

基于电气系统故障诊断的逻辑物理综合建模方法

黄哲志^a, 王安^a, 曾庆华^a, 龙志强^b

(国防科学技术大学 a. 航天科学与工程学院; b. 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘要: 基于建模的故障诊断方法直观、可重构、效率高,但当前主要对电气系统的信号/功能进行建模,难以准确地将故障定位到电气系统中具体的物理位置。针对上述问题,将逻辑物理综合模型扩展应用到通用电气系统故障诊断,提出电气系统的逻辑物理综合建模原理,给出层次化建模、可更换单元合并处理、信号反馈闭环通路及故障模式自动关联等建模处理策略,以三角波发生器电路为例,说明电气系统逻辑物理综合建模的实现过程。实例结果表明,该逻辑物理综合建模方法可以将诊断过程和结果直观地显示出来,适用于通用电气系统的故障诊断。

关键词: 逻辑物理综合;相关性;电气系统;故障诊断;建模处理策略

中文引用格式:黄哲志,王安,曾庆华,等. 基于电气系统故障诊断的逻辑物理综合建模方法[J]. 计算机工程, 2017,43(6):301-307.

英文引用格式:Huang Zhezhi, Wang An, Zeng Qinghua, et al. Logical Physical Synthetically Modeling Method Based on Fault Diagnosis in Electrical System[J]. Computer Engineering, 2017, 43(6):301-307.

Logical Physical Synthetically Modeling Method Based on Fault Diagnosis in Electrical System

HUANG Zhezhi^a, WANG An^a, ZENG Qinghua^a, LONG Zhiqiang^b

(a. College of Aerospace Science and Engineering; b. College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

【Abstract】 The fault diagnosis method based on modeling is intuitional, reconfigurable and also effective. However, modeling the signal/function of electrical system can hardly locate the physical position of the fault. Therefore, this paper expands Logical Physical Synthetically(LPS) model to the application of fault diagnosis in general electrical system. It proposes the principle of LPS modeling in electric system, and presents a hierarchical modeling, merge processing in Replaceable Unit(RU), signal feedback closed-loop path, automatic fault mode correlation and other modeling processing strategies. Taking a triangle wave generator circuit as an example, this paper also shows the modeling process of LPS modeling in electrical system, which indicates that LPS modeling method can be applied in general fault diagnosis in electrical system. The diagnostic process and the result can be visually displayed.

【Key words】 Logical Physical Synthetically(LPS); correlation; electrical system; fault diagnosis; modeling processing strategy

DOI:10.3969/j.issn.1000-3428.2017.06.049

0 概述

随着电气系统复杂度越高,对电气故障诊断的快速、准确地定位也提出更高的要求。能否有效、实时地定位并排除故障已成为客户对于产品重点关注的要求^[1-2]。由于具有直观、可重构、效率高等特点,通过对实际系统进行抽象化分析及可视化建模的故障诊断方法/工具逐渐展现其在工程应用中优

势^[3-5]。例如美国 QSI 公司的 TEAMS (Testability Engineering and Maintenance System) 软件,该软件将系统建模和分析智能化处理,大大提高了故障诊断的效率,对维修工程有很高的利用价值,并可在一定程度上弥补传统分析的不足,可满足越来越高的故障诊断需求^[6-8]。诸如 Mentor Graphic, Multisim 等专业电气系统设计工具软件,能够生成完整的系统组成结构信息^[9-11],包含详细的逻辑连接关系和物

基金项目:国家自然科学基金(61174120)。

作者简介:黄哲志(1986—),男,硕士,主研方向为控制系统测试、故障诊断;王安,硕士;曾庆华、龙志强,研究员。

收稿日期:2016-03-28 **修回日期:**2016-06-15 **E-mail:**383302018@qq.com

理连接关系,从电气设计软件中可容易地获取到电气系统的逻辑和物理连接信息,文献[12]提出了逻辑物理综合(Logical Physical Synthetically, LPS)建模方法,并针对飞行控制系统故障诊断研究了LPS模型的实例化方案及诊断方法。本文在此基础上,将LPS建模方法的研究扩展到通用电气系统故障诊断应用中。

1 逻辑物理综合模型

逻辑物理综合模型是在分析系统的结构、信号和故障基础上,对系统结构描述、故障知识表述等信息进行了抽象^[13],以分层有向图来表示系统中各组成可更换单元(Replaceable Unit, RU)及其相互的逻辑和物理连接关系,并通过关联定义来表征系统中RU单元、信号、故障、物理连接、逻辑连接等信息之间的相关性。其中,LPS模型中的信号是指从逻辑连接线上传输的物理参数,每一个RU单元的故障模式包括自身的故障与输入信号相关的故障。模型描述了故障在其传播路径上每个RU单元中的传递关系。因此,LPS模型从逻辑层面和物理层面,全面系统地描述系统信号及其传播信息,能够将故障直接定位到具体的物理位置。

