

## 星载铷钟的故障模式及影响分析\*

邓爱民 陈 循 张春华 董 理

(国防科技大学 机电工程与自动化学院 湖南 长沙 410073)

**摘 要** :星载铷钟在许多空间系统中起着重要作用 ,要求其具有高的可靠性。阐述了故障模式及影响分析在星载铷钟可靠性设计中的重要作用 ,介绍了星载铷钟的基本原理和结构简图 ,依据星载铷钟的功能将其划分为 6 个子系统 ,在此基础上进行了故障模式及影响分析 ,并给出了物理泵体子系统的部分 FMEA 结果。

**关键词** :星载铷钟 ;可靠性 ;可靠性框图 ;故障模式及影响分析(FMEA)

中图分类号 :TB114.3 ;O455.1 文献标识码 :A

## The Failure Modes and Effects Analysis of the Space-borne Rubidium Clock

DENG Ai-min , CHEN Xun , ZHANG Chun-hua , DONG Li

(College of Mechatronics Engineering and Automation , National Univ. of Defense Technology , Changsha 410073 , China)

**Abstract** :The space-borne rubidium atomic frequency standards( RAFS ) play a critical role in many space systems. Their performance and reliability will greatly influence the functions of these systems. The failure mode and effects analysis( FMEA ) is applied in the space-borne RAFS to identify and rectify the failures during its development and design stages. The basic principle of the space-borne RAFS and its framework diagram are introduced. A certain space-borne RAFS is divided into six subsystems and its reliability block diagram is depicted. Each subsystem is analyzed by FMEA and a part of the FMEA table of physics package subsystem is presented as an example.

**Key words** :space-borne rubidium clock ; reliability ; reliability block diagram ; failure modes and effects analysis( FMEA )

原子频率标准是导航定位卫星的核心技术。美国的 GPS 系统使用了铯原子频率标准和铷原子频率标准<sup>[1]</sup> ,俄罗斯的 GLONASS 系统使用了铯原子频率标准<sup>[2]</sup>。拟于 2008 年投入使用的欧洲 Galileo 系统 ,将使用氢原子频率标准和铷原子频率标准<sup>[3]</sup>。铷原子频率标准( rubidium atomic frequency standards : RAFS ,简称铷原子频标、铷原子钟或铷钟 ,以下统称铷钟 )具有体积小功耗小、环境适应性强、频率稳定性和漂移率等电性能指标高的优点 ,可适应各种空间使用的要求。由于空间环境具有与地面环境不一样的特点 :真空、无重力、温度变化范围大、自然辐射强等 ,使得星载铷钟与普通商用铷钟或军用铷钟相比 ,必须具备抗辐射、长寿命、低功耗、低漂移、低噪声、高可靠性的特点 ,才能更好地适应空间应用的需要。因此 ,研究星载铷钟的可靠性具有重要意义<sup>[4,5]</sup>。

确保星载铷钟高可靠性的根本方法是从设计研制一开始就考虑故障模式及其影响 ,进行可靠性设计 ,增强其在恶劣环境下的生存能力。分析星载铷钟在其生存周期内可能出现的故障模式及其可能造成的影响 ,是保障星载铷钟可靠性的基本环节。

### 1 故障模式及影响分析

故障模式及影响分析( failure modes and effects analysis : FMEA )是通过研究可能发生的故障及其对系统的影响来鉴定设计产品可靠性的一种技术 ,是确定故障原因、减小故障影响措施的一种系统方法<sup>[6]</sup>。

\* 收稿日期 2004 - 09 - 23

基金项目 :总装备部技术基础资助项目

作者简介 :邓爱民(1972—),男,博士生。

根据星载铷钟的结构、功能对其进行 FMEA,从理论的角度对现有的设计进行分析,发现设计中的薄弱环节,及时实施改进措施,可以确定影响星载铷钟可靠性的关键件与重要件,同时根据 FMEA 结果,能够为环境试验、可靠性试验提供失效判据、测试手段和试验剖面设计方面的相关信息。在星载铷钟设计的早期阶段就开始进行 FMEA 分析,有助于对设计的评审和为安排改进措施的先后顺序提供依据。

