

徐八林, 刘黎平, 张涛, 等. CINRAD/CC 雷达速调管运行状态控制[J]. 气象, 2011, 37(3): 373-378.

CINRAD/CC 雷达速调管运行状态控制^{* 1}

徐八林^{1,2} 刘黎平¹ 张涛² 熊岐³ 杨宇² 王涛⁴

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 云南省气象局大气探测中心, 昆明 650034

3 安徽四创公司, 合肥 230088

4 辽宁省营口市气象局, 营口 115000

提 要: 速调管性能直接影响到雷达探测的回波质量、运行成本和使用时间, 目前使用和维护好速调管是雷达站提高业务质量和降低成本的主要环节之一。从云南 6 部 CINRAD/CC 雷达近年来的运行情况看, 使用和维护好速调管是十分重要和必要的。以德宏、普洱的速调管使用维护为个例, 在速调管工作原理的基础上, 结合前期实际工作中经验, 以收集极波形、发射功率和地物回波变化三项指标来判断运行性能状况。通过多年分析总结, 电子枪通常是速调管的易损和易老化部件, 对此主要提出速调管使用初期宜适当调高电子枪灯丝电流以使灯丝充分激活和保证新管具有较好的真空度; 中期宜灯丝电流略低运行; 晚期速调管的阴极发射能力可能会有所下降, 在此时可适当调高灯丝电流, 以保证雷达探测的回波质量。通过对速调管工作阶段提出分段运行的新措施和建议, 从实际效果看, 在不影响探测质量的前提下应能提高速调管的使用时间, 供同行探讨。对其他型号 CINRAD 雷达也应有较好的借鉴。

关键词: 雷达, 速调管, 运行状态控制, 优化

The Operational Optimization of CINRAD/CC Radar Klystron

XU Balin^{1,2} LIU Liping¹ ZHANG Tao² XIONG Qi³ YANG Yu² WANG Tao⁴

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Meteorological Observation Center of Yunnan Meteorological Bureau, Kunming 650034

3 Anhui Sun Create Electronics Limited Company, Hefei 230088

4 Yingkou Meteorological Office of Liaoning Province, Yingkou 115000

Abstract: The use and safeguard of radar klystron are one of the main links in improving operation quality and reducing the cost in radar station, because the performance of klystron directly affects the quality of radar echo, operating costs and the lifetime of use. It is very important and necessary to use and safeguard the klystron better in the case of Yunnan 6 CINRAD/CC radars' operations in recent years. For example, in Dehong and Pu'er radars, based on both klystron operation principle and practical experience, the operating performance of klystron is determined by the change of collecting waveform, transmission power and anomalous propagation. Based on years of experience, it is shown that the electron gun of klystron is usually considered vulnerable and easy aging. It should be appropriately increased the klystron electron gun filament current so that the full activation of the filament and the new tube keeping with good vacuum during the initial klystron operational period. It should be slightly lowered filament current during the medium klystron operation period. During later period, it should be increased the filament current to ensure the quality of radar echo because klystron cathode emission capability may be decreased at this period. Based on the above operation initiatives and proposals on klystron, it could extend the use lifetime of klystron

* 灾害天气国家重点实验室基金(2008LASW-B09)资助
2010 年 5 月 7 日收稿; 2010 年 8 月 13 日收修定稿
第一作者: 徐八林, 从事气象电子研究. Email: ynxbl@sina.com

without affecting the quality of detection. The method should also be good reference for other CINRAD radars.

Key words: radar, klystron, working state control, optimization

引言

新一代天气雷达已在许多地方建成并投入业务使用,发挥着重要的作用。目前已建雷达发射机均使用速调管。速调管将激励信号充分放大,输出符合技术指标规定的雷达发射脉冲,通过云中雨滴等物体的反射信号,从而确定回波强度、速度和谱宽。因此,速调管运行情况直接影响到新一代天气雷达探测业务质量和建设效益的发挥,做好速调管的维护工作十分重要。

