

# 热敏电阻非线性修正方法的探讨

张国栋(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

〔摘要〕本文提出三种修正热敏电阻非线性的实用方法,即最佳参数法、函数变换法和相似函数法。从原理上讲,这些方法也适用于其他传感器非线性硬件电路的修正。本文后附这三种方法的实际应用电路。

关键词 热敏电阻 非线性 修正方法

分类号 TP211

## 1 前 言

热敏电阻具有体积小、灵敏度高、反应快、功耗小等特点。在动态温度测量、点温测量、表面温度测量及温度控制等方面得到了广泛的应用。热敏电阻的阻值  $R_T$  和温度  $T$  之间的关系近似地用下面式子来表示:

$$R_T = R_{T_0} \exp\left[B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (1)$$

式中:  $B$  为材料系数,  $K$ ;

$R_{T_0}$  为温度  $T_0$  时的电阻,  $\Omega$ 。

由式(1)中可知热敏电阻的阻值与温度 ( $R_T \sim T$ ) 之间的关系具有严重的非线性,使热敏电阻的应用受到了限制。为此国内外学者对热敏电阻非线性的修正方法及原理进行了深入的探讨和研究,做了大量有意义的工作。本文通过收集大量的国内外资料,并结合科研实践分析、归纳出以下三种修正热敏电阻非线性的方法。它们是最佳参数法、函数变换法及相似函数法。从原理上来讲,以上方法完全适用于其他传感器非线性硬件电路的修正。

## 2 三种修正方法

### 2.1 最佳参数法

设有一变换电路。热敏电阻为该电路中的一个元件,变换电路输出量(模拟量或数字量)  $E$  是热敏电阻  $R_T$  (或者说是被测温度  $T$ ) 及其他电路元件参数的函数,记为

$$E = f(T, X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (2)$$

式中:  $X_i$  为变换电路中的元件参数,  $1 \leq i \leq n$ 。一般情况下,  $E = f(T, X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$  是  $T$  的非线性函数。如能恰当、合理地选择元件参数(通常只有一、二个元件为可调元件),则可在一定测量范围内,即在  $T_0$  附近,得到变换电路的输出量  $E$  与被测量温度  $T$  之间的线性变换关系

$$E = KT + b \quad (3)$$

式中:  $K$ 、 $b$  均为常数。

为了确定待定元件参数的最佳值,将式(2)在  $T = T_0$  点展开为泰勒级数,得到:

$$E = E(T_0) + E' \Delta T + E''(T_0) \frac{(\Delta T)^2}{2!} + E'''(T_0) \frac{(\Delta T)^3}{3!} + \dots \quad (4)$$

收稿日期 1993 06 10 修改定稿 1994 03 05

本文联系人 张国栋 男 45 工程师 150030 哈尔滨 77 8 信箱

式中： $\Delta T = T - T_0$

若只有一个元件参数为待定值，其最佳参数可由：

$$E''(T_0) = 0 \quad (5)$$

解得，若有二个元件参数为待定值。其最佳参数可由

$$\begin{cases} E''(T_0) = 0 \\ E'(T_0) = K \end{cases} \quad (6)$$

联立方程解得。若有  $n$  个元件参数为待定值，( $n > 2$ ) 其最佳参数可由

$$\begin{cases} E^n(T_0) = 0 & n \neq 0, 1 \\ \dots \\ E'(T_0) = K \end{cases} \quad (7)$$

联立方程解得，式(5)(6)(7)是变换电路修正传感器非线性的条件。这一条件是基于二次项对非线性影响最大这一事实得到的。需要指出的是，由式(5)(6)确定的元件参数是最佳参数附近的一个初值。通实验调整待定

元件参数，使保留下的二次项与高次项综合影响相反，可获得最佳的非线性修正结果。图 1 是一个温度 / 频率变换器电路。实际上图 1 电路是一个多谐振荡器。运算放大器  $A_2$  为恒流源， $A_3$ 、 $A_5$  是电压跟随器， $A_4$  是一反相器， $A_1$  是一较典型的多振荡器电路。 $R_c$  为线性化电阻，其阻值可由式(5) 确定。分析电路可知：该变换器输出信号频率为

$$f(T) = \frac{1}{2RCLn\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)} \quad (8)$$

式中： $\beta = V_f/V(t) = (R_c + R_T)/(R_4 + R_c + R_T)$  为反馈回路的反馈系数。将  $\beta$  值及式(1) 代入式(8) 得

$$f(T) = 1/\{2RCLn[1 + \frac{2RC}{R_4} + \frac{2R_{T0}}{R_4}e^{B(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0})}]\} \quad (9)$$