## 2 星载铷钟的故障模式及影响分析

### 2.1 星载铷钟的基本原理

原子钟是利用原子内部能级间的量子跃迁谱线作为参考,通过伺服环路将晶体振荡器的频率锁定于该原子跃迁频率之上,使晶体振荡器的频率具有和原子跃迁频率相同的频率稳定度。本文所研究的星载铷钟结构原理简图如图 1 所示<sup>[7]</sup>。它是利用光抽运原理,实现铷原子基态超精细能级间的粒子数反转,采用光检测方法,探测由晶体振荡器、倍频与综合器组成的微波源作用下产生的受激跃迁信号,利用原子内部的这一极窄而稳定的共振谱线,对微波源进行鉴频,由鉴频器得出频率误差信号,再对晶振频率进行控制<sup>[8]</sup>。

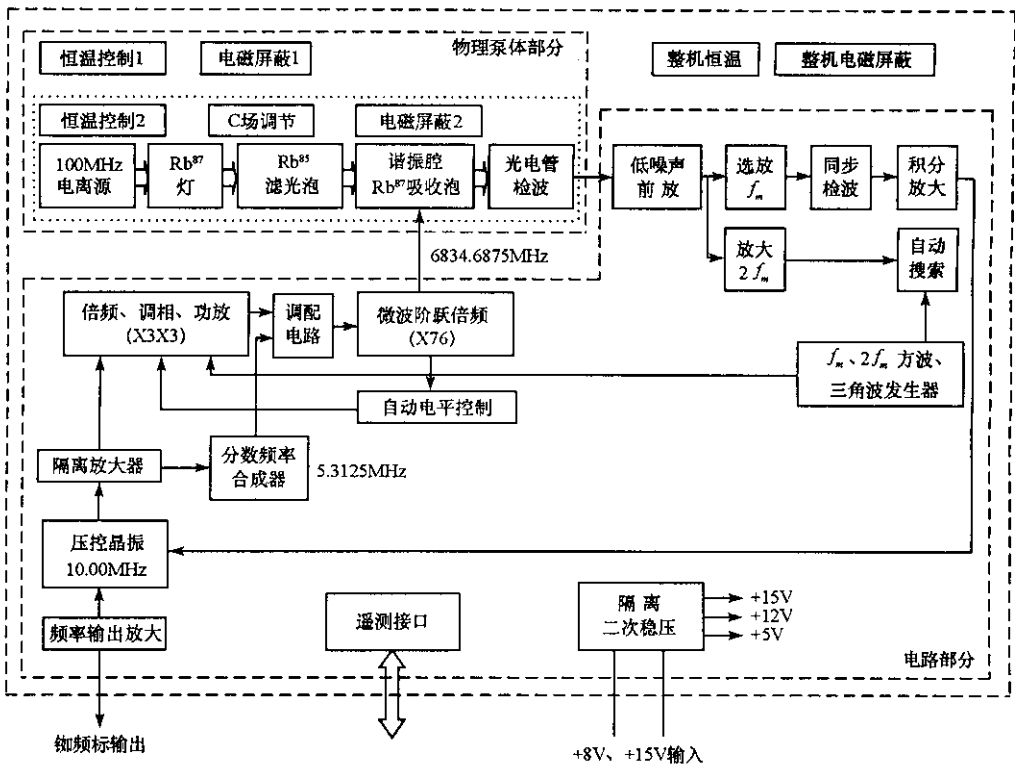


图 1 星载铷钟结构原理简图

Fig. 1 The structure principle diagram of the space-borne rubidium clock

根据对星载铷钟基本原理的理解,按照其基本结构和完成的功能将星载铷钟系统划分成 6 个子系统,这 6 个子系统分别为:物理泵体子系统、频率控制子系统、射频子系统、温度控制电路子系统、遥测电路子系统、电源及接口子系统。根据星载铷钟的基本原理,可知星载铷钟的任何组成部分发生故障,都将使系统(星载铷钟)不能正常工作。因此,星载铷钟为可靠性串联系统,其可靠性框图如图 2 所示。

