DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2006.01.017
2006年 1月 北京航空航天大学学报 January 2006
第32卷 第1期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol.32 No.1

电磁轴承电磁铁单边工作控制方式的实现

邢 涛 张庆春 李国栋 梁迎春

(哈尔滨工业大学 机电工程学院,哈尔滨 150001)

摘 要:由于电磁力与位移及励磁电流的强非线性,使电磁轴承AMB(Active Magnetic Bearing)系统精确建模比较困难,较高的偏置电流增加了系统的功耗,系统的高刚度与大范围稳定又是一对矛盾体.为此,在建模型时,以电磁力为控制量,将电磁力计算公式、电磁铁及功率放大器集成为电磁力构件,避开了电磁力非线性的影响;在基础电流为0.2 A时,采用电磁轴承单边的工作方式,实现了系统的高刚度;以模糊控制方法解决了系统高刚度与大范围稳定的矛盾.仿真与试验表明:以电磁力构件的方式构造电磁轴承模型有较好的精度,采用单边的工作方式降低了系统的功率损耗,采用模糊控制方法实现了系统大范围稳定小范围内高刚度.

关 键 词:电磁轴承;模糊控制;T-S模型

中图分类号:TH 133.3

文献标识码:A **文 章 编 号**:1001-5965(2006)01-0069-05

Realization of single side working mode of active magnetic bearings

Xing Tao Zhang Qingchun Li Guodong Liang Yingchun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: It is difficult to provide an accuracy model for an AMB(active magnetic bearing) system due to the strong nonlinearity among magnetic force, the currents flowing in the coils and the displacements between the rotor and the AMBs. The bias currents in the coils increase the system power loss. For AMBs, higher stiffness and system stability in a larger displacement range could not be achieved at the same time. Magnetic force was considered as a controlled object and a component named magnetic force component with magnets and power amplifiers included was built to avoid nonlinearity of the model for the AMB system. With a base current of 0.2 A in the coils, high bearing stiffness was obtained when single side working mode of AMBs was achieved. To achieve higher stiffness and stability in a larger range at the same time, a fuzzy control method was used. Simulations and experiments show that a more accurate AMB model can be obtained with magnetic force component used; System power loss is reduced when single side working mode of AMBs is achieved and higher stiffness and stability in a larger range are achieved at the same time with the fuzzy control method used.

Key words: active magnetic bearing; fuzzy control; T-S fuzzy control

电磁轴承AMB(Active Magnetic Bearing)是利用电磁力使转子稳定悬浮的一种新型轴承,具有无接触、无摩擦、无需润滑、刚度阻尼可调和寿命长等优点.在电磁轴承建模时,对电磁力的计算通常采用线性化公式.Switcher[1]所提出的电磁力线性化方法,在小范围内电磁力计算有较好的计算精度,随着偏离工作点其计算精度下降;文献[1,2]实现了全局线性化,但其以磁通为控制量,而磁通的测量比较困难;文献[3]使用了反馈线性化,反馈线性化的反馈与控制器之间有耦合,影响了控制器的性能,这些方法在电磁轴承系统建模时都不是很理想.电磁铁对拉的工作方式是为了电磁力的线性化计算而设定的,在这种工作方式下,即使转子没有位移偏差,在电磁铁线圈中也有偏置电流,为了实现磁轴承的高刚度必须设定较大的偏置电流,这使电磁轴承功率损耗加大.在磁悬

收稿日期:2004-10-22

作者简介:邢 涛(1971—),男,山东蓬莱人,博士生,russian01@163.com.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

浮系统中轴承高刚度和大范围稳定是一对矛盾;文献[4]采用变增益方法实现了高刚度和大范围稳定,但是变增益方法只能针对系统在高刚度和大范围稳定的各自特点设计一个折中的控制器,这种控制器在系统对动态性能要求较高时表现出不足.

本文采用数字控制的方法,在建模时以电磁力为控制量,将电磁力计算公式、电磁铁及功率放大器集成为电磁力构件,避开了电磁力非线性的影响,提高了建模精度.采用电磁铁单边工作方式,即当转子产生位移偏差时,使气隙增大的一边电磁铁线圈通过控制电流,另一边的电磁铁线圈保持设定的较小的恒定电流,此电流定义为基础电流,降低了系统的功率损耗.建立了电磁轴承T-S模糊模型,利用平行分布补偿PDC(Parallel Distribution Compensates)的概念进行模糊控制器设计,解决了电磁铁高刚度与大范围稳定的矛盾.

