

基于脉冲法的飞机电气线路测试仪研究

彭若梅 刘 杰 董慧芬

(中国民航大学航空自动化学院航空电气系, 天津 300300)

摘要 飞机电气线路故障检测是飞机维护的一项重要内容, 由于线路繁多布局复杂, 检测起来较为困难。本文设计了一种便携式飞机线路多功能测试仪以解决这一难题, 可以进行线路故障的检测、分析和定位。通过对飞机的各种线路故障进行分析、总结、分类及对各种检测方法进行比较分析, 确定脉冲检测法方法为测试仪的主要检测方法。多功能测试仪主要实现线路故障性质确定、故障筛选和线路故障定位等功能。本文重点研究故障判断及其定位方法, 对检测原理进行了详细地分析, 设计了电路原理图, 编写了相应的软件程序, 并给出线路测试仪的基本构型。

关键词: 故障检测; 脉冲法; 线路测试仪; 故障定位

Study on the instrument of the Aircraft Electrical Circuit Fault Detecting Based on the Pulse Method

Peng Ruomei Liu Jie Dong Huifen

(Civil Aviation University of China, Aeronautical Automation college,
Department of Aeronautical Electrical Engineering, Tianjin 300300)

Abstract Detecting the aircraft circuit fault is a main content of the aircraft maintenance, owing to the numerous circuits and complicated layouts, fault detecting becomes more difficult. A portable multifunctional testing instrument is designed in this paper, which can be used for the fault detecting, analyzing and locating of the aircraft wiring. Various types of circuit breakdown in the aircraft are analyzed, summarized and classified, the pulse method is selected as the main detection principle of the testing instrument through comparing and analyzing these various detecting methods. The main functions of instrument such as the fault type identifying, the breakdown circuit sifting and the exact breakdown position locating can be realized. There is a focus on the research of the fault diagnosis and location in the paper, a detailed analysis on the various detecting principle is given, main electric circuit is designed and a certain soft procedure is compiled, at last the basic structure of the circuit testing instrument is obtained.

Key words: fault detection; pulse method; circuit testing instrument; fault location

1 引言

随着经济的发展, 飞机作为交通工具越来越占据主要地位, 随着飞机数量增多, 飞机的维护也就成为主要问题。飞机供电系统的电缆性能好坏直接影响到飞行安全。美国运输安全委员会(NTSB)1996年对环球航空公司 800 次航班坠毁事故漫长的调查后断定, 事故原因是电缆线短路火花造成中心机翼油箱爆炸。总的来说, 飞机内部导线会因为机龄, 或对水、紫外线、温度、振动和过载的影响, 以及

在正常使用和维修期间所受的应力等老化问题。机龄超过 20 年的飞机肯定存在电线问题, 其中许多问题是在例行机务维修期间发现的。飞机电线的维修成本相当高^[1], 据估计, 中国每年在飞机电线系统排故和修理方面要花费约 180 万人工时。可见, 要降低飞机电线故障维修成本, 关键在于选用快速多功能测试仪表对电线故障进行分析定位, 从而减少飞机故障排除时间。

飞机电缆检测仪器常用的有两种: 万用表和专用测量仪器。利用两者检测故障均存在缺点: 利用

万用表只能对一束电缆中的每根电线逐个测试,需要花费许多时间,可靠性不高;一般的专用仪器采用有线数据传输的方法,在对飞机电缆进行测试的同时引入了大量的附加电缆,操作复杂。因此,有必要设计一种便携式的飞机电缆检测仪器,以便对机载系统线路进行分析与测试,实现对机载设备故障和线路故障快速准确的定位,本文对一种基于脉冲法的飞机电气线路测试仪进行了研究。

2 基于行播法的脉冲故障定位方法^[2-5]

脉冲故障检测法的原理是当在故障电缆芯上加脉冲电压时,发射的脉冲在传输线上遇到故障点会产生反射,如果反射脉冲与发射脉冲的极性相同,表示故障性质为断线;如果极性相反,则表示接地故障,如图1所示。脉冲波往返的时间差 t 通过仪器的指示显示系统表示出来,这样能迅速而又准确地确定故障点与测量端之间的距离 $x=0.5vt$ (式中 v 为脉冲波在电缆中的传播速度, t 为时间差), v 与电缆的结构尺寸和绝缘材料的种类有关,一般油纸绝缘电力电缆中的波速为 $160\text{m}/\mu\text{s}$ 。采用对比法测量,即在同一电缆的故障缆芯与良好缆芯分别测定反射所需时间之比,乘以总长度,即为故障点与测量端的距离。如果缆芯某个部位烧断,则可在电缆线路的两端分别用脉冲仪测定反射所需时间,由此可方便地算出故障点距各测试端的距离。本方法主要适用于电缆断线故障和低电阻(1000Ω 以下)接地故障。

