

自动化学院

031 系

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物会议名称	年卷期	类别
1	朱家强 郭锁凤	博士 正高	031 031	一种在线神经网络在补偿飞机模型不确定性误差中的应用	南航学报	2003.35.01	
2	朱家强 郭锁凤	博士 正高	031 031	基于神经网络的超机动飞机自适应重构控制	航空学报	2003.24.03	
3	朱家强 郭锁凤	博士 正高	031 031	具有伪控制补偿的自适应动态逆控制系统设计与仿真	系统仿真学报	2003.15.05	
4	朱家强 郭锁凤	博士 正高	031 031	一种基于神经网络补偿动态逆误差的方法	飞行力学	2003.21.01	
5	龚华军 金贤坤 杨一栋	副高 硕士 正高	031 031 031	基于遗传算法和模糊逻辑的智能飞控技术研究	数据采集与处理	2003.18.3	
6	龚华军 金贤坤 杨一栋	副高 硕士 正高	031 031 031	中性稳定技术在综合火力/飞行控制系统中的应用	南京航空航天大学学报	2003.35.4	
7	龚华军 杨一栋	副高 正高	031 031	智能火力/飞行综合控制系统研究	东南大学学报	2003.33.6A	
8	于秀芬 段海滨 龚华军	硕士 硕士 副高	031 031 031	基于人工神经网络BP算法的倒立摆控制研究	兵工自动化	2003.22.3	
9	龚华军	副高	031	专业课教学中培养学生创造性思维能力的几点体会	南京航空航天大学学报(社会科学版)	2003.5.增刊	
10	董冠强 姚恩涛 龚华军 解金榜	硕士 副高 副高 副高	031 031 031 031	等强度梁动应变冲击试验测试仪的控制系统	河南科技大学学报	2003.24.4	
11	于秀芬 段海滨 龚华军	硕士 博士 副教	031 035 031	基于人工神经网络BP算法的倒立摆控制研究	兵工自动化	2003.22.03	
12	于秀芬 龚华军	硕士 副教	031 031	一种实时视频捕捉技术的编程实现	南京航空航天大学第五届学术会议论文集	2003年	
13	余勇 杨一栋 代世俊	博士 正高 硕士	031 031 031	着舰导引中的 H_∞ 飞行/推力综合控制系统研究	南京理工大学学报	2003.27.3	
14	杨一栋 代世俊 余勇 范彦铭	正高 硕士 博士 正高	031 031 031	抑制舰尾流扰动的着舰导引控制策略研究	海军航空工程学院学报	2003.18.01	
15	李众 杨一栋	博士 正高	031 031	基于混合维云模型定性推理的调距桨螺距控制	南京航空航天大学学报	2003.35.02	
16	王新华 杨一栋 周波	硕士 正高 正高	031 031 032	综合火力/飞行控制系统火/飞耦合器设计技术研究	南京航空航天大学学报	2003.35.02	

17	余 勇 杨一栋	博士 正高	031 031	侧向甲板运动补偿技术研究	航空学报	2003. 24. 01	
18	范玉梅 杨一栋	硕士 正高	031 031	小型无人直升机增稳动力学建模 与姿态系统优化	东南大学学报	2003, 33. sup 增刊	
19	黄 屹 杨一栋	硕士 正高	031 031	飞行仿真演示系统人机交互模块 研究方案	电光与控制	2003. 10. 02	
20	林雪原 刘建业 汪淑华	博士 正高 正高	031 031 031	双星定位/SINS组合导航系统研究	中国空间科学技术	2003. 23. 02	
21	林雪原 刘建业	博士 正高	031 031	北斗双星定位系统改进及其算法 的研究	空间科学学报	2003. 23. 02	
22	林雪原 刘建业 赵伟	博士 正高 讲师	031 031 031	一种改进的旋转矢量姿态算法	东南大学学报（自然 科学版）	2003. 33. 02	
23	林雪原 刘建业 刘红	博士 正高 硕士	031 031 031	An Improved Rotation Vector Attitude Algorithm for Laser Strap-down Inertial Navigation System.	南京航空航天大学学 报（英文版）	2003. 21. 01	
24	熊智 刘建业 林雪原	博士 正高 博士	031 031 031	高度辅助的INS/SAR组合导航系统 研究	中国空间科学技术	2003. 23. 04	
25	熊智 刘建业 林雪原 曾庆化	博士 正高 博士 博士	031 031 031 031	激光陀螺捷联惯性导航系统中惯 性器件误差补偿技术	上海交通大学学报	2003. 37. 11	
26	熊智 刘建业	博士 正高	031 031	激光捷联惯性导航中不可交换性 误差补偿算法研究	东南大学学报（自然 科学版）	2003, 33, 04	
27	孙永荣 刘建业 陈武	讲师 正高 博士	031 031 香港理 工大	机载SAR运动补偿传感器研究	中国空间科学技术	2003, 23, 05	
28	孙永荣 刘建业 陈武 胡丛玮	讲师 正高 博士 外校	031 031 香港理 工大 外校	多波束勘测中航向姿态系统研究	南京航空航天大学学 报	2003, 35, 04	
29	孙永荣 刘建业 陈武 陈永琪	讲师 正高 博士 教授	031 031 香港 理工大 外校	SAR Motion Information Sensor Based on GNSS/SINS	南京航空航天大学学 报（英文版）	2003, 21, 02	
30	匡启和 刘建业	博士 正高	031 031	基于自由软件的GPS/INS组合导航 系统设计	中国空间科学技术	2003, 4, 02	
31	林雪原 刘建业	博士 正高	031 031	双星定位系统定位误差与仿真研 究	战术导弹控制技术	2003, /, 1	