在对速调管的相关研究上,姚武生^[1]论述了广播电视发射系统大功率速调管的使用方法以及对寿命的影响。王晓刚等^[2]提出备份速调管采用热存放的方法来延长速调管的使用时间。孙永宽^[3]讨论了电视转播系统大功率电视发射速调管的使用调整和维护。赵鼎等^[4]采用动态追踪算法对速调管输出段进行分析,取得了更加准确的速调管输出段数值结果,提出一些输出结构的优化建议。针对新一代天气雷达,张文建^[5]指出天气雷达的重要性的发展方向以及对资料一致性的业务要求。杨传凤等^[6-7]对 CINRAD/SA 雷达发射机及高压部分故障进行了分析,提到了发射分机速调管相关部分常出故障。王志武等^[8]进一步对 CINRAD/SB 发射机一例发射机高压打火特殊故障排除进行了介绍。胡东明等^[9]对 CINRAD/SA 雷达日常维护及故障诊断方法进行了归纳。张沛源等^[10]对数字化天气雷达定标调试方法做了总结介绍,并就定标中调试发射功率的一些问题做了探讨。潘新民等^[11]把测试信号输入得到的反射率因子 Z 值和雷达正常观测模式显示的 Z 值相比较,以检验天气雷达接收功率标定的误差。王志武等^[12]介绍天气雷达天馈系统插入损耗进行定量测量的方法,并举例给出了发射功率损耗的测量结果。胡东明等^[13]对 CINRAD/SA 雷达速调管输入信号相关的调制器真空开关漏气故障进行了分析。文献^[14]简单介绍了 CINRAD/CC 雷达发射系统的基本电路原理情况。黄晓等^[15]介绍了 CINRAD/CB 脉冲多普勒天气雷达数字中频接收机对发射功率的影响作用。吴少峰等^[16]基于 CIN-

RAD/SA 雷达发射功率一次异常的陡降现象,发现高频脉冲宽度变小,引起发射功率的下降。周红根等^[17]分析连云港站 CINRAD/SA 天气雷达所出现的故障,统计各类故障,认为速调管相关的发射分机故障率较高。文献^[18]针对 CINRAD/CC 雷达速调管相关的磁场电源故障进行了分析,提出排除故障后统调发射机相关系统是十分必要的。以上文献对 CINRAD/CC 发射系统故障诊断和调试均有较好参考意义,虽然文献^[19]对提高 CINRAD/CC 发射机重要部件速调管性能及工作状态控制进行了研究,由于研究个例和时间不足,还不够深入,本文在此基础上进一步研究,通过近几年实践,又有一些新的经验体会。现以四创公司生产 CINRAD/CC3830 型号的新一代天气雷达速调管为例,提出一些维护经验,供同行参考。

1 速调管

速调管是随着近代电子学的发展,于 20 世纪 30 年代发明。1939 年兰德尔(J. T. Randel)和波特(H. A. H. Boot)研制出微波大功率振荡器——多腔磁控管。目前,速调管作为微波大功率发射器件替代了磁控管,使用到新一代天气雷达中。

1.1 特性与功能作用

新一代天气雷达运用直射式多腔速调管具有的大功率、高增益特性,在射频激励脉冲和阴极调制脉冲的共同作用下,产生峰值功率 ≥ 250 kW 的射频发射脉冲,完成这一功能的核心部件就是速调管。

1.2 KC4085 型直射式六腔速调管组成与原理

新一代天气雷达发射机用的速调管基本原理就是利用电子束的速度调制间接获得电子束的密度调制。利用速度调制方法改变在交变电磁场中电子流的运动速度,从而将直流能量转换成为微波能量。CINRAD/CC 发射机采用 KC4085 型直射式六腔速调管^[14]。KC4085 型速调管主要由电子枪、输入谐振腔、中间谐振腔、输出谐振腔、漂移管、收集极以及输入、输出耦合装置组成,其结构示意图如图 1 所示。

