

太阳能 & 谷电加热熔盐蓄热系统特性

李九如, 董喜欣, 陈巨辉, 李欣

(哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要:针对环境污染日益严重和电网谷峰差逐年加大给电网带来安全隐患的两个重大问题, 结合熔盐储能技术提出了太阳能 & 谷电加热蓄能系统。太阳能 & 谷电加热蓄能系统不仅具有良好的节能减排效果, 还有很好的经济性。针对熔盐蓄热技术传热规律研究较少的问题, 理论计算了管道弯头内表面的对流换热系数, 并且采用灰色关联分析方法, 对不同尺寸弯头在不同流速时表面对流换热系数进行研究, 分析了几何形状和流速对内壁面对流换热系数的影响程度。

关键词:太阳能, 谷电, 熔盐, 灰色关联度, 表面对流换热系数

DOI: 10.15938/j.jhust.2017.01.014

中图分类号: O359 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2017)01-0080-06

The Characteristic of Molten Heat Salt Storage System Utilizing Solar Energy Combined with Valley Electric

LI Jiu-ru, DONG Xi-xin, CHEN Ju-hui, LI Xin

(School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: With the environmental pollution and energy consumption due to the large difference between peak and valley of power grid, the molten salt heat storage system (MSHSS) utilizing solar Energy combined with valley electric is presented for good energy saving and low emissions. The costs of MSHSS utilizing solar Energy combined with valley electric are greatly reduced. The law of heat transfer in molten salt heat storage technology is studied with the method of grey correlation analysis. The results show the effect of elbow sizes on surface convective heat transfer coefficient with different flow velocities.

Keywords: solar energy; valley electricity; molten salt; gray correlation degree; surface convective heat transfer coefficient

0 引 言

能源是人类进步和发展的物质基础, 经济的发展和能源的利用有着密不可分的关系。我国工业化

和现代化进程正向着深层次方向发展, 这将对能源行业提出了更高的要求^[1]。我国能源结构是以煤为主的化石燃料^[2]。化石燃料的大量使用造成我国各地污染严重。开发和利用可再生能源的可谓“迫在眉睫”。太阳能有储量大、分布广、清洁型、经

收稿日期: 2015-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(51406045); 黑龙江省自然科学基金(E201441); 哈尔滨市科技创新人才基金(2015RAQXJ033); 哈尔滨理工大学青年拔尖创新人才培养计划资助(201504)。

作者简介: 李九如(1970—), 男, 博士, 教授;

董喜欣(1992—), 男, 本科生。

通信作者: 陈巨辉(1982—), 女, 博士, 副教授, E-mail: chenjuhui@hit.edu.cn。

济性的优点,被视为理想的替代能源^[3]。同时阅读相关资料^[4-5]后知,随着我国经济的发展,电网的谷峰值逐年加大,给电网的安全运行带来一定的安全隐患,为削减谷峰差《电力法》第四十一条规定国家实行分时电价,同时,政府对符合条件的低谷电用户给予政策补贴。基于熔盐蓄热技术已在太阳能热发电电站实现应用^[6],考虑到开发利用可再生能源和削减电网谷峰差两个问题。设计了太阳能 & 电加热联合加热熔盐系统。虽目前太阳能熔盐蓄热电站已实现运行^[6-7],对于熔盐蓄热的传热规律研究较少同时,在北京工业大学马重芳、吴玉庭等验证了经典关联式对高温熔融盐传热的适用性的基础上,考虑熔融盐的流动^[8]与传热特性,直接关系到熔融盐蓄热循环系统和换热器的设计与布置^[9]。

本文为解决管道弯头的几何形状和熔盐流速与弯头内表面传热系数的关系的问题。理论计算了管道弯头内表面的对流换热系数,并采用灰色关联分析的方法,比较了弯头几何要素和熔盐流速分别对弯头内侧表面对流传热系数的影响程度的大小关系。

