

基于电流参数的导管泵的智能生理控制

卢源炜¹, 陈亚楠¹, 宁胤喆², 张一珂¹, 王芳群^{1*}

¹江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江

²江苏大学计算机科学与技术学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2026年8月12日; 录用日期: 2026年9月16日; 发布日期: 2026年9月24日

摘要

经过半个多世纪发展, 叶轮式人工心脏血泵在血液相容性、植入性和耐久性方面已逐步满足临床需求, 但患者术后舒适性及血泵流量对扬程变化的响应仍需改善。针对左心室辅助泵难以自动匹配右心室流量的问题, 本文提出基于神经网络自动检测血泵参数的仿生控制系统。系统根据电机功率和转速实时推算扬程, 基于扬程、流量与电压关系制定补偿控制策略, 并采用ML4425驱动芯片与STM32控制器完成硬件设计。结果表明, 与等电压或等转速控制相比, 该系统提高了流量对扬程变化的响应灵敏度, 为维持左右心室流量平衡提供了参考。

关键词

人工心脏泵, 无刷直流电机控制, 神经网络, 电路设计及仿真, 仿生控制

Intelligent Physiological Control of a Catheter Pump Based on Current Parameters

Yuanwei Lu¹, Yanan Chen¹, Yinzhe Ning², Yike Zhang¹, Fangqun Wang^{1*}

¹School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

²School of Computer Science and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: August 12, 2026; accepted: September 16, 2026; published: September 24, 2026

Abstract

After more than half a century of development, centrifugal artificial-heart blood pumps have

*通讯作者。

文章引用: 卢源炜, 陈亚楠, 宁胤喆, 张一珂, 王芳群. 基于电流参数的导管泵的智能生理控制[J]. 生物医学, 2026, 16(5): 932-941. DOI: 10.12677/hjbm.2026.165095

gradually met clinical requirements for hemocompatibility, implantability, and durability. However, postoperative comfort and the sensitivity of pump flow to head changes remain challenges. To address the difficulty of left ventricular assist pumps in automatically matching right ventricular flow this study proposes a biomimetic control system that detects pump parameters with a neural network. The system estimates head from motor power and speed, develops a voltage-compensation strategy from the head-flow-voltage relationship, and implements the hardware with an ML4425 driver and STM32 controller. Results showed higher flow sensitivity to head changes than equal-voltage or constant-speed control, providing a reference for maintaining left-right ventricular flow balance.

Keywords

Artificial Heart Pump, Brushless DC Motor Control, Neural Network, Circuit Design and Simulation, Biomimetic Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

人工心脏泵是心室辅助装置的核心部件, 涉及流体力学、机械、医学、电子、电磁学和控制学等交叉技术。叶轮式离心泵具有结构紧凑、血液相容性较好和效率较高等特点, 已成为心脏泵研究与临床应用的重要方向[1]-[3]。

本文实验采用江苏大学生物医学工程研究所研制的叶轮式离心血泵。该泵采用泵机一体化结构, 电机转子与血泵转子共同带动叶轮旋转, 重量约 200 g, 最外圆直径为 40 mm, 既可植入体内, 也可置于体外[2]。

恒定转速控制难以适应患者静息、运动及病理状态下的动态需求, 可能造成过度卸载或流量不足。血泵电机电流与泵扭矩相关, 而扭矩受后负荷和转速共同影响, 因此电流参数包含血泵工作状态及其与循环系统交互的信息, 可用于无额外侵入式传感器的状态监测与智能控制。

1.2. 研究内容

本文围绕提高血泵流量对扬程变化的响应灵敏度, 依次完成基线性能测试与控制策略制定、神经网络训练样本采集、MATLAB 建模与训练、基于 STM32 和 ML4425 的硬件设计、压力反馈仿真及系统对比验证, 最终构建神经网络自动检测与压力反馈相结合的仿生控制系统。

2. 基于 MATLAB 的神经网络模型

2.1. 原理与模型结构

人工神经网络由大量神经元按拓扑结构连接而成, 通过调整连接权重学习输入与输出之间的非线性关系, 具有容错性强、并行处理、分布式存储和学习能力强等特点[4]-[7]。本文采用监督学习, 以电机运行参数为输入、血泵扬程为输出, 利用前馈网络完成软测量。单个神经元的计算关系如下:

$$\begin{cases} u_i = \sum_{j=1}^n w_j x_j - \theta_i \\ y_i = f(u_i) \end{cases}$$

网络训练阶段根据样本调整权重，工作阶段固定权重并对新输入给出预测。该模型以电机功率、转速等参数反映血泵工况，为压力反馈控制提供扬程估计。

2.2. 建模、训练与结果

训练样本来自叶轮泵测试系统：通过调节出口阀改变负载，记录不同转速下的电压、电流、转速和流量，筛选得到 143 组有效数据，完整样本表置于附录 A。数据经清洗和标准化后，采用 MATLAB 的 fitnet 建立单隐层前馈网络，训练集、验证集和测试集比例为 70%、15% 和 15%，并采用 Levenberg-Marquardt 算法和均方误差评价训练效果。

训练程序完成数据载入、网络初始化、反向传播、性能评估和训练曲线分析；验证集用于监控泛化性能并避免过拟合。

完整训练结果(训练次数及最小均方误差)置于附录 A。多次训练结果表明，隐含层取 6 个神经元时最小均方误差为 2947.3968，预测精度最高。由此建立了从电机运行参数到血泵扬程的映射，可为扬程的非传感器式检测提供反馈。