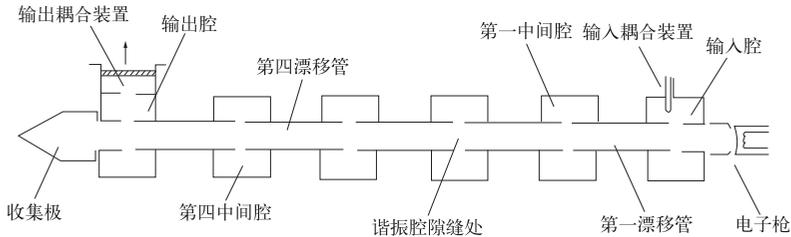


图 1 KC4085 型速调管结构示意图

Fig. 1 The schematic structure principle of KC4085 klystron

电子枪由阴极、灯丝、聚束极和阳极组成。灯丝通电后发射出大量电子。聚束极与阳极配合,在阴极表面附近产生聚焦电场,使得从阴极表面向不同方向发射出来的电子,聚成一束电子注,射向收集极。固态放大器输出的激励脉冲,通过输入耦合装置从输入谐振腔注入。速调管工作时,谐振腔内会被运动电子注感应而发生振荡,在腔体中部的隙缝处激励起射频电压,形成射频电场,这个射频电场与上面产生的电子注中的群聚电子发生能量交换,经速调管放大到 ≥ 250 kW 的发射脉冲,从输出腔通过输出耦合装置注入馈线部分送往天线。从电气原理看,电子枪将大电流转换成电子,通常是速调管的易损和易老化部件。

2006 年和 2008 年启用的速调管均工作 11000 h 以上,达到设计寿命的两倍多。普洱雷达站在采用该方法以后,速调管寿命也超过 10000 h 以上。在速调管性能判断上,主要依靠以下 3 个指标。

2.1.1 输出波形比较

通过电流测试环,从速调管收集极耦合后测得的输出波形来判断所测速调管的性能。以德宏 2008 年速调管为例,2010 年更换时从速调管输出波形(如图 2 老管),y 轴为发射脉冲高度,每格 2 V;x 轴为发射脉冲宽度,每格 1 μ s。A 点“凹槽”可判断速调管性能,当 A 点“凹槽”达到 1.5 V 左右时,发射脉冲高度将会下降,发射功率和回波强度都会明显减弱,获得的雷达资料基本无法正常使用。由于“凹槽”从 0.5 V 发展至 1.5 V 左右的进程目前还没掌握其规律,故 A 点“凹槽”值在 1.5 V 以下时,速调管性能正常,还可以正常使用,但其能够继续使用多久,目前尚没有较准确方法来确定,从云南几个速调管的情况看,最短的 600 多小时;最长的约 2800 h。该德宏雷达老速调管使用 11000 h 后的输出波形(如图 2 老管波形)已经出现了明显“凹槽”(A 点所示,约 0.7 V),能运行 11000 h 说明该老速调管自身性能和维护做的都比较出色,达到 1.5 V 的报废标准还能坚持使用多少小时目前也仍无法确定。

2 速调管运行性能指标技术分析

在基本原理基础上,对新一代天气雷达速调管运行参数加以分析,得出如下主要技术指标要求。

2.1 速调管性能判断

CINRAD/CC 雷达速调管设计寿命为 5000 h,2004 年以前,速调管寿命通常在 5000~7000 h,近年由于速调管自身质量提高并采用分段调整灯丝电流方法以后,通过厂家和雷达站具体实验,德宏雷达

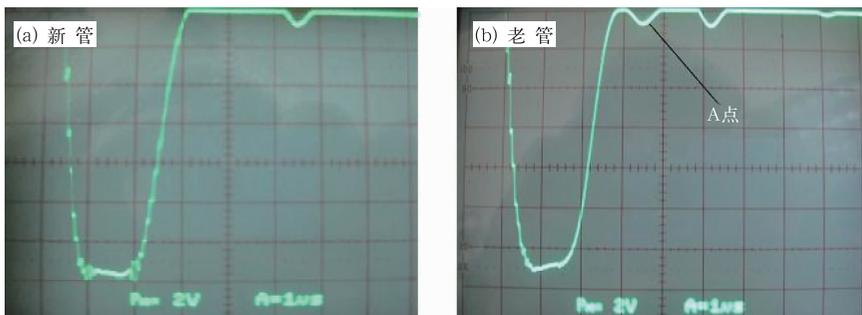


图 2 德宏新老速调管的发射脉冲输出波形比较(y 轴电压,单位:V;x 轴时间,单位:μs)

Fig. 2 Comparison of two klystron voltage waveforms

(a) new klystron, (b) old klystron

2.1.2 发射功率变化分析

以德宏 2006 年更换的速调管为例,该管的发射功率变化情况如表 1(表中:— 为记录不全),从每月日平均功率和每月登记功率的月份对比情况看出,在累计运行时间 4807 h,出现了第一次功率的下降,微调了磁场电源,功率升至 299.6 kW。累计运行时间 9700 h 后,出现了第二次功率的明显下

