

民机节油策略研究

Research on Civil Aircraft Fuel Saving Strategy

张 伟 / Zhang Wei

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘 要:

节油是航空公司的长效措施,各航空公司均很重视。从飞行具体环节出发,基于性能研究民机节油策略,给出飞行前重量、重心、APU使用和滑行等措施分析和建议,并给出起飞、爬升、巡航、下降和进近着陆的经济飞行节油策略分析和建议。通过对飞行具体环节节油策略的研究,提出重视飞行计划优化和执行的思路,案例分析优化效果,对比分析现有飞行计划方法,得出飞机制造商提供包含飞行计划和QAR(Quick Access Recorder)分析系统等的整体IT解决方案,是提升节油效果的一个性价比很高的选择的结论。

关键词:民用飞机;节油;飞行计划;经济飞行

中图分类号:F407.5

文献标识码:A

[Abstract] Fuel saving is a very important and long-term action for airlines. Based on aircraft performance analysis, this paper presents fuel saving suggestions on weight, center of gravity and APU usage and taxiing before flight, and also presents economy flight fuel saving strategy suggestions on take-off, climb, cruise, descent, approach and landing phase. By the research of fuel saving measures in each detailed aspect of a flight circle, the paper suggests the method of well using flight planning tool to improve fuel consuming efficiency, with a case study and the comparison of different flight planning methods, and educes the conclusion that the integration IT solutions including flight planning and QAR(Quick Access Recorder) analysis systems from civil aircraft manufacture is a high performance-price ratio choice for airlines' fuel saving.

[Key words] civil aircraft; fuel saving; flight plan; economy flight

0 引言

航空公司的燃油成本占运营成本35%左右,节油成为航空公司提高经济效益和满足环保要求的长期策略^[1-2]。各航空公司虽然制定了一系列节油措施,效果显著,但节油还有更多潜力可挖^[3-8],且相比飞机设计降低油耗的长周期而言往往更快甚至更有效。本论文主要基于性能分析研究航空公司如何节油,并通过机型案例进行节油效果检查,未分析维修等其它方面因素。

1 飞行前

1.1 重量

重量增加,油耗增加。着陆重量每减少1%,使得飞行油耗可降低0.75%~1%^[9]。国际公认航班落地剩余油量为1.25小时为最佳,也就是对于波音737这一类机型来说,落地油量在3t左右较为合适^[8]。

每1000lb零油重量的减少对波音各机型轮挡油耗影响如表1所示。

表1 每1000lb零油重量对波音机型轮挡油耗的影响

机型	717-200	737-3/4/500	737-6/7/8/900	757	767	787-8	777	747-400/8
轮挡油耗变化量	0.9%	0.7%	0.6%	0.5%	0.3%	0.3%	0.2%	0.2%

另根据IATA的统计,每1kg重量带来的油耗影响在2%~7%之间。奥凯航空飞机载重每减少

100kg,每小时可减少燃油消耗 2.1kg。

飞行中应尽量降低重量,包括着陆重量、零油重量和油量等。航空公司通常会采用该措施,但需与机场和空管等部门协同才能效果更好。例如,加油液面不稳定会导致加油量不准确,多加油往往会使得重量增加数百公斤,这使得减重效果荡然无存,少加油则影响飞行安全。

1.2 重心

重心后移,配平阻力降低,油耗降低。飞机起降性能数据基于前重心计算。

长航程宽体机,如波音 747、A340 等往往通过

配平油箱转换系统,转移燃油位置而调整飞机的重心。据统计,每 1% 平均气动弦长 (Mean Aerodynamic Chord, 简称 MAC) 的重心改变会产生 0.05% ~ 0.125% 的油耗变化。例如 Q400 飞机每 1% MAC 的重心改变会产生约 0.04% 的油耗变化^[10]。飞机重量越轻,油耗变化影响越小。

飞行中应尽量使用后重心或最优重心以降低油耗。

1.3 APU 和滑行

APU 一般地面使用较多。不同机型 APU 油耗如表 2 所示。

表 2 不同机型 APU 和滑行油耗^[9-11]

	ATR72	Q400	CRJ700	E190	717	727	737	747	757	767	777	787	320	330
滑行 (lb/min)	15	11	18	20	25	60	25	100	40	50	72	62	22	55
APU (lb/min)	/	3	4	4	4	5	4	11	4	4	9	7	5	7

