

中国科学技术大学

工程硕士研究生学位论文

开题报告

论文题目：基于表面肌电的神经调节
通气辅助系统设计及实现

学 生 姓 名：李遥

学 生 学 号：SA22219064

学 校 导 师：张旭

实 践 导 师：汪孔桥

领 域（代码）：085400

研 究 方 向：医疗电子

所 在 单 位：微电子学院

中国科学技术大学研究生院

填表日期：2023 年 12 月 10 日

说 明

1. 工程硕士学位论文的开题报告是保证论文质量的一个重要环节，为了加强对工程硕士研究生培养的过程管理，规范其学位论文的开题报告，特制此表。
2. 工程硕士学位论文开题报告，应该在工程硕士学位授予点或培养单位组织的学术报告会上报告，听取意见，论证后再填写此表。
3. 此表一式两份经导师和培养单位负责人签字后，交培养单位研究生教学管理办公室存档。
4. 工程硕士研究生在申请学位论文答辩时，必须提交该学位论文开题报告。

一、 简况

研究生简况	学 号	SA22219064		姓 名	李遥		姓名拼音	Li Yao	
	性 别	男	身份证号	622102200004179637			出生年月	2000 年 4 月	
	工程领域	电子信息			研究方向		医疗电子		
	入学时间	2022 年 9 月		录取方式	联考 <input checked="" type="checkbox"/> 统考 <input type="checkbox"/> 自考 <input type="checkbox"/>		培养方式	<input checked="" type="checkbox"/> 脱产 <input type="checkbox"/> 不脱产	
	本科毕业时间		2022 年 6 月			本科毕业学校	合肥工业大学		
论文类型与性质	名称	中文	基于表面肌电的神经调节通气辅助系统设计及实现						
		英文	Design of neurally adjusted ventilatory assist system based on surface electromyogram						
	类别	1. 技术攻关研究√ 2. 工程项目策划 3. 工程设计或技术改造 4. 新工艺、新材料、新设备、新产品的研制与开发							
	形式	1. 工程设计 2. 研究论文√							
性质	1. 应用技术研究√ 2. 技术开发								
论文内容和意义	摘要	膈肌肌电（Diaphragmatic electromyographic ,EMGdi）包含了人体呼吸信息的重要电生理信号，可以被用作呼吸机触发。通过表面电极采集膈肌肌电相比于食道采集更加无创方便，但有用信息更容易被噪声淹没。目前技术手段无法满足对于表面膈肌肌电信号的提取，所以主流方法还是从食道采集。为了无创、便捷地获取人体呼吸相关信号，本文设计了一套基于表面肌电的神经调节通气辅助系统，运用实验室自研电生理信号采集设备，获取临床数据，并利用盲源分离的思想，使用一套基于逐步独立分量剥离的呼吸信号提取算法，从高噪声的表面电生理信号中提取理想的呼吸源信号。在此基础上，本研究进一步进行在线临床验证，通过使用硬件对算法进行加速，从而在临床案例上实现高实时性的呼吸源信号提取。经验证，本研究所采集方案与算法框架能够较好地临床状况下提取呼吸相关信号。							
	主题词	主题词数量不多于三个，主题词之间空一格（英文用“/”分隔）							
		中文	表面膈肌肌电 盲源分离						
	英文	surface diaphragmatic electromyogram/blind source speration							

