

孟昭林,李雁,陈挺,等. 综合气象观测系统业务运行综合评估技术研究[J]. 气象,2011,37(2):219-225.

综合气象观测系统业务运行综合评估技术研究^{*1}

孟昭林 李雁 陈挺 石城

中国气象局气象探测中心,北京 100081

提 要: 综合气象观测网运行监控系统是我国气象探测设备运行保障的实时业务系统。文章以装备技术保障工程理论为基础,按可靠性、维修性、保障性、业务性、经济性等多个范畴,从装备运行状态、装备性能参数、探测数据质量、通信传输、供应保障、维护维修等方面,提出了针对我国综合气象观测网中各类设备的运行、维护和保障等工作进行综合评估的技术方法,建立了综合评估指标体系。综合评估指标体系的建立可以为综合气象观测系统的稳定、可靠运行提供保障,为决策人员决策和设备生产厂家设备选型、改进等提供信息依据。

关键词: 综合气象观测系统, 运行评估, 指标体系

Research on Operational Synthesis Evaluation Techniques of the Integrated Meteorological Observation System in China

MENG Zhaolin LI Yan CHEN Ting SHI Cheng

Meteorological Observation Center, CMA, Beijing 100081

Abstract: The integrated observation network operational monitoring system is the real-time professional platform for the meteorological observation equipment operational supporting in China. This paper gave the synthesis evaluation index system of meteorological facilities' operation, maintenance and supporting in the integrated meteorological observation network in China, based on the equipment technique supporting engineering theory. The evaluation index system contained reliability, maintainability, supportability, daily job and economic categories, and then evaluated the integrated meteorological observation network from the facilities' operational status, parameters, the observation data's quality, the information transmission, the supply guarantee and the maintenance. Synthesis evaluation index system can not only make the integrated observation system operation stable and reliable, but also can provide information for decision makers and equipment manufacturers to select and to improve equipments in China.

Key words: integrated meteorological observation system, operational evaluation, index system

引 言

现代气象业务的重点是以提高公共气象服务水平为目标,面向预报服务业务和发展需求,建立能连续、稳定、可靠运行为基础的综合气象观测系统。随着气象现代进程加快,由地基、空基、天基观测系统

组成的综合气象观测系统建设快速发展^[1-5],综合气象观测系统运行监控作为气象行业的一项新兴业务,日益成为气象探测业务保障工作的重要组成部分。运行监控工作的核心是保障观测网的稳定、可靠运行,最终目标是提高其运行效能。为使我国综合气象观测网的效益充分发挥,需要开展面向全国综合气象观测系统技术保障能力的评估工作。

* 中国气象局新技术推广项目“气象观测全网运行评估指标体系研究(CMATG2008M09)”资助
2010年3月24日收稿; 2010年7月20日收修定稿
第一作者:孟昭林,从事气象探测系统运行监控技术开发。Email:mzlaoc@cma.gov.cn

国际上,早在 20 世纪 50 年代,军工领域针对武器装备,从设计和应用角度出发,开展装备质量管理的可靠性、维修性、保障性研究,建立综合保障工程理论,目前已经发展到面向全系统、全寿命的信息化可靠性工程研究阶段^[6-8]。国内从 20 世纪 70 年代起,有少数在军工领域从事该方面研究工作^[9],到 80 年代开始可靠性研究进入较快发展阶段,主要应用于电子、核能、军工、电力等行业^[6-12]。杨秉喜等在《雷达综合技术保障工程》中,全面阐述了雷达质量与可靠性、维修性、保障性的关系^[13];丁朝阳提出采用专家定性评价方法,基于气象服务保障能力评估体系基础,采用模糊综合评判法对某气象台的气象服务保障能力进行了评估^[14]。气象探测行业中,除有少数针对单个系统进行评估的研究外^[15,19-21],基本仅以探测数据到达率作为业务考核指标,而针对我国综合气象观测系统中探测网设备运行情况综合评估方面的研究基本是空白,缺乏综合、全面、客观的评估方法。

