

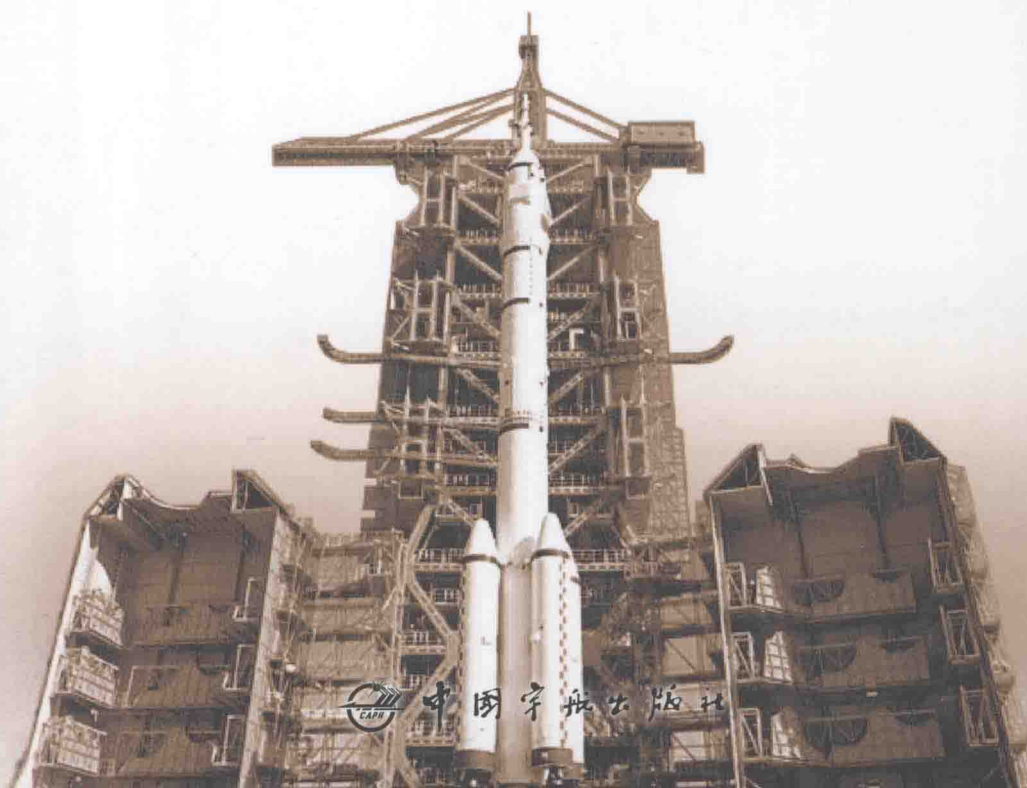


载人航天出版工程

总 主 编：周建平
总 策 划：邓宁丰

航天工程设计实践 [上]

冉隆隧 编著



中国宇航出版社



载人航天出版工程

总主编：周建平

总策划：邓宁丰

航天工程设计实践

(上)

冉隆燧 编著

 中国宇航出版社

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

航天工程设计实践: 全 2 册/冉隆燧编著. --北京:

中国宇航出版社, 2013. 12

国家出版基金项目

ISBN 978-7-5159-0593-8

I. ①航… II. ①冉… III. ①航天工程—设计 IV.

①V4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 298387 号

责任编辑 易 新

封面设计 姜 旭

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

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 北京画中画印刷有限公司

版 次 2013 年 12 月第 1 版

2013 年 12 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230

开 本 1/32

印 张 37

字 数 1140 千字

书 号 ISBN 978-7-5159-0593-8

定 价 198.00 元(上下册)

