

国防科研试验工程技术系列教材·试验工程建设系统

航天发射塔设计

魏继友 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

内 容 简 介

本书全面介绍了航天发射塔设计的基础知识;总体方案设计与论证;发射塔金属结构的类型与计算;发射塔用运行机构、起升机机构、旋转机构、安全与供电装置等的设计与计算;各种工作平台、脐带塔系统及发射塔用的各种大门的结构和传动方案的选型与计算方法。

本书是从事航天发射塔设计、研究、使用的技术人员不可缺少的参考书。对从事民用结构设计、传动设计工作的技术人员也是不可多得的参考书。也可以作为高等学校教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

航天发射塔设计 / 魏继友编著. —北京: 国防工业出版社, 2007. 2

国防科研试验工程技术系列教材. 试验工程建设系统
ISBN 7-118-04302-8

I. 航... II. 魏... III. 航天器发射—发射台—设计—教材 IV. V553.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 017745 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 33¼ 字数 803 千字

2007 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 60.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764



魏继友

高级工程师，男，汉族，出生于1939年9月，江苏丰县人，1964年毕业于上海交通大学机械系，任职于总装备部工程设计研究总院。先后参加十几项国家重点工程建设，是酒泉、西昌、太原三个卫星发射中心各种地面设备的主要设计人；先后完成了六十多台套设备的设计与研究工作，是我国发射“亚星”、“澳星”、“神舟飞船”等发射塔设计的主任工程师，其中两项获全国科学大会奖，三项获国家科技进步二等奖；两项获全国优秀设计奖。多项获部委级科技进步奖；先后荣立两次二等功，一次三等功，多次嘉奖。1991年首批获得“政府特别津贴”，1996年获“中国航天基金奖”。被报纸誉为“国防科技战线上的英豪”。

改革开放后，根据国家建设的需要，又成为机械化舞台设计的专家，先后设计了“中央歌剧院”、“山东大厦剧场”、“辽宁文化艺术中心”、“天桥剧场”、“深圳世界之窗环球舞台”等剧场的舞台机械，曾参与国家大剧院的机械化舞台方案设计。最近又成功地设计了世界独特的上海旗忠网球馆活动屋盖工程，受到专家的好评。

在完成繁重设计任务的同时，先后在导弹与航天运载技术、特种工程、演艺设备与科技等刊物上发表了《航天发射塔纵横谈》、《航天飞行器发射塔总体方案设计》等有关机械化舞台设计的论文十多篇。

