

提升新能源电网中距离保护响应的策略

黄辉, 邓慧琼, 黄泓宇

(福建理工大学 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118)

摘要: 随着新能源发电系统在电网中的广泛应用,其控制策略对距离保护性能的影响日益显著。针对这一问题,提出了一种基于电压平面的距离保护方法。首先,通过理论分析揭示了新能源并网系统中距离保护在故障工况下的性能劣化机制,特别是系统功角的显著增加对保护性能的影响。其次,基于故障后系统功角接近 90° 的运行特征,结合电压余弦量在大功角较工况下过渡电阻耐受能力增强的特性,提出了一种能够有效判断系统是否发生不对称相间故障的判据。基于Matlab/Simulink搭建的仿真模型进行验证,结果证实,该方案能够有效减少新能源发电系统控制策略的干扰,具有较强的抵御过渡电阻的能力,并且具有很高的灵敏度和可靠性。

关键词: 距离保护; 新能源发电系统; 控制策略; 过渡电阻; 电压余弦量

中图分类号: TM77

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)04-0361-06

Strategies to improve response of distance protection in renewable power grid

HUANG Hui, DENG Huiqiong, HUANG Hongyu

(School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: With the wide application of renewable power generation system in power grid, its control strategy has an increasingly significant impact on distance protection performance. To solve this problem, a distance protection method based on voltage plane is proposed. Firstly, theoretical analysis reveals the performance degradation mechanism of the distance protection in the renewable power grid-connected system under fault conditions, especially the influence of the significant increase of the system power angle on the protection performance. Secondly, according to the characteristic that the system power angle is close to 90° after the fault, combined with the characteristic that the voltage cosine significantly increases the resistance to transition resistance when the power angle is large, an effective criterion for judging whether asymmetric phase fault occurs in the system is proposed. The simulation model constructed by Matlab/Simulink is verified, and results confirm that this scheme can reduce the interference of renewable power control strategies, showing a strong ability to resist transition resistance, and high sensitivity and reliability.

Keywords: distance protection; renewable power generation system; control strategy; transition resistance; voltage cosine quantity

距离保护作为输电线路保护的核心技术之一,因其保护范围及运行模式对系统运行状态变化的敏感性较低且能有效应对多种短路故障,在电力传输系统中得到了广泛应用^[1-2]。随着光伏发电、风力发电等新能源并网容量的快速增长,新能源发电在总发电量中的占比持续上升。然而,

新能源并网系统在交流输电线路发生故障时,其故障特性受控制策略的显著影响,表现为短路电流幅值减小、负序电流受到抑制,这与传统同步发电机呈现出截然不同的动态特性,对传统距离保护技术提出了新的挑战^[3-4]。

针对新能源发电系统控制策略和过渡电阻对

距离保护的影响,专家们开展了广泛研究。文献[5]研究了新能源发电系统控制策略对交流送出场景中等效电源阻抗和系统功角的影响。文献[6]发现控制策略影响下系统等效功角不满足约束条件,导致相位比较式距离保护不能正确动作。但都未提出解决方案。文献[7]分析了新能源并网系统控制策略和过渡电阻在各种短路故障时对距离保护的具体影响。文献[8]考虑了新能源发电系统控制策略和过渡电阻的影响,但其仅适用于偏移圆阻抗特性的距离保护,对其他阻抗特性的距离保护识别不足。文献[9]提出了基于电流分布系数和高频谐波的距离保护阻抗测量改进方案,但未考虑负序电流受控制策略限制的影响。文献[10]利用电压余弦量识别过负荷程度及各种相间故障,发现在功角较小时过渡电阻的识别能力较弱,而在功角较大时具有较好的过渡电阻识别能力。

综上所述,当新能源发电系统通过交流系统送出电能时,其控制策略对等效电源阻抗和系统功角的影响可能会导致距离保护的性能下降。为解决这一问题,本研究基于文献[10],结合新能源发电系统控制策略使不对称相间故障后系统功角接近 90° 的特点,提出了一种基于电压余弦量的新型距离保护方案。该方案充分利用了电压余弦量在较大功角时,过渡电阻耐受能力显著增强的特性,能够有效应对新能源并网系统中的复杂故障场景。

