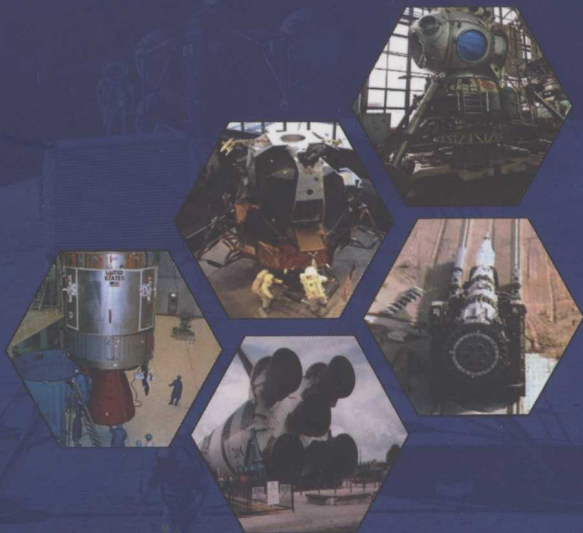




航天科技图书出版基金资助出版

载人登月推进系统

李 斌 丁丰年 张小平 编著



中国宇航出版社

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (C I P) 数据

载人登月推进系统 / 李斌等编著. — 北京 : 中国
宇航出版社, 2011. 1

ISBN 978-7-80218-913-3

I. ①载… II. ①李… III. ①载人航天器—推进系统
—研究②月球探索—研究 IV. ①V476. 2②V1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 263898 号

责任编辑 阎 列

责任校对 祝延萍

封面设计 宇航数码

出 版
发 行

中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号 邮 编 100830
(010)68768548

网 址 www.caphbook.com/ www.caphbook.com.cn

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承 印 北京画中国画印刷有限公司

版 次 2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷

规 格 880×1230 开 本 1 / 32

印 张 15.625 字 数 433 千字

书 号 ISBN 978-7-80218-913-3

定 价 78.00 元

本书如有印装质量问题,可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的,旨在鼓励航天科技人员著书立说,不断积累和传承航天科技知识,为航天事业提供知识储备和技术支持,繁荣航天科技图书出版工作,促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定,由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作,航天工程技术著作,航天科技工具书,航天型号管理经验与管理思想集萃,世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著,向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次,资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站,点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表;也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址: <http://www.caphbook.com>

电话: (010)68767205, 68768904

序

空间探索与开发是航天发展的目标，是促进科技进步的动力。20世纪60年代以来，人类进行了各种探月活动，并在20世纪90年代掀起了第二轮探月高潮，月球资源、能源与特殊环境的开发利用，展现出了广阔的前景，将对人类社会的可持续发展具有重大意义。

中国作为航天大国，开展空间探索、空间开发与利用，可以促进科学技术的进步，促进国民经济的发展，增强民族的凝聚力，为人类社会的进步作出贡献。随着中国载人航天工程的顺利实施和嫦娥1号、嫦娥2号月球探测器成功进行月球探测，如何完成载人登月任务，开展月球探测与应用活动，将是未来我国航天发展面临的问题。

国外在载人登月重型运载火箭和登月飞船技术领域进行了大量研究，具有许多成功经验和失败教训。李斌、丁丰年和张小平同志多年来一直积极跟踪国外该领域的发展动态，研究了美国和苏联登月计划中运载火箭和登月飞船的情况以及未来的发展动态，并提出了我国载人登月重型运载火箭和登月飞船动力系统的方案设想。

《载人登月推进系统》一书收集了近年来国内外的相关研究成果，可供领导决策和相关技术人员方案论证时借鉴。

张贵田

2011年2月

前 言

20世纪60年代，美国阿波罗计划取得了举世瞩目的成就，人类首次登上了月球。20世纪90年代，世界各国重新提出了开展月球探测和开发利用月球的议题。2004年1月15日美国总统布什宣布了“空间探测新构想”，指出美国未来航天发展的重点是重返月球、登陆火星和完成国际空间站建设与维护。2005~2006年，美国国家航空航天局选定猎户座飞船和两种战神运载火箭作为重返月球的运输工具。与此同时，俄罗斯、欧空局和印度也提出了相应的载人登月初步计划。我国也不失时机地制定了“绕、落、回”三期探月计划，为我国未来实现载人登月奠定了基础。

