

## 二级摇摆伺服机构供电系统可靠性分析

朱丹波, 薛会建

(西安航天动力试验技术研究所 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 某型二级摇摆伺服机构要求在地面热试车全过程中由试验台提供稳定可靠的直流电源, 原二级摇摆伺服机构供电系统为单一的整流器供电模式, 试验过程完全依赖市电进行转换, 没有任何其他保障措施, 可靠性受到很大影响。为此, 提出 2 种供电方案, 通过比较分析系统的可靠性和可能发生的故障, 最终选择了整流器和电池组相配合的供电方式。试验测试性能结果表明: 这种供电方式完全满足试车任务的需求并具有较高的可靠性。

**关键词:** 二级摇摆伺服机构; 地面供电; 电池组; 可靠性分析

**中图分类号:** V434+.3-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 06-0078-07

## Reliability analysis of DC power supply system for secondary servo mechanism

ZHU Dan-bo, XUE Hui-jian

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** A steady DC power supply provided by test-bed is required by the secondary servo mechanism of a certain liquid rocket engine in the ground test, but the old power supply system of the original secondary servo mechanism is only made up of some silicon rectifiers, and the test process relies on AC electric supply to convert to DC. Therefore, the reliability of the system is affected. Two power supply plans were put forward according to the reliability analysis. After comparison, the plan combining the silicon rectifiers with battery pack was chosen to supply power to the servo mechanism. The testing result shows that the scheme can meet the requirements of the testing mission and is more reliable.

**Keywords:** secondary servo mechanism; ground power supply; battery pack; reliability analysis

### 0 引言

某型二级摇摆伺服机构油泵采用直流电动机

驱动, 共有 4 台, 其额定功率均为 30 VDC·40A, 在地面热试车中需全程提供  $30_{-0.5}^{+3}$  VDC 直流电压源, 由于供电异常会导致伺服机构失控, 因此二级摇摆伺服机构地面供电的可靠性十分重要。

收稿日期: 2012-11-20; 修回日期: 2013-02-25

作者简介: 朱丹波 (1981—), 女, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机地面试验控制技术

一号台摇摆系统的原二级伺服机构地面供电设备为可控硅整流器, 由于使用年限长, 存在元器件老化、转换效率低等问题。并且经多次维修, 导致可靠性大大降低, 因此拟更换二级摇摆伺服机构地面供电设备。但仅更换设备并不能使二级摇摆伺服机构在地面热试车过程中摆脱对市电的依赖, 为彻底解决这一问题, 从供电方式上提高系统的可靠性, 我们对供电方案进行了深入的分析研究比对, 并做了大量的可行性验证试验。

## 1 二级摇摆伺服机构工作原理

二级发动机摇摆伺服机构是电液伺服机构, 伺服系统的能源为供电设备——直流电动机——油泵, 因此在地面试验时给伺服机构提供地面电源的是直流供电设备。其工作原理见图 1。

当电机接通电源后, 电枢绕组和激磁绕组分别流通电流, 激磁绕组产生磁势, 主磁通与电枢电流相互作用产生电磁转矩, 在电磁转矩的作用下, 负载与电枢一起旋转。由于二级摇摆伺服机构为低压直流电机, 启动电流很大, 因此需选择具有较强抗冲击能力的供电设备。

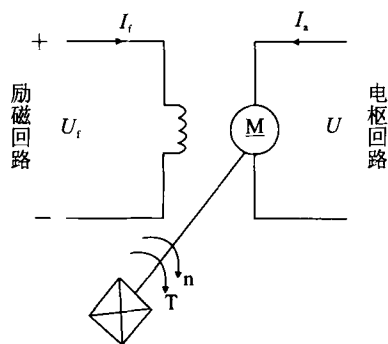


图 1 二级摇摆伺服机构工作原理简图

Fig. 1 Principle diagram of secondary servo mechanism

## 2 供电方案

根据试车台二级摇摆伺服机构供电系统现状, 解决市电对系统的影响有 2 种方式: 一种使用 UPS, 通过大功率 UPS 来保证提供至少 30 min 的交流电源, 然后通过稳压电源将交流电转换为

直流电源供给伺服机构; 一种使用蓄电池, 在热试车过程中由蓄电池给伺服机构提供直流电源。

### 2.1 使用 UPS 和直流稳压电源的供电方案

#### 2.1.1 方案介绍

由于使用 UPS, 因此直流稳压电源可选择 4 台实现给 4 台伺服机构一对一供电, 4 台直流电源合用一套 UPS 系统, 如图 2 所示。为了提高系统可靠性, 可额外备一台同功率的直流电源。