1 太阳能 & 谷电加热熔盐蓄热系统原理

本文设计的熔盐蓄热系统如图1所示,太阳能 & 谷电加热熔盐系统的基本原理是将太阳能和谷电以热能的形式储存在熔盐蓄热介质中,考虑到太阳能与谷电时间上的互补性,利用储能技术解决了太阳能间歇性和谷电周期性和固定时间段的弊端,达到日间用低谷电、夜间用太阳能的效果储存的热能可作为吸收式空调^[10]的热源和用于采暖。太阳能 & 谷电联合蓄能系统由太阳能集热器、电加热器、高温熔盐罐、低温熔盐罐、循环管道等组成。系统采用双熔盐罐设计高温熔盐罐(罐内熔盐温度 550°C)主要作用为蓄热作用;低温的熔盐流回低温罐(罐内熔盐温度 300°C),主要作用为:①熔化固体盐;②储存液态熔盐,熔盐在系统中运行的阻力由熔盐泵克服^[9]。熔盐蓄热系统以混合熔盐(60%硝酸钠和40%硝酸钾)作为传热和储能介质,混合熔盐作为蓄热材料其优势为:液体温度范围宽、黏度低、流动性好、蒸汽压小、对管路承压能力要求低、相对密度大、比热容高、蓄热能力强、成本较低等诸多优点^[9]。

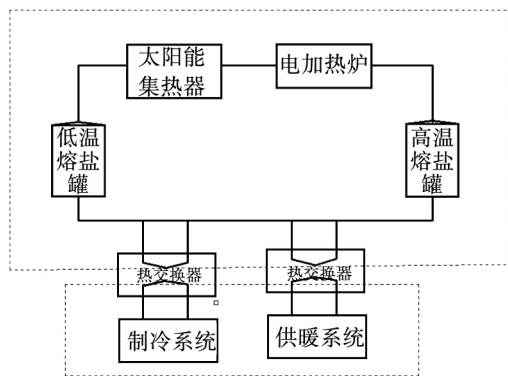


图1 太阳能 & 谷电联合加热系统原理图

2 太阳能 & 谷电加热熔盐蓄热系统与用能环节的匹配

太阳能是一种间歇性、不稳定性的清洁能源^[11],其能流密度受时间段、天气情况、地理位置等诸多因素影响,同时蓄热系统^[12]耗能模块的能耗的变化会造成熔盐蓄热系统与耗能环节匹配不良。往往熔盐蓄热系统与用能环节匹配时需要依照用能环节的特性恰当选用补偿器进行能源补偿,因此匹配模式可分为

1) 无补偿理想模式

日间通过系统存储的太阳能足以满足夜间系统用能模块的用能要求;夜间通过系统存储的低谷电足以满足日间系统用能模块的用能要求。理想模式运行模式下的熔盐蓄热系统实现了日间太阳能夜用,夜间低谷电日用,此种模式是理想模式。

2) 补偿器补偿太阳能

①由于夜间耗能模块工作量的加大导致夜间工业设备的耗能量超过系统设计的日间存储的太阳能能量;②由于天气的不可控性和随机性较大,日照量主要受天气条件的影响因素较重,导致太阳能的系统输入不稳定,日间存储的太阳能无法满足夜间能量需求。

3) 补偿器补偿低谷电

相对于太阳能熔盐系统电力供给相对稳定,系统所装配的电加热炉的功率和数量是固定的,故此低谷电供给熔盐系统的能量是稳定的,熔盐系统需要能量补给时主要由于日间耗能模块工作量的加大导致日间工业设备的耗能量超过系统设计的日间存储低谷电的能量。

4) 补偿器补偿太阳能及低谷电

①由于夜间耗能模块工作量的加大导致夜间工业设备的耗能量超过系统设计的日间存储的太阳能能量;②由于天气的不可控性和随机性较大,日照量主要受天气条件的影响因素较重,导致太阳能^[2]的系统输入不稳定,日间存储的太阳能无法满足夜间能量需求;③相对于太阳能熔盐系统电力供给稳定,系统所装配的电加热炉的功率和数量是固定的,故此低谷电供给熔盐系统的能量是稳定的,熔盐系统需要能量补给时主要由于日间耗能模块工作量的加大导致日间工业设备的耗能量超过系统设计的日间存储低谷电的能量。此种模式为最不理想模式。

