

准稳态灵敏度的分析方法

孙宏斌 张伯明 相年德

清华大学电机工程与应用电子技术系, 100084 北京

NEW SENSITIVITY ANALYSIS METHOD UNDER QUASI-STEADY-STATE FOR POWER SYSTEMS

Sun Hongbin Zhang Bom ing Xiang Niande

Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084 China

ABSTRACT Quantitative analysis for the limitations of conventional sensitivity analysis method is carried out and the result shows that the conventional method can not consider correctly the physical response of electrical components. In order to overcome the shortcoming, a new quasi-steady-state sensitivity is presented in the paper. The formulations for calculating quasi-steady-state sensitivities are given out. The corresponding software package is developed. The research results show that the new sensitivity analysis method is practical for making decision in real time environment.

KEY WORDS quasi-steady-state; sensitivity analysis; control; power system

摘要 定量剖析了常规灵敏度分析在实时控制应用中不符合电力系统实际的物理响应的局限性, 提出了准稳态灵敏度分析的新方法, 并全面介绍了准稳态灵敏度的计算公式。研究表明, 准稳态灵敏度的分析方法实用性强, 能满足实时控制决策的要求。

关键词 准稳态 灵敏度分析 控制 电力系统

中图分类号 TM 711 TM 734

1 引言

灵敏度分析是一种经典的电力网络分析方法^[1,2], 它基于网络方程的线性化, 研究的是电力系统可控变量与状态变量之间相互变化的定量关系, 它作为一种实用、简单、物理概念清晰且计算效率高的分析方法, 已经在电力系统的分析中得到了广泛的应用^[2~10], 成为电力系统分析的基本工具。

然而, 常规的灵敏度分析仅仅依赖于电力网络方程的线性化, 不考虑电力设备(如: 发电机、负荷等)对各种控制操作和扰动的准稳态的物理响应, 这在一般的静态的电力网络分析中是可行的, 但要服

务于控制决策就无法适用了^[11]。

因此, 与常规的静态灵敏度的分析方法不同, 本文认为, 实用的灵敏度分析方法必须考虑电力系统准稳态的物理响应, 为便于区分, 本文称之为准稳态灵敏度分析的方法。这里, “准稳态”的物理响应是指系统在经受操作或扰动后, 不计系统暂态过程, 但计及系统扰动前后新旧稳态间的总变化。

在电力系统中, 最常见的准稳态物理响应有:

有功频率类: 发电机调速器的频率响应、负荷的频率静特性、区域AGC调节等。

无功电压类: 发电机的自动电压调节(AVR)、发电机的自动无功功率调节(AQR)、发电机的自动功率因数调节(APFR)、负荷的电压静特性等。

在历史上, 曾有少数文献^[3,7,9]指出常规灵敏度分析在应用中的一些缺陷, 并提出过改进措施, 但是, 这些文献面向专门的应用, 只是准稳态灵敏度分析的一种特例, 而未能系统剖析这类问题的物理实质, 更未能全面地解决此类问题。

本文根据应用的不同, 将灵敏度分为三类, 即: 有功类、无功类和经济类, 并分别给出准稳态灵敏度的分析方法, 其中, 以有功类灵敏度作为典型进行深刻剖析。这些准稳态灵敏度的计算均已在实际电网控制中心的能量管理系统得以实现^[11]。

2 准稳态灵敏度分析的基本方法

2.1 常规的灵敏度分析方法

对于给定的电力网络, 非线性的潮流方程可表示为

本文课题获国家“八五”攻关项目资助(合同号: 85-720-10-38)。

$$f(x, u) = 0 \quad (1)$$

$$h = h(x, u) \quad (2)$$

式中 x 为状态变量; u 为控制变量; h 为依从变量。线性化后有

$$\Delta x = S_{xu} \cdot \Delta u \quad (3)$$

$$\Delta h = S_{hu} \cdot \Delta u \quad (4)$$

$$\text{式中 } S_{xu} = - \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right]^{-1} \cdot \frac{\partial f}{\partial u} \quad (5)$$

$$S_{hu} = \frac{\partial h}{\partial x} \cdot S_{xu} + \frac{\partial h}{\partial u} \quad (6)$$

