

长征三号系列与阿里安系列运载火箭 技术经济比较研究

张文翰 黄祖蔚 陈持平 胡 菁

一、概 述

长征三号(CZ-3)与阿里安(Ariane)是两种性能相当,总体技术方案相似的运载火箭系列,又是当前国际发射服务市场上的竞争对手,因此,为了进行自我总结,借鉴国外的有益经验,对这两种运载火箭系列进行技术经济比较是很有必要的。

长征三号系列与阿里安系列运载火箭具有相同的设计目的,即向地球同步转移轨道发射卫星,其同步转移轨道的运载能力分别为1500-4800kg(CZ-3系列)及1800-4460kg(AR系列)。两种火箭采取相同的技术方案,即芯级加捆绑助推火箭。

阿里安火箭从1973年开始研制,1979年12月阿里安1型火箭首次试飞,1982年9月开始商业发射,1984年8月装有固体助推火箭的AR3发射。1988年6月首次试飞捆绑两枚液体助推火箭的AR44LP;1989年6月,首次发射捆绑4枚液体火箭的AR44L。从1979年12月至1994年1月,阿里安火箭系列一共进行了63次发射,其中发射失败6次,除前4发属于研制性试飞外,其余均为商业性发射。

长征三号火箭从1976年开始研制,1984年1月进行首次试验,至1994年4月共发射9次,其中2次失败。长征三号甲火箭于1986年开始研制,1994年进行2次飞行试验均获成功。

二、主要技术性能比较

阿里安火箭系列共有AR1、AR2、AR3、AR4,这4种火箭的技术状态见表1。

表1 阿里安火箭系列技术状态

	AR1	AR2	AR3	AR4
助推级	/	/	2P9.5	由P9.5/L40组合
第1级	L140	L140	L140	L220
第2级	L33	L33	L33	L33
第3级	H8	H10	H10	H10+
起飞重量(吨)	210	217	237	305-483
运载能力(公斤)GTO	1825	2175	2585	1900-4460

说明: GTO 运载能力指轨道倾角 7° 。

长征三号火箭系列包括 CZ-3、CZ-3A、CZ-3B 及 CZ-3C 4 种型号, 技术状态综合于表 2。

表 2 长征三号火箭系列技术状态

	CZ-3	CZ-3A	CZ-3B	CZ-3C
助推级	/	/	4L37	2L37
第 1 级	L142	L172	L172	L172
第 2 级	L36	L30	L49	L49
第 3 级	H8	H18	H18	H18
起飞重量(吨)	203	241	425	345
运载能力(公斤)GTO	1450	2300	4800	3500

说明: GTO 运载能力指轨道倾角 28.5° 。

1. 总体参数比较

为了对比这两种运载火箭系列的总体技术性能, 各选两种对应的型号进行比较, 并列于表 3。表 3 中的结构系数等于火箭级的干重被级的全重除。

经过比较我们得出以下的结论:

(1) 阿里安 1 型与长征三号是两个系列的初始原型, 从总体技术性能看, 阿里安 1 型火箭优于长征三号火箭。同样的起飞重量, 阿里安的运载能力与长征三号相当。阿里安 1 的氢氧级性能比长征三号第 3 级要高, 即发动机比推力高 22.6 秒, 结构轻 24%, 弥补了第 1、2 级火箭的性能劣势。此外, 阿里安的发射点位于北纬 5.2° , 因此, 同步转移轨道的倾角在 7° 左右, 这可以大量节省用于转变轨道面的推进剂量, 增加卫星的在轨寿命。

(2) 阿里安系列的第 1 级结构水平比长征三号系列差, 结构重量要重 45%。

(3) 阿里安第 1 级的发动机水平低于长征三号, 即维金 5 发动机的比推力比 YF-20 发动机低 11 秒。

上述两点反映了阿里安的设计思想及历史原因。阿里安火箭所用的维金发动机由 60 年代的一种挤压式液体火箭发展出来, 改成泵式供应以后, 燃烧式压力仍在 52-58 大气压, 再加上燃气发生器用了水作为冷却, 不可能使性能有较大提高。不改的原因主要是不愿再投研制费, 使成本大大降低。可见阿里安火箭是以成本最低作为设计准则的, 这也是商业化火箭的一条重要设计原则。