1 电磁铁单边工作方式数字控制

电磁铁的工作方式如图1所示,控制器根据所测的位置与设定位置之间的偏差按一定控制规律输出控制量,转变成电压控制信号至功率放大器,由功率放大器改变电磁铁 A 和 B 的励磁电流,调节电磁铁 A 和 B 产生的电磁拉力,使转子在设定位置附近达到稳定悬浮.

电磁轴承模型通常为图2所示,对电磁力线性化,建立线性控制模型,以电流作为控制量进行控制器设计.本文采用图3所示结构图,以电磁力构件方式建模,将电磁力作为控制量设计控制器.

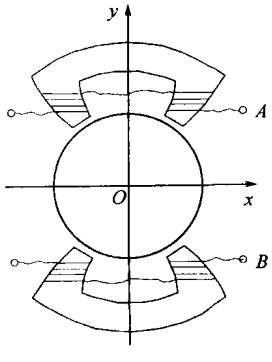


图1 电磁铁工作方式

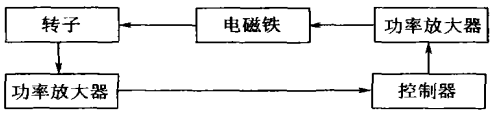


图2 通常采用的控制模型

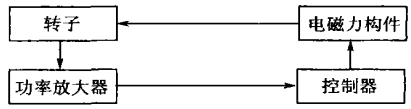


图3 单边工作方式控制模型

根据图3建立电磁轴承系统单边工作方式下转子动力学方程,忽略结构阻尼和陀螺效应(陀螺效应采用交叉解偶的方式控制),用 $2n$ 个自由度的物理数学模型来描述以电磁力为控制变量的电磁轴承系统:

$$\boldsymbol{M}\{\ddot{\boldsymbol{z}}\}+\boldsymbol{C}\{\dot{\boldsymbol{z}}\}+\boldsymbol{K}\{\boldsymbol{z}\}=\boldsymbol{Q}\{\boldsymbol{f}\} \tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{M}$ 为质量矩阵;$\boldsymbol{C}$ 为转子外阻尼矩阵;$\boldsymbol{K}$ 为转子的刚度矩阵;$\boldsymbol{Q}$ 为控制输入矩阵;$\{\boldsymbol{z}\}=\{z_1,\theta_1,z_2,\theta_2,\cdots,z_n,\theta_n\}^{\mathrm{T}}$ 为转子的广义坐标;$\boldsymbol{f}$ 为控制力.设系统离散化状态方程为

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{x}(k+1)&=\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}_2\cdot\boldsymbol{f}(k)\\ \boldsymbol{y}(k+1)&=\boldsymbol{C}_2\cdot\boldsymbol{x}(k+1)\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

其中,$k=1,2,\cdots,n$;$\boldsymbol{x}(k)\in\mathbf{R}^n$,$\boldsymbol{f}(k)\in\mathbf{R}^m$,$\boldsymbol{y}(k)\in\mathbf{R}^{\eta}$分别为系统的状态、控制输入和观测输出;$\boldsymbol{A}$,$\boldsymbol{B}$,$\boldsymbol{C}$ 为适当维数的矩阵.

控制器可采用线性控制理论进行设计,如PID,H_∞等.通过某种控制方式得到输出反馈控制:

$$\boldsymbol{f}(k)=\boldsymbol{G}(k)\cdot\boldsymbol{y}(k) \tag{3}$$

其中 $\boldsymbol{G}(k)$为控制器传递函数.

设计出控制器后,下边将实现控制力的构建.$\boldsymbol{f}(k)$为电磁铁 A 和 B 共同作用产生的电磁力,则

$$f_i(k)=f_a(k)-f_b(k) \tag{4}$$

其中,$f_i(k)$为 $\boldsymbol{f}(k)$中的一个元素;$f_a(k)$为电磁铁 A 产生的电磁力;$f_b(k)$为电磁铁 B 产生的电磁力.

