

枭龙飞机与竞争机型的对比研究

委托方：中国航空技术进出口总公司政府产品出口部

承担方：北京航空航天大学经济管理学院

2005 年 12 月

摘 要

目前国际上与“枭龙”飞机(FC-1)同代的竞争机型主要有美国的 F-16、俄国的 MIG-29、法国的 Mirage-2000 以及瑞典的 JAS39。本报告对这几种飞机的飞行性能、雷达与武器系统、航空电子设备、费用、作战能力与效能等进行对比分析,以明确 FC-1 的优势与不足。本报告的主要结论如下:

FC-1 在飞行性能上总体处于劣势,但劣势并不明显。高空高速性能较差是 FC-1 的一个很大的缺陷,FC-1 的最大飞行速度与竞争机型相比有较大差距,其升限也较低。机动性与 Mirage2000-5 和 JAS39 相当,而与 F-16C 和 MIG-29M 有一定差距。起降性能与 Mirage2000-5 相当,优于 F-16C,但劣于 JAS39 和 MIG-29M。FC-1 的作战半径和转场航程,处于中等水平。

在雷达与武器系统上,FC-1 与竞争机型处于同一水平。FC-1 的雷达性能不亚于竞争机型,在雷达探测距离和对地攻击性能上占有优势。由于现代战斗机大量使用空-空导弹,FC-1 在航炮上的劣势对作战效能的影响不大。FC-1 的近距离导弹性能与 F-16C、MIG-29M 以及 JAS39 相当,但劣于 Mirage2000-5。FC-1 如果挂载俄制 AA-12 型或国产 SD-10 型的中距导弹,其火力可与 F-16C 和 MIG-29M 处于同等水平,明显优于 JAS39 和 Mirage2000-5。

FC-1 的航空电子设备与 F-16C 和 JAS39 的航空电子设备相当,优于 Mig-29M 及 Mirage2000-5。FC-1 与竞争机型航空电子设备最大的差距在电传操纵系统上,对 FC-1 的机动性有一定影响。

按美国的评估方法,FC-1 的作战能力指数高于 JAS39 和 Mirage2000-5,但低于 Mig-29M 和 F-16C。FC-1 的作战能力指数相当于 MIG-29 的 93%,F-16C 的 95%,JAS39 的 105%,Mirage2000-5 的 110%,与 Mig-29M 和 F-16C 的差距不明显。

按俄国的评估方法,FC-1 的综合作战效能与 F-16C、MIG-29、Mirage2000 相比处于劣势,只有 F-16C 综合作战效能的 58%,MIG-29 的 63%,Mirage2000 的 86%。

总体上,FC-1 的整体性能达到第 3 代战斗机的水平,接近 Mirage2000-5 和 JAS39,但比不上 F-16C 和 MIG-29M。FC-1 与 JAS39、以及 F-16、MIG-29 和 Mirage2000 的改进型相比,在价格和性价比上占有优势,但与 F-16、Mirage2000 的早期型号相比,价格和性价比优势可能会丧失,与 MIG-29 的早期型号相比,甚至在价格和性价比上处于劣势。

关键词: 枭龙飞机, FC-1, 竞争机型, 对比研究, 效能分析

目 录

1 竞争机型基本参数	1
2 飞行性能对比	2
2.1 飞行速度	2
2.2 升限	2
2.3 机动性	2
2.4 起降性能	4
2.5 作战半径与航程	5
3 雷达与武器系统对比	7
3.1 雷达	7
3.2 航炮	7
3.3 导弹	8
4 航电系统对比	10
5 作战能力指数对比	11
5.1 作战能力指数计算方法	11
5.2 作战能力指数对比	11
6 作战效能对比	15
6.1 效能评估方法	15
6.2 作战效能对比	18
7 费用和性价比对比	24
8 综合评价	26
参考文献	27

表索引

表 2-1 竞争机型的基本参数.....	1
表 2-2 作战半径与航程.....	5
表 2-3 雷达性能参数.....	7
表 2-4 航炮参数.....	8
表 2-5 导弹参数.....	8
表 2-6 机动性参数.....	12
表 2-7 空 - 空导弹火力参数.....	12
表 2-8 雷达探测能力参数.....	12
表 2-9 典型武器配置和雷达的火力参数.....	13
表 2-10 操纵效能系数.....	13
表 2-11 生存力系数.....	14
表 2-12 航程系数.....	14
表 2-13 评估指标体系.....	16
表 2-14 机动性指标值.....	19
表 2-15 几何指标值.....	19
表 2-16 结构布局指标值.....	20
表 2-17 经济性指标值.....	20
表 2-18 单发航炮火力参数评估值.....	22
表 2-19 雷达能力参数评估值.....	22
表 2-20 武器、火控和航空电子系统效能计算的参数值.....	22

图索引

图 2-1 起飞和作战推重比.....	2
图 2-2 起飞和作战翼载.....	3
图 2-3 海平面最大爬升率.....	3
图 2-4 最大使用过载.....	3
图 2-5 稳定和瞬时盘旋角速度.....	4
图 2-6 起飞和着陆滑跑距离.....	5
图 2-7 作战能力指数.....	14
图 2-8 $\varepsilon = g(E_w)$ 曲线.....	18
图 2-9 机动性指标对效能的贡献因子 $E_{\text{机动}}$	19
图 2-10 几何指标对效能的贡献因子 $E_{\text{几何}}$	19
图 2-11 结构布局指标对效能的贡献因子 $E_{\text{结构}}$	20
图 2-12 经济性指标对效能的贡献因子 $E_{\text{经济}}$	21
图 2-13 飞行技术特性效能 E_F	21
图 2-14 武器、火控和航空电子系统综合效能 E_w	23
图 2-15 综合效能(不考虑使用技术特性效能).....	23
图 2-16 FC-1 与其它几种飞机的作战指数比、价格比及相对性价比.....	24
图 2-17 FC-1 与 F-16A、MIG-29 和 Mi rage2000 的效能、价格及性价比.....	25

1 竞争机型基本参数

FC-1 属于第 3 代轻型战斗机，目前国际上与其同代的竞争机型主要有美国的 F-16、俄国的 MIG-29、法国的 Mirage-2000 以及瑞典的 JAS39。表 2-1 给出了 FC-1、MIG-29M、F-16C、Mirage2000-5 及 JAS39 这 5 种型号飞机的基本参数。MIG-29M、F-16C、Mirage2000-5 及 JAS39 的数据主要来源为“世界飞机手册^[1]”和文献[2]。FC-1 的数据来源于多个渠道的综合，包括成飞公司提供的数据，以及公开报道的文献，如文献[3]和文献[4]。

表 2-1 竞争机型的基本参数

机型	FC-1	Mirage2000-5	JAS39	MIG-29M	F-16C
首飞时间	2003.8	1978.3	1988.12	1986.4	1976/1984
服役时间	2005	1984	1997	-	1986
乘员数	1	1	1	1	1
发动机	RD-93A	M-53-P20	RM-12J85-GE-2 1A	RD-33K	PW F100-229
加力推力 (KN)	1×83	1×98	1×80	2×86	1×129
军用推力 (KN)	1×52	1×67	1×53	2×50	1×79
机翼面积 (m ²)	24.4	41	28	38	27.9
翼展 (m)	9.0	9.13	8.4	11.36	9.45
机高 (m)	5.1	5.20	4.5	4.73	5.09
机长 (m)	14.5	14.36	14.1	17.37	15.03
雷达反射面积 (m ²)	5.9	5.8	4.8	9.2	4.9
前视角 (°)	14	13	-	15.5	15
操纵系统	机械+电传	电传	电传	电传	电传
起飞重量 (kg)	9100	13000	9700	15800	15300
空重 (kg)	6800	7500	6660	11050	8700
机内油 (kg)	2327	3160	2268	4600	3100
副油箱 (kg)	2×1000+1000	2×1700+1300	3×1135	2×1150+1500	2×1400+1135
最大重量 (kg)	12700	17000	12500	19700	19180
外挂重量 (kg)	3800	6300	2000	4500	5443
载油系数	0.256	0.24	0.23	0.29	0.20
最大过载 (g)	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0
最大表速 (km/h)	1300	1380	1380	1400	1380
最大马赫数	1.6	2.2	2.0	2.3	1.95
最大速度 (km/h)	1750	2400	2100	2450	2000
升限 (m)	16500	18500	17000	18000	18000
单位重量剩余功率 (m/s)	250	225	250	320	300
机内油航程 (km) (高度为 12km)	1800	1650	1700	2000	1700
雷达	KOPYO 或 GRIFO S7	RDY	PS-05/A	NO-193	APG-68
挂架数量	7	12	7	9	11
空空导弹	AIM-9P, SD-10	MICA,M-550II	“空中闪光”, AIM-9P	AA-8, AA-12	AIM-9M,AIM-120
航炮	23mm 机炮 180 发	2×DAFA554 2×125 发	毛瑟-27	Gsh301 100 发	M-61 514 发
显示器	1 平显+3 下显	平显+下显	平显+下显	1 平显+2 下显	平显+下显
价格 (万美元)	1600	4500	2500	2500	3000

基于上述基本参数，我们对这 5 种飞机的飞行性能、雷达与武器系统、航空电子设备、费用、作战效能等进行对比分析，明确 FC-1 的优势与不足。

2 飞行性能对比

2.1 飞行速度

从表 2-1 可以看出，Mig-29M 最大飞行马赫数最大，达到 2.3，其次是 Mirage2000-5，为 2.2，F-16C 为 2.0，JAS39 为 1.95，分别排在第 3 和第 4 位。FC-1 最低，只有 1.6 马赫，与其它 4 个机型有较大差距。FC-1 强调的是中低空格斗性能，其翼型主要是为满足中低空亚跨音速机动性而设计的，但是高空高速性能较差是 FC-1 的一个很大的缺陷。

2.2 升限

根据表 2-1，Mirage2000-5 的升限最高，为 18500m。其次为 MIG-29M 和 F-16C，均为 18000m，排在第 3 位的是 JAS39，为 17000m。FC-1 的升限最低，为 16500 米。

2.3 机动性

影响战斗机机动性的因素很复杂，一般可根据以下几个指标分析战斗机的机动性：推重比、翼载荷、盘旋角速度、爬升率、最大使用过载等。其中翼载越小表明机动性越高，其它指标越大，机动性越好。图 2-1~图 2-5 给出了这 5 个机型的机动性指标。

