

# 基于飞机改装的电气负载分析方法及工具开发

崔媛媛 张凤 林雨萌

北京飞机维修工程有限公司，北京，100621；

**摘要：**电气负载分析是飞机电气系统设计与运行中的关键技术，旨在通过统计和分析各飞行阶段的设备用电情况，验证电源容量是否满足需求，优化电源分配，并支持飞机改装与升级。对于在飞机持续运行过程中进行的改装项目，特别是那些涉及电气负载变化或电源连接位置调整的改装，必须重新进行电气负载分析，以确保改装后的系统仍能满足电源容量和电源分配的要求。为此，本研究提出并开发了一种专门针对飞机改装的电气负载分析方法及工具，以规范分析流程、提升效率，确保改装后的电气系统符合适航标准，为飞机电气系统的设计优化和运行维护提供支持。

**关键词：**电气负载分析；飞机改装；电源分配

DOI:10.69979/3041-0673.25.04.059

## 1 概述

随着旅客对机上服务品质和客舱环境要求的日益提高，以及国产化解决方案的兴起，航空公司对飞机系统和客舱产品的改装需求显著增加。无论是针对飞机原有系统的升级改造，还是加装全新的系统，这些改装往往都会涉及电气设备的电气负载变化。根据CCAR/FAR/CS 25.1351(a)条款的要求，当飞机改装导致电气负载发生变化时，必须进行电气负载分析，以确保用电需求不超过飞机电源系统的供电能力范围，从而保证电源系统的正常运行。

对于新交付的飞机，飞机制造厂通常会随飞机提供一份电气负载分析报告。然而，这类报告通常不具备数据可编辑性，且改装厂家无法获取相关的计算工具。此外，尽管飞机制造厂（如波音和空客）会提供关于电气负载计算方法的指导文件，但这些文件主要侧重于电气负载基本概念的介绍和特定机型的电源选取要求，并未形成一套完整且可实际应用的分析方法。

目前，各改装厂家提供的电气负载分析报告质量参差不齐，分析内容缺乏统一的标准。特别是在飞机整舱改装项目中，由于加装了较多的新系统和设备，汇流条层级关系复杂，电气负载的计算工作量巨大，且容易产生较高的错误率。这些问题不仅增加了改装工作的复杂性，也对飞机电源系统的安全性和可靠性提出了更高的挑战。

针对上述问题，本文提出并开发了一种基于飞机改

装的电气负载分析方法及工具。该方法旨在规范电气负载计算和分析流程，提升计算效率，降低错误率，从而为飞机改装项目提供科学、可靠的电气负载分析支持。

## 2 飞机改装项目中电气负载分析的应用

在飞机改装项目中，电气负载分析是确保电源系统安全性和可靠性的核心环节。通过对飞机进行电气负载分析，主要实现以下目标：

### 2.1 计算新增电气负载

在改装过程中，新增设备或系统会引入额外的电气负载。通过电气负载分析，可以准确计算这些新增负载的功率需求，为后续电源系统评估提供数据支持。

### 2.2 验证跳开关额定电流的符合性

新增负载可能导致相关跳开关的电流需求变化。电气负载分析用于确认跳开关的额定电流是否满足改装后的设计要求，避免因过流而引发跳闸或设备损坏。

### 2.3 评估汇流条负载变化

改装可能对子级汇流条及其上级汇流条的负载分配产生影响。通过分析，可以计算子级汇流条的负载变化，并确认其与上级汇流条的负载总和未超出设计容量，确保电源分配的合理性。

### 2.4 校验发电机负载能力

新增负载可能对发电机的负载能力提出更高要求。电气负载分析用于计算改装后发电机的负载情况，并确

认其是否在设计容量和安全裕度范围内运行，从而保证发电机的可靠性和使用寿命。

### 3 电气负载分析的基本概念

在电气负载分析中，常用的基本概念包括以下几类：

#### 3.1 功率及功率因数

在电工学中，电功率分为三种：视在功率、有功功率和无功功率。

功率因数是有功功率与视在功率的比值，用于衡量电气设备的效率。功率因数低意味着电路中的无功功率较大，降低了设备利用率并增加了供电损耗。

#### 3.2 电能转换设备及效率

飞机上的电能转换设备主要包括变压整流器、变压器和逆变器（静变流机）。在电气负载计算中，需考虑这些设备的转换效率和功率因数，以计算从设备级到主电源级的功率需求。

#### 3.3 设备负载占空比

负载设备的占空比是指设备在飞行航段中处于工作状态的时间百分比。占空比通常基于设备供应商数据、地面及飞行试验数据以及实际运行经验确定。在安装新负载前，需计算其在各飞行阶段的功耗影响（包括额定值、最大值和运行值）。若无法获取运行功耗数据，则采用最大值进行计算。