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

《载人航天出版工程》总序

中国载人航天工程自 1992 年立项以来，已经走过了 20 多年的发展历程。经过载人航天工程全体研制人员的锐意创新、刻苦攻关、顽强拼搏，共发射了 10 艘神舟飞船和 1 个目标飞行器，完成了从无人飞行到载人飞行、从一人一天到多人多天、从舱内实验到出舱活动、从自动交会对接到人控交会对接、从单船飞行到组合体飞行等一系列技术跨越，拥有了可靠的载人天地往返运输的能力，实现了中华民族的千年飞天梦想，使中国成为世界上第三个独立掌握载人航天技术的国家。我国载人航天工程作为高科技领域最具代表性的科技实践活动之一，承载了中国人民期盼国家富强、民族复兴的伟大梦想，彰显了中华民族探索未知世界、发现科学真理的不懈追求，体现了不畏艰辛、大力协同的精神风貌。航天梦是中国梦的重要组成部分，载人航天事业的成就，充分展示了伟大的中国道路、中国精神、中国力量，坚定了全国各族人民实现中华民族伟大复兴中国梦的决心和信心。

载人航天工程是十分复杂的大系统工程，既有赖于国家的整体科学技术发展水平，也起到了影响、促进和推动着科学技术进步的重要作用。载人航天技术的发展，涉及系统工程管理，自动控制技术，计算机技术，动力技术，材料和结构技术，环控生保技术，通信、遥感及测控技术，以及天文学、物理学、化学、生命科学、力学、地球科学和空间科学等诸多科学技术领域。在我国综合国力不断增强的今天，载人航天工程对促进中国科学技术的发展起到了积极的推动作用，是中国建设创新型国家的标志性工程之一。

我国航天事业已经进入了承前启后、继往开来、加速发展的关键时期。我国载人航天工程已经完成了三步走战略的第一步和第二

步第一阶段的研制和飞行任务，突破了载人天地往返、空间出舱和空间交会对接技术，建立了比较完善的载人航天研发技术体系，形成了完整配套的研制、生产、试验能力。现在，我们正在进行空间站工程的研制工作。2020年前后，我国将建造由20吨级舱段为基本模块构成的空间站，这将使我国载人航天工程进入一个新的发展阶段。建造具有中国特色和时代特征的中国空间站，和平开发和利用太空，为人类文明发展和进步做出新的贡献，是我们航天人肩负的责任和历史使命。要实现这一宏伟目标，无论是在科学技术方面，还是在工程组织方面，都对我们提出了新的挑战。

以图书为代表的文献资料既是载人航天工程的经验总结，也是后续任务研发的重要支撑。为了顺利实施这项国家重大科技工程，实现我国载人航天三步走的战略目标，我们必须充分总结实践成果，并充分借鉴国际同行的经验，形成具有系统性、前瞻性和实用性的，具有中国特色的理论与实践相结合的载人航天工程知识文献体系。

《载人航天出版工程》的编辑和出版就是要致力于建设这样的知识文献体系。书目的选择是在广泛听取参与我国载人航天工程各专业领域的专家意见和建议的基础上确定的，其中专著内容涉及我国载人航天科研生产的最新技术成果，译著源于世界著名的出版机构，力图反映载人航天工程相关技术领域的当前水平和发展方向。

《载人航天出版工程》凝结了国内外载人航天专家学者的智慧和成果，具有较强的工程实用性和技术前瞻性，既可作为从事载人航天工程科研、生产、试验工作的参考用书，亦可供相关专业领域人员学习借鉴。期望这套丛书有助于载人航天工程的顺利实施，有利于中国航天事业的进一步发展，有益于航天科技领域的人才培养，为促进航天科技发展、建设创新型国家做出贡献。



2013年10月

贺 词

祝贺航天老战友冉隆燧同志近半个世纪的航天科研实践总结《航天工程设计实践》一书,即将出版!

从20世纪60年代初,中国航天从自行设计第一个型号开始,至2011年正在执行的中国载人航天工程第二步任务,我们共同为中国航天事业奋斗了半个世纪。中国航天事业从无到有,取得今天航天大国的地位,这是几代中国航天人奋斗的结果。我们这代人也已进入古稀之年,总结经验教训,培养航天新人,是我们的责任和义务。冉隆燧同志在为“两弹一星”和“载人航天工程”作出重要贡献的同时,又勤于著述,总结实践经验,传授知识培育新人,实在难能可贵!

