

电动直升机的性能特点分析

Analysis of Electric Helicopter Performance Feature

中航工业昌河飞机工业(集团)有限责任公司 曹京军
中航工业直升机设计研究所 何叔荣

[摘要] 电动直升机的关键技术已接近成熟,相较于热机直升机有更好的垂直性能和水平性能,在噪音和振动、可靠性、使用成本上具有优势。

关键词: 比能量 比功率 可用功率

[ABSTRACT] Key technology of all electric helicopter is almost ripe. Its horizon and vertical performance is better than helicopter with heat engine. It also has the advantage of noise, vibration, reliability and operation cost.

Keywords: Specific energy Specific power Available power

近年来电动力技术在飞机上得到了发展,飞机要求的功率重量比大,电池容量高。随着大功率电机和大容量动力电池的性能提高,电动飞机的实现条件逐渐成熟。电动飞机实现途径就是飞机动力单元以电机替代燃油发动机,飞机储能单元以电池替代燃油。小功率内燃机提供动力的轻型飞机首先改装使用电动力,电动直升机的研制也已经起步,典型产品如西科斯基公司的 Firefly 全电动直升机,见图 1^[1]。

Firefly 直升机由施韦策 S300C 直升机改装而来,动力单元以 US Hybrid 公司的电机取代莱康明 H10-360D1A 汽油内燃机。电机功率 143.25kW,与内燃机相同;电机(含控制器)重量为 81kg,内燃机干重 131.9kg。储能单元以 GIGA 公司的两个锂离子电池组取代汽油箱,每组容量 45A·h、电压 370V、重量 265kg;汽油箱容量是 114L。

Firefly 直升机首飞时最大速度 148.2km/h,飞行了 15min。而 S300C 直升机起飞重量 930kg 时,最大速度也只有 151.9km/h^[1]。相较 S300C, Firefly 直升机减少了部件数量,大幅降低噪音和振动,飞行和使用成本也大为下降。西科斯基公司评价其优点是更加平稳、安静、清洁、易用、可靠且经济,如果电池储能有大幅提高,这种电动直升机会有很好的前景。

1 电动直升机发展的难点及解决途径

电动直升机的关键是动力电机和电储能技术。与



图1 Firefly直升机及驱动电机

Fig.1 Firefly helicopter and electric motor

所有飞行器一样,要求功率重量比大,所以部件应该性能高、重量轻。电动直升机的动力电机要求高比功率特性(单位质量所输出的功率, kW/kg),电储能单元要求高比能量特性(单位质量所储存的电能, (W·h)/kg)。

1.1 电机比功率不亚于内燃机

电机将电能转化成机械能,相较于内燃机其效率高、节能环保,US Hybrid 公司的电机效率高于 95%,内燃机一般为 30%;其他优点包括结构简单、零件数少、可靠性高、维修性好、噪音和振动小、重量轻、经济性好、输出扭矩特性和高度特性好、转速控制技术简便成熟等。

用于电动飞机的电机技术关键是高比功率、大输出功率以及无刷技术。稀土永磁无刷直流电机和交流同步电机、开关磁阻电机(SRM)是主要发展方向。目前的永磁直流电机的比功率可达到 1.5~2.25kW/kg(内燃机约为 1.13~1.5kW/kg)。US Hybrid 公司的电机的比功率为 1.77kW/kg。

大输出功率电机实现起来有难度,目前主要应用于轻型飞机。应用无刷电机技术克服了高空中电刷打火和磨损问题,提高了电机的寿命和可靠性。

1.2 电储能技术难点

电储能技术主要途径是使用蓄电池和燃料电池。燃料电池目前使用贵金属铂作催化剂,成本高、结构复杂、技术不成熟,实际应用困难。

目前的动力电储能器仍然是蓄电池,以锂离子电池为主,这是因为它有如下优点:比能量高、无污染、使用寿命长、额定电压高、无记忆效应、循环寿命高、高低温适应性好、可快速充电等。目前的商用锂电池的比能量为 60~150 (W·h)/kg,难以满足飞机动力系统的最低要求。所以 Firefly 直升机目前只能用作原理验证。

传统的石墨类碳阳极材料的锂离子电池比能量理论上限为 372 (W·h)/kg,改进空间有限。研发单位纷纷转向研究锂硅电池和锂硫电池等新阳极材料电池,获得重大突破。

硅阳极材料锂离子电池比能量理论上限为 4200 (W·h)/kg,但硅材料在充放电循环中有巨大的体积变化,容易产生机械分裂,使电极粉化剥落。2008 年斯坦福大学的 Cui 用硅纳米线制备出高充放电次数的阳极,容量比碳阳极锂电池提高 10 倍^[2]。2014 年 Cui 用碳壳硅纳米粒子形成石榴状的群簇,制备出的阳极在充放电 1000 次之后仍能维持 97% 电池容量,已经接近商用要求^[3]。

