

平流层飞艇地面功能测试方法分析

张永栋, 翟嘉琪, 王建勋

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 为保证平流层飞艇飞行试验的安全, 平流层飞艇放飞前需在地面开展功能测试来校验飞艇系统状态; 平流层飞艇系统地面测试包含能源、测控、安控等诸多内容; 针对平流层飞艇地面功能测试需求, 在分析飞艇关键系统构成的基础上, 给出了地面功能测试的主要测试内容与方法; 建立了功能测试条件矩阵, 给出了功能测试项目总体流程; 建立地面功能测试模式, 并开展飞艇功能测试系统与飞艇系统间接口设计, 给出了开展地面功能测试所需的测试仪器资源; 在此基础上, 建设了一套满足平流层飞艇功能测试需求的测试系统; 利用该系统对国内某型飞艇开展了能源、测控、安控等方面的测试, 校验了该型飞艇系统状态, 以此验证了所建设的功能测试系统的有效性和所提出测试方法的正确性。

关键词: 平流层飞艇; 地面; 功能测试

Analysis of Proving Ground Functional Testing Methods for Stratospheric Airship

Zhang Yongdong, Zhai Jiaqi, Wang Jianxun

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: To ensure the safety of the stratospheric airship flight test, a functional test on the ground is need to verify the state of the airship system before the stratospheric airship is released, which contains tests on energy system, telemetry and remote control system, safety control system and other vital systems. The article manifests the main testing contents and methods of the proving ground after analyzing vital system structure of stratospheric airships to meet the testing requirement of the Stratospheric Airship Proving Ground. Testing flow is given according to measurement matrix of testing conditions. Technical references for test system design and test implementation can be provided by establishing testing patterns and developing interface design between the test system of the proving ground and airships. A testing system that meets the testing requirement of the stratospheric airships is established on this basis. The system was used for the functional tests on energy system, telemetry and remote control system, safety control system and other vital system of a certain type of airship to verified its system state, which also verified the availability of the testing system and the correctness of the testing methods methioned in the article.

Keywords: stratospheric airship; proving ground; functional test methods

0 引言

平流层飞艇是指在囊体内充入轻于空气的气体(比如氦气)来产生上升所需要的浮力, 同时带有动力驱动, 可以进行控制, 工作在平流层(一般为18~25 km)的飞行器^[1]。因平流层飞艇具有较大的载荷能力、较强的生存能力、较低的费用等特点^[2], 平流层飞艇在高空预警、地对观测、通信中继等方向的应用得到广泛的关注。国内已有多家单位开展平流层飞艇的研制工作, 并在能源、动力、飞控等方面取得了一定的进展。在此基础上, 研制了多种类型的平流层飞艇, 并开展了相关的飞行试验。

因平流层飞艇系统较为复杂, 飞行试验风险因素较多, 因此, 为保证飞行试验的安全性, 平流层飞艇在地面完成集成后, 必须开展地面功能测试以保证飞艇各分系统功能正常以及全系统长时工作可靠。

平流层飞艇地面功能测试重点关注飞艇分系统功能性验证

收稿日期: 2018-01-16; 修回日期: 2018-03-16。

作者简介: 张永栋(1982-), 男, 山东济宁人, 硕士, 工程师, 主要从事测试与状态评估技术方向的研究工作。

和全系统长时工作可靠性, 区别于研制单位在研制过程所开展的实验性测试和出厂前所做的验收性测试, 其测试方法需根据地面功能测试所关注重点进行设计。因此, 本文基于放飞安全性考虑, 根据平流层飞艇各分系统构成与功能, 给出功能测试的主要测试内容和方法, 并开展测试模式设计以及测试系统与飞艇系统间接口设计, 在此基础上, 建设了一套满足平流层飞艇功能测试需求的测试系统。

1 平流层飞艇系统构成

一般而言, 平流层飞艇系统由能源分系统、测控分系统、安控分系统、飞控分系统、结构分系统等构成, 其中能源分系统、测控分系统、安控分系统、飞控分系统包含了平流层飞艇关键航电设备, 主要集成于飞艇航电设备吊舱内。

