

Z427/1033(2009)-151



NUAA2010055213

Z427
1033(2009)-(15)

自动化学院

031



2010055213

15

第2本

序号	作者姓名	职称	单位	论文题目	刊物名称	年卷期	提交人
115	王志胜 甄子洋 范大鹏			多传感器系统的正交 全信息融合滤波方法	中南大学学报	第40卷增刊 1, 第149- 153页, 2009 年9月	
116	刘伟杰 王志胜 甄子洋			电动负载模拟器的 CMAC神经网络复合控 制	电光与控制	第16卷第9 期, 第89- 96页, 2009 年9月	
117	王志胜 胡勇 王道波 范大鹏			基于强跟踪滤波器的 多传感器组合测姿系 统	南京航空航天大 学学报	第41卷1 期, 第64- 68页, 2009 年2月	
118	王志胜 甄子洋 张洪景 陈兆海			Robust Information Fusion Filtering Method for Discrete-Time Linear Uncertain System	2009 IEEE International Conference on Control and Automation	December 9-11, 2009	
119	甄子洋 王志胜 胡勇			Multi-Sensor Information Fusion for Aircraft Attitude Determination System	2009 World Congress on Computer Science and Information Engineering	474-478	
120	王志胜 甄子洋			非线性信息融合估计 理论	宇航学报	第30卷第1 期, 第8-12 页, 2009年 1月	
121	王志胜 甄子洋 范大鹏			基于联合滤波器的高 精度卫星定姿系统设 计	中国空间科学技 术	2009年6 月, 第3期	
122	杨蒲	讲师	031	稳定平台有限记忆模 型H ∞ 目标预测滤波算 法	系统仿真学报	2009, 21 (13)	杨蒲
123	张绍杰 胡寿松	讲师 教授	031	基于反馈线性化的 MIMO非最小相位系统 指数镇定	控制与决策	2009, 24 (2)	张绍杰
124	张绍杰 胡寿松	讲师 教授	031	MIMO非线性非最小相 位系统的鲁棒跟踪控 制	南京航空航天大 学学报	2009, 41 (4)	张绍杰
125	陶洪峰 胡寿松	博士 教授	031 031	模糊广义时滞系统的 鲁棒集成容错控制器 设计	南京航空航天大 学学报	2009, 41 (3)	胡寿松
126	陶洪峰 胡寿松	博士 教授	031 031	具有饱和死区非线性 输入的自适应滑模跟 踪控制	信息与控制	2009, 38 (3)	胡寿松
127	邓志良 胡寿松 张军峰	博士 教授 博士	0310 31 031	船舶动力定位系统的 在线模型预测控制	中国造船	2009, 50 (2)	胡寿松
128	蔡俊伟 胡寿松	博士 教授	031 031	不确定变时滞系统的 模糊静态输出反馈保 性能可靠控制	系统工程与电子 技术	2009, 31 (4)	胡寿松

129	蔡俊伟	博士	031	基于观测器的非线性	控制与决策	2009, 24	胡寿松
	胡寿松	教授	031	系统 H_∞ 模糊可靠控制		(4)	
130	张军峰	博士	031	基于无约束优化的非	控制与决策	2009, 24	胡寿松
	胡寿松	教授	031	线性支持向量回归		(1)	
	叶永强						
	Abdelh						
	amid						
135	Tayebi	正高	031	All-Pass Filtering In Iterative Learning Control	Automatica	2009, 45 (1)	叶永强
	, Xiapin						
	g Liu						
	叶永强						
	Danwei						
	Wang,						
136	Bin	正高	031	Simple LMI Based Learning Control Design	Asian Journal of Control	2009, 11 (1)	叶永强
	Zhang,						
	Yigang						
	Wang						
	王宝宝	硕士	031				
137	龚华军	正高	031	基于模糊控制的智能	第三届中国导航、 制导与控制学 术会议	2009, 11	龚华军
	王新华	中级	031	复飞技术研究			
	杨一栋	正高	031				
	龚华军	正高	031				
138	杨长锋	硕士	031	无人机的追逃对抗仿	控制理论与应用	2009, 26	龚华军
	王彪	副高	031	真研究		(9)	
	杨忠	正高	031				
	龚华军	正高	031				
139	方芬	硕士	031	先进的目视回收光学	南京航空航天大 学学报	2009, 41	龚华军
	邢建芳	博士	031	助降系统纵向着舰精		(5)	
	杨一栋	正高	031	度研究			
	邱海俊						
	江驹						
140	龚华军			近地告警系统的工作	中国自动化学会 第二十四届青年 学术会议论文集		
	郑晟			原理分析及阈值设计			
	满翠芳						
	邱海俊						
141	江驹			基于性能指标的近地	第三届中国导航、 制导与控制学 术会议		
	龚华军			告警系统的阈值研究			
	郑晟						
	满翠芳						
	邱海俊						
142	江驹			基于统计方法的近地	中国航空学会飞 行器控制与操纵 第十三次学术会 议		
	龚华军			告警曲线阈值算法研			
	郑晟			究			
	满翠芳						
	邱海俊						
143	江驹			基于模糊逻辑的舰载	中国航空学会飞 行器控制与操纵 第十三次学术会 议		
	龚华军			机进场动力补偿系统			
	郑晟			研究			
	满翠芳						
144	李东华			多智能体强化学习飞	电光与控制	2009年10 月, 第16期	
	江驹			行路径规划算法			
	姜长生						

145	江驹 李东华 赵敏 Keith W. Hiple			Flight Path Planning and Air- to-Air Combat Decision Masking Using Multiagent Reinforcement Learning Method	an international meeting on group design and negotiation	2009年6月	
146	xin yang, l ijuan chen, m ou chen , dake zhou xin yang, l ijuan chen, m ou chen , dake zhou			Classification and recongition of character using WP Decomposition, zern ike moments and fuzzy integral			
147	xin yang, l ijuan chen, m ou chen , dake zhou			Design and Reduction of UML- PN Models of Power Plant's Fault Management System			
148	xin yang, l ijuan chen			Design and fault diagnosis of Petri net controllers for Petri nets with uncontrollable and unobservable transitions	Journal of Manufactring Systems	2009年, 第 28期	
149	杨欣 杨蒲 费树岷			基于资源配置混杂 Petri网的混杂系统 生产过程建模	控制与决策	2009年9 月, 第24卷 第12期	
150	齐瑞云 姚雪莲	副高 硕士生	031	Nonlinear Identifi	the IEEE 17th Int. Conf. on Fuzzy Systems	2009	齐瑞云
151	齐瑞云 Mietek A. Brdy s	副高 正高	031 031	Indirect adaptive	Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.	2009, 19 (4)	齐瑞云
152	刘久富 杨振兴	讲师 研究生	032 032	Test Generation from StateChart and B method for flight control software of unmanned aerial vehicle	PROCEEDINGS OF 2009 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE & EDUCATION	ICCSSE 2009	刘久富
153	于维倩 姜 斌 刘剑慰	硕士 正高 中级	031 031 031	非线性飞控系统鲁棒 故障诊断	中国智能自动化 会议论文集	2009	姜斌
154	李洁 姜斌 刘春生	硕士 正高 正高	031 031 031	基于T-S模糊模型的飞 控系统故障诊断研究	控制工程	2009, 16	姜斌