(4) 从 CZ-3B 及 AR44 两种火箭的比较看, CZ-3B 的总体性能已超过 AR44。长征三号 B 的起飞重量比阿里安 44 低 13%, 但运载能力高 8.5%。其原因有以下几点:

一是 CZ-3B 的第 1、2 级性能优于 AR44。

二是 CZ-3B 研制了新的第 3 级, 在性能上已相当于 AR44 的第 3 级。

三是从火箭的重量分配 (即各级的推进剂加注量比例) 上看, CZ-3B 要更合理, 有利于发挥氢氧级火箭的高能量优势。CZ-3B 第 3 级加注量 18 吨, 而 AR44 只有 10 吨。这可以看出阿里安火箭在当初选直径时, 第 2、3 级的直径选小了 (只有 2.6 米)。由于长度的限制, 第 2、3 级不能再加长, 因此只好在第 1 级多加注推进剂, 因为第 1 级直径是 3.8 米。但是增加第 1 级加注量对提高火箭运载能力的贡献较小, 不如加大第 3 级直径有效。反过来

看，长征三号 B 第 2、3 级的直径较大（3.35 及 3.0 米），有较大发展余地，而第 1 级由于直径偏小（3.35 米），再加长已不合算了。

表 3 长征三号与阿里安火箭系列总体参数比较

		AR1	CZ-3	AR44	CZ-3B
助推器	推进剂加注量(公斤)			40000	37600
	结构质量(公斤)			3500	2920
	结构系数			0.08	0.072
	比推力(秒)			248.6	260
第 1 级	推进剂加注量(公斤)	152000	142270	228000	172000
	结构质量(公斤)	15040	9344	23700	10800
	结构系数	0.09	0.062	0.094	0.059
	比推力(秒)	247.5	258.1	248.6	260
第 2 级	推进剂加注量(公斤)	35300	35670	35300	49000
	结构质量(公斤)	3600	3000	3600	4400
	结构系数	0.092	0.078	0.092	0.082
	比推力(秒)	291.8	290	293	296.4
第 3 级	推进剂加注量(公斤)	8150	8700	11140	18200
	结构质量(公斤)	1039	1514	1400	2510
	结构系数	0.113	0.148	0.115	0.121
	比推力(秒)	442.6	420	444	437
仪器舱重量(公斤)		257.5	427	257.5	240
起飞重量(吨)		210	203	483	425
GTO 运载能力(公斤) $i=7^\circ / i=28.5^\circ$		1825 / 1780	1501 / 1450	4460 / 4365	4870 / 4800

2. 入轨精度与可靠性

(1) 制导控制系统与入轨精度。两种火箭的制导系统均采用了平台计算机方案。在初期，长征三号的制导系统仪器重量比阿里安 1 型大。长征三号 A 更换了新的惯性平台，在制导与控制系统的重量水平上做到基本相当。

在入轨精度方面，初期飞行试验结果统计说明，阿里安 1 型火箭与长征三号的入轨偏差相当。由于阿里安火箭的发射场靠近赤道，第三级火箭只需一次工作即可把卫星送入同步转移轨道，对于提高精度有好处。阿里安 4 型火箭的入轨精度为：标准偏差，远地点高度 50 公里，近地点高度 1 公里，倾角 0.02° 。

(2) 发射可靠性比较。到 1994 年 1 月为止, 阿里安系列火箭共发射了 63 次, 发射失败 6 次。到 1994 年 11 月为止, 长征三号系列火箭共发射 11 次, 其中 9 次成功。

如果把研制阶段的试飞失败去掉, 则两类火箭的实用发射成功率分别为 $57/63$ 与 $9/11$, 即 0.905 与 0.818。

阿里安的 6 次事故中, 有两次是由第一级火箭引起的。其它 4 次失败都是因为第 3 级发动机的齿轮箱、涡轮泵、活门的故障引起的。最近的 1 次失败是 1994 年 1 月 24 日的 V63 次发射, 原因是液氧泵轴承故障。可见阿里安的氢氧发动机设计方案没有完全过关, 存在着一些薄弱环节, 遇到比较苛刻的环境条件, 就会引发事故。

