

# 运载火箭贮箱增压控制技术发展综述

孙礼杰, 金鑫, 程光平, 张亮

(上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

**摘要:** 随着运载火箭低成本、高可靠性的发展趋势, 对贮箱增压的控制技术提出了更高的要求。在研究国内外火箭的增压控制技术现状的基础上, 总结提炼出增压控制技术的发展趋势, 为后续新型火箭的研制提供参考。

**关键词:** 火箭; 增压; 控制

中图分类号: V434

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2017) 01-0066-05

## Review on Development of Pressurization Control Technology for Launch Vehicle Storage Tank

SUN Li-jie, JIN Xin, CHENG Guang-ping, ZHANG Liang

(Astronautical System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** With the development trend of low cost and high reliability of launch vehicle, it puts forward higher requirements for the control technology of tank pressurization. On the basis of studying the situation of the tank pressurization control technology of domestic and international launch vehicle, the development trend of tank pressurization control technology is summarized, which provides reference for new launch vehicles in the future.

**Key words:** Launch vehicle; Pressurization; Control

### 0 引言

贮箱增压控制是运载火箭动力系统设计的一项关键技术, 研制一套高可靠度并且成本低廉的增压控制系统是火箭研制过程中必须考量的重要问题。进入 21 世纪以来, 我国多个新型火箭进入了密集研制期, 研究贮箱增压控制技术的发展情况有助于提高我国运载火箭动力系统设计的水平, 也可为我国新型火箭的研制提供技术参考。

### 1 箱压控制技术应用现状

贮箱增压有开式增压和闭式增压两种方案。开式增压无论采用燃气或推进剂蒸气自生增压方

案还是惰性气体增压方案, 增压气体按照预定的程序和流量进入贮箱增压, 在整个增压工作过程中不对增压气体实施人为的控制, 贮箱压力处于开环状态。闭式增压根据贮箱压力的变化情况进行反馈, 对增压气体实施人为的控制, 从而将箱压控制在设定的范围内。本文讨论的增压控制技术就是闭式增压的技术手段。

目前最常采用的增压控制技术有增压气体流量调节类和增压气体通断控制类两个大类。增压气体通断控制又分为压力信号器控制类和压力传感器控制类两种。国内外主流火箭的箱压控制方案如表 1 所示。

收稿日期: 2017-04-16; 修订日期: 2017-04-24

作者简介: 孙礼杰 (1985-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事运载火箭动力系统研究。E-mail: seven169@163.com

表 1 箱压控制技术应用情况统计表

箱压控制技术		典型应用情况
增压气体流量调节控制技术		CZ-3A 火箭三级氧箱 <sup>[1]</sup>
增压气体通断控制技术	压力信号器控制技术	CZ-4 火箭三级 <sup>[1]</sup> 新一代某型火箭助推 <sup>[2]</sup> Zenit 火箭一、二级氧箱 <sup>[3]</sup> Zenit 火箭一、二级煤油箱
	压力传感器控制技术	新一代某型火箭一级氧箱和煤油箱 <sup>[4]</sup> Ariane V 火箭芯一级氧箱 <sup>[5]</sup> H-II 火箭芯一级氧箱 <sup>[6]</sup> Ares I 火箭二级氧箱 <sup>[7]</sup> Atlas V 通用芯级氧箱和煤油箱 <sup>[1]</sup> Centaur 氧箱和氢箱 <sup>[1]</sup> Saturn V 一级氧箱 <sup>[1]</sup>

1.1 增压气体流量调节类控制技术

采用一个可调开度的减压器，根据贮箱压力的升高或降低自动调节减压器的开度，减小或增大增压气体流量，从而将贮箱压力控制在设定的范围内，工作原理如图 1 所示。这种系统方案简单，控制精度略差，适用于增压流量小的系统，如运载火箭的末级、大型卫星和飞行器等，CZ-3A 火箭三级氧箱增压系统在早期就采用这样的方案<sup>[1]</sup>。

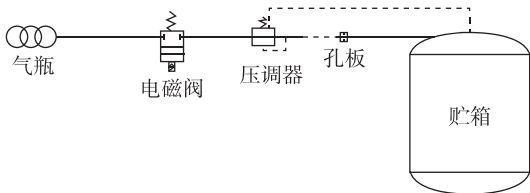


图 1 增压气体流量调节类箱压控制系统

1.2 压力信号器控制技术

压力信号器常与控制系统电阻盒搭配使用，压力信号器内的膜片、弹簧或波纹管等感压元件根据箱压的变化情况使触点移动，形成电路打开和关闭的效果。压力信号器的开闭进一步诱发电阻盒内继电器的开闭，从而实现对电磁阀供电的通断控制。通过电磁阀的开闭控制来调节增压气体的流量，达到控制箱压的目的，其工作原理如图 2 所示，电磁阀随贮箱压力变化的逻辑如图 3 所示。