155	汪阳	硕士	031	Fault-tolerant	中国控制与决策 会议论文集	2009	姜斌
	姜斌	正高	031	Control Design for			
	冒泽慧	中级	031	a kind of			
156	耿森	硕士	031	Nonlinear	中国智能自动化 会议 (CIAC) 论 文集	2009	姜斌
	姜斌	正高	031	Networked Control			
	郭玉英	中级	031	System with			
	杨浩	中级	031	Communication			
157	耿森	硕士	031	Constraints	东南大学学报 (自然科学版)	2009, 39 (S1)	姜斌
	姜斌	正高	031	Model Following			
	郭玉英	中级	031	Reconfigurable			
	杨浩	中级	031	Control for			
158	陈伟	硕士	031	Helicopters with	中国自动化学会 青年学术年会论 文集	2009	姜斌
	姜斌	正高	031	Actuator Faults and			
	张柯	博士	031	Saturation			
159	陈伟	硕士	031	执行器故障参数不可	中南大学学报	2009, 40 (S1)	姜斌
	姜斌	正高	031	测飞行系统的模型跟			
	张柯	博士	031	踪重构控制			
160	陈伟	硕士	031	基于LPV的直升机飞控	南京航空航天大学 英文学报	2009, 26 (4)	姜斌
	姜斌	正高	031	系统快速故障诊断			
	张柯	博士	031	Fault diagnosis			
				and accommodation			
161	高志峰	博士	031	for linear	第四届先进计算、 信息与控制国 际学术会议论文 集	2009	姜斌
	姜斌	正高	031	parameter-varying			
	龚华军	正高	031	in flight control			
	许域菲	博士	031	systems			
162	高志峰	博士	031	Robust Fault	系统工程与电子 技术	2009, 31 (12)	姜斌
	姜斌	征稿	031	Diagnosis for			
	许域菲	博士	031	Helicopter FCS			
	姜斌	正高	031	Based on Linear			
163	许域菲	博士	031	Parameter-Varying	华中科技大学学 报	2009, 37 (Sup 1)	姜斌
	姜斌	正高	031	Adaptive Observer			
	齐瑞云	副高	031	Fault-tolerant			
	高志峰	博士	031	Sliding Mode			
164	许域菲	博士	031	Control Design for	第七届亚洲控制 会议论文集	2009	姜斌
	姜斌	正高	031	Near Space Vehicle			
	高志峰	博士	031	Based on T-S Fuzzy			
	齐瑞云	副高	031	Model			
165	易辉	博士	031	一类参数不确定的线	仪器仪表学报	2009年增刊	姜斌
	宋晓峰	副高	031	性时变系统的故障调			
	姜斌	正高	031	节			

166	孟令雅 姜斌 许域菲	博士 正高 博士	031 031 031	Observer-based Robust Fault Diagnosis for a Class of Uncertain Nonlinear Systems	Proc. Of Chinese Control and Decision Conference	2009	姜斌
167	郭玉英 姜斌	博士 正高	031 031	基于降维UIO的飞控系 统鲁棒故障诊断	南京航空航天大 学学报	2009, 41 (2)	姜斌
168	郭玉英 姜斌 张友民 程月华	博士 正高 副高 中级	031 031 031 031	基于多模型的飞控系 统执行器故障调节	宇航学报	2009, 30 (2)	姜斌
169	邱爱兵 文成林 姜斌	博士 正高 正高	031 031	Optimal Diagnostic Observer for Sampled-Data systems	Proc. of 48th IEEE CDC and 28th CCC	2009	姜斌
170	张柯 姜斌 Alexey Shumsk y	博士 正高 正高	031 031	A new criteria of fault estimation for neutral delay systems using adaptive observer	自动化学报	2009, 35 (1)	姜斌
171	张柯 姜斌 陈伟	博士 正高 硕士	031 031 031	An improved adaptive fault estimation design for polytopic LPV systems with application to helicopter models	第七届亚洲控制 会议论文集	2009	姜斌
172	张柯 姜斌	博士 正高	031 031	一种改进的自适应诊 断设计方法及其在飞 控系统中的应用	航空学报	2009, 30 (7)	姜斌
173	张柯 姜斌 石碰	博士 正高 正高	031 031 031	Fast fault estimation and accommodation for dynamical systems.	IET Control Theory and Applications	2009, 3 (2)	姜斌
174	张柯 姜斌 Vincen t Cocque mpot	博士 正高 正高	031 031	Fast Adaptive Fault Estimation and Accommodation for nonlinear Time-Varying Delay Systems	Asian Journal of Control	2009, 11 (6)	姜斌
175	张柯 姜斌 石碰	博士 正高 正高	031 031 031	A New Approach to Observer-Based Fault-Tolerant Controller Design for Takagi-Sugeno Fuzzy Systems with State Delay	Circuits Syst Signal Process	2009, 28 (5)	姜斌
176	冒泽慧 姜斌 石碰	中级 正高 正高	031 031 031	Protocol and Fault Detection Design for Nonlinear Networked Control Systems	IEEE Trans. on circuits and systems II:	2009, 56 (3)	姜斌

