

基于逆向思维的卫星热真空试验 热电偶实施工艺方法

郭涛, 贾瑞金, 王冬梅, 肖正懿, 方志开, 蔡玮

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: **目的** 提高卫星热真空试验的热电偶实施效率, 提升实施结果和试验结果的一致性。**方法** 基于逆向思维的方法, 将正常流程中后实施的星上工作转移至星下提前实施, 即首先完成热电偶的分区和路径规划工作, 再在星下完成热电偶的模板制作和焊连电连接器工作, 最后在星上完成热电偶的粘贴工作。**结果** 实现了星上工作星下化, 星下工作辅线化, 辅线工作单元化, 并在卫星热真空试验中成功应用。**结论** 工艺方法合理可行, 操作方便, 主线工作效率提升 267%, 现场实施一致性提高, 并降低了热电偶引线损伤的可能性。

关键词: 逆向思维; 热真空试验; 热电偶; 工艺方法

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.04.007

中图分类号: TJ410.3; V461

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)04-0032-06

Thermocouple Implementation Technique of Satellite Thermal Vacuum Test Based on Reverse Thinking

GUO Tao, JIA Rui-jin, WANG Dong-mei, XIAO Zheng-yi, FANG Zhi-kai, CAI Wei
(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: Objective To improve the implementation efficiency of thermocouple for satellite thermal vacuum test, and improve the consistency of implementation result and test result. **Methods** The on-satellite tasks in normal process were transferred to off-satellite operation star in advance based on reverse thinking. Firstly, partition and path planning of the thermocouple was completed. Secondly, template of thermocouple were made and welded to the electric connectors. Finally, the thermocouple was pasted onto the satellite. **Results** Off-satellite operation for the on-satellite tasks, subordinate line operation for the off-satellite tasks, and unit operation for the subordinate line were achieved and were successfully applied in the thermal vacuum test of satellite. **Conclusion** The technique is reasonable, feasible and easy to operate. In this way, the efficiency of the principle line is increased by 267%, thus improving the consistency of on-site implementation and reducing the possibility of damaging the lead of thermocouple.

KEY WORDS: reverse thinking; thermal vacuum test; thermocouple; implementation technique

卫星热试验过程中, 为全面地分析和评估卫星舱板、设备等部件的温度状态, 需要在卫星特征部位布置一定数量的测温传感器, 从而比较全面地获取试验的温度数据。热电偶是一种简单、经济、热惯性小、

动态响应速度快、应用最为广泛的温度传感器^[1-2], 在卫星热试验中被广泛应用。影响热电偶测温精度的因素主要包括: 分度误差、不均匀性和不稳定性引起的误差、补偿导线误差、参考端温度变化、热交换引

起的温差、测量回路引入新的热电势等^[3-4]。目前，在热电偶的制造封装工艺方面的研究很多^[5-6]，但是热电偶实施方面的工艺研究鲜有报道。航天器热试验一般采用热电偶进行测温^[7]。目前热电偶实施的工艺方法需要占用较长的型号主线研制时间，实施现场环境相对杂乱，容易造成热电偶引线损伤。针对上述问题，文中提出了基于逆向思维的热电偶实施工艺方法，该工艺方法不会引入新的温度测量误差，且可大幅提高热电偶现场实施的效率。

1 热电偶测温原理

当两种不同的导体 A 和 B 组成一个回路，且两端相互连接时，只要接点位置存在温度梯度，回路中就会产生电动势，该现场被称为“热电效应”，又称“塞贝克效应”，产生的电动势称为“热电势”，如图 1 所示^[8-10]。

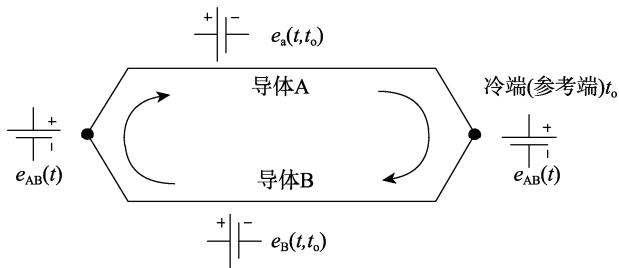


图 1 热电效应

热电动势两种导体的接触电动势和的温差电动势两部分组成。热电偶回路的总电动势可写成：

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) + e_A(t, t_0) - e_B(t, t_0) \quad (1)$$

