各种故障模式集合, 即

$$H = \{H_i \mid i=1, 2, \dots, d\} \quad (7)$$

其中  $H_i$  为该产品的故障模式之一。

进一步, 可建立故障模式集和信号集之间的二元关系集合, 即

$$R_{HS} = H \times S \\ = \{ \langle H_k, S_i \rangle \mid H_k \in H \wedge S_i \in S \wedge H_k \mathbf{RS}_i \}_{k=1, \dots, d} \\ i=1, \dots, a+b \quad (8)$$

其中,  $H_k \mathbf{RS}_i$  为健康模式  $H_k$  与信号  $S_i$  之间存在二元关系, 即表示  $H_k$  与  $S_i$  有关。

### 1.2.4 系统层

系统层主要定义其内部所有产品集合、逻辑连接线集合、物理连接线集合及系统连接关系信息。

产品集合:

$$P = \{P_i \mid i=1, 2, \dots, e\} \quad (9)$$

逻辑连接线是网表文件中所有网络标示码所组成的集合, 即

$$N = \{N_i \mid i=1, 2, \dots, f\} \quad (10)$$

而每根网络标示码是由各个产品等电位的连接点所组成的。即

$$N_i = \left\{ \langle P_k, L_j \rangle \mid \begin{array}{l} P_k \in P \wedge L_j \in L \\ \wedge (P_k : L_j) \mathbf{RN}_i \end{array} \right\}_{k=1, \dots, e} \\ j=1, \dots, c \quad (11)$$

其中,  $(P_k : L_j) \mathbf{RN}_i$  表示第  $k$  个产品的第  $j$  个连接

点是网络标示码  $N_i$  所在连接线的一个节点。

于是, 系统层的逻辑连接关系就是以产品及其连接点  $\langle P_k, L_j \rangle$  作为顶点, 以逻辑连接线  $N_i$  作为连接各顶点的边所组成的有向图模型。

物理连接线是导线表文件中所有导线标示码所组成的集合, 即

$$W = \{W_i \mid i=1, 2, \dots, g\} \quad (12)$$

而每根导线标示码是由各个产品之间、各个产品和转接端子之间的所有连接导线所组成。因此, 此处应将产品含义进行拓展, 将所有转接端子也视为产品。

$$W_i = \left\{ \langle P_l : L_m, P_n : L_k \rangle \mid \begin{array}{l} P_l, n \in P \wedge L_m, k \in L \\ \wedge (P_l : L_m, P_n : L_k) \mathbf{RW}_i \end{array} \right\}_{l, n=1, \dots, e} \\ m, k=1, \dots, c \quad (13)$$

注意: 上述导线的  $P_l : L_m$  为信号的源接点, 而  $P_n : L_k$  为信号的目的接点。

于是, 系统层的物理连接关系就是以产品及其连接点  $\langle P_l, L_m \rangle$  作为顶点, 以物理连接线  $W_i$  作为连接各顶点的边所组成的有向图模型。

## 1.3 LPS 建模过程与原理

LPS 模型结构系统地描述了从各个产品层次到系统层的物理、逻辑信息及其相互之间的关联关系。由于现有专业电气系统设计软件中包含了大量的 LPS 模型的基础信息。因此, 论文从 LPS 模型信息和专业电气系统设计软件导出信息的相融合的角度出发, 研究了 LPS 模型实例化方案, 提出了一套行之有效的 LPS 建模方法。该方法的基本过程和原理如下

(1) 利用专业电气设计软件绘制飞行器控制系统的电气原理图。和传统电气原理图绘制相比, 仅需增加如下操作: 给每个产品分配一个标示码; 针对每根逻辑连接线定义传输信号类型。之后, 即可利用专业电气设计软件输出系统层的导线表文件和网表文件;

(2) 建立一个基于 LPS 模型的故障诊断开发平台。通过该平台读取产品的导线表文件和网表文件, 从而对系统层参数实例化, 包括: 产品集合  $P$ 、物理连接线集合  $W$ 、逻辑连接线集合  $N$ ;

(3) 通过平台的交互操作, 针对传输单端信号和差分信号的逻辑连接线  $N_i$  进行关联信号定义, 包括所传输信号的信号标示码, 信号端/公共端或信号正端/信号负端属性, 公共端标示码, 信号源产品标示码, 信号目的产品标示码集合;