177	冒泽慧 姜斌 Steven X. Ding	中级 正高 正高	031 031	A fault-tolerant control framework for a class of non-linear networked control systems	International Journal of Systems Science	2009, 40 (5)	姜斌
178	杨浩 Vincen t Cocque mpot 姜斌	中级 正高 正高	031 031	Dissipativity of hybrid systems with application to supervisory fault tolerant control	Proc. Of 3rd IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems	2009	姜斌
179	杨浩 姜斌 Vincen t Cocque mpot	中级 正高 正高	031 031	A new supervisory fault tolerant output regulation scheme for nonlinear systems	Proc. Of 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference	2009	姜斌
180	杨浩 姜斌 Vincen t Cocque mpot	中级 正高 正高	031 031	Fault tolerant control in hybrid systems: a brief survey	Proc. Of 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes	2009	姜斌
181	杨浩 Vincen t Cocque mpot 姜斌 杨浩	中级 正高 正高	031 031	Robust fault tolerant tracking control with applications to hybrid nonlinear systems	IET Control Theory and Applications	2009, 3 (2)	姜斌
182	杨浩 姜斌 Vincen t Cocque mpot 姜斌	中级 正高 正高	031 031	Fault tolerant control for a class of hybrid systems with uncontrollable switching	International Journal of Systems Science	2009, 40 (10)	姜斌
183	杨浩 姜斌 Vincen t Cocque mpot	中级 正高 正高	031 031	Fault tolerance analysis for stochastic systems using switching diffusion processes	International Journal of Control	2009, 82 (8)	姜斌
184	杨浩 姜斌 Vincen t Cocque mpot	中级 正高 正高	031 031	A fault tolerant control framework for periodic switched nonlinear systems	International Journal of Control	2009, 82 (1)	姜斌

185	杨浩 Vincen t Cocque mpot 姜斌 杨浩 姜斌	中级 正高 正高	031 031	On stabilization of switched nonlinear systems with unstable modes	Systems and Control Letters	2009, 58 (10-11)	姜斌
186	Marcel Staros wiecki 文杰 姜长生 钱承山 周丽	中级 正高 正高 博士 正高 博士 博士	031 031 0310 3103 1031	Supervisory fault tolerant control for a class of uncertain nonlinear systems	Automatica	2009, 45 (10)	姜斌
187	蒲明 吴庆宪 姜长生	博士 正高 正高	0310 3103 1	非放射非线性系统的 自适应模糊输出反馈 控制	系统工程与电子 技术	2009, 31 (7)	姜长生
188	施蓉花 吴庆宪 姜长生	博士 正高 正高	0310 3103 1	基于非线性干扰观测 器的二阶Terminal滑 模在近空间飞行器控 制中的应用	东南大学学报	2009, 39	姜长生
189	张军 姜长生	硕士 正高 正高	0310 3103 1	无人机协同攻击的混 合粒子群算法	火力与指挥控制	2009, 34 (9)	姜长生
190	都延 丽 吴庆宪 姜长生	博士 正高 正高	0310 31	基于复杂干扰估计的 高动态NSV鲁棒自适应 Terminal滑模控制	宇航学报	2009, 30 (5)	姜长生
191	都延 丽 吴庆宪 姜长生	硕士 正高 正高	031	Robust Optimal Predictive Control for a Near-Space Vehicle Based on Functional Link Network Disturbance Observer	宇航学报	2009年30卷 4期	吴庆宪
192	贺乃宝 姜长生 吴庆宪	博士 正高 正高	031 0310 31	基于FLNDO的近空间 飞行器鲁棒最优预测 控制(英文)	宇航学报	2009, 30 (4)	姜长生
193	周丽 姜长生 都延丽	副高 正高 正高	031 031 031	一类不确定非线性系 统基于Backstepping 的自适应跟踪控制	哈尔滨工业大学 学报	2009, 41 (5)	姜长生
194	卫星 姜长生	博士 正高 博士	031 0310 31	一种基于反步法的鲁 棒自适应终端滑模控 制	控制理论与应用	2009, 26 (6)	姜长生
195	张军 姜长生 方炜 张军 姜长生 文杰	硕士 正高 正高 正高 正高 博士	031 031 0310 31 0310 31	基于Petri Nets 的 无人机自主飞行任务 管理系统	佳木斯大学学报	2009, 27 (3)	姜长生
196	许平 姜长生	博士 正高 正高	031 0310 31	变结构近空间飞行器 大包络控制特性研究	宇航学报	2009, 30 (2)	姜长生
197	姜长生	博士 正高 正高	031 0310 31	近空间飞行器的DSF: vsat鲁棒快速 Terminal滑模控制	西安交通大学学 报	2009, 43 (3)	姜长生
198	姜长生	硕士 正高	031 031	基于遗传算法及 Hicks-Henne型函数 的层流翼型优化设计	空军工程大学学 报	2009, 10 (1)	姜长生

199	贺乃宝 姜长生	副高 正高	031 031	非线性混沌系统的鲁棒自适应控制	重庆大学学报	2009, 32 (1)	姜长生
200	陈复扬 姜斌 张柯			DIRECT SELF-REPAIR CONTROL AND ACTUATOR FAILURES RE-PRESENT TECHNIQUES FOR CIVIL AVIATION AIRCRAFT	ICIC International	VOL5, NO. 2, FEBRUARY 2009	姜斌
201	陈复扬 姜斌 张柯			The Integrated Application on Adaptive Control of Unmanned Combat Aerial Vehicles			姜斌
202	陈复扬 姜斌 刘宇航			基于模糊逻辑的故障直升机直接自适应控制	华中科技大学学报	2009年37卷增刊1	姜斌
203	王从庆 柯昌俊	正高 硕士	031 031	自由浮动柔性空间双臂机器人的混合抑振控制	振动工程学报	2009 年22卷 1 期	王从庆
204	王香岭 王从庆	硕士 正高	031 031	自由浮动冗余度空间机器人的混沌识别与控制	宇航学报	2009 年30卷4期	王从庆
205	郭鸿昌 陈欣 洪春霞 姚旭寅	硕士 正高 硕士 硕士	035 035 035 035	基于网络的无人机实时仿真系统软件	南京航空航天大学学报	2009, 12 (S)	陈欣
206	王丽丽 陈欣	硕士 正高	035 035	无人机飞行控制计算机冗余度管理软件	南京航空航天大学学报	2009, 12 (S)	陈欣
207	张 民 陈 欣 陆宇平	中级 正高 正高	0350 3503 1	基于改进PSO算法的导弹控制参数优化	南京航空航天大学学报	2009, 41 (4)	张民
208	张 民 陈 欣 陆宇平	中级 正高 正高	0350 3503 1	基于 μ 综合的空空导弹纵向鲁棒驾驶仪设计	南京航空航天大学学报	2009, 33 (6)	张民

多传感器系统的正交化全信息融合滤波方法

王志胜^{1,2}, 甄子洋¹, 范大鹏²

- (1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京, 210016;
2. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙, 410073)