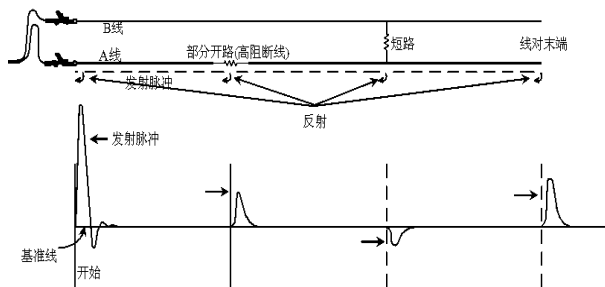


图1 脉冲故障定位示意图

设以电缆的始端为计算距离的起点,电缆上某一点到始端的距离为 x ,利用节点电流方程 $\sum i=0$,节点电压方程 $\sum u=0$ 。可以得到如下的电压电流方程组

$$\begin{aligned} u - (u + \frac{\partial u}{\partial t}) &= R_0 dx i + L_0 \\ i - (i + \frac{\partial i}{\partial x} dx) &= G_0 dx (u + \frac{\partial u}{\partial t}) + C_0 dx \frac{\partial}{\partial t} (u + \frac{\partial u}{\partial t}) \end{aligned} \quad (1)$$

略去高阶无穷小项,当 $R_0=0$ 、 $G_0=0$ 时,上式简化为波动方程其通解为

$$\begin{aligned} u(x,t) &= u^+(t-x/v) + u^-(t+x/v) \\ i(x,t) &= i^+(t-x/v) - i^-(t+x/v) \\ i^+(t-x/v) &= \frac{1}{Z_0} u^+(t-x/v) \\ i^-(t+x/v) &= \frac{1}{Z_0} u^-(t+x/v) \end{aligned} \quad (2)$$

对于固定的电压值 u_a 来说,它在导线上的横坐标是以速度 v 向 x 正方向移动的,因此 $u^+(t-x/v)$ 可以理解为一个以速度 v 向 x 正方向移动的电压波。同样 $u^-(t+x/v)$ 可以看成是一个以速度 v 向 x 负方向移动的电压波。 u^+ 、 u^- 分别被称为前行电压波、反行电压波,如图2所示。同理可以知道 i^+ 是前行电流波, i^- 是反行电流波。

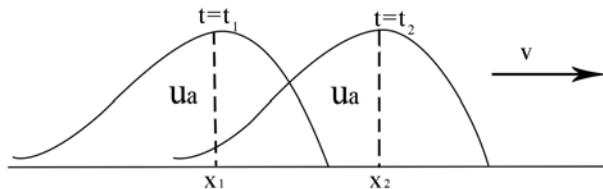


图2 前行电压波传播示意图

3 测试仪主要功能及工作原理

3.1 测试仪主要功能

便携式飞机电缆智能测试仪系统采用无线发射、单片机控制与测试技术,实现了对飞机电缆的自动测试。其基本功能有:

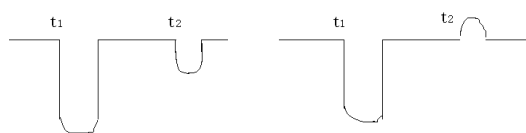
- (1) 快速检查飞机电缆线路的通、断、短等状态。
- (2) 对机载设备线路故障进行快速准确的定位。
- (3) 通过无线数据传输模块与计算机进行数据传输,完成检测任务的自动加载与检测数据的传送,通过计算机软件完成故障分析。

飞机线路测试仪的主要功能是对飞机电气线路故障的快速测试,及定位。

3.2 线路测试仪的工作原理

(1) 线路故障的定性检测

飞机线路测试仪的基本功能即飞机线路的短路,断路等故障的检测定性分析。其基本原理是根据所反馈回的脉冲波形来确定故障类型。线路在不同故障下所反馈回的波形有所不同,具体见图3。



开路（断路）故障波形 低阻（短路）故障波形

图 3 脉冲法故障检测波形图

采用脉冲反射原理^[6]，向线路送入一脉冲电压 U_i ，当线路有障碍时，障碍点输入阻抗 Z_i 不再是线路的特性阻抗 Z_c 而引起反射，其反射系数为

$$p = \frac{Z_i - Z_c}{Z_i + Z_c} \quad (3)$$

反射脉冲电压为

$$U_n = pu_i = \frac{Z_i - Z_c}{Z_i + Z_c} u_i \quad (4)$$

由式 (3) 可知，当线路出现断路故障时， Z_i 趋近于无穷大，而 $p=1$ ，反射脉冲为正。而当线路出现短路故障时 Z_i 趋近于 0， $p=-1$ ，反射脉冲为负。

