

锂电池内阻参数的研究

杨冬进, 娄建安

(军械工程学院 电工电子实验中心, 石家庄 050003)

摘要: 随着电池的更新换代, 锂电池渐渐地成为了该行业内的主要研究对象; 针对内阻是反映锂电池状态的重要参数, 对松下 18650 型号锂电池设计充放电实验; 对得到的实验数据, 用文中提出的改进灰色关联分析算法进行分析研究; 并将该算法用作遗传粒子群算法的适应度函数进行最小二乘支持向量机算法的参数选优, 达到了全面分析时间序列参数变化的目的; 通过 Matlab 的建模分析, 用变差函数改进的灰色关联分析法能够证明内阻的变化与锂电池的荷电状态变化关联度最高, 适合作为荷电状态估计的主要因素; 为了进一步分析锂电池内阻的性能, 使用改进算法对锂电池内阻与各参数的变化关系进行分析, 可得内阻的大小变化受电流、温度等参数变化的影响; 因此, 正确估计锂电池的状态, 必须综合考虑锂电池的各项基本参数。

关键词: 锂电池; 内阻; 最小二乘支持向量机; 灰色关联分析; 变差函数

Study on Parameters of Lithium Battery Internal Resistance

Yang Dongjin, Lou Jianan

(Electrical and Electronic Experiment Center, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: With the research and development of energy problem, lithium batteries are becoming the main target of the industry. For the internal resistance is an important parameter reflecting the state of the lithium battery, the charging and discharging experiment for Panasonic 18650 lithium battery is designed. The obtained experimental data are analyzed and studied by the improved grey relational analysis (GRA) algorithm. The algorithm is used as the fitness function of the genetic particle swarm optimization algorithm to optimize the parameters of the least squares support vector machines (LS-SVM), and the purpose to comprehensive analysis the change of time series is achieved. Through the modeling analysis of MATLAB, the GRA method that improved by variogram function, which proved the internal resistance could reflect the state of the lithium battery better. In order to analyze the internal resistance of lithium battery further, the relationship between the internal resistance of lithium battery and its parameters is analyzed by using improved algorithm, it can be seen that the magnitude of internal resistance can be affected by the change of current, temperature and other parameters. So, in order to correctly estimate the state of the battery, the relevant parameters must be considered.

Keywords: lithium battery; internal resistance; LS-SVM; GRV; variogram

0 引言

目前, 电动汽车行业正在兴起, 为保证汽车的安全行驶, 正确检测锂电池的工作状态, 是保证电动汽车安全行驶的前提。锂电池的状态检测技术从安时积分法发展到卡尔曼滤波法, 以及目前的 BP 人工神经网络法, 可以看出对状态的估计需要考虑的因素越来越多。抓住主要的因素对估计锂电池的状态显得尤为关键。许多研究证明, 内阻的大小不仅能够反映电池当前的荷电状态, 而且也是电池寿命状况的度量^[1]。文中针对内阻是衡量电池状态的重要参数设计证明实验, 并提出改进遗传粒子群算法的适应度函数进行 LS-SVM 的参数优化^[2], 进一步探索锂电池各基本参数之间的关系。适应度函数是遗传粒子群算法的核心, 它是衡量个体性能的标准, 根据适应度的大小优胜劣汰, 适应度函数的选取决定了同一种群的不同结果。文中针对时间序列提出的改进灰色关联分析法适应度函数目标性强、容易实现, 与其他常用适应度函数相比, 该方法速度较快、精度高。

1 灰色关联分析法的改进及运用

1.1 灰色关联分析法的改进

1.1.1 灰色关联度分析

灰色关联分析法是在研究对象部分确定, 部分不确定的基础上, 对未知的不同对象与已知对象之间进行的不确定度分析。邓聚龙教授的邓氏关联度分析法原理是由各比较数列集构成的曲线族与参考数列构成的曲线之间的几何相似程度来确定比较数列集与参考数列之间的关联度, 几何图形越相似其关联度越大^[3]。目前, 由于在工程技术、经济、农业、生态、环境等各种系统中经常会遇到信息不完全的情况, 因此, 灰色关联分析法普遍作为一种模型, 用于系统分析、评估、建模、预测、决策、控制或者各类设备故障的诊断和识别。但许多学者研究发现该方法存在一些问题:

1) 分辨系数 ρ 的确定方法没有针对性, 邓教授只分析给出了 ρ 的合理取值范围。实际运用中, 若数据出现干扰, 可能受算法中的最小、最大绝对差的影响而导致关联度分布区间减小, 而不能准确的表达序列之间关联性的大小。

2) 基本灰色关联法采用等权重的形式求关联度, 没有考虑各评价指标的不同影响^[4], 而不能体现各指标的不同贡献, 降低了结果的精度。

由锂电池的充放电原理可知, 电池的荷电状态变化与时间呈线性关系, 而荷电状态一般由锂电池基本参数转换得到, 并

收稿日期: 2017-06-28; 修回日期: 2017-07-22。

作者简介: 杨冬进(1991-), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 主要从事电气测试技术与智能系统方向的研究。

娄建安(1967-), 男, 河北石家庄人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事电气测试技术与智能系统方向的研究。

且基本参数的变化也和时间呈线性关系。根据以上分析,引入变差函数,建立时间数据序列的锂电池基本参数分析矩阵,针对不同时刻数据的变化大小,改变分辨系数的取值,降低干扰带来的影响。由于锂电池的时间序列数据由等时间间隔采取,外界因素可认为不变,则不用考虑各评价指标的影响。

1.1.2 变差函数改进分辨系数的取值

变差函数是模拟数据点之间的相关性函数,数据点在空间上相距越远,相关性就变得越小,当超过一个最小相关性时,距离的影响就不大了^[5]。引进变差函数来确定分辨系数 ρ 的大小,根据锂电池荷电状态的变化规律改进标准指数模型的变差函数。对该模型类变差函数的指数取值变化规律进行改进,使 h 越大则分辨系数下降越快。为了使分辨系数的取值位于最佳范围,加入系数 C ,将原有被减数 1 调整为 1.36。改进的变差函数,以减小干扰带来的影响为目的^[6]。改进的原理是荷电状态在每个时间段的变化存在一定规律,基本参数的变化在同样时间段的变化越接近这个规律,则由变差函数输出的分辨系数越大。改进变差函数的指数模型如公式 (1) 所示:

$$\rho = C(1.36 - e^{-1 \cdot (\frac{h}{a})}) \quad (1)$$

其中: ρ 是分辨系数; C 是系数,根据邓氏关联分析法 $C = 0.546$; a 是变程,指的是相关性的衡量标准,文中设定为数据变化的均值; h 为滞后距,表示实际变化值与平均变化值的差值。

1.1.3 改进后的灰色关联度计算步骤

不考虑评价指标的影响,在标准灰色关联分析法的基础上加上分辨系数的取值,具体步骤^[7]如下:

1) 选取分析数据,组成 m 个数列, n 是时间序列取样点的个数,如公式 (2) 所示;

$$X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))^T, i = 1, 2, \dots, m$$

$$mX = (X_0, X_1, \dots, X_m) \quad (2)$$

2) 选定参考数据列 X_0 记作:

$$X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(m)) \quad (3)$$

3) 数据采用初值化像法无量纲化,无量纲化后的数据如矩阵公式 (4):

$$x_i'(k) = \frac{x_i(k)}{x_i(1)}, X'_0 = (X'_0, X'_1, \dots, X'_m)$$

$$i = 0, 1, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

4) 逐个计算每个被评价对象指标序列与参考序列对应元素的绝对差值;

$$\Delta_i(k) = |x_0'(k) - x_i'(k)|,$$

$$k = 1, \dots, n. i = 1, \dots, m. \quad (5)$$

5) 确定最大绝对差值与最小绝对差值;

$$m = \min_{i=1}^n \min_{k=1}^m |x_0'(k) - x_i'(k)|,$$

$$M = \max_{i=1}^n \max_{k=1}^m |x_0'(k) - x_i'(k)| \quad (6)$$

6) 根据改进变差函数计算分辨系数 ρ ;

