

# 一种承力式表面张力贮箱

陈志坚, 邱中华

(上海空间推进研究所, 上海 201112)

**摘 要:** 卫星平台总体结构的要求是自身重量轻, 承载能力强, 与推进剂燃料贮箱是相同的, 如果能把推进剂燃料贮箱作为卫星平台的结构承力件使用, 无疑会使卫星平台的结构重量减轻。为此, 提出一种卫星平台承力结构件的表面张力贮箱方案。针对采用承力式表面张力贮箱的卫星平台承力结构方案进行了基本的受力分析。通过实例计算证明了承力式表面张力贮箱的适用性。

**关键词:** 承力; 表面张力贮箱; 卫星平台; 主承力结构

**中图分类号:** V434+.23-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 01-0025-05

## Bearing surface tension tank

CHEN Zhi-jian, QIU Zhong-hua

(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** The main structure of satellite platform is required to have light weight and large loading capacity, which is in accord with the propellant tank. If the propellant tank can be used as the bearing structure, the weight of satellite platform can be reduced. Thus, a new style of surface tension tank which can be used as the main bearing structure of satellite platform is discussed in this paper. The basic force analysis for the main bearing structure of satellite platform with bearing surface tension tanks was carried out. The applicability of the bearing, surface tension tanks was proved by an example computation with FEA codes.

**Keywords:** bearing; surface tension tank; satellite platform; main bearing structure

## 0 引言

卫星平台的结构是卫星整体的主体结构, 其结构的性能直接关系到卫星有效载荷的能力和卫星在轨的工作寿命。美国、欧洲、日本、中国、

俄罗斯和印度发射的卫星都有自己的结构特点, 但归纳起来主要有中心承力筒结构、板式结构、桁架结构和它们的组合结构。以美国休斯公司为代表的制造商采用的是桁架结构, 典型的卫星平台有 HS-601 平台、HS-702 平台; 以劳拉空间系

收稿日期: 2013-01-25; 修回日期: 2013-11-13

作者简介: 陈志坚 (1957—), 男, 研究员, 研究领域为各种航天器用推进剂贮箱的设计

统公司为代表的制造商采用的是主承力筒结构,典型代表是 FS-1300;在欧洲法国宇航推出的空间公用舱卫星平台,典型的有 Space-bus1000, 2000 和 3000;马特拉马可尼空间公司推出的欧星平台有 Eurostar-1000, 2000 和 3000。俄罗斯和日本发展了 GOMS 和 MTSAT 静止气象卫星;印度研制了 INSAT-1, 2 和 3 代气象和广播通信合用的多功能卫星;我国先后发射了东方红系列通信卫星和风云系列气象卫星等结构都是承力筒结构、板式结构、桁架结构和它们的组合结构形式<sup>[1-6]</sup>。除此之外,俄罗斯 FREGAT 上面级中采用了将主承力桁架放置在贮箱中的主承力结构,见图 1。它采用 6 件贮箱(包括 4 件推进剂贮箱与 2 件安装设备单机的贮箱)相贯的结构,通过相贯连接与桁架连接实现主承力结构的功能。



图 1 俄罗斯 FREGAT 上面级  
Fig. 1 Russia FREGAT upper stage

卫星平台上的贮箱是姿轨控系统的重要部件,它的体积和重量约占卫星平台的 80% 到 90%,是卫星平台中最庞大的部件,是卫星变轨和调姿所需动力燃料的储存容器。如果贮箱失效,轻则缩短卫星寿命,重则引起爆炸导致整个卫星毁灭。由于贮箱部件的特殊性,所以贮箱在设计 and 制造时,要求其尽可能的坚固,承受载荷的能力强,在卫星平台的安装和联结方面,要求尽可能地使其受力最小,承力条件最好。但由于火箭运载能力限制,又要求卫星平台自身重量最轻,使其能携带最多有效载荷和推进剂燃料。这两个方面相互矛盾的要求迫使工程技术人员必须选择最佳设计。

