

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.03.029

# 汽车自动紧急制动系统行人避障策略及仿真

向世林

(中国汽车工程研究院股份有限公司,重庆 401122)

**摘要:**为进一步提高汽车自动紧急制动系统对行人的安全保护功能,设计一种上层采用模糊控制方法和下层采用PID控制方法的联合分层控制行人避障策略。基于某款E级SUV车辆,建立相应的动力学模型,在实际行人测试环境下,建立基于碰撞时间算法的风险评价模型,为了验证所提出控制策略的有效性,通过Simulink和Carsim联合仿真进行测试验证。仿真测试结果表明,所提出的行人避障控制策略达到C-NCAP行人测试工况标准,与行人最小安全距离为0.9m。在保证安全的前提下,模糊控制方法可调整制动强度,减速度控制在 $4.8\sim 6.1\text{ m/s}^2$ ,能够使车辆具有较好的舒适性。

**关键词:**自动紧急制动;模糊控制;行人避障策略;联合仿真

中图分类号:U461.91 文献标志码:B 文章编号:1671-5276(2021)03-0113-05

## The Pedestrian Obstacle Avoidance Strategy and Simulation of Auto Automatic Emergency Braking System

XIANG Shilin

(China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

**Abstract:** To further improve the safety protection function of auto automatic emergency braking system for pedestrians, a combined hierarchical control strategy of fuzzy control for the upper layer and PID control for the lower layer was designed. Based on a certain E-class SUV vehicle, the corresponding dynamics model was established. In the actual pedestrian test environment, a risk evaluation model based on Time to Collision was established. To verify the effectiveness of the proposed control strategy, Simulink and Carsim co-simulation were applied. Simulation test results show that the proposed pedestrian avoidance control strategy meets the standard of C-NCAP pedestrian test conditions, and the minimum safe distance between the pedestrian and the pedestrian is 0.9 m. On the premise of ensured safety, and by the fuzzy control method, the braking strength can be adjusted and the speed can be reduced within  $4.8\sim 6.1\text{ m/s}^2$ , providing better comfort for vehicles have better comfort.

**Keywords:** automatic emergency braking; fuzzy control; pedestrian avoidance strategies; the joint simulation

## 0 引言

汽车自动紧急制动系统(AEB)可以通过摄像头、毫米波雷达等传感器设备对周围环境状况进行判断,在发生碰撞危险之前,实时、不断发出预警信号,当驾驶员未采取有效措施时,AEB会主动控制车辆并进行紧急制动,从而避免或减轻对行人的伤害。据统计,AEB系统的应用可减少约27%的车辆碰撞交通事故,能够有效保障行人的安全<sup>[1]</sup>。

近年来,对于自动紧急制动行人避障系统(AEB-P)的研究日益得到重视,国内外现有的行人避障系统研究主要包括控制策略、行人检测和危险场景三大方向。文献[2]基于我国特有的交通场景条件,建立了AEB-P典型测试场景,并借助PreScan工具进行了系统分析。文献[3]提出了基于车车通讯AEB-P的仿真模型,并进行了相关的测试验证。文献[4]基于模糊控制相关理论,提出了一种行人避障自动转向方法,在30km/h车速范围内精

度较高。文献[5]提出了一种行人预测位置和车辆速度相融合的目标检测算法,可以保证在40km/h车速内的有效避障。文献[6]针对行人横穿马路的典型场景,对车辆速度进行实时控制,可以有效防止车辆与行人发生碰撞。文献[7]根据行人速度提出了一种碰撞风险计算方法,可以对碰撞概率进行量化分析,并且计算结果与实际安全测评数据有较高的契合度。