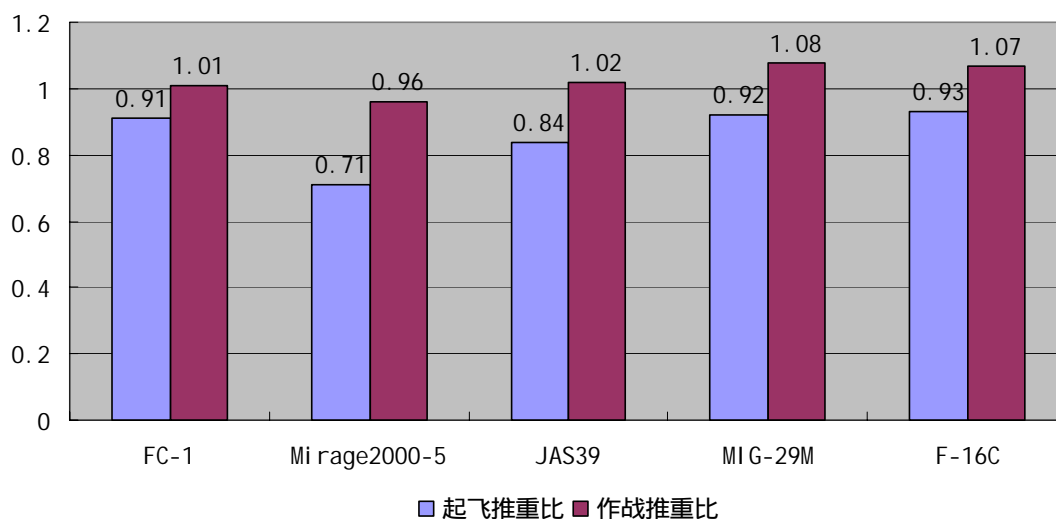


图 2-1 起飞和作战推重比

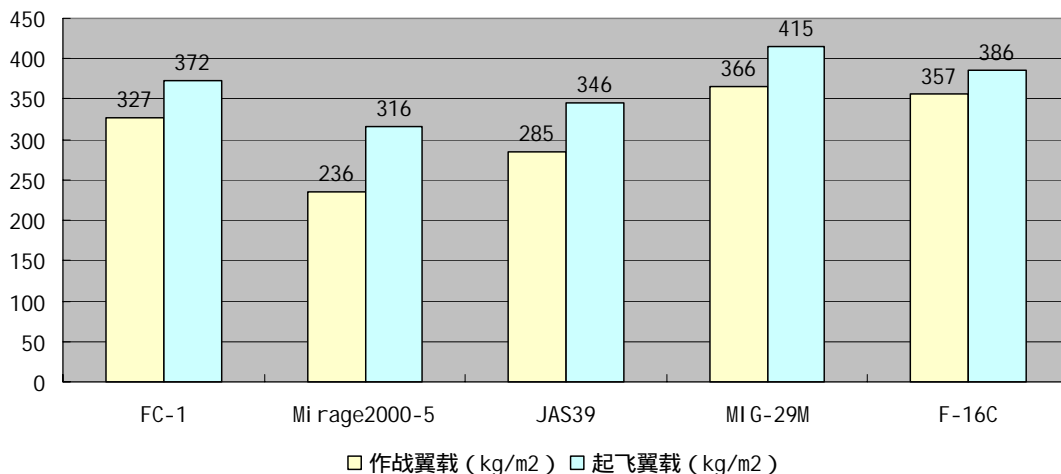


图 2-2 起飞和作战翼载

海平面最大爬升率 (m/s)

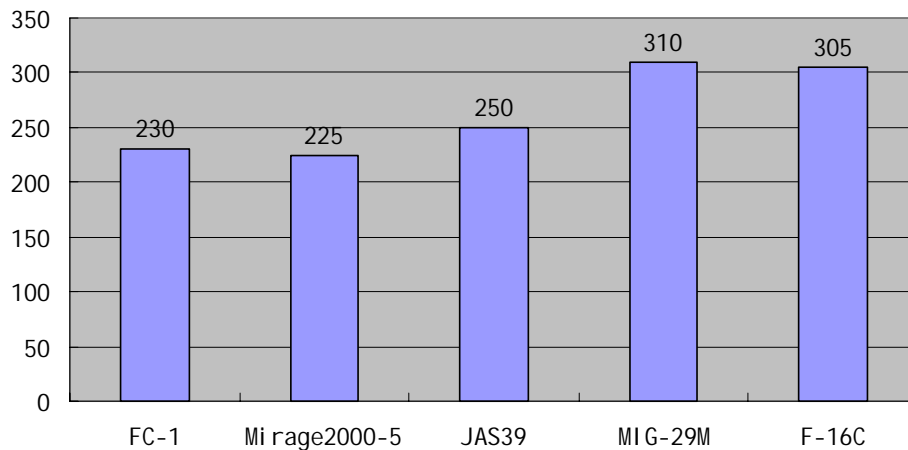


图 2-3 海平面最大爬升率

最大使用过载 (g)

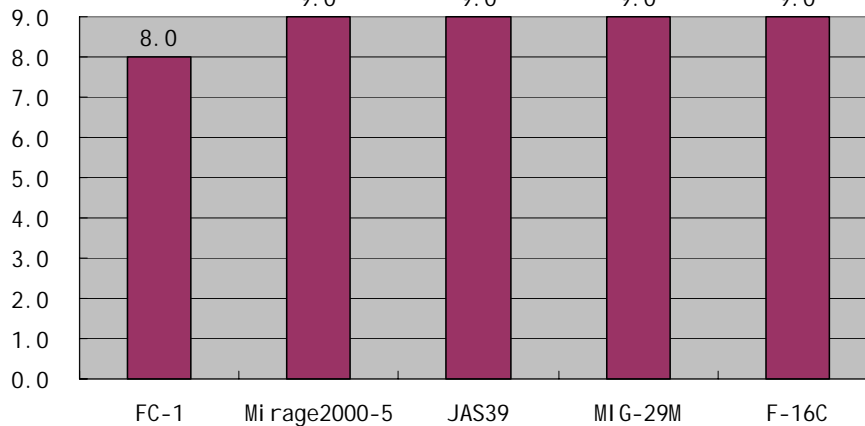


图 2-4 最大使用过载

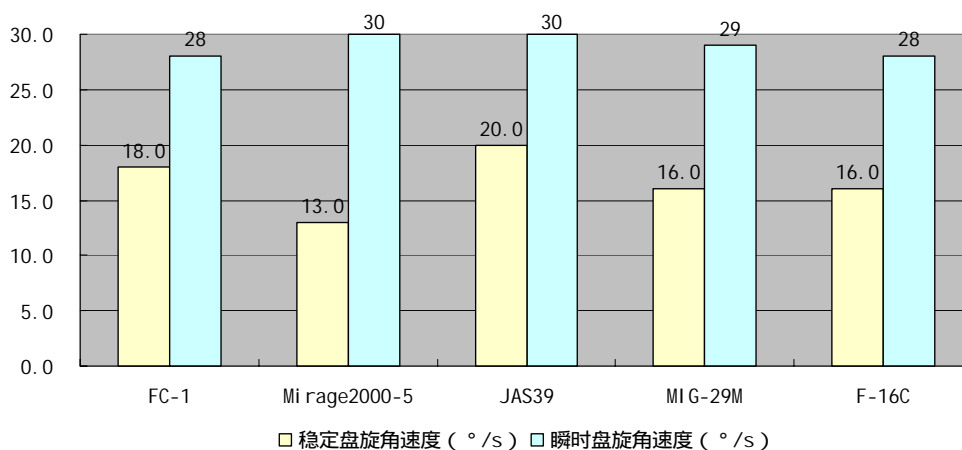


图 2-5 稳定和瞬时盘旋角速度

从最大过载来看，FC-1 最低，只有 8g。其它 4 种战斗机的最大过载都是 9g，这也是现代战斗机的设计标准之一。FC-1 的最大过载限制在 8g，一个原因是由于该机的制造主要是采用传统材料和技术；另一个是 FC-1 为了控制成本，只是在纵向控制上采用三余度数字电传，横向仍然采用机械控制，从而使飞机的最大过载受到限制。

在起飞推重比上，F-16C 最大，为 0.93，Mirage2000-5 最低，只有 0.71。FC-1 居中，为 0.91，稍低于 Mig-29M (0.92)，高于 JAS39 (0.84)。

在作战推重比上，Mig-29M 最大 (1.08)，其次是 F-16C (1.07)。FC-1 排在第 4 位，为 1.01，略低于 JAS-39 (1.02)，比 Mirage2000-5 高。