1.1 LPS模型的组成集合

LPS模型属于一种相关性图示模型^[14],可以直观展现RU单元之间故障的关联关系,用于描述信号/故障在系统中具体物理位置传播过程。LPS模型主要由信号逻辑层、RU单元连接层、系统层和健康层组成,包括以下基本元素集合:

1) RU单元集合

$$P = \{P_i | i = 1, 2, \dots, e\}$$

2) 信号集合

由所有RU单元的输入信号集合和输出信号集合所组成,输出信号集合 $O = \{O_i | i = 1, 2, \dots, a\}$, 输入信号集 $I = \{I_i | i = 1, 2, \dots, b\}$ 。于是,信号集合 S :

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

3) 故障模式集合

$$H = \{H_i | i = 1, 2, \dots, d\}$$

4) RU单元连接点集合

$$L = \{L_i | i = 1, 2, \dots, c\}$$

5) 逻辑连接线集合

$$N = \{N_i | i = 1, 2, \dots, f\}$$

$$N_i = \left\{ \langle P_k : L_j \rangle \mid \begin{array}{l} P_k \in P \wedge L_j \in L \\ \wedge (P_k : L_j) RN_i \end{array} \right\}_{k=1,2,\dots,e; j=1,2,\dots,c}$$

其中, $(P_k : L_j) RN_i$ 表示第 k 个RU单元的第 j 个连接点,是网络标示码 N_i 所在连接线的的一个节点。因

此,逻辑连接关系就是以RU单元及其连接点 $\langle P_k, L_j \rangle$ 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。

6) 物理连接线集合

$$W = \{W_i | i = 1, 2, \dots, g\}$$

$$W_i = \left\{ \langle P_l : L_m, P_n : L_k \rangle \mid \begin{array}{l} P_{l,n} \in P \wedge L_{m,k} \in L \\ \wedge (P_l : L_m, P_n : L_k) RW_i \end{array} \right\}_{\substack{l,n=1,\dots,e, \\ m,k=1,\dots,c}}$$

物理连接线的 $P_l : L_m$ 为信号的源接点,而 $P_n : L_k$ 为信号的目的接点。物理连接关系就是以RU单元及其连接点 $\langle P_l, L_m \rangle$ 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。

LPS模型中还包含关联关系集合,主要有:

1) 信号集合与逻辑连接线集合之间的二元关系集合,即:

$$\begin{aligned} R_{NS} &= N \times S \\ &= \{ \langle N_k, S_i \rangle \mid N_k \in N \wedge S_i \in S \wedge N_k RS_i \} \end{aligned}$$

其中, $N_k RS_i$ 为逻辑连接线 N_k 与信号 S_i 之间存在二元关系,表示 N_k 与 S_i 有关。对于系统中某根逻辑连接线 N_k ,其与信号 S_i 的二元关系可表示为 $R_{NS} \langle N_k, S_i \rangle$ 。

2) 输入输出信号的二元关系集合,即:

$$\begin{aligned} R_{OI} &= O \times I \\ &= \{ \langle O_k, I_i \rangle \mid O_k \in O \wedge I_i \in I \wedge O_k RI_i \} \end{aligned}$$

其中, $O_k RI_i$ 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,对应关联关系为 r_{ki} 。

信号在RU单元中输入到输出的过程,完成运算、变化和传递。对于系统中某个RU单元 p_i ,其输入输出信号的二元关系可表示为 $R_{OI}(p_i)$,RU单元的输出输入形式主要包括有输出无输入、有输入无输出、单输入单输出、单输入多输出、多输入单输出和多输入多输出^[15]。假设RU单元 p_i 有 $n(n \geq 1)$ 个输入信号和 $m(m \geq 1)$ 个输出信号,则有:

$$R_{OI}(p_i) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

其中, $r_{mn} = \begin{cases} 0, \text{NoRel} \\ 1, \text{Rel} \end{cases}$, $r_{mn} = 0$ 表示 O_m 与 I_n 不相关, $r_{mn} = 1$ 表示 O_m 与 I_n 相关。

3) 故障模式集合和信号集之间的二元关系集合,即:

$$\begin{aligned} R_{HS} &= H \times S \\ &= \{ \langle H_k, S_i \rangle \mid H_k \in H \wedge S_i \in S \wedge H_k RS_i \} \end{aligned}$$