综上所述,目前我国AEB-P系统的研究大多是针对行人检测和危险场景,在行人避障策略方面缺乏深入分析。由于国内外交通状况不同,不能直接将国外相关研究应用于我国交通场景。为此,本文在C-NCAP发布的AEB-P行人避障评价标准基础上,建立了上层模糊控制和下层PID控制的联合分层控制策略。对安全距离算法<sup>[8]</sup>(AS)、碰撞时间算法<sup>[9]</sup>(TTC)以及车头时距算法<sup>[10]</sup>(THW)进行了对比分析,提出了基于TTC算法的风险评价模型。最后通过搭建Simulink/Carsim联合仿真模型,对控制策略的有效性进行验证。

作者简介:向世林(1988—),男,重庆云阳人,工程师,硕士,主要从事车辆主动安全、整车检测方面的工作。

# 1 风险评价模型和预警系统

## 1.1 建立风险评价模型

风险评价模型决定 AEB-P 系统的响应时间,这是 AEB-P 系统安全性的重要保障。本文建立了如式(1)所示的 TTC 风险评价模型。

$$t_{TTC} = \begin{cases} -\frac{\Delta s}{\Delta v}, & \Delta v < \Delta a \neq 0 \\ \frac{\Delta v}{\Delta a} - \frac{\sqrt{\Delta v^2 - 2\Delta s\Delta a}}{\Delta a}, & \Delta v < 0 \& \Delta a \neq 0 \\ -\frac{\Delta v}{\Delta a} + \frac{\sqrt{\Delta v^2 - 2\Delta s\Delta a}}{\Delta a}, & \Delta v \geq 0 \& \Delta a < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $t_{TTC}$ 表示从某一时刻开始,车辆避免与前车发生碰撞的时间; $\Delta v$ 表示车辆与目标物纵向相对速度; $\Delta a$ 表示车辆与目标物纵向相对加速度。

将 AEB-P 预警系统发出预警信号时的  $t_{TTC}$  临界值作为  $t_{TTC}$  安全阈值。该参数的选取可以基于中国 C-NCPA 发布的 AEB-P 行人避障测试标准,通过实际道路测试和虚拟仿真手段确定。 $t_{TTC}$  安全阈值随不同的车速进行变化,与表 1 中的  $t_{TTC}$  取值相对应。

## 1.2 AEB-P 预警系统

如表 1 所示, AEB-P 预警系统根据不同车速的  $t_{TTC}$  取值划分出相应的安全等级。该安全等级分为 3 级,其中 I 级表示行驶安全级,说明此时行车处于安全状态, AEB-P 预警系统输出信号值 0; II 级表示碰撞预警级,此时与行人有碰撞风险, AEB-P 系统输出信号值 1; III 级表示碰撞危险级,车辆与行人即将发生碰撞, AEB-P 系统输出信号值 2,此时驾驶员若还没有进行减速控制, AEB-P 系统立即介入进行制动。

当车辆处于 I 级安全状态, AEB-P 系统不干预驾驶员行为。当车辆处于 II 级状态, AEB-P 系统实时不断发出预警信号。驾驶员的反应时间选取为 1.25 s。制动迟滞一般在 0.2~0.3 s 之间,因此设置预警时间为 1.5 s。

表 1 不同车速时  $t_{TTC}$  取值区间和安全等级

车速/(km·h <sup>-1</sup> )	$t_{TTC}$ 取值区间/s	安全等级
20	[0~1.2]	III
	(1.2~2.7)	II
	>2.7	I
30	[0~1.2]	III
	(1.2~2.7)	II
	>2.7	I
40	[0~1.3]	III
	(1.3~2.8)	II
	>2.8	I
50	[0~1.4]	III
	(1.4~2.9)	II
	>2.9	I
60	[0~1.5]	III
	(1.5~3.0)	II
	>3.0	I

# 2 AEB-P 系统控制策略

## 2.1 AEB-P 系统工作原理

如图 1 所示,基于风险评价模型上层模糊控制器可以输出期望的减速度,下层 PID 控制器则将获取的期望减速度值以制动管路压力值的方式传递给车辆的制动系统,实现对车速度的控制。

