一种恒定灵敏度的方向行波保护

山东工业大学　潘贞存　王广延

摘要　本文简单介绍了行波判别式的方向行波保护的基本工作原理，通过分析，指出了这种保护存在的问题，在此基础上，提出了一种新的保护方案，解决了原保护方案中的问题，并使保护得到简化。

一　引　言

1978年，M.Chamia M.T.Yee等人提出了利用故障引入的行波量来实现继电保护的新方法[1,2]，为继电保护的研究开辟了新的广阔的领域，因为这种方法具有一系列的优点，可以解决一些常规保护难以解决的问题，因而受到了许多国家的继电保护工作者的普遍关注，并进行了大量的研究工作，取得了许多可喜的成绩。继M.Chamia，M.T.Yee的极性比较式方向行波保护之后，日本的T. Takagi提出了基于行波原理的纵差保护——行波差动保护[3]，加拿大的H.W.Dommet提出了利用行波判别式的方向行波保护[4]，英国的A.T.Johns提出了通过判断正向波和反向波出现的顺序来判断故障方向的顺序比较式方向行波保护[5]，瑞士的M.Vitins提出了判别故障行波轨迹

保护便是如此。

四　结束语

实际对于不同的元件可根据引起超越的原因，元件构成的特点，从而从原理特性上或电路上采取对策加以防止。本文仅对阻抗元件的超越进行了初步的归纳与分析，并介绍了某些对策，因水平及篇幅所限，错误与不全之处在所难免，望读者鉴谅。

参考文献

〔1〕华中电管局调度局继电保护科.1989.8.15 葛洲坝大江12号变事故保护动作分析及改进.1989.10.

〔2〕陈国建、宋璇坤　国内外超高压线路保护装置及在国内系统中配置、运行概况.1988. 9.

〔3〕TSL32、High—Speed Distance Proteition Siemens Co.

的轨迹式方向行波保护[6]，英国的P.A.Crossley提出了包括方向判别和故障测距的行波保护。以上这些行波保护各有特点，分别适用于不同的系统情况。但除了H.W.Dommel的行波判别式方向行波保护外，都存在一个共同的缺点，就是保护的灵敏度随着故障初始角的不同而有较大的变化，在某些电气角度下发生短路时，甚至会出现死区。

二　行波判别式方向行波保护的基本原理

各种原理的行波保护都以故障引入的行波电压和行波电流来作为保护的测量信号，它们不反应故障前的稳态负荷状态，根据迭加原理，故障引入的行波可以认为是一个与原系统相对应的无激励系统对故障点处突然投入的虚构电压源的响应，该虚构电压源与故障前故障点的电压大小相等、符号相反。虚构电压源的投入，将引起向故障点两侧传播的电压和电流行波，对于单位长度电感为l，单位长度电容为c的单相无损线路，行波电压、电流之间满足下述的偏微分方程：

$$-\frac{\partial V}{\partial X}=l\cdot\frac{\partial i}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial X}=c\cdot\frac{\partial V}{\partial t}$$

其解具有达朗贝尔形式，即：

$$V(x,t)=f_1(x-at)+f_2(x+at) \quad (3)$$

$$i(x,t)=[f_1(x-at)-f_2(x+at)]/z \quad (4)$$

式中　$z=l/c$为线路的波阻抗；

$a=1/lc$为行波传播的速度

（4）式两端同乘以z，并与（3）式相加，可得：

$$v(x,t)+zi(x,t)=2f_1(x-at) \quad (5)$$

可见，组合电压$v+zi$为$(x-at)$的函数，当x、t同时变化，而保持$(x-at)$不变时，$(v+zi)$的值也不变化。当一行波沿+x方向以速度a传播时，它所遇到的$(x-at)$是不变的，所以对应的$(v+zi)$也是不变的，设被保护线路上F点处在$t=-\tau$时刻（此处τ为行波从故障点传到保护安装处所需的时间）发生故障，且故障后故障点处的行波电压和电流分别为v_F和i_F（i_F的参考方向由故障点指向保护安装处），则有：

