

蓬勃发展中的小卫星国际标准

卫巍 陆静 周玉霞

(中国航天标准化研究所,北京,100071)

摘要:针对小卫星迅猛发展对标准化的需求,全面分析了现阶段国际标准化组织(International Standardization Organization, ISO)制定的小卫星方面的标准,给出了国际标准化工作中对小卫星的定义,小卫星与传统卫星的差异性分析,详细介绍了 ISO/TC20/SC14 组织制定的小卫星包括设计、发射、验证、运行 4 方面的国际标准和立方星标准。

关键词:ISO 国际标准;小卫星;立方星

中图分类号:V41 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2018)S1-0039-06

Thriving International Standards for Small Satellite

WEI Wei, LU Jing, ZHOU Yuxia

(China Astronautics Standards Institute, Beijing, 100071, China)

Abstract: Based on the rapid development of small satellite, this paper comprehensively analyzes the standard for small satellite in International Standardization Organization (ISO), give the definition of small satellite in international standards, and discuss the differences between small satellite and traditional satellite. Furthermore, the international standards and cube sat standards for design, launch, verification and operation of small satellites formulated by ISO/TC20/SC14 are introduced.

Key words: ISO international standards; small satellite; cube sat

近年来,商业航天概念愈发成熟,小卫星在新技术和新的商业运营模式下在全球卫星应用中呈现爆发式发展,随着微电子、微光机电和集成电路技术不断发展,卫星小型化趋势不断加速,微纳卫星性能快速提升,成为小卫星领域发展最为活跃的组成部分。尤其是 50 kg 以下微纳卫星发展高度活跃,成为航天技术创新和航天应用变革的重要突破点。

数据表明:2017 年,全球共发射 500 kg 以下的小卫星 310 颗,占同期入轨航天器综述的 70.5%。其中,0~10 kg 卫星 276 颗,10~50 kg 卫星 17 颗,50~100 kg 卫星 4 颗,100~500 kg 卫星 13 颗。从发射数量看,2017 年小卫星发射数量翻倍增长,处于历史最高发射水平。美国行星

公司(Plant)2017 年通过 3 次发射部署了 140 颗“鸽群”立方体卫星,贡献了 10 kg 以下卫星数量的过半,小卫星已成为航天产业中的重要组成部分^[1]。

由此可见,新一代的小卫星产业已经发生了质的飞跃,其技术密集程度和功能密度都大大提高,并促使航天领域发生深刻的变革,是未来商业航天领域新的产业增长点。面对蓬勃发展的国际市场,一大批新的参与者试图加入到小卫星产业大军中。想要更好地融入行业发展,就必须掌握行业规则,标准可以明确其应当符合的要求,从而帮助那些计划进入宇航领域的小微企业和大学快速掌握规则。

收稿日期:2018-03-23;**修订日期:**2018-05-30

通信作者:卫巍,男,高级工程师,E-mail:wei90909@163.com。

引用格式:卫巍,陆静,周玉霞.蓬勃发展中的小卫星国际标准[J].南京航空航天大学学报,2018,50(S1):39-44. WEI Wei, LU Jing, ZHOU Yuxia. Thriving international standards for small satellite[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(S1): 39-44.

1 国际标准中小卫星的定义

尽管小卫星的概念已经家喻户晓,但就定义而言,国际航天界尚未达成一致性的意见,最常见的分类原则是按照卫星的质量,通常将小于1 000 kg 的卫星称为广义的小卫星,其中,将 500~1 000 kg 的卫星称为小卫星,将 100~500 kg 的卫星称为微小卫星,将 10~100 kg 的称为显微卫星,将小于 10 kg的称为纳米卫星。但是,也有不少业内人士认为仅仅以尺寸和质量作为卫星分类的准则是缺乏科学性的。

为了达到对小卫星定义的共识,2014 年 11 月 AIAA 组织召开了一个国际研讨会,来自 27 个国家的 88 名专家参与了讨论。会议的结论是,无论是尺寸还是质量,都不是一个适合的定义方法,小卫星的定义应该基于卫星开发的原理或模式。

