

文章编号: 1007-4627(2018)03-0287-07

CiADS 固态功率源的可用性设计与分析

高鹏辉^{1,2}, 王志军^{1,†}, 孙列鹏¹, 贾永智^{1,2}, 秦元帅^{1,2}, 何源¹, 黄贵荣¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: ADS 加速器面临的一大技术挑战是高可用性要求, 进行固态功率源可用性设计是为 ADS 加速器的可用性设计与分析做准备。首先对 CiADS 的可用性要求进行了分配, 固态功率源的分配结果为 0.999; 然后对固态功率源进行了初步可用性设计, 分析的结果无法满足要求; 最后对固态功率源进行了冗余设计, 使用 Reliasoft 软件建立了固态功率源的可靠性框图, 分析结果显示: 满足一定的维修条件下, 当其他元件的平均故障间隔时间 (MTBF) 达到 171 702 h, 25/28 冗余设计可以满足 0.999 的可用性要求。

关键词: ADS; 加速器; 固态功率源; 可用性; 可靠性; 维修性

中图分类号: O572.21⁺1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.35.03.287

1 引言

加速器驱动次临界系统 (ADS, Accelerator Driven Sub-critical System) 被认为是一种清洁的可持续发展的能源系统之一; 不仅能够将高放射性乏燃料嬗变成短寿命核废料, 实现乏燃料的安全处理, 而且次临界反应堆可以在嬗变乏燃料的同时输出电能, 变废为宝^[1-3]。各发达国家均制定了 ADS 中长期发展路线图, 我国也提出了发展 ADS 路线图。第一阶段: 由中国科学院实施的战略先导专项-未来先进核裂变能^[4-5]; 代表成果之一 CADS-25 MeV 超导加速器。第二阶段: 加速器驱动嬗变研究装置 (CiADS, China initiative Accelerator Driven System) 将建于广东省惠州市, 预计 2022 年建成; 它由 2.5 MW 超导直线加速器、散裂靶、10 MW 的次临界反应堆、总控制系统和其他设施组成。第三阶段: 加速器驱动嬗变工业示范装置 (CDADS)。

目前国际上的很多加速器在设计阶段进行了可用性设计与分析, 如 IFMIF (国际聚变辐照装置) 加速器^[6]、LHC 机器保护系统^[7-10]、FCC 的机器保护系统^[11]和欧洲散裂中子源^[12]。

ADS 加速器面临的三大挑战: 高可用性要求、严格的失束次数要求和苛刻的束损要求。2010 年美国六大实验室出版的 ADS 白皮书对各阶段 ADS 加速器所需的技术做了一个评估, 可用性技术是最大的挑战^[1]。MYRRHA (欧洲 ADS 项目) 为了研究 ADS 加速器的可

用性, 对现有的美国散裂中子源超导直线加速器进行了可用性分析, 得到导致加速器停机时间最长的两个系统是电源系统和高频系统^[13], 与其运行经验符合^[14]。中国科学院近代物理研究所对 CADS-25 MeV 超导加速器做了稳定性研究, 高频系统和控制系统是可靠性最低的两大系统。目前要对整个 ADS 超导加速器进行可用性设计与分析是困难的, 而高频系统是最容易出现故障且导致停机时间长的系统, 所以选择高频系统进行可用性设计与分析; 功率源子系统相比于低电平子系统是大功率器件, 可靠性更低, 所以选择功率源进行可用性设计与分析; 固态功率源相比于速调管和四极管功率源, 具有高可靠性和易维修的特点^[15], 所以它将应用于 ADS 来提高加速器的可用性。因此将对固态功率源进行可用性设计与分析, 其意义在于为 ADS 加速器的可用性设计与分析做准备。本文将在可用性要求分配结果基础上, 对固态功率源进行可用性设计与分析。

2 可用性设计与分析方法

可用性是一个综合参数, 通过设计可靠性和维修性来提高可用性。

可靠性是指系统在一段时间内正常运行不出现故障的概率, 即 R_t 。定义 $f(t)$ 为故障密度函数, 则 R_t 可以表达为公式 (1)。不同设备的故障密度函数服从不同函数分布。常用的函数分布有指数分布、正态分布、对数

收稿日期: 2018-03-19; 修改日期: 2018-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (Y636030GJ0)

作者简介: 高鹏辉 (1991-), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生, 从事加速器物理研究; E-mail: gaoph2016@impcas.ac.cn

† 通信作者: 王志军, E-mail: wangzj@impcas.ac.cn.

