1994年3月
第17卷第2期

重庆大学学报
JOURNAL OF CHONGQING UNIVERSITY

Vol.17,№.2
Mar.1994

(5) 26-32

我国首台γ射线工业CT计算机体系可靠性的分析*

Analyses of XN-1300ICT Computer System Reliability

蒋立俊　　徐问之
Jiang Lijun　　Xu Wengzi
(重庆大学信息学院,重庆,630044)

TP391.41

A

摘　要　比较了国内外CT的计算机体系结构;针对我国首台γ射线工业CT(XN-1300ICT)的计算机体系的可靠性进行了分析;同时从提高可靠度及系统连续运行时间的角度出发,提出了确定计算机体系内备件配置量的方法。

关键词　计算机体系结构;可靠性/ICT　γ射线

中国图书资料分类法分类号　TP 302.7

ABSTRACT　It has summarized the structure of CT's computer at home and abroad, and qualitatively analyzed XN-1300 ICT's computer system reliability in this paper. Meanwhile, the method of how to determine the deposition numbers of spare parts is put forward, which is realized from improvement of reliability and continual time in motion of system.

KEYWORDS　computer architecture; reliability / ICT

0　引　言

ICT(Industry Computerized Tomography)用于工件的无损检测,该项技术国外从80年代起逐步用于航天、核工业、微电子、新材料、生物工程等高新技术领域;还可广泛用于材料工业、钢铁冶金、机械制造、石油化工等工业领域。XN-1300ICT是我国第一台γ射线ICT,对其计算机体系特点及计算机体系部分的可靠性作如下分析。

1　XN-1300ICT 计算机体系

系统分数据采集、图像重建、图像显示和处理三个子系统,其中图像重建的计算过程有如下特点:1)基本演算过程单一,一次运算过程数据量多;2)多数计算步骤可用简单的重复方式实现;3)常用的运算环节可用少量组合过程实现。

因此可仿效高速大型并行、流水线工作原理,采用阵列结构等形式的专用图像处理机,

* 收文日期　1993-08-27

使其承担成像的主要运算，而控制和管理任务交给主机完成，所以目前一般 CT 的计算机方案是采用小型机加专用阵列处理机，如 Somaton 医用全身 CT（西德），主机是 PDP11/44，阵列机是采用 BSP-11专用图像处理机；又如 Toshiba 全身 CT，主机是 T-7120E，阵列机是利用 BGR 高速算术部件，用 AM2900系列位片搭成。

受经费等诸多因素的影响，XN-1300ICT 计算机体系方案是用一套高档微机作为主机 CM 与两套 STD 工控机 C Ⅰ、C Ⅱ 组成主从式体系，实现对检测工件的断层扫描、数据采集、图像重建与数据处理全过程。数据采集系统实现 CM、C Ⅰ、C Ⅱ 在线过程，其中系统运行控制功能由主控下位机 CⅠ 与主机 CM 协作完成；采集实验数据功能由采传下位机 C Ⅱ 与 CM 协作完成，并将采集结果存入 CM 存贮器中，而图像重建子系统是由主机 CM 以及图像加速板子系统完成，见图1。

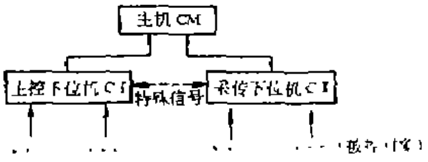

图 1　计算机体系简图

2　XN-1300ICT 计算机部分可靠性的定性分析

2.1　几个概念

产品（或系统）在规定的条件和时间范围内完成其预定功能的能力，称为产品的可靠性。

产品（或系统）在规定条件和规定时间 t 内完成预定功能的概率，称为产品（或系统）的可靠度，记为 $R(t)$. 可靠度是可靠性的重要数量指标之一，它与规定的条件和时间密切相关，规定条件是指产品工作时所处的环境，如温度、湿度和应力等；规定的时间是指产品在其有效寿命期内的任何时间，其可靠度不低于规定值。

因可靠度是时间的函数，故可靠度与发生故障的频率有关。一般元器件在寿命中经过早期失效期，随机失效期和耗损失效期三个阶段，其失效率曲线形似一浴盆，在随机失效期内其失效率近似为一常数，这是能连续工作到某一时间 t 的概率，也就是可靠度 $R(t)$，一般按负指数律分析，即 $R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-t/D}$，$\lambda$ 为失效率，其倒数 $1/\lambda = D$，即 D 为其平均失效间隔时间。

