

文章编号: 2095-2163(2023)12-0186-05

中图分类号: TP211

文献标志码: A

基于改进线性同余算法的随机参数的生成研究

刘子慧, 马家庆, 何志琴, 吴钦木, 陈昌盛, 覃涛

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)器件的结温是导致其失效的重要因素。为了抑制IGBT的结温,本文在IGBT器件中引入一种新型随机脉冲宽度调制(RPWM)策略,其结温的上升和波动会有效地降低。通过线性同余算法产生伪随机数,引入马尔科夫链算法与之相结合,使产生的随机序列的随机性得到强化,进一步抑制对IGBT的结温效果。实验结果表明:IGBT器件在给定的时间段内运行时,采用该新型随机PWM策略比未采用时IGBT器件的结温温度要低3.56 K,表明基于引入马尔科夫链的线性同余法的随机PWM策略能较好地抑制IGBT的结温。

关键词: 绝缘栅双极型晶体管; 结温; 随机脉冲宽度调制; 马尔科夫链; 线性同余法

Research on the generation of random sequences based on improved linear congruence algorithm

LIU Zihui, MA Jiaqing, HE Zhiqin, WU Qinmu, CHEN Changsheng, QIN Tao

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The junction temperature of insulated gate bipolar transistor (IGBT) devices is an important factor leading to its failure. In order to restrain the junction temperature of IGBT, a new random pulse width modulation (RPWM) strategy is introduced into IGBT devices, which can effectively reduce the rise and fluctuation of junction temperature. The pseudo-random number is generated by the linear congruence algorithm, and the Markov chain algorithm is combined with it to enhance the randomness of the generated random sequence. The theoretical analysis of the random sequence generated under this strategy can further restrain the junction temperature effect on IGBT. In the experimental verification, when the IGBT device is running in a given period of time, the junction temperature of the new random PWM strategy is 3.56 K lower than that of the IGBT device without it, which shows that the random PWM strategy based on the linear congruence method with Markov chain can better suppress the junction temperature of IGBT.

Key words: insulated gate bipolar transistor; junction temperature; random pulse width modulation; Markov chain; linear congruence method

0 引言

随着电力电子器件大量投入应用,电力电子半导体开关器件在电力电子系统中的地位愈显重要。在许多功率半导体器件中,IGBT器件作为复合全控型电压驱动式功率器件,其通流密度大、输入阻抗高,具有良好的低导通损耗特性,成为目前中、大功率电力电子设备的主要开关器件,应用广泛并且还在不断提高其电压和电流容量^[1]。由于IGBT模块电压和电流的提高而被广泛应用于中高压变流设备中,并已成为支持柔性直流输电的核心器件。但是IGBT器件在高电压、大功率的条件下连续工作,其

开关过程结温会不可避免地升高,这是器件所处系统功率转换效率的关键^[2]。一般来说,设备的结温越低,其功率损耗就越小,系统的能量转换效率就越高^[3]。相关研究报告指出,IGBT模块失效是导致逆变器运行故障的重大原因之一^[4]。随着电力电子器件应用场景不断增多,功率器件在不同运行场合中受到包括气候场合条件、生物场合条件、机械场合条件、湿度的限制等因素影响。其中,由于结温因素导致功率器件失效最为常见^[5]。Wang H^[6]研究表明:IGBT平均结温每增加10 K或者结温波动每增加5 K,电力电子器件的使用寿命将缩短至一半;并且高频率的热冲击力使不同热膨胀材料产生机械反

基金项目: 国家自然科学基金(62163006); 贵州省科技厅黔科合支撑([2021]一般442,[2022]一般264,[2023]一般179)。

作者简介: 刘子慧(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:电力电子器件的能量传递效率。

通讯作者: 马家庆(1981-),男,博士,副教授,主要研究方向:交流电机非线性控制及传感器非线性特性。Email:357287962@qq.com

收稿日期: 2023-10-14

应,造成焊接层材料产生键合线脱落,导致 IGBT 模块的老化,致使产生更多的热量,散热能力下降,而温度升高又加速功率半导体器件的老化,最终因超过工作结温上限,功率器件失效。现在越来越多的研究都集中在采用经济有效且可发展的方案来提高电力电子系统的可靠性,因此采用必要的策略来抑制 IGBT 器件在运行过程中的结温具有重要的意义。