显然  $f$  与  $T$  之间是非线性函数，由于  $f'(T_0) = 0$  求得线性化电阻  $R_c$  的表达式为

$$R_c = \frac{-X + \sqrt{X^2 - 8(B + T_0)R_{T0}(4R_{T0}T_0 + 2R_4T_0 - BR_4)}}{4(B + 2T_0)} \quad (10)$$

式中： $X = 2R_{T0}(B + 4T_0) + R_4(B + 2T_0)$ 。

实验证明：按上式选取  $R_c$  值，得到了最

佳非线性性的修正结果。

表 1 给出最佳参数法应用的三个实例。

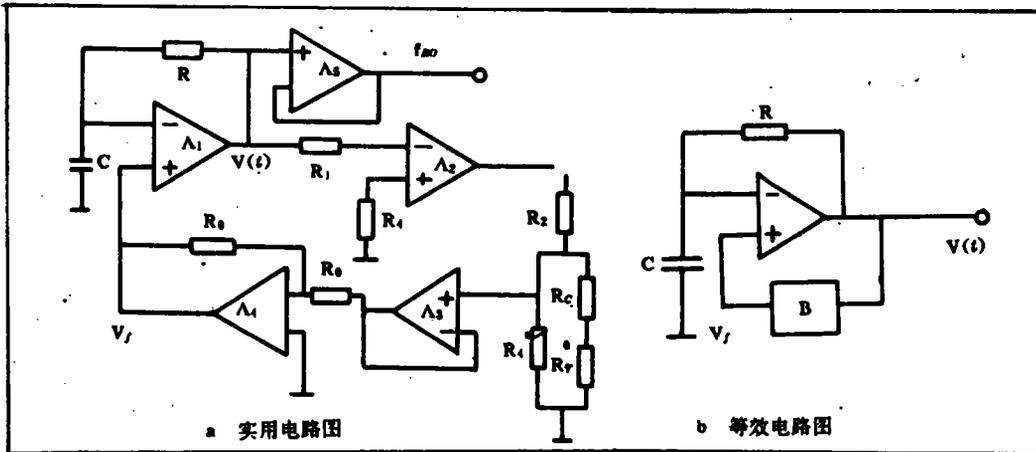
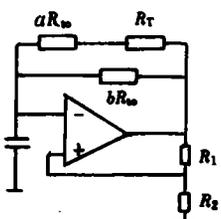
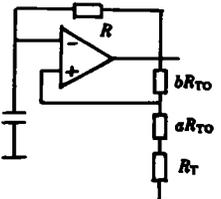
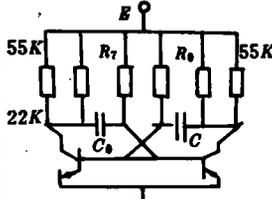


图 1

表 1 最佳参数法应用实例

电路形式	输出电量表达式	线性化条件	待定参数表达式
	$f = \{a + b + \exp[B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})]\} / [2R_0L_n(a + \exp[B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})]) + (1 + \frac{2R_2}{R_1})]$	$\frac{d(f/T_0)}{dT} = m$ $\frac{d^2(f/T_0)}{dT^2} = 0$ $m \text{ 为常数}$	$a = \frac{B - 2T_0}{B + 2T_0}$ $b = \frac{(4B_mT_0^2)}{(B + 2T_0 - 2mT_0^2)}$
	$f = 1/[2R_0L_n(1 + \{1 + 2(a + \exp[B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})])\}/b)]$	同上	$a = \{2m/\alpha - 2\alpha T_0 - \exp[2(1 - 1/mT_0 - \alpha/2m)]\} / (1 + 2/\alpha T_0 - 2m/\alpha)$ $b = \{\exp[2(1 - 1/mT_0 - \alpha/2m)]\} / (1 + 2/\alpha T_0 - 2m/\alpha)$ $a = B/T_0$
	$f = f_0 \tau - \tau_0$ $f = \frac{1}{L_n 2(R_T C_1 + R_0 C_0)}$	$f'(T_0) = 0$	$R_0 = R_{T0} \frac{B - 2T_0}{B + 2T_0}$