FC-1 的起飞翼载和作战翼载在 5 种飞机中居中。

FC-1 的稳定盘旋角速度只低于 JAS39，比其它三个机型都高，尤其与 Mirage2000-5 相比具有明显优势。

FC-1 的瞬时盘旋角速度与 F-16C 相同，比其它三个机型略低。

FC-1 的海平面最大爬升率仅比 Mirage2000-5 略高，但比其它三个机型低，与 MIG-29M 相比有明显差距。

总的来看，FC-1 的机动性与 Mirage2000-5 和 JAS39 相当，而与 F-16C 和 MIG-29M 有一定差距。

2.4 起降性能

图 2-6 给出了 5 种机型的起飞和着陆滑跑距离。

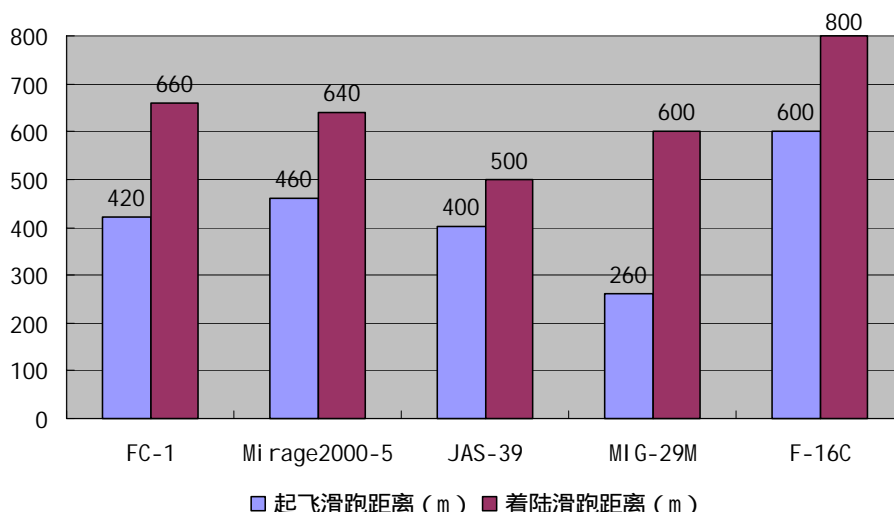


图 2-6 起飞和着陆滑跑距离

起飞滑跑距离，MIG-29M 最短，F-16C 最长，FC-1 居中。

着陆滑跑距离，JAS39 最短，FC-1 居第 4，仅比 F-16C 优。

总体来看，FC-1 的起降性能与 Mirage2000-5 相当，优于 F-16C，但劣于 JAS39 和 MIG-29M。

2.5 作战半径与航程

表 2-2 列出了五个机型不同构型下的作战半径和航程。

表 2-2 作战半径与航程

	作战半径 (km)		航程 (km)	
	配置	半径	配置	航程
FC-1	3 个副油箱+2 枚近距导弹+2 枚中距导弹+高-高-高飞行剖面	1350	机内油航程	1800
	2 吨炸弹+1 个副油箱+低-低-低飞行剖面	530	机内满油+最大外挂副油箱	3300
Mirage2000-5	2 枚近距导弹+4 枚中距导弹+最大外挂油箱+高-高-高飞行剖面	1600	机内油航程	1650
	1 吨炸弹+2 个副油箱+2 枚近距导弹+低-低-低飞行剖面	400	机内满油+最大外挂副油箱	3500
JAS39	执行截击任务配置	1100	机内油航程	1700
	执行对地攻击任务配置	400	机内满油+最大外挂副油箱	3200
MIG-29M	1 个副油箱+2 枚近距导弹+2 枚中距导弹+高-高-高飞行剖面	574	机内油航程	2000
	2 颗炸弹+1 个副油箱+2 枚导弹+低-低-低飞行剖面	555	机内满油+最大外挂副油箱	3200
F-16C	3 个副油箱+2 枚近距导弹+2 枚中距导弹+高-高-高飞行剖面	1400	机内油航程	1700
	2 吨炸弹+3 个副油箱+2 枚近距导弹+低-低-低飞行剖面	680	机内满油+最大外挂副油箱	3600

从表 2-2 可以看出,执行高空截击任务的作战半径,Mirage2000-5 最大,MIG-29M 最小,FC-1 居中。而执行对地攻击任务的作战半径,F-16C 最大,Mirage2000-5 和 JAS39 最小,FC-1 居中,略低于 MIG-29M。

在机内油航程上,MIG-29M 最大,FC-1 次之,比 JAS39,F-16C 和 Mirage2000-5 大。而在机内满油加最大外挂副油箱航程上,F-16C 最大,MIG-29M 最低,FC-1 居中。

3 雷达与武器系统对比

3.1 雷达

目前 FC-1 的机载雷达还没有完全确定下来,从多方面情况分析,FC-1 国内使用型采用俄制 KOPYO 雷达的可能性较大,而出口巴基斯坦的 FC-1 装备意大利 FIAR 公司生产的 Grifo S7 型雷达的可能性较大。

KOPYO 雷达是俄罗斯法特佐龙公司研制的一种轻型多用途脉冲多普勒体制雷达,具有对空、对地功能,有高、中、低三种脉冲重复频率,对空有 9 种工作模式,对地有 11 种工作模式,具有边跟踪边扫描能力。对 5 平方米空中目标迎头探测距离为 80 公里,尾后探测距离为 48 公里,可同时跟踪 10 个空中目标,并引导中距导弹攻击其中的两个目标。在对地模式下,具有用实际波束、多普勒锐化及合成孔径进行地形测绘的能力。最具特点的是其还具有跟踪地面移动目标的能力。其对海的最大探测距离达 150 公里。

Grifo-S7 型雷达采用脉冲多普勒体制,同样具有对空、对地两种工作模式(对空 12 种、对地 13 种),具有高、中、低三种不同脉冲重复频率,具有上下视及制导主动、半主动中空空导弹的那里。该型雷达具有边扫描边跟踪能力,对 5 平方米空中目标迎头探测距离为 120 公里,下视距离为 50-60 公里,可同时跟踪 8 个目标,打击其中的 2 个。Grifo S7 型雷达的对地攻击能力也很强,对大型舰艇的探测距离达 200 公里,可在 100 公里上发现地面大型厂房或大型桥梁。

5 种飞机所配备的雷达性能见表 2-3, FC-1 飞机假定装备 Grifo-S7 型雷达。

表 2-3 雷达性能参数

型号	使用飞机	发现距离 (km)	跟踪距离 (km)	下视距离 (km)	同时跟踪目标 数(m_1)	同时攻击 目标数 (m_2)
AN/APG-68	F-16C	90	-	65	10	1
PS-05/A	JAS-39	120	-	-	10	3
NO-193	Mig-29M	100	70	-	8	1
GRIFO S7	FC-1	120	-	50-60	8	2
RDY	Mirage2000-5	90	55	-	8	4

在雷达发现距离上,FC-1 装备的 GRIFO S7 雷达与 JAS39 装备的 PS-05/A 雷达最远,为 120km。由于雷达跟踪数据不全,难以对该项性能进行比较。GRIFO S7 雷达同时跟踪的目标数与其它雷达相差不大,同时攻击的目标数为 2 个,在 5 种雷达中居中。

总体来看,FC-1 的雷达性能不亚于其它四种飞机的雷达性能,在雷达探测距离上具有优势,而且该雷达的对地攻击性能比其它四者要强一些。

3.2 航炮

5 种飞机配备的航炮参数见表 2-4。

表 2-4 航炮参数

机型	航炮型号	射速(<i>rpm</i>)	初速(<i>m/s</i>)	弹头重量(<i>g</i>)	口径(<i>mm</i>)
F-16C	M-61A1	6000	1036	102	20
JAS39	“毛瑟”BK27	-	-	-	27
Mig-29M	рш-301	1500	870	410	30
FC-1	рш-23	3400	715	199	23
Mirage2000-5	DEFA 554	1800	800	263	30

注：FC-1 的航炮目前没有公开资料，暂用 рш-23 计算。

F16-C 采用的是美国战斗机的标准 6 管航炮 M-61A1，射速相当高，达到 6000rpm，但是其口径只有 20mm；JAS-39 采用的航炮为“毛瑟”BK27，该航炮的技术数据不祥。Mig-29M 采用的是 рш-301，口径为 30mm；FC-1 的航炮目前没有公开资料，暂用 рш-23 代替。FC-1 的航炮口径、初速和弹头重量偏低，但在射速上较高，总的来看，FC-1 的航炮性能在 5 个机型中处于劣势。

需要指出的是，现代战斗机由于大量使用空-空导弹，在效能评估中，航炮的优劣相对于导弹和火控系统的性能来说微不足道。

3.3 导弹

表 2-5 导弹参数

型号	射程 (km)	射高 (km)	杀伤概率	总攻击角度	最大机动过载	跟踪角速度	总离轴发射角	马赫数	制导	
									制导方式	$K_{制}$
AIM-9L	7	6	0.78	320	26	20	±28	2.5	红外(碲化镉光敏原件)	0.5
AIM-120	60	16	0.75	360	35	30	±35	5	半主动脉冲多普勒雷达加主动雷达	1.2
AA-8 (P-60)	15	4	0.70	180	25	10	±20	2.5	红外	0.5
AA-12	80	14	0.75	360	35	30	±35	4	半主动雷达	0.8
Sky-Flash	26	12	0.75	320	21	20	±15	4	连续波雷达单脉冲体制	1.0
M550	12	6	0.75	320	35	30	±30	3	红外	0.5
超 530D	30	14	0.78	320	30	20	±30	4	连续波或半主动脉冲多普勒雷达	0.8

F-16C 的典型配置为 2× AIM-9L+2× AIM-120；JAS39 的典型配置为 2× AIM-9L+2× Sky Flash；Mig-9M 的典型配置为 4× AA-8+2× AA-12；FC-1 的典型配置为 2× AA-8+2× AA-12（由于保密原因，国产导弹的数据不祥，暂用性能相当的俄式导弹代替）；Mirage2000-5 的典型配置 2× M550 +2× 超 530D。这几种导弹的具体性能数据如表 2-5 所示。

AIM-9L 和 AA-8 均为红外制导近距离格斗导弹，AA-8 的射程超过 AIM-9L 的 2 倍，但是

其总攻击角度只有 180 度，而 AIM-9L 为 320 度，而且跟踪角速度也只有 AIM-9L 的一半。M550 也是红外制导近距格斗导弹，35g 的最大机动过载， ± 30 的总离轴发射角，以及 3 马赫的最大速度，使得其性能整体上优于 AIM-9L 和 AA-8。因此，从近距导弹性能来看，FC-1 与 F-16C、MIG-29M 以及 JAS39 相当，但劣于 Mirage2000-5。

AIM-120、AA-12 和 Sky Flash 均为雷达制导中距空空导弹，从性能数据上看 AA-12 和 AIM-120 属于同一较高水平，A-12 速度要比 AIM-120 低，但是具有更大的射程；Sky Flash 和超 530D 属于同一较低水平，相比而言 Sky Flash 的性能最差。有资料显示 JAS39 正在研制挂载 AIM-120。Mig-29M 挂载了 AA-12 中距空空导弹之后，具有很强的空战火力，FC-1 如果也挂载该型号导弹，其火力也可以与 F-16C 处于同等水平，而且会明显优于 JAS39 和 Mirage2000-5。

4 航电系统对比

JAS39 由于研制年代较新，其机载设备很先进，主要包括博福斯航空电子公司的 AMR345 甚高频/特高频 - 调幅/调频通信电台，霍尼韦尔公司的激光惯性导航系统；先进的 EP17 座舱电子显示系统；红外前视外挂吊舱置于机翼前缘前方发动机右侧进气道下方，飞机内、外还配备先进的电子对抗设备。

Mig-29M 的主要机载设备包括：头盔瞄准具、激光测距器、红外搜索与跟踪系统、惯性导航系统、平面显示器（现代战机的标准座舱配置）。在每侧边条前端的介电质整流罩内装有 2 个 SO-69 电子对抗天线。