32	林雪原 刘建业	博士 正高	031 031	基于神经网络的余度敏感器结构 故障诊断方法	仪表技术与传感器	2003, /, 11	
33	林雪原 刘建业	博士 正高	031 031	双星定位系统定姿的建模与仿真 研究	海军航空工程学院学 报	2003, /, 5	
34	孙永荣 丁晓莉 陈武 刘建业	讲师 外校 博士 正高	031 外校 香港理 工大 031	GPS多天线数据采集与控制系统	数据采集与处理	2003, 18, 1	
35	赖际舟 刘建业 陈武 林雪原 熊智	博士 正高 博士 博士 博士	031 031 香港理 工大 031 031	惯性/卫星组合导航开发平台的可 视化仿真和实现	航空电子技术	2003, 34, 1	
36	张晓斌 刘建业 赵伟	硕士 正高 讲师	031 031 031	应用动画和动态图表的导航实时 监测系统的设计	航空电子技术	2003, 34, 4	
37	张晓斌 刘建业	硕士 正高	031 031	基于Windows的车载导航系统短消 息通信软件的设计	微型机与应用	2003, 22, 11	
38	柏菁 刘建业 熊智	硕士 正高 博士	031 031 031	地形辅助/惯性/GPS组合导航系统 的可视化仿真研究	中国惯性技术学报	2003, 11, 1	
39	袁朔 刘建业 孙永荣 陈武	硕士 正高 讲师 博士	031 031 031 香港理 工大	车辆导航系统DSP算法精度和显示 技术研究	交通与计算机	2003, 21, 6	
40	林雪原 刘建业	博士正 高	031 031	双星定位系统/Doppler/SINS组合 导航系统研究	导航与控制	2003, /, 3	
41	林雪原 刘建业 熊智	博士正 高 博士	031 031 031	基于双星定位系统的车辆调度监 控系统探讨	导航	2003, 39, 1	
42	林雪原 刘建业 赖际舟 李荣冰	博士正 高 博士 博士	031 031 031 031	基于RDSS辅助的多普勒/SINS组合 导航系统研究	导航	2003, 39, 4	
43	熊智 刘建业	博士正 高	031 031	基于激光陀螺的捷联惯导系统工 程实现技术研究研究	导航	2003, 39, 3	
44	熊慧 刘建业 孙永荣 陈武	硕士 正高 讲师 博士	031 031 031 香港	新型城市交通导航系统	导航	2003, 39, 1	
45	熊慧 刘建业 孙永荣 陈武	硕士 正高 讲师 博士	031 031 031 香港	蓝牙技术在车辆导航系统中的应 用研究	工业控制计算机	2003, 16, 1	

46	薛志宏 刘建业	硕士 正高	031 031	TMS320C54XX系列DSP异步串行数据传输的研究与实现	工业控制计算机	2003, 16, 6	
47	薛志宏 刘建业	硕士 正高	031 031	TMS320C54XX系列DSP与PC机间串行通信的实现	电子技术应用	2003, /, 5	
48	薛志宏 刘建业	硕士 正高	031 031	基于DSP和单片机的双CPU导航计算机设计	电子产品世界	2003, 4/下半月	
49	范胜林 袁信	副高 正高	031 031	基于整数高斯变换的整周模糊度快速求解算法	弹箭与制导学报载	2003, 23, 03	
50	范胜林 黄蓓蓓 袁信	副高 硕士 正高	031 031 031	GPS载波相位周跳检测和修复方法	信号处理	2003, 6, 19	
51	胡寿松 朱其新	正高 博士	031 031	Stochastic optimal control and analysis of stability of networked control systems with long delay	Automatica	2003, 39, 11	
52	刘亚 胡寿松	博士 教授	031 031	Robust H_∞ Control for Multiple Time-delay Uncertain Nonlinear System Based on Fuzzy Mod and Neural Network	自动化学报	2003, 29, 6	
53	胡寿松 刘亚	教授 博士	031 031	基于粗糙模型的歼击机损伤故障检测	控制理论与应用	2003, 20, 6	
54	刘亚 胡寿松	博士 教授	031 031	基于模糊模型的时滞不确定系统的模糊 H_∞ 鲁棒反馈控制	控制理论与应用	2003, 20, 4	
55	王源 胡寿松 吴庆宪	博士 教授 教授	031 031 031	一类非线性系统的自组织模糊CMAC神经网络自适应重构跟踪控制	控制理论与应用	2003, 20, 1	
56	徐德友 胡寿松	博士 教授	031 031	一种基于粗糙集的近似质量求取属性约简的决策算法	控制与决策	2003, 18, 3	
57	朱其新 胡寿松 刘亚	博士 教授 博士	031 031 031	多输入多输出网络控制系统的时延分析与建模	控制与决策	2003, 18, 增刊	
58	朱其新 胡寿松	博士 教授	031 031	网络控制系统的分析与建模	信息与控制	2003, 32, 1	
59	何亚群 胡寿松	博士 教授	031 031	军需备件需求量修正的粗糙集方法	中国管理科学	2003, 11, 5	
60	何亚群 胡寿松	博士 教授	031 031	基于粗糙集的空军航材供应点的偏好选址	系统工程理论与实践	2003, 23, 7	
61	胡寿松 王源	正高 博士	031 031	区间矩阵系统的保低本鲁棒容错控制	东南大学学报	2003, 33, 2	
62	胡寿松 张栋	正高 硕士	031 031	基于神经网络的自修复飞行控制系统故障认定	东南大学学报	2003, 33, Sup	
63	何亚群 胡寿松	博士 教授	031 031	基于模糊相容关系的粗糙集的扩展	东南大学学报	2003, 33, Sup	
64	朱押红	硕士	031	粗糙神经网络系统在歼击机结构	东南大学学报	2003, 33, sup	