式中： $E_{AB}(t, t_0)$ 为总电动势； $e_{AB}(t)$ 为导体 A、B 在接点温度 t 时形成的接触电动势； $e_{AB}(t_0)$ 为导体 A、B 在接点温度 t_0 时形成的接触电动势； $e_A(t, t_0)$ 为导体 A 在两端温度分别为 t 和 t_0 时形成的温差电动势； $e_B(t, t_0)$ 为导体 B 在两端温度分别为 t 和 t_0 时形成的温差电动势。

实践证明，总电动势中占主要部分的是接触电动势，温差电动势只占极小部分，可忽略。故式（1）可简化为如下：

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) \quad (2)$$

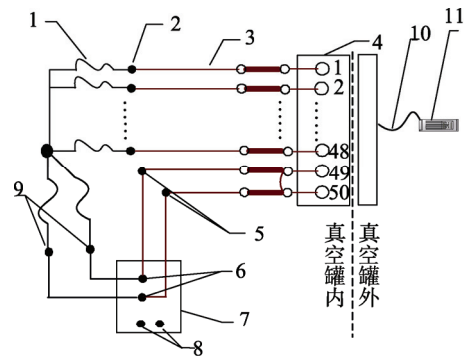
热电势大小只与导体的材料及接点的温度有关，当热电偶两电极材料固定后，热电势只与接点温度有关，即两节点温度 t 和 t_0 的函数为：

$$E_{AB}(t, t_0) = f(t) - f(t_0) \quad (3)$$

式（3）在实际测量中得到了广泛的应用。因为冷端 t_0 恒定后，热电偶产生的热电势只随热端（测量端）温度的变化而变化，即一定的热电势对应着一定的温度。

2 热试验中热电偶应用

卫星真空热试验中使用最多的是 T 型热电偶，由铜丝和康铜丝通过激光点焊而成。测量线路一般采用双线冗余公用负极的接线方式，数采仪器位于真空罐外部，并通过 Y2-50 密封插头的方式引出罐外。每个密封插头的前 48 针分别与对应热电偶的铜线焊接，第 49、50 针各连接 2 根长铜线延长线，且第 49、50 针用短铜丝搭接。将测温热电偶的 48 根康铜线端头扭焊在一起，并连接出 2 根 5 m 长同牌号的康铜丝。单独引出的 2 根铜丝和康铜丝分别与 2 个参考热电偶的铜丝端和康铜丝端进行扭焊，参考点温度（一般为 0°C ）由铂电阻测量，最后通过电连接器与数采仪器连接，实现温度的测量，具体原理如图 2 所示。



1-热电偶康铜丝；2-热电偶测温点；3-热电偶铜丝；4-密封插头；5-参考点端铜丝焊接点；6-温度参考点；7-内置温度参考点装置；8-参考点测温用铂电阻；9-参考点端康铜丝焊接点；10-过渡电缆；11-数采仪器。

图 2 热电偶在热真空试验中应用

目前热电偶实施的工艺流程如图 3 所示。该工艺流程主要存在如下问题：热电偶引线统一甩出卫星外后，几百根引线汇在一起，且长度不一，分线工作难度大，占用时间长；甩线的路径未进行合理设计，而是现场自由发挥，容易影响其他部件的装配，且实施一致性差；焊连插头前，由于引线长度不一，引线剪齐工作前需要进行标签转移工作，工作效率低下；在卫星周边操作，工作现场较为杂乱，热电偶的引线细且长，实施过程中容易造成引线的打结，进而损伤引线，如图 4 所示。以某型号 240 个热电偶实施过程为例，若以 4 个熟练电装人员和 2 个检验人员同时开展工作，热电偶实施预估时间见表 1。