(2) 多端线路的断路筛选

多端线缆的筛选检测是飞机线路测试仪的一个主要研究对象。其原理基本如下：主机通过适配器接在被测电缆的一端，各子机则由适配器连在被测电缆另一端的多个接头上，如图 4 所示。系统工作时，主机将一个恒流源信号按一定时间间隔逐一施加在被测电缆的各导线上，同时向各子机发出“开始检测”指令，子机接收到指令后开始检测电缆各导线的通断状态，并将数据保存在存储器中。待检测完毕，各子机向主机发出“检测完毕”信号，主机收到该信号后向子机发出“数据回传”指令，子机将检测数据通过无线传输到主机，主机通过接收到的导线通断状态判断被测电缆线路的状态，同时决策是否启动断缆测长电路，测量断缆位置。

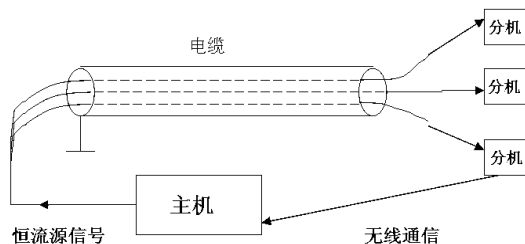


图 4 多端线路检测图

(3) 线路故障定位

1) 波速测定

欲知电缆故障点距测试端的距离，须要知道脉冲波在电缆中的传播速度。经资料查询精确测定出下述四种电力电缆的电波传播速度为：油浸纸电缆：

$V=160 \text{ m}/\mu\text{s}$ ；交联乙烯电缆： $V=172 \text{ m}/\mu\text{s}$ ；不滴流电缆： $V=160 \text{ m}/\mu\text{s}$ ；聚氯乙烯电缆： $V=184 \text{ m}/\mu\text{s}$ 。由于脉冲波在电缆中的传播速度只与电缆介质有关，故将这四种常见的介质电缆的传播速度在本仪器中预置。使用时只需选择出实际电缆的传播速度即可。

2) 脉冲法故障定位

线路故障定位主要指输电线路和光缆线路，飞机线路测试仪要兼顾这两种线路故障的定位，既要能够准确定位输电线路故障同时也要能够对飞机的一些光缆线路进行故障定位。在系统对电缆检查完毕后，如果主机从无线传输模块接收到的数据中发现有断路信号，便通过继电器将断线切换到断缆测长电路，进行断点定位。断路故障定位主要是利用电学中脉冲信号遇到断路会产生回波这一原理设计的。

脉冲法故障定位就是在故障电缆芯上加一脉冲电压时，发射的脉冲在传输线上遇到故障点会产生反射。如果反射脉冲与发射脉冲的极性相同，表示故障性质为断线，如果极性相反，则表示接地故障。脉冲波往返的时间差 t 通过仪器的指示器示波系统表示出来，这样便能迅速而又准确地确定故障点与测量端之间的距离 $x = vt/2$ （式中 v 脉冲波在电缆中的传播速度， t 为时间差）。

4 线路故障测试仪的主体设计思想^[7-8]

由于飞机线路分布范围广，往往是“一进多出”，因此线路测试仪的构造采用两部分组成，即一台主机、多分机及各种适配器一起组成，如图 5 所示。两部分通过通信模块进行信息交换。主机进行信号发出、信息存储、分析和故障定位，分机则进行信号接收、判断线路通断、储存信息并把信息传输给主机，再由主机判断是何故障并进行故障定位。两部分都由单片机控制，从而实现检测的智能化。

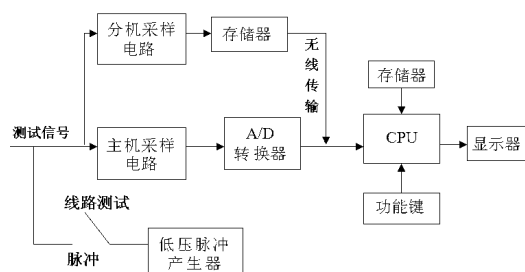


图 5 电缆检测仪方框图

4.1 主机部分

线路传感器的主机主要由嵌入式计算机系统、

恒流源、线路故障筛选电路、断缆测长电路、显示屏、无线传输模块 PTR2000 等组成,如图 6 所示。嵌入式系统构成测试仪的控制部分,主要包括单片机程序、I/O(含定时器)等。系统将各个元件结合起来,进行信号采集、存储和计算等。