正态分布及威布尔分布等。指数分布在可靠性工程领域应用十分广泛,常用于描述电子元件的失效分布,而固态功率源主要由电子元件组成,所以本文采用指数分布。指数分布的 R_t 可以表达为公式(2),式中 λ 为平均故障密度。指数分布中平均故障密度是一常数,且是平均故障间隔时间(MTBF)的倒数。

$$R_t = 1 - \int_0^t f(t)dt, \quad (1)$$

$$R_t = e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

可靠性设计方法可以分为元件级设计和系统级设计。元件级设计方法有简化设计和降额设计等;简化设计是指在设备设计过程中,在满足功能条件的情况下,尽量减少元件的数量、规格和品种,方便制造和维修;降额设计是指降低元件的工作应力,使其工作应力与额定应力之间存在一定的安全裕度,提高可靠性。系统级设计方法主要有冗余设计等;冗余设计是指采用多余的资源来实现较高的可靠性,具有一套以上能完成功能的系统或者子系统,只有所有系统发生故障时设备才会丧失功能。

可靠性分析方法包括定性FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)和定量可靠性框图及故障树。FMEA是指分析系统所有可能发生的故障模式以及产生的影响,并且对每个故障模式影响的严重程度进行归类,然后进行针对设计。可靠性框图可以简单地理解为系统元件的串并联关系。在串联关系中,系统的所有元件必须正常工作,整个系统才能正常工作,如果有任何一个元件故障,则系统故障;并联关系是指系统所有元件故障才会导致系统故障; k/N 关系是指总共有 N 个元件且至少需要 k 个元件正常运行,系统才能正常运行。故障树可以理解可靠性框图的逆命题,可靠性框图是从元件正常运行角度去考虑设备正常运行的概率,而故障树是从事件的故障考虑导致系统故障的概率。本文采用可靠性框图进行可靠性分析。

维修性是指在一段时间内能够修复故障的概率,即 M_t 。维修时间统计分布有很多种,正态分布是一种适用于简单的维修活动或基本维修作业的分布;ADS固态功率源设计将采用模块化和标准化设计,一个模块故障时可以用备用的模块替换,简单快速的维修故障,之后离线在实验室对故障模块进行维修;对于维修活动我们关心的是备用模块替换故障模块,正好符合正态分布,所以在本文中维修时间服从正态分布,如公式(3)所示,式中: $MTTR$ 为平均修复时间, d 为维修

时间标准差:

$$M_t = \int_0^t \frac{1}{d\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-(t-MTTR)^2}}{2d^2} dt. \quad (3)$$

维修性设计可以分为总体布局设计和现场可更换单元(LRU)设计等。总体布局设计是指在维修时考虑各系统的安装位置、接近途径、相关的功能与物理接口和管线布置等;现场可更换单元设计是指将元件模块化和标准化设计,方便维修更换。

维修性分析包括定性的维修性物理关系模型及FMEA和定量的维修性数学关系模型。维修性物理关系模型常见的有维修职能流程图和系统功能层次图。维修性数学关系模型是对维修参数(维修时间和维修工时等)进行建模,并定量计算。如前面所述,本文将采用维修时间服从正态分布的数学关系模型。

可用性是系统在一段时间内能够正常运行的概率,即 A_t 。可用性与不可用性 Q_t 可以用公式(4)表示,不可用性可以用公式(5)表示。在许多情况下,可用性也可以表达为实际运行时间(T)除以计划运行时间($T+T_d$, T_d 为停机时间),如公式(6):

$$A_t = 1 - Q_t, \quad (4)$$

$$Q_t = \frac{\lambda}{\lambda + \frac{1}{MTTR}} \left(1 - e^{-(\lambda + \frac{1}{MTTR})t} \right), \quad (5)$$

$$A_t = \frac{T}{T + T_d}. \quad (6)$$

Reliasoft软件是一款进行可用性、可靠性和维修性分析的综合软件,采用蒙特卡罗方法,支持建立FMEA、可靠性框图和故障树模型。Reliasoft软件可以支持用可靠性框图和故障树进行可用性和维修性分析,这也是其优点之一。本文将在Reliasoft软件中采用可靠性框图进行可用性、可靠性和维修性分析。软件中采取的模拟条件有:(1)仿真时间为8000 h(CiADS加速器每年计划运行时间);(2)每个点结果为10;(3)仿真次数为100000。

