

# 太湖流域水文遥测系统可靠性分析

颜恩祝

(水利部太湖流域管理局, 上海 200434)

**提 要** 水文遥测系统工作制式不同, 系统的验收标准也不同. 水文遥测系统的组网结构不同, 系统可靠性的分析方法也不同. 本文用概率方法对太湖流域水文遥测系统的可靠性进行分析, 对带存储功能的应答系统采用系统可靠度衡量, 而不采用月平均数据通过率衡量; 同时讨论不同的系统结构对可靠性的影响. 这种以概率统计的方法分析水文遥测系统的可靠性, 对水文遥测系统建设的验收标准制定和水文遥测系统结构设计具有重要意义.

**关键词** 水文遥测系统 可靠度 分析

**分类号** P332

太湖流域地处长江三角洲, 位于东经  $119^{\circ}11'$  至  $121^{\circ}53'$ , 北纬  $30^{\circ}28'$  至  $32^{\circ}15'$  之间, 面积约  $36520\text{km}^2$ . 西以茅山、天目山为界, 北抵长江, 南濒杭州湾, 东临东海. 本区内人口稠密, 城镇密布, 内有上海、苏州、无锡、常州、镇江、杭州、嘉兴、湖州等大中城市, 乡镇企业发达, 是中国经济最发达地区之一. 为满足太湖流域的洪水调度需要, 自 1991 年太湖大水后, 结合太湖流域综合治理, 利用世界银行贷款, 于 1995 年从加拿大引进遥测设备, 并于 1997 年基本建成太湖流域水文遥测系统. 本着信息共享, 根据防汛信息采集需要, 全流域共建有 76 个测站, 划为苏州、无锡、常州、镇江、湖州、嘉兴和上海青浦分中心 7 个分中心. 各分中心利用公众数据交换网将数据传送到水利部太湖流域管理局(简称局中心). 本系统采用计算机广域网和超短波无线遥测网混合组网方式(系统拓扑结构见图 1), 实现多级网络, 分级管理, 因此系统的可靠性不仅与设备本身有关, 还与系统结构有关. 本文用概率的方法对太湖流域水文遥测系统的可靠性进行分析, 探讨水文遥测系统的验收标准和系统结构设计影响.

## 1 系统可靠性

### 1.1 定义

系统的可靠性与系统出现的故障有关, 故障除与设备本身的可靠性有关外, 还与系统备份与否有关. 由于故障具有随机性, 同一产品不一定同时损坏, 系统故障只能用概率表示, 因此系统可靠性也只能用概率表示, 为此可靠性定义为系统正常运行的概率. 水文遥测系统可靠性分析可从以下两个角度进行.

(1) 信息源: 水文遥测系统的有效性是以水情信息的收集来衡量的, 不管那个环节出现故障, 只要某个水情信息不能收集, 就认为系统有故障, 在这里以局中心为出发点的, 所指的系统故障并不排除某个(或全部)分中心能正常收集信息.

(2) 网络: 太湖流域水文遥测系统是一个层次式的网络结构, 系统的可靠性可以只考虑高

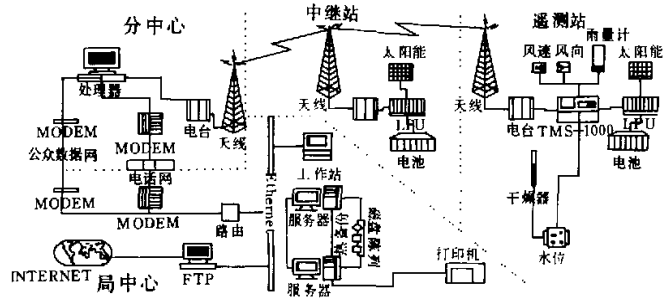


图1 太湖流域水文遥测系统结构拓扑图

Fig.1 Topology of Hydrological Data Acquisition System Structure (HDAS) in Taihu Basin

层次的节点正常工作,就算系统并未失效,对于测站或传感器的故障,虽然影响了部分信息的收集,仍认为网络并未失效.