摘要: 针对多传感器系统的状态估计问题, 提出一种基于正交化方法的全信息融合滤波算法。首先, 阐述了多传感器系统全信息的概念及其融合结构。其次, 推导出融合滤波前、后2次子系统状态估计信息之间的相关矩阵以及子系统状态估计信息与系统状态预测信息之间的相关矩阵, 在此基础上实现对子系统状态估计信息与系统状态预测信息的正交化处理。基于信息融合估计理论, 通过融合这些正交信息可获得系统的状态估计, 且比传统估计方法具有更高的精度。

关键词: 多传感器系统; 信息融合; 滤波

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2009)S1-0149-05

Orthogonalized full information fusion filtering method of multi-sensor system

WANG Zhi-sheng^{1,2}, ZHEN Zi-yang¹, FAN Da-peng²

- (1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China;
2. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, China)

Abstract: In allusion to the state estimation of the multi-sensor system, an orthogonalization method based full information fusion filtering algorithm was presented. A concept and a fusion architecture of full information of the multi-sensor system were expounded. A related matrix of pre and post filtering information of sub-system state and a related matrix between sub-system state estimation and system preview information were deduced, based on which the orthogonalization of the sub-system state estimation information and the system preview information was derived. According to the information fusion estimation theory, the system state estimation is obtained through fusing the orthogonal information, which has higher precision than the estimations obtained by the traditional methods.

Key words: multi-sensor system; information fusion; filtering

对于多传感器系统的状态估计问题, 总是希望尽可能获得对系统状态的最高精度估计。基于卡尔曼滤波器的融合方法是目前普遍采用的多传感器系统状态估计方法, 但是, 它仅利用了系统的量测信息和子系统的状态预测信息, 而没有利用系统预测信息。LI

等^[1-2]提出了基于最优线性无偏估计、加权最小二乘估计和线性最小方差估计的信息融合准则。本文作者提出了基于线性均方估计的信息融合定理以及信息量的概念^[3-4], 还给出了基于融合估计的多传感器系统集中融合滤波、量测融合滤波以及状态融合滤波算法^[5]。

收稿日期: 2009-06-09; 修回日期: 2009-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60874037); 教育部博士点基金资助项目(20070287050); 中国博士后科学基金资助项目(20080441286)

通信作者: 王志胜(1970-), 男, 湖北松滋人, 博士, 副教授, 国防科技大学机械工程博士后科研流动站博士后, 从事多传感信息融合、无人机飞行控制等研究; 电话: 025-84892305; E-mail: wangzhisheng@nuaa.edu.cn

根据融合估计理论可知,利用的信息越多,信息量就越大,融合估计精度就越高。因此,为融合更多的有用信息,本文作者提出多传感器系统的全信息滤波方法。在多传感器系统全信息情况下,由于每个传感器自带有子系统滤波器,使系统滤波器实际上被子系统滤波估计所激励,因此,称多传感器系统全信息滤波为滤波激励滤波条件下的 Kalman 滤波。由于各种信息之间往往存在相关性,为此,需要进行正交化处理。

1 多传感器系统全信息融合滤波结构

假设多传感器系统包含 N 个子系统传感器,它们的测量信息是相互正交的。根据系统状态预测信息独立性原理, N 个子系统状态的预测信息也是相互正交的,并且与 N 个测量信息之间相互独立。上述 $2N$ 个独立信息构成了状态融合滤波的所有信息,可直接利用信息融合估计定理获得状态估计。

然而,根据状态预测信息独立性原理,系统状态预测信息中含有子系统状态预测信息和所有测量信息所没有的信息成分。根据信息融合估计理论,信息融合越多,估计精度就越高。为此,在上述 $2N$ 个独立信息的基础上,融合系统状态预测信息势必能提高滤波精度,本文称其为全信息融合滤波方法。与集中式融合滤波、分散式融合滤波以及量测融合滤波相比,全信息融合滤波增加了对子系统状态预测信息的利用。与状态融合滤波相比,全信息融合滤波增加了对系统状态预测信息的利用。

多传感器系统全信息融合滤波算法采用多处理器分层处理结构方式,首先由各个子系统滤波器融合子系统预测信息和测量信息获得子系统状态估计,然后,由系统主滤波器融合这些子系统状态估计信息和系统状态预测信息获得系统状态估计。

2 系统状态预测信息与子系统状态估计信息的正交化

多传感器系统状态方程表示为

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)w(k) \quad (1)$$

式中: $E[w(k)w^T(j)] = Q(k)\delta_{kj}$ 。

子系统状态方程和测量方程分别表示为

$$y_i(k+1) = F_i(k)y_i(k) + G_i(k)w_i(k) \quad (2)$$

$$z_i(k) = H_i(k)y_i(k) + n_i(k) \quad (3)$$

式中: $E[w_i(k)] = 0$; $E[w_i(k)w_i^T(j)] = Q_i(k)\delta_{kj}$; $E[n_i(k)] = 0$; $E[n_i(k)n_i^T(j)] = R_i(k)\delta_{ij}$ 。

多传感器系统的子系统测量信息和子系统状态预测信息之间是相互独立的,子系统测量信息和系统状态预测信息之间也是相互独立的。根据状态融合滤波方法^[5],子系统状态预测信息表示为

$$\hat{y}_i(k|k-1) = F_i(k-1)\hat{y}_i(k-1) \quad (4)$$

$$P_i^{-1}(k|k-1) =$$

$$\left[F_i(k-1)P_i(k-1)F_i^T(k-1) + G_i(k-1)Q_i(k-1)G_i^T(k-1) \right]^{-1} \quad (5)$$

系统状态预测信息可表示为

$$\hat{x}(k|k-1) = A(k-1)\hat{x}(k-1) =$$

$$A(k-1)P(k-1)\sum_{i=1}^N C_i^T(k-1)P_i^{-1}(k-1)\hat{y}_i(k-1) \quad (6)$$

$$P^{-1}(k|k-1) =$$

$$\left[A(k-1)P(k-1)A^T(k-1) + B(k-1)Q(k-1)B^T(k-1) \right]^{-1} \quad (7)$$

式中: $\hat{y}_i(k|k-1)$ 为第 i 个子系统状态预测值; $P_i(k|k-1)$ 为其预测误差的协方差; $\hat{x}(k|k-1)$ 为系统状态预测值; $P(k|k-1)$ 为其预测误差的协方差; $i=1, 2, \dots, N$ 。