由于实际情况很复杂,在进行可靠性框图建模时,须要做出如下假设:

(1) 假设所有组成元件只有故障与正常工作两种状态,不存在第三种状态;

(2) 假设单元内的所有故障都导致单元功能故障;

(3) 假设功放小于额定功率工作时,平均故障间隔时间不变;

(4) 假设元件之间没有联系,一个元件故障不会造成其他元件故障。

3 固态功率源的可用性要求

ADS 白皮书对 ADS 研究装置的可用性要求大于 0.5, 对工业示范装置的可用性要求大于 0.7; 但本文对 CiADS 研究装置提出可用性要求为 0.8, 其依据是: (1) CADS-25 MeV 超导加速器在连续束的情况下其可用性为 0.57; (2) 未来几年技术的进步和 CADS-25 MeV 超导加速器建造经验会提高装置的可靠性; (3) 也兼顾考虑 CDADS 的可用性要求。

目前从技术难度上来说, 散裂靶和和次临界堆最大, 其次超导加速器, 再者总控制系统和其他设施。预估以后造成 CiADS 装置停机各系统占比为: 散裂靶 0.35, 次临界堆 0.3, 超导加速器 0.25, 总控制系统 0.05, 其他设施 0.05。假设 T 为 CiADS 装置运行时间, T_d 为总的停机时间, 由公式 (7) 可以得到 $T_d = 0.25 T$ 。而超导加速器造成装置停机的时间为 $0.25 T_d$, 超导加速器的可用性 A_a 可以用公式 (8) 计算, 为 0.941。同理可得其他系统的可用性要求, 如表 1 所列。

$$\frac{T}{T+T_d} = 0.8, \quad (7)$$

$$A_a = \frac{T}{T+0.25 T_d} \quad (8)$$

表 1 CiADS 可用性要求

系统	可用性要求
CiADS	0.8
超导加速器	0.941
散裂靶	0.92
次临界堆	0.93
总控制系统	0.988
其他设施	0.988

根据 SNS 加速器各系统造成停机时间占比, 如图 1 所示^[13]; 再者根据 CADS-25 MeV 加速器运行经验, 预估 CiADS 加速器各系统造成停机时间占比如表 2 所列, 以及 CiADS 加速器各系统可用性要求如表 3 所列。一般而言, 可用性要求分配到各系统不再往子系统分配, 需要对整个系统进行可用性设计, 以满足可用性要求; 但是目前对 CiADS 加速器整个高频系统进行可用性设计难度很大, 所以将可用性要求分配到固态功率源。根据 CiADS 加速器高频系统造成加速器停机占比为 0.28, 可以计算其可用性要求为 0.983。高频系统由低电平子系统和固态功率源子系统组成, 固态功率源子系统是大功率器件, 根据 CADS-25 MeV 超导加速运行经验, 固态功率源子系统造成高频系统停机的时间占比为 0.8, 低电平子系统占比 0.2, 则固态功率源子系统的

可用性要求为 0.988。CiADS 加速器有 4 种类型的固态功率源: 20, 40, 60, 80 kW; 其他 3 种都由 20 kW 的进行合成^[16], 总共有 224 台 20 kW 固态功率源, 这些固态功率源是串联关系, 只要一台故障则整个功率源子系统故障, 所以一台 20 kW 固态功率源的可用性要求为 0.999。