$$v_R(t)-z\cdot i_R(t)=v_F(t-\tau)+z\cdot i_F(t-\tau) \quad (6)$$

式中　v_R、i_R分别为保护安装处的行波电压和电流（且i_R的参考方向由保护安装处指向故障点）。

设故障前故障点处的电压为：

$$v_{pf}(t)=-v_m\cdot\sin(\omega t+\phi) \quad (7)$$

则在故障后，故障行波电压为：

$$v_F(t)=-v_{pf}(t)=v_m\cdot\sin(\omega t+\phi) \quad (8)$$

在$-\tau<t<\tau$时间内，故障点处仅有单向的行波，这时有：

$$v_F(t)-z\cdot i_F(t)=0 \tag{9}$$

所以
$$v_F(t)+z\cdot i_F(t)=2v_m\cdot\sin(\omega t+\phi) \tag{10}$$

代入（6）式中，可得：

$$v_R(t)-z\cdot i_R(t)=2v_m\cdot\sin(\omega t+\phi-\omega\tau) \tag{11}$$

（11）式在$0<t<2\tau$时间内成立，所以在这段时间内，保护安装处的组合电压（$v-z\cdot i$）是可观测的，该组合电压与保护背后系统的边界条件无关，但它与故障的初始角度密切相关，在$\phi=90°$时，它近似一个阶跃函数，而在$\phi=0°$时，它又近似为一个斜坡函数，要在$0<t<2\tau$时间内检测出这样一个量值甚小的斜坡函数是相当困难的，为解决此问题，可对（11）式进行求导：

$$\frac{dv_R(t)}{dt}-z\frac{di_R(t)}{dt}=2\omega v_m\cdot\cos(\omega t+\phi-\omega\tau) \tag{12}$$

并把（11）、（12）两式进行组合，可得：

$$D=[v_R(t)-z\cdot i_R(t)]^2+\frac{1}{\omega^2}\left[\frac{dv_R(t)}{dt}-z\frac{di_R(t)}{dt}\right]^2=4V_m^2 \tag{13}$$

该表达式与故障的初始角度无关，因此用信号D来作为确定故障条件的判别式，可使保护的灵敏度独立于故障的初始角度，对于故障线路，在故障后两侧的D信号均有较大的量值，而对非故障线路，至少有一侧的D信号在故障后的一定时间内为0。因此，同时比较被保护线路两侧的D信号的大小，就可以确定出故障的线路。

上述的分析都是以单相系统为基础的，对于实际的三相系统，因各相之间相互藕联，系统故障时，任一相的电压、电流都要受其他相的影响，所以不能把上述的方法简单的应用于每一相中，在这种情况下，可以利于模变换理论，把相互藕联的三相系统变换成三个相互独立的模系统，每一个模系统都相当于一个单相系统，因此上述分析的结论都是成立的，所以我们可以采用三个模的行波判别式来实现三相系统的保护。

设三个模系统分别记为0、α、β模系统，则三个模的行波判别式分别为：

$$D_0=[v_{0R}-z_0\cdot i_{0R})^2+\frac{1}{\omega^2}\left(\frac{dv_{0R}}{dt}-z_0\cdot\frac{di_{0R}}{dt}\right)^2 \tag{14}$$

$$D_\alpha=(v_{\alpha R}-z_\alpha\cdot i_{\alpha R})^2+\frac{1}{\omega^2}\left(\frac{dv_{\alpha R}}{dt}-z_\alpha\cdot\frac{di_{\alpha R}}{dt}\right)^2 \tag{15}$$

$$D_\beta=(v_{\beta R}-z_\beta\cdot i_{\beta R})^2+\frac{1}{\omega^2}\left(\frac{dv_{\beta R}}{dt}-z_\beta\cdot\frac{di_{\beta R}}{dt}\right)^2 \tag{16}$$

同时比较被保护线路两侧的D_0、D_α、D_β信号，就可以实现三相系统的保护。在故障线路上，两侧的各模信号均有确定的量值，而在非故障线路上，至少有一侧在故障后的一定时间内各模信号均为0。

三　摸量保护的灵敏度分析

由上节的分析可知，在被保护线路故障的情况下，各模行波判别式之值取决于故障点处该模虚构电压源的电压值，对于各种不同的故障类型和故障相别，该电压值都是不同的，所以各模的行波判别式值也是不同的，下面以A相单相接地故障为例，来说明各模行波判别式的求法。

