

考虑设备状态和系统风险的设备重要度评估模型

赵登福¹, 段小峰^{1,2}, 张磊¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 泰州供电公司, 225300, 江苏泰州)

摘要: 为了给状态检修决策过程提供有用的设备重要度信息, 基于缺电损失描述系统风险指标, 首先研究了系统风险灵敏度指标和元件停运前后系统风险差值指标在状态检修体制下的适用性, 接着提出了反映设备当前状态引起系统风险增量的输电设备重要度评估模型. 理论推导和算例分析表明, 灵敏度指标和设备停运前后系统风险差值指标不能正确反映设备当前状态对系统风险的影响, 因而不适用于状态检修体制, 文中提出的评估模型避免了上述两种指标的不足, 在状态检修体制中有很好的适用性.

关键词: 输电设备; 风险; 状态检修; 重要度

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)02-0083-05

Equipment Importance Evaluation Model Considering Equipment Condition and System Risk

ZHAO Dengfu¹, DUAN Xiaofeng^{1,2}, ZHANG Lei¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Taizhou Power Supply Company, Taizhou, Jiangsu 225300, China)

Abstract: To supply equipment importance information for condition-based maintenance (CBM) decision-making, following the system risk index described by power loss, the applicability of sensitivity index and risk difference index in CBM are considered. Then a transmission equipment importance evaluation model is proposed, which reflects the system risk increment caused by the equipment current condition. The theory derivation and instance analysis show that sensitivity index and risk difference can not correctly reflect system risk incremental caused by equipment current condition, while this model avoids the weakness with good applicability for CBM.

Keywords: power transmission equipment; risk; condition-based maintenance; importance

对电力系统中的输电设备进行重要度评估, 是进行输电设备状态检修决策中的重要环节^[1-2], 目前对输电设备重要度的评估主要采用系统风险对元件可靠性参数的灵敏度指标和元件停运前后系统风险差值指标. 文献[3-5]推导了系统风险对元件可靠性参数的关系表达式, 利用这些表达式得到了系统风险对元件可靠性参数的灵敏度, 应用灵敏度能够识别对系统风险有重要影响的薄弱点, 进而为电力系统的规划与运行提供有用的信息. 文献[6]指出了可靠性经济学中的一个基本概念, 即电力设备的价值

取决于它从系统中退出运行所带来的损失, 投资高的设备并不一定比投资低的设备对降低系统风险有更高的价值, 所以该文献根据元件从系统中退出运行所造成的影响, 来评估输电设备的重要度.

以上两种指标适用于系统规划层面, 所使用的电力设备可靠性数据往往是根据历史数据得到的, 它是一种统计意义上的平均值, 是对设备一段时间内运行可靠性的宏观评价. 当前电力设备检修体制正逐步由定期检修向状态检修过渡, 随着状态监测技术的不断进步, 运行人员已经能够连续或者定期

地获取单个设备的状态信息,而设备在系统中的重要度与设备当前的运行状态是密不可分的。

本文首先通过严格理论推导,研究了系统风险灵敏度指标和元件停运前后系统风险差值指标在状态检修体制下的适用性,并在此基础上提出了一种同时考虑设备状态和系统风险的适用于输电设备状态检修的新指标。

1 基本假设

本文的分析过程将基于以下两个基本假设。

假设 1 随着元件强迫停运率的上升,系统风险增大,即系统不存在非同调问题^[6]。

假设 2 系统每多发生一次故障,故障后果将按照类似指数级增长规律急剧扩大,而不是简单的按比例扩大^[7]。

2 基于灵敏度指标的重要度评估模型

输电系统的风险指标用统一的公式表达如下^[3]

$$E(F) = \sum_{x \in X} F(x)P(x) \quad (1)$$

式中: X 表示系统的状态空间; x 表示系统的某一个状态; $F(x)$ 是以系统状态 x 为自变量的风险指标测试函数; $P(x)$ 表示系统状态为 x 的概率。假设系统由 N 个元件组成且所有元件的状态是相互独立的,则系统状态 $x = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_N\}$,其中 x_i 表示第 i 个元件的状态,所以 $P(x) = \prod_{i \in N} P(x_i)$ 。当元件 i 处于运行状态时, $x_i = 1$;当元件 i 处于故障状态时, $x_i = 0$,则 $P(x_i)$ 可以表示为

$$P(x_i) = \begin{cases} f_i, & x_i = 0 \\ 1 - f_i, & x_i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_i 表示元件 i 的强迫停运率。