电磁力的计算一般采用式(5)[1].式(5)忽略了漏磁和能量损失,假定线圈与电源之间没有能量交换.电磁铁在高频控制电流作用下产生的涡流及转子在磁场中高速旋转引起的涡流会引起电磁轴承承载力的下降[5];转子高速旋转时离心力引起的转子直径的变化及温度引起转子的热变形,会引起气隙的变小导致电磁力的计算产生偏差;温度会影响电磁铁及转子中涡流大小;则电磁力变为控制电流、转子气隙、转子转速及系统温度的函数.将电磁铁 A 和 B 中的电流分开考虑,同时考虑温度、转速、控制电流及气隙厚度的影响和功率放大器的增益,将式(5)变为式(6),则

$$F=\frac{\mu_0 n^2 s}{4}\cos\theta\cdot$$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\left[\left(\frac{I_0-i}{h_0+x}\right)^2-\left(\frac{I_0+i}{h_0-x}\right)^2\right] \tag{5}$$

$$f=k_a k_0\left[\left(\frac{I_0+u_{ia}}{h_0+x}\right)^2-\left(\frac{I_0+u_{ib}}{h_0-x}\right)^2\right] \tag{6}$$

其中,$k_0=\varphi(x,i,\omega,\tau)\cdot\frac{\mu_0 n^2 s}{4}\cos\theta$;$\mu_0$ 为空气磁导率;n 为线圈匝数;s 为磁极面积;θ 为磁极偏角;I_0 为工作点电流;φ 为考虑温度 τ、转速 w、位移 x 及控制电流 i 的系数因子;u_{ia} 为电磁铁 A 的控制电流;u_{ib} 为电磁铁 B 的控制电流;k_a 为功率放大器增益.由式(6)得到单边工作方式下控制电流计算公式:

如果控制力方向与 A 电磁铁产生的电磁力方向相同,则

$$\left.\begin{aligned}u_{ia}(k)&=I_0+(x_0+y_i(k))\cdot\\&\quad\sqrt{-f_i(k)/k_0+I_0^2/(x_0-y_i(k))^2}\\u_{ib}(k)&=I_0\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

其中 $y_i(k)$ 为 $\boldsymbol{y}(k)$ 中的一个元素.如果控制力与 B 电磁铁产生的电磁力方向相同,则

$$\left.\begin{aligned}u_{ia}&=I_0\\u_{ib}(k)&=I_0+(x_0-y_i(k))\cdot\\&\quad\sqrt{f_i(k)/k_0+I_0^2/(x_0+y_i(k))^2}\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

式(7)、式(8)为电磁铁单边工作方式下电磁力构件数学表达式.

采用单边工作方式理想的状态是电磁铁 A,B 产生的对拉作用为零,则电磁铁基础电流为零,但是基础电流设为零,电磁力响应速度不能够满足要求.

设转子的位移为 $y_i(k)=A_0\sin(\omega k+\varphi)$,则力的响应速度为

$$\frac{\partial f_i(k)}{\partial(\omega k)}=G_i(k)A_0\omega\cos(\omega k+\varphi) \tag{9}$$

其中 $G_i(k)$ 为 $\boldsymbol{G}(k)$ 中的一个元素.对于放大器电流摆率,必须满足下式[5]

$$\frac{\partial i}{\partial t}\leqslant\frac{U_c}{L}$$

电磁铁 A,B 为对称结构,为此只考虑电磁铁 A 工作的情况,则

$$\frac{\partial f}{\partial t}=\frac{\partial f}{\partial u_{ia}}\frac{\partial u_{ia}}{\partial t}=$$

$$k_0\left[\frac{I_0^2+I_0+u_{ia}I_0+u_{ia}}{(h_0+y_i(k))^2}\right]\frac{U}{L}\leqslant$$

$$k_0\left[\frac{I_0^2+I_0+u_{ia}I_0+u_{ia}}{(h_0+y_i(k))^2}\right]\frac{U_c}{L} \tag{10}$$

对式(10)分析可知,如果工作点电流为零和控制电流为零,则电磁力响应速度也为零.提高工作点电流和减小气隙有助于提高系统的电磁力响应速度,为此基础电流的确定一般应该在满足电磁力响应速度前提下,尽量取较小的值以降低功耗.