压力信号器控制系统方案比较简单，除需要控制系统供电外几乎依靠增压系统自身就可完成箱压的闭环控制。但是缺点也比较明显，压力信号器为机械式产品，膜片的可移动距离本身就很小，这导致压力信号器的控制范围十分有限。压力信号器控制技术常应用于火箭一级和二级的的大流量增压系统中，典型的应用案例包括 Zenit 和 CZ-4 火箭等。

小，这导致压力信号器的控制范围十分有限。压力信号器控制技术常应用于火箭一级和二级的的大流量增压系统中，典型的应用案例包括 Zenit 和 CZ-4 火箭等。

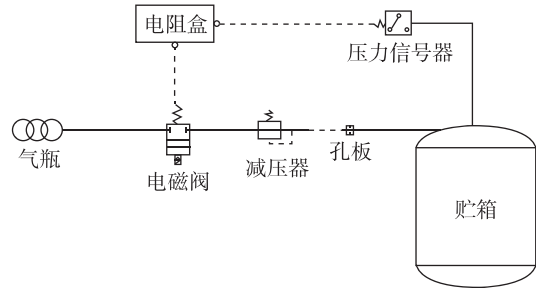


图 2 压力信号器控制系统

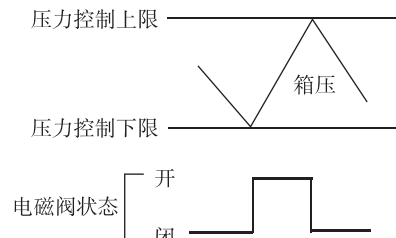


图 3 电磁阀的通断逻辑

1.3 压力传感器控制技术

压力传感器控制技术常和箭载计算机配合使用，控制器根据压力传感器采集到的箱压，依据事先设定的控制逻辑判断电磁阀的通断状态，之后向继电器发出控制信号，实现电磁阀的通断控制，进而达到控制箱压的目的，工作原理如图 4 所示。为提高控制精度，通常设置 3 个压力传感器，采用取平均值或者 3 取 2 的选取模式以减小测量误差带来的影响。

压力传感器控制系统涉及传感器采集和控制逻辑，往往无法由增压系统独立完成；但是优势很明显，包括无控制带宽限制，控制逻辑灵活多变以及控制精度高等。压力传感器控制技术同样常应用于火箭一级和二级的的大流量增压系统中。

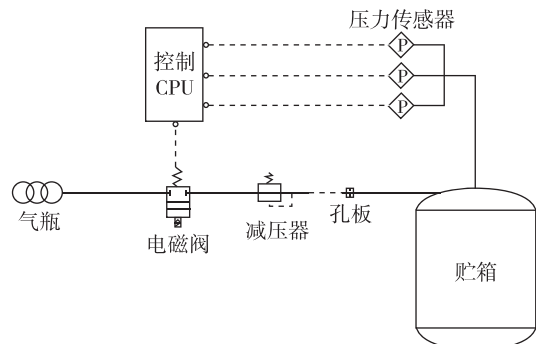


图 4 压力传感器控制增压系统

采用压力传感器控制技术可以实现较为复杂的控制逻辑,这是压力信号器控制技术所不具备的能力,典型应用案例就是 Ariane V 火箭。Ariane V 火箭芯一级氧箱采用超临界氮增压方案,液氮贮存在低温杜瓦当中。发动机工作时,杜瓦中采用氮气增压从而挤出液氮,经 Vulcain 发动机换热器加温至 200~300K,再经流量控制器后进入氧箱增压。流量控制器为 3 个增压路集成的设备,每一路为电磁阀+节流孔板设计,3 路完全相同,电磁阀的通断由箭载计算机根据箱压传感器的测量结果进行控制。

3 个增压路分别设计为常通路、调节路和冗余路,共设计调节压力和冗余压力两个带宽,其箱压控制方法如下。

1) 正常状态下常通路保持常开增压,调节路根据箱压变化情况打开关闭,使箱压稳定在调节压力带宽范围内,冗余路不工作。

2) 当箱压超过冗余压力带宽上限时,常通路关闭,由调节路和冗余路负责增压,电磁阀的开闭根据箱压进行控制,箱压控制范围为调节压力带宽,此时调节路和冗余路同时为同时开闭工作状态,不分主次。