显然,式(4)和(6)含有相同的信息成分 $\hat{y}_i(k-1)$,因此子系统状态预测信息和系统状态预测信息是相关的。又由于子系统状态估计为

$$\hat{y}_i(k) =$$

$$P_i(k)[P_i^{-1}(k|k-1)\hat{y}_i(k|k-1) + H_i^T(k)R_i^{-1}(k)z_i(k)] \quad (8)$$

$$P_i^{-1}(k) = P_i^{-1}(k|k-1) + H_i^T(k)R_i^{-1}(k)H_i(k) \quad (9)$$

即表示子系统状态估计与子系统状态预测信息之间是相关的。因此,子系统状态估计信息与系统状态预测信息是相关的。于是,在使用信息融合估计定理之前,需要将子系统状态估计信息和系统状态预测信息进行正交化处理。

系统状态预测信息与子系统状态估计信息的量测模型分别表示为

$$\hat{x}(k|k-1) = Lx(k) + u(k) \quad (10)$$

$$\hat{y}_i(k) = C_i(k)x(k) + v_i(k) \quad (11)$$

式中: $E[u(k)u^T(j)] = P(k|k-1)\delta_{kj}$; $E[v_i(k)v_i^T(k)] = P_i(k)\delta_{kj}$; $i=1, 2, \dots, N$.

令

$$\hat{y}(k) = \begin{bmatrix} \hat{y}_1(k) \\ \hat{y}_2(k) \\ \vdots \\ \hat{y}_N(k) \end{bmatrix}, \quad C(k) = \begin{bmatrix} C_1(k) \\ C_2(k) \\ \vdots \\ C_N(k) \end{bmatrix}, \quad v(k) = \begin{bmatrix} v_1(k) \\ v_2(k) \\ \vdots \\ v_N(k) \end{bmatrix},$$

$$\bar{P}(k) = \text{var}[v(k)] = \begin{bmatrix} P_1(k) & & & \\ & P_2(k) & & \\ & & \ddots & \\ & & & P_N(k) \end{bmatrix}$$

将式(11)表达的 N 个子系统状态估计信息写成集中形式为

$$\hat{y}(k) = C(k)x(k) + v(k) \quad (12)$$

根据信息正交化定理^[3], 保持信息 $\hat{y}(k)$ 不变, 存在新信息 $\tilde{x}(k|k-1)$ 代替 $\hat{x}(k|k-1)$, 使 $\tilde{x}(k|k-1)$ 与 $\hat{y}(k)$ 正交, 得到如下新的量测方程:

$$\tilde{x}(k|k-1) = \tilde{I}(k)x(k) + \tilde{u}(k) \quad (13)$$

且

$$\tilde{x}(k|k-1) = \hat{x}(k|k-1) - P_{12}(k)\bar{P}^{-1}(k)\hat{y}(k) \quad (14)$$

$$\tilde{I}(k) = I - P_{12}(k)\bar{P}^{-1}(k)C(k) \quad (15)$$

$$\bar{P}^{-1}(k|k-1) = [P(k|k-1) - P_{12}(k)\bar{P}^{-1}(k)P_{21}(k)]^{-1} \quad (16)$$

式中: $E[\tilde{u}(k)\tilde{u}^T(j)] = \tilde{P}(k|k-1)\delta_{kj}$; $P_{12}(k) = P_{21}^T(k) = \text{cov}[x(k|k-1), \hat{y}(k)]$; $P_{12}(k)$ 为 $\hat{x}(k|k-1)$ 与 $\hat{y}(k)$ 之间的相关矩阵。

根据融合估计定理^[3-4], 利用正交化信息 $\tilde{x}(k|k-1)$ 和 $\hat{y}(k)$, 得到系统状态滤波方程为

$$P^{-1}(k)\hat{x}(k) = \tilde{I}^T(k)\tilde{P}^{-1}(k|k-1)\tilde{x}(k|k-1) + C^T(k)\bar{P}^{-1}(k)\hat{y}(k) \quad (17)$$

$$P^{-1}(k) = \tilde{I}^T(k)\tilde{P}^{-1}(k|k-1)\tilde{I}(k) + C^T(k)\bar{P}^{-1}(k)C(k) \quad (18)$$

因此, 要获得系统状态估计, 需要先求得 $\tilde{x}(k|k-1)$ 与 $\hat{y}(k)$ 之间的相关矩阵 $P_{12}(k)$ 。

3 子系统状态估计信息与系统状态预测信息之间的相关矩阵

根据式(17), 可得系统状态预测信息为

$$\hat{x}(k|k-1) = A(k-1)\hat{x}(k-1) = A(k-1)P(k-1)[\tilde{I}^T(k-1)\tilde{P}^{-1}(k-1|k-2) \cdot \tilde{x}(k-1|k-2) + \sum_{i=1}^N C_i^T(k-1)P_i^{-1}(k-1)\hat{y}_i(k-1)] \quad (19)$$

$$P^{-1}(k|k-1) = [A(k-1)P(k-1)A^T(k-1) + B(k-1)Q(k-1)B^T(k-1)]^{-1} \quad (20)$$

信息 $\hat{x}(k|k-1)$ 与信息 $\hat{y}(k)$ 之间的相关矩阵表示为

$$P_{12}(k) = \text{cov}[\hat{x}(k|k-1), \hat{y}(k)] = [P_{12,1}(k) \quad P_{12,2}(k) \quad \dots \quad P_{12,N}(k)] \quad (21)$$

式中: $P_{12,i}(k) = \text{cov}[\hat{x}(k|k-1), \hat{y}_i(k)]$; $i=1, 2, \dots, N$ 。由于 $\tilde{x}(k-1|k-2)$ 与 $\{\hat{y}_i(k-1), i=1, 2, \dots, N\}$ 正交, $\tilde{x}(k-1|k-2)$ 与子系统测量信息 $\{z_i(k), i=1, 2, \dots, N\}$ 正交, 因此, $\tilde{x}(k-1|k-2)$ 与 $\{\hat{y}_i(k), i=1, 2, \dots, N\}$ 也是正交的。又因为 $\hat{y}_i(k)$ 由 $\hat{y}_i(k-1)$ 和 $z_i(k)$ 融合而成, 所以, $\hat{x}(k|k-1)$ 与 $\hat{y}_i(k)$ 的相关矩阵为

$$P_{12,i}(k) = \text{cov}\left\{A(k-1)P(k-1) \cdot \left[\tilde{I}^T(k-1)\tilde{P}^{-1}(k-1|k-2)\tilde{x}(k-1|k-2) + \sum_{j=1}^N C_j^T(k-1)P_j^{-1}(k-1)\hat{y}_j(k-1)\right], \hat{y}_i(k)\right\} = A(k-1)P(k-1)C_i^T(k-1)P_i^{-1}(k-1)\text{cov}[\hat{y}_i(k-1), \hat{y}_i(k)] \quad (22)$$