太阳能和低谷电在熔盐蓄热系统^[3]与用能环节的匹配是系统运行的难点,关键在于如何根据天气预测,实时调整系统集能部分与用能部分工作状态,使整个熔盐蓄热系统的运行在贴近无补偿理想状态下工作,已达到最佳的节能性、经济性和环保性。

3 经济性分析与节能减排效果分析

3.1 经济性分析

基于太阳能 & 谷电联合加热熔盐储能系统的经济性与用能模块的具体工作性质密切相关,特别适合于对分别集中在日间和夜间的用能场所进行捆绑供能。本文对一栋北京市商住楼住宅(1~2层为商场,3~12层为住宅,每层1040 m²)利用太阳能 & 谷电加热熔盐蓄热系统驱动吸收式中央空调情况进行分析。

住宅空调制冷集中在夜晚,时间段主要集中在18:00~次日7:00,按需制冷率与按需供暖率相差甚微,参照文[6]资料,将按需制冷率取为21.4%,且制冷时间段主要集中在18:00~次日7:00,住宅能流密度120 W/m²(按空调设计手册查取),商场空调制冷集中在日间(商场的营业时间为9:30~21:30),营业时间不间断制冷,商场24小时按需制冷率为50%,制冷所需能流密度为300 W/m²(按空调设计手册查取),楼宇每层1040 m²,则商场总面积为2080 m²,住宅总面积为10400 m²。计算得,该商住楼每月住宅楼层与商场制冷需能分别为192292 kWh和224640 kWh。北京非低谷电电价为0.4883元/kWh,低谷电价0.3元/kWh,符合国家的补贴政策可享受0.2元/kWh的补贴,因此低谷电实际电价为0.1元/kWh^[4]。采用常规电网电力

驱动中央空调工作,每月需花费203588元。采用太阳能 & 低谷电联合加热熔盐储能系统驱动中央空调,无补偿理想模式下分析,住宅制冷所需能源为储存太阳能,目前太阳能是无偿性能源。商场制冷所需能量为夜间谷电的电能,每月可花费电费19229.2元,故该商住楼每月可节省电费184358.8元(每月按30天计算),节省电费比率为90.5%。

3.2 节能减排效果分析

2010年我国燃煤发电的能耗为312 g/kWh,节约1 kWh的电力相当于节约0.312 kg标准煤,可减少1.0296 kg CO₂排放^[4]。按上述商住楼分析,若采用常规电网电力驱动中央空调每月用电416932 kWh,相当于消耗130083 kg标准煤,产生429273.2 kg CO₂排放。采用太阳能 & 低谷电联合加热熔盐储能系统驱动上述商住楼住宅中央空调每月可节省电力192292 kWh,相对于59995 kg标准煤,可减少197983.8 kg CO₂排放,节约标准煤比率、减排CO₂比率为46.1%。

4 熔盐管道弯头的传热特性计算

在熔盐蓄热系统中存在管道弯曲的结构,考虑到熔融盐的流动与传热特性,直接关系到熔融盐蓄热循环系统和换热器的设计与布置^[6]。弯曲处存在二次环流的现象,其传热特性不同于直管段。故对熔盐管道弯曲处的传热特性进行研究^[3]。

熔盐系统管段的热能传递(如图2)所示。

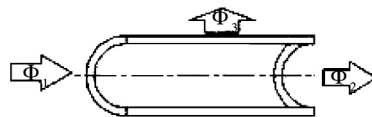


图2 管段的热能传递

熔盐在管道中流动符合热量平衡原理,可知在单位时间内 Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 之间存在数学关系式

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3 \quad (1)$$

式中: Φ_1 为流入管段的热量; Φ_2 为流出管段的热量; Φ_3 为经管壁进入到环境中的热量。

Φ_3 为传递环境中的热量,其大小将影响整个熔盐系统和换热器的效率。损失热量传递过程中各个环节的换热方式为^[2],熔盐存储的热量通过对流换热方式传递到管道内侧,又以导热的方式传递到管壁外侧,再以对流传热和辐射传热的方式传递到环