降,这时如需继续使用一般可通过适当提高灯丝电流的方法,从而达到提高雷达发射功率的目的,2006 年 1 月进行了提高灯丝电流约 10% 的调整。从速调管整个运行过程来看,除 2005 年 12 月外发射功率均在 250 kW 以上,至 2006 年 4 月止该速调管均能正常运行。2006 年 5 月从厂家更换时所测试的硬件指标看,该老速调管目前性能正常,尚能使用。

表 1 速调管后期发射功率变化情况

Table 1 Klystron Transmit power variation close to life span

年.月	2005.3	2005.4	2005.5	2005.6	2005.7	2005.8	2005.9	2005.10	2005.11	2005.12	2006.1	2006.2
每月日平均功率/kW	285.2	298.7	294.5	309.0	312.0	299.8	272.8	271.5	241.3	—	—	—
每月登记功率/kW	282.6	299.6	297.9	298.7	299.2	309.8	294.0	285.6	251.4	238.6	287.6	266.3
累计运行时间/h	4807	5274	5934	6574	7183	7868	8478	9146	9707	9981	10255	10684
当月运行时间/h	236	452	660	601	624	685	610	668	561	274	254	429

2.1.3 固定地物回波强度检验发射功率

由于地物回波强度受大气折射、天线抖动等情况影响,较难准确说明问题,只能反映大致情况。以普洱 2006 年速调管为例,统计的地物回波强度变化如表 2,表中“点 1”代表方位角 289°距离 39.6 km 附近的地物;点 2 代表方位角 4°距离 57.0 km 附近的地物;点 3 代表方位角 80°距离 30.3 km 附近的地物。2006 年雷达速调管当时已使用 12000 h 左右,与 2004 年地物回波强度相比,地物回波强度平均减弱 13.9 dBz,地物回波面积也小许多,固定地物回波强度下降基本是由于速调管发射功率下降造成,说明普洱雷达速调管的性能明显下降,应更换。这与速调管输出功率是比较对应的,2004 年月平均输出功率 294.4 kW,2006 年的输出功率 165.1 kW。德宏雷达工作两年多后,从第三年数据看,对比前年相同的固定地物回波强度,从十多次对比结果发现,仅有两次的强度值偏离正常范围,大致也能说明该速调管目前工作状况和性能。所以固定地物回波检验发射功率也是一项基本可行的指标。

表 2 对应月平均地物回波强度比较(单位: dBz)

Table 2 The comparison of corresponding echo intensity on the ground objects (units: dBz)

固定地物	年份	1月	2月	3月	4月
点 1	2004	38.8	35.6	34.7	43.7
	2006	25.5	21.5	20.8	18.3
点 2	2004	42.4	37.0	34.5	35.6
	2006	31.0	27.4	16.0	19.7
点 3	2004	42.6	35.6	41.5	41.6
	2006	35.2	28.2	25.8	20.5

2.2 速调管运行参数优化及其他参数调整的技术总结

根据夏贤江等^[20]对速调管的发射部分设计思想和系统组成作的阐述和讨论的发射机研制中的难点,通常设计难点也是应重点维护的地方,对此经近年总结,主要有以下内容。

运行参数调整主要是工作电压、电流的调整。启用的新管,“老炼”之后,灯丝电流则宜调整到略高于额定值,运行 200 h 左右,以便将灯丝充分激活和保持较好真空度;之后在主运行期间,在低于灯丝额定值的 10% 左右工作;后期当发射功率低于 250 kW 的额定值时,又可适当调高。这样可相对延长速调管使用寿命。运行期间为了保证速调管较好的运行状态,应经常检查工作电压、电流是否符合规定的要求。其中,灯丝电流的高低对速调管的寿命有较大影响,低于黑灯丝和高于额定值是不能允许的。

速调管激励功率长期过小或过大,均会降低管子使用寿命。固态放大器输出激励功率在 1~5 W 范围内连续可调,调节到较佳位置的依据为:调节激励功率时,速调管输出功率在一定的范围内达到最大并保持不变,此时宜将激励功率设在该范围低端。

