

徐鸣一,李峰,夏元彩,等,2017.新一代天气雷达 2009—2014 年运行状态分析[J].气象,43(3):365-372.

新一代天气雷达 2009—2014 年运行状态分析^{*1}

徐鸣一^{1,2} 李 峰² 夏元彩² 李 雁² 曹婷婷² 秦世广²

1 南京信息工程大学,南京 210044

2 中国气象局气象探测中心,北京 100081

提 要: 综合气象观测系统运行监控平台(ASOM)是地面观测设备实时运行状态及探测数据的监控保障系统,文章基于 ASOM 中 2009 年 12 月 1 日至 2014 年 11 月 30 日的维护维修数据对新一代天气雷达运行指标进行评估,统计其业务可用性(A_o)、平均无故障工作时间($MTBF$)、平均故障持续时间(T_{fd})、故障次数(N_f)和故障分布情况,2014 年, A_o 和 $MTBF$ 分别提高到 99.06% 和 1465.08 h, T_{fd} 和 N_f 分别降低至 13.15 h 和 4.68 次。此外文章对故障案例中的备件更换情况按照雷达分系统和不同型号进行统计分类,建立针对性的备件供应管理,以提高新一代天气雷达的维修能力,提升综合观测系统装备供应管理效能。

关键词: 新一代天气雷达,运行评估,备件

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.03.013

Analysis of CINRAD Radar Operation Status During 2009—2014

XU Mingyi^{1,2} LI Feng² XIA Yuancai² LI Yan² CAO Tingting² QIN Shiguang²

1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Meteorological Observation Centre, CMA, Beijing 100081

Abstract: Atmospheric observing system operations and monitoring (ASOM) is a real-time monitoring system of observation equipment's running status and observation data. In this article, four operating indexes including availability of operation (A_o), mean time between failures ($MTBF$), failure duration (T_{fd}), number of failures (N_f) are evaluated on the basis of maintenance data of ASOM from 1 December 2009 to 30 November 2014. For the 2014 indexes, A_o and $MTBF$ increase to 99.06% and 1465.08 h respectively while T_{fd} and N_f reduce to 13.15 h and 4.68 times. In addition, the failure distribution and replacement of radar spare parts in these fault cases and their trends are quantified and evaluated for different radar sub-systems and different types of radar. The results, to some extent, make efforts to set up pertinent spare parts supply management, improve maintenance support capability of CINRAD, and, eventually, promote efficiency of China's meteorological observation equipment management.

Key words: CINRAD, operational evaluation, radar spare parts

引 言

随着我国气象现代化事业的不断深化改革,为

实现综合气象观测系统稳定运行、有力保障,中国气象局气象探测中心承担了综合气象观测运行监控系统的设计和建设(梁海河等,2011;裴翀等,2011b)。于 2010 年建设完成的“综合气象观测系统运行监控

* 山洪地质灾害防治气象保障工程项目和中国气象局气象关键技术项目(CMAGJ2014M71)共同资助

2016 年 1 月 27 日收稿; 2016 年 10 月 13 日收修定稿

第一作者:徐鸣一,从事气象探测设备运行保障方面研究. Email: sweetydaisy@163.com

通信作者:李峰,主要从事灾害性天气机理探测技术及试验方法研究. Email: liflif04@cma.gov.cn

平台”(ASOM),是气象观测装备保障业务的重要组成部分,目前已经或正在实现对新一代天气雷达(注:本文中所提及的新一代天气雷达特指正式投入业务运行的雷达)、探空系统、国家级和区域级自动气象站、测风塔、雷电、GNSS/MET、风廓线雷达、土壤水分观测设备、大气成分观测等十类观测系统的运行状态监控、数据质量监控、站网信息管理、维护维修信息管理以及业务运行评估,并向各级业务管理部门提供远程技术支持、信息服务等(李峰等,2014),其在全国范围内的业务推广应用,也促进了国家级、省级、地市级和台站级四级运行监控业务体系的建设和发展。