其中, $H_k RS_i$ 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。对于系统中某个RU单

元 P_i , 其故障模式 H_k 与信号 S_i 的二元关系可表示为 $R_{HS} < H_k, S_i >$ 。

1.2 电气系统 LPS 模型的建模方法

电气系统 LPS 建模方法是按照 LPS 模型中的信号逻辑层、RU 单元连接层、系统层和健康层来分析电气系统中电路的信号互连结构网络、信号传播方向以及故障模式等信息,将电路中与故障的关联属性抽象化。电路原理图纸的元器件(集成芯片、二极管、电容、电阻、电感等)、元器件之间的连接导线、各连接导线的逻辑标号以及各元器件的引脚,分别对应 RU 单元集合、物理连接线集合、逻辑连接线集合和 RU 单元连接点集合。电气软件可将这些集合相关信息以网络表文件(Netlist Report)形式导出。

网络表文件中的元器件(Component)列表对应 LPS 模型中的 RU 单元集合 P ,所有的网络标号(Net Label)对应 LPS 模型中的逻辑连接线集合 N ,各元器件的引脚(Pin)对应 LPS 模型中的 RU 单元连接点集合 L ,结合网络标号和引脚分析

得到的相互连接关系对应 LPS 模型中的物理连接线集合 W 。

以某电气系统中 RC 串联滤波局部电路为例,该电路中有 2 个 RU 单元分别为电阻 R_1 和电容 C_1 ,因此,电路的 LPS 模型中 RU 单元集合为 $P = \{P_1, P_2\}$,电阻 R_1 和电容 C_1 分别具有 2 个引脚,则 RU 单元连接点集合 $L = \{P_1:L_1, P_1:L_2, P_2:L_1, P_2:L_2\}$,电阻 R_1 的引脚 2 与电容 C_1 的引脚 1 相连,则有物理连接导线 $W_1 = \{ < P_1:L_2, P_2:L_1 > \}$, W_1 表征信号通过 RU 单元 P_1 的 L_2 引脚到 RU 单元 P_2 的 L_1 引脚的传输。假设在 W_1 标注的网络标号 $N_1, N_1 = \{ < P_1, L_2 >, < P_2, L_1 > \}$,类似地 $N_2 = \{ < P_1, L_1 >, N_3 = \{ < P_2, L_2 > \}$ 。

对电气系统进行信号分析、故障模式分析以及关联关系分析等,形成 LPS 模型中的信号集合 S 、故障模式集合 H 、输入信号与输出信号关联集合 R_{Or} 、信号与逻辑连接线关系集合 R_{Ns} 、故障与信号关系集合 R_{HS} ,从而建立系统的 LPS 模型,形成故障关联知识,用于故障诊断,如图 1 所示。