境中。

热量传递过程中的各个环节的数量关系为:

$$\Phi_3 = \Phi_a = \Phi_b = \Phi_c + \Phi_d \quad (2)$$

式中: Φ_a 为熔盐以对流换热方式传递给内侧管壁的热量; Φ_b 为内侧管壁以导热的方式传递给外侧管壁的热量; Φ_c 为外侧管壁以对流换热方式传给环境的热量; Φ_d 为外侧管壁以辐射传热的方式传给环境的热量。

熔盐与内侧管壁的对流传热量 $\Phi_a = \Phi_3$, 通过计算熔盐以对流换热^[4]方式传递给内侧管壁的热量, 与外界交换的热量全部是由于熔盐在内侧管壁上的对流传热造成的, 管道传递出热能的数量与内壁的表面传热系数有直接关系。表面传热系数的大小与流体的物性(λ 、 ρ 、 C_p 等)以及换热表面的形状、大小、布置、流速有密切关系^[3]。假设弯头入口熔盐的温度为 350℃。

表 1 350℃熔盐特性表格(SI)

运动粘度	普朗德数	导热系数
1.251 0 ⁻⁶	6.91	0.509

本文用理论分析的方法对弯头在流速不同情况下的表面传热系数^[4]进行计算, 研究换热表面的形状、大小、流速与表面传热系数的关系。弯头的示意图见图 3。

需要说明的是: 内径 d 和弯头半径 R 均和换热表面的形状 A 、大小 B 存在函数关系。

$$A = f(d, R) \quad (3)$$

$$B = g(d, R) \quad (4)$$

用 d, R 可以间接描述换热表面的形状 A 和大小 B 。

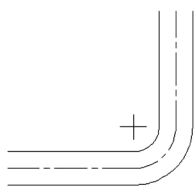


图 3 弯管示意图

为简化研究做如下假设: ①弯头中熔盐的流动为稳态流动; ②熔盐的物性参数在流动过程中不变; ③弯头截面未发生畸变; ④弯管的布置方式相同; ⑤外部环境条件不变。

故表面对流换热系数只与内径 d 、弯道曲率 R 、流速 u 有关。

采用 Dittus-Boelter 实验关联式, 特征长度为内径 d 。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (5)$$

流体被冷却, $n = 0.3$ 。

式中: Re -雷诺数; Pr -普朗德数。

$$Re = (u \times d) / \vartheta \quad (6)$$

$$Nu = (ud) / \lambda \quad (7)$$

Dittus-Boelter 实验关联式只适用于直管段对于弯管要加以修正。

螺旋管修正系数 C_r

对于液体

$$C_r = 1 + 10.3 \left(\frac{d}{R} \right)^3 \quad (8)$$

联立式(5)、(6)、(7)和式(8)得弯头处的

$$h = \frac{0.023 \left(\frac{u \times d}{\vartheta} \right)^{0.8} Pr^{0.3} [1 + 10.3 \left(\frac{d}{R} \right)^3] \lambda}{d} \quad (9)$$