因此, 系统状态预测信息与子系统状态估计信息的相关矩阵 $P_{12,i}(k)$ 由子系统状态的前、后 2 次滤波值之间的协方差 $\text{cov}[\hat{y}_i(k-1), \hat{y}_i(k)]$ 确定。

4 子系统滤波前后两次状态估计信息之间的相关矩阵

从滤波算法分析, 若要得到 $k-1$ 时刻的子系统状态估计 $\hat{y}_i(k-1)$ 则需利用 $0 \sim (k-1)$ 时刻的子系统测量

信息 $\{z_i(j), j=0, 1, \dots, k-1\}$, 若要得到 k 时刻的系统状态估计 $\hat{y}_i(k)$ 则需利用从 $0 \sim k$ 时刻的子系统测量信息 $\{z_i(j), j=0, 1, \dots, k\}$ 。因此, $\hat{y}_i(k-1)$ 和 $\hat{y}_i(k)$ 之间是相关的。

子系统滤波器如式(8)和(9)所述, 将式(8)改写为

$$\hat{y}_i(k) = K_1 \hat{y}_i(k|k-1) + K_2 z_i(k) \quad (23)$$

式中: $K_1 = P_i(k)P_i^{-1}(k|k-1)$; $K_2 = P_i(k)H_i^T(k)R_i^{-1}(k)$ 。

由于 $E[\hat{y}_i(k) - y_i(k)] = 0$, 且

$$\begin{aligned} E[\hat{y}_i(k) - y_i(k)] &= E[K_1 \hat{y}_i(k|k-1) + K_2 z_i(k) - y_i(k)] = \\ &= E[K_1 \hat{y}_i(k|k-1) + (K_2 H_i(k) - I)y_i(k) + n_i(k)] \end{aligned} \quad (24)$$

故

$$K_1 + K_2 H_i(k) = I \quad (25)$$

将式(3)和(4)代入式(23), 可得:

$$\begin{aligned} \hat{y}_i(k) &= K_1 F_i(k-1) \hat{y}_i(k-1) + K_2 [H_i(k)y_i(k) + n_i(k)] = \\ &= K_1 F_i(k-1) \hat{y}_i(k-1) + K_2 H_i(k) \cdot \\ &\quad [A(k-1)y_i(k-1) + w_i(k-1)] + \\ &\quad K_2 n_i(k) = K_1 F_i(k-1) \hat{y}_i(k-1) + \\ &\quad K_2 H_i(k) A(k-1) y_i(k-1) + K_2 H_i(k) w_i(k-1) + K_2 n_i(k) \end{aligned} \quad (26)$$

进一步, 可得状态估计误差为:

$$\begin{aligned} \hat{y}_i(k) - y_i(k) &= \\ &= K_1 F_i(k-1) \hat{y}_i(k-1) + K_2 H_i(k) F_i(k-1) y_i(k-1) + \\ &\quad K_2 H_i(k) w_i(k-1) + K_2 n_i(k) - \\ &\quad [F_i(k-1) y_i(k-1) + w_i(k-1)] = \\ &= K_1 F_i(k-1) [\hat{y}_i(k-1) - y_i(k-1)] + \\ &\quad [K_1 + K_2 H_i(k) - I] F_i(k-1) y_i(k-1) + \\ &\quad [K_2 H_i(k) - I] w_i(k-1) + K_2 n_i(k) = \\ &= K_1 F_i(k-1) [\hat{y}_i(k-1) - y_i(k-1)] + \\ &\quad [K_2 H_i(k) - I] w_i(k-1) + K_2 n_i(k) \end{aligned} \quad (27)$$

将式(25)代入式(27), 可得

$$\begin{aligned} \hat{y}_i(k) - y_i(k) &= \\ &= K_1 F_i(k-1) [\hat{y}_i(k-1) - y_i(k-1)] + K_1 w_i(k-1) + K_2 n_i(k) \end{aligned} \quad (28)$$

因为 k 时刻的系统噪声 $w_i(k)$ 与系统状态估计信息 $\hat{y}_i(k)$ 是不相关的, 所以,

$$E\{w_i(k)[\hat{y}_i(k) - y_i(k)]^T\} = 0 \quad (29)$$

又因为 k 时刻的测量噪声 $n_i(k)$ 与 $k-1$ 时刻的子系统状态估计 $\hat{y}_i(k-1)$ 是不相关的, 所以,

$$E\{n_i(k)[\hat{y}_i(k-1) - y_i(k-1)]^T\} = 0 \quad (30)$$

于是, $\hat{y}_i(k-1)$ 与 $\hat{y}_i(k)$ 之间的相关矩阵为

$$\begin{aligned} \text{cov}[\hat{y}_i(k-1), \hat{y}_i(k)] &= \\ &= E\{[\hat{y}_i(k-1) - y_i(k-1)][\hat{y}_i(k) - y_i(k)]^T\} = \\ &= E\{[\hat{y}_i(k-1) - y_i(k-1)][\hat{y}_i(k-1) - y_i(k-1)]^T\} \cdot \\ &\quad F_i^T(k-1)K_1^T = P_i(k-1)F_i^T(k-1)P_i^{-1}(k|k-1)P_i(k) \end{aligned} \quad (31)$$

将式(31)代入式(22), 得到 $\hat{x}(k|k-1)$ 与 $\hat{y}_i(k)$ 的相关矩阵为

$$\begin{aligned} P_{12,i}(k) &= A(k-1)P(k-1)C_i^T(k-1) \cdot \\ &\quad F_i^T(k-1)P_i^{-1}(k|k-1)P_i(k) \end{aligned} \quad (32)$$

式(32)即为子系统状态估计信息与系统状态预测信息之间的相关矩阵, 对 $i=1, 2, \dots, N$ 均成立。

5 全信息融合正交化滤波算法

完成相关矩阵的正交化处理后, 可直接利用融合估计定理进行估计运算, 具体计算步骤描述如下:

第1步: 给定各子系统状态滤波初值 $\hat{y}_i(0)$ 及其信息量 $P_i^{-1}(0)$, $i=1, 2, \dots, N$; 给定系统状态滤波初值 $\hat{x}(0)$ 及其信息量 $P^{-1}(0)$;