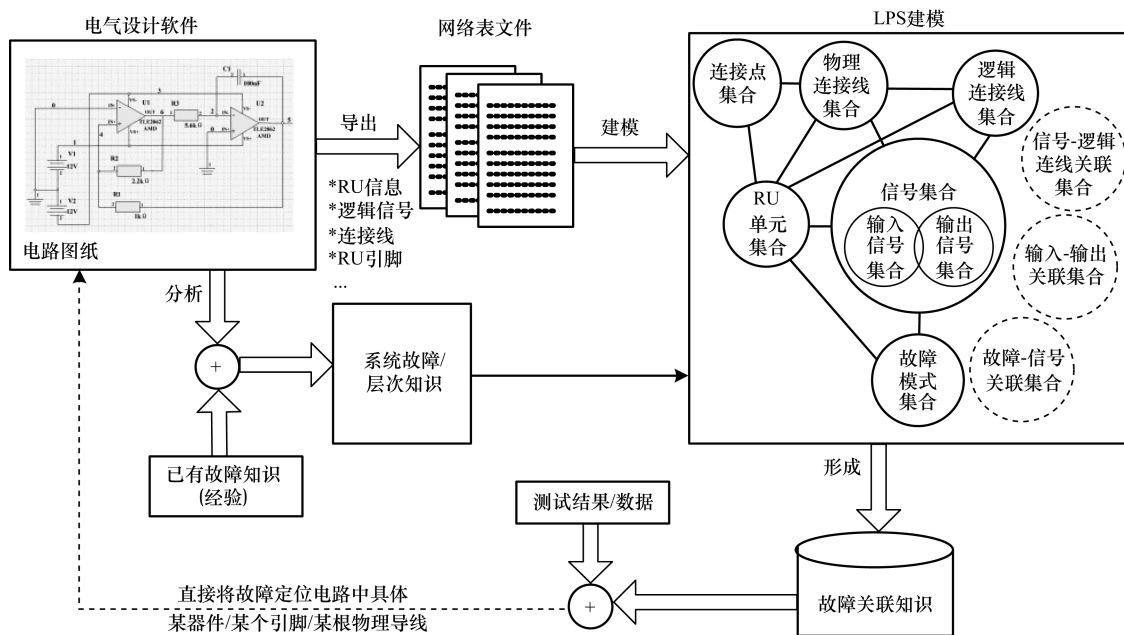


图 1 电气系统的 LPS 建模及故障诊断过程示意图

综上所述,电气系统 LPS 模型的建模基本过程如下:

- 1) 利用电气设计软件,绘制电气系统的电路原理图,导出网络表文件。
- 2) 从网络表文件中提取网络标号、元器件和引脚等信息,形成 LPS 模型的 RU 单元集合 P 、RU 单元连接点集合 L 和逻辑连接线集合 N ,进一步分析电路中输入输出关系得到物理连接线集合 W 。

- 3) 分析电气系统每个 RU 单元的输入信号 I 、输出信号 O 及信号传播流向,形成信号集合 S 。
- 4) 对每个 RU 单元的输出信号 O 与输入信号 I 进行关联定义,形成集合 R_{Or} 。
- 5) 对逻辑连接线集合 N 与信号集合 S 进行关联定义。
- 6) 分析每个 RU 单元的故障模式得到故障模式集合 H ,对信号集合 S 进行故障模式关联定义,形成集合 R_{HS} 。

2 建模处理策略

LPS 模型旨在构建一种与实际电气系统电路一致的互连网络结构,该模型结构既描述电气系统中某物理位置的故障模式,同时也描述故障随着信号传递而传播的物理链路。电气系统中的电路可能存在不同层次的电路或子电路,具有模拟电路和数字电路,存在回环电路。这些情况都可能影响建模或者故障诊断,因此,需采取相应的策略进行处理,保证建模和故障诊断的可行性、准确性等。

2.1 层次化建模

在复杂电气系统的电路设计工程中,通常采用层次化电路或子电路来组成整个系统的电路原理图,而目前未能有效从大部分的电气设计软件中直接导出包含电路层次化设计信息的文件,一般采用人工分析划分的方式,不利于构建层次化的 LPS 模型。

因此,LPS 建模前要求电气系统的电路原理图尽量以层次化设计,电路图的层次清晰,上下层次的从属关系明确,便于在 LPS 建模平台中人工划分/定义模型的层次结构。若未来大部分电气软件能够导出电路层次化设计以及不同电路层次的从属关系信息,将可大大地提升对 LPS 模型进行层次化建模的便捷性。

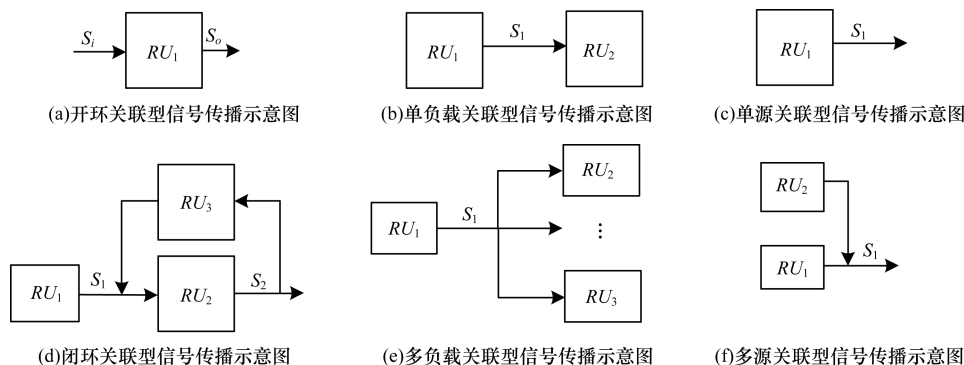


图 2 信号传播的基本形式示意图

2.4 信号反馈闭环通路

LPS 模型中每个 RU 单元之间的互连关系网络与实际电气系统电路的互连关系网络完全相同。电路中可能存在由 2 个或多个元器件形成的回环电路,回环电路可能形成信号反馈闭环通路,则影响诊断定位。例如元器件 A 的某个输出信号 s_1 是元器件 B 的输入信号,元器件 B 的输入信号 s_2 ,元器件 A 的输入信号,同时信号 s_2 影响信号 s_1 (即有 $s_1 R s_2$),则元器件 A、信号 s_1 、元器件 B 和信号 s_2 形成一个信号反馈闭环通路。当信号 s_2 故障时,诊断定位得到故障模糊组为元器件 A 和元器件 B。回环电路并不一定就是信号反馈闭环通路,仅当回环电路具中存在信号闭环时,形成每个信号反馈闭环通路。对于