	胡寿松	教授	031	故障诊断中的应用			
65	朱其新 胡寿松 侯霞	博士 教授 博士	031 031 031	长时滞网络控制系统的随机稳定性研究	东南大学学报 (自然科学版)	2003, 33, 3	
66	侯霞 胡寿松	博士 教授	031 031	基于小波神经网络的多模型故障检测	南京航空航天大学学报	2003, 35, 4	
67	徐德友 胡寿松 刘亚	博士 教授 博士	031 031 031	基于粗集理论的系统评估	南京航空航天大学学报	2003, 35, 2	
68	何亚群 胡寿松	博士 教授	031 031	粗糙集中连续属性离散化的一种新方法	南京航空航天大学学报	2003, 35, 2	
69	潘晓宁 胡寿松	博士 教授	031 031	基于神经网络非线性时滞系统的鲁棒可靠控制器设计	南京航空航天大学学报	2003, 35, 2	
70	朱其新 胡寿松	博士 教授	031 031	网络控制系统的随机状态反馈控制	南京航空航天大学学报	2003, 35, 6	
71	胡寿松 徐德友 刘亚	教授 博士 博士	031 031 031	动态系统故障诊断方法的评估	华北电力大学学报	2003, 30, 6	
72	胡寿松 刘亚	教授 博士	031 031	复杂工程系统的可靠控制	华北电力大学学报	2003, 30, 2	
73	胡寿松 刘亚	教授 博士	031 031	复杂工程系统的可靠控制(续)	华北电力大学学报	2003, 30, 3	
74	李医民 胡寿松 孙建安	博士 教授 博士	031 031 031	一类M/G/1排队系统的最优控制	江苏大学学报	2003, 24, 5	
75	张栋 胡寿松	硕士 教授	031 031	基于神经网络的故障飞机仿真	计算机仿真	2003, 20, 6,	
76	曹邦武 姜长生	博士 正高	031 031	非线性飞控系统的滑模PI混合模糊逻辑控制	南航学报	2003, 35, 1	
77	姜长生 陈谋	正高 博士	031 031	Adaptive H^∞ Control of Nonlinear Systems with Neural Networks	Chinese Journal of Aeronautics	2003, 16, 1	
78	陈谋 姜长生	博士 正高	031 031	基于RBF神经网络的一类不确定非线性系统自适应 H^∞ 控制	控制理论与应用	2003, 20, 1	
79	陈谋 姜长生	博士 正高	031 031	一类不确定非线性时滞关联大系统的分散鲁棒稳定控制器设计	数据采集与处理	2003, 18, 1	
80	曹邦武 姜长生	博士 正高	031 031	一类不确定非线性系统的滑模PI混合模糊控制	宇航学报	2003, 24, 1	
81	高键 姜长生	博士 正高	031 031	调桨距的舰船航速智能控制技术	南航学报	2003, 35, 2	
82	朱荣刚 姜长生	博士 正高	031 031	超机动飞行的神经网络动态逆控制	南航学报	2003, 35, 2	
83	黎明 姜长生	博士 正高	031 031	现代空战单机多目标攻击火控计算与决策实现	南航学报	2003, 35, 2	
84	张锐 姜长生	博士 正高	031 031	基于神经网络的非线性自适应输出反馈控制	南航学报	2003, 35, 2	
85	朱永红	博士	031	不确定串联非线性系统具有L2增	南航学报	2003, 35, 2	

	姜长生	正高	031	益的鲁棒自适应控制			
86	陈谋 姜长生	博士 正高	031 031	一类不确定非线性系统的鲁棒稳定控制器的设计	南理工学报	2003, 27, 2	
87	陈谋 姜长生	博士 正高	031 031	基于小波神经网络的自适应飞/推控制系统设计	航空动力学报	2003, 18, 3	
88	武国庆 姜长生	博士 正高	031 031	武装直升机旋翼下洗流对空空导弹发射的影响	南航学报	2003, 35, 3	
89	朱永红 姜长生	博士 正高	031 031	Robust Control of A Class of Nonlinear System with Time-Varying Parametric Uncertainties	Transaction of Nanjing University of Aero&Astro	2003, 20, 1	
90	陈谋 姜长生	博士 正高	031 031	不确定非线性系统控制方法概述	自动化仪表	2003, 18, 4	
91	陈谋 姜长生	博士 正高	031 031	一类不确定非线性系统的鲁棒自适应L2增益控制	南航学报	2003, 18, 4	
92	张冰 姜长生	博士 正高	031 031	基于ANFIS的蒸气发生器水位实时控制系统设计	南航学报	2003, 35, 4	
93	朱永红 姜长生	博士 正高	031 031	Robust Adaptive Dynamic Surface Control for Nonlinear Uncertain System	Journal of Southeast University	2003, 19, 2	
94	张锐 姜长生	博士 正高	031 031	基于DSP的神经网络实时仿真系统设计	小型微型计算机系统	2003, 24, 8	
95	朱永红 姜长生	博士 正高	031 031	一类非线性不确定系统的鲁棒自适应控制	数据采集与处理	2003, 18, 3	
96	陈谋 姜长生	博士 正高	031 031	一类串级不确定非线性系统的最优滑模控制器的设计	系统工程理论与实践	2003, 23, 11	
97	陈谋 姜长生	博士 正高	031 031	一类不确定非线性大系统的分散鲁棒控制器的设计	数据采集与处理	2003, 18, 4	
98	樊春霞 姜长生	博士 正高	031 031	Backstepping-Based Adaptive Control and Synchronization of Chaotic systems	Transaction of Nanjing University of Aero&Astro	2003, 20, 2	
99	杨敏 沈春林	博士 教授	031 031	基于单平面模板的摄像机定标研究	数据采集与处理	2003, 18, 1	
100	杨敏 沈春林	博士 教授	031 031	基于场景几何约束未标定两视图的三维建模重建	中国图象图形学报	2003, 8., 8	
101	唐超颖 吴文海 沈春林	硕士 博士 教授	031 031 031	航天飞行器制导方法综述	飞机设计	2003, /, 2	
102	唐超颖 沈春林 李丽荣	硕士 教授 讲师	031 031 031	航天器姿态滑模变结构姿态研究	南京航空航天大学学报	2003, 35, 4	
103	唐超颖 沈春林	硕士 教授	031 031	逆系统方法在航天器姿态控制系统中的应用	航天控制	2003, 21, 81	
104	唐超颖	硕士	031	基于无数的航天器解耦模糊变结	上海航天	2003, 20, 1	