单质硫正极活性材料的锂硫电池也很受关注,硫正极比能量理论上限为 1675 (W·h)/kg,并且硫廉价、无毒。但充放电过程中硫和 Li_2S 体积改变,破坏电极结构,导致容量快速衰减。有人宣称难题已经攻克。2013 年美国劳伦斯伯克利国家实验室的 Elton Cairn 制造的锂硫石墨烯氧化物电池的比能量已达到 500 (W·h)/kg,每个充放循环容量仅衰减 0.039%,充放电 1500 次后库仑效率为 96.3%^[4]。

以 Firefly 全电动直升机为例,其 GIGA 公司锂电池组的比能量为 62.8 (W·h)/kg,首飞达 15min (保守估计航时为 15min);如果换装新型的锂硅或锂硫电池组,比能量提高至 500Wh/kg,航时就增加到 120min,此时电动直升机就具备了实用价值。

2 热机和电动力的特点

直升机使用的热机发动机一般分两类:内燃机和涡轴式发动机。内燃机比功率小、油耗低,适于轻型直升机;涡轴式发动机比功率大、油耗高,适于中重型直升机。无论是内燃机还是涡轴发动机,工作时都要吸入空气,燃烧做功。一般规律是高度越大,大气密度越小,输

出功率随高度上升而下降;气温越高,大气密度越小,输出功率随气温上升而下降。

不装增压器的内燃机输出功率随高度上升而单调下降,下降速度快于大气相对密度 ρ/ρ_0 。如果装了增压器,在设计高度以下,增压器保持进气压力为常数,所以高度上升,输出功率保持不变;在设计高度以上,与普通内燃机一样,功率随高度上升而单调下降。涡轴发动机输出功率也随高度上升而单调下降,但下降速度稍慢于大气相对密度 ρ/ρ_0 ,如图 2 所示。

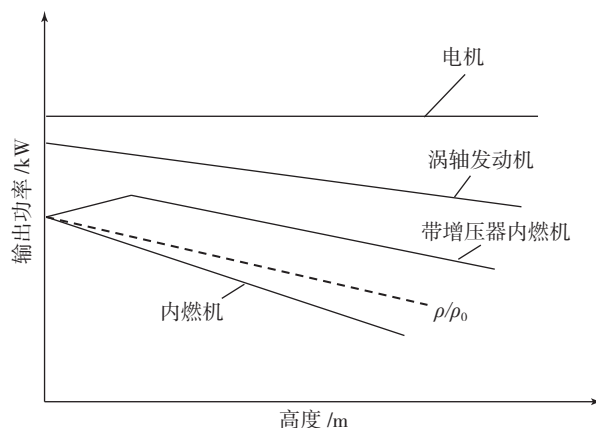


图2 内燃机和涡轴发动机、电机的功率-高度特性
Fig.2 Altitude-power curves of explosive motor, turboshaft engine, electric motor

电机对工作温度有要求。电机工作时发热,如果能及时散热,形成热平衡,电机就能稳定工作。有刷电机对工作高度有要求,高度升高,大气密度下降,电刷磨损加快,电刷换向火花加大,影响了寿命、可靠性和电磁兼容性。无刷电机无此问题。在允许的工作温度和高度范围内,哪怕是在外太空,电机都能稳定、持续地输出额定功率。

3 电动力对直升机性能的影响

电机输出功率不因高度和气温而变化,会对直升机的性能产生重大影响。

3.1 电动力提高直升机垂直性能

电机输出功率不因高度和气温而变化,会提高直升机的垂直性能,极大改善直升机的爬升率和动升限。

热机功率随高度的上升而下降;热机功率下降到接近直升机需用功率时,直升机就没有剩余功率去爬升,升限就此形成。高度上升,气温增加,热机功率下降,所以热机直升机在高空和高温的爬升率会变小。爬升率简化为:

$$\text{ROC} = k_{ps} N_{ky} - N_{\min} / G,$$

式中, k_{ps} 为爬升系数; N_{ky} 为可用功率; N_{\min} 为直升机最小需用功率; G 为全机重量。

决定爬升率的主要因素有两个,一是剩余功率,在当前温度与高度下,可用功率(动力单元最大连续输出功率经过传动等损耗)与直升机最小需用功率之差;二是飞机的重量。

在这里以国产轻型直升机为样例,其最大起飞重量 2200kg,发动机最大起飞功率 545.9kW,最大连续功率 484.7kW,选取其需用功率曲线,将发动机输出功率和直升机需用功率作归一化处理。假定其动力单元改造为电动力,电机额定功率等于发动机最大连续功率 484.7kW,归一化功率为 94%,讨论不同动力对直升机垂直性能的影响。