对于 IGBT 器件结温问题,国内外的学术界早已展开了广泛的研究。叶峻涵^[7]根据 IGBT 数据手册拟合出温度特性曲线;PEYGHAMI S^[8]提出了一种结温估算数学模型,搭建三相电感结温测试仿真平台,通过结温验证了 IGBT 器件损耗模型和温度预估模型的一致性;吴志红^[9]将 IGBT 的温度特性与其损耗进行联系;Gao B^[10]研究了 IGBT 在不同脉冲策略下的温度特性,比较了 IGBT 中的瞬态热反应和最高结温;LI D、王亚楠^[11-12]计算了 IGBT 的最高结温,但缺少 IGBT 静态特性下的温度特性分析;杨经纬^[13]根据风力发电系统中 IGBT 器件长期运行会使焊接层材料过度疲劳而失效,通过建立 IGBT 器件的电-热-机械应力场模型,探究了焊接层材料空洞的大小和位置对 IGBT 器件热应力的影响变化,这对 IGBT 器件块的寿命评估具有重要意义。上述文献中包含了 IGBT 器件在不同应用场景中的散热方式,都从抑制结温或者计算结温的程度上保证了 IGBT 模块的运行效率,延长其使用寿命。

本文在 IGBT 中引入了一种基于改进的线性同余法的随机脉冲宽度策略,其产生的随机序列作用于 IGBT 器件时,IGBT 器件在运行过程中所产生的结温会得到较为明显的抑制。通过建立并分析 IGBT 的损耗数学模型,从理论上得出 IGBT 器件在运行过程中的损耗减少,且有效地降低了 IGBT 的结温温升和波动。搭建实验平台验证本文所提策略的合理性。

1 IGBT 损耗原理分析及随机 PWM 策略理论研究

1.1 IGBT 总损耗模型分析

IGBT 并非理想的开关器件,可以作为一个栅级晶体管,其等效电路示意图如图 1 所示。IGBT 的损耗主要由导通损耗、关断损耗和通态损耗组成^[14],则 IGBT 的总损耗可表示为式(1):

$$P = P_c + P_o + P_s \quad (1)$$

式中: P_c 、 P_o 分别表示为导通损耗和关断损耗, P_s 表示通态损耗。

由于 IGBT 器件在高开关频率运行时其通态损耗 P_s 很小,与产生的导通损耗和关断损耗相比可忽略不计。

IGBT 的开关损耗由 IGBT 的开关属性决定,故导通损耗 P_c 和关断损耗 P_o 可表示为式(2)和式(3):

$$P_c = \int_{T_0} u(t) i(t) dt \quad (2)$$

$$P_o = \int_{T_1} u(t) i(t) dt \quad (3)$$

式中: $u(t)$ 为集射级电压瞬时值, $i(t)$ 为集电极电流瞬时值, T_0 为导通持续周期时间, T_1 为关断持续周期时间。

可推导出 IGBT 在一个周期内总损耗,可表示为式(4):

$$P = \left[\int_{T_0} u(t) i(t) dt + \int_{T_1} u(t) i(t) dt \right] \times f_{sw} \quad (4)$$

式中: f_{sw} 为 IGBT 的开关频率。

由式(4)可知,由于 IGBT 的额定电压和额定电流是已知固定数值,则 IGBT 的总损耗主要由集射级电压、集电极电流和开通关断持续周期时间决定。

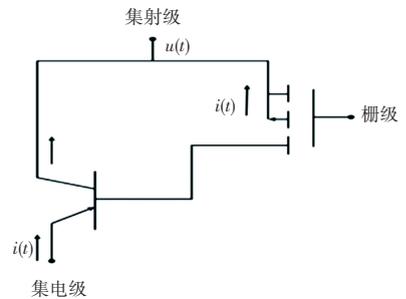


图 1 IGBT 等效电路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of IGBT equivalent circuit