2.2 RU 单元合并

电气系统中可能存在 2 个或多个 RU 单元,虽然从电信号角度分析,这些 RU 单元之间无物理导线连接,是相对独立的,但 RU 单元之间存在光、电磁波、机械传动等传输形式关联。例如对射型红外传感器的发射器件和接收器件,这 2 个器件在电路中是独立的,当发射器件出现异常或者其输入信号异常,导致接收器件输入异常,而非接收器件自身内部异常或者其输入的电信号异常。

对于具有非电信号传输形式关联的 2 个或多个 RU 单元,可以采取“合并”的方式,将这些 RU 单元关联“等效”成一个 RU 单元,这个“等效”RU 单元具备完整输入信号、输出信号以及输入输出信号的关联关系,非电信号传输形式的故障可当作这个“等效”RU 单元的内部故障。

2.3 信号传播形式

电气系统(电路)中大部分的逻辑信号通过其组成元器件/部件的引脚和元器件/部件之间的导线传输。电气系统(电路)中信号传播的基本形式有开环关联型、闭环关联型、单负载关联型、多负载关联型、单源关联型和多源关联型,如图 2 所示。

模型中存在的信号反馈闭环通路,给出信号反馈闭环通路的提示信息或者进行 RU 单元合并处理。

2.5 故障模式自动关联

LPS 建模方法直接导入电气系统的网络表文件,并对每一个元器件都进行抽象建模。对于复杂度比较高的电气系统,若手动逐一地对每个 RU 单元进行故障定义/关联,则所需的工作量很大。可采取的解决措施是:建模时通过识别 RU 单元的器件种类(如电容、电阻、运放器、电感、集成芯片等),自动关联该 RU 单元的常见故障模式。尤其是电气系统中可能具有成千上万的电容或者电阻,通常在电气系统器件数量中占据较高的比例,它们自身的故障模式通常包括短路、开路、参数值超过 $\pm 5\%$ 、参数

值超过 ±20% 等。因此,对电容、电阻或者其他器件采取故障模式自动关联的方式,将可提高 LPS 建模的可操作性。

3 建模示例

如图 3 所示,在电气软件 Multisim 中建立一个

三角波发生器电路,该电路包括电源 +12 V (V_1)、电源 -12 V (V_2)、电源地 (Ground)、TLE2062AMD 放大器 (U_1)、1 kΩ 电阻 (R_1)、2.2 kΩ 电阻 (R_2)、5.6 kΩ 电阻 (R_3)、100 nF 电容 (C_1) 和 TLE2062AMD 放大器 (U_2),电路网络表文件信息如表 1 所示。

