

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.04.008

多电飞机与传统飞机电源系统直接运营成本研究

曹涛*

上海飞机设计研究院, 上海 201210

摘 要: 阐述了飞机系统直接运营成本在系统权衡研究中的重要性, 详细介绍了飞机系统直接运营成本计算方法, 对多电飞机电源系统和传统飞机电源系统的折旧成本、燃油成本、直接维修成本、航班延误/取消成本和备件储备成本进行分析研究, 得出了多电飞机电源系统和传统飞机电源系统直接运营成本的差异。

关键词: 民用飞机; 电源系统; 直接运营成本

中图分类号: V328 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017) 04-0008-04

商用飞机价格昂贵, 使用成本高, 从市场角度来看, 经济性是影响航空市场竞争的关键因素之一, 也是航空公司进行飞机选型和制造商开展型号研制的重要指标之一^[1]。在飞机各个系统设计中也必须考虑系统的直接运营成本(DOC_{sys}), 通过对不同系统架构 DOC_{sys} 的计算, 从而更好地开展系统的权衡研究, 优化系统架构。

飞机电源系统在研制初期进行系统权衡研究时, 会涉及到电源供电体制、系统架构、产品价格和产品数量等。如选择变频系统还是恒频系统, 采用传统架构还是多电架构等, 不同的选择就会导致不同的系统直接运营成本。电源系统的重量、单机价格、维护成本等都会影响系统的直接运营成本, 在满足系统功能和性能等技术要求以及适航要求前提下, 减少系统重量、降低系统单机成本和维护成本等, 都会降低系统的直接运营成本。多电飞机与传统飞机相比, 其电源系统容量、重量、价格和设备数量都发生了很大变化, 在采用多电技术后对电源系统 DOC_{sys} 有怎么样的影响, 需要在飞机研制的最初阶段进行权衡研究。

在电源系统直接运营成本增加或降低的同时, 还必须考虑其他系统直接运用成本是否会因为电源系统而增加或减少, 当飞机上各个系统都完成了自身的系统直接运营成本

的计算后, 在经过总体的权衡对比、分析和计算, 从而确定最优的飞机级直接运营成本。

1 系统直接运营成本计算方法

系统级 DOC_{sys} 主要涉及飞机价格、燃油费、飞机维护成本。飞机价格主要受飞机的制造成本和飞机的折旧价格影响; 燃油成本主要受飞机的气动设计、发动机选型、其他系统对发动机功率的提取等影响; 飞机维护成本主要涉及到飞机的直接维护、派遣率等。据上述分析, 描述机载系统 DOC_{sys} 的计算方法^[2] 如式 (1) 所示:

$$\text{DOC}_{\text{sys}} = \text{Depr}_{\text{sys}} + \text{Fuel}_{\text{sys}} + \text{DMC}_{\text{sys}} + \text{Delay}_{\text{sys}} + \text{SHC}_{\text{sys}} \quad (1)$$

式中: DOC_{sys} 为某备选机载系统的直接运行成本; Depr_{sys} 为系统引起的折旧成本; Fuel_{sys} 为系统引起的燃油成本; DMC_{sys} 为系统引起的直接维护成本; Delay_{sys} 为系统引起的延误/取消成本; SHC_{sys} 为系统引起的备件储备成本; 在 DOC_{sys} 的各项成本分析中, 均以“美元/年”为单位来计算。

1.1 系统引起的折旧成本 Depr_{sys} 计算方法

系统引起的折旧成本 Depr_{sys} 主要受到系统的初始采

收稿日期: 2016-11-29; 退修日期: 2016-12-05; 录用日期: 2017-02-08

* 通讯作者: Tel.: 13585714417 E-mail: caotao@comac.cn

引用格式: CAO Tao. Research of direct operating costs for the more electrical aircraft and traditional aircraft electrical power system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (04): 08-11. 曹涛. 多电飞机与传统飞机电源系统直接运营成本研究 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (04): 08-11.

