

大型飞机供配电系统可靠性评估与分析

蔡林, 张玲, 杨善水, 王莉*

南京航空航天大学 电气工程系 航空航天电源技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210016

摘要: 飞机供配电系统的可靠运行是关系飞机飞行安全的关键因素。以某供配电网络为例介绍了一种适合大型飞机复杂供配电网络的可靠性评估方法, 并对该供配电网络的可靠性指标进行了评估和分析。该评估方法利用图论的知识, 首先将飞机配电系统抽象为网络图; 然后采用深度优先搜索法求出电源点到负荷点的最小割集, 进而求出相应的最小割集, 找出系统运行的薄弱环节; 最后, 通过对最小割集的不变化处理结合配电系统部件的原始可靠性数据得出大型飞机供配电系统的可靠性指标。本文方法可以为大型飞机复杂供配电网络的设计和可靠性评估提供参考。

关键词: 飞机供配电系统; 复杂网络; 可靠性; 深度优先搜索; 最小割集

中图分类号: V242.3; TM732 **文献标识码:** A

目前, 飞机正朝着多电化和全电化的方向发展, 机载电气电子设备的数量急剧增加。大型飞机供配电系统正变得日趋庞大和复杂。飞机供配电系统的可靠运行是关系飞机飞行安全的关键因素。在飞机供配电系统的设计阶段需要对供配电系统进行可靠性分析和预测, 寻找系统设计中的薄弱环节, 优化供配电系统的设计方案。这样可以大幅降低因后期出现问题时更改设计而产生的时间和金钱成本。因此, 开展对大型飞机供配电系统可靠性评估的研究非常重要。

目前, 国内外关于飞机配电系统可靠性评估研究的公开发表的文献较少。文献[1]采用蒙特卡罗法开展了飞机电源系统的可靠性分析; 文献[2]和文献[3]中采用故障树分析法对飞机配电系统进行可靠性评估, 取得了较好的成果。故障树分析法通用性较好几乎可以应用于各种系统的分析, 但是当配电网络比较庞大和复杂时, 采用传统的故障树分析法对网络系统进行分析建模时, 工

作量较大, 需要针对网络系统的特点开展相应分析方法的研究。在陆地电力系统和船舶电力系统领域, 可靠性评估算法的研究都取得了较为突出的成果。其中, 文献[4]介绍了一种将复杂辐射状配电网简化的网络等值法; 文献[5]采用基于负荷点到电源点最短路的方法分析中压配电网的可靠性; 文献[6]和文献[7]采用邻接终点矩阵算法求取造成负荷停电的最小割集事件, 取得了很好的成果, 其优点是算法通用性较强, 但是当网络比较庞大时, 邻接终点矩阵算法的计算量较大, 耗时长; 文献[8]介绍了由所求的相互包含的最小割集近似评估可靠性的方法; 文献[9]和文献[10]介绍了最小路/最小割集不变化算法。

飞机供电系统集发电环节和配电环节于一体, 网络较为复杂, 节点数量较多, 是一个交直流混合的供电系统, 其中含有整流器、逆变器等大量功率和电流单方向流动的设备^[1]。并且飞机在飞行阶段, 供电系统应视为不可修复系统。这些都是与陆

收稿日期: 2010-09-02; 退修日期: 2010-12-28; 录用日期: 2011-03-21; 网络出版时间: 2011-05-09 11:53:31

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110509.1153.003.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20110509.1153.003

基金项目: 航空科学基金(20091952022)

* 通讯作者. Tel.: 025-84893497 E-mail: liwang@nuaa.edu.cn

引用格式: 蔡林, 张玲, 杨善水, 等. 大型飞机供配电系统可靠性评估与分析 [J]. 航空学报, 2011, 32(8): 1488-1496. Cai Lin, Zhang Ling, Yang Shanshui, et al. Reliability assessment and analysis of large aircraft power distribution systems [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(8): 1488-1496.

地以及船舶电力系统的不同之处。因此不能完全照搬陆地和船舶电力系统的可靠性评估方法对其进行研究,需要找到一个适合其特点的可靠性评估方法。

总结各类可靠性评估算法,其基本思想多为列举造成系统不可用的事件并计算其概率。本文借鉴并融合优化了各领域对供配电系统可靠性评估与分析方法的研究成果,结合飞机供配电系统的特点,开展了适合飞机复杂配电网络可靠性评估方法的研究。主要研究了根据飞机配电系统特点将其抽象为网络图的方法,并结合深度优先遍历搜索法提高了搜索电源到负荷点最小路集和最小割集的速度和效率;采用可靠性原始数据折算的方法,近似考虑了元件发生扩大型故障对系统可靠性的影响;通过对最小割集的不交化处理可以较为精确地评估负荷点的可靠性指标。

