

推進系統設計

- Lecture 1
- 授課老師: 郭正山 博士
- 日期: 2025/09/12
- 時間: 09:00~12:00

授課大綱

- 航太學門涉及所有基本物理、化學、數學及各類工程學科，而其中推進系統則更為上述各學科之整合，所牽涉之技術既複雜且高深，須長期持續投入大批人力、預算及時間，經理論分析設計製造與試驗等循環過程，一點一滴、一步一腳印，扎扎實實累積屬於自己的實戰經驗才可能有所成。因此，迄今具備航太載具推進系統研發能量之國家屈指可數。
- 本課程擬依實際從事航太載具推進系統工作者的經驗著手，提供本所研究生或大學部高年級生研習航太推進系統所需相關知識，以為後續高階研究或就業做準備。
- 擬定之課程初步規劃如下；

授課大綱規劃

- 航太推進系統分類與應用
- 推進系統設計準則
- 吸氣式引擎設計
- 液體火箭設計
- 固體火箭設計
- 推進系統驗證設計
- 推進系統測試設備參觀

分數配當: 作業/期中考/期末考

參考資料

- 課堂講義
- [Rocket Propulsion Components](#) , An Introduction to the Engineering of Rockets by George P. Sutton
- [Design of Liquid Propellant Rocket Engines](#) by David Huang
- [Gas Turbine Theory](#) by HH Saravanamuttoo etc
- Gas Turbine Combustion by Arthur H. Lefebvre
- Ramjet Engines (Part1 of 2 Parts) by M. N. Bondaryuk and S. M. ICyashenko
- Scramjet Propulsion Edited by E.T. Curran and S.N.B. Murthy

火箭相關歷史

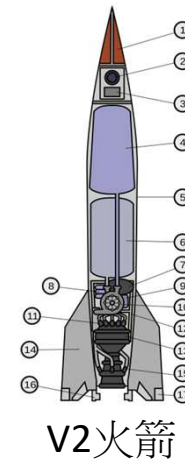
- 火藥:發明於7世紀的中國，為當時中國術士煉製長生不老藥時意外得到的副產品。
- 火箭首次戰役: 西元1232年(南宋)Kai-fung-fu(開封府)戰役-中國對抗蒙古帝國的人侵
- 第一枚液體燃料火箭:西元1926年3月16日美國物理學家(液體火箭的發明者)羅伯特·哈欽斯·戈達德（Robert Hutchings Goddard），發射了人類歷史上第一枚液體燃料火箭。飛行2.5秒、高度41英尺、距離184英尺。
- V2火箭:於二戰期間1944年9月8日攻擊倫敦
- 1957年10月4日蘇聯Sputnik I衛星發射
- 1958年元月31日美國Explorer I 衛星發射
- 1970年4月24日中國東方紅一號衛星發射



黑火藥與無煙火藥



羅伯特·戈達德
與其首枚液體
火箭試射



V2火箭

航太推進系統分類與應用



航太推進系統分類

TABLE 1-1. Energy Sources and Propellants for Various Propulsion Concepts

Propulsion Device	Energy Source ^a			Propellant or Working Fluid
	Chemical	Nuclear	Solar	
Turbojet	D/P	TFD		Fuel + air
Turbo-ramjet	TFD			Fuel + air
Ramjet (hydrocarbon fuel)	D/P	TFD		Fuel + air
Ramjet (H ₂ cooled)	TFD			Hydrogen + air
Rocket (chemical)	D/P	TFD		Stored propellant
Ducted rocket	TFD			Stored solid fuel + surrounding air
Electric rocket	D/P	TFD	D/P	Stored propellant
Nuclear fission rocket		TFD		Stored H ₂
Nuclear fusion rocket		TFND		Stored H ₂
Solar heated rocket			TFD	Stored H ₂
Photon rocket (big light bulb)		TFND		Photon ejection (no stored propellant)
Solar sail			TFD	Photon reflection (no stored propellant)

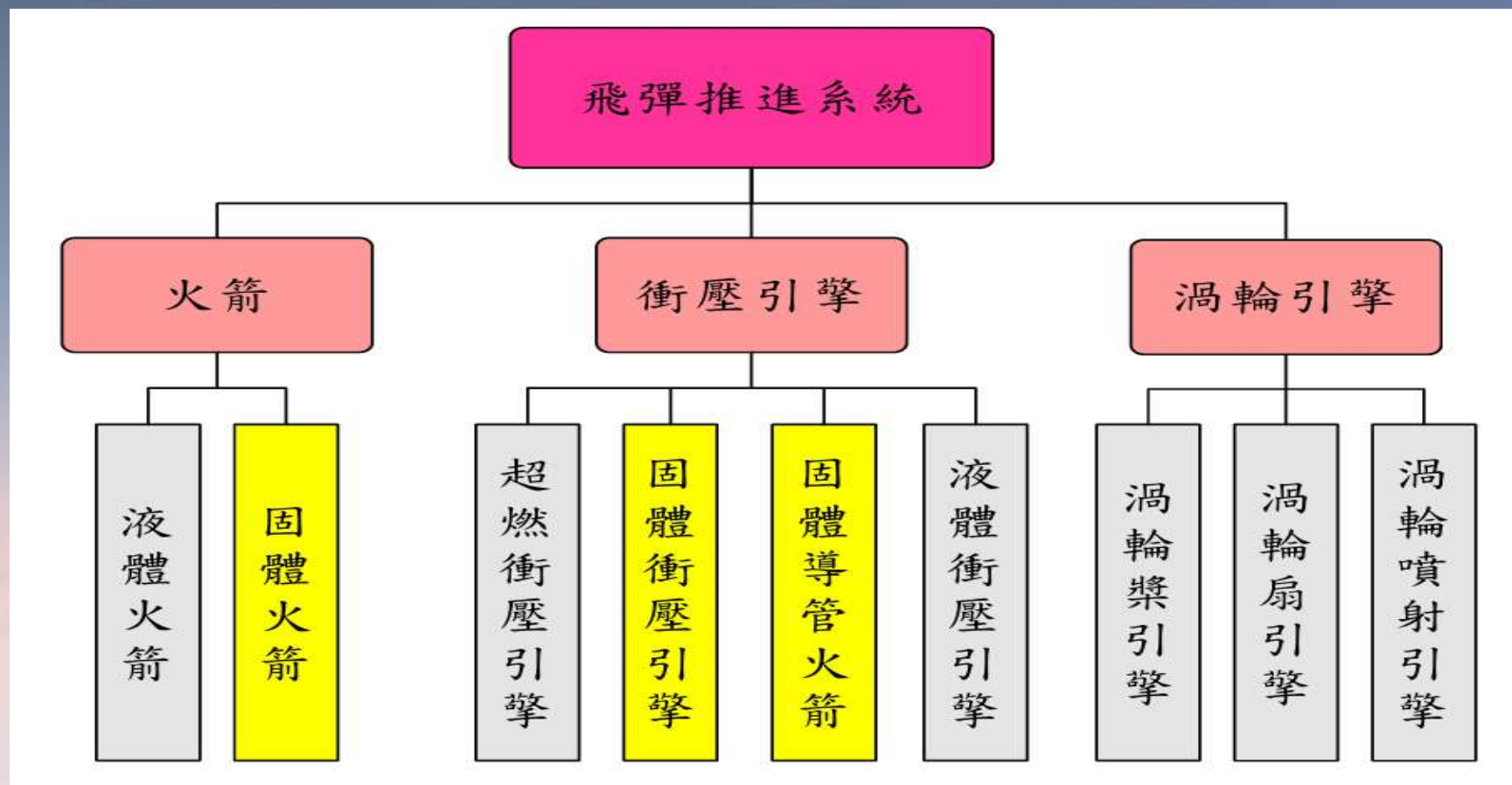
^aD/P, developed and/or considered practical; TFD, technical feasibility has been demonstrated, but development is incomplete; TFND, technical feasibility has not yet been demonstrated.