中国气象局早在1996年便组织开展新一代天气雷达(以下简称雷达)的建设总体规划、设计和布局,截至2014年底共有171部雷达正式投入业务运行,已经初步形成覆盖全国、设计科学、布局合理且运行稳定的新一代天气雷达观测网(柴秀梅等,2011a),并广泛应用于台风监测(白玉洁等,2012)、组网拼图的定量降水估测(勾亚彬等,2014)、雷暴与强对流临近天气预报(俞小鼎等,2012)等气象防灾减灾服务中。目前全国范围内正式业务运行的新一

代天气雷达分属不同厂家,型号和技术特点各不相同,有必要运用统一的评估指标对其运行情况进行分析(裴翀等,2011a)。本文基于ASOM中2009年12月1日至2014年11月30日的维护维修数据(邵楠等,2012)对正式业务运行的新一代天气雷达运行指标进行评估,统计其业务可用性(A_o)、平均无故障工作时间($MTBF$)、平均故障持续时间(T_{fd})、故障次数(N_f)和故障分布情况,并对故障案例中的备件更换情况按照雷达分系统和不同型号进行统计分类,便于建立针对性的备件供应管理,以提高新一代天气雷达的维修能力,提升综合观测系统装备供应管理效能。

1 天气雷达运行能力评估指标

ASOM的运行能力评估指标体系是在装备技术保障工程理论的基础上制定的,分别为可靠性、维修性、保障性、业务性和经济性五大类别,同时考虑新一代天气雷达的业务运行规定和数据传输特点,设计了指标(表1;孟昭林等,2011):

表1 天气雷达运行能力评估指标

Table 1 Operating evaluation indexes of CINRAD radar in China

定义	指标	含义
A_o	$A_o = \frac{T_{on} + T_{pm} + T_s}{T_t} \times 100\%$	指在选取的评估时段内,雷达无故障工作时间与规定工作时间的百分比,是衡量天气雷达运行能力的综合指标
$MTBF$	$MTBF = \frac{\sum_{n=1}^{N_f} T_{on}(n)}{N_f + 1}$	指在选取的评估时段内,相邻两次故障之间的平均工作时间,单位为h,是衡量天气雷达可靠性的综合指标
T_{fd}	$T_{fd} = \frac{\sum_{n=1}^{N_f} [T_{cm}(n) + T_{fd}(n) + T_{ad}(n)]}{N_f}$	指在选取的评估时段内,从故障发生到修复所用的平均时间,是衡量天气雷达维修能力的综合指标

注: T_t 为规定的工作时间; T_{on} 为表示系统正常和报警两种状态下的时间总和; T_{pm} 为表示维护的总时间(周维护、月维护、年维护、大修、巡检等); T_s 为系统正常,观测时段内的特殊情况停机时间; $T_{cm}(n)$ 为第 n 次故障和第 $n+1$ 次故障之间的工作时间; N_f 为故障次数; $T_{cm}(n)$ 为第 n 次故障的故障维修时间; $T_{fd}(n)$ 为第 n 次故障台站维修缺乏备件,等备件时间; $T_{ad}(n)$ 为第 n 次故障由于管理原因延误的时间。

2 天气雷达运行能力结果分析

2010—2014年全国正式业务运行的新一代天气雷达型号及数量分布如表2所示,通过ASOM中2009年12月1日至2014年11月30日的维护维修数据对新一代天气雷达运行指标进行逐年评估,统计其 A_o 、 $MTBF$ 、 T_{fd} 、 N_f 和故障分布情况。

2.1 逐年评估结果及分析

图1为2010—2014年全国新一代天气雷达

A_o 、 $MTBF$ 、 T_{fd} 和 N_f 年度对比结果。

2010—2014年的全国新一代天气雷达的平均 A_o 为 98.39% (图1a),并呈现逐年递增趋势,2014年为 99.06%,较2010年提高了 1.63%,说明我国新一代天气雷达总体运行效能维持在较高水平。

2010—2014年的全国新一代天气雷达的平均 $MTBF$ 为 1465.08 h (图1b),从年度对比来看,新一代天气雷达 $MTBF$ 略有波动,总体呈现递增趋势,2010年 $MTBF$ 为 1332.28 h,至2014年,该指标达到 1768.79 h,雷达运行可靠性得到大幅提升。