F-16C 的主要机载设备包括：AN/APN-132 雷达高度表，AN/ARN-108 仪表着陆系统，AN/ARN-118 塔康，AN/APX-101 敌我识别器，AN/ALR-56M 雷达告警接收机，AN/ALQ-131 电子干扰吊舱，AN/ARC-164 甚高频电台，KY-58 保密话音通信系统，利顿公司的 LN-39 惯性导航系统，GEC 公司的广角平显，GPS 系统，霍尼韦尔公司的多功能显示器。

Mirage2000-5 的机载设备包括：座舱内装有平视显示和下视显示器，先进的数字式火控和导航系统(WDNS)，机上装有通信设备、惯性导航设备和无线电导航设备等，属 80 年代水平，还汤姆森 CSF 公司的红外成像吊舱，以及装备汤姆森 CSF 公司的 ICMS MK2 自动综合电子对抗系统具有很强的电子对抗能力。

FC-1 飞机座舱采用“一平三下”布局，这主要由不同用户的需要决定。多功能彩色显示器可显示导航、通信、电子战、飞机飞行数据、武器外挂管理、雷达告警等信息，可很大程度提高飞行员在战场上的信息获取能力，并可减轻飞行员的负担。FC-1 还使用了 HOTAS 技术（双手不离杆操纵），可大幅度提高飞行员的反应速度，并可装备头盔瞄准具，这对近距离空战的胜负有至关重要的作用。除此之外，机上还装有先进的任务计算机、大气数据计算机、外挂管理系统、敌我识别器、全向雷达告警系统、惯导加 GPS 综合导航系统、电子战系统及数据链等。根据作战任务的不同，FC-1 还可外挂各种前视红外瞄准吊舱、激光指示吊舱、电子战吊舱及侦察吊舱等。FC-1 航空电子产品的选择对象包括法国、英国和意大利公司的产品。

总的来看，FC-1 航空电子设备上与 F-16C 和 JAS39 应当处在同一水平，比 Mig-29M 及 Mirage2000-5 要好一些。FC-1 与其它 4 种飞机最大的差距在飞机的电传操纵系统上，这对飞机的机动性有一定影响，使得 FC-1 的最大使用过载只有 8g。

5 作战能力指数对比

5.1 作战能力指数计算方法

目前国内广泛采用的战斗机空-空作战能力指数的计算采用如下的对数法，该方法是美国人在 20 世纪 70 年代提出的，该方法的详细介绍文献[5]。

$$C = [\ln B + \ln(A_1 + 1) + \ln A_2] \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \quad (1)$$

(1) B 为机动性参数， $B = (n_{y\max} + n_y + SEP \times 9/300)$ 。 $n_{y\max}$ 为最大允许过载， n_y 为最大稳定盘旋过载， SEP 为最大单位剩余功率 (m/s)。

(2) A_1 为火力参数， $A_1 = A_{\text{炮}} + A_{\text{导弹}}$ ，其中

$$A_{\text{炮}} = K_{\text{瞄}} \left(\frac{rpm}{1200} \right) \left(\frac{\text{初速}}{1000} \right)^2 \left(\frac{\text{弹丸质量}}{400} \right) \left(\frac{\text{口径}}{30} \right) n$$

$K_{\text{瞄}}$ 为瞄准具修正系数， n 为航炮配置数量。

$$A_{\text{导弹}} = \text{射程} \times \text{射高} \times P_k \times \left(\frac{\text{总攻击角}}{360} \right) \times \left(\frac{\text{过载}}{35} \right) \times \left(\frac{\text{跟踪角速度}}{20} \right) \times \left(\frac{\text{总离轴发射角}}{40} \right) \times \left(\frac{\text{最大马赫数}}{5} \right) \times K_{\text{制导}} \times \sqrt{n}$$

P_k 为单发杀伤概率， $K_{\text{制导}}$ 为制导修正系数， n 为同类导弹挂载数量。

(3) A_2 为雷达探测能力参数，其计算为：

$$A_2 = \left(\frac{\text{发现距离}^2}{4} \right) \times \left(\frac{\text{总搜索方位角}}{360} \right) \times \text{发现概率} \times K \times (m_1 \times m_2)^{0.05}$$

K 为雷达体制衡量系数， m_1 为同时跟踪目标数量， m_2 为同时允许攻击目标数量。

(4) ε_1 为操纵效能系数。

(5) ε_2 为生存力系数， $\varepsilon_2 = \left(\frac{10}{\text{翼展}} \times \frac{15}{\text{全长}} \times \frac{5}{RCS} \right)^{0.0625}$ 。

(6) ε_3 为航程系数， $\varepsilon_3 = (\text{机内燃油最大航程}/1400)^{0.25}$ 。

(7) ε_4 为电子对抗能力系数。

5.2 作战能力指数对比

(1) 机动性参数

5 个机型机动性参数的计算见表 2-6。

表 2-6 机动性参数

型号	F-16C	JAS-39	Mig-29M	FC-1	Mirage2000-5
$n_{y\max}$	9	9	9	8	9
n_y (5km 高度)	6.2	6.2	6.6	6.0	6.2
SEP	300	250	320	250	225
B	24.2	22.7	25.2	21.5	21.95
$\ln B$	3.186	3.122	3.227	3.068	3.089

(2) 火力参数

对于第 3 代战斗机而言,由于普遍挂载了中距空-空导弹,其航炮的火力参数远远小于导弹的火力参数,对于效能评估来说,航炮的火力参数可以忽略。5 个机型所装备的不同空-空导弹单发的火力参数的计算结果见表 2-7。

表 2-7 空-空导弹火力参数

型号	AIM-9L	AIM-120	AA-8(P-60)	AA-12	Sky-Flash	M550	超 530D
单发 $A_{\text{导弹}}$	3.79	1134	0.94	705.6	94	16.2	119.8

雷达探测能力参数的计算见表 2-8。

表 2-8 雷达探测能力参数

型号	使用飞机	发现距离 (km)	发 现 概 率	总搜 索方 位角 ($^{\circ}$)	同时跟 踪目标 数(m_1)	同时攻击 目标数 (m_2)	K	A_2
AN/APG-68	F-16C	90	0.85	120	10	1	1.0	643.8
PS-05/A	JAS-39	120	0.90	120	10	3	1.0	1280.2
NO-193	Mig-29M	100	0.85	120	8	1	1.0	785.9
GRIFO S7	FC-1	120	0.85	120	8	2	1.0	1171.6
RDY	Mirage2000-5	90	0.90	120	8	4	1.0	722.4

相应于这 5 种战斗机的典型挂载配置及雷达,(1)式中的一些参数的计算结果列于表 2-9。

表 2-9 典型武器配置和雷达的火力参数

型号	典型武器配置	A_1	$\ln(A_1 + 1)$	A_2	$\ln(A_2)$
F-16C	1 × M61-A1 2 × AIM-9L 2 × AIM-120 AN/APG-68	1609.08	7.38	643.8	6.47
JAS-39	1 × BK27 2 × AIM-9L 2 × Sky Flash PS-05/A	138.30	4.94	1280.2	7.15
Mig-29M	1 × рпц-301 4 × AA-8 2 × AA-10 NO-193	999.75	6.91	785.9	6.67
FC-1	1 × рпц-23 2 × AA-8 2 × AA-10 GRIFO S7	999.20	6.91	1171.6	7.07
Mirage2000-5	2 × DEFA 554 2 × M550 2 × 超 530D RDY	192.33	5.26	722.4	6.58

注：表 2-9 未考虑航炮的火力参数

(3) 操纵效能系数

操纵效能系数的取值原则为：第二次世界大战时期战斗机 0.60；50 年代战斗机用一般仪表以及液压助力操纵系统的 0.7；有平显的喷气战斗机 0.80；用电传操纵有平显的 0.85；用电传操纵，有平显、下显、数据总线以及双杆技术（HOTAS）的 0.90。在此基础上更能发挥飞行员能力的设计从 0.90~1.0 之间取值。如配备同步头盔瞄准具时， ε_1 增加 0.05。

Mig-29M 配备有头盔瞄准具。

5 种战斗机的操纵效能系数取值见表 2-10。

表 2-10 操纵效能系数

型号	F-16C	JAS-39	Mig-29M	FC-1	Mirage2000-5
ε_1	0.90	0.90	0.95	0.85	0.90

(4) 生存力系数

生存力系数的计算结果见表 2-11。

表 2-11 生存力系数

型号	翼展	全长	RCS	ϵ_2
F-16C	9.45	15.03	4.9	1.005
JAS-39	8.40	14.10	4.8	1.017
Mig-29M	11.36	17.37	9.2	0.946
FC-1	9.00	14.50	5.9	0.998
Mirage2000-5	9.13	14.36	5.8	0.999

(5) 航程系数

航程系数计算结果见表 2-12。

表 2-12 航程系数

型号	F-16C	JAS-39	Mig-29M	FC-1	Mirage2000-5
ϵ_3	1.050	1.050	1.093	1.065	1.042

(6) 作战能力指数

最终各型号作战能力指数的评估值列于图 2-7。

作战能力指数

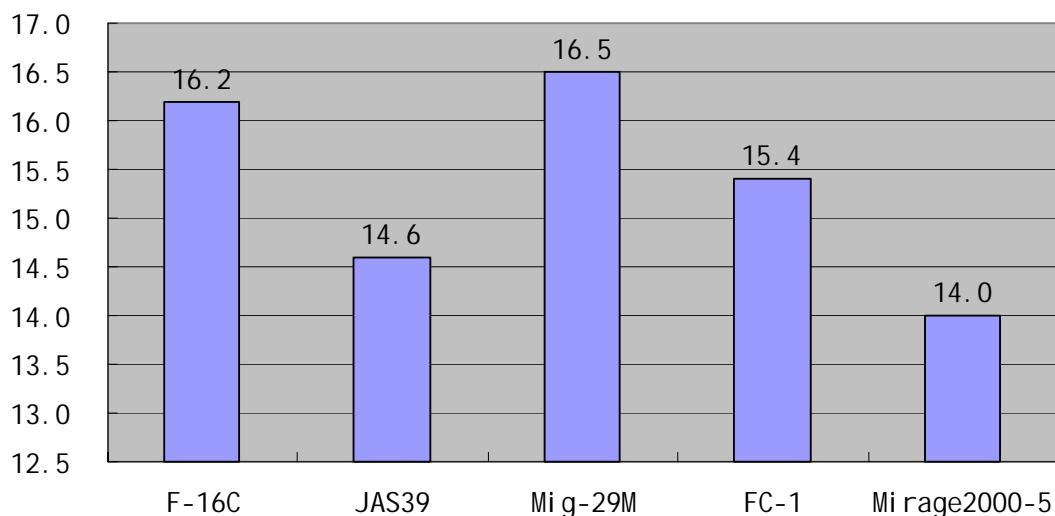


图 2-7 作战能力指数

从图 2-7 看出，作战能力指数最高的是 Mig-29M，为 16.5，其次是 F-16C，为 16.2。FC-1 的作战能力指数在 5 个型号中居中，为 15.4，高于 JAS39（14.6）和 Mirage2000-5（14.0）。FC-1 的作战能力指数相当于 MIG-29 作战能力指数的 93%，F-16C 作战能力指数的 95%，JAS39 作战能力指数的 105%，Mirage200-5 作战能力指数的 110%。