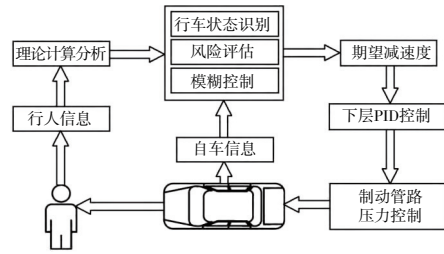


图 1 AEB-P 系统工作原理

## 2.2 AEB-P 上层模糊控制系统

本文建立的模糊控制器输入参数为车辆与行人纵向相对速度  $\Delta v_0$  ( $\Delta v_0 = 0 - v_2$ , km/h) 以及车辆与行人相对距离  $\Delta s$  (m)。模糊输入参数、输出参数的语言变量可以划分为 N10(负大)-N1(负小)、Z0(零)、P1(正小)-P7(正大)。 $\Delta s$  的论域范围为 [0, 80], 采用 Z0、P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7 这 8 个变量描述(图 2)。 $\Delta v_0$  的论域范围为 [-150, 0], 采用 Z0、N1、N2、N3、N4、N5、N6、N7、N8、N9、N10 这 11 个语言变量进行描述(图 3)。输出量期望减速度  $a_r$  (m/s<sup>2</sup>) 的论域为 [-10, 0], 采用 Z0、N1、N2、N3、N4、N5、N6、N7 这 8 个变量描述(图 4)。

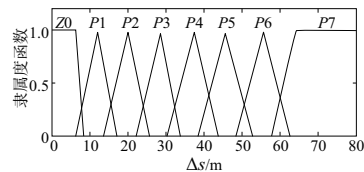


图 2 距离隶属度函数

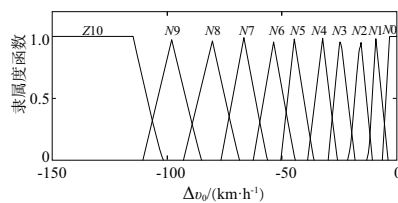


图 3 速度差隶属度函数

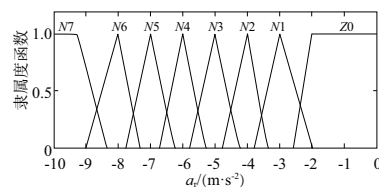


图 4 车辆期望减速度隶属度函数

在确保安全的前提下,以中国 C-NCPA 发布的 AEB-P 行人避障测试工况为标准来制动模糊规则,同时考虑驾乘人员的舒适性,部分模糊规则如表 2 所示。

表 2 部分模糊规则

$\Delta s$	$\Delta v_0$	$a_r$
Z0	Z0	N2
Z0	N10	N7
P1	N1	Z0
P1	N9	N7
P2	N2	N1
P2	N8	N6
P3	N3	N1
P3	N7	N4
P4	N4	N1
P4	N6	N2
P5	N5	N0
P5	N5	N1
P6	N6	N1
P6	N4	N0
P7	N7	N1
P7	N3	N0

### 2.3 AEB-P 下层 PID 制动控制系统

下层 PID 控制系统将期望减速度以制动管路压力信号的形式传递到车辆制动系统,实现对车辆的速度控制。期望减速度以及期望减速度与实际减速度两者之间的差值作为 PID 控制器输入参数,制动管路压力值作为 PID 控制器输出参数,以期望减速度和实际减速度的差值作为误差控制参数,得出 PID 控制器的比例参数  $k_p=5$ ,积分参数  $k_i=15$ ,微分参数  $k_d=0$ 。

## 3 AEB-P 系统仿真分析

### 3.1 C-NCAP 行人测试工况

C-NCAP 行人测试场景如图 5、图 6 所示。C-NCAP 测试规程对于 AEB 行人系统规定了 4 个测试场景:远端碰撞 CVFA-25、CVFA-50 和近端碰撞 CVNA-25、CVNA-75。CVFA 场景的行人速度为 6.5 km/h, CVNA 测试场景的行人速度为 5.0 km/h。