1 主要影响距离保护动作性能的因素

1.1 过渡电阻的影响

图1展示了过渡电阻可能引发的距离保护装置的不正确动作行为。从图1可以看出,测量阻抗 Z_m 由两部分组成:其一为真实故障阻抗 Z_1 (即保护安装处至故障点的线路阻抗),其二为附加阻抗 Z_R 。其中,附加阻抗 Z_R 的特性对距离保护装置的动作行为具有决定性作用, Z_R 的性质(如阻性、容性或感性)直接影响保护装置的动作特性,可能导致保护误动或拒动。

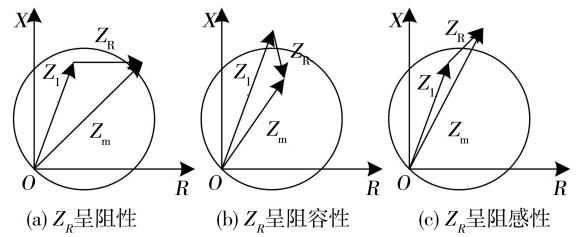


图1 过渡电阻对距离保护的影响

Fig.1 Effect of transition resistance on distance protection

1.2 系统功角的影响

在系统外部故障情况下,场站侧输出的故障电流一般应限制在不超过额定电流的1.2倍^[11],该条件下,新能源发电系统将表现出显著的弱馈特性,故障后等效阻抗 Z_s 显著增大。

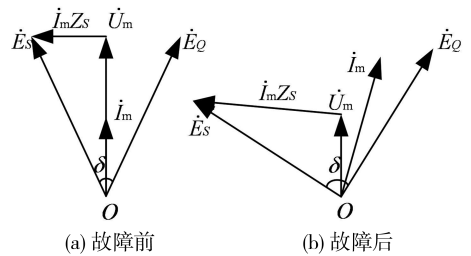


图2 故障前后系统功角特性

Fig.2 System power angle before and after fault

图2展示了交流线路故障前后系统功角的变化情况。在正常运行状态下,功角 δ 与新能源发电系统 S 和系统 Q 之间的电力潮流密切相关。然而,当交流线路发生故障后,受控制策略的影响,等效阻抗 Z_s 迅速增长,导致功角 δ 显著增大,接近 90° 。

1.3 距离保护分析

结合第1.1节和第1.2节的分析结果,当新能源送出线路发生故障后,控制策略的影响导致等效阻抗 Z_s 和系统功角 δ 显著增大。距离保护的動作特性与过渡电阻的大小密切相关。

对于金属性故障(如两相短路),故障点的故障相间电压为零。在新能源保护装置安装处测得的阻抗 Z_m 能够准确反映从保护装置安装点到故障点的阻抗,距离保护能够正确动作,且不受新能源发电系统控制策略的影响。

然而,当过渡电阻不为零时,控制策略的影响会导致 Z_s 和 δ 增大,距离保护的動作特性如图3所示。当 F 点发生两相故障时, Z_m 会随着过渡电阻 R 的增大而变化,表现为 Z_m 从第一象限向第

四象限偏移。这意味着在发生区域内的故障时,距离保护可能会拒动。同时,对于发生在区域外的故障, Z_m 随着 R 的增大而偏移至保护动作区域,导致距离保护发生误动作。