本文从我国气象探测业务的实际特点出发,依托综合气象观测网运行监控系统汇聚的探测信息,采用综合保障工程技术方法^[16],结合国内外相关领域的研究成果,提出可靠性、维修性、保障性、业务性和经济性五大评估范畴,研究评估我国综合气象观测网运行保障业务情况的技术方法,建立了综合评估指标体系。综合评估指标体系的建立可以为综合气象观测系统的稳定、可靠运行提供保障,为决策人员进行决策和设备生产厂家进行设备选型、改进等提供信息依据。

1 综合气象观测网运行监控系统

中国气象局气象探测中心组织开发的综合气象观测网运行监控系统是我国气象探测设备保障领域内的实时业务系统^[17]。目前主要监控综合气象观测网中投入业务运行的新一代天气雷达、探空系统、国家级地面自动气象站三类设备,为适应业务发展需要,未来还将陆续实现对 GPS/MET、雷电探测系统、风廓线、风能探测设备、太阳能探测设备等新型探测系统的监控保障。系统开发的目的是提高气象技术装备保障现代化管理水平和业务运行质量,建立以探测网业务运行监控和技术保障系统为支撑平台的“信息化、规范化、体系化”业务运行模式。系统的使用对象为我国台站级、省级和国家级业务人员、

管理人员和决策服务人员。

系统提供对各类气象装备的运行状态监控、探测数据监控、技术保障信息管理、业务运行综合评估、业务基础信息管理等功能。其中,状态监控可以提供实时运行状态、连续追踪历史状态、装备运行性能参数;探测数据监控提供探测数据质量监控、探测数据产品监控能力;技术保障信息管理分为装备保障信息管理、装备维修管理、日常业务运行管理三个部分;业务运行基础信息管理提供探测系统业务运行基础信息管理维护功能,涉及测站基本信息管理、测站装备配置信息管理、人员信息管理以及技术保障部门信息管理;业务运行综合评估根据装备运行状态监控、探测数据质量监控、技术保障信息等,评估探测系统运行情况。

2 综合气象观测网运行综合评估

我国气象探测装备研发和业务运行管理主要集中在追求高技术性能,可靠性、维修性设计指标具有很大随意性,装备管理考核主要是完成“点性能”的验收测试,业务评估也基本停留在针对系统探测数据的到达情况,这些远远跟不上现代装备质量管理的步伐。现代质量管理是面向全系统贯穿于全寿命周期的信息化全面质量管理。建立综合气象观测网运行综合评估技术,针对运行使用情况进行综合评估,对提升装备质量管理水平具有重要意义。

2.1 气象探测装备业务运行特点

起源于军工领域的可靠性评估强调军用武器装备的备战完好性,该指标适用于备战状态和战时状态,其特点是备战时间常远远大于战时时间。气象探测装备业务运行特点是长期使用,且要求持续稳定运行。因此,针对气象探测装备的运行评估主要是对使用可用性进行评价,是面向气象探测系统业务运行的评价。

2.2 综合评估原则和评估内容

综合气象观测网运行综合评估需要以质量管理工程理论为基础,以综合技术保障工程方法为依据,以提高装备运行效能为目标,紧密依托气象探测和监控保障业务,进行信息化、规范化、体系化的综合技术评估,其突出特点体现在面向气象探测设备保障实际业务。

(1) 综合评估基本原则

根据气象探测装备业务运行特点,综合评估应遵循下面基本原则:系统性原则:需要从全方位对评估对象展开综合性评估,保证评估的全面性和可信度;客观性原则:需要根据实际运行情况,尽可能采集客观数据进行评估;可测性原则:需要明确定义评估指标涵义,数据收集方便,计算简单;实用性原则:综合评估需要有针对性,满足业务运行评估需要;适用性原则:综合评估不仅适用于单一探测系统,而且适合于综合气象观测系统中所有气象探测设备。

(2) 综合评估内容

总体而言,装备质量管理综合评价可以归结为:技术评价、经济评价、效能评价、环境评价和综合评价等几个方面。根据可靠性和维修性理论中对产品状态的描述以及综合技术保障工程方法分类^[13,17],气象探测装备使用过程全生命周期剖面图如图 1 所示。

