

文章编号: 2095-2163(2022)05-0150-05

中图分类号: TP181

文献标志码: A

基于机器学习的乘用车上坡动力学建模研究

葛阳洋, 范平清

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 本文针对无人驾驶的动力学建模和数据处理问题,从汽车上坡时的动力学分析出发,综合考虑各种参数,研究建立了乘用车上坡过程的数学模型和处理建模数据的方法。在此基础上,建立乘用车上坡过程的机器学习网络,利用BP神经网络对动力学建模数据进行训练,使得建模的误差大幅减少。仿真结果表明,动力学模型得到了优化,实现了乘用车上坡过程的智能化参数分配。

关键词: 动力学建模; 数据整编; BP神经网络; 机器学习

Modeling and research of passenger vehicles uphill dynamics based on machine learning

GE Yangyang, FAN Pingqing

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] In this paper, aiming at the dynamics modeling and data processing problems of unmanned driving, starting from the dynamics analysis of vehicle uphill process, considering various parameters, the mathematical model of passenger vehicles uphill process and the method of processing modeling data are studied and established. On this basis, the machine learning network of passenger vehicles uphill process is established, and the BP neural network is used to train the dynamics modeling data, which greatly reduces the modeling error. The simulation results show that the dynamics model is optimized and the intelligent parameter allocation is realized in the uphill process of passenger vehicles.

[Key words] dynamics modeling; data consolidation; BP neural network; machine learning

0 引言

研究可知,无人驾驶是人工智能领域的热点科技课题之一。研究初期,只有为数不多的几个发达国家在该领域展开角逐,随着中国科研基础和工业技术的发展、完善,在政府的支持下,国内的一些高科技公司和多所高校也已陆续开启了对无人驾驶的探索和讨论,并取得了可观的研究成果^[1]。虽然在路试中暴露了不少缺点,但却为此后的研究奠定了坚实的基础。

本文的研究内容方向是无人驾驶领域中的一个重要分支,通过数学建模的方法来模拟汽车上坡过程^[2],将乘用车上坡过程数字化,并通过编程导出关键数据。后续用到的BP神经网络是机器学习衍生出的一种算法,不仅具有结构简单、使用方便等特点,而且在Matlab工具箱中还有自带的BP神经网络工具,因此可以直接在Matlab上进行调用来训练建模产生的数据,优化动力学模型,实现重要参数的分配。在研究过程中提出了有关无人驾驶的新思

路,进一步开拓了智能驾驶领域的研究。

1 动力学建模

从汽车上坡过程的阻力部分入手,接着引入附着条件,然后根据发动机转矩拟合结果对驱动力部分进行处理,最后对各个部分的建模进行汇总,并不断完善和修改模型^[3],直至符合车辆动力学要求。动力学建模的流程如图1所示。

1.1 汽车行驶方程拟定

乘用车上坡过程涉及多个参数,汽车行驶方程式可写为^[4]:

$$F_t = F_{RO} + F_w + F_{st} + F_j \quad (1)$$

式中各部分有:

$$F_{RO} = f \cdot m \cdot g \cos \alpha \quad (2)$$

$$F_w = \frac{c_d \cdot A \cdot v^2}{21.15} \quad (3)$$

$$F_{st} = mg \sin \alpha \quad (4)$$

$$F_j = \delta m \frac{du}{dt} \quad (5)$$

作者简介: 葛阳洋(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:智能驾驶。

通讯作者: 范平清 Email: fanpingqing@163.com

收稿日期: 2021-09-10

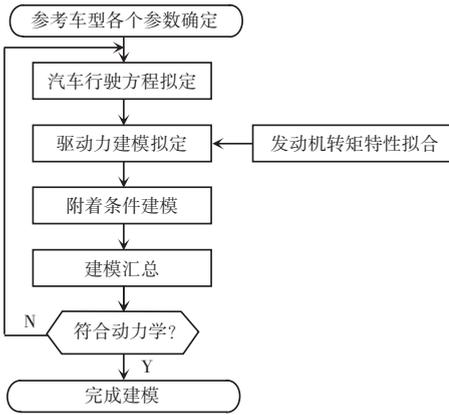


图1 动力学建模流程图

Fig. 1 Flow chart of dynamics modeling

其中, F_t 为驱动力; F_{R0} 为滚动阻力; F_w 为空气阻力; F_{st} 为坡度阻力, 即重力下滑分力; F_j 为加速阻力 ($F_t, F_{R0}, F_w, F_{st}, F_j$ 的单位均为 N); m 为整备质量, 单位为 kg; g 为当地重力加速度 (取 9.8 m/s^2); f 为滚动阻力系数; C_d 为空气阻力系数; A 为迎风面积 (选定车型计算得 $A = 2.442 \text{ m}^2$), v 为汽车行驶速度; δ 为该乘用车的旋转质量转换系数 (此车型是 1.2)。

