

短文

# 汽轮机自动控制系统的可靠性预测

史进洲

(上海发电设备成套设计研究所 200240)

## 摘要

本文提出了汽轮机自动控制系统可靠性的预测方法,给出了汽轮机自动控制系统的可靠性框图、子系统部件严重的失效模式、系统可用度的预测公式和可靠性预测实例。

**关键词:** 汽轮机,自动控制系统,可靠性预测。

## 1 引言

根据事故统计数据,汽轮机自动控制系统失效引起的停机次数约占汽轮机总停机次数的  $\frac{1}{2}$ ,而自动控制系统失效引起的停机小时数约占汽轮机总停机小时数的  $\frac{1}{3}$ ,这表明自动控制系统是汽轮机可靠性的薄弱环节。虽然系统可靠性理论的研究已有不少文献[1,2],但至今尚无应用于汽轮机的自动控制系统,研究汽轮机自动控制系统的可靠性预测方法是一项有益的工作。

## 2 系统和子系统的可靠性模型

### 2.1 系统的可靠性模型

根据汽轮机自动控制系统的功能和各组成单元功能对系统工作的影响,大型电站汽轮机的自动控制系统可以分解成调节油子系统  $S_1$ 、液压调节子系统  $S_2$ 、液压超速保护子系统  $S_3$ 、电液调节子系统  $S_4$  和配汽子系统  $S_5$ ,其可靠性框图如图1。因系统和各子系统都是可修产品,故其可靠性的主要评价指标是可用度。从图1知,汽轮机自动控制系统的可用度  $A_s$  为

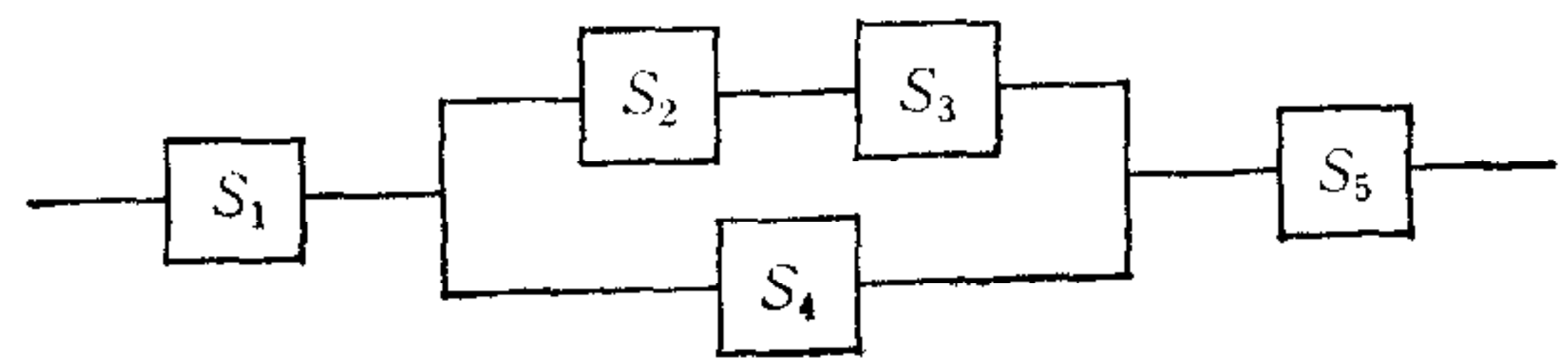


图1 汽轮机自动控制系统的可靠性框图

根据汽轮机自动控制系统的功能和各组成单元功能对系统工作的影响,大型电站汽轮机的自动控制系统可以分解成调节油子系统  $S_1$ 、液压调节子系统  $S_2$ 、液压超速保护子系统  $S_3$ 、电液调节子系统  $S_4$  和配汽子系统  $S_5$ ,其可靠性框图如图1。因系统和各子系统都是可修产品,故其可靠性的主要评价指标是可用度。从图1知,汽轮机自动控制系统的可用度  $A_s$  为

$$A_s = A_{S1} [1 - (1 - A_{S2} \cdot A_{S3})(1 - A_{S4})] A_{S5},$$

式中,  $A_{S1}$ 、 $A_{S2}$ 、 $A_{S3}$ 、 $A_{S4}$  和  $A_{S5}$  分别为子系统  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  和  $S_5$  的可用度。

