2017 年第 4 期　总 127 期
ISSN 1674-9804　CN 31-1614/V

DOI：10.19416/j.cnki.1674－9804.2017.04.016

某民用飞机发动机空中起动时间对比分析

Discussion on Aeroengine In-flight Starting Time

江民节　王嘉一 / JIANG Minjie　WANG Jiayi
（中国商飞民用飞机试飞中心，上海 200232）
（Flight Test Center of COMAC，Shanghai 200232，China）

摘　要：
在描述风车起动和起动机起动过程的基础上，对比分析了起动机起动和风车起动的起动时间和点火时间。通过研究可知：（1）风车起动和起动机起动时间对比主要取决于起动机脱开前阶段，由于起动机的带转作用，起动机起动时间较短，但随着飞行速度增大，起动时间逐渐和风车起动接近；（2）风车起动和起动机起动的点火时间对比，主要取决于点火准备时间，起动机起动点火时间相对较长，随着飞行速度的增加，逐渐和风车起动点火时间接近。该研究可为发动机起动系统设计以及发动机空中起动试飞数据分析、排故提供参考。

关键词：风车起动；起动机起动；起动时间；点火时间
中图分类号：V231　　**文献标识码：**A

[**Abstract**] Based on the description of windmilling start and Starter start，the Start time and Ignition time between them were compared and analyzed in this paper. By researching，we know：1）The differences between windmilling start time and Starter start time mainly depend on the step before releasing starter. Because of the high acceleration of Starter，engine can be started in a shorter time. As the flight speed increases，the effect of Starter start decreases. The starter start time gradually approaches the windmilling start time. 2）The difference between their Ignition time mainly depends on preparation period of ignition. The starter requires longer ignition time. With the increasing of flight speed，the Starter Ignition time gradually approaches the windmilling ignition time. This study can provide reference for engine start system design and engine airstart flight test data analysis and troubleshooting.

[**Keywords**] windmill starting；starter starting；starting time；ignition time

0　引言

航空发动机空中起动能力对于保障飞机安全飞行至关重要，一旦出现空中停车，如果不能可靠、快速起动，则可能造成机毁人亡[1]。针对民用飞机，AC25-7C 规定了发动机起动时间历程为：点火时间不得超过 30s，从点火到稳定慢车的时间不得超过 90s，且在高空发生双发熄火后，发动机开始起动到改平的高度损失不得超过 5 000 ft[2]。

发动机空中起动性能取决于起动方式，在相同起动方式下，取决于燃烧室进口气流条件以及供油、点火逻辑，在同一发动机和相同的起动方式下，起动性能与燃烧室进口气流的压力、温度以及进口气流的速度和供油规律有关。因此，高度、马赫数、起动方式及发动机温度均影响发动机空中起动性能。

民用飞机常用的起动方式有起动机起动和风车起动，本文在详细分析其起动过程的基础上，结合某民用飞机飞行试验结果，对比分析了两种起动方式下的起动时间和点火时间及其影响因素。

1　发动机起动过程及其分析

发动机起动是一个重要的过渡过程，要求在压气机不喘振和涡轮前温度不超温的情况下，按照设定的起动和燃油控制程序点燃燃烧室，并将发动机加速到慢车状态[3]。

起动机起动过程：起动机带动发动机转子加速，当达到某转速时，发动机点火装置开始工作；发动机转速继续上升到更高转速时，供油系统开始为发动机供油，在点火装置的作用下，燃烧室油气混合稳定燃烧，涡轮开始输出功率；此时，涡轮的输出功仍不足以维持发动机运转的需求，起动机和涡轮共同带动发动机转子加速，当达到某个转速时，涡轮输出功率足以维持发动机加速，起动机脱开；发动机继续加速至慢车，起动结束。

