航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
May. 25 2019 Vol. 30 No.05 3-8

电动飞机的误解分析与研究综述

王妙香*，王元元
中国航空工业发展研究中心，北京 100024

摘　要：近年来，电动飞机已成为航空发展的热点之一，受到越来越多的企业和研发机构的重视。但由于人们对电推进飞机和传统推进飞机缺乏全面的理解，对电动飞机和混合电推进飞机的研究容易产生一些误解。本文阐述并分析了电动飞机研制中容易产生的5种主要误解及其产生的原因。在此基础上，对电动飞机的发展前景进行展望，并预测电动飞机是未来航空工业的发展方向之一。

关键词：电动飞机；电力推进技术；分布式布局；飞机设计；协同集成

中图分类号：V272　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.05.001

近年来，人们对绿色环境的渴望，极大地促进了传统工业创新升级，从而对电推进飞机的研发力度不断加大，因此，电动飞机已成为航空界的研究热点之一。包括波音公司、空中客车集团在内的传统航空巨头和多家创新型企业在内的制造商，以及美国国家航空航天局（NASA）、德国航空航天研究院（DLR）等国家级航空研究机构等均开展了关于电动飞机技术的相关研究，许多企业已经推出了新的产品，其中包括中国研制的全球第一款获得型号设计批准和生产许可的小型电动飞机“锐翔RX1E”。据不完全统计，目前全球范围内有约100型电动飞机项目处于研制中。根据综合研究，同时对国内外权威研究结论的分析认为，电动飞机在提高航空器环保性、可靠性、安全性、经济性等方面存在巨大潜力，未来在航空市场应用前景广阔。

但是，相比电动汽车如今的普及和发展，人们对电动飞机仍然缺乏清晰的了解。在电动飞机的发展中，经常会听到一些质疑或不解的声音。如很多人听到电动飞机的第一反应是“电池还不行”“电动飞机没有经济性”等，如果这些问题不研究清楚，很可能会影响业界对电动飞机发展的预期及对电动飞机的研发决策。因此，通过参阅国内外大量相关文献，结合国内的研究分析，试图澄清目前困扰公众甚至是有些业内人士的关于电动飞机的五大主要误解。

1 电动飞机的误解分析

（1）误解1：电动飞机的整体设计与现有整体飞机没什么不同

这种误解认为：电动飞机无非是把目前的活塞或涡轮发动机动力系统换成了电动力系统，在飞机系统的设计方面没有任何不同。实际上，这是对电动飞机的最大误解。

相比传统动力飞机，电动飞机的最大特点是采用了电推进系统，而电推进系统的特性将会给电动飞机的性能提升带来巨大的优势。“尺度无关”性指的是一个大功率电动机分解为数个小功率电动机（小功率电动机功率之和不变）后，整个系统的功率密度和效率基本不变[1,2]。这样带来的好处是，将目前集中的动力形式（单发、双发、四发）根据需要变成分布式推进，可以实现气动、结构、动力的最佳融合，如通过边界层抽吸（BLI）技术、环量控制技术、噪声遮蔽技术等实现气动、噪声、推进效率的全面提升[3]。NASA在这方面做了大量研究工作，可利用螺旋桨滑流效应提高空气动力效率并降低机翼面积和结构重量（质量），如图1所示。初步研究表明，利用前缘异步推进技术（LEAPTech）可使飞机升阻比提高一倍，最大升力系数接近5.0，机翼面积减少一半，结构重量显著减轻。

可以说，电动飞机的出现，拓展了飞机设计的自由度，带来了大幅提高飞机综合性能新的可能性。当然，与此同时带来的还有计算分析的复杂性和多学科设计的挑战，面

收稿日期：2019-04-02；　退修日期：2019-04-19；　录用日期：2019-04-29
*通信作者. Tel.：010-57827745　E-mail：avicwmx@163.com
引用格式：Wang Miaoxiang, Wang Yuanyuan. Review on misconceptions of electric propulsion aircraft analysis and research [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(05): 3-8. 王妙香，王元元. 电动飞机的误解分析与研究综述[J]. 航空科学技术，2019，30(05)：3-8.