对于中小型电站汽轮机、工业汽轮机和船用汽轮机，通常没有配置电液调节子系统， $A_s$  的计算公式为  $A_s = A_{S1} \cdot A_{S2} \cdot A_{S3} \cdot A_{S5}$ 。

### 2.2 子系统的可靠性模型

根据汽轮机自动控制子系统的功能和各组成单元功能对子系统工作的影响，各子系统也可分解成若干个主要部件。汽轮机自动控制子系统的主要部件也可处理为可修产品，其可靠性的主要评价指标仍为可用度。

1) 调节油子系统。汽轮机调节油子系统的主要部件有电源  $S_{11}$ 、油箱（包括油净化器） $S_{12}$ 、油管路  $S_{13}$ 、射油器  $S_{14}$  和主油泵  $S_{15}$ ，其可靠性框图如图 2(a)， $A_{S1}$  的计算公式为

$$A_{S1} = A_{S11} \cdot A_{S12} \cdot A_{S13} \cdot (2A_{S14} - A_{S14}^2) \cdot A_{S15}$$

式中， $A_{S11}$ 、 $A_{S12}$ 、 $A_{S13}$ 、 $A_{S14}$  和  $A_{S15}$  分别为部件  $S_{11}$ 、 $S_{12}$ 、 $S_{13}$ 、 $S_{14}$  和  $S_{15}$  的可用度。

2) 液压调节子系统。汽轮机液压调节子系统的主要部件包括调速器（调速泵或旋转阻尼） $S_{21}$ 、调速器错油门  $S_{22}$ 、同步器  $S_{23}$ 、中间错油门  $S_{24}$  和油动机（含反馈滑阀） $S_{25}$ ，其可靠性框图如图 2(b)， $A_{S2}$  的计算公式为

$$A_{S2} = A_{S21} \cdot A_{S22} \cdot A_{S23} \cdot A_{S24} \cdot A_{S25}$$

式中， $A_{S21}$ 、 $A_{S22}$ 、 $A_{S23}$ 、 $A_{S24}$  和  $A_{S25}$  分别为部件  $S_{21}$ 、 $S_{22}$ 、 $S_{23}$ 、 $S_{24}$  和  $S_{25}$  的可用度。

3) 液压超速保护子系统。汽轮机液压超速保护子系统的主要部件为危急遮断器  $S_{31}$ 、附加保安油口  $S_{32}$ 、手拍停机按钮  $S_{33}$ 、电磁解脱器  $S_{34}$  和危急遮断器错油门  $S_{35}$ ，其可靠性框图如图 2(e)， $A_{S3}$  的计算公式为

$$A_{S3} = [1 - (1 - A_{S31})^2(1 - A_{S32})(1 - A_{S33})(1 - A_{S34})][1 - (1 - A_{S35})^2]$$

式中， $A_{S31}$ 、 $A_{S32}$ 、 $A_{S33}$ 、 $A_{S34}$  和  $A_{S35}$  分别为部件  $S_{31}$ 、 $S_{32}$ 、 $S_{33}$ 、 $S_{34}$  和  $S_{35}$  的可用度。

4) 电液调节子系统。汽轮机电液调节子系统的主要部件包括测量部件  $S_{41}$ 、运行人员操作盘  $S_{42}$ 、数字控制器  $S_{43}$ 、电液伺服执行机构  $S_{44}$  和超速保护控制器  $S_{45}$ ，其可靠