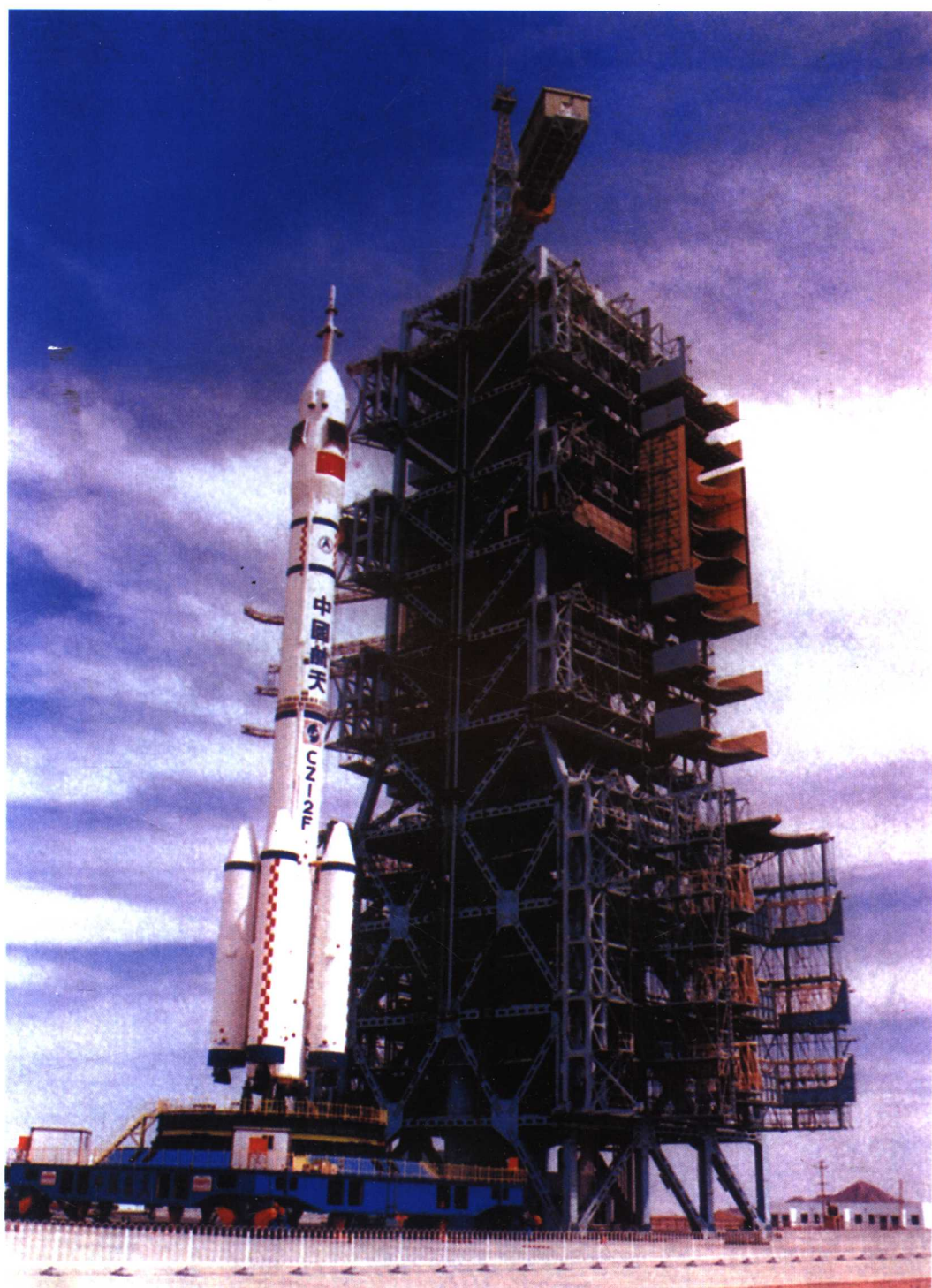


图0-12 中国“神舟”号飞船发射塔

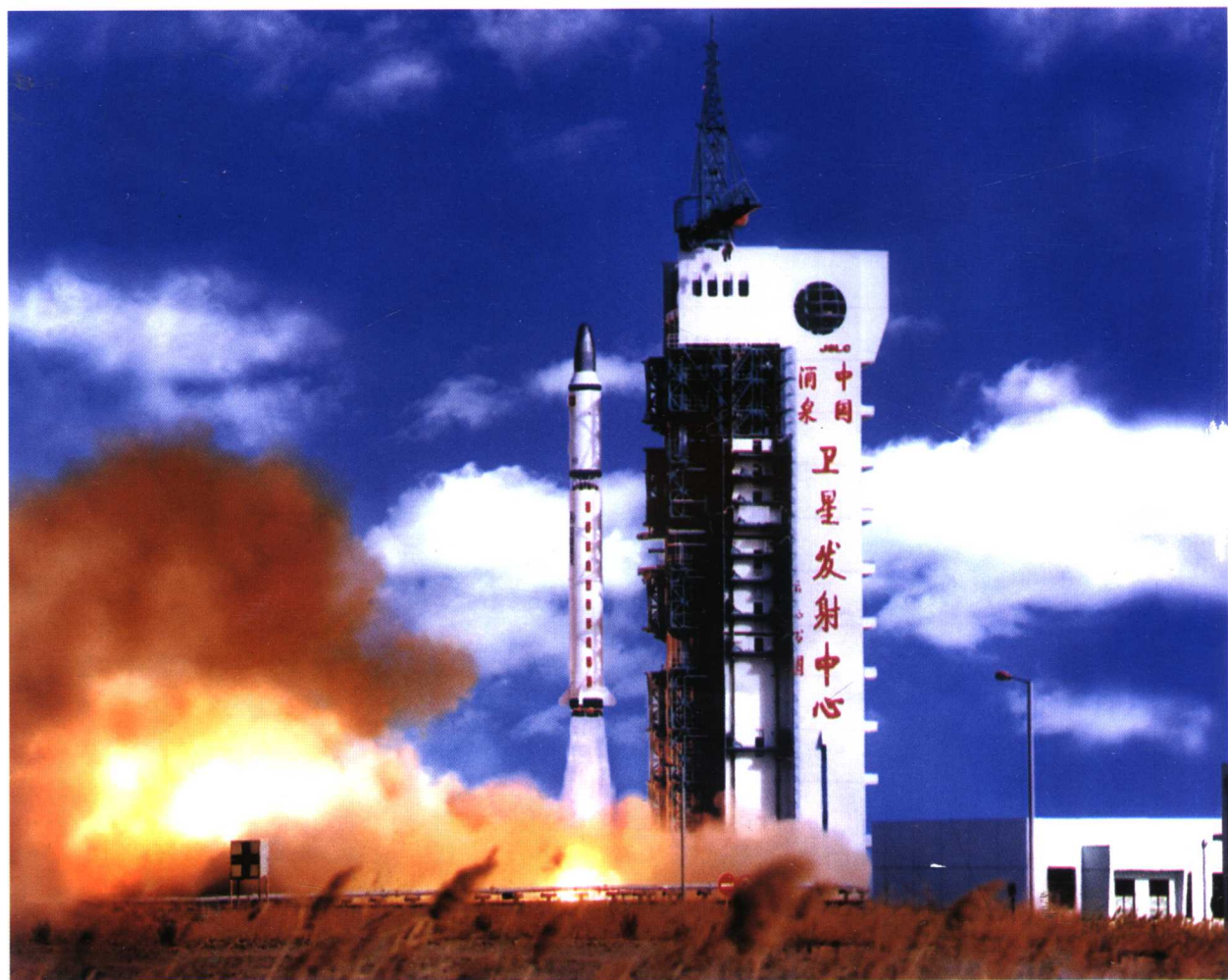


图 0-13 钢筋混凝土塔体结构发射塔

《国防科研试验工程技术系列教材· 试验工程建设系统》编审委员会

主任委员 王文宝

副主任委员 于建平 徐鸿才 黄水潮

委员 熊家新 张 平 周凤广 刘思富 黄 建

张松林 龚崇彬 张宗国 于 曦 陈正兴

张卫东 宋安基 吕明儒

主 编 刘占卿

副 主 编 殷国柱 明尊强 陈 斌 姚永安

秘 书 刘英华

《航天发射塔设计》 编写人员名单

主 编 魏继友

参编人员 (按姓氏笔画排序)

王迎东	王海林	尹华钢	史晓平	刘永惠
刘建斌	孙雅度	伊善贞	张玉魁	郑 辉
郑志荣	尚 文	周 波	龚奎成	温庆林
智 浩	蒲世明	魏从旗		

总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,知识经济迅速兴起,国力竞争越来越取决于各类高技术、高层次人才的质量与数量,因此,作为人才培养的基础工作——教材建设,就显得格外重要和紧迫。为总结、巩固国防科研试验的经验和成果,促进国防科研试验事业的发展,加快人才培养,我们组织了大批专家、学者编著了这套教材。

建国以来,我国国防科研试验战线上的广大科技人员,发扬“自力更生、艰苦奋斗、科学求实、大力协同、无私奉献”的精神,经过几十年的努力,建立起了具有相当规模和水平的科研试验体系,创立了一系列科研试验理论,造就了一支既有较高科学理论知识、又有实践经验,勇于攻关、能打硬仗的优秀科技队伍,取得了举世瞩目的成就。这些成就对增强国防实力,带动国家经济发展,促进科技进步,提高国家和民族威望,都发挥了重要作用。

编著这套教材是国防科研试验事业继往开来的大事,它是国防科研试验工程技术建设的一个重要方面,是国防科技成果的一个重要组成部分,也是体现国防科研试验技术水平的一个重要标志。它承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,是众多科技工作者用心血和汗水凝成的科技成果。编著该套教材,旨在从总体的系统性、完整性、实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的国防科研试验理论与实践相结合的知识体系。一是总结整理国防科研试验事业创业40年来的重要成果及宝贵经验;二是优化专业技术教材体系,为国防科研试验专业技术人员提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的急需;三是为国防科研试验提供有力的技术保障;四是将许多老专家、老教授、老学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来。

