

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201801093

基于灰度共生矩阵理论的 PVA 纤维分散评价法

曹源文¹, 吴春洋¹, 郑婷婷¹, 肖 伟¹, 夏柱林², 郑南翔³

(1.重庆交通大学 机电与车辆工程学院,重庆 400074;2.济祁高速公路(砀山段)项目办公室,安徽 宿州 235300;
3.长安大学 公路工程学院,西安 710064)

摘 要: 为了有效地评价 PVA 纤维束的均匀性,基于灰度共生矩阵理论,并以 PVA 纤维束搅拌分散后图像的角二阶矩和熵值为主要特征参数,建立 PVA 纤维束分散评价方法,给出了 PVA 纤维束的均匀性评价指标(f_1 和 f_2),分析了在不同种类分散剂、不同搅拌速度、不同搅拌桨的搅拌参数下 PVA 纤维束分散效果,绘制了 PVA 纤维束分散后的角二阶矩和熵值曲线图。结果表明:均匀性评价方法可以评价 PVA 纤维束分散的均匀性;利用均匀性评价指标分析获得最佳搅拌分散参数,可实现对 PVA 纤维分散性的快速准确评价。

关键词: PVA 纤维束;灰度共生矩阵;角二阶矩;熵

中图分类号: U415.5

文献标志码: B

文章编号: 0367-6234(2019)01-0157-05

PVA fiber dispersion evaluation method based on grey co-occurrence Matrix Theory

CAO Yuanwen¹, WU Chunyang¹, ZHENG Tingting¹, XIAO Wei¹, XIA Zhulin², ZHENG Nanxiang³

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Jiqi Expressway(Dangshan section), Project Office, Suzhou 400074, Anhui, China;
3. Highway Engineering Institute, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to study how to evaluate the dispersion of PVA fiber bundles uniformly, a variety of agitation and dispersion parameters were tested, and based on the theory of gray coexistence matrix, the dispersion evaluation method of PVA fiber was established. The dispersion effect of PVA fiber under different mixing factors, different stirring speed and different stirring blades was analyzed and the angular second moment of PVA fiber bundle and the entropy value of the line graph was plotted. The result shows that the dispersion of PVA fiber bundles can be evaluated by the method well, which provides a theoretical basis for the study of the dispersion uniformity of PVA fiber bundles.

Keywords: PVA fiber bundle; gray covariance matrix; angle second moment; entropy

PVA 纤维是一种直径仅为几个微米,且都以束状形态存在的材料,同时表面光滑还具有较强的亲水性,在水泥基复合材料中难以均匀分散,影响了 PVA 纤维水泥基复合材料的机能,限制了 PVA 纤维作为功能材料的普及运用^[1-2]。实验研究表明,在水泥基复合材料中掺入 PVA 纤维,可有效地改善水泥基复合材料的抗裂性能、抗冲击、抗渗、抗收缩性能以及弯曲韧性^[3]。因此,在 PVA 纤维掺入水泥基复合材料搅拌之前,需将 PVA 纤维束分散成单丝状并形成均匀的三维网状结构,使分散后的 PVA 纤维与水泥基复合材料材料更加容易拌和均匀,发挥出其对水泥基复合材料材料的改善作用。

一直以来,纤维分散的均匀性评价方法较多,国

内外学者通过直观对比法、参数评价法和数值图像法等对 PVA 纤维进行分散均匀性评价^[4-7]。其中直观对比法只能进行分散效果比较明显,用肉眼能直接辨别的搅拌分散;参数评价法是用一些高精度测量仪器,测量搅拌后纤维溶液中的参数,用来定量评价纤维的分散效果,这种方法对操作要求高、测量仪器昂贵;数字图像法是利用数字图像处理技术,将搅拌分散后的纤维图像进行采集,分析图像特征信息,从而评价纤维分散效果。灰度共生矩阵法属于数字图像法的一种,通过提取图像纹理特征,获取图像的特征参数值来作为评价指标,这种方法具有操作简单、精度高、再现性好、获取信息多等优点。所以本文选用灰度共生矩阵法,依据纤维分散后的图像特征参数来评价纤维的分散效果,从分散剂、搅拌参数、搅拌设备部分开展纤维分散研究且评价分散均匀性。本文运用 PVA 纤维束搅拌设备样机,依据灰度共生矩阵理论,应用图像特征参数从分散剂种类、搅拌桨转速和搅拌

