集主承力结构与大容量储箱支架于一体的卫星主承力筒结构研究 *

陈昌亚 [1,2]　王德禹 [1]

[1](上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院　上海 200030)

[2](上海卫星工程研究所)

摘　要　针对现代卫星结构的大型化、燃料储箱的大型化，提出了一种集主承力结构与大容量储箱支架一体化的卫星主承力筒结构形式，旨在降低卫星质心、提高基频；在满足储箱容积的前提下，又能满足主结构有效载荷往运载的力的传递作用. 有限元数值计算表明，该结构形式能够满足卫星相关结构性能的要求，可以作为今后卫星结构设计的参考构型.

关键词　卫星结构；主承力筒；大型卫星；卫星储箱；支架

中图法分类号　V 42

The Research on Main Satellite Bobbin Cylinder Incorporated With Main Heary Structure and Bracket of Large-Volume Tank

CHEN Changya[1,2]　　WANG Deyu[1]

[1](*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai* 200030)

[2](*Shanghai Institute of Satellite Engineering*)

Abstract　With the background of the large-scale of modern satellite structure and propellant tank, a format of main satellite bobbin cylinder incorporated with main heary structure and bracket of large-volume tank, are proposed aiming at lowering the centroid and increase the fundamental frequency. The new structure type can meet the requirements of both the design of tank volume and the mechanical transferring efficiency from payload of main structure to carry. The numerical computation of finite element method indicates that the proposed structure format can meet the requirement of relevant structure performances and can server as the referential configuration of satellite structural design in the future. The main bobbin structure is weaved by high modulus carbon fiber, the cylinder of which is embedded a carbon fiber board inside. The designability and spreading weavablility should be made full use of to produce it according to the need.

Key words　Satellite structure, Main satellite bobbin cylinder, Large-scale satellite, Propellant tank, Bracket

---

* 国家“十五”预先研究课题资助

2004-08-23 收到原稿，　2005-01-12 收到修定稿

1 引言

随着现代卫星技术的发展，卫星的结构越来越趋于大型化、柔性化与复杂化，卫星的重量也随之重量也越来越大[1]. 例如，美国的 Lacrosse 卫星，重达 14.5 T[2]，轨道寿命 8 年. KH-11 照相侦察卫星自 1976 年首次发射以来已经发射 10 余颗，长 19.5 m，直径 3 m，质量 13 T 以上，星上除了携带大型可见光侦察相机外，还携带了红外相机和多光谱相机. KH-12 是一颗大型高精度普查和详查相结合的侦察卫星，长 20 m，直径 5 m，质量 14 T 以上 (包括 5300 kg 的双组元推进剂). 此后，美国还将 KH-12 卫星的侦察视场扩大了 8 倍，并与 Lacrosse 雷达成像卫星综合在一起，形成一颗超大型、多功能、宽视场、全天候 8X 型侦察卫星. 该卫星质量达 18 T，将完成军事普查和详查两种功能. 其雷达成像 (普查) 分辨率为 0.9—3 m，CCD 相机 (详查) 分辨率达 0.15 m. 另一方面，由于对卫星寿命要求越来越长，变轨机动也越来越频繁，机动能力要求越来越高. 因此，卫星在设计时需考虑携带较多的燃料，有些甚至多达数吨. 由于携带燃料较多，不仅卫星质量大，而且布局不好将导致卫星质心较高，卫星柔性大，基频低. 在布局中，储箱的布局是决定卫星质心位置的关键.

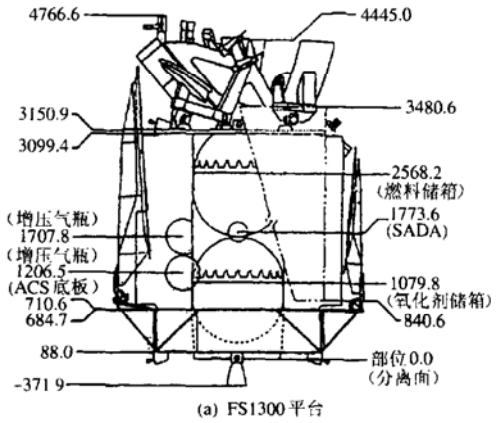
对于主承力结构来说，不外乎主承力筒结构，构架式结构和混合式结构三大类[3],[4]. 针对携带较多燃料同时还要传递较大载荷的空间大平台，本文提出了一种集主承力结构与大容量储箱于一体的卫星主承力筒结构形式，旨在既满足大质量卫星及大容量储箱的要求，同时又能够降低卫星的质心，提高卫星基频. 有限元数值模拟结果表明，本文提出的结构形式，能够满足卫星的有关结构性能要求，可以作为未来相关卫星研制的参考构型.