式(5)和(6)即是状态变量和依从变量对控制变量的常规灵敏度的基本算式。

2.2 准稳态灵敏度的分析方法

由于电力系统的物理响应, 电力系统在 Δu^0 的控制作用下, 经过一段过渡过程后将达到一个新的稳态。设在新的稳态下, 真正作用在电力网络上的控制为 Δu , 则增量形式的准稳态的物理响应可形式化地表示为

$$\Delta u = F_u \cdot \Delta u^0 \quad (7)$$

式中 F_u 为 $R^{N_u \times N_u^0}$ 为准稳态物理响应线性化后的系数矩阵。

本文定义准稳态灵敏度 S_{xu}^R 和 S_{hu}^R 为

$$\Delta x = S_{xu}^R \cdot \Delta u^0 \quad (8)$$

$$\Delta h = S_{hu}^R \cdot \Delta u^0 \quad (9)$$

$$\text{式中 } S_{xu}^R = S_{xu} \cdot F_u \quad (10)$$

$$S_{hu}^R = S_{hu} \cdot F_u \quad (11)$$

式(10)和(11)即是准稳态灵敏度的基本算式。

3 准稳态有功类灵敏度的分析

3.1 常规有功类灵敏度的计算

设电网节点数为 N , 第 N 个节点为参考节点, 串联支路数为 b 。基于 PQ 解耦模型, 状态变量 x 为电压相角 θ , 控制变量 u 为节点有功注入 P , 依从变量有支路有功潮流 P_b , 重要的有功类灵敏度有 S_θ 和 $S_{P_b P}$ 。有功潮流的线性化程度很高, 通常采用如下的直流潮流模型^[4]来计算灵敏度:

$$\Delta \theta = X \cdot \Delta P \quad (12)$$

$$\Delta P_b = X_b^{-1} \cdot A^T \cdot \Delta \theta \quad (13)$$

式中 X 为 $R^{(N-1) \times (N-1)}$ 为由串联支路电抗形成的节点电抗矩阵; X_b 为 $R^{N_b \times N_b}$ 为原始支路电抗矩阵; A

为降阶的节点-支关联阵。

因此, 灵敏度计算式为

$$S_\theta = X \quad (14)$$

$$S_{P_b P} = X_b^{-1} \cdot A^T \cdot X \quad (15)$$

3.2 常规有功类灵敏度局限性的定量分析

式(12)决定了系统中由于功率调节而引起的系统功率失配将完全由虚设的参考节点 N 来承担, 这不符合电力系统实际的物理响应, 也使得参考节点功率无法充当控制量, 因此, 由式(14)和式(15)计算出的灵敏度可能与实际情况相去甚远, 无法实用。

为了改进常规有功灵敏度, 文献[3]和文献[10]分别提出了广义发电分布因子(GGDF)和广义负荷分布因子(GLDF), 在 GGDF/GLDF 中, 不需要平衡机, 系统中的功率失配将均匀地由全系统的负荷来平衡。这一隐含的物理条件相对较合理一些, 但它只是准稳态物理响应的一种特例, 与实际物理响应仍有较大距离, 仍不能满足实时应用的需要。

为了明确提出准稳态灵敏度, 本文对常规有功类灵敏度的局限性作定量分析。分析的基点是对电抗阵与参考节点选取的关系的分析, 考虑到电抗阵是忽略支路电阻形成的阻抗阵, 它是阻抗阵的一种特例。为了使定量分析具有普遍性, 故以阻抗阵作为研究对象。

(1) 包含参考节点 N 的增广阻抗阵

为便于定量分析, 首先将参考节点增广进阻抗阵。从阻抗阵的物理意义以及数值计算(即: 将包含参考节点的增广导纳阵中对应于参考节点的对角元加大数后求逆得增广阻抗阵)这两个角度考虑, 增广参考节点后的新阻抗阵为

$$Z = \begin{bmatrix} Z^0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中 Z^0 为 $C^{(N-1) \times (N-1)}$ 和 Z 为 $C^N \times N$ 分别为增广参考节点前后的阻抗阵。