由于推进剂燃料贮箱在整个卫星的重要性及其失效的危险性,在上述卫星平台的结构设计中,除俄罗斯 FREGAT 上面级外没有一种结构是将贮箱作为卫星平台的受力件来考虑的,随着科学技术的不断发展,计算机辅助设计日趋成熟,特别是近年来航天事业的迅速发展积累了大量的航天工程经验,使贮箱既是推进剂燃料容器,又是卫星平台结构件的设计方案有可能应用于实际。

现在卫星平台所应用的贮箱种类按其结构大概可分为 3 大类,表面张力贮箱,膜片(膜盒)式贮箱,囊式贮箱等。表面张力贮箱相对其它 2 种贮箱,显著的优点是其为全金属的焊接结构件,在工作过程中没有相对运动的部件,它工作可靠,自身结构重量轻,挤出效率高,是国内外航天工程中卫星平台首选的推进剂燃料贮箱。

对于卫星平台总体结构的要求是自身重量轻,强度刚度大,承载能力强,这与推进剂燃料贮箱是相同的,如果能把推进剂燃料贮箱作为卫星平台的结构承力件使用,无疑会使卫星平台的结构重量减轻,但同时也必须解决推进剂燃料贮箱安全性问题,才能将这种设想应用到实际中。

## 1 卫星平台主承力结构

假设一种有承力式表面张力贮箱(简称“承力贮箱”)构成的卫星结构平台方案,卫星平台主承力结构的布置如图 2 所示。该结构包含 4 个同种规格的表面张力贮箱,2 个转接框架和一些斜撑拉杆件。4 个贮箱呈阵列平铺式,贮箱的上下法兰分别与上下转接框架连接,在 4 个贮箱对称轴的下半部安装轨控发动机,在 4 个贮箱的空档处布置支撑拉杆件与轨控发动机头部连接,上转接框架安装有效载荷,下转接框架与运载连接。上述构件连接的方式近似桁架结构连接,形成卫星推进部分的主承力结构,各姿控发动机推力室按要求布置在主承力结构的上、下面或侧面。桁架结构除能将较大的有效载荷过载力传到运载结构上外,也起到防止主承力结构扭转或弯曲等作用,但贮箱壳体受力较小,这主要是由承力贮箱的结构决定的。

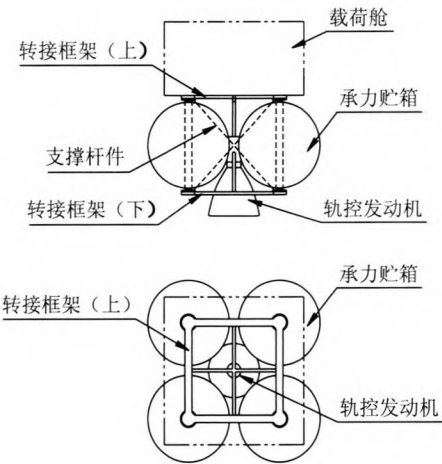


图 2 卫星平台主承力结构布置示意图  
Fig. 2 Layout of main bearing structure of satellite platform

## 2 承力贮箱结构及受力分析

### 2.1 承力贮箱的结构

承力贮箱的结构如图 3 所示，在贮箱中心轴线设置一承力柱（实际是筒状），承力柱两端焊接上下 2 个法兰，分别与上下转接框架连接同时也固定了贮箱，贮箱的进/出接嘴可设计在承力柱中轴线上，也可设计在承力柱以外的贮箱封头上。贮箱的承力柱既是贮箱的主承力构件也是表面张力贮箱管理装置的构件，能承载较大的轴向力，在设计上考虑发射时主动段的过载加速度高达  $9g$ 。

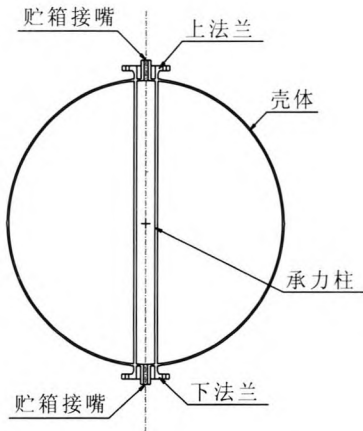


图 3 承力贮箱基本结构示意图  
Fig. 3 Basic structure of bearing tank

承力贮箱作为承力构件参加了卫星平台的主承力结构，替代了大部分卫星平台的主承力构件。与传统贮箱比较，由于增加了承力柱使承力贮箱本身的结构重量增加，但是由于承力柱两端法兰与转接框架连接省去了传统贮箱的赤道安装法兰，并且承力柱也是内部推进剂管理装置的一部分，所以增加的重量不会很多。从卫星平台的总体来看，采用承力贮箱所增加的重量远小于卫星平台减少的重量，对整个卫星平台而言可以提高承载有效载荷的能力。