目前,在国际航天标准领域并未对小卫星进行具体的定义,但是有针对性的提出了 4 种小卫星的定义,具体见表 1。

通过表 1 定义的对比可以看出,其中精益卫星(Lean satellite)的定义较为全面。它包含了小卫星 3 个方面的核心要素,即:(1)研制要求:精巧的、低成本、快速交付,货架式产品为主;(2)管理要求:非传统的风险控制,可接受的可靠性风险;(3)开发条件:规模较小的研究团队,无需丰富的航天产品研制经验。

综上,卫星体积小,并不是追求的最终目标,而是由于寻求低成本和快速交付带来的结果。卫星的设计依赖于使用非宇航级货架式产品,从而降低了成本,同时通过选择小型的产品而实现了卫星及其单机尺寸能够变得越来越小。因此,小卫星的“小”是结果而非原因。

表 1 航天国际标准中小卫星相关的术语和定义
Tab. 1 Terms and definitions in international standards

序号	术语	定义	来源
1	小型辅助航天器	为了更好地利用运载火箭,通过使用富裕的运载能力而与主载荷	ISO 26869
	Small auxiliary spacecraft	共同发射的小型有效载荷	
2	立方体卫星	体积为 100 mm 立方体,质量不大于 1.33 kg 的皮卫星	ISO 17770
	Cube sat		
3	芯片式卫星	仅有单元组成(有时甚至就是块电路板)直接暴露于环境中而不是安装在卫星结构上	ISO 19683
	Flat-sat / table sat		
4	精益卫星	为了实现低成本和快速交付的目标,有较小的研究团体使用非传统的风险控制和策略进行开发的卫星	ISO 19683
	Lean satellite		

2 小卫星与传统的大卫星的差异

正如“精益卫星(Lean satellite)”定义的 3 个关键要素,小卫星的基本特点以及带来的市场经济效益可以从以下几个方面的说明:

- (1)物理参数:重量轻,体积小,可降低航天器成本,简化系统。
- (2)功能:属特定的设计,为专属任务,可减少接口要求,用户少,寿命周期短。
- (3)过程:项目周期短,一般为线性流程(无迭代),因此只关注设计效率,管理结构简单。
- (4)开发:多用已有的组件/设备和成熟的软件,因此无新产品和技术开发,软件重用。
- (5)风险:任务价值中低(即使任务失败,损失也不大),任务容错性高,多依靠现有技术,减少冗余和复杂性。
- (6)发射:多为小型运载或者搭载,发射成本较低。
- (7)地面终端:多为简单的、自动的,人力成本

较低。

根据任务和需求的不同,用户可以拥有更多的选择。不同的选择,也将会面临不同的要求。传统卫星性能要求高、任务重要、系统功能复杂且运行周期长,在标准的要求上需要满足性能的最高要求、接口关系复杂、严苛的条件、全面的试验与测试、采用宇航级产品、具备在轨控制能力、完备的应急预案以及整星的高可靠性。小卫星由于成本有限、功能简单、可承受风险以及研制周期短的特点,在标准方面的要求只需要满足最低要求、最基本的接口、宽松的条件、关键项目的试验与测试、采用货架式产品、无在轨控制、基本应急处置、允许失败。

从开发过程、技术以及开发团队 3 个方面分析小卫星与传统卫星差异,具体内容见表 2~4。这些差异最终则可以反映在标准的差异上。模块化、标准化是小卫星与生俱来的特点,也是低成本的重要原因。同时由于成本低廉,技术门槛低,越来越多的参与者加入这一领域,合作成为小卫星发展的