购价格、系统残值和系统的折旧年限的影响,具体计算方法^[2]如式(2)所示:

$$\text{Depr}_{\text{SYS}} = P_{\text{SYS}} \times (1 - R_{\text{SYS}}) / N \quad (2)$$

式中: Depr_{SYS} 为系统的年折旧成本; P_{SYS} 为系统的初始采购价格; R_{SYS} 为系统的残值(表示为系统价格的百分数); N 为系统的折旧年限。

1.2 系统的年燃油成本 Fuel_{SYS} 的计算方法

系统的年燃油成本 Fuel_{SYS} 主要由系统每次飞行消耗的燃油重量、单位重量的燃油价格和年飞行次数决定,具体的计算方法^[2]如式(3)所示:

$$\text{Fuel}_{\text{SYS}} = \text{FW}_{\text{SYS}} \times \text{FP} \times \text{NFY} \quad (3)$$

式中: Fuel_{SYS} 为系统的年燃油成本; FW_{SYS} 为系统每次飞行消耗燃油的重量; FP 为单位重量的燃油价格; NFY 为年飞行次数。

其中,针对系统每次飞行消耗燃油的重量 FW_{SYS} ,可能是由于系统重量造成的,或是消耗发动机的引气或功率提取所引起的,或是系统部件突出引起飞机气动外形的附加气动阻力造成的。任何系统每次飞行引起的耗油重量 FW_{SYS} 的计算方法^[2]如(4)所示:

$$\text{FW}_{\text{SYS}} = \text{FW}_{\text{WF}} + \text{FW}_{\text{WV}} + \text{FW}_{\text{P}} + \text{FW}_{\text{B}} + \text{FW}_{\text{D}} \quad (4)$$

式中: FW_{WF} 为系统固定重量(指系统自重,在飞行中保持不变)引起的油耗重量; FW_{WV} 为系统可变重量(如水/废水系统中的废水,在飞行中被排出机外)引起的油耗重量; FW_{P} 为系统消耗发动机轴功率提取所引起的油耗重量; FW_{B} 为系统消耗发动机的引气所引起的油耗重量; FW_{D} 为系统附加阻力(如水/废水系统的外部排水管、通讯系统的机外天线和大气数据系统的机外传感器)所引起的油耗重量。

根据电源系统的特点,电源系统应不涉及系统可变重量 FW_{WV} 、系统消耗发动机的引气所引起的油耗重量 FW_{B} 和系统附加阻力所引起的油耗重量 FW_{D} ,简化后的 FW_{SYS} 计算方法^[2]如(5)所示:

$$\text{FW}_{\text{SYS}} = \text{FW}_{\text{WF}} + \text{FW}_{\text{P}} \quad (5)$$

1.3 系统引起的直接维修成本 DMC_{SYS} 计算方法

系统引起的直接维修成本 DMC_{SYS} 应该由系统供应商提供。飞机制造商与系统供应商在签署系统采购协议之前,供应商应该提供在特定条件下该系统每飞行小时直接维修成本的担保值。 DMC_{SYS} 可分原位维修和离位维修两类,其计算方法^[2]如式(6)所示:

$$\text{DMC}_{\text{SYS}} = (\text{MMH}_{\text{ON}} + \text{MMH}_{\text{OFF}}) \times \text{LR} + \text{MC} \quad (6)$$

式中: DMC_{SYS} 为系统引起的直接维修成本(单位为美元/年); MMH_{ON} 为原位维修工时数(单位为小时/年); MMH_{OFF} 为离位维修工时数(单位为小时/年); LR 为劳务费率(单位为美元/小时); MC 为维修材料成本(单位为美元/年)。

1.4 系统引起的航班延误/取消成本 $\text{Delay}_{\text{SYS}}$ 的计算方法

系统引起的航班延误/取消成本 $\text{Delay}_{\text{SYS}}$ 主要受系统引起的航班延误概率、航班延误每分钟的成本、系统引起的航班延误的平均时间、系统引起的航班取消概率、航班取消的成本和年飞行次数的影响。具体的 $\text{Delay}_{\text{SYS}}$ 的计算方法^[2]如式(7)所示:

$$\text{Delay}_{\text{SYS}} = (P_{\text{D}} \times C_{\text{D}} \times t_{\text{D}} + P_{\text{C}} \times C_{\text{C}}) \times \text{NFY} \quad (7)$$

式中: $\text{Delay}_{\text{SYS}}$ 为系统引起的航班延误/取消成本(单位为美元/年); P_{D} 为系统引起的航班延误概率(单位为次/年),由系统供应商提供; C_{D} 为航班延误每分钟的成本(单位为美元/分钟); t_{D} 为系统引起的航班延误的平均时间(单位为分钟/次),由系统供应商提供; P_{C} 为系统引起的航班取消概率(单位为次/年),由系统供应商提供; C_{C} 为航班取消的成本(单位为美元/次); NFY 为年飞行次数。