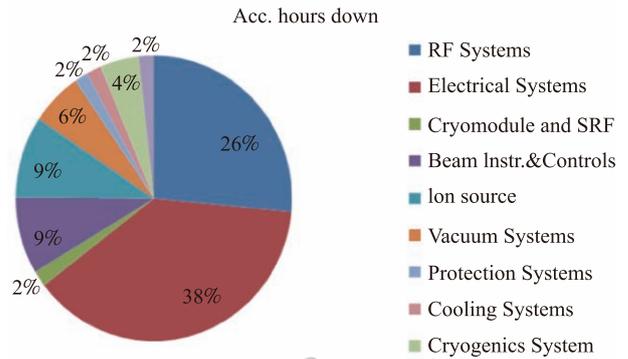


图 1 (在线彩图) SNS 加速器各系统造成停机时间占比

表 2 CiADS 加速器各系统造成停机时间占比

系统	停机时间占比
离子源	0.05
LEBT	0.01
RFQ	0.02
MEBT	0.01
超导加速段	0.12
HEBT	0.04
电源系统	0.30
高频系统	0.28
控制系统	0.02
束诊系统	0.05
低温系统	0.06
真空系统	0.04

表 3 CiADS 加速器各系统可用性要求

系统	可用性要求
离子源	0.997
LEBT	0.999
RFQ	0.999
MEBT	0.999
超导加速段	0.992
HEBT	0.997
电源系统	0.981
高频系统	0.983
控制系统	0.999
束诊系统	0.997
低温系统	0.995
真空系统	0.997

4 固态功率源可用性设计

4.1 固态功率源初步可用性设计

20 kW 固态功率源由高频放大链、控制系统和水冷系统组成，如图 2 所示。高频放大链由限幅器、衰减

器、射频开关、前级放大(一般由几十瓦的功放组成)、主放(一般由几百瓦的功放组成)、定向耦合器、合成器和分配器等组成。水冷系统包括水泵、流量计和水管等。控制系统由工控机和监测回路组成。

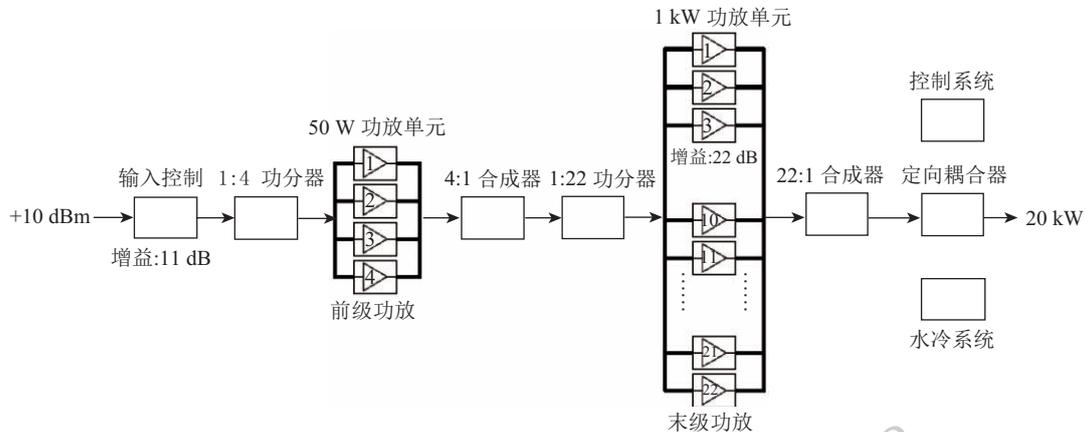


图 2 20 kW 固态功率源的组成

根据 CADS-25 MeV 加速器的运行经验，提出元件平均修复时间的要求，如表 4 所列。为了实现 CiADS 加速器 20 kW 固态功率源维修性要求，对其进行可更换单元设计和标准化设计。将限幅器、衰减器和射频开关做成一个可更换单元，即输入控制；其他的可更换单元有前级放大、定向耦合器、合成器和分配器；相同的可更换单元之间可以互换。主放采用标准化的 1 kW 功放，所有的 1 kW 功放可以互换，能够进行热插拔操作。一个元件故障时可以用备用元件替换，简单快速的维修故障，之后离线在实验室对故障元件进行维修。

kW，需要 22 个 1 kW 功放。将水冷系统和控制系统作为一个模块考虑，里面的元器件采用统一的标准。将可更换单元和模块看成一个元件，任何一个元件故障将导致功率源无法输出 20 kW 功率，所以元件之间是串联关系，其可靠性框图如图 3 所示。