1 飞机供配电系统网络结构

飞机供配电系统是现代飞机的一个重要组成部分,它的作用是向飞机上所有用电设备连续地提供满足规定技术性能的电能,保证用电设备的正常工作^[1]。

某供配电系统的结构如图1所示,供配电系统主交流电源为115 V/400 Hz 恒速恒频电源,采用四发电通道分组并联的布局。分组并联布局综合了并联运行布局和独立运行布局两者的优点。对任一侧的分系统而言,并联运行确保了大多数故障不会导致供电中断,同时也减小了负载变化和转换引起的瞬变;与此同时,两侧分系统之间隔离独立运行有助于防止发生连锁故障,将系

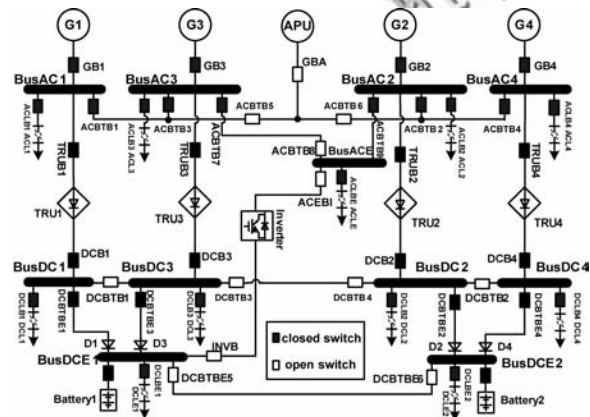


图1 某供配电系统结构图

Fig. 1 Schematic of a certain power distribution system

统瞬变限制在部分分系统中^[12]。

直流二次电源也为四通道布局,正常情况下,每台变压整流器独立工作,分别向各自对应的直流主汇流条供电。当某一台变压整流器故障时,便将其从系统中隔离,由同侧正常工作的变压整流器通过汇流条连接接触器向失电的直流主汇流条供电。辅助电源为一台由辅助动力装置驱动的交流发电机。在交流主电源发生故障时,辅助电源可以向配电系统提供额外的电能满足负载的需求。系统中的直流和交流应急电源由两台航空蓄电池和一台逆变器组成。系统正常工作情况下,直流应急汇流条由同侧的两个直流主汇流条冗余供电,蓄电池处于浮充状态,交流应急汇流条由交流主电源供电。当系统发生故障时,蓄电池可以向敏感电子负载提供直流不间断电源,当主交流电源和辅助电源都发生故障时,逆变器便投入运行,向交流应急汇流条提供电力。

2 供配电系统可靠性评估方法

可靠性的定义是在规定的条件下和规定的时间内系统完成规定功能的能力^[13]。它可用可靠度 R_s 和故障率 λ 等几个指标定量表示。当元件寿命服从指数分布时,元件故障率 λ 为恒定值,元件可靠度为 $R_c(t) = e^{-\lambda t}$ 。

飞机配电系统可靠性评估算法流程图如图2

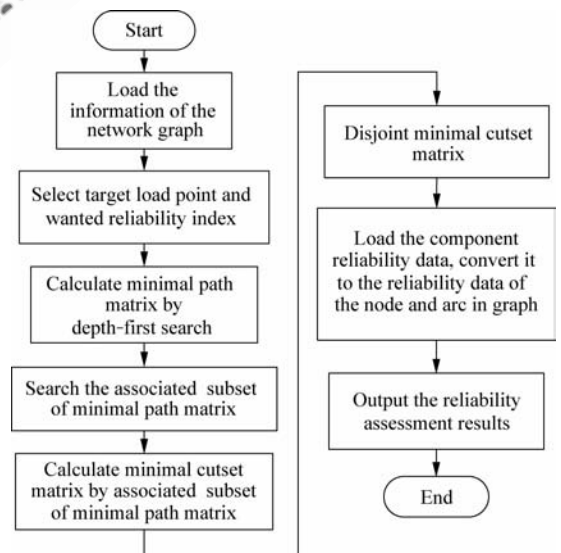


图2 大型飞机配电系统可靠性评估算法流程图

Fig. 2 Flow chart of reliability assessment of large aircraft power distribution system

所示。飞机在飞行阶段,供配电系统应视为不可修复系统,因此不能照搬陆地和船舶配电系统的可靠性指标对大型飞机配电系统进行可靠性评估。又由于飞机配电系统有着故障重构等容错供电设计,其本身又是一个能够自愈的系统。本文通过寻找造成负荷点中断供电的最小割集事件,以及无法经过故障重构继续向负荷点供电而造成负荷点永久性失电的最小割集事件,进而评估飞机供电系统中的负荷点不中断供电可靠度和负荷点供电可靠度。