摘錄自: Rocket Propulsion Elements

在飛彈上的應用

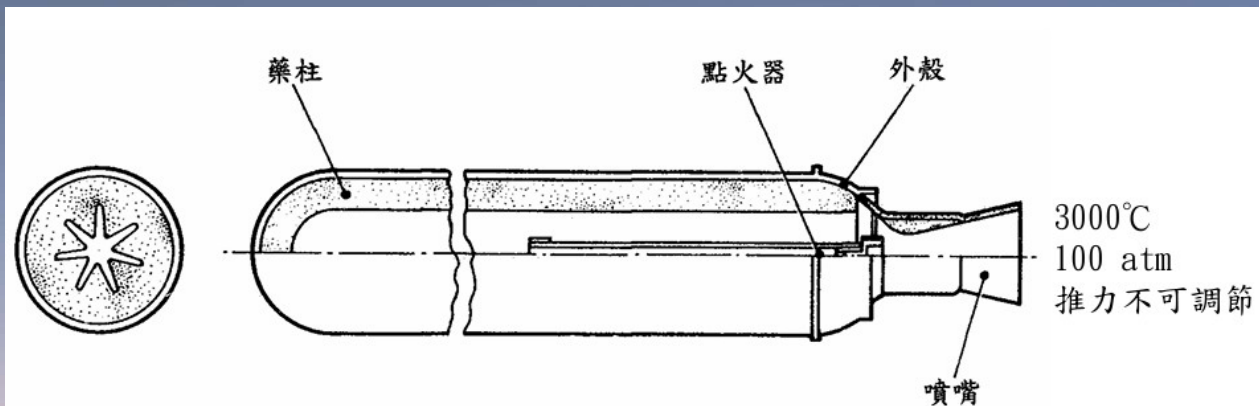


飛彈推進系統分類

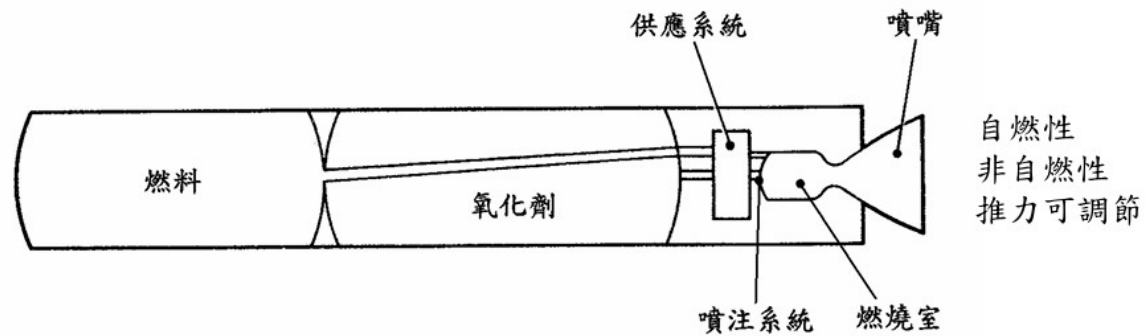


固體火箭與液體火箭

固體火箭

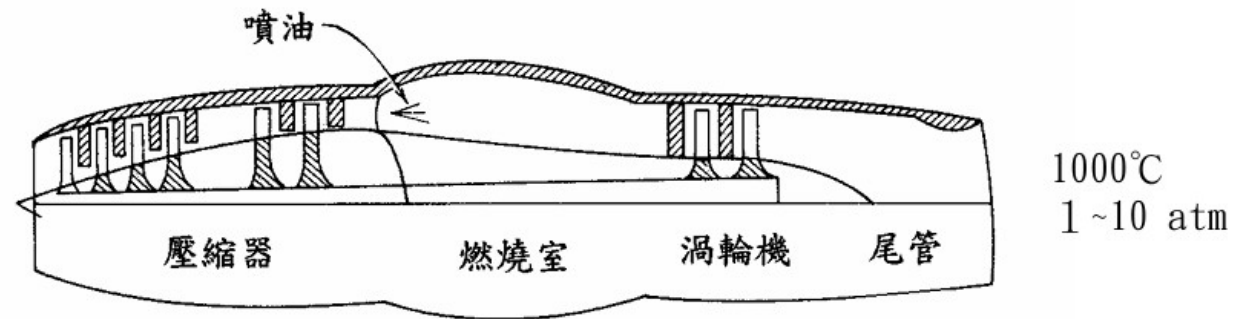


液體火箭

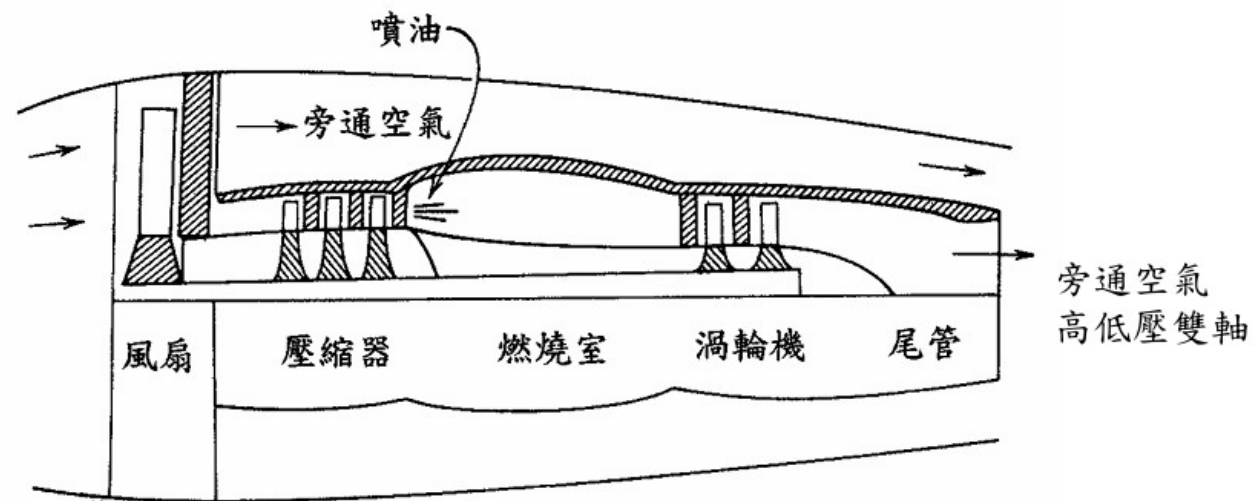


渦輪噴射引擎與渦輪扇引擎

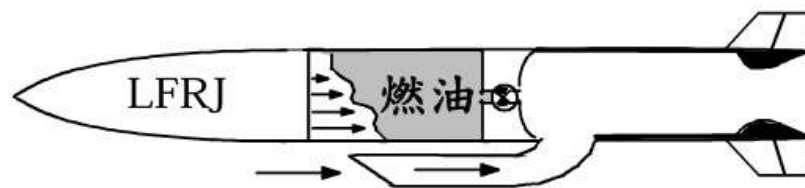
渦輪噴射引擎



渦輪扇引擎



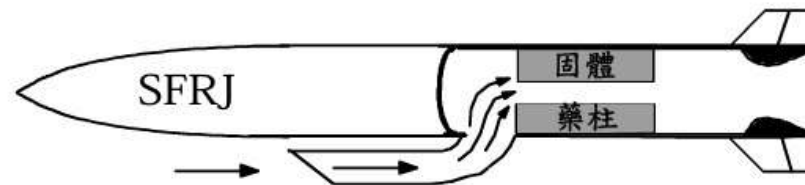
衝壓引擎的種類



2000°C
2~20 atm



氣體產生器供應
富油的燃氣至衝
壓燃燒室

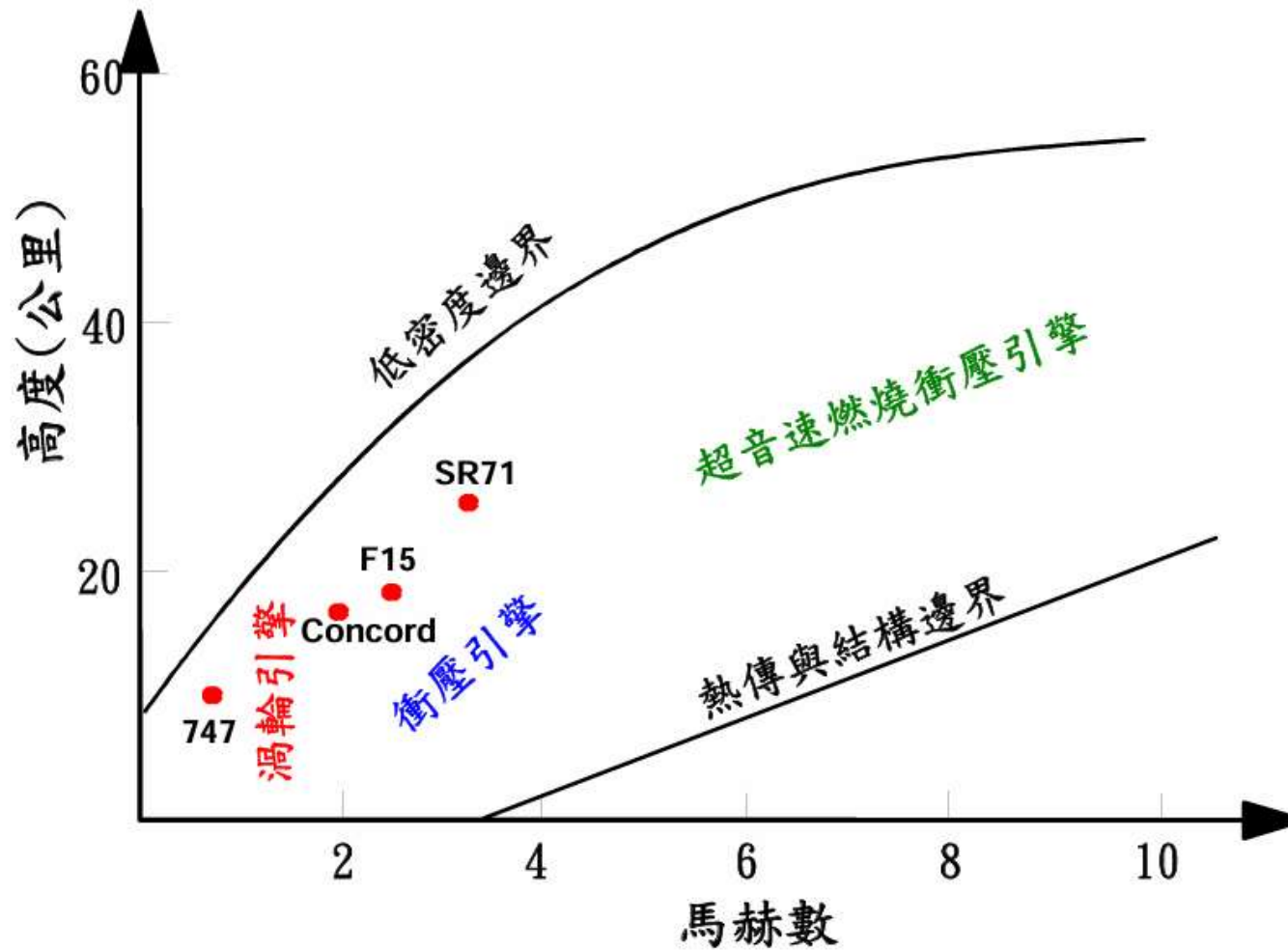


固體燃料直接與
高速氣流混合燃燒

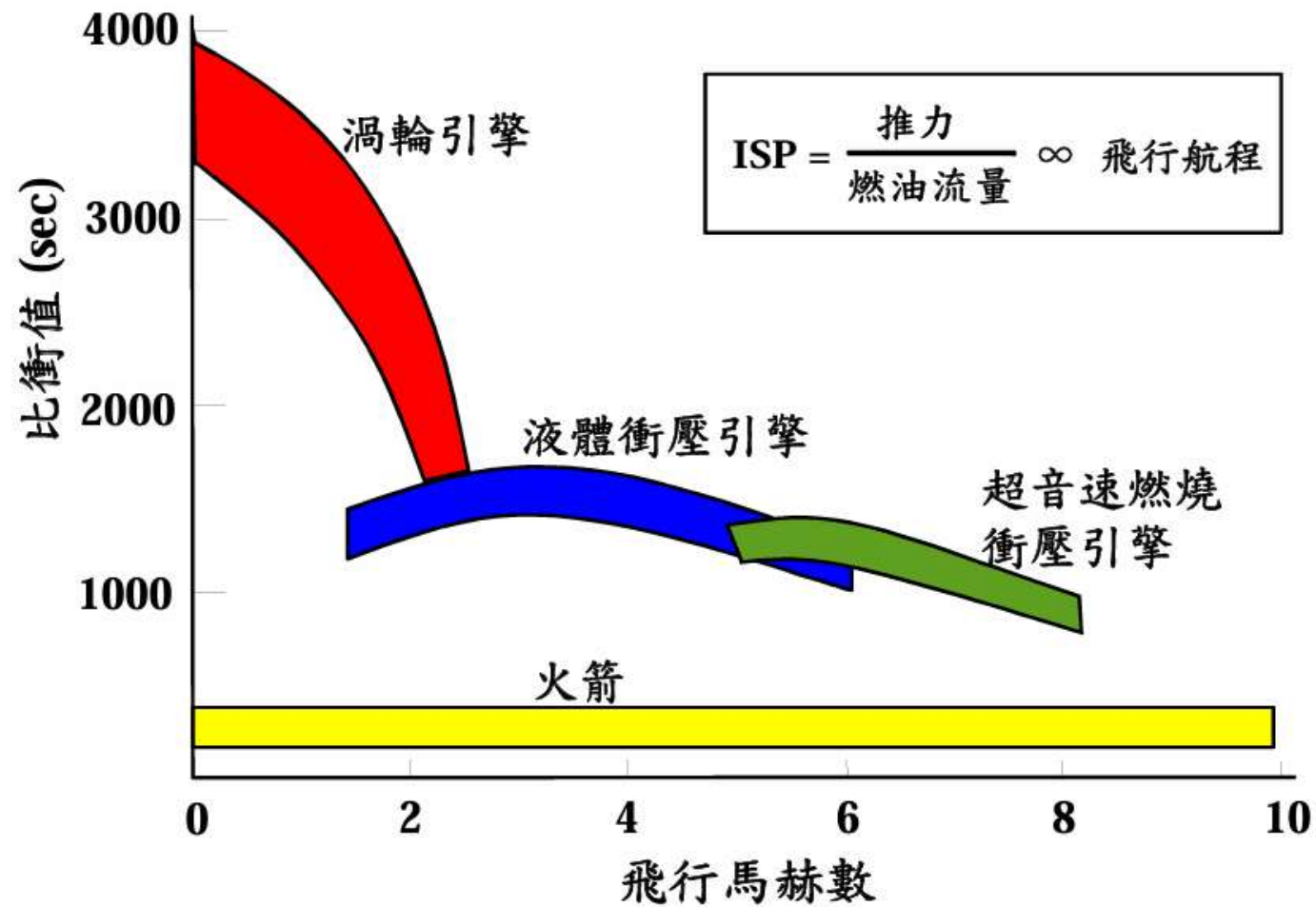


進氣全溫>1500°C
超音速氣流燃燒

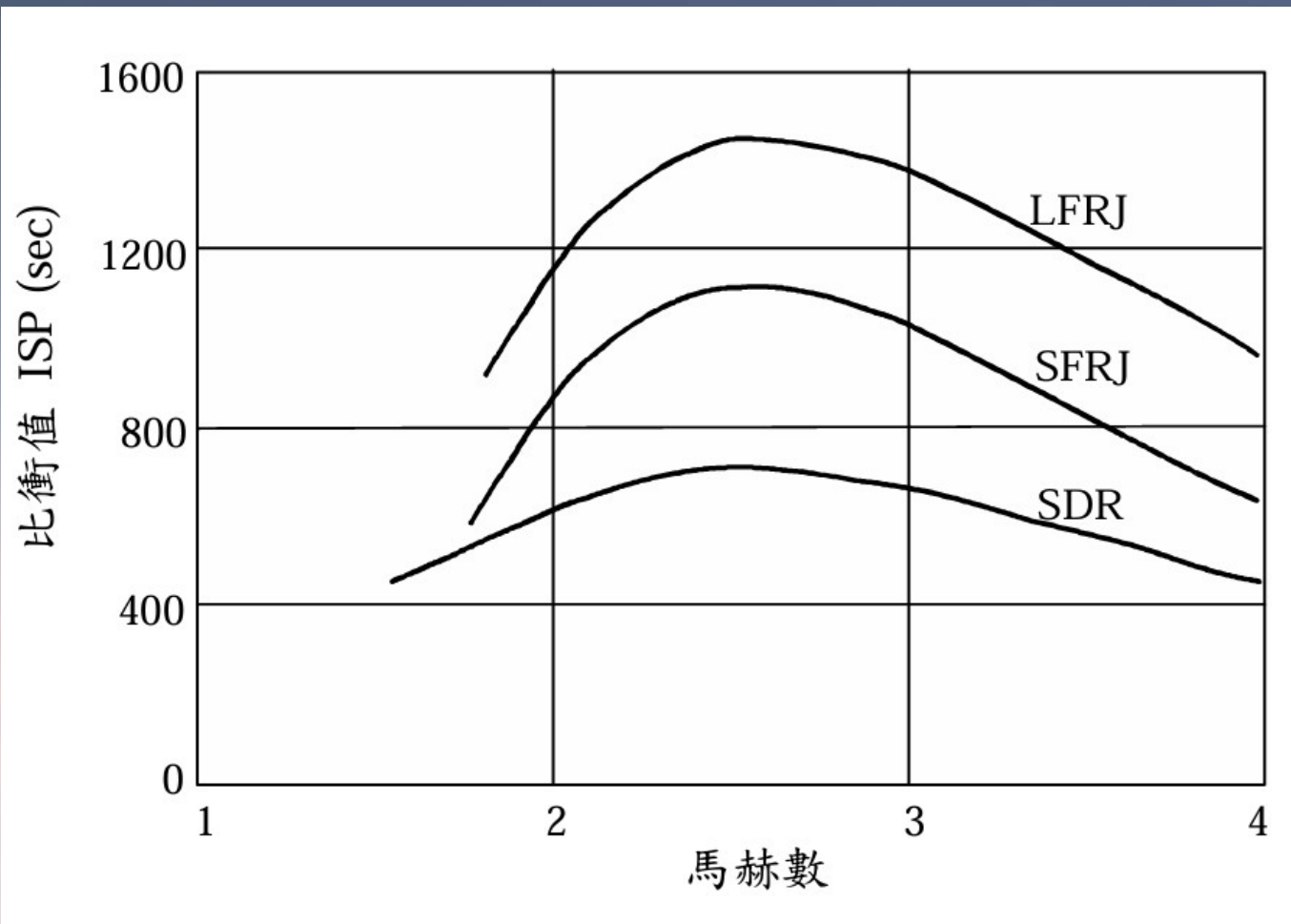
吸氣式引擎的飛行包線



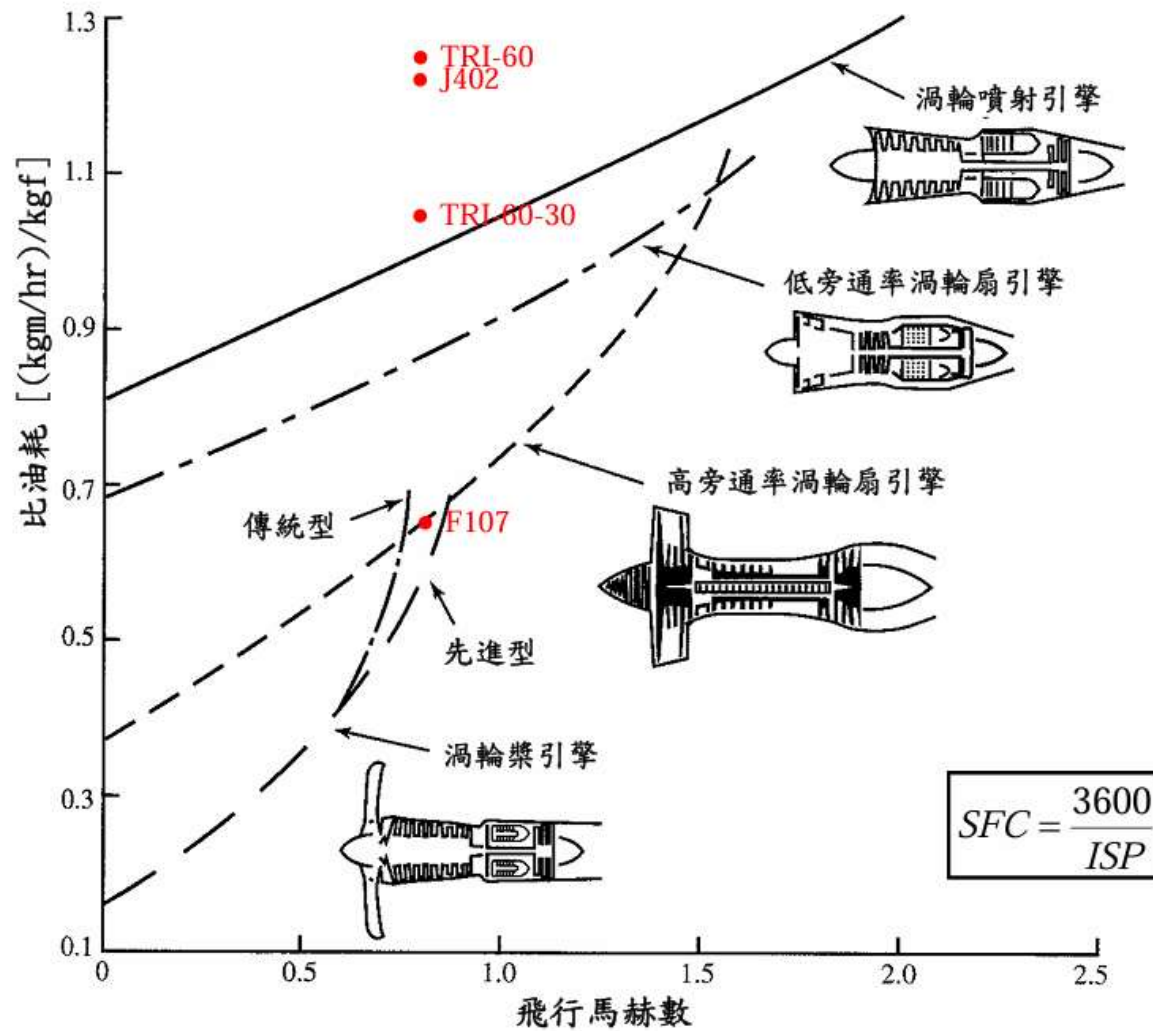
各推進系統的比衝值



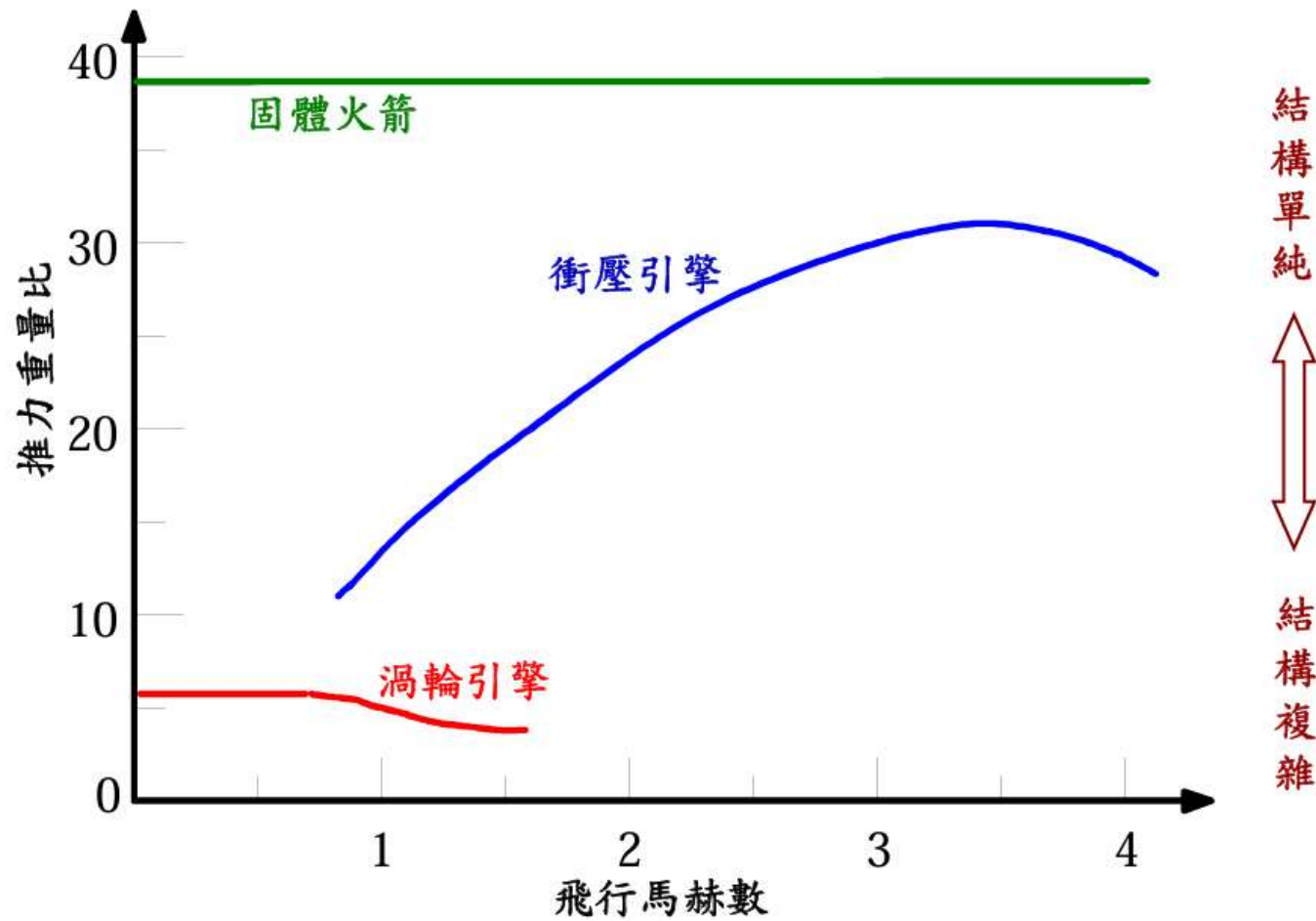
各種衝壓引擎的比衝值



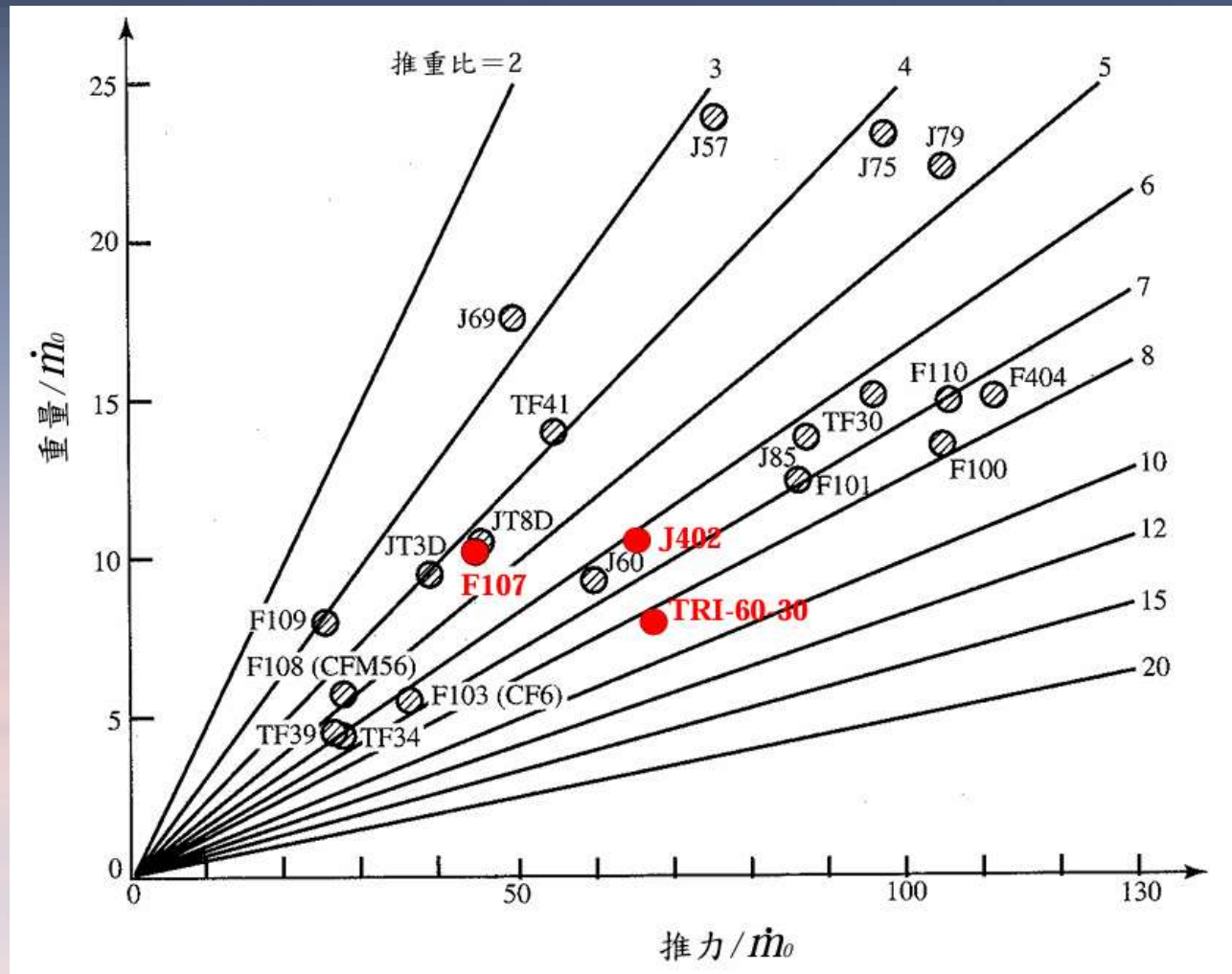
各種渦輪引擎的比油耗



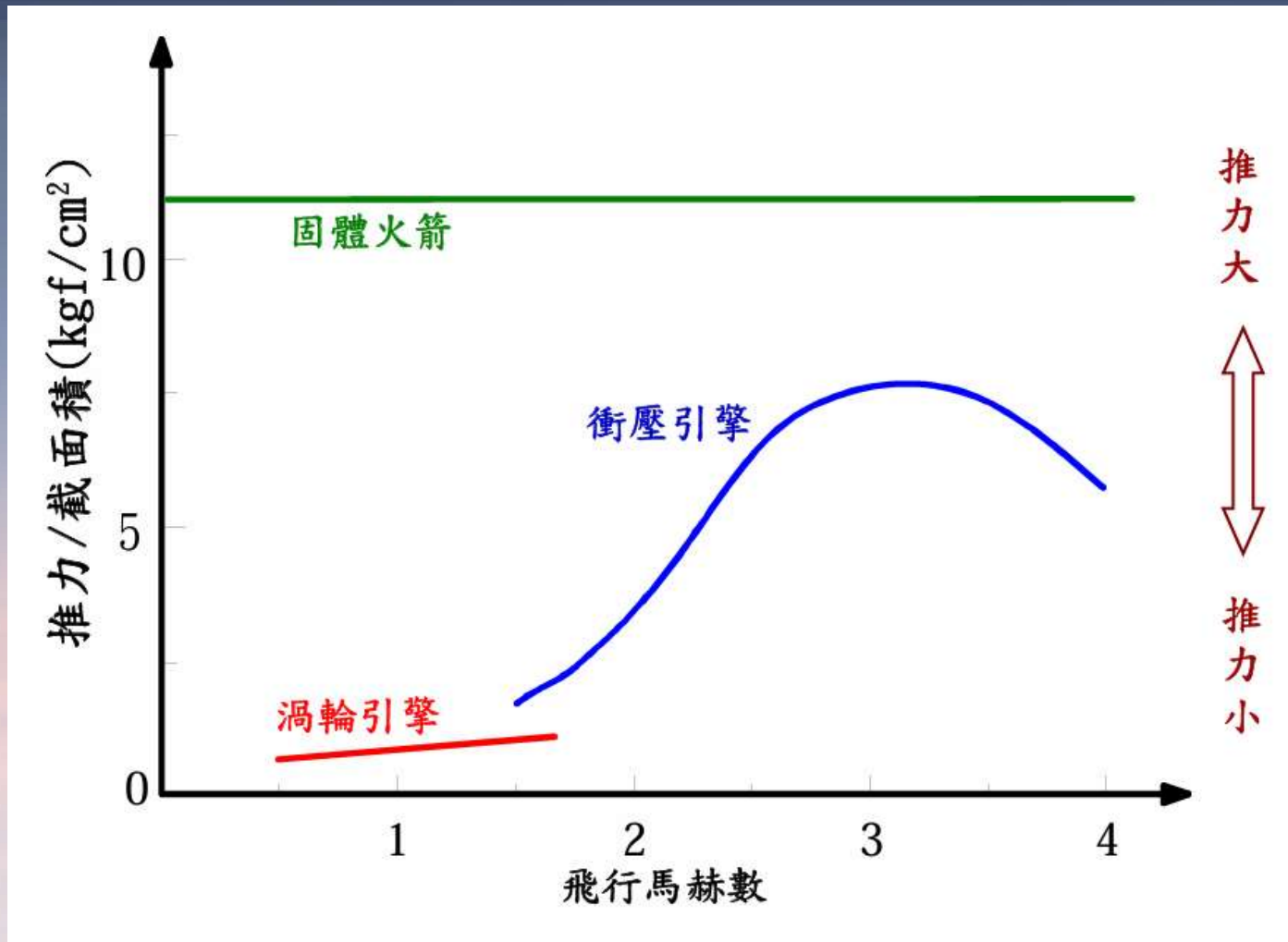
各種推進系統的推力重量比



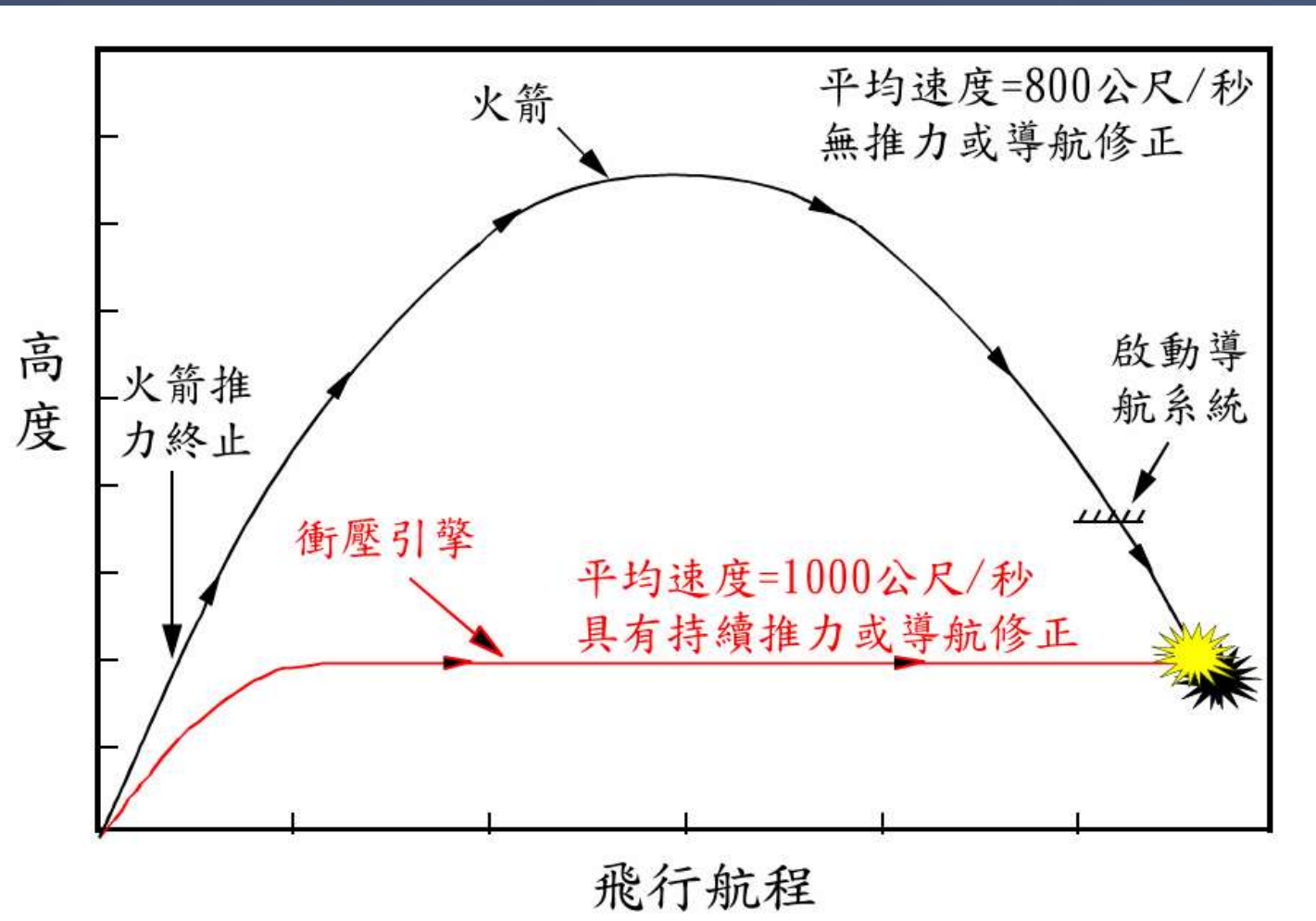
各渦輪引擎的推力重量比較



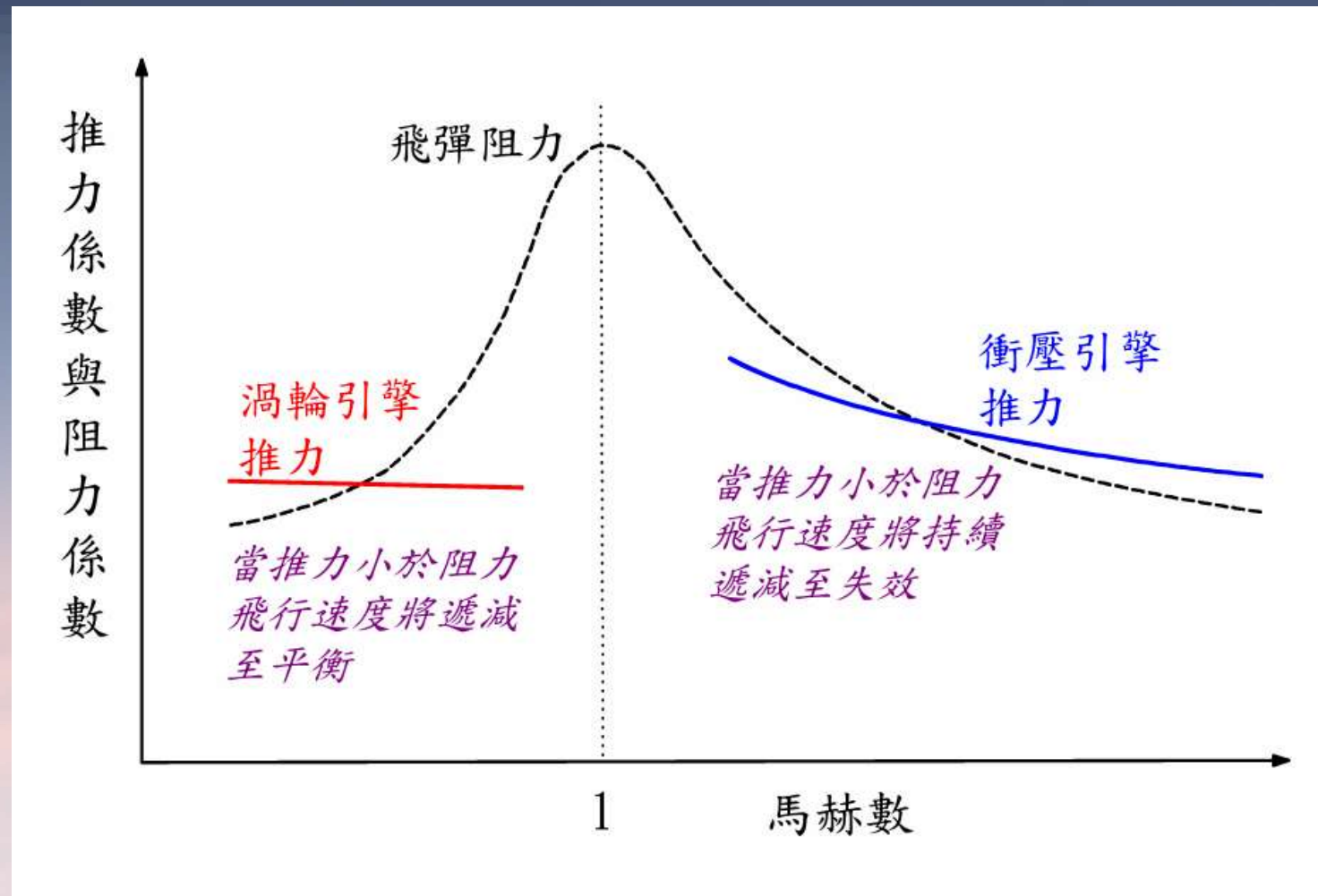
各推進系統的單位鋒面推力



各推進系統的傳統飛行彈道



渦輪引擎與衝壓引擎的推阻力特性



飛彈推進系統特性比較

推進系統 特性	固體火箭	液體火箭	渦輪引擎	衝壓引擎
持續推力	差	良	優良	優良
飛行速度	高.中.低	高.中.低	中.低	高
比衝值	低	低	高	中
推重比	高	高	低	中
單位鋒面推力	高	高	低	中
自行起動能力	可以	可以	可以	不可
引擎與彈體整合	優良	優良	良	良
機械構造	簡單	中等	複雜	中等
後勤維護	簡單	複雜	中等	中等

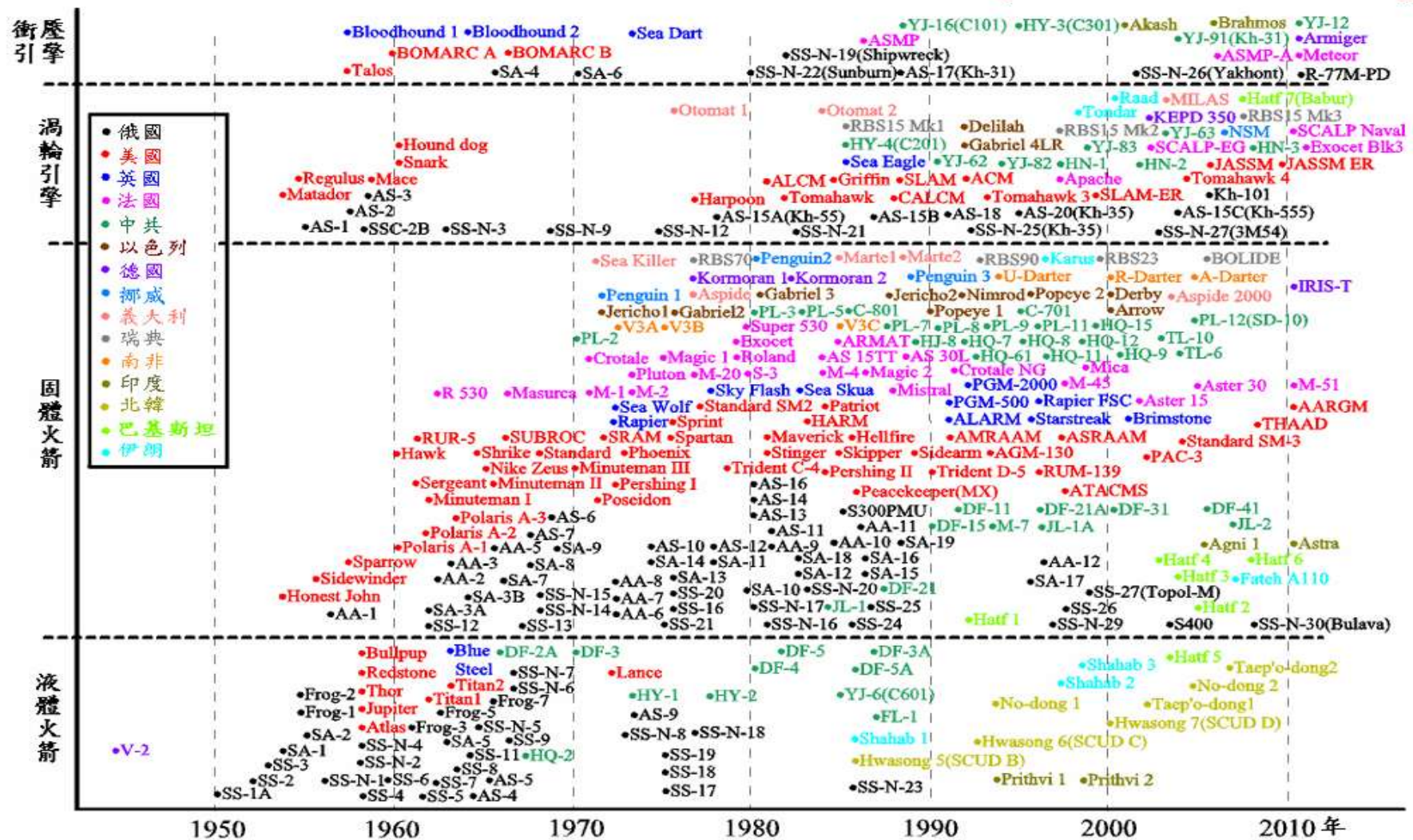
飛彈應用實例



飛彈發展歷程簡要

	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000
液體火箭	V-2	Atals Jupiter Thor SS-4 SS-N-4	Titan1 Titan2 SS-8 SS-N-6 DF-2A	SS-19 SS-N-18 DF-3 HY-1 HY-2	DF-4 DF-5 C-601(YJ-6) Hwasong5 Shahab1	Prithvi No-dong1 Hwasong6 Shahab2 Shahab3	Taep'o-dong1 Taep'o-dong2 No-dong2 Hwasong7 Hatf5