管体电流常反应出速调管高压漏电流的大小,当聚焦不好时,管体电流就变大。聚焦电流不得大于额定值,一般在静态时以使管体电流最小为好。

磁场电流调节到位的依据^[21]为:管体电流不得大于速调管总流的 10%。

正确选择束电压和激励功率。激励不够和束电压过低都会导致输出功率的下降;而激励过量或束

电压过高却会使工作点上升,使速调管工作在过激区造成脉冲同步头被压缩,体电流增加。这样会严重影响速调管的寿命。所以速调管长期工作时宜在稍欠饱和状态较佳。

速调管的调谐^[22]:调谐前要检查所有的保护,特别重点保护电路一定要正常。上高压后,运行 15 min,待其工作稳定后再开始进行调谐。调谐后的速调管必须较长时间的低压预热使钛泵电流完全达到正常值。

另外,在采用前面谈到的合理调整电压电流的过程中,必须保证速调管安全,只有操作得当才能收到好的效果,否则适得其反。

总之所采取的主要措施是:根据速调管性能指标,在初期、运行期和晚期分别调以不同的运行参数。这是因为原设计的电子发射效率有一定的储备,适当调低依然可以满足雷达发射功率的要求。而实际上速调管的寿命主要决定因素通常就是灯丝寿命。另外,调低的幅度要视速调管的使用时限和工作状态而定,灯丝电流过低倘若造成灯丝发热不足就会使灯丝中毒,反而不好。

2.3 外部环境要求

2.3.1 外部设备工作状态维护

钛泵电流过大是常见的现象。如果钛泵电流指示大于 $20 \mu\text{A}$ 而且不回落,经过老炼问题依然存在,此时多为速调管问题。常可能是速调管由于老化漏气,造成管内真空度不好,破坏了速调管正常工作的条件。高压线较脏也会使泵电流表头大于 $10 \mu\text{A}$,如果擦干净后还是很大,也说明速调管真空度不足。速调管的阴极接头处要经常保持清洁状态,并防止松动。备用速调管宜每 3 个月做一次“老炼”,以保持良好的真空状态。

2.3.2 安放水平调整

速调管安装水平、与波导口联接稳固也会影响寿命。

2.3.3 冷却须到位

速调管运行中需散发大量热量,冷却风量的大小应达到要求。否则易造成油温太高、油量不足、风量不足等,以致冷却系统长期处于故障状态工作,速调管长期冷却不到位也会造成速调管损坏。

3 速调管安装存放技术

使用和维护好速调管,延长速调管寿命,从安装

和更换速调管时就应开始注意,在正常操作^[21]情况下,还应重点注意以下两点。

3.1 速调管的“老炼”

速调管是一种大功率真空器件,如果系统处于长期停机状态,可能会使速调管的真空度下降,造成电子枪的阴极材料表面氧化,导致阴极发射能力下降,输出功率降低。因此长期停机时(超过 3 个月)或新安装,应进行一次“老炼”,具体方法是将灯丝钛泵电源断开,再将控制指示设置为本控状态,按照系统开机顺序加至低压状态,此时速调管只施加了钛泵电压,工作至钛泵电流指示表的指示值 $\leq 10 \mu\text{A}$ 后关机。然后接上钛泵电源再开机,此时速调管灯丝电流和钛泵电压都加上了,再工作至钛泵电流指示值 $\leq 10 \mu\text{A}$ 后关机,完成“老炼”过程。“老炼”过程主要目的是提高速调管的真空度。

3.2 速调管的更换

更换步骤主要是使发射系统断电并确定钛泵电源电压为零,拆除速调管与外部所有连接;拔出速调管;卸下磁场聚焦线包;放掉变压器油并用酒精清洗油箱。然后注入新油,确保油面超过速调管的陶瓷部分,根据新管的具体要求调整灯丝电流后,插上新管,再装上聚焦线包,恢复速调管与外部的连接,再根据新管的出厂具体性能要求,适当调整磁场电流等参数;最后,应记下旧管换下和新管换上时高压计时器的读数。

4 结 语

总结云南的新一代天气雷达速调管使用情况,在以前研究成果上,又以近年德宏和普洱 3 只速调管运行情况为例,得到的维护经验主要有以下几点:

(1) 掌握速调管的原理特点,采用正确的维护方法,就能保证其良好的性能,并更好地延长速调管使用寿命。

(2) 根据速调管收集极波形、输出功率和固定地物回波强度 3 项指标参数,判断速调管性能状况,并对速调管灯丝电流做及时的调整,使速调管在不同的寿命期在合适的电压下运行,是确保速调管长期正常使用的关键。目前对启用的新管灯丝电流则调整到略高于额定值,运行 200 h 左右,以便将灯丝充分激活和保持较好真空度;之后在主运行期间,在