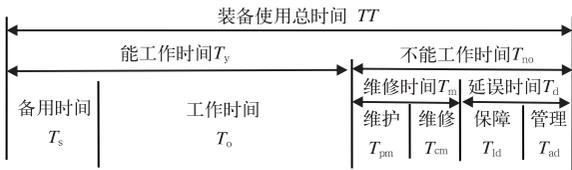


图 1 气象装备全生命周期剖面图

Fig. 1 Meteorological equipment life-span diagram

气象装备全生命周期(对应总使用时间 TT)中按服役状态总体可划分为能工作(对应时间 T_y)和不能工作(对应时间 T_{no})两种状态,其中,能工作状态中又可分为设备处于备用状态(对应时间 T_s)和设备真正业务运行状态(对应时间 T_o);不能工作状态中含维护维修(对应时间 T_m)和故障保障延误(对应时间 T_d)两种状态。

气象装备全生命周期 TT 由备用时间 T_s 、工作时间 T_o 、维修时间 T_m 和延误时间 T_d 组成,即:

$$TT = T_o + T_s + T_{pm} + T_{cm} + T_{ad} + T_{ld} \quad (1)$$

气象装备在全生命周期中的应工作时间 TT_o 为:

$$TT_o = T_o + T_{pm} + T_{cm} + T_{ad} + T_{ld} \quad (2)$$

装备寿命周期中三个状态分别对应可靠性(Reliability)、维修性(Maintainability)和保障性(Supportability),也即装备质量工程管理中的 RMS 体系^[18]。可靠性是用来定量描述在给定的工作期间内装备可能处于无故障状态的时间;维修性是用

来描述如果采用规定的程序和资源、在给定时间内装备保持在或恢复到规定状态的能力;保障性是用来定量描述需要附加的保障延误时间。

气象探测业务运行过程完成的业务剖面如图 2 所示,其总任务 T 按照完成任务阶段和内容可分为数据采集任务 T_1 、数据传输汇集任务 T_2 和数据质量分析任务 T_3 ,分别需要评估装备探测状态和性能可靠性、数据通信传输及时性和探测数据质量的可信性。

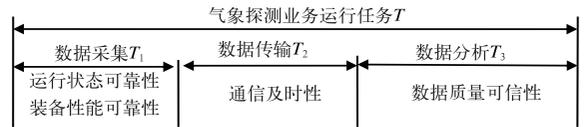


图 2 气象探测设备业务运行任务剖面图

Fig. 2 Meteorological equipment operation diagram

因此,以气象装备全寿命周期为线索,依据装备质量管理理论基础并结合气象探测装备实际业务运行特点,综合气象观测系统业务运行综合评估主要从可靠性、维修性、保障性、业务性以及经济性五大范畴展开。

3 综合评估指标体系和计算方法

3.1 可靠性评估

可靠性即装备在规定时间内和规定条件下,完成规定功能的能力。通常装备的使用条件、自身性能、维修条件、环境条件、操作技术等都将影响综合气象观测网中气象探测设备运行可靠性的高低。由于我国综合气象观测网中不同探测设备业务运行的时限要求、产生的探测数据以及不同探测设备数据的传输情况等都不尽不同,因此有必要分别进行评估。具体如表 1 所示。

装备运行状态:装备运行能力是考察系统可靠性的重要指标之一。气象探测装备运行状态是对装备系统运行状态的综合反映,可以通过装备运行可用性(A_o)、完好可用性(A_s)和平均无故障工作时间(MTBF)反映;装备性能参数:每一类气象探测系统均应含自身运行状态检测的运行性能参数,这些参数直接反应装备的性能状况;探测数据质量:获取高质量探测数据是进行气象观测系统的根本目标。通过数据质量监控技术可以完成探测数据质量监测。数据质量的可用性(A_q)指标可以说是系统可靠性

