

文章编号: 2095-2163(2023)12-0177-05

中图分类号: U495;U491

文献标志码: A

# 基于非线性模型预测控制的交叉口自动驾驶车辆轨迹规划与控制

郑佳媛<sup>1</sup>, 潘承晨<sup>1</sup>, 张雪妍<sup>1</sup>, 马若铭<sup>1</sup>, 朱浩<sup>2</sup>, 陈南<sup>3</sup>, 赵靖<sup>1</sup>

(1 上海理工大学管理学院, 上海 200093; 2 上海市城乡建设和交通发展研究院, 上海 200032;

3 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

**摘要:** 为保证自动驾驶车辆在交叉口内安全且高效的行驶, 本文提出一种基于非线性模型预测控制(NMPC)的交叉口内自动驾驶车辆的轨迹规划与轨迹控制算法。以自动驾驶车辆完成期望的驾驶行为为目标, 基于车辆轮廓不互相重叠的原理建立防碰撞约束, 并根据交叉口的几何信息构建车道约束; 为了保证车辆行驶符合运动学规律, 根据交通规则和车辆特性设置运动约束。通过运用公开自然驾驶智能汽车仿真测试环境(Onsite)接口, 将该算法在300个由真实世界孪生的测试场景进行了仿真测试, 测试结果表明: 本文算分在安全、效率和舒适度3个方面都有良好的表现。

**关键词:** 自动驾驶; 轨迹规划; 轨迹控制; NMPC

## Trajectory planning and control of autonomous vehicles at intersections based on nonlinear model predictive control

ZHENG Jiayuan<sup>1</sup>, PAN Chengchen<sup>1</sup>, ZHANG Xueyan<sup>1</sup>, MA Ruoming<sup>1</sup>, ZHU Hao<sup>2</sup>, CHEN Nan<sup>3</sup>, ZHAO Jing<sup>1</sup>

(1 Business of School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2 Shanghai Urban and Rural Construction and Transportation Development Research Institute, Shanghai 200032, China;

3 Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** To ensure the safe and efficient operation of autonomous vehicles at intersections, this study proposed a trajectory planning and control algorithm based on Nonlinear Model Predictive Control (NMPC). The algorithm aims to achieve desired driving behavior while considering anti-collision constraints based on non-overlapping vehicle contours and lane constraints derived from geometric information. Additionally, motion constraints are established in accordance with traffic rules and vehicle characteristics to ensure compliance with kinematic laws. The proposed method is evaluated through simulation using 300 real-world twin test scenarios within the publicly available Natural Driving Smart Vehicle Simulation Test Environment (Onsite), demonstrating favorable performance in terms of safety, efficiency, and comfort.

**Key words:** autonomous vehicle; trajectory plan; trajectory control; NMPC

## 0 引言

21世纪, 自动驾驶技术的日趋成熟, 为提升城市交通系统的性能和安全性提供了又一有力方案<sup>[1]</sup>。为实现自动驾驶车辆安全、高效、舒适、节能行驶, 缓解交通拥堵, 减少交通事故发生, 自动驾驶车辆需具备环境感知、智能决策、轨迹规划、车辆控制四大核心技术。

轨迹规划与控制对实现自动驾驶车辆在复杂交通环境中安全而高效的行驶起到关键性作用。以往研究大多采取分步式控制, 即完成轨迹规划后再进

行轨迹跟踪控制<sup>[2]</sup>。轨迹规划以找到符合特定要求的可行路径为目标, 常用的方法有图搜索法、基于优化的方法、采样法、插值法。其中, 图搜索法需要遍历所有区域、搜索最优路径, 计算资源需求大, 且搜索结果仅考虑了效率最优, 无法保证行驶舒适性<sup>[3]</sup>; 基于优化的方法需要在多个目标函数之间进行权衡和优化, 找到最优轨迹, 同样存在计算时间长的问题<sup>[4]</sup>; 采样法通过随机采样的方式快速地探索搜索空间, 但并不能保证找到全局最优解<sup>[5]</sup>; 插值法所规划轨迹的平滑度随样条阶数的增高而增高, 但同时运算量也会随之增加, 自动驾驶有限的计算

**基金项目:** 上海市创新行动计划项目(23692112200); 上海市曙光计划(22SG45)。

**作者简介:** 郑佳媛(2002-), 女, 本科生, 主要研究方向: 自动驾驶、车辆轨迹规划与控制; 马若铭(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 自动驾驶、车辆轨迹预测、轨迹重构。