能源分系统为平流层飞艇系统提供电源供应, 通常由储能电池系统、太阳能电池阵列和能源管理器组成。当前, 因太阳能电池阵列转化效率不高, 储能电池系统为平流层飞艇提供主要的能源供给, 储能电池系统通常由多组锂电池组构成, 输出电压一般不超过380 V。能源管理器实现对能源系统的输出管理, 并实现对测控、安控、结构等分系统设备所需的电压转换

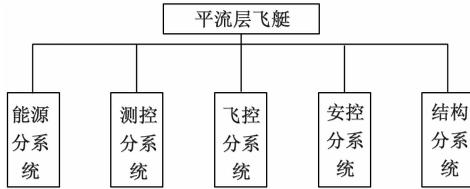


图 1 平流层飞艇系统构成

和电力供给。测控分系统一般由多个波段的视距链路构成，也可利用卫星通信链路，实现对安控指令、飞控指令等控制指令的上传以及艇上数据的下传，视距链路可采用 UHF、L、S、C 等多种成熟体制链路设备，卫星通信链路设备一般采用北斗一代设备终端，其利用北斗一代短报文通信系统实现控制指令的传输和艇上关键设备状态数据下传。安控分系统实现应急情况下飞艇氦气的释放与结构囊体的切割，实现飞行试验时突发情况下飞艇紧急着陆，避免飞艇飞出试验空域而因引发安全事故。飞控分系统由飞控计算机、惯导单元等构成，内置飞控核心算法，与结构分系统一起实现对平流层飞艇的飞行控制。结构分系统主要由囊体、安装于囊体上的各种传感器（温度传感器、压力传感器等）、风机与阀门、电机、囊体切割装置等执行结构构成。根据控制设备和实现的功能可将执行机构分为安控执行机构和飞控执行机构。安控执行机构主要包括囊体切割装置、阀门等，飞控执行机构主要包括风机、阀门、电机等。

2 测试需求

飞行试验安全是平流层飞艇飞行试验的重点关切。开展飞行试验时，飞艇实时可控和应急着陆是保证试验安全的重要手段。因此，飞艇能源分系统、测控分系统、飞控分系统、安控分系统的功能性以及全系统长时工作可靠性是飞艇于试验场的主要测试内容，结构分系统的测试结合飞控分系统测试和安控分系统测试开展。能源分系统重点测试储能电池组的放电电压、放电电流与放电容量，以及能源管理器输出接口的输出电压等。测控分系统重点测试多种视距链路的作用距离以及利用链路传输执行安控指令等；安控分系统测试主要包括安控执行机构测试、安控控制逻辑测试、自主安控策略测试、北斗链路安控测试等。安控执行机构测试主要测试氦气释放阀门、爆破切割装置等执行机构的执行效果，安控控制逻辑测试主要测试通过不同的视距链路组合控制安控执行机构情况，自主安控策略测试主要测试在视距链路中断、能源故障等情况下飞艇系统自动控制安控执行机构情况，北斗链路安控测试主要测试利用北斗一代终端控制安控执行机构情况；系统间电磁兼容测试主要目的是保证试验场外测雷达系统的工作不影响飞艇航电系统的正常工作，采用模拟产生雷达信号并监测飞艇系统在模拟雷达信号辐照下工作情况的测试模式；全系统拷机测试从时间、飞行剖面等方面模拟飞艇飞行试验全过程，测试飞艇系统长时工作可靠性，主要测试内容与方法如表 1 所示。

由表 1 可知，地面功能测试项目主要包括能源、测控、飞控、安控等分系统测试，以及飞艇系统与外测雷达系统间电磁兼容测试、全系统拷机测试等全系统测试。通过分析各测试项目之间的条件关系，给出测试条件矩阵如表 2 所示。

3 测试流程与测试模式

在平流层飞艇试验测试中，由于测控分系统测试、飞控分系统测试以及安控分系统测试均可利用外接电源进行，故能源分系统测试与各分系统测试可并行开展；飞控分系统和安控分系统的测试需要相应的飞控执行机构和安控执行机构配合完成，因此，在开展此两种分系统测试之前需确定相关执行机构状态。另外，通常来讲，平流层飞艇研制单位在开展安控分系