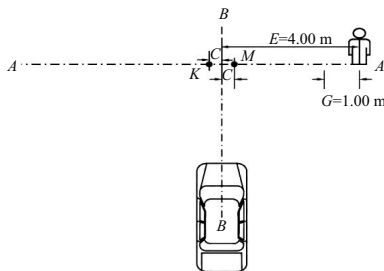


图 5 CVNA-25 和 CVNA-75 行人测试场景

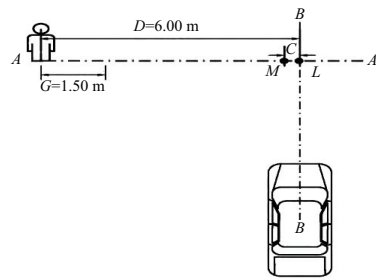


图 6 CVFA-25 和 CVFA-75 行人测试场景

在图 5 中,  $BB$  表示测试车辆的中心线,轴线  $AA$  表示假人的运动轨迹,  $C$  表示 25% 和 75% 偏置碰撞,  $M$  表示近端 25% 碰撞点,  $K$  表示近端 75% 碰撞点,  $G$  表示假人的加速位移。在图 6 中,  $C$  表示 25% 远端偏置碰撞,  $M$  表示远端 25% 碰撞点,  $L$  表示远端 50% 碰撞点。

测试工况设置 5 组,每组测试场景分为:CVFA-50、CVFA-25、CVNA-25、CVNA-75。车速范围为 20 km/h ~ 60 km/h。

### 3.2 仿真结果及分析

建立的 Simulink/Carsim 联合仿真模型如图 7 所示,其中,理论计算模块用于获取车辆以及行人的速度、位置等参数,然后据此计算出相应的  $t_{TTC}$  值。逆动力学模型可以将期望的减速度转变为制动压力信号值,实现对车辆的速度控制。

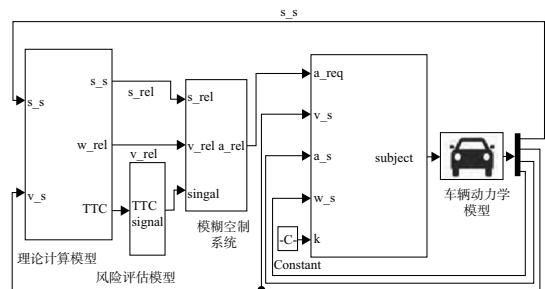


图 7 车辆仿真模型

AEB-P 的部分典型场景仿真测试结果如图 8 和图 9 所示。  $L_1$  表示车辆左边前轮的制动轮缸曲线,  $L_2$  表示车辆左边后轮的制动轮缸曲线。由于车辆两侧的制动力相同,故仅对车辆左边的制动情况进行分析。

由图 8 和图 9 的仿真结果可以看出,车辆制动后的相对车速变化平稳,车辆与行人始终没有发生碰撞现象 ( $\Delta s \neq 0$ )。预警信号发出及时准确,制动过程保持稳定,车辆的舒适性较好。

由图 8(d) 的减速度曲线可知,实际减速度  $a_2$  能够很好地跟随期望减速度  $a_1$  进行变化。车辆在安全行驶状态下,  $a=0$  表明 AEB-P 没有影响车辆的行驶状况。当车辆开始制动后,减速度较为平稳,曲线的振荡幅值小。由图 8(e) 的轮缸压力曲线可知, AEB-P 系统输出的期望减速度为  $-6 \text{ m/s}^2$ , 此时后轮首先激活 ABS 功能,轮缸压力  $L_2$  开始出现振荡起伏,然后当前轮轮缸压力  $L_1$  处于  $-10 \text{ MPa}$  时, ABS 功能也被激活。前后轮均通过 ABS 进行制动,可

