

# S4000P 规范下装备预防性维修分析方法的研究

王南松, 王凌

(上海精密计量测试研究所, 上海 201109)

**摘要:** 在装备多样化以及演习实战化背景下, 如何高效且经济的对装备进行保障, 已成为影响部队战斗力的重要因素, 为此, 西方发达国家制定了一系列有关装备保障的国际规范集; 首先, 阐述了国际规范间的数据关系, 重点对有关制定和持续改进预防性维修任务的 S4000P 进行了介绍, 该规范在装备保障工作中起到了承上启下的关键作用; 其次, 分析了预防性维修任务定义的工作流程以及涉及到的方法, 包括确定分析系统、系统故障模式及其影响分析、功能故障层级、预防性维修任务定义分析、维修间隔分析; 最后, 通过某装备刹车系统为实例对该方法的适用性进行了验证, 结果证明了方法的有效性, 对国内开展装备综合保障相关工作具有一定的指导意义。

**关键词:** 预防性维修; S4000P; 维修间隔

## Study on Equipment Preventive Maintenance Analysis Method Based on S4000P Specification

Wang Nansong, Wang Ling

(Shanghai Precision Metrology & Test Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Under the background of equipment diversification and combat, how to effectively and economically support equipment has become an important factor affecting the combat effectiveness of troops. For this reason, western developed countries have formulated a series of international specification on equipment support. Firstly, the data relationship between international specifications is expounded, and mainly introduces the S4000P, which plays a key role in the comprehensive equipment support work. Secondly, the general workflow of preventive maintenance task definition and the methods involved are analyzed, including the system analysis, failure modes and effects analysis, functional failure categorization, preventive maintenance interval analysis. In the end through a brake system as an example of applicability of this method is verified. The results prove the validity of the method, the domestic equipment-integrated support related work has a certain guiding significance.

**Keywords:** preventive maintenance; S4000P; maintenance interval

### 0 引言

随着装备系统研制多样化和复杂化, 以及作战任务实战化, 装备保障已成为影响部队战斗力的重要因素, 采用定时维修保证装备完好性的保障模式不够经济和科学, 不但加重了用户的保障负担, 而且造成了资源的浪费<sup>[1-2]</sup>。为此, 欧洲航空航天防务工业协会 (Aerospace and Defense Industries Association of Europe, ASD) 联合美国航空航天工业协会 (Aerospace Industries Association, AIA) 和美国航空运输协会 (Air Transport Association, AIA) 提出了装备综合后勤保障 (Integrated logistic Support, ILS) 思想, 并制定了相应的规范体系, 包括: S1000D 《使用公共源数据库技术出版物国际规范》 (International Specification for Technical Publications Utilizing a Common Source Database)、S2000M 《物料管理国际规范》 (International Specification for Materiel)、S3000L 《保障性分析国际程序规范》 (International Procedure Specification for Logistics Support

Analysis LSA)、S4000P 《预防性维修制定和持续改进国际规范》 (International Specification for Developing and Continuously Improving Preventive Maintenance) 等国际规范<sup>[3-8]</sup>, 该标准体系覆盖了装备综合保障的各个方面, 它们不断融合互为数据来源, 形成了完整的综合保障工作框架, 如图 1 所示。其中 S4000P 旨在提供实际可行的分析方法, 以建立装备的预防性维修任务需求 (Preventive Maintenance Task Requirements, PMTR) 及任务间隔<sup>[9-10]</sup>。