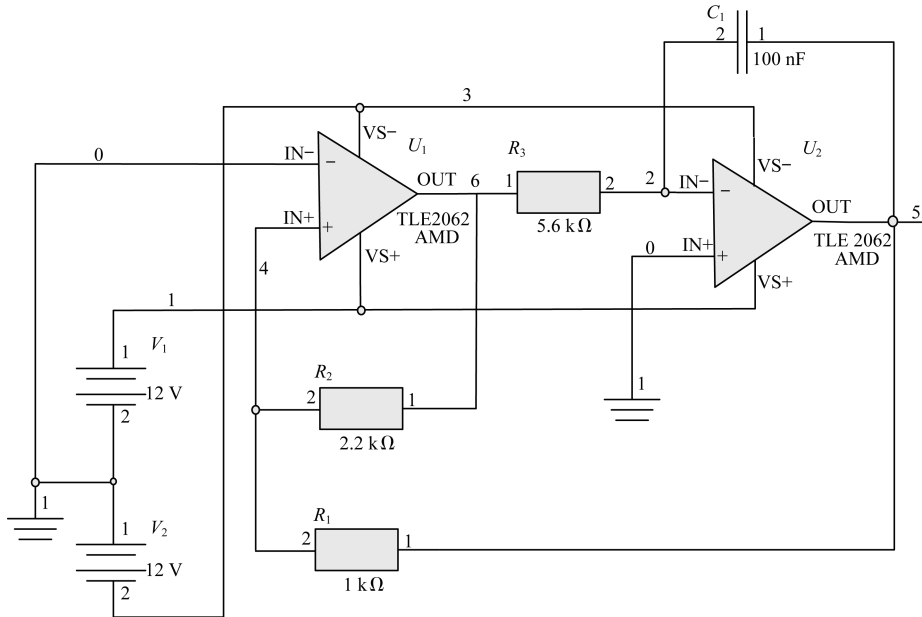


图 3 三角波发生器电路

表 1 示例电路的网络表文件信息

网络编号	组件	pin	网络编号	组件	pin
0	Ground	1	3	U_2	VS -
0	Ground	1	3	V_2	2
0	Ground	1	3	U_1	VS -
0	U_1	IN -	4	R_1	1
0	U_2	IN +	4	R_2	1
0	V_1	2	4	U_1	IN +
0	V_2	1	5	U_2	OUT
1	U_1	VS +	5	C_1	2
1	U_2	VS +	5	R_1	2
1	V_1	1	6	R_2	2
2	U_2	IN -	6	R_3	1
2	R_3	2	6	U_1	OUT
2	C_1	1			

根据电路网络表文件信息,可得到以下集合:

- 1) 逻辑网络标号为 0 ~ 6,则系统的逻辑连接线集合 $N = \{N_i | i = 1, 2, \dots, 7\}$ 。
- 2) 电路中共有 9 个元件,则系统的 RU 单元集合 $P = \{P_i | i = 1, 2, \dots, 9\}$ 。
- 3) 所有元件的独立引脚有 25 个,则系统的 RU 单元连接点集合 $L = \{L_i | i = 1, 2, \dots, 25\}$ 。
- 4) 对电路分析可知,每根逻辑连接线都只传输单个信号,则系统的信号集合 $S = \{S_i | i = 1, 2, \dots, 7\}$ 。

5) 根据信号的流向,得到每个 RU 单元的输入信号 I 和输出信号 O ,进一步得到物理连接线集合 W 。

例子中电路的逻辑连接线均是单信号传输。对逻辑连接线进行信号关联定义,可得到系统的逻辑连接线与信号一一对应的关联关系,如表 2 所示。

表 2 示例电路中逻辑连接线与信号的关联关系

网络标号 N_i	信号 S_i	信号名称	关联关系 $R_{NS} < N_i, S_j >$
0	s_0	电源地	$R_{NS} < 0, S_0 >$
1	s_1	电源 +12 V	$R_{NS} < 1, S_1 >$
2	s_2	s_2	$R_{NS} < 2, S_2 >$
3	s_3	电源 -12 V	$R_{NS} < 3, S_3 >$
4	s_4	s_4	$R_{NS} < 4, S_4 >$
5	s_5	三角波输出	$R_{NS} < 5, S_5 >$
6	s_6	s_6	$R_{NS} < 6, S_6 >$

假定电路中每个元器件(电源地除外)都有 2 种故障模式。对每个元器件的故障模式与其输出信号进行关联定义,则得到元器件的故障模式与输出信号关联关系 $R_{HS} < H_1, S_1 >$, $R_{HS} < H_2, S_1 >$, $R_{HS} < H_3, S_3 >$, $R_{HS} < H_4, S_3 >$, $R_{HS} < H_4, S_6 >$, $R_{HS} < H_5, S_6 >$, $R_{HS} < H_7, S_4 >$, $R_{HS} < H_8, S_4 >$, $R_{HS} < H_9, S_4 >$, $R_{HS} < H_{10}, S_4 >$, $R_{HS} < H_{11}, S_2 >$, $R_{HS} < H_{12}, S_2 >$, $R_{HS} < H_{13}, S_5 >$, $R_{HS} < H_{14}, S_5 >$, $R_{HS} < H_{15}, S_2 >$ 和 $R_{HS} < H_{16}, S_2 >$ 。

在电路中同时具有输入输出信号的RU单元有 U_1, U_2, R_1, R_2, R_3 和 C_1 。从故障传播的角度出发,这些RU单元具有输出输入信号的关联关系为: $R_{oi}(U_1), R_{oi}(R_1), R_{oi}(R_2), R_{oi}(R_3), R_{oi}(U_2), R_{oi}(C_1)$ 。经分析可得具体的输出输入信号关联关系表达式如下:

- 1) $R_{oi}(U_1) = [s_6 R_{s_0} \quad s_6 R_{s_1} \quad s_6 R_{s_3} \quad s_6 R_{s_4}] = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$ 。
- 2) $R_{oi}(R_2) = [s_4 R_{s_6}] = [1]$ 。
- 3) $R_{oi}(R_1) = [s_4 R_{s_5}] = [1]$ 。
- 4) $R_{oi}(R_3) = [s_2 R_{s_6}] = [1]$ 。
- 5) $R_{oi}(U_2) = [s_5 R_{s_0} \quad s_5 R_{s_1} \quad s_5 R_{s_2} \quad s_5 R_{s_3}] = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$ 。

$$6) R_{oi}(C_1) = [s_2 R_{s_5}] = [1]$$

以上6个关系式描述了信号 s_4 与 R_1, R_2 相关,信号 s_2 与 R_3, C_2 相关。建模得到示例电路的LPS模型如图4所示。模型中 R_2 与 U_1, C_1 与 U_2 形成信号反馈闭环通路,可根据处理策略进一步将 R_2 与 U_1, C_1 与 U_2 分别合并处理成一个等效RU单元。基于测试数据/信息的故障诊断是一种直接有效的故障诊断方法^[16]。从建立示例电路的LPS模型中,可得到故障关联知识,实时获取测试数据,并对信号健康状态进行监测,一旦出现信号异常,将启动图5所示的故障诊断处理流程。