### 2.2 承力贮箱的受力分析

通过对承力贮箱进行结构分析，可知载荷力虽然作用在贮箱上，但它的作用点在贮箱的承力柱上，贮箱的壳体并没有直接受力，只有当贮箱承力柱受力发生（压缩）形变时才会牵动贮箱壳体靠近承力柱的周边受力，如图 4 所示承力柱的受力形变是可以通过设计控制的，在设计中优化承力柱的截面尺寸，使之在承受最大载荷变形时，贮箱壳体受力变形在安全范围之内。

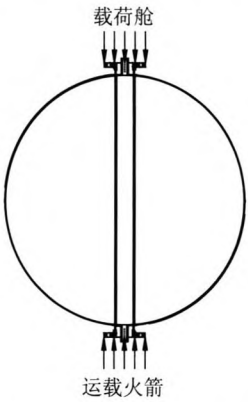


图 4 承力贮箱受力示意图  
Fig. 4 Schematic diagram for basic load of bearing tank

贮箱内部的充气压力均匀分布在贮箱内表面上，安装法兰由于布置的位置不同所引起的受力有所不同，传统贮箱的安装法兰一般布置在赤道附近，贮箱在发射过程中推进剂过载受力状态见图 5 所示。传统贮箱的球形壳体要承载在发射主动段推进剂重量引起的过载力，从质心通过球壳体传递到赤道法兰上，由赤道法兰将力传递到卫星平台的承力筒或是承力桁架。而承力贮箱安装

法兰布置在贮箱球体两极的中心承力柱上，贮箱内装载的推进剂重量在发射时引起的过载力也在贮箱的质心上与中心承力柱轴线重合，贮箱壳体所承受的力是由最大圆周逐步向内圆心传递，在圆心处最大。因此，承力式贮箱的安全性与传统贮箱相当。

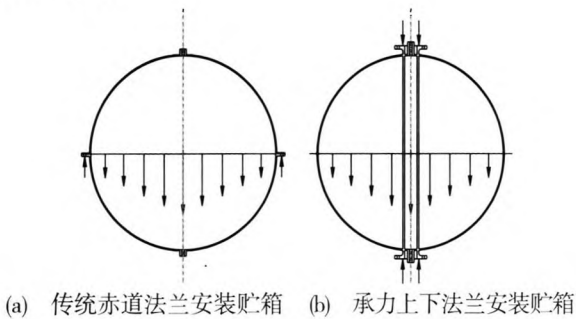


图 5 发射过程中推进剂过载受力状态示意图  
(未标示内压)

Fig. 5 Diagram of force distribution during the launch  
(excluding inner-pressure)

从贮箱壳体受力分析来看，贮箱壳体要采用不等壁厚的设计，与承力柱连接的球体顶部要通过增加壁厚来降低因推进剂重量过载引起的应力增加和结构焊缝系数的补偿，见图 6。承力柱采用与壳体相同的材料（一般为 TC4 钛合金）通过真空电子束焊接的方法将其焊接在一起，可以有效提高贮箱的刚性和承压能力。当贮箱充压时，内压引起的张力不仅由赤道环焊缝承担，承力柱也分担一部分张力；当在发射主动段有效载荷过载的压力传递到承力贮箱时，贮箱所受的力是压应力，这两部分的合力是它们的代数和，而拉压应力会抵消一部分，增加贮箱的可靠性。