1.2 驱动力的确定

乘用车行驶过程中对驱动轮有一摩擦力, 此摩擦力的反力 F_t 驱动乘用车行驶, 研究推得的数学公式为:

$$F_t = \frac{T_{iq} i_g i_0 \eta_T}{r} \quad (6)$$

其中, F_t 是发动机转矩通过汽车传动系后传递到驱动轮的转矩; r 为车轮半径; T_{iq} 为发动机转矩; i_g 为变速器的传动比; i_0 为主减速器的传动比; η_T 为传动系的机械效率, 该车型为 0.89; 对于该车型的发动机有厂家给定测试转矩数据, 见表 1。

表1 发动机转矩实测数据

Tab. 1 Measured data of engine torque

发动机转速 $n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	发动机转矩 $T_{iq} / (\text{N} \cdot \text{m})$
1 000	135.49
1 500	146.32
2 000	150.74
2 500	155.33
3 000	151.95
3 500	143.65
3 800	138.37
4 000	125.81

将转矩数据在 Matlab 上进行多项式拟合^[5], 由此可得发动机转矩与转速关系为:

$$T_{iq} = -1.0898 \times 10^{-15} n^5 + 1.2315 \times 10^{-15} n^4 - 5.3730 \times 10^{-8} n^3 + 1.0424 \times 10^{-4} n^2 - 0.0710n + 144.8593 \quad (7)$$

由公式 (7) 得到选定车型发动机转矩性能如图 2 所示。

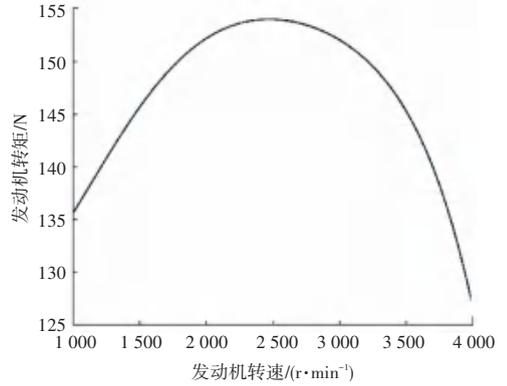


图2 选定车型发动机转矩性能拟合

Fig. 2 Fitting of engine torque performance for selected vehicle types

1.3 汽车行驶的附着条件

图 3 是乘用车上坡受力分解的简单示意。汽车行驶的附着条件^[4]是:

$$\frac{F_{X1}}{F_{Z1}} \leq \varphi \quad (8)$$

其中, F_{Z1} 是地面对 2 个前轮的法向反作用力; F_{X1} 是地面对 2 个前轮的切向反作用力; $\frac{F_{X1}}{F_{Z1}}$ 是该车 (前驱) 的附着率 $C_{\varphi 1}$, 该值可以由如下公式计算求得:

$$C_{\varphi 1} = \frac{b/L}{1/\varphi + h_g/L} \quad (9)$$

其中, i 为坡比, q 等同于 $i + (\frac{1}{\cos \alpha})(\frac{1}{g})(\frac{du}{dt})$, 这里包含了加速阻力以表示等效坡度。

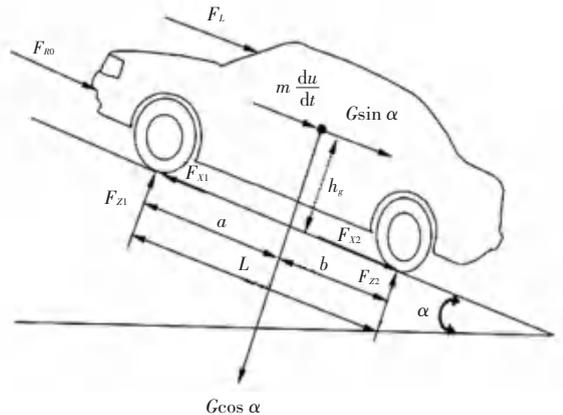


图3 乘用车上坡受力分解

Fig. 3 Decomposition of uphill forces for passenger vehicles

1.4 模型总结

该车发动机与车速的关系式为:

$$n = \frac{v}{0.377r} i_g i_0 \quad (10)$$

其中, v 为是汽车行驶速度; n 是发动机转速; r 为车轮半径, 是 0.328 4 m; 二档时, i_g 为 2.816; i_0 为 4.788。

乘用车上坡时所受空气阻力和发动机转速的关系为^[3]:

$$F_w = \frac{C_d A n^2}{2.498 \times 10^5} \quad (11)$$

将式(7)、式(11)在 Matlab 计算后得出该车发动机转速和驱动力的关系式:

$$F_t = 36.54(S_1 n^5 + S_2 n^4 + S_3 n^3 + S_4 n^2 + S_5 n + 144.8593) \quad (12)$$