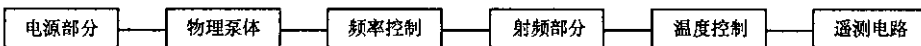


图 2 星载铷钟基本可靠性框图

Fig. 2 The basic reliability block diagram of the space-borne rubidium clock

### 2.2 物理泵体

物理泵体是星载铷钟的核心。不同型号的星载铷钟的具体结构有所不同,但其基本结构一致<sup>[8]</sup>。对于物理泵体子系统,存在以下通用的部分:

灯激励电路:功能是点燃铷灯。其故障模式为元器件损坏、性能下降。

灯、泡:铷灯和滤光泡、吸收泡在星载铷钟系统中起着重要的作用,所以必须分析物理泵体子系统内铷灯和滤光泡、吸收泡的可能故障模式。灯、泡的主要故障模式有玻璃破损、真空度降低等。

腔内温控、C场、腔内倍频、磁屏蔽:它们影响着星载铷钟的稳定性、准确度、漂移率,是保障星载铷钟性能的重要组成部分。这些部分主要的故障模式是部件失效和性能下降。

光检测部分:光检测部分包括光敏二极管、电阻和前置放大器,其输出的误差电压用来控制压控晶振。通常经过光敏二极管的电阻输出误差信号是微小的模拟量,不经过放大,其信噪比非常低,无法使用。其故障模式是元器件损坏、性能下降。

物理泵体子系统的任何一个组成部分出现故障,都会影响物理泵体的鉴频功能,不能控制压控晶振输出高稳定标准频率的误差电压,此时星载铷钟的输出频率就是压控晶振的固有频率,其稳定性和准确性都不高。因此,物理泵体子系统是星载铷钟的关键件,它的可靠性将最终决定星载铷钟的可靠性。物理泵体子系统的可靠性框图如图3所示。

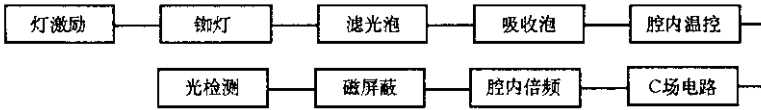


图3 物理泵体子系统的可靠性框图

Fig.3 The reliability block diagram of the physics package subsystem

### 2.3 频率控制电路子系统

频率控制电路将物理泵体子系统输出的误差电压进行放大,转换成直流纠偏电压,控制压控晶振的频率输出,使其输出频率具有很高的准确度和稳定性,同时频率控制电路对输入到物理泵体的激励频率进行调制、合成。频率控制电路由伺服电路、倍频电路、调制电路、ALC电路及FSK电路等部分组成。频率控制电路出现故障,就不能有效地对相关信号进行伺服、调制和综合处理。频率控制电路子系统的故障模式主要是元器件损坏、性能下降(参数漂移)。其可靠性框图如图4所示。

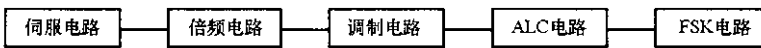


图4 频率控制电路子系统的可靠性框图

Fig.4 The reliability block diagram of the frequency control circuit subsystem

### 2.4 射频子系统

射频子系统由压控晶体振荡器、隔离放大电路和频率输出放大电路组成,其功能是提供物理泵体激励信号频率,并提供标准频率输出。如果压控晶体振荡器不振荡或隔离放大电路出现问题,就无法得到物理泵体的激励频率,星载铷钟无法输出标准频率。由此可见,压控晶体振荡器是铷钟的关键件。该子系统的主要故障模式是性能退化、无频率输出。其可靠性框图如图5所示。