综上,新能源发电系统出现故障时, Z_s 和 δ 的增大以及过渡电阻的存在,会使距离保护的保护区范围缩小,进而影响其动作的准确性和可靠性。

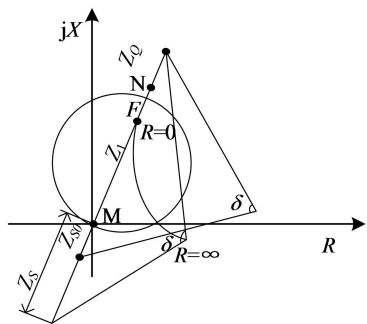


图 3 新能源送出线路测量阻抗变化轨迹

Fig.3 Measured impedance change trajectory of renewable power transmission line

2 基于电压平面的故障识别方法

电压平面上,不对称相间故障工况下的电压余弦量 $U_{ij} \cos \varphi_{ij}$ ($ij = ab, bc, ca$) 如图 4 所示。其中, \dot{E}_S 和 \dot{E}_Q 分别代表系统两端的等效电势; \dot{U}_{ij} 和 \dot{I}_{ij} 分别是故障时刻母线 M 侧保护装置记录的相间电压和电流; $\dot{U}_{F|0ij}$ 和 \dot{U}_{Fij} 则分别代表故障前故障点以及故障发生时故障点的相间电压。 $U_{ij} \cos \varphi_{ij}$ 能够有效反映故障点处的电压情况,其中 $\varphi_{ij} = \arg(\dot{U}_{ij} / \dot{I}_{ij}) + (90^\circ - \varphi_L)$ 。对于不对称相间故障,故障间隙中的过渡电阻主要表现为电弧电阻,其最大残余电压通常不超过额定电压的 5%,即 $U_{ij} \cos \varphi_{ij} < 0.05 \text{ pu}$ 。因此,线路发生不对称相间故障时的判据为 $U_{ij} \cos \varphi_{ij} < 0.5 \text{ pu}$ [10]。

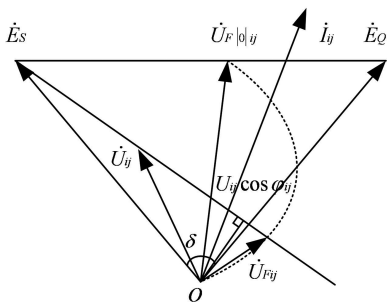


图 4 不对称相间故障时的 $U_{ij} \cos \varphi_{ij}$

Fig.4 $U_{ij} \cos \varphi_{ij}$ when asymmetrical interphase fault occurs

图 5 展示了电压余弦量 $k = U_{ij} \cos \varphi_{ij}$ 与功角 δ 的关系。从图中可以看出,随着功角的增大, k 值逐渐减小,表明系统对过渡电阻的识别能力显著增强,灵敏度也随之提高。

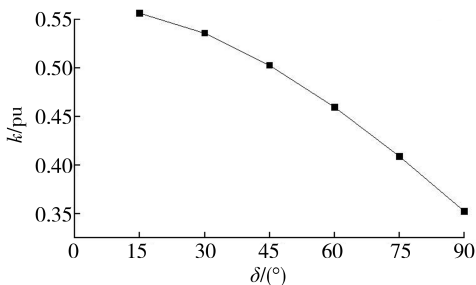


图 5 电压余弦量与的功角的关系

Fig.5 Relationship between voltage cosine and power angle

图 6 展示了电压余弦量 $k = U_{ij} \cos \varphi_{ij}$ 在不同功角下对过渡电阻的识别能力。从图中可以看出,随着功角的增大,系统对过渡电阻的抗干扰能力显著增强。特别是在新能源并网系统中,故障后等效阻抗 Z_s 受控制策略的影响迅速增长,进一步提升了系统对过渡电阻的抗干扰能力。这一现象进一步验证了本研究所提方法在功角较大时具有更强的过渡电阻耐受能力。

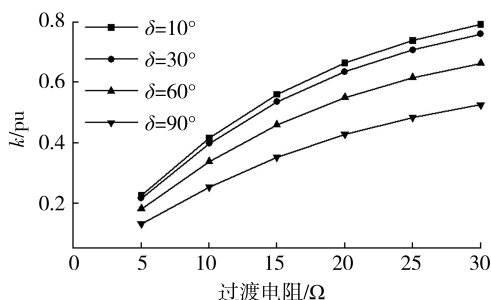


图 6 不同功角下 k 的过渡电阻耐受能力

Fig.6 Resistance of k to transition resistance at different power angles

传统两端供电系统中基于电压余弦量 $U_{ij} \cos \varphi_{ij}$ 的故障识别方案在过渡电阻较小的情况下发生不对称相间故障时,能够准确识别故障并确保距离保护正确动作。然而,由于传统系统不受新能源发电系统控制策略的影响,发生不对称相间故障时等效阻抗 Z_s 保持不变,系统功角 δ 变化较小。故障发生后,系统功角的变化主要取决于故障前的系统状态。当过渡电阻较大且系统功角较小