表 1 可靠性评估范畴

Table 1 The reliability evaluation category

评估范围	评估指标	符号	计算方法	指标说明
装备运行能力	完好可用性	A_s	$(T_o + T_s)/TT$	装备状态可用, 含备用情况
	运行可用性	A_o	T_o/TT_o	装备实际运行可用性, 不含备用情况
	平均无故障工作时间	MTBF	$T_o/(FF+1)$	平均故障间隔时间
装备性能	性能可用性	A_p	T_y/TT_o	装备运行参数达标率分析
通信传输能力	到报率	R_{dr}	T_{dr}/TT_c	应到报数据时间占应工作时间的比率
	及时率	R_{di}	T_{di}/TT_c	及时到报数据时间占应工作时间的比率
	逾限率	R_{do}	T_{do}/TT_c	逾限报数据时间占应工作时间的比率
数据质量	数据可用性	A_q	T_a/TT_c	可用数据时间占应到达数据时间的比率

注: FF 为故障次数; T_{dr} 为数据到报时间; T_{di} 为数据及时到报时间; T_{do} 为超过业务规定时间的数据到报的时间; T_a 为数据可用的时间; TT_c 为规定时间内应到达数据的时间

考核的最重要参数; 通信传输能力: 探测数据、装备运行状态数据以及装备运行性能数据等都要通过通信传输手段进行获取, 通信传输是气象探测运行实时监控重要一环, 因此通信传输也是保证系统可靠的重要组成部分。

3.2 维修性评估

维修性指装备在规定的条件和规定的时间内,

按规定的程序和方法进行维修时, 保持或使装备恢复到规定状态的能力。维修能力的高低不但与装备本身的结构有关, 而且还与维修人员的技术水平、人员素质等有关。气象探测系统运行中的维修性通过维修可用性 (A_m)、平均故障修复时间 (MTTR)、最大维修时间 (M_{maxct})、站级修复比 (R_s)、省级修复比 (R_p) 及平均预防性维修时间 (M_{tp}) 等进行评估。如表 2 所示。

表 2 维修性评估范畴

Table 2 The maintainability evaluation category

评估范围	评估指标	符号	计算方法	指标说明
维护维修能力	维修可用性	A_m	$T_o/(T_o + T_{cm} + T_{pm})$	维修敏感可用性的简称
	平均修复时间	MTTR	$T_{cm}/(FF+1)$	故障平均修复时间
	最大维修时间	M_{maxct}	$\text{Max}(T_{pm}, T_{cm})$	最大维护时间和最大修复时间
	站级修复比	R_s	$F_s/(FF+1)$	台站维修人员修复所占比率
	省级修复比	R_p	$F_p/(FF+1)$	省级维修人员修复所占比率
	平均预防维修时间	M_{tp}	T_{pm}/N_p	平均维护时间

注: F_s 为台站修复的故障次数; F_p 为省级修复的故障次数; N_p 为对设备进行维护的总次数; T_{pm} 为对设备进行维护的总时间

维修可用性是维修敏感性可用性的简称, 也称可达可用度, 用于评估完全由于装备维修维护工作对系统运行造成的影响。是对维修维护能力的综合评估, 维修可用性高表明维修能力强, 维修及时高效。

3.3 保障性评估

装备保障性反映装备综合技术保障对探测装备

维修延误情况, 装备保障性与物资供应保障、技术资料、保障设施、储存和运输、人力资源及管理决策水平有关。气象探测系统运行的保障性通过保障可用性 (A_d)、平均保障延误时间 (M_{idt})、国家级备件延误时间 (M_{idtn})、省级备件延误时间 (M_{idtp})、台站级备件延误时间 (M_{idts}) 进行评估。如表 3 所示。

表 3 保障性评估范畴

Table 3 The supportability evaluation category

评估范围	评估指标	符号	计算方法	指标说明
供应保障能力	保障可用性	A_d	$T_o/(T_o + T_{ld} + T_{ad})$	保障敏感可用性的简称
	平均保障延误时间	M_{idt}	$(T_{ld} + T_{ad})/(FF+1)$	供应保障延误平均时间
	国家备件延误时间	M_{idtn}	$T_{ldn}/(FF+1)$	国家备件保障的平均延误时间
	省级备件延误时间	M_{idtp}	$T_{ldp}/(FF+1)$	省级备件保障的平均延误时间
	台站备件延误时间	M_{idts}	$T_{lds}/(FF+1)$	台站备件平均延误时间