7) 计算关联系数;

$$r(x_0'(k), x_i'(k)) = \frac{m + \rho \cdot M}{\Delta_i(k) + \rho \cdot M}, \quad k = 1, \dots, n \quad (7)$$

8) 计算关联。

$$r(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r_{0i}(k) \quad (8)$$

1.2 遗传粒子群算法优化最小二乘支持向量机

最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 是标准支持向量机的改进,是最小二乘法与支持向量回归机的结合,解决了迭代运算的低精度问题^[8]。选用径向基函数作为支持向量机算法的核函数。由文献 [9] 的对比仿真实验,得到径向基函数作为核函数时 SVM 的性能优于其他函数。因而本文运用径向基函数作为核函数,如式 (9) 所示:

$$K(x, x_i) = e^{-\frac{\|x-x_i\|^2}{\sigma^2}} \quad (9)$$

采用径向基函数的 LS-SVM 算法存在待定的参数,即惩罚参数 C 和核参数 σ 。惩罚参数 C 的大小代表误差对模型的影响力度的大小,核参数 σ 的大小代表着支持向量机的学习程度的状况。因此, C 、 σ 的优化是运用 LS-SVM 建模解决回归问题的关键。文中引用遗传粒子群算法对实验数据的 LS-SVM 模型进行待定参数选优^[10]。粒子群算法具有参数少、收敛速度快等特点,但其种群的多样性会随着迭代次数的增加而下降,则引入遗传算法当中的交叉变异算子以加速种群的进化,实现全局寻优的目的^[11-12]。文中为准确、有目的地分析锂电池基本参数之间以及各参数与荷电状态的关系,采用以上提出的改进灰色关联分析法作为遗传粒子群算法的适应度函数。

2 锂电池内阻实验及算法验证

2.1 锂电池参数采集实验

锂电池工作状态的检测,可通过寻找电压、电流、内阻等参数与锂电池状态的关系间接得到。本文运用艾德克斯 (ITECH) IT-B1004 电池充放电测试系统对电池进行充放电测试,模拟电池的正常工作。运行过程中,使用日置 BT3563 电池测试仪对电压、电阻等动态参数进行测量。根据国标 QC-T743,充电方式为恒压充电,当电流为充电电流的 1/10 时停止充电;放电方式为恒流放电,当电压低于最低工作电压时停止放电。每次充放电结束后,为防止自漏电和电池内部温度变化的影响,每节电池充放电后需放置两个小时左右才能进行下次实验。根据估计锂电池状态所需基本参数的原理要求,主要开展以下实验:

- 1) 相同温度 (室温 20℃) 条件下,用 0.2C、1/3C、0.5C、0.8C 的电流测量参数。
- 2) 相同电流 (1/3 C) 条件下,分别在温度 5℃、15℃、25℃ 的环境下测量参数。

标准松下 18650 型号锂电池,容量 $C = 3400$ mAh,最大工作电压 $U_{max} = 4.2$ V,最小工作电压 $U_{min} = 2.8$ V,室温内阻在 35~40 mΩ 之间。实验的环境温度测量仪器选用室内高精度的温度计,主要测量电池周围的环境温度 (即工作温度)。运算中,选取电池试验 30 次左右的测量数据 (最佳状态参数) 拟合曲线,避免产生不必要的误差。根据实验设计要求,测得 17℃ 时,放电电流为 0.68A 的某次实验放电测试数据见表 1 和表 2,表中的荷电状态 (SOC) 由安时积分法计算得到。

2.2 改进 LS-SVM 算法的验证

根据前文的改进 LS-SVM 算法原理,用改进 GRA 算法做遗传粒子群算法的适应度函数,对表 1、2 中内阻、荷电状态的变化进行拟合分析。设定算法中的各参数为^[12]: 最大迭代次数 $G_{max} = 100$,加速因子 $C_1 = C_2 = 2$,种群规模 $N = 100$,惯性权重因子 $\omega = 0.8$,局部粒子判定阈值 $CNT = 5$,惰性粒