3) 当箱压低于冗余压力带宽下限时,冗余路被激活为常通状态,由原常通路和调节路负责调节箱压,其箱压控制范围为调节压力带宽,此时原常通路和调节路为同时开闭工作状态,不分主次。

增压控制逻辑如图 5 所示。

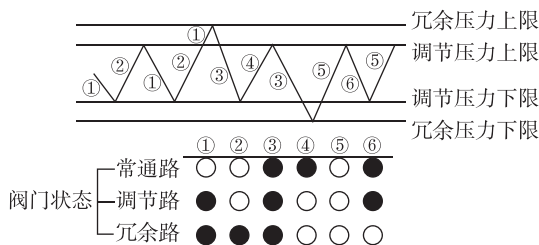


图 5 Ariane V 芯一级氧箱增压控制逻辑

## 2 流量控制技术应用现状

流量控制分为定流量控制和不定流量控制两种。定流量控制方法根据贮箱增压所需的流量在增压系统中设置减压器+节流孔板的方式实现。不定流量控制则直接采用节流孔板,由于没有稳定减压,增压流量随气源压力的变化而变化,如储存惰性气体的气瓶会随着工作时间的增长压力

逐步降低,增压气体的流量也随之减小。

在具体的增压系统设计中,通常根据不同增压系统的要求采取某一种流量控制方法或者进行组合得到较为优化的一套流量控制系统。采用双路增压的系统,一种方案是一路为主增压路,保持常通,一路备份,如 CZ-4 火箭三级;另一种方案是两路互为备份,均根据箱压实施控制,如新一代某些火箭助推冗余增压系统。

目前国外主流火箭大多采用 3 路以上的多路增压方案,多路增压方案实施起来较为灵活多变,目的都是提高系统的冗余度和可靠性,详见表 2。从表 2 中可以看到多路增压方案主要集中在 3 路和 4 路两种方案,再提高增压路数对于提高系统的冗余度和可靠性已没有实际作用。是否设置主路常通没有固定的规律可循,但是可以看到主流火箭都不再采用定流量增压的方式。

表 2 流量控制技术应用情况统计表

增压路数	典型应用情况	流量控制情况
单路	CZ-3A 火箭三级氧箱 <sup>[1]</sup>	定流量
双路	CZ-4 火箭三级氧化剂箱和燃料箱 <sup>[1]</sup> 新一代某型火箭助推 <sup>[2]</sup>	主路定流量,副路不定流量
多路	新一代某型火箭一级氧箱和煤油箱 <sup>[8]</sup> Ariane V 火箭芯一级氧箱 <sup>[5]</sup>	3 路,均不定流量
	Zenit 火箭一、二级氧箱,二级煤油箱 <sup>[3]</sup>	4 路,均不定流量
	Zenit 火箭一级煤油箱 <sup>[3]</sup>	3 路,主路常通,2 副路并联,主副路均不定流量
	H-II 火箭芯一级氧箱 <sup>[6]</sup> Saturn V 三级氢箱 <sup>[1]</sup>	3 路,主路常通,主副路均不定流量
	Ares I 火箭二级氧箱 <sup>[7]</sup>	4 路,主路常通,主副路均不定流量
Saturn V 一级煤油箱 <sup>[1]</sup>	5 路,1 路常通,2、3、4 路根据气瓶压力顺序打开,5 路根据箱压开闭	

## 3 增压控制技术分析

压力信号器控制是较为传统的技术,主要在苏联时期研制的部分火箭上使用。由于历史原因,

我国的部分火箭也延用了此种控制技术。美国、日本和欧洲的火箭大多采用压力信号器控制技术，我国的新一代火箭也开始逐渐采用此种技术。相比压力信号器控制技术，压力传感器控制在各方面均有着独特的优势。

#### (1) 增大箱压控制带宽

采用压力信号器控制技术，箱压的控制带宽受压力信号器的调节能力限制，而压力信号器为机械式调节阀，压力调节的能力往往有限。当箱压控制带宽较窄的时候容易引起电磁阀频繁打开关闭，降低系统工作的可靠度。采用压力传感器控制技术，箱压的控制带宽由控制器中软件设置，不受产品能力的限制，可以根据需求设置箱压控制带宽，从而避免电磁阀频繁打开关闭的现象。