图1 NASA兰利研究中心的LEAPTech分布式电力推进概念
Fig.1 NASA Langley Research Center(LaRC)LEAPTech distributed electric propulsion concept

对高度耦合的多学科分析计算，需要新的基于物理的工具才能捕获这种复杂的相互作用。对于如何探索这个新拓展的设计空间，使用传统的梯度方法可能已不适用，需要采用类似于遗传算法的探索，尝试多种新集成方式和构型。

值得注意的是，当前的部分电动飞机设计和验证机基本是对传统飞机方案的改装，或是采用电机替代现有的常规推进系统，或进行少量改装。因此，这些研究通常在没有进行更复杂的多学科分析和设计的情况下，认为电推进飞机性能相对较差。实际上，现有飞机的改装只是渐进式验证电力推进可行性的一小步，并不完全具备验证电动飞机全部优势的能力。

(2) 误解2: 电动力和常规动力应在独立动力系统基础上实现公平比较

这种误解认为：将电动飞机电推进系统和传统飞机动力系统进行单独比较是公平的，可以反映电动飞机带来的变化[4]。

实际上，正如我们在前面提到的，电动飞机带来了电推进与飞机整体集成的大量收益，实现了协同增值效益(1+1≫2)。单独从动力系统比较，电动飞机在动力系统重量、复杂度、效率等方面可能会有所增加，但考虑其给飞机整体带来的收益，总体上性能还是有很大提升的。例如，使用机身结构的一部分作为电池等(如多功能碳纳米管结构电池，有效地增加能量存储密度)。NASA兰利研究中心曾专门进行了协同效应研究，根据协同潜力的大小进行了如下排序：空气动力学、声学、控制和结构。因此，上述单独对动力系统进行比较的思路是不全面的，尤其是当一项新技术的特性要求与其他学科高度集成时，以孤立的方式对其进行比较也是不公平的。

NASA开展过全电、混合电和涡轮电架构研究，电推进与飞机总体的集成方式也是多种多样的。具体采用哪种动力架构和集成方式取决于使用要求、综合权衡和技术储备。

图2给出了NASA兰利研究中心研究的螺旋桨与机翼不同的耦合方式。这些例子显示了寻求协同集成时考虑的权衡类型。图2(a)、图2(b)、图2(c)三张小图分别代表后缘环量增升矢量推进式、后缘环量增升推进式、前缘推进式。其中，后缘环量增升矢量推进式集成应用了矢量推力[5,6]，其后部集成使环流影响最大化，但在翼型后缘的逆压梯度中需要保持流动附着，同时还面临包括襟翼和电机的铰接复杂性提高。后缘环量增升推进式试图在结构复杂性较低的情况下最大限度地增加环流，但同时也会带来附加问题，引起进气特性恶化(襟翼尾流吸入)，这将导致螺旋桨噪声增加。前缘推进式提供了最小的结构复杂性，负载能够直接传递到主翼梁，最干净的来流条件使螺旋桨噪声最低，对升力和阻力分析的不确定性最小。然而，最右边的集成方案在诱导环流方面效率有所降低(前缘装置不如后缘装置有效)。基于以上原因，NASA在LEAPTech方案中选择最右侧的集成方案，并不是因为此种集成方案最优，而是因为在电力推进集成探索的初始阶段，需要最小化不确定性。

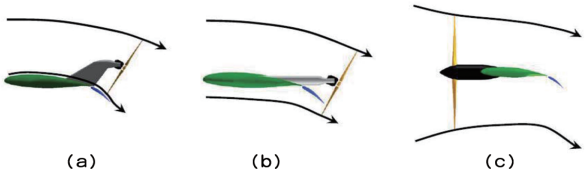

图2 几种分布式螺旋桨机翼集成方式
Fig.2 Several DEP wing integration strategies

图2所示的几种分布式螺旋桨机翼集成方式，体现了最大化环量影响与结构集成复杂性之间的各种权衡，绿色代表机翼，灰色部分代表螺旋桨支撑结构，黄色代表螺旋桨。

总之，要探索电力推进的真正潜力，考虑整个飞机集成解决方案非常重要，只有在飞机系统级上才能实现公平的比较，这样的飞机总体比较比孤立的推进系统比较要复杂得多，因此首先要降低系统级比较的不确定性因素，才能使结果具有高度的可靠性。