2.1 拓扑结构网络图的表示方法

将复杂的飞机供配电网络拓扑抽象成为网络图,可以利用计算机对图进行辅助分析,搜寻源节点到目标节点的路集和割集,枚举系统故障状态^[14]。因此,将供配电网络拓扑抽象为网络图要遵循以下两个原则。首先,所抽象等效网络图能够反映供配电网络的拓扑结构和工作状态;其次,所抽象等效网络图能够方便计算机辅助分析,有助于提高计算机算法的效率。根据以上两条原则,总结了将大型飞机供配电系统抽象成为网络图的具体方法。

① 将配电系统中的双节点元件如开关、线路、发电机、变压整流器等,抽象为网络图中的弧、汇流条等单节点元件,等效为图中的节点。

② 在图的生成过程中,设置一个虚拟的源节点,等效为供电系统输出功率的源点,电能由该源节点出发,经过发电机、蓄电池所抽象的有向弧,向配电系统提供电能。

③ 在图的生成过程中,设置若干虚拟的阱节点,等效为负荷点。电能经过系统负荷输出线所抽象的有向弧,消耗在对应负载上。

④ 配电系统中功率和电流单方向流动的原件如变压整流器、逆变器、二极管等抽象为有向弧,否则为无向弧。

⑤ 为了降低图中节点和弧的数量,提高运算效率,当元件间存在串联的关系,且该元件串间没有分叉节点时,将该元件串等效为一条弧。

将图1中的供配电系统抽象为网络图,如图3所示。 v_1 为网络中虚拟的源节点,发电机G1和发电机断路器抽象为有向弧e1,电能经由弧e1向发电机汇流条BUSAC1所抽象的节点v2提供电能。

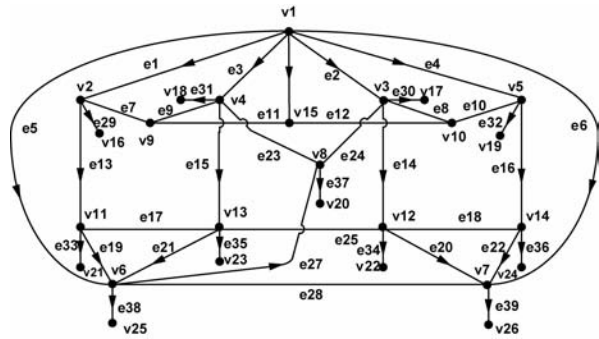


图3 某供配电系统抽象网络图

Fig. 3 Abstract network graph of a certain power distribution system

2.2 最短路集求取方法

采用深度优先搜索法搜索系统的最短路集,文献[13]介绍了一种非常巧妙的网络图的编码和深度优先最短路搜索算法。基于深度优先搜索法求解网络图最短路矩阵的程序流程图如图4所示,程序中变量的说明如下。

路径矩阵 R :描述网络的拓扑信息。路径矩阵 R 的第 i 行记录了节点 i 可以进一步到达的所有相邻节点的标号。另外在 R 的每行再增加一个元素,若该行是源节点行,则增加-1,否则补0。对于不同的行,可达邻接节点数不相等时,元素用0补齐。

网络邻接矩阵 A :当节点 i 存在可达邻接节点 j 时, $A(i, j)$ 为由节点 i 到其相邻节点 j 所经过弧的编号,否则 $A(i, j) = 0$ 。

辅助矩阵 F :

$$F(i) = \begin{cases} -1 & \text{本轮搜索中第 } i \text{ 个节点为目标节点} \\ 1 & \text{本轮搜索中第 } i \text{ 个节点已经经过} \\ 0 & \text{本轮搜索中第 } i \text{ 个节点尚未经过} \end{cases}$$

从源节点开始每搜索一步则动态修改 $F(i)$ 的值。

辅助矩阵 C : $C(i)$ 指向了第 i 个节点当前正在访问的邻接节点,初始值为1,并在程序运行中根据需要动态修改。

矩阵 P : $P(W, V)$ 记录了第 W 条最短路由源节点到目标节点所经过的第 V 个节点的编号。

最短路矩阵 $path$:程序的输出结果,其行代表所找到的最短路,列代表配电网元件所等效到网络图中的节点和弧数量。若第 i 条最短路经过元件 j ,则 $path(i, j) = 1$,否则 $path(i, j) = 0$ 。