表 1 17℃放电及相关数据

t/s	U/V	R/mΩ	I/A	T/℃	C/mAh	SOC
0	4.2	35.3	0.68	17	3400	1.000
10	4.08	35.4	0.68	17	3287	0.967
20	3.99	35.4	0.68	17	3174	0.934
30	3.95	35.5	0.68	17	3061	0.900
40	3.91	35.6	0.68	17	2948	0.867
50	3.88	35.7	0.68	17	2835	0.834
60	3.84	35.8	0.68	17	2722	0.801
70	3.81	36	0.68	17	2609	0.767
80	3.79	36.1	0.68	17	2496	0.734
90	3.76	36.3	0.68	17	2383	0.701
100	3.73	36.4	0.68	17	2270	0.668
110	3.69	36.6	0.68	17	2157	0.634
120	3.67	36.7	0.68	17	2044	0.601
130	3.64	36.9	0.68	17	1931	0.568
140	3.62	37.1	0.68	17	1818	0.535
150	3.59	37.2	0.68	17	1705	0.501

表 2 17℃放电及相关数据

t/s	U/V	R/mΩ	I/A	T/℃	C/mAh	SOC
160	3.56	37.4	0.68	17	1592	0.468
170	3.54	37.6	0.68	17	1479	0.435
180	3.52	37.7	0.68	17	1366	0.402
190	3.5	37.9	0.68	17	1253	0.368
200	3.48	38.1	0.68	17	1140	0.335
210	3.45	38.3	0.68	17	1027	0.302
220	3.43	38.6	0.68	17	914	0.269
230	3.4	38.8	0.68	17	801	0.235
240	3.37	39.1	0.68	17	688	0.202
250	3.32	39.4	0.68	17	575	0.169
260	3.26	39.7	0.68	17	462	0.136
270	3.2	40.1	0.68	17	349	0.103
280	3.12	40.5	0.68	17	236	0.069
290	2.98	41	0.68	17	123	0.036
300	2.84	41.3	0.68	17	67	0.020

子判定阈值 $h=0.5$, 初始变异率 $P_c=0.2$, 初始交叉率 $P_m=0.8$, 平均变化值 $a=0.2$, 系数 $C=0.546$ 。经过规定的域值或迭代次数优化后, 惩罚参数 $C=893.6$, 核参数 $\sigma=20.13$, 此时的平均绝对误差 $MAE=0.0043$, 得到高精度的拟合图形如图 1 所示。

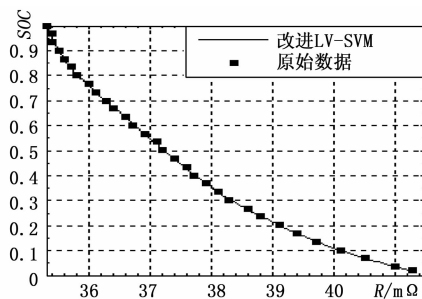


图 1 改进 LV_SVM 拟合曲线

适应度函数是参数选优的核心^[14]。常用的适应度函数有 Griewank 函数, Rastrigin 函数以及 MAE 函数的倒数等。将这三类函数运用于本文的遗传粒子群改进的 LS-SVM 算法, 参数设置与改进 GRA 算法一致。对表 1 和表 2 中的荷电状态、内阻的变化拟合分析, 并计算出相应的 MAE 值和各适应度函数运行时间, 见表 3。从表中可得, 4 种算法精度都很高, 可得基于遗传粒子群改进的 LS-SVM 算法本身已经具有很高的精确度。在 4 种适应度函数中, GRA 函数精度最高, 由于算法相对 MAE 复杂, 速度略低于 MAE 算法。综合分析可得改进 GRA 函数性能优于其他适应度函数。

表 3 4 种适应度函数评价参数

函数	Griewank	Rastrigin	1/MAE	GRA
MAE	0.0415	0.0196	0.0317	0.0043
t/s	1.96	2.33	1.23	1.31