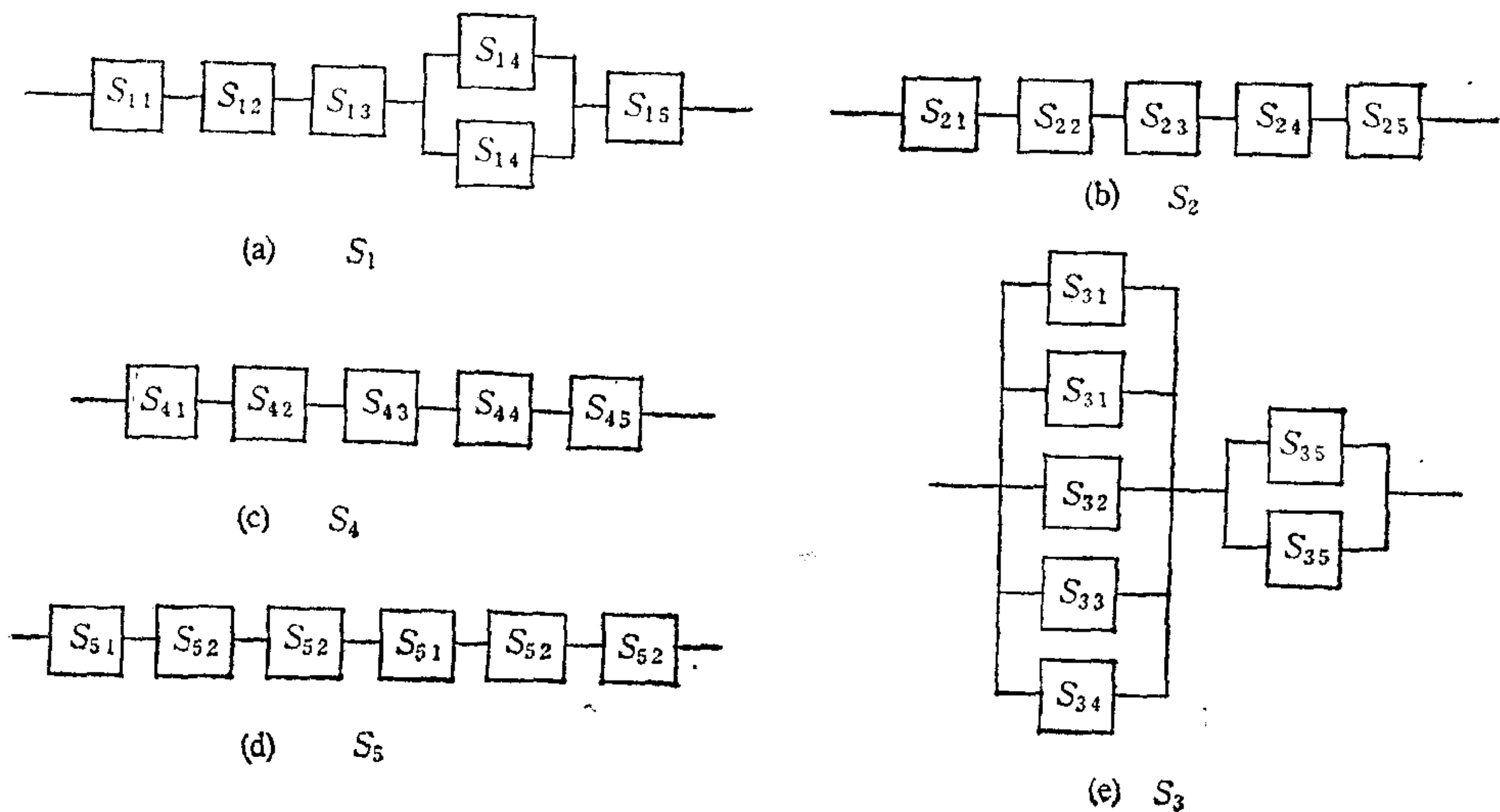


图 2 汽轮机自动控制子系统的可靠性框图

性框图如图 2(c),  $A_{S4}$  的计算公式为  $A_{S4} = A_{S41} \cdot A_{S42} \cdot A_{S43} \cdot A_{S44} \cdot A_{S45}$ , 式中,  $A_{S41}$ 、 $A_{S42}$ 、 $A_{S43}$ 、 $A_{S44}$  和  $A_{S45}$  分别为部件  $S_{41}$ 、 $S_{42}$ 、 $S_{43}$ 、 $S_{44}$  和  $S_{45}$  的可用度。

5) 配汽子系统。汽轮机配汽子系统的主要部件是主汽阀(包括自动关闭器)  $S_{51}$  和调节阀  $S_{52}$ , 其可靠性框图如图 2(d) 所示,  $A_{S5}$  的计算公式为  $A_{S5} = (A_{S51} \cdot A_{S52}^2)^2$ , 式中,  $A_{S51}$  和  $A_{S52}$  分别为部件  $S_{51}$  和  $S_{52}$  的可用度。

### 3 主要部件严重的失效模式

汽轮机自动控制各子系统主要部件严重的失效模式, 指的是部件失效后造成整套机组退出运行或机毁人亡后果的两类失效模式。通过现场采集大型电站汽轮机总共 324.23 台年的运行可靠性数据, 经统计分析后得出各子系统主要部件在长期运行中所暴露的严重失效模式如下:

- 1) 调节油子系统。断油, 油压低, 主油泵部件断脱, 主油泵推力瓦磨损、烧损、温度高, 射油器堵塞、泄漏, 油管路断裂、泄漏, 油箱油位低, 油中带水, 油质不清洁等等。
- 2) 液压调节子系统。负荷晃动, 甩负荷, 调速器错油门卡涩, 同步器失灵、卡涩, 中间错油门卡涩, 高压油动机卡涩、漏油, 反馈滑阀卡涩, 中压油动机卡涩、漏油等等。
- 3) 液压超速保护子系统。危急遮断器卡涩、失灵, 错油门卡涩、漏油等等。
- 4) 电液调节子系统。测量部件失灵、子系统误动, 电气故障等等。
- 5) 配汽子系统。主汽阀误关闭, 阀壳泄漏, 阀杆断、卡涩, 密封泄漏, 自动关闭器脱落; 调节阀壳泄漏, 阀杆断、变形、脱落、晃动, 阀芯脱落, 阀座开裂, 操纵机构部件断等等。

## 4 部件和系统的可靠性预测

### 4.1 部件的可靠性预测

利用汽轮机的可靠性数据库, 可以得出某一部件  $S_{ij}$  因发生第  $k$  种失效模式的可用度  $A_{Sijk}$  的计算公式为  $A_{Sijk} = 1 - \frac{UOH_{Sijk}}{\sum_{k=1}^n UOH_{Sijk} + SH_{Sij}}$ , 式中,  $SH_{Sij}$  为部件  $S_{ij}$  的

累积工作小时数;  $UOH_{Sijk}$  为第  $k$  种失效模式引起的部件  $S_{ij}$  的停机小时数。

在部件  $S_{ij}$  对应每一种严重的失效模式的可用度  $A_{Sij1}$ ,  $A_{Sij2}$ ,  $\dots$ ,  $A_{Sijn}$  确定之后,

该部件的可用度  $A_{Sij}$  为  $A_{Sij} = \prod_{k=1}^n A_{Sijk}$ 。

### 4.2 系统的可靠性预测

在产品的设计阶段确定每一个主要部件的可用度  $A_{Sij}$  之后, 使用前边给出的公式可以确定各子系统的可用度  $A_{S1}$ ,  $A_{S2}$ ,  $\dots$ ,  $A_{S5}$  和汽轮机自动控制系统的可用度  $A_S$ 。如果在设计中采取了某些改进措施并能够消除某几种严重的失效模式时, 再次使用文中提出的方法, 可以预测改进后汽轮机自动控制系统的可用度。

### 4.3 应用实例

某大型汽轮机的自动控制系统,使用文中给出的预测方法,计算得  $A_{S1} = 0.9980$ ,  $A_{S2} = 0.9963$ ,  $A_{S3} = 0.9989$ ,  $A_{S4} = 0.9971$ ,  $A_{S5} = 0.9978$ 。早期生产的汽轮机没有配制电液调节子系统,自动控制系统可用度的预测值为  $A_S = 0.9910$ 。该大型汽轮机在 1981 至 1985 年内,自动控制系统运行可靠性的统计值为  $A_S = 0.9916$ ,可靠性的预测值和实际统计值相吻合。近期生产的汽轮机增配了电液调节子系统,自动控制系统可用度的预测值为  $A_S = 0.9958$ 。

## 5 结 语

本文提出的汽轮机自动控制系统的可靠性预测方法,数学模型简单,物理意义明确,实例预测结果同实际相吻合。使用文中给出的可靠性预测方法,可以定量地确定汽轮机自动控制系统的可靠性指标,为汽轮机自动控制系统的可靠性分析、设计和改进提供了依据。

## 参 考 文 献

- [1] 梅启智,廖炯生,孙惠中. 系统可靠性工程基础. 科学出版社,1987.  
[2] [苏] Л. П. 格拉祖诺夫等著,郭永基等译. 自动控制系统可靠性理论基础. 水利电力出版社,1988.

# RELIABILITY PREDICTION FOR AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF STEAM TURBINE

SHI JINYUAN

(Shanghai Power Equipment Research Institute, 200240)

## ABSTRACT

This paper presents a reliability prediction method for steam turbine control systems. The reliability block diagram of the control system are given together with serious failure modes of the components, the availability prediction formulas of the system and a reliability prediction examples.

**Key words:** Steam turbine; control system; reliability prediction.