设故障前故障点处的A相电压为：

$$v_{pfa}=-V_m\cdot\sin(\omega t+\phi) \tag{17}$$

则在A相接地故障的情况下，故障点处的约束条件为：

$$\left.\begin{aligned} &v_{Fa}=-v_{pfa}=V_m\cdot\sin(\omega t-\phi)\\ &i_{Fb}=0\\ &i_{Fc}=0\end{aligned}\right\} \tag{18}$$

利用Karrenbauer变换，可以把上式变换为模域的约束条件：

$$\left.\begin{aligned} &v_{F0}+v_{F\alpha}+v_{F\beta}=V_m\sin(\omega t+\phi)\\ &i_{F0}-i_{F\alpha}=0\\ &i_{F0}-i_{F\beta}=0\end{aligned}\right\} \tag{19}$$

因为在故障发生后的0到2τ时间内，故障点处仅存在传向保护安装处方向的单向行波，所以在这段时间内，故障点处的各模电压、电流之间的关系可以表示为：

$$\left.\begin{aligned} &v_{F0}-Z_0\cdot i_{F0}=0\\ &v_{F\alpha}-Z_\alpha\cdot i_{F\alpha}=0\\ &v_{F\beta}-Z_\beta\cdot i_{F\beta}=0\end{aligned}\right\} \tag{20}$$

将（19）、（20）两式进行联立，就可以求出这种情况下，0＜t＜2τ时间内故障点处的各模电压：

$$v_{F0}=\frac{Z_0}{Z_0+Z_\alpha+Z_\beta}v_{Fa}=\frac{Z_0}{Z_0+Z_\alpha+Z_\beta}\cdot V_m\cdot\sin(\omega t+\phi)$$

$$v_{F\alpha}=\frac{Z_\alpha}{Z_0+Z_\alpha+Z_\beta}v_{Fa}=\frac{Z_\alpha}{Z_0+Z_\alpha+Z_\beta}\cdot V_m\cdot\sin(\omega t+\phi)$$

$$v_{F\beta}=\frac{Z_\beta}{Z_0+Z_\alpha+Z_\beta}v_{F\beta}=\frac{Z_\beta}{Z_0+Z_\alpha+Z_\beta}\cdot V_m\cdot\sin(\omega t+\phi)$$

根据上节的分析方法，我们可以求得各模的行波判别式：

$$D_0=4\cdot\left(\frac{Z_0}{Z_0+Z_\alpha+Z_\beta}\right)^2\cdot V_m^2$$

$$D_\alpha=4\cdot\left(\frac{Z_\alpha}{Z_0+Z_\alpha+Z_\beta}\right)^2\cdot V_m^2$$