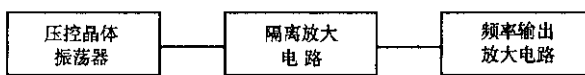


图5 射频子系统的可靠性框图

Fig.5 The reliability block diagram of the radio frequency (RF) subsystem

### 2.5 温度控制电路

温度控制电路用来控制星载铷钟的内部温度环境,减小电路部分的温度敏感性,减小温度变化对失

稳和漂移的影响,使其工作在一定的温度下性能最佳。整机温度控制电路主要由电阻、电容、热敏电阻、电位器、加热元件和传感器组成,其主要故障模式是元器件损坏、温度超差。

## 2.6 遥测电路

遥测电路是根据星载铷钟的锁定信号指示与输出频率信号幅度指示,对其工作状态进行判断,并根据判断的结果来决定是否切换到备份的星载铷钟。在进行地面试验时,遥测电路可以用来对星载铷钟在试验中出现的故障进行分析判断与定位。

## 2.7 电源及接口子系统

星载铷钟正常工作过程中,将采用星上一次电源,通过滤波和DC-DC变换后,得到各电路板工作电压,因此,电源及接口子系统的各部分对星载铷钟能否正常工作有重要影响。一般来讲,星载铷钟电源子系统由电源滤波和电源稳压两部分构成,包括稳压器、电容、电阻、电感、小型集成块等元器件。电源的主要故障模式是无功率输出、电压波动。

星载铷钟还使用了一些传输线与插头,传输线与插头虽不是复杂器件,但作用重大,一旦发生故障,很不容易查找。其主要故障模式是短路与断路。因而,传输线与插头的可靠性应着重依赖选材与筛选试验,尽可能使系统短、断路现象少发生。

## 3 星载铷钟物理泵体子系统的FMEA表

根据以上对星载铷钟6个子系统的分析,结合其可能经历的各种环境,就可以对星载铷钟进行故障模式及影响分析,如果要对具体的星载铷钟型号进行可靠性设计与制造,必须在此基础上,结合具体的结构进行详细分析与补充。本文在对星载铷钟各个子系统分析的基础上,给出了某型号星载铷钟物理泵体子系统部分故障模式及影响分析表,如表1所示。

在星载铷钟中,故障的严酷度可以分为三级:I级故障表示铷钟损坏,需更换部件或切换至备份钟,如引起铷钟无输出的各种故障;II级故障是影响铷钟输出频率稳定度、精度的故障,这级故障的模式很多,在各个部分都有可能发生,如物理泵体部分的故障;III级故障不影响铷钟的正常工作,输出无异常,但会有一些障碍,使系统性能有所下降,如接口的某些故障等。故障的发生频率分为经常、有时、偶然、很小、极小,共五级。

由于星载铷钟是新近研制和设计的航天电子产品,其产品特性只能通过商用铷钟和军用铷钟来类似推断,而且对商用铷钟和军用铷钟的故障模式,文献也极少报道,因此,星载铷钟物理泵体子系统的故障模式及影响分析表中的补偿措施、严酷度级别和故障的发生概率等内容只是一种合理的想定,这几项内容可以在今后对星载铷钟有了更深的了解和经过更多的性能试验、环境试验、可靠性试验及实际使用后,再进行进一步的补充和完善。对于星载铷钟的其它子系统的FMEA,也是如此。

## 4 结论

故障模式及影响分析是指导产品设计及改进、提高系统可靠性的重要环节。在进行星载铷钟系统设计时,应用可靠性分析方法进行深入的故障模式及影响分析研究,建立完善的星载铷钟系统故障数据库,在星载铷钟系统设计阶段就找出可能发生的故障及其原因,并在设计、工艺等方面采取有效的改进措施,对提高星载铷钟系统可靠性具有重要意义。在子系统基础上对星载铷钟系统一般结构所做的FMEA分析,为星载铷钟系统的可靠性设计提供了技术支持,也为提高其系统可靠性提供了良好的思路。