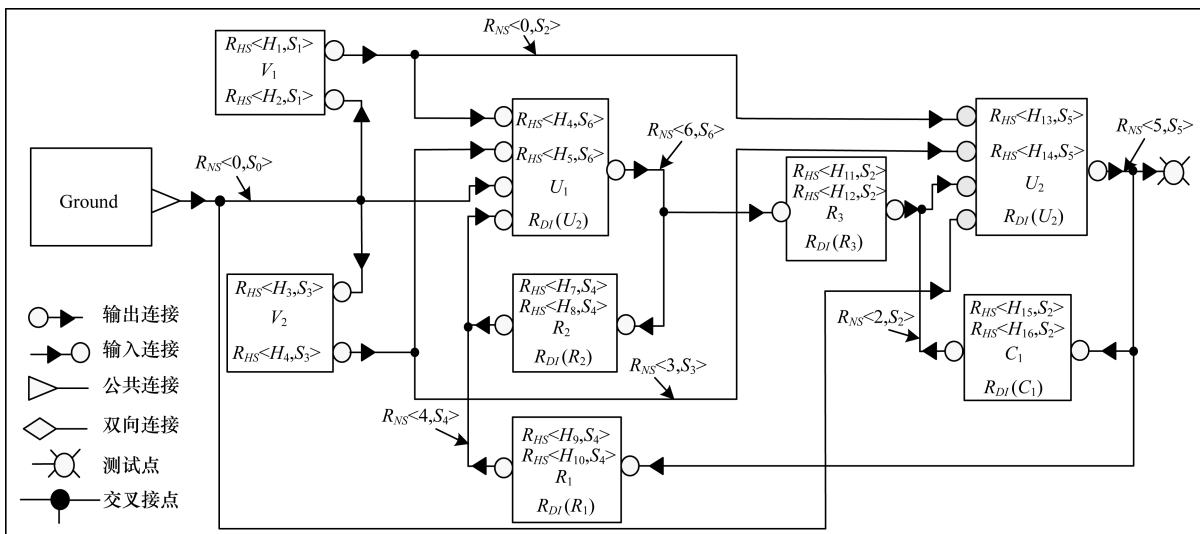


图4 三角波发生器电路的LPS模型

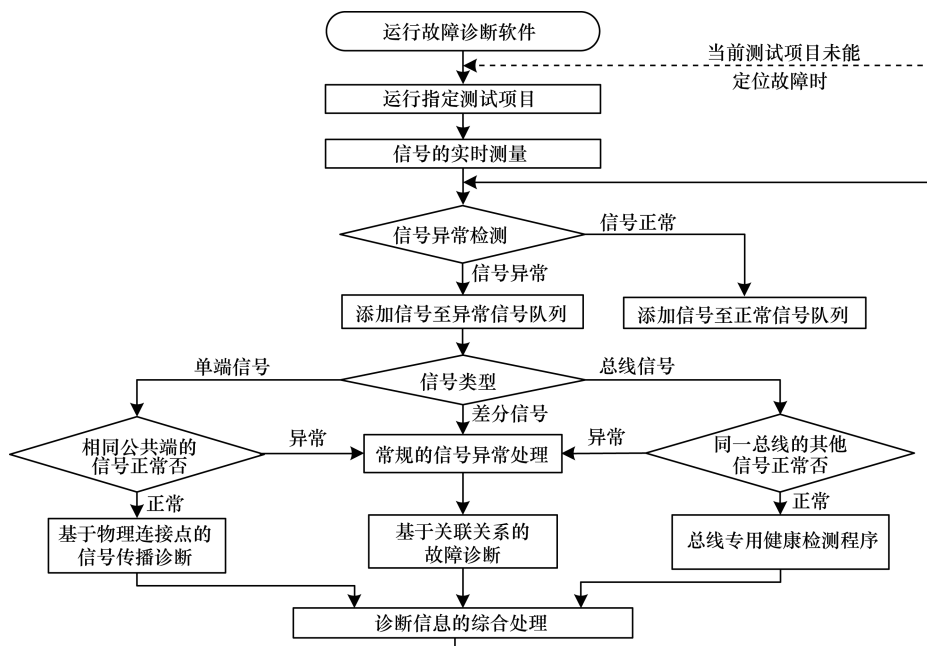


图5 故障诊断处理基本流程示意图

由于示例电路 LPS 模型中不存在总线类型的信号,而具有相同公共端信号 s_0 (即电源地 Ground),假设从整个电路的测试点检测到三角波输出信号 s_5 异常,则首先判断信号 s_0 是否异常,若正常按照基于物理连接点的信号传播诊断处理,若异常,按照常规信号异常处理,进入关联关系的故障诊断。信号 s_5 为 RU 单元 U_2 的输出信号,同时由于 U_2 的输入输出信号关系为:

$$R_{or}(U_2) = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$$

则需判断 U_2 的输入引脚上的输入信号 s_1, s_2, s_3 正常与否,若均正常,则故障可判定 U_2 内部出现故障。若 s_1, s_2, s_3 其中一个或多个存在异常,则仍按照模型中逻辑物理连接关系、关联关系逐级追溯,完成故障诊断定位,并将诊断过程和诊断结果直观地显示出来。

若故障诊断过程中,若指定的测试项目未能实现故障定位,则根据设定的算法重新指定新的测试项目,进一步诊断。

4 结束语

本文阐述了逻辑物理综合建模方法的建模原理及建模处理策略,以三角波产生电路为例说明 LPS 的建模过程。对于复杂的电气系统,建模原理及故障诊断方法一样,同样以导出的网络表文件进行建模,只是模型规模更大,建模时需要更加注重运用层次化建模、RU 单元合并、信号反馈闭环通路等建模处理策略。因此,LPS 建模方法可应用在通用电气系统故障诊断中。

参考文献

- [1] Elissaveta D G, Ekaterina N D D Y S. A Model-based Approach to Automated Diagnosis of Multiple Parametric Faults [EB/OL]. (2010-11-21). [https://www.researchgate.net/publication/228686260_A_Model-](https://www.researchgate.net/publication/228686260_A_Model-Based_Approach_to_Automated_Diagnosis_of_Multiple_Parametric_Faults)
- [2] Jurryt P, Gemund A J C, Andre B. A Model-based Approach to Sequential Fault Diagnosis [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2007, 10(2): 46-52.
- [3] 和 麟,王彦松,张慧敏,等. 故障传播模型的飞机电源系统故障诊断研究[J]. 机械与电子, 2012(9): 7-10.
- [4] 董 磊,任 章,李清东. 基于模型和案例推理的混合故障诊断方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(11): 2339-2343.
- [5] 刘长龙,马 昕,张贝克. 基于 SDG 模型的故障诊断专家系统[J]. 计算机工程, 2009, 35(17): 233-235.
- [6] 田华明,孙 华,赵宏家. 复杂电子系统的 TEAMS 测试性研究[J]. 测控技术, 2009, 28(9): 73-76.
- [7] 樊大地,王宏力,侯青剑. TEAMS 在故障诊断中的应用研究[J]. 装备制造技术, 2008(9): 126-128.
- [8] 龚 勇,景小宁,陈云翔,等. 基于多信号流图的飞控系统实时故障诊断[J]. 电光与控制, 2006, 13(6): 89-92.
- [9] 林志文,贺 喆,杨士元. 基于多信号模型的雷达测试性设计分析[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11): 2781-2784.
- [10] 明导(上海)电子科技有限公司. Mentor Graphics 公司线缆线束设计解决方案 CHS [J]. 中国集成电路, 2008, 17(3): 90-94.
- [11] 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): 43-45.
- [12] 曾庆华,黄哲志,贾 涛. 基于 LPS 模型的飞行器控制系统故障诊断方法[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(5): 20-25.
- [13] 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): 70-78.
- [14] 田 仲,石君友. 系统测试性设计分析与验证[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003.
- [15] 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): 86-90.
- [16] 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): 84-87.

编辑 刘 冰