

# 城轨车辆电气柜故障诊断方法研究

周晨程, 李 军

(南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

**摘要:** 城轨车辆电气柜种类繁多, 结构复杂, 若依靠人工检测的方式进行故障的排除, 不仅诊断效率低且可靠性差; 通过对多个城轨车辆电气柜的具体分析, 提出一种动态提取有向图结构模型并生成测试序列的算法, 利用图的最优路径算法进行测试自检, 最后使用一种适应性测试诊断树来完成故障的定位与隔离; 实验表明, 该诊断方法能够有效地对城轨车辆电气柜的故障进行诊断, 且对于不同拓扑结构的城轨车辆电气柜具有良好的适应性。

**关键词:** 依赖矩阵; 有向图; 电气柜; 故障诊断

## Research on Fault Diagnosis Method of Electrical Cabinet for Urban Rail Vehicles

Zhou Chengchen, Li Jun

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** There are many types of electrical cabinets in urban rail vehicles, and the structure is complex. Manual detection to eliminate the fault is not only low in diagnosis efficiency but also poor in reliability. Based on the analysis of multiple rail cabinets, an algorithm is proposed to dynamically extract the directed graph structure model and generate the test sequence. The optimal path algorithm is used to test the self-test. Finally, an adaptive test diagnosis Tree is used to complete the fault location and isolation. Experiments show that the diagnosis method can effectively diagnose the faults of electrical cabinets and have good adaptability to the electrical cabinets of different topologies.

**Keywords:** dependency matrix; directional graphic; electrical cabinet; fault diagnosis

### 0 引言

城轨车辆电气柜是轨道交通中保障安全的基础设施, 是影响轨道运输质量和可靠性的关键技术设备。电气柜投入使用前如果不经过故障的检测和排查, 会给企业生产经营带来很大的损失, 而且也给调试带来了困难。而传统人工检测的方式面临效率低、可靠性差等问题, 已经不能满足时代的需求, 因此, 寻找一种支持自动在线故障检测和定位且能适用于不同结构电气柜的故障检测方法具有重要意义。

城轨车辆电气柜中存在着大量的继电电路, 故障征兆往往只能通过测试点的电压信号来判断, 其表现形式单一, 但电路内部大多又是多输入多输出的复杂结构。针对小型电路而言, 可以使用群举测试法将可能存在的输入信号全部输入至待测电路作为测试码进行对比测试。然而, 电气柜中信号输入点与信号输出点较多, 群举法必然会暴露测试码过多、测试效率低的缺点, 同时也给仿真模拟响应信号带来很大难度<sup>[1]</sup>。针对这一现状, 将电气柜电路网络进行子网络划分后有效地减小了输入点与输出点的规模, 组合测试效率大大提高。本文基于依赖矩阵的电气柜故障诊断方法, 实现了动态构建电气柜电路拓扑结构, 并对其进行子网络分解, 结合路径寻优技术生成测试码, 最后使用适应性测试诊断树的方式

达到了故障的准确定位。

### 1 有向图模型

当前较成熟的测试性模型, 如信息流模型、多信号流图模型、混合诊断模型以及贝叶斯网络等都来源于有向图。因此, 代表电路拓扑的有向图模型  $G(V, E)$  是故障仿真数据的来源, 也是电路故障检测与推理的基础<sup>[2-3]</sup>。

不同结构的城轨车辆电气柜的内部电路, 本质上都可以用有向图的形式来表示。通过计算机读取电气柜的相关信息后, 能够将元件之间的连接关系抽象成图节点, 形成电路的拓扑网络。电气柜的结构信息可以分为两部分, 一部分为元件连接关系表, 描述电路中包含的元件及端子信息, 以及元件之间的连接关系, 另一部分为元件配置表, 描述元件的具体端子映射关系以及系统的总正总负信息。电气柜电路网络中存在着大量继电器与接触器设备, 在节点的数据结构中需要添加触点类型字段, 一个节点的数据结构应当包含的基本信息如表 1 所示。

表 1 节点数据结构

中文名称	英文名	类型
编号	ID	string
名称	Name	string
端子号	Terminal	string
节点类型	NodeType	string
触点类型	TNType	string
子节点	Children	List