#### 3.4 三相不平衡度

三相不平衡是指电力系统中三相电流（或电压）幅值不一致且超出允许范围的现象。飞机制造厂通常会在指导文件中规定三相不平衡的限值。例如，波音的电气负载分析指导文件中规定，主交流汇流条（main AC bus）中任两相的不平衡值不得超过 3.5 kVA，转换交流汇流条（AC transfer bus）中任两相的不平衡值不得超过 2.4 kVA。三相不平衡度的控制对于确保电源系统稳定运行至关重要。

通过对上述基本概念的深入理解和应用，电气负载分析能够为飞机改装项目提供科学、准确的技术支持，确保改装后的电气系统满足设计要求和适航标准。

## 4 基于改装飞机的电气负载分析流程

飞机在交付后，若进行涉及电气负载变化的改装工作，必须进行电气负载分析，以满足适航条款（如 CCA R/FAR/CS 25.1351(a)）的要求。为此，本文提出了一套基于飞机改装的电气负载分析流程，该流程旨在规范分析步骤，确保改装后的电气系统满足电源容量要求，同时提升分析效率。具体流程如下：

#### 4.1 步骤 1：信息输入

在进行电气负载分析计算之前，首先需要获取拟改装飞机的最新电气负载数据。这些数据包括两部分：一部分为飞机制造厂提供的原始电气负载分析报告，该报告是飞机出厂时由制造厂提供的，包含飞机各系统在不同飞行阶段的电气负载数据；另一部分为后续改装补充的电气负载数据：针对飞机交付后进行的改装，需补充相关电气负载信息，以确保数据的完整性和准确性。

其次，需确认拟改装设计的电气负载信息，具体包括：

- ①负载描述（如设备名称、功能等）；
- ②新加装负载所连接的断路器信息（如额定电流、位置等）；
- ③连接的汇流条信息（如汇流条编号、层级关系等）；
- ④负载类型（交流或直流）；
- ⑤负载工作模式（如连续工作、间歇工作等）；
- ⑥各飞行阶段的功耗（最大功耗或正常功耗）。

负载信息的准确性直接决定了电气负载分析结果的可靠性，特别是在多系统改装项目中，需在初始设计阶段综合考虑各系统对电气负载的影响。

最后，针对改装飞机，需建立其汇流条层级关系图，作为电气负载分析工具的输入，以便逐级计算各级汇流条的负载情况。

#### 4.2 步骤 2：正常运行条件下的电源容量分析

正常运行条件包括地面运行、飞行和着陆三个阶段。

**地面运行：**飞机通常使用外部电源或辅助动力装置（APU）发电机供电，主要用于加油、日常维护、乘客登机、货物装卸及设备测试等。若出现过载情况，系统会自动卸载部分非关键负载。

**飞行和着陆：**由飞机发动机驱动的发电机供电，这些发电机为所有系统提供交流电，并通过变压器整流器（TRU）等设备提供直流电。

在正常运行条件下，电气负载分析分为交流负载和直流负载两部分：

交流负载分析：根据第3节的要求，首先计算当前汇流条的负载总和，确保其满足容量要求，然后逐级计算上级汇流条的负载，最终验证发电机容量是否满足需求。

直流负载分析：首先计算改装后的直流负载是否满足TRU的容量要求，然后根据第3节的公式将直流负载转换为等效交流负载，进而计算发电机级的总负载。

#### 4.3 步骤3：三相不平衡度分析

随着飞机上电子设备的增加，特别是大功率单相用电设备的引入，三相配电系统的平衡性可能受到影响。三相不平衡不仅会降低供电品质，还可能对飞机交流电网产生不利影响。因此，在完成电源容量分析后，需进一步评估交流电源的三相不平衡度。三相不平衡度的限值通常由飞机制造厂规定（如波音公司要求主交流汇流条中任两相的不平衡值不超过3.5 kVA）。根据第3节的方法，计算并验证三相不平衡度是否在允许范围内。

#### 4.4 步骤4：非正常运行条件下的电源容量分析

在完成正常运行条件下的电气负载分析后，还需评估非正常运行条件下的电源容量。非正常运行条件包括一台或多台发动机失效，或一台或多台电源转换设备失效的情况。在这些情况下，飞机会自动卸载部分非关键汇流条，以确保关键系统（如飞行控制系统、通信系统等）的正常运行。因此，需计算改装后的飞机在非正常运行条件下的电气负载，确保在部分负载卸载后，剩余负载仍能满足电源容量要求。