2　模糊控制器的设计

对式(9)分析可知:电磁力的响应速度与 $G(k)$ 与 $A_0\omega$ 的积相关,在电磁铁响应速度确定的情况下,提高控制器的反馈刚度与系统的稳定范围、控制带宽是相互矛盾的.在提高系统反馈刚度的同时必须降低 $A_0\omega$ 值,也就是说在提高反馈刚度和控制带宽时,转子的稳定范围变小.变增益方法可以实现小范围高刚度及大范围稳定,但是变增益方法处理这个问题太粗糙,特别是对于挠性转子将磁力约束代之以适当的弹簧约束进行模态分析时,变增益环节调节电磁轴承支撑刚度同时转子模态也发生了变化,这将引起控制质量下降甚至使系统失稳.为此采用模糊控制方法解决反馈刚度与大范围稳定的矛盾.

T-S 模糊模型是一种本质非线性模型,宜于表达复杂系统的动态特性.由于该模型的后件是子系统的线性多项式形式,因此可以采用线性控制理论设计子系统的控制器,Buckley 已经证明这种控制器是一种完备的全局控制器[6].可以对转子位移分档,并作为模糊系统的前件变量,针对转子在不同支撑刚度下其动力学特性改变的特点,用不同的状态点对应电磁轴承系统状态方程建立 T-S 模型.T-S 模糊模型是将每一个推理规则的局部动态过程表示线性模型,整体系统通过 n 个线性子系统的模糊合成得到.令 R_i 表示模糊系统的第 i 条规则,则 T-S 模型描述如下:

$$\left.\begin{aligned}R_i:&\text{If}\,z_i(t)\,\text{is}\,M_i\,\text{and},\cdots,\text{and}\,z_p(t)\,\text{is}\,M_p,\,\text{then}\\\dot{x}_i(k)&=A_1^i x_i(k)+B_2^i f_i(k)\\y_i(k)&=C_2^i x_i(k)\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

其中,$x_i(k)$ 是 $\boldsymbol{x}(k)$ 中的一个元素,$i=1,2,\cdots,r$,r 为 If-then 规则个数,相应于选取的工作点的个数;$z_1(t),\cdots,z_p(t)$ 为条件变量;p 为条件变量的个数;M_i 为模糊集合;

对于式(11)的 T-S 模型,利用 PDC 的概念进行模糊控制器设计.PDC 设计的基本思想是利用线性控制的设计技巧为每一推理规则设定补偿规则,最终模糊控制器是每一个独立线性控制器的合成,模糊控制器共享模糊模型的前件,因此,式

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(11)给出的系统由以下规则确定：

R_i：If $z_i(t)$ is M_i and，…，and $z_p(t)$ is M_p，then

$$f_i(k) = G_i(k)_i y_i(k) \qquad i = 1,2,\cdots,r \quad (12)$$

从而模糊控制器为

$$f_i(k) = \sum_{i=1}^{r} h_i(z(k))\, G_i(k)\, y_i(k) \quad (13)$$

3 仿真分析及试验测试

以实验室设计的第三代磨床电主轴系统做试验，电磁轴承系统转子与电磁铁之间的气隙厚度为 0.25 mm，保护轴承与转子之间的间距为 0.20 mm，工作点电流选为 0.2 A，最大控制电流输出为 3 A；转子质量为 2.827 kg，赤道转动惯量为 0.0106 kg/m^2，极转动惯量为 0.00088 kg/m^2，其一阶弹性固有频率为 1979 Hz，设计转子工作转速为 60 r/min．位移传感器采用涡流位移传感器，差动式安装，传感器的分辨率为 1 μm/8 mV．功率放大器采用最小脉宽开关功率放大器，其工作电压为 310 V，平均电感为 20 mH，最大电流摆率为 15 500 A/s．

软件平台选择 RTLinux．A/D 为 PCI 卡，D/A 选用了 AD 公司的高速 D/A 芯片 AD7537．采样频率为 10 kHz，控制方法采用模糊 PID．