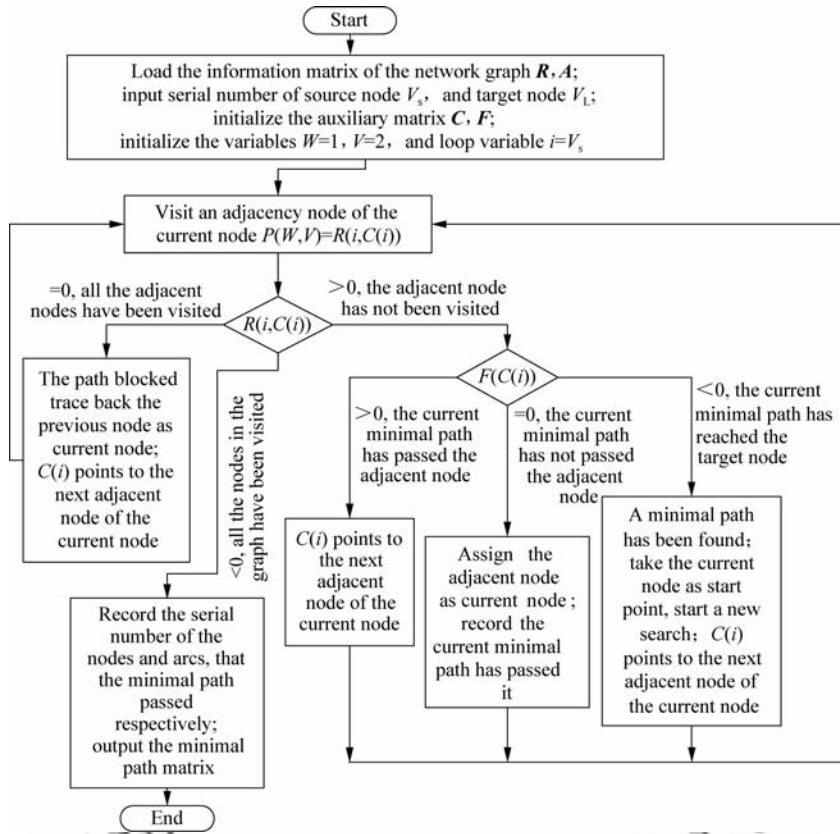


图4 求解网络图最小路矩阵程序流程图

Fig. 4 Flow chart of the algorithm searching for minimal path matrix of network graph

2.3 最小割集求取方法

利用最小路矩阵求取最小割集,该方法的基本思想是,如果最小路矩阵中某一列元素全为1,那么,最小路矩阵的这一列所对应的元件就是网络的一阶最小割集。再将最小路矩阵中任意两列元素(不包含一阶最小割集列)进行逻辑或,如果逻辑运算结果列元素全为1,那么这两列所对应元件就是网络的一个二阶割集。以此类推。本文利用该故障搜索方法找到源节点到目标节点的最小割集,包括一阶割集、二阶割集、三阶割集,也就是相应的一重故障、二重故障、三重故障。由于三重以上的故障发生的概率和频率都极小,低阶割集支配了系统的可靠性指标。故本文在求最小割集时只考虑到三阶割集,更高阶割集暂不考虑。

求出电源点到目标负荷点的最小路矩阵后,从所求出的最小路矩阵中除去包含系统正常供电状态下断开的开关弧所在行后,求得的最小割矩阵对应目标负荷点的中断供电事件;直接利用所求出的最小路矩阵求得的最小割集矩阵对应目标

负荷点永久性失电的最小割集事件,即经过故障重构仍无法为目标负荷点恢复供电的故障事件。分别对搜索出的造成目标负荷点中断供电和永久失电的最小割集事件加以分析和计算,从而得出目标负荷点的不中断供电可靠度和供电可靠度。

2.4 最小割集不变化方法

对于所求出的系统的最小割集 $C_s = \bigcup_{i=1}^l C_i$,一般来说 $C_i (i=1, 2, \dots, l)$ 是相互包含的,系统的不可靠度可按照式(1)求得。

$$F_s = P\left\{\bigcup_{i=1}^l C_i\right\} = \sum_{i=1}^l P\{C_i\} - \sum_{i < j = 2}^l P\{C_i \cap C_j\} + \dots + (-1)^{l-1} P\{C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_l\} \quad (1)$$

式(1)的项数为 $2^l - 1$ 项,当最小割集的数量很大,此时的计算量十分巨大。因此需要对最小割集进行不变化处理。采用 Aggrawal 提出的

“删去留下”法,其基本思想是采用增加变元的方法逐一将相交的最小割集不相交化,最终求得互不相容的最小割集 $C_{disj}^{[15]}$ 。

“删去留下”法的程序流程图如图 5 所示。程序中的变量、向量分解步骤和判断规则说明如下。

最小割集矩阵 $cutset$:若第 i 个最小割集包含元件 j 则 $cutset(i,j)=1$,否则 $cutset(i,j)=0$ 。

矩阵 T_M : 其第 j 行向量 $T_M(j,:) = \sum_{i=1}^j cutset(i,:), j=1,2,\dots,l$;