收稿日期: 2017-03-23; 修回日期: 2017-04-07。

**作者简介:** 周晨程(1993-), 男, 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要从事故障诊断的原理研究与软件设计方向的研究。

李 军(1970-), 男, 博士, 教授, 主要从事伺服系统及其相关测控技术方向的研究。

城轨车辆电气柜内部电路拓扑结构的建立可以分为如下

几个步骤：

- 1) 读取所有连接关系信息，将所有出现的元件名称和端子号作为唯一标识，生成节点集合；
- 2) 读取一条连接关系信息，找到步骤一生成的节点集合中名称和端子与之匹配的两个节点；
- 3) 判断这两个节点各自的子节点中是否已经互相包含，如果未包含，就添加节点的引用或者地址。连接关系未遍历完成返回步骤 2)，否则转入步骤 4)；
- 4) 读取端子排短接表，以步骤 2)、3) 的方式把短接关系视为有向边添加到节点的子节点信息中；
- 5) 读取元件端子映射表，以步骤 2)、3) 的方式把元件自身的端子映射关系视为有向边添加到节点的子节点信息中，若遇到有向元件则按导通方向单方向添加子节点。

## 2 测试方案

### 2.1 对比测试法

针对大多数逻辑电路，最常用的检测方法即对比测试法，简单的原理可以表述为将一系列输入矢量  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$  加在标准线路 A 和待测线路 B 上，由异或电路对输出进行比较，结果为 1 说明 B 有故障，若所有输入序列输出的结果均为 0，则说明 B 线路正常，检测通过<sup>[4]</sup>。为了提高自动测试的效率，输入向量可以依据划分的子网络来自动生成，而子网络的标准输出响应可以使用仿真得到的模拟结果集来替代，输出的特征向量作为检索故障字典的索引，测试结构如图 1 所示。

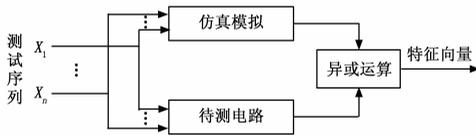


图 1 测试结构

### 2.2 子网络生成

测试以子网络为单位，同一子网络中包含的多条测试支路可以一起测试，因此子网络的划分也是故障隔离与定位的基础。测试模式可以分为两种类型，一种是导通测试，另一种是逻辑测试。导通测试较为简单，测试线路中不包括继电器、接触器等逻辑元件，将电路总正、总负以及测试点与测试点之间的导通测试划分为 3 个导通测试网络。逻辑测试较为复杂，测试线路中包含逻辑元件，一条逻辑支路的测试可能涉及到多条条件支路，该测试支路与条件支路组成一个子网络。

已知被测支路的情况下，寻找测试激励的问题实质就是求解布尔方程组的解的问题。然而，系统中的逻辑电路并非纯数字电路，其输入与输出并不固定，即布尔方程组结构是未知的。因此，必须先要确定输入输出，寻找有效的施加激励的测试点，首先通过深度遍历有向图，得到包含逻辑元件的测试支路集，然后生成完全条件回路集，即电路拓扑中所有测试点到总负且包含继电器线圈的回路集合。最后生成一个测试子网可以分为如下几步：

- 1) 将待测支路设为起始支路；
- 2) 起始支路中线圈对应的触点标记为‘动作’，常闭触点对应的线圈标记为禁止得电，常开触点标记为‘动作’，并

设置下一个目标线圈为常开触点对应的线圈；

- 3) 遍历栈中所有条件支路，若仍全部保持导通状态，则将起始支路入栈，否则，撤销起始支路中线圈对应的触点的‘动作’状态，继续寻找上一个目标线圈；
- 4) 寻找包含目标线圈的回路，设置为起始支路，返回步骤 2)；
- 5) 含常开触点但找不到条件支路，则出栈，返回步骤 4) 寻找另一条件回路；
- 6) 栈为空或栈顶支路不含有常开触点则结束。