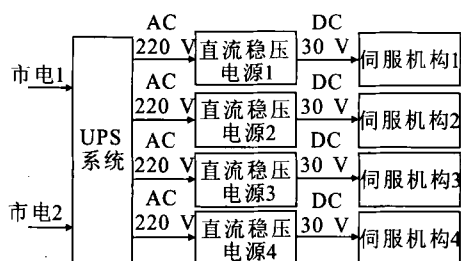


图 2 使用 UPS 和直流稳压电源的供电原理图

Fig. 2 Principle diagram of power supply mode using UPS and DC power

图 2 所示的这种供电方案可解决直流电源对市电的依赖, 但 UPS 系统的可靠性成为提高可靠性的瓶颈。因此, 配置 2 台相同型号和相同容量的 UPS 单机, 将 2 台 UPS 的输出直接并联而形成并联冗余供电系统。相对于单机系统, “1+1”冗余并机系统的可靠性得到了很大的提高。“1+1”冗余并机系统原理如图 3 所示。

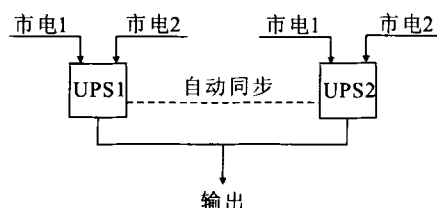


图 3 UPS 并联冗余系统

Fig. 3 UPS parallel redundant system

#### 2.1.2 可靠性分析

按功能区分, 使用 UPS 和直流稳压电源的供电系统可分为 UPS 系统、稳压电源系统和配电系统 3 个串联部分。其中 UPS 系统为“1+1”冗余系统, 其可靠度高达 99.99%, 不可用度  $\lambda(t)$  约小

于等于 $(0.91\sim1.82)\times10^{-6}$ 。某军品级直流稳压电源可靠度高达 90%，直流配电系统的可靠度为  $R_1$ 。则该供电系统的可靠性为 3 个分系统可靠度之积： $R=0.999\ 9\times0.9\times R_1=0.899\ 9R_1$ 。

2.1.3 可能出现的故障及解决方法

在系统运行中，分析较为可能产生的故障，提出了解决方法及其对系统的影响，见表 1。

表 1 系统可能产生的故障和解决方法

Tab. 1 Possible failures of the system and solutions

故障现象及原因	解决方法
UPS 系统其中一台故障，如电池模块故障等。	由于系统为“1+1”冗余，可自动由另一台 UPS 承担全部的供电任务，对系统正常工作无影响，尽快对故障 UPS 进行检修。
一台直流稳压电源故障。	由于直流稳压电源为 4 备 1 的情况，因此使用备用直流稳压电源即可。
直流配电系统故障，常见原因为按钮、指示灯、接触器等故障。	对故障元器件进行更换即可，维修时间不超过 1 天。

2.2 使用蓄电池的供电方案

2.2.1 方案介绍

考虑到与其他控制系统的设备通用性，因此选用镍镉蓄电池组作为二级摇摆伺服机构供电电源。考虑到蓄电池组占用场地较大，而台体空间有限，因此选用中倍率的镍镉蓄电池组组成 2 组直流电源，每组可同时驱动 2 台伺服机构。同时，选用 2 台晶闸管整流稳压电源作为电池组的充放电设备，与电池组配套使用。系统原理图如图 4 所示。

在二级摇摆热试车时，供电系统仅需电池组工作，供给伺服机构稳定的直流电源，无需任何其他电源额外供电，从根本上解决了市电对伺服机构供电的影响。但蓄电池维护需要定期进行充/放电、更换电解液等维护措施，使用较为麻烦。

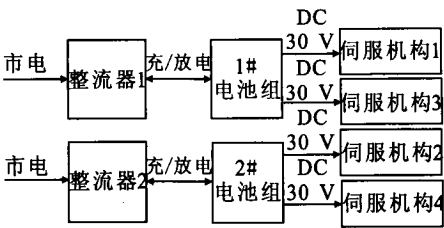


图 4 使用蓄电池的供电原理图

Fig. 4 Power supply principle of storage batteries

2.2.2 可靠性分析

按功能区分，使用蓄电池组供电的系统可分电池组系统和直流配电系统。电池组为 28 只镉镍蓄电池串联组成，作为有限寿命元件，镉镍电池最常见的失效模式是容量衰减至不能满足负载功率需求，其标志为以 0.2 IA 电流放电至终止电压 1.0 V，其持续放电时间少于 3.5 h 时循环寿命即为终止。其额定循环次数为不少于 550 次，如每年充/放电循环 20 次，也要使用 27 年。因此，在维护正常的情况下，其使用可靠性非常高。