收稿日期: 2023-10-13

资源导致该方法无法使用过大的阶数,从而导致不理想的轨迹结果<sup>[6]</sup>。

对于分步式控制,若上层轨迹规划结果为非最优轨迹,自动驾驶车辆将只能按照非最优路线行驶;若需要上层规划找出最优轨迹,虽然保住了最优性,但会导致算法速度下降。相比分步式控制方案,一体式轨迹规划控制方法将规划和跟踪控制整合为一个优化问题,在降低计算量和保证全局最优方面具有明显优势。目前,采用一体式轨迹规划控制的研究工作较少,且研究场景多为高速路场景,对交叉口场景下的研究存在空白<sup>[7]</sup>。本文将轨迹规划与跟踪控制进行整合,考虑交叉口场景下自动驾驶车辆的行驶过程,提出了基于模型预测控制的交叉口内无人驾驶车辆轨迹规划控制方法,进行一体式轨迹规划控制。首先,基于车辆动力学对车辆运动进行建模,将车辆与期望终点的最小距离作为目标函数,同时考虑车辆的安全、效率及舒适度约束;根据自动驾驶车辆行驶状况及周边环境动态求解最优控制变量的值,使自动驾驶车辆沿着最优路径行驶。通过对300个不同的交叉口场景进行仿真,验证了本文方法的有效性。

## 1 基于NMPC的二维轨迹规划控制模型

为适应交叉口的二维环境,本文提出的方法同时控制车辆的制动与转向,建立了基于NMPC的二维轨迹规划控制模型。首先,将车辆与期望终点的最小距离定义为目标函数,再建立车辆动力学模型;其次,依据行驶安全性、交叉口几何设计、道路交通规则、乘坐舒适度等要求,给出模型约束;最后,对模型进行求解。

### 1.1 目标函数

目标函数的设置直接影响到自动驾驶车辆的驾驶行为,为保证自动驾驶车辆尽可能快速达到预定的行驶目标点,本文将规划窗口内最后时刻自动驾驶车辆的车头位置与目标点之间的距离 $D(t)$ 最小设为目标,构建如式(1)的目标函数:

$$\min D(t) = \sqrt{(x(T) - x_d)^2 + (y(T) - y_d)^2} \quad (1)$$

其中, $(x_d, y_d)$ 为期望终点的横纵坐标; $T$ 为规划窗口大小(单位:s); $(x(T), y(T))$ 表示规划窗口最后时刻 $T$ 的目标车车头位置坐标。

### 1.2 车辆动力学模型

准确的动力学模型是运用NMPC进行轨迹规划控制的基础。首先,给出控制车辆在 $t$ 时刻的状态变量 $X(t)$ ,式(2):

$$X(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \varphi(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $t$ 表示规划窗口 $T$ 内的第 $t$ 时刻车辆(单位:s); $x(t)$ 和 $y(t)$ 表示自动驾驶车辆在 $t$ 时刻的位置(单位:m); $\varphi(t)$ 表示自动驾驶车辆在 $t$ 时刻的行驶方向角; $v(t)$ 表示自动驾驶车辆在 $t$ 时刻的纵向行驶速度(单位:m/s)。

由于本文旨在建立交叉口内的二维控制模型,故对自动驾驶车辆动力学的控制变量包括曲率和纵向加速度,如式(3)所示:

$$C(t) = \begin{bmatrix} k(t) \\ a(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据设置的状态变量和控制变量间的关系,建立如式(4)所示车辆动力学公式:

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \begin{bmatrix} v(t) \cos \varphi(t) \\ v(t) \sin \varphi(t) \\ v(t) k(t) \\ a(t) \end{bmatrix} \Delta t \quad (4)$$

其中, $k(t)$ 为车辆在 $t$ 时刻的曲率(单位: $m^{-1}$ ),即转弯半径的倒数(左转时为正,右转时为负); $a(t)$ 为车辆在 $t$ 时刻的纵向加速度(单位: $m/s^2$ ); $\Delta t$ 为时间步长(单位:s),为相邻两次控制的时间间隔。