(2) 参考节点改变时增广阻抗阵的变换

对于 N 个节点的电力网络(无并联对地支路), 若选定 s 节点作为参考节点, 形成增广阻抗阵 Z (其中第 s 行列的元素全为零值), 当参考节点由节点 s 变到 k 时, 由节点阻抗方程式和 KCL 定律, 可推导出新阻抗矩阵 Z 的计算公式^[11]

$$Z = TZT^T \quad (17)$$

式中 T 为变换矩阵, 定义为

$$T = \begin{bmatrix} 1 & & & -1 \\ & \ddots & & \vdots \\ & & 1 & -1 \\ & & 0 & \\ & & -1 & 1 \\ & & \vdots & \ddots \\ & -1 & & 1 \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (18)$$

k

(3) 常规有功类灵敏度与参考节点选取的定量关系

本文中所有矩阵均考虑为增广参考节点后的矩阵。根据式(16), 增广参考节点 N 后, 原有的灵敏度元素值(见式(14)和(15))保持不变, 而所有增广而得的灵敏度元素值必均为零值, 即有

$$S_{\Theta}(N, j) = 0 \quad j = 1, \dots, N \quad (19a)$$

$$S_{\Theta}(i, N) = 0 \quad i = 1, \dots, N \quad (19b)$$

$$S_{P_b P}(i, N) = 0 \quad i = 1, \dots, b \quad (19c)$$

由变换公式(17), 可得参考节点改变为 k 节点后的灵敏度计算公式

$$S_{\Theta} = T \cdot X \cdot T^T \quad (20)$$

$$S_{P_b P} = X_b^{-1} \cdot A^T \cdot (T \cdot X \cdot T^T) \quad (21)$$

进一步, 可得参考节点由节点 N 变到 k 前后灵敏度元素的变化量为

$$\Delta S_{\Theta}(i, j) = S_{\Theta}(i, j) - S_{\Theta}(i, j) = - [S_{\Theta}(i, k) + S_{\Theta}(k, j) - S_{\Theta}(k, k)] \quad (22a)$$

$$S_{P_b P}(i, j) = S_{P_b P}(i, j) - S_{P_b P}(i, j) = - S_{P_b P}(i, k) \quad (22b)$$

式(22b)定量地揭示了常规有功灵敏度在实时控制应用中的局限性。即对支路功率的调整与参考节点的选择关系很大, 不同的参考节点可以得到完全不同的灵敏度。而且式(19)表明, 参考节点的功率无法参与控制。

图1为三节点电力系统。图中给出了支路阻抗。设支路编号顺序为: 1-2, 2-3, 1-3, 利用式(14)和(15), 可计算当选择节点1作为参考节点时的灵敏度

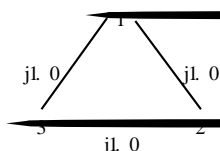


图1 三节点电力系统
Fig 1 Three buses power system

$$S_{\Theta} = \begin{bmatrix} 0 & 000 & 0 & 000 & 0 & 000 \\ 0 & 000 & 0 & 667 & 0 & 333 \\ 0 & 000 & 0 & 333 & 0 & 667 \end{bmatrix}$$

$$S_{P_b P} = \begin{bmatrix} 0 & 000 & -0 & 667 & -0 & 333 \\ 0 & 000 & 0 & 333 & -0 & 333 \\ 0 & 000 & -0 & 333 & -0 & 667 \end{bmatrix}$$

当取节点2作为参考节点时, 可计算得

$$S_{\Theta} = \begin{bmatrix} 0 & 667 & 0 & 000 & 0 & 333 \\ 0 & 000 & 0 & 000 & 0 & 000 \\ 0 & 333 & 0 & 000 & 0 & 667 \end{bmatrix}$$

$$S_{P_b P} = \begin{bmatrix} 0 & 667 & 0 & 000 & 0 & 333 \\ -0 & 333 & 0 & 000 & -0 & 667 \\ 0 & 333 & 0 & 000 & -0 & 333 \end{bmatrix}$$

由这一算例结果便可容易地验证上述定量分析结论(式(19)~(22))的正确性。

3.3 准稳态有功类灵敏度的计算

不同的电力系统有不同的准稳态物理响应, 因此, 式(7)中的系数阵 F_u 可能千差万别, 需要深入研究具体的电力系统来加以确定。本文通过考虑电力系统的频率响应作为特例来阐明准稳态灵敏度的优势。