二、选题依据

1. 阐述该选题的研究意义，或工程设计的价值和意义，国内外概况和发展趋势，选题的先进性和实用性，技术难度及工作量。

在临床操作中，机械通气的一个关键方面是准确识别和量化患者的自主呼吸力。传统方法采用流量和压力测量来实现此目的，但吸气肌收缩产生的压力必须对抗气道阻力和肺泡内源性呼气末正压(PEEPi)后，才能在气道产生触发呼吸机的流量或压力变化，因此，从吸气肌收缩到气道产生流量或压力变化存在一定的延迟，导致呼吸机送气的时刻比患者实际吸气时刻会相对滞后。相比之下，人体呼吸时膈肌产生的肌电信号(EMGdi)比流量和压力信号更早出现，并受到较少来自肺部和气道疾病等因素的干扰[1]。作为主要的呼吸肌群之一，膈肌在呼吸过程中负责 60%-80%的呼吸运动，通过进一步处理 EMGdi，可以得到膈肌电活动(EAdi)曲线，它在触发和调节呼吸机与人类呼吸协同方面起着重要的作用[2]。近年来，一种神经调节通气辅助((Neurally Adjusted Ventilatory Assist, NAVA) [3]的呼吸机已经能够利用 EAdi 来控制呼吸机加压的时间和水平。在这个过程中，采集到的 EMGdi 信号的质量和去噪效果将显著影响 EAdi 导出参数的可靠性[4]。

采集 EMGdi 有两种主要方法。一种方法是使用带有电极的鼻胃管从食道获取 EMGdi[5]。它不仅会给患者带来不适，导致出血和呕吐等不良反应，而且有严格的使用限制，容易受环境制约[6]。另一种方法是通过表面电极从肋骨处皮肤表面采集 EMGdi[7]。然而从体表获取的 EMGdi 不仅极其微弱，而且往往容易受到各种干扰和噪声的影响，例如心电(ECG)干扰、电极运动伪影[8]，目前的技术手段都不能从中提取出有效的呼吸信号。因此，尽管存在局限性，从食道收集 EMGdi 信号仍然是市场上 NAVA 呼吸机中主要使用的方法。

心电干扰是影响表面采集的 EMGdi 的一个巨大因素。从胸部表面电极采集的电生理信号中，ECG 信号的幅值往往是 EMGdi 信号的数倍，淹没了原始信号中包含的有用的呼吸相关的信息[9]。在目前常用的处理算法中，高通滤波器是一种简单的方法。然而，ECG 信号的能量主要集中在 1-50Hz 的频率范围内，而 EMGdi 的主要功率谱范围为 20-100Hz。因此，仅依靠传统的高通滤波器或带通滤波器去除心电图信号，重叠的频谱会导致 EMGdi 信号的严重损失有效信息[10]。Yacoub 等人[11]使用了最小均方算法(LMS)来从 EMGdi 信号中去除心电干扰，这种方法需要使用额外的电极记录心电图信号作为先验信息。Jonkman 等人[12]提出了一种基于单通道数据的估计并削减心电方法，利用事先确定的阈值来估计心电图波形，并将其从原始信号中减去。许多研究人员使用了基于小波的方法，如小波阈值法[13]和基于小波的自适应滤波器[14]。这些方法都适用于单通道数据，并对获取先验信息有一定要求。

电生理信号的本质是人体不同源产生的电信号的叠加，符合盲源分离模型，因此在处理电生理信号时，一种常用的方法使用盲源分离算法。Alty 等人[15]将传统的 FastICA 算法应用于四通道 EMGdi 信号以去除心电干扰，但是其去除结果不完全，直观效果不好，也没有给出定量评价标准。FastICA 还可以与其他技术如小波分析结合，以去除心电干扰[16]。大多数基于 ICA 的方法将受原始信号视为瞬时混合模型，不考虑心电图波形在不同通道上的变化，导致降噪效果差。除此以外，由于心电信号幅度较大，在没有约束条件的情况下，盲源分离算法容易收敛到较大幅度的源上，这也导致传统盲源分离算法在提取呼吸相关的源信号时效果并不理想。

针对以上的技术缺陷，本文首先制定出了一套适用于神经调节辅助通气的无创电生理信号采集方案；同时，采用基于逐步独立分量剥离的呼吸信号提取算法，从多通道的表面肌电信号中，提取出呼吸相关的曲线；考虑到临床运用，将上述算法改进为在线算法，并结合硬件加速，验证其在临床的使用效果，为医生实施临床诊断以及呼吸监测提供重要的信息，证明了选题的先进性和实用性。