以将滑移率控制在适当的范围,很好地利用了地面摩擦力,有助于车辆输出较大的减速度。

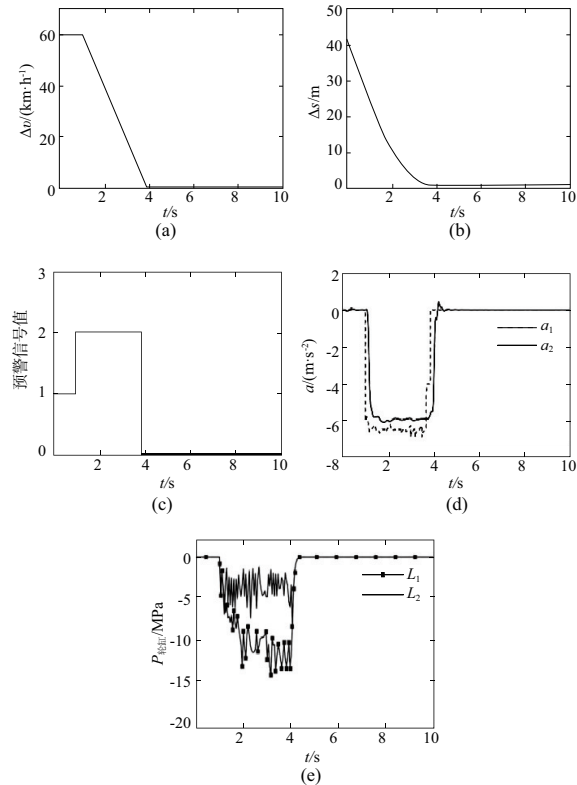


图8 CVNA-75 测试场景仿真(车辆速度为 60 km/h)

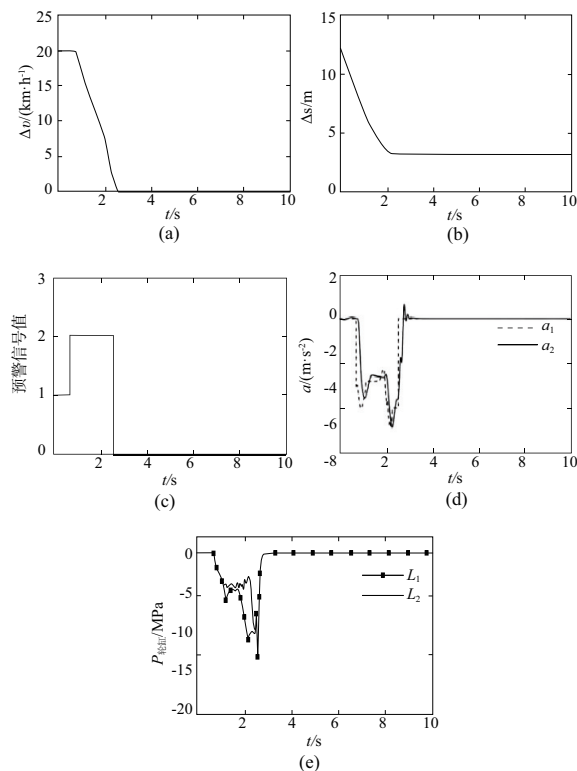


图9 CVFA-25 测试场景仿真(车辆速度为 25km/h)

由图9(d)所示的减速度曲线可以看出,通过模糊规

则的作用,实际减速度  $a_2$  能够与期望减速度  $a_1$  保持一致。本文设计的 AEB-P 系统在制动力较小时,自动进行车辆减速度的调控,提高车辆的行驶安全性。由图9(e)中的轮缸压力曲线可知,后轮先激活 ABS 功能,其轮缸压力  $L_2$  频繁起伏变化并保持在 4 MPa 左右。前轮轮缸压力  $L_1$  制动过程中没有激活 ABS 模块。

基于 C-NCAP 行人测试规程进行仿真。根据仿真结果可知,车辆发生紧急制动后,始终与行人保持在 0.9~3.1 m 之间的安全距离,可以有效消除行人因车辆紧急制动带来的紧张情绪。车辆减速度范围为  $4.8\sim 6.1\text{ m/s}^2$ ,制动强度范围为  $0.48\sim 0.61$ ,有助于车辆根据行驶情况及时调整减速度。预警时间设置在 1 s 左右,整个过程中没有发出误、漏警的情况。