在水文遥测系统的可靠性分析中还引入串接系统和并接系统的概念.串接系统是指系统的运行以各设备全部运行为充要条件,即只要系统中一个设备故障,就认为系统存在故障;并接系统故障的充要条件是各并接设备全部失效,如中继站有备份,只有在主、备中继站同时发生故障时才被认为失效.为与月平均数据畅通率<sup>[2]</sup>(该指标较适合于自报式,对带存储功能的应答系统不适合)对应,本文采用串接系统信息源定义方法进行分析.

## 1.2 系统可靠性相关参数

一个系统投入运行后有两种状态:正常运行和故障(或失效)状态.系统不但有从运行状态转移到失效状态,而且也有从失效状态转移到正常运行状态.因此,在分析系统的可靠性时可引入以下参数:

(1)可靠度  $R(t)$  定义:系统运行了时间  $t$  时仍在正常工作的概率.

(2)失效率  $\alpha$  定义:当  $t$  时系统正常运行的条件下,在  $t$  到  $t + \Delta t$  内失效的条件概率为  $\alpha \Delta t$ .当  $\alpha$  为常数时,平均故障间隔时间  $MTBF = 1/\alpha$ .

(3)修复率  $\beta$  定义:当  $t$  时处于失效状态的条件下,在  $t$  到  $t + \Delta t$  内修复的概率为  $\beta \Delta t$ .当  $\beta$  为常数时,平均故障修复时间  $MTTR = 1/\beta$ .

## 1.3 系统可靠性分析

(1)对于可修复系统:根据上述参数定义,可列出可靠度  $R(t)$  的微分方程<sup>[1]</sup>.若  $R(t + \Delta t)$  是在  $t + \Delta t$  时系统正常运行的概率,到达运行状态有两种情况:即  $t$  时在运行,  $t$  到  $t + \Delta t$  之间系统不出故障;在  $t$  时已发生故障,  $t$  到  $t + \Delta t$  之间系统恢复运行.因此可得:

$$R(t + \Delta t) = R(t)(1 - \alpha \Delta t) + [1 - R(t)]\beta \Delta t \quad (1)$$

令  $\Delta t \rightarrow 0$ , 整理后得

$$R'(t) = \beta - (\alpha + \beta)R(t) \quad (2)$$

由于  $\alpha$  和  $\beta$  为统计平均值,可视为常量,上式为一阶微分方程,其起始条件为:

$$R(0) = 1, \quad R(t) = \frac{\beta}{\alpha + \beta} + \frac{\alpha}{\alpha + \beta} e^{-(\alpha + \beta)t}$$

$$R(0) = 0, \quad R(t) = \frac{\beta}{\alpha + \beta} (1 - e^{-(\alpha + \beta)t})$$

当  $t \rightarrow \infty$ , 可得稳态下系统可靠度为:

$$R = \frac{\beta}{\alpha + \beta} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3)$$

(2) 对于串接系统: 串接系统的可靠度  $R$  就是各子系统的可靠度  $R_r$  的乘积, 即:

$$R = \prod_{r=1}^n R_r = \prod_{r=1}^n \frac{\beta_r}{\alpha_r + \beta_r} = \frac{1}{\prod_{r=1}^n (1 + \frac{\alpha_r}{\beta_r})} \quad (4)$$

(3) 平均故障间隔时间: 由失效率  $\alpha$  的定义可得条件概率:

$$R(t + \Delta t) = R(t)(1 - \alpha \Delta t)$$

令  $\Delta t \rightarrow 0$ , 得可靠度的微分方程为:

$$R'(t) = -\alpha R(t)$$

设  $\alpha$  为常量, 起始条件为  $R(0) = 1$ , 可解析得:

$$R(t) = e^{-\alpha t}$$

当各子系统有不同的失效率  $\alpha_r$  时, 串接系统的可靠度为:

$$R(t) = e^{-t \sum_{r=1}^n \alpha_r}$$

即串接系统的平均故障间隔时间为:

$$MTBF = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sum_{r=1}^n \alpha_r} = \frac{1}{\sum_{r=1}^n \frac{1}{(MTBF)_r}} \quad (5)$$