(3) 误解3：就像初期电动汽车发展一样，电动飞机在经济性上没有意义

这种误解认为：正如考虑购买电动汽车前，人们会进行经济权衡，发现电动汽车的经济性还不足以说服人们来购

买。电动飞机也不足以说明其具有更好的经济性。

经济性的好坏是决定电动汽车普及程度的重要因素。根据国内相关研究，目前电动车10万km综合使用成本较燃油车高出50%，这主要是因为初次购买成本较燃油车高出100%。而在使用和维护方面，电动汽车相比燃油车有很大的优势。长期来看，电动汽车的经济性可以与传统燃油车进行正面竞争。预计在2020年左右，电动汽车经济性将会更好。

与电动汽车相比，电动飞机的购置成本相比传统燃油动力飞机不会高出很多[7]。车用内燃机的制造速度非常快，电动系统很难在目前产能不大的情况下与其经济相比；而SR−22飞机配装的227.85kW的IO−550发动机价格在6万美元左右（类似的汽车动力发动机不到6000美元），飞机推进组件成本的这种差异使得电力推进在采购成本方面更具竞争力。

从能源利用方面看，电动飞机提高利用率可显著降低能源成本，也意味着降低了运营成本。与航空燃油（同等能量下）的成本相比，电力成本约为燃油的1/3。研究表明，相比SR−22，LEAPTech概念使能耗降低到它的1/8，能源成本降低到它的1/12。得益于电机效率提高3.3倍，整体气动效率和推进效率提高2.4倍的综合结果，使飞机效率提高8倍。如果考虑到电池寿命和电池高昂的成本在其全生命周期内的折旧，会将能源成本降低到1/12，其真正差异降低到1/4。但是进一步考虑到非峰值电价，可将成本进一步降低到原来的1/2。因此，在飞机的高利用率下有可能大幅降低能源成本。

(4) 误解4：受电池储能密度的制约，不能满足有意义的航程需求

这种误解认为：电池能量密度是未来10年内电动飞机可行性的根本限制因素。

NASA研究表明，预计400W·h/kg的电池能量密度足以支持有意义的电动和混合动力飞机。图3给出了与传统SR−22相比，改进的电动SR−22概念飞机起飞总重对电池能量密度的敏感性。从图中可以看出，在322km航程内，电动飞机总重对电池能量密度非常敏感，能量密度达到400W·h/kg具有替代传统SR−22的意义。根据Zip公司的研究表明[8]，77%的ODM（NASA提出的按需飞行概念）需求的航程小于370.4km，400 n mile的航程足以覆盖94%的旅行行程。根据预测，未来几年内电池可能实现400W·h/kg能量密度的目标，足以支持该级别电动飞机的运营。

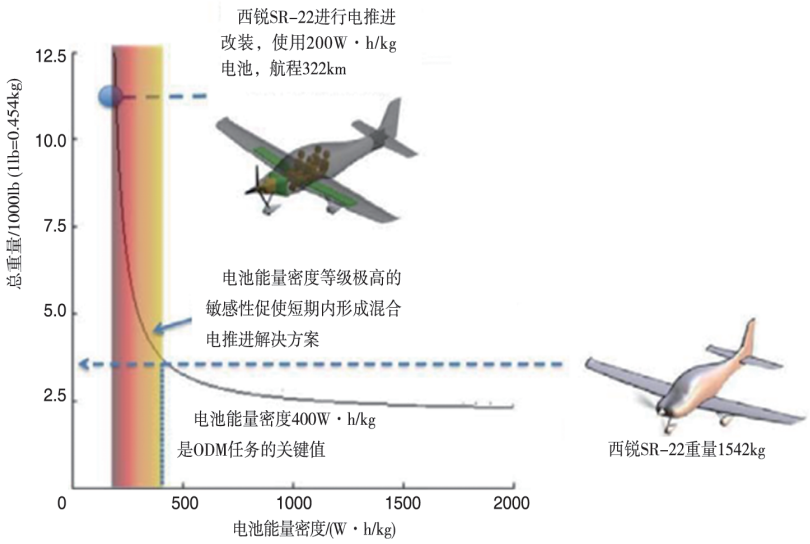

图3 电池能量密度敏感性

Fig.3 Battery energy density sensitivity

西锐SR−22（限制航程200英里，约321.8km）的电动改装概念机与现有传统飞机相比，电池能量密度为400W·h/kg时，起飞总重与SR−22相当；电池能量密度为200W·h/kg时，起飞总重会变成原来的3倍。