图 4 给出了电磁轴承系统以图 2 方式和以图 3 方式建模后系统的阶跃响应图，以图 2 模型方式建模中采用 Switcher 提出的电磁力线性化方法，在图 3 所示模型中采用电磁力构造方式．位置输入值为 0.08 mm，0.1 mm，0.12 mm．从图中可以看出，位移在小偏差范围内，两种建模方式基本相同，随着位移偏差的增大，以图 3 方式建立的模型其动态性能要优于以图 2 方式建立的模型．图 5 给出了电磁铁单边工作方式(基础电流为 0.2 A)与设置偏置电流(偏置电流为 1.5 A)方式下电磁轴承系统在承受 600 N，作用时间为一个采用周期的冲击力时控制电流对比图．从图中可以看出，单边工作方式下控制电流幅值比较小，为此系统的功率损耗也降低．图 6 给出了采用模糊控制方式下转子起浮仿真图．如果不采用模糊控制，电磁轴承在高刚度下不能够起浮．转子的起浮试验可测试系统大范围运动的性能．图 7a 和图 7b 给出了转子起浮转子大端和小端 y 向时域响应曲线图．从图中可以看到，转子基本在一个振动周期内很快悬浮到中心，这表明转子起浮性能良好，具有较好的大范围运动能力．转子的大载荷冲击实验可测试控制系统抗载荷冲击能力．图 8a 和图 8b 给出了系统大端和小端受大幅度冲击 x 方向时域

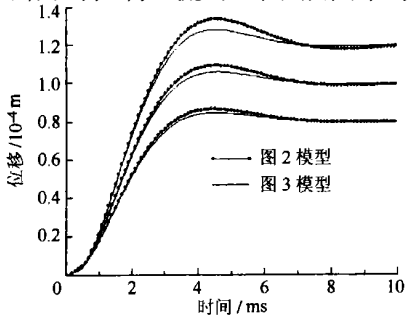


图 4 不同建模方式下阶跃响应对比图

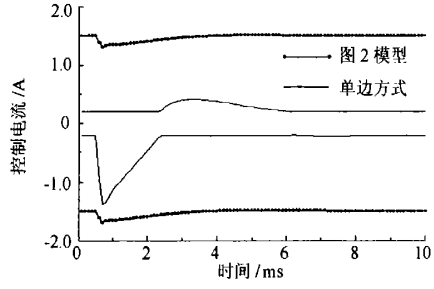


图 5 电磁铁不同工作方式控制电流对比图

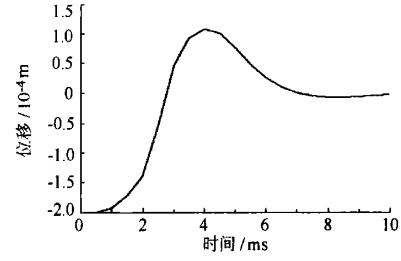
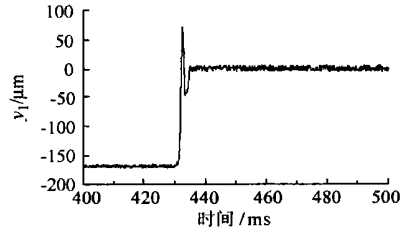
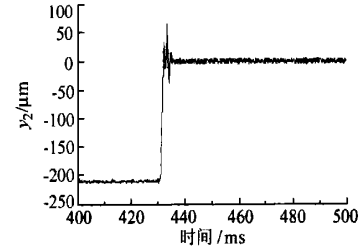


图 6 转子起浮仿真图



a 转子大端

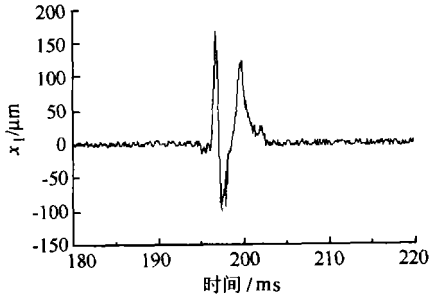


b 转子小端

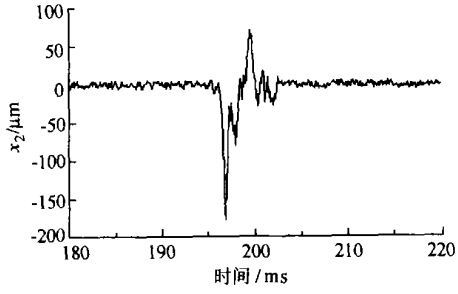
图 7 系统起浮响应曲线图

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

响应曲线图.从图中可以看到,转子在受到接近最大位移冲击时,基本上在 2 个振荡周期内很快地稳定下来,这和计算仿真结果基本相一致.