注: T_{ldn} 为国家级备件延误时间; T_{ldp} 为国家级备件延误时间; T_{lds} 为国家级备件延误时间

保障可用性是保障敏感性可用性的简称,用于评估完全由于装备保障供应工作对系统运行造成的影响。反应保障供应工作效率是对保障能力的综合评估,保障可用性高表明保障供应及时高效,管理决策水平高。

3.4 业务性评估

业务性指标是与综合气象观测网运行监控实际业务相关的一类评估指标,主要用来评估日常业务

性工作的开展情况。业务性指标中包括探测系统运行时间达标率,即运行时间超额率(R_o)、日常维护报告率(R_{rd} 、 R_{rw} 、 R_{rm} 、 R_{ry})、故障报告填报率(R_f)、维修报告填报率(R_{cm})等。具体如表 4 所示。

运行时间超额率 R_o 。主要是考核存在业务应观测时间设备有关的一个指标,如我国因存在汛期和非汛期,我国新一代天气雷达业务运行时间也不相同,一般汛期全天候进行开机观测,而非汛期一般为上午 10 时到下午 15 时进行开机观测。

表 4 业务性评估范畴
Table 4 Daily job evaluation category

评估范围	评估指标	符号	计算方法	指标说明
日常业务	运行时间超额率	R_o	$(T_o - T_w) / T_w$	超过规定运行时间的比率
	值班记录填报率	R_{rd}	/	实际填报次数占应填报次数的比率
	故障报告填报率	R_f	/	
	维修报告填报率	R_{cm}	/	
维护报告填报情况	周维护填报率	R_{rw}	每周 1 次	实际填报次数占应填报次数的比率
	月维护填报率	R_{rm}	每月 1 次	
	年维护	R_{ry}	每年 1 次	有/未做此维护

注: T_w 为气象业务规定应该开机运行的时间。

3.5 经济性评估

经济性指标是围绕经济效益进行的,主要是寿命周期费用分析和经济可行性分析,包括探测系统运行成本、保障成本和维修成本等。

经济性指标将作为长远目标进行研究。

4 综合评估指标体系适用性

气象探测业务运行评估指标体系具有广泛的适用性。从运行评估的设备来看,不仅适用于单一气象探测系统,而且适合于天气雷达、探空系统、自动气象站、气象资源观测设备等多种气象探测系统的运行评估;按地理区域来说,适合于对国家级、省级、地市级和台站级等多级区域范围内气象探测系统的综合评估。

在实际运行监控评估中,将根据实际条件,可以有选择地进行成熟项目的评估,并在实施中逐步改进和完善。

5 应用分析实例

目前综合气象观测网中部分气象探测系统缺乏可评估信息,本实例以新一代天气雷达为代表,针对各种探测系统采用指标体系中适当的指标进行评

估。主要分析 2008 年 1 月 1 日至 10 月 30 日期间的运行情况。

5.1 天气雷达运行评估

新一代天气雷达是目前我国综合气象观测网中监控信息比较多的探测系统,但不同型号设备可提供的信息不同,所以,我国新一代天气雷达的可评估性也存在较大差异。天气雷达运行评估是以雷达系统运行状态可用性分析为主,以通信传输能力、维修能力、保障供应能力分析为辅。通过对 2008 年 1 月 1 日至 10 月 30 日期间天气雷达的运行情况,按天气雷达型号进行了评估和分析,在统计雷达出现故障次数基础上,分析统计平均维修时间、平均保障延误时间,评估雷达的可用性,表 5 是几个主要评估指标的计算结果。

表 5 天气雷达运行可用性计算结果
Table 5 The results of the weather radar operation availability