## 4 结语

本文基于自动紧急制动行人避障系统(AEB-P)特性分析与辨识,将模糊控制方法和 PID 控制方法进行融合,提出了一种能够兼顾安全和实时的行人避障策略。针对 AEB-P 的响应判断需求,建立了基于 TTC 风险评价模型,可以有效提高 AEB-P 系统的安全性。通过设计相关仿真测试,验证了所提出方法的有效性,得出如下结论。

1) 基于 TTC 建立的风险评价模型可以及时有效地发出预警和制动信号,具有较高的准确性,能够提高车辆的行驶安全性。

2) 上层模糊控制和下层 PID 控制的联合分层控制策略,能够达到 C-NCAP 行人测试要求。在 CVNA-25,车速为 60 km/h 的极端危险工况下,仍然能够与行人保持至少 0.9 m 的安全距离。

3) 与传统的单一恒定减速度控制方法相比,本文提出的控制策略使车辆制动过程中输出的减速度始终平稳且振荡较小,车辆具有较好的安全性和舒适性。

### 参考文献:

- [1] 杨为,赵胡屹,舒红. 自动紧急制动系统行人避障策略及仿真验证[J]. 重庆大学学报,2019,42(2):1-10.
- [2] 李霖,朱西产,董小飞,等. 自主紧急制动系统避障策略的研究[J]. 汽车工程,2015,37(2):168-174.
- [3] 刘颖,贺锦鹏,刘卫国,等. 自动紧急制动系统行人测试场景的研究[J]. 汽车技术,2014(3):35-39.
- [4] TANG B, CHIEN S, HUANG Z, et al. Pedestrian protection using the integration of V2V and the pedestrian automatic emergency braking system[C]//2016IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems(ITSC), November 1-4, 2016, Rio de Janeiro, Brazil; IEEE, 2016; 2213-2218.
- [5] FERNANDEZ Llorca D, MILANES V, PARRA Alonso I, et al. Autonomous pedestrian collision avoidance using a fuzzy steering controller[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(2):390-401.
- [6] PARK M K, LEE S Y, KWON C K, et al. Design of pedestrian target selection with funnel map for pedestrian AEB system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016; 1-1.
- [7] SAITO Y, RAKSINCHAROENSAK P. Shared control in risk predictive braking manoeuvre for preventing collision with



- pedestrian[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1(4):314-324.
- [8] SHIMIZU T, RAKSINCHAROENSAK P. Motion planning via optimization of risk quantified by collision velocity accompanied with AEB activation[C]//2017 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), June 27-28, 2017, Vienna, Austria: IEEE, 2017:19-25.
- [9] DOI A, BUTSUEN T, NIIBE T, et al. Development of a rear-end collision avoidance system with automatic brake control[J]. JSAE Review, 1994, 15(4):335-340.
- [10] 陆建, 张文珺, 杨海飞, 等. 基于碰撞时间的追尾风险分析[J]. 交通信息与安全, 2014, 32(5):58-64, 76.

收稿日期:2020-10-14

(上接第 98 页)

## 4 结语

本文对 SiCp/2009Al 复合材料的静拉伸性能、循环力学性能进行了室温下的试验研究,分析材料的单轴拉伸曲线以及稳态循环滞回曲线,采用 Chaboche 以及 B-P 本构理论对其循环滞回响应进行了预测及对比分析,得到如下结论:

1) SiCp/2009Al 复合材料的强度较“2”系列铝合金有较大提升,但延展性下降,其静拉伸行为与基体相似在室温下加载速率 0.001~0.004/s 的范围内体现出“率无关”的特性;循环力学响应中的应力、应变对应较好,循环拉伸性能对称。

2) Chaboche 本构理论对 SiCp/2009Al 复合材料稳态滞回曲线预测结果的整体趋势与试验曲线更加一致,预测误差更小,可以更好地描述该材料循环力学行为。