收稿日期: 2018-01-16

基金项目: 安徽省交通科技基金项目(Ahjtkt20140051);

河南省交通厅项目(Hnxcrc2013001)

作者简介: 曹源文(1963—),女,教授,硕士研究生导师

通信作者: 吴春洋, wu-c-y@qq.com

桨类型三个方面来评价 PVA 纤维分散均匀性,为 PVA 纤维束搅拌分散技术提供指导。

1 PVA 纤维分散效果评价方法

1.1 灰度共生矩阵理论

灰度共生矩阵表述的是图像中灰度在方向、相邻间隔和变化幅度方面的综合信息。灰度共生矩阵属于数字图像法的一种,通过提取纤维分散图像中的纹理特征,获取图像的特征参数值,依据纤维分散后的图像特征参数来评价纤维的分散效果。在整张图像中,统计每一组灰度对出现的频率为 $P(i, j, d, \theta)$, 称方阵 $[P(i, j, d, \theta)]_{G \times G}$ 为灰度共生矩阵。灰度共生矩阵实质上就为两像素点的联合直方图,若距离间隔值 $(\Delta x, \Delta y)$ 取不同的数值组合,就能够获得图像沿一定方向 θ 、相距一定距离 $d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ 的灰度共生矩阵^[8]。其数学表达式为

$$P(i, j, d, \theta) = \{[(x, y), (x + \Delta x, y + \Delta y) | f(x, y) = i; f(x + \Delta x, y + \Delta y) = j]\}.$$

为了便于实际中的计算,灰度共生矩阵元素往往用概率值来表示,即各元素 $P(i, j, d, \theta)$ 除以各元素之和 S , 获得各元素都小于 1 的归一化值 $\hat{P}(i, j, d, \theta)$, 其数学表达式为

$$\hat{p}(i, j, d, \theta) = p(i, j, d, \theta) / s.$$

1.2 评价特征参数

灰度共生矩阵具有大量的特征参数, Haralick 等人定义了 14 个用于纹理分析的灰度共生矩阵参数^[9]。其中:熵值是表征纹理粗细和复杂度的参数,是图像所包含的信息量的表征;角二阶矩是表征灰度分布均匀度的参数,是图像灰度分布均匀性的表征。

1) 熵 f_1 的表达式:

$$f_1 = - \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} \hat{P}(i, j, d, \theta) \lg \hat{P}(i, j, d, \theta). \quad (1)$$

若图像中无纹理,则灰度共生矩阵基本为零阵,其熵值 f_1 接近为零。如果图像中布满着细纹理,则 $\hat{P}(i, j, d, \theta)$ 的数值近似相等,该图像的熵值 f_1 最大。如果图像中包含着较少的纹理,则 $\hat{P}(i, j, d, \theta)$ 的数值差别较大,该图像的熵值 f_1 较小。

2) 角二阶矩 f_2 的表达式:

$$f_2 = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} P^2(i, j, d, \theta). \quad (2)$$

从图像整体来看,纹理越粗,角二阶矩 f_1 越大,

也可以理解为粗纹理含有较多的能量。反之,纹理越细,则角二阶矩 f_1 就越小,也就是它具有较少的能量。

1.3 Matlab 实现

本文的灰度共生矩阵法要借助于 MATLAB 编程算法来实现。在 PVA 纤维搅拌分散后,通过图像采集设备得到纤维的 RGB 真彩色图像,利用 `rgb2gray()` 程序将 PVA 纤维 RGB 图像转换为灰度图像。然后将灰度图像保存为 bmp 格式,导入灰度共生矩阵算法程序,得到灰度共生矩阵特征参数值。程序的算法步骤如下:

1) 将原始图像的 256 灰度级进行压缩,转化为 16 级灰度。

2) 取 $d = 1$, $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 135° , 分别计算 4 个灰度共生矩阵。

3) 对共生矩阵进行归一化处理。

4) 根据式(1)和式(2),计算灰度共生矩阵的角二阶矩和熵这两个特征参数值。

5) 分别对 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 135° 这 4 个方向的特征值求平均值,得到最终的二维纹理特征。