时,上述方案可能无法准确识别区内故障,导致保护性能下降。

然而,在新能源并网系统中,发生不对称相间故障时,控制策略的影响会导致系统功角迅速增大至接近 90° ,电压余弦量 $U_{ij} \cos \varphi_{ij}$ 的灵敏度显著提高,从而大幅增强了系统对过渡电阻的抗干扰能力。这一特性使得本研究所提方法在新能源并网系统中能够更有效地应对高过渡电阻故障,提升了距离保护的可靠性和适应性。

3 仿真验证

利用 Matlab/Simulink 搭建的 220 kV 仿真系统如图 7 所示,新能源场站为 S,交流系统为 Q。新能源场站等效阻抗 $Z_s = (6.3 + j84.3) \Omega$,交流系统等效阻抗 $Z_Q = (2.1 + j28.1) \Omega$;线路参数为单位长度电阻 $R_1 = 0.021 \Omega/\text{km}$,单位长度电抗 $X_1 = 0.281 \Omega/\text{km}$,单位长度电容 $C_1 = 12.74 \text{ nF}/\text{km}$,零序电阻 $R_0 = 0.115 \Omega/\text{km}$,零序电抗 $X_0 = 0.719 \Omega/\text{km}$,零序电容 $C_0 = 7.751 \text{ nF}/\text{km}$;新能源场站容量为 50 MW;线路全长为 100 km;系统频率为 50 Hz。新能源场站与交流系统的等效电源电势相角差为 δ ,故障开始时间为 0.2 s。不对称相间故障时,电弧电阻通常在 $(0, 30) \Omega$ 之间^[12]。

仿真验证在不同过渡电阻,不同故障位置 and 不同功角的场景下进行,以全面评估所提方法的性能。

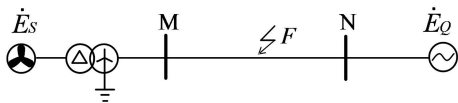


图 7 仿真系统示意图

Fig.7 Schematic diagram of simulation system

3.1 控制策略的影响

图 8 展示了不同类型故障下系统功角的变化曲线,从图中可以看出,在单相接地故障时,系统功角变化较小;而在相间故障时,系统功角变化显著,接近 90° 。这一现象表明,相间故障对系统功角的影响更为显著,为本研究所提方案提供了有利条件。具体而言,功角的显著增大使得电压余弦量的灵敏度大幅提升,从而增强了系统对过渡电阻的抗干扰能力。

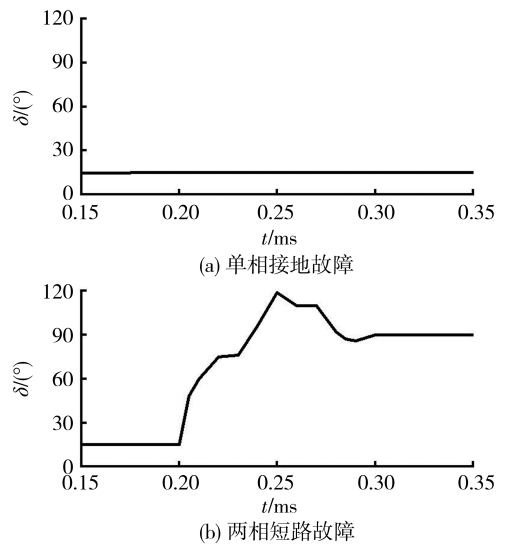


图 8 不同类型故障后系统功角特征

Fig.8 System power angle characteristics after different types of faults

图 9 展示了发生 BC 相间故障时测量阻抗的仿真结果。其中, Z_{m1} 为新能源并网系统的测量阻抗, Z_{m2} 为交流系统的测量阻抗。从图中可以看出,在相同过渡电阻故障条件下, Z_{m1} 位于保护范围内,距离保护正确动作;而受新能源发电系统控制策略的影响, Z_{m2} 位于保护范围外,导致距离保护无法正确动作。仿真结果表明,新能源发电系统控制策略显著降低了并网系统的过渡电阻耐受能力,使得基于阻抗平面的距离保护性能下降。