## 2 太湖流域水文遥测系统可靠性分析

### 2.1 系统规模

太湖流域水文遥测系统由 1 个局中心、7 个分中心、9 个中继站和 76 个遥测站组成。传感器有水位计、雨量计和风力风向仪等, 累计 152 个。

### 2.2 系统结构

太湖流域水文遥测系统通信网络构为星型结构(系统结构示意图如图 2)。从结构图可以看出是一种根树结构, 即在任何两端间有径且只有一条路径。从信息采集角度分析, 本系统为串接系统。

### 2.3 参数取定

计算可靠性的各参数以水文自动测报系统规范的要求进行估算。根据规范规定<sup>[2]</sup>单个遥测站、中继站、中心站设备的平均无故障工作时间(MTBF)一般应大于 5000h, 传感器的 MTBF 应大于或等于 16000h。

### 2.4 系统平均故障间隔时间 MTBF

由于系统内各设备的独立性, 从信息源的角度分析, 只要系统内有一个设备故障, 就认为系统有故障(或失效)。因此, 根据式(5)可得系统的平均故障间隔时间 MTBF 为 36h。

### 2.5 系统可靠度计算

由上述系统可靠度计算方法, 如果故障修复时间从 24h 降为 6h(假设各分中心均有维护

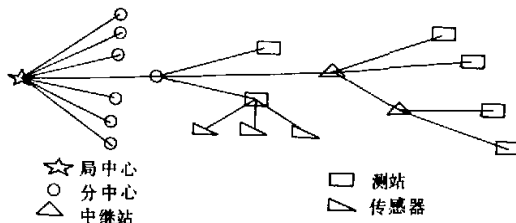


图 2 太湖流域水文遥测系统结构示意图

Fig. 2 Sketch of Hydrological Data Acquisition System Structure in Taihu Basin

人员), 则根据式(3), 可以得到系统的可靠度  $R$ . 当  $MTTR = 24\text{h}$  时,  $R = 0.6$ ; 当  $MTTR = 6\text{h}$  时,  $R = 0.857$ .

综上所述, 提高平均故障修复时间, 可明显提高系统的可靠性.

### 2.6 各分中心系统可靠度计算

与全系统的可靠性分析类似, 可得各分中心子系统的平均故障间隔时间和系统可靠性. 以平均修复时间  $MTTR$  为  $6\text{h}$  计算结果如表 1.

表 1 分中心水文遥测系统可靠性分析结果

Tab. 1 Analytical results of reliability of hydrological data acquisition system from sub-areas

分中心	中继站	测站	MTHF	可靠性
苏州分中心	2	16	172	0.966
无锡分中心	2	11	240	0.976
常州分中心	2	8	313	0.980
镇江分中心	1	3	727	0.992
湖州分中心	2	12	222	0.974
嘉兴分中心	1	10	273	0.978
青浦分中心	0	16	185	0.969
系统可靠性				0.846

## 3 1999 年汛期太湖流域水文遥测系统可靠性估算

1999 年汛期太湖流域遭遇特大洪水, 太湖水位创历史最高, 达  $5.08\text{m}^{[3]}$ . 太湖流域水文遥测系统在特大洪水中经受住考验, 发挥了很大的作用, 为各级防汛部门提供及时、可靠的水文信息. 现对 1999 年汛期(从 5 月 1 日—10 月 1 日, 计  $3672\text{h}$ )的系统可靠性进行估算.

### 3.1 1999 年汛期故障统计

对太湖流域水文遥测系统 1999 年汛期维修纪录进行统计分析, 剔除无线信道问题和 X.25 线路故障外, 系统故障统计如表 2.

### 3.2 平均无故障工作时间和故障修复时间

根据上述故障统计分析, 整个汛期系统故障累计 40 站次(有些为重复性故障), 则汛期系

统平均无故障工作时间 MTBF 为 91.8h. 由于太湖流域交通便捷, 并得到各级防汛部门的高度重视, 缩短了故障修复时间, 因此今年汛期系统平均故障修复时间 MTTR 取 8h.