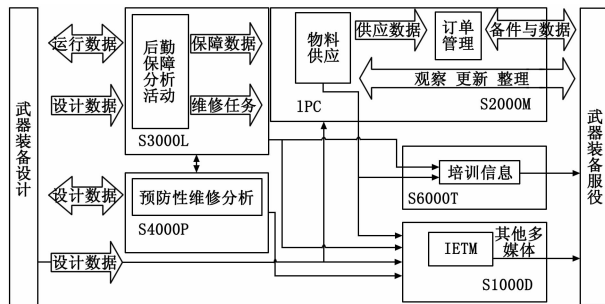


图 1 S 系列标准工作框架

收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-08-01。

**作者简介:** 王南松 (1988-), 男, 河北邢台人, 硕士, 工程师, 主要从事武器装备保障信息系统开发与技术应用相关工作方向的研究。

目前, 国内各军工行业开展了基于 S1000D 的交互式电子技术手册设计与开发, 还未对 S4000P 进行实质性研究,

依据 S4000P 分析出的预防性维修数据是保障性分析和技术手册的主要输入, 在综合保障过程中发挥了承上启下的关键作用。通过研究 S4000P 的 PMTR 分析方法, 对国内开展装备综合保障工作有一定的指导意义。

### 1 S4000P 简介

2014 年, 由 ASD、AIA 及 ATA 共同制订的 S4000P 是基于面向民用航空器的 MSG-3 《运营商/制造商计划维修》关于预防性维修制定和持续改进的国际规范, 其考虑了军民用维修程序协调一致性, 目的是提供一种通用维修分析方法, 帮助工业方建立装备的 PMTR 及任务间隔, 作为装备交付初期阶段预防性维修计划的基础。通过该规范制定的 PMTR 内容是结构化、标准化并且考虑全面的。此外, 对装备的区域、结构等方面如何进行优化, 给予了具体的分析方法, 确保了 PMTR 覆盖的完整性。S4000P 规范应用范围非常广泛, 涉及航空、舰船、装甲、导弹武器系统等。因此针对不同的应用对象, 需要合理选取 S4000P 分析方法和程序, 建立有效分析模型, 以准确定义装备的维修任务。

### 2 预防性维修分析方法

装备预防性维修是未雨绸缪, 是通过各种有效监控方法, 实时监控系统部件工作状态, 对部件性能下降或者系统冗余度下降到极限值之前, 及时采用纠正措施, 保证装备的完好。装备具有重复性和周期性间隔的预防性维修任务需求 (PMTR with repetitive scheduled intervals, PMTRI) 分析应按照以下过程展开: 首先, 应明确装备哪些系统或分系统需要进行预防性维修分析; 其次, 对需要进行预防性维修分析的系统进行故障模式及影响分析; 然后依据故障模式及影响分析结果进行功能故障分类; 最后, 对故障原因进行评估确定具体 PMTRI。分析过程如图 2 所示。

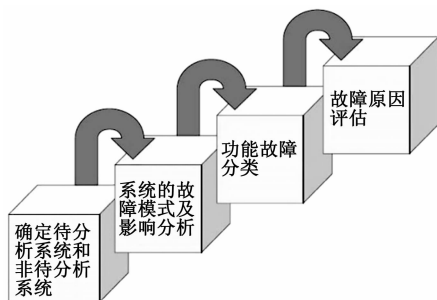


图 2 PMTRI 主要分析过程

#### 2.1 确定分析系统

依据 S1000D 规范对装备的物理结构进行分解, 分解至可更换单元为止, 并逐一对以下 4 个问题进行分析。问题 1: 功能故障后是否对安全性有影响? 问题 2: 功能故障后是否与相关法律、环境生态产生冲突? 问题 3: 功能故障后对操作人员的任务完成有无影响? 问题 4: 功能故障后对经济是否有影响? 对装备系统而言问题 1 和 2 只要其中之一是“肯定”回答, 则应确定为需要进行 PMTRI 的系统, 若问题 1 和 2 均为“否定”回答, 而 3 和 4 之一是“肯定”回

答, 则需要对该系统进行评估, 确定其是否为 PMTRI 的系统, 若问题 1 至 4 均为“否定”回答, 则可以不对该系统进行 PMTRI 分析, 通过分析形成清单如表 1 所示。

表 1 系统分析清单

序号	型号 识别码	S1000D 标准编码 系统	名称	问题 1	问题 2	问题 3	问题 4	是否 PMTRI 系统
1	X	00	X	是	是	是	是	是
2	X	01	X	是	否	否	否	是
3	X	02	X	否	是	否	否	是
4	X	03	X	否	否	是	否	评估
5	X	04	X	否	否	否	是	评估
6	X	05	X	否	否	否	否	否
...	...	...	...	...	...	...	...	...