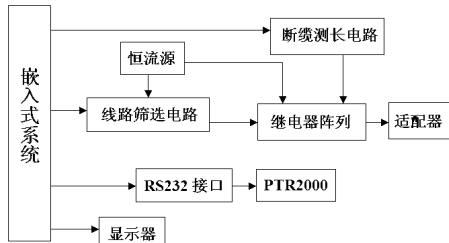


图 6 主机方框图

(1) 线路故障筛选电路

为了避免电缆上压降损耗产生的测量误差,系统的测试激励选用恒流源,恒流源的核心元件为集成恒流源 LM334,LM334 是一个三端可调集成恒流源,采用金属封装,当外部设定电阻 R_{set} 为 $10\text{ k}\Omega$,在的 LM334 输入端施加 27V 直流电压时,在输出端就能产生 10mA 左右的电流。

(2) 断路定位电路设计

在系统对电缆检查完毕后,如果主机从无线传输模块接收到的数据中发现有断路信号,便通过继电器将断线切换到断缆测长电路,进行断点定位。断路定位电路是根据电学中脉冲信号遇到断路会发生反射设计的。

1) 主电路设计

该电路利用程序控制 I/O 口产生一个宽度为 $4\mu\text{s}$ 的负脉冲作为检测的交流信号,在脉冲的下降沿启动定时计数器开始计数;在脉冲的上升沿开放与非门 U_1 当脉冲反射波返回来经 U_2 , U_3 滤波放大后变为一个宽度为 $4\mu\text{s}$ 的正向脉冲时,在脉冲的上升沿使定时器停止计时,从而获得脉冲在导线中的传输时间值 t ,根据电磁信号在导线中的传播速度 v ,即可计算出断线的位置 $vt/2$,从而完成故障定位。如图 7 所示。

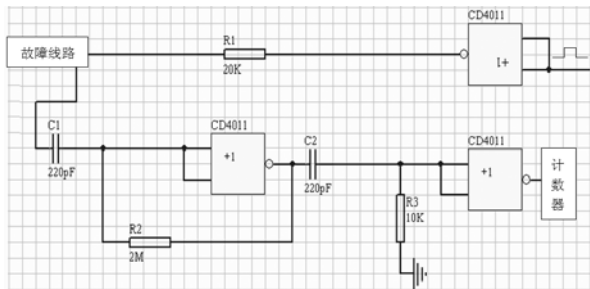


图 7 主测试电路图

2) 脉冲电压源设计

为了研究电缆低压脉冲响应,设计了实用的可调脉冲电压源,电路原理如图 8 所示。74LS123 的 A 口与单片机 P2.0 口相连,74LS123 的 B 和 CLK 端接高电平。当脉冲发射按钮按下后单片机 (AT89C51) 产生中断,在中断服务程序中,使单片机 P2.0 口产生一个负电压脉冲,则在 74LS123 的输出端 Q 就会产生正脉冲信号,通过对脉冲信号进行放大和跟随,可以增加其带负载能力。实际脉冲电压上升时间小于 40ns 。脉冲宽度计算近似公式为 $W=K\times(R_4+R_p)\times C$,其中 K 为比例系数,一般取 $0.3\sim 0.5$ 之间。脉冲宽度由电阻 R_1 ,进行调节,脉冲宽度设置为 $4\sim 9\mu\text{s}$ 可调。

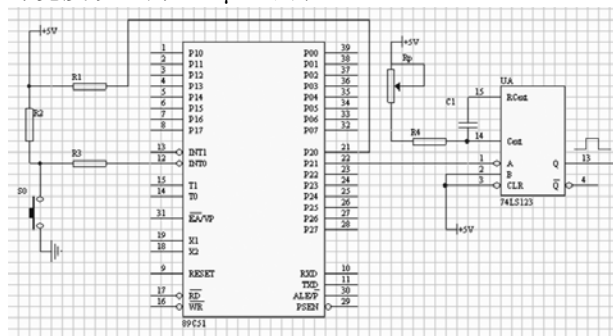


图 8 脉冲电压源电路图

4.2 分机部分

系统的分机是一个单片机系统,其硬件结构包括:AT89C51 单片机、标准电阻、多路选通器、无线传输芯片、电源电路等。根据主机发出的指令,对多片多路数据选择器构成的输入接口进行巡检,并且把巡检数据存储在存储器中,当检测完成后向主机发出“检测完毕”指令;当接收到主机发出的“数据回传”指令后,各子机按照约定顺序将数据通过无线传输模块传送给主机。由于子机采用电池供电,所以在长时间使用的过程中电池的电压会产生衰减,为此采用了 BAWOS 构成的稳压电路对输入电压进行稳压处理。