#### (2) 消除产品散差

在压力信号器的生产过程中由于弹簧和膜片产品特性的散差，必然带来压力信号器控制带宽与设计值的偏差。从实际使用情况来看，压力信号器的控制带宽往往小于设计要求值。采用压力传感器控制技术则不存在调节类单机的散差问题，可以完全避免这种现象。

#### (3) 提高箱压控制的灵活性

采用压力传感器控制技术可以实现较为复杂的控制逻辑，如 Ariane V 芯一级氧箱的增压控制逻辑，而压力信号器控制技术则只能实现“不足即开，超出即关”的控制逻辑。并且一个压力信号器只控制其对应的一个电磁阀，而压力传感器控制技术则能根据需求同时控制多个电磁阀，从而实现较为优化的控制方案。

#### (4) 提高系统可靠性

压力传感器控制技术一般采用 3 个及以上传感器感受箱压，对多个传感器的测量结果取平均值，可以减小测量误差带来的影响，也同时起到单机冗余的作用，提高系统可靠性。压力信号器控制技术使用压力信号器感受箱压，通常情况下压力信号器与电磁阀的一一对应，当某个压力信号器故障时，该增压路失效。可以用并联压力信号器或者采用“三取二”的方式提高系统可靠度，但也增加了成本。

#### (5) 降低系统成本

压力信号器仅在运载火箭领域使用，均根据需求特殊研制，产量低，成本高；而压力传感器

技术成熟，有多家厂所研制，成本较压力信号器更低。

除此之外，还可以看到一些贮箱增压控制技术的发展趋势。

#### (1) 无减压器设计

通过减压器稳压之后可以将增压流量控制在稳定的范围内，但在采取了压力信号器或压力传感器控制箱压以后，稳定的流量对于贮箱增压并无实际优势，而减压器的引入对系统设计反而带来了不利的影响。

①取消减压器减少单机的种类，降低单机研制的成本。

②取消减压器可以减少增压系统中的单机数量，降低增压系统的成本，同时提高系统的可靠性。

③相对一些火箭型号，增压路中一路带减压器一路不带减压器设置的情况，取消减压器后可将每路节流孔板设计为相同尺寸，达到防差错设计的目的，增强单机产品的通用性和互换性。

#### (2) 多路增压成为主流选择

多路增压方案可以实现 2 路以上的备份增压路，系统冗余度和可靠性大幅提升。多路增压的方案下，并不要求每一个增压路具备单独工作即可满足箱压要求的能力，而是对单机进行冗余来提高系统可靠性。采取这样的思路可以降低系统设计的难度，增加系统设计的灵活性。

#### (3) 集成化、模块化设计

从欧洲、美国和日本的火箭都可以看到集成化设计的身影，如流量控制模块和箱压控制模块。采用压力信号器控制的方案下，电磁阀和压力信号器一一对应，而在压力传感器控制的方案下电磁阀与传感器无直接对应关系，可实现流量控制和箱压控制的独立设计。采用集成后设计后，对流量控制模块或箱压控制模块视为单机进行处理，将大量的工作提前到装箭前，达到简化系统测试的目的。

## 4 结论

通过研究国内外各型运载火箭增压控制技术后发现，压力传感器控制技术成为国内外火箭的主流选择，对增压流量的控制朝着简单化、多路冗余的方向发展。

## 参考文献

- [1] 《世界航天运载大全》编委会. 世界航天运载器大全 (第2版) [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2007.
- [2] 姚娜, 李会萍, 程光平, 等. 新一代运载火箭推进剂贮箱的冗余氮气增压系统 [J]. 上海航天, 2014, 31 (2): 42-46.
- [3] 金鑫. 增压输送系统全系统建模及仿真分析 [D]. 上海: 上海航天技术研究院, 2015.
- [4] 范瑞祥, 田玉蓉, 黄兵. 新一代运载火箭增压技术研究 [J]. 火箭推进, 2012, 38 (4): 9-16.
- [5] Dussollier G, Teissier A. Ariane 5 main stage oxygen tank pressurization [R]. AIAA 1993-1969, 1993.
- [6] Nagai H, Noda K, Yamazaki I, et al. Status of H-II rocket first stage propulsion system [J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8 (2): 313-319.
- [7] Quinn J E, Swanson L A. Overview of the main propulsion system for the NASA Ares I upper stage [R]. AIAA 2009-5131, 2009.
- [8] 胡海峰. 新一代运载火箭闭式增压控制技术研究 [J]. 航天控制, 2015, 33 (4): 28-33.