修复度 $M(t)$ 是表示修理到时间 t 得以修复的概率。

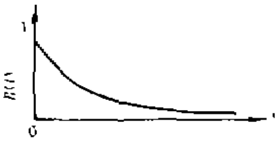

图 2　可靠度函数曲线

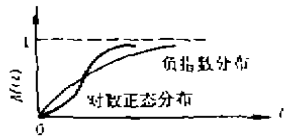

图 3　修复度函数曲线

2.2　可靠性分析

如图1所示，这里 CM、C Ⅰ、C Ⅱ 各设为一子系统，则 C Ⅰ、C Ⅱ、CM 结构框图可用串联结构表示成：

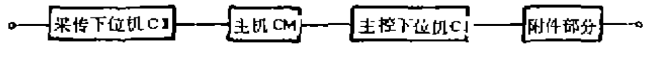

图 4　C Ⅰ、C Ⅱ、CM 串行结构框图

设主机、采传下位机、主控下位机、附件部分的可靠度分别为 $R_m(t)$、$R_{CⅠ}(t)$，$R_{CⅡ}(t)$ 和 $R_Ⅱ(t)$. 附件部分包括打印机、电源设备、显示器 CRT 等。则整个计算机体系的可靠度就为以上各项之积，即 $R(t) = R_m(t) \cdot R_{CⅠ}(t) \cdot R_{CⅡ}(t) \cdot R_Ⅱ(t)$，现根据一些典型资料数据(见表 1)，求出 $R(t)$.

表 1　CM、CⅠ、CⅡ 及附件的台数、$N_i\lambda_i$

部件	D/h	台数	$N_i\lambda_i$ 次 /h
主机 CM	4000	1	0.25×10^{-3}
CⅠ	4000	1	0.25×10^{-3}
CⅡ	4000	1	0.25×10^{-3}
打印机	2000	1	0.5×10^{-3}
CRT	5000	1	0.2×10^{-3}
电源设备	10000	1	0.1×10^{-3}

$R_m(t) = e^{-0.25\times10^{-3}t}$，$R_{CⅠ}(t) = R_{CⅡ}(t) = e^{-0.25\times10^{-3}t}$，$R_Ⅱ(t) = e^{-0.8\times10^{-3}t}$

$\sum N_i\lambda_i = (0.25 + 0.25 + 0.25 + 0.5 + 0.2 + 0.1) \times 10^{-3} = 1.55 \times 10^{-3}$ 次 /h

$R(t) = R_m(t) \cdot R_{CⅠ}(t) \cdot R_{CⅡ}(t) \cdot R_Ⅱ(t) = e^{-1.55t\times10^{-3}}$

即系统的故障率为 1.55×10^{-3} 次 /h，则故障平均间隔时间约为 645h，即系统连续运行 48 小时可靠度为 $e^{-1.55\times48\times10^{-3}} = 92.83\%$.

从 $R(t)$ 的表达式可知：系统的可靠度既取决于主机及附件部分的性能、质量，也取决于 CⅠ、CⅡ 的可靠度。前者是生产厂家的责任；而后者则要靠设计者通过合理的设计来达到，但其值的提高幅度是有限的，这是由于串联结构的系统没有任何备份和余量，当其中某一部件损坏时，都将导致失效。所以要想提高可靠性，必须具有一定的贮备，也就是说即使少许零件或设备失效，也不会导致系统失效。

利用贮备提高可靠性最简单的形式是并联形式，它分两种情况。即冷贮备(指贮备在存贮时不参与工作，并且贮备时不出现失效) 和热贮备(贮备的备件也参与工作)。

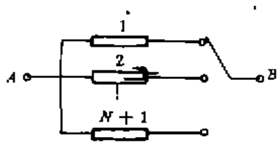

图 5　冷贮备

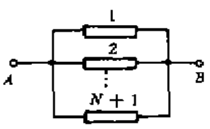

图 6　热贮备

1) CⅠ、CⅡ 各配一备件(CⅠ、CⅡ 可修复) 且转换开关完全可靠，则系统连续运转到时间 t 的可靠度及寿命 T 为：

① 冷贮备时(一套 CⅠ、CⅡ 工作，一套冷备)

$R_{CⅠ}(t) = R_{CⅡ}(t) = (s_1e^{s_1t} - s_2e^{-s_1t}) / (s_1 - s_2)$，式中 $s_1 = -0.5\{(2\lambda - \mu) + \sqrt{\mu^2 + 4\mu\lambda})\}$，$s_2 = -0.5\{(2\lambda + \mu) - \sqrt{\mu^2 + 4\mu\lambda})\}$，式中 μ 为修复率，λ 为失误率，在 $\mu \geqslant 10\lambda$ 时，可取近似式 $R_{CⅠ}(t) \approx e^{-\lambda^2t/(2\lambda+\mu)}$，寿命 $T = (2\lambda + \mu) / \lambda^2$.