固體火箭	美國 俄國 英國 法國 中共 德國 義大利 印度 北韓 巴基斯坦 伊朗	Sidewinder Sparrow AA-1	Polaris Minuteman Hawk Standard SS-13 SA-9	Poseidon Pershing1 Trident Phoenix SS-16 M-20 Exocet Kormoran1	MX Pershing2 Stinger Patriot M-4 SS-24 SS-25 S300PMU DF-21 JL-1 C-801(YJ-8)	Trident D-5 AMRAAM M-45 Mica SS-27 SS-N-29 DF-11 DF-15 DF-21A HQ-12 Hatf1	PAC-3 Standard3 THAAD Aster SS-N-30 S400 DF-31 DF-41 JL-2 Agni Fateh A-110
渦輪引擎		Matador Regulus AS-1 AS-2	Houndd dog Snark SS-N-3 SS-N-9	Harpoon Otomat SS-N-12 AS-15	Tomahawk ALCM SS-N-21 HY-4	Tomahawk3 Apache SS-N-25 YJ-62 YJ-83 HN-1	Tomahawk4 JASSM SCALP-EG SS-N-27 Kh-101 HN-2
衝壓引擎		BOMARC A TALOS Bloodhound1	BOMARC B Bloodhound2 SA-4	Sea Dart SA-6	ASMP Shipwreck Sunburn Kh-31 C-101	C-301	ASMP A Yakhont Akash Brahmos YJ-91

世界各國飛彈的發展



各國服役的彈道飛彈

國家	飛彈名稱	航程(km)	用途	彈徑(m)	彈長(m)	CEP(m)
美國	Trident C-4	7400	三節固體	1.88	10.39	450
	Trident D-5	12000	三節固體	2.11	13.42	90
	Peacekeeper (MX)	9600	三節固體	2.34	21.8	90
俄國	Minuteman III	13000	三節固體	1.85	18.2	120
	SS-18 Mod3	15000	二節液體	3.0	34.3	500
	SS-19	9000	二節液體	2.5	24.0	550
	SS-21	120	單節固體	0.65	6.4	95
	SS-24	10000	三節固體	2.4	22.4	500
	SS-25	10500	三節固體	1.8	20.5	200
	SS-26	400	單節固體	0.92	7.3	10-30
	SS-27 (Topol-M)	10500	三節固體	1.9	21.9	350
	SS-N-18	6500	二節液體	1.8	14.6	900
	SS-N-20	8300	三節固體	2.4	16.1	500
	SS-N-23	8300	三節液體	1.9	14.8	500
	SS-N-30 (Bulava)	10000	三節固體	n/a	n/a	研發中
中共	DF-11A (M-11)	350-530	單節固體	0.8	8.5	200
	DF-15A (M-9)	600	單節固體	1.0	9.5	30-45
	DF-21A	2500	二節固體	1.4	12.3	50
	DF-31	10000	三節固體	2.25	18.4	300
	DF-41	12000	三節固體	2.25	21	100-500
	DF-5	8000	三節固體	2.25	18	300