鉴于我国现有的航天运载器发射能力过低，无法实现载人登月任务，因此我们对20世纪60年代美国的阿波罗计划和苏联的登月飞行计划，以及载人登月运载火箭的推进系统进行了较为细致的探索性研究。

美国土星5三级运载火箭和由服务舱、下降级、上升级组成的阿波罗飞船方案为人类载人登月取得了成功的经验，而苏联的由三子级火箭和四级登月系统构成的N-1登月运载火箭方案也为各国提供了失败的教训。

我们在探讨载人登月运载器推进系统的方案时，做了一些前期预研工作。早期工作的重点是收集和整理20世纪60年代美国阿波罗登月计划和苏联登月飞行计划的相关资料。然后，根据我国的国情和技术条件，提出我国载人登月火箭推进系统的初步方案。描述这些方案的论文在2004年中国科协年会上首次发表，并在2006年中国宇航学会首届学术年会和2007年中国宇航学会航天运载系统专业委员会的学术讨论会上分别发表了我国载人登月运载器推进系统方案的论文，这些论文的观点是经过与相关专家多次磋商、研究和修改后提出的。2008年，我们完成了“探月与载人登月工程上面级

较大推力发动机方案探讨”、“液氧/烃火箭发动机发展趋势及对策”等专题研究，并于同年在推进技术研究院内部出版了《载人登月运载火箭及宇宙飞船推进系统方案研究》论文专辑。

本书是在《载人登月运载火箭及宇宙飞船推进系统方案研究》论文专辑的基础上，结合近几年国内外载人登月计划的发展和变化，重新整理撰写而成的。本书研究的重点是载人登月运载火箭的推进系统，文中涉及的运载火箭方案，多为作者的预想方案，有的方案凝聚了其他专家的意见，在此向他们致以衷心的感谢！

本书在写作过程中，得到了很多专家的帮助。王衍芳为译校收集的论文花费了很多精力；陈建华对书中涉及的推进系统方案提出了宝贵意见；林革、刘昌波对登月舱下降级变推力发动机方案提出了新的见解；邹宇、马键对宇宙飞船推进剂供应分系统提出了改进方案；情报档案室的有关人员为本书提供了丰富的资料；尤其是吴涛、卢钢、马东英等为本书提供了发动机相关参数的计算数据，邹宇绘制了重型运载火箭方案构型图。在此一一表示感谢。

本书第1章~第3章由刘昌波校对，第4章~第6章由陈祖奎校对，第7章、第8章由邹宇校对，全书由靳治礼、靳爱国总校对。

特别感谢推进技术研究院科技委主任张贵田院士为本书作序，十一所科技委主任张恩昭等领导对本书的出版所给予的关心与支持。

本书收集的国外资料，因出处不同，某些参数的数据略有差异，或存在错误，仅供参考之用。

本书提出的推进系统方案纯属作者一家之言，可能有不妥之处，甚至可能存在错误，敬请读者指正。

希望本书能够为我国未来载人登月及空间探测研究提供帮助，如能尽到微薄之力，我们将不胜荣幸。



2011年2月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 载人登月计划	2
1.2 推进系统	6
1.3 航天运载器主推进系统	8
1.4 航天运载器上面级推进系统	11
参考文献	14
第 2 章 美国土星 5 运载火箭及阿波罗飞船推进系统	15
2.1 概述	15
2.1.1 阿波罗载人登月计划	15
2.1.2 土星 5 运载火箭与阿波罗飞船的组成	18
2.2 土星 5 运载火箭推进系统	27
2.2.1 推进系统	27
2.2.2 F-1 发动机	32
2.2.3 J-2 发动机	35
2.3 阿波罗飞船	37
2.3.1 阿波罗飞船的飞行任务	37
2.3.2 阿波罗飞船的基本构型	38
2.4 阿波罗飞船推进系统特点与工作原理	42
2.4.1 阿波罗飞船主推进系统设计特点	43
2.4.2 阿波罗飞船主推进系统工作原理	44