图 4、图 5、图 6 分别表示 3 个变量单独变化时对表面对流换热系数的影响效果。

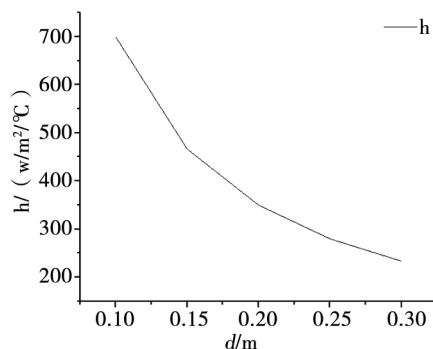


图 4 表面对流换热系数与内径的关系

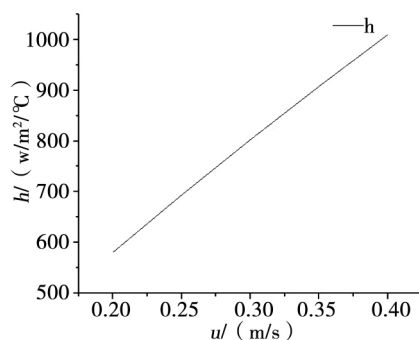


图 5 表面对流换热系数与流速的关系

图 4 说明表面对流换热系数随管道内径的增大呈递减趋势的。

图 5 说明表面对流换热系数随流速的增加呈递

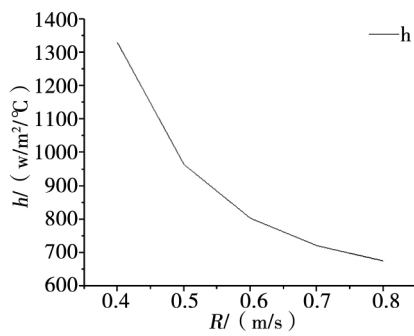


图6 表面对流换热系数与曲率的关系

增趋势,且趋于线性。流速增加,流体对于管壁的冲刷强烈,导致对流换热系数加大。

图6说明表面对流换热系数随曲率的增加呈递减趋势。曲率增大,流体在弯曲管道中流动的速度方向变化减小,二次环流现象^[17]不明显,对管壁冲刷不强烈,导致对流换热系数减小。

5 对流换热系数与弯头的 R 和 d 以及流速 u 的灰色关联分析

如前所述,弯头的形状、大小可用 d 、 R 间接描述,为进一步探究对流表面换热系数与弯头的 R 和 d 以及流速 u 的关系,分别为下表中的不同流速、不同曲率半径、不同内径的5种情况进行分析。

表2 弯头尺寸和熔盐流速汇总表

内径 d / m	流速 u / (m/s)	弯头半径 R / m	表面对流 换热系数 h
0.1	0.2	0.8	492.305 9
0.15	0.25	0.7	585.894 6
0.2	0.3	0.6	802.781 0
0.25	0.35	0.5	1 438.098 2
0.3	0.4	0.4	3 605.436 6

由于弯头内壁的表面传热系数与弯头的形状、大小、流速之间(即 d 、 R 、流速)存在着相似或相异的关系,为衡量关系的远近程度,故采用灰色系统理论中的灰色关联发进行分析。具体过程^[18-20]

1) 确定序列矩阵:系统参考序列因子(对流换热系数)用 X_0 表示,灰色关联分析中,内径 d 为 X_1 、弯头半径为 X_2 、流速 u 为 X_3 这3个因子为比较序列因子,这4个序列构成一个矩阵。

$$(X_0, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} x_0(1) & x_1(1) & x_2(1) & x_3(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_0(k) & x_1(k) & x_2(k) & x_3(k) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_0(5) & x_1(5) & x_2(5) & x_3(5) \end{pmatrix} \quad (10)$$

$k=1, 2, 3, 4, 5$.

2) 无量纲化:为去除数据中的量纲,并在数量上统一,用“初值化”的方法数据处理,并得到无量纲矩阵。

$$x'_i(k) = \frac{x_i(k)}{x_i(1)}, i=0, 1, 2, 3, 4 \quad k=1, 2, 3, 4, 5 \quad (11)$$

得到无量纲矩阵

$$(X'_0, X'_1, X'_2, X'_3) = \begin{pmatrix} x'_0(1) & x'_1(1) & x'_2(1) & x'_3(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_0(k) & x'_1(k) & x'_2(k) & x'_3(k) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_0(5) & x'_1(5) & x'_2(5) & x'_3(5) \end{pmatrix} \quad (12)$$

3) 求差序列

根据 $\Delta_{0i}(k) = |x'_0(k) - x'_i(k)| \quad i=1, 2, 3 \quad (13)$

得到差矩阵,同时找到差矩阵中的最大值、最小值,分别记作 $\Delta_{\max}, \Delta_{\min}$

$$4) \text{ 计算关联系数 } \xi_{0i} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \Delta_{\max}} \quad (14)$$