(4) 进行产品级参数的实例化, 包括: 针对各个产品建立产品的关联信号集  $R_{PS}$ , 结合逻辑连

接线集合  $N$  以及关联信号定义,可实例化各个产品连接点集与产品信号集的二元关系集合  $R_{LS}$ 、各个产品的输入信号集  $I$ 、输出信号集  $O$ 、输入输出信号二元关系集  $R_{OI}$ ;

(5) 通过平台的交互操作,定义健康层的模型参数,包括信号的健康知识,产品的故障模式集与信号集之间的二元关系集  $R_{HS}$ ;

(6) 各个产品的故障模式集可通过信号关联关系的组合运算,形成系统故障模式与信号之间的系统关系矩阵<sup>[10]</sup>。至此,即可建立基于信号异常队列的系统关系矩阵。

## 2 软件实现与算例

根据 LPS 建模要求和故障诊断算法,论文研究和开发了一套智能故障检测系统,它由故障检测建模平台和故障检测运行平台两个独立软件所组成。故障检测建模平台可读取用户在专业电气系统设计软件 Mentor CHS 的 Harness 模块生成的导线表文件和网表文件,据此完成 LPS 模型的实例化,从而生成故障检测知识库;故障检测运行平台将实时获取测试数据,并对信号健康状态进行监测,一旦出现异常,将启动图 2 所示的故障诊断处理流程,并将诊断过程和诊断结果直观地显示出来。

由于实例化 LPS 模型包含了产品级的信号/故障信息,系统级的信号/故障信息,全面描述了系统基于互连结构知识的故障诊断知识。因此,可按照图 2 所示流程进行故障检测运行平台软件的开发。

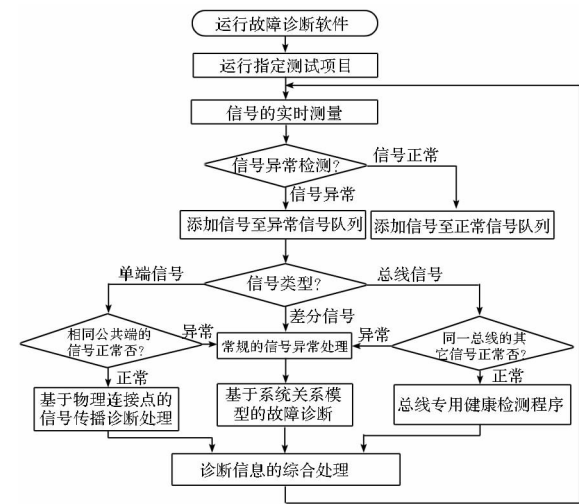


图 2 故障诊断处理流程

Fig. 2 The fault diagnosis process flow chart

该故障诊断方法的基本思想为:(1)通过测试项目针对各类信号,利用 LPS 模型中定义的健

康层信息进行信号异常状态检测;(2)当出现信号异常后,根据信号类型,分别开展常规信号异常处理、公共端信号异常处理或总线信号异常处理;(3)常规信号异常处理方法利用 LPS 模型导出的系统关系矩阵,进行故障诊断定位;(4)公共端信号异常处理方法首先针对异常信号列表进行单信号/多信号异常鉴别。如果是多信号异常,则利用 LPS 模型的物理连接点信息和导线连接信息,进行基于物理连接点的信号传播故障诊断,否则进入(3)进行常规信号异常处理;(5)总线信号异常处理方法也是首先对异常信号列表进行单信号/多信号异常鉴别。如果是多信号异常,启动总线专用健康检测程序,否则进入(3)进行常规信号异常处理。

软件系统开发完毕后,针对如图 3 所示的某飞行器电气系统简化模型,设计了 B 组件正常的单元测试、B 组件逻辑控制异常的单元测试、+B2 配电异常的系统测试、A 组件逻辑控制异常的系统测试等四个测试用例,分别针对单元测试、系统测试、信号未向后级传播与向后级传播后的诊断定位功能等项目进行了测试验证,故障检测结果正常。

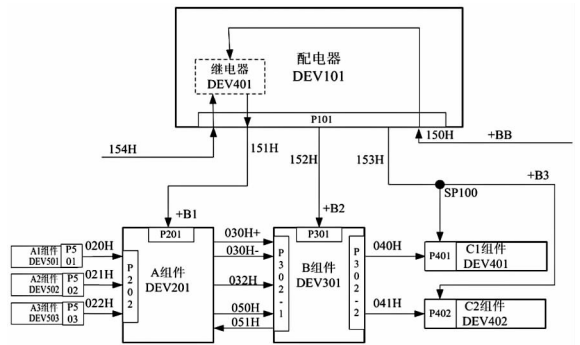


图 3 某飞行器电气系统简化模型算例

Fig. 3 A aircraft electrical system's simplified model example

## 3 结论

论文从基于产品之间互连关系——结构知识的故障诊断方法出发,研究了各级别产品及其产品间信号的连接特性,提出了一套 LPS 建模原理与方法,开发了相应软件并进行了验证,结果表明:LPS 模型能够充分利用专业电气设计软件中所包含的系统组成结构信息,易于从逻辑和物理层面全面描述飞行器控制系统信号及其传播信息,适宜用于故障检测的工程应用,采用其相关算法能够将系统故障定位到指定产品级别上。