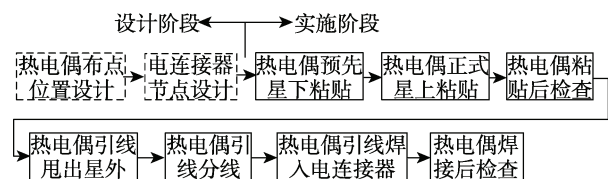


图 3 当前工艺流程

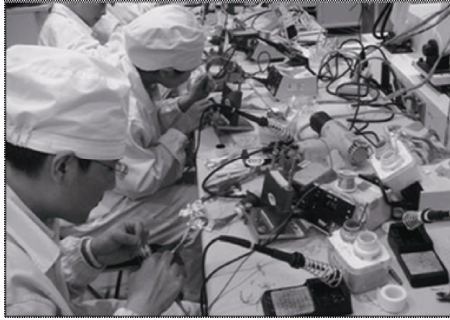


图4 焊入电连接器现场

表1 当前方法占用时间

序号	实施内容	实施时间/d	备注
1	预先星下粘贴	4	辅线时间
2	正式星上粘贴	2	与其他操作并行时间
3	粘贴后测量	0.5	与其他操作并行时间
4	引线甩出卫星外	1	与其他操作并行时间
5	引线分线	3	与其他操作并行时间
6	引线焊入电连接器	4	主线时间
7	焊连后检查	0.5	主线时间

3 基于逆向思维的实施工艺方法

针对热电偶实施过程中的主要问题，秉承主辅线分离、提高效率、提升产品质量的原则，提出基于逆

向思维的热电偶实施工艺方法，即将热电偶引线甩出卫星外、引线分线、引线焊入电连接器、焊连后检查等最后实施的问题集中的工作内容，提前至工作的前期，并转化为辅线，增加设计阶段的工作内容，变被动为主动，提高生产效率，具体工作流程如图5所示。该工艺方法只是将原实施流程的前后顺序进行优化，未增加新的现场实施内容，不会引入新的测量误差。

3.1 分区设计

分区设计就是将所有的热电偶进行区域划分，以降低不同区域之间热电偶引线间的关联性，提高实施效率。

热电偶实施过程中，因存在装配关系的遮挡，部分位置的热电偶需要提前粘贴。所属不同舱段的热电偶，舱段对接前，无法同时、同地点实施。因此，热电偶分区设计时，以实施时间前后、卫星舱段、同一舱段距离远近分开为原则，将热电偶分成若干个区域。由于数据采集设备资源和真空罐上密封电连接器数量的限制，需将相邻区域内的热电偶合并焊接在同一个电连接器上。多个区域合并时，热电偶数不能超过48个。

以某型号240个热电偶为例，240个热电偶划分成了21个区域，21个区域最后合并为8个电连接器，见表2。

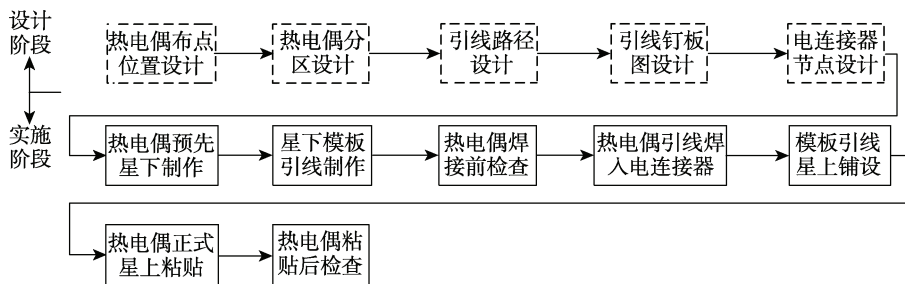


图5 基于逆向思维的工艺流程

表2 分区设计

序号	区域	热电偶数/个	所属电连接器	热电偶总数/个	序号	区域	热电偶数/个	所属电连接器	热电偶总数/个
1	载荷舱区域1	4			12	平台舱区域2(提前实施)	26	T5	26
2	载荷舱区域2	18	T1	42	13	平台舱区域3	13	T6	24
3	载荷舱区域3	10			14	平台舱区域4	11		
4	载荷舱区域4	10			15	平台舱区域5	13		
5	载荷舱区域5	19	T2	37	16	平台舱区域6	4	T7	18
6	载荷舱区域6	18			17	平台舱区域7	1		
7	载荷舱区域7	7			18	平台舱区域8	9		
8	载荷舱区域8	10	T3	27	19	平台舱区域9	4	T8	46
9	载荷舱区域9	4			20	平台舱区域10	14		
10	载荷舱区域10	6			21	平台舱区域11	19		
11	平台舱区域1(提前实施)	26	T4	26					