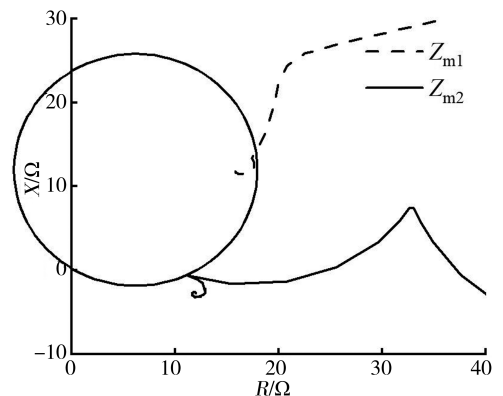


图 9 测量阻抗的仿真结果

Fig.9 Simulation results of measured impedance

3.2 不同过渡电阻的仿真结果

在新能源并网系统中,受控制策略的影响,系

统功角 δ 接近 90° , 线路发生 BC 相间故障时, 不同过渡电阻下电压余弦量 $k = U_{ij} \cos \varphi_{ij}$ 的仿真结果如图 10 所示。从图中可以看出, 在不同过渡电阻条件下, $k < 0.5$ pu, 距离保护能够正确动作。仿真结果表明, 本研究基于新能源并网系统在发生两相短路时功角接近 90° 的特点。利用电压余弦量 k 识别相间故障, 能够在不同过渡电阻下均准确识别故障并确保距离保护正确动作。

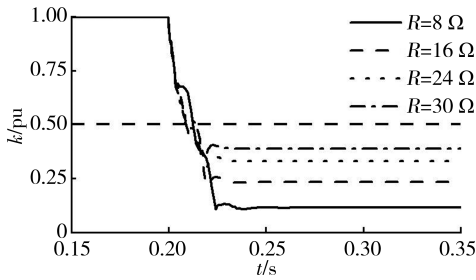


图 10 BC 相间故障时 k 的仿真结果

Fig.10 Simulation results of k in BC interphase fault

3.3 不同故障位置的仿真结果

当过渡电阻 $R = 15\Omega$, 在线路的不同位置发生 BC 相间故障时, 电压余弦量 $k = U_{ij} \cos \varphi_{ij}$ 的仿真结果如图 11 所示。从图中可以看出, 无论故障发生在线路的哪个位置, $k < 0.5$ pu, 距离保护能够正确动作。仿真结果表明, 本研究所提方案不受故障位置的影响, 能够在不同故障位置下准确识别故障并确保距离保护正确动作。

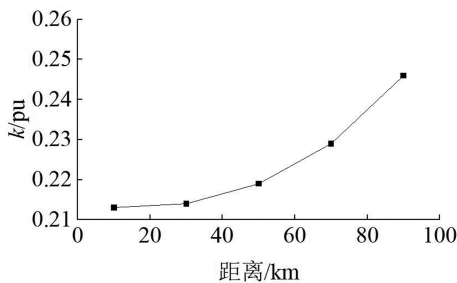


图 11 不同故障位置两相短路时 k 的仿真结果

Fig.11 Simulation results of k for two-phase short circuit at different fault locations

3.4 不同工况的仿真结果

表 1 展示了线路发生 BC 相间故障时, 不同工况下电压余弦量 $k = U_{ij} \cos \varphi_{ij}$ 的仿真结果。从表中可以看出, 系统功角 δ 受控制策略影响, 在发生两相故障后会接近 90° , 功角对电压余弦量

影响较小。在线路的不同位置以及不同过渡电阻条件下发生故障时, $k < 0.5$ pu, 距离保护能够正确动作。仿真结果表明, 在保护范围内的不同工况下发生两相故障时, 本研究所提方案均能准确识别故障并确保距离保护正确动作, 进一步验证了该方案在不同运行条件下的鲁棒性和可靠性。

表 1 不对称相间故障时 k 仿真结果

Tab.1 Simulation results of k at asymmetric interphase faults

故障位置/km	过渡电阻/ Ω	k			
		$\delta = 15^\circ$	$\delta = 30^\circ$	$\delta = 60^\circ$	$\delta = 90^\circ$
20	8	0.112 7	0.112 4	0.112 6	0.112 7
	16	0.226 5	0.226 4	0.226 8	0.226 4
40	8	0.113 0	0.113 3	0.112 9	0.113 0
	16	0.229 3	0.229 4	0.229 5	0.229 5
60	8	0.115 9	0.116 0	0.116 2	0.116 0
	16	0.237 3	0.237 4	0.237 6	0.237 7
80	8	0.127 3	0.127 4	0.127 7	0.127 2
	16	0.261 7	0.261 6	0.261 6	0.261 5