进一步分析可以看出，FC-1 在机动性、操纵效能和生存能力上跟其它四种战斗机相比处于劣势，在火力参数、雷达性能以及航程系数上有一定优势。

6 作战效能对比

本节采用一种不同的方法,对几种竞争机型的作战效能进行评估、对比,以便与作战能力的评估结果相互补充,更准确地分析 FC-1 飞机的优劣。

6.1 效能评估方法

飞机是一个非常复杂的武器系统,就飞机本身而言,其效能既与飞机的设计、构造特性有关,又与使用技术特性有关,因此飞机的效能评估准则应该包括两大类:飞行技术特性准则和使用技术特性准则。另外,作为一个完整的武器系统,机载武器、火控和航空电子系统的效能也是飞机整体作战效能的极其重要的组成部分。高性能的飞机对飞行员也提出了更高的要求,性能提高的同时人的可靠性会受到不同程度的影响,所以,飞行过程中人的可靠性也应该是分析飞机作战效能时必须考虑的一个因素。此外,在实际作战过程中,作战环境和使用的战术技术对飞机效能的影响也很重要。考虑到以上因素,将战斗机视为一个完整的武器系统,其综合效能可以定义为:

$$E = f(E_F, E_U, E_W, R, T)$$

其中, E 为飞机的综合效能; E_F 为按飞行技术特性准则评估的效能; E_U 为按使用技术特性准则评估的效能; E_W 为武器、火控和航空电子系统的效能; R 为飞行员的可靠性; T 为战术环境和使用的战术技术。

(1) E_F 模型

飞行技术特性准则考虑飞机的几何、重量、经济性能,以及翼载荷、推重比等主要参数来制定。根据飞行技术特性准则评估飞机的作战效能,相应的评估指标体系包括机动性指标、几何指标、结构布局指标、经济性指标共 4 类 16 个指标,见表 2-13。这一评估指标体系由俄苏霍伊设计局提出^[6]。

机动性指标涉及飞机几何、重量及动力特性,最常用的是推重比和翼载。其中,起飞推重比、作战推重比越大表明飞机的设计越完善,而起飞翼载、作战翼载以及空机翼载这三项指标一般情况下越小表明飞机的设计越完善。根据统计,起飞推重比,3 代战斗机为 0.8-1.1。作战推重比,3 代战斗机则为 0.9-1.3;起飞翼载,3 代战斗机为 $220-250 \text{ kg/m}^2$;按平面投影面积计算的作战翼载,3 代战斗机则为 $180-220 \text{ kg/m}^2$;空机翼载,3 代战斗机为 $130-180 \text{ kg/m}^2$ 。

几何指标反映飞机内、外部布置的完善程度。其中,机身最大横截面相对面积指标值越小越好,发动机最大截面相对面积和飞机油箱相对容积两个指标值越大越好。机身最大横截面相对面积,3 代战斗机处于 3.88%-5.4%范围内;发动机最大截面相对面积,3 代战斗机在 0.4 左右;飞机油箱相对容积,3 代战斗机大部分处在 16%-21%范围内。

结构布局指标表征结构受力系统的合理性和结构布局设计水平。除机体构造重量控制完善性系数这项指标值是越小越好外,其它的指标值都是越大越好。结构布局密度系数,3 代战斗机大部分为 $420-435 \text{ kg/m}^3$ 。3 代战斗机的相对内部装油量处在 35%-56%较大范围内,

机体构造重量控制完善性系数，3代战斗机为 20-23 kg/m²。有效载荷空机重量比，3代战斗机大部分在 2.1-2.5 之间。

经济性指标反映飞机的经济特性。低空飞行相对公里耗油率和高空飞行相对公里耗油率这两项指标都是越小越好。低空飞行相对公里耗油率，3代战斗机为 0.020- 0.022；高空飞行相对公里耗油率，3代战斗机为 0.10-0.15 kg/km/t。

表 2-13 评估指标体系

指标类型	指标	含义
机动性指标	$\bar{T}_T = T_i / W_T$	起飞推重比=加力状态试验台上最大推力/起飞重量
	$\bar{T}_F = T_i / W_F$	作战推重比=加力状态试验台上最大推力/作战重量
	$\bar{T}_S = T_i / S_s$	单位浸润面积推力=加力状态试验台上最大推力/浸润面积 (kg/m ²)
	$\bar{T}_A = T_i / W_f$	单位最大横截面推力=加力状态实验台上最大推力/最大截面积 (T/m ²)
	$P_T = W_T / S_p$	按平面投影面积计算的起飞翼载=起飞重量/投影面积 (kg/m ²)
	$P_F = W_F / S_p$	按平面投影面积计算的作战翼载=作战重量/投影面积 (kg/m ²)
	$P_e = W_e / S_p$	空机翼载=空机重量/投影面积 (kg/m ²)
几何指标	$\bar{A}_{F \max} = A_{F \max} / S_p$	机身最大横截面相对面积=机身最大截面积/飞机投影面积
	$\bar{A}_{E \max} = A_{E \max} / A_{F \max}$	发动机最大截面相对面积=发动机最大截面积/机身最大截面积
	$\bar{V}_f = V_f / V$	飞机油箱相对容积=燃油容积/机体容积
结构布局指标	$C_{Lp} = W_{T \max} / V$	飞机布局密度系数=最大起飞重量/飞机容积 (kg/m ³)
	$\bar{W}_f = W_f / W_e$	相对内部装油量=内置油箱燃油重量/空机重量
	$C_{swc} = W' / S_s'$	机体构造重量控制完善性系数=不带起落架机体重量/不含喷管浸润面积 (kg/m ²)
	$\bar{W}_{pe} = W_p / W_e$	有效载荷空机重量比=有效载荷重量/空机重量
经济性指标	$\overline{SFC}_l = SFC_l / S_s$	低空飞行的相对公里耗油率=低空飞行公里耗油率/浸润面积 (kg/km/m ²)
	$\overline{SFC}_h = SFC_h / W_{average}$	高空飞行的相对公里耗油率=高空飞行公里耗油率/飞行平均重量 (kg/km/t)

机动性指标对效能的贡献因子定义为：

$$E_{\text{机动}} = \frac{1}{P_e} \left(\frac{1000\bar{T}_T}{P_T} + 1.5 \frac{1000\bar{T}_F}{P_F} \right) (0.1\bar{T}_S + 2.0\bar{T}_A) \quad (2)$$

式中 $\frac{1000\bar{T}_T}{P_T}$ 、 $\frac{1000\bar{T}_F}{P_F}$ 的含义分别为起飞机动效率系数和作战机动效率系数。起飞

机动效率系数，3代战斗机为 3.3-6.6；作战机动效率系数，3代战斗机为 4.6-7.0。几何指标对效能的贡献因子定义为：

$$E_{\text{几何}} = \frac{0.4\sqrt{\bar{V}_f \bar{A}_{E \max}}}{\bar{A}_{F \max}} \quad (3)$$

结构布局指标对效能的贡献因子定义为：

$$E_{\text{结构}} = 0.005 \frac{C_{L\rho}}{C_{\text{SWC}}} \bar{W}_{pe} \sqrt{\bar{W}_f} \quad (4)$$

经济性指标对效能的贡献因子定义为：

$$E_{\text{经济}} = \frac{0.1}{\sqrt{SFC_{\text{low}} \cdot SFC_{\text{high}}}} \quad (5)$$

最后，飞行技术特性效能综合为：

$$E_F = E_{\text{机动}} E_{\text{几何}} E_{\text{结构}} E_{\text{经济}} \quad (6)$$

(2) E_U 模型

反映飞机使用技术特性的因素主要有无故障性、维修性、耐久性、安全性和生存性。无故障性是飞机在完成飞行任务期间能连续保持能工作状态的一种特性，评估指标为平均无故障间隔时间 $MTBF$ （小时）。维修性是飞机对预报和发现故障与损坏产生的原因、并通过维护与修理保持和恢复能工作状态的适应性的一种特性，一般用战备完好系数 K_R 这一指标来度量。耐久性是飞机按规定的维护和修理体制在达到极限状态之前能保持能工作状态的一种特性，评估指标为总寿命 TL （飞行小时）。安全性是飞机在飞行期间连续的保持保证能完成飞行任务而无飞行事故的那些系统和设备处于能工作状态的一种特性，评估指标为平均事故间隔时间 $MTBA$ （小时）。生存性是飞机在杀伤手段和意外负荷的作用下以及存在累计损伤的情况下，能保持可工作状态的一种特性，用指标生存力系数来评估。对各指标先进行无量纲化处理，再用指数加权法加权，得到使用技术特性效能评估模型为：

$$E_U = P_c^{0.25} \cdot K_R^{0.5} \cdot C_L^{0.25} \cdot C_s^{0.2} \cdot S \quad (7)$$

其中 P_c 为一架飞机在执行作战任务时完成任务的概率，反映飞机的无故障性。

$P_c = \exp(-t / MTBF)$ t 为飞行小时。 K_R 为战备完好系数，反映飞机的维修性。 $C_L = \frac{TL}{8000}$

为寿命系数，反映飞机的耐久性，8000 小时为我国对新型战斗机的总飞行寿命的规定值。

$C_s = \frac{MTBA}{26300}$ 为安全性系数，26300 小时为第三代战斗机目前 $MTBA$ 的最大值。 S 为生存力

系数，与飞机的几何尺寸和雷达反射面积有关。本文取 $S = \left(\frac{13.2}{\text{展长}} \times \frac{20}{\text{机长}} \times \frac{0.3}{RCS} \right)^{0.05}$ ，雷达