2010—2014年的全国新一代天气雷达的 T_{fd} 为

13.15 h(图 1c),平均 N_f 为 4.68 次(图 1d), T_{fd} 和平均 N_f 年度对比结果略有波动,总体呈现递减趋势, T_{fd} 从 2010 年的 22.40 h 缩短至 2013 年的 8.09 h,2014 年略有延长为 10.32 h,主要原因是万州雷达故障关机 5 次,故障持续时间高达 376 h,恩施雷达

故障关机 3 次,故障持续时间为 255.16 h。平均 N_f 从 2010 年的 5.28 次下降到 2014 年的 3.36 次,说明我国雷达的维护维修能力逐年增强,雷达的故障持续时间和故障次数大幅降低。

表 2 2010—2014 年全国业务运行新一代天气雷达型号及数量分布
Table 2 Types and quantity distribution of CINRAD radar in China from 2010 to 2014

厂家	型号	2010 年 (130 部)	2011 年 (137 部)	2012 (143 部)	2013 (159 部)	2014 (171 部)
北京敏视雷达有限公司	SA	42	45	49	56	60
	SB	16	17	19	20	20
	CB	12	12	12	12	13
安徽四创电子股份有限公司	CC	28	29	29	34	37
	SC	12	12	12	14	15
成都锦江电子系统工程有限公司	CD	20	22	22	23	26

2.2 分型号评估结果及分析

根据综合气象观测系统运行监控平台 2009 年 12 月至 2014 年 11 月的数据分析来看,不同型号全国新一代天气雷达 A_o 、 $MTBF$ 、 T_{fd} 和 N_f (图 2)。

由图 2a 可以看出,CC 型号雷达的 A_o 较高为 98.86%,CD 型号雷达的 A_o 相比其他型号偏低为 97.39%。同时 CD 型号的 $MTBF$ 也较低(图 2b),为 899.55 h,究其原因,图 2c 和 2d 中 CD 型号雷达较长的 T_{fd} (14.67 h)和较多的 N_f (5.76 次)可以解释这一差异。经过综合分析的结果来看,2009 年 12 月至 2014 年 11 月这一时间段内,CB、CC 两个型号

的雷达运行能力较好。

2.3 各型号雷达故障分布情况

从统计情况来看(图 3),发射系统和伺服系统在各型号雷达中故障率较高:SA、SB、SC、CB、CC、CD 各型号雷达的发射系统故障率分别为 29%、26%、27%、32%、34%和 16%,其中 CC 型号雷达最高而 CD 型号雷达最低;伺服系统故障率相应分别为 27%、30%、23%、25%、17%和 14%,其中 SB 型号雷达最高而 CD 型号雷达最低。此外,SA 型号雷达的天线馈线系统故障率较高达 20%。