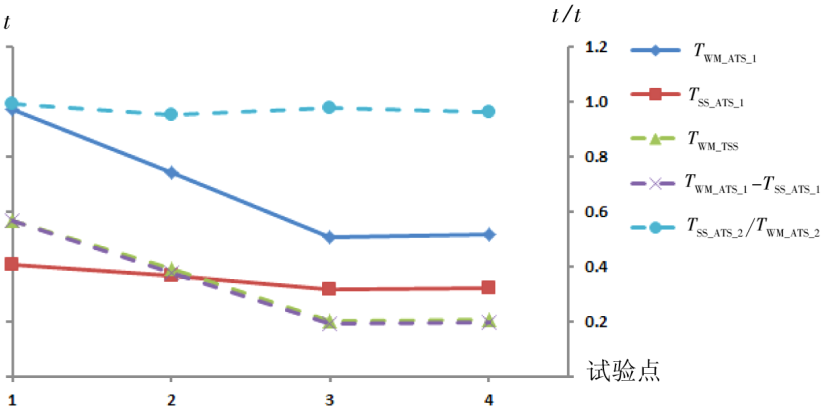
风车起动过程：依靠来流冲击使得发动机加速至某转速，发动机开始点火、供油，点火成功后，依靠涡轮输出功率加速至慢车，起动结束。

2　发动机空中起动时间对比分析

2.1 发动机空中起动时间对比

分析起动机起动过程，可将其分为起动机脱开前和脱开后两个阶段。起动机脱开前阶段从发出起动命令开始，至起动机脱开结束；起动机脱开后阶段从起动机脱开至起动成功结束。为便于分析，本文将风车起动也相应划分两个阶段，划分界限为起动机起动时的起动机脱开转速。

一般来说，发动机的起动过程主要由起动机脱开前决定[3]。因此，起动机起动和风车起动时间对比，主要取决于起动机脱开前阶段。由于起动机的带转作用，起动机起动时间相对风车起动较短一些，但随着飞行速度增大，其风车转速随着增加[4-5]，相应的起动机的带转优势减弱，起动机起动和风车起动时间趋于接近；起动机脱开后，风车起动和起动机起动均主要依靠涡轮输出功驱使发动机转子加速，所需时间基本一致，如图 1 所示。



注：T_{WM}表示风车起动时间；T_{SS}表示起动机起动时间；$T_{WM_ATS_1}$表示风车起动的起动机脱开前阶段时间；$T_{WM_ATS_2}$表示风车起动的起动机脱开后阶段时间；$T_{SS_ATS_1}$表示起动机起动的起动机脱开前阶段时间；$T_{SS_ATS_2}$表示起动机起动的起动机脱开后阶段时间。

图 1　发动机空中起动时间对比

试验点 1、2、3、4 马赫数逐渐增加，1、2、3、4 高度逐渐增加（1、2 高度相同）。

2.2 转速加速率对比

综上，起动机起动和风车起动时间的差异主要受起动机的影响，而起动机影响的主要因素是发动机的加速能力，即转速加速率$\left(\frac{dn}{dt}\right)$。转速加速率的计算公式可表示为：

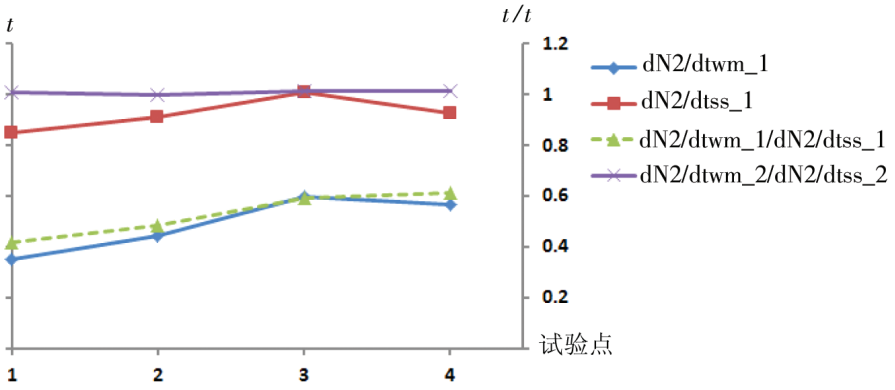
$$\Delta P = 4\pi^2 J_z n \frac{dn}{dt} \tag{1}$$

$$\Delta P = P_{ATS} + P_{tur} + P_{RAM} - P_{drag} \tag{2}$$

其中：ΔP 为净输出功率；J_z 为转子转动惯量；P_{ATS}为起动机输出功率；P_{tur}为涡轮输出功率；P_{RAM}为冲压气流产生功率；P_{drag}为阻力功率。