3.2 路径设计

通过现场实验,若每个热电偶的引线长度均不一致,将大大增加模板引线的制作效率,且所需时间与热电偶的数量近似成指数关系。为达到模板引线制作耗费时间与最终实施效果之间的平衡,需采用如下方法:各个区域之间的路径必须明确走向,而单个区域内每个热电偶引线的走向无需明确,只需设计出集束点;集束点到每个热电偶粘贴点之间的引线长度用集束点到该区域最远点之间的距离替代,确保每个热电

偶都可粘贴在指定位置。

以某型号的第一个电连接器为例,路径设计如图 6 所示。

3.3 钉板图设计

依据分区设计和路径设计,进行钉板图的设计。钉板图应包含插头起点、分支点、集束点、热电偶测温点、每个分支的热电偶数量、长度信息等。以某型号的第一个电连接器为例,钉板图设计如图 7 所示。

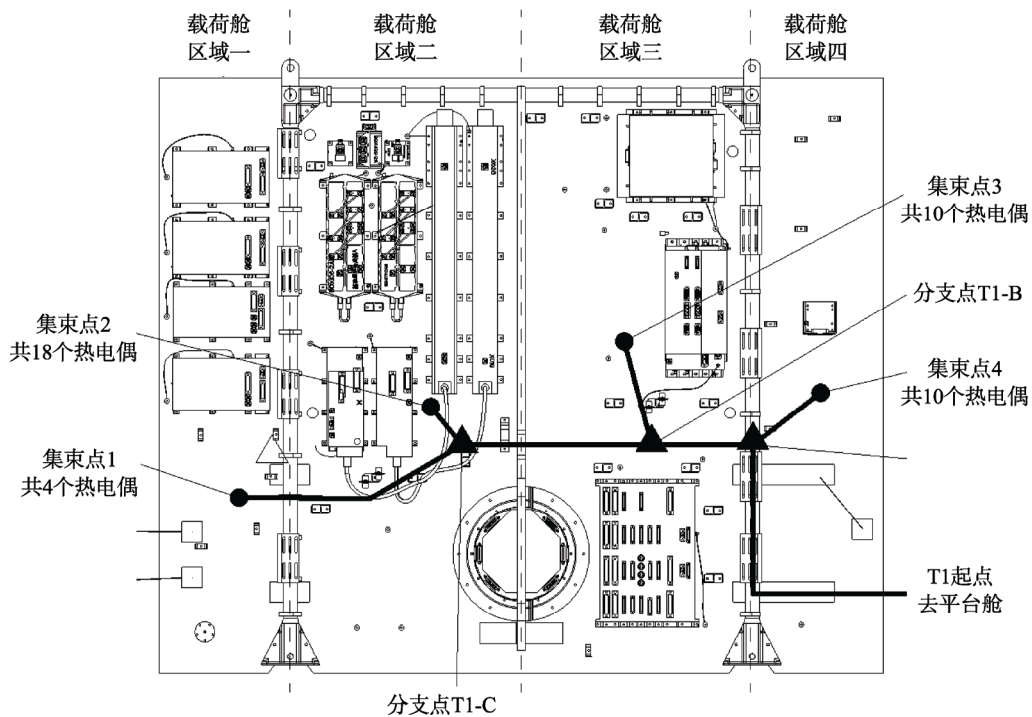


图 6 路径设计