#### 2.2 系统故障模式及影响分析

确定分析系统后, 开展系统的故障模式及影响分析 (FMEA), 包括了系统功能分析、功能故障分析、功能故障影响分析、故障原因、故障模式及影响分析清单。

对系统的功能分析不仅仅是分析该系统设计定义功能还应包括:

- 1) 用户对异常情况的警告注意事项提醒;
- 2) 在功能失效时如何关闭当前系统;
- 3) 在功能失效时如何启动备用功能;
- 4) 还应考虑防护装置, 应急设备和误操作;

系统每一个功能会存在一个或多个故障。功能故障是指系统在规定的范围内不能执行预期的功能。对于冗余系统, 即使对系统的正常运行没有直接影响, 也必须对冗余系统的功能故障进行分析。在正常的操作任务中, 应急系统的功能故障应归为与安全相关的 (例如: 直升机的救援升降机电缆的紧急情况、紧急燃油切断阀、紧急电源等)。

发生系统功能故障的原因主要分为以下几方面:

- 1) 在指定的系统操作或任务中, 系统或设备的固有设计缺陷。
- 2) 在指定的系统操作或任务中, 由于意外损坏而导致系统故障;
- 3) 在指定的系统操作或任务中, 由于预期环境影响导致的系统故障;
- 4) 系统遇到意外事件, 例如: 飞机受到鸟击;

一个故障原因可能会引发一个或多个功能故障, 同时多个故障原因对一个功能故障产生影响。因此, 有可能将与多个功能故障关联的单个故障原因分配到相同或不同的功能故障层级中。

#### 2.3 故障层级分析

依据系统 FMEA 结果, 对每个功能故障原因 (Functional Cause, FC) 进行分类, 并通过以下逻辑层级方法对 FC 进行分析, 形成功能故障影响层级 (Functional Failure Effect Categorization, FEC)。

1) 故障层级逻辑是评估每个功能故障对产品的总体影响,以确定功能故障的影响编码(例如:与安全有关的为 FFEC1&5、与相关法律和环境有关 FFEC2&6、使用任务有关的为 FFEC3&7、与经济费用有关 FFEC4&8);

2) 通过逻辑决断,决定是否进行 PMTRI;

利用图 3 所示的逻辑决策对每个识别出的故障进行分析。逻辑流的设计方式是自顶开始,对分析流程方向上的每个问题回答“是”或“否”,在回答逻辑问题之后将最终的 FFC 分配给该 FC。

### 2.4 PMTRI 分析

PMTRI 分析须遵循以下逻辑流程:

1) 确定该部件的故障概率是否低于该部件的门限值,若回答“是”则不需要进行 PMTRI 分析;若回答“否”则进入逻辑判断 2);

2) 依据该故障的层级分析该故障是否完全可以由机内测试 (Built-In-Test, BIT) 解决,若回答“是”则进行周期性维护;若回答“否”则进入逻辑判断 3);

3) 对该部件进行保养任务是否有效,针对不同类型部件,保养任务包括润滑、调整、清洁、补给;若回答“是”则进行相应的预防性维护保养任务;若回答“否”则进入逻辑判断 4);

4) 操作人员对该部件进行检查是否有效,操作人员检查包括:BIT、目视检查、详细检查;若回答“是”则进行相应的预防性维护检查;若回答“否”则进入逻辑判断 5);

5) 操作人员对该部件进行测试是否有效,测试手段包括:特殊的详细检查、无损探测;若回答“是”则进行相应的预防性维护检查;若回答“否”则进入逻辑判断 6);