a　系统大端



b　系统小端

图 8　系统大幅度冲击响应图

4　结 束 语

以电磁力为控制变量,通过电磁力构件反算控制电流,避开电磁力非线性问题,为电磁轴承准确建模创造了条件.在电磁铁单边工作方式下,系统的刚度设计不必再依赖于工作点电流,可以设定较小的基础电流实现较高的反馈刚度.较小的基础电流及电磁铁单边工作方式降低了电磁铁的功率损耗.针对转子在高刚度与大范围不同的动力学特性,设计不同的控制器,利用模糊控制方法使控制器有机地结合,解决了转子大范围稳定和高刚度的矛盾.

参考文献 (References)

[1] Schweitzer G, Bleuler H, Traxler A. Active magnetic bearings—basics[A]. In: Properties and Application of Active Magnetic Bearings [C]. Switzerland: Hochschulverlag, 1994

[2] 李新生,杨作兴,赵　雷,等. 磁轴承磨床电主轴全局线性化研究[J].机械工程学报,2002,38(10):122～126
Li Xinsheng, Yang Zuoxing, Zhao Lei, *et al*. Study on global linearization for grinding spindle with active magnetic bearings[J]. Chinese J Mechanical Engineering, 2002, 38(10): 122～126(in Chinese)

[3] Li L, Mao J. Feedback linearisation of magnetic beating actuators for a uniform upper bound of force slew rate[J]. IEE Proceedings: Electroic Power Applications, 1999, 146(4): 378～382

[4] 张德魁. 高速电磁轴承磨床电主轴的研究[D]. 北京:清华大学工程物理系,2000
Zhang Dekui. Research on high speed AMB grinding electro spindle [D]. Beijing: Department of Engineering Physics, Tsinghua University, 2000(in Chinese)

[5] Wang L X. Adaptive fuzzy system and control: design and stability analysis[J]. Prentice-HaH, Englewood Cliffe, J J, 1994

[6] Buckley J J. Sugeno type controllers are universal controllers [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 53(3): 299～303

[7] 张德魁,赵　雷,赵鸿宾.电流响应速度及力响应速度对电磁轴承性能德影响[J]. 清华大学学报,2001,41(6):23～26
Zhang Dekui, Zhao Lei, Zhao Hongbin. Effect of current response rate and force response rate on performance of magnetic bearing systems [J]. Journal of Tsinghua University, 2001, 41(6): 23～26(in Chinese)

(上接第 68 页)

参考文献 (References)

[1] Warren L H. Strategic information synthesis by globular knowledge fusion[A]. In: Information, Decision and Contro, IDC99 Proceedings[C]. Adelaide: SA, 1999. 407～412

[2] Dempster A. Upper and lower probabilities induced by multivalued mapping [J]. Am Math Statist, 1967, 38:325～339

[3] Shafer G. A mathematical theory of evidence [M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1976

[4] Beaver W H. Financial ratios as predictors of failure[J]. Journal of Accounting Research, 1966, 17(supplement): 71～111

[5] Altman E I. Financial ratios, discriminant analysis and the prediction of corporate bankruptcy [J]. Journal of Finance, 1968, 23: 589～609

[6] Ohlson J A. Financial ratios and the probabilistic prediction of bankruptcy[J]. Journal of Accounting Research, 1980, 18: 109～131

[7] 乔　卓,薛　锋,柯孔林. 上市公司财务困境预测 Logit 模型实证研究[J]. 华东经济管理,2002,16(5):103～104
Qiao Zhuo, Xue Feng, Ke Konglin. The empirical research on predicting financial distress in listed companies using logit model [J]. East China Economic Management, 2002, 16(5): 103～104(in Chinese)

[8] Barnett J A. Computational methods for a mathematical theory of evidence [A]. In: Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence[C]. Vancouver: B C, 1981. 868～875

[9] 何　友,王国宏,陆大金,等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2000.31～32
He You, Wang Guohong, Lu Dajin, *et al*. Multisensor information fusion with applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2000. 31～32(in Chinese)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net