2.2 函数变换法

由式(1)可知:热敏电阻值  $R_T$  与被测温度  $T$  之间是非线性函数关系。这里记为  $R_T = f(T)$ 。为提高测量精度及直读被测温度值,希望构造出一个新函数  $A(T)$ ,并要求  $A(T)$  与  $T$  之间是线性关系,同时要求所构造出的新函数  $A(T)$  形式要简单,电路要容易实现。这里设  $A(T)$  的形式为

$$A(T) = \frac{kf(T) + C}{1 + Bf(T)} = \frac{kR_T + C}{1 + BR_T} \quad (11)$$

式中:  $K, C$  为电路常数;

$B$  为校正非线性的待定系数。

为确定系数  $B'$ ,对非线性影响最大的是二次项,所以,  $A'(T_0) = 0$  可做为求系数  $B'$  的条件。对式(11)求二阶导数并令其为零,得到

$$B' = f''(T_0) / 2[f'(T_0)^2 - f''(T_0)f(T_0)] \quad (12)$$

图 2 是基于函数变换法而设计的修正热敏电阻非线性的实际电路图,由图中写出输

出电压  $e_0$  的表达式:(其中  $R_2 = R_0$ )

$$e_0 = \frac{e_w}{R_0} \cdot R_T / (1 + R_T/R_3) \quad (13)$$

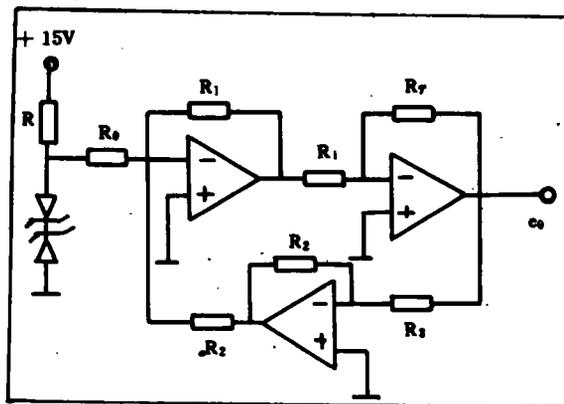


图 2

将式(13)与式(11)比较可知:  $K = \frac{e_w}{R_0}$

$$C = 0 \quad B = \frac{1}{R_3}$$

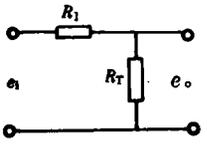
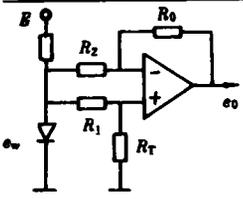
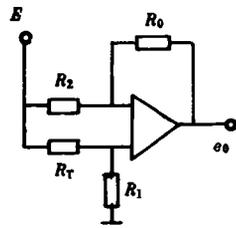
将式(1)求一阶、二阶导数代入式(12),得到:

$$B = \frac{B + 2T_0}{B - 2T_0} \cdot \frac{1}{R_{T0}} \quad \text{或}$$

$$R_3 = R_{T0} \cdot \frac{B - 2T_0}{B + 2T_0} \quad (14)$$

若按式(14)选取  $R_3$  值,即可得到较为满意的热敏电阻非线性修正结果。表 2 给出三个函数变换法应用实例。

表 2 函数变换法应用实例

电路形式	输出电量表达式	线性化条件	待定参数表达式
	$e_0 = \frac{e_1 R_T}{R_1 (1 + R_T/R_1)}$	$e_0'(T_0) = 0$	$R_1 = \frac{B - 2T_0}{B + 2T_0} \cdot R_T$
	$e_0 = e_w \frac{R_T/R_1 - R_0/R_2}{1 + R_T/R_2}$	同上	同上
	$e_0 = \frac{E(1 - \frac{R_0}{R_1 R_2} R_T)}{1 + R_T/R_1}$	同上	$R_1 = R_{T0} \frac{B - 2T_0}{B + 2T_0}$

### 2.3 相似函数法

在最佳参数法应用中,条件是知道变换电路及变换电路输出电量  $E$  的表达式。这里要介绍的相似函数法就是利用函数形式相似原理,提出变换电路设计思想并巧妙加以实现,再根据输出电路表达式的出线性化条件,进而确定电路参数,实现传感器非线性的修正。换句话说,相似函数法是利用传感器变换函数与其他函数的相似性,设计新型原理变换电路的方法。