多段线路的筛选工作主要是由分机和主机共同完成的,主要包括信号采集、判断、存储与发送等。

信号采集判断主要由 AT89C51 来完成。这里拟定 16 个分机,即设 16 个信号采集点,信号通过前向通道分别进入 AT89C51 的 P1 ($0\sim 7$) 和 P2 ($0\sim 7$),如图 9。

由前向通道来的 16 路检测信号直接进入 C51 的 P1 和 P2 端,由单片机控制线路故障筛选和存储,并把测试结果传输给主机。如果 16 位全导通则 LED 输

出“00”，如果有一根线路故障假设为第三根，则LED输出“03”，从而完成线路故障的筛选任务。

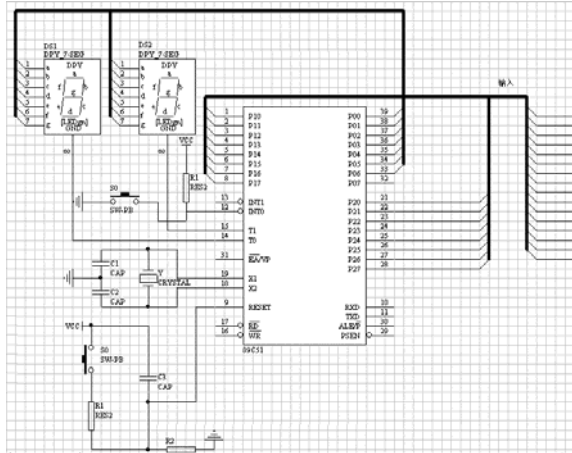


图9 信号的采集判断电路

5 结论

本文通过对飞机电气线路的分析，针对飞机线路故障检测不方便和故障定位难的问题，对检测飞机线路故障的新方法进行了研究。经过对不同故障分析和多种检测方法的比较，选择了脉冲信号检测方法。以脉冲法为主对线路测试仪的原理进行阐述，分别对测试仪的定性检测、筛选监测和故障定位检测原理进行分析，给出了线路测试仪的主体设计思想，对主要的电路图进行设计，包括主机筛选电路，

故障定位电路和分机的电路设计等。

参考文献

- [1] 魏征. 航空维修与工程. 民航总局, 2005.2.
- [2] 李明华, 门春江, 严璋. 高压电缆故障测距及定位方法[J]. 高电压技术, 2002.
- [3] 李胜祥. 电力电缆故障测试仪器的原理及选用[J]. 电世界, 1996 (6).
- [4] 朱小辉. 低压电缆故障的定点方法[J]. 天津电力技术, 1994(1).
- [5] 牟龙华, 刘建华. 电缆故障测距方法的基本工作原理[J]. 继电器, 1999, 27(4).
- [6] P. F. Gale etc. Fault Location Base On Travelling Waves. Developments in Power System Protection, Fifth International Conference on 1993.
- [7] 白杰, 田秀云. 飞机故障诊断与监控技术[M]. 天津: 中国民航大学, 1998.1.
- [8] 蔡美琴等. MCS-51 系列单片机系统及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.6.

作者简介

彭若梅 (1957-), 女, 副教授, 主要从事航空电机与传动、飞机环境电气控制、飞机电气传动方向的研究。

(上接第24页)

对测距结果产生显著的影响。对于故障相角对行波测距精度的影响，可以和传统的阻抗测距法相结合来消除测距死区。

参考文献

- [1] 李梦秋, 王耀南, 王辉, 等. 小电流接地系统单相接地故障点故障点探测方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10).
- [2] 徐丙垠, 李京, 陈平, 等. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62-65.
- [3] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 影响输电线路行波故障测距精度的主要因素分析[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 28-35.
- [4] 刘涛, 曾祥利, 曾军, 等. 实用小波分析入门[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

- [5] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距的原理与技术(第2版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [6] 徐青山. 电力系统故障诊断及故障恢复[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

作者简介

王晓丽 (1982-), 女, 在读工程硕士, 河南省煤炭技工学校教师, 现就读于河南理工大学电气工程与自动化学院, 研究方向为检测技术与智能仪表。

董爱华 (1955-), 男, 河南理工大学电气工程与自动化学院教授。现从事电工、电子技术教学和自动控制等方面的科研工作。