由于蓄电池需要经常维护，因此，其维护可靠性也十分重要。给蓄电池组进行充/放电的 2 台整流器为一对一的工作模式，但这 2 台整流器可互为备份，即如果其中一台整流器故障，则另一台整流器可实现给 2 组电池分别或同时充/放电。因此，蓄电池组系统的可靠度是非常高的，约为 0.99（单台整流器可靠度 90%），则系统可靠度为  $0.99R_1$ 。

2.2.3 可能发生的故障及解决方法

使用蓄电池组的供电系统可能出现的故障之一为其中一台整流器故障，可通过对 2 组电池进行串、并联组合，实现整流器作为充/放电装置一备一的冗余功能。以整流器 1 故障为例，如图 5，完成由一台整流器给 2 组电池组分别充/放电，虚线条为改动线路。其次，可能出现的故障为直流配电系统故障，主要解决方法是更换元器件。

2.3 方案比较

综上可知使用蓄电池组供电的方式具有更高的可靠性，能够保证在二级摇摆伺服机构地面热试过程中的不间断供电。因此，选用蓄电池组供电的方法对二级摇摆伺服机构供电系统进行改进。

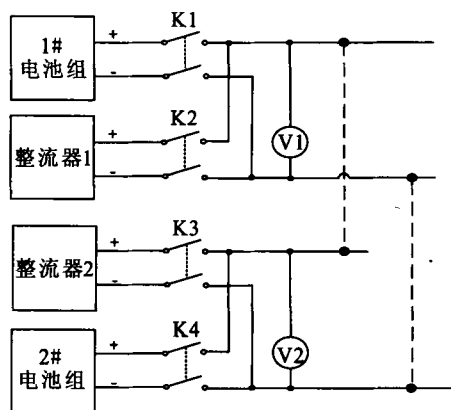


图 5 由一台整流器分别给两组电池充/放电

Fig. 5 Charge or discharge two sets of batteries by one silicon rectifier

## 2.4 其他可靠性保证措施

除了负责给电池组进行充/放电, 整流器还可以作为直流稳压电源直接连接伺服机构, 以适应大量测试工作的需要, 减少电池组短期内的充电次数, 减少操作人员用于电池维护的工作量。

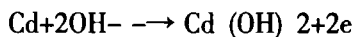
袋式镉镍蓄电池的性能特点为: 结构坚固、寿命长、荷电保持能力好、可靠性高、耐滥用、放电容量范围宽且成本低, 适用于对体积和质量要求不高, 电流不大的固定使用场所。

镉镍蓄电池的结构式为:

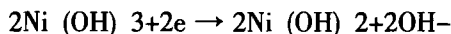


该电池的电极反应:

负极板



正极板



由正、负极产生的电池电动势为 1.299 V, 但镉镍电池的实际电动势为 1.34~1.36 V, 并与电解液的密度和温度关系不大。根据二级摇摆伺服机构的额定电压和供电线路的压降, 选择 28 块镉镍蓄电池组成一组, 可提供足够的电压。

单台二级摇摆伺服机构额定工作电流为 40 A, 启动瞬间冲击电流约为额定电流的 3~4 倍, 因此, 选用中倍率的 300 A·h 镉镍蓄电池。中倍率

的 300 A·h 镉镍蓄电池适用于 60~1 050 A 电流放电, 放电过程中电压变化较小, 可以满足系统使用需要。

由于每组电池组同时给 2 台伺服机构供电, 因此对电池组供电而言, 主要问题是电池的抗冲击能力和大电流放电是否稳定可靠。

## 3 试验验证及结果分析

为了验证电池组同时给 2 台伺服机构供电的性能, 进行了大量验证试验, 分别测试了伺服机构的启动对电池组的影响和 2 台伺服机构均长程运行 (即大电流长程放电) 对电池组的影响等。

### 3.1 伺服机构状态

伺服机构状态与某次地面热试车状态一致 (见表 2)。

表 2 参加试验的伺服机构状态

Tab. 2 Status of servo mechanism under test

分机号	1 分机	3 分机	2 分机	4 分机
线圈电阻/ $\Omega$	1.734	0.45	0.284	0.374
供电电池组	1# 电池组		2# 电池组	