2.4.3	阿波罗飞船反作用控制系统	55
2.4.4	阿波罗飞船的飞行遥测参数	61
2.5	阿波罗飞船主推进系统的研制	68
2.5.1	服务舱主推进系统	68
2.5.2	阿波罗登月舱下降发动机	105
2.5.3	阿波罗登月舱上升发动机	123
2.6	阿波罗载人登月计划的后续发展与启示	126
2.6.1	F-1 发动机的改进研究	126
2.6.2	J-2 发动机的后续研究	128
2.6.3	服务舱推进系统的改进研究	130
2.6.4	下降级发动机的改进研究	151
2.6.5	姿控发动机的应用与发展	152
2.6.6	阿波罗载人登月计划对我们的启示	152
	参考文献	155
第3章	苏联 N-1 火箭推进系统	158
3.1	N-1 计划概述	158
3.2	N-1 运载火箭推进系统	158
3.2.1	N-1 运载火箭	158
3.2.2	N-1 运载火箭载人登月的飞行程序	163
3.2.3	N-1 运载火箭研制历程与飞行试验	166
3.2.4	三级运载器的发动机	172
3.3	L-3 登月系统的发动机	182
3.3.1	基本方案	182
3.3.2	后备发动机	188
3.4	N-1 计划的后续发展与启示	189
3.4.1	N-1 计划失败的原因	189
3.4.2	N-1 运载火箭的后续发展与启示	193
	参考文献	203

第 4 章 美国星座计划及重返月球运载火箭的推进系统	205
4.1 星座计划概述	205
4.1.1 阿波罗载人登月计划后美国航天运载器发展 简介	205
4.1.2 重返月球计划	207
4.1.3 重返月球计划的研制项目	211
4.1.4 重返月球计划的技术管理经验	233
4.1.5 重返月球计划面临的问题	236
4.2 战神 1 和战神 5 运载火箭推进系统	243
4.2.1 固体助推器	243
4.2.2 RS-68B 发动机	245
4.2.3 J-2X 发动机	247
4.3 猎户座飞船与牵牛星登月舱推进系统	254
4.3.1 猎户座飞船推进系统	254
4.3.2 牵牛星月球着陆器推进系统	255
参考文献	257
第 5 章 俄罗斯月球探测与开发计划	260
5.1 载人登月与空间开发计划	260
5.1.1 概述	260
5.1.2 月球探测与开发	263
5.1.3 俄罗斯的登月计划	263
5.1.4 俄罗斯载人登月与空间开发计划存在的 问题	267
5.2 载人登月运载火箭及其推进系统	268
5.2.1 联盟号系列运载火箭	268
5.2.2 联盟号运载火箭使用的液体火箭发动机	272
5.3 改进后的联盟号飞船及其推进系统	282

5.3.1	改进型宇宙飞船	283
5.3.2	快船号飞船	287
5.3.3	快船号飞船推进系统	289
5.3.4	快船—渡船系统的经济性评估	289
	参考文献	291
第6章	大型、重型运载器及其火箭发动机研制	292
6.1	航天运载器的发展趋势	292
6.1.1	航天运载器的发展历程与发展趋势	292
6.1.2	重型运载器的发展概况与发展趋势	295
6.2	大推力火箭发动机的研制	304
6.2.1	大推力火箭发动机的研制	304
6.2.2	液体推进技术的发展历程与发展趋势	307
6.2.3	国外大推力火箭发动机的发展概况	313
6.3	上面级发动机的研制与发展概况	336
6.3.1	上面级的研制历程与发展趋势	337
6.3.2	上面级发动机的研制概况	340
6.4	我国运载火箭及其发动机的现状	352
6.4.1	现有的运载火箭	352
6.4.2	现有运载火箭存在的差距	353
6.4.3	火箭发动机的研制概况	353
6.5	美国商业航天运载的最新发展	356
6.5.1	一次性使用运载火箭	356
6.5.2	重复使用运载器	358
6.5.3	进入空间的研究	359
6.5.4	商业航天运载技术的预先研究	361
6.5.5	美国商业航天运载技术最新发展的启示	365
	参考文献	367