	沈春林	教授	031	构控制			
105	姜太平 沈春林 谭皓.	博士 教授	031 031	真三维立体显示技术	中国图象图形学报	2003, 8., 4	
106	雷亚平 沈春林	硕士 教授	031 031	嵌入式系统的组成、设计与调试	航空计算技术	2003, 33, 3	
107	姜太平 沈春林	博士 教授	031 031	基于学习控制系统的三维物体识别技术	计算机应用研究	2003, 20, 增刊	
108	杨小凡 吴文海 沈春林	硕士 博士 教授	031 031 031	战机多目标攻击排序算法研究	飞机设计	2003, /, 4	
109	孙建 沈春林	硕士 教授	031 031	伊拉克战争中的高效航空武器 精确制导航弹	江苏航空	2003, /, 3	
110	唐超颖. 沈春林.	硕士 教授		非线性不确定系统的变结构控制	兵工自动化	2003, /, 3	
111	宗明山 蒋支运 吴文海	硕士 博士 教授	031 031 031	无人直升机飞行控制系统设计	飞机设计	2003, /, 3	
112	宗明山 陆宇平 吴文海	硕士 教授 博士	031 031 031	综合飞行/推进 (IFPC) 系统设计与仿真	航空计算技术	2003, 33, 增刊	
113	吴文海 程文俊 沈春林	博士 硕士 教授	031 031 031	考虑约束对策最优开环对策的必要条件	飞机设计	2003, /, 3	
114	薛冰 陆宇平	硕士 教授	031 031	TERCOM系统移植到飞行器上的一种方法	航空计算技术	2003, 33, 增刊	
115	杨忠 左洪福 沈春林	博士后 教授 教授	031 071 031	ReaLization of Object-Oriented Rule -Type Expert System Template	南航学报英文版	2003, 20, 2	
116	王彪 沈春林	博士 教授	031 031	Dense Disparity Map Estimation Using Genetic Algorithms	南航学报英文版	2003, 20, 2	
117	陈岩 刘春生	硕士 副教授	031 031	计算机控制的位置伺服系统设计	计算机仿真	2003, 20, 12	
118	刘美霞 刘春生	硕士 副教授	031 031	温度控制中新fuzzy控制器研究	计算机仿真	2003, 20, 11	
119	刘春生	副教授	031	汽车用PTFE油封唇口温升特性的模型辨识	机械科学与技术	2003, 22, 7	
120	王瑛 蔡勋 王晶	工程师 助工 工程师	031 031 031	自动控制原理虚拟实验平台的设计与应用	实验技术与管理	2003, 20, 4	
121	丁勇 刘守生	中级 副高	031 031	一种广义小波神经网络的结构及其优化方法	控制理论与应用	2003, 20, 1	
122	王晶 周波	中级 正高	031 034	南京新街口商圈建设工作会议	政协白下委员会	2003, /, 12	
123	王晶	中级	031	新型工业化条件下的江苏“生态工	江苏省科学与科技管	2003, /, 11	

				业”建设对策研究	理研究会年会		
124	赵洁 王从庆 王雪峰	硕士 副教授 硕士	031 031 031	基于神经网络—遗传算法的双轴 运动系统PID控制	自动化技术与应用	2003, 22, 7	
125	沈伯秀 秦海鸿 龚春英	助教 博士 副教授	030 032 032	准访波整流在电压调整模块 (VRM) 中的应用	电源技术应用	2003, 6, 3	

一种在线神经网络在补偿飞机模型不确定性误差中的应用

朱家强, 郭锁凤

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

摘要:讨论了一种基于神经网络动态逆的直接自适应控制方法,并应用于超机动飞机的飞行控制中。基本控制律采用非线性动态逆方法进行设计,对由于模型不准确导致的逆误差采用单隐层神经网络进行在线补偿。仿真结果表明,神经网络通过补偿由于模型不准确引起的逆误差,弥补了非线性动态逆要求精确数学模型的缺点,提高了整个控制系统的鲁棒性,而且可以大大简化动态逆控制律的设计。

关键词:自适应控制;动态逆;神经网络;飞行控制;超机动

中图分类号:V249

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2003)01-0086-05

Application of Online Neural Network for Compensating Uncertain Error of Aircraft Model

Zhu Jiaqiang, Guo Suofeng

(College of Automation Engineering,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: An adaptive controller with a neural network compensator is designed and applied in the control of a super-maneuvering aircraft. The base control law is designed by nonlinear dynamic inversion method, and single hidden layer (SHL) neural networks are used to compensate the inversion error induced by the inaccuracy of the system model. Simulation results show that the limitation of the accurate mathematical model used in dynamic inversion method can be released through adaptively canceling inversion error in neural networks and the robustness of the control system is improved. Besides, the design of dynamic inversion control law can be simplified by the online neural networks.

Key words: adaptive control; dynamic inversion; neural network; flight control; super maneuver

引言

超机动飞行是现代近距空战的特点之一,也是新一代战斗机的典型特征,它的操纵及机动不能光靠气动舵面,还要靠发动机推力及推力矢量的控制。飞机在进行超机动飞行时,气动力和力矩均进入非线性范围,3个轴的惯性动力学耦合严重,运动方程已完全是6自由度的非线性方程,无法再用传统的小扰动方法进行线性化处理、纵侧向分开及解耦处理,必须采用非线性控制。

在以往的超机动飞行控制中,对利用动态逆来进行控制的算法已经有比较完善的研究^[1,2]。但是,动态逆控制律的成功应用要求控制方程必须已知并且被精确建模,飞机状态必须是可精确测量的或可被估值的,这些因素在很大程度上限制了非线性动态逆的应用。

近年来的研究表明,多层感知器神经网络自适应参数是非线性的,具有以理想精度逼近平滑非线性函数的能力^[3,4],因而可以用于动态补偿逆误差。本文在非线性动态逆控制的基础上考虑模型的不确定性,引入一种在线神经网络动态补偿逆误差,

收稿日期:2002-04-08;修订日期:2002-05-20

作者简介:朱家强,男,博士研究生,1974年9月生;郭锁凤,男,教授,博士生导师,1929年生。

以保证控制系统的鲁棒性和跟踪误差的渐进收敛性。

1 超机动飞行控制系统的设计

1.1 控制律设计及跟踪误差动态特性

本文研究的控制对象为某型超机动飞机,三角翼/鸭翼/单垂尾/单发动机结构,并带推力矢量。飞机控制量有6个,分别为副翼偏转角 δ_a 、鸭翼偏转角 δ_c 、方向舵偏转角 δ_r 、侧向推力矢量角 δ_y 、法向推力矢量角 δ_z 和发动机推力 T 。这几个舵面在允许的偏角范围内加权组合联动,可实现期望的机动飞行^[1]。

由于飞机各状态变量的变化在时间上具有明显的差异,故可利用奇异摄动理论将状态变量分为快慢不同的几个层次: $x_0=(x,y,z)^T$ 为极慢状态, $x_1=(V,\chi,\gamma)^T$ 为非常慢状态, $x_2=(\alpha,\beta,\mu)^T$ 为慢状态, $x_3=(p,q,r)^T$ 为快状态。其运动方程可简写成

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= f_0, \dot{x}_1 = f_1 \\ \dot{x}_2 &= f_2 + g_2 u \approx f_{21} + g_{21} x_3, \dot{x}_3 = f_3 + g_3 u \end{aligned} \quad (1)$$