3) B-P 本构理论对 SiCp/2009Al 复合材料稳态滞回曲线的预测存在明显的“偏方”现象,会对曲线整体预测结果带来较大的误差。

4) 采用遗传算法可以较好地解决本文所选用本构模型中多参数、多方程相互耦合的参数识别问题。本文所识别的模型参数可以很好地描述材料的循环力学行为,具有不错的实用效果。

5) 可以通过在两类本构理论中增加相关修正项,以降低所建立本构模型对 SiCp/2009Al 复合材料循环滞回行为的预测误差。

### 参考文献:

- [1] 田治宇. 颗粒增强金属基复合材料的研究及应用[J]. 金属材料

料与冶金工程, 2008, 36(1):3-7.

- [2] KANG G Z. A visco-plastic constitutive model for ratcheting of cyclically stable materials and its finite element implementation[J]. Mechanics of Materials, 2004, 36(4):299-312.
- [3] 秦亮, 耿小亮, 郭运强, 等. SiCp/Al 材料力学行为研究的进展[J]. 航空制造技术, 2010, 53(16):79-82.
- [4] FLEMING W J, TEMIS J M. Numerical simulation of cyclic plasticity and damage of an aluminium metal matrix composite with particulate SiC inclusions [J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(10):1079-1088.
- [5] PIERARD O, DOGHRI I. An enhanced affine formulation and the corresponding numerical algorithms for the mean-field homogenization of elasto-viscoplastic composites [J]. International Journal of Plasticity, 2006, 22(1):131-157.
- [6] 魏洪亮, 杨晓光, 于慧臣. GH4169 合金高温力学行为本构建模及参数识别[J]. 材料工程, 2005, 33(4):42-45.
- [7] 杜京. Ti2AlNb 材料高温低周疲劳力学行为与预测方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
- [8] 胡绪腾, 宋迎东. Bodner-Partom 本构模型材料参数估计新方法[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(2):196-199.
- [9] 张晶. 基于遗传算法的 Chaboche 模型参数的估计与优化[D]. 沈阳:东北大学, 2011.
- [10] 宋迎东, 高德平, 杨治国. 粉末高温合金黏塑性试验评定与本构模型参数估计[J]. 航空学报, 2002, 23(2):162-165.
- [11] 卢孔汉, 张宏建, 贾鹏超. GH4169 合金的循环本构模型研究[J]. 推进技术, 2019, 40(2):416-423.

收稿日期:2020-03-30

(上接第 100 页)

## 4 结语

本文利用钣金折弯过程中中性层长度不变的特性建立了钣金折弯数学模型,并对折弯过程进行仿真分析,仿真与计算结果的对比显示,两者表现出较好的契合性,验证了所建立的钣金折弯过程数学模型与计算结果的正确性,同时对出现的误差原因进行了分析,为钣金折弯过程机械臂末端路径规划提供了理论依据。

### 参考文献:

- [1] ZANELLA A, TONELLO S, PAGELLO E. A planning system to manipulate metal sheets within a workcell simulator[C]// IEEE International Symposium on Assembly & Manufacturing, IEEE,

2013.

- [2] 查健. 钣金折弯加工离线编程与仿真系统设计[D]. 镇江:江苏科技大学, 2019.
- [3] 张如华, 黄智松, 尹燕, 等. 板料 V 型弯曲工件端部摆动区域初步研究[J]. 锻压技术, 2016, 41(10):64-70.
- [4] 樊瑞峰, 韩涛. 钣金零件折弯展开长度的计算方法[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2013, 28(1):83-85.
- [5] HAN Z R, XU J, MENG X T. Research on algorithm of springback in sheet metal forming [J]. Advanced Materials Research, 2012, 472/473/474/475:2969-2974.
- [6] 葛辉, 秦显柱. SolidWorks 钣金折弯在生产中的应用[J]. 大众科技, 2009, 11(10):126-128.

收稿日期:2020-06-10