除了能量密度，电池的其他两个特性对于电动飞机研制的可行性也很重要[9]：电池的比功率(或电池放电的速度)和所需的充电时间。对于短距离起降(STOL)或垂直起降(VTOL)飞机来说，功率密度是一个比能量密度更重要的问题。将电

力推进应用于STOL或VTOL飞机主要是为了适应起飞/着陆与巡航飞行所需动力的巨大差异。混合电推进提供了一种方法，优化核心发动机以降低巡航所需的功率，而电池仅提供短期补充能源。对于这样的飞机，如果任务不需要持续盘旋，补充起飞功率所需的时间可能会非常短，并且所需的总能量仅需要在全功率下工作大约5min。用于这些应用的电池需要能够非常快速地提取能量（通常称为高C速率，其中C是电池消耗能量与充电时间之比）。充电率是决定能否实现高利用率的另一个因素，并且要求低的内部电池电阻以便快速充电。目前在这两个领域的研究都取得了重大进展，25C和60C电池的能量密度可用（虽然较低）。通过使用高压快速充电器，特斯拉让充电时间大大缩短，经过实测认证车辆电量从10%充电达到80%基本可以在30min内完成。

（5）误解5：电动飞机的研究应该集中在大型商用飞机上，20年后才会进入市场

这种误解认为：应集中力量研究大型电动商用飞机，为20年后进入市场做好准备。

随着电推进、自主性等技术的发展，其进入市场的方式会对技术的进一步发展产生重大影响。如果不了解在这条“渐进式革命”发展道路上将出现的商业模式和机会，就无法有效地对电动飞机进行投资研究[10]。虽然大部分航空产品研发与商业运输有关(因为这是目前客运里程和利润的主要来源)，但从短期技术水平来看，分布式电推进技术(DEP)应用并不适合这一主要市场。DEP的市场开拓将首先涉及无人机和通用航空市场，然后再随着能力的提升进入主流市场。如图4所示。

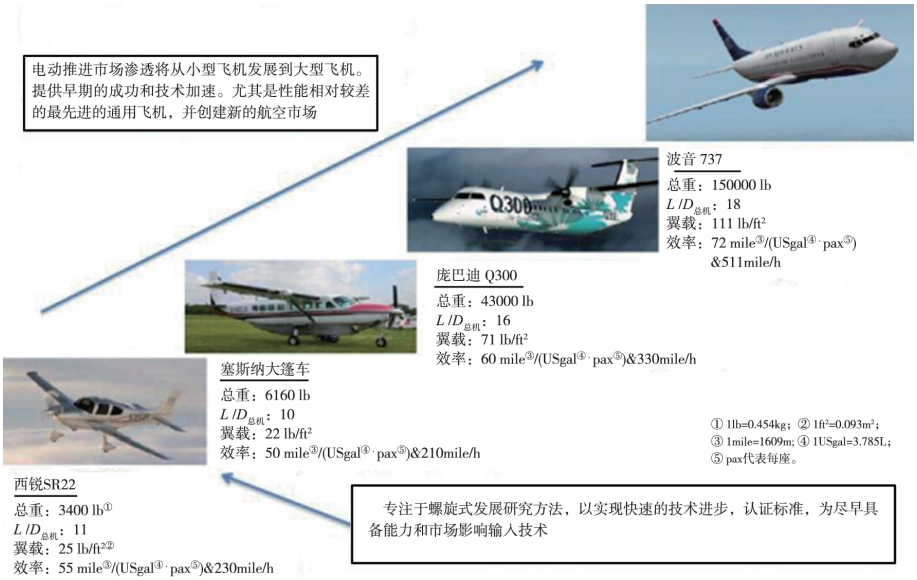

图4 电推进市场遵循从小飞机到大飞机的发展路径

Fig.4 Electric propulsion market infusion pathway（from small aircraft to large）

由于电推进系统存在巨大的潜力，未来5年内可能会大量进入民用无人机和通用航空市场，10年内可能会进入通勤和支线喷气式飞机市场。

随着科学技术和认证水平的成熟与发展，电力推进市场将遵循从小飞机到大飞机的发展路径。

因此，只关注大型商业运输未来市场的电动飞机研究可能会对业界投资带来误导。例如，研制一台多兆瓦的轻型电动机需要依靠电力电子设备，而目前电力电子设备仅在较小规模(电压、电流)下满足重量轻、成本低的需求[11,12]。如果将目标只瞄准未来大型飞机上的应用，势必会增大研究难度和开发成本，可能会错过其潜在的短期市场机会。基于此，研究投资应该与不断发展的市场高度相关，首先应关注DEP技术快速发展的小型飞机，因为与试图为未来的商业运输市场开发DEP技术相比，这一成本要低得多(由于受到这一新技术前沿的鼓励，飞机架构发生了重大变化，很可能与我们目前的设想大相径庭)。