6) 对该部件进行维修是否有效;若回答“是”则进行相应的维修任务;若回答“否”则进入逻辑判断 7);

7) 对该部件进行定时更换是否有效,定时更换适用于有明确的寿命或者部件维修该不经济高效;若回答“是”则进行定时更换;若回答“否”则进入逻辑判断 8);

8) 通过对该部件执行单一 PMTRI 或者组合 PMTRI

是否有效适用;若回答“是”则需要依据表 2 对其进行 PMTRI 分析;若回答“否”则需要对该部件进行重新设计,重新设计原则见表 3;

表 2 PMTRI 分析原则

FFEC	PMTRI 选择	备注
1	选择合适高效的 PMTRI 或多个 PMTRI 的组合	明确的预防性维修间隔
2	选择最高效的 PMTRI 或多个 PMTRI 的组合	可调节维修间隔
3	选择最彻底的 PMTRI	明确的维修间隔
4	选择最高效的 PMTRI	对维修间隔无要求
5	选择合适高效的 PMTRI 或多个 PMTRI 的组合	明确的维修间隔
6	选择最高效的 PMTRI 或多个 PMTRI 的组合	可调节的维修间隔
7	选择最彻底的 PMTRI	明确的预防性维修间隔
8	选择最高效的 PMTRI	对维修间隔无要求

表 3 重新设计需求评估

FFEC	重新设计需求	备注
1	强制重新设计	通过 PMTRI 无法避免故障,同时不能进行状态监控
2	进行重新设计评估	考虑相关法律法规
3	进行重新设计评估	考虑用户需求
4	没有重新设计的必要	可承担的费用内
5	强制重新设计	通过 PMTRI 无法避免故障,同时不能进行状态监控
6	进行重新设计评估	考虑法律法规
7	进行重新设计评估	考虑用户需求
8	没有重新设计的必要	可承担的费用内

9) 是否进行状态监控进行评估,由于通过 BIT 是不能对故障完全解决,因此若回答“是”则需要对 PMTRI 进行量化,并分析其对产品寿命周期内的费用影响;若回答“否”则说明当前不需要进行状态监控;

10) 对产品寿命周期内费用影响分析后评估是否需要进行状态监控,若回答“是”则在相应的产品设计状态监控系统;若回答“否”则说明当前不需要进行状态监控;

11) 评估状态监控数据置信度,功能是否实现,若回答“是”则进行 BIT 设计;若回答“否”则说明当前不需要进行状态监控;

### 2.5 PMTRI 间隔分析

PMTRI 定义完成后,需要对其间隔形式进行分析,分析逻辑如下:

1) 是否确定故障部件的性能衰退过程;若回答“是”则进入逻辑判断 2);若回答“否”则分析并定义部件故障的衰退过程;