重要主题。使用通用化模块、货架式产品、标准化接口以及系列化尺寸的产品可以助力小卫星产品的蓬勃发展,这就需要标准来支撑。

标准可以明确航天器应当符合的要求,从而帮助那些计划进入宇航领域的参与者快速掌握规则,

进而解决他们的困惑。标准可以统一基准、明确要求,尤其是对验证要求、接口要求进行统一,用来帮助研制和开发小卫星的用户在研制周期、成本和资源有限的条件下满足任务要求,保证产品品质,避免在轨问题等方面的要求。

表 2 小卫星与传统卫星开发过程的差异
Tab. 2 differences in development processes between small and traditional satellites

项目	传统卫星	小卫星
项目成本	无限制,经常超过 1 亿美元	一般少于 350 万美元,其中卫星 200 万美元,发射 100 万美元,运行 50 万美元。用于试验验证的费用(包括人员费用)小于 50 万美元
交付周期	一般超过两年	小于两年,一般用于设计验证的时间小于 1 年,甚至少于 6 个月
系统更新换代周期	长,有时甚至长达 5~15 年	短,经常采用迭代设计,次代产品的验证只针对新产品进行
任务保证	目标非常高,确保任务成功	允许一定比例的失败,及时发射替代品
制造	针对航天产品的特定的严格的制造工艺和材料控制	使用非航天制造工艺和材料
试验	在内部对单机、分系统进行试验,通过国际、国内、内部标准建立完善的试验程序和文件	试验往往在不同的地方进行,没有特定的试验程序,必要时,甚至多个卫星共享试验项目和数据
控制方式	大量人员,高成本控制;由专家进行操作和控制,大型和高成本的地面站	少量人员,低控制成本;由用户控制和运行;小型的廉价地面站,在合法的前提下,通过网络在移动办公室进行控制

表 3 小卫星与传统卫星的技术差异
Tab. 3 Technical differences between small and traditional satellites

项目	传统卫星	小卫星
重量尺寸	重量只受运载器能力的限制,尺寸收到整流罩空间的限制	重量和尺寸都由搭载发射的条件确定
轨道	任何轨道	大部分地球轨道,一方面受卫星本身通信能力限制,另一方面由主载荷或其转移轨道决定,小卫星不具备机动性
接口	复杂,经常需要进行专门的接口设计	简单,每个产品通过相同类型的接口进行连接,通过采用通用的机械接口减少匹配试验的数量
设计寿命	超过 15 年	小于 3 年,主要与所在的具体轨道有关
可靠性	基于每项产品的随机失效率	强调整体的初始入轨成功率
安全性	全过程要求严格	在发射阶段,要求与大卫星一致
零部件	宇航级,抗辐射电子器件数量需求大	低成本和快速交付,市场化程度高(易获取),具有替代品,操作简单;尽可能减少用量以减少安装集成成本
碎片减缓	使用星上推进系统进行离轨	要求与传统卫星一致,但是小卫星设计时必须预留用于离轨操作的能源

表 4 小卫星与传统卫星开发团队的差异

Tab. 4 Differences in development teams between small and traditional satellites

项目	传统卫星	小卫星
开发方	航天企业和大型研究机构，具有雄厚偶的基础和开发经验	较小企业、研究组织、机构、高校等，基本都属于入门者，缺少航天产品研究经验
企业规模	一般超过 100 人	一般 20 人左右，甚至少于 10 人。一个人就可以负责多个分系统，简化的卫星系统允许少数人管理
开发设施	需要配备单机和分系统级测试设备，但有时系统级试验还可能需要到其他地方进行	设施设备有限，需要去其他地方进行试验，外包测试
外包政策	外包的目的是通过分包商降低成本，但是严格控制分包商工作	外包的目的是通过非航天制造商制造产品补充人力资源的不足
采购模式	从可靠的分包商采购定制的产品	从市场采购现成的产品，尽可能限制内部进行专门开发产品。产品数据单必须包含足够的空间应用的试验结果
用户	政府、军队、大型企业、研究机构等	主要以小企业、小型科研组织、开发者自己等为主，也有部分用于政府、军队等
开发方	航天企业和大型研究机构，具有雄厚偶的基础和开发经验	较小企业、研究组织、机构、高校等，基本都属于入门者，缺少航天产品研究经验