长征三号出现的两次失败, 都发生在第 3 级发动机第二次点火期间。第 1 次失败是 1984 年 1 月首次试飞时, 因第 3 级发动机燃器发生器系统的故障, 未能正常工作, 属于设计方案性的问题。第 2 次失败在 1993 年 12 月 28 日第 8 次发射时, 因第 3 级发动机供氧系统漏气导致气压不够而关机, 此故障属于工艺性问题。

对于可靠性比较的初步结论是, 两种火箭的第 3 级氢氧发动机都存在潜在的薄弱环节, 在可靠性方面较难分出高低。由于长征三号的发射次数少, 因此从统计数字算出的成功率偏低, 这不能影响总的结论。

三、管理体制与研制经费

在进行经济性能比较之前, 有必要对两种系运载列火箭的研制过程与管理体制进行简要的比较, 因为, 先进的项目管理体制是体现现代产业高效率的重要标志。简而言之, 阿里安系列采用政府机制与商业企业机制分阶段侧重的混合管理体制, 而长征三号系统采用了以政府机制为主导的管理体制。

1. 阿里安火箭系列的管理体制

阿里安火箭是欧洲空间局 (ESA) 管理的一个项目。ESA 是在 1975 年由欧洲 10 国联合组成的政府间的联合组织。1973 年 7 月, ESA 的前身之一欧洲运载火箭发展组织 (ELDO) 决定研制阿里安火箭, 其目的是:

- (1) 使欧洲具有自主的卫星发射能力, 摆脱对美国运载火箭的依赖;
- (2) 打入国际商业发射市场。

欧洲空间局有两个领导机构, 即理事会与执行局。理事会是由各成员国派代表组成的权威机构, 负责重大问题的决策。执行局由局长及各部门组成, 是常设的执行机构。

在阿里安火箭的研制阶段, 欧洲空间局委托法国空间局负责火箭的总体设计及技术协调工作。选定法国航空宇航公司为负责总装的总承包商。在总承包商之下, 又选定了分系统的总承包商及子承包商。在各成员国之间承包商的分配, 根据每个国家的投资额及技术能力而定。

在研制阶段完成以后, 阿里安火箭的生产、推销及发射完全由阿里安空间公司负责。阿里安空间公司是股份制公司, 入股的有: 欧洲的 36 家航空航天公司及电子公司; 11 家主要的银行; 及法国空间局。从该公司的组成看出, 有很强的政府背景, 因为入股者中, 法国空间局持有 34% 的股份。

阿里安空间公司实行董事会制度, 董事长由前法国空间局局长达赖斯特担任。该公司有雇员 250 人。每年要承担 8-10 次发射任务, 可以看出, 阿里安空间公司的机构非常精简, 办事效率很高。

阿里安空间公司租用法属圭亚那的库鲁发射中心来完成发射任务,享受非常优惠的租费标准。

1986年1月,在阿里安空间公司之下成立了负责发射保险业务的S3R公司。S3R公司除对发射进行保险以外,还为顾客组织信贷,以保证能按期支付发射费。

2. 长征三号火箭系列的管理体制

长征三号火箭的研制从1976年开始,是当时“三抓”任务之一的331工程的一部分,研制长征三号的目的,是把我国第一颗试验型通信卫星东方二号送入同步转移轨道。

长征三号的研制沿用了以往的管理体制,即有两条指挥线:行政指挥线及技术指挥线——设计师系统。研制分工采用定点的办法。长征三号由航天部一院及上海航天局联合组成总体设计队伍,第1、2级火箭由上海生产,总设计师设在北京。1986年开始研制的长征三号甲,属于与东方红三号通信卫星配套的火箭,为便于集中管理,简化技术协调,总体设计、研制与生产集中在北京,大的管理体制没有明显变动。