2. 主要参考文献（列出作者、论文名称、期刊名称、出版年月）。

1. Hutten, G.J., et al., *Relative impact of respiratory muscle activity on tidal flow and end expiratory volume in healthy neonates*. 2008. **43**.
2. Dreyfus, L., et al., *Respiratory physiology during NAVA ventilation in neonates born with a congenital diaphragmatic hernia: The "NAVA-diaph" pilot study*. *Pediatr Pulmonol*, 2023. **58**(5): p. 1542-1550.
3. Kallio, M., et al., *Neurally adjusted ventilatory assist (NAVA) in pediatric intensive care--a randomized controlled trial*. *Pediatr Pulmonol*, 2015. **50**(1): p. 55-62.
4. Li, S.-M., et al., *A DENOISING METHOD OF DIAPHRAGM ELECTROMYOGRAM SIGNALS BASED ON DUAL-THRESHOLD FILTER*. 2022.
5. Sinderby, C.A., et al., *Enhancement of signal quality in esophageal recordings of diaphragm EMG*. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md. : 1985), 1997. **82**(4): p. 1370-1377.
6. Kusche, R., et al., *A Multichannel EMG System for Spatial Measurement of Diaphragm Activities*. *IEEE Sensors Journal*, 2022. **22**(23): p. 23393-23402.
7. Gu, X., et al., *Evaluation of Correlation Between Surface Diaphragm Electromyography and Airflow Using Fixed Sample Entropy in Healthy Subjects*. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2022. **PP**: p. 1-1.
8. Kusche, R. and M. Ryschka, *Respiration Monitoring by Combining EMG and Bioimpedance Measurements*. 2019. p. 847-850.
9. Estrada, L., et al. *Evaluation of Laplacian diaphragm electromyographic recording in a dynamic inspiratory maneuver*. in *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2014.
10. Luo, G. and Z. Yang, *The application of ECG cancellation in diaphragmatic electromyographic by using stationary wavelet transform*. *Biomedical Engineering Letters*, 2018. **8**(3): p. 259-266.
11. Yacoub, S. and K. Raoof, *Noise Removal from Surface Respiratory EMG Signal*. 2008. **38**.
12. Jonkman, A.H., et al., *Estimated ECG Subtraction method for removing ECG artifacts in esophageal recordings of diaphragm EMG*. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2021. **69**.
13. Wu, F.-Y., K. Yang, and Z. Yang, *Compressed Acquisition and Denoising Recovery of EMGdi Signal in WSNs and IoT*. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018. **14**(5): p. 2210-2219.
14. Zhan, C., L.F. Yeung, and Z. Yang, *A wavelet-based adaptive filter for removing ECG interference in EMGdi signals*. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2010. **20**(3): p. 542-549.
15. Alty, S.R., et al., *Denoising of diaphragmatic electromyogram signals for respiratory control and*

diagnostic purposes, in *2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2008. p. 5560-5563.

16. Wu, F.-Y., F. Tong, and Z. Yang, *EMGdi signal enhancement based on ICA decomposition and wavelet transform*. *Applied Soft Computing*, 2016. **43**: p. 561-571.

三、课题内容及具体方案

拟采用的设计方法，技术路线，实验方案的可行性分析。

设计方法：

1. 面向呼吸监护的无创电生理信号采集方案设计

本研究采用实验室自主研发的阵列式表面电生理采集设备，采集受试者呼吸相关的电生理信号，设计标准化的数据采集流程和信息记录方案，以减少受试者个体差异对信号分析的影响。

2. 基于逐步独立分量剥离的呼吸信号提取方法研究

针对采集到的表面电生理信号，本研究设计了一个基于先验约束的逐步独立分量剥离的呼吸信号提取算法，目标是从含有大量噪声与伪迹的表面电生理信号中有效提取出呼吸相关的信息，进而获得进行呼吸监测的重要指标。算法的核心思想是利用盲源分离算法提取出的呼吸相关的先验信号，运用约束性快速独立分量分析（Constrained FastICA）与逐步剥离策略，提取出与呼吸相关性最高的信号。在该算法的基础上，我们能够准确计算呼吸频率与呼吸强度，为医生提供了宝贵的辅助诊断信息。