$$D_\beta=4\cdot\left(\frac{Z_\beta}{Z_0+Z_\alpha+Z_\beta}\right)^2\cdot V_m^2$$

用同样的方法，可以求出其他类型和相别的故障情况下的各模行波判别式，表1就是按上述办法求出的各种故障情况下，各模行波判别式的表达式。

由表1可见，对于各种不同的故障类型和相别，各模的行波判别式都是不同的，且有较大的变化范围。因此，为保证在各种不同的故障情况下，各模继电器都有足够的灵

表 1　不同故障情况下，各模的行波判别式

故障		0模	α模	β模
单相接地	A	$4\left(\frac{Z_0}{Z_0+Z_\alpha+Z_\beta}\right)^2\cdot V_m^2$	$4\left(\frac{Z_\alpha}{Z_0+Z_\alpha+Z_\beta}\right)^2 V_m^2$	$4\left(\frac{V_\beta}{Z_0+Z_\alpha+Z_\beta}\right)^2\cdot V_m^2$
	B	$4\left(\frac{Z_0}{Z_0+2Z_\alpha}\right)^2\cdot V_m^2$	$4\left(\frac{Z_\alpha}{Z_0+2Z_\alpha}\right)^2\cdot V_m^2$	0
	C	$4\left(\frac{Z_0}{Z_0+2Z_\beta}\right)^2\cdot V_m^2$	0	$4\left(\frac{Z_\beta}{Z_0+2Z_\beta}\right)^2\cdot V_m^2$
两相短路	A—B	0	$\frac{4}{3}V_m^2$	$\frac{1}{3}V_m^2$
	B—C	0	$\frac{1}{3}V_m^2$	$\frac{1}{3}V_m^2$
	C—A	0	$\frac{1}{3}V_m^2$	$\frac{4}{3}V_m^2$
两相接地	A—B	$4\frac{Z_0^2}{Z_\alpha^2+4Z_0Z_\alpha+4Z_0^2}V_m^2$	$\frac{4}{3}V_m^2$	$\frac{4}{9}\cdot\frac{Z_0^2+Z_0Z_\alpha+7Z_\alpha^2}{Z_\alpha^2+4Z_0Z_\alpha+4Z_0^2}\cdot V_m^2$
	B—C	$4\frac{Z_0^2}{Z_\alpha^2+4Z_0\cdot Z_\alpha+4Z_0^2}\cdot V_m^2$	$\frac{4}{9}\cdot\frac{Z_0^2+Z_0Z_\alpha+7Z_\alpha^2}{Z_\alpha^2+4Z_0Z_\alpha+4Z_0^2}\cdot V_m^2$	$\frac{4}{9}\cdot\frac{Z_0^2+Z_0Z_\alpha+7Z_\alpha^2}{Z_\alpha^2+4Z_0Z_\alpha+4Z_0^2}\cdot V_m^2$
	C—A	$4\frac{Z_0^2}{Z_\alpha^2+4Z_0\cdot Z_\alpha+4Z_0^2}\cdot V_m^2$	$\frac{4}{9}\cdot\frac{Z_0^2+Z_0Z_\alpha+7Z_\alpha^2}{Z_\alpha^2+4Z_0Z_\alpha+4Z_0^2}\cdot V_m^2$	$\frac{4}{3}\cdot V_m^2$
三相短路		0	$\frac{4}{3}V_m^2$	$\frac{4}{3}\cdot V_m^2$

注：在两相接地的判别式中，利用了关系 $Z_\alpha=Z_\beta$

敏度，必须对各种情况进行计算比较，取较小的值（零除外）进行整定，因此整定计算相当麻烦，并且各模继电器在各种不同的故障情况下灵敏度有较大的变化范围，给相邻线路之间的灵敏度配合及运行分析带来了许多的困难，甚至在某些情况下难以应用。此外，这种模域量的保护在实现时需要采用解模电路或相应的解模程序，构成较为复杂。为解决上述问题，并使保护的接线得以简化，本文在总结上述方案的基础上，发展出了一种带零模电流补偿的相域量实现的具有恒定灵敏度的行波保护方案。

四　具有恒定灵敏度的行波保护方案

如前分析，行波判别式的方向行波保护的灵敏度取决于故障点处虚构电压源电压的幅值，在各种不同的故障情况下，各模虚构电压源电压的幅值是不同的。所以，各模继电器的灵敏度是随故障情况而变的，若能够找到一个幅值恒定的虚构电压源，并可用保护

安装处的电压电流来表示之，就可以实现恒定灵敏度的行波保护。

分析可知，除两相不接地故障以外，在其他各种类型的故障情况下，故障相虚构电压源电压的幅值都是固定的，且与故障前故障点处电压的幅值相等。而在两相不接地故障时，故障相虚构电压源的幅值为故障前故障点处电压幅值的$\sqrt{3}/2$。因而用反映故障相虚构电压源电压的行波信号来构成行波判别式，可对绝大多数的故障情况有恒定的灵敏度，而在极为罕见的两相不接地故障情况下，灵敏度降为原来的$(\sqrt{3}/2)^2=3/4$倍，使保护的灵敏度大为稳定。

下面我们来分析，如何利用保护安装处的行波信号来表示故障点处各相虚构电压源的电压。设故障点处三相虚构电压源的电压分别为v_{Fa}、v_{Fb}、v_{Fc}，三模虚构电压源的电压分别为v_{F0}、$v_{F\alpha}$、$v_{F\beta}$，则根据模变换理论，在Karenbauer变换的情况下，它们之间的关系为：

$$\left.\begin{aligned} v_{Fa} &= v_{F0}+v_{F\alpha}+v_{F\beta} \\ v_{Fb} &= v_{F0}-2v_{F\alpha}+v_{F\beta} \\ v_{Fc} &= v_{F0}+v_{F\alpha}-2v_{F\beta} \end{aligned}\right\} \tag{23}$$