### 3.2 电机启动验证

为了验证电机启动对电池电压的影响, 做了数次电机启动试验, 表 3 和表 4 为 2 组参考数据。表 3 中的数据为电池组刚充足电后的电机启动试验数据, 表 4 为电池组工作几次后的电机启动试验数据。由于电池组刚充足电后电压较高, 因此, 为了防止顺序启动伺服机构时对先启动的电机造成供电电压过高的情况发生, 同一组电池供电的 2 台伺服机构同时启动。

从表 3、表 4 和表 5 可知, 电池组在启动第一台伺服机构时浮电压下降约 2.8 V, 至稳定状态; 再启动第二台伺服机构时由于电池组放电电流增大, 电池电压下降约 2.0 V 至稳定状态, 总压降约为 4.8 V。因此, 电池组供电能够满足伺服机构的启动要求。

表 3 电池组足电量时的电机启动试验数据表  
Tab. 3 Start-up data of motors when batteries are full

步骤描述	1# 电池组 电压/V	2# 电池组 电压/V	1 分机电流/A	3 分机电流/A	2 分机电流/A	4 分机电流/A
1,3 分机启动前	39.5	39.5	0	0	0	0
1,3 分机启动后	34.8	39.5	45	45	0	0
2,4 分机启动后	-	34.7	0	0	46	47

表 4 电机启动试验数据表  
Tab. 4 Start-up data of motors

步骤 描述	端电压/V		1 分机		3 分机		2 分机		4 分机	
	1# 电池组	2# 电池组	电压/V	电流/A	电压/V	电流/A	电压/V	电流/A	电压/V	电流/A
启动前	38.8	39.0	0	0	0	0	0	0	0	0
启动 1 分机	36.0	39.0	33.2	44	0	0	0	0	0	0
再启动 3 分机	34.1	39.0	30.9	44	31.0	43	0	0	0	0
再启动 4 分机	33.9	36.2	30.9	44	31.0	43	0	33.4	45	0
再启动 2 分机	33.9	34.1	30.9	44	31.0	43	30.9	44	31.2	45
全部关 闭,约 5 min 后	38.6	38.6	0	0	0	0	0	0	0	0

表 5 电机启动试验结果表  
Tab. 5 Battery pack status when servo mechanisms start

电池组	单台伺服机构启动 时压降/V	第 2 台伺服机构启 动时压降/V	总压降/V (表 2/表 3)	放电电流/A (表 2/表 3)
1# 电池组	2.8	1.9	4.7/4.7	90/87
2# 电池组	2.8	2.1	4.8/4.9	93/89

3.3 长程放电试验

电池组长程放电试验是为了测试电池组的性能是否满足试验过程全程大电流放电的需求。为了更符合热试车需要，长程放电试验以某次试车时间为参考，完全模拟地面热试过程，从准备时间至地面试验结束为一次长程放电试验，约为

600 s。本文仅选 2 次长程放电试验数据作为参考，数据见表 6 和表 7。通过大量的试验数据可得知，针对某次试车，电池组充足一次电可完成 4 次全程放电试验。因此，中倍率镉镍蓄电池可以承担发动机地面热试车二级摇摆伺服机构全程供电的任务。

表 6 电池组第二次长程放电试验数据表  
Tab. 6 Test data of the 2nd long time discharge of battery packs

时间/s	端电压/V		1 分机		3 分机		2 分机		4 分机	
	1# 电池组	2# 电池组	电压/V	电流/A	电压/V	电流/A	电压/V	电流/A	电压/V	电流/A
-10	38.6	38.6	0	0	0	0	0	0	0	0
20	33.7	33.8	31.4	43	31.4	41	31.3	42	31.3	45
200	33.5	33.5	30.6	42	30.7	41	30.5	42	30.7	45
420	33.2	33.2	30.3	42	30.5	39	30.1	42	30.2	45
450~590	36.3	36.1	0	0	0	0	0	0	0	0

表 7 电池组第四次长程放电试验数据表  
Tab. 7 Test data of the 4th long time discharge of battery packs

时间/s	端电压/V		1 分机		3 分机		2 分机		4 分机	
	1# 电池组	2# 电池组	电压/V	电流/A	电压/V	电流/A	电压/V	电流/A	电压/V	电流/A
-10	37.7	38.0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	33.0	33.0	30.2	44	30.0	42	29.7	44	30.1	45
60	32.6	32.6	29.8	41	29.9	43	29.7	43	29.9	44
200	32.5	32.5	29.6	42	29.8	40	29.5	43	29.7	44
400	32.3	32.3	29.4	42	29.7	39	29.2	43	29.4	43
450~590	36.0	35.8	0	0	0	0	0	0	0	0