② 热贮备时(二套 CⅠ、CⅡ 同时工作)

$R_{c\,\mathrm{I}}(t) \approx R_{c\,\mathrm{II}}(t) = (s_1 e^{s_2 t} - s_2 e^{-s_1 t}) / (s_1 - s_2)$，式中 $s_1 = -0.5\{(3\lambda + \mu) + \sqrt{\lambda^2 + 6\mu\lambda + \mu^2})\}$，$s_2 = -0.5\{(3\lambda + \mu) - \sqrt{\lambda^2 + 6\mu\lambda + \mu^2})\}$，在 $\mu \geqslant 10\lambda$ 时，$R_{c\,\mathrm{I}}(t) \approx e^{-2\lambda^2 t/(3\lambda+\mu)}$，$T = (3\lambda + \mu) / 2\lambda^2$.

现根据一些典型资料的数据（见表2）求出$C\,\mathrm{I}$、$C\,\mathrm{II}$ 的可靠度和平均使用寿命，表中Q为故障平均修复时间。

表 2　$C\,\mathrm{I}$、$C\,\mathrm{II}$ 的MTBF、MTTR、设备数、运转数、储备方式、λ、μ

设备名	D/h	Q/h	设备数	运转数	储备方式	$10^3\lambda$/(次·h^{-1})	μ/h^{-1}
$C\,\mathrm{I}$	4000	5	2台	1	冷(热)	0.25	0.2
$C\,\mathrm{II}$	4000	5	2台	1	冷(热)	0.25	0.2

冷：

$$R_{c\,\mathrm{I}}(t) \approx R_{c\,\mathrm{II}}(t) = e^{-\lambda^2 t/(2\lambda+\mu)} = e^{-3.18\times 10^{-7}t}$$

$$R_{c\,\mathrm{I}}(t)(\text{冷}) / R_{c\,\mathrm{I}}(t) = e^{-\lambda^2 t/(2\lambda+\mu)} / e^{-\lambda t} = e^{(\lambda^2+\lambda\mu)t/(2\lambda+\mu)} > 1$$

$$T = (2\lambda + \mu) / \lambda^2 = 3.18 \times 10^6 \text{ 小时}$$

热：

$$R_{c\,\mathrm{I}}(t) \approx R_{c\,\mathrm{II}}(t) = e^{-2\lambda^2 t/(3\lambda+\mu)} = e^{-6.225\times 10^{-7}t}$$

$$R_{c\,\mathrm{I}}(t)(\text{热}) / R_{c\,\mathrm{I}}(t) = e^{-2\lambda^2 t/(3\lambda+\mu)} / e^{-\lambda t} = e^{(\lambda^2+\mu\lambda t)/(3\lambda+\mu)} > 1$$

$$T = (3\lambda + \mu) / 2\lambda^2 = 1.606 \times 10^6 \text{ h}$$

2)$C\,\mathrm{I}$、$C\,\mathrm{II}$ 各有两套备件

① 冷备：

$$R(t) = [-s_2 s_3 (s_2 - s_3) e^{s_1 t} - s_3 s_1 (s_3 - s_1) e^{s_2 t} - s_1 s_2 (s_1 - s_2) e^{s_3 t}] / s$$

$$s = (s_1 - s_2)(s_2 - s_3)(s_3 - s_1)$$

式中 s_1、s_2、s_3 在故障设备只能逐个修理时为下列方程之三根：

$$s^3 + (3\lambda + 2\mu)s^2 + (3\lambda^2 + 2\mu\lambda + \mu^2)s + \lambda^3 = 0$$

而在 $\mu \geqslant 10\lambda$ 时，$R(t) \approx e^{-\lambda^3 t/(3\lambda^2+2\mu\lambda+\mu^2)}$，$T = (3\lambda^2 + 2\mu\lambda + \mu^2) / \lambda^3$，在故障设备可并行修理时，$s_1$、$s_2$、$s_3$ 则为方程式

$s^3 + 3(\lambda + \mu)s^2 + (3\lambda^2 + 3\mu\lambda + 2\mu^2)s + \lambda^3 = 0$ 之三根，而在 $\mu \geqslant 10\lambda$ 时，$R(t) \approx e^{-\lambda^3 t/(3\lambda^2+3\mu\lambda+2\mu^2)}$，$T = (3\lambda^2 + 3\mu\lambda + 2\mu^2) / \lambda^3$.