2 典型储箱布局特点分析及现状

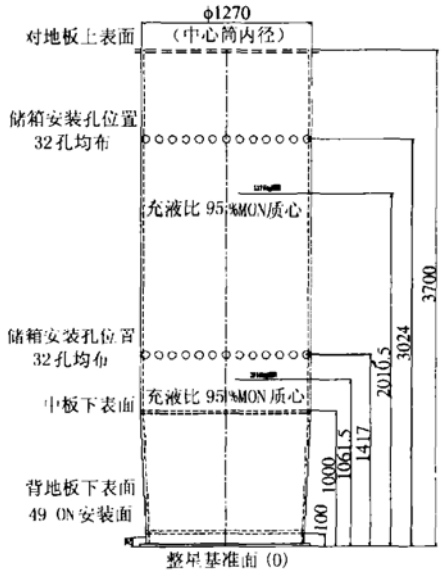
目前，卫星储箱的典型结构形式是上下叠放布局或环向布局.

2.1 储箱上、下叠放布局

在主承力筒内上、下法兰上固定 2 个储箱，储箱在筒内上、下排列. 例如，美国 Laura 公司 FS1300 的平台主承力构件采用中心承力筒，2 个推进储箱串联放置在承力筒内[5]，如图 1(a) 所示. 欧洲空间局的 Space Bus 3000 平台，中国的 DFH-3、DFH-4 等卫星平台均是如此. DFH-4 卫星的 2 个直径 1250 mm 的储箱上、下布置，每个储箱通过 32 个 M8 螺钉连接，如图 1(b) 所示.



(a) FS1300平台



(b) DFH-4 平台

图 1 储箱在承力筒内的布设位置

Fig.1 The position arranged of the tanks in the bobbin cylinder, (a) is FS1300 platform, and (b) is DFH-4 platform

2.2 储箱环向布局

在储箱支架的周向布局储箱，储箱环向平铺. 例如SPOT, HS601和Eurostar 3000平台. SPOT 平台系列[6] 通过推进舱的储箱支架环向连接 4 个储箱，储箱支架承力环下与服务舱承力筒连接，上通过W型承力构架支撑载荷舱的载荷. SPOT 平台能支撑 1 T 以上有效载荷，但储箱细小，法兰连接尺

寸仅 ϕ 434 mm, 携带燃料化约 300 kg, 如图 2 所示.

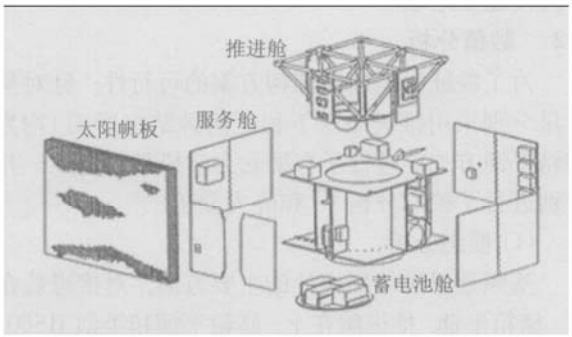


图 2 SPOT 卫星平台分解图

Fig.2 The exploded view of SPOT satellite

HS601 平台储箱环向布局在承力筒、板块和桁架结构上, 如图 3 所示. 平台模块包括: 4 个蓄电池包、12 个 2 磅 (8.89 N) 和 5 磅 (22.2 N) 推进器、4 个 0.9 m 直径的球形钛推进剂储箱和液体远地点发动机. 平台外形大约为 2.2 m × 2.2 m × 2 m; 储箱有 2 个系列, 第 1 系列储箱尺寸为 ϕ 860 mm, 第 2 系列储箱尺寸为 ϕ 940 mm. 这种平台上部的支撑载荷只有 440 kg, 最大载荷为 680 kg.

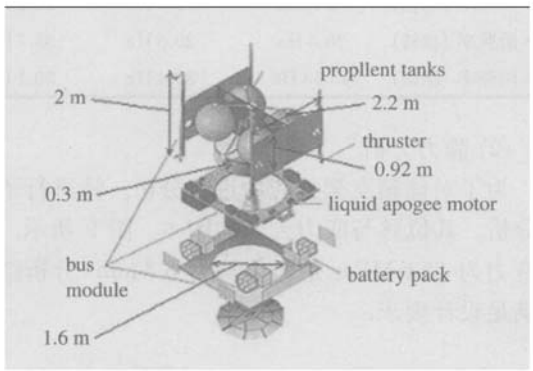


图 3 HS601 结构分解图

Fig.3 The exploded view of HS601 structure

Eurostar 3000 系列平台的储箱环向依附于主承力筒上, 如图 4 所示.