其中: f_i 和 g_i 是 (x_1, x_2, x_3, T) 的函数, $i=0\sim 3$ 。控制输入有两种:舵向量 u 和推力 T 。飞行员希望直接控制 x_2 。 $g_2 u$ 是弱小项,一般忽略它,否则直接通过动态逆方法用 u 控制 x_2 将导致 x_2 的闭环系统内部不稳定。这样 x_3 就成为 x_2 主要的控制输入。由于 x_3 比 x_2 , x_2 比 x_1 , x_0 , T 均快5倍,工程上可用奇异摄动法和动态逆方法来构造 x_3 比 x_2 的控制律,这样, x_3 和 x_2 可形成内外两个回路。飞行控制系统包括 (p, q, r) 和 (α, β, μ) 两回路,这两个回路的控制律采用动态逆方法进行设计。动态逆控制律的详细设计方法见文[1],本文不再详述。

由于飞机建模误差、时标分离和不确定性因素的影响,将导致动态逆误差,表示为

$$\dot{x} = v + \Delta'(x, \dot{x}, u) \quad (2)$$

其中

$$\Delta'(x, \dot{x}, u) = f(x, \dot{x}, u) - \hat{f}(x, \dot{x}, u) \quad (3)$$

表示各种因素造成的逆误差。动态逆误差实质是由于求逆不精确所引起的状态误差。

本文在动态逆控制律的基础上,引入在线神经网络对动态逆误差进行补偿^[5],如图1所示。控制结构为

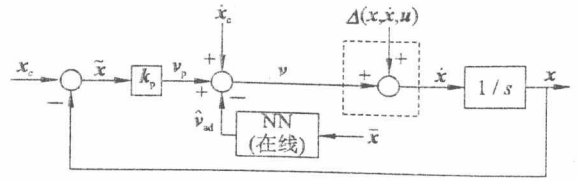


图1 基于神经网络的自适应控制结构

$$v = v_p + \dot{x}_c - \hat{v}_{ad} \quad (4)$$

其中, $v_p = k_p(x_c - x)$ 为比例控制项; $\hat{v}_{ad}$ 为自适应项,用以补偿逆误差。

若令

$$e = \tilde{x} = x_c - x, \dot{e} = \dot{x}_c - \dot{x} \quad (5)$$

将式(4,5)代入式(2),经整理可以得到

$$\dot{e} = -k_p \cdot e + (\hat{v}_{ad} - \Delta') \quad (6)$$

由式(6)可知,如果自适应项能够完全重构逆误差,则系统误差将渐进趋向于零。

1.2 神经网络的构造

本文将采用Lewis提出的单隐层神经网络^[6]来重构逆误差。神经网络的结构如图2所示,其输入输出关系可以写成

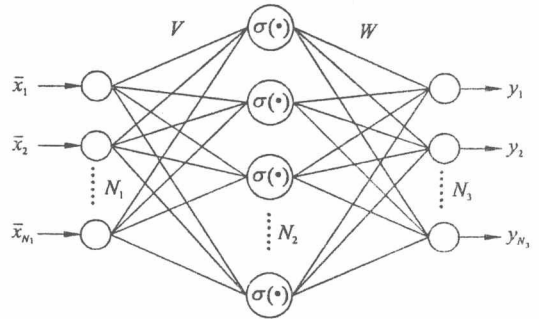


图2 单隐层神经网络结构

$$y_i = \sum_{j=1}^{N_2} [w_{ij} \cdot \sigma(\sum_{k=1}^{N_1} v_{jk} \cdot \bar{x}_k + \theta_{v_j}) + \theta_{w_i}] \quad (7)$$

其中, $i=1, \dots, N_3$, $\sigma(\cdot)$ 表示隐含层激励函数; v_{jk} 表示输入层到隐含层之间的连接权值; w_{ij} 表示隐含层到输出层之间的连接权值; θ_{v_j} , θ_{w_i} 表示阈值, N_1, N_2, N_3 分别表示输入层、隐含层和输出层神经元的个数。

隐含层神经元激励函数选择如下S型函数

$$\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-az}} \quad (8)$$

其中, $z \in R$, a 称为激励系数。

定义 $\bar{x} = [1, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_{N_1}]^T$, $y = [y_1, \dots, y_{N_3}]^T$, $\sigma(z) = [1, \sigma(z_1), \dots, \sigma(z_{N_2})]$;并且将阈值包含在

权重矩阵中,即

$$W^T = [\theta_{wi} | w_{ij}], V^T = [\theta_{vj} | v_{ij}] \quad (9)$$

这样单隐层神经网络映射可写成如下矩阵形式

$$y = W^T \sigma(V^T \bar{x}) \quad (10)$$

由单隐层神经网络结构和单隐层神经网络全局近似定理^[3]可知,对于连续的不确定性非线性逆误差函数 Δ' 及任意给定的逆误差重构误差 $\varepsilon_N > 0$, 存在有限个隐层神经元数 N_2 和权重矩阵 W, V 使得

$$\Delta' = W^T \sigma(V^T \bar{x}) + \varepsilon, \|\varepsilon\| \leq \varepsilon_N \quad (11)$$

其中, $\bar{x}$ 为神经网络的输入,稍后给出定义。 W, V 可以认为是神经网络重构逆误差时的理想权值。若令式(6)中自适应项为

$$\hat{v}_{ad} = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T \bar{x}) + v_r \quad (12)$$

其中, v_r 为鲁棒自适应项,稍后给出定义。则系统误差动态可以改写为

$$\dot{e} = -k_p \cdot e + (\hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T \bar{x}) - W^T \sigma(V^T \bar{x})) - v_r - \varepsilon \quad (13)$$

神经网络不需要进行离线训练,网络的权值调整规则根据李雅普诺夫稳定性定理得到,可以保证跟踪误差的渐进稳定性。作者希望通过权值(包括神经元阈值)的在线实时更新来保证网络的逼近性能,这样神经网络就会表现出在线实时控制的特性。

下面说明神经网络权重调整规则。

首先定义 $Z = \begin{bmatrix} V & 0 \\ 0 & W \end{bmatrix}$ 和 $\hat{\sigma}_z(\hat{z}) = \frac{d\sigma(z)}{dz} \Big|_{z=\hat{z}}$, $\hat{\sigma} = \sigma(\hat{V}^T \bar{x})$ 。并引入以下假设:

(1) 所有指令信号有界;

(2) 神经网络权重矩阵范数有界,即: $\|Z\| \leq \bar{Z}$;

得到如下结果:

定理 1 对于式(2)描述的反馈可线性化系统,设计出如图 1 所示的神经网络自适应控制器,控制结构的解析表达式为式(4),并且满足上述假设。如果其中自适应补偿项分别取为

$$\begin{aligned} \hat{v}_{ad} &= \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T \bar{x}) + v_r \\ v_r &= -K_{r0}e - K_{r1}(\|\hat{Z}\| + \bar{Z})e \\ \dot{\hat{W}} &= -\{(\hat{\sigma} - \hat{\sigma}_z^T \hat{V}^T \bar{x})e + \lambda \|e\| \hat{W}\} \Gamma_W \\ \dot{\hat{V}} &= -\{\bar{x}e \hat{W}^T \hat{\sigma}_z^T + \lambda \|e\| \hat{V}\} \Gamma_V \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $K_{r0} > 0, K_{r1} > 0, \Gamma_W > 0, \Gamma_V > 0$, 则闭环系统所有信号保持有界。

定理 1 可以通过选取适当的李亚普诺夫函数,

利用李亚普诺夫定理进行证明,详细证明过程可以参考文[6]。

神经网络具有通过自适应学习(调节网络权重),可以消除很大范围内的逆误差,从而使动态逆对飞机数学模型精确性的要求大为降低。因此,求取动态逆控制律时,不需要依据系统精确的数学模型,可以对飞机运动方程进行简化。例如:以飞机在某个飞行条件下,甚至线性化以后的数学模型,作为整个飞行过程求逆计算的依据,以简化动态逆控制律的求取。由此带来的逆误差可以由神经网络进行补偿。

神经网络的引入,可以在很大程度上减小动态逆控制律的计算量。从总体上来说,虽然控制器结构变得复杂,但是计算量增加不多甚至可能减少。另外,神经网络权重调整速率(学习速率)可以通过学习算法中选择适当的增益矩阵进行调整,网络输出能够很快地逼近逆误差。因此,整个控制系统的实时性是可以得到保证的。

对于前面基于时标分离的动态逆飞行控制系统,可以在慢回路中设计 3 个神经网络分别对 α, β, μ 三个姿态角的动态逆误差进行补偿。选择在慢回路中进行补偿,是因为慢回路动态逆采用近似逆设计,而且慢回路是飞行控制系统的外回路,内回路产生的逆误差也会反映到外回路中。因此,在慢回路进行补偿,能够比较充分地消除逆误差。

以迎角 α 为例,如图 3 所示。 α_c 为指令信号,经过指令滤波器输出理想的响应信号 α_f 及其微分信号 $\dot{\alpha}_f$; 线性补偿器取一阶比例控制,比例系数 k_a 。伪控制信号 v_a 由线性补偿器输出信号 v_{pa} 、指令滤波器输出的微分信号 $\dot{\alpha}_f$ 和神经网络输出的自适应信号 $\hat{v}_{ada}$ 三部分组成。神经网络的输入信号选为 $\bar{x} = [\bar{\alpha}, \alpha_f, \dot{\alpha}_f, \hat{v}_{ada}, \|Z\|_e]^T$ 。网络的输入层、隐含层和输出层神经元数目分别为 5, 10 和 1。另外,为了把隐含层和输出层神经元的阈值包括在权重矩阵中,在输入层和隐含层分别增加一个输出信号为 1 的神经元,该神经元与下一层各神经元的连接权重(即为下层神经元阈值)也实时调整。

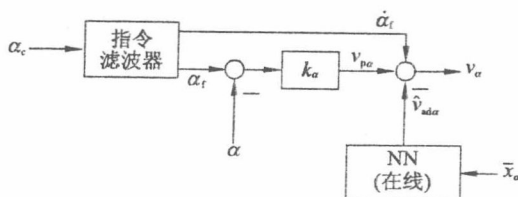


图3 迎角自适应控制结构

对于 β 角和 μ 角的自适应神经网络设计与 α 角相同,分别合成 v_β, v_μ 信号。3个姿态角的伪控制信号 v_α, v_β, v_μ 作为输入信号,经过慢回路动态逆控制器生成快回路指令信号 p_c, q_c, r_c 。

2 仿真结果及分析

仿真指令是让飞机完成一个大迎角机动动作:初始迎角指令为0;4 s迎角指令 $\alpha_c=1$ rad,维持6 s;10 s迎角指令 $\alpha_c=-1.2$ rad,维持6 s;16 s迎角指令恢复为0。在此期间,侧滑角 β 和航迹滚转角 μ 指令输入保持为0。飞机飞行的初始条件为 $v=100$ m/s, $H=1\ 000$ m, $\alpha_0=4^\circ$, 发动机推力 $T=125\ 000$ N。

采用动态逆控制律(无神经网络补偿)的控制效果如图4所示。图4(a,b)为迎角响应曲线,实线为经过滤波的指令信号,点划线为迎角状态响应。图4(a)求解控制律时,取飞机六自由度非线性运动方程,气动参数实时更新。图4(b)求逆时,将飞机运动方程气动参数固定(取迎角为 4° 时的值),并且忽略运动方程中重力、发动机推力等项,简化动态逆控制律的求解。图4(c,d)分别为两种情况下所产生的逆误差。

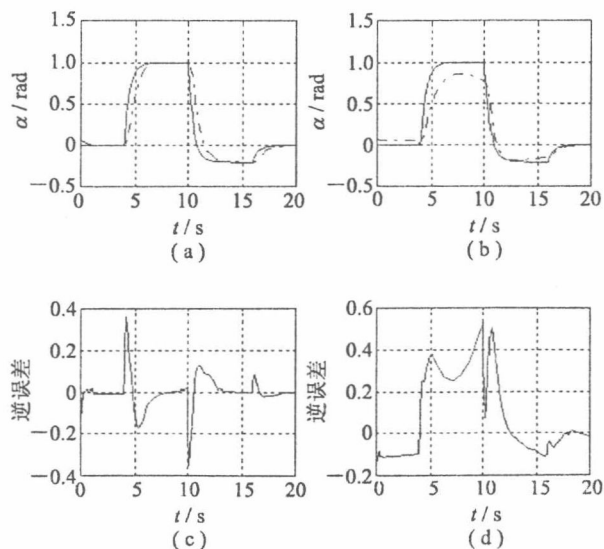


图4 动态逆控制效果

飞机运动方程中的气动参数是状态量的非线性函数,建模误差很大程度上是由于气动参数误差造成的。在求逆过程中对飞机运动方程的简化,实际上是增加了建模误差。对比图4(a)和图4(b)可以看出,由于增加了建模误差,动态逆控制效果明显恶化。由图4(b)可见,将运动方程简化后,飞机