从1984年开始长征三号进入商业化以后,发射外星的商业谈判由新组成的长城工业公司负责。火箭的生产、发射仍按原管理体制进行。

3. 火箭的研制经费

阿里安系统火箭的研制经费见表4。阿里安1型火箭的第1、2级是在钻石火箭的技术基础上研制的,第3级是完全新研制的低温级火箭,研制工作量比较大。因此研制费比较高,约8亿美元,研制费中包括4发飞行试验批在内。在试验批之后,1978年投产了6发阿里安火箭作为商业发射的促进批。在促进批之后的投产转到阿里安空间公司负责。

表4 阿里安火箭研制经费(1984年币值)

	MUC	亿美元	亿美元[1990年价]
阿里安1研制	962.2	7.89	10.09
阿里安促进批	426.7	3.50	4.60
阿里安2、3	142.4	1.17	1.28
阿里安4	417.4	3.42	4.37
阿里安第2发射区	153.8	1.26	1.61

注: MUC 为百万欧洲货币单位。

阿里安2型、阿里安3型火箭是在阿里安1型火箭的基础上改进第3级,并加了固体助推火箭。由于改动比较小,只进行地面试验,没有进行专门的研制性试飞,因此只花了1.17亿美元。阿里安4型火箭的主要改动是加长了第1级火箭,并加了液体助推火箭,也没有进行专门的试飞,而是直接在商业发射中改动了设计状态。这种小风险改进的做法大大节省了研制经费。

由统计可见,阿里安系列火箭的研制费共计约18亿美元(1984年币值),其中包括第二发射工位的建设费。阿里安空间公司不承担这笔经费,完全由欧洲空间局成员国分摊。

长征三号第 1、2 级火箭是在长征 2 号及风暴 1 号火箭的基础上改进的, 只有第 3 级是新研制的, 因此, 研制经费相对较低。

四、发射服务商业化

1. 政府的强有力支持

阿里安火箭在商业化过程中, 欧洲空间局给阿里安空间公司以下的优惠条件:

(1) 型号研制费由政府经费支持, 商业化价格中不分摊研制费, 而且商品化火箭的生产、试验发射设施都是研制阶段投资建起来的, 也免收折旧费, 这项措施相当于降低了 20% 的生产成本。

(2) 在欧洲空间局内部包销发射服务, 凡是欧洲空间局的卫星一律由阿里安火箭发射, 其价格要高于对外商业发射价。在发射周期出现矛盾时, 欧洲空间局的卫星调整发射计划给外星让路。

(3) 低价租用库鲁发射场。

(4) 政府承担保险。阿里安空间公司只需购买 1 亿美元的第三方责任保险, 剩下的保险额由欧洲空间局及法国政府承保。

以上各项措施, 都属于变相的政府补贴, 其目的是降低发射服务报价, 提高竞争能力。

2. 以成本低及适应性强为设计原则

阿里安火箭为了降低成本, 采用了性能偏低的 1、2 级推进系统, 及钢板制造的第 1 级推进剂箱, 而且为了增强箱体的互换性, 第 1 级的燃料箱与氧化剂箱采用同一尺寸, 尽管实际需要的容积并不相同。同样, 在提高运载能力时, 并不重新设计大直径的第 2、3 级, 而是加大第 1 级的加注量。所有这一切都说明阿里安火箭以降低成本为首要准则, 在此前提下改进技术性能。

为了适应各种重量档次的卫星, 阿里安 4 型火箭以固体和液体助推火箭的数量和品种的搭配, 组合出 6 种不同的运载能力的火箭。与此同时, 阿里安火箭解决了一箭发射双星或三星的技术, 使发射成本降低 20-25%。

3. 加大投产批量, 降低成本

阿里安 4 型火箭一开始投产了 21 发, 根据市场的估计, 1989 年 2 月决定再投 50 发, 加大投产批量可以降低生产成本 20-25%。

4. 发射服务中的金融与其它鼓励手段

阿里安空间公司采取了一系列的金融手段支持客户购买阿里安的发射服务, 包括: 提供信贷; 短期购买乙方的股份; 补偿贸易与反贸易。在个别竞争激烈的情况下, 减价 15-25% 提供发射服务。