ρ 为分辨系数,取 0.5。得到关联矩阵。

5) 求解参考序列和3种比较序列的灰色关联度 γ_{0k} 。

$$\gamma_{0k} = \sum_{i=1}^N \xi_{0i} \quad (15)$$

将表中的数据进行关联度计算,得到3个参数对表面对流换热系数的灰色关联度。

$\gamma_{01} = 0.431 8, \gamma_{02} = 0.451, \gamma_{03} = 0.505$

6) 排序并分析

排序结果: $\gamma_{03} > \gamma_{02} > \gamma_{01}$ (16)

在本文研究的影响对流换热系数的3个因素中,曲率半径对表面传热系数的关联度最高,流速次之,管径与对流表面换热系数关联度最小。

6 结 论

1) 太阳能 & 谷电联合加热熔盐蓄热系统充分利用太阳能与谷电时间的互补性,特别适合于对分别集中在日间和夜间的用能场所进行捆绑供能。利用太阳能可减少化石燃料的燃烧,有利于减少用能

过程的环境污染、有利于减小电网的谷峰差、有利于电网的安全运行。

2) 采用太阳能 & 低谷电联合加热熔盐储能系统驱动上述商住楼住宅中央空调每月可节省电力 136 200 kWh, 相对于 42 494.4 kg 标准煤, 可减少 140 231.5 kgCO₂ 排放。该商住楼每月可节省电费 124 659 元(每月按 30 天计算), 节省电费比率为 89.3%。

3) 通过对影响管道弯头处表面对流换热系数的 3 个参数的灰色关联分析, 3 种参数对弯头表面对流传热系数的关联度依次是曲率半径、流速、管径。对熔盐系统管道弯曲处的设计和布置有一定的指导意义。

参 考 文 献:

- [1] 贾兴振, 杨宝臣. 中国能源消费和经济增长的协整关系分析 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2005, 10(4): 117-120.
- [2] 车得福, 庄正宁, 李军, 等. 锅炉 [M]. 西安: 西安交通大学出版, 2008: 1-4.
- [3] 朱建坤. 太阳能高温熔盐传热蓄热系统设计及实验研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2006.
- [4] 刘靖. 高温相变蓄热电器研制及热性能研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [5] 李丽霞. 基于太阳能和低谷电的混合采暖系统研究 [D]. 山东: 青岛理工大学, 2009.
- [6] 吴玉庭, 任楠, 马重芳. 熔融盐显热蓄热技术的研究与应用进展 [J]. 储能科学与技术, 2013, 2(6): 588-591.
- [7] 郭晓娟, 丁旆, 秦贯丰, 等. 高温熔融盐蓄热系统的若干工程问题 [J]. 储能科学与技术, 2015, 4(1): 32-40.
- [8] 戴昌晖. 流体流动测量 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1991.
- [9] (美) W. F. 斯托克, J. W. 琼斯著. 制冷与空调 [M]. 陈国邦, 胡熊飞译. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [10] 罗运俊, 何梓年, 王长贵. 太阳能利用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [11] 张升黎, 旷立辉, 于立强. 太阳能利用中的蓄热技术, 青岛建筑工程学院学报, 2000, 21(4): 93-97.
- [12] 斯帕罗 E M, 塞斯 R D. 辐射传热 [M]. 顾传保, 张学学, 译. 北京: 高等教育出版社, 1982: 127-149.
- [13] 吕可非, 童莉葛, 尹少武, 等. 低谷电蓄能供暖系统分析与利用 [J]. 供热制冷, 2013(9): 65-66.
- [14] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京, 高等教育出版社, 2006.
- [15] 陈熙. 动力论及其在传热与流动研究中的应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 1, 2, 27.
- [16] 曹玉璋, 邱绪光. 实验传热学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 116-119.
- [17] 程兆雪, 谢永曜. 流体力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 153-168.
- [18] 张一龙, 夏玲丽, 刘坐东, 等. 交叉错放管生物污垢热阻与水质参数的关联分析 [J]. 热能动力工程, 2015, 30(4): 505-506.
- [19] 孙伟. 基于灰关联分析的上市公司绩效评价 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2006, 11(1): 59-61.
- [20] 田凯波. 基于层次分析法的灰色关联分析的应用 [J]. 湖南农机, 2010, 37(3): 98-99.

(编辑: 关 毅)