可以看出, 上述卫星储箱布局形式特点如下.

(1) 卫星储箱上、下叠放布局, 整星质心较高, 不利于提高卫星基频.

(2) SPOT 平台储箱容量太小, 不能满足现代大卫星携带燃料的需要.

(3) HS601 平台虽提高了储箱容量, 但上部承担有效载荷能力不大, 不能满足现代大卫星的需要.

因此, 针对存在的问题, 开发出一种既能使卫星质心位置较低 (储箱平铺), 又能承载较大载荷的能够集主承力结构与大容量储箱于一体的主承力筒结构, 对现代卫星结构的设计具有十分重要的意义.

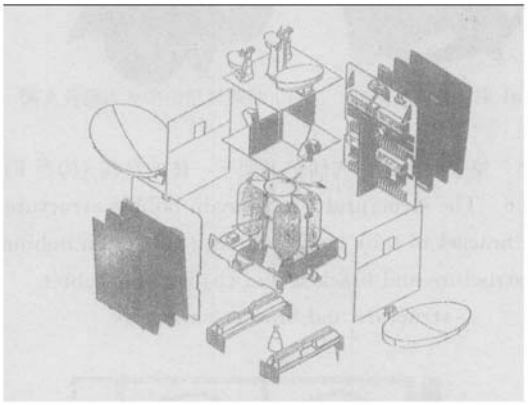


图 4 Eurostar 3000 系列平台结构图

Fig.4 The exploded view of Eurostar 3000 platform series

3 集主承力结构与大容量储箱一体化的主承力筒方案

3.1 主承力结构的设计

主承力结构采用高模量碳纤维复合材料制成, 筒内嵌入碳纤维复合材料板板. 充分利用该材料性能的可设计性, 根据需要进行编制生产. 在主承力筒的 45° 方向凸出储箱连接法兰, 连接储箱法兰.

推进舱可以在下部也可以在上部, 如图 5 所示; 承力筒兼储箱支架, 如图 6 所示; 承力结构与储箱支架一体, 如图 7 所示.

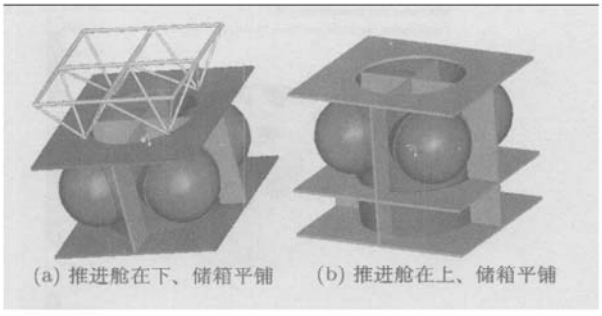


图 5 集主承力结构与储箱支架于一体的结构 (构型 I)

Fig.5 The structural I with main bobbin structure and bracket of tank incorporated, (a) is propulsion module on the lower part and the tanks tiled, and (b) is propulsion module on the up part and the tanks tiled

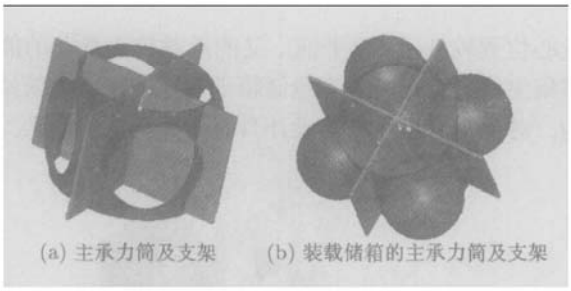


图 6 集主承力结构与储箱支架于一体的结构 (构型 Ⅱ)

Fig.6 The structural Ⅱ with main bobbin structure and bracket of tank incorporated, (a) is main bobbin structure and bracket, and (b) is main bobbin structure and bracket with tank

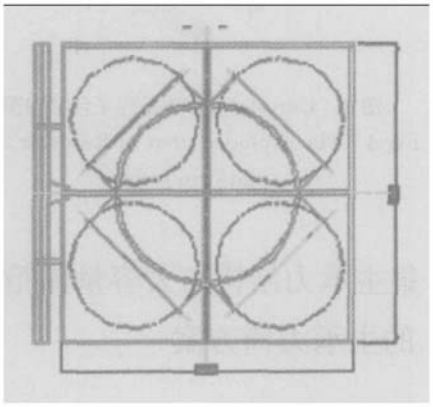


图 7 集主承力结构与储箱支架一体化 (构型 Ⅲ)

Fig.7 The structural Ⅲ with main bobbin structure and bracket of tank incorporated

主承力结构的特点如下.