1.2 随机载波频率 PWM 原理

随机 PWM 策略产生的脉冲信号是随机序列信号,产生的随机系数服从某种分布规律并应用于 PWM 脉冲波形中,将原来的 PWM 脉冲波改变为有一定随机规律的非周期波形。随机载波频率 PWM 是目前使用最多的随机 PWM 调制策略,让处于给定周期内的载波频率服从随机分布规则,再与调制波结合,进而使 IGBT 的开关频率达到随机化,随机载波频率 PWM 原理如图 2 所示。

随机 PWM 波形作用于 IGBT 时,其导通和关断过程会对开关频率表现为阻性和感性。随机 PWM 在实际控制过程中的策略有随机载波频率、随机占空比和随机死区时间 3 种。随机占空比 PWM 实现方法:每个开关周期固定不变,每次的脉冲位置保持

在周期起始处,脉冲宽度在每个 PWM 周期内随机变化,此时占空比的期望保持不变。在随机占空比 PWM 作用于 IGBT 模块中,从 IGBT 总能量损耗的角度来看,可以认为是载波周期随机增减。而随机死区时间本质上是随机占空比的一种特殊情况,故三种随机 PWM 可作为一种类型的随机调制方式来分析。在 IGBT 运行过程中,3 种随机方法原理上都是在没有改变 IGBT 周期内运行时间总开关次数,改变了开关的某些间隔周期时间,载波频率服从随机变化规律,故 IGBT 器件的开关频率的数学表达式(5):

$$f_{sw} = f_{s0} + \alpha \Delta f \quad (5)$$

式中: α 为 $[-1, 1]$ 范围内的随机数, f_{s0} 为给定的固定频率, Δf 是频率的波动范围,这两者均为定值。

当 f_{s0} 在某特定范围内变化时, PWM 输出的波形也会随之改变。

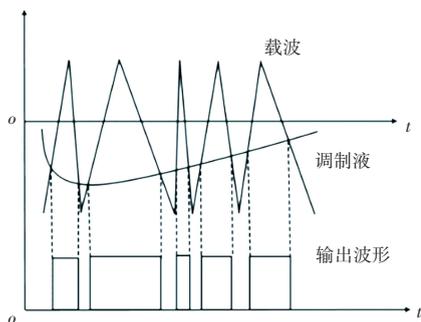


图2 随机载波频率 PWM 原理图

Fig. 2 Schematic diagram of random carrier frequency PWM

2 基于马尔科夫链的随机数序列生成法

2.1 马尔科夫链的线性同余法

对随机 PWM 策略来说,重要的是随机数的产生。在迄今的数字系统学中,随机数主要靠微处理器通过编译产生,而这种随机数是带周期的伪随机序列,故这种随机数并不是理想的随机数,现今随机数的生成主要有查表法、逻辑移位法和线性同余法。查表法是将已经生成的随机数储存到计算机中,需要时直接读取,这种方法实现简单且计算简便,但会占用计算机存储器;逻辑移位法是通过几个级联寄存器进行逻辑位移,生成的随机序列;线性同余算法作为使用最为广泛的伪随机数生成算法,具有速度快、输出序列周期长等特点,其表达式为式(6):

$$x_{n+1} = \text{mod } m[(x_n \times a + b)] \quad (6)$$

式中: x_0 为初始值, a 为乘法器(质数), b 为增值(质数), m 为随机数的字长,即模数, mod 是取模运算。

由式(6)所得的解析式为式(7), $r_1, r_2, \dots, r_\alpha$ 就是 α 个 $[0, 1]$ 范围内的随机数序列。

$$\begin{cases} x_1 = (x_0 \times a + b) \\ x_i = (x_{i-1} \times a + b) \\ r_i = x_i/m, i = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (7)$$