各國服役的彈道飛彈(續)

國家	飛彈名稱	航程(km)	用途	彈徑(m)	彈長(m)	CEP(m)
法國	M-4B	5000	三節固體	1.93	11.05	500
	M-45	5300	三節固體	1.93	11.05	350
	M-5	6000	三節固體	2.35	13	研發中
以色列	Jerico 1	500	二節固體	0.8	13.4	1000
	Jerico 2	1500-3000	二節固體	1.56	14.0	n/a
	Jerico 3	4800-6000	三節固體	1.56	15.5	研發中
印度	Prithvi 1	150	單節液體	1.1	8.56	50
	Prithvi 2	250	單節液體	1.1	9.0	50
	Prithvi 3	300	二節固體	1.0	8.56	25
	Agni 1	700-1200	單節固體	1.3	14.8	25
	Agni 2	2000-3500	二節固體	1.3	20	40
	Agni 3	3500-5000	三節固體	1.8	N/A	研發中
巴基斯坦	Hatf 1/2/3/4	100-750	單節固體	0.56~1	6~12	250
	Hatf 5	1500	單節液體	1.35	15.9	2500
	Hatf 6	2000	二節固體	1.4	17.2	350
北韓	Hwasong 5/6/7	300~700	單節液體	0.88	11~13.5	450~
	No-dong 2	1500	單節液體	1.36	16.2	250
	Taep' o-dong 1	2000	二節液體	1.36	32	4000
	Taep' o-dong 1(slv)	5000	二液+一固	1.36	27	3000
	Taep' o-dong 2	6000	二節液體	2.1	35	n/a
伊朗	Shahab 3/3A/3B	1300-2000	單節液體	1.38	16-17	2500

各國服役固體火箭飛彈

國家	飛彈名稱	航程(km)	用途	彈徑(m)	彈長(m)	備註
美國	Patriot	70	地對空	0.41	5.2	
	PAC-3(ERINT)	20	地對空	0.255	5.2	
	Standard SM-2 IV	150	地對空	0.34/0.53	6.5	二節固體
	Standard SM-3	1200	地對空	0.34/0.53	6.5	三節固體
	AMRRAM(AIM-120)	50	空對空	0.178	3.65	
	ASRAAM	20	空對空	0.166	2.9	
	Phoenix(AIM-54)	150	空對空	0.38	3.96	
	HARM(AGM-88)	80	空射反輻射	0.254	4.17	
	THAAD	200	地對空	0.34	6.17	終端液體
俄國	S-300(SA-10)	75-200	地對空	0.515	7.5	二節固體
	S-300V(SA-12A/B)	75-200	地對空	0.72/0.9	7.0/8.5	二節固體
	S-400	120	地對空	0.24	5.65	二節固體
	SA-17	45	地對空	0.4	5.55	
	R-33(AA-9)	120-160	空對空	0.38	4.15	
	R-27ER(AA-10)	110	空對空	0.26	4.78	
	R-73(AA-11)	20	空對空	0.17	2.9	
	R-77(AA-12)	80	空對空	0.20	3.6	
	Kh-15(AS-16)	150	空對地	0.46	4.78	
	Kh-58(AS-11)	160	空射反輻射	0.36	4.85	