第 7 章 我国载人登月运载火箭推进系统方案构想	370
7.1 载人登月运载火箭推进系统	370
7.1.1 载人登月任务	370
7.1.2 总体框架构想	371
7.1.3 载人登月飞行模式及发射模式	371
7.1.4 载人登月飞行模式设想	373
7.1.5 载人登月飞行模式与载人登月运载火箭的 关系	377
7.2 多次发射载人登月运载火箭初步设想	378
7.2.1 载人火箭	378
7.2.2 4 次发射的货运火箭	378
7.2.3 3 次发射的货运火箭	379
7.2.4 地月轨道转移级飞行器	382
7.2.5 多次发射飞行模式运载火箭主要发动机方案	384
7.2.6 地月轨道转移级飞行器火箭发动机方案	384
7.2.7 多次发射飞行模式运载火箭主要发动机方案	387
7.3 重型运载火箭的初步方案	388
7.3.1 方案设计中与推进系统有关的几个重要参数	388
7.3.2 重型运载火箭方案的初步设想	392
7.4 载人登月重型运载火箭主发动机方案	403
7.4.1 下面级大推力液氧/煤油发动机	406
7.4.2 大推力液氧/液氢发动机	422
7.4.3 大推力固体火箭发动机	429
参考文献	430
第 8 章 我国载人登月飞行器系统推进系统构想	431
8.1 载人登月飞行器系统构想及预先研究	431
8.1.1 概述	431

8.1.2	载人登月飞行器系统方案构想	434
8.1.3	载人登月飞行器系统方案的预先研究	435
8.2	载人登月飞行器系统推进系统方案	437
8.2.1	国外载人登月飞行器系统推进系统简介	437
8.2.2	推进系统方案的评估依据和设计准则	438
8.2.3	载人登月飞行器系统推进系统方案研究	448
8.3	可供载人登月飞行器系统选用的推进系统	454
8.3.1	登月舱下降级可贮存推进剂主推进系统	454
8.3.2	登月舱上升级可贮存推进剂主推进系统	462
8.3.3	往返飞船主推进系统	465
8.3.4	低温推进剂主推进系统	470
8.3.5	载人登月飞行器系统反作用控制系统	475
8.3.6	载人登月飞行器系统推进系统方案的最后选择	475
	参考文献	480

第 1 章 绪 论

小时不识月，呼作白玉盘。
又疑瑶台镜，飞在青云端。
仙人垂两足，桂树何团团。
白兔捣药成，问言与谁餐。

——李白

面对高悬天空、时圆时缺的月球，人类编织的大量美丽的神话故事、留下的动人诗篇，始终有着强烈的“知月”渴求：月球有多大？月球是怎么来的？是否有嫦娥、吴刚等居民？月球与地球有什么差别？月球有什么宝藏可利用……

随着人类文明的进步，人们对月球的认识和研究日益深入。1690年，伽利略利用自制折射式望远镜观察月球，第一次揭开“月神”的真面目。1959年1月2日，苏联发射了人类第一个月球探测器——月球1号，揭开了月球探测的序幕。从此，美国和苏联在探月领域展开了激烈的竞赛，分别进行了大规模的探月与登月活动，1959年~1976年共发射了108个月球飞行器，形成了美苏争霸时期的探月高潮。1969年7月20日，美国的阿波罗11号飞船成功在月球的静海谷地着陆，航天员尼尔·阿姆斯特朗成功地实现了“个人一小步、人类一大步”跨越，人类首次登陆月球。而苏联由于载人登月N-1重型运载火箭4次飞行全部失败，在登月竞赛中落败。1976年以后，由于美国和苏联进行了战略调整，以太空竞赛和探险活动为主要目标的第一轮月球探测活动陷入了低潮。

1986年，美国研究人员发现月壤中含有丰富的核聚变材料氦⁻³ (³He)，此后又在月球的岩石中发现了丰富的钛铁矿、铀、钍、钾、磷和稀土元素等，这些资源具有巨大的应用前景，能够承担起地球