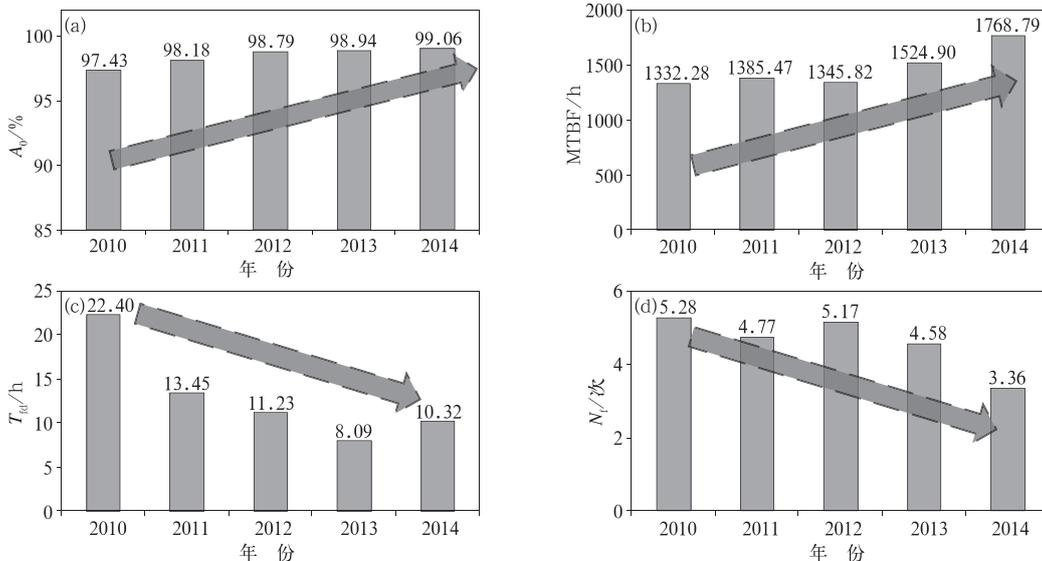


图 1 2010—2014 年全国天气雷达 A_o (a)、 $MTBF$ (b)、 T_{fd} (c)和 N_f (d)年度对比
Fig. 1 Annual comparison of A_o (a), $MTBF$ (b), T_{fd} (c) and N_f (d) from 2010 to 2014

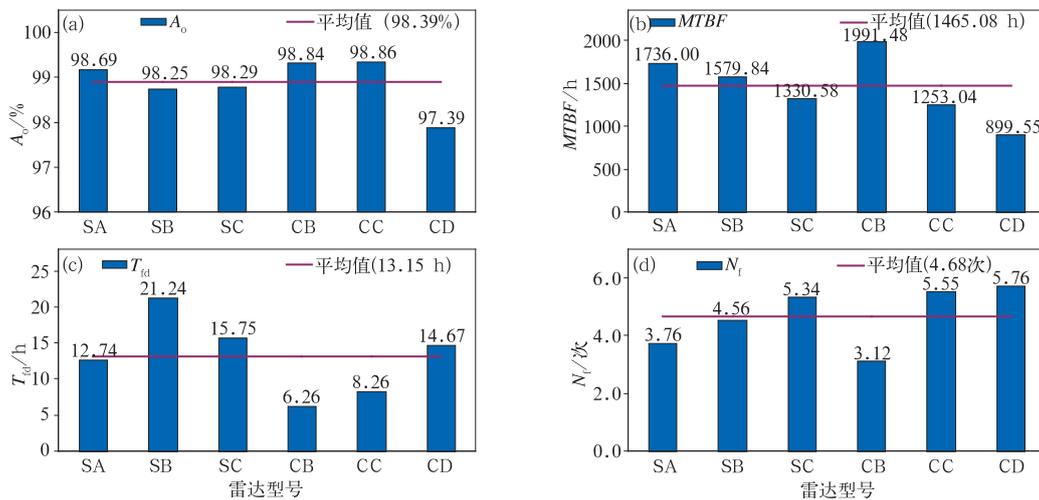


图 2 2010—2014 年全国各型号天气雷达 A_o (a)、 $MTBF$ (b)、 T_{fd} (c) 和 N_f (d) 年度对比
 Fig. 2 Annual comparison of A_o (a), $MTBF$ (b), T_{fd} (c) and N_f (d) of each type of radar