由式(1)可知:热敏电阻值  $R_T$  与被测温度  $T$  之间是指数关系。一个  $R_C$  网络充放电时,其电容器两端电压与时间也是指数关系。若利用  $R_T$  与  $T$  的特性与  $R_C$  网络充电电容端电压函数的相似性。即可巧妙地设计出多种热敏电阻非线性修正电路。下面举一实例简述其原理。

图 3 是一个应用  $R_C$  网络充电,电压比较的线性温度/频率变换器电路及波形图。由图可知

表 3 相似函数法应用实例

电路形式	输出电量表达式	线性化条件
	$T = KX$ <p>式中, <math>K</math> 为常数  <math>T</math> 为时间间隔  <math>X</math> 为被测非电量  <math>Y = f(x)</math> 与 <math>U = f(u)</math> 为相同形式的函数</p>	$f(x)$ 与 $f(u)$ 函数形式相同
	$f = \frac{T}{\tau B(1 + \frac{T_0 T}{\tau B} - \frac{T \ln(E_0/I_0 A)}{B})}$ $= \frac{T}{\tau B(1 + \frac{T_0 T}{\tau B} - \ln(\frac{E_0}{I_0 A}) T/B)}$ <p>式中: <math>t_0</math>—充电到 <math>V_i = I_0 R_r</math> 的时间  <math>A = R_{r0} \cdot e^{-\frac{1}{\tau_0}}</math>  <math>\tau = RC</math> 充电时间常数</p>	$t_0 = \ln(\frac{E_0}{I_0})$
	$f = \frac{1}{\frac{RC}{T} + t_m - \tau(\frac{B}{T_0} - \ln \frac{V_R R t_0 C}{ER})}$ <p><math>\tau = RC</math></p>	$t_m = \frac{\tau B}{T_0} - \ln \frac{V_R R t_0 C}{ER}$

$$V_i = (1 - \frac{R_i}{R_r})E \tag{15}$$

当  $t = t_1$  时刻,  $V_c = V_i$  有

$$(1 - R_i/R_r)E = E[1 - \exp(-t_1/R_c)]$$

或为  $R_i/R_r = \exp(-t_1/R_c)$  (16)

将式(1)代入式(16), 并令  $R_i = R_{r0}$  可得到:

$$t_1 = -RCL \ln e^{-\ln(\frac{1}{1} - \frac{1}{1})} = \frac{RCB}{T} - \frac{RCB}{T_0} \tag{17}$$

$$[R_r = R_{r0} e^{-\ln(\frac{1}{1} - \frac{1}{1})} \quad R_i/R_r = 1/e^{-\ln(\frac{1}{1} - \frac{1}{1})}]$$

$$RC \frac{dV_c}{dt} + V_c = E \quad V_c = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

$$V_i = V_c]$$

由波形图可知: 变换电路输出信号周期为:

$$t_m = t_1 + t_{d1} + t_{d2} \tag{18}$$

式中:  $t_{d1}, t_{d2}$  为延时电路的延迟时间。

变换电路输出信号频率为:

$$f = \frac{1}{t_m} = \frac{1}{\frac{RCB}{T} - \frac{RCB}{T_0} + t_{d1} + t_{d2}} \tag{19}$$

若:  $t_{d1} + t_{d2} = RCB/T_0$  (20)

则有:  $f = (RCB)^{-1} \cdot T$  (21)