滑行油耗率是巡航油耗率的 25% ~ 30%,意味着每多滑行 4min 等同于巡航 1min,相当于巡航 13.9km (35 000ft, 0.78M, ISA, 无风)。据国航统计,2009 年比 2004 年每架次出港滑行时间增加 5.3min。双发飞机单发滑行且 APU 运行时,油耗可降低 10% ~ 15%,若 APU 不运行则油耗可降低 25% ~ 30%。

为节省 APU 耗油,应减少 APU 的工作时间,或使用地面电源车和气源车代替 APU 的措施^[5]。同时还应该尽量晚地启动发动机,较长距离直线滑行时少使用刹车,减少滑行时间,或者考虑单发滑行等。

1.4 其他

起飞时一般要求先加油门后松刹车,但实际上由于国内机场跑道长度较长,多数采用先松刹车并同时加油的方式起飞。这样会使得起飞场长变长,但会降低油耗。

1% 的阻力增加有可能带来 0.7% ~ 1.0% 的航程油耗增加。因此可采取保持飞机表面光洁等措施来减小飞机阻力,从而降低油耗。

2 经济飞行

2.1 起飞和爬升

起飞时,尽量采用小襟翼起飞,尽早收起襟翼,进而减小阻力,使飞机拥有更好的爬升性能,减少低高度飞行时间,从而降低油耗。另外,还可采用

改进爬升等方式,相同梯度所需推力减少,使得油耗降低。假设温度起飞、减推力起飞等有利于降低发动机维护成本,但却导致油耗增加,需权衡使用。

航路爬升虽然是从起飞飞行航迹终点 (距地面 1500ft 处) 开始,但为了计算和使用方便起见,使用手册中都是从起飞离地开始计算。图 1 所示为一个典型的爬升剖面,可分为 6 个阶段。

- A 段:从起飞离地爬升到 1 500ft;
- B 段:从 1 500ft 爬升到 10 000ft;
- C 段:在 10 000ft 高度平飞加速到爬升速度;
- D 段:按给定的表速和马赫数爬升到爬升顶点;
- E 段:在初始巡航高度加速到巡航速度;
- F 段:巡航到爬升终点。

为了确定最佳爬升速度,需按图 1 所示的典型爬升剖面,对给定的飞机起飞重量、初始巡航高度和速度、大气温度、风速、风向等条件,选几种不同的爬升速度,分别计算出从起飞离地开始至爬升到爬升终点的爬升性能。比较不同爬升速度时的燃油消耗量,其中燃油消耗最少的爬升速度即为该计算条件下的最佳爬升速度。

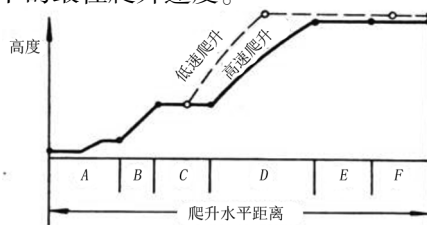


图 1 典型爬升剖面

2.2 下降和着陆

与分析爬升性能计算相同,按照典型下降剖面进行下降性能计算(见图2)可以得到与爬升类似的下降规律,即从巡航结束的下降起点到下降着陆为止的下降过程中,燃油最省的下降速度仅仅是着陆重量的函数。其他因素,例如最后巡航高度马赫数、环境温度等对下降的影响很小,通常可以不用考虑。典型剖面如下所示。

- A 段:巡航到下降起点开始下降;
- B 段:从下降起点下降到 10 000ft;
- C 段:10 000ft 高度巡航并减速到 250n mile/h;
- D 段:进近着陆阶段。

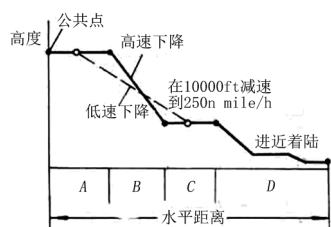


图2 典型下降剖面

在完成下降后,需要迅速进入进近着陆。在完成相同燃油的情况下,飞机在高空飞过的距离比在低空能飞过的距离要大,所以要选择好下降点,不要太早下降。飞机过早下降会在低空中消耗更多燃油,表3为几种机型提早1min下降,额外增加的燃油消耗量。

表3 提早1min下降额外的燃油消耗量

机型	707	727	737	747
额外的燃油消耗量(lb)	80	60	40	200

使用低速下降方式,下降段水平距离较长,节省燃油;而使用高速下降,则下降时间较短,水平距离也短,耗油比较多。

低速的下降方式比较省油,正常下降用低速下降方式。但由于空中交通管制或其他原因,当飞机被允许下降时,如果距机场距离较短就要使用高速下降。高速下降时需要使用减速板,高速下降不仅耗油多,而且还因为下降时间短,不能从容地进入进近状态,也不利于建立稳定的进近和着陆飞行状态。高速下降主要应用于特殊的情况,也称应急下降,对于高速下降的下降率有一定要求,如FAA要求能在4min内从42 000ft下降到14 000ft。高速下降时飞机以最大允许使用速度下降。