## 3 故障—测试依赖矩阵

故障—测试依赖矩阵又称  $D$  矩阵，在测试性学科中依赖矩阵是设备故障与测试、故障与故障、测试与测试之间定性关系的一种矩阵表示。它能够将与设备故障诊断相关的知识 (FMECA、故障字典、测试性模型、仿真测试结论) 和算法 (数理逻辑、模式识别、图论等) 紧密衔接起来。基于依赖矩阵的测试性分析方法以依赖矩阵为核心，将设备可靠性信息直接关联到测试性工程中，配合多种诊断推理手段，最终给出标准化的、高可信度的、可验证的测试性分析结果<sup>[5-6]</sup>。

$D$  矩阵描述模型中所有可能发生的故障模式  $F = \{f_0, f_1, \dots, f_m\}$  与可用测试  $T = [d_{1j}, d_{2j}, \dots, d_{mj}]^T$  之间的逻辑关系：

$$D_{m \times n} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \\ d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix}$$

其中：矩阵的第  $i$  行向量  $F = [d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{in}]$  反映的是故障模式  $i$  发生时所有可用测试输出的结果，第  $j$  列向量  $T = [d_{1j}, d_{2j}, \dots, d_{mj}]^T$  反映的是测试  $j$  可以检测到的故障模式，矩阵中元素  $d_{ij}$  表示的是故障模式  $i$  与测试  $j$  之间的逻辑关系，即故障  $i$  发生时测试  $j$  产生的特征向量。由于电路拓扑结构有一定的复杂性，若由所有元件的故障模式与测试激励组成一个二维的矩阵，这个矩阵会十分庞大，不利于故障的隔离与定位，因此必须对电路进行子网络划分，建立各子网络的测试故障依赖矩阵。

直接通过穷举所有测试序列得到的依赖矩阵通常会包含一些冗余的无效数据。依赖矩阵中的全 0 行，表示该故障模式对于可用测试集没有分辨能力，称故障不可测；依赖矩阵中的全 0 列，表示该测试不能分辨系统故障模糊集中的任何故障，属于无效测试；矩阵中还包含特征向量完全相同的行，将这些故障模式称为不可区分故障。经过以下两个步骤可以简化依赖矩阵：

- 1) 删除所有不可测故障的行向量；
- 2) 合并所有不可区分故障的行向量。

根据有向图的最小覆盖原理可知，在简化的依赖矩阵中取有限个测试列，如果其能够涵盖的故障模糊集中所有的故障模式，那么生成的测试集是一组完全测试集。完全测试集表征依赖矩阵中的故障发生时能够被检测到的测试集对象。

## 4 测试集生成

### 4.1 问题

评价一组测试集是否合理通常可以使用模糊度、冗余度、故障隔离水平等多个指标来衡量，其中，测试的安全性是所

有指标的前提<sup>[7-8]</sup>。将生成的测试集直接用于实际电路进行测试是不安全的, 会面临很多的问题。这些问题可以概括为:

- 1) 测试点注入高压激励时可能存在短路问题;
- 2) 测试支路中可能存在环路问题;
- 3) 已知子网络的输入输出点, 求取有限种输入组合的情况下的正常输出特征向量与故障输出特征向量的问题, 即求子网络的完全测试集与最小测试集的问题。

#### 4.2 Dijkstra 算法

Dijkstra 算法是解决单源最短路径的经典算法, 在一个赋权的简单连通无向图  $G = \langle V, E, W \rangle$  ( $V$ : 顶点集;  $E$ : 边集;  $W$ : 权重) 中, 求一源结点  $a$  到其他结点  $x$  的最短路径的长度。算法思想为:

- 1) 把  $V$  分成两个子集  $S$  和  $T$ , 初始时,  $S = \{a\}, T = V - S$ ;
- 2) 对于每个  $t_i (t_i \in T)$ , 计算  $D(t_i)$ , ( $D(t_i)$  表示从  $a$  到  $t_i$  的不包含  $T$  中其他结点的最短路径的长度), 根据  $D(t_i)$  值找出  $T$  中距  $a$  最短的结点  $x$ , 写出  $a$  到  $x$  的最短路径的长度  $D(x)$ ;
- 3) 置  $S$  为  $S \cup \{x\}$ , 置  $T$  为  $T - \{x\}$ , 若  $T = \Phi$ , 则停止, 否则再重复步骤 2)。