3. 呼吸信号提取算法的在线临床验证

针对上述呼吸信号提取算法，本研究设计了一个在线呼吸信号提取算法，包含了提取算法中的关键框架并符合临床使用的需求。在此基础上，将算法在硬件系统上进行验证并优化加速，使其能在低延迟的情况下无创、便捷、实时地提取受试者的呼吸信号，这对于临床实践中的呼吸监护具有重要意义。

技术路线：

1. 面向呼吸监护的无创电生理信号采集方案设计

根据人体呼吸运用膈肌发力的生理特点和临床实验需求，采用实验室自研的阵列式表面电生理采集设备，该设备具有安全无创、操作便捷、贴合度良好的特点，用于采集呼吸尤其是膈肌相关的电生理信号。我们使用 32 通道的柔性表面电极从受试者的右侧肋缘，也就是第八和第十根肋骨之间的区域采集高密度表面肌电。电极排布为 4×8 的阵列电极，如图 1(a)所示。每个电极圆片的直径为 2mm，电极间距为 4mm。

在使用酒精清洁皮肤后，将电极阵列贴在受试者的右侧肋骨下缘处，并使用一个 Ag-AgCl 电极作为参考电极贴在受试者胸口处，如图 1(b)所示。我们拟采集重症监护室（ICU）内有自主呼吸但无意识的病人的表面膈肌肌电信号（EMGdi），记录受试者的编号、年龄、病史等临床信息，采集过程中设备可实时显示 EMGdi 波形，同时运用呼吸监测仪或呼吸气流计同步记录受试者的呼吸气压信息，如图 1(c)所示。每位受试者完成 20 秒到 5 分钟的膈肌肌电信号采集。

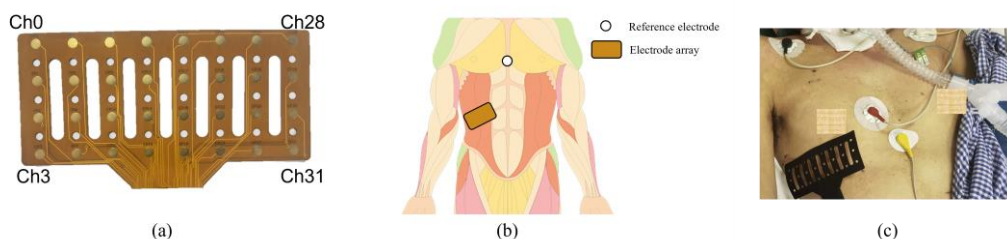


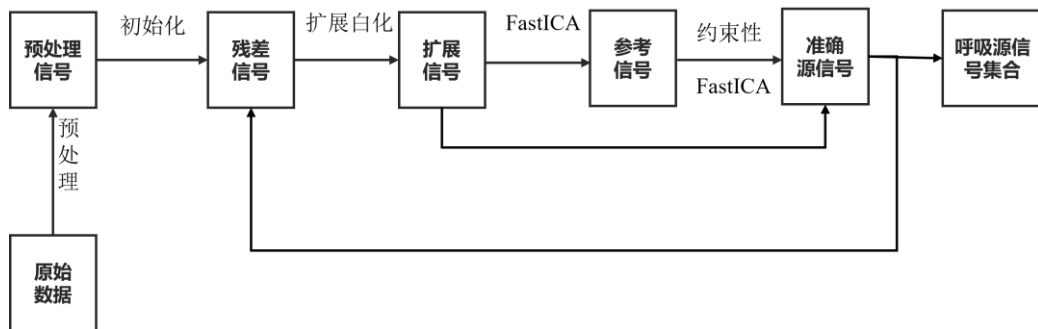
图 1 (a)所用 32 通道电极(b)高密度电极与参考电极位置示意图(c)临床实验示意图

2. 基于逐步独立分量剥离的呼吸信号提取方法研究

本研究旨在解决呼吸信号提取过程中的关键挑战，克服现有方法提取信息不完全，易受噪声干扰等缺陷，设计出一种基于逐步独立分量剥离的呼吸信号提取算法。步骤包含信号预处理、基于盲源分离的参考信号提取、呼吸信号的检验与提取三个步骤，具体流程如下所述：