迎角状态不能有效跟踪指令信号。对比图4(c,d)可以看出,由于建模误差的增加,导致系统的逆误差明显增大。可见,动态逆控制方法对建模误差是很敏感的。

采用简化的动态逆控制律,按照图1方案加入神经网络补偿后,效果如图5所示。图5(a)为迎角响应,可以看出,采取神经网络补偿后,飞机迎角状态可以准确地跟踪指令输入,控制效果甚至比未简化的动态逆控制效果还要好。这是因为神经网络通过在线学习重构逆误差,从而有效地对逆误差进行了补偿。图5(b)为神经网络补偿后的逆误差,除指令变化的很短时间外,逆误差基本保持为0。图5(c)为神经网络重构逆误差的效果,实线为逆误差,点划线为神经网络输出,二者基本是重合的,说明神经网络可以精确地逼近逆误差。图5(d)为神经网络权重矩阵,可以看出,整个调节过程中,神经网络权值是有界的。神经网络主要起到补偿逆误差的作用,当飞机状态达到要求的指令后,神经网络输出将恢复为0。

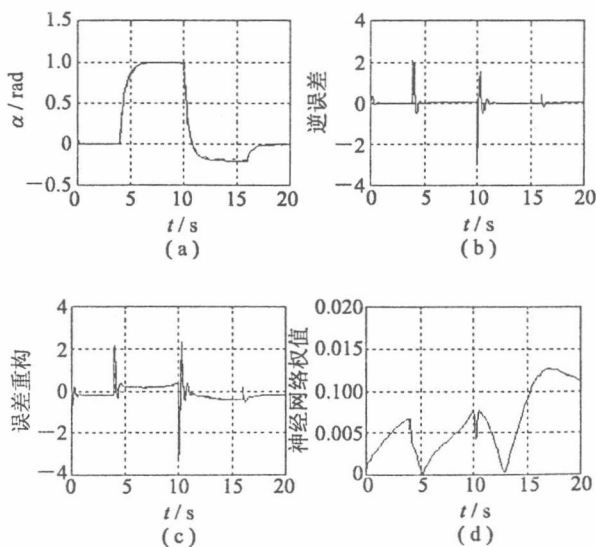


图5 神经网络补偿效果

3 结束语

基于非线性动态逆的神经网络自适应控制结构,理论上可以证明其跟踪误差的渐进收敛性,仿真结果也表明其良好的指令跟踪性能。神经网络通过补偿由于模型不准确引起的逆误差,弥补了非线性动态逆要求精确数学模型的缺点,而且可以大大简化动态逆控制律的设计,提高整个控制系统的效果。

参 考 文 献

- [1] 朱 恩. 大迎角超机动飞行控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1995
- [2] Snell S A, Enns D F, William L G. Nonlinear inversion flight control for a supermaneuverable aircraft [R]. AIAA Paper. AIAA-90-3406-CP, 1990
- [3] Hornik K, Stinchcombe M, White H. Multilayer feed-forward networks are universal approximators [J]. Neural Networks, 1989, 2(5):359~366
- [4] Funahashi K. On the approximate realization of continuous mappings by neural networks [J]. Neural Networks, 1989, 2(3):183~192
- [5] Kim B, Calise A. Nonlinear flight control using neural networks [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1997, 20(1):26~33
- [6] Lewis F L, Yesildirek A, Liu K. Multilayer neural-net robot controller with guaranteed tracking performance [J]. IEEE Trans Neural Networks, 1996, 7(2):388~399

文章编号:1000-6893(2003)03-0246-05

基于神经网络的超机动飞机自适应重构控制

朱家强, 郭锁凤

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

Neural-Net Based Adaptive Reconfigurable Control for a Super-Maneuverable Aircraft

ZHU Jia-qiang, GUO Suo-feng

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘要: 讨论了一种基于神经网络的超机动飞机直接自适应重构控制方法。飞机的基本控制律采用非线性动态逆方法设计,对于模型不准确和舵面故障等因素导致的逆误差采用神经网络进行在线补偿。通过仿真表明,在飞机发生舵面故障时,神经网络通过自适应地补偿逆误差,可以快速在线重构控制律,保持飞机稳定和一定的操纵品质。

关键词: 神经网络; 超机动; 飞行控制; 动态逆; 自适应控制

中图分类号: V249 **文献标识码:** A

Abstract: This paper describes a neural network based direct adaptive control approach to the problem of reconfigurable flight control of a super-maneuvering aircraft. The base control law is designed in nonlinear dynamic inversion, and neural networks are used to cancel the inversion error induced by many reasons, especially by actuator failures. Simulation of two types of actuator failures show that through adaptively canceling the inversion error, neural networks can reconfigure the control instantly when there should be actuator failures. The system will keep steady and maintain certain handling qualities.

Key words: neural network; super-maneuver; flight control; dynamic inversion; adaptive control

新一代战斗机在超机动飞行时,高度、速度和姿态变化剧烈,需要多操纵面相互配合。如果飞机执行任务时受到战斗损伤或发生部件故障,会使得飞行品质急剧下降甚至坠机。如何利用飞机多操作面的功能冗余,增加结构故障适应性,使出现结构损伤的歼击机仍可安全飞行并保持一定的操纵品质,成为目前日益被重视并迫切需要解决的技术难题。研究表明,自适应神经网络通过权值的在线调整,具有以理想精度逼近平滑非线性函数的能力^[1,2],很适合对模型误差进行自适应补偿。Lewis^[3]首次将多层感知器神经网络应用于机器人手臂的运动控制中,并且提出一种新颖的权值调整算法。Calise^[4,5]领导的研究小组将神经网络引入飞行控制,提出基于神经网络的自适应跟踪控制结构。McFarland 分别采用 RBF 结构^[6]和 SHL 结构^[7]神经网络设计了敏捷导弹的自适应控制器。美国近年开展的 RESTORE 计划研究了利用神经网络等为新一代战斗机提供自适应重构控制方案^[8,9],并且通过无垂尾飞机的试飞验证了控制方案的有效性^[10,11]。

本文研究了超机动飞机的自适应重构控制问题,在动态逆控制的基础上,引入自适应神经网络对飞机舵面故障等因素导致的逆误差进行动态补偿,使飞机在出现舵面故障时能够在线重构控制律,保持稳定并维持一定的操纵品质。

1 基于神经网络的自适应控制结构

1.1 动态逆实现反馈线性化

考虑如下二阶系统

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}, \delta) \quad (1)$$

其中: x 为状态量; δ 为控制量; $x, \dot{x} \in \mathbb{R}^n$, $\delta \in \mathbb{R}^m$, $m \geq n$ 。