本书的基础篇(第1篇和第2篇),曾作为清华大学航天航空学院2005年硕博研究生班“航天工程设计概论”专业课的讲义,并应我(兼任该院院长)的邀请,冉隆燧同志亲自授课,效果很好,学生们均取得了优良的成绩。本书的出版,将为我国航天新人的培养、推进我国航天科技持续发展起促进作用。

王永志

2011年12月

序 一

冉隆燧同志和我是在“航天战线”上共同奋斗 50 多年的老战友。他在过去的半个多世纪中从为我国第一个自行设计的东风二号导弹研制横偏校正系统开始，而后参加了东风四号导弹、长征一号运载火箭（东风四号弹体加一级固体火箭，用以发射我国首颗东方红一号卫星）和东风五号导弹的地面自动化系统的研制。在 331 工程（用长征三号运载火箭发射地球同步卫星）中，他曾任长征三号运载火箭控制系统主任设计师，克服了重重困难和技术难题，出色地完成了各研制阶段的任务，获得了多项科研成果奖，出席了航天 30 周年劳模大会，荣立了航天工业部一等功。他是中国载人航天工程大总体的研制骨干，获突出贡献奖两次。他的作风认真、深入、细致，航天知识渊博，勤于总结经验。

《航天工程设计实践》就是隆燧同志参阅了大量文献和他自己亲身实践总结出来的。其目的是为后来航天人和热心于航天的读者提供一本航天科研入门教材和工作参考书。本书有以下特点。

一、现身说法，实践第一

每个参加中国航天事业工程设计方面的新人，必须在业务上从 3 个方面狠下苦功，那就是：

- 1) 建立正确的航天工程基本概念；
- 2) 深入掌握航天工程基础理论；
- 3) 积极投入航天工程设计任务。

这是隆燧同志半个多世纪以来对航天工程设计实践的系统性总结，简称“航天科研三步骤方法”，反复进行螺旋上升，不断深化。这也是本书“3 篇 22 章”的论述结构。

二、理论与实践相结合

在航天事业初创时期,领导就提出“出成果”、“出人才”的“双出方针”。理论与实践相结合就是培养科技人才的正确而有效途径。本书第1篇从第1章到第7章的内容就是讲航天工程中最基本的概念。只要基本概念搞清楚,就知道每项航天工程需要“做些什么”。本书第2篇从第8章到第14章的内容讲航天工程中的基础理论。只要“基础理论”学得扎实就能发现中外文献中的核心内容,加上自己的推论就会找出某项工程“怎样做”的办法。本书第3篇从第15章到第22章的内容讲工程设计任务本身。就是采取措施“实际去做”。“做”有可能成功,也有可能失败,失败并不可怕。只要你认真总结,纠正错误,你就会在认识上提高一步。理论与实践相联系又相互促进,也就是“理论与实践”由低级向高级的螺旋循环上升的过程。这个过程就是一个大学毕业生或硕、博研究生锻炼成一位能攻克航天科技难题的航天专家的成长过程。

三、本书有不少“亮点”

我认为第20章航天工程供电与接地的电磁兼容性设计就是“亮点”之一。一般人会觉得供电与接地是小事一桩,不足为道。但凡是干过大电子系统工程的人对供电与接地处理不当都会大伤脑筋、头痛不已。隆燧同志在这章里进行了深入分析,很详尽透彻,并提出解决措施。这是他经过多年磨炼而显出功力的表现,很值得一读。当然还有不少其他“亮点”,这有待读者深入地品味。

四、人才是21世纪一个国家最重要的资源

培养高级工程人才是我国的当务之急。《航天工程设计实践》这本书内容全面、详细,深入浅出,是一本培养航天工程师的好书,它将为我国培养“新一代航天接班人”作出积极贡献。

梁思礼

2011年10月

序 二

《航天工程设计实践》即将出版，值得庆贺！我们有幸受作者和出版社的邀请，审阅本书。该书是作者近半个世纪（1960年5月～2009年10月）从事中国航天科技的经验总结，目的是为后来航天人提供一本航天科研入门教材和工作参考书。