本文以电力不足期望指标(EDNS)为例进行分析,此时测试函数 $F(x)$ 表示在系统状态 x 下,为使得系统返回到静态安全运行点所需切除的负荷量。

设元件 k 的强迫停运率为 f_k ,根据元件停运与否将系统状态空间 X 划分为两个互斥空间^[8]: $X_1 = \{x \in X \text{ 且 } x_k = 1\}$, $X_2 = \{x \in X \text{ 且 } x_k = 0\}$ 。显然, $X_1 \cup X_2 = X$, $X_1 \cap X_2 = \emptyset$ 。系统风险指标 L_{EDNS} 与元件 k 的强迫停运率 f_k 的关系式推导过程如下^[1]

$$\begin{aligned} L_{EDNS} &= \sum_{x \in X} F(x)P(x) = \\ &= \sum_{x \in X_1} F(x)P(x) + \sum_{x \in X_2} F(x)P(x) = \\ &= \sum_{x \in X, x_k=1} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_k=1)P(x_{k+1}) \cdots P(x_m) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \sum_{x \in X, x_k=0} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_k=0)P(x_{k+1}) \cdots P(x_m) = \\ &= (1-f_k) \sum_{x \in X, x_k=1} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+1}) \cdots P(x_m) + \\ &+ f_k \sum_{x \in X, x_k=0} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+1}) \cdots P(x_m) = \\ &= (1-f_k)D_1 + f_k D_2 = D_1 + f_k(D_2 - D_1) \end{aligned}$$

即

$$L_{EDNS} = D_1 + f_k(D_2 - D_1) \quad (3)$$

式中: $D_1 = \sum_{x \in X, x_k=1} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+1}) \cdots P(x_m)$,其物理意义是已知元件 k 的强迫停运率为0的条件下系统的风险值; $D_2 = \sum_{x \in X, x_k=0} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+1}) \cdots P(x_m)$,其物理意义是,已知元件 k 的强迫停运率为1的条件下系统的风险值。