行向量 K :比较 $T_M(j,:)$ 和 $cutset(j,:)$ 对应位置的每一个元素,若 $T_M(j,:)$ 中非 0 元素对应 $cutset(i,:)$ 的元素为 0,就由大到小记下它们的位置标号,并存入行向量 $K=[K_1 \dots K_2 \dots K_l]$;

行向量 $Matrix(j,:)$ 对 K_k 的分解操作:分别用 1 和 -1 代替行向量 $Matrix(j,:)$ 第 K_k 位置上的零,得到两个分量记为 C_{Mj} 和 C_{IMj} ;

判断规则 1: $C_{Mj}(C_{IMj})$ 中有 1 的位置包含了任一 $cutset(i,:)(i < j)$ 全部有 1 的位置;

判断规则 2:每个 $cutset(i,:)(i < j)$ 中有 1 的位置至少有一个与 $C_{Mj}(C_{IMj})$ 中相同位置的 -1 相对应;

不相交的最小割集矩阵 $cutset_dis$:程序的输出结果,在 $cutset_dis(u,v)$ 中,“1”对应于割集 C_{disu} 中元件 v 故障,“-1”对应割集 C_{disu} 中元件 v 正常,“0”表示对应割集 C_{disu} 不含元件 v 。

cut_chk, cut_chk_t 存放了不交化过程中缓存的中间结果; s_c, s_k 为根据矩阵中每个行向量不同的情况而需要循环的次数。

求出不相交的最小割集后,负荷点的故障率可以按照式(2)计算。

$$F_s = \sum_{j=1}^m P\{C_{disj}\} \quad (2)$$

2.5 可靠性原始数据到网络图可靠性数据折算方法

当元件寿命服从指数规律分布时,元件故障率 λ 为恒定值,配电系统中元件的可靠性原始数

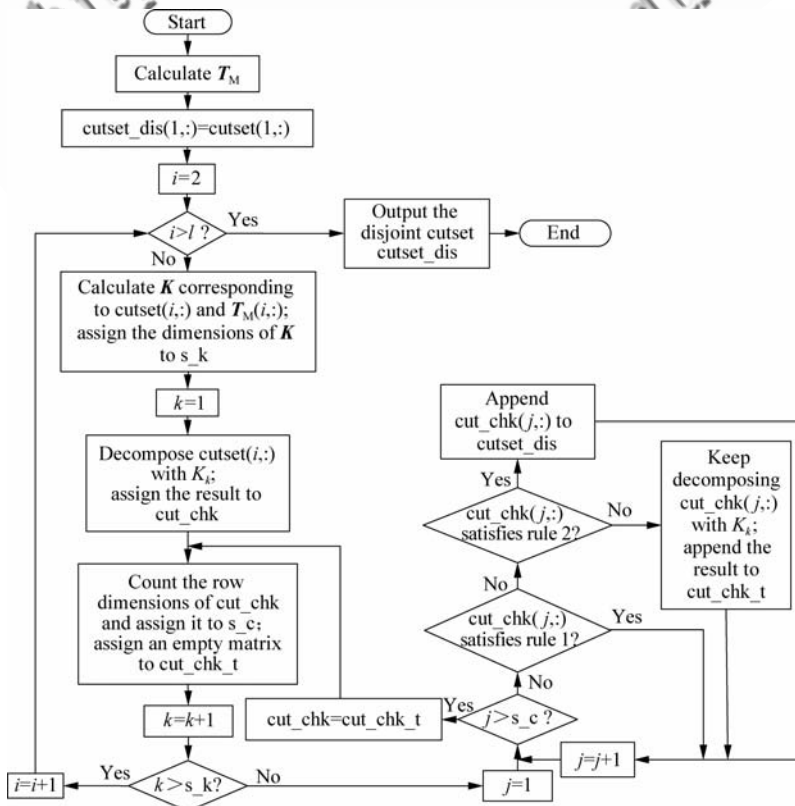


图 5 最小割集不交化程序流程图

Fig. 5 Flow chart of algorithm for disjoint of minimal cut sets

据可以按照以下方式折算到网络图中的节点和弧的可靠性数据指标。

对于网络图中的一条弧,当该条弧由若干个元件串联等效而成时,则这一条弧的故障率可以按照式(3)进行折算。

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (3)$$

式中: n 为抽象为网络图中该条弧的串联元件的个数。

对于网络图中的一个节点,有很多弧或终止或出发于它,每一条弧等效为配电系统中的一条分支。当该分支发生扩大型故障时,就有可能使该节点受到牵累,退出运行,从而造成与其相关联的负荷点失电。根据配电系统的网络结构,将配电系统中与相应节点相关联的元件的扩大型故障率近似折算为网络图中该节点的故障率,参与系统的可靠性评估。折算中只考虑到开关保护电器的一阶拒动型故障,即认为存在上下级关系的两个或两个以上开关保护电器不会同时发生拒动故障。