- (1) 信号预处理：表面肌电信号幅值在 0 到 10mv 间，频率一般为 10-500Hz，较微弱的肌电信号需要经过放大滤波后才能接入模数（A/D）转换器进行模数转换，且由奈奎斯特采样定理可知，采样频率大于 2 倍原信号的最高频率时，抽样后的信号才能无失真地恢复到原信号。因此，我们的自研采集设备将表面肌电信号经过 64dB 的两级放大器 and 1-500Hz 的带通滤波器后，再由采样率为 1000Hz 的 A/D 转换器（RHS2132, Intan technology）进行采集并传输到上位机。考虑到 EMGdi 的主要频段为 10-120Hz，将采集到的信号使用一个 10-120Hz 的巴特沃斯滤波器进行滤波以消除低频和高频干扰，然后使用一个 50Hz 及其倍频的带阻滤波器去除工频及其谐波。
- (2) 基于盲源分离的呼吸信号提取：在本研究中，我们采集的生理信号被考虑基于卷积模型而不是瞬时混合模型。首先将残差信号初始化为原始预处理信号，并在拓展后的残差信号上运行 FastICA 算法，提取出不同的源。根据不同源之间特征的不同，筛选出理想的与呼吸相关的源。
- (3) 基于约束性逐步分量剥离的呼吸信号检测：由于盲源分离总是倾向收敛于较大的源，使用 FastICA 算法提取出的呼吸相关信号难免会包含残留的心电信号，这在临床应用上是一个很大的问题。为此，我们在算法中设计了约束性 FastICA（cfICA）来进行错误信号的检验与约束。将 FastICA 提取出的源作为参考信号，并重新利用参考信号与拓展后的残差信号执行 cfICA 算法。同时，为了避免 FastICA 的局部收敛，将 FastICA 得到的每一步结果从原先残差信号中减去从更新残差信号，这便是剥离步骤。

在这样设计的算法流程下，我们便能够在噪声与伪影干扰较大的情况下，从原始信号中逐步提取出精准可靠的呼吸相关源信号。算法的流程图如图 2 所示。



3. 呼吸信号提取算法的在线临床验证

临床呼吸监测算法的人机同步性要求决定了处理算法应该具有较高的实时性。本研究拟使用一种在线算法对呼吸信号，主要包括两个步骤：

- (1) 离线预处理阶段：首先利用上述呼吸信号提取算法对所得数据进行离线预处理。根据独立成分分析的原理，我们能在进行迭代计算的过程中得到一系列解混向量，对于同样的信号源，这些解混向量在在线分解时仍然适用。
- (2) 在线提取阶段：对于在线获取的数据，将离线预处理时所得到的解混矩阵作为先验数据，估计出所得数据的源信号，也就是我们想要获取的呼吸源信号。

同时，考虑到实时性，拟使用硬件资源,将算法转换为流水线运行，对算法进行加速，以加快临床操作时的数据处理速度。

可行性分析：

目前已利用实验室自研的阵列式表面电生理采集设备进行 12 组临床数据采集实验，并利用呼吸信号提取算法进行了一系列初步实验，根据所述方法的信号处理流程如图 3 所示。