② 热备：

$$R(t) = [-s_2 s_3 (s_2 - s_3) e^{s_1 t} - s_1 s_3 (s_3 - s_1) e^{s_2 t} - s_1 s_2 (s_1 - s_2) e^{s_3 t}] / s$$

$$s = (s_1 - s_2)(s_2 - s_3)(s_3 - s_1)$$

式中 s_1、s_2、s_3 在故障设备逐台修理时为方程式：$s^3 + (6\lambda + 2\mu)s^2 + (11\lambda^2 + 4\mu\lambda + \mu^2)s + 6\lambda^3 = 0$ 之三根，而在 $\mu \geqslant 10\lambda$ 时，$R(t) \approx e^{-6\lambda^3 t/(11\lambda^2+4\mu\lambda+\mu^2)}$，$T = (11\lambda^2 + 4\mu\lambda + \mu^2) / 6\lambda^3$.

很显然，随着备件数的增多，系统的可靠性及连续工作时间都将得以提高。但值得一提

的是这两种情形中冷贮备实现较困难，其中开关转换等技术涉及容错及诊断等手段；在成本允许的前提下，利用热贮备方案将大大提高系统的可靠性及寿命，实现起来也较易。

2.3 计算机体系中部件配置量的确定

从上节可知，增加贮备量可提高 $R(t)$ 及 T，那么如何确定系统中的设备配置量？

现举一简单而典型问题：设一系统在运转过程中有一部分易坏，另有 B 个部件作为冷贮备，如这部件在运转时的故障率 k 为已知，修复率 k' 也为已知，问这系统平均运转多长时间，该部件将出现一次缺备件事件？

对于这一问题，用该部件出现故障的数量 i 来表示系统在运转过程中所处的状态而以 $^{\#}i$ 表之，在 $i < B$ 时，系统中尚有良好备件，$i = B$ 时表示系统中良好备件正耗尽。图 7 给出了系统在连续运转过程中的状态转移模式（设在极短的瞬间内将不会出现两个或更多事件）.

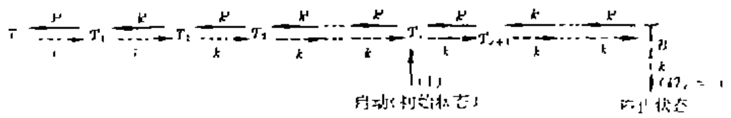

图 7 系统在连续运转过程中的状态转移模式

$J = 0$ 时，表示系统启动时，所有备件处于良好状态；$J = B$ 时，表示系统启动时，没有一个备件处于良好状态。

虚箭头表示由于系统出现故障导致的状态转移(k)，实箭头表示由于故障备件的修复导致的状态转移(k').

$kT_B = 1, kT_i - k'T_{i+1} = 0 \qquad (0 \leqslant i \leqslant j)$

$kT_i - k'T_{i+1} = 1 \qquad (0 \leqslant i \leqslant B)$

各状态间的转移次数必平衡。这里引入几个技术参数。

1) 已知缺备件时间确定备件设置量($j = B$)

$T_i = KT_{i+1} = K^2T_{i+2} = \cdots = K^{B-i}T_B$，系统连续运行时间 $T = T_B \cdot \dfrac{K^{B+1} - 1}{K - 1}$，$B = \log[kT(K-1)+1] / \log K - 1$，$K = K/k'$.