4 结论

新能源发电系统的交流送出线路在故障后, 受控制策略的影响, 其等效阻抗显著增大, 系统功角也随之增大, 进而对保护装置的动作性能产生显著影响。为解决这一问题, 本研究提出了一种基于电压余弦量的保护方案。仿真结果表明, 该方案具有以下显著特点:

- 1) 电压余弦量在系统功角较大时展现出较高的过渡电阻耐受能力。由于控制策略能够使系统功角增大至接近 90° , 从而显著提升了电压余弦量对过渡电阻的识别能力。
- 2) 无论过渡电阻的大小以及故障位置的远近, 所提方案均能准确识别区内故障。
- 3) 求取电压余弦量的时间短, 求取时间在 0.05 s 以内, 有助于提升距离保护动作时间, 具备良好的工程实用价值。

参考文献:

- [1] XU Z Y, ZHANG X, HE J, et al. First-zone distance relaying algorithm of parallel transmission lines for single-phase to ground faults[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 80: 374-381.
- [2] 秦瑜, 文明浩, 白宇, 等. 在线估计判据极值的高压直流线路新型距离保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3888-3897.
- [3] 李菁, 郑涛, 赵裕童, 等. 双馈风电短路电流特性对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 37-47.
- [4] ZHANG F, MU L H. A fault detection method of microgrids with grid-connected inverter interfaced distributed generators based on the PQ control strategy[J]. IEEE Trans Smart Grid, 2019, 10(5): 4816-4826.
- [5] 王兴国, 于溯, 周泽昕, 等. 新能源发电系统控制故障响应对交流线路距离保护影响分析[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3834-3843.
- [6] 周泽昕, 于溯, 李勇, 等. 新能源经柔直送出场景下功角变化导致比相式距离保护不正确动作机制分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1730-1739.
- [7] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 逆变型电源对距离保护的影响机理分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 54-59.
- [8] 陈晓乾, 秦文萍, 杨乐, 等. 逆变式电源接入下的配电网自适应距离保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 27-38.
- [9] 马伟, 黄晓波, 吴旻昊, 等. 一种抗过渡电阻的阻抗测量改进方案[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 1134-1139.
- [10] 柳焕章, 周泽昕, 王德林, 等. 具备应对过负荷能力的距离保护原理[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2943-2947.
- [11] 季亮, 张林楠, 姜恩宇, 等. 提升距离保护适应性的新能源主动故障控制研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(7): 22-29.
- [12] 康小宁, 赵选宗, 索南加乐, 等. 输电短线路的相间自适应距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 22-27, 32.

(责任编辑: 方素华)

(上接第 337 页)

- [6] ZHANG Y, CHENG Y, DONG X, et al. Study on the performance of new TPS high viscosity modifier on its modified asphalt [J]. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 587(1): 012023.
- [7] 李霞. 橡胶粉与 TPS 复合改性沥青及排水性沥青混合料性能研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(7): 95-98, 103.
- [8] WANG F, XIAO Y, CUI P, et al. Correlation of asphalt performance indicators and aging degrees: a review[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118824.
- [9] 兰添晖, 刘旭, 贾存兴, 等. 沥青胶结料应变延迟恢复特性的动态剪切流变试验表征[J]. 材料导报, 2024, 38(4): 92-98.
- [10] 中国工程建设标准化协会. 公路温拌橡胶沥青混合料施工技术规程: T/CECS G:K44-01-2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20-2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [12] NOURA S, AL-SABAEI A M, SAFAELDEEN G I, et al. Evaluation of measured and predicted resilient modulus of rubberized Stone Mastic Asphalt (SMA) modified with truck tire rubber powder[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15: 00633.
- [13] GUI W, LIANG L, WANG L, et al. Performance evaluation of warm-mixed crumb rubber modified asphalt based on rheological characteristics[J]. Construction and Building Materials, 2021, 285: 122881.
- [14] MA Q, GUO Z, GUO P, et al. Research on the viscosity-temperature properties and thermal stability of stabilized rubber powder modified asphalt[J]. Sustainability, 2021, 13(24): 13536.

(责任编辑: 陈雯)