能源和资源接替的重任。此外，月球独特的无大气、无污染、弱重力、弱磁场的空间环境，为某些特殊生产和实验提供了极为有利的条件；月球还是天体物理研究的良好场所，可以作为深空探测的中继站和天文观测站。从长远来看，月球对人类进步有着特殊的意义，月球探测和开发将成为人类未来发展的重点之一。载人登月是一个国家航天技术和空间科学高度发达的重要标志之一，是综合国力的具体体现，也是大国地位的象征。载人登月不仅能够推动经济的发展，为人类寻找新的资源提供条件，而且为未来的经济发展、技术进步提供了可能。同时月球可能成为一个潜在的军事基地，载人登月将会为巩固国防，打破少数国家对月球的垄断，遏制月球军事化，推动世界和平利用空间发挥巨大作用。2004年，美国政府制订了雄心勃勃的重返月球星座计划，掀起了新一轮的载人登月高潮。

我国的运载技术、卫星发射及其应用已经取得了重大成就。随着神舟6号载人飞船的成功飞行，我国载人航天技术取得了重大进展；探月工程的“绕月飞行”也获得了成功；探月工程的后续工程——“降落月球飞行”正在实施之中；新一代运载火箭几年后即将启用。目前，我国已经积累了载人航天飞行的实践经验，加上借鉴阿波罗计划成功的载人登月经验、苏联登月失败和美国重返月球的星座计划取消的教训，以及改革开放以来经济的飞速发展，为我国载人登月提供的财力支撑，我国研制载人登月运载火箭和载人登月飞行器系统的条件已经成熟。

我国载人登月计划是一项创新技术的系统工程，又是一项规模宏大、技术复杂、耗资巨大的长期工程，只要充分发挥举国体制的优势，加强自主研发，积极开展国际间的合作，必将会取得载人登月计划的成功。

1.1 载人登月计划

20世纪90年代，世界许多国家再度掀起了探测月球的热潮。

1994年和1998年,美国国家航空航天局先后发射了克莱门汀号和月球勘探者号环月探测器,发现在月球两极的盆地底部可能蕴藏着固态水,意味着人类在月球上生存的基本条件已经具备,这项发现再一次激发了航天大国探测月球的兴趣。

2004年1月14日,美国总统布什宣布了新的空间探索计划,提出美国2020年前后重返月球、建立月球基地的星座计划。2006年,美国国家航空航天局提出了战神1和战神5登月火箭、猎户座飞船和金牛座月球着陆器的初步方案,并着手开始研制工作。但美国总统奥巴马2010年2月1日在向美国国会提交的2011财政年度政府预算报告中,建议取消美国重返月球的计划,而将火星作为美国载人航天计划的目的地。最初,美国是把月球作为登陆火星这一终极目标的中转站而选择重返月球的,现在,虽然已经放弃了星座计划,但美国空间探测计划的最终目标是绝不会放弃的。

2006年5月,俄罗斯发布“2006年~2030年俄罗斯载人航天发展计划”,提出载人登月、建立月球基地和实现月球产业化的规划。鉴于经费有限,俄罗斯提出利用国际空间站(ISS),分7次发射小型登月模块,在地球轨道对接后完成登月的方案。之后,俄罗斯就载人登月运载火箭方案等问题进行了广泛的讨论。直到2009年年初,俄罗斯才决定开展名为“新一代载人航天运输系统”(PPTS)计划,包括新型载人飞船、货运飞船和新型运载火箭。2009年4月,俄罗斯航天局宣布了研制新型运载火箭的中标团队——萨马拉航天中心、能源(Energia)空间公司和马卡耶夫导弹设计局,该团队将于2010年8月确定运载火箭的最终方案。

2004年2月3日,欧洲航天局公布了曙光空间探测计划。该计划是一项载人空间探测计划,目前和未来若干年的探测重点是无人月球探测和火星探测。曙光空间探测计划提出的主要目标是在2024年实现载人登月,2033年实现载人登陆火星,但对于采用何种技术途径和研制何种运载火箭实现探测目标等问题,至今未见任何相关报道。