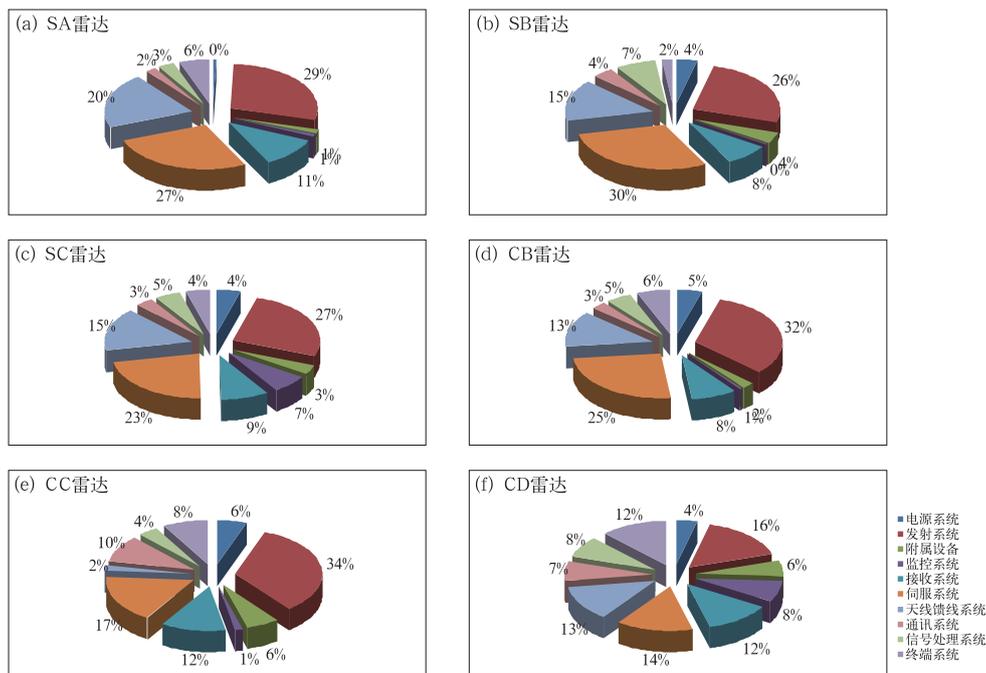


图 3 2009 年 12 月至 2014 年 11 月各型号雷达故障分布情况
 Fig. 3 Failure distribution of each type of radar from December 2009 to November 2014

3 天气雷达备件更换情况统计

雷达硬件故障直接影响气象回波数据的质量, 直接影响预报员对天气系统的分析和判断(赵瑞金等, 2015)。选取 ASOM 中 2009 年 12 月 1 日至 2014 年 11 月 30 日全国新一代天气雷达在规定业

务运行开机时间内发生的 3490 个故障案例, 剔除了重复报的故障单、维护或特殊情况停机时而填报的故障单, 并对备件归属哪个分系统的错误情况进行了纠正。经过筛选, 共得到 2629 个故障案例。对各个故障中备件更换情况按不同分系统进行分类, 得到不同型号、不同分系统的备件更换情况统计。

3.1 发射系统备件更换统计

发射系统共出现 705 次故障, 占有所有故障的 26.82%, 是出现故障最多的分系统。各型号雷达发射系统更换统计如表 3 所示, 主要常更换的备件有风机、调制器、灯丝电源、开关组件、触发器、可控硅、磁场电源和钛泵电源(柴秀梅等, 2011b)等。

风机是发射系统中更换次数最多的备件, 主要由于风机是全天候运转, 容易发生老化磨损, 因而出现风流量报警。IGBT 模块在各型号雷达中更换频率也较高, 一直工作于高压过流状态下, 发热剧烈, 损耗较大, 导致击穿损坏。开关组件在 SA 型号雷达中更换了 19 次, 运行时间过长、发射机过压都有可能引起开关组件出现故障。而可控硅在 CC 型号雷达中更换了 14 次, 当电压不稳或者出现过压时, 可控硅有可能被击穿, 这时便需要进行更换。

在日常维护中应注意对易损备件进行参数检查, 对性能下降的备件及时更换, 以减少雷达发射机的故障次数, 提高业务可用性。

表 3 各型号雷达发射系统备件更换统计

Table 3 Spare parts replacement for each type of radar transmission system

发射系统	SA	SB	SC	CB	CC	CD
测量接口板	3	1			2	
整流组件	2	2	1		2	5
主控制板组合	2	1	1		1	3
固态放大器	6	3			1	
开关组件	19	5	2			1
触发器	7	2	3	2		2
调制器	14	7	5		4	3
人工线	8	2	6	1	7	2
反峰二极管	2	3	1	2		1
可控硅	9	2		4	14	5
速调管	1	1	3	4	4	3
风机	23	5	6	3	14	4
聚焦线圈	3	1				
保险丝	4	6	2			8
灯丝电源	12	11		9	3	
磁场电源	12	6	7		6	
IGBT 模块	4	5	13		2	18
-15 V 电源	1	1		1		
+5 V 电源	3	1		2	1	
钛泵电源	3	2	1	1	2	9
继电器		1		2	4	3
高压开关	8	4				