### 1.3 模型约束

为符合实际,根据交通规则、车辆特性与构建模型约束,保证自动驾驶车辆的行驶安全与行车规范。本文对模型添加了碰撞约束、车道功能约束及运动参数约束。

#### 1.3.1 碰撞约束

为防止被控车辆与背景车辆发生碰撞,需要在模型中添加防碰撞约束来限制自动驾驶车辆的运动。

本文将车辆轮廓简化成矩形,两车不发生碰撞即两车对应的矩形轮廓不发生重叠(如图1所示)。目标车与其他车不发生碰撞的充分必要条件是目标车矩形的4个顶点中的任意一个与背景车矩形的4个顶点所构成的所有三角形面积之和大于目标车矩形面积,故可构建如公式(5)所示的碰撞约束:

$$S_{\Delta PAB}(t) + S_{\Delta PBC}(t) + S_{\Delta PCD}(t) + S_{\Delta PDA}(t) > S_{ABCD}(t) = l_i * w_i \quad (5)$$

其中, $P$ 表示目标车的矩形顶点,满足 $\forall P \in \{P_A, P_B, P_C, P_D\}$ ;  $S_{\Delta PAB}(t)$ 、 $S_{\Delta PBC}(t)$ 、 $S_{\Delta PCD}(t)$ 、

$S_{\Delta PDA}(t)$  和  $S_{ABCD}(t)$  分别表示第  $t$  时刻, 目标车顶点  $P$  分别与背景车辆  $i$  的 4 个顶点构成的三角形面积和背景车辆  $i$  矩形轮廓的面积 (单位:  $\text{m}^2$ );  $l_i$  和  $w_i$  分别为车辆  $i$  的车身长度和车身宽度 (单位:  $\text{m}$ )。

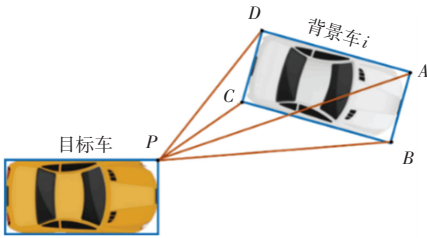


图 1 碰撞判断

Fig. 1 Collision identification

由于需要保证规划窗口  $T$  内所有时刻目标车与背景车都不发生碰撞, 需要对背景车辆在规划窗口内的轨迹进行预测。本文运用背景车辆的历史轨迹数据来构建 3 次样条曲线, 并将背景车视作沿着所构建的样条曲线匀速运动。需要说明的是, 本文旨在提出一种交叉口内自动驾驶车辆的轨迹规划与控制模型, 轨迹预测并不是本研究的重点, 可根据具体要求, 采用不同的预测方法来满足应用要求, 同时不需要修改本文模型的其他部分。

### 1.3.2 车道功能约束

由于驶入对向车道或驶出交叉口会增加发生交通事故的概率, 且容易影响其他车辆的正常行驶, 降低交叉口效率, 故模型中需添加车道功能约束以保证自动驾驶车辆的行驶符合行驶规范, 不影响交叉口的通行效率<sup>[8]</sup>。本文将交叉口放在如图 2 车道功能约束示意图的全局坐标中, 并针对车辆的不同行驶行为, 构建不同的车道功能约束。本文研究的对象为十字交叉口, 各进口道驶入的情况一致, 故只对西进口道驶入的情况进行阐述, 其他进口道驶入情况可以依此类推。

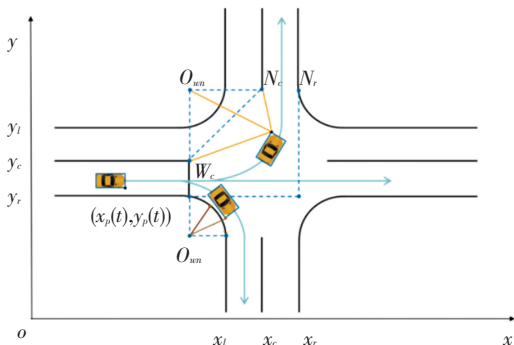


图 2 车道功能约束示意图

Fig. 2 Lane function constraints

的所有顶点坐标不超出行车道的道路边界坐标。直行的车道功能约束:  $y_r < y_p(t) < y_c$ ,  $y_r$  和  $y_c$  分别为西进口道路的上下边界对应的纵坐标;  $y_p(t)$  为  $t$  时刻目标车顶点  $p$  的纵坐标。