#### 4.3 Dijkstra 在测试集生成中的应用

建立一个  $n \times n$  的二维矩阵, 作为有向图的权重矩阵, 其中  $n$  为有向图模型中的节点数。依据节点间的连接关系来设置不同的权重:

- 1) 等电位点之间的有向边权重为 0;
- 2) 断开状态的元器件的触点之间的有向边权重为  $\infty$ , 闭合状态的元器件的触点之间的有向边权重为 0;
- 3) 闭合的断路器触点间有向边权重大于 0。

计算所有测试点与总负之间的最短路径权重, 如果权重为 0 时, 会发生短路状况, 此测试点不能作为信号注入点。计算所有被测支路的首节点与尾节点之间的最短路径与权重, 如果权重为 0 则该支路是一条环路。

Dijkstra 算法还可以用于计算子网络在各故障模式下施加不同输入激励获得的响应向量。首先设置故障节点处的权重, 短路故障有向边的权重为 0, 开路故障有向边的权重为  $\infty$ 。找出该故障模式下子网络中线圈依然得电的继电器, 修改其相应的触点节点的权重, 常开触点权重修改为 0, 常闭触点权重修改为  $\infty$ , 计算各个信号激励点到各信号输出点的最短路径, 权重为 0 的路径即表示该输出点信号为 1, 反之为 0。

基于城轨车辆电气柜的有向图模型, 应用图论中最短路径算法, 可以快速排除短路、环路等不安全测试, 同时也提高了仿真模拟故障响应集的效率。

## 5 故障推理与诊断

理论上, 所有故障诊断问题都可以由以下五元组来进行描述:

- 1) 系统的故障模糊集, 记为  $F = \{f_0, f_1, \dots, f_m\}$ ;
- 2) 故障模式的先验概率分布集合  $p = \{p(f_0), p(f_1), \dots, p(f_m)\}$ ;
- 3) 系统可用的测试集  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ;
- 4) 测试代价集  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ;

5) 故障测试依赖矩阵  $D = [d_{ij}]_{(m+1) \times n}$ 。

在五元组的基础上, 故障诊断策略可以通过列表或者诊断树的形式来直观的描述。诊断策略的问题就是求解最优的测试诊断顺序和方案, 使生成的诊断树具有最小的测试代价的问题<sup>[9]</sup>。然而, 五元组中概率分布集合与测试代价集通常难以获取, 因此系统中无法应用启发式搜索算法等诊断策略, 改而使用一种适应性测试方法来生成电路的最小测试集, 该方法可以描述为:

1) 根据每一测试序列下的特征向量将故障模糊集划分为  $p$  个类别,  $n_i$  表示该测试中属于第  $i$  个类别的故障模式的个数,

$$f(p) = \begin{cases} 0 & p \leq 1 \\ \prod_1^p n_i & p > 1 \end{cases}, f(p) =$$

max 的列向量作为当前测试序列。  $f(p)$  称为该列的“权”, “权”的大小反映了相应的测试列区分故障的相对能力;

2) 测试完成后从依赖矩阵中删除该测试列, 并根据测试获得的特征向量, 查询依赖矩阵中相匹配的故障模式, 作为新的故障模糊集, 重复 1) 中的方法找到剩余测试列中“权”值最大的列作为下一次测试;

3) 当故障模糊集在剩余测试中的特征向量均相同时, 故障无法继续细分或隔离, 推理结束。

如图 2 所示, 该子网络中第一条为待测支路, 其余三条为条件支路, 其中 CF 标识的是测试点, 断路器默认均为闭合状态。待测支路连接总正, 因此测试码中只包含条件支路的 3 个输入点。MCCB 与 VD 的开路故障属于不可区分故障, 因此合并为一个故障模式, 并且删除了 MCCB 短路等不可测故障。为了方便叙述, 故障模式类别只设定为开路故障和短路故障两种。该子网络的测试依赖矩阵化简后如表 2 所示, 其中涉及的特征向量除  $F_0$  为正常的输出外, 其余均是响应输出与  $F_0$  正常输出的异或结果, 且都在单故障的假设之下进行。