其中, S_1 为 -1.0898×10^{-15} ; S_2 为 1.2315×10^{-11} ; S_3 为 -5.3730×10^{-8} ; S_4 为 1.0424×10^{-4} ; S_5 为 -0.0710 。

2 输入输出参数的处理

2.1 确定输入输出参数

影响乘用车上坡过程的因素有汽车内部因素—发动机的转速, 外部因素主要是道路的条件, 如道路的坡度、滚动阻尼等, 由此拟定以下输入变量: 坡度 α 、发动机转速 n 、路面附着系数 ϕ 、路面滚动阻尼 f 。

为衡量车辆上坡时的性能, 拟定以下输出变量: 驱动力 F_t 、车辆加速度 a (负数表示不能持续爬坡)、可通过的最大等效坡度 q 、轮胎是否打滑判定 (输出 1 表示不打滑, 输出 0 表示打滑)。

2.2 建模过程的数据导出与处理

后续编程用到的选定车型的基本参数见表 2。

表 2 基本参数

Tab. 2 Basic parameters

项目	数值
汽车整备质量 m/kg	1 535
轴距 L/m	2.908
质心高度 h_g/m	0.566
质心至前轴距离 a/m	1.385
质心至后轴距离 b/m	1.523
风阻系数 C_d	0.27
空气密度 $\rho/(\text{N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4})$	1.225 8
重力加速度 $g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.8
传动系统效率 η	0.91
迎风面积 A/m^2	2.442
旋转质量换算系数 δ	1.2

根据第一节所建立的车辆上坡过程动力学模

型, 通过 Matlab 编译出乘用车在上坡过程中产生的各个数据^[6], 编程算法代码具体如下:

```
clear all;
close all;
clc
m = 1 535; g = 9.8;
C_d = 0.27; A = 2.442; S_1 = - 1.089 8e - 15; S_2 =
1.231 5e - 11; S_3 = - 5.373 0e - 8; S_4 = 1.042 4e - 4;
S_5 = - 0.071 0; h_g = 0.512; b = 1.820; x = 1.2; L =
2.908;
index = 1;
for i = 0:100:3 000
    for j = 0:pi/60:pi/6
        for k = 0.01:0.01:0.06
            for z = 0.2:0.1:0.8
                ii(index) = i;
                jj(index) = j;
                kk(index) = k;
                zz(index) = z;
                f_1 = k * m * g * cos(j);
                f_2 = (C_d * A * i * i) / 2.498e5;
                f_3 = m * g * sin(j);
                S_11 = S_1 * (i^5); S_22 = S_2 * (i^4); S_33 =
S_3 * (i^3); S_44 = S_4 * (i^2); S_55 = S_5 * i;
                ft(index) = 36.54 * (S_11 + S_22 + S_33 + S_44 + S_55 +
144.859 3);
                a(index) = (ft(index) - (f_1 + f_2 + f_3)) / (x * m);
                q(index) = (b/L) / (1/z + hg/L);
                P(index) = q(index) - tan(j);
                if P(index) > 0
                    P(index) = 1;
                else P(index) = 0;
                end
                index = index + 1;
            end
        end
    end
end
```

将根据动力学建模运行处理后的数据保存成 Excel 表格, 用于后续的数据训练与 BP 神经网络学习^[7]。

3 BP 神经网络训练与预测

根据下面经验公式选取层数, 即:

$$n_l = \sqrt{n + m} + a \quad (13)$$

其中, n_i 是 BP 神经网络的隐含层节点数量^[8-9]; n 是神经网络输入层节点数; m 为神经网络输出层节点数; a 为 1~10 之间任意常数。计算后得出本模型的 n_i 为 10。

调用 Matlab 工具箱的 BP 神经网络对第二节导出的数据进行训练^[10], 训练流程见图 4。

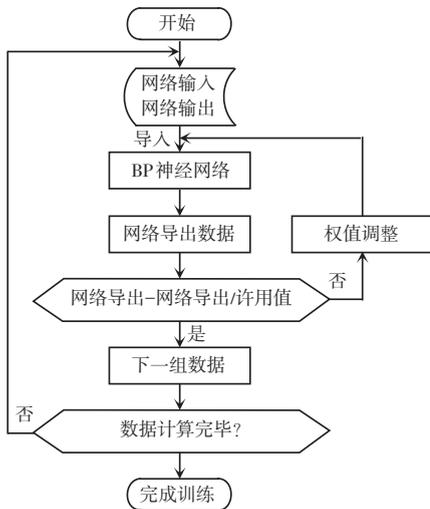


图 4 数据训练流程图

Fig. 4 Flow chart of data training

图 5 是在 Matlab 进行车辆上坡过程动力学建模中 BP 神经网络训练时的参数设置, 包括训练步长、梯度、最小误差范围^[11]等。图 6 是经过训练后形成的神经网络的 10 个隐含层的各个权值情况, 各个隐含层的权值在数据的训练中不断进行调整, 使得神经网络进一步得到优化。