反射面积 RCS 指迎头或尾后方位 120° 左右之内对应 3 cm 波长雷达的平均值。定义 F-117 飞机的生存力系数为 1，常数 13.2m，20m，0.3m² 对应 F-117 的展长、机长和 RCS 值。

(3) E_w 模型

武器、火控和航空电子系统的效能主要考虑武器系统、雷达和导航能力，在对数法基础上，针对目前武器装备的发展作了修改，评估模型为：

$$E_w = [\ln(A_{\text{炮}} + A_{\text{导弹}} + 1) + \ln A_2] P_n \quad (8)$$

对于战斗机武器系统本文只考虑航炮和空-空导弹。(8) 式中 $A_{\text{炮}}$ ， $A_{\text{导弹}}$ ， A_2 ， P_n 分别为航炮的火力系数、空-空导弹的火力系数、雷达能力系数及导航能力系数， $A_{\text{炮}}$ 、 $A_{\text{导弹}}$ 、 A_2 和 P_n

具体计算式可查阅文献[5]。

(4) E_F, E_U, E_W 的综合

不考虑 R 和 T , E_F, E_U, E_W 三项的综合效能定义为 :

$$E = E_F E_U (1 + \varepsilon) \quad (9)$$

$\varepsilon = g(E_W)$ 为武器、火控和航电系统效能对总效能的影响因子, 它具有 Logistic 函数形式。

$$\varepsilon = g(E_W) = \frac{1}{1 + 100 \times 0.659^{E_W}} \quad (10)$$

(10) 式的曲线特征见图 2-8。

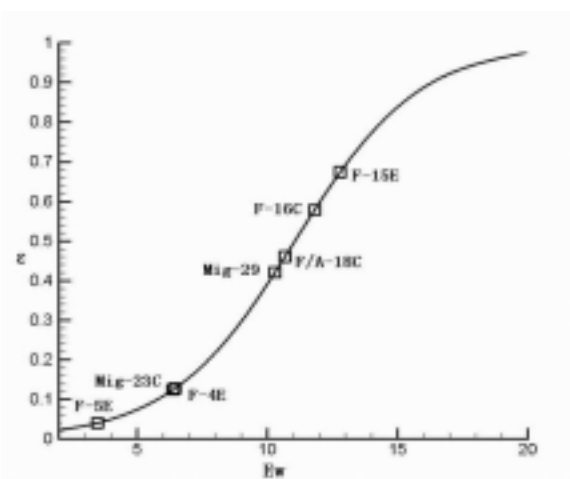


图 2-8 $\varepsilon = g(E_W)$ 曲线

6.2 作战效能对比

由于 FC-1 还未准备形成战斗力, 无法评估其使用技术特性效能, 故对比仅评估飞行技术特性效能以及武器、火控和航空电子系统效能。根据上述模型评估飞机的作战效能, 需要收集与飞机气动、结构、几何、重量、发动机有关的非常详细具体的数据。现阶段, 竞争机种中我们只拥有 F-16A、Mig-29 基本型和 Mirage2000 基本型的完整数据, 这些数据来源于苏霍伊设计局^[6]。JAS39 的数据不全, 且难以估计, 而 FC-1 的部分数据可由估计得到。

F-16C 是 F-16A 的改进型, 主要的改进在于: 机上装有 AN/APG-68 脉冲多普勒雷达、GPS 系统等; 装备了 MIL-STD-1760 武器单元接口, 拥有发射 AIM-120 导弹能力; 改用增强型 F100-PW-229 或 F110-GE-129 发动机, 性能有进一步提高。其实 F-16A 上也广泛采用了 F-16C 上的技术, 武器、火控和航空电子系统与 F-16C 相差不大。本节的作战效能评估对比, 只针对 4 个机型, 即 F-16C、Mig-29(基本型)、Mirage2000(基本型)和 FC-1。F-16C 的部分数据将采用 F-16A 的数据。

(1) 飞行技术特性效能

(a) 机动性指标

各型号机动性指标值及对效能的贡献因子见表 2-14 和图 2-9。

表 2-14 机动性指标值

机型	\bar{T}_T	\bar{T}_F	\bar{T}_S	\bar{T}_A	P_T	P_F	P_e
Mig-29	0.92	1.08	77	4.55	250	220	165
Mirage2000	0.79	0.925	67	3.52	238	201	155
F-16C	0.93	1.07	80	4.65	254	220	175
FC-1	0.91	1.01	75	4.5	360	230	180

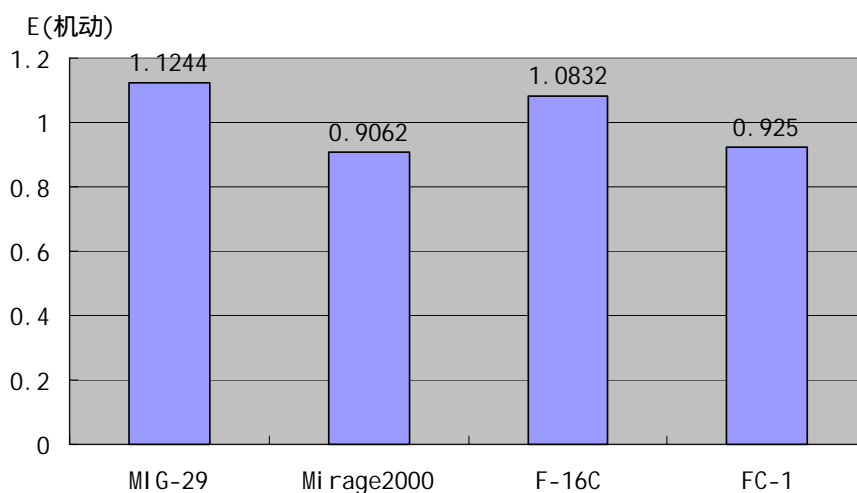


图 2-9 机动性指标对效能的贡献因子 $E_{\text{机动}}$

(b) 几何指标

各型号几何指标值及对效能的贡献因子见表 2-15 和图 2-10。

表 2-15 几何指标值

机型	$\bar{A}_{F \max}$ (%)	$\bar{A}_{E \max}$	\bar{V}_f (%)
Mig-29	5.1	0.45	18.0
Mirage 2000	5.3	0.37	18.4
F-16C	5.0	0.42	17.3
FC-1	5.0	0.40	17.0

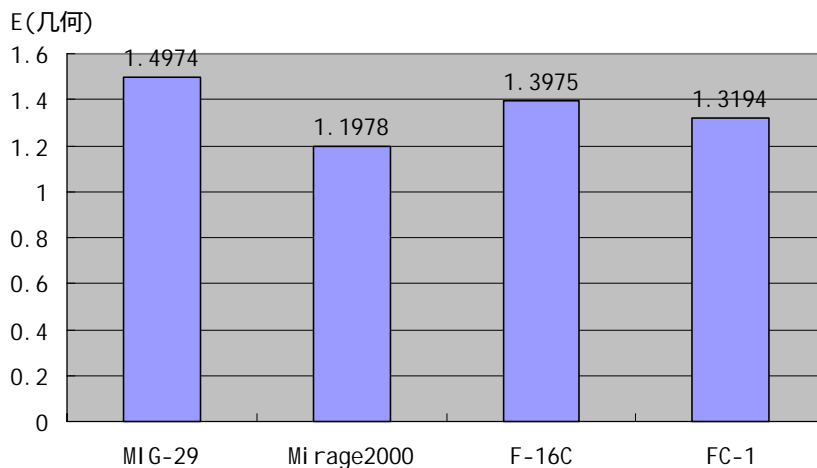


图 2-10 几何指标对效能的贡献因子 $E_{\text{几何}}$

(c) 结构布局指标

各型号结构布局指标值及对效能的贡献因子见表 2-16 和图 2-11。

表 2-16 结构布局指标值

机型	C_{Lp} (kg/m^3)	\bar{W}_f (%)	C_{SWC}	\bar{W}_{pe}
Mig-29	430	41.6	24	2.2
Mirage 2000	427	42.1	22.0	2.2
F-16C	420	35.6	20.6	2.15
FC-1	440	34.2	25	2.0

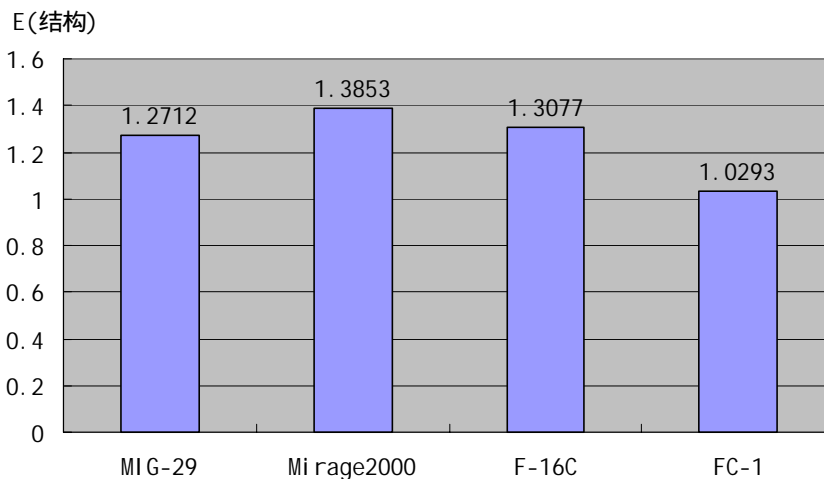


图 2-11 结构布局指标对效能的贡献因子 $E_{结构}$

(d) 经济性指标

各型号经济性标值及对效能的贡献因子见表 2-17 和图 2-12。

表 2-17 经济性指标值

机型	\overline{SFC}_{low} ($Kg/km/m^2$)	\overline{SFC}_{high} ($Kg/km/t$)
Mig-29	0.026	0.17
Mirage 2000	0.021	0.14
F-16C	0.022	0.15
FC-1	0.025	0.16