进近时,晚放襟翼和起落架可以减小阻力,降

低油耗。着陆时,少使用反推可以降低油耗。

2.3 巡航

经济飞行是用使成本(或油耗)最低的速度飞行^[12]。

(1) 速度

巡航分为几种类型,在实际运行中根据不同情况可采用不同的巡航方式。

第一种为飞行高度保持不变的远程巡航(LRC)方式。

第二种为马赫数和飞行高度固定不变的巡航方式。

第三种为经济巡航即成本指数巡航,巡航速度和高度都产生变化。

最省油的方式是LRC巡航,最经济的方式是经济巡航。

(2) 高度

在一定的巡航方式下,使目标值最优的巡航高度即为最佳高度,也即对于给定的条件,在此高度上巡航,可以使单位航程最大。

最理想的巡航高度是随燃油消耗,飞机重量减轻而改变巡航高度,阶梯巡航高度选择原则是使巡航高度尽可能地接近最佳高度,按飞机高度层间隔规定,所选巡航高度层在最佳高度 $\pm 2\ 000\text{ft}$ 的范围内。偏离最佳高度越大,燃油里程损失越多。所以确定最佳高度是节油的重要的一部分。

以波音737飞机为例,高于最佳高度2 000ft,航程燃油消耗增加2%;低于最佳高度2 000ft,航程燃油消耗增加1%;低于最佳高度4 000ft,航程燃油消耗增加4%;低于最佳高度8 000ft,航程燃油消耗增加9%^[9]。

通过上述数据可以看出,偏离最佳高度对飞行耗油的影响很大,在实际运行中尽量不要偏离最佳高度过多。在选择巡航高度时既要考虑经济性同时也要考虑其他几个因素:不能超过发动机推力限制和机动能力限制;考虑航程的影响,航程较短的飞行可能会受到爬升或者下降距离的限制;还应满足空管对飞行高度层的限制。

(3) 风

在有风的情况下,为了保持大的燃油里程,需要改变无风情况下确定的巡航速度或高度。在选择最佳高度时也要考虑保本风的问题,在最佳高度上风速不是保本风速就要考虑爬升或下降到某个

风速接近保本风速的高度上,这样就可以增大燃油里程达到节油的目的。

但一般为简化计算,手册中保本风计算不考虑航路爬升和下降所产生的油耗。

(4) 其他

选择更直的航路,如国内申请临时航线、国际航线采取 ETOPS、未来采用 PBN 航线等优化航路,可有效降低油耗。

还可以充分利用燃油差价、燃油密度等进行回程油分析,提升经济性,但对降低油耗没有帮助。

3 飞行计划

3.1 节油控制点

飞行中的节油具体可控环节如图 3 所示,四川航空也采用类似的措施,如图 4 所示。不难看出基于性能分析的节油策略中最重要的在于飞行计划的合理制定和执行。



图3 飞行中的具体环节和可控点

节油不仅是飞机制造商在飞机设计时要考虑的因素,也是航空公司运营的策略,应等同看待,如同驾驶习惯是影响安全和油耗的最主要因素一样。飞机制造商的设计应在提供低油耗性能的同时也提供节油策略实施的便利条件。飞机是否具备让航空公司实施节油措施的功能也是其价值点。例如速度是否多选、重心是否便于可调、襟翼位置是

否更多、油箱容量等。



图4 川航节油控制点^[13]

3.2 优化案例

对 Q400 飞机 500nm 典型航段 (ISA, 无风, 100nm 备降+45min 等待) 进行优化对比,结果如表 4 所示,最优情况下油耗优化效果非常显著。

再以浦东至成都航线 85% 年概率气象条件为例进行多机型航线优化飞行计划计算,参考上述节油措施,主要优化项目如表 5 所示,优化结果如表 6 所示,可带来 5% 以上的油耗降低。