由 D_1 和 D_2 的物理意义可知, D_1 和 D_2 与元件强迫停运率 f_k 无关,所以由式(3)进一步得到系统风险对元件强迫停运率的灵敏度为

$$I_1 = \frac{\partial L_{EDNS}}{\partial f_k} = D_2 - D_1 \quad (4)$$

根据假设1可知 $D_2 > D_1$,则系统风险与强迫停运率之间的关系如图1所示,灵敏度指标即为图中直线的斜率。

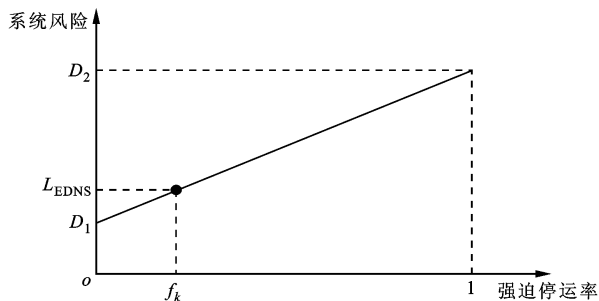


图1 系统风险与强迫停运率之间的关系

元件灵敏度表达式(4)中,因为 D_1 和 D_2 与元件强迫停运率 f_k 无关,所以可以得到结论1。

结论 1 元件 k 的灵敏度指标与其本身强迫停运率的大小无关。

根据式(3)的推导思想,本文推导了 D_1 和 D_2 与元件 k 和元件 $k+1$ 的强迫停运率的关系式

$$D_1 =$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{x \in X, x_k=1} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+1}) \cdots P(x_m) = \\ &= \sum_{x \in X, x_k=1} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+1}=1) \cdots P(x_m) + \\ &+ \sum_{x \in X, x_k=1} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+1}=0) \cdots P(x_m) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& P(x_{k+1} = 1) \sum_{\substack{x \in X \\ x_k=1, x_{k+1}=1}} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1}) \cdot \\
& P(x_{k+2}) \cdots P(x_m) + P(x_{k+1} = 0) \sum_{\substack{x \in X \\ x_k=1, x_{k+1}=0}} F(x) \cdot \\
& P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+2}) \cdots P(x_m) = (1 - f_{k+1})E_1 + f_{k+1}E_2
\end{aligned}$$

即

$$D_1 = (1 - f_{k+1})E_1 + f_{k+1}E_2 \quad (5)$$

$$D_2 =$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{x \in X, x_k=0} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+1}) \cdots P(x_m) = \\
& \sum_{x \in X, x_k=0} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+1} = 1) \cdots P(x_m) + \\
& \sum_{x \in X, x_k=0} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+1} = 0) \cdots P(x_m) = \\
& P(x_{k+1} = 1) \sum_{\substack{x \in X \\ x_k=0, x_{k+1}=1}} F(x)P(x_1) \cdots \\
& P(x_{k-1})P(x_{k+2}) \cdots P(x_m) + P(x_{k+1} = 0) \cdot \\
& \sum_{\substack{x \in X \\ x_k=0, x_{k+1}=0}} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+2}) \cdots P(x_m) = \\
& (1 - f_{k+1})E_3 + f_{k+1}E_4
\end{aligned}$$

即

$$D_2 = (1 - f_{k+1})E_3 + f_{k+1}E_4 \quad (6)$$

将式(5)和式(6)代入式(3)中,得

$$\begin{aligned}
L_{EDNS} = & (1 - f_k)(1 - f_{k+1})E_1 + (1 - f_k)f_{k+1}E_2 + \\
& f_k(1 - f_{k+1})E_3 + f_kf_{k+1}E_4
\end{aligned} \quad (7)$$

式中: $E_1 = \sum_{\substack{x \in X \\ x_k=1, x_{k+1}=1}} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+2}) \cdots$

$P(x_m)$,其物理意义是已知元件 k 和元件 $k+1$ 的强迫停运率都为0的条件下系统的风险值; $E_2 =$

$\sum_{\substack{x \in X \\ x_k=1, x_{k+1}=0}} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+2}) \cdots P(x_m)$,其物

理意义是已知元件 k 的强迫停运率为0、元件 $k+1$ 的强迫停运率为1的条件下系统的风险值; $E_3 =$

$\sum_{\substack{x \in X \\ x_k=0, x_{k+1}=1}} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+2}) \cdots P(x_m)$,

其物理意义是已知元件 k 的强迫停运率为1、元件 $k+1$ 的强迫停运率为0的条件下系统的风险值; $E_4 =$

$\sum_{\substack{x \in X \\ x_k=0, x_{k+1}=0}} F(x)P(x_1) \cdots P(x_{k-1})P(x_{k+2}) \cdots P(x_m)$,

其物理意义是已知元件 k 和元件 $k+1$ 的强迫停运率都为1的条件下系统的风险值。

由 E_1, E_2, E_3, E_4 的物理意义可知, $E_1, E_2, E_3,$

E_4 与元件强迫停运率 f_k 和 f_{k+1} 无关,由式(7)得到系统风险对元件 $k+1$ 的强迫停运率的灵敏度为

$$\begin{aligned}
I_1^{k+1} &= \frac{\partial L_{EDNS}}{\partial f_{k+1}} = \\
& [E_4 - E_3 - (E_2 - E_1)] f_k + E_2 - E_1
\end{aligned} \quad (8)$$