2 试验及试验结果分析

2.1 试验设计

本文研究的 PVA 纤维选用的是安徽皖维集团生产的混凝土用改性 PVA 纤维,分散剂选用山东特耐斯化工有限公司生产的分散剂进行研究,搅拌设备为 PVA 纤维束搅拌样机,搅拌桨的结构类型为四直叶、三斜叶、四斜叶和组合桨,如图 1~4 所示。



图 1 四直叶



图 2 三斜叶

Fig.1 Four straight blades

Fig.2 Triclinic blades



图 3 四斜叶



图 4 组合桨

Fig. 3 Quadrature blades

Fig.4 Combined paddles

为了保证试验数据的准确性与客观性,本文对分散剂种类、搅拌桨类型和搅拌桨转速每个变量都重复 10 组试验,通过图像采集和纹理特征提取之后,得到 10 组不同的角二阶矩和熵值。在数据处理

中,将 10 组数据去除最大值和最小值后求平均值,将该平均值作为各组变量的数值。

在数字图像的采集、传送和转换过程中,由于噪声等原因会造成图像的模糊和失真,需要根据图像退化的逆向过程进行还原,因此在进行求解数字图像的特征参数之前,需要对真彩色图像进行压缩、灰度化、滤波去噪、直方图均衡化、集料小颗粒过滤、图形的膨胀与腐蚀、开运算以及闭运算以及中值滤波处理,提升对比度与灰度色调的变化,消除噪点,使得像素更加分明和逼真,为纹理特征的提取和计算提供更加可靠和准确的角二阶矩阵和熵值。

2.2 不同添加剂的分散效果评价

PVA 纤维缠敷性很强,机械搅拌时无法较好地将纤维束分散,添加分散剂可有效改善分散效果。PVA 纤维表面具有极性羰基基团和羟基基团,使 PVA 纤维束具有较强的亲水性。选用的甲基纤维素 (MC)、羟乙基纤维素 (HEC) 和羧甲基纤维素钠 (CMC-Na) 这 3 种分散剂都具有极性羟基基团^[10]。

在使用前,将分散剂均配为 15% 的水溶液。采用 4 种类型搅拌桨,转速设置为 600 r/min,搅拌时间为 3 min,分别进行无分散剂和添加 MC、HEC 和 CMC-Na 这 3 种分散剂的试验。试验中添加每种分散剂搅拌后,PVA 纤维按照标签依次放置,如图 5 所示。