这套教材根据国防科研试验工程建设需要,重点论述试验工程总体设计、设备设计;设计规范;工程施工管理、质量验收,等等。

这套教材的使用对象主要是:具有大专以上学历的科技与管理干部,从事试验技术总体、技术管理工作的人员及院校有关专业的师生。

期望这套教材能够有益于高技术领域里人才的培养,有益于国防科研试验事业的发展,有益于科学技术的进步。

《国防科研试验工程技术系列教材·试验工程建设系统》

编审委员会

2006年10月

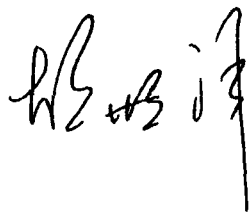
序 言

我国的航天事业是在外国进行严密封锁的条件下完全靠我国自己的力量研究发展起来的。作为航天发射场必不可少的重要设施——发射塔,也完全是自己设计和建造的,它完全适应我国航天飞行器发射的需要,经过适当改建,也能满足发射外国卫星的需要。我国多座航天发射塔的设计水平与建造规模都可以与世界其他航天大国的发射塔相媲美。

魏继友高级工程师是我国航天飞行器发射塔设计的专家,他几乎参加了我国所有航天发射塔的设计、建造和改建工作,并为此做出了不可磨灭的贡献。他在完成繁重设计任务的同时,先后用了23年的时间写成了这本书。这种吃苦耐劳、勇攀高峰、持之以恒的敬业精神,正是航天科技工作者勇于献身精神的体现。

这本书是关于航天发射塔设计的专著。作者以深厚的理论基础和丰富的实践经验熔铸于全书。书中对发射塔的总体设计、脐带塔(杆)及其附件的设计与计算,以及大悬臂转动平台、发射塔用起重机、运行台车等关键设施的设计、研究与应用都进行了详细的介绍与总结。这本书是从事航天发射塔设计与研究的技术人员的一本极有价值的参考书,对从事其他结构与传动设计与研究的技术人员,也会有很大帮助。

21世纪,我国的航天事业必定会有更大的发展,随着新的航天飞行器的研制成功,还需要设计、建造与其配套的航天发射塔。愿从事这项工作的同志,像魏继友高级工程师那样,不断总结提高,勇攀高峰,为我国的航天事业的发展做出更大的贡献。



2006年10月2日

前 言

我单位——总装备部工程设计研究院,长期从事航天发射塔的设计与研究工作,先后设计了多座航天发射塔,积累了丰富的经验。为了使这些经验能够传给后来者,使他们能在今后的设计中少走弯路,设计出高质量的航天发射塔,笔者于1978年便开始收集资料,陆续撰写,直至2001年完稿,经反复修改并将全书整体编排做了一次大的调整,2003年完成第三稿。以后经过反复校对修改并增加了部分章节,2004年完成第四稿。现在又把与发射塔无关的部分删除,同时又补充了一些新内容,便形成了第五稿。在撰写过程中,曲从治、张泽明、于建平、张光猷、哈允兴等同志先后提出许多宝贵意见,单位领导给予大力支持,参编的同志帮助做了许多工作,最后由上海交通大学王殿臣教授、丁怡教授、马登哲教授审阅定稿,王殿臣教授担任主审,尹华钢高级工程师又对结构设计部分进行重点审核,蒲世明高级工程师、张玉魁高级工程师根据最新发展又补充了许多新内容。

本书共分12章,第1章是设计基础,介绍了发射塔设计需要的原始资料、常用资料、载荷、强度和稳定性计算、联接设计与计算等;第2章介绍了发射塔总体方案的设计与论证方法;第3章介绍了金属结构的设计方法;第4、第5、第6章分别介绍了固定式、门架式塔体结构与吊装设备金属结构的设计计算方法;第7、第8、第9章分别介绍了活动发射塔与起重机运行机构、起升机构、旋转机构、安全指示与供电装置等设计与计算;第10章介绍发射塔用工作平台的设计与计算;第11章介绍脐带塔(杆)的设计与计算;第12章介绍发射塔用的各种大门的结构、传动、密封形式等的设计与计算。

这些内容中有许多是与民用机械相通的,更有许多是民用机械所没有的。在与民用机械相似的机构中也有许多特殊的要求,本书中都有详细论述。本书编写时引用了《起重机设计规范》^[1]、《起重机械》^[3]、《起重机设计手册》^[4]、《金属结构》^[9]的有关内容,并做了适当修改和补充。本书的特点是作者结合自己的工作实践撰写出来的,其中许多内容是作者工作经验的总结。

