文章编号：02-029

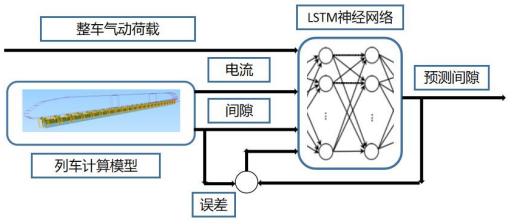
高速磁浮列车悬浮间隙仿真预测

刘梦娟[12]，吴晗[12*]，曾晓辉[12]
（1.中国科学院力学研究所 流固耦合实验室，北京 100190；2.中国科学院大学 工程科学学院，北京 100049）

1 引言

电磁悬浮（EMS）磁浮列车需施加控制实现列车的主动悬浮。传统的PID控制是基于单电磁铁在平衡点的线性方程建立控制器[1]，未考虑电磁铁间的相互作用且属于离线算法，不能满足复杂系统需求。鉴于模型预测控制（MPC）适用于较复杂的非线性系统，可以将其用于磁浮控制系统中，但想要实现MPC控制，必须保证预测结果的精准性。为了解决悬浮间隙强非线性的影响以及为MPC算法提供基础，本文提出了一种电磁铁间隙预测方法。该方法以TR08列车仿真模型实测动力响应为样本集，并通过PyCharm建立神经网络模型，证明了本文提出的电磁铁间隙算法的准确性。

2 基于LSTM神经网络的预测模型



1 基于LSTM神经网络的列车电磁铁间隙预测系统

本文提出的悬浮间隙预测系统如图1所示，共包含列车运行仿真和神经网络间隙预测2个步骤。

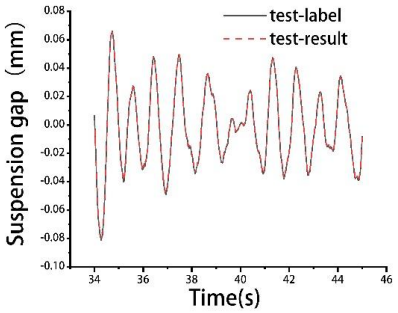
2.1 高速磁浮列车仿真模型

为了向预测模型提供数据，本文基于TR08单车物理模型建立了三编组磁浮列车多体动力学模型，并设置了PID控制器来实现列车的主动悬浮，得到了动力学和控制联合仿真的计算模型。利用此仿真模型，本文计算了气动荷载作用下列车以500 km/h在明线上运行时的动力响应，并将计算得到的数据当作样本集用于训练和测试预测算法。

2.2 神经网络模型

因为长短期记忆（LSTM）引入的门结构与记忆单元，可以解决循环随机网络中的梯度消失和爆炸问题[2]，适用于预测时间序列问题，本文采用LSTM构建神经网络模型。由图1可知，本文构建的神经网络模型的输入为：气动荷载、实测电磁铁间隙 z 和电流 I 以及预测误差 e，输出为预测间隙，输入中引入预测误差可起到校正模型的作用。

2.3 预测模型计算结果



2 预测模型计算结果

通过对仿真模型得到的数据进行深度学习训练，得到了电磁铁悬浮间隙的预测模型。计算结果显示：利用本文设计的预测算法，计算得到的间隙预测值与实际值误差很小且预测指标均符合要求。

3 结 论

本文以LSTM神经网络为核心，以仿真模型计算结果为样本集，提出了一种基于人工智能的磁浮列车电磁铁悬浮间隙预测算法，并通过与仿真模型计算结果的对比验证了该算法预测的准确性。该算法可为发展磁浮列车MPC控制算法提供基础。

参考文献（References）：

[1] 张小庆. 混合多磁铁磁浮列车悬浮系统协调预测控制研究[D]. 北京交通大学, 2021.DOI:10.26944/d.cnki.gbfju.2021.002508.

[2] 杜睿. 基于GRU改进的LSTM门控制长短期记忆网络的股票交易策略设计[D]. 上海师范大学, 2020. DOI:10.27312/d.cnki.gshsu.2020.001034.

基金项目：气动升力作用下的EMS磁浮车辆动力稳定性理论和实验研究（51805522）.

作者简介：刘梦娟(1998－)，女，河南省、平顶山市，硕士研究生，主要从事磁浮列车、悬浮控制的研究；通信方式 E-mail: liumengjuan@imech.ac.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net