(1) 充分利用承力筒内的容积, 能够较大限度的利用空间布设储箱;

(2) 主承力筒结构承上启下, 能有效的将载荷舱得力传递至运载.

3.2 数值分析

为了验证所提出的结构方案的可行性, 针对某卫星分别采用推进舱在下和上两种结构形式 (均为储箱平铺方式), 进行了有限元力学模型的建立, 并分别进行了模态分析 [7] 和静力分析.

(1) 模态分析

基频是卫星结构设计的主要方面, 对推进舱在下、储箱平铺, 推进舱在上、储箱平铺和类似 HS601 平台结构方案 3 种方案进行了模态分析, 分析结果详见表 1.

表 1 3 种方案的整星模态分析结果

Table 1 The results of mode analysis of three kinds on whole satellite

	推进舱在下、储箱平铺, 详见图 5(a)	推进舱在上、储箱平铺, 详见图 5(b)	类似 HS601 平台结构方案 详见图 10
卫星纵向质心	1.365 m	1.6349 m	1.276 m
第 1 阶频率 (弯曲)	13.96 Hz	12.6 Hz	11.0 Hz
第 2 阶频率 (弯曲)	14.13 Hz	12.6 Hz	11.1 Hz
第 3 阶频率 (扭转)	25.3 Hz	29.6 Hz	33.7 Hz
第 4 阶频率 (纵向)	43.53 Hz	39.4 Hz	39.1 Hz

(2) 静力分析

为了对储箱支架处应力进行分析, 特进行了静力分析, 其位移与应力云图如图 8、图 9 所示. 最大应力为 65.6 MPa, 最大位移为 3.3 mm, 分析结果均满足设计要求.