根据（6）、（9）两式，可以推出：

$$\left.\begin{aligned} v_{R0}(t)-z_0\cdot i_{R0}(t) &= v_{F0}(t-\tau_0)+z_0\cdot i_{F0}(t-\tau_0)=2v_{F0}(t-\tau_0) \\ v_{R\alpha}(t)-z_\alpha\cdot i_{R\alpha}(t) &= v_{F\alpha}(t-\tau_\alpha)+z_\alpha\cdot i_{F\alpha}(t-\tau_\alpha)=2v_{F\alpha}(t-\tau_\alpha) \\ v_{R\beta}(t)-z_\beta\cdot i_{R\beta}(t) &= v_{F\beta}(t-\tau_\beta)+z_\beta\cdot i_{F\beta}(t-\tau_\beta)=2v_{F\beta}(t-\tau_\beta) \end{aligned}\right\} \tag{24}$$

在三相平衡系统的条件下，有$Z_\alpha=Z_\beta$、$\tau_\alpha=\tau_\beta$，若不计地模（即零模）与线模（即α、β模）行波速度的差别，则有$\tau_0=\tau_\alpha=\tau_\beta=\tau$，这种情况下：

$$\begin{aligned} v_{Fa}(t-\tau) &= v_{F0}(t-\tau)+v_{F\alpha}(t-\tau)+v_{F\beta}(t-\tau) \\ &= \frac{1}{2}[v_{R0}(t)-z_0\cdot i_{R0}(t)]+\frac{1}{2}[v_{R\alpha}(t)-z_\alpha\cdot i_{R\alpha}(t)] \\ &\quad +\frac{1}{2}[v_{R\beta}(t)-z_\beta\cdot i_{R\beta}(t)] \\ &= \frac{1}{2}[v_{Ra}(t)-z_\alpha(i_{Ra}(t)+k\cdot 3i_{R0}(t))] \end{aligned} \tag{25}$$

即：
$$v_{Ra}(t)-z_\alpha[i_{Ra}(t)+k\cdot 3i_{R0}(t)]=2v_{Fa}(t-\tau) \tag{26}$$

同理可得：

$$v_{Fb}(t)-z_\alpha[i_{Rb}(t)+k\cdot 3i_{R0}(t)]=2v_{Fb}(t-\tau) \tag{27}$$

$$v_{Fc}(t)-z_\alpha[i_{Rc}(t)+k\cdot 3i_{R0}(t)]=2v_{Fc}(t-\tau) \tag{28}$$

式中　$k=\dfrac{z_0-z_\alpha}{3z_\alpha}$——为取决于波阻抗的常数

因此，用（26）、（27）、（28）式左端的组合电压就可以表示出故障点处A、B、C三相虚构电压源的电压，所以，它们可被用来构成行波判别式，即：

$$D_a=[v_{Ra}-z_\alpha(i_{Ra}+k\cdot 3i_{R0})]^2+\frac{1}{\omega^2}\left[\frac{dv_{Ra}}{dt}-z_\alpha\frac{d(i_{Ra}+k\cdot 3i_{R0})}{dt}\right]^2$$

$$D_b=[v_{Rb}-z_\alpha(i_{Rb}+k\cdot 3i_{R0})]^2+\frac{1}{\omega^2}\left[\frac{dv_{Rb}}{dt}-z_\alpha\frac{d(i_{Rb}+k3i_{R0})}{dt}\right]^2$$

$$D_c=[v_{Rc}-z_a(i_{Rc}+k\cdot 3i_{R0})]^2+\frac{1}{\omega^2}\left[\frac{dz_{Rc}}{dt}-z_a\frac{d(i_{Rc}+k3i_{R0})}{dt}\right]^2 \tag{29}$$

若故障前故障点处电压的幅值为V_m，则根据前面的分析，在单相接地故障、两相接地故障和三相故障的情况下，故障相虚构电压源电压的幅值也为V_m，对应的故障相的行波判别式的值为$4V_m^2$，例如对A相单相接地故障，因故障后A相虚构电压源的电压为：

$$v_{Fa}=V_m\sin(\omega t+\phi) \tag{30}$$

所以 $$v_{Ra}-z_a[i_{Ra}+k\cdot 3i_{R0}]=2v_{Fa}(t-\tau)=2V_m\sin(\omega t+\phi-\omega t) \tag{31}$$

$$\frac{dv_{Ra}}{dt}-Z_a\frac{d[i_{Ra}+k\cdot 3i_{R0}]}{dt}=2\omega V_m\cos(\omega t+\phi-\omega\tau) \tag{32}$$