注：根据某次试验大纲，200~400 s 为稳态特性。稳态特性为仅维持伺服机构零位，伺服机构不再作动，因此电压可稍低于标准电压。

4 结论

电池组作为直流电源直接给伺服机构供电的方式有效地提高了二级摇摆伺服机构地面热试车供电系统的可靠性，极大地降低了系统对市电的依赖性。通过大量的测试验证，中倍率 300 A·h

镉镍蓄电池能够满足伺服机构启动特性及大电流长程供电的特性，能够满足二级摇摆伺服机构地面热试车供电需求。这种电池组直接启动伺服机构和大电流长程放电的供电方式在二级摇摆伺服机构地面热试车供电系统的成功应用对今后在大功率直流供电系统的设计方面具有很好的借鉴意义。

## 参考文献:

- [1] 严仰光. 航空航天器供电系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995.
- [2] 朱忠惠. 推力矢量控制伺服系统[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
- [3] 陈明, 张京妹. 控制系统可靠性设计[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [4] 邵文蛟. 不完整结构的可靠性分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [5] 张佩元. 地面设备设计与试验(下)[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1996.
- [6] 李福昌. 运载火箭工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2002.
- [7] 陈勇, 陈亚爱. 电机与拖动基础 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [8] 徐延万. 控制系统(中)[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [9] 马学利. “1+1”冗余并机 UPS 系统与冗余式双总线“1+1”UPS 系统可靠性比较分析 [J]. 现代经济信息, 2008 (9): 104-105.
- [10] 宋清山. 镉镍电池的发展及用途 [J]. 家用电器, 2000 (10): 37.
- [11] 余国华. 我国镉镍蓄电池的技术发展与现状[J]. 电池工业, 1999 (6): 106-108.
- [12] 乔学荣. 低轨道卫星镉镍蓄电池组在轨性能分析[J]. 电源技术, 2009 (12): 1101-1103.
- [13] 李成模. 镉镍蓄电池组的直流系统在发电厂和变电所的应用[J]. 湖南电力, 2001 (6): 7-9.

(编辑: 张永秀)

(上接第 47 页)

根据以上各改进方案仿真结果的对比, 最后确定改进方案 4 作为最终的修改方案。并对改进方案 4 的实际产品进行随机振动试验, 试验结果表明: 结构不再发生疲劳破坏, 改进可行有效。

## 7 结论

本文通过对某气瓶结构在振动试验中出现的支架断裂进行动力学分析, 并结合相关试验数据, 得到以下主要结论:

1) 在原结构耳片断裂位置上厚度方向的尺寸过渡过于剧烈 (1 mm 过渡到 5 mm), 从而引起该位置的应力集中, 是气瓶安装裙上多个耳片发生断裂的主要原因之一。

2) 在进行随机振动的边界条件下, 气瓶结构的前两阶摆动模态则是振动过程中多个耳片发生断裂的另一个主要原因。

3) 一方面由于振动输入谱的量级在 400 Hz 以后以对数关系呈线性下降走势, 另一方面, 由于提高结构的固有频率有利于降低振动过程中该阶模态引起的位移幅度, 进而降低相应的动应力。这意味着提高气瓶结构的前两阶摆动频率能

有效降低耳片在振动过程中产生的动应力。

4) 方案 4 的改进结构一方面通过增加安装裙壁厚改善了应力集中, 同时也较大程度上提高了气瓶结构的前两阶摆动频率, 使得气瓶结构在振动过程中, 耳片上的最大动应力 RMS 值降低了 91.9%, 并经试验验证, 方案改进有效。

## 参考文献:

- [1] 方同, 薛璞. 振动理论及其应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- [2] KREYSZIG E. Advanced engineering mathematics [M]. 2nd ed. New York: John Wiley, 1967.
- [3] 纽兰 D E. 随机振动与谱分析概论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- [4] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [5] MSC. Nastran basic dynamics user's guide [EB/OL]. [2010-09-19]. <http://www.ishare.iask.sina.com.cn>
- [6] 徐稼轩, 郑铁生. 结构动力分析的数值方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993.
- [7] 贾建援, 黄一红, 康春霞. 一种工程结构模态阻尼特征预估方法[J]. 西安: 西安电子科技大学学报, 1995, 22(3): 295-300.

(编辑: 马杰)