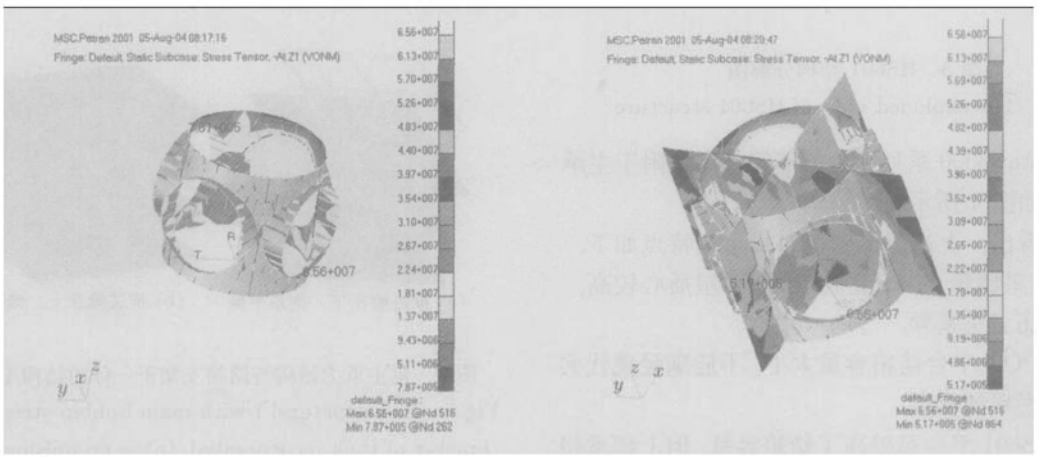


图 8 $(x+z)$ 方向过载应力云图

Fig.8 $(x+z)$ overload tress nephogram

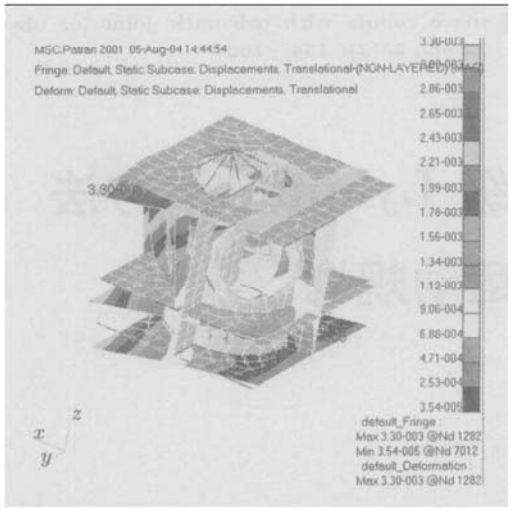


图 9 $(x+z)$ 方向过载位移云图

Fig.9 Overload displacement nephogram

(3) 结果与分析

①所选方案较 FS1300 平台和 DFH-4 平台承力筒内 2 个储箱串联布局相比，具有质心低，频率高的特点.

②与环向布局的 SPOT 平台和 Eurostar 3000 平台相比，储箱的容积比大.

③如图 10 所示，与 HS601 方案相比，具有储箱易布局、基频高的特点. 相反，类似 HS601 方案储箱空间布局与杆件干涉，基频也偏低.

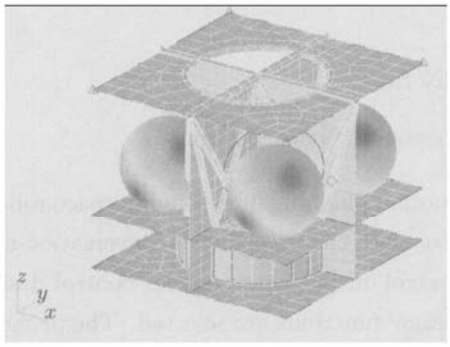


图 10 类似 HS601 平台结构方案

Fig.10 Structural platform similar to HS601

④集主承力结构与储箱一体化的主承力筒在支架处应力达到 65.6 MPa，但仍小于屈服限 $\sigma_{0.2}$ ($\sigma_{0.2\mathrm{Al}} = 255\,\mathrm{MPa}$, $\sigma_{0.2\mathrm{tc4}} = 825\,\mathrm{MPa}$)，满足性能要求.

4 讨论

(1) 集主承力结构与储箱支架于一体的结构是可行的，既可以携带大容量的储箱，又可以承载大吨位的有效载荷，卫星质心又相对较低. 以某携带大吨位燃料 [11] 的卫星为背景，经有限元分析，基频满足运载要求，静力满足要求.

(2) 集主承力结构与储箱于一体的主承力筒的关键技术在于主承力筒制造.

(3) 可以作为今后卫星结构设计的参考构型.

参考文献

[1] Ma Xingrui, Wang Benli, Gou Xingyu *et al.* Some Problem's Advance and Application in Spacecraft Dynamics. Beijing: Science Press, 2001. in Chinese (马兴瑞，王本利，苟兴宇等. 航天器动力学 —— 若干问题进展及应用. 北京：科学出版社，2001)

[2] Luoge. A Collection of World's Spacecraft and Launch Vehicles. Beijing: China Astronautics Publishing House, 2000. in Chinese (罗格主编. 世界航天器与运载火箭集锦. 北京：宇航出版社，2000)

[3] Chen Changya. Analysis on application of heavy bobbin and frame structure abroad. *Aerospace Shanghai*, 1997, (1):44—48. in Chinese (陈昌亚. 国外承力筒与构架结构应用浅析. 上海航天，1997, (1):44—48)

[4] Chen Changya. The preliminary research on reasonable selection of satellite central cylinder. *Aerospace Shanghai*, 2000, (5):34—41. in Chinese (陈昌亚. 对卫星承力筒结构合理选用的初步研究. 上海航天，2000, (5):34—41)

[5] Xu Fuxiang. Satellite Engineering. Beijing: China Astronautics Publishing House, 2002. in Chinese (徐福祥. 卫星工程. 北京：宇航出版社，2002)

[6] Dornier. Earth Observation System. Daimler-Benz Aerospace. ESA Bulletin, 1995, 83

[7] Chen Changya. Talk about the equivalent problems of honeycomb sandwich plates in dynamic analysis. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(2):142—147. in Chinese (陈昌亚. 动力学分析中铝蜂窝夹层板的等效问题. 空间科学学报，2002, **22**(2):142—147)

[8] Berlin P. The Geostationary Applications Satellite. Cambridge: Cambridge University Press, 1988, 72—78

[9] Zhu Yilin. Standardization of satellite platforms. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, **20**(2):116—126. in Chinese (朱毅麟. 卫星平台的标准化. 空间科学学报，2000, **20**(2):116—126)