(2) 对于左转行为, 根据交叉口的几何参数, 为防止自动驾驶车辆左转时驶入对向车道, 可建立如  $x_p(t) < x_r$  和  $S_{\Delta PW_c N_c}(t) + S_{\Delta PW_c O_{wn}}(t) + S_{\Delta PN_c O_{wn}}(t) > S_{W_c N_c O_{wn}}$  的车道功能约束,  $x_p(t)$  和  $y_p(t)$  分别代表目标车在  $t$  时刻目标车顶点  $p$  的横、纵坐标;  $S_{\Delta PW_c N_c}(t)$ 、 $S_{\Delta PW_c O_{wn}}(t)$  和  $S_{\Delta PN_c O_{wn}}(t)$  表示目标车在  $t$  时刻目标车顶点  $p$  分别与  $W_c$ 、 $N_c$  和  $O_{wn}$  中任意两点所构成三角形的面积;  $S_{W_c N_c O_{wn}}$  表示由点  $W_c$ 、 $N_c$  和  $O_{wn}$  所构成三角形的面积。

(3) 对于右转行为, 为防止车辆右转时驶出交叉口边界, 需保证目标车辆的 4 个顶点与包含转弯边界的圆的圆心之间的距离大于该圆的半径, 构建的右转行为的车道约束  $d_{PO_{wn}}(t) > r$ ,  $d_{PO_{wn}}(t)$  为目标车在  $t$  时刻 4 个顶点中任意一点与点  $O_{wn}$  间的欧拉距离 (单位:  $\text{m}$ );  $r$  为包含转弯边界的圆的半径 (单位:  $\text{m}$ )。

### 1.3.3 运动参数约束

为保证规划轨迹的运动符合运动学规律, 参考相关文献中运动参数约束的设置思想, 根据交通规则和车辆特性, 将速度、加速度、加加速度、曲率与曲率变化分别约束在  $[0 \text{ m/s}, 35 \text{ m/s}]$ 、 $[-5 \text{ m/s}^2, 5 \text{ m/s}^2]$ 、 $[-10 \text{ m/s}^3, 10 \text{ m/s}^3]$ 、 $[-1/5 \text{ m}^{-1}, 1/5 \text{ m}^{-1}]$ 、 $[-0.1 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}, 0.1 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}]$  范围内<sup>[9-10]</sup>。运动参数约束的设置可以根据应用场景灵活地替换为任何合理的值, 而不需要改变方法的结构。

### 1.4 模型求解

利用车辆动力学公式 (4), 将本文构建的模型预测控制模型转换为每一个规划窗口内的非线性优化模型, 并运用数值优化工具箱 CasADi 中的内点优化器 (IPOPT) 来求解出每一次滚动的最优控制变量值。由于不同进口道下不同的行驶行为, 需要建立不同的模型约束, 为保证本文构建的模型能够适用于交叉口内的所有行驶情况, 算法流程如下:

**Step 1** 根据被控车辆在的起始位置和期望终点的位置判断进口道和预期行为;

**Step 2** 基于目标车辆初始位置即所在的进口道和预期行为构建不同的控制模型;

**Step 3** 结合 CasADi 对构建的模型滚动求解, 生成对自动驾驶车辆的最优控制策略。

(1) 对于直行行为, 只需要保证自动驾驶车辆

## 2 模型评价

采用公开自然驾驶智能汽车仿真测试环境 (Onsite) 对本文所构建模型进行仿真评价。该测试环境基于国家智能网联汽车创新中心数据、TJRD TS 数据集及 SIND 数据集等多源检测数据, 综合集成交通流模型、测试优化算法和仿真可视化界面, 为高等级自动驾驶汽车的感知、决策、规划、控制等模块提供测评服务的公共平台。

本文采用 Onsite 测试平台提供的 300 个交叉场景, 不同场景的交叉具有不同的行驶环境, 同时目标车具有不同的预期行为, 能够较为全面的覆盖十字交叉路口内的各种驾驶情况。运用 Onsite 平台提供的 Python 接口, 对本文提出的轨迹规划与控制算法进行测试, 部分场景的仿真测试界面如图 3 所示, 绿色矩形为受到模型控制的自动驾驶车辆, 蓝色矩形为背景车辆, 红色区域为该测试场景下自动驾驶车辆的预期终点。