## 参考文献 (References)

- [1] 于劲松,李行善.美国军用自动测试系统的发展趋势[J].测控技术,2001,20(12):1-3.  
YU Jinsong, LI Xingshan. Future trends of the U. S. military ATS[J]. Measurement & Control Technology, 2001, 20(12): 1-3. (in Chinese)
- [2] Ross W A. The impact of next generation test technology on aviation maintenance [R]. DoD Automatic Test Systems Executive Agent Office Naval Air Systems Command PMA260D.
- [3] GJB451-90, 测试通用术语[S]. 1990.  
GJB451-90, General testing terminology [S]. 1990. (in Chinese)
- [4] 唐小峰. 面向故障诊断的测试流程自动生成技术研究[D]. 国防科学技术大学, 2010.  
TANG Xiaofeng. Research of automatic test flow technology oriented fault diagnosis [D]. National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [5] Ligeza A, Koscielny J M. A new approach to multiple fault diagnosis: a combination of diagnostic matrices, graphs, algebraic and rule-based models. The case of two-layer models [J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2008, 18(4): 465-476.
- [6] Górný B. Consistency-based reasoning in model-based diagnosis [D]. Akademia Gorniczno-Hutnicza, Krakow (Poland), 2001.
- [7] NG C K, Chow K P. An expert system for diagnosis of electronic equipment using structural model and troubleshooting heuristics[C]//Proceedings of TENCON'89. Fourth IEEE Region 10 International Conference, 1989, 11.
- [8] Lu T C, Allen D L, Zhang Y L, et al. Fault diagnostics using network motif signature [C]//Proceedings of Annual Conference of Prognostics and Health Management Society 2012.
- [9] Sreenuch T, Tsourdos A, Jennions I K. Distributed embedded condition monitoring systems based on OSA-CBM standard[J]. Computer Standards & Interfaces, 2013, 35: 238-246.
- [10] 唐小峰,曾庆华. 基于单组件信号模型的系统可测试性分析[J]. 中国测试, 2010, 36(6).  
TANG Xiaofeng, ZENG Qinghua. System testability analysis based on signal model of single component [J]. China Measurement & Testing Technology, 2010, 36(6). (in Chinese)
- [11] 吴灿,曾庆华. 控制系统故障诊断方法研究[J]. 航天控制, 2005, 23(4).  
WU Can, ZENG Qinghua. Realization research of fault diagnosis for control system [J]. Aerospace Control, 2005, 23(4). (in Chinese)
- [12] 刘道平,曾庆华. 基于多测试信息的故障诊断技术研究[J]. 航天控制, 2007, 25(3).  
LIU Daoping, ZENG Qinghua. Fault diagnosis Based on Multiform Test Information [J]. Aerospace Control, 2007, 25(3). (in Chinese)
- [13] Renee Robbins. 电气设计软件[J]. 软件, 2008(10).  
Renee Robbins. Electrical design software [J]. Software, 2008(10). (in Chinese)
- [14] 王美菁,李怡麒,李鑫,等. 基于CHS与Pro/E cabling电气系统线缆线束数字化设计[J]. 车辆与动力技术, 2012(3).  
WANG Meijing, Llyiqi, LI Xin, et al. Digital design of cabling for vehicle electrical system based on CHS and Pro/E-cabling [J] Vehicle & Power Technology, 2012(3). (in Chinese)
- [15] Elisa Pouyane. 模块化/KSK线束自动化设计[J]. 汽车与配件, 2012, 27(7).  
Elisa Pouyane. Automating modular/"KSK" harness design [J]. Automobile and parts, 2012, 27(7). (in Chinese)
- [16] 耿素云,屈婉玲,张立昂. 离散数学[M]. 北京:清华大学出版社, 1995: 112-116.  
GENG Suyun, QU Wanling, ZHANG Liang. Discrete mathematics [M]. Beijing: Tsinghua University press, 1995: 112-116. (in Chinese)