第2步: 每个子系统独立进行融合 Kalman 滤波, 按照式(4)和(5)计算子系统状态预测信息 $\hat{y}_i(k|k-1)$ 和 $P_i^{-1}(k|k-1)$, 按照式(8)和(9)计算子系统状态估计信息 $\hat{y}_i(k)$ 和 $P_i^{-1}(k)$;

第3步: 按照式(19)和(20)计算系统的状态预测信息 $\hat{x}(k|k-1)$ 和 $P^{-1}(k|k-1)$;

第4步: 按照式(32)和(21)计算系统状态预测信息与子系统状态估计信息的相关矩阵 $P_{12,i}(k)$ 和 $P_{12}(k)$;

第5步: 按照式(14)和(16)计算系统状态预测信息与子系统状态估计信息正交的新信息 $\tilde{x}(k|k-1)$, $\tilde{I}(k)$ 和 $\tilde{P}^{-1}(k|k-1)$;

第6步: 根据融合估计定理, 融合正交化信息 $\tilde{x}(k|k-1)$ 和 $\{\hat{y}_i(k), i=1, 2, \dots, N\}$, 按照式(17)和(18)

获得系统状态估计 $\hat{x}(k)$ 及其信息量 $P^{-1}(k)$ 。

以上步骤循环, 即可实现基于信息正交化方法的多传感器系统全信息融合卡尔曼滤波。考虑到子系统融合滤波器的收敛过程需要一段时间, 系统融合滤波器可以在各子系统融合滤波器独立工作一段时间后开始启动。在系统融合滤波器启动前一时刻的各子系统状态估计信息按照状态融合滤波方式可得到一系统状态估计信息, 该信息可用来设定系统状态估计信息的初值。

6 结 论

研究了一种多传感器系统状态估计问题的新解法——全信息融合滤波方法。传统的集中式、分散式滤波方法没有充分利用系统状态的全部信息。推导出子系统状态的前后两次滤波值之间的相关矩阵以及子系统状态估计信息与系统状态预测信息之间的相关矩阵, 进而获得正交化后的子系统状态估计信息和系统状态预测信息, 通过融合这些正交信息即可获得系统状态估计。由于本文方法有效地利用了系统状态的所有信息, 根据“融合的信息越多, 估计精度越高”的

原则可知, 全信息融合滤波得到的系统状态估计比传统滤波方法具有更高的精度。

参考文献:

- [1] LI Xiao-rong, ZHU Yun-min, WANG Jie, et al. Optimal linear estimation fusion — Part I: Unified fusion rules[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(9): 2192–2208.
- [2] ZHU Yun-min, LI Xiao-rong, ZHAO Juan. Linear minimum variance estimation fusion[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2004, 47(6): 728–740.
- [3] 王志胜. 信息融合估计理论及其在航天器控制中的应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.
WANG Zhi-sheng. Information fusion estimation theory and its applications to spacecraft control[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002.
- [4] 周 军, 王志胜, 周凤岐. 基于线性均方估计的数据融合理论[J]. 宇航学报, 2003, 24(4): 364–367.
ZHOU Jun, WANG Zhi-sheng, ZHOU Feng-qi. The theory of multi-sensor system data fusion based on linear least square estimation[J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(4): 364–367.
- [5] WANG Zhi-sheng, ZHEN Zi-yang, HU Yong. Information fusion based filtering for multi-sensor system[C]//Chinese Control and Decision Conference. Yangtai, 2008: 427–430.

电动负载模拟器的 CMAC 神经网络复合控制

刘伟杰, 王志胜, 甄子洋
(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘 要: 为增强电动负载模拟器的自适应能力以抵抗系统的非线性、时变参数及运动扰动的影响, 提出利用小脑模型神经网络 (CMAC) 与 PD 的并联进行控制与调节的控制方法。利用 PD 控制保证系统的初始稳定性, 在小脑模型神经网络引入速度信号和误差信号构成二维参考输入, 使系统具有很好的自适应消扰能力, 减小了多余力矩的影响。仿真证明了该方法的可行性和有效性, 收到了很好的控制效果。

关键词: 电动负载模拟器; 神经网络控制; 智能 PD; 多余力矩

中图分类号: V271.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2009)09-0089-03

CMAC Neural Network Control on Electrical Load Simulator

LIU Weijie, WANG Zhisheng, ZHEN Ziyang

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

Abstract: A new control structure is presented for load simulator to improve its adaptability and robustness to the influence of nonlinear, time-varying parameters, in which the Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC) neural network is adopted together with PD controller. The CMAC can deal with dynamic problem, which is used to identify the generalized inverse model, and the nonlinear problem will be solved properly. The neural network PD controller is designed by requirement for steady. The speed and error signals are taken as reference inputs of the CMAC neural network, which improves the system's robustness to the influence of extraneous torque. The simulation, which has a good control effect, proved the feasibility and robustness of the method.

Key words: motor-drive load simulator; neural network controller; intelligent PD; extraneous torque

0 引言

负载模拟器是半实物仿真实验室中模拟无人机等飞行器在飞行中舵面所受空气动力载荷的重要设备。对于被动式伺服加载系统来说, 最大的困难是如何有效的消除多余力矩影响。目前克服多余力矩的方法主要是利用结构不变性原理^[1-3], 由于结构不变性原理只对低频段加载的补偿效果较好^[4], 随着加载频率的提高, 补偿多余力矩的效果只会越来越差^[4, 10-11]。CMAC 网络是 J. S. Albus 提出的一种模拟人类小脑学习结构的小脑模型关节控制器 (cerebellar model articulation controller), 具有学习速度快、不存在局部最小点

的特点。文献 [5] 提出了用 CMAC 神经网络复合控制电动负载模拟器的方法, 但克服多余力矩还是利用结构不变性原理, 必然不能达到满意的效果。本文提出了一种基于 CMAC 神经网络和传统 PD 控制的复合控制, 利用前馈消除由角位移引起的线性定常多余力矩, 利用神经网络消除非线性等因素引起的多余力矩, 因此采用前馈校正来设计定常补偿网络来消除多余力矩的定常部分, 采用神经网络来设计自适应控制校正部分, 加强系统的非线性控制能力, 提高系统的鲁棒性。

1 负载模拟器

负载模拟器的机械结构如图 1 所示, 左侧是一个电动加载系统, 执行机构为力矩电机; 右侧为加载对象, 二者通过力矩传感器刚性连接。在动态加载实验中, 被加载对象做主动运动, 加载系统跟随加载对象运动, 同时进行力矩加载。被加载对象一边根据位置伺服系统的指令信号转动, 一边承受加载系统施加的转矩负载。因此, 对于位置伺服系统来说, 加载系统的转