表 4 维修性数据要求

元件	平均修复时间/h	分布
输入控制	2	正态分布
1:4功分器	2	正态分布
前级放大	2	正态分布
4:1合成器	2	正态分布
1:22功分器	2	正态分布
1 kW功放	2	正态分布
22:1合成器	2	正态分布
定向耦合器	2	正态分布
水冷系统	3	正态分布
控制系统	4	正态分布

文中的合成器和分配器的功耗为 0.4 dB，这个值是偏安全的。为了保证固态功率源输出功率 P_o 为 20 kW，根据公式 (9) 可以计算主放输出功率 P_m 至少为 21.93

$$10 \lg \left(\frac{P_m}{P_o} \right) = 0.4, \quad (9)$$

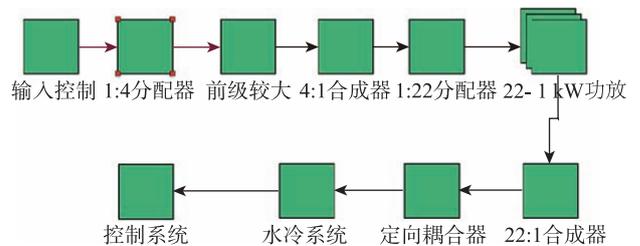


图 3 (在线彩图) 20 kW 固态功率源可靠性框图

一般来说，大功率器件的 MTBF 要短于小功率器件，1 kW 功放相比于其他元件故障率更高；因此相比于其他元件，由 1 kW 功放组成的主放 MTBF 最短。1 kW 功放的 MTBF 为 1×10^5 h^[17]，假设其他元件的 MTBF 为无穷大，采用表 4 的维修数据进行模拟计算，可得 20 kW 固态功率源的可用性为 0.995，可靠性为 0.172，MTBF 为 4537 h，如图 4 所示，无法满足 0.999 的可用性要求。由于主放的可靠性太低了，不管其他元件的可靠性多大，都无法实现可用性要求，所以需要 对 固 态 功 率 源 的 主 放 进 行 冗 余 设 计 以 提 高 可 靠 性。

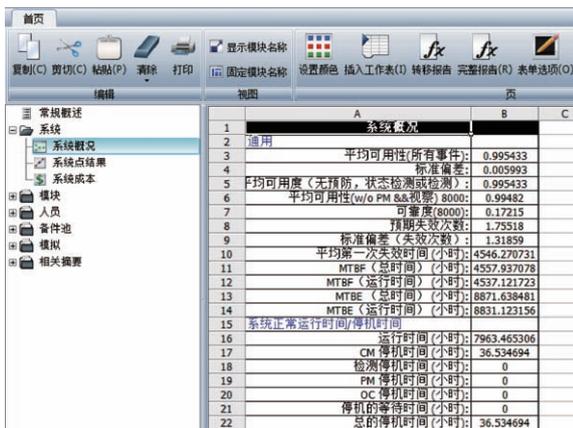


图 4 (在线彩图) 初步可用性设计结果

4.2 固态功率源冗余设计

为了考虑的方便, 引入等效合成器和等效分配器的概念, 因为合成方式和分配方式对可用性分析没有影响。定义 N 为主放的 1 kW 功放的总数量, n 为 1 kW 功放故障的最大数量, 令 k 等于 $(N-n)$, P_k 代表 k 个功放输出功率。根据公式(10)、(11)可以计算各种情况下的冗余设计。假设主放有 23 个 1 kW 功放, 其中一个功放故障, 则 $P_k = 20 \times (23/22)^2 = 21.86$ kW, $P_m = 10^{0.04} P_k = 23.97$ kW, 主放要求输出的功率要大于 23 kW, 所以无法冗余。假设主放有 24 个 1 kW 功放, 其中一个功放故障, $P_k = 20 \times (24/23)^2 = 21.78$ kW, $P_m = 10^{0.04} P_k = 23.88$ kW, 所以最多允许一个功放故障。同理可得其他冗余设计方式, 主放的冗余设计如表 5 所列。25/28 是指: 主放总共有 28 个 1 kW 功放, 最多容许 3 个功放故障, 超过 3 个将无法输出 20 kW 的功率; 也就是说, 在考虑插入损耗和幅相不一致性损耗的情况下, 至少需要 25 个功放工作才能输出 20 kW 的功率。

$$P_k = P_o \times [N \div (N - n)]^2, \quad (10)$$

$$10 \lg(P_m \div P_k) = 0.4. \quad (11)$$

对于 23/24 和 24/25 的冗余设计, 都允许一个功放故障, 考虑到 24/25 冗余设计要比 23/24 冗余设计造价更高, 所以舍弃 24/25 冗余设计; 同理舍弃 23/23, 25/27, 26/29 和 27/31 冗余设计。