为了实现反馈线性化,引入伪控制量 v ,使得伪控制量和状态量之间成为线性关系

$$\ddot{x} = v \quad (2)$$

其中:

$$v = f(x, \dot{x}, \delta) \quad (3)$$

伪控制量 v 代表系统状态量期望的动态响应。控制量通过对系统方程求逆得到

$$\delta = \hat{f}^{-1}(x, \dot{x}, v) \quad (4)$$

其中: $\hat{f}$ 为求逆采用的系统模型。由于系统的复

杂性, f 往往难以确切描述, 因此 $\hat{f}$ 一般为 f 的一个近似函数。

动态逆误差由建模不准确、求逆计算、外界干扰等引起; 当飞机发生舵面故障时, 将导致严重的逆误差。考虑逆误差的存在, 系统动态特性可以表示为

$$\ddot{x} = \hat{f}(x, \dot{x}, \delta) + \Delta(x, \dot{x}, \delta) \quad (5)$$

其中: $\Delta(x, \dot{x}, \delta)$ 为逆误差。从数学观点来看, 逆误差是指令信号、状态量和控制量等的非线性时变函数, 可以表示为

$$\Delta(x, \dot{x}, \delta) = f(x, \dot{x}, \delta) - \hat{f}(x, \dot{x}, \delta) \quad (6)$$

由于飞行条件变化剧烈, 飞机纵向和横侧向通道耦合, 加上外界干扰等, 逆误差函数非常复杂, 很难用具体的解析表达式进行描述。而动态逆方法应用的条件是对系统数学模型有准确的了解^[12], 因此, 逆误差无法在动态逆框架内消除。由于逆误差的存在, 特别是存在舵面故障时, 会造成动态逆控制效果的急剧恶化甚至不稳定。由前面关于伪控制信号和动态逆误差的定义, 系统方程可等价表示为

$$\ddot{x} = v + \Delta(x, \dot{x}, \delta) \quad (7)$$

为了消除逆误差, 在控制器中增加一个自适应环节, 其输出信号 v_{ad} 叠加到伪控制信号 v 中。由于神经网络具有良好的逼近连续非线性函数的特性, 该自适应环节采用神经网络进行实现。系统结构如图1所示。

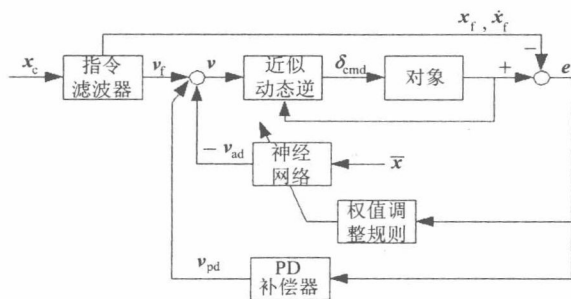


图1 自适应控制结构

Fig.1 Adaptive control structure

图中, 指令滤波器输出信号 x_f 代表输入指令信号 x_c 时, 系统理想的响应模型。对于二阶系统, 指令滤波器可以表示为

$$\ddot{x}_f = f_f(x_f, \dot{x}_f, x_c) \quad (8)$$

指令滤波器输出的伪控制信号

$$v_f = f_f(x_f, \dot{x}_f, x_c) \quad (9)$$

比例微分控制器采用线性控制理论进行设计, 用以获得要求的动态品质。比例微分控制器输出的伪控制信号为

$$v_{pd} = K_p(x_f - x) + K_d(\dot{x}_f - \dot{x}) \quad (10)$$

其中: K_p, K_d 为比例微分控制器参数矩阵。伪控制量由指令滤波器、比例微分控制器和自适应神经网络信号三部分构成

$$v = v_f + v_{pd} - v_{ad} \quad (11)$$

将式(11)代入式(7), 经整理可以得到系统跟踪误差的动态特性

$$\dot{e} = Ae + B[v_{ad} - \Delta(x, \dot{x}, \delta)] \quad (12)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K_p & -K_d \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}, e = \begin{bmatrix} x_f - x \\ \dot{x}_f - \dot{x} \end{bmatrix} \quad (13)$$

通过合理选择 K_p, K_d , 系统矩阵 A 可以成为霍尔维茨矩阵。由式(12)可知, 理想情况下, 自适应输出项 v_{ad} 如果能够完全重构逆误差, 则系统跟踪误差将渐进趋向于零。

1.2 神经网络的构造

本文采用 Lewis 提出的多层感知器神经网络来重构逆误差, 神经网络结构见文献[3], 其输入输出映射关系可以写成

$$y_i = \sum_{j=1}^{N_2} [w_{ij} \sigma(\sum_{k=1}^{N_1} v_{jk} \bar{x}_k + \theta_{v_j}) + \theta_{w_i}], i = 1, \dots, N_3 \quad (14)$$

其中: $\sigma(\cdot)$ 表示隐含层激励函数; v_{jk} 表示输入层到隐含层之间的连接权值; w_{ij} 表示隐含层到输出层之间的连接权值; $\theta_{v_j}, \theta_{w_i}$ 表示阈值; N_1, N_2, N_3 分别表示输入层、隐含层和输出层神经元的个数。隐含层神经元激励函数选择如下 S 型函数

$$\sigma(z_i) = \frac{1}{1 + e^{-az_i}} \quad (15)$$

其中: $z_i \in \mathbf{R}, a$ 称为激励系数。若定义 $\bar{x} = [1, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_{N_1}]^T, \mathbf{y} = [y_1, \dots, y_{N_3}]^T, \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{z}) = [1, \sigma(z_1), \dots, \sigma(z_{N_2})]$; 并且定义如下神经网络权重矩阵

$$\mathbf{W}^T = [\theta_{w_i} | w_{ij}], \mathbf{V}^T = [\theta_{v_j} | v_{ij}] \quad (16)$$

则神经网络输入输出映射可写为矩阵形式

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}^T \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{V}^T \bar{\mathbf{x}}) \quad (17)$$

由多层感知器神经网络普遍近似定理^[2]可知, 若给定足够的输入信息和隐含层神经元数目, 神经网络能够以任意精度逼近任何连续非线性函数。对于连续的不确定性非线性逆误差函数 $\Delta(x, \dot{x}, \boldsymbol{\sigma})$ 及任意给定的逆误差重构误差 $\epsilon_N >$