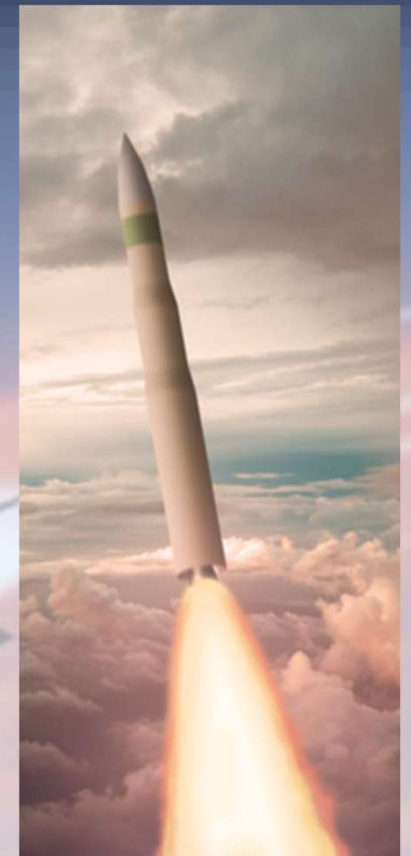
各國服役固體火箭飛彈(續)

國家	飛彈名稱	航程(km)	用途	彈徑(m)	彈長(m)	備註
法國	Aster 30	100	地對空	0.38	5.2	
	MICA	60	空對空	0.165	3.1	
	Exocet	50-72	空對地	0.36	4.7	
	ARMAT	100	空射反輻射	0.4	4.15	
英國	ALARM	45	空射反輻射	0.224	4.3	
	PGM-500	50	空對地	0.36	3.38	
	PGM-2000	50	空對地	0.46	4.62	
以色列	Arrow	100	地對空	0.8	6.95	二節固體
	Derby	63	空對空	0.16	3.62	
	Popeye	80	空對地	0.533	4.0	
德國	Kormoran	35	空對艦	0.34	4.4	
挪威	Penguin Mk3	55	空對艦	0.28	3.18	
義大利	Aspide 2000	40	空對空	0.234	3.7	
南非	R-Darter	63	空對空	0.16	3.62	
中共	HQ-8(KS-1)	50	地對空	0.4	5.6	
	HQ-9	150	地對空	0.52	7.5	S-300PMU
	HQ-12(FT-2000)	100	地對空	0.47	6.8	
	HQ-15	75	地對空	0.51	7.2	S-300PMU1
	PL-12(SD-10)	70	空對空	0.203	3.85	
	YJ-1(C-801)	50	空對艦	0.36	4.65	
	TL-6(FL-9)	35	反艦	0.28	3.5	

美國彈道飛彈

液體火箭
都已除役

固體火箭
部份除役



LGM-35哨兵
研發中

美國新型戰術導彈



ATACMS
MGM-140
海馬士發射系統

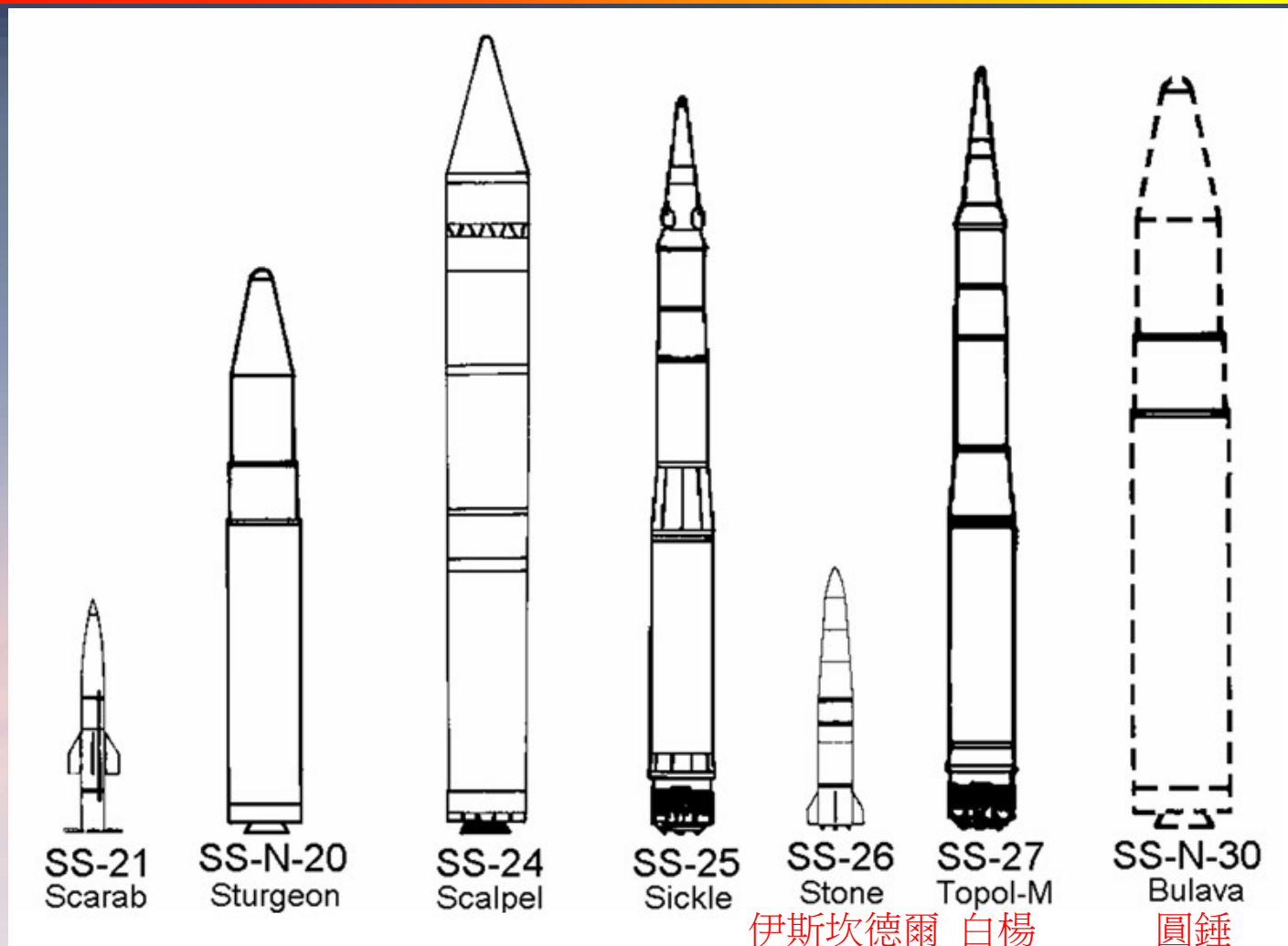


PrSM
研發中
海馬士發射系統

俄國液體火箭彈道飛彈

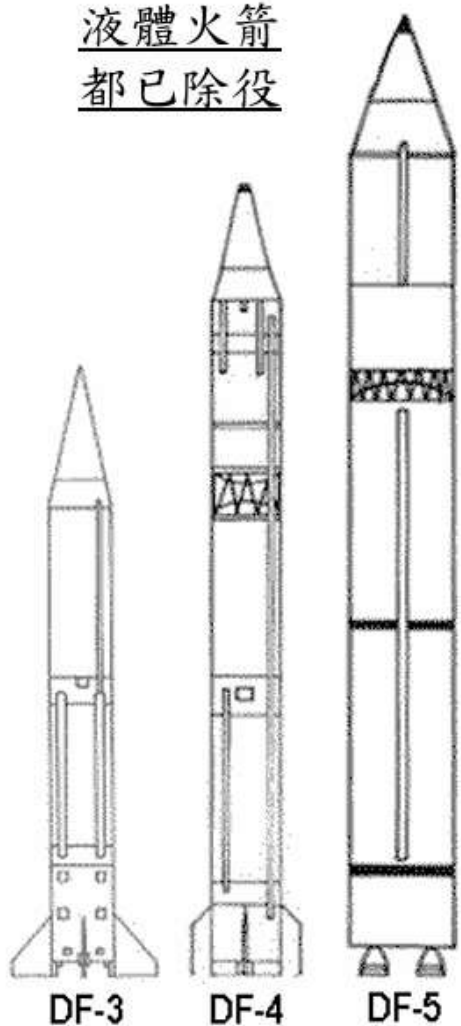


俄國固體火箭彈道飛彈

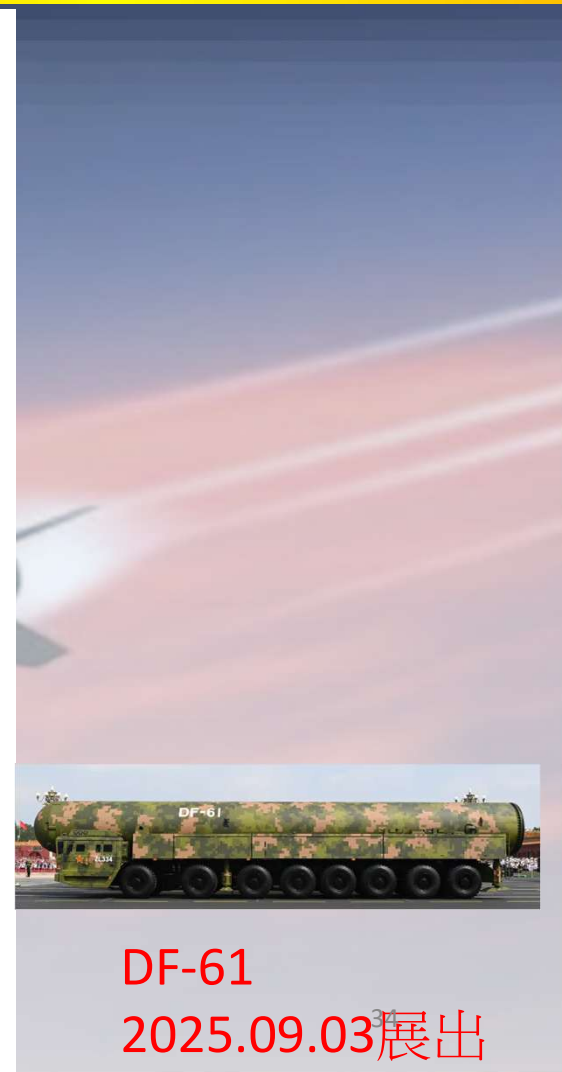
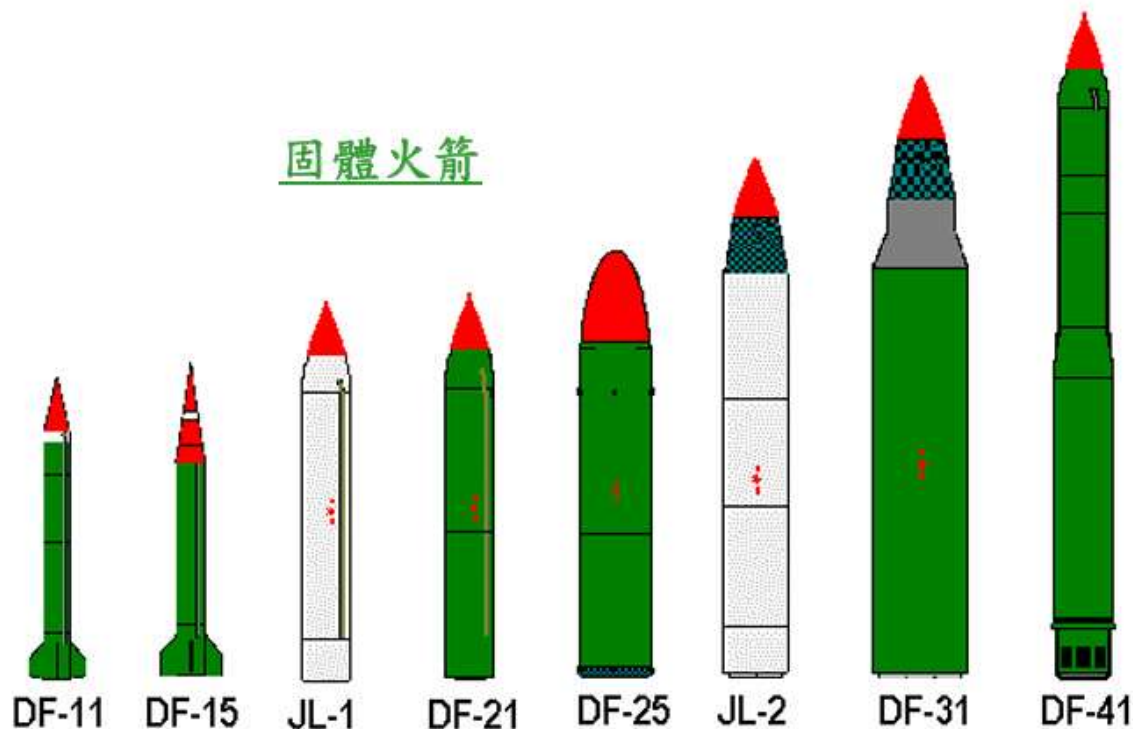