1.5 系统引起的备件储备成本 SHC_{SYS} 的计算方法

系统引起的备件储备成本 SHC_{SYS} 主要受系统引起的备件储备成本、贷款的年息、价格系数、系统的初始采购单价、所需备件套数和机队规模的影响。具体的 SHC_{SYS} 的计算方法^[2]如式(8)所示:

$$\text{SHC}_{\text{SYS}} = r \times k_{\text{P}} \times P_{\text{SYS}} \times \text{RQS} / \text{FS} \quad (8)$$

式中: SHC_{SYS} 为系统引起的备件储备成本(单位为美元/年); r 为贷款的年息; k_{P} 为价格系数,综合考虑备件价格与初始采购价之比、储备备件占整个系统之比以及系统余度的参数,由系统供应商提供; P_{SYS} 为系统的初始采购单价(单位为美元); RQS 为所需备件套数,是备件可获得性的函数,通常以 RQS/FS 形式(机队的所需备件套数),由系统供应商提供; FS 为队规模。

2 多电飞机和传统飞机电源系统权衡研究

波音 787 飞机是一款典型的多电商用飞机,它完全按多电飞机来设计,总发电功率是 1450kVA。波音 787 飞机的电源系统与以往的波音飞机有很大区别,飞机上的电源来自 4 个安装在发动机上的 230V 交流 250kW 变频发电机和两个安装在辅助动力装置 (APU) 上的 230V 交流 225kW 变频发电机组成,变频系统取代了传统的恒频系统,频率在

360~800Hz 之间^[3]。

A380 飞机也是一款典型的多电商用飞机,它完全按多电机电力系统来设计,总的发电功率为 915kVA。其中,由发动机驱动 4 台 150kVA 的变频交流发电系统,发电容量共 600kVA,频率在 360~800Hz 之间;由辅助动力装置 (APU) 驱动两台 120kVA 恒速发电机,发电容量共 240kVA。

2.1 系统折旧成本 $Depr_{SYS}$ 分析研究

通过式 (2) 可以得出,在折旧年限一样的情况下,多电机系统容量增加,电气设备增多。以发电系统为例,传统宽体飞机发电系统只需 4 台 120kVA 的主发电机就可以满足用电需求,而多电宽体飞机则需要 4 台 250kVA 的主发电机来提供电能,满足用户需要。以配电系统为例,传统的飞机远程配电装置可能只需要 10 台,而多电机则至少在 20 台以上,所以系统价格明显高于传统飞机,故多电机折旧成本 $Depr_{SYS}$ 高。

2.2 系统燃油成本 $Fuel_{SYS}$ 分析研究

通过式 (3)~式 (5) 可以得出,电源系统燃油成本 $Fuel_{SYS}$ 最终主要取决于电源系统的固定重量所引起的燃油消耗重量 FW_{WF} 和电源系统从发动机上提取功率所消耗的燃油重量 FW_P 。多电机电源系统重量大,从发动机上提取的功率多,所以系统燃油成本 $Fuel_{SYS}$ 明显高于传统飞机。

2.3 系统引起的直接维修成本 DMC_{SYS} 分析研究

通过式 (6) 可以得出,在劳务费率 LR 相同的情况下,系统引起的直接维修成本 DMC_{SYS} 主要取决于原位维修工时数 MMH_{ON} 、离位维修工时数 MMH_{OFF} 和维修材料成本 MC。多电机电源系统电气设备多,系统复杂,每架飞机每年的维修工时和维修材料都明显高于传统飞机,所以多电机电源系统引起的直接维修成本 DMC_{SYS} 要高于传统飞机。

2.4 系统引起的航班延误 / 取消成本 $Delay_{SYS}$ 的计算方法

通过式 (7) 可以得出,系统引起的航班延误 / 取消成本 $Delay_{SYS}$ 各因素,如航班延误概率 P_D 、航班延误每分钟的成本 C_D 、系统引起的航班延误的平均时间 t_D 、系统引起的航班取消概率 P_C 、航班取消的成本 C_C 和年飞行次数 NFY,对于多电机电源系统与传统飞机电源系统基本是相同的,所以系统引起的航班延误 / 取消成本 $Delay_{SYS}$,多电机电源系统和传统飞机电源系统基本相同。

2.5 系统引起的备件储备成本 SHC_{SYS}

通过式 (8) 可以得出,系统引起的备件储备成本

SHC_{SYS} 在贷款的年息、价格系数和机队规模相同的情况下,主要受所需备件套数 RQS、系统的初始采购单价 P_{SYS} 的影响。多电机电源系统负载,所需备件套数和系统的初始采购价格都明显高于传统飞机电源系统,所以多电机电源系统备件储备成本 SHC_{SYS} 明显高于传统飞机。