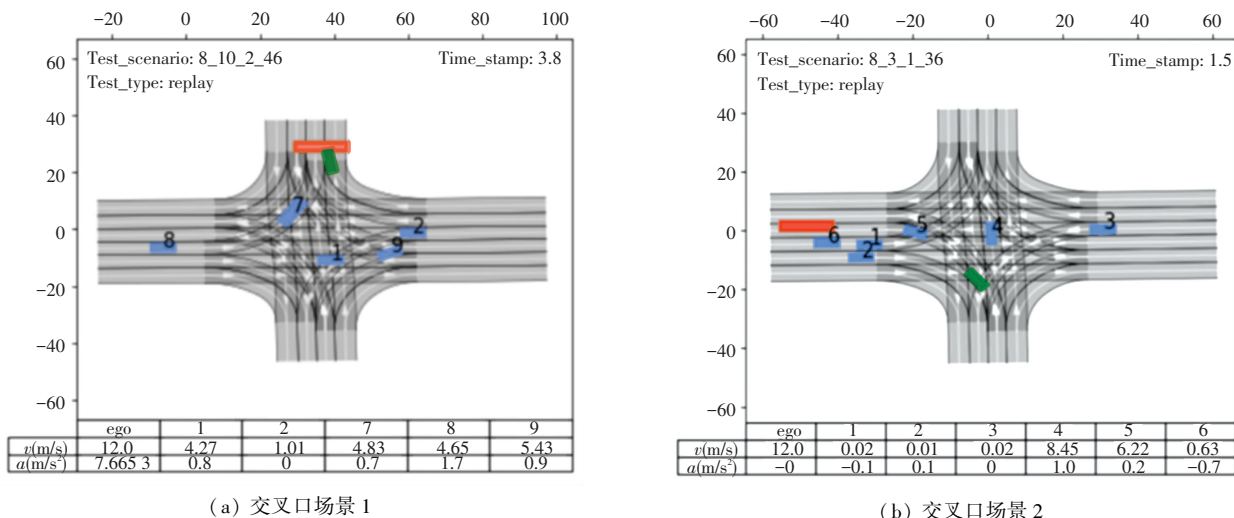


图 3 仿真测试界面

Fig. 3 Simulation test interface

Onsite 平台在仿真结束后会对轨迹规划和控制模型的表现进行评分, 满分为 100 分, 评分标准见表 1。对于扣分制项目, 最多扣至 0 分, 不会出现负数情况。碰撞时间 (TTC) 阈值为 1 s, 纵向加速度的合理范围为  $3 \text{ m/s}^2$  至  $-3 \text{ m/s}^2$ , 横向加速度的合理

范围为  $0.5 \text{ m/s}^2$  至  $-0.5 \text{ m/s}^2$ , 纵向加加速度的合理范围为  $6 \text{ m/s}^3$  至  $-6 \text{ m/s}^3$ , 横向加加速度的合理范围为  $1 \text{ m/s}^3$  至  $-1 \text{ m/s}^3$ , 转弯向心加速度的合理范围为  $-1 \text{ m/s}$  至  $1 \text{ m/s}$ 。

表 1 评分细则

Table 1 Scoring rules

准则	指标	分值	得分标准
安全 (50 分)	碰撞	扣分制	若碰撞, 安全分为 0
	驶出行车道	扣分制	驶出行车道的时长占总行驶时的比例 * 50
	TTC	扣分制	低于 TTC 阈值的时长占总行驶时的比例 * 50
	驶入对向车道	扣分制	驶入对向车道的时长占总行驶时的比例 * 25
	闯红灯	扣分制	闯红灯, 扣 10 分
效率 (30 分)	任务完成	10	任务未完成, 扣 10 分
	任务耗时	20	期望耗时占总耗时的比例 * 20
舒适 (20 分)	横向舒适度	扣分制	横向加速度及加加速度超出阈值的时长占总耗时比例 * 4
	纵向舒适度	扣分制	纵向加速度及加加速度超出阈值的时长占总耗时比例 * 4
	转弯舒适度	扣分制	向心加速度超出阈值的时长的总耗时比例 * 4



IDM 算法和 Lattice 算法为 Onsite 平台内置的对比标杆算法,只能得知算法的总分,300 个场景的仿真测试结果见表 2,可以看出本文方法的仿真测试总分远远高于标杆算法,相较于 IDM 算法和 Lattice 算法,得分分别提高 87.32% 和 199.7%;在安全、效率和舒适度 3 个方面,本文方法离满分差距分别仅为 7.78%、11.43% 和 6.2%,证明本文能够在保证安全和舒适度的同时,以较高的效率达成驾驶目的。

表 2 测试结果

Table 2 Test results

方法	安全得分	效率得分	舒适得分	总分
本文方法	46.11	26.57	18.76	91.45
IDM 算法				48.82
Lattice 算法				30.51