3 内阻重要性证明

3.1 基本参数的相关度分析

选取相关实验数据, 由改进灰色关联分析法设计 GRA 模型^[15]。参考数据列 X_0 为荷电状态变化序列, 电压、电流、内阻的变化序列组成比较序列集。分别用 $\rho=0.5$ 的 GRA 和改进分辨系数后的 GRA 在 Matlab 中进行仿真, 结果如图 2 和图 3。图中序号 1 为电压序列, 序号 2 为电流序列, 序号 3 为内阻序列, 纵坐标是关联度。对比两图可知, 改进方法 3 个参数关联度更加接近。改进后的算法优点在于很好地抑制了干扰的影响。由电池充放电参数变化可知, 电池电压在充电开始和放电快结束时变化很大, 电流也有类似变化, 而内阻的变化值是逐渐增大的, 不存在突变现象。造成以上突变的原因和负载等外界干扰有关, 应该对这些干扰进行抑制。考虑到电压的突变和本身性质有关, 所以不能将干扰完全抑制。文中规定在一定范围内, 使用随着干扰增加分辨系数 ρ 变化速率加快的方法。

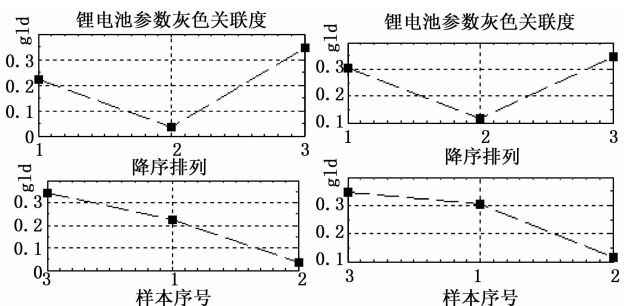


图 2 $\rho=0.5$ 关联度分布图

图 3 改进关联度分布图

以上两图中可得到一个共同的结果, 内阻的变化与荷电状态的变化的关联度最高。改进后的方法, 电压的关联度接近于内阻, 但实际中, 电压的变化容易突变, 并且稳定变化范围相对更小。综合考虑, 内阻的大小适合作为衡量电池的工作状态的主要因素。

3.2 影响内阻大小变化的参数分析

根据前文的实验设计要求, 提取相同电流不同温度的三组数据, 运用改进的 LS-SVM 算法拟合内阻与荷电状态的变化曲线, 参数设置不变, 平均变化值 $a_1=0.41$, $a_2=0.39$, $a_3=0.4$, 如图 4。设置的温度均在电池工作的范围内, 从图中可

以看出,随着温度的降低电池内阻在不断变化,温度越高,电阻越小。并且同等条件下,温度下降 10℃比上升 10℃内阻变化要大,说明低温对电池的影响比高温大。同样根据实验要求,提取相同温度不同电流的三组数据,参数设置不变,平均变化值 $a_4 = 0.57$, $a_5 = 0.39$, $a_6 = 0.2$, $a_7 = 0.29$,拟合参数曲线如图 5。不同倍率的电流对电池进行放电,电流越大内阻变化越快,电阻的变化范围越小。

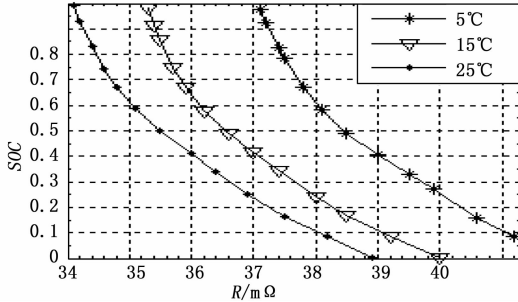


图 4 不同温度拟合曲线

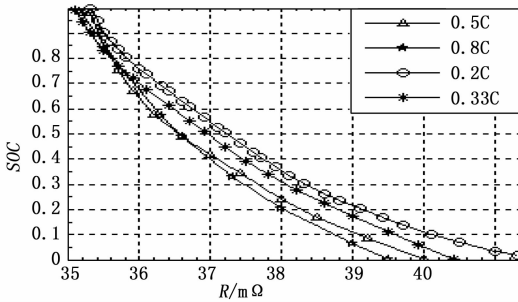


图 5 不同电流拟合曲线

在实验过程中,用 0.8C 的电流对电池进行放电时,电池出现发热现象,根据不同温度内阻不同,所以电池的内阻上限值减小。从图中可以看出,所有拟合曲线的斜率在减小,表明随着荷电状态的减小,内阻的变化是先小后大。综上所述,内阻的变化与电流、温度等参数的变化存在一定联系。