令 $a = E_4 - E_3 - (E_2 - E_1), b = E_2 - E_1$,则

$$I_1^{k+1} = \frac{\partial L_{EDNS}}{\partial f_{k+1}} = af_k + b \quad (9)$$

根据假设1可知 $b > 0$,根据假设2可知 $a > 0$,所以 I_1^{k+1} 是关于 f_k 的增函数,由此得到结论2。

结论2 元件 k 的强迫停运率上升,使得系统风险值对元件 $k+1$ 的强迫停运率的灵敏度变大。

分析造成这种现象的原因是:元件 k 的强迫停运率上升使得系统发生多重故障的可能性变大了,而多重故障的后果是很严重的,这就直接导致系统风险对元件 $k+1$ 的强迫停运率变得更加敏感。

如果以系统风险对元件强迫停运率的灵敏度来衡量元件的重要度,那么根据结论1和结论2可知:元件 k 的强迫停运率上升后,它本身的重要度并没有得到提升,元件 $k+1$ 的重要度反而会增强。这样的结果显然是不合理的,因此在状态检修决策中仅以灵敏度指标来衡量设备重要度不尽合理。

3 基于元件停运前后系统风险差值指标的重要度评估模型

某个元件停运对系统的影响,在由其他元件的随机停运所构成的不同系统状态下是不一样的,这种影响可以借助于系统状态概率与后果综合而构成的风险指标来量化。文献[6]采用的重要度指标是元件停运前后系统风险差值。元件 k 停运前后的系统风险差值 I_2 可表示如下

$$I_2 = D_2 - L_{EDNS} \quad (10)$$

将式(3)代入式(10),得

$$I_2 = (1 - f_k)(D_2 - D_1) \quad (11)$$

由于 D_1 和 D_2 与元件强迫停运率 f_k 无关,且根据假设1可知 $D_2 > D_1$,所以在式(11)中,当元件 k 的强迫停运率 f_k 增大时, I_2 变小,由此可以得到结论3。

结论3 当元件 k 的强迫停运率变大时,其停运前后的系统风险差值变小。

将式(5)和式(6)代入式(11)中,得

$$\begin{aligned}
I_2 = & (1 - f_k) \{ f_{k+1} [(E_4 - E_3 - (E_2 - E_1))] + \\
& (E_3 - E_1) \}
\end{aligned} \quad (12)$$

令 $a=E_4-E_3-(E_2-E_1)$, $b=E_3-E_1$, 则

$$I_2 = (1-f_k)(af_{k+1}+b) \quad (13)$$

根据假设 1 可知 $b>0$, 根据假设 2 可知 $a>0$, 所以元件 k 停运前后的系统风险差值 I_2 是关于元件 $k+1$ 强迫停运率 f_{k+1} 的增函数. 由此得到结论 4.

结论 4 当元件 $k+1$ 的强迫停运率变大时, 元件 k 停运前后的系统风险差值将变大; 反之同理, 当元件 k 的强迫停运率变大时, 元件 $k+1$ 停运前后的系统风险差值将变大.

进一步分析造成这种现象的原因是: 元件 k 的强迫停运率上升使得系统发生多重故障的可能性变大了, 而多重故障的后果是很严重的, 这就直接导致元件 $k+1$ 停运前后的系统风险差值扩大.

如果以元件停运前后的系统风险差值来衡量元件的重要度, 那么根据结论 3 和结论 4 可知: 元件 k 的强迫停运率上升后, 它本身的重要度变弱了, 元件 $k+1$ 的重要度反而会增强. 这样的结果显然是不合理的, 因此在状态检修决策中仅以风险差值指标来衡量设备的重要度不尽合理.