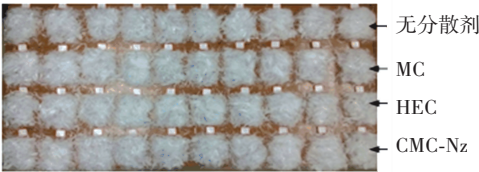


图 5 试验搅拌后的 PVA 纤维
Fig. 5 PVA fiber after agitation

采集分散后 PVA 图像,进行灰度共生矩阵特征参数提取,试验得到的无分散剂和添加分散剂的角二阶矩和熵值曲线图如图 6、7 所示。

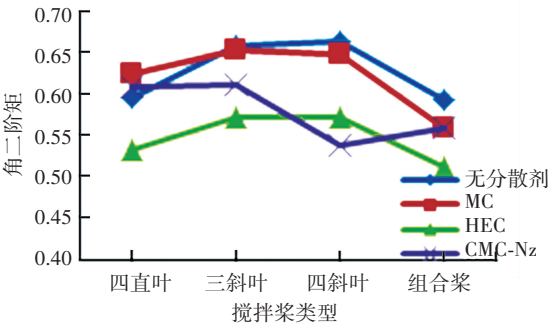


图 6 不同分散剂种类的角二阶矩曲线图

Fig. 6 Angular second moment curves of different dispersant types

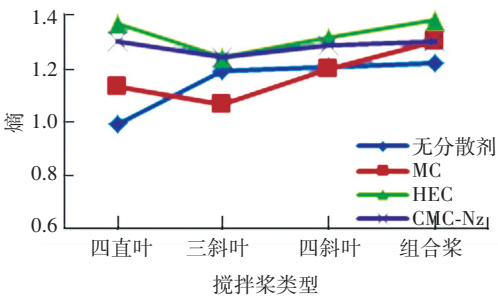


图 7 不同分散剂种类的熵值曲线图

Fig. 7 Entropy curves of different dispersant types

添加 HEC 和 CMC-Na 分散剂的角二阶矩曲线处于整个曲线图的下方,除四直叶工况 CMC-Na 角二阶矩大于无分散剂外,其他 3 种搅拌桨工况的 2 种分散剂角二阶矩均小于添加 MC 和无分散剂;处于曲线图上方的无分散剂和 MC 分散剂,除四直叶工况 MC 角二阶矩大于无分散剂外,其他 2 种搅拌桨工况的添加 MC 分散剂角二阶矩均小于无分散剂。在 4 种搅拌桨工况下,添加 HEC 分散剂的熵值均最大,在组合桨工况下达到最大值 1.3825,其次是添加 CMC-Na 分散剂,其熵值略小于 HEC 分散剂;添加 MC 分散剂和无分散剂熵值曲线处于整个曲线图下方。

综上所述,根据角二阶矩越小,熵值越大,PVA 纤维束分散效果越好的评价标准,得出以下试验结论:添加 HEC 分散剂对 PVA 纤维束的分散效果最好,而添加 MC 分散剂对纤维的分散效果最差。

2.3 不同转速的分散效果评价

在试验过程中,观察到当高转速时,搅拌桨产生的离心力增大,虽然大于纤维的内摩擦力,但是纤维由于离心力的作用无法靠近搅拌叶片边缘,附着在搅拌槽壁面,无法充分分散;当低转速搅拌时,搅拌的离心力和剪切力小于纤维之间的内摩擦力,纤维依然呈缠敷状态,也无法充分分散。试验中高低转速时搅拌槽内的纤维状态图如图 8、9 所示。



图 8 高转速时纤维状态图

Fig. 8 Fiber state diagram at high speed



图 9 低转速时纤维状态图

Fig. 9 Fiber state diagram at low speed

转速范围选取 450 ~ 750 r/min 区间,间隔为 50 r/min. 添加分散剂为 HEC 分散剂,搅拌桨选取四直叶、三斜叶、四斜叶及其组合桨. 同样对每种转速进行 10 次试验,采集分散后的 PVA 纤维图像,进行灰度共生矩阵特征参数提取,得到不同转速下 4 种搅拌桨的角二阶矩和熵值曲线图,如图 10、11 所示.

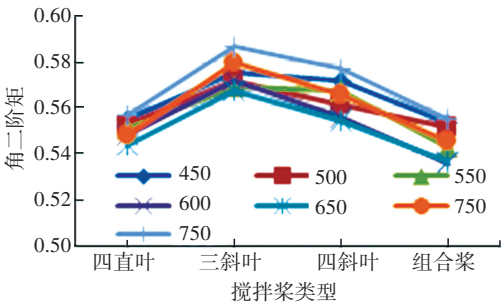


图 10 整数转速的角二阶矩曲线图

Fig.10 Angular second moment curves of the integer rotational speed

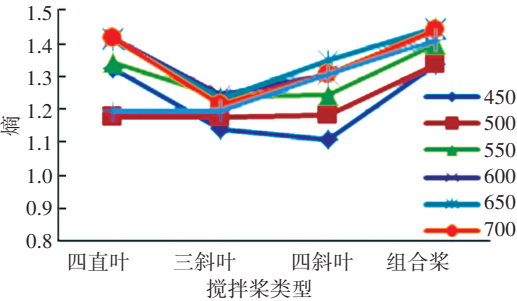


图 11 整数转速的熵曲线图

Fig.11 Entropy curves of integer speed

根据搅拌桨转速的角二阶矩和熵值曲线图,对比分析可得:随着转速的增大,角二阶矩先增大后减小,转速 750 r/min 的角二阶矩在 4 种搅拌桨工况下大于其他转速,转速 650 r/min 的角二阶矩在 4 种搅拌桨工况下大于其他转速;随着转速的增大,角二阶矩先减小后增大,转速 650 r/min 的熵值在 4 种搅拌桨工况下大于其他转速,转速 450、500 r/min 的熵

值在 4 种搅拌桨工况下最小.