3.2 接收系统备件更换统计

接收系统故障共 276 次, 占有所有故障的 10.50%。

接收系统常见的故障主要表现为产品回波的异常(柴秀梅等, 2011c; 赵瑞金等, 2013), 扫描没有回波时, 可能是频率源损坏或者是频综中的滤波器无输出, 需检查和测试接收机通道和频综输出信号; 回波出现大量噪点时可能是 IQ 相位检波器出现故障; 回波为圆饼图时一般是信号处理器故障所致, 回波强度偏弱或偏强时, 需调整线性通道增益常数和接收机接口板线缆的衰减。

对应上面的故障情况, 接收系统在备件更换方面主要是频率源综合器、混频/前置中放和 IF 放大/限幅器(表 4), 根据报警信息和回波情况, 通过通道测试法, 完成故障的定位并进行备件的更换。

表 4 各型号雷达接收系统备件更换统计

Table 4 Spare parts replacement for each type of radar receiving system

接收系统	SA	SB	SC	CB	CC	CD
频率源综合器	14	2	5		6	7
锁相环						2
晶体振荡器						2
频标综合						2
VCO 变频综合						4
倍频组件		4				
混频/前置中放	6		2	3		
IF 放大/限幅器	8	6		3		
IQ 相位检波		2				
场放			2			5
微波延迟线	2					
4 位二极管开关	1					
RF 噪声源	2					
接收机接口板	2	2				
接收机电源	2		1	2	1	2

3.3 天线馈线系统备件更换统计

天线馈线系统故障共 331 次, 占有所有故障的 12.59%。天线馈线系统中更换频次较高的备件有波导、波导开关、轴角盒、汇流环及碳刷等(表 5)。汇流环更换最多, 涉及各个型号的雷达, 其中 SB 和 CD 型号雷达频次最多。汇流环易受磨损, 长时间工作的话, 其碳刷也很容易损坏。如果长期工作在冬季温度过低, 或者山顶等湿度大的环境下, 短暂关机后碳刷极易结雾, 会导致误差电压大幅波动, 天线转速极慢, 造成各类故障, 甚至造成高压器件被击穿。因而对汇流环要定期地进行维护、清洗, 保持良好的工作环境。

表 5 各型号雷达天线馈线系统备件更换统计
Table 5 Spare parts replacement for each type of radar antenna and feed system

天线馈线系统	SA	SB	SC	CB	CC	CD
波导	10	1				1
波导开关	9	5		1		
空气干燥机	5	2				1
轴角盒	12					
轴角编码器	4					
汇流环	11	25	2	7	8	26
碳刷		6	3	3	5	7
接收机保护器	4					
接收机保护器 驱动模块	3					2
旋转关节	9					1
FA-32 O 型 硅胶密封圈			1			
TR 管				2	3	8

3.4 伺服系统备件更换统计

伺服系统故障共 568 次, 占有所有故障的 21.61%, 仅次于发射系统故障次数。各型号雷达伺服系统备件更换统计如表 6 所示, 俯仰电机和方位电机更换频次最高, 尤其是 SA (14 和 34 次) 和 CD

表 6 各型号雷达伺服系统备件更换统计
Table 6 Spare parts replacement for each type of radar servo system

伺服系统	SA	SB	SC	CB	CC	CD
俯仰同步箱	1					1
轴承	2	2	1		1	3
天线主轴						2
齿轮				1		1
俯仰电机	14	3	8		6	17
俯仰限位	11					
俯仰减速箱		1	3			
方位同步箱	7	2		1		
方位减速箱	15	2				
方位电机	34	8	17		5	22
油阀			5			
旋转变压器	9	1			3	
数字控制单元	9	3		1		3
PIN 控制板					9	
数字板	5					
模拟板	6					
电源模块	4	1		2		
功率放大单元	3		8		3	6
固态继电器	1		2		1	2
风扇	2				4	
伺服控制器		5	3		4	3
伺服电源变压器	2		6		16	9
R/D 变换						10