设配电系统中某汇流条或接线节点自身的可靠度为 λ_b ,有若干处处于工作状态中的常闭分支与该汇流条或连接节点相连接。分别由这些分支向下搜索,直到遇到开关保护电器或故障隔离元件(其功率和电流只能单向流动如二极管,限制了所要折算的目标汇流条和接线节点向故障点馈送短路电流),并记下此时所经过的所有非开关保护电器,其数量记为 w 。同时记下所有遇到的开关保护电器,其数量记为 m 。再分别从所记下的开关保护电器向下搜索,直到遇到其他开关保护电器或故障隔离元件,并记录本次搜索所经过的非开关保护电器,其数量记为 $u(i)$ 。则该汇流条或接线节点在网络图中等效的节点可靠度可以按照式(4)进行折算。

$$\lambda_v = \lambda_b + \sum_{k=1}^w \lambda_{ck} + \sum_{i=1}^m (P_{fi} \sum_{k=1}^{u(i)} \lambda_{ck}) \quad (4)$$

式中: P_{fi} =开关拒动次数/开关应动次数; λ_{ck} 为元件 k 的扩大型故障率。

当元件寿命不服从指数规律分布时,在目标负荷点供电可靠度计算时,可以根据元件的可靠度函数计算出元件在不同时刻的可靠度,并将其代入求解目标负荷点供电在对应时刻的可靠度。

3 可靠性评估及分析

采用前文介绍的方法对某一次配电系统右侧交直流主汇流条和右侧交直流应急汇流条进行可靠性评估与分析。

配电系统组成元件的可靠性原始数据如表1所示。表2和表3分别给出了电源点到交流应急汇流条的最小路集,以及造成交流应急汇流条永久失电的最小割集事件。

表1 配电系统组成元件的原始可靠性数据

Table 1 Reliability parameters of components

Component	Fault rate/h ⁻¹	Diffusive fault rate/h ⁻¹
Contactors	1.333 3×10 ⁻⁵	0.5%(Refuse operation)
Generator	5.555 6×10 ⁻⁵	8.333 3×10 ⁻⁶
Inverter	9.090 9×10 ⁻⁵	1.363 6×10 ⁻⁵
Battery	1.830 0×10 ⁻⁶	2.745 0×10 ⁻⁷
TRU	5.882 4×10 ⁻⁵	8.823 5×10 ⁻⁶
Bus	5.000 0×10 ⁻⁷	5.000 0×10 ⁻⁷
Diode	5.714 3×10 ⁻⁶	8.571 4×10 ⁻⁷
Feeder	3.448 3×10 ⁻⁶	1.551 7×10 ⁻⁶

表2 电源到交流应急汇流条的最小路集

Table 2 The minimal path sets from source node to node BUSACE

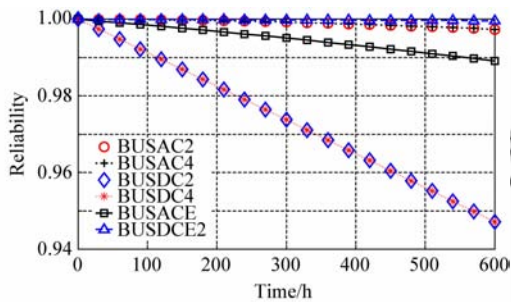
Path	List	Minimal path
Minimal path of normal power supply mode	1	e2v3e24v8
	2	e4v5e10v10e8v3e24v8
	3	e3v4e23v8
	4	e1v2e7v9e9v4e23v8
Minimal path of alternate power supply channel	7	e5v6e27v8
	8	e6v7e28v6e27v8
	9	e26v15e11v9e9v4e23v8
	10	e26v15e12v10e8v3e24v8
	11	e3v4e9v9e11v15e12v10e8v3e24v8
	12	e1v2e7v9e11v15e12v10e8v3e24v8
	13	e2v3e8v10e12v15e11v9e9v4e23v8
	14	e4v5e10v10e12v15e11v9e9v4e23v8