表 5 各种冗余设计

N	n	冗余设计
22	0	22/22
23	0	23/23
24	1	23/24
25	1	24/25
26	2	24/26
27	2	25/27
28	3	25/28
29	3	26/29
30	4	26/30
31	4	27/31
32	5	27/32
33	6	27/33

一般来说, 冗余越多可靠性越高, 但是冗余越多功率源建造成本会越高, 所以需要找到满足可用性要求的最低冗余设计, 以减少建造成本。首先, 对主放建立了可靠性框图模型, 对各种冗余设计的主放 MTBF 进行了计算, 如表 6 所列。

表 6 各种冗余设计的主放 MTBF

冗余设计	MTBF/h
23/24	14 924
24/26	49 268
25/28	171 702
26/30	700 985
27/32	3 052 783
27/33	21 052 180

除了 1 kW 功放是 k/N 关系, 其他元件都是串联关系, 因此可以建立各种冗余设计的可靠性框图, 如图 5 所示。

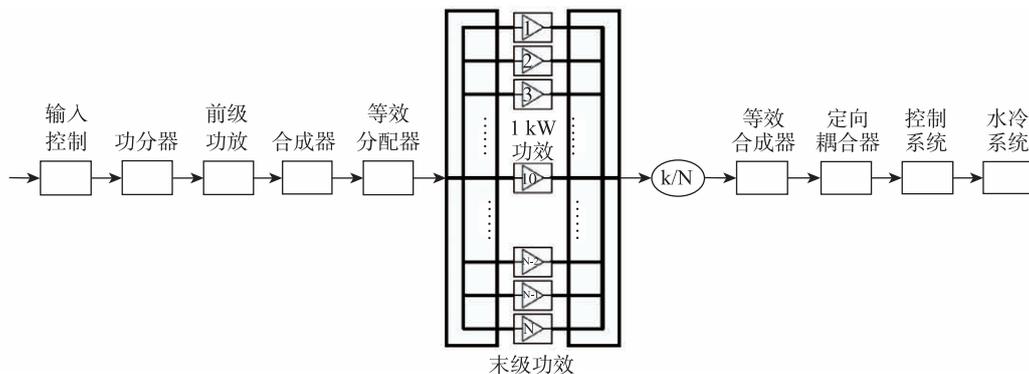


图 5 20 kW 固态功率源各种冗余设计的可靠性框图

建立可靠性框图之后, 采用表 4 的数据以及 1 kW 功放的 MTBF, 对各种冗余设计的固态功率源可用性做了模拟计算, 结果显示: 对于 23/24 和 24/26 的冗余设计, 无论其他元件的 MTBF 多大, 都无法实现 0.999 的可用性要求; 对于 25/28, 26/30, 27/32 和 28/33 冗余设计, 当其他元件的 MTBF 达到 171 702 h, 可以满足 0.999 的可用性要求。但是从经济性考虑, 26/30, 27/32 和 28/33 冗余设计造价更高, 所以舍弃这几种冗余设计。

5 结论

20 kW 固态功率源的初步可用性设计无法满足 CiADS 加速器的可用性要求; 对于 23/24 和 24/26 的冗余设计, 无论其他元件的 MTBF 多大, 都无法实现 0.999 的可用性要求。对于 25/28 冗余设计, 当其他元件的 MTBF 达到 171 702 h, 可以满足 0.999 的可用性要求。

致谢 作者在此特别感谢中国科学院近代物理研究所直线加速器室全体同事给与的帮助, 也非常感谢北京北广科技股份有限公司熊艺等给与的建议以及帮助。本工作得到了国家自然科学基金委的资助。

参考文献:

- [1] AIT ABDERRAHIMH H, GALAMBOSD J, GOHAR Y, *et al.* Accelerator and Target Technology for Accelerator Driven Transmutation and Energy Production[R]. United States Department of Energy, 2010.
- [2] CARMINATI F, KLAPISCH R, REVOL I P, *et al.* An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear Energy Production Driven by a Particle Beam Accelerator[R]. Switzerland: CERN, 1993.
- [3] BOWMAN C D. Annu Rev Nucl Part Sci, 1998, **48**: 505.
- [4] ZHAN Wenlong, XU Hushan, Bull Chin Acad Sci, 2012, **27**(3): 375. (in Chinese)
(詹文龙, 徐珊珊. 中国科学院院刊, 2012, **27**(3): 375.)
- [5] WANG Zhijun, HE Yuan, LIU Yong, *et al.* Chin Phys C, 2012, **36**: 256.
- [6] BARGALLO E. IFMIF Accelerator Facility RAMI Analyses Engineering Design Phase[D]. Spain: Polytechnic University of Catalonia, 2014.
- [7] FILIPPINI R, DELMING B, GUAGLIO G, *et al.* Reliability Assessment of the LHC Machine Protection System[R]. Switzerland: CERN, Proceedings of PAC05, 2005.
- [8] JAKUB JANCZYK, ISABELLE LAUGIER, SERGIO PASINELLI, *et al.* Fault Tracking at the LHC[R]. Switzerland: CERN, EuCARD, 2015.
- [9] SCHMIDT R. Machine Protection and Interlock Systems for LHC [R]. Switzerland: CERN, EuCARD, 2015.
- [10] SCHMIDT R. Reliability and Availability of Machine Protection Systems[R]. Switzerland: CERN, U.S. Particle Accelerator School, 2017.
- [11] GUTLEBER J. FCC Reliability, Availability, Maintainability, Supportability Study[R]. Switzerland: CERN, EuroCirCol, 2017.
- [12] BARGALLO E. Reliability and Availability at ESS[R]. ESS, 4th International Workshop on ADSR systems and Thorium, 2017.
- [13] JEAN-LUC BIARROTTE. Reliability challenges for SC linacs as ADS drivers[R]. Switzerland: CERN, 2015.
- [14] PITIGOI A E, FERNANDEZ R P. Reliability Modeling of an ADS Accelerator[R]. Switzerland: CERN, 2015.
- [15] MARCHAND P, RUAN T, RIBEIRO F, *et al.* Phys Rev Accel Beams, 2007, **10**: 112001.
- [16] XU Hushan, HE Yuan, PAN Weimin, *et al.* Design Report of China Initiative Accelerator Driven System [R]. Beijing: Chinese Academy of Sciences. (in Chinese)
(徐珊珊, 何源, 潘卫民, 等. 加速器驱动嬗变研究装置可行性研究报告[R]. 北京: 中国科学院, 2017.)
- [17] BARGALLO E, GIRALT A, MARTINEZ G, *et al.* Fusion Engineering and Design 2013, **88**: 2732.

Availability Designs and Analyses of Solid-state Amplifiers for CiADS

GAO Penghui^{1,2}, WANG Zhijun^{1,†}, SUN Liepeng¹, JIA Yongzhi^{1,2}, QIN Yuanshuai^{1,2}, HE Yuan¹, HUANG Guirong¹

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: One of the challenging technologies of ADS is the high availability requirement. The availability design of the solid-state amplifier is the preparation for ADS. Firstly the availability requirement of CiADS is proposed as 0.8. The distribution result of the solid-state amplifier is 0.999 according to this requirement. Then the availability result shows the preliminary design of solid-state amplifiers can not reach the availability requirement. At last the power loss is considered to build the k/N redundancy model of the main amplifier and the mean time between failure (MTBF) is calculated for various redundancy models. The reliability block diagram of the solid-state amplifier is set up by Reliasoft and the simulation results show that the 25/28 redundancy model can meet the requirement 0.999 when MTBF of other components reaches 171 702 hours with the certain maintenance.

Key words: ADS; accelerator; solid state amplifiers; availability; reliability; maintainability

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 19 Mar. 2018; **Revised date:** 12 Apr. 2018

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(Y636030GJ0)

† **Corresponding author:** WAGN Zhijun, E-mail: wangzj@impcas.ac.cn.