在无功控制中, 考虑发电机调速器和负荷频率特性, 当电力系统达到一个新的稳态时, 由于控制产生的系统功率失配量将按频率特性由所有的发电机和负荷来分担。设母线功率注入的分担系数矢量为 $\alpha \cdot R^N$ 。由于在新的稳态下, 系统功率平衡, 若忽略网损的变化, 则由控制产生的系统功率失配量将全部由所有母线来承担, 则必有

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1.0 \quad (23)$$

进一步由定义式(7)和线性叠加原理, 可得

$$F_u = \begin{bmatrix} 1 - \alpha_1 & -\alpha_1 & \dots & -\alpha_1 \\ -\alpha_2 & 1 - \alpha_2 & \dots & -\alpha_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\alpha_N & -\alpha_N & \dots & 1 - \alpha_N \end{bmatrix} \quad (24)$$

上式的物理图像是: 若在第 i 号母线上增加1个单位的注入功率, 则在该控制(或扰动)作用下, 由于电力系统的频率响应, 电力系统经过一段过渡过程后将达到一个新的稳态, 在新稳态下, 真正作用在电力网络上的母线注入功率的增量则为:

$$[-\alpha_1 \dots 1 - \alpha_i \dots -\alpha_N]^T$$

i

由式(23)可知, 在新稳态下, 功率失配量将按频率特性由所有的母线分担, 系统功率仍保持平衡。

这时,由式(10)和(11),可得准稳态有功类灵敏度为

$$S_{\Phi}^R = X \cdot F_u \quad (25)$$

$$S_{P_bP}^R = X_b^{-1} \cdot A^T \cdot X \cdot F_u \quad (26)$$

式中的 F_u 由式(24)给出。

由式(25)和(26)可以验证,当参考节点的分担系数取1.0,而其他节点的分担系数为0时的准稳态灵敏度即是常规灵敏度。显然,由式(25)和(26)给出的准稳态灵敏度比常规灵敏度具有明显的优势,由控制引起的功率失配量将根据系统频率响应特性由各发电机和负荷分担,这与电力系统的物理响应相符合。同时可得

$$S_{P_bP}^R(i, N) = - \sum_{n=1}^N [\alpha_n \cdot S_{P_bP}(i, n)] \quad i=1, \dots, b \quad (27)$$

式中 $S_{P_bP}(i, n)$ 均为常规灵敏度元素。

显然, $S_{P_bP}^R(i, N)$ 不再为零,即参考节点的功率注入能够参与潮流控制。

同样,可给出参考节点变化时的准稳态灵敏度的变换公式(节点 k 为新的参考节点):

$$(S_{\Phi}^R(i, j)) = S_{\Phi}^R(i, j) - S_{\Phi}^R(k, j) \quad i, j = 1, \dots, N \quad (28a)$$

$$(S_{P_bP}^R(i, j)) = S_{P_bP}^R(i, j) \quad i = 1, \dots, b; \quad j = 1, \dots, N \quad (28b)$$

上式表明, $S_{P_bP}^R$ 的计算与参考节点的选取无关。这展示了准稳态灵敏度在应用中的优越性。它能灵活地选择功率缺额的分担系数 α , 以适应不同的实际系统的需要,摆脱了常规灵敏度分析的局限性,隐含了实际系统的准稳态物理响应,具有很高的实用性。

对图1的三节点系统,设功率失配量的分担系数 $\alpha = [0.1 \quad 0.3 \quad 0.6]^T$, 则有

$$F_u = \begin{bmatrix} 0.9 & -0.1 & -0.1 \\ -0.3 & 0.7 & -0.3 \\ -0.6 & -0.6 & 0.4 \end{bmatrix}$$

若取节点1为参考节点,由式(25)和(26)可计算出准稳态灵敏度:

$$S_{\Phi}^R = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ -0.400 & 0.267 & -0.067 \\ -0.500 & -0.167 & 0.167 \end{bmatrix}$$

$$S_{P_bP}^R = \begin{bmatrix} 0.400 & -0.267 & 0.067 \\ 0.100 & 0.433 & -0.233 \\ 0.500 & 0.167 & -0.167 \end{bmatrix}$$