本书由于撰写时间较长,其间国家标准多次变化,新技术、新材料、新工艺的应用与发展很快,书中引用的公式与表格有的较陈旧,虽在最后审稿时予以改正,仍难免有遗漏之处。

由于水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

为本书的出版,各级领导同志给予大力支持,刘占卿、刘英华同志做了大量的工作,资料室的同志也给予许多帮助,非常感谢。

作 者
2006年4月

目 录

绪 论	1
0.1 概况及用途	1
0.2 发射塔分类及特点	2
0.3 发射塔主要组成部分及要求	7
0.4 发展与展望	8
第 1 章 设计基础	11
1.1 设计原始资料	11
1.2 常用材料及选择	15
1.3 载荷	24
1.4 机构强度、耐久性及稳定性计算	41
1.5 联接	47
第 2 章 发射塔总体方案设计	74
2.1 方案设计概述	74
2.2 塔型设计与选择	76
2.3 发射塔总体尺寸及工艺设计	78
2.4 用数值统计方法进行方案评审	81
第 3 章 金属结构计算总论	88
3.1 综述	88
3.2 许用应力法计算总则	89
3.3 轴向受力构件计算	93
3.4 受弯构件计算	110
3.5 受扭构件计算	136
3.6 桁架结构计算	149
3.7 基本构件——柱、梁、杆	160
3.8 用电子计算机计算金属结构	175
第 4 章 固定式塔体结构	205
4.1 结构形式	205
4.2 主要构件	207
4.3 塔体与各部件之间的联接	215
4.4 载荷与组合	226
4.5 计算简图设计	230

4.6	强度与刚度计算	231
4.7	钢筋混凝土塔体结构设计	233
第5章	门架式塔体结构	235
5.1	结构形式及主要参数	235
5.2	载荷及组合	239
5.3	结构计算模型设计	243
5.4	塔体结构强度及刚度计算	248
5.5	塔体结构与各部件的联接	255
第6章	吊装设备金属结构	267
6.1	发射塔常用吊装设备	267
6.2	载荷与组合	269
6.3	发射塔用桥式起重机金属结构	270
6.4	发射塔用塔式起重机金属结构	281
6.5	固定式回转起重机金属结构	294
第7章	运行机构	297
7.1	特征及组成	297
7.2	支承反力和车轮计算	297
7.3	运行机构驱动方式	307
7.4	运行机构计算	313
7.5	牵引式小车运行机构计算	320
第8章	起升机构与旋转机构	323
8.1	起升机构组成及特征	323
8.2	发射塔用起升机构典型布置	324
8.3	起升钢丝绳卷绕系统设计	325
8.4	大起升高度卷绕系统设计	328
8.5	起升机构计算	335
8.6	旋转机构概述	343
8.7	滚动轴承式旋转支承装置	344
8.8	旋转驱动机构的形式及构造	347
8.9	旋转驱动机构计算 ^[3]	348
第9章	安全、指示与供电装置	356
9.1	缓冲器	356
9.2	防风装置	360
9.3	起重量限制器	369
9.4	载重力矩限制器	372
9.5	限位器	372
9.6	供电辅助装置方案设计	373

9.7	电缆卷筒设计	375
9.8	供缆小车及托链	377
第 10 章	工作平台	379
10.1	工作平台设计综述	379
10.2	翻板式及折叠翻板式工作平台	385
10.3	推拉式工作平台	391
10.4	升降式工作平台	396
10.5	回转式工作平台	408
10.6	可调标高式工作台	421
10.7	平台密封洁净间设计	426
10.8	平台附件	432
10.9	工作平台驱动装置	440
第 11 章	脐带塔(杆)设计	459
11.1	脐带塔(杆)概述	459
11.2	脐带塔(杆)金属结构	464
11.3	脐带塔(杆)附属机构	484
11.4	脐带塔(杆)驱动装置	488
第 12 章	航天发射塔非标准大门设计	495
12.1	大门构造形式	495
12.2	平板式大门结构及计算	497
12.3	门框、导轨及导轮	506
12.4	门轴及支座	511
12.5	大门闭锁装置	514
12.6	大门密封装置	519
12.7	大门驱动装置	521
参考文献		528

绪 论

0.1 概况及用途

自从1957年10月4日前苏联发射第一颗人造地球卫星和1961年4月12日把世界上第一宇宙宇航员尤里·加加林少校送上太空,人类便开始了宇宙航行的时代。推力更大、技术更先进的大型运载火箭先后被研制出来。1967年美国把宇航员送上月球,使人类的幻想变成了现实。航天飞机的诞生和使用,更推进了宇宙航行的进程,可以说,人类在星际之间航行已经不再是遥远的将来。我国航天事业虽然起步较晚,但也取得了举世瞩目的成就。