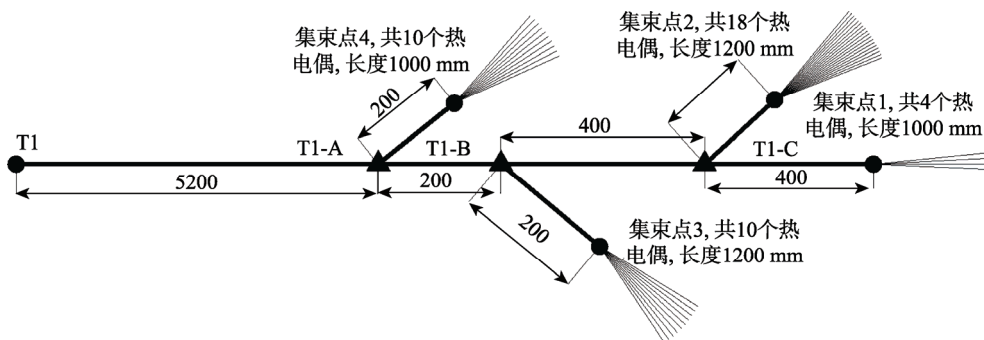


图 7 钉板图设计

3.4 电连接器节点设计

确定同一电连接器上具体焊连的热电偶后,将同一区域按照热电偶编号的大小顺序从小到大排列,不同区域按照区域的编号进行排列,并赋予电连接器号以及对应的节点号。考虑到热电偶反甩和粘贴的过程发生损坏的可能性,需要在每个舱段或者区域对应热

电偶数量较少的电连接器上增加若干个备份(一般为 3~8 个,依据热电偶的总数确定)。

3.5 实施阶段

按照逆向思维的实施工艺方法,热电偶的实施过程如图 8 所示。

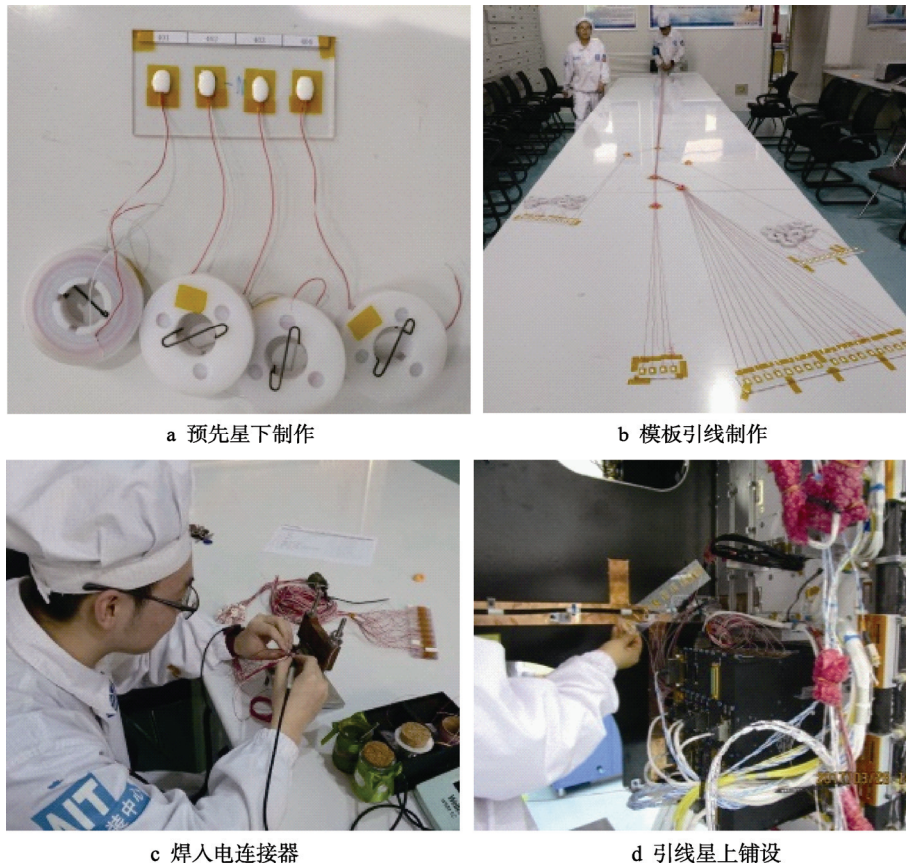


图8 实施过程

4 优势分析和试验验证

基于逆向思维的实施工艺方法,基本实现了星上工作星下化,星下工作辅线化,辅线工作单元化。相比常规的方法,主要有如下优势:

- 1) 热电偶引线甩出星外、引线分线等最占用主线时间的工作成功转移至星下辅线工作,节省主线时间。
- 2) 模板引线主束走向完全确定,提高了热电偶实施过程的一致性。
- 3) 焊连电连接器前,因引线长度不齐产生的标签转移工作完全取消,规避了标签转移错误带来的风险。
- 4) 现场整洁有序,降低了热电偶引线损伤的可能性。

基于逆向思维的实施工艺方法已经在某型号上成功应用,缩短并行操作时间 3.5 d,缩短主线操作时间 4.5 d,缩短总操作时间 1 d,具体见表 3、图 9。考虑到人力资源安排,并行操作时间可能转化为为主线时间,即当前方法占用主线时间为 11 d,逆向思维方法占用主线时间为 3 d,按此计算,主线工作效率可提升 267%。

表3 逆向思维方法占用时间

序号	实施内容	实施时间/d	备注
1	预先星下粘贴	4	辅线时间
2	星下模板引线制作	2.5	辅线时间
3	焊连前检查	0.5	辅线时间
4	引线焊入电连接器	4	辅线时间
5	模板引线星上铺设	0.5	与其他操作并行时间
6	正式星上粘贴	2	与其他操作并行时间
7	粘贴后测量	0.5	与其他操作并行时间

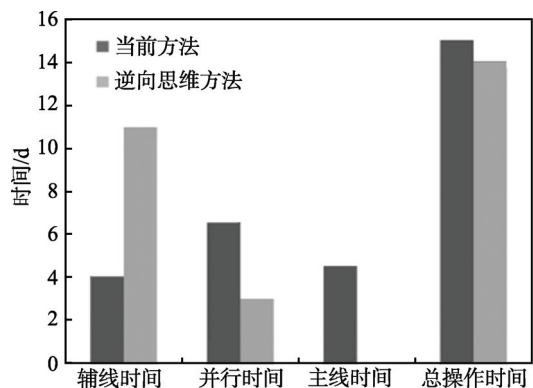


图9 时间对比

5 结论

1) 该工艺方法与传统方法相比, 不会引入新的测量误差。

2) 合理可行, 操作方便, 主线工作效率提升 267%。

3) 可提高现场实施的一致性, 降低热电偶引线损伤的可能性。

4) 可为其他行业的测温试验工作提供参考。

参考文献:

- [1] 陈寅之. 在镍基高温合金上制备薄膜热电偶及其相关技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [2] 郑晓文. 关于热电偶冷端补偿问题的探讨[J]. 宇航计测技术, 2002, 22(6): 53-59.
- [3] 倪建丰. 热电偶的测量误差及克服方法[J]. 化工装备技术, 2008, 29(2): 59-61.
- [4] 王彦明, 郝彦军. 热电偶测量误差分析[J]. 中国仪器仪表, 2013, 8: 56-59.
- [5] 戴磊, 吴云峰, 胡波洋, 等. 热电偶灌胶工艺中的图像轮廓检测和判定[J]. 机电信息, 2016, (15): 86-89.
- [6] 戴磊. 热电偶自动装配工艺中的机器视觉测量技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [7] 郭赣. 真空热试验的温度测量系统[J]. 航天器环境工程, 2006, 26(1): 33-36.
- [8] 安万庆, 柳晓宁, 赵翔宇, 等. 钨铼热电偶在航天器真空热试验中的应用[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(2): 189-193.
- [9] 尹代冬, 谢锴. 热电偶测温过程中温度跳跃问题的分析及处理[J]. 计量、测试与校准, 2011, 31(6): 31-32.
- [10] 蒋亚州. 电磁涡流刹车综合性能试验台[D]. 西安: 西安石油大学, 2013.