收稿日期: 2008-09-27

修回日期: 2008-10-29

基金项目: 国家自然科学基金 (60874037); 教育部博士点基金 (20070287050)

作者简介: 刘伟杰 (1981—), 男, 山东平度人, 硕士生, 研究方向为智能控制与检测技术。E-mail: lwjnuaa@qq.com

矩输出是一个很强的干扰;同理,对于加载系统来讲,动态加载时,位置伺服系统的运动也是一个强大的扰动,将会严重影响相互作用的两个系统。这也是电动加载伺服系统和其他伺服系统的主要区别。

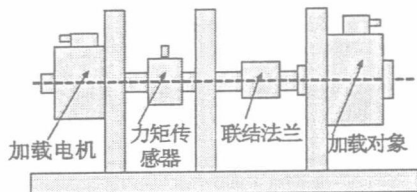


图 1 电动伺服加载系统执行机构示意图

Fig 1 Structure of electrical load simulator

电动负载模拟器多余力矩的产生是由于舵机角位移变化引起,在启动过程、正常运行和换向过程中均会产生多余力矩。这里所说的多余力矩是指负载模拟器力矩指令输入为 0,舵机按照自身规律运动时负载模拟器的力矩输出^[2]。负载模拟器的控制框图如图 2 所示。

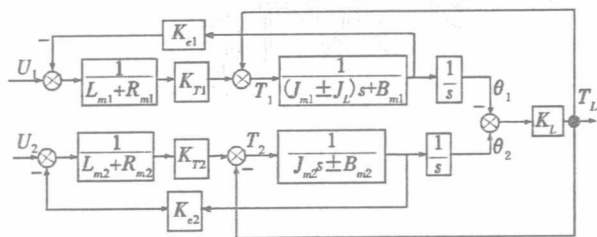


图 2 负载模拟器的数学模型

Fig 2 Model of electrical load simulator

由模型得系统的传递函数为

$$T_L = \frac{K_{T2} K_L \cdot U_2(s) - G_2(s) \theta_1(s)}{D(s)} \quad (1)$$

$$G_2(s) = K_L [L_{m2} J_{m2} s^3 + L_{m2} B_{m2} J_{m2} s^2 + (R_{m2} B_{m2} + K_{T2} K_L) s]$$

$$D(s) = L_{m2} J_{m2} s^3 + (L_{m2} B_{m2} + R_{m2} J_{m2}) s^2 + (R_{m2} B_{m2} +$$

$$K_{T2} K_L + L_{m2} K_L) s + R_{m2} K_L$$

式中: U_1 为电机电枢电压 (V); L_{m1} 为电机回路总电感 (mH); R_{m1} 为电机的回路总电阻 (Ω); K_{e1} 为电机反电动势常数 ($V \cdot s/rad$); K_{T1} 为电机转矩系数 (Nm/A); J_{m1} 、 J_L 分别为电机和加载对象的转动惯量 ($kg \cdot m^2$); B_{m1} 为电机阻尼系数 ($Nm \cdot s/rad$); T_L 为加载电机的输出转矩 (Nm); K_L 为力矩传感器的扭转刚度 (Nm/rad)。

目前,基于结构不变性原理的前馈补偿是对加载对象的角位移补偿^[2]和加载电机的角速度补偿^[3],但是角位移补偿要实现高次微分,极易放大噪声,降低补偿效果;对加载电机的角速度补偿则忽略了加载力矩引起的角速度^[4],当输入信号频率升高时对多余力矩的补偿效果必然不能令人满意。

2 小脑模型神经网络 (CMAC)

小脑模型神经网络是一种前馈神经网络,由两个基

本映射表示输入-输出之间的非线性关系,结构见图 3。

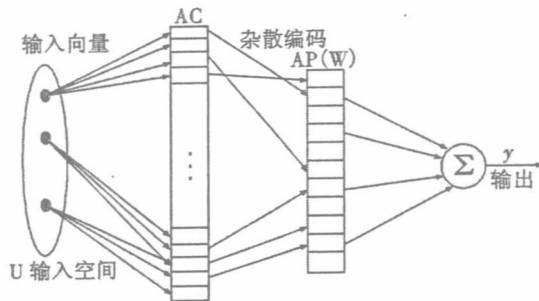


图 3 小脑模型神经网络 (CMAC)

Fig 3 Model of CMAC

概念映射是从输入空间 U 到概念存储器 AC 的一个映射,设 n 维输入向量为: $u_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in}]^T$ 量化编码以后变为 $[u_i]$, 将其映射到 AC 中的 c 个存储空间 (c 为二进制非零单元的数目)。映射后的向量可以用下式表示:

$$R_i = S([u_i]) = [s_1([u_i]), s_2([u_i]), \dots, s_p([u_i])]^T \quad (2)$$

式中: $s_j([u_i]) = 1, j = 1, 2, \dots, c$ 定义为泛化常数。

实际映射是由概念存储器 AC 的 c 个单元,用杂散编码技术,映射到实际存储器 AP 的 c 个单元。 c 个单元中存放着相应的输出值,则网络的输出为 AP 中 c 个单元的权值之和。单输出时,

$$y = \sum_{j=1}^c w_j \quad (3)$$

式中, $w_p = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_c]^T$ 。

CMAC 采用 δ 规则调整权值,权值调整指标为

$$E = 1/2c \cdot (e(t))^2 \quad (4)$$

式中, $e(t) = r(t) - y(t)$ 。

3 复合控制器的设计

对于负载模拟器动力机构来说,系统的输出力矩是控制电压所控制的输出力矩和舵机角速度引起的多余力矩叠加的结果。神经网络必须能够从输入中获取足够多的被控系统信息,这样才能保证整个系统的稳定和高性能。非线性调节器控制方案正是做到了及时获取系统输出和指令的信息,才能做到同时提高系统跟踪的精度、快速性和鲁棒性。考虑到电动负载模拟器最强的外部干扰,即舵机的运动,取输入力矩和舵机角速度 (或其替代信号) 组成二维输入。CMAC 与 PD 复合控制结构图如图 4 所示。该系统通过 CMAC 和 PD 的符合控制实现前馈反馈控制。

CMAC 采用有导师的学习算法。每一控制周期结束时,计算出相应的 CMAC 输出 $u_n(k)$, 并与总控制输入 $u(k)$ 比较,修正权值,进入学习过程。该系统的算法:

$$u_r(k) = \sum_{i=1}^c w_i a_i \quad (5)$$