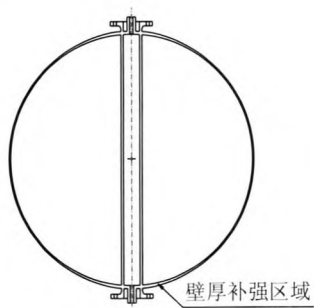


图 6 不等壁厚的贮箱壳体示意图

Fig. 6 Diagram of tank shell with different thickness

另外，承力贮箱除了考虑壳体的强度，还要考虑推进剂管理装置（PMD）的性能及结构可靠性。PMD 装置（通道网式 PMD 结构或板式 PMD 结构）主要布置在贮箱壁面处，因此承力柱的设置对 PMD 性能无不利影响，而且 PMD 装置中的气泡陷阱等结构可以与承力柱集成设计。

总之，承力式表面张力贮箱与传统表面张力贮箱相比较在安全性方面并不差，从分析来看不会比传统贮箱更危险。虽然承力贮箱较传统贮箱结构复杂，在设计、工艺制造和试验方面增加了难度，但目前的技术水平都是可以解决的。贮箱壳体不等壁厚的设计计算可以采用有限元已有成熟的计算方法和软件，数控机床也可以加工不等壁厚。而在卫星平台减重方面则具有相当的潜力可挖。

### 3 举例说明

假设一种容积为 100 L 的球形承力式表面张力贮箱，对承力贮箱的受力情况进行定量计算。贮箱几何模型见图 7。基本参数见表 1。认为贮箱充填 100 L（满载）密度为  $1.45\text{ g/cm}^3$  的推进剂。取不同的载荷舱重量，取载荷舱分配到单个贮箱的轴向支承重量分别为 100 kg，200 kg 与 300 kg 进行计算。

主要考虑贮箱的受内压与载荷舱的主动段过载，贮箱受力情况如表 2 所示。

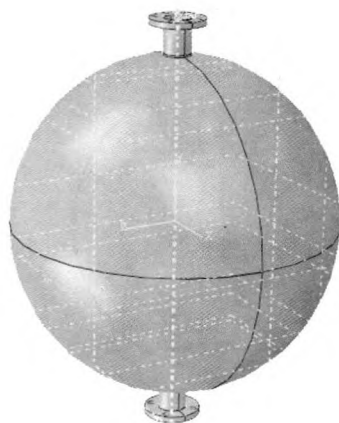


图 7 贮箱几何模型

Fig. 7 Geometry model of tank

表 1 贮箱基本参数

Tal. 1 Basic parameters of tank

指 标	参 数
贮箱容积/L	100
最大工作压力/MPa	2
液压验收压力/MPa	3
爆破压力/MPa	≥4
贮箱材料	钛合金 TC4
贮箱内径/mm	580
壳体壁厚/mm	1(焊接处增厚补强)
承力柱规格/mm	50×2
上下安装法兰外径/mm	100
上下安装法兰内径/mm	42

表 2 贮箱受力情况说明

Tab. 2 Load of tank

载 荷	表 达	备 注
内压/MPa	2	
推进剂过载/g	10	取主动段过载为 10 g
载荷舱过载/g	10	

初步计算结果见表 3。由表 3 可见，上法兰承重的大小直接影响承力柱与上壳体连接处的应力，承力柱结构支承作用明显，随着支承重量的增加，承力柱的受力因受内压的共同作用先减小后增大。另外，贮箱壳体下部应力较大，但其与支承重量关系不大，因为承力柱分担了这部分重量，计算结果见表 4。

表 3 承力柱支承重量与应力大小

Tab. 3 Bearing mass, stress and strain of bearing column

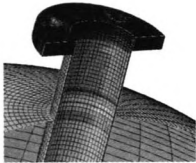

基本载荷	上法兰附加载荷	承力柱应力 最大值/MPa	承力柱最大 变形量/mm	最大应力位置
内压 2 MPa 满载状态过载 10 g	100 kg 质量 加速度 10 g	756	2.1	
	200 kg 质量 加速度 10 g	725	2.3	
	300 kg 质量 加速度 10 g	731	2.5	