综上所述,根据角二阶矩越小,熵值越大,PVA 纤维束分散效果越好的评价标准,得出以下试验结论:在转速 650 r/min 时,角二阶矩最小,熵值最大,因此 650 r/min 为分散 PVA 纤维的最佳搅拌转速.

2.4 不同搅拌桨的分散效果评价

由于搅拌桨叶片的类型不同,其运动形态可以分为径向流、轴向流和切向流,因此不同形状的叶片类型对 PVA 纤维分散的效果有很大的影响. 四直叶片属于径向流型叶片,其叶片末端的剪切作用力大,但是耗散的功率也较大. 三斜叶、四斜叶属于轴流型叶片,混合效果较好. 组合桨则属于混合型或者叠加型叶片,其剪切和混合效果有的只是简单的叠加,有的则是有显著的互补与促进分散的作用.

本文采用的 4 种类型搅拌桨可以有效地对流动形态进行试验研究,搅拌时间为 3 min,添加分散剂为 HEC 分散剂,转速间隔为 35 r/min,绘制出转速范围在 450~750 r/min 的 4 种不同类型搅拌桨的熵值曲线图,如图 12、13 所示.

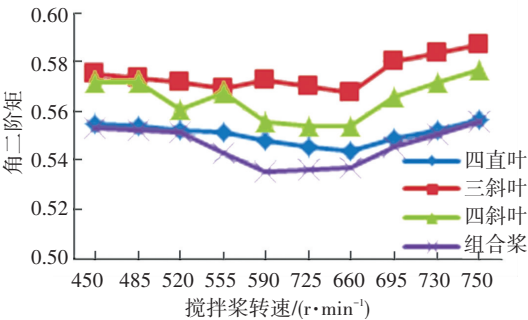


图 12 不同搅拌桨的角二阶矩折线图

Fig.12 The second order moments of different agitating paddles

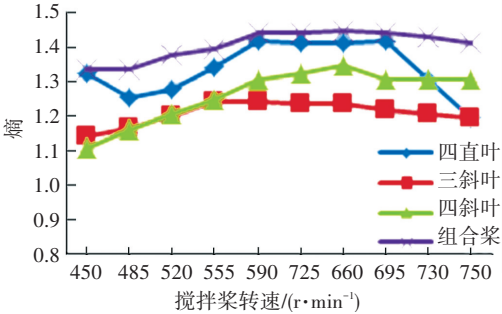


图 13 不同搅拌桨的熵值折线图

Fig.13 Entropy values of different agitating paddles

在图 12 中,4 种搅拌桨都呈现先减小后增大的趋势,组合桨的角二阶矩均小于其余 2 种搅拌桨;在图 13 中,4 种搅拌桨都呈现先增大后减小的趋势,组合桨的熵均大于其余 2 种搅拌桨,在 650r/min 达到了最大值. 4 种搅拌桨对 PVA 纤维的分散效果为:组合桨>四直叶>四斜叶>三斜叶.

综上所述,得到本文中 PVA 纤维束搅拌分散设

备的最优搅拌作业参数为:添加 HEC 分散剂,转速 650 r/min、组合浆。

3 结 语

1)本文利用数字图像处理技术对拍摄的 PVA 纤维图像进行分析和预处理,在灰度共生矩阵理论的基础上,提出应用灰度共生矩阵特征参数熵值进行 PVA 纤维分散性判别的方法,运用 MATLAB 软件,依据试验后提取的 PVA 纤维图像特征参数的熵值,来评价 PVA 纤维的分散性,得到一种快速、准确的 PVA 纤维束分散效果评价方法。

2)分析了在不同种类分散剂、不同搅拌转速、不同搅拌桨搅拌参数下 PVA 纤维的分散效果。结果表明:添加 HEC 分散剂使 PVA 纤维分散效果更好,可以有效促进 PVA 纤维束的分散;搅拌转速越大, PVA 纤维分散效果越好,转速 650 r/min 是 PVA 纤维束搅拌设备的最佳搅拌转速;四直叶浆属于径流型搅拌设备,具有较好的剪切作用,四斜叶浆则为轴向型,能够产生良好的整体循环流动,组合浆在二者的交互作用下,总体对流循环与分散效果更好,能够产生更强的剪切与混合作用,可以更有效地促进 PVA 纤维束的搅拌分散。