2) 是否针对分析中的部件指定并设计了导致该故

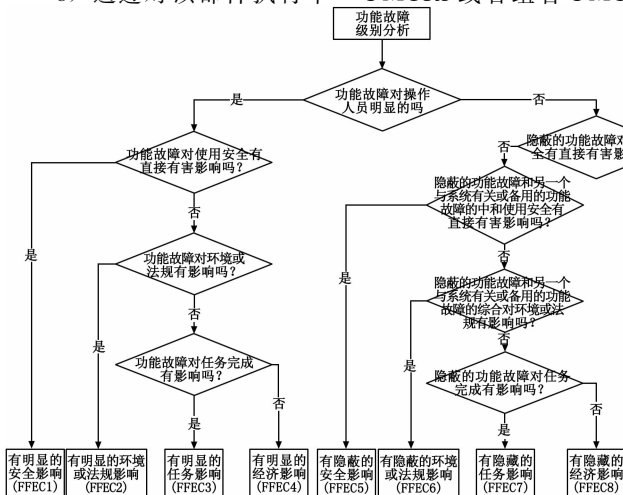


图 3 功能故障影响级别分析逻辑流程

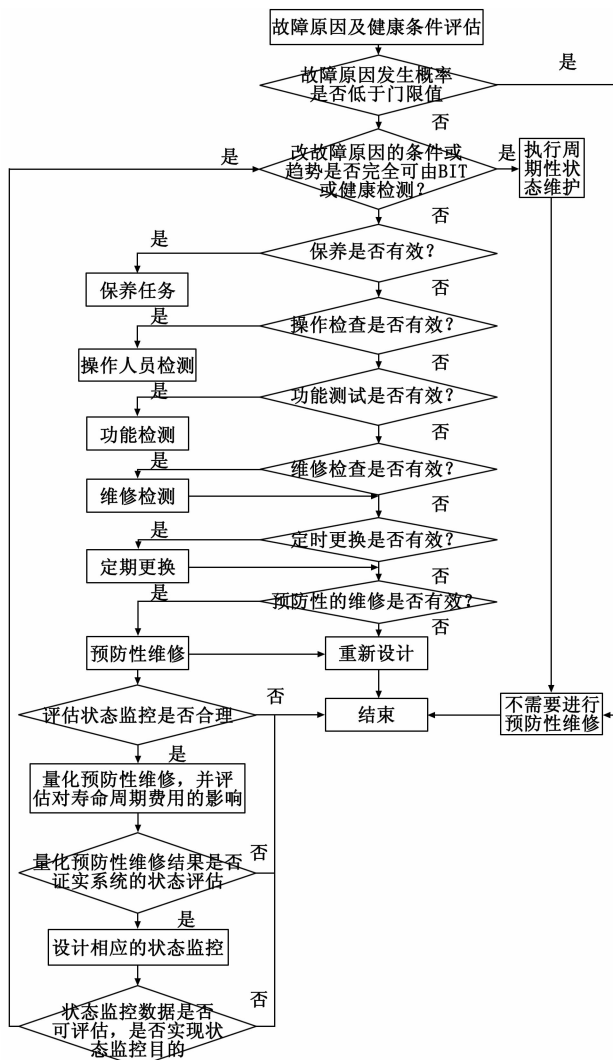


图 4 PMTRI 分析逻辑流程

障原因的项目; 若回答“是”则进入逻辑判断 3); 若回答“否”则执行测试/计算/分析, 以便将最初的设计与产品的使用场景匹配;

3) 是否确定部件故障率和故障率分布; 若回答“是”

则进入逻辑判断 4); 若回答“否”则执行测试/计算/分析, 以便将最初的设计与产品的使用场景匹配;

4) 部件衰退过程是否仅与时间参数有关; 若回答“是”则选择时间参数作为该 PMTRI 的间隔形式; 若回答“否”则进入逻辑判断 5);

5) 衰退过程是否由一个或多个参数触发; 若回答是则进入逻辑判断 6); 若回答否则进入逻辑判断 7);

6) 是否将单个参数标识为 PMTRI 间隔形式; 若回答是则选择使用参数作为该 PMTRI 的间隔形式; 若回答否则选择所有参数作为该 PMTRI 的间隔形式;

7) 衰退过程是否由时间和使用参数组合触发; 若回答是则进入逻辑判断 8); 若回答否则分析并定义部件的恶化过程;

8) 是否以时间参数为主, 作为 PMTRI 间隔形式; 若回答是则选择时间参数作为该 PMTRI 的间隔形式; 若回答否则进入逻辑判断 9);

9) 是否以使用参数为主, 作为 PMTRI 间隔形式; 若回答是则选择使用参数为该 PMTRI 的间隔形式, 若回答否则选择所有参数作为该 PMTRI 的间隔形式。

PMTRI 间隔值的定义需要从以下几方面进行考虑:

- 1) PMTRI 任务形式;
- 2) PMTRI 任务对应的 FFEC;
- 3) 在未来产品使用阶段, 分析该故障类型的预期平均故障率;
- 4) 偏离预期故障分布的风险。