很显然式(20)是该电路线性化的条件。

表 3 是相似函数法的三个应用实例。

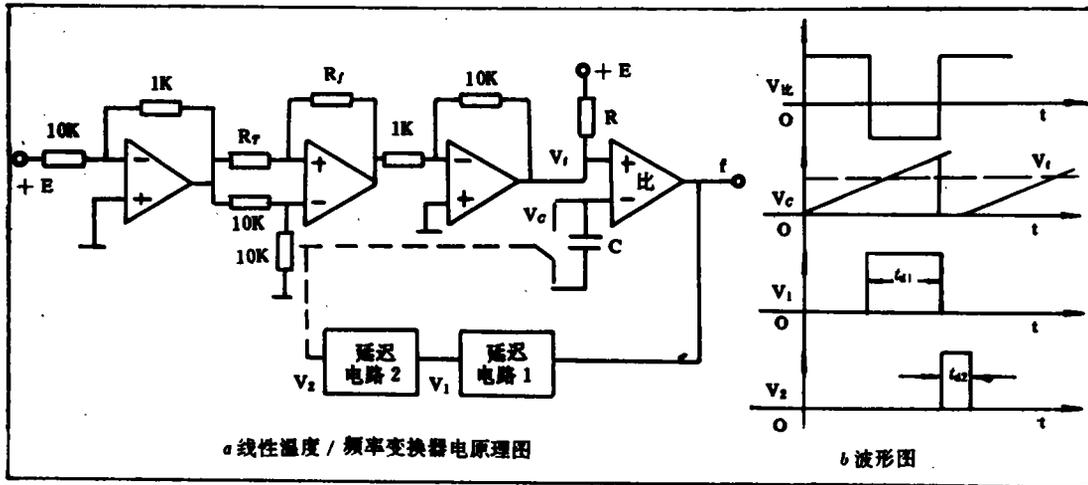


图 3

### 3 结束语

本文以简要的方式介绍了三种修正热敏电阻非线性的方法。这些方法的思想 and 原理完全可以用来做其他传感器非线性修正研究的参考, 本文表中给出的修正热敏电阻非线性电路, 都是很有实用价值的线路。

### 参 考 文 献

- 1 刘海坤. 仪器仪表学报, 1982(3), 283—280
- 2 高明伦. 电测与仪表, 1982(3), 8—9 页
- 3 沈承安. 电测与仪表, 1982(9), 1—7
- 4 宋 庭. 仪器仪表学报, 1985(8), 221—225
- 5 魏俊奇. 仪器仪表学报, 1982(10), 359—364
- 6 张达明. 电测与仪表, 1976(6), 38—39
- 7 王桂珠. 自动化仪表, 1986(1), 8—12
- 8 王成辉. 电测与仪表, 1985(6), 42—43

### 试验技术

## 排气管的仿真试验

据“Теплоэнергетика”1993年6月号报道, 实际工作条件下, 尤其是在变工况工作时, 涡轮末级流出的气流是明显扭曲的, 其根部区域流速较低。在进行排气管静吹风试验时未考虑这些因素, 致使得到的气动力特性与实际情况明显不同。列宁格勒涅瓦工厂生产联合体的试验数据表明, 典型燃气轮机排气管实际工作时的总压损失系数比其模型在空气动力试验台上轴向均匀进气条件下试验时的测定值高40%。

俄罗斯中央锅炉透平研究所科学生产联合体和列宁格勒涅瓦工厂生产联合体共同进行了研究, 评估入口流动条件对排气管模型中流动阻力的影响, 并检查原先针对这些条件提出的优化其流通部分措施的效果。

研究表明, 排气管气动力研究可以利用静止的模型试验来进行。但是, 这时得到的气动力系数并不反映排气管在实际工作条件下的损失。因此, 在必须确定动力特性实际值时(例如为了进行燃气轮机热力计算), 应该模拟入口条件, 至少要模拟最典型的一些参数, 来进行模型的气动力试验。

(学牛 供稿)

and rear arch can be considered as proper. Tests have shown that in such a case the a-shaped combustion flame will result. **Key words:** *combustion, grate firing furnace, furnace arch design*

**(285) Optimization Design of a Power Plant Thermodynamic System by Using "Process Energy Combination" Method**..... Zhang Yongde (*Northwestern Electric Power Design Institute*)

A so-called "Process Energy Combination" method is employed to improve the design of a thermodynamic system for a cogeneration power plant, which plays a significant role in enhancing energy-saving effects. **Key words:** *thermodynamic system, Process energy combination, heater*

**(290) A Study on the Optimization for Preliminary Design of a Nuclear Power Plant Steam Generator** ..... Shi Hongshen (*Shanghai Naval Standards and Specifications Design Institute*), Chen Lingen, Zong Qingchang (*Naval Engineering Academy*)

With the minimum total weight of a steam generator set as a target function the authors have proposed a method for optimizing the preliminary design of a nuclear propulsion plant steam generator. Given in the paper are the optimization and sensitivity analysis results. The computation results have substantiated the validity of the recommended method. **Key words:** *steam generator, design optimization, sensitivity analysis*

**(297) The Specific Features of Industrial Steam Turbines and Their Technical Retrofitting**..... Luo Yigen, Lan Ruji, Zhang Zhitong (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

The present paper briefly deals with the design features of mechanical — drive industrial steam turbines and the experience gained by the authors in recent years in the course of implementing the technical modification of steam turbines for some domestic petrochemical enterprises. Proceeding from the specific conditions existing in Chinese petrochemical works the authors have proposed some feasible measures and approaches for conducting energy-saving and power uprating-oriented modifications of industrial steam turbines. **Key words:** *industrial steam turbines, high efficiency, energy-saving, power uprating*