若取节点2为参考节点,可计算出准稳态灵敏度:

$$(S_{\Phi}^R) = \begin{bmatrix} 0.400 & -0.267 & 0.067 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ -0.100 & -0.433 & 0.233 \end{bmatrix}$$

$$(S_{P_bP}^R) = \begin{bmatrix} 0.400 & -0.267 & 0.067 \\ 0.100 & 0.433 & -0.233 \\ 0.500 & 0.167 & -0.167 \end{bmatrix}$$

由这一算例结果也容易验证本节结论式(27)和(28)的正确性。

4 准稳态无功类灵敏度的分析

在无功类的准稳态物理响应中,本文考虑最常见的情形,即各发电机安装有AVR(或AQR或APFR),并且负荷有电压静特性。

在准稳态的范畴内,当发电机安装有AVR时,可认为该发电机节点为PV节点;而当装有AQR或APFR时,可认为该发电机节点与普通负荷节点相同,均为PQ节点。此外,将负荷电压静特性考虑成节点电压的一次或二次曲线。这样,在潮流建模时就可自然地这些准稳态的物理响应加以考虑,从而使基于该潮流模型计算出的灵敏度即为准稳态灵敏度。在该潮流模型下,设PQ节点和PV节点个数分别为 N_{PQ} 和 N_{PV} , 状态变量 x 是PQ节点的电压幅值 V_{PQ} $R^{N_{PQ}}$, 控制变量 $u = [Q_{PQ} V_{PV} T_k]^T$, 其中 Q_{PQ} $R^{N_{PQ}}$ 是PQ节点的无功注入, V_{PV} $R^{N_{PV}}$ 是PV节点的电压幅值, T_k R^{N_T} 是变压器变比,重要的依从变量 $h = [Q_b \quad Q_{PV}]^T$, 其中 Q_b R^b 是支路无功潮流, Q_{PV} $R^{N_{PV}}$ 是PV节点的无功注入。这时,无功潮流模型为

$$Q_{PQ}(V_{PQ}, V_{PV}, T_k) = 0 \quad (29)$$

$$Q_b = Q_b(V_{PQ}, V_{PV}, T_k) \quad (30)$$

$$Q_{PV} = Q_{PV}(V_{PQ}, V_{PV}, T_k) \quad (31)$$

由式(5)和(6),可得准稳态无功类灵敏度的计算公式,见表1。

表1 准稳态无功类灵敏度的计算公式
Tab 1 Formulations for reactive sensitivities under quasi-steady-state

(x, h)	Q_{PQ}	V_{PV}	T_k
V_{PQ}	$-\left[\frac{\partial Q_{PQ}}{\partial V_{PQ}}\right]^{-1}$	$S_{V_{PQ}Q_{PQ}} \cdot \frac{\partial Q_{PQ}}{\partial V_{PV}}$	$S_{V_{PQ}Q_{PQ}} \cdot \frac{\partial Q_{PQ}}{\partial T_k}$
Q_b	$\frac{\partial Q_b}{\partial V_{PQ}} \cdot S_{V_{PQ}Q_{PQ}}$	$\frac{\partial Q_b}{\partial V_{PV}} \cdot S_{V_{PV}V_{PQ}} + \frac{\partial Q_b}{\partial V_{PV}}$	$\frac{\partial Q_b}{\partial T_k} \cdot S_{V_{PQ}T_k} + \frac{\partial Q_b}{\partial T_k}$
Q_{PV}	$\frac{\partial Q_{PV}}{\partial V_{PQ}} \cdot S_{V_{PQ}Q_{PQ}}$	$\frac{\partial Q_{PV}}{\partial V_{PV}} \cdot S_{V_{PV}V_{PQ}} + \frac{\partial Q_{PV}}{\partial V_{PV}}$	$\frac{\partial Q_{PV}}{\partial T_k} \cdot S_{V_{PQ}T_k} + \frac{\partial Q_{PV}}{\partial T_k}$