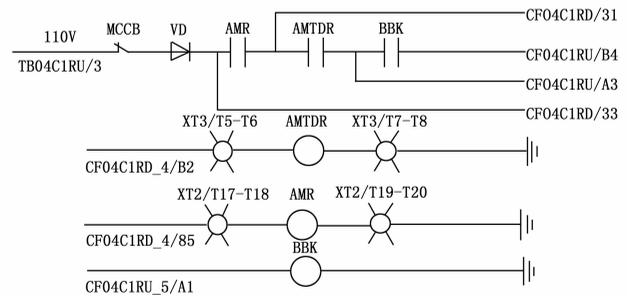


图 2 某子网络结构

分析故障测试依赖矩阵可知,  $T_1$  至  $T_7$  中  $T_3$ 、 $T_4$ 、 $T_6$  的“权”最大, 任选其一, 这里选择  $T_6$  作为首次测试, 故障模糊集可以被划分成三大类,  $F_1/F_8$  与  $F_7$  这两类故障模式被隔离到最小单元, 而  $F_0$ 、 $F_2$  至  $F_6$  对应  $T_6$  测试的特征向量均相同, 将其作为新的故障模糊集进行下一步测试。基于这 6 种故障模式继续计算剩余测试列对应的“权”,  $T_5$  和  $T_7$  的“权”最大, 选取  $T_7$  作为下一次测试激励, 故障再次可以被隔离为  $F_4$ 、 $F_5$  和  $F_0F_2F_3F_6$  这三类, 继续计算  $F_0F_2F_3F_6$  模糊集的下一测试激励, 选择  $T_1$  又可以隔离出故障  $F_2$  与  $F_3$ , 最后经过施加  $T_2$  测试激励, 故障被完全隔离到最小的范围中。

表 2 子网络依赖矩阵

测试码	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$
故障模式	(1,1,1)	(1,1,0)	(1,0,0)	(1,0,1)	(0,1,1)	(0,0,1)	(0,1,0)
正常 $F_0$	(1,1,1,1,1)	(1,0,1,1,1)	(0,0,0,1,1)	(0,0,0,1,1)	(1,0,0,1,1)	(0,0,0,1,1)	(1,0,0,1,1)
MCCB/VD 开路 $F_1/F_8$	(1,1,1,1,1)	(1,0,1,1,1)	(0,0,0,1,1)	(0,0,0,1,1)	(1,0,0,1,1)	(0,0,0,1,1)	(1,0,0,1,1)
AMTDR 开路 $F_2$	(0,1,1,0,0)	(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)
BBK 开路 $F_3$	(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)
AMR 开路 $F_4$	(1,1,1,0,0)	(1,0,1,0,0)	(0,0,0,0,0)	(0,0,0,0,0)	(1,0,0,0,0)	(0,0,0,0,0)	(1,0,0,0,0)
AMTDR 短路 5	(0,0,0,0,0)	(0,0,0,0,0)	(0,0,0,0,0)	(0,0,0,0,0)	(0,1,0,0,0)	(0,0,0,0,0)	(0,0,0,0,0)
BBK 短路 $F_6$	(0,0,0,0,0)	(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)
AMR 短路 $F_7$	(0,0,0,0,0)	(0,0,0,0,0)	(1,0,0,0,0)	(1,1,0,0,0)	(0,0,0,0,0)	(1,0,0,0,0)	(0,0,0,0,0)

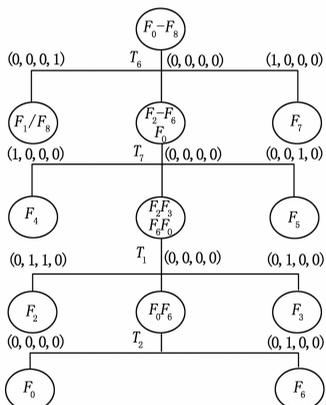


图 3 子网络诊断树

### 6 试验结果与分析

根据上述对适应性测试方法的应用，可以发现下一次测试的激励向量  $T_i$  均由上一次测试得到的特征向量来决定，将可能得到的测试结果（特征向量）均分类考虑，可以得到图 3（上接第 22 页）

[2] 王子洪. 基于 WSN 穿戴式系统的研究现状与展望 [J]. 中国医疗设备, 2012, 27 (2): 62-65.

[3] 方明科, 李 蕾. 一种用于 WLAN 的自适应发射功率控制方案 [J]. 计算机工程, 2012, 38 (13): 86-88.