由式(2)可知,起动机脱开前,相较于风车起动的 ΔP,起动机起动还有 P_{ATS} 的作用;而起动机脱开后,起动机起动和风车起动的 ΔP 的影响因素一致。

因此,起动机起动和风车起动的加速率差异主要体现在起动机脱开前阶段,由于起动机的带转作用,起动机起动的加速率大于风车起动[6],但随着飞行速度增加,P_{RAM} 增加,而 P_{ATS} 作用相对减弱,起动机起动和风车起动加速率逐渐接近;起动机脱开后,起动机起动和风车起动的加速率均主要取决于涡轮输出功,其加速率接近,这也和前文分析结果一致,如图 2 所示。



注:WM 表示风车起动;SS 表示起动机起动;_1 表示起动机脱开前;_2 表示起动机脱开后。

图 2　发动机空中起动的加速率对比

3　点火时间对比分析

AC25 – 7C 提出发动机空中起动过程中点火时间不得超过 30s。因此,本文重点对比分析风车起动和起动机起动的点火时间及其影响因素。

3.1 点火过程分析

点火过程从发出起动命令开始,至点火成功结束。点火成功与否需要利用发动机状态参数进行判断,选取的状态参数应快速、有效反应燃烧室点燃状态。由于点火成功后,EGT(发动机排气温度)存在明显突变。因此,一般选取 EGT 判断发动机点火是否成功,当 EGT 有明显的升高,则表明发动机点火成功,如图 3 所示。

无论风车起动还是起动机起动,都需在发动机转速达到某特定值后点火器才开始工作、然后供油。因此,可将发动机点火过程分为点火准备阶段和点火实施阶段,点火准备阶段从发出起动命令开始,至开始供油结束,该阶段主要是为了使得发动机加速至某特定转速(下文称为点火转速),以保证燃烧室进口气流温度、压力满足点火要求;点火实施阶段从开始供油至点火成功结束,该阶段目的是点燃燃烧室内油气混合物,形成稳定火焰,确保燃烧室内稳定燃烧。