### 3 实验应用及结果分析

以某地面装备刹车系统为例, 对预防性维修分析方法进行实例应用, 验证方法的适用性。刹车系统主要用于对装备的制动, 是该装备执行各项日常任务中反复使用的系统之一, 因此该实例具备一定的典型性。

首先, 确定刹车系统是否需要预防性维修的系统, 依据分析方法确定是需要进行 PMTRI 分析的系统, 分析清单如表 4 所示。其次, 对刹车系统进行 FMEA, 分析清单如表 5 所示。

表 4 系统分析清单

S4000P 编码	型号识别码	S1000D 编码	名称	问题 1	问题 2	问题 3	问题 4	是否是 PMTRI 系统	备注
F4	MTB-BRS800-801	DA1-10	刹车系统	是	否	是	否	是	最坏情况: 下坡时刹车失灵存在安全隐患;

表 5 刹车系统 FMEA

S4000P 编码	功能	功能故障编码	功能故障	功能故障影响编码	功能故障影响	故障原因编码	故障原因	故障率/%
F41	产生制动摩擦力	FF41-1	无法产生制动摩擦力	FFE41-1-1	制动时可能发生碰撞, 影响安全	FFC41-1-1-1	制动液压油泄漏	60
						FFC41-1-1-2	制动管路损坏	40
		FF41-2	制动摩擦力衰退	FFE41-2-1	增加制动距离, 影响安全	FFC41-2-1-1	制动衬垫恶化	50