在 K 值较大时($K > 1$)，B 值也较大，以致 $K^{B+1} \gg 1$ 时，$T = T_BK^{B+1} / (k-1)$，这里表示每增加一备份，系统连续运转时间将增加 K 倍，在 B 值较大时，随着检修率的提高也可使系统运转时间得以极显著增长；在 K 值等于 1 时，$T = (B+1)T_B$，每增加一备份，系统连续运转时间可望增加一个 T_B；在 K 值较小时($K < 1$)，而 B 值较大，以至 $K^{B+1} \ll 1$ 时，$T = T_B / (k-1)$，它是 B 值无限大的情况，这表示增加备件数对系统连续运行时间影响不大，B 值愈大，作用愈小，这时不能依靠增加备件数来延长系统连续运行时间，主要地是靠增加 K 值，即减小系统故障率，提高系统修复率，后者要从增加维修力量着手。

现以 CⅠ、CⅡ 为研究对象，设 CⅠ、CⅡ 的平均修复时间 Q 为 25 小时。
则如要求系统的 CⅠ、CⅡ 缺备件的平均间隔时间大于 4000 小时，CⅠ、CⅡ 至少应配备的备份数为：

$B = \{\log[kT(K-1)+1] / \log K - 1\}$，将 $k = 5 \times 10^{-4}$ 台/小时、$k' = 0.04$ 台/小时，$K = 80$ 代入可得 $B = 0.16$，取 $B = 1$.

2) 已知首次缺备件时间确定备件设置量($j = B$)

$$T = \sum_{i=0}^{B} T_i = T_B(K^B + 2K^{B-1} + \cdots + BK + B - 1)$$

$$= \sum_{i=0}^{B}\left(\frac{K^{i+1}-1}{K-1}\right)T^B = \frac{T_0}{K-1}\left[\frac{K^{B+2}-1}{K-1} - (B+2)\right] \qquad (1)$$

① $K \approx 1$ 时，$T = \frac{1}{k} \cdot \frac{(B+1)(B+2)}{2} \Rightarrow B^2 + 3B - 2kT + 2 = 0$，解之得 $B = -\frac{3}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{9 + 8(kT - 1)}$，用上式求出 B 的第一近似解 B_1，而后再据此 B_1 值，利用(1)式求出第二近似解 B_2，即 $B_2 = \log[kT(K-1)^2 + (B_1+2)\cdot(K-1)+1] / \log K - 2$，如 B_1 与 B_2 相差较大，可令 B_2 代替上式中的 B_1，进一步求 B 的第三近似解，直到 B_i、B_{i-1} 之差小于 1，取其较大者。

② $K > 1$ 时，(1)式可近似为 $kT = \frac{1}{K-1} \cdot \frac{K^{B+2}-1}{K-1}$，从而可得 $K^{B+2} = kT(K-1)^2 + 1$，取对数得 $B_1 = \{\log[kT(K-1)^2 + 1] / \log K\} - 2$，而后再求出 B_2、B_3、…、直到 B_i、B_{i-1} 之值相近，方法同 ①。

③ $K < 1$ 时，$kT = -\frac{1}{K-1}\left[(B+2) - \frac{1}{K-1}\right]$，从而求出 B 的第一近似解 $B_1 = \left[kT(1-K) + \frac{1}{1-K}\right] - 2$，以后各步同上。

现根据一些典型资料数据(见表 3)，求出各子系统的备件配置数。

表 3　主机 C Ⅰ、C Ⅱ 及附件设备的 MTBF、MTTR、单件价格

	主机	C Ⅰ	C Ⅱ	电源设备	打印机	CRT
MTBF(小时)	4	4	4	10	2	5
MTTR(小时)	25	10	10	20	20	10
单件价格	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6

现要求系统平均缺备件的平均间隔时间大于 1200 小时，那么至少需多少费用，各子系统的备件配置如何?

解：可先设各子系统的平均故障间隔时间相等，这样按系统缺备件的平均间隔时间为 1200 小时，也就是每 1200 小时出现一次缺备件事件考虑，则各子系统每 1200 小时，出现 1/6 次缺备件事件，平均故障间隔时间为 $T^{-1} = \sum_{i=1}^{6} T_i^{-1} = 6T_i^{-1}$，$T_i = 7200$ 小时，可得各子系统的修复率与故障率之比为：160、400、400、500、100、500，此时 $K > 1$，$B_1 = \log[kT(K-1)^2 + 1] / \log K - 2$，$B_2 = \log[kT(K-1)^2 + (B_1+2)(K-1)+1] / \log K - 2$.