理论与实践相结合是培养航天科技人才的正确途径。我们完全同意作者对“航天科研三步骤方法”的解释：

1) “概念”是人们认识过程中，把事物（这里指航天工程）的共同特性抽出来，加以概括提炼，形成“概念”。也可以说，“概念”是初级阶段的“理论”。“基本概念”是诸多概念中最根本和最重要的部分。航天工程中最“基本的概念”，这是本书第1篇的内容。只要“基本概念”清楚，就能自学阅读中外文献，知道每项航天工程需要做些什么。

2) “理论”是人们从实践中概括出来关于自然界和社会的知识（这里指自然界中的航天知识）的系统性和规律性结论（通常可用数学方法描写成数学公式，并能进行数量计算），称为“理论”。将“概念”进行系统性的概括，可升华为“理论”。基础理论是知识系统结论中的起点和最根本的部分。航天工程中的基础理论，就是本书第2篇中的内容。只要基础理论扎实，就能发现中外文献中的核心内容，加上自己的推论，就能找出完成某项航天工程的方法。

3) “设计任务”是指航天工程研制人员所担任的具体工作和职责。它是我们建立正确的航天工程基本概念、深入掌握航天工程基础理论的最终目的。“三步骤”的前两步是“理论”学习，第三步是“实践”任务。理论与实践既相互联系，又相互促进。

这就是理论与实践由低级到高级的循环发展过程。这就是一位大学毕业生变成一位能攻克航天科技难题的专家的修炼成长过程。

本书取材完全符合著书目的，并来自国内外公开出版的书刊（详见本书参考文献），符合国家的有关规定，建议正式出版。本书具有较强的实用性和可操作性，可作为新参加航天工程设计与试验的大学毕业生和硕博研究生的专业入门教材和工作参考书。本书将为我国航天事业今后的发展，发挥积极作用。

王世石 谢名艺

2011年9月

前 言

本书是我从1960年投身新中国航天事业以来,至2009年近半个世纪的航天工程研制实践总结。我正赶上了中国航天从无到有的大发展时期。1960年我从成都电讯工程学院无线电工程系雷达专业毕业后,被分配到国防部第五研究院(1965年改名为第七机械工业部,后又更名为航天工业部、航天工业总公司等),在一院十二所从事运载火箭的控制系统和测试发控系统的研制工作,先后担任技术员、工程组长、研究室主任(高级工程师)、研究所副所长(研究员)、航天工业部航天民品总公司总工程师等技术职务(职称);1960年~1976年,主要担任东风四号导弹(后改为长征一号运载火箭,发射我国第一颗人造地球卫星东方红一号)和东风五号导弹(后改为长征二号运载火箭,发射我国低轨道重型卫星)自动化测试系统数字仪器(数字电压表、测时测频仪、数字比较器和数字打印机等)研制主管设计师(工程组长),后期担任数控系统计算机和计算机测试发控系统技术攻关组长;1977年~1984年,担任发射地球同步卫星工程(即“331工程”)运载火箭(长征三号)控制系统主任设计师(总体研究室主任);1984年10月~1992年,在研究所任技术副所长和副总工程师,负责长征三号运载火箭外星发射和航天民品开发领导工作;1992年~1994年,担任航天工业部航天民品总公司总工程师,兼航天地铁与高速铁路专家组组长;1995年~2005年,在中国载人航天工程办公室任研究员(军职),主要负责工程电气与控制专业的大总体设计与技术协调工作。在我近50年的“航天设计人生”中,有16年(1960年~1976年)的航天仪器设备研制经历,有17年(1977年~1994年)的控制系统、测试发控系统、

民用自动化系统研制经历,有10年(1995年~2005年)的航天工程大总体研制经历,最近5年主要担任“专家组”成员和教学工作。我在较长的航天型号研制中,编写了多个航天工程型号研制报告,公开发表过20多篇论文,正式出版了60多万字的个人专著《运载火箭测试发控工程学》(1989年被评为部级优秀教材);荣立过航天工业部和部队的三等功(1961年)、一等功(1984年)、二等功(1993年),并获突出贡献奖两次(1999年和2004年),享受政府特殊津贴;荣获国家科学技术进步特等奖两项(“331工程”和“921工程”),全国科技大会重大科技成果奖一项,国防科工委重大科技成果特等奖一项,一等奖、二等奖、三等奖多项;先后受聘多所军队院校和地方大学为硕博研究生讲授《航天工程设计》专业课。本书就是对上述部分型号研制报告、学术论文和授课讲义的系统性整理。本书可作为新参加航天工程设计的大学毕业生、硕博研究生、航天发射场的指战员等的入门教材和工作参考书。