有关部门的研究结果表明,如果中国民航能系统地采取节油措施,有可能使航油消耗总量在现有基础上降低 2% ~ 5%。航油消耗每降低一个百分点,中国民航每年可节约 10 万吨航油,约合 5 亿元人民币。一般来说,合理优化并有力执行的飞行计划,能实现 2% ~ 8% 的燃油节省。飞机制造商不换发的优化设计一般只能达到如此量级,新飞机设计虽然可以达到 10% 以上油耗降低,但是却需要 6 ~ 8 年的研制周期。如此看来,合理的飞行计划优化和执行是一个性价比极高的选择。例如,春秋航空研发计算机飞行计划软件耗资约 180 万,使用计算机飞行计划软件,每架飞机每天可节省航油 50kg,一年 21 架飞机共节油 383t (395t 标准油)。南方航空公司也一直致力于自主开发 IT 系统,效果显著。

表4 Q400 飞机 500nm 航段飞行计划优化对比

节油措施	典型高速飞行	最低油耗优化	节省油量	轮挡油耗节省比例
OEW 减少	17 819kg	17 690kg	-	-
业载	8 489kg	8 339kg	-	-
TOW	29 574kg	28 476kg	-	-
APU 引气	34kg	18kg	16.8kg	0.7%
滑出	93kg	54kg	38kg	1.6%
起飞	42kg	42kg	-	-
空中操纵	28kg	-	28kg	1.2%
爬升	324kg	375kg	-50kg	-2.2%
巡航高度	23 000ft	27 000ft	-	-
巡航速度/风/重心	1 335kg	897kg	439kg	18.8%
下降	318kg	166kg	153kg	6.6%
进近/着陆	89kg	22kg	67kg	2.9%
滑入	93kg	54kg	38kg	1.6%
备降高度	5 000ft	10 000ft	-	-
备降油量	817kg	532kg	286kg	-
等待油量	413kg	362kg	47kg	-
轮挡油量	2 329kg	1 628kg	700kg	30.1%
飞行油量	2 138kg	1 502kg	636kg	29.7%

表5 ZSPD-ZUUU 航线优化措施

项目	优化前	优化后
巡航速度	高定速巡航	LRC
飞行高度/ft	30 100	32 100
航路风/kt	-91	-101
航路温度	ISA+16	ISA+16
备降场	贵阳	重庆
滑行时间/min	30/20/10	15/10/10
其他	最快爬升、下降、等待	最省爬升、下降、等待

表6 不同机型飞行计划优化结果

机型	ZSPD-ZUUU 轮挡油量/kg		
	优化前	优化后	变化量
CRJ700	5 601.0	5 141.5	-459.5/-8.2%
E190	7 360.1	6 873.2	-486.9/-6.6%
B737-800	8 996.5	8 492.7	-503.8/-5.6%
A320-200	8 581.0	7 968.9	-612.1/-7.1%
A330-200	19 875.6	17 200.5	-2 675.1/-13.5%

3.3 方法对比

目前飞行计划制定有两种方法:第一,商用飞行计划软件供应商所采用的,以飞机爬升、巡航、下降和等待等各阶段积分和点性能数据,实际航路以及风、温等数据为输入,基于分步积分的思想完成每个航班最大业载、油量和时间等数据计算,形成各航路点的详细飞行计划。第二,飞机制造商性能软件所采用的,以质点运动学方程的方式进行性能计算,但没有实际航路以及风、温等数据接口链接。

采用标准统一剖面下对两款机型的两种飞行计划计算结果进行对比,如表7所示。分步积分与运动学方程虽然差异不大,但仍存在一定差异。但由于第二种方法制造商没有结合航空公司实际运营需求,即没有与航路、风、温度等数据有效链接,以及没有与航空公司运控及其他系统合理衔接,因此实际应用不广泛。

表7 飞行计划方法对比

航段距离/n mile	A 机型轮挡油耗(kg)			C 机型轮挡油耗(kg)		
	分步积分	运动学方程	差异	分步积分	运动学方程	差异
500	2401	2442	-41/-1.7%	3163	3132	31/1.0%
1000	4353	4412	-59/-1.3%	5566	5491	75/1.4%
1500	6351	6433	-82/-1.3%	8018	7911	107/1.4%
2000	8413	8451	-38/-0.4%	10517	10381	136/1.3%

互联网、大数据时代,飞机制造商基于了解飞机产品的先天优势,切实从航空公司运营角度提出综合 IT 解决方案将成为飞机的新卖点。

飞机制造商可提供更符合运营要求的飞行计划系统、QAR 数据分析系统,并实现更好的交连。实时监控每架飞机的性能,完成对每个飞机的独立飞行计划,同时兼顾航路、风和操作等因素,在保证飞行安全的前提下减少不必要的额外油耗。例如,LRC、MRC 以及经济巡航考虑风速修正,多飞行剖面精确计算等。