4 输电设备重要度评价新指标

由式(4)可知, 灵敏度指标本质上表示设备强迫停运率分别为 1 和 0 时的系统风险差值, 而这个差值与设备当前的强迫停运率是无关的, 所以灵敏度指标没有反映设备当前状态. 事实上, 设备在系统中的重要度与设备当前的运行状态是息息相关的. 由式(11)可知, 风险差值指标虽然反映了设备状态, 但其反映的规律却不合理.

为了在重要度指标中反映设备的当前状态, 本文提出了以设备当前状态对系统风险影响的指标来评估设备重要度, 即在灵敏度指标的基础上乘以设备强迫停运率

$$I_3 = \frac{\partial L_{EDNS}}{\partial f_k} f_k \quad (14)$$

由式(3)和式(4), 可得

$$I_3 = (D_2 - D_1) f_k = L_{EDNS} - D_1 \quad (15)$$

因为 L_{EDNS} 表示设备在当前状态下(即强迫停运率为 f_k)系统的风险, D_1 表示设备强迫停运率为 0(即完好状态)的条件下系统的风险, 则 I_3 的物理意义是设备当前的状态给系统带来的风险增量.

下面, 分析风险增量指标的正确性. 将式(5)和式(6)代入式(15), 得到元件 k 当前状态给系统带来的风险增量

$$I_3^k = f_k \{f_{k+1}[E_4 + E_1 - (E_3 + E_2)] +$$

$$(E_3 - E_1)\} \quad (16)$$

同理, 元件 $k+1$ 当前状态给系统带来的风险增量

$$I_3^{k+1} = f_{k+1} \{f_k[E_4 + E_1 - (E_3 + E_2)] + (E_2 - E_1)\} \quad (17)$$

则二者的差值为

$$\Delta I_3 = I_3^k - I_3^{k+1} = f_k(E_3 - E_1) - f_{k+1}(E_2 - E_1) \quad (18)$$

ΔI_3 越大, 元件 k 相比于元件 $k+1$ 给系统带来的风险越大, 即越重要.

根据假设 1 可知 $E_3 - E_1 > 0$, 所以 ΔI_3 是关于 f_k 的增函数, 因此可以得到结论 5.

结论 5 当元件 k 的强迫停运率变大时, 元件 k 相比于元件 $k+1$ 给系统带来的风险越大.

如果以风险增量指标来衡量元件的重要度, 根据结论 5 可知, 当元件的强迫停运率变大时, 它相对于其他元件的重要度会增强, 这样的结果显然是合理的.

5 算例分析

图 2 中发电机通过双回线路向负荷供电, 负荷为 P_L . 线路 A 的强迫停运率为 f_A , 线路 B 的强迫停运率为 f_B , 且 $f_A > f_B$. 线路 A 和线路 B 允许通过的额定功率均为 C , 且 $\frac{P_L}{2} < C < P_L$. 下面, 通过评价线路 A 和 B 的相对重要性来分析以上 3 种指标的适用性.

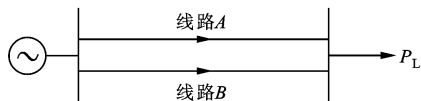


图 2 简单双回线供电系统

线路 A 和 B 是双回线, 它们在网络功率传输方面的作用同等重要, 但是线路 A 的强迫停运率比线路 B 大, 即健康状况相对较差, 所以在检修决策中线路 A 相比于线路 B 需要更多关注度.

(1) 以灵敏度指标 I_1 评估重要度

$$I_1^A = \frac{\partial L_{EDNS}}{\partial f_A} = D_2^A - D_1^A =$$

$$(P_L - C + f_B C) - f_B (P_L - C) =$$

$$P_L - C + f_B (2C - P_L)$$

$$I_1^B = \frac{\partial L_{EDNS}}{\partial f_B} = D_2^B - D_1^B =$$

$$(P_L - C + f_A C) - f_A (P_L - C) =$$

$$P_L - C + f_A (2C - P_L)$$

显然, $I_1^A < I_1^B$, 即线路 B 比线路 A 重要, 这样的结果不合理.