3 ISO 组织现阶段制定的小卫星国际标准

国际标准的宗旨是确保产品和服务安全的、可靠、并具有良好的质量。对于商业活动，国际标准作为一种战略工具，能够通过减少浪费和错误来降低成本，并提高生产率。国际标准能够帮助企业进入新市场，为发展中国家提供公平竞争机会，并促进全球贸易的自由和公平。

随着国际各国在航天领域合作的不断增加，小卫星合作项目日益增加，如著名的 QB50 项目，为了达成各项活动及相关产品的一致性，不同的国家和机构在卫星开发过程中，协调一致是不可避免的，ISO 是唯一的可以实现深入协调的实体。

从 2013 年开始，ISO 在航空航天技术委员会航天系统与操作分技术委员会(TC20/SC14)里陆续开展了多项小卫星相关标准的立项和编制工作，为商业小卫星的发展提供了一系列国际公认的指南，为国际商业小卫星发展提供国际规则。

3.1 设计标准——小卫星开发的最低要求 (ISO 20991 小卫星要求)^[2]

小卫星的特点决定了它的研制不可能达到传统卫星那样的高要求，不论是成本能力、验证能力还是研制人员的实力，都无法与传统航天研制方相提并论。因此，对于小型航天器的研制应达到的水平也必然有所下降，不能按照传统航天器研制要求

来实现。

本标准的对象是为了达到降低成本并缩短研制周期的目标，而使用非常规风险控制和管理方法的航天器。此类航天器的质量一般小于 50 kg，大量采用基于货架式产品的设计。本标准为此类航天器的开发提供了一系列最低的要求，主要包括：

(1)发射接口：发射合同中的接口控制文件 (Interface control document，ICD)要求，以及 ISO 26829 的要求。

(2)安全性：任何卫星都应遵循 ISO 14620-1 中的安全要求，还应遵循发射场的有关要求(压力，EMC，化学，污染等)。

(3)对主载荷、相邻载荷和运载器无害：分离要求，排放要求，质量特性，RF 兼容性等方面内容。

(4)频率使用：按照国际和国内法规关于无线电频率要求使用无线电。

(5)碎片减缓：任何小型航天器都应遵循空间碎片减缓要求(ISO 24113)。

(6)联合国注册：任何小型航天器的发射都必须在其发射后在联合国进行登记。

(7)设计制造验证：小型航天器同时也需要减少验证成本，执行 ISO 19683。

3.2 发射标准——为获得更多的发射机会的 ISO 26869 标准^[3]

ICD 是一组系统之间机械、热和电气接口的要

求的文档的集合。接口控制文件就是所有必要的接口文件的索引与概述,它必须包含系统集成方调整和控制其接口所必需的充足信息,其中包括机械、热、电气以及其他典型接口。

在发射活动中,搭载航天器(SASC)不同于主航天器,不但能够获得的资源少,限制条件还比较多,在接口方面也需要遵循许多额外要求,本标准的目的就是在运载火箭方和搭载航天器方之间建立一个通用的接口控制文件要求。

本标准规定的内容能够鼓励搭载这类充分利用空间发射潜能的活动,提升空间运载效率,并能够为更多的航天参与者(特别是小卫星研制、应用单位)提供更多的机会。标准的主要内容包括:

- (1)任务特征:SASC 的任务,轨道特征,平台特征,有效载荷及其特性,SASC 的特殊要求和限制条件,模型等。
- (2)机械接口:结构布局,基础频率,净空间,适配器接口,连接器和微动开关,流体接口等。
- (3)电接口:脐带电缆接线图,脐带电缆连接器,脐带电缆,电器指令指示器,分离状态指示器,供配电,接地等。
- (4)RF 和电磁接口:无线电系统,RF 遥测和指令链路和电磁接口。
- (5)运载火箭和 SASC 任务特性:用于任务分析和规划的:SASC 输入数据(参考坐标系,质量特性),弹道分析数据,发射窗口,SASC 指向和分离。
- (6)诱导环境:描述 SASC 会经历的环境条件,及其与运载火箭各种环境条件的兼容性,包括机械环境,热环境,静压力,洁净度,无线电和电磁环境等。
- (7)验证试验:必须的试验来验证 SASC 满足 ICD 中规定的环境要求,包括 SASC 本身的环境条件,SASC 与运载火箭的匹配性,SASC 与主载荷的协调性等。
- (8)发射场操作:描述 SASC 发射的设备操作,工作空间和发射时序。包括发射场能力,地面支持设备操作,载荷操作,卫星加注,通讯设施,数据传输,发射场服务等。

3.3 验证标准——成本与可靠性的综合考虑的 ISO 19683^[4]

一般用于商业目的小卫星,其核心目标是保持低成本及减少研制周期。通过使用成熟的非宇航级货架产品来实现成本的减少,但是相对而言也会带来可靠性的降低,这种风险一方面是任务失败的问题,然而更加严重的是,小卫星一般都缺乏有效的在轨控制能力,发生故障后很有可能对其他正常航天器造成危害。因此,对于小卫星的验证与考核

也是必须的。

由于成本和研制能力等方面的因素限制,小卫星无法实现如传统卫星那样的全面考核,而是需要一种均衡考虑成本与风险的的试验验证策略来完成上述目标。

本标准正是为了改善小卫星的可靠性,通过为非宇航级产品(主要是货架式产品)提供一个最低水平的试验验证要求,来保障其能够在空间中正常运作。标准的主要内容如下:

- (1)通用要求:介绍了小卫星不同于传统卫星的设计、验证和试验模式。描述了低成本和快速交付目的驱动下,结合小卫星计划/设计的固有特点,建立相应的验证策略。
- (2)系统级试验和单机级试验:从小卫星的角度对试验项目,试验量级,试验时间等进行规定,并给出具体的试验矩阵,并注释说明试验项目是否为必要项。
- (3)试验要求:上述试验的具体要求,如电磁接口试验,功能试验,任务试验,辐照总剂量试验,单粒子试验,空间放电,释放部署试验等,具体包括每项试验的试验目的,试验件状态,试验设备,试验量级及时间,试验监测,试验条件及指南等。

3.4 运行标准——小卫星安全运行的最佳实践

本项目的目的是为开发小卫星的总体架构提供指南,为使其安全运行提供准则,以及为那些希望利用小卫星优势进行活动的研究人员提供运行和设计参考。

主要目的在于解决随意发射的小卫星,可能由于缺乏可靠性设计而导致在轨故障形成垃圾的问题。标准用户主要是缺少卫星安全、有效设计和运行经验的小卫星制造商和运营商。

本标准建立了小卫星安全运行的要求和准则、小卫星监管与许可证制度,小卫星监测方法,小卫星的机动方法,小卫星与运载器接口等内容。从而保证小卫星本身的安全运行,同时避免对其他航天器造成危险。主要技术内容如下:

- (1)小卫星安全运行的要求和准则:在需要保护或目标密集的轨道环境中操控小卫星的准则,验证卫星是否满足准则要求的方法。
- (2)小卫星监管与许可证制度:描述国家和国际的卫星许可和监管要求,同时提供满足这些要求的具体方法和指南。
- (3)小卫星监测方法:提高用于确定小卫星的运动状态的被动和主动式观察和跟踪系统的能力的方法。
- (4)小卫星机动方法:用于小卫星的主动式和

被动式姿态和轨道修正的方法。

(5)小卫星与运载器接口:明确小卫星在机动性和能源方面的限制,从而确定潜在功能和机械接口要求,如多个立方体卫星组合安装或小卫星通信的资源共享。

说明:该项国际标准正在制定中,尚未正式发布。

3.5 从事实标准到国际标准——ISO 17770《立方体卫星》^[5]