4 结论

在飞行各个阶段的节油策略各不相同,航空公司宜分别对待。航空公司节油措施得力所带来的效果不亚于飞机优化设计。因此,作为飞机制造商应为航空公司节油提供便利,提供相关功能、设备和
(下转第 68 页)

4 飞行试验

只有地面排液试验获得批准后方可进行飞行试验。APU 排液试飞用于验证在各种可能的飞行条件下,APU 舱液体排放路径不会产生其他危害。为避免湿气影响排液路径,飞行试验不可在有可见湿气(包括云)时进行。

4.1 试飞方法

在飞机各种可能的运行条件下(包括滑行、起飞、爬升、巡航、侧滑、盘旋、下降、进近、着陆等),均注入一定量(通常是 1gallon/min)的染色水,注入时间 30s ~ 120s。试验前后,需对 APU 舱排液路径进行拍照。进行该试验时,着陆时一般开反推和不开反推两种条件都应进行验证。同样,应综合考虑 APU 舱内可燃液体泄露的可能性及可燃液体排放的严酷性,决定是否起动 APU。巡航高度和速度一般选取某一特定高度和速度作为其典型代表。典型的 APU 舱排液飞行试验条件如图 3 所示。

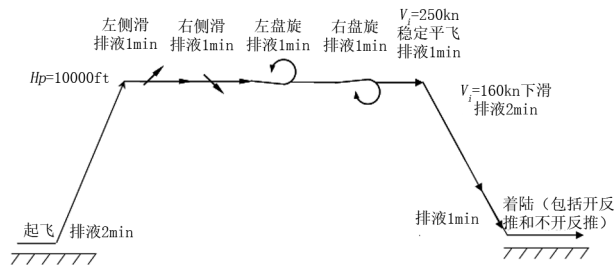


图 3 APU 排液飞行试验示意图

(上接第 27 页)

工具支持。从基于性能的节油策略出发,制造商为航空公司提供 QAR 性能数据实时监控、飞行计划工具的整体 IT 解决方案,合理优化和完善飞行性能,将是一个性价比极高的选择。

参考文献:

- [1] 中国民航大学. 飞机节油策略研究报告[R]. 天津:中国民航大学,2015.
- [2] 李宜. 航空节油飞行策略研究及分析软件的设计和开发[D]. 成都:电子科技大学. 2010.
- [3] 奥凯航空公司节能减排工作经验[R]. 空运商务, 2011,02.
- [4] 春秋航空公司节能减排工作经验[R]. 空运商务, 2011,02.

4.2 试飞判据

CCAR25.863 条款和 CCAR25.1187 条款并未对“危害”给出明确定义,因此审查代表往往基于主观的工程判断对排液试飞结果的符合性进行评判。一般情况下,液体进入以下区域是不可接受的:

- (1) 客舱,货舱;
- (2) 任何存在潜在点火源的区域;
- (3) APU 舱;
- (4) APU 进气口和尾喷口;
- (5) 发动机进气口和尾喷口;
- (6) 附件舱或可燃液体泄漏时可能有名义点火源存在的区域,例如电子电气舱,航灯或电池舱等;
- (7) 起落架舱。

5 结论

本文对民用飞机 APU 排液验证试验方法进行了研究,给出了 APU 排液地面试验和飞行试验时相关测试改装、试验方法的技术要点,以及试验结果的可接受判据等,供民机设计人员参考。

参考文献:

- [1] 中国民用航空局. CCAR25-R4 中国民用航空规章第 25 部:运输类飞机适航标准[S]. 北京:中国民用航空局,2009.
- [2] Draft Advisory Circular AC No. 25.863-1 Flammable Fluid Fire Protection.

- [5] 山东航空股份公司节能减排工作经验[R]. 空运商务, 2011,02.
- [6] 中国东方航空公司节能减排工作经验[R]. 空运商务, 2011,02.
- [7] 中国国际航空股份公司节能减排工作经验[R]. 空运商务,2011,02.
- [8] 中国南方航空股份公司节油工作经验[R]. 空运商务, 2011,02.
- [9] 波音. 性能培训资料[Z]. 波音公司,2014.
- [10] 庞巴迪. Q400 下一代飞机节油手册[R]. 2005.
- [11] 空客. 性能培训资料[Z]. 空客公司,2008.
- [12] 中国民航大学. 经济飞行研究报告[R]. 天津:中国民航大学,2015.
- [13] 赴令. 四川航空节油系统策略研究及应用[D]. 重庆:重庆大学,2007.