中共彈道飛彈

液體火箭
都已除役



固體火箭



固體火箭的應用發展

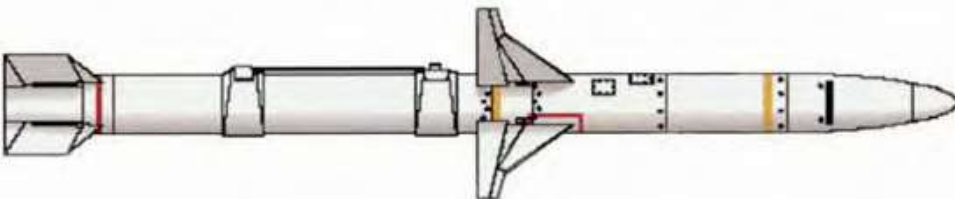
PAC-3(美)
防空



THAAD(美)
高層防禦



AARGM(美)
空射反輻射



Astra(印)
空對空



IRIS-T(德)
空對空



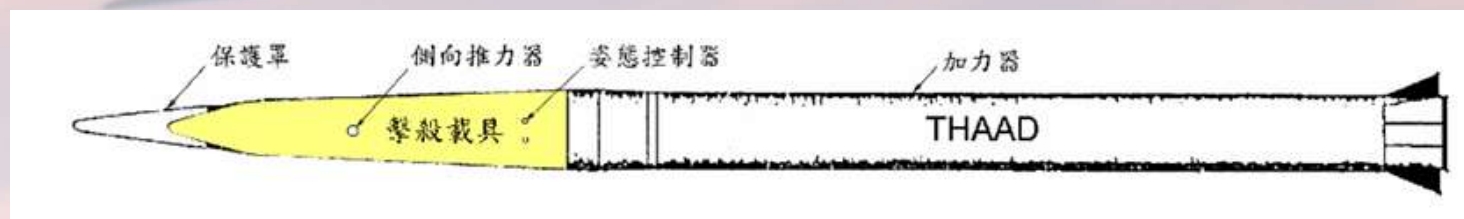
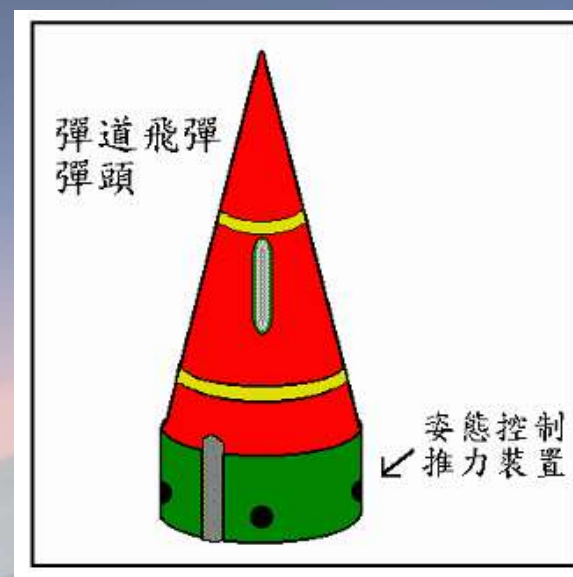
M-5(法)



SS-N-30
Bulava(俄)

液體火箭的應用發展

- 衛星發射載具之主推進器
- 彈道飛彈終端變軌/姿態控制:俄國白楊彈道飛彈之彈頭
- 防空飛彈動能擊殺載具動力/姿態控制:THAAD之KKV



各國渦輪引擎飛彈

國家	飛彈名稱	飛行速度	航程(km)	推進系統外形	引擎編號	彈徑(m)	彈長(m)
美國	CALCM	M0.65	1300	進氣道位於彈上方	F107-WR-101	0.693	6.32
	Harpoon	M0.7	120	沒入式進氣道	J402-CA-400	0.343	3.85
	SLAM-ER	M0.7	280	沒入式進氣道	J402-CA-100-2	0.343	4.37
	JASSM	M0.8	>370	沒入式進氣道	J402-CA-100-9B	0.550	4.26
	Tomahawk	M0.73	1300	突出式進氣道	F107-WR-402	0.518	5.56
	Tomahawk IV	M0.84	1800	沒入式進氣道	F415-WR-402	0.518	6.3
俄國	Kh-35(AS-20)	M0.9	130	突出式進氣道	TRDD-50	0.42	4.4
	Kh-55(AS-15A)	M0.77	3000	引擎外掛	TRDD-50	0.514	6.04
	Kh-555(AS-15C)	M0.77	3500	引擎外掛	TRDD-50AT	0.514	6.04
	Kh-65SE	M0.75	600	引擎外掛	n/a	0.514	6.04
	Kh-SD	M0.75	600	引擎於彈體內	n/a	0.514	6.04
	Kh-101	M0.7	5000	引擎外掛	TRDD-50AT	0.55	7.45
	Kh-59MK(AS-18)	M0.75	285	引擎外掛	TRDD-50	0.42	5.7
	3M54(SS-N-27)	M0.7	220	引擎於彈體內	TRDD-50	0.533	8.22
	Apache	M0.82	140	突出式進氣道	TRI 60-30	0.63	5.1
法國	Scalp EG (Storm Shadow)	M0.8	650	突出式進氣道	TRI 60-30	0.63	5.1
	Scalp Naval	M0.9	1000	突出式進氣道	n/a	0.53	n/a
	Exocet blk3	M0.9	180	四個突出式進氣道	TRI-40	0.35	5.8 ³⁷

各國渦輪引擎飛彈(續)

國家	飛彈名稱	飛行速度	航程(km)	推進系統外形	引擎編號	彈徑(m)	彈長(m)
中共	HY-4(C-201)	M0.8	135	突出式進氣道	WP-11	0.76	7.36
	YJ-62(C-602)	M0.8	280	突出式進氣道	n/a	0.54	6.1
	YJ-63(KD-63)	M0.7	250	突出式進氣道	n/a	0.76	7.36
	YJ-82(C-802)	M0.9	120	突出式進氣道	TRI 60-2	0.36	5.3
	YJ-83(C-803)	M0.85	160	突出式進氣道	TRI 60-2	0.36	5.3
	HN-1	M0.7	600	突出式進氣道	W40	0.52	6.4
	HN-2	M0.9	1400	突出式進氣道	TRDD-50	0.53	6.4
	HN-3	M0.9	3000	突出式進氣道	n/a	0.75	n/a
挪威	NSM	M0.95	200	突出式進氣道	TRI-40	0.69	3.96
德國	KEPD 350	M0.9	350	二個突出式進氣道	WJ 38-15	0.63	5.1
瑞典	RBS 15 Mk3	M0.8	200	突出式進氣道	TRI 60-5	0.5	4.35
義大利	Otomat(Teseo)	M0.9	180	四個突出式進氣道	TR281	0.46	4.46
	Milas	M0.9	60	四個突出式進氣道	TR281	0.46	6.0
以色列	Gabriel 4LR	n/a	200	突出式進氣道	n/a	0.44	4.7
	Delilah	M0.9	300	突出式進氣道	BS 175	0.33	2.71
南非	Torgos	M0.7	300	突出式進氣道	TRI 60	0.64	4.86

美國渦輪引擎飛彈



CALCM - 渦輪扇F107-WR-101



Harpoon-渦輪引擎J402-CA-400

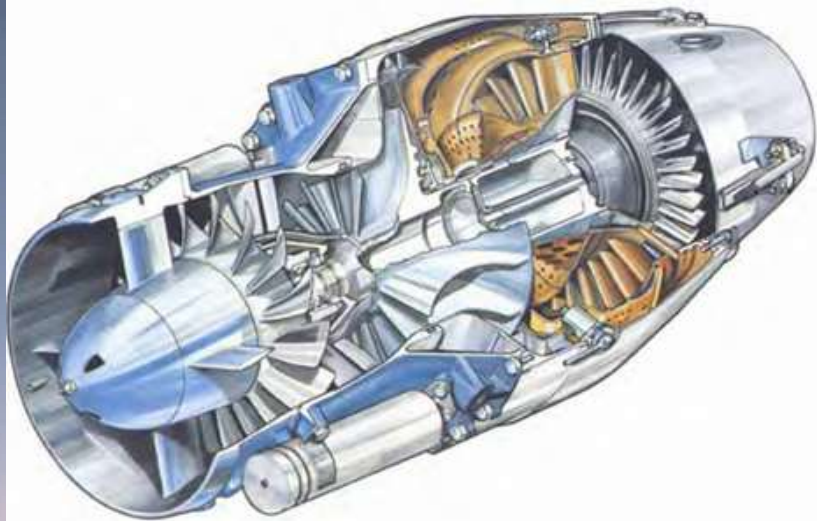


Tomahawk-渦輪扇F107-WR-402



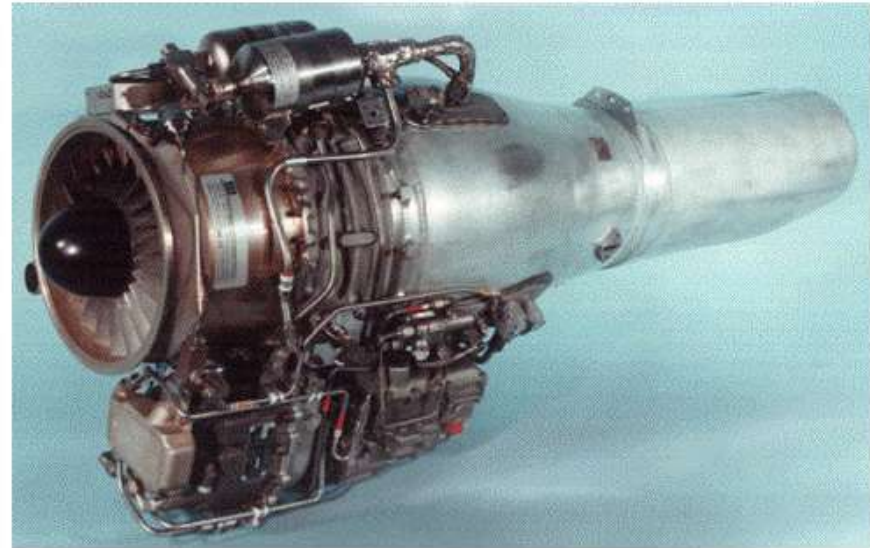
JASSM-渦輪引擎J402-CA-100

使用之渦輪引擎



Teledyne J402

一級軸流式壓縮器
一級離心式壓縮器
最大推力300kg
SFC=1.2~1.52
12.5"φ x 29.4"L



Williams International F107

雙軸驅動
二級軸流低壓壓縮器
一級離心高壓壓縮器
最大推力288kg
SFC=0.683~0.643
12.0"φ x 36.9"L

俄國渦輪引擎飛彈



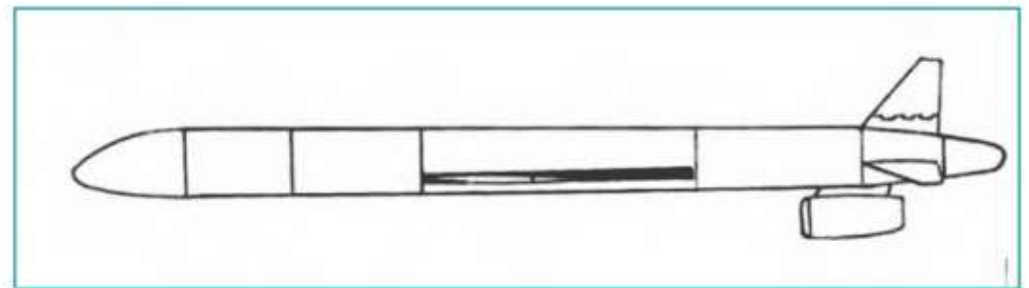
Kh-59MK (AS-18)



3M54 (SS-N-27)



Kh-555 (AS-15)



Kh-101

俄國渦輪引擎飛彈(續)



CLUB 3M-54E系列飛彈



X-35E飛彈海岸防禦系統



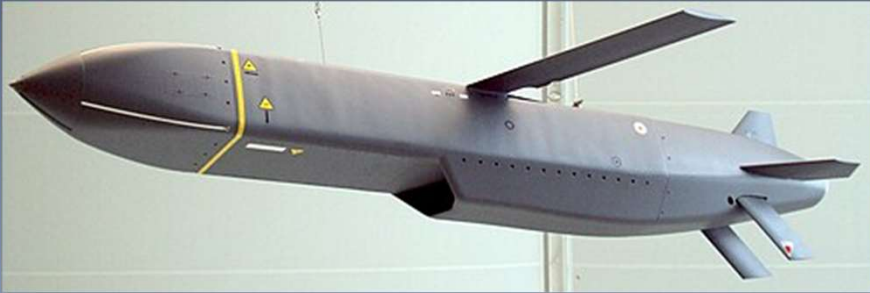
X-59MK II/ X-69匿蹤飛彈

使用之渦輪引擎



俄國TRDD-50 渦輪扇引擎

MBDA渦輪引擎飛彈



STORM SHADOW/ SCALP EG



TAURUS



EXOCET MM40 BLK IIIC



OTOMAT MK2 blk IV

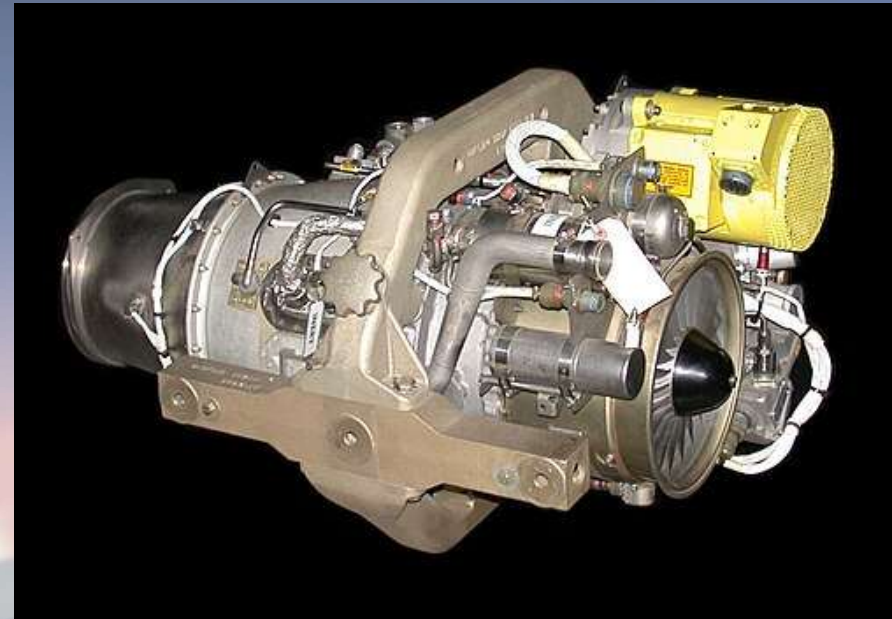
使用之渦輪引擎



法國渦輪噴射引擎TRI-60-2



法國渦輪噴射引擎TRI-60-30



美國WILLIAM F112 渦輪扇引擎
TAURUS 用引擎

中共渦輪引擎飛彈



鷹擊62 (YJ-62)



鷹擊63 (YJ-63)



鷹擊82 (YJ-82)



鴻鳥二號 (HN-2)

渦輪引擎飛彈發展趨勢

- 遠程陸攻巡弋飛彈採用渦輪扇引擎：
 - 美國戰斧飛彈四型航程**1800km**
 - 美國JASSM-ER航程**1000km**
 - 俄國Kh-555與Kh-101航程**3000km**
 - 法國Scalp Naval航程**1000km**
 - 中共鴻鳥二號**1400km**，鴻鳥三號**3000k**
- 匿蹤成趨勢：
 - 美國**AGM-158**
 - **MBDA STORM SHADOW /TAURUS..**
- 渦輪引擎飛彈終端加速至超音速：
 - 俄國**3M54**反艦飛彈終端以火箭加速