2 电动飞机前景分析

基于对电动飞机误解的分析，在今后电动飞机的研制中，应充分利用电推进系统的特点，最大限度地发挥电推进的优势，从根本上改变现有的推进集成方法。

在众多电推进飞机的创新概念研究中，分布式电推进

系统技术展现出了较为明显的发展潜力[13]。与传统的动力推进相比，民用飞机采用电推进技术可降低能源成本、排放和噪声，采用分布式电推进系统构型还可提高飞机气动效率，并通过冗余设计及降低生命周期温室气体排放，显著改善效率、降低噪声、提高推进系统可靠性和安全性。同时显著降低总运营成本。

（1）分布式电推进系统是对飞机推进方式的变革，也将带来飞机总体和系统设计的重大转变，在降低油耗、噪声和排放等方面具有很好的前景，具有商业运营的潜力。

（2）分布式电推进系统在推进电机、电力高效变换和控制、电力电子系统集成及飞机适航取证等方面尚有很多亟待解决的关键技术问题，属于具有较大风险的前沿技术，因此，欧美等国在政府层面上均给予大力支持，制订相应的研究计划并进行大量的投资，促进企业参与研究和开发工作。

（3）电气化是一个循序渐进的过程，因此，应首先关注在小型飞机上的应用效果，并在研制FAR（CCAR）23部电推进飞机的基础上，将电推进系统应用于FAR（CCAR）25部飞机。

（4）分布式电推进方式的变革体现了飞机设计从单一动力研究到飞机总体、动力、机电等技术集成研究的变化[14,15]，很有可能成为航空工业革命性的转折，为航空科技发展提供新的方向。欧美等国的飞机及发动机制造商、初创企业、科研机构等均加大投入电动飞机的相关研发力度。从目前的电动航空发展趋势来看，未来的飞机研制也可能会影响发动机制造商与飞机制造商传统的工作分工，未来先进的飞发一体化设计技术概念可能须依托跨专业、跨领域的企业/科研机构团队来协同研发。

3 结论

通过对几种普遍存在的关于电动飞机误解的讨论分析，可以得到以下结论：

首先，对电推进的相关主要误解阻碍了探索电推进最大潜在效益所必须的研究投资。未来电动飞机构型与现有飞机有巨大差异，单独进行推进系统的比较是不合适的。尽管LEAPTech概念提供的巨大潜在收益令人倍受鼓舞，但这绝不是最佳集成解决方案，也不是应该研究的唯一电推进集成方法。由于这一新技术前沿的发展速度很快，很可能会开发出多种同样或更具吸引力的替代集成方法。

其次，分布式电推进系统和飞机的综合设计是具有巨大技术潜力的研究和发展方向，应充分利用电推进系统的特性，积极探索多种DEP概念解决方案。以具体效益指标为指导，实现在效率、排放、噪声、控制、运营成本、运营能力和飞机尺寸等方面的突破性改进。电池能量密度远非是电动飞机可行性的限制因素，如果电池继续以当前速度发展，那么或许在5年内，就可以达到足够的能量密度来实现合理的通用航空解决方案。另外混合电推进方案仍然实现了电推进的大部分目标。

最后，本文虽在尽力澄清对电动飞机的主要误解，但是我们也清醒地认识到，电动飞机研制目前还存在一些关键技术问题须攻关。例如，大功率电推进系统的核心产品的热管理问题，即电力系统各部分的冷却，这对电力系统特别是电机的性能有着重要影响。电力系统在运行过程中将不可避免地产生热量，分布式电推进飞机不仅要求系统具备极高的效率，还要求具备高效热管理系统，用于分布式电推进系统的高效热管理系统仍在探索阶段，还须进一步研究验证。再如，电动飞机的认证问题。美国联邦航空局（FAA）已全面修订了FAR 23部，从eVTOL到通勤飞机的适航认证将有据可依，这也激起人们研发小型电动飞机的兴趣。但较大的运输类飞机的认证标准（FAR 25部）尚未进行更改。近几年空客和其他公司可能会支持SAE国际公司成立一个新的委员会，专门负责FAR 25部飞机的混合电推进系统的适航认证研究。同时也要加快电推进技术成果转化，将经过研究验证的技术转化为真正的飞机产品，加快电推进飞机相关技术成熟。