表1 星载铷钟故障模式及影响分析表

Tab.1 FMEA table of the space-borne rubidium clock

初始约定层次:星载铷钟

约定层次:物理泵体子系统

产品标志	功能	故障模式	故障原因	故障影响		补偿方法	严酷度	发生概率
				局部影响	高一层次影响			
灯激励电路	高频振荡器,点燃铷灯	1. 开路 2. 不振荡 3. 性能降低	1. 线圈折断 2. 电压不足,元件损坏 3. 元件性能下降	无法点燃铷灯	无 <sup>87</sup> Rb抽运光进入滤光泡	降低功耗	II	极小
铷灯	产生 <sup>87</sup> Rb抽运光	1. 灯泡损坏 2. 灯泡内铷量不足 3. 其它	1. 玻璃破损 2. Rb扩散或凝结 3. 真空度不够	灯泡不发光	无 <sup>87</sup> Rb抽运光进入滤光泡	使用优质玻璃	II	很小
滤光泡	滤掉抽运光中的a线	1. 灯泡损坏 2. 其它	1. 玻璃破损 2. 真空度不够、其它	没有滤掉抽运光中的a线	无 <sup>87</sup> Rb光b线进入吸收泡	同上	II	很小
吸收泡	吸收 <sup>87</sup> Rb光,使光强变弱	1. 灯泡损坏 2. 其它	1. 玻璃破损 2. 真空度不够、缓冲气体不足	没有吸收 <sup>87</sup> Rb光	没有光强的变化	同上	II	很小
C场电路	产生恒定磁场,微调谐振频率	1. 开路 2. 短路 3. 磁场偏移	1. 线圈折断 2. 无电压 3. 电流偏移	1. 不产生磁场 2. 无磁场强度 3. 场偏移	无法调制谐振频率到所需频率上		II	极小
微波腔	使谐振频率与谱线中心频率一致	1. 频率泄漏 2. 性能参数漂移	机械失效 结构故障	无法鉴频或者性能下降	无法鉴频或者性能下降	更换	II	很小
光敏二极管	将光强转换成光电流	1. 开路 2. 短路 3. 参数漂移	1. 电压为0 2. 电子故障 3. 透光面污染	1. 不能将光强转换成电流 2. 同上 3. 电流偏小	1. 无纠偏电压形成 2. 同上 3. 形成的纠偏电压偏小	更换	II	极小
前置放大器	将纠偏电压放大	1. 开路 2. 短路 3. 性能退化	1. 电路断开 2. 元件击穿损坏 3. 元器件老化	1. 无输出 2. 无输出 3. 参数漂移	1. 无输出 2. 无输出 3. 参数漂移	更换元器件	II	极小
腔内温控	保持灯室、腔温恒定	1. 开路 2. 短路 3. 性能退化	1. 无电压输入 2. 元器件损坏 3. 加热功率不足	1. 不加热 2. 不加热 3. 温度达不到要求	无法鉴频或者性能下降	增加保温层	III	很小
电磁屏蔽	使腔体与外界隔离,减少相互影响	电磁干扰	结构故障	无法鉴频或者性能下降	无法鉴频或者性能下降	多层屏蔽	III	很小

## 参考文献:

- [1] Riley W J. Rubidium Atomic Frequency Standards for GPS Block III[A]. 22nd PTTI, 1990: 221 - 230.
- [2] Bhaskar N D, et al. A Historical Review of Atomic Frequency Standards Used in Space Systems[A]. Proceedings of the 1996 IEEE International Frequency Control Symposium, 1996: 24 - 32.
- [3] Jeanmaire A, Rochat P, Emma F. Rubidium Atomic Clock for GALILEO[A]. 31st PTTI, 1999: 627 - 636.
- [4] 管仲成, 狄青叶, 于洪喜. 空间用原子频率标准[J]. 空间电子技术, 1999(4): 21 - 27.
- [5] 邓爱民, 张春华, 陈循, 等. 星载铷原子钟的可靠性研究[A]. 中国兵工学会第二届维修专业学术年会, 昆明, 2004(8).
- [6] 陆廷孝, 郝鹏洲. 可靠性分析与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [7] 周忠石, 王亮, 郭鹏翔. 铷原子频率标准的小型化研究[J]. 宇航计测技术, 2002(1): 1 - 6.
- [8] 王义道, 王庆吉, 傅济时, 等. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986.