20世纪80年代中期,日本启动探月计划,1990年1月发射的缪斯A科学卫星失败,2007年9月发射的月亮女神号探测卫星获得成功。2005年,日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)公布了日本“2005年~2025年空间探索长期规划”,提出将在2025年前建造月球基地,开展月球和空间资源利用。2006年8月,日本宇宙航空研究开发机构宣布日本确立2030年将实现建立有人月球基地的目标。根据该计划,日本将在2020年左右向月球运送航天员,开始建造月球基地,2030年完成建造任务。

印度也制订了雄心勃勃的发展载人登月的计划,成为该领域的新成员。目前,印度正在实施“月球初探”计划,大力开发空间飞行器返回技术。2008年4月,印度成功发射月球飞船号飞行器,计划于2015年实现首次绕地载人航天飞行,并进一步规划了载人登月和火星探测计划,欲将载人航天作为提升综合国力的突破口,还提出2020年前后实现载人登月。印度空间研究组织(ISRO)已经得到印度政府批准,获得了10.9亿美元的经费,进行能将2名航天员送入太空并安全返回的载人飞行器的预研工作。

20世纪90年代以来的第二轮月球探测高潮,规模宏大,参与国家多,目标明确,即近期探测研究月球的资源、能源与特殊环境,掌握月球研究与利用技术,实施载人登月,逐步建设月球基地,最终开发和利用月球,实现月球基地的产业化,为人类社会的可持续发展服务。

1994年,我国开始月球探测的论证,提出“绕、落、回”(绕月飞行、落月探测、取样返回)的发展构想。2000年,我国政府首次公布的航天白皮书——《中国的航天》明确了近期“开展以月球探测为主的深空探测的预先研究”。2004年1月,月球探测第1期工程——绕月探测通过国家立项;此外,第2期和第3期工程也开展了积极的论证和研究。2007年10月24日,我国长征3号甲运载火箭成功发射探月卫星嫦娥1号,并于11月7日准确进入环月工作轨道,拉开了中国人月球探测与研究的大幕。

然而，月球探测的最终目标是开发和利用月球的宝贵资源，而无人探测必然存在各种局限性。为此，各国均提出在无人探测之后，实施载人登月、建立月球基地的计划。

与无人探测相比，载人登月对运载火箭和载人飞船的要求极高，不仅需要大直径、大推力的重型运载火箭，而且需要各种工作任务复杂、可靠性和性能极高的系统，包括多个舱段的载人登月飞行器系统。

载人登月重型运载火箭和载人登月飞行器系统的推进系统是工作条件严酷、研制难度最大的关键系统之一。一般来说，载人登月需要的推进系统主要有：运载火箭地面级发动机、高空发动机、上面级或地月转移轨道飞行器的发动机、登月飞船服务舱发动机、登月舱下降级发动机、登月舱升级发动机及姿态控制发动机等。其中，地面级发动机的研制难度最大、研制周期最长，是载人登月工程的关键。登月舱下降级发动机是具有变推力、高性能和热防护要求严格的发动机，也是最为关键的系统。

20世纪60年代，美国和苏联在登月竞赛过程中，均研制了多种不同推力量级的火箭发动机。美国载人登月的土星5运载火箭主要采用F-1液氧/煤油发动机和J-2液氧/液氢发动机，阿波罗飞船主要采用AJ-10-137，MIRA-10K和RS-18等3种发动机。其中，F-1发动机采用燃气发生器循环，海平面推力6770 kN，5台发动机组成了土星5运载火箭的一子级。为了充分验证土星5运载火箭推进系统的可靠性，曾进行了大量的热试车，其中五机并联试车就达到了25次。正是对火箭发动机的深入细致的研究，才确保了美国登月计划的成功。

苏联载人登月的N-1/L-3运载火箭和登月飞船主要采用了NK-33，NK-43（NK-33的加大喷管改进型），NK-39和RD-58液氧/煤油发动机和RD-859/858，S5.51四氧化二氮/偏二甲肼发动机。另外，苏联还同时研制了备用的RD-54和RD-57液氧/液氢发动机。为了提高发动机的可靠性，NK-33发动机进行了数百