表1给出的准稳态灵敏度中,负荷的电压静特性已在各种关于负荷节点电压的Jacobian阵中得

到体现, 而且已经不存在虚设的参考节点, 对 PQ 节点是无功注入 Q_{PQ} 直接参与控制, 而对 PV 节点, 是由电压 V_{PV} 来充当控制量。

5 准稳态经济类灵敏度的分析

本文以经济性指标网损 P_L 为控制目标, 显然 P_L 是一种重要的依从变量, 考虑准稳态, 并分别基于有功模型和无功模型, 则网损模型为

$$P_L = P_L(\Theta) \quad (32)$$

$$P_L = P_L(V_{PQ}, V_{PV}, T_k) \quad (33)$$

表 2 给出准稳态的网损灵敏度计算公式。

表 2 准稳态的网损灵敏度 $S_{P_L u}$ 的计算式

Tab 2 Formulations for sensitivities of MW loss under quasi-steady-state

	P	Q_{PQ}	V_{PV}	T_k
P_L	$\frac{\partial P_L}{\partial P} \cdot S_{\Theta P}^R$	$\frac{\partial P_L}{\partial Q_{PQ}} \cdot S_{V_{PQ} Q_{PQ}}^{SV}$	$\frac{\partial P_L}{\partial V_{PV}} \cdot S_{V_{PQ} V_{PV}}^{SV} + \frac{\partial P_L}{\partial V_{PV}}$	$\frac{\partial P_L}{\partial T_k} \cdot S_{V_{PQ} T_k}^{SV} + \frac{\partial P_L}{\partial T_k}$

表 2 中, $S_{\Theta P}^R$ 的计算公式见式 (25), $S_{V_{PQ} Q_{PQ}}^{SV}$ 、 $S_{V_{PQ} V_{PV}}^{SV}$ 、 $S_{V_{PQ} T_k}^{SV}$ 的计算公式见表 1。

6 结论

(1) 准稳态灵敏度的分析方法考虑了电力系统准稳态的物理响应, 弥补了常规灵敏度分析方法的不足, 满足了实时控制决策的要求。

(2) 本文基于 PQ 解耦模型, 将灵敏度分为有功类、无功类和经济类, 全面给出并实现了此三类准稳态灵敏度分析的具体方法。

(3) 以常规有功类灵敏度作为典型, 定量地剖析了常规灵敏度分析在实时控制应用中的局限性, 推

导了阻抗阵和有功类灵敏度与参考节点选取的定量关系, 揭示了参考节点变化对常规有功类灵敏度计算结果的影响以及在常规灵敏度中参考节点的有功注入无法参与控制等缺陷。

7 参考文献

- 1 Peschon J *et al* Sensitivity in power systems IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1968, 87: 1687-1696
- 2 吴际舜 电力系统静态安全分析 上海: 上海交通大学出版社, 1985
- 3 Ng W Y. Generalized generation distribution factors for power system security evaluation IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(3): 1001-1005
- 4 Chang Y C, Liu C C, Yang W T. Real-time line flow calculation using a new sensitivity method Electric Power System Research, 1992, 24: 127~ 133
- 5 Singh S P, Raju G S, Gupta A K. Sensitivity based expert system for voltage control in power system. Electrical Power & Energy Systems, 1993, 15(3): 131~ 136
- 6 Exposito A G, Ramos J L M *et al* Sensitivity-based reactive power control for voltage profile improvement IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 937~ 945
- 7 Chang Y C, Yang W T, Liu C C. Improvement on GGDF for power system security evaluation IEE Proceedings Part C, 1994, 141(2): 85~ 88
- 8 Shultz R D, Muslu M, Smith R D. A new method in calculating line sensitivities for power system equivalencing IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1465~ 1470
- 9 Crisan O, Liu M. Voltage collapse prediction using an improved sensitivity approach Electric Power System Research, 28(1994): 181~ 190
- 10 Sun H B, Zhang B M, Xiang N D. Sensitivity analysis method with on-line application to EMS 3rd International Conference on Advances in Power System Control, Operation & Management, Hong Kong, 1995: 375~ 380
- 11 孙宏斌 电力系统全局无功优化控制的研究 [博士学位论文], 北京: 清华大学 1996, 11

收稿日期: 1997-09-25; 改回日期: 1998-04-08。

孙宏斌 1969 年生, 1997 年获清华大学博士学位, 讲师, 从事 EMS 和 DMS 的研究和开发工作, 曾获国家教委科技进步二等奖。