略低于灯丝额定值工作;后期当发射功率低于 250 kW 的额定值时,又适当调高。

(3) 对速调管外部工作设备(如:钛泵)的维护;高压导线焊接端子、脉冲变压器所有绝缘子和速调管钛泵端子的陶瓷体保持良好绝缘强度,均能对速调管寿命延长起到较好的作用。另外,还有些虽不在速调管范围也应注意;保证雷达供电电源稳定;针对速调管安全而设置的保护电路,例如收集极过流、钛泵过流、收集极过热、腔体打火、聚焦电流及体电流过荷等保护电路可靠是必不可少的。这些保护电路乃至发射机其他部分的保护电路的工作状态都应经常检查。

致谢: 中国气象科学研究院葛润生老师和中国科学院丁耀根老师对完成本文做了悉心指导,德宏、普洱、文山雷达站提供相关数据,谨此表示感谢!

参考文献

- [1] 姚武生. 大功率速调管的使用和维护[J]. 雷达科学与技术, 2002,(01):45-53.
- [2] 王晓刚,霍文广. 速调管的热存放装置[J]. 广播与电视技术, 2003,30(04):99-100.
- [3] 孙永宽. 大功率电视发射速调管的使用调整和维护[J]. 广播与电视技术, 1990,17(01):53-60.
- [4] 赵鼎,丁耀根,孙鹏,等. 动态追踪算法在速调管输出段计算中的应用[J]. 物理学报,2006,55(05):2389-2396.
- [5] 张文建. 世界气象组织综合观测系统(WIGOS)[J]. 气象, 2010,36(3):1-8.
- [6] 杨传凤,袁希强,黄秀韶,等. CINRAD/SA 雷达发射机故障诊断技术与方法[J]. 气象,2008,34(2):115-118.
- [7] 杨传凤,黄秀韶,刁秀广. 济南 CINRAD/SA 雷达发射高压故障诊断[J]. 气象, 2005,31(1):88-89.
- [8] 王志武,韩博,林忠南, CINRAD-SB 型发射机一例复杂故障排除[J]. 气象,2006,32(9): 116-120.
- [9] 胡东明,伍志方. CINRAD/SA 雷达日常维护及故障诊断方法[J]. 气象,2003,29(10):26-28.
- [10] 张沛源,周海光,梁海河,等. 数字化天气雷达定标中应注意的一些问题[J]. 气象, 2001,27(6):27-32.
- [11] 潘新民,汤志亚. 天气雷达接收功率标定的检验方法探讨[J]. 气象, 2002,28(4):34-37.
- [12] 王志武,赵海林,郑旭初. 天气雷达天馈系统损耗的测量[J]. 气象, 2001,27(7):24-26.
- [13] 胡东明,胡胜,刘强. CINRAD/SA 雷达调制器真空开关漏气故障的分析处理[J]. 气象,2006,32(8):118-120.
- [14] 信息产业部电子第 38 研究所. 3830 雷达技术说明书[G]. 合肥,华东电子工程研究所, 2001,1.
- [15] 黄晓,裴翀. CINRAD/CB 脉冲多普勒天气雷达数字中频接收机[J]. 气象科技,2005,33(5):464-468.
- [16] 吴少峰,胡东明,胡胜,等. 一次 CINRAD/SA 雷达发射机功率偏低故障的分析及处理[J]. 气象,2009,35(10):108-112.
- [17] 周红根,朱敏华,段素莲,等. CINRAD/SA 雷达故障分析[J]. 气象,2005,31(10): 39-42.
- [18] 徐八林,杨松福,何跃,等. CINRAD/CC 雷达发射机磁场电源故障诊断与调试[J]. 气象,2010,36(2):126-129.
- [19] 徐八林,刘黎平,余海容,等. CINRAD/CC 雷达速调管工作状态控制及维护[J]. 气象科技,2007,35(5):736-740.
- [20] 夏贤江,李网生,蒋云彬. 一种 C 波段大功率单脉冲雷达发射机的设计[J]. 现代雷达,2004,26(8):55-57.
- [21] 安徽四创电子股份有限公司. CINRAD/CC 雷达系统使用与维修手册[G]. 安徽四创电子股份有限公司, 2003.
- [22] 周红根,高玉春,胡帆,等. CINRAD/SA 雷达频综故障检修方法[J]. 气象,2009,35(10):113-118.