(17 和 22 次) 型号雷达, 这是由于电机设备在连续工作状态下, 性能下降, 另外长期工作的碳刷上的碳粉积聚, 引起短路, 很容易烧坏电机 (李明元等, 2012)。SA 型号雷达中的方位减速箱更换频次也较高, 达到 15 次, 主要是漏油造成的故障。对伺服电机和减速箱这两种备件需加强观察和维护, 定期进行清洗, 在良好的工作环境里工作 (蔡勤等, 2011; 郑洪等, 2011)。

3.5 信号处理系统备件更换统计

信号处理系统故障共 128 次, 占有所有故障的 4.87%, 更换备件情况如表 7 所示。SA、SB 型号雷达主要更换了硬件信号处理器 HSP(A、B) 和可编程信号处理器 PSP 两种备件, 主要故障现象为雷达天线不运转、报警、无法停靠在指定位置、输入/输出状态错、天线座初始化错误等。SC、CD 雷达更换的备件主要为数字信号处理 RPV8, RVP8 在连续运行一段时间后会出假死或者死机现象, 一般重新启动 RVP8, 故障应该排除, 若重启故障仍然存在, 那就需考虑更换备件。

3.6 通讯系统备件更换统计

通讯系统故障共 139 次, 占有所有故障的 5.29%, 主要更换的备件为光端机和上光纤线路板 (表 8), 这些备件的故障会导致通讯中断, 雷达数据无法上传, 建议对这些备件增加适当的备份, 以提高雷达数据的及时率和到报率。

表 7 各型号雷达信号处理系统备件更换统计
Table 7 Spare parts replacement for each type of radar signal processing system

信号处理系统	SA	SB	SC	CB	CC	CD
数据格式转换板	1	1				
硬件信号处理器 HSP(A)	5	5		2		2
硬件信号处理器 HSP(B)	5	4				
可编程信号处 理器 PSP	4	3				
MDSP 板						4
时序板						5
数字信号处理 RPV8			6			5
RVP7 数字中频 接收模块 (IFD)			2			3

表8 各型号雷达通讯系统备件更换统计
Table 8 Spare parts replacement for each type of radar communication system

通讯系统	SA	SB	SC	CB	CC	CD
上光端机	8				5	
下光端机	3					
复分接					5	
上光纤线路板	11					
上光端机电源	5				2	

3.7 监控系统备件更换统计

监控系统故障共77次,占有故障的2.93%,各型号雷达备件更换情况如表9所示,SA、SB雷达中更换较多的是DAU数字组合,分别达到6和8次,DAU数字板和模拟板分别也更换较多。CD雷达中更换较多的是直流监控电源,达到5次。另外CC雷达中监控主板更换次数较多,达到8次,故障主要表现为速度图像和谱宽图像失真、不能控制各分系统,更换监控主板后故障得以排除。

表9 各型号雷达监控系统备件更换统计
Table 9 Spare parts replacement for each type of radar monitoring system

监控系统	SA	SB	SC	CB	CC	CD
RDASC计算机	4	1		1	2	3
HSP-PSP接口 转换板	1	2				
DAU组合	6	8		1		
DAU数字板	5	4				
DAU模拟板	6	1				
下光纤线路板	5					
直流监控电源	1	4	1	1	1	5
监控主板						8

表10 各型号雷达附属设备、电源系统备件更换统计
Table 10 Spare parts replacement for each type of radar auxiliary equipment and power system

附属设备、 电源系统	SA	SB	SC	CB	CC	CD
配电机柜	2	2			1	1
空气开关						
电源保险		1		1	2	1
避雷器	1				1	
电缆	2	1			3	
UPS电池组	2	1	1		6	2
发电机		1				1
16 Mhz 电缆插头			1		3	

3.8 附属设备及电源系统备件更换统计

附属设备、电源系统故障共193次,占有故障

的7.34%,主要更换的备件有空气开关、电源保险、避雷器、电缆、UPS电池组和发电机等,在雷达定期维护中应对发电机、UPS、电缆等设备进行清理和性能参数检查,杜绝故障隐患。

4 结论与讨论

4.1 结论

通过对ASOM中2009—2014年的维护维修数据对新一代天气雷达运行指标进行评估,并对故障案例中的备件更换情况按照雷达分系统和不同型号进行统计分析,结论如下:

(1) 从逐年综合气象观测运行监控平台评估结果对比来看,2010—2014年 A_0 和MTBF逐年上升, T_{fd} 和 N_f 逐年递减,说明新一代天气雷达运行效能维持在较高水平,雷达运行可靠性逐年提高,我国雷达的维护维修能力在不断加强,保障更加及时有力。

(2) 从各型号天气雷达的综合气象观测运行监控平台评估结果来看,业务可用性最高的是CC型雷达,可靠性最好的是CB型雷达。经过综合分析的结果来看,2009年12月至2014年11月这一时间段内,CB、CC两个型号的雷达运行能力较好。

(3) 从故障分布情况和备件更换情况来看,故障主要集中在发射系统和伺服系统,对于长期处于高压过流工作状态下、更换频次较高的风机、调制器、灯丝电源、磁场电源等建议增加各级备件供应。另外对于电机和汇流环等磨损备件,应进行定期维护、清洗,并保持工作环境良好,进而减少故障发生比率。

4.2 存在不足

(1) 由于综合气象观测系统运行监控平台(ASOM)2009年完成开发,于2010年11月正式开展综合气象观测系统运行监控业务,截至2015年12月为止台站的维护维修信息填报还存在不够规范的现象,鉴于评估的数据主要来自台站填报的维护维修报告,这些数据的准确性会影响评估结果。

(2) 根据我国《新一代天气雷达业务观测规定》,雷达开机观测时段按气候区域特点划分3个不同观测时段,由于各区域规定的观测时段不同,将对雷达运行能力的评估产生一定影响。

参考文献

- 白玉洁,胡东明,程元慧,等,2012.广东天气雷达组网策略及在台风监测中的应用[J].热带气象学报,28(4):603-608.
- 蔡勤,柴秀梅,周红根,等,2011. CINRAD_SA 雷达闪码故障的诊断分析[J].气象,37(8):1045-1048.
- 柴秀梅,高玉春,潘新民,等,2011a.新一代天气雷达分类维护与分级维修的探讨[J].气象水文海洋仪器,1(1):116-119.
- 柴秀梅,潘新民,高玉春,等,2011b.新一代天气雷达钛泵电源调试和故障定位方法[J].沙漠与绿洲气象,5(2):57-60.
- 柴秀梅,潘新民,汤志亚,等,2011c.新一代天气雷达回波强度异常分析与处理方法[J].气象,37(3):379-384.
- 勾亚彬,刘黎平,杨杰,等,2014.基于雷达组网拼图的定量降水估测算法业务应用及效果评估[J].气象学报,74(4):731-748.
- 李峰,秦世广,周薇,等,2014.综合气象观测运行监控业务及系统升级设计[J].气象科技,42(4):539-544.
- 李明元,陈明林,左经纯,等,2012.新一代多普勒天气雷达_CINRAD_CD_方位伺服系统典型故障分析及处理[J].气象,38(4):123-128.
- 梁海河,孟昭林,张春晖,等,2011.综合气象观测运行监控系统[J].气象,37(10):213-218.
- 孟昭林,李雁,陈挺,等,2011.综合气象观测系统业务运行综合评估技术研究[J].气象,37(10):1292-1300.
- 裴翀,石城,邵楠,等,2011a.新一代天气雷达运行能力评估研究[J].科技通报,1(3):336-341.
- 裴翀,宋连春,吴可军,等,2011b.我国综合气象观测运行监控系统的设计与实践[J].气象,37(2):213-218.
- 邵楠,裴翀,夏元彩,等,2012. ASOM 维护维修信息管理子系统的开发与应用[J].山东气象,32(132):51-53.
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,70(3):311-337.
- 赵瑞金,董保华,聂恩旺,等,2013.根据异常回波特征和报警信息判断雷达故障部位[J].气象,39(5):645-652.
- 赵瑞金,刘黎平,张进,2015.硬件故障导致雷达回波错误数据质量控制方法[J].应用气象学报,26(5):578-589.
- 郑洪,柴秀梅,余加贵,等,2011. CINRAD_CC 雷达伺服系统故障分析与处理方法[J].气象与环境科学,34(1):91-95.