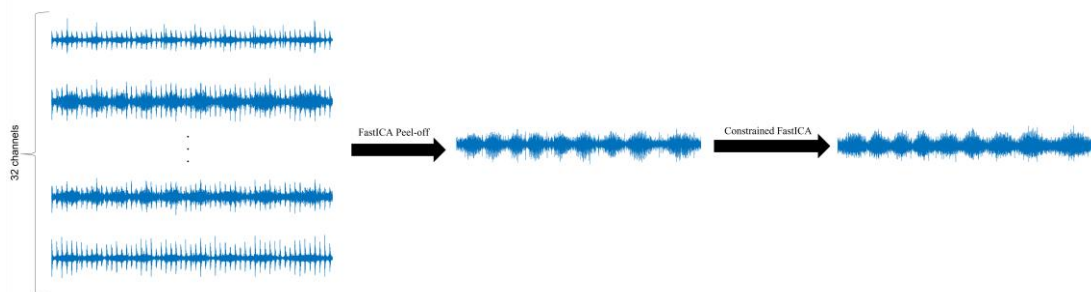


图 3

呼吸信号提取算法目前已在临床数据与仿真数据上进行验证，并得到了一些初步的结果。对于由纯净的心电干扰、纯净的仿真 EMGdi 以及噪声组成的合成信号，我们可以明显观察到频带偏移，如图 3 所示。同时，我们使用不同方法所提取信号与纯净仿真 EMGdi 之间的相关系数(CORR)、中值频率偏移(MVFR)，以及信号干扰比(SIR)这三个定量指标来说明所述方法的性能，结果如表 1

所示。这些结果能够说明所述方法对于表面电生理信号的处理具有提取准确率高，损失小，还原度高的特点。同时，Constrained FastICA 对于源信号的错误提取也有较好的纠正效果，如表 2 所示。

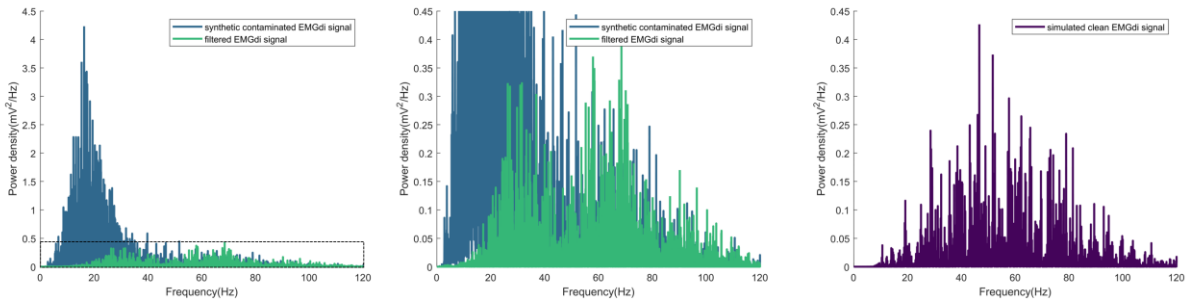


图 4 功率谱偏移示意图 (a)原始合成信号与所提取出信号的功率谱(b)原始仿真纯净 EMGdi 信号的功率谱

表 1. 不同方法的性能对比

指标	原始合成信号	带通滤波	自适应滤波	所提方法
SIR	-11.516	-3.936	-0.192	13.357
CORR	0.171	0.142	0.069	0.969
MVFR	44.035	13.467	45.900	2.078

表 2. 消去 Constrained FastICA 流程的结果对比

指标	FastICA	FastICA+cfICA
SIR	12.894	13.357
CORR	0.901	0.969
MVFR	2.102	2.078

考虑到呼吸信号提取的在线算法对实时性要求较高，使用硬件资源对其进行加速。考虑到数据量巨大，拟计划使用四块存储器用来存储不同步骤的输出信号，并使用流水线结构使算法并行运行，优化算法运行速度，目前已拟定所用算法硬件架构与拟采用流水线结构，如图 5 所示。这其中的关键步骤是解混矩阵的迭代计算。为了实现在线算法的流水线结构，提高系统的数据处理速度，整个信号处理的过程拟定划分为三个主要部分：adc 控制模块，数据处理也就是盲源分离框架算法执行模块 dac 控制模块。通过使用流水线架构的算法，能够实现连续的实时信号处理，如图 6 所示。本文拟采用流水线化算法结构框图如图 7 所示。