温度为 0℃,全机重量 2200kg 时,当高度为 0m,发动机动力和电动力剩余功率相同,为 50%,直升机最大斜向爬升率也均为 8.5m/s。当高度为 3648m,发动机动力剩余功率为 10%,最大斜向爬升率降到 1.8m/s;电动力剩余功率为 42%,最大斜向爬升率仍有 7.4m/s。当高度为 4134m 时,发动机动力直升机斜向爬升率为 1m/s,达到动升限;电动力直升机剩余功率约 41%,最大斜向爬升率还有 7.1m/s^[5]。

由于电动力系统输出功率不因高度下降,使得直升机在高空仍有足够的剩余功率去做爬升,提高了爬升率。如果主桨叶的翼型良好,在高空中仍能在总距工作范围产生足够的升力,电动力直升机是有足够的剩余功率使动升限获得重大突破的。

由于电动力系统输出功率也不因温度下降,使得直升机在高气温中仍有足够的剩余功率去做爬升,其爬升率和升限好于热机直升机。

3.2 电动力提高直升机水平性能

电机输出功率不因高度和气温而变化,能够改善直升机的水平性能,改善直升机在高空的最大速度和速度范围。

温度为 0℃,全机重量 2200kg 时,当高度为 0m,发动机动力和电动力输出功率相同,均为 94%,直升机最大速度为 237.2km/h(真空速),最小速度为 0 km/h(真空速),两者相同。当高度为 3648m,发动机功率降至 62%,受功率限制,直升机最大速度为 177.9km/h,最小速度为 83.4km/h,最大速度降低,速度范围变窄;电动力系统输出功率仍保持 94%,使得直升机最大速度为 231.6km/h,最小速度为 0km/h,最大速度和速度范围基本不变。

由于电动力系统输出功率不因高度和高温下降,使得直升机在高空和高温仍有足够的功率去做大速度前飞和小速度前飞,甚至悬停,改善了高空和高温中的直升机最大速度和速度范围指标。

3.3 电动直升机可降低使用维护成本

电动力系统相较内燃机系统具有零件少、结构简单可靠、故障率低、维护简易、维护成本低等优势。

现今石油制品价格高,航空汽油比普通汽油价格还高出 20%~30%,而电动直升机运行只需用电,运行成本大为降低。

4 结束语

电动直升机的关键技术已接近成熟。相较于热机直升机,电动直升机高空和高温环境有更好的垂直性能和水平性能;同时在噪音和振动、可靠性和维护性、使用成本上具备优势。可以相信,只要新型大容量电池商业化应用,电动直升机的时代很快就会到来。

参考文献

- [1] 施韦策公司.S300C 飞行手册.埃尔迈拉:施韦策公司,2009:1-14.
- [2] Cui Y. High-performance lithium battery anodes using silicon nanowires. *Nature Nanotechnology*, 2008(3):31-35.
- [3] Cui Y. A pomegranate-inspired nanoscale design for large-volume-change lithium battery anodes. *Nature Nanotechnology*, 2014(9):187-192.
- [4] Song M K, Zhang Y, Cairn E J. A long-life, high-rate lithium/sulfur cell: a multifaceted approach to enhancing cell performance. *Nano Letters*, 2013, 13(12): 5891-5899.
- [5] 中航工业直升机研究所.AC311 飞行手册.景德镇:中航工业直升机研究所,2012.

(责编 深蓝)

(上接第 163 页)

在售后服务过程中客户支援队伍经常能实现对关键技术的突破,但关键技术局限于个别技术人员手中没有相互交流,仍存在信息孤岛现象。所以建立在役机的故障、维修知识库管理系统,将所取得的成果和经验记录在经验知识库中,可以在今后的型号研制中进行验证和推广,推进我国直升机制造业的发展,对新型号的研制和老型号的改型具有重要的现实意义。最终把关键技术广泛应用于直升机产品的整个生产研制过程中,提高直升机整体水平,是保证直升机飞行性能和安全的重要手段,将带来可观的经济效益。

5 展望

通过构建直升机客户支援管理体系,对直升机产品从研制、生产、交付到使用维护进行全生命周期管理,能有效地提升品牌形象及客户关系友好度,提高企业的核心竞争力。着力推广以市场为导向、以客户为中心、适应军民两用直升机市场发展需求的一流营销和服务体系,将成为航空企业发展的重要手段。(责编 小城)