随着大型航天飞行器的研制成功,为其发射服务的大型发射勤务塔也先后被建造起来了。美国佛罗里达州肯尼迪航天发射场以及西部的范登堡航天发射场都建造了各种类型的发射塔和其他发射设备。法属圭亚那库鲁发射场、日本种子岛犬崎发射场也同样建造了大型的发射塔。我国的酒泉卫星发射场、西昌卫星发射场和太原卫星发射场也建造了大型火箭发射塔。可以说,有什么型号的航天飞行器,就要有相应的发射塔为其服务,否则是无法进行发射试验的。

大型航天飞行器的发射塔是非常庞大的钢铁构筑物。其重量少则几百吨,多则几千吨;其高度矮则几十米,高则一百多米。例如:法属圭亚那的库鲁发射场为“阿里亚娜”运载火箭服务的发射塔高82m,重约1000t;我国为“长征”2号运载火箭服务的发射塔高77m,重1180t;美国为发射登月火箭服务的活动勤务塔,高125m,重4760t,底部尺寸为40m×40m,其发射塔架(也称脐带塔)高116m,重2450t,底部尺寸为18.2m×18.2m。像这样高大的构筑物其设计和建造工作都是非常复杂的。

发射塔的用途就是为发射和试验运载火箭、卫星、飞船等航天飞行器提供地面服务。它要为完成运载火箭各子级的起竖、吊装、对接,卫星的吊装、装拆吊具,安装各种仪器、仪表及插头,为航天飞行器供电、供气并进行各诸元的垂直测试检查,加注、泄出推进剂,进行综合测试检查和临射前总检查等各项工作提供必要的工作条件和设备。

为了完成上述各项工作,航天发射塔必须设计有牢固的塔体结构和具有良好工作性能的起重吊装设备;必须有具备良好工作条件的工作平台;必须有能支承电缆、加注、供气管及其插头和连接器用的脐带塔或脐带杆和勤务臂;必须有作为垂直交通用的电梯和爬梯;必须有放置仪器、仪表和进行测试检查等各种用途的工作间;有的还要设置能够进行空气净化和温度、湿度调节的卫星测试工作间;必须有加注、泄出燃料的管道、消防管道、给排水管道及其支架和控制台;必须有能容纳足够多的测试电缆的通道和支架;还必须有完善的照明设备、通信设备以及其他应当具有的设备,等等。因此,大型航天发射塔是一个具有多种设备、多种专业、多种机构和结构的特殊的有机组合体,是一个具有特殊用途的钢铁巨人。

设计和建造这样的发射塔,要花费巨大的人力、物力和财力。因此,拥有大型航天飞行

器发射能力的世界各国,在研制大型运载火箭的同时,很重视发射塔的设计研究和建造工作。在满足发射工作使用的前提下,使其结构简单、重量轻、投资省、造形美观且能一塔多用。在进行少量改建扩建之后,能满足多种型号航天飞行器的使用。

随着我国航天事业的发展,我国已经设计和建造了不同类型的航天发射塔,今后还将设计和建造满足新型航天飞行器发射使用要求的、具有我国特色的航天发射塔。

0.2 发射塔分类及特点

一、概述

航天发射塔有勤务塔和脐带塔之分。用于支承测试电缆、加注供气管道等的固定式或后倒式塔架,一般称为脐带塔。用于吊装对接、测试检查、加注燃料等其他工作的塔架称为勤务塔。二者合称发射勤务工作塔,简称发射工作塔或发射塔。

由于世界各国的大型运载火箭的型号不同,性能不同,各种仪器仪表的自动化程度不同,发射时测试检查的项目不同,各国的国情不同,发射场所在地气候条件、地形条件的不同,因此,设计建造的发射塔的结构形式也不同。从各种资料表明,世界各国建造的发射塔,几乎没有两座是完全相同的,要想将其归纳分类是比较困难的。但为了分析研究的需要,我们试图将其归纳分类,以供参考。