#### 4.5 步骤5：形成结论

通过上述步骤的计算分析，若所有条件均满足要求，则可利用本文开发的电气负载分析工具导出数据表，并生成完整的电气负载分析报告。若任一条件不满足，则需调整设计方案。常见的优化方法包括调整负载的取电位置、重新分配汇流条负载或优化设备工作模式，以确保改装后的电气系统符合适航要求。

本文提出的电气负载分析流程不仅规范了改装项目的分析步骤，还通过工具化手段提升了计算效率和准确性，为飞机改装项目的顺利实施提供了可靠的技术支

持。

### 5 基于飞机改装的电气负载分析工具开发

从上节提出的电气负载分析流程可以看出，电气负载计算过程较为复杂，尤其是在整舱改装或复杂系统改装项目中，涉及的汇流条和负载数量众多，计算量显著增加。为提高计算效率并减少人为错误，本文基于VB语言开发了一款EXCEL计算工具，实现了电气负载的自动化计算。计算处理工具具体分为以下几个阶段：

#### 5.1 数据处理阶段

飞机原始的电气负载数据通常以PDF格式包含在飞机制造厂提供的电气负载分析报告中。此外，还需从飞机运营商处获取飞机出厂后进行的改装所补充的电气负载数据。将这两部分数据整合后，整理为结构化的EXCEL格式，作为工具的基础输入数据。这一阶段的目的是确保数据的完整性和可操作性，为后续计算提供可靠的数据支持。

#### 5.2 定义阶段

在本阶段，需根据具体改装飞机的机型，定义以下关键参数：

汇流条层级关系：明确各级汇流条的连接关系及负载分配路径；

容量限制：确定各级汇流条、变压器整流器（TRU）及发电机的设计容量；

自动卸载汇流条：识别在非正常运行条件下可自动卸载的非关键汇流条；

三相不平衡度限制：根据飞机制造厂的规定，设定三相不平衡度的允许范围（如主交流汇流条的不平衡值不超过3.5 kVA）。

这些定义不仅为后续计算提供了输入条件，还为计算结果是否满足要求提供了判断标准。

#### 5.3 输入阶段

根据前期统计的新加装负载或更改负载的信息表，将各负载在飞机不同运行阶段（如地面、飞行、着陆）的功耗数据（包括最大功耗和正常功耗）输入到EXCEL工具中。输入数据包括负载描述、连接的断路器信息、汇流条信息、负载类型及工作模式等。这一阶段的关键

在于确保输入数据的准确性和完整性，以避免计算结果的偏差。

### 5.4 计算阶段

基于本文提出的电气负载分析流程和计算方法，结合定义阶段和输入阶段的数据，利用 VB 语言编写的算法实现自动化计算。该工具能够一键计算以下内容：

正常运行条件下的电气负载：包括交流负载和直流负载的逐级计算；

非正常运行条件下的电气负载：模拟一台或多台发动机或电源转换设备失效时的负载分配情况；

三相不平衡度：评估交流电源系统的平衡性，确保其符合飞机制造厂的规定。

### 5.5 结果判断阶段

若计算结果超出限值，工具会提示用户重新选择汇流条或调整负载分配方案；

若所有计算结果均在限值范围内，工具将自动生成最新的图表数据，用于编写电气负载分析报告。

综上所述，该工具可有效提升电气负载分析的效率和准确性，为改装方案的优化和适航符合性验证提供了强有力的技术支持。

## 6 结语

本研究针对飞机改装过程中的电气负载分析问题，

提出了一套系统化的分析方法，并开发了相应的计算工具。通过规范化的流程和自动化工具，显著提高了电气负载分析的效率和准确性，确保了改装后的飞机电气系统满足适航要求和电源容量限制，帮助设计人员优化电源分配方案，提升飞机电气系统的整体性能和可靠性。未来，该方法和工具可进一步扩展至更多机型和应用场景，为飞机电气系统的设计与优化提供更广泛的支持。

## 参考文献

- [1] 中国民用航空局. CCAR-25-R4 运输类飞机适航标准 [S]. 北京: 中国民用航
- [2] Airbus SAS. METHODOLOGY TO UPDATE A320 FAMILY A/C ELA AND TO VALIDATE NEW ELECTRICAL LOAD INSTALLATION[R]. Toulouse:Airbus Operations SAS, 2017.
- [3] 王伟, 李明. 飞机电气系统设计与优化[M]. 北京: 航空工业出版社, 2017.
- [4] 陈刚, 王丽. 飞机改装中的电气系统设计与验证[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2018

作者简介：崔媛媛（1992年9月—）、女、汉族、山东省德州市、北京飞机维修工程有限公司、硕士、研究方向：飞机电气系统改装。