(2) 以风险差值指标 I_2 评估重要度

$$I_2^A = (1 - f_A)(D_2^A - D_1^A) =$$

$$(1 - f_A)(1 - f_B)(P_L - C) - f_A f_B C + f_B C$$

$$I_2^B = (1 - f_A)(D_2^B - D_1^B) =$$

$$(1 - f_A)(1 - f_B)(P_L - C) - f_A f_B C + f_A C$$

显然, $I_2^A < I_2^B$, 即线路 B 比线路 A 重要, 这样的结果不合理.

(3) 以本文指标 I_3 评估重要度

$$I_3^A = \frac{\partial L_{EDNS}}{\partial f_A} f_A =$$

$$f_A(P_L - C) + f_A f_B(2C - P_L)$$

$$I_3^B = \frac{\partial L_{EDNS}}{\partial f_B} f_B =$$

$$f_B(P_L - C) + f_A f_B(2C - P_L)$$

显然, $I_3^A > I_3^B$, 即在状态检修决策中应更关注线路 A, 结论是合理的.

通过以上分析, 一方面说明在状态检修决策中灵敏度指标和风险差值指标不能用来评价设备重要度, 另一方面也验证了本文所提指标的合理性.

6 结 论

本文研究了在输电设备状态检修决策中, 对输电设备重要度的评估模型, 得出了以下结论.

(1) 基于系统风险对元件可靠性参数的灵敏度指标以及元件停运前后风险差值指标的设备重要度评估模型, 由于没有正确反映设备当前状态对系统风险的影响, 因此不能应用于输电设备状态检修决策制定中.

(2) 本文所提出的设备重要度评估模型可充分考虑设备的当前运行状态, 其评估结果合理, 为输电设备状态检修决策提供了一种新方法.

参考文献:

[1] BERTLING L, ALLAN R, ERIKSSON R. A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (1): 75-82.

[2] ENDRENYI J, ANDERS G J, BERTLING L, et al. Comparison of two methods for evaluating the effects of maintenance on component and system reliability[C] // IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power System. Ames, Iowa, USA: Iowa State University, 2004: 307-312.

[3] 赵渊, 周家启, 周念成, 等. 大电力系统可靠性评估的解析计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (5): 19-25.

ZHAO Yuan, ZHOU Jiaqi, ZHOU Niancheng, et al. An analytical approach for bulk power systems [J]. Proceedings of CSEE, 2006, 26(5):19-25.

[4] 赵渊, 周念成, 谢开贵, 等. 大电力系统可靠性评估的灵敏度分析[J]. 电网技术, 2005, 29 (24): 25-30.

ZHAO Yuan, ZHOU Niancheng, XIE Kaigui, et al. Sensitivity analysis on reliability assessment of bulk power system [J]. Power System Technology, 2005, 29(24):25-30.

[5] MELO A C G, PEREIRA M V F. Sensitivity analysis of reliability indices with respect to equipment failure and repair rates [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (2): 1014-1021.

[6] 李文沅. 电力系统风险评估:模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005:183-184.

[7] 程林, 郭永基. 发输电系统充裕度和安全性算法研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (19): 23-26.

CHENG Lin, GUO Yongji. New algorithm of adequacy and security evaluation for bulk power system [J]. Power System Automation, 2001, 25(19):23-26.

[8] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用:上册[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986:117-136.

(编辑 杜秀杰)

《科研论文写作新解》出版

本刊讯 《西安交通大学学报》副主编赵大良编著的《科研论文写作新解》已于 2011 年 9 月由西安交通大学出版社出版. 该书以主编和审稿人的视角诠释了科研论文的写作, 作为科研论文写作教材的辅助读物, 解决了作者与编者之间的信息不对称问题, 适合于具有一定写作基础或投稿经历的读者阅读. 该书尽管是为论文作者而写, 但对于普通期刊编辑认识学术出版的本质、增强与作者沟通的能力、提高办刊水平也具有很好的参考价值.