表 1 主要测试内容与方法

测试项目	测试内容	测试方法
能源	充电测试	通过锂电池组充放电控制设备分别对各电池组进行充电操作，记录各电池组充电容量及充电后最大单体电压差
	放电测试	通过锂电池组充放电控制设备分别对各电池组进行放电操作，记录各电池组放电容量
	能源管理器输出测试	利用数字多用表测试能源管理器各输出接口的电压参量、单体电池电压参量
测控	测控链路模拟拉距测试	利用衰减器等自由空间路径损耗来模拟最大作用距离，观察链路上、下行链路状态
	模拟转运过程测控链路测试	以放飞前状态对吊舱进行封装、吊装，使用艇上供电后，以放飞前转速速度运输至放飞场坪，监测转运过程中链路指令发送及状态回传。
飞控	飞控模拟综合测试	模拟飞艇飞行试验任务剖面，测试不同试验阶段飞艇飞控控制逻辑功能
安控	安控执行机构测试	通过控制台发送安控指令观察安控执行机构的破坏效果。
	安控控制逻辑测试	通过不同链路发送安控指令，测试安控执行机构作动情况与状态反馈。
	自主安控策略测试	测试在链路中断、能源故障等极端条件下的自主安控执行情况
	北斗链路安控测试	通过北斗安控指令，测试安控执行机构作动情况与状态反馈，同时用频谱仪监测信号发送、接收情况，判断安控北斗成功率
系统间电磁兼容测试	飞艇系统与外测雷达系统间电磁兼容测试	利用信号源、功放、天线等模拟雷达信号环境，测试飞艇在雷达信号辐照下的工作情况。
全系统拷机测试	长时工作可靠性	从时间、飞行剖面等方面模拟飞艇飞行试验全过程，综合测试飞艇储能电池组、测控链路等能源供给与控制系统以及阀门等执行机构的长时工作可靠性

表 2 平流层飞艇测试条件矩阵

项目 \ 条件	能源分系统	测控分系统	飞控分系统	安控分系统	执行机构
能源分系统测试	1	0	0	0	0
测控分系统测试	0	1	0	0	0
飞控分系统测试	0	1	1	0	1
安控分系统测试	0	1	1	1	1
系统间电磁兼容测试	1	1	1	1	1
全系统拷机测试	1	1	1	1	1

注：“0”表示测试条件没有严格的条件要求，“1”表示测试条件经过测试后功能正常，对应的测试项目才能进行。

统设计时，亦会将飞控计算机设计成某些安控执行机构的控制设备，赋予飞控计算机执行安控控制功能。因此，在试验场测试中通常将安控分系统的测试安排在飞控分系统之后。根据表 2 测试条件矩阵中测试项目之间的关联关系，形成地面功能测试项目总体流程如图 2 所示。

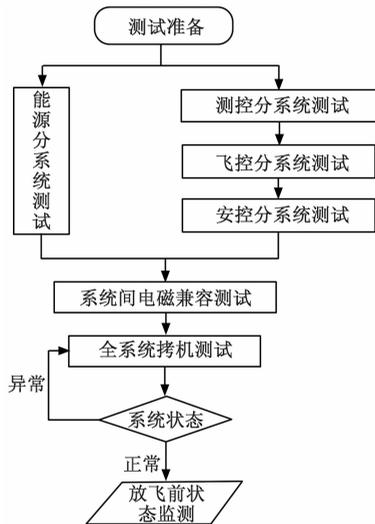


图 2 平流层飞艇地面功能测试项目总体流程

针对分系统测试和全系统测试，建立图 3 所示的总体测试模式。总体测试流程如下：地面功能测试系统发送测试指令给飞艇系统地面测控站；飞艇系统地面测控站在收到测试指令后确认测试指令并确认是否具备测试执行条件；在测试条件具备的情况下，飞艇地面测控站将测试指令转换为遥控指令，并发送给飞艇系统航电设备吊舱；地面功能测试系统在收到飞艇系统地面测控站回复的指令状态后，根据测试内容给飞艇系统航电设备施加激励信号，并采集关键物理参量；飞艇系统航电设备吊舱执行指令并将执行状态以遥测数据形式发送给地面测控站；地面功能测试系统通过分析采集的关键物理参量和飞艇系统地面测控站转发的遥测数据，判读测试执行情况，给出测试结论。