表3 造成交流应急汇流条永久失电的最小割集

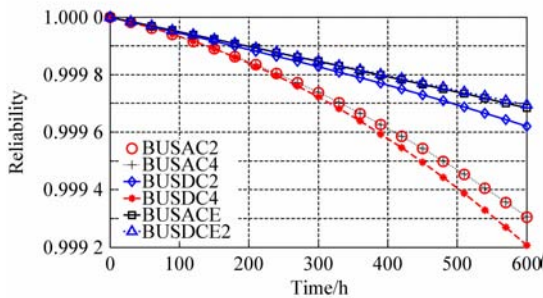
Table 3 The minimal cut sets that cause permanent loss of power for node BUSACE

List	Minimal cut set	List	Minimal cut set	List	Minimal cut set
1	v3v4v6	4	v3e23e27	7	v6e23e24
2	v3v4e27	5	v4v6e24	8	e23e24e27
3	v3v6e23	6	v4e24e27	9	v8

右侧主配电中心各汇流条的可靠性评估结果如图 6 所示。从图中可以看出直流应急汇流条的可靠度最高,满足美国空军《先进系统航空电子计划》中对关键飞行负载在 2 h 内不中断供电的可靠度大于 0.999 975 25 的要求^[2-3,12]。这是因为其供电通路较多,当来自主直流汇流条的供电中断时,蓄电池还可以提供电力插入保证不中断供电,并且电力二极管隔离了主直流汇流条侧的扩大型故障对直流应急汇流条的影响。对于在飞行阶段持续工作,要求不中断供电的设备应拥有一条从直流应急汇流条取电的冗余供电支路。



(a) Reliability of bus uninterrupted power supply



(b) Reliability of bus power supply

图 6 右侧主配电中心各汇流条供电可靠度评估结果
Fig. 6 Reliability assessment of bus power supply

由于交流应急汇流条在正常供电模式下,其本质是主交流汇流条的次级汇流条,因此其不中断供电可靠度低于主交流汇流条,而当系统发生故障后,交流应急汇流条的备用供电通路较多,因此构成其永久失电的最小割集的阶数较高,其供电的可靠度就会大于主交流汇流条供电的可靠度。由此可见虽然交流应急汇流条供电可靠度较高,但是其提供不间断电源的能力较差,因此,对不中断供电要求不高,或者正常情况下不工作,在应急情况下启动工作的设备可以由交流应急汇流条供电。

普通的负载由交流和直流主汇流条供电基本

都可以满足可靠性要求,若对可靠性要求较高,则可采用从左侧和右侧主汇流条同时取电的方案,直流负载可以通过并联二极管冗余供电,交流负载可以通过转换继电器在正常供电通路上元件发生故障时进行供电切换。

4 结 论

(1) 进行了飞机供电系统的可靠性评估与分析的研究,通过对某供电系统网络的可靠性评估与分析,介绍了一种适合飞机复杂供电系统可靠性评估与分析的算法。算法针对网络系统运行特点,易于实现计算机辅助运算,以提高分析效率,同时可以给出电源到目标负荷点的最小路集以及造成目标负荷点中断供电和永久性失电的最小割集事件,为研究人员提供针对网络分析的材料。

(2) 通过对实例的分析,证明该算法可以较为有效地辅助分析复杂供电系统,进行供电系统的可靠性评估以验证系统设计的可靠性指标,可以为飞机供电系统的设计和优化,以及运行决策提供一定的参考依据和帮助。

参 考 文 献

- [1] 吕弘, 袁海文, 张莉, 等. 基于模式重要度的航空电源系统可靠性估计[J]. 航空学报, 2010, 31(3): 608-613.
Lu Hong, Yuan Haiwen, Zhang Li, et al. Aircraft electrical power system reliability estimation based on pattern importance[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(3): 608-613. (in Chinese)
- [2] 周素莹. 多电飞机电气系统的研究[D]. 西安:西北工业大学自动化学院, 2006.
Zhou Suying. Research on more electric aircraft power system[D]. Xi'an: Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [3] 牛云. 先进飞机电气系统计算机控制与管理主处理机关键技术研究[D]. 西安:西北工业大学自动化学院, 2006.
Niu Yun. Research on key technologies of advanced aircraft power system processor[D]. Xi'an: Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [4] 万国成, 任震, 田翔. 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 48-52
Wan Guocheng, Ren Zhen, Tian Xiang. Study on model of reliability-network-equivalent of distribution system reliability[J]. 航空学报编辑部 <http://hkxb.buaa.edu.cn>