表 4 壳体下部受力情况

Tab. 4 Force of shell bottom at different bearing mass

基本载荷	上法兰附加载荷	壳体应力 最大值/MPa	最大应力位置
内压 2 MPa 满载状态过载 10 g	100 kg 质量 加速度 10 g	756	
	200 kg 质量 加速度 10 g	725	
	300 kg 质量 加速度 10 g	731	

实例计算说明，承力柱的作用非常明显，可满足其作为卫星平台承力结构的条件。经估算，

将承力贮箱用于卫星平台主承力结构，可简化承力结构桁架，减轻推进系统结构干重约 10%。

(下转第 38 页)



## 参考文献:

- [1] HSIEH S C, CHEN J H, LEE A C. A modified transfer matrix method for the coupling lateral and torsional vibrations of symmetric rotor-bearing systems [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 289(1/2): 294-333.
- [2] EDE J D, ZHU Z Q, HOWE D. Study of rotor resonances high speed permanent magnet brushless machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(6): 1542-1548.
- [3] HOLM-CHRISTENSEN O, TRAGER K. A note on rotor instability caused by liquid motions[J]. Journal of Applied Mech, 1991, 58(4): 801-811.
- [4] ZHANG Wen, TANG Jiong, TAO Ming-de. Dynamic stability of a rotor filled or partially filled with liquid[J]. Journal of Applied Mech, 1996, 64(1): 101-105.
- [5] 祝长生. 支承刚度各向异性部分充液转子系统的稳定性[J]. 航空动力学报, 2000, 15(4): 431-434.
- [6] 张大义, 母国新, 洪杰. 航空发动机转子支承系统刚度计算中的几个问题[J]. 战术导弹技术, 2005 (2): 20-23.
- [7] 周明, 倪维斗, 于文虎, 等. 某单轴式燃气轮机支承刚度计算分析[J]. 山东电力技术, 1998 (2): 36-39.
- [8] 盛步云, 张涛, 丁毓峰. 支承刚度对汽轮机转子动力学特性的影响分析[J]. 机械设计, 2008, 25(12): 38-41.
- [9] 姜尚崇, 王正. 汽轮发电机转子的支承动刚度与临界转速问题[J]. 大电机技术, 1996 (5): 14-17.
- [10] 何洪庆, 沈达宽, 张哲文. 涡轮泵转子的临界转速研究 (I) 均匀支承转子临界转速的传递矩阵法[J]. 推进技术, 1998, 19(6): 83-87.
- [11] 韩玉强, 张锁怀. 结构参数对转子-轴承系统临界转速的影响[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(1): 105-107.

(编辑: 王建喜)

(上接第 29 页)

## 4 结束语

以承力式表面张力贮箱为主承力结构组成的卫星平台是一种全新的概念, 通过以上分析, 承力式表面张力贮箱本身在技术上是可行的。而对于卫星平台承力柱两端上下法兰与连接框架的连接方法和斜撑拉杆件的配置还需要进行仔细研究, 主要有以下几个方面: 一是连接框架和斜撑杆的材料选择; 二是贮箱和连接框架以及各斜撑杆的连接方式和局部补强方法; 三是对于这些接头承力能力和工艺质量的判断和评价; 四是对整体结构疲劳和可靠性的考核和验证; 五是具体的试验方法和对建模计算的修正。最终所有以上工作都应通过卫星平台整体的力学环境试验来验证。

## 参考文献:

- [1] 陈昌亚. 储箱平铺多燃料卫星平台的主承力构架结构[J]. 上海航天, 2007 (1): 42-47.
- [2] 陈昌亚. 国外承力筒与构架结构应用浅析[J]. 上海航天, 1997, 14(1): 44-48.
- [3] 徐福祥. 卫星工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2002.
- [4] 王炜, 周徐斌, 顾亦磊, 等. 基于 HyperWorks 的卫星平台贮箱安装板拓扑优化研究[J]. 机械与电子, 2012 (8): 30-33.
- [5] 朱毅麟. 卫星平台的标准化[J]. 空间科学学报, 2000, 20 (10): 116-126.
- [6] 廖云龙, 吴剑. 基于 Riks 方法的复合材料贮箱稳定性分析[J]. 火箭推进, 2013, 39(5): 65-69.

(编辑: 张永)