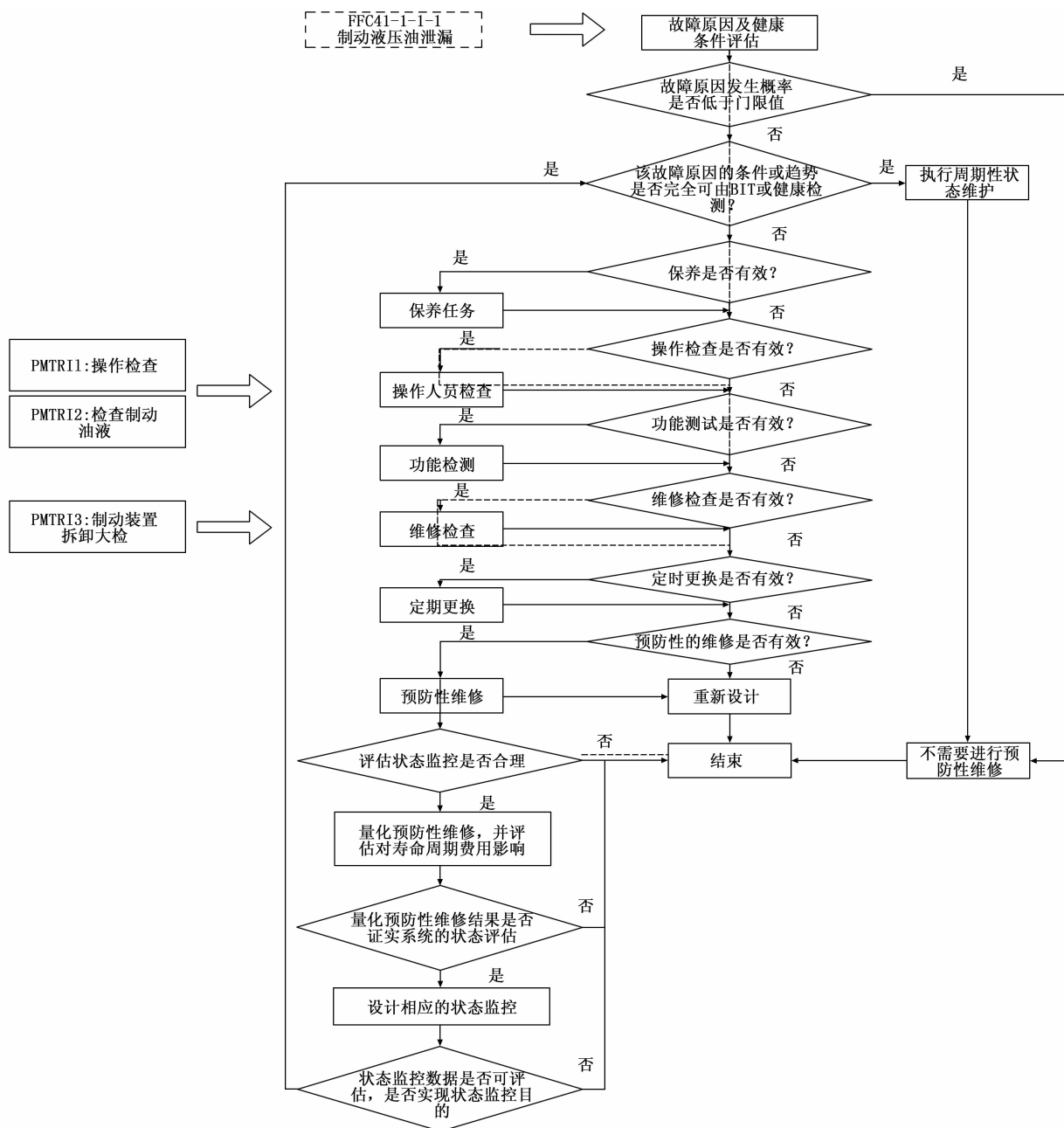


图 7 刹车系统 PMTRI 分析过程

最后, 以故障原因为制动液压油泄漏进行 PMTRI 评估, 评估得出 3 个 PMTRI, 分别为操作检查、检查制动油液、制动装置拆卸大检可有效降低该故障的发生概率, 分析过程如图 7 所示。

依据图 7 的分析过程对 3 个 PMTRI 进行间隔形式定义, PMTRI1&2 为每次行驶前进行, PMTRI3 为每 5 年进行一次。经过 4 个过程的分析得出结论, 结论见表 8。

#### 4 结束语

本文阐述了 S 系列规范在装备综合保障体系中的工作框架, 介绍了 S4000P 规范主要内容, 重点研究了 PMTRI 的分析方法。该分析方法适应性强, 可对各型装备进行科学的预

防性维修规划, 规划结果可作为装备保障性分析以及用户技术手册的输入数据, 可有效指导用户开展维修保障, 有利于装备保障性的提升。最后, 以某装备刹车系统作为示例进行了实验, 实验结果表明, 分析方法的合理性和有效性, 对国内开展装备维修保障工作具有一定的指导意义。

#### 参考文献:

[1] 赵洪利, 王南松. 基于 S1000D 规范的 IETM 业务规则研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (11): 3786-3789.  
 [2] 朱兴动, 张琦, 宋建华. 基于 S 系列标准体系的装备综合保障信息数据闭环研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2018 (6): 110-113.

表 8 PMTRI 分析结果

PMTRI1:刹车系统操作检查
间隔形式:行驶任务前
间隔值:1
对应故障层次编码:FFEC1
人员:装备操作人员
PMTRI2:检查制动油液
间隔形式:行驶任务前
间隔值:1
对应故障层次编码:FFEC1
人员:装备操作人员
PMTRI3:制动装置拆卸大检
间隔形式:年
间隔值:5
对应故障层次编码:FFEC1
人员:大修厂维修专业人员

(上接第 139 页)