- bility evaluation [J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23 (5): 48-52. (in Chinese)
- [5] Xie K G, Zhou J Q, Billinton R. Reliability evaluation algorithm for complex medium voltage electrical distribution networks based on the shortest path[J]. IEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution, 2003, 150(6): 686-690.
- [6] 鲁宗相, 郭永基. 水电站电气主接线可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(18): 16-19.
Lu Zongxiang, Guo Yongji. Reliability evaluation of hydroelectric power station bus systems arrangement[J]. Automation of Electrical Power Systems, 2001, 25 (18): 16-19. (in Chinese)
- [7] 李红江, 鲁宗相, 王森, 等. 基于可靠性模型的船舶电网拓扑结构对比分析[J]. 电工技术学报, 2006, 21(11): 47-53.
Li Hongjiang, Lu Zongxiang, Wang Miao, et al. Analysis of shipboard power system topological structures based on reliability model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(11): 47-53. (in Chinese)
- [8] 相晓鹏, 邵玉槐. 基于最小割集法的配电网可靠性评估算法[J]. 电力学报, 2006, 21(2): 149-153.
Xiang Xiaopeng, Shao Yuhuai. Reliability evaluation of distribution systems based on the minimum cut sets method [J]. Journal of Electric Power, 2006, 21(2): 149-153. (in Chinese)
- [9] 任明珠, 郜能灵, 王鹏, 等. 基于直接不交化最小路的船舶电力主接线可靠性分析[J]. 船电技术, 2009(12): 1-7.
Ren Mingzhu, Tai Nengling, Wang Peng, et al. Reliability evaluation of main electrical connection of shipboard based on disjointing minimal pathset[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2009(12): 1-7. (in Chinese)
- [10] Suresh R, Aggarwal K K. An efficient method for reliability evaluation of a general network[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1978, R-27(3): 206-211.
- [11] 王守方. 浅谈飞机供电系统的供电转换[J]. 航空标准化与质量, 2001(5): 39-42.
Wang Shoufang. Power conversion of aircraft power supply system [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2001(5): 39-42. (in Chinese)
- [12] 于敦, 王守芳, 林侠. 国外飞机供电系统手册[M]. 北京: 中国航空信息中心, 1997: 22-30.
Yu Dun, Wang Shoufang, Lin Xia. Foreign aircraft power supply system manual[M]. Beijing: China Aeroinfo Center, 1997: 22-30. (in Chinese)
- [13] 王珍熙. 可靠性·冗余及容错技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991: 63-70.
Wang Zhenxi. Reliability · redundancy and fault tolerant technique[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1991: 63-70. (in Chinese)
- [14] 郭志忠. 电力网络解析论[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 2-47.
Guo Zhizhong. Analysis of electricity network[M]. Beijing: Science Press, 2008: 2-47. (in Chinese)
- [15] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 66-69.
Guo Yongji. Principles of reliability engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 66-69. (in Chinese)

作者简介:

蔡林(1985—) 男, 硕士研究生。主要研究方向: 飞机供配电系统网络可靠性与故障重构。

Tel: 025-84893497

E-mail: lcolinq@163.com

王莉(1969—) 女, 博士, 教授。主要研究方向: 飞机供配电系统网络可靠性与故障重构。

Tel: 025-84893497

E-mail: liwang@nuaa.edu.cn

Reliability Assessment and Analysis of Large Aircraft Power Distribution Systems

CAI Lin, ZHANG Ling, YANG Shanshui, WANG Li *

Engineering Research Center of Aerospace Power Technology, Ministry of Education, Electrical Engineering Department, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: Reliable operation of the aircraft power distribution system (APDS) is critical to the flight safety of a plane. In this paper, a reliability assessment algorithm suited to a complex large aircraft power distribution network is introduced, and the reliability of a certain power distribution system is assessed and analyzed. The algorithm abstracts the power distribution system as a network graph. The minimal path sets are searched from the source node to the sink nodes by depth-first search (DFS). Then the corresponding minimal cut sets are found, which can point out the weaknesses in the system operation. Finally the minimal cut sets are converted to disjoint sets. According to the raw reliability data of the components, the reliability of a large aircraft power distribution system can be evaluated. This method has the advantage of strong logicity and universality, which may provide reference for the design and reliability evaluation of a complex large aircraft power distribution network.

Key words: aircraft power distribution system; complex network; reliability; depth-first search; minimal cut set

Received: 2010-09-02; **Revised:** 2010-12-28; **Accepted:** 2011-03-21; **Published online:** 2011-05-09 11:53:31

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110509.1153.003.html **DOI:** CNKI:11-1929/V.20110509.1153.003

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20091952022)

* **Corresponding author.** Tel.: 025-84893497 E-mail: liwang@nuaa.edu.cn