评估指标	型号						备注
	SA	SB	SC	CB	CC	CD	
运行状态/%	94.20	88.20	94.30	92.90	92.80	89.30	运行可用性
通信传输/%	98.01	98.18	97.71	97.49	96.72	92.75	数据到报率
维修能力/%	97.90	95.10	98.50	98.20	98.80	97.00	维修可用性
保障能力/%	98.40	94.30	98.70	98.20	98.90	96.70	保障可用性

为了方便进行综合对比分析,对相应评估项目采用按评估指标分为优、良、中、差进行评价归类分

级,分别用 A、B、C、D 表示。表 6 为采用装备状态、装备性能、通信传输、维修能力以及供应保障能力 5 个方面对 2008 年 1 月至 10 月我国各型号天气雷达运行状况的综合分析评估结果。

表 6 我国各型号天气雷达运行综合评估
Table 6 Synthesis evaluations of the different types of weather radar in China

评估指标	型号						备注
	SA	SB	SC	CB	CC	CD	
装备状态	A	B	A	A	A	B	运行可用性分析
装备性能	A	A	D	B	C	D	参数可用定性评估
通信传输	A	A	B	B	B	C	数据到报率
维修能力	B	C	A	A	A	B	维修可用性分析
供应保障	A	C	A	A	A	B	维修可用性分析

从统计分析结果看,评估结果与我国新一代天气雷达实际运行情况具有较好的一致性。

5.2 自动站运行评估

自动气象站系统由于系统顶层设计等原因,缺乏状态监控信息。这里只对数据质量和通信传输能力进行评估,分析结果见表 7。从统计分析结果看,由于数据质量可用性实际上是对包含数据到报情况的探测系统综合分析,对数据质量可用性分析有很大影响,造成与人们通常的探测设备质量概念不一致,特别是 Vaisala 自动站。分析原因主要是地域和气候影响,Vaisala 自动站大部分安装在西藏和青海,通信条件比较差。

表 7 自动站系统运行评估结果分析
Table 7 The results of the AWS operation availability

评估指标	Vaisala	长春厂	广东	华创	天津厂	无锡所	备注
数据质量/%	95.42	96.47	93.1	97.19	97.03	98.02	数据可用性,数据到报有一定影响
	B	B	C	A	A	A	
通信传输/%	95.53	96.57	93.12	97.3	97.14	98.09	数据到报率
	B	B	C	A	A	A	

5.3 探空系统运行评估

探空系统相对而言是最稳定的探测系统,探测数据到报率稳定在 100%,但有时会有重复报、逾限报出现。探测数据质量实时监控方法有待开发。下面从探空系统运行情况,统计 L 波段探空雷达部件稳定性。

通过对 2008 年 1 月 1 日至 2008 年 10 月 30 日期间探空系统的报警情况统计,发现报警发生的部件主要有印刷版、驱动电源、程序方波、仰角限位、精

扫触发、粗扫触发等共 24 类。从统计结果来看,全国 80 部 L 波段探空雷达共有各类部件报警 6889 起,报警的具体分布如图 3 所示。从图中可以看出,印刷版产生报警的情况最严重,占总类报警的 53%,驱动电源产生报警的情况所占的比重最小,仅占报警总量的 2%。

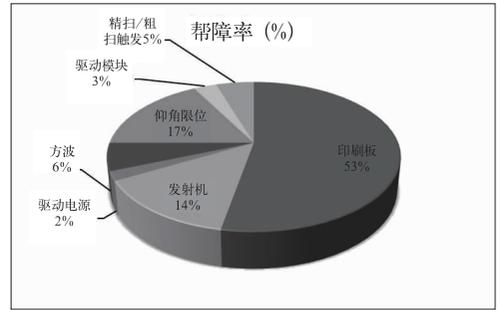


图 3 L 波段探空系统部件报警分析
Fig. 3 Analysis of L band sounding system alarm parts

6 结 语

针对国内气象探测装备研发和业务运行中的不足,按照气象探测装备全寿命周期为线索,依托综合气象观测网运行监控系统,以装备技术保障工程方法为基础,从我国气象探测业务的实际特点出发,提出可靠性、维修性、保障性、业务性、经济性等多个范畴,从装备运行状态、装备性能参数、探测数据质量、通信传输、供应保障、维护维修等方面提出了针对我国综合气象观测网中各类设备的运行、维护和保障等工作的综合评估指标体系,提供了各类指标具体计算方法。通过对 2008 年各型号新一代天气雷达业务运行情况的实际分析评估,评估结果能够较好地反映天气雷达实际运行情况。