参考文献

[1] 孔祥浩,张卓然,陆嘉伟,等. 分布式电推进飞机电力系统研究综述[J]. 航空学报, 2018, 39(1): 021651.
Kong Xianghao, Zhang Zhuoran, Lu Jiawei, et al. Review of electric power system of distributed electric propulsion aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(1): 021651.（in Chinese）

[2] 黄俊, 杨凤田. 新能源电动飞机发展与挑战[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 57-68.
Huang Jun, Yang Fengtian. Development and challenges of electric aircraft with new energies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 57-68.（in Chinese）

[3] Berton J J, Kim H D, Singh R, et al. Turboelectric distributed propulsion benefits on the N3-X vehicle[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 2014, 86(6): 558-561.

[4] Mark D M, Bill F. Misconceptions of electric propulsion

aircraft and their emergent aviation markets[R]. American Institute of Aeronautics and Astronautics,2017.

[5] Nalianda D, Singh R. Turbo-electric distributed propulsion-opportunities, benefits and challenges [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 2014, 86 (6): 543-549.

[6] Mc Donald R. Electric propulsion modeling for conceptual aircraft design[C]// AIAA SciTech Conference, 2014.

[7] Michael P, Matthew D, Brian G. Conceptual design of electric aircraft with distributed propellers: Multidisciplinary analysis needsand aerodynamics modeling development[C]// Georgia Institute of Technology, AIAA SciTech Conference, 2014.

[8] Michael P, Brian G. Performance analysis and design of on-demand electric aircraft concepts[C]//AIAA ATIO Conference, 2012.

[9] Amir G. A synergistic glance at the prospects of distributed propulsion technology and the electric aircraft concept for future unmanned air vehicles and commercial/military aviation [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2013, 57: 25-70.

[10] Jack L. Green flight challenge: Aircraft design and flight planning for extreme fuel efficiency[J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(3):832-846.

[11] Martin H. Electric flight potential and limitations[D]. Lisbon, DLR, Institute of Aerodynamics and Flow Technology, 2012.

[12] Mark D M. High speed mobility through on-demand aviation [C]// AIAA Aviation Conference,2013.

[13] William J F, Mark D M. Benefits of hybrid-electric propulsion to achieve 4x cruise efficiency for a VTOL UAV[C]// AIAA ATIO Conference, 2012.

[14] Dever T P, Duffy K P, Provenza A J, et al. Assessment of technologies for noncryogenic hybrid electric propulsion: NASA / TP-2015-216588[R]. Cleveland, OH: NASA Glenn Research Center, 2015.

[15] Mark D M, Bill F. Misconceptions of electric propulsion aircraft and their emergent aviation markets[R]. American Institute of Aeronautics and Astronautics,2017.

（责任编辑 皮卫东）

作者简介

王妙香（1977— ）女，硕士，研究员。主要研究方向：民机情报研究、预先研究和技术论证。

Tel: 010-57827745 E-mail: avicwmx@163.com

Review on Misconceptions of Electric Propulsion Aircraft Analysis and Research

Wang Miaoxiang*, Wang Yuanyuan

China Aviation Industry Development Research Center, Beijing 100024, China

Abstract: Over the past several years, electric aircraft has become one of the hot spots in aviation development,and more and more enterprises and research and development institutions pay attention to it. However, since people have not really understood the powerful advantages of electric propulsion aircraft compared to traditional propulsion, there are many misunderstandings in the feasibility analysis of full and hybrid electric propulsion aircraft. This paper introduces five misunderstandings encountered in aircraft electrification development, explains the causes of misunderstanding, and analyzes and points out the characteristics of the scale independence of electric propulsion systems. Based on the clarification analysis of some misunderstandings in the development of electric aircraft, the electric propulsion aircraft is promising. It is predicted that the direction of aviation electrification development.

Key Words: electric aircraft; electric propulsion technology; distributed configurations; aircraft design; synergistic integration

Received: 2019-04-02； **Revised:** 2019-04-19； **Accepted:** 2019-04-29

***Corresponding author.Tel. :** 010-57827745 **E-mail:** avicwmx@163.com