[4] 王智鹰, 何 晨, 蒋铃铃. 基于最小发射功率的自适应调制多输入多输出系统 [J]. 上海交通大学学报, 2006, 40 (3): 391-393.

[5] 吴明慧, 严正香. 基于自适应调制与发射功率控制的 WLAN 功耗降低解决方案 [J]. 华中师范大学学报 (自然科学版), 2007, 41 (4): 533-536.

[6] Correia L, Macedo D, Dos S, et al. Transmission power control techniques for wireless sensor networks [J]. Computer Networks, 2007, 51 (17): 4765-4779.

[7] 孙佩刚, 赵 海, 罗玳玳, 等. 无线传感器网络链路通信质量测量研究 [J]. 通信学报, 2007, 28 (10): 14-22.

[8] 马 枫, 初秀民, 严新平. 内河 AIS 船台自适应发射功率调节技术

所示的完整诊断树。诊断树非常直观的反映了故障—测试激励—响应之间的关系，诊断树中的所有叶节点都是当前可用测试集下的不可再分割的故障集，由叶节点向上回溯，可以获得确定该最小故障集的完整测试序列，如  $F_5$  的测试序列为  $T_6-T_7$ ， $F_3$  的测试序列为  $T_6-T_7-T_1$ 。该子网络的故障定位测试集为  $\{T_6, T_7, T_1, T_2\}$ ，测试长度为 4。

### 7 结束语

本文提出了一种基于依赖矩阵的城轨车辆电气柜故障检测的方法，并叙述了从动态识别电气柜拓扑建立有向图模型到利用适应性测试方法导出诊断树的过程。通过建立的有向图模型来仿真模拟各个故障发生时输出的特征向量，建立起故障测试依赖矩阵，最终使用适应性测试生成方法可以确定完整的测试流程，并有效的将故障从电路隔离到子网络，从子网络隔离到元件。根据实验验证，该方法较以往城轨车辆电气柜的检测方法在一定程度上减少了测试的冗余，提高了测试的效率与诊断精度，并能适用于不同结构的城轨车辆电气柜的故障检测与诊断。

### 参考文献:

[1] 严 莹. 边界扫描在数字电路故障诊断中的应用 [D]. 南京: 南京大学, 2016 (5).

[2] 陈晋音. 基于时序约束模糊有向图的电网故障诊断 [J]. 控制工程, 2016, 23 (6): 800-811.

[3] 庞文青. 基于图模型的电子系统故障诊断及应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014 (7).

[4] 申延强. 基于免疫粒子群文化算法的数字电路故障诊断 [J]. 火力与指挥控制, 2016, 41 (8): 192-195.

[5] 韩 斌, 秦思渊. 基于多信号模型的诊断推理机设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (6): 1902-1904.

[6] 张 悦. 一种基于信号流图理论的流体网络建模方法 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28 (5): 1038-1044.

[7] 罗 慧, 蹇兴亮, 卢 伟. 基于动态蚁群算法的模拟电路最优测点选择 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 (10): 2231-2237.

[8] 谷晓娟. 可测性评估定量建模技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

[9] 刘 歆, 熊有伦. 数字电路测试生成的基本算法 [J]. 微电子学与计算机, 2002, 19 (2): 1-6.

[9] 韩素敏, 王裕清. 近红外无损脑血氧检测技术 [J]. 激光与红外, 2008, 38 (7): 659-661.

[10] 王志宇, 袁江涛, 周 珺, 等. 头戴式血氧检测装置的设计与实现 [J]. 科技资讯, 2016, 14 (17): 119-124.

[11] 俞文彬, 谢志军. 基于穿戴式心电信号监测系统的设计 [J]. 传感器与微系统, 2015, 34 (9): 65-68.

[12] Muller N J. Bluetooth demystified [M]. New York: McGraw-Hill, 2001.

[13] Salvadori F, De Campos M, Sausen P S, et al. Monitoring in industrial systems using wireless sensor network with dynamic power management [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2009, 58 (9): 3104-3111.

[14] 孙行行, 卢 伟, 钱宇宁, 等. 一种新型节能无线传感节点的设计与组网 [J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2011, 3 (5): 391-397.