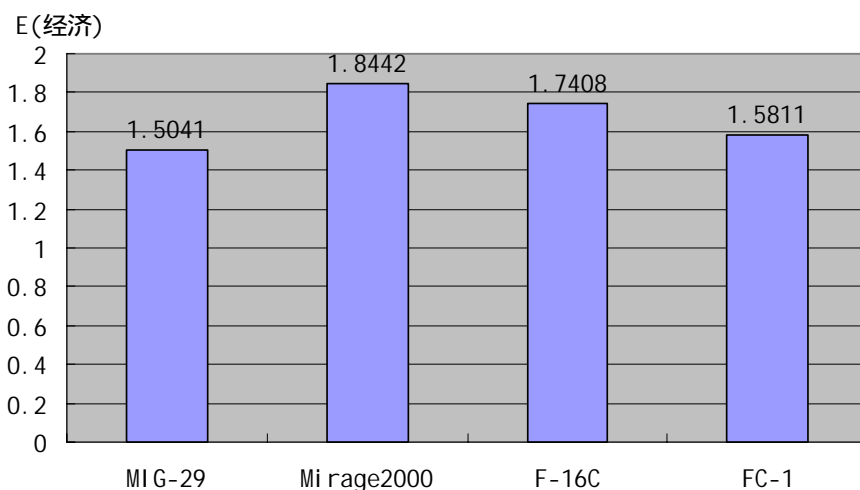


图 2-12 经济性指标对效能的贡献因子 $E_{经济}$

(e) 飞行技术特性效能综合

飞行技术特性效能值 $E_F = E_{机动} E_{几何} E_{结构} E_{经济}$ ，计算结果见图 2-13。

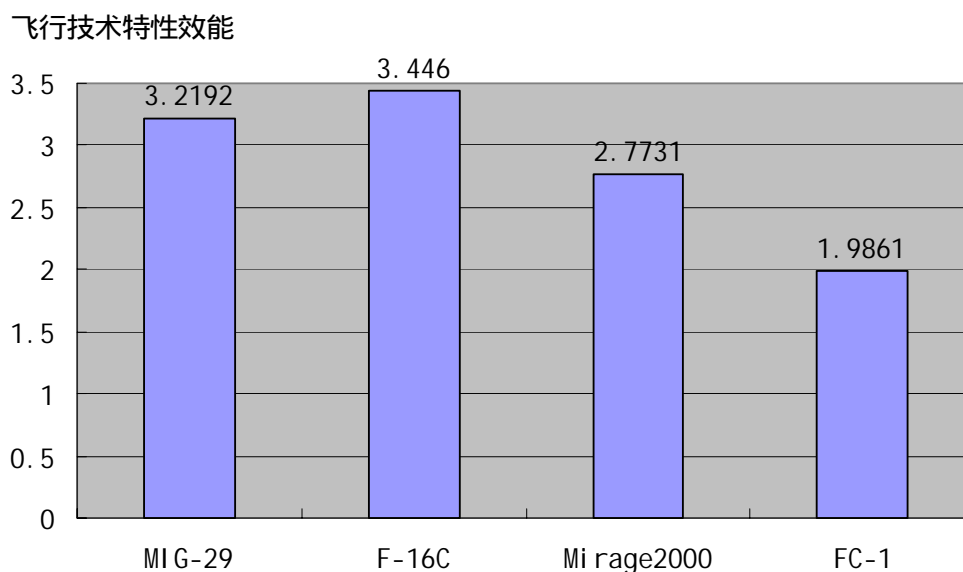


图 2-13 飞行技术特性效能 E_F

飞行技术特性效能为飞机出厂时具有的效能，又称为初始效能。一般所称的作战效能指的就是这部分效能。从计算结果可以看出，FC-1 的作战效能比其它三种同类型飞机都低，约相当于 Mig-29 的 62%，F-16C 的 58%，Mirage2000 的 72%。

(2) 武器、火控和航空电子系统效能

单发航炮火力参数 $A_{炮}$ 的评估结果见表 2-18。

表 2-18 单发航炮火力参数评估值

机型	航炮型号	射速 (rpm)	初速 (m/s)	弹头重量 (g)	口径 (mm)	$A_{炮}(K_{瞄}=1.0)$
F-16C	M-61A1	6000	1036	102	20	0.912
Mirage2000	DAFA 554	1800	800	263	30	0.631
Mig-29	ГШ-23	3400	715	199	23	0.553
FC-1	ГШ-23	3400	715	199	23	0.553

各飞机典型配置的单发空空导弹的火力系数 $A_{导弹}$ 评估结果同表 2-7。

雷达性能参数 A_2 的评估结果见表 2-19。

表 2-19 雷达能力参数评估值

型号	使用飞机	A_2	$\ln(A_2)$
AN/APG-68	F-16C	643.8	6.46
CYRANO	Mirage2000	158.8	5.07
NO-9	Mig-29	459	6.12
GRIFO S7	FC-1	1171.6	7.07

作战飞机的导航能力用导航能力系数 (P_n) 来评估, 具体取值准则为: 机上只有无线电罗盘的 0.5, 增设塔康战术导航或类似系统的 0.6, 如再增加多普勒导航系统为 0.7, 增加惯性导航系统的增加 0.1-0.15, 增加卫星导航系统 (GPS) 的增加 0.1-0.2, 最后总值不超过 1.0。

武器、火控和航空电子系统综合效能计算所需的各参数值列于表 2-20, 计算结果见图 2-14。

表 2-20 武器、火控和航空电子系统效能计算的参数值

型号	典型配置	$A_{炮} + A_{导弹}$	$\ln(A_{炮} + A_{导弹} + 1)$	A_2	$\ln(A_2)$	P_n
F-16C	1 × M61-A1 2 × AIM-9L 2 × AIM-120 AN/APG-68	2077.8	7.64	643.8	6.46	0.85
Mirage 2000	2 × DEFA 554 2 × M550 2 × 超 530D CYRANO	350.1	5.86	158.8	5.07	0.85
Mig-29	1 × 23 2 × AA-8 4 × AA-10 NO-9	1987.55	7.60	459	6.12	0.75
FC-1	1 × -23 2 × AA-8 2 × AA-10 GRIFO S7	1098.7	7.00	1171.6	7.07	0.85

武器、火控和航空电子系统效能

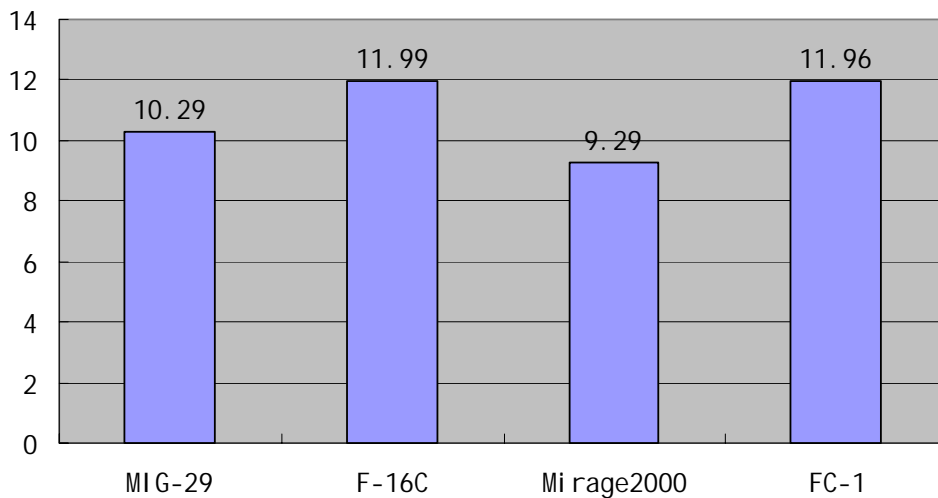


图 2-14 武器、火控和航空电子系统综合效能 E_w

从计算结果可以看出，FC-1 的武器、火控和航空电子系统效能与 F-16C 相当，高于 MIG-29 和 Mirage2000。

(3) 综合效能

不考虑使用技术特性效能，按 (9) 式计算这几种飞机的综合效能，结果见图 2-15。

综合效能（不考虑使用技术特性效能）

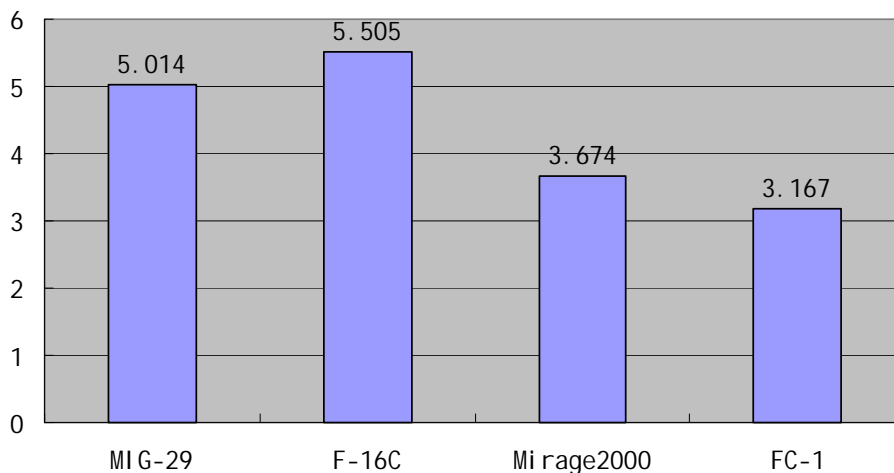


图 2-15 综合效能（不考虑使用技术特性效能）

FC-1 的综合作战效能只有 F-16C 的 58%，MIG-29 的 63%，Mirage2000 的 86%。

7 费用和性价比对比

由于 FC-1 还未服役，难以估计其全寿命周期费用。我们仅从销售价格上对几种飞机进行对比分析。

表 2-1 给出了 5 种竞争机型的单价。Mirage2000-5 的价格最高，为 4500 万美元，其次为 F-16C，为 3000 万美元。MIG-29M 和 JAS39 并列第 3，为 2500 万美元。FC-1 的单价预计为 1600 万美元，是这 5 种机型中价格最低的。