将以上对比分析的结果代入式 (1),可以明显得出多电机电源系统的直接运营成本 DOC_{SYS} 明显高于传统飞机电源系统的直接运营成本,如图 1 所示。根据实际的计算分析传统的宽体双通道飞机电源系统的年直接运营成本 DOC_{SYS} 约为 350 万美元 / 每年,而多电的宽体双通道飞机电源系统的年直接运营成本 DOC_{SYS} 多达 710 万美元 / 每年。

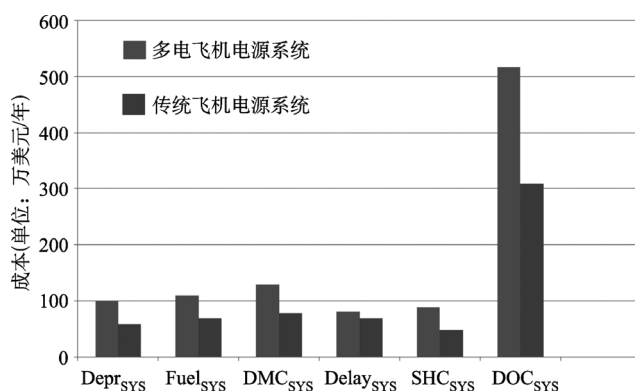


图 1 多电机与传统飞机电源系统 DOC_{SYS} 比较

Fig.1 Compare with more aircraft and traditional aircraft electrical power systems DOC_{SYS}

3 结束语

从分析可以得出,多电机电源系统的直接运营成本 DOC_{SYS} 明显要高于传统飞机电源系统直接运营成本 DOC_{SYS} 。但是,多电机技术应用有很多优点。由电力驱动代替了液压、气源等,简化了发动机、环控、液压等系统结构,减轻了重量,提高了可靠性。由于引气和液压机械装置的取消,改善了飞机发动机的性能。由高效率的发电机代替低效率的引气和液压转换和传输,提高了能源的利用率^[4]。尽管多电机电源系统的直接运营成本 DOC_{SYS} 要比传统的飞机电源系统高,但环控、液压等系统的直接运营成本将会减少,通过对飞机上所有系统的 DOC_{SYS} 进行计算分析,最终确定最优的飞机系统架构。

AST

参考文献

[1] 任启鸿,王如华.基于市场需求的商用飞机经济性分析方法[J].

- 民用飞机设计与研究, 2015, 118 (3): 87-90.
- REN Qihong, WANG Ruhua. Economics analysis method for commercial aircraft based on market demand [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2015, 118 (3): 87-90. (in Chinese)
- [2] Scholz D. DOC_{sys} -A method to evaluate aircraft systems[M]. Bonn: German Aerospace Society, 1998.
- [3] 程国华. 大型民用飞机电源系统的现状与发证 [J]. 民用飞机设计与研究, 2008, 4: 1-5.
- CHENG Guohua. Present situation and development of large civil aircraft power supply system[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2008, 4: 1-5. (in Chinese)
- [4] 李开省. 多电飞机技术的发展 [J]. 国际航空, 2009, 01: 73-75.
- LI Kaisheng. Development more electric aircraft technologies[J]. International Aviation, 2009, 01: 73-75. (in Chinese)
- 作者简介**
- 曹涛 (1983—) 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 民用飞机电源系统。
- Tel: 13585714417
- E-mail: caotao@comac.cc

Research of Direct Operating Costs for the More Electrical Aircraft and Traditional Aircraft Electrical Power System

CAO Tao*

Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai, 201210

Abstract: Firstly, briefly introduced the significance of aircraft system direct operating costs for system trade study. Secondly, detailedly introduced the calculate methods of system direct operating costs. Lastly, analyzed and calculated the $Depr_{sys}$, $Fuel_{sys}$, DMC_{sys} , $Delay_{sys}$ and SHC_{sys} for more electrical aircraft electrical power system and traditional aircraft electrical power system, and had gotten the difference of that direct operating costs of both types' aircraft.

Key Words: civil aircraft; electrical power system; DOC_{sys}

Received: 2016-11-29; Revised: 2016-12-05; Accepted: 2017-02-08

*Corresponding author. Tel.: 13585714417 E-mail: caotao@comac.cc