本文采用线性同余法产生随机数序列。然而,在使用计算机产生随机数序列时,其周期受限于计算机位数影响,且不可避免地出现连续多个随机数大于或小于期望,极有可能产生随机数均处于期望的一侧,当这些随机数因子引入 IGBT 模块运行过程中时,不能最大程度地发挥随机 PWM 策略的谐波分散特性,导致输入电流波动的增加,影响系统的稳定运行。马尔科夫链是一类时间离散、数值连续的随机过程,故本文引入了马尔科夫链,增强了计算机产生的伪随机数序列的随机性。

设 $\{X(t), t \in T\}$ 为一个随机过程,且 $(0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n) \in T$, 此随机过程满足式(8):

$$F(x_n, t_n | x_{n-1}, t_{n-1}; x_{n-2}, t_{n-2}; \dots; x_1, t_1) = F(x_n, t_n | x_{n-1}, t_{n-1}) \quad (8)$$

则称 $\{X(t), t \in T\}$ 为马尔科夫过程。从定义得知,马尔科夫过程具有无后效性,即下一个时刻 t_{n+1} 的状态 x_{n+1} 只与当前的时刻 t_n 的状态 x_n 有关。当马尔科夫过程的自变量 t 和状态空间 $\{X\}$ 均离散时,称该过程为离散型马尔科夫链。对于同一系统,状态空间中的状态数越多则控制越精细,随机性更强,但状态数越多,计算机的计算负担也会骤增,故并不是状态数越多越好。本文将状态数取 2, 马尔科夫链引入随机 PWM 策略控制 IGBT 时生成的随机数序列最能达到理想效果。

2.2 随机数序列生成方法

根据式(7)中生成的随机数序列方法,结合马尔科夫链算法增强其随机性,经过二次处理得到最终的随机数序列,示意图如图 3 所示。

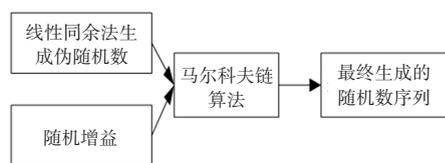


图3 随机数序列生成示意图

Fig. 3 Schematic diagram of random number sequence generation

3 实验验证

本文利用马尔科夫链对随机性有增强作用的特性,结合线性同余法输出所需的随机 PWM 波形,再

驱动 IGBT 晶体管工作, 即通过逆变器电路模块将直流电压 U_{dc} 转换成三相交流电, 最终驱动永磁同步电机运行, 其控制结构图如图 4 所示。

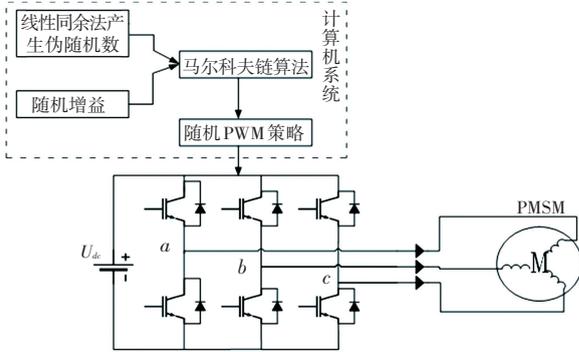


图 4 马尔科夫链的线性同余法的随机 PWM 策略控制结构图

Fig. 4 Stochastic PWM strategy control structure diagram of linear congruence method for Markov chains

基于永磁同步电机 (PMSM) 平台进行实验验证。实验环境的室温为 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 根据 IGBT 器件的正常运行条件, 本实验 IGBT 器件的开关频率设置为 10 kHz , 永磁同步电机的额定电压为 80 V , 额定转速为 700 r/min , 以永磁同步电机作为负载驱动, 验证本文所采用的随机策略对 IGBT 结温抑制效果。

3.1 随机数的产生

为保证随机数序列的均匀性, 给定的时间约 600 s 内, 在此期间首先利用线性同余法在给定的随机数范围 $(0,1)$ 内生成约 1×10^4 个随机数, 再引入马尔科夫链做二次随机生成的随机数序列, 实验随机数范围分布情况如图 5 所示。从图 5 可知, 在随机数范围 $(0,1)$ 内产生的随机数大概有 2×10^3 个, 且该随机数序列的随机性基本均匀分布, 满足实验的基本需求。