在衝壓引擎飛彈的應用



各國衝壓引擎飛彈

國家	飛彈名稱/用途	飛行速度	航程(km)	推進系統	彈徑(m)	彈長(m)	現況
美國	Coyote 靶彈	M2.5	80	四個方進氣道 固體導管	0.35	5.62	完成飛 試驗證
	AMRAAM 空對空	M2.5+	120	雙方形進氣道 固體導管	0.178	3.65	研發中
俄國	SA-6 地對空	M2.8	25	四個圓形進氣道 固體導管	0.34	5.8	服役中
	Sunburn (SS-N-22)反艦	M2.1- M2.5	160	四個半圓形進氣道 液體	0.76	9.74	服役中
	Shipwreck (SS-N-19)反艦	M2.5	500	鼻端進氣道 液體	0.85	10.0	服役中
	Kh-31A(AS-17) 空對地	M3.0	100	四個圓形進氣道 液體	0.36	5.23	服役中
	Kh-31P 反輻射	M3.0	200	四個圓形進氣道 液體	0.36	5.23	服役中
	Yakhont (SS-N-26)反艦	M2.0- M2.6	120- 300	鼻端進氣道 液體	0.67	8.3	服役中
	R-77M-PD 空對空	M4.0	100	二或四個方形進氣道 固體導管	0.225	3.7	研發中

各國衝壓弓|擎飛彈(續)

國家	飛彈名稱/用途	飛行速度	航程(km)	推進系統	彈徑(m)	彈長(m)	現況
法國	ASMP 空對地	M2.0- M3.0	300	雙方形進氣道 液體	0.35	5.38	服役中
	ASMP-A 空對地	M2.0- M3.0	600	雙方形進氣道 液體	0.35	n/a	研發中
英國	Sea Dart 艦對空	M2.5	40	鼻端進氣道 液體	0.42	4.36	服役中
德國	Armiger 反輻射	M2.0- M3.0	100	四個倒置方形進氣道 固體導管	0.20	4.0	研發中
歐盟	Meteor 空對空	M2.5- 4.0	100+	雙方形進氣道 固體導管	0.18	3.65	研發中
印度	Akash 地對空	M2.8	30	四個圓形進氣道 固體導管	0.35	5.8	SA-6 技轉
	Brahmos(PJ-10) 反艦	M2.0- 2.8	120- 300	鼻端進氣道 液體	0.67	8.3	Yahont 技轉
中共	HY-3(C-301) 岸基反艦	M2.0	130	外掛式引擎 液體	0.76	9.46	服役中
	YJ-16(C-101) 反艦	M2.0	45	外掛式引擎 液體	0.54	6.5	服役中
	YJ-12 空對空/地	M2.0+	200	雙方形進氣道	0.36	5.1	研發中
	YJ-91 空對地	M3.0	400	四個圓形進氣道 液體	0.36	5.23	Kh-31P 技轉

俄國衝壓引擎飛彈

SA-6



Shipwreck



Kh-31



Sunburn



Yakhont



Brahmos



歐美衝壓引擎飛彈



法國ASMP飛彈

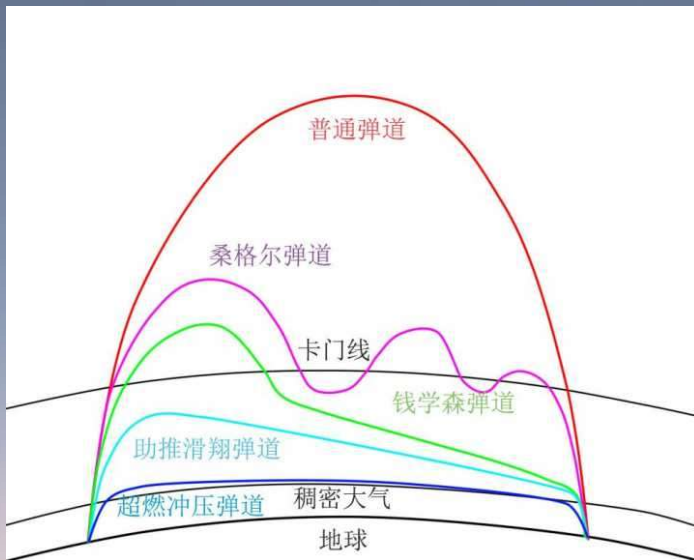


MBDA流星飛彈

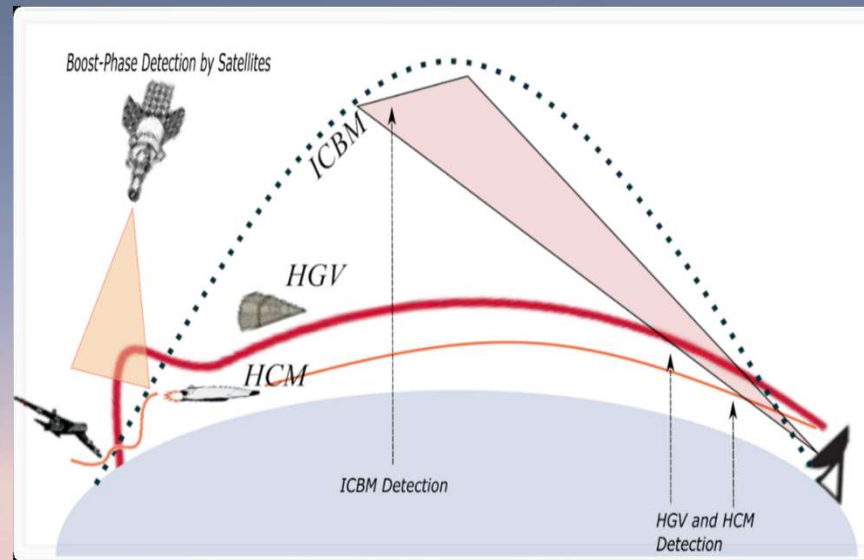


美國土狼靶彈

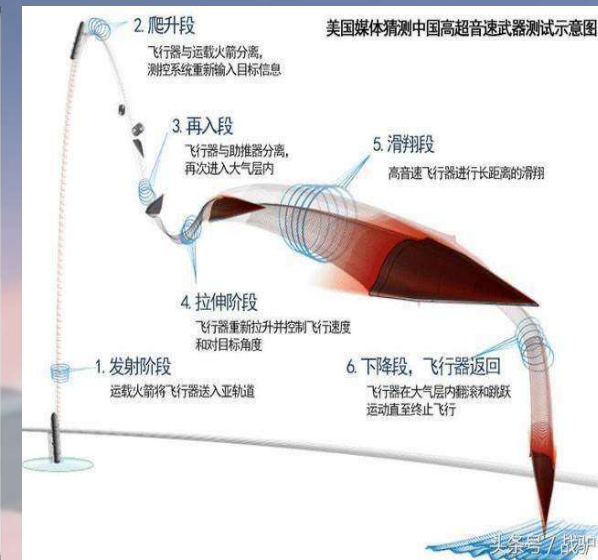
各類型彈道比較



各類型載具飛行軌跡



ICBM HGV 與 HCM 飛行軌跡比較



HGV飛行軌跡

HGV: Hypersonic Glide Vehicle
HCM: Hypersonic Cruise Missile

HGV與HCM發展之優勢

各國超燃衝壓引擎飛彈現況



俄國鎚石(佈署)

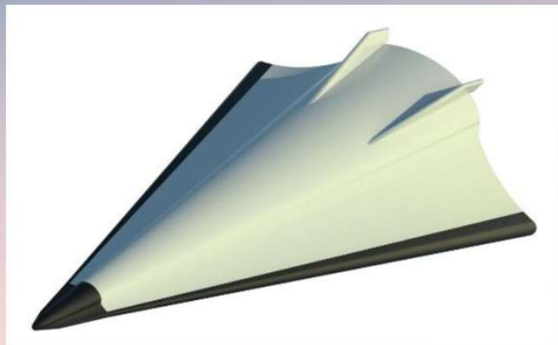


中共YJ-19(2025.09.03)



俄國/印度 Brahmos II
研發中

各國極音速滑翔飛彈現況



俄國先鋒HGV

中共DF-17 WU-14載具

美國AGM-183A
Dark Hawk 彈頭⁵⁵

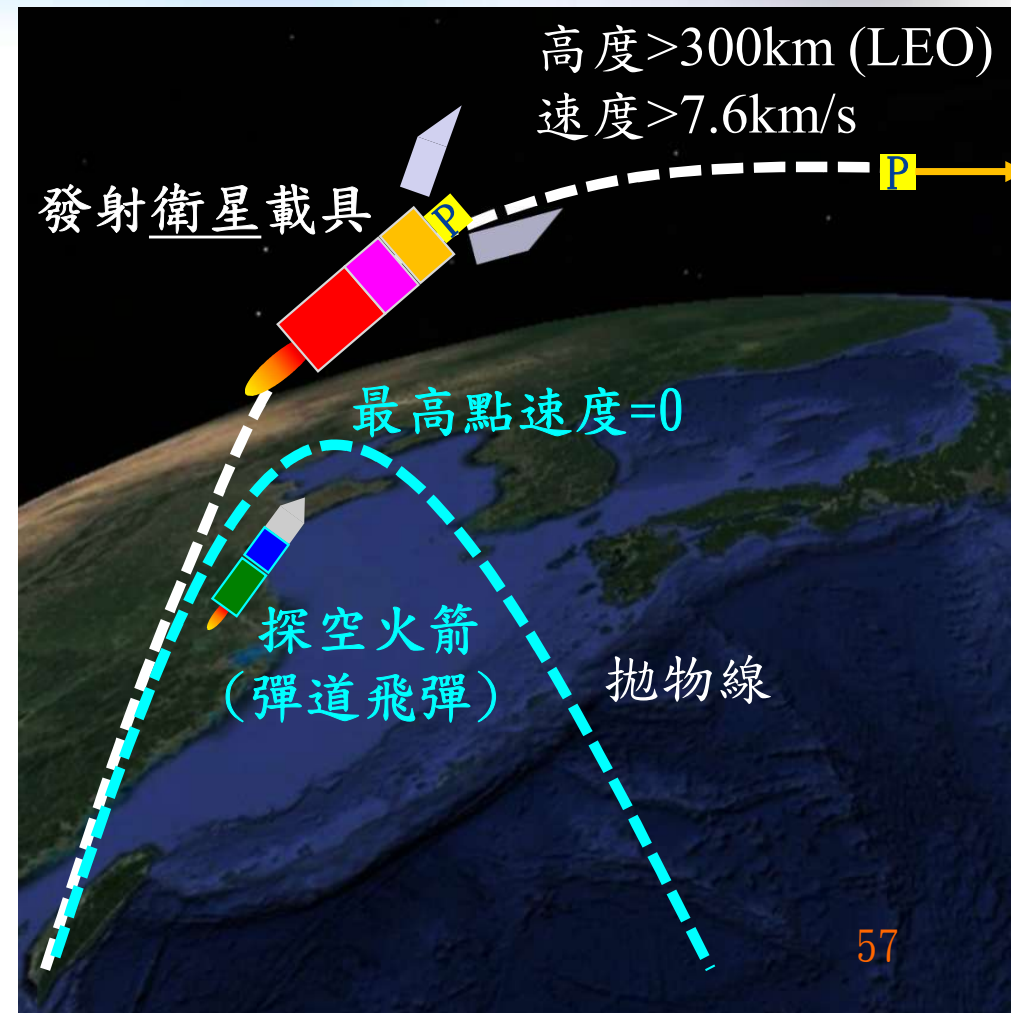
在衛星發射載具上的應用



發射載具推進系統

- 發射衛星載具不但要能夠抵達預定高度，同時還必須具備足夠軌道速度，其技術規格與探空火箭及彈道飛彈不同。

特性	小型發射載具	探空火箭
高度	>300 km	50~300 km
最高點速度	>7.6 km/s	接近0
案例比較	Epsilon一號(日本)	探空十號(台灣)
起飛重量	91公噸	1.7公噸
第一節推力	2,271 kN	196 kN
第一節燃時	112 秒	5.5 秒



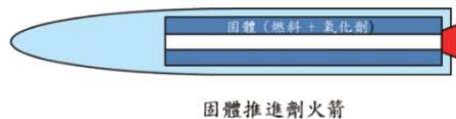
衛星發射載具推進技術發展

- 目前最廣泛應用於衛星發射載具的推進器為**化學火箭**，可細分為以下三類：

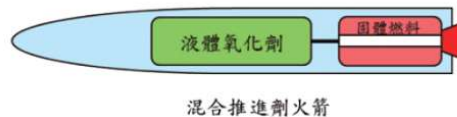
◆液體火箭



◆固體火箭

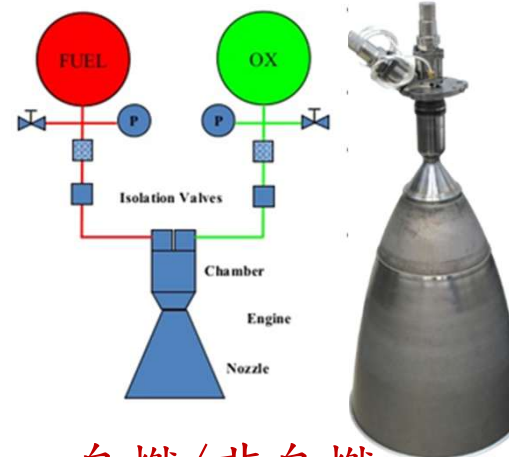


◆混合火箭



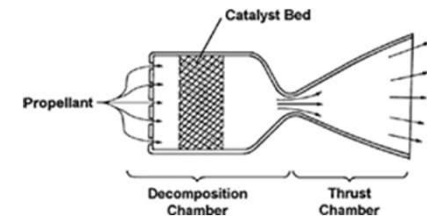
圖片來源:TASA

- 液體火箭可再細分為
 - 雙基火箭 (bi-propellant)



自燃/非自燃

- 單基火箭 (mono-propellant)



衛星發射載具推進技術發展現況

- 化學火箭特性比較:一般以比衝值Specific Impulse, ISP(即單位質量所產生之推力)大小來判定，如下表所示；

Bi-propellant Fuel/Oxidizer	Max. ISP (s) Pc=1000 psi
LH ₂ /LOX	457
RP-1/LOX	358
CH ₄ /LOX	368
RP-1/H ₂ O ₂	331
N ₂ H ₄ /NTO	348
MMH/NTO	341

Mono-propellant	ISP (s)
N ₂ H ₄	242
H ₂ O ₂	192

Hybrid Rocket	ISP
Paraffin/LOX	292
HTPB/H ₂ O ₂	240
HTPB/N ₂ O	180



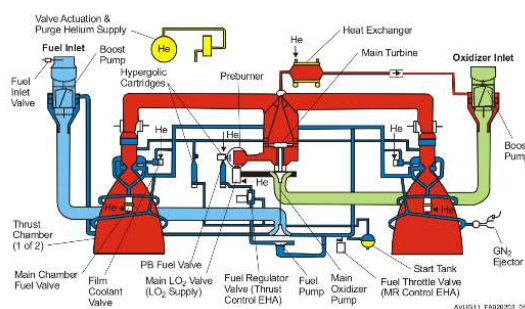
MR-106L 22N
Hydrazine Monopropellant Thruster
ISP: 228~235



Innospace:
Hyper-15 Hybrid Rocket
Paraffin/LOX Propellants
ISP ≅ RP-1/LOX
Thrust: 150KN



RD180 Engine (RP-1/LOX)