对于部分不适宜采用此模式的测试（主要指锂电池组充放电、囊体切割装置等安控执行机构测试等）可基于相对应的测试内容与测试方法单独展开，其中锂电池组充放电测试利用专用充放电设备完成，囊体切割装置采用将切割装置预先布设于囊体材料上给其加电观察囊体材料破坏效果的模式。

基于图 3 所示的测试模式，地面功能测试系统在测试过程

中需给飞艇系统航电设备吊舱施加激励信号和采集航电设备输出的关键物理参量。所施加的激励信号主要为电压信号和射频/微波信号。电压激励信号为能源管理器测试时作为输入信号，为直流信号；射频/微波信号主要为利用信号源、功放、天线等产生的模拟外测雷达信号，用于飞艇系统与外测雷达系统间电磁兼容测试。测试过程中所采集的关键物理参量包括电压信号、传感器编码信号、射频/微波信号等。电压信号的来源主要为能源管理器输出电压信号，传感器编码信号主要来自于风机、阀门等执行机构上用于检测执行机构状态的传感器，射频/微波信号主要来自于测控分系统中视距链路工作所发射的载波信号，以及北斗一代终端工作时发射的信号。

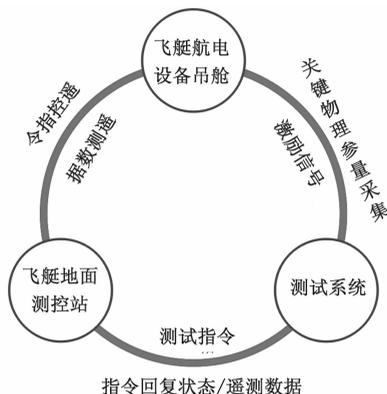


图 3 平流层飞艇地面功能测试总体测试模式

由以上分析可知，地面功能测试系统所包含的测试资源如表 3 所示。

表 3 测试资源需求

	信号类型	关键指标范围
激励信号	电压信号	直流, 不低于 380 V
	射频/微波信号	工作频率不低于 18 GHz
采集的关键物理参量	电压信号	直流, 范围大于 0~380 V
	传感器编码信号	距离、温度、压力等传感器信号
	射频/微波信号	频率不低于 18 GHz

4 测试系统与飞艇系统间接口设计

地面功能测试系统与飞艇系统间的接口主要包括：地面功能测试系统与飞艇系统地面测控站之间的接口；地面功能测试系统与飞艇系统航电设备吊舱之间的接口。

测试系统与飞艇系统地面测控站之间信息传输内容主要包括：

- 1) 测试指令。由测试系统发送给飞艇系统地面测控站，测试系统根据测试内容发送相对应的测试指令。
- 2) 指令回复状态。由飞艇系统地面测控站发送给测试系统，飞艇系统地面测控站接收到测试指令后确认测试执行条件。
- 3) 遥测数据。由飞艇系统地面测控站发送给测试系统，测试系统接收到转发的遥测数据后根据接口协议提取飞艇状态信息。

由以上可知，测试系统与飞艇系统地面测控站之间传输的主要是指令与数据，可利用试验场网络系统以 UDP 或 TCP/

IP 传输方式来实现。

测试系统与飞艇系统航电设备吊舱之间交联的内容可分为两类:

1) 测试系统采集飞艇系统航电设备关键物理参量来判断飞艇技术状态。所采集的物理参量与所用仪器模块如表 4 所示。

2) 测试系统给飞艇系统航电设备所施加的激励信号。如表 5 所示。

表 4 采集信号接口形式

序号	物理参量	接口形式	测试系统所用仪器模块
1	传感器编码信号	数字接口	传感器信号采集模块
2	电压信号	电源接口	电子负载/数字多用表等
3	射频/微波信号	RF 接口/天线接口	天线/示波器/频谱分析仪/功率计等