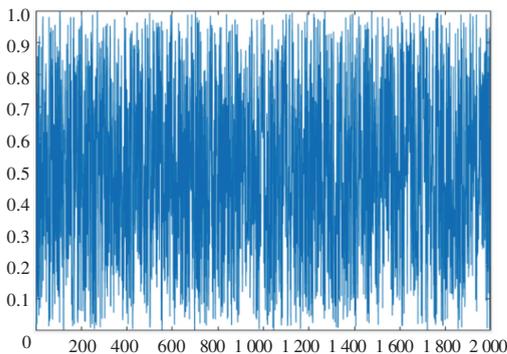


图 5 随机数分布情况

Fig. 5 Distribution of random numbers

3.2 无随机 PWM 与引入随机 PWM 策略对 IGBT 结温对比

三种方式下 IGBT 结温效果图如图 6 所示。在相同时间段内, IGBT 的结温抑制要好于无随机

PWM 策略; 在引入马尔科夫链对随机 PWM 策略的情况下, 其 IGBT 的结温抑制效果要好于未引入马尔科夫链的随机 PWM 策略控制, 并且采用该型随机 PWM 策略比未采用时 IGBT 模块的结温温度要低 3.56 K ,

可见改进的线性同余法的随机 PWM 策略在 3 种方式中对减小 IGBT 模块的功率损耗及抑制 IGBT 的结温温升均是最好的。

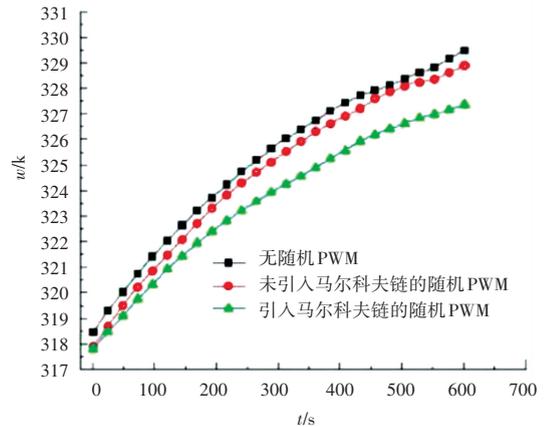


图 6 三种方式下对 IGBT 结温效果图

Fig. 6 Effect of junction temperature on IGBT in three ways

4 结束语

马尔科夫链在目前的机械学习中非常热门, 本文结合该算法与应用广泛的线性同余法应用在对 IGBT 模块结温影响分析上, 对功率半导体器件的结温分析提供了一个新思路, 并且所提基于改进的线性同余法的随机 PWM 策略更好地阐明了当脉冲宽度调制策略作用于 IGBT 时的功率损耗及结温机制。实验结果验证了该策略对减小 IGBT 的功率损耗及抑制其结温温升波动均有较好地效果, 并且使 IGBT 理论在实际工况中得到了更好的理论支持。

参考文献

- [1] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 8-20.
- [2] HUO Qunhai, WANG Peng, CAO Guoén, et al. Novel flexible HVDC transmission converter station topology with DC fault blocking capability [J]. Power Electron, 2020, 20(3): 884-893.
- [3] SHIMIZU T, WADA K. A gate drive circuit for low switching losses and snubber energy recovery [J]. Power Electron, 2009, 9(2): 259-266.
- [4] RYU H M. Highly efficient AC-DC converter for small wind power generators [J]. Power Electron, 2011, 11(1): 188-193.
- [5] CIAPPA M. Selected failure mechanisms of modern power modules [J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(4): 653-667.
- [6] WANG H, LISERRE M, BLAABJERG F, et al. Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics [J].

- IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(1): 97-114.
- [7] 叶峻涵, 杨平, 周荣斌, 等. 基于 SVPWM 调制方式的列车牵引逆变器功率器件寿命预测[J]. 机电传动, 2021(5): 175-182.
- [8] PEYGHAMI S, WANG H, DAVARI P, et al. Mission-profile-based system-level reliability analysis in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(5): 5055-5067.
- [9] 吴志红, 何耀华. IGBT 损耗和温度估算[J]. 微特电机, 2022, 50(7): 24-28.
- [10] GAO Bing, YANG Fan, CHEN Minyou, et al. A temperature gradient based condition estimation method for IGBT module[J]. Proceedings of the IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(3): 1-10.
- [11] LI Daohui, LI Xiang, QI Fang, et al. Thermal networks generation and application in IGBT module packaging[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Shanghai, China: IEEE, 2018; 23-26.
- [12] 王亚楠. IGBT 电磁损伤热效应及热可靠性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [13] 杨经伟, 王念春, 程明, 等. 多绕组风力发电机主动缺相运行变流器效率分析[J]. 电气传动, 2016, 46(1): 24-27.
- [14] SATHIK M, SUNDARARAJAN P, SASONGKO F, et al. Comparative analysis of IGBT parameters variation under different accelerated aging tests[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(3): 1098-1105.
- [15] LI Keqin. Performance modeling and analysis for randomly walking mobile users with Markov chains[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2023, 140(2024): 103492.

(上接第 185 页)

3 结束语

本文针对车辆轨迹预测存在需考虑车辆自身因素的同时, 需要综合考虑周围车辆影响的问题, 提出了一种融合坐标注意力的卷积社交池网络模型。使用 LSTM 编码器对网格范围内车辆进行状态编码; 将周围车辆信息映射到社交网络, 形成社交张量, 使用卷积网络提取社交特征, 添加坐标注意力, 对社交特征进行特征增强, 得到社交上下文编码, 目标车辆状态编码使用全连接网络生成特征编码, 两个编码结合得到完整的轨迹编码; 轨迹编码传递给解码器得到目标车辆的多模态未来轨迹预测分布。经在数据集 NGSIM 上实验, 本文所提模型具有较好的准确率。

参考文献

- [1] LEFÈVRE S, VASQUEZ D, LAUGIER C. A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles[J]. Robomech Journal, 2014, 1(1): 1-14.
- [2] AMMOUN S, NASHASHIBI F. Real time trajectory prediction for collision risk estimation between vehicles[C]//Proceedings of 2009 IEEE 5th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing. IEEE, 2009: 417-422.
- [3] ALTHOFF M, STURSBURG O, BUSS M. Model-based probabilistic collision detection in autonomous driving[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2009, 10(2): 299-310.
- [4] LI X, YING X, CHUAH M C. Grip: Graph-based interaction-aware trajectory prediction[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). IEEE, 2019: 3960-3966.
- [5] MO X, XING Y, LV C. Recog: A deep learning framework with heterogeneous graph for interaction-aware trajectory prediction[J]. arXiv preprint arXiv:2012.05032, 2020.
- [6] LI J, MA H, ZHANG Z, et al. Social-wagdat: Interaction-aware trajectory prediction via wasserstein graph double-attention network[J]. arXiv preprint arXiv:2002.06241, 2020.
- [7] DEO N, TRIVEDI M M. Multi-modal trajectory prediction of surrounding vehicles with maneuver based lstms[C]//Proceedings of 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2018: 1179-1184.
- [8] DEO N, RANGESH A, TRIVEDI M M. How would surround vehicles move? A unified framework for maneuver classification and motion prediction[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2018, 3(2): 129-140.
- [9] DEO N, TRIVEDI M M. Convolutional social pooling for vehicle trajectory prediction[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. 2018: 1468-1476.
- [10] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018: 7132-7141.
- [11] HOU Q, ZHOU D, FENG J. Coordinate attention for efficient mobile network design[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2021: 13713-13722.
- [12] 连静, 丁荣琪, 李琳辉, 等. 基于图模型和注意力机制的车辆轨迹预测方法[J]. 兵工学报, 2023, 44(7): 2162-2170.
- [13] ZHAO T, XU Y, MONFORT M, et al. Multi-agent tensor fusion for contextual trajectory prediction[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019: 12126-12134.