表 2 汛期系统故障统计结果

Tab. 2 Statistical results of trouble of hydrological data acquisition system

	局中心维修站次	分中心维修站次
局中心	无	无
分中心	2	2
中继站	无	无
测站(不含传感器)	10	18
水位传感器	无	3
风力/风向传感器	5	无
雨量传感器	无	无
合计	17	23

### 3.3 系统可靠性估算

根据式(3)可计算 1999 年汛期太湖流域水文遥测系统的可靠度  $R = 91.98\%$ .

因此, 太湖流域水文遥测系统在抗御 1999 年太湖特大洪水中, 以其高可靠性为防汛调度提供服务, 获得各级防汛、水文部门的好评. 1999 年汛后评估, 太湖水文遥测系统的减灾效益为 0.92 亿元.

## 4 提高水文遥测系统可靠性的措施

### 4.1 提高设备本身可靠性

太湖遥测系统经过近两年多的试运行和运行, 解决了遥测终端和电台之间的通信以及雨量计的环境适应等问题, 提高了设备本身的可靠性, 使系统在抗御 1999 大洪水中充分发挥了遥测数据在防汛中的作用.

### 4.2 提高系统维护水平

太湖局信息中心在 1999 年汛前对系统进行了全面检修, 对故障设备进行更换, 保证系统正常工作. 并于汛前组织分中心技术人员举办一次交底式技术培训, 提高了分中心技术人员的管理、维护水平.

### 4.3 缩短故障修复时间

在 1999 年大洪水期间, 要求各分中心发现故障后在 4h 内赴现场及时排除故障, 提高了水文信息的畅通, 为防汛部门提供即时水文信息, 大大提高了水文遥测系统的可靠性.

### 4.4 减少串接子系统

在水文遥测系统中, 采用超短波通信时由于受地形等因素的限制, 有些信息采集点需要经过多级中继而中继路径只有一条, 使系统可靠性大大降低. 因此在系统设计时应尽量简化系统结构, 减少转接次数.

### 4.5 并接回路提高可靠性

水文遥测系统结构从串接系统改为部分并接系统, 增加备份可提高系统的可靠性. 如湖州分中心的德清站由于上行信道的畅通率较低, 后将新市站以测站兼中继的方式, 为德清站并接

了一通路,提高了德清站的畅通率。

#### 4.6 公网为主专网辅助

在 1999 年大洪水中, X.25 信道的故障率最高,影响局中心水文信息的收集和分中心之间的信息共享。从 1999 年汛期的运行情况分析,在条件允许时应增加备用信道,如利用水利卫星专网通道作为迂回路由,提高系统的可靠性。

### 5 结论

通过以上对太湖流域水文遥测系统的可靠性分析,要提高系统的可靠性,必须在提高设备本身可靠性的同时,加强维护队伍的建设,提高维护人员的技术水平。另外,从系统结构看,由于串接系统中没有备份,任何设备的故障都导致信息收集的故障,因此可以增加设备的备份,尤其是分中心和中继站需要备份。为提高系统的可靠性,可在分中心设立冷备份,中继站可设热备份,使系统存在并接部分,可进一步提高系统的可靠性。

### 参 考 文 献

- 1 周炯槃. 通信网理论基础. 北京: 人民邮电出版社. 1991. 269 - 328
- 2 水利部. 水文自动测报系统规范(SL 61-94). 北京: 水利电力出版社. 1994. 12 - 13
- 3 吴泰来. 太湖流域 1999 年特大洪水和对防洪规划的思考. 湖泊科学, 2000, 11(3): 6 - 11

## Reliability Analysis of Hydrological Data Acquisition System (HDAS) in Taihu Basin

YAN Enzhu

(*Taihu Basin Authority, Ministry of Water Resources, Shanghai 200434, P. R. China*)

### Abstract

The checking and accepting standards of Hydrological Data Acquisition System (HDAS) construction vary with its work mode. The analytical methods of HDAS reliability could be different under different structures. The reliability of the built-up of HDAS in Taihu Basin is discussed in this paper by means of probability analysis. The reliability is better to measure the polling-answering system with memory than the accessible rate of a monthly average, and the reliability has been influenced by the system structure. It is of great significance that the reliability of HDAS is studied by the probability-statistics on the draft of checking and accepting standards of the system construction and the structure design of HDAS.

**Key Words** Hydrological Data Acquisition System, reliability analysis, Taihu Basin