从事现代航天工程设计与试验的技术人员,必须牢固掌握三个方面的航天知识和技能。

(1) 建立正确的“航天工程基本概念”(第1篇)

了解从古代火箭技术与航天理论的建立到现代适用火箭问世和人类进入航天新时代的发展进步过程(第1章),全面而系统地掌握现代运载火箭与航天器的分类、定义、组成和关键技术,掌握重要部件或仪器的工作原理和技术参数(第2章、第3章),进一步掌握运载火箭和航天器的地面支持系统——测控通信系统(第4章)和测试发控系统(第5章)的设计原理与重要作用,建立航天工程总体设计概念(第6章),掌握航天工程安全性与可靠性设计的基本内容(第7章)。

(2) 深入掌握“航天工程基础理论”(第2篇)

这些基础理论包括天文、地球物理与航天运动学(第8章),航天动力学及其应用(第9章),火箭推进与飞行动力学(第10章),火箭的飞行轨道与总体参数计算(第11章),航天器的运行

轨道设计（第12章），航天器的返回轨道设计（第13章），登月轨道设计（第14章）等。

（3）积极投入“航天工程设计任务”（第3篇）

这是基本概念与实际工作的结合，基础理论在设计实践的应用，可以检验自己能否担当航天工程各层次（工程大系统、火箭或飞船系统、推进/结构和控制分系统、仪器设备、原材料与元器件）的设计、制造与试验任务。参加设计实践的最好途径是先承担基层的“仪器设备设计”任务（同时可掌握新材料和新元件的研制与选用），再承担“分系统和系统设计”任务，最后承担“工程大系统设计”任务。因为上层的设计是建立在下层次设计基础上的，这与建设高楼大厦是一样的道理（万丈高楼从地起）。但是，你不一定有这样好的机遇，可能你一进入航天工程设计部门就担任系统设计任务，对下面层次的设计一无所知。较好的补救办法是到仪器设备研制单位去实习一段时间。若没有这样的机会，那只好去请教那些有经验的仪器设备设计师们了。这一课不补，你的系统设计会困难重重，你还可能会犯终生遗憾的错误。还有一个忠告，你若是承担控制系统设计任务，你还要抓住时机学习相邻专业（如推进和发动机、结构与机构等专业）的设计知识，因为它们通常是控制系统的设计条件或控制对象。若相邻系统间的接口关系搞不好，控制系统的设计质量也肯定上不去。还要强调一点，研制一个新型号时，各层次的设计是按设计阶段分步实施的，一般分为方案论证和方案设计阶段、初样研制阶段、试样研制阶段。每一研制阶段必须完成本阶段规定的研制任务，更不能跨阶段去做下阶段的工作。各阶段规定完成的任务，详见第6章。

航天工程师们将在具体的型号研制中，深化对基本概念的认识和基础理论的掌握，并以此指导自己的设计实践；同时，在实践中会遇到新技术和新问题，要通过分析计算和试验相结合的办法解决这些问题；从而，又提高和充实了原有的概念和理论，并获得了更新更高级的概念和理论。每通过一个新型号的设计实

践，都将在航天概念和航天理论方面大大提高一步，这是唯物辩证法中理论与实践的循环发展。这就是攻克航天科技难题的“三步骤”方法。因此，本书以“航天工程基本概念”、“航天工程基础理论”、“航天工程设计任务”的3篇结构，论述航天工程设计实践。愿你在中国航天的广阔天地里，出色地完成你担负的任务，为进一步提高我国的航天技术水平作出自己的贡献。

在此，我首先要感谢老一辈中国航天开创专家黄纬禄、沈家楠、梁思礼、王汝龙、徐延万等老师对我的指导和帮助！感谢我在多个航天型号研制中的领导和战友们。我们共同战斗的惊险和喜悦，今生难忘！感谢我的爱妻、同学和同事黄国玉，我的科研成果中有她的辛劳和奉献。