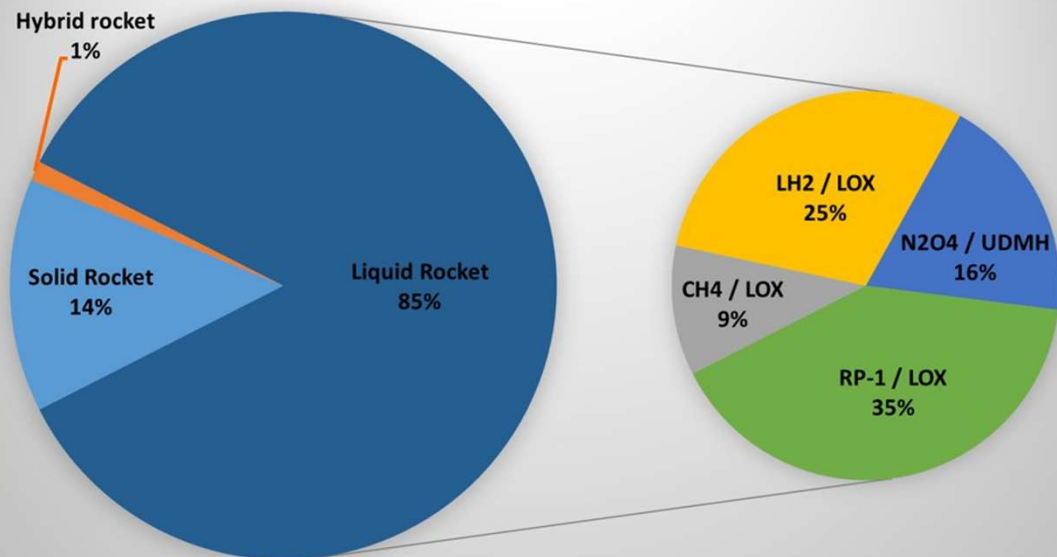


各國發射載具數量



現役/發展中的火箭引擎種類

現役/發展中的火箭引擎種類



Citation: Comparison of orbital rocket engines - Wikipedia

	Raptor 1	Raptor 2	Raptor 3	Raptor 3.1	Raptor 3.2	LEET-1337
Mass	2000 kg	1600 kg	1400 kg	1400 kg	1400 kg	1100 kg
Thrust	185 tons	230 tons	269 tons	276 tons	300 tons	320 tons
Chamber Pressure	250 bar	300 bar	350 bar	370 bar	400 bar	450 bar
Specific Impulse	330	327	327	327	327	327
TW engine only	93	144	192	197	214	318

They are now building seven engines a week. But Elon Musk even set his expectation that SpaceX has to make a capacity of 2000 raptors per year.

EVERYDAY
ASTRONAUT



	Merlin	RD-180	F-1	Raptor	BE-4	RS-25
Cycle	Open	Closed (LOX rich)	Open	Closed (Full Flow)	Closed (LOX rich)	Closed (Fuel Rich)
Fuel Type	RP-1	RP-1	RP-1	Methane	Methane	Hydrogen
Total Thrust	0.84 MN	3.83 MN	6.77 MN	2.00 MN	~2.40 MN	1.86 MN
Thrust : Weight	198 : 1	78 : 1	94 : 1	107 : 1	~80 : 1	73 : 1
Specific Impulse (ISP)	282 sl 311 vac	311 sl 338 vac	263 sl 304 vac	330 sl ~350 vac	~310 sl ~340 vac	366 sl 452 vac
Chamber Pressure	97 bar	257 bar	70 bar	270 bar	~135 bar	206 bar

各型高性能液體火箭

	RP-1	METHANE	HYDROGEN
Density	813 g/L	422 g/L	70 g/L
Oxidizer : Fuel Ratio (as used)	2.7 : 1	3.7 : 1	6 : 1
1 Liter of LOX : X Liter of Fuel	1 : 0.52	1 : 0.73	1 : 2.7
Efficiency (Maximum Theoretical ISP)	370s	459s	532s
Combustion Temp	3670 K	3550 K	3070 K
Boiling Point	490 K	111 K	20 K
Combustion Byproducts	CO ₂ & H ₂ O & icky stuff	CO ₂ & H ₂ O	H ₂ O
Manufacturable on Mars?	No	Yes	Yes

EVERYDAY
ASTRONAUT

液體燃料特性比較

現役/發展中的火箭引擎種類



Model: YF-77
Propellants: LH2/LOX
Thrust: 700kN @ vacuum
Chamber Pressure: 101 bar
ISP: 428 sec @ vacuum
Application: LM5



Model: YF-100
Propellants: RP-1/LOX
Thrust: 1340kN @ vacuum
Chamber Pressure: 180 bar
ISP: 335 sec @ vacuum
Application: LM5~LM8



Model: TQ-12(天鵝)
Propellants: CH4/LOX
Thrust: 785kN @ vacuum
Chamber Pressure: 101 bar
ISP: 337 sec @ vacuum
First hot fire: May 2019
Application: ZQ-2(朱雀二號)
Manufacturer: LandSpace



朱雀二號遙二發射與成功入軌
July 12, 2023

太空推進技術發展現況

- 現役發射載具-**重型**(>50,000 kg to LEO)、**大型**(20,000-50,000 kg to LEO)

型號	所屬	首飛	酬載(kg)	推進系統
太空發射系統(SLS)	美國	2022	130,000	兩節 液體火箭 (RS-25:LH2/LOX、RL10: LH2/LOX) 兩枚輔助 固體火箭
Starship	Space X (美國)	2024	150,000	兩節 液體火箭 (Raptor:CH4/LOX)
獵鷹重型(Falcon Heavy)	Space X (美國)	2018	63,800	兩節 液體火箭 (Merlin:RP-1/LOX) 輔助 液體火箭 (Merlin:RP-1/LOX)
獵鷹九號(Falcon 9)	Space X (美國)	2010	22,800	兩節 液體火箭 (Merlin:RP-1/LOX)
三角洲四號 (Delta 9250H)	ULA(美國)	2004	28,790	兩節 液體火箭 (RS-68、RL-10:LH2/LOX) 輔助 液體火箭 (RS-68:LH2/LOX)
質子M型(протон-M)	俄羅斯	2001	23,000	四節 液體火箭 (RD253、RD-2010、RD-0212、 S5.98M:UDMH/NT0)
安加拉A5	俄羅斯	2014	24,500	兩節 液體火箭 (RD-191、RD0124:LH2/LOX) 上層 液體火箭 (S5.98M:UDMH/NT0)
亞利安5號ES	歐洲太空總署	1996	21,000	兩節 液體火箭 (Vulcain2、Aestus:LH2/LOX) 輔助 固體火箭 (P241)
長征五號(5B)	中國	2016	25000	一節 液體火箭 (YF-77:LH2/LOX) 四枚輔助 液體火箭 (YF-100:RP-1/LOX) 上層 液體火箭 (YF-50D:UDMH/NT0)

太空推進技術發展現況

● 現役發射載具-中型(2,000-20,000 kg to LEO)

型號	所屬	首飛	酬載(kg)	推進系統
亞特拉斯五型(Atlas V)	ULA(美國)	2002	9,750	輔助 <u>固體火箭</u> +兩節 <u>液體火箭</u> (RP-1、LH2/LOX)
安塔瑞斯(Antares)	軌道科學公司(美國)	2013	6,120	<u>液體火箭</u> (RP-1/LOX)+ <u>固體火箭</u> + <u>液體火箭</u> (MMH/NTO)
聯合1號(Soyuz-1)	俄羅斯	2013	2,850	輔助 <u>液體火箭</u> (RG-1/LOX)+兩節 <u>液體火箭</u> (RG-1/LOX)
聯合2號(Soyuz-2.1b)	俄羅斯	2006	8,200	輔助 <u>液體火箭</u> (RG-1/LOX)+兩節 <u>液體火箭</u> (RG-1/LOX)
安加拉1.2型	俄羅斯	2014	3,800	兩節 <u>液體火箭</u> (RP-1/LOX)+上層載具(<u>液體火箭</u>)
長征二號系列(CZ-2F)	中國	1999	8,600	輔助 <u>固體火箭</u> +兩節 <u>液體火箭</u> (UDMH/NTO)
長征三號系列(CZ-3C)	中國	2008	9,100	輔助 <u>液體火箭</u> (UDMH/NTO)+三節 <u>液體火箭</u>
長征四號系列(CZ-4C)	中國	2006	4,200	三節 <u>液體火箭</u> (UDMH/NTO)
長征六號A(CZ-6A)	中國	2022	4,000(SSO)	輔助 <u>固體火箭</u> +兩節 <u>液體火箭</u> (RP-1/LOX)
長征七號(CZ-7)	中國	2016	14,000	輔助 <u>液體火箭</u> (RP-1/LOX)+兩節 <u>液體火箭</u> (RP-1/LOX)
長征八號(CZ-8)	中國	2020	5,000(SSO)	兩節 <u>液體火箭</u> (RP-1/LOX)
天龍二號	天兵科技公司(中國)	2023	2,000	兩節 <u>液體火箭</u> (LH2/LOX)+ <u>液體火箭</u> (MMH/NTO)
朱雀二號	藍箭航太公司(中國)	2023	6,000	兩節 <u>液體火箭</u> (LH2/LOX)
引力一號	東方空間公司(中國)	2024	6,500	四枚輔助 <u>固體火箭</u> +三節 <u>固體火箭</u>
H-IIA	日本	2001	15,000	輔助 <u>固體火箭</u> +兩節 <u>液體火箭</u> (LH2/LOX)

衛星發射載具推進技術發展現況

- 現役的中、重型發射載具皆為液體火箭，大都使用RP-1/LOX與LH₂/LOX

亞特拉斯五型(Atlas V)



- ❑ Booster: HTPB
- ❑ 1st stage: RP-1/LOX
- ❑ 2nd stage: LH₂/LOX

亞利安五型(Ariane 5)



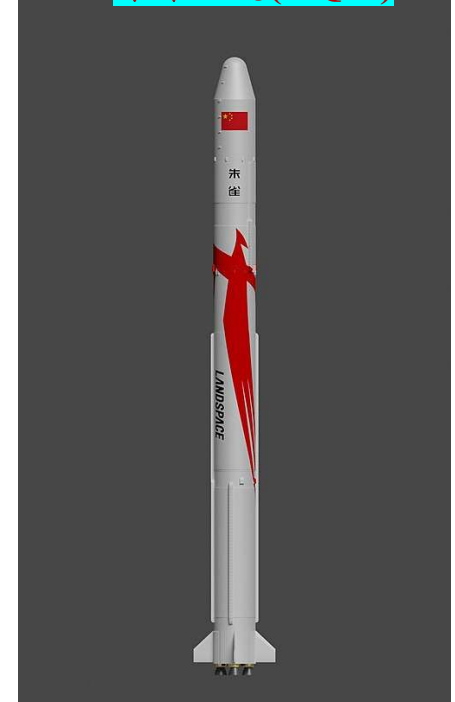
- ❑ Booster: HTPB
- ❑ Core stage: LH₂/LOX
- ❑ Upper stage: LH₂/LOX

獵鷹九號(Falcon 9)



- ❑ 1st stage: RP-1/LOX
- ❑ 2nd stage: RP-1/LOX

朱雀2號(ZQ-2)



- ❑ 1st stage: CH₄/LOX
- ❑ 2nd stage: CH₄/LOX

太空推進技術發展現況

- 現役發射載具-小型(<2,000 kg to LEO)

型號	所屬	首飛	酬載(kg)	推進系統
飛馬座(Pegasus)	軌道科學公司(美國)	1990	443(LEO)	三節 <u>固體火箭</u> +上層載具(<u>液體火箭</u>)
米諾陶 (Minotaur IV)	軌道科學公司(美國)	2010	1735(LEO)	四節 <u>固體火箭</u>
電子火箭(Electron)	火箭實驗室(美國)	2017	300(LEO)	兩節 <u>液體火箭</u> (<u>RP-1/LOX</u>)+上層載具(<u>液體火箭</u>)
織女星(Vega)	歐洲太空總署	2012	1430(LEO)	三節 <u>固體火箭</u> +上層載具(<u>液體火箭</u>)
天箭(стрела)	俄羅斯	2003	1400(LEO)	兩節 <u>固體火箭</u>
快舟一號	中國	2013	430(SSO)	三節 <u>固體火箭</u>
長征六號	中國	2015	1080(SSO)	三節 <u>液體火箭</u> (<u>RP-1/LOX</u> 、 <u>UDMH/NTO</u>)
長征十一號	中國	2015	700(SSO)	四節 <u>固體火箭</u>
捷龍一號	中國	2019	150(SSO)	四節 <u>固體火箭</u>
雙曲線一號	星際榮耀(中國)	2019	300(LEO)	四節 <u>固體火箭</u> +姿態控制 <u>液體火箭</u> (<u>MMH/NTO</u>)
穀神星一號	星河動力(中國)	2020	350(LEO)	四節 <u>固體火箭</u>
艾普斯龍(Epsilon)	日本	2013	1200(LEO)	三節 <u>固體火箭</u> +上層載具(<u>液體火箭</u>)
世界號	南韓	2022	1500(LEO)	三節 <u>液體火箭</u> (<u>RP-1/LOX</u>)

衛星發射載具推進技術發展現況

● 現役小型發射載具主要可分為三種型式

1. **全固體火箭**: 過去是針對軍事上快速部屬的需求，如Minotaur、長征十一號、快舟一號。近年來中國的民間公司開始將其應用於商業發射，如捷龍一號、雙曲線一號。
2. **全液體火箭**: 主要使用RP-1/LOX作為前兩節推進劑，第三節使用其他燃料，如電子火箭、長征六號；**採用CH₄/LOX推進劑之發射載具已逐漸成熟；混合火箭仍在研發測試中。**
3. **固體火箭搭配上層的液體火箭**: 利用可調控的液體火箭作為最後一節，提高入軌精度，如飛馬座(Pegasus)、織女星(Vega)、艾普斯龍(Epsilon)

全固體火箭



穀神星



捷龍一號

全液體火箭

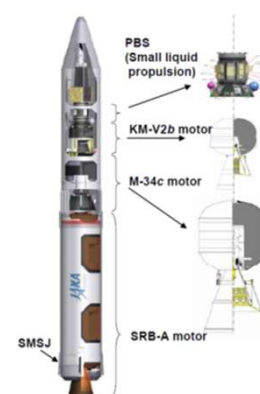


長征六號

固體火箭+液體火箭



織女星(Vega)



艾普斯龍(Epsilon)



飛馬座
(Pegasus)

發射載具應用小結

- ◆ 中、重型發射載具皆為液體火箭，大都使用**RP-1/LOX**或**LH2/LOX**
- ◆ 小型發射載具較多元，有全固體火箭、全液體火箭及固體火箭搭配上層的液體火箭
- ◆ 發射載具用火箭絕大部分採用液體火箭
- ◆ 可重複使用火箭為發展趨勢並採用**CH4+LOX**
 - 性能優於煤油
 - 燃燒產物乾淨易於維修-降低維修成本有利於重複使用
 - 容易取得、價格便宜-成本約煤油1/3、液態氫1/30