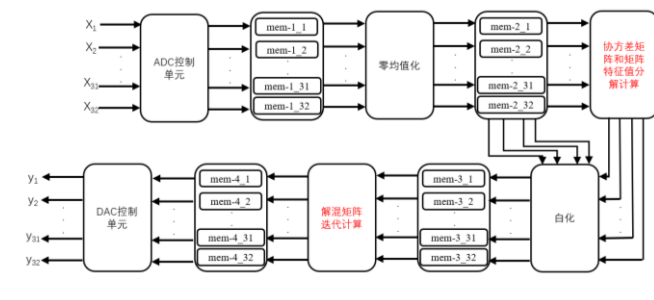


图 5 拟采用算法硬件架构图

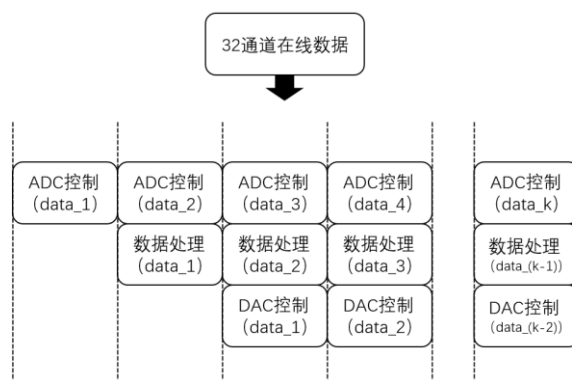


图 6 拟采用流水线化流程示意图

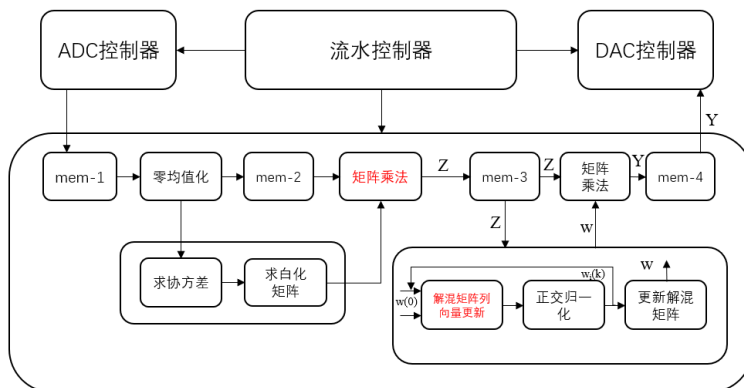


图 7 流水线化算法结构框图

四、工作进度的大致安排

应包括文献调研，工程设计，新工艺、新材料、新设备、新产品的研制和调试，实验操作，实验数据的分析处理，撰写论文等。

2022.9-2023.7 文献调研，完成电生理采集设备设计，采集受试者数据，并根据处理结果，改善实验方案和算法设计。

2023.7-2024.5 在已有实验基础上，探究并完善信号预处理方法，提高信号检测稳定性，提高系统性能。

2024.5-2024.12 优化算法框架，使用硬件资源进行算法临床在线验证。

2024.12-2025.5 梳理神经辅助呼吸系统整体框架，完成毕业论文，准备答辩。

预期成果

发表 SCI 论文一篇，发表专利一篇。

研究生本人签名：_____

年 月 日

中国科学技术大学研究生学位论文开题报告评审表

研究生姓名	李遥	学 号	SA22219064	所在院系	微电子学院
学科、专业	电子信息	研究方向	医疗电子	指导教师	张旭
拟撰写的学位论文题目		基于表面肌电的神经调节通气辅助系统设计及实现			
支持论文研究的科研项目		基于神经控制信息解码的四肢运动定量检测评价系统			
学位论文 是否保密	1. 不保密 (<input checked="" type="checkbox"/>)				
	2. 保密 () 密级: 绝密 ()、机密 ()、秘密 ()				
开题报告评审组成员名单					
姓名	职称	工作单位	签名		
沈斐	研究员	中科院上海微系统所			
王明会	副教授	信息学院 6 系			
丁卫平	副教授	信息学院 6 系			
陈香	副教授	微电子学院			
指导教师意见: <div style="text-align: right; margin-top: 100px;"> 指导教师签字: _____ 年 月 日 </div>					
评审小组意见: (是否通过开题论证, 是否需要修改等) <div style="text-align: right; margin-top: 100px;"> 评审小组组长签字: _____ 年 月 日 </div>					