综合气象观测系统业务运行综合评估技术的建立,对开展综合气象观测网运行监控业务具有一定的指导意义。为实现综合气象观测网气象探测设备运行综合评估体系更加科学化、更符合气象探测运行监控与保障实际业务的需求,还需要持续性的开展如下相关研究工作:(1) 建立装备监控信息需求规范,提供有效监控评估信息;(2) 面向数据质量的评估。目前数据质量监控技术还不成熟,需要加强数据质量监控技术方法研究,提高观测数据质量的可靠性,获取高质量探测数据;(3) 面向运行保障评估,深化维护维修、供应保障信息化、系统化管

理,理清维修业务级别、实际维修时间、备件级别和时间、管理延误原因和时间等等,通过评估分析提高装备管理水平;(4)深化系统效能分析研究,从简单技术评价向经济评价、效能评价、综合评价方向发展。

参考文献

- [1] 宋连春,李伟.综合气象观测系统的发展[J].气象,2008,36(34):3-9.
- [2] 李雄.1980年地面气象观测规范变更对能见度资料连续性影响研究[J].气象,2010,36(3):117-122.
- [3] 何志军,封秀燕,等.气象观测资料的四方空间一致性检验[J].气象,2010,36(5):118-122.
- [4] 刘旭林,赵文芳.气象观测数据等值线自动绘制系统[J].气象,2009,35(4):104-107.
- [5] 吕文华,边泽强.地面气象观测站自动检测系统研究[J].气象,2009,35(2):106-110.
- [6] Crow L H. Estimation procedure for the duane model:ADA0139372[R]. Aberdeen Proving Ground, Maryland: Unite States Army Material Systems Analysis Activity, 1972: 32-44.
- [7] Department of Defense Washington DC. MIL2HDBK2189 Reliability growth management[S]. Washington DC, USA: Department of Defense, 1981: 130-134.
- [8] U. S. Air Force. Air force reliability and maintainability program[R]. AFR80-5, 1978.
- [9] 郑开陞. 导弹冲击规范的制订及其可靠性[J]. 强度与环境, 1979, 4: 23-17.
- [10] 李立强. 宇航工程可靠性研究中的加速试验技术[J]. 强度与环境. 1979, 3: 54-62.
- [11] 顾基发, 赵丽艳. 航天系统安全性分析的概率风险评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(8): 28-31.
- [12] 刘浩华. 后勤装备保障效能评估研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2006, 17(3): 29-30.
- [13] 杨秉喜. 雷达综合技术保障工程[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002, 10-80.
- [14] 丁朝阳, 唐万年. 多级模糊综合评判法在气象服务保障能力评估中的应用[J]. 气象科学, 2005, 1(25): 48-54.
- [15] 李雁, 梁海河, 孟昭林, 等. 自动气象站运行效能统计[J]. 应用气象学报, 2009, 4(20): 504-509.
- [16] 花兴来, 刘庆华. 装备管理工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 100-150.
- [17] 中国气象局大气探测技术中心. 气象探测全网运行监控系统功能规格书[R]. 2007: 10-25.
- [18] 中华人民共和国国家标准. 可靠性维修性术语(GB/T 3178-94)[M]. 1995: 5-8.
- [19] 杨为民, 阮键, 俞沼, 等. 可靠性维修性保障性总论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 1-20.
- [20] 陶士伟, 徐枝芳. 加密自动站资料质量保障体系分析[J]. 气象, 2007, 2(33): 34-41.
- [21] 陶士伟, 张跃堂, 陈卫红, 等. 全球观测资料质量监视评估[J]. 气象, 2006, 6(32): 53-57.