这里，我还要感谢在本书写作和出版过程中，中国载人航天工程办公室和航天一院十二所新老领导和同事们对我的鼓励和帮助！感谢中国载人航天工程办公室提供了主要的出版经费。感谢王永志、王汝龙、陈炳忠、谢名芭等领导，详细地审阅书稿并提出了宝贵的修改意见。感谢周雁飞、宋伟和易新等同志，在本书出版工作中付出的辛勤劳动。

最后，我要特别感谢本书参考文献中所列出的著者（译者）们！我引用了文献中的技术观点或论述方法。由于本人理论修养和写作水平有限，书中难免有错误与不妥之处，敬请批评指正，万分感谢！

冉隆燧

2005年8月初稿

2011年12月修改于北京

目 录

第 1 篇 航天工程基本概念

第 1 章 航天工程发展简史	3
1.1 古代的飞天传说和航天理论	3
1.2 中国古代火箭和欧洲火箭	4
1.3 现代航天理论的建立	5
1.4 从 V-2 导弹到发射美国第一颗人造卫星的丘辟特 C 火箭	6
1.5 人类进入航天新时代	7
1.6 中国的航天计划与成就	9
第 2 章 运载火箭	15
2.1 概述	16
2.1.1 导弹与运载火箭的定义	16
2.1.2 导弹与运载火箭的分类	17
2.1.3 导弹与运载火箭的主要性能	19
2.2 导弹与运载火箭的组成	21
2.2.1 弹头	21
2.2.2 航天器	23
2.3 箭体结构与分离系统	23
2.4 运载火箭的推进系统	25
2.4.1 液体火箭推进系统	25

2.4.2 固体火箭推进系统	29
2.4.3 液体火箭发动机	36
2.4.4 各类火箭发动机的特征参数比较	41
2.5 运载火箭控制系统	44
2.5.1 控制系统的组成	48
2.5.2 导航分系统	48
2.5.3 制导分系统	59
2.5.4 姿态控制分系统	64
2.5.5 电源配电分系统	68
2.6 中国的运载火箭	69
2.6.1 长征一号系列运载火箭	69
2.6.2 长征二号系列运载火箭	72
2.6.3 长征三号系列运载火箭	85
2.6.4 长征四号系列运载火箭	93
2.7 结论	100
第3章 航天器	102
3.1 概述	103
3.1.1 航天器的分类与基本组成	103
3.1.2 人造地球卫星及其分类	104
3.1.3 空间探测器及其探测成果	106
3.1.4 宇宙飞船及其载人飞行	106
3.1.5 空间站及其载人太空活动	108
3.1.6 航天飞机及其载人飞行	109
3.2 航天器的有效载荷(专用系统)	110
3.2.1 科学实验卫星的有效载荷	110
3.2.2 对地观测卫星的有效载荷	111
3.2.3 通信卫星的有效载荷	116

3.2.4 导航定位卫星的有效载荷	120
3.3 航天器的通用系统(通用平台)	122
3.3.1 航天器的结构与机构系统	122
3.3.2 航天器的推进系统	132
3.3.3 航天器的控制系统	148
3.4 中国的航天器	175
3.4.1 中国的通信卫星	176
3.4.2 中国的返回式遥感卫星	183
3.4.3 中国的气象卫星	187
3.4.4 中国的小卫星和地球资源卫星	190
3.4.5 中国的载人飞船	194
3.4.6 中国的探月卫星——嫦娥一号	199
第4章 测控通信系统	202
4.1 引论	202
4.2 航天器测控计划执行过程	206
4.3 航天器天地结合的控制方案	208
4.4 航天器作为控制对象的特点	209
4.5 航天器飞行控制中心	210
4.5.1 指令信息计算机系统完成的任务	211
4.5.2 指令信息计算机系统的组成	213
4.5.3 生成飞行计划与控制航天器指令程序信息 用软件	214
4.5.4 小结	215
4.6 运载火箭测控方案	215
4.6.1 火箭自主测轨法	215
4.6.2 外弹道测轨法	216
4.7 统一载波测控系统的基本概念	217