4 结束语

文中以准确估计锂电池的工作状态为目的,分析了锂电池的基本参数。将灰色关联分析与遗传粒子群算法进行融合,达

到了很好的效果。改进的 LS-SVM 算法对实验设计得到的数据拟合研究,从图中可以清楚得到参数的变化趋势,而得到以内阻为主要依据,其他参数为次要条件来估计电池的工作状态,才能正确估计锂电池的工作状态的结论。本文的研究为锂电池的检测找到了关键之处,为下一步准确估计锂电池的工作状态打下基础。

参考文献:

[1] 方小斌. 电池内阻监测方法的研究 [J]. 通信电源技术, 2013, (5): 68-71.

[2] Jan P S, Philipp B. The distribution of relaxation times as basis for generalized time-domain models for Li-ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2013, 221: 70-77.

[3] 马苗, 张艳宁, 赵健. 灰色理论及其在图像工程中的应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.

[4] 曹满亮, 潘宏侠, 董安. 改进的灰色关联法在柴油机故障诊断中的应用 [J]. 噪声与振动控制, 2015 (4): 6-10.

[5] 薛丽娜. 空间信息场约束下的随机建模方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.

[6] 周游, 程时清, 张敏. 储层建模中变差函数参数的设置 [J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2010 (5): 25-27.

[7] 潘田甜. 基于灰色关联法的哈尔滨松北新区发展动力研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.

[8] 李匡成, 杨亚丽, 孙磊, 等. 基于 LS-SVM 的铅酸蓄电池极化电势预测模型研究 [J]. 电源技术, 2014 (4): 724-727.

[9] 刘开丽. 粒子群优化算法的研究与应用 [D]. 合肥: 安徽大学, 2013.

[10] 韩蕊蕊. 基于遗传粒子群算法的网络编码链路优化研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.

[11] 李国焯. 遗传算法的改进及其应用 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016.

[12] 玄登影, 王福林, 高敏慧, 等. 一种改进适应度函数的遗传算法 [J]. 数学的实践与认识, 2015 (16): 232-238.

[13] 史娇娇. 基于遗传粒子群优化算法的测试数据自动生成技术研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.

[14] 刘寒冰, 吴春利, 程永春. 不同适应度函数的遗传算法在桥梁结构传感器布设中的应用 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2012, (1): 51-56.

[15] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国, 等. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.

(上接第 111 页)

修对象相比,新方法为决策者提供更加客观地、科学可靠地判断依据,减少由于主观因素影响太强而造成的决策失误。下一步将研究成果运用于装备维修任务的调度上,构建战时装备维修任务动态调度模型,使研究更具实际应用价值。

参考文献:

[1] 吴云鹤. 测控弧段优先级的确定及量化 [J]. 飞行器测控学报, 2001, 20 (4): 16-22.

[2] 王震, 周占永. 基于回退算法的测控弧段优先级确定及量化方法 [J]. 航天信息, 2010, 7: 11-14.

[3] 周培杰, 刘进峰, 刘苏, 等. 基于优先级策略的模型预测控制性能评估 [J]. 上海交通大学学报, 2015, 49 (11): 1641-1654.

[4] 单晓红, 刘晓燕. 基于混合权重的软件企业项目优先级评估方法 [J]. 计算机应用, 2009, 29 (11): 3314-3319.

[5] 李云峰, 武小悦. 基于综合优先度的卫星数传调度算法 [J]. 系统工程学报, 2007, 22 (6): 645-648.

[6] 凌晓冬, 武小悦, 刘琦. 多星测控调度问题任务优先级研究 [J]. 数学的实践与认识, 2008, 38 (23): 114-120.

[7] 王磊, 刘道福, 陈云霁, 等. 片上多核处理器共享资源分配与调度策略研究综述 [J]. 计算机研究与发展, 2013, 50 (10): 2212-2227.

[8] 廖炎平, 刘莉, 邢超. TOPSIS 中不同规范化方法的研究 [J]. 北京理工大学学报, 2012, 32 (5): 871-880.

[9] 王正新. 基于马氏距离的 TOPSIS 决策方法及其应用 [J]. 经济数学, 2012, 29 (2): 17-20.