表 5 激励信号接口形式

序号	物理参量	接口形式	测试系统所用仪器模块
1	电压信号	电源接口	大功率直流电源
2	射频/微波信号	RF 接口/天线接口	天线/信号源/功率放大器

因不同型号的飞艇系统具有不同的接口特征, 因此, 测试系统与飞艇航电设备之间接口需根据飞艇系统具体的接口型号来研制。

5 测试系统建设与测试实施

根据第 3、4 节的分析, 基于文献 [3-4] 所提出平流层飞艇地面通用测试原型系统架构, 在其基础上根据测试需要进行功能与资源裁剪, 并结合实验室现有的电子负载、射频/微波仪器资源建设了一套适用于平流层飞艇地面功能测试的测试

(上接第 41 页)

- [3] Wu Y C, Chaudhari Q, Serpedin E. Clock synchronization of wireless sensor networks [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 28 (1): 124-138.
- [4] Rhee I K, Lee J, Kim J, et al. Clock synchronization in wireless sensor networks: an Overview [J]. Sensors, 2009, 9 (1): 56.
- [5] Cristian F, Fetzer C. Probabilistic internal clock synchronization [J]. IEEE Symp on Reliable Distributed Systems, 2003: 22-31.
- [6] 王晓冬. 以太网时间同步技术的研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2009.
- [7] Ganerwal S. Timing-sync protocol for sensor networks [A]. International Conference on Embedded Networked Sensor Systems [C]. ACM, 2003: 138-149.
- [8] 康冠林, 王福豹, 段渭军. 无线传感器网络时间同步综述 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13 (10): 1021-1024.
- [9] Ping S. Delay measurement time synchronization for wireless sensor networks [J]. IRB, 2003.
- [10] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts [J]. Acm Sigops Operating Systems Review, 2002, 36 (SI): 147-163.
- [11] Noh K L, Serpedin E, Qaraqe K. A new approach for time synchronization in wireless sensor networks: pairwise broadcast syn-

chronization [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7 (9): 3318-3322.

[12] 郑锦, 刘万军. 实时分布式系统的时间同步化策略 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2004, 23 (1): 92-94.

[13] Su, Weilian, Akyildiz, et al. Time-diffusion synchronization protocol for wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13 (2): 384-397.

[14] Li Q, Rus D. Global Clock Synchronization in Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 2006, 55 (2): 214-226.

[15] Schenato L, Fiorentin F. Average TimeSynch: A consensus-based protocol for clock synchronization in wireless sensor networks [J]. Automatica, 2011, 47 (9): 1878-1886.

[16] Maggs M K. Consensus clock synchronization for wireless sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12 (6): 2269-2277.

[17] 寇海洋, 段雄英. 基于 STM32F407 的时钟同步系统的实现 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (8): 2759-2761.

[18] 孔亚广, 孙祥祥. 基于 ARM 的 IEEE1588 精密时间同步协议的实现 [J]. 计算机应用, 2013, 33 (s1): 315-317.

[19] 李文锋, 王汝传, 孙力娟. 基于 RBS 的无线传感器网络时间同步算法 [J]. 通信学报, 2008, 29 (6): 82-86.

[20] 于鹏飞, 喻强, 邓辉, 等. IEEE 1588 精确时间同步协议的应用方案 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (13): 99-103.

6 结论

对平流层飞艇飞行试验而言, 飞行试验安全为其重点关切。飞行试验前开展飞艇系统测试获取关键数据是保证平流层飞艇飞行试验安全的主要措施之一。飞艇能源分系统、测控分系统、安控分系统的功能性以及全系统长时工作可靠性等为主要测试内容。基于以上测试内容, 给出了试验场总体测试模式, 并进行测试系统与飞艇系统接口设计, 建设了一套适用于平流层飞艇地面功能测试的测试系统, 为保证平流层飞艇地面功能测试的顺利实施提供了技术依据。

参考文献:

- [1] 杨秋萍, 席德科. 飞艇技术发展现状与趋势 [J]. 航空制造技术, 2010 (19): 78-81.
- [2] 马文良. 基于动力学与热力学模型耦合的平流层飞艇上升段航迹研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.
- [3] 刘收. 平流层飞艇地面通用测试原型系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (7): 82-89.
- [4] 史红卫, 刘收, 房红征, 等. 装备测试保障技术在平流层飞艇上的应用研究 [A]. 第三届高分辨率对地观测学术年会, 临近空间对地观测技术分会文集 [C]. 2014: 148-153.