与金融措施相配合, 还运用技术出口作为拉拢用户的刺激手段。例如出售属于禁运的卫星部件, 许诺签发维金发动机的生产许可证, 为用户租用地面接收站及跟踪站等。

阿里安的以上措施和手段, 都可为长征三号系列火箭在发射服务商业化过程中借鉴。

五、发射价格与效益

阿里安火箭的发射服务价格 (1990 年价) 见表 5。

表 5 阿里安火箭的发射服务价格(1990 年价)

卫星重量(公斤)	每个卫星发射价(万美元)	说 明
700-800	2500	双星发射
1200-1600	5000	
2000-2500	6000	AR42P
2500-3000	7000	AR44P
> 3000	> 9000	

火箭的平均单发生产成本 7000 万美元, 大批量投产后可降至 5700 万美元 / 发。阿里安火箭的生产成本组成见表 6。

表 6 阿里安 4 型火箭成本组成表(按工作量百分数计算)

项 目	工作量(%)
整流罩	3.2
双星支架	2.5
控制系统及仪器舱	13.15
箭体结构与总装	37.65
推进系统(含液体助推火箭)	38.75
固体助推器	4.1
其 它	0.65

阿里安火箭的商业报价中, 除了产品成本以外, 发射操作费 15% (另一报道为 20%), 公司内部消耗费 3%。最后利润 3-5%。以每发火箭平均发射价 8000 万美元, 每年发射 8 发计算, 估计阿里安公司的收益为每年 1920-3200 万美元。如果每 20 发有一次发射失败, 支付保险金 1 亿美元, 则纯收益非常微薄。阿里安火箭发射服务商业价组成, 见表 7。

表 7 阿里安火箭发射服务商业价组成

项 目	比 例
产品费	79-72%
公司内部消耗	3%
发射操作费	15-20%
利 润	3-5%

到现在为止,长征系列火箭的发射服务还没有建立起统一的价格及收益分配体系。由于中国具有相对低廉的劳动力及货币汇率方面的差价,使长征系列火箭能以压低的发射价取得市场竞争的优势。随着国内市场经济体制的完善及国际发射服务市场竞争的新形势,长征系列火箭能否继续保持这种价格优势,这是有待研究的新问题。

六、结论与建议

1. 通过以上分析,我们可得出以下结论:

(1) 阿里安火箭系列与长征三号系列火箭总体技术性能相当,长征三号 B 的性能略优于阿里安 AR44。

(2) 从设计思路看,阿里安系列的改进具有突出的低成本、低风险和对用户适应性强等明确的商业竞争指导思想,不单纯追求技术性能最优。长征三号系列火箭的发展以满足国内卫星需求为导向,然后开拓国际市场。

(3) 在发射服务方面,由于中国的劳动力比国际市场便宜等原因,长征三号系列火箭暂时具有价格低的优势。

(4) 阿里安火箭系列在政府支持下的商业化管理机制方面,比长征三号做得好,因此在争取发射服务市场方面占有优势。

2. 我们认为,运载火箭发射服务是我国航天产业走向国际商业市场的优势项目。我们必须抓住机遇,加强市场开发战略的研究,力争扩大商业发射服务的市场。为此,我们提出以下建议:

(1) 努力提高产品性能。通过模块化、系列化,改善对发射各种重量卫星的适应能力。重点要放在提高火箭的可靠性及降低发射价格两个方面。提高可靠性,不但提高了中国火箭的信誉,而且也是降低成本的有效途径。

(2) 重视市场导向。长征系列火箭在开发市场方面已取得很大成绩,今后必须提高火箭的适应性,争取更大市场。

(3) 改善服务。服务的概念,包括从开始谈判到发射以后的数据提供的全过程服务项目。在这方面必须给予足够重视。

(4) 加强政府对市场开发的支持。包括火箭的研制费应由政府拨款,政府给予原材料价格优惠,承担发射保险,降低发射场收费,给用户补偿贸易优惠,提供技术援助等等措施。

我们相信,我国的运载火箭商业发射服务一定会创造更大的市场,取得更好的效益。

1995 年 5 月

(作者单位:张文翰、胡苇,中国运载火箭技术研究院;
黄祖蔚、陈持平,航天工业总公司 710 所)