**(300) The Application of STD Bus Microcomputer-based Industrial Control Unit on a Grain Drying Production Line**..... Yang Chengyi, Zhao Aijun (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

In connection with the design, commissioning tests and operational effectiveness of a microcomputer-based monitoring and control system installed on a grain drying production line of District NO. 8 Grain Depot in Harbin city the authors make some observations on the proper selection of microcomputer type and the method of interface design when such factors as serious dust-borne surroundings and electric appliance interference are to be taken into account. **Key words:** *grain drying, microcomputer-based control, STD industrial control unit*

**(304) An Exploratory Study on a Thermistor Nonlinearity Correction Method**..... Zhang Guodong (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

Three practical methods are proposed for correcting the nonlinearity of thermistors, namely: optimum parameter method, transformation function method and similarity function method. Theoretically, the above-cited methods are also suitable for the correction of nonlinear hardware

## 我国首套电站汽轮发电机组 振动监测与超限保护系统投运成功

集“七五”和“八五”国防科技重点预研成果之精华,并根据电站汽轮发电机组运行特点而衍化研制的我国首套电站汽轮发电机组振动监测与超限保护系统——“MVC—2M 电站汽轮发电机组振监测与超限保护系统”于 1994 年 6 月 24 日在上海闵行发电厂 8# 机组上(125 MW 机组)投运运行。在该机组规范化大修后首次启动过程中,该系统有效地监视了机组六道轴承共 18 个特征点上振动状态的优劣,为现场及时了解机组运行状态提供了科学依据。目前 8# 机组已并网发电,配置其上的 MVC—2M 电站汽轮发电机组振动监测与超限保护系统也工作正常。

据统计,我国电力系统至今曾已有 10 台汽轮发电机组发生过整机毁机事故。然而,从机械设备的故障诊断理论和国外的先进运行经验来看,若在此类机器上配置相应的状态监测和故障诊断系统是可以有效地降低事故率并取得明显的社会效益的。鉴于此,自“大同”、“秦岭”两电厂的两台 200 MW 机组发生恶性毁机事故后,原能源部曾先后从美国 BN 公司和德国 PHILIPUS 公司引进了数百套电站汽轮机组保护仪表(TSI)配置在全国电厂 200 MW 以上的机组上,以期保障机组安全运行。不足的是,上述进口仪表在使用中或因机仪配匹不理想,或因轴振动监控标准难确立和现场干扰导致过多误动作等综合因素的影响,致使工程效果并不理想,且至今也没有投入振动超限保护功能。

这次在上海闵行发电厂 8# 机组上投运的“MVC—2M 电站汽轮发电机组振动监测与超限保护系统”系由“七五”国防科技重点预研成果(已获部二等奖)且已在电站汽轮发电机组和锅炉风机的前期试用中多次避免过恶性毁机事故的 YD—N 型电荷—电压加速度传感器群、MVC—2M—1 型振动烈度监测仪和 MVC—2M—3 型故障数据记录仪,以及根据“八五”国防科技重点预研项目的阶段成果衍化而成的 MVC—2M—9 型振动超限保护控制仪器所组成,它们具有对汽轮发电机组实施状态的多点平行实时监测、故障数据自动记录并绘制故障过程曲线以及按预设的工程模(现场可修改)和“1+1”控制理论要求对被控机组实施振动状态超限保护等功能。此外,该系统还备有多种信号输出接口,以便在必要时增配 MVC—2M—4 型模拟信号磁带记录仪、MVC—2M—5 型数据采集管理系统、MVC—2M—2 型 FFT 信号分机仪和 MVC—2M 电站汽轮发电机组的故障诊断专家系统,用以对汽轮发电机组所发生的各类故障进行深层次的分析与诊断。

(翁维熊 供稿)

circuits of other sensors. For the applicable circuits used for the three methods, please refer to the appendix of the present paper. Key words: *thermistor, nonlinearity, correction method*

Edited and Published by Harbin Marine  
Boiler & Turbine Research  
Institute and Editorial Staff  
of this Journal  
Printer: Printing House of Harbin Institute  
of Technology  
Address: P. O. Box 77, Harbin China

Cable: 6511, Harbin China  
Post Code Number 150036  
ISSN 1001-2060  
Periodical Registration: CN23-1176/TK  
Distributed by China International  
Book Trading Corporation,  
P. O. Box 399, Beijing, China