按发射塔的运动形式可分为后倒式、直立固定式和直立活动式。

按发射塔体横截面构造形式可分为“吕”字形(图0-1(a))、矩形(图0-1(b))、“凹”字形(图0-1(c))、“K”字形(图0-1(d))。

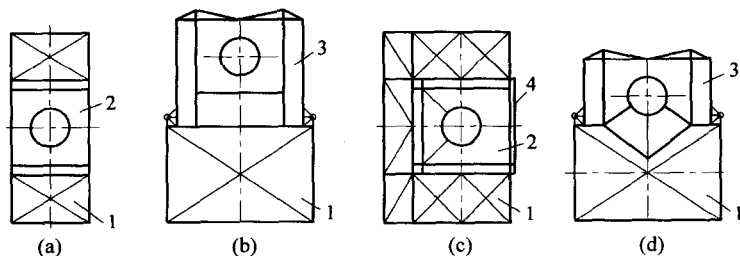


图0-1 发射塔体横截面构造形式

1—塔体结构; 2—平台; 3—旋转式平台; 4—大门。

按使用的工作位置可分为单工位、双工位和多工位。

按塔体的组合方式可分为单塔式、双塔式和多塔式。

虽然对发射工作塔进行了分类归纳,但建造使用时彼此之间都要相互联系。例如,直立固定式发射工作塔只能用于一个发射工位,其横截面的构造形式一般为矩形或“K”字形,一个发射塔便可完成发射服务工作;直立活动式勤务工作塔常用于两个发射工位或多个发射工位。其结构形式有“门”式,有整体式,其横截面构造则多种多样。另外,与直立活动式勤务工作塔配合使用的必然还要有一个直立式或后倒式脐带塔。因此,直立活动式塔架必然是双塔式或三塔式;至于后倒式发射塔,一般为三塔式,即其中一座作为脐带塔使用,另两座作为勤务塔使用,它们的横截面构造形式一般以“品”字形布置。

下面以塔架的运动方式不同分别介绍各种类型的工作塔的特点。

二、后倒式发射塔的特点

后倒式发射塔,常用于捆绑式大型运载火箭或单级中短程运载火箭。单级中短程火箭用的后倒式发射塔(或称高空工作台)是一塔多用的设备,既可作为公路运输支架车及火箭起竖机械使用,又可作为勤务工作塔使用。这种塔架的主要组成部分有塔体结构、擒纵臂、支腿、工作平台、爬梯、液压系统和充气式行轮机构等,它可以用牵引车拉着在公路上行驶,机动性好。其结构见图0-2。

用于捆绑式大型火箭的后倒式发射塔,一般由三个各自独立的塔架,按“品”字形布置,其中一个作为脐带塔使用,另两个便是执行测试、检查、加注工作的勤务塔,图0-3所示为苏联用于“联盟”号运载火箭的发射塔。这种形式的发射塔的特点是:高度比较低,一般只比箭体略高,不超过(50~60)m;工作平台的面积比较小,其工作标高虽然可以调整,但是在工作过程中平台的高度是不调整的;一般不设大型的起重吊装设备,在塔顶只设小型吊车,供吊运小型物品使用;火箭的起竖、对接工作由专用的起竖架完成;勤务塔的垂直交通一般以爬梯为主,也可设置简易的电梯;火箭测试检查用的仪器设备,主要放置在地面勤务测试间内,勤务塔上只能设置少量的测试工作间;勤务塔的起竖和后倒都是采用液压驱动,工作平稳、可靠;当火箭的测试、加注和总检查工作结束以后,用作测试检查的两个勤务塔便后倒一定角度或全部倒地,只留下脐带塔矗立在火箭旁边,在火箭点火发射前的几十秒内,火箭的各脱落插头脱落,脐带塔后倾一定的角度,让开火箭的横向漂移安全区,以保证火箭的安全飞行。