将（31）、（32）代入（29）式中，可以得到： （33）

$$D_a=4V_m^2$$

在两相不接地故障时，因故障相虚构电压源电压的幅值为$\sqrt{3}/2V_m$，所以故障相的行波判别式值为$3V_m^2$。

五 结 论

行波判别式的方向行波保护克服了保护的灵敏度随故障初始角度变化的缺点，是行波保护原理的一项突破，但其原始方案中，行波判别式是用模域的行波量来实现的，其灵敏度仍随故障类型和相别的不同而有较大的变化。给保护的整定计算，运行分析和相邻线路保护间的灵敏度配合带来了许多的困难。本文所提出的利用带零序（模）电流补偿的相域行波量构成的行波判别式，克服了模域量保护存在的上述缺陷，能在绝大多数的故障情况下有恒定的值，只有在极为罕见的两相不接地故障时，其值才有所降低，使保护的灵敏度大为稳定，性能大为完善，并且这种保护方案直接采用相域的信号，零序电流可以从中性点回路中获得，不必采用专门的解模电路或相应的解模程序，使保护得以简化。

本论文的研究工作得到了马长贵教授的指导和厉吉文、徐炳垠同志支持和帮助，在此特表感谢。

参考文献

[1] Chamia, M.Liberman, S.Uttra High Speed Relay for EHV/UHV Transmission Lines——Development, Design and Application. IEEE Trans. vol. PAS—97, No. 6. 1978.

[2] Yee, M. T., Esztergalyos, J.: Ultra High speed Relay for EHV/UHV Transmission Lines——Installation, Staged Fault Tests and Operational Experience. ibid, No. 5, 1978.

[3] Takagi, T., et al: Feasibility Study for a Current Differential Carrier Relay System Based on Travelling Wave Theory. IEEE 1978 PES Winter Meeting, P132—3/1—7.

〔4〕 Dommel, H. W., Michels, J. M.. High Speed Relaying Using Travelling Wave Transient Analysis. ibid. A78—214—9

〔5〕 Johns, A. T.: New Ultra High Speed Directional Comparison Techniques for the Protection of E.H.V.Transmission Lines. IEE Proc., Vol 127, Pt. c. No. 4, July 1980.

〔6〕 Vitins, M.: A Fundamental Concept of High Speed Relaying. IEEE Trans. Vol. PAS—100, No. 1, 1981.

〔7〕 Crossley, P. A.: Distance Protection Based on Travelling Vaves. ibid, Vol. PAS—102, No. 9, 1983.

（上接封三）

（f）在整个装置的 λ_{ZSY} 中，占56.88%。

说明在设计上采用通用失效率最小的实芯电位器是合理的。否则会使 λ_{ZSY} 增长到该装置可靠性太低不能应用的程度。如有办法减少电位器的含量，或用失效率小的元器件代用，则装置可靠性特征量会更加改进。

②钮子开关与密封小型中间继电器，二者失效率之和

（a）在 λ_{PS} 中，占59.73%。

（b）在 λ_{ZSY} 中，占9.88%。

（2）降额设计在二极管、三极管、电容器与电阻器上的实施，起到了十分有效的提高可靠性的作用，现以金属膜电阻器为例，如果降额系数S由1／2减小为1／1.5时，将使 λ_{ES} 由 10.274×10^{-6}／hr上升到 11.409×10^{-6}／hr，即失效率增长11.04%。

（3）中控电路中采用“Y”字工况显示，每0.82秒通断一个循环，对工况给以监视是符合可靠性设计原则的。

3．可靠性制造方面

（1）集成电路片坚持在国内一个公司购用MC系列有利于保证产品可靠性。

（2）元器件坚持严格老化筛选，因该装置没有冗余电路，显得更为必要。

（3）该装置出厂前进行高温处理方式的可靠性增长试验，剔除元器件早期失效同样是不可忽略的。

4．该估算结果符合实际运行情况，其特征量数值可以参考使用。

后　　记

本估算分析，是在阿城电站自动化所刘景铎设计师协助下完成的，对此表示衷心谢意，特此声明。

参考文献

GJB299—87电子设备可靠性预计手册。

〔1〕可靠性基础及其应用．机械工业部仪器仪表局出版　1985.03.

〔2〕电子可靠性工程．国防工业出版社出版．1987.05