自 1999 年立方体卫星概念提出,美国加州理工学院和斯坦福大学就制定了立方星及其分离机构的标准,用于规范立方星的设计。随着立方体卫星在全球范围内的应用日趋广泛,其逐渐形成了一种事实标准,在业界得到了广泛的认可。2013 年,美国提出将立方体卫星及其发射机构的要求制定为国际标准,以满足日益繁荣的国际市场需要。

ISO 17770《立方体卫星》以立方体卫星为对象,一方面统一了相关定义,另一方面则给出了立方体卫星研制的基本要求,尤其是在释放装置方面的要求最为重要,核心目标是不能危害其他航天产品同时保证立方体卫星任务的成功。通过本标准建立了研制和发射立方体卫星的最基本保障。

ISO 17770《立方体卫星》的主要内容包括:

(1)一般要求:(a)包括外形尺寸、质量的要求:边长 10 cm 的立方体,体积为 1 000 cm³ 方厘米;总质量不大于 1 kg。(b)安全要求和空间碎片减缓要求、上升段排气要求、电源及无线电频率管理要求。

(2)接口要求与释放装置:(a)封装要求,包括包络空间和出口。(b)释放附件要求,释放直至结束全过程,所有附件都必须留在释放装置中,避免空间碎片的产生。(c)对释放后,不能有旋转和扰动,以避免发生撞击。(d)释放装置应保护运载火箭和主载荷,避免受到来自 Cube sat 的机械、电气、电磁等方面的干扰。

(3)质量保证要求:卫星应当经历随机振动,热真空/循环,冲击,外观检查。

4 结束语

标准是未来小卫星产业有序发展的保障条件。小卫星国际标准的陆续发布,说明了小卫星产业已经逐渐成为国际航天领域的重要分支,未来将会在

国际航天标准领域占有其一席之地。纵观国际标准的发展历程,相关标准的制定与发布,始终都围绕真小卫星的本质来进行,即成本有限,能力有限,经验有限,风险可接受。因此,在标准编制方面存在以下特点:

(1)标准的面向对象是更广泛的受众,而非航天企业或承包商。

(2)标准以最基本原则为新加入航天产业的对象提供一些基本的要求。

(3)标准的内容更趋向于指南,告诉使用者应当遵循的标准,而非直接提出具体指标。

(4)标准是针对小卫星特点来编写,重点强调它与传统卫星的差异。

(5)小卫星标准不是孤立存在自成体系的,他必须与其他标准相互联系,共同构建小卫星研制的总体原则。

综上所述,小卫星标准化工作是助力小卫星产业加速发展的重要手段,国际标准在世界范围内建立了基本的游戏规则。然而国际标准由于其特殊性毕竟在使用中有所限制,因此,在国际标准规则之下,还应当构建适应小卫星技术本身发展的标准体系,从设计、管理全流程建立标准,实现整个产业链的统一,保证小卫星产品的研制、应用的顺利发展。对于我国小卫星产业的参与方,如何将自身能力、自身特点融入整个行业的发展之中,是需要重点考虑的关键问题。

参考文献:

[1] 何慧东,付郁. 2017 年全球小卫星发展回顾[J]. 国际太空,2018(2):51-56.
HE Huidong, FU Yu. 2017 year in review: World small satellites [J]. Space International, 2018(2):51-56.

[2] ISO. PD ISO/TS 20991 2018: Space systems—Requirements for small spacecraft[S]. [S. l.]: BSI, 2018.

[3] ISO. ISO 26869—2012:Space systems—Small-auxiliary-spacecraft (SASC) to launch vehicle interface control document[S]. [S. l.]: ISO, 2012.

[4] ISO. ISO 19683—2016:Space systems—Design qualification and acceptance tests of small spacecraft and units[S]. [S. l.]: ISO, 2016.

[5] ISO. ISO17770—2017:Space systems—Cube satellites (CubeSats)[S]. [S. l.]: ISO, 2017.

(编辑:孙静)