这种发射塔重量比较轻,受风载荷的影响比较小,具有较强的抗自然灾害能力。对于躺倒在地面上的设备,维修比较方便。但设备加工量较大,机构比较复杂。它特别适于以捆绑

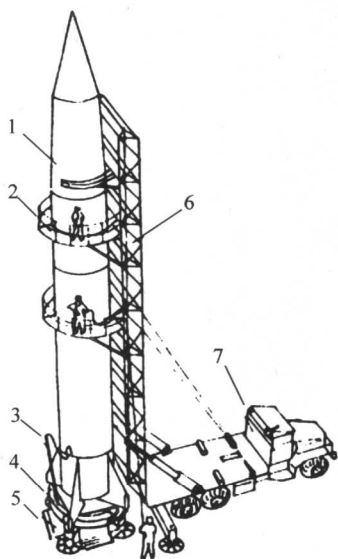


图0-2 单级火箭发射工作塔

1—火箭；2—工作平台；3—脐带杆；4—发射台；
5—导流锥；6—起竖架；7—工作车。

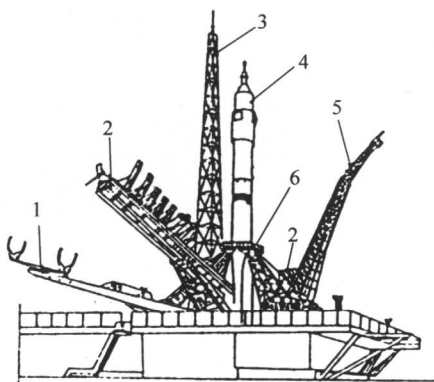


图0-3 大型火箭后倒式勤务工作塔

1—起竖运输车；2—勤务塔；3—避雷塔；
4—运载火箭；5—脐带塔；6—支承臂。

式为主,横向漂移量较大的大型运载火箭使用。

三、直立固定式发射塔的特点

直立固定式发射塔是另一种结构形式的塔架。所谓固定,就是当火箭起飞发射时塔架不移开,固定式脐带塔也包括在此类塔架之内。这种塔架有一个直立固定的高大塔体,顶部装有起重吊装设备;塔架的两侧装有工作平台和附着式脐带杆;而专用的脐带塔前面则装有勤务臂(或称水平杆)。图0-4便是典型的直立式固定发射塔。

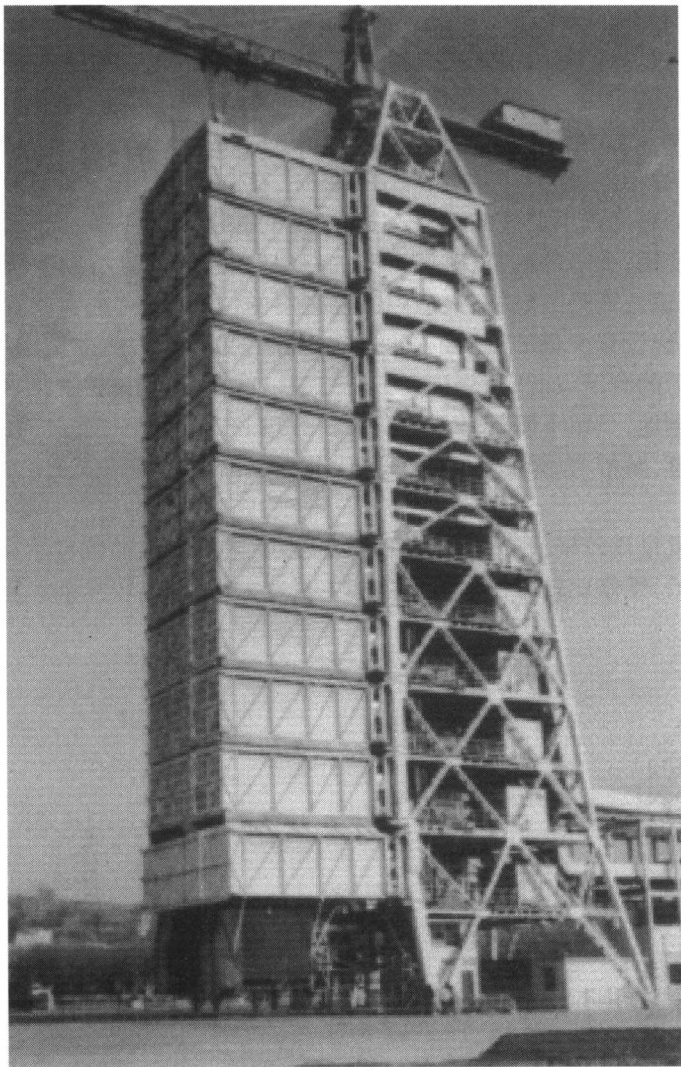


图0-4 固定式发射塔

这种发射塔的横截面一般设计为矩形或“K”字形结构。由于塔体要让开火箭飞行安全漂移区,所以塔体离发射中心的距离较大,以致造成其工作平台的悬臂和吊车的工作幅度比较大,且脐带塔(杆)的勤务臂(或称水平杆)也比较长,这是它的第一个特征。

这种发射塔的第二特征是工作平台一般设计成旋转式或推拉式;吊车设计成塔式或