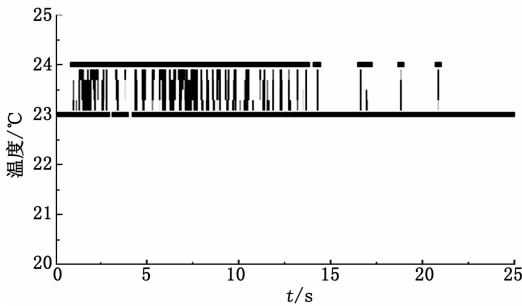


图 8 液冷系统出口温度

结果表明该试验平台能实现液冷控制系统的传感器采集及信息传输。

### 5.3 控制逻辑结果及分析

表 3 给出了模拟一级超温告警故障时, 综合管理计算机执行一级超温故障诊断的过程, 结果表明综合管理计算机按照控制逻辑正确执行逻辑控制、故障诊断。

表 3 一级超温告警故障时序分析

信号名称	刷新时间(h:min:s)	时间差/s
冷板入口温度(高于 70 °C)	<15:42:37.277>	/
冷板入口一级超温告警	<15:42:47.258>	9.981
冷板入口温度(低于 60 °C)	<15:46:32.923>	/
冷板入口一级超温告警消除	<15:46:42.904>	9.981

## 6 结论

基于某高空高速无人机机电综合架构对其液冷系统进行的控制系统设计, 经利用 LabVIEW 和 Simulink 搭建的半物理仿真试验台的多项测试结果表明: 综合管理计算机

[3] 刘威, 王勇, 蒋庆喜, 等. 应用 S4000P 制订民用飞机区域检查任务方法探究 [J]. 航空维修与工程, 2016 (5): 59-61.

[4] 周旭娜. 浅析 S3000L《后勤保障分析国际程序规范》中产品分解方法 [J]. 航空标准化与质量, 2014, 10: 50-56.

[5] ASD/AIA/ATA S4000P. International specification for developing and continuously improving preventive maintenance. Issue 1.0 [Z]. ASD-AIA2014.

[6] 周钢, 郭福亮. 军械装备综合保障的数据体系分析 [J]. 兵工自动化, 2017 (2): 23-26.

[7] 都业宏, 郁浩, 赵静. 武器系统预防性维修间隔期的多目标决策研究 [J]. 兵工学报, 2015, 36 (6): 1089-1095.

[8] 张鹏, 许力, 赵世伟. 飞机系统维修方式确定于维修间隔优化研究 [J]. 计算机仿真, 2016, 33 (1): 68-71.

[9] 王灵芝. 以可靠性为中心的高速列车设备维修决策支持系统研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.

[10] 邵延君. 基于故障预测的武器装备预防性维修策略研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013.

能够按照预定的控制逻辑实现液冷传感器采集与信息传输、故障诊断与控制逻辑解算、指令控制与数据分发等功能。

本文所采用的机电综合技术在无人机液冷系统的设计应用实践可推广至燃油、液压等多个机电系统, 通过对多个机电系统的综合控制与管理, 实现降低无人机重量、提高无人机性能的目标。

### 参考文献:

[1] 谢曦鹏. 某型飞机机电综合系统设计 [J]. 西安航空学院学报, 2014, 32 (3): 21-23.

[2] 林志昆, 王宏霞. 浅谈飞机机电综合技术发展及标准需求 [J]. 航空标准化与质量, 2017 (6): 15-17, 44.

[3] 任杰. 飞机机电综合管理系统研究与应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.

[4] 於二军, 吴斌, 李林, 等. 机载机电管理计算机双冗余设计 [J]. 微电子学与计算机, 2012, 29 (12): 88-90.

[5] 陈福, 张晓红, 赵刚, 等. 飞机机电综合管理平台应用任务调度方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (3): 255-257, 262.

[6] 杨涤, 李立涛. 系统实时仿真开发环境与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[7] The MathWorks Inc. Real-Time Workshop for Users With Simulink [Z]. The MathWorks Inc, 2003.

[8] 黄晖, 张磊, 邵惠明. 一种机电综合控制技术仿真平台原理方案 [J]. 科技信息, 2012 (29): 43-44.

[9] 张正明, 袁冬莉, 吕鹏. 某型无人机液冷装置的实时仿真 [J]. 电子设计工程, 2013, 8 (15): 1-4.

[10] 刘庆杰, 江相乐, 任杰, 等. 机载机电公共设备自动化测试技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (6): 12-14.