以下进一步对几种飞机的性价比进行分析。图 2-16 给出了 FC-1 与其它几种飞机的作战能力指数比、价格比及相对性价比。

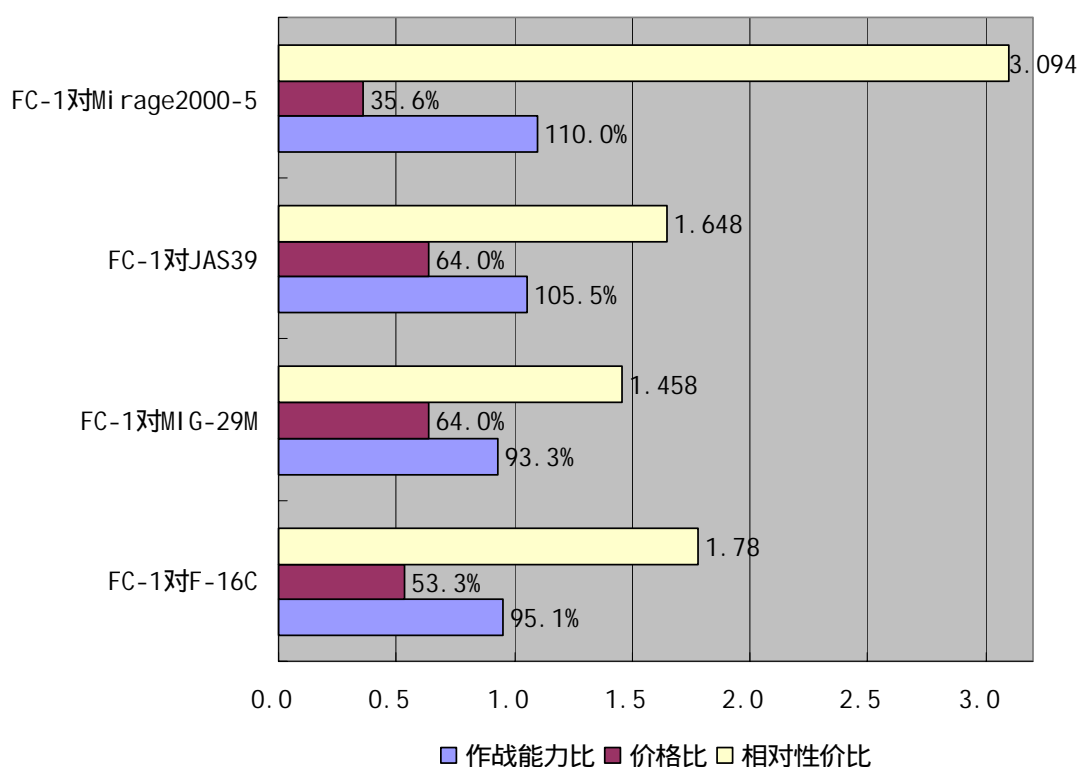


图 2-16 FC-1 与其它几种飞机的作战指数比、价格比及相对性价比

从图 2-16 可以看出，FC-1 比 F-16C 的相对性价比高 78%，比 MIG-29M 的相对性价比高 45.6%，比 JAS39 的性价比高 64.8%，比 Mirage2000-5 的性价比高 209%。因此，FC-1 与 Mirage2000-5 相比，性价比占有绝对优势，与 F-16C 和 JAS39 相比，性价比上也有很大优势，与 MIG-29M 相比，性价比上优势不显著。

F-16、Mirage2000 和 MIG-29 也有不同的型号和批次，价格相差很大。有资料表明，F-16 和 Mirage2000 的一些型号单价低到 2000 万美元左右。MIG-29 不同型号向不同国家出售的单价在 1000-2500 万美元之间。例如俄罗斯米格公司将向坦桑尼亚提供 6 架米格-29，总金额约 5000 万美元，平均每架 1000 万美元。2002~2003 年，苏丹向俄罗斯购买了 12 架米格-29 歼击机，其总价值为 1.2 亿美元。厄利特里亚购买了 6 架米格-29 战机，其价值为 6000 万美元。这些飞机的平均价格为 1000 万美元。

有一些资料显示,FC-1 的单价可能没有那么高,只有 1 亿元人民币,约合 1200 万美元。我们按这一价格再次进行对比,图 2-17 给出了 FC-1 与 F-16A, MIG-29 和 Mirage2000 的作战效能比、价格比及相对性价比。其中, F-16A 和 Mirage2000 的价格按 2000 万美元计算,而 MIG-29 的价格按 1000 万美元计算。F-16A 的作战效能采用图 2-15 中 F-16C 的作战效能代替。

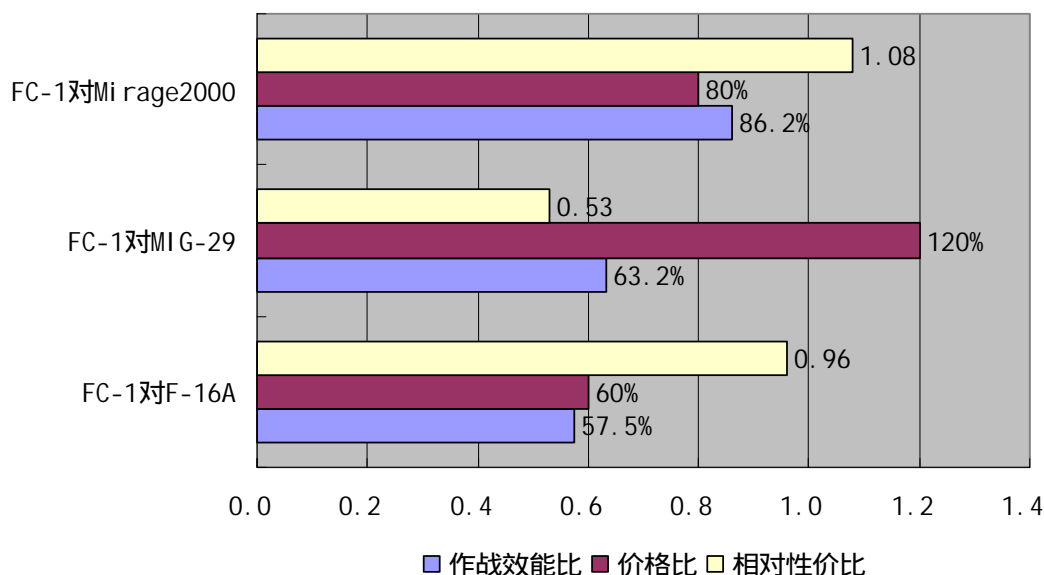


图 2-17 FC-1 与 F-16A、MIG-29 和 Mirage2000 的效能、价格及性价比

从图 2-17 看出,FC-1 依然可以维持对 Mirage2000 价格优势和微弱性价比优势;对 F-16A,虽然 FC-1 在价格上具有极大优势,但这不足以平衡在性价比上的微弱劣势;对 MIG-29,FC-1 在价格上处于劣势,导致在性价比上均处于明显劣势。

因此,我们认为,虽然 FC-1 与 JAS39、以及 F-16、MIG-29 和 Mirage2000 的改进型相比,在价格和性价比上占有优势,但与 F-16、Mirage2000 的早期型号相比,价格和性价比优势可能会丧失,与 MIG-29 的早期型号相比,甚至在价格和性价比上处于劣势。

8 综合评价

通过对 FC-1、MIG-29M、Mirage2000-5、JAS39、F-16C 五个机型的对比，可以得出如下结论：

(1) 在飞行性能上总体处于劣势，但劣势并不明显。

FC-1 的最大飞行速度和升限是 5 个机种中最低的，尤其在飞行速度上，与其它 4 个机型有较大差距。高空高速性能较差是 FC-1 的一个很大的缺陷。

FC-1 的机动性与 Mirage2000-5 和 JAS39 相当，而与 F-16C 和 MIG-29M 有一定差距。

FC-1 的起降性能与 Mirage2000-5 相当，优于 F-16C，但劣于 JAS39 和 MIG-29M。

FC-1 的作战半径和转场航程，在 5 个机型中处于中等水平。在机内油航程上，仅次于 MIG-29M，比 JAS39，F-16C 和 Mirage2000-5 大。

(2) 在雷达与武器系统上，FC-1 与其它飞机处于同一水平。

FC-1 的雷达性能不亚于其它四种飞机的雷达性能，在雷达探测距离上具有优势，而且该雷达的对地攻击性能比其它四者要强一些。

虽然 FC-1 的航炮处于劣势，但现代战斗机由于大量使用空-空导弹，航炮的劣势影响不大。

从近距导弹性能来看，FC-1 与 F-16C、MIG-29M 以及 JAS39 相当，但劣于 Mirage2000-5。从中距导弹性能看，FC-1 如果挂载俄制 AA-12 型导弹或国产 SD-10 导弹，则其火力可与 F-16C 和 MIG-29M 处于同等水平，明显优于 JAS39 和 Mirage2000-5。

(3) FC-1 的航空电子设备处于较高性能水平，与 F-16C 和 JAS39 的航空电子设备相当，优于 Mig-29M 及 Mirage2000-5。FC-1 最大的差距在飞机的电传操纵系统上，对飞机的机动性有一定影响。

(4) 按美国的评估方法，FC-1 的作战能力指数在五个型号中处于中等水平，高于 JAS39 和 Mirage2000-5，但低于 Mig-29M 和 F-16C。FC-1 的作战能力指数相当于 MIG-29 的 93%，F-16C 的 95%，JAS39 的 105%，Mirage2000-5 的 110%，与 Mig-29M 和 F-16C 的差距不明显。

(5) 按俄国的评估方法，FC-1 的综合作战效能与 F-16C、MIG-29、Mirage2000 相比处于劣势。FC-1 的综合作战效能只有 F-16C 的 58%，MIG-29 的 63%，Mirage2000 的 86%。

(6) 总体上，FC-1 的整体性能达到第 3 代战斗机的水平，接近 Mirage2000 和 JAS39，但比不上 F-16C 和 MIG-29M。

(7) FC-1 与 JAS39、以及 F-16、MIG-29 和 Mirage2000 的改进型相比，在价格和性价比上占有优势，但与 F-16、Mirage2000 的早期型号相比，价格和性价比优势可能会丧失，与 MIG-29 的早期型号相比，甚至在价格和性价比上处于劣势。

参考文献

- [1] 卢成文主编. 世界飞机手册. 航空工业出版社, 1997
- [2] 林光宇主编. 常规武器威胁下提高飞机生存力设计要求. 中国航空工业总公司科技局, 1997
- [3] 新一代轻型多用途战斗机超七/FC-1. 国际航空, 2002, 11
- [4] 银河. 搏击长空谁领风骚 FC-1 与 F-16A/BMLU、幻影 2000-5、IDF 作战性能比较. 舰载武器, 2004, 2
- [5] 朱宝鏊, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估. 航空工业出版社, 1993
- [6] 战斗机有效性评估方法. 苏霍伊设计局, 1999