参考文献

[1] 张丽辉,郭丽萍.高延性水泥基复合材料的流变特性和纤维分散性[J].东南大学学报,2014,44(5):1037
ZHANG Lihui, GUO Liping. Rheological properties and fiber dispersibility of high ductility cementitious composites [J]. Journal of Southeast University, 2014,44 (5): 1037
[2] 郭丽萍,陈波,杨亚男. PVA 纤维对混凝土抗裂与增韧效应影

响的研究进展[J]. 水利水电科技进展,2015,35(6):113
GUO Liping, CHEN Bo, YANG Yanan. PVA fiber on concrete cracking and toughening effect of progress [J]. Water Resources and Hydropower Engineering Progress, 2015,35 (6): 113
[3] Jr Sydney Fur lan, Joao Bento de Han nai. Shear behavior of fiber reinforced concrete beams [J]. Cement and Concrete Composites, 1997,19(4):359
[4] 黄一磊,胡健,郑焱嵩. ξ 电位对玻璃纤维分散的影响[J]. 造纸科学与技术,2004,23(1):31
HUANG Yilei, HU Jian, ZHENG Zhisong. Effects of xi potential on the dispersion of glass fiber [J]. Science and Technology of Paper Making, 2004, 23(1): 31
[5] KEREKES R J, SCHELL C J. Characterization of fiber flocculation regimes by a crowding factor [J]. Journal of Pulp and Paper Science,1992,18(1):32
[6] JEONG S H, KIM S H, HONG C J. The evaluation of evenness of nonwovens using image analysis method[J]. Fibers and Polymers, 2001,2(3):164
[7] 关晓宇,钱晓明,杨棹航.合成纤维在水中的分散手段与表征方法[J].产业用纺织品,2015,33(8):35
GUAN Xiaoyu, QIAN Xiaoming, YANG Zhuohang. The dispersion methods and characterization methods of synthetic fibers in water [J]. Industrial Textiles, 2015, 33(8): 35
[8] 侯群群,王 飞,严 丽.基于灰度共生矩阵的彩色遥感图像纹理特征提取[J].国土资源遥感,2013(4):26
HOU Qunqun, WANG Fei, YAN Li. Texture feature extraction of color remote sensing images based on gray level co-occurrence matrix [J]. Remote Sensing of Land and Resources, 2013 (4): 26
[9] HARALICK R M. Statistical and structural approaches to texture [J].Proceedings of the IEEE, 1979,67(5):786
[10]杨杰,张文苑,隋学叶,等.分散剂在陶瓷纤维分散过程中的应用[J].应用技术,2014(4):58
YANG Jie, ZHANG Wenyuan, SUI Xueye, et al. Application of dispersant in dispersion process of ceramic fiber [J]. Applied Technology,2014(4):58

(编辑 王小唯)

(上接第 156 页)

[10] 朱福堂.单电机多模式混合动力系统的架构设计分析与模式切换研究[D].上海:上海交通大学,2014
ZHU Futang. Architecture design, analysis and mode transition research of a multi-mode hybrid powertrain using a single electric machine [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014
[11]SYED F U, KUANG M L, YING H. Active damping wheel-torque control system to reduce driveline oscillations in a power-split hybrid electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9):4769
[12]WANG J, RAKHA H A. Fuel consumption model for heavy duty diesel trucks: model development and testing [J]. Transportation Research Part D: Transport & Environment, 2017, 55:127
[13]SUN J, XING G, LIU X, et al. A novel torque coordination control strategy of a single-shaft parallel hybrid electric vehicle based on model predictive control [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015(1):1
[14]FROISY J B. Model predictive control: past, present and future[J]. Isa Transactions, 1999, 33(3):235
[15]杜波,秦大同,段志辉,杨文辉,彭志远.新型混合动力汽车动力切换动态过程分析[J].汽车工程,2011,33(12):1018
DU Bo, QIN Datong, DUAN Zhihui, et al. An analysis on the power switching dynamic process in a new type of HEV [J]. Automotive Engineering, 2011,33(12):1018

(编辑 王小唯)