### 3 结束语

为保证无人驾驶车辆在行驶过程不与背景车辆发生碰撞的同时不违反交通规则,本文针对自动驾驶车辆在交叉口内的轨迹规划与控制问题,提出了一种基于非线性模型预测控制(NMPC)的二维轨迹规划与控制算法。以自动驾驶车辆完成期望驾驶行为为目标,并设置了防碰撞约束、车道约束和运动约束构建非线性模型预测控制规划与控制模型;将模型和算法移植入公开自然驾驶智能汽车仿真测试环境,基于 300 个由真实场景孪生的测试场景对模型

进行了仿真测试。测试结果表明,本文方法在安全、效率和舒适度 3 个方面都有良好的表现。

### 参考文献

- [1] 赵靖, 杨晓光, 章程. 交通设计技术发展及对策建议[J]. 前瞻科技, 2023, 2(3): 45-57.
- [2] 采国顺, 刘昊吉, 冯吉伟, 等. 智能汽车的运动规划与控制研究综述[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(3): 279-297.
- [3] 郑好, 冯毓雯, 蒲文杰, 等. 基于 Dijkstra 算法的封闭环境全局路径规划[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(16): 7-11.
- [4] WEI C, WANG Y, ASAKURA Y, et al. A nonlinear programming model for collision-free lane-change trajectory planning based on vehicle-to-vehicle communication[J]. Journal of Transportation Safety & Security, 2021, 13(9): 936-956.
- [5] 余嘉星, ALIASGHAR A, 裴晓飞, 等. 考虑路径平滑性和避撞稳定性的智能汽车弯道轨迹规划研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(5): 656-663.
- [6] 覃振杰, 熊铎程, 林智桂, 等. 基于双向线性插值的车道辅助系统障碍避让研究[J]. 中国信息化, 2022(5): 74-76.
- [7] 彭浩楠, 唐明环, 查奇文, 等. 自动驾驶汽车双车道换道最优轨迹规划方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(12): 2852-2863.
- [8] 赵靖, 陈凯佳, 周溪召. 阵列式交叉口几何设计与信号控制协同鲁棒优化[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 296-305.
- [9] ZHAO J, KNOOP V L, WANG M. Microscopic traffic modeling inside intersections: interactions between drivers [J]. Transportation Science, 2023, 57(1): 135-155.
- [10] BICHIOU Y, RAKHA H A. Developing an optimal intersection control system for automated connected vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(5): 1908-1916.

(上接第 176 页)

### 4 结束语

Flash MTV 作品创作中,音频文件处理技术是难点,是成功创作 MTV 的前提基础;词曲同步技术是难点中的焦点;片头内容和片头动画则是亮点。笔者通过近几年 Flash MTV 作品创作过程中的反复实践、深入研究总结出:借助音频编辑软件 Goldwave、MP3 播放软件 Winamp 和歌词编辑器 LyricsMate Lyrics Editor 等软件实现软件之间的技术关联后,Flash MTV 作品创作中的关键技术都能科学地突破。作品创作者再结合自身的 Flash 动画设计水平和信息技术素养,一部好的 Flash MTV 作品就可以完美呈现。

### 参考文献

- [1] 缪亮. Flash 动画制作基础与上机指导 [M]. 北京:清华大学出

版社,2010:98-101.

- [2] 王智强. 中文版 Flash CS5 标准教程 [M]. 北京:中国电力出版社,2011:111-121.
- [3] 龚花兰. FLASH CS6 项目驱动“教学做”案例教程(第三版) [M]. 上海:复旦大学出版社,2014:242-244.
- [4] 卢伟, 郭根生. FLASH 软件中的声音格式 MP3 和 Wav [J]. 电脑知识与技术: 学术版, 2006 (8): 153.
- [5] 王建生. 中文版 Flash CS5 动画制作实训教程 [M]. 北京:清华大学出版社,2011:106-108.
- [6] 张文, 龚花兰, 刘晓芹. 基于 Flash 探讨音乐动画创作技术 [J]. 智能计算机与应用, 2018, 8(2): 184-186.
- [7] 龚花兰, 顾湘萍, 周颖. Flash MTV 制作中软件关联技术 [J]. 沙洲职业工学院学报, 2010, 13(1): 26-29.
- [8] 肖建芳, 刘进军. 基于 Flash 的 MTV 动画制作方法与技巧探析 [J]. 现代计算机, 2012, 403(19): 51-53, 65.
- [9] 龚花兰, 郭自飞, 郭嘉铭. 基于网页设计探讨 Photoshop 和 Flash 关联技术 [J]. 计算机产品与流通, 2021(4): 162-163.