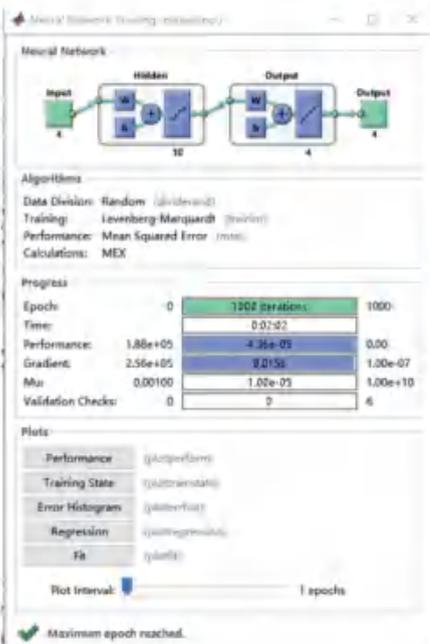


图 5 训练参数设置

Fig. 5 Setting of training parameters

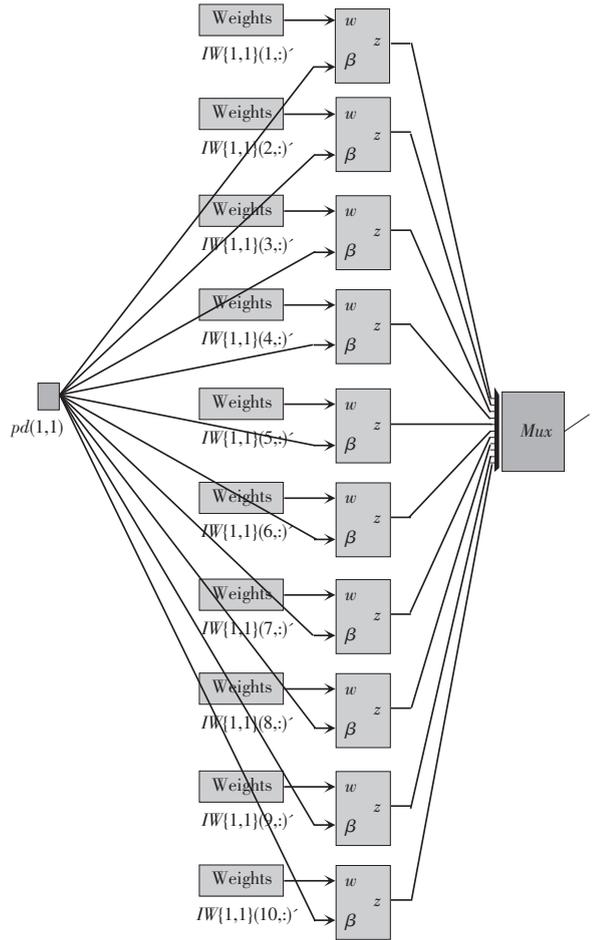


图 6 隐含层权值

Fig. 6 Weights of the hidden layer

图 7 是基于均方误差计算并绘制出来的曲线图。均方误差 (mean-square error) 的变化可以体现出模型预测情况与实际情况的差异程度^[12]。由图 7 可以看出, 随着训练的进行, 误差大体沿着越来越小的方向进行变化, 从最开始数百万的误差变成了只有百分之一级别的误差, 训练优化了动力学模型。

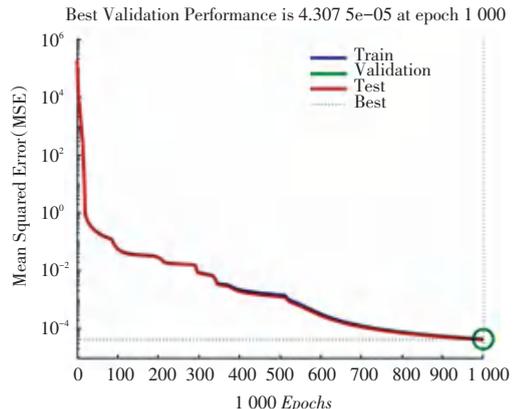


图 7 训练误差表现

Fig. 7 Performance of training errors

(下转封三)