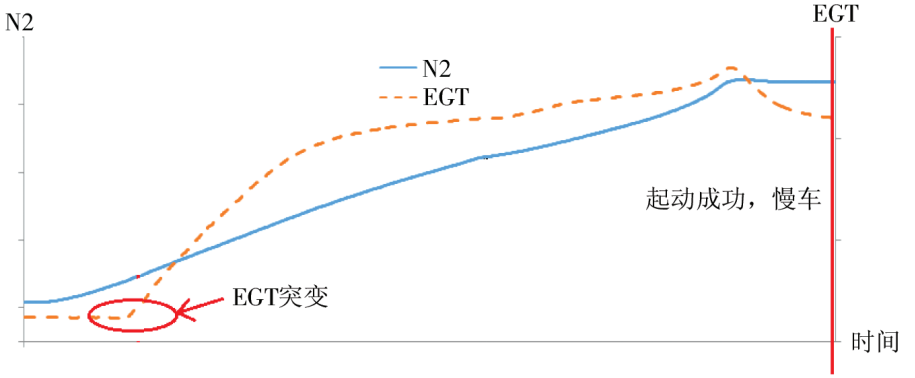


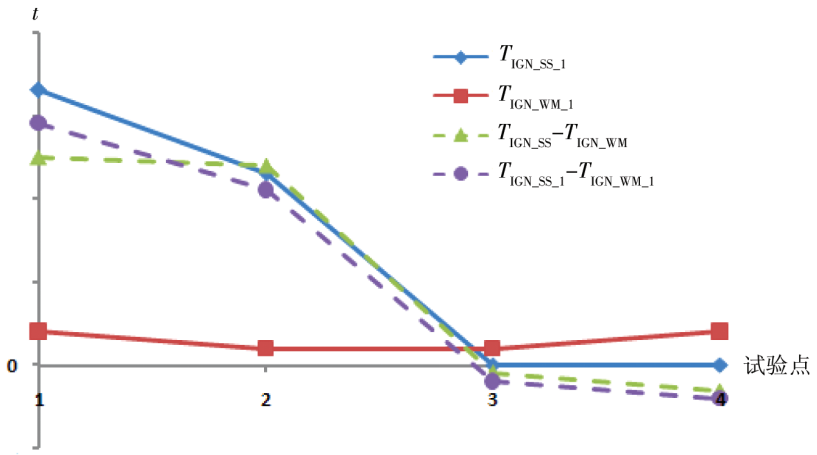
图 3　发动机起动典型过程

3.2 点火时间对比

风车起动的初始转速完全依靠来流冲压作用，很难达到较高状态，尤其是飞行速度较低时，因此风车起动点火转速相对较低，一般来说，风车起动包线内任何高度、速度下的风车转速均满足该要求；而由于燃烧室进口空气压力及温度均影响发动机的点火性能，因此为提高点火性能，起动机起动时其点火转速相对较高[7]。

因此，起动机起动点火准备时间会长于风车起动，但随着飞行速度的增加，风车转速逐渐接近点火转速，起动机起动的点火准备时间随着缩短，当飞行速度达到一定程度时，风车转速和点火转速接近、甚至超过点火转速，这时起动机起动和风车起动的点火准备时间接近，如图 4 所示。

风车起动和起动机起动点火时间对比，主要取决于点火准备时间。因此，起动机起动点火时间长于风车起动，但随着飞行速度的增加，两者逐渐接近。



注：T_{IGN_SS} 表示起动机起动点火时间；T_{IGN_WM} 表示风车起动点火时间；$T_{IGN_SS_1}$ 表示起动机起动点火准备时间；$T_{IGN_WM_1}$ 表示风车起动点火准备时间。

图 4　发动机点火时间对比分析

4　结论

本文在详细描述风车起动和起动机起动过程的基础上，结合某民用飞机发动机空中起动试飞数据，对比分析了起动机起动和风车起动的起动时间和点火时间。结论如下：

（1）风车起动和起动机起动时间对比主要取决于起动机脱开前阶段，由于起动机的带转作用，起动机起动时间较短，但随着飞行速度增大，起动时间逐渐和风车起动接近；

（2）风车起动和起动机起动的点火时间对比，主要取决于点火准备时间，起动机起动点火时间相对较长，随着飞行速度的增加，逐渐和风车起动点火时间接近。

本文研究结论，可为发动机起动系统设计以及发动机空中起动试飞数据分析、排故提供参考。

参考文献：

[1] 张绍基，邴连喜. 一项扩大涡扇发动机空中起动包线的有效措施[J]. 航空发动机，2009，35(2)：1－5.

[2] AC25-7C Flight Test Guide For Certification Of Transport Category Airplanes[M]. FAA，2012.

[3] 冯维林. 涡扇发动机起动过程的数值模拟[D]. 西安：西北工业大学，2006.

[4] 韦德·凯西，等著. 张蓉译. 涡轮发动机空中起动时间的比较方法[J]. 科技创业，2013，235(12)：176－181.

[5] 田琳，陶冶，等. 民用涡扇发动机空中启动风车转速研究[J]. 工程与试验，2013，53(01)：6－9.

[6] 朴英. 航空燃气涡轮发动机起动性能分析[J]. 航空动力学报，2003，18(6)：777－782.

[7] 聂恰耶夫著. 姜树明译. 航空燃气涡轮发动机原理[M]. 北京：国防工业出版社，1984.

作者简介

江民节　男，硕士，工程师。主要研究方向：发动机、APU 试飞方法的研究；E-mail：jiangminjie@comac.cc

王建一　男，本科，工程师。主要研究方向：发动机、APU 试飞方法的研究；E-mail：wagnjiayi1@comac.cc