主机 CM：　$k = 1/4000$ 台 $\cdot h^{-1}$、$k' = 1/25$ 台 $\cdot h^{-1}$，$kT = 18$，代入上式得：$B_1 = 0.567$，$B_2 = 0.568$，取 $B = 1$，$T = \frac{K^{B+1}-1}{K-1} \cdot T_B$

C Ⅰ、C Ⅱ：　$k = 1/4000$ 台 $\cdot h^{-1}$，$k' = 1/10$ 台 $\cdot h^{-1}$，$kT = 18$，代入上式得：$B_1 = 0.48$，$B_2 = 0.49$，取 $B = 1$

电源设备：　$k = 1/10000$，$k' = 1/20$，$kT = 7.2$，代入公式得：$B_1 = 0.31$，$B_2 = 0.32$，取 $B = 1$

打印机：　$k = 1/2000$，$k' = 1/20$，$kT = 36$，代入公式得：

$B_1 = 0.773, B_2 = 0.774$,取 $B = 1$

CRT:　$k = 1/5000, k' = 1/10, kT = 14.4$,代入公式得:

$B_1 = 0.42, B_2 = 0.43$,取 $B = 1$

总费用 $M = C_1B'_1 + C_2B'_2 + \cdots + C_6B'_6$,$B'_1$、$B'_2$、…、$B'_6$ 为主机、CⅠ、…、CRT各自的备件数;各子系统连续运行时间由 $T = \frac{K^{B+1}-1}{K-1}T_B$ 求得,由 T 可求得给定时间内的缺备件事件次数;同时考虑到各子系统的利用率不同,这样由上述三因素决定各 B_i 的大小,如设 x 轴表费用,y 轴表缺备件次数,z 轴表示利用率,则求出图 8 中立方体的体积 V_i,当 $V = \sum_{i=1}^{6} V_i$ 为最小时,B_i 即为所求。

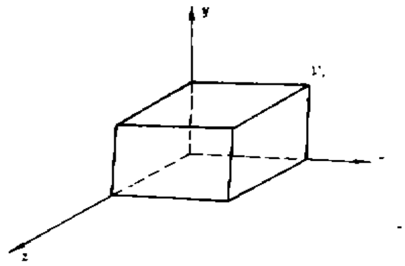

图 8　各 B_i 所对应的立方体 V_i

显然,该例是在令各子系统在不缺备件的连续运转基本相等前提下解的,也就是说使系统不致由于某一系统出现缺备件频繁而导致系统可靠性显著下降,而后加以调整。

同样,如购置系统的总投资已定,求系统的备件配置最佳方案以使系统缺备件时间最长,问题就要复杂得多,对于这一问题可先根据各子系统连续运转时间的近似式,按其时间大至相等,并结合其价格,初步确定方案,而后进行调整,求出最佳方案。

接下来从部件不可修复系统的可靠性方面着手,对CⅠ采集子系统作一探讨,该方案主要元件是 6 片 8253 芯片,设系统运行时元件的单个失效率为 λ_a,而贮存时为 λ_b,现设在没有任何备件的前提下:$k = N\lambda_a + 0 \times \lambda_b, T = 1/k$,设8253芯片的失效率为 5×10^{-7}次/h,则CⅠ的使用寿命为 $T = 1/k = 333333$ h,但实际运用中元件的失效率肯定要高,设元件不参与运行时的失效率为 10^{-8}次/h,则 $\lambda_a = 12 \times 10^{-7} \times 5 + (24 - 12) \times 10^{-8} = 61.2 \times 10^{-7}$次/d,$T = \frac{1}{N\lambda_a} \approx 27233$ d。

就元件而言,实际运行中情况就较复杂,有些元件可修复、可添加,而有些则不能;同时系统故障率随状态而异等情况都给计算带来复杂性;另外有些参数无法考证,如产品价格,MTBF 等也给计算带来复杂性,限于 ICT 体系已定,故本文只作理论上的定性分析。

3　结　　论

在 XN-13000ICT 系统实际投入运行过程中,数据采集过程是一复杂而繁锁的工作,其耗时长、精度要求高,因此可靠性的分析十分必要;本文比较了 XN-1300ICT 体系与国外传统 CT 体系(计算机部分)的异同点;分析了 XN-1300ICT 计算机体系的可靠性;同时从提高可靠性及系统连续运行时间的角度出发,提出了确定系统中备件配置量的方法。

参　考　文　献

1　黄玉彬. 系统可靠性实用计算方法. 北京:科学出版社,1986
2　王珍熙. 可靠性冗余及容错技术. 北京:航空工业出版社,1991
3　丁连芬. 可靠性设计手册. 北京:航空工业出版社,1990