3. 血泵压力反馈仿生控制系统设计

3.1. 系统总体架构

系统以 STM32 为核心控制器，以 ML4425 完成无刷直流电机驱动，并集成电源管理、压力检测、电流检测、转速检测、控制算法和人机交互模块，形成分层的闭环控制架构。各模块通过标准化接口连接，硬件总体框图如图 1 所示。

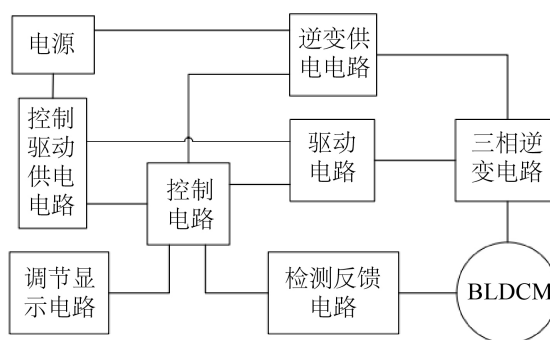


Figure 1. Hardware block diagram of the blood pump pressure-feedback control system

图 1. 血泵压力反馈控制系统的硬件框图

3.2. 驱动、电源与反馈检测

ML4425 集成无位置传感器控制、驱动和保护功能，采用三相全桥逆变拓扑，PWM 频率范围为 1~20 kHz。电源采用 12 V 输入、5 V 和 3.3 V 多级稳压，并配置自恢复保险丝、TVS 抑制和 LC 滤波。压力检测采用 MPXV5050GP 传感器，测量范围 0~50 kPa，输出范围 0.2~4.7 V；信号经 INA128 差分放大和 LM358 低通滤波后送入 STM32 的 12 位 ADC。

压力与输出电压关系式为：

$$V_{out} = V_{supply} \times (0.99 \times P + 0.04)$$

电流检测同时采集相电流和总线电流，ACS712 用于隔离式总线检测，检测范围为±5 A、灵敏度 0.185 V/A，并与 ML4425 和 STM32 构成硬件、软件双重过流保护。转速检测采用反电动势无位置检测与霍尔传感器备用方案，使用 M/T 法计算转速，控制范围为 1000~8000 rpm。

转速计算关系式为：

$$n = \frac{60}{P \times T}$$

4. 电路仿真与分析

4.1. 仿真平台与控制策略

仿真平台按照实际硬件搭建，以 STM32 和 ML4425 为核心，形成压力反馈闭环。仿真如图 2 所示。

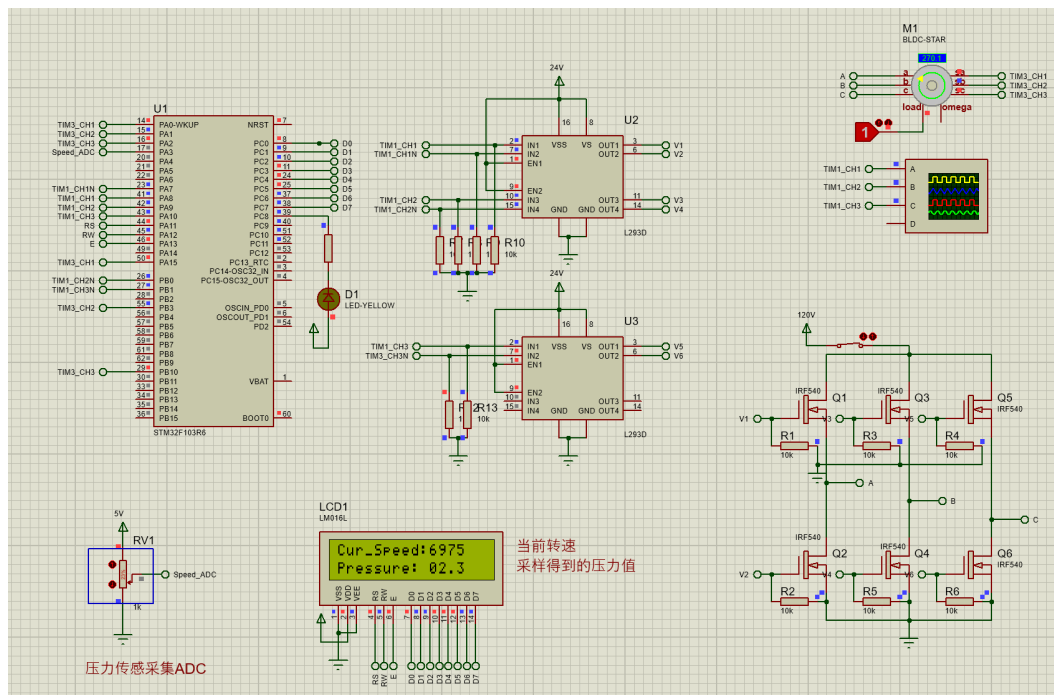


Figure 2. Simulation circuit of the blood pump pressure-feedback biomimetic control system

图 2. 血泵压力反馈仿生控制系统仿真电路

4.2. 仿真结果

仿真验证了电流参数与血泵输出流量之间的映射关系，频谱特征能够反映负载变化和异常状态[8]-[11]。压力反馈策略根据进出口压力差变化自适应调节电机转速，在体位改变、运动负荷和急性心衰等场景下能够及时调整血泵输出；电流、压力和转速多参数融合可在噪声条件下提高状态感知和流量控制能力[12]。

动态测试显示系统调节过程平稳，频率响应带宽达到 0.5 Hz；输入电压在 10~14 V 范围内变化时系统仍可稳定运行，过流、过压、电机堵转和传感器故障等异常能够触发保护机制。

5. 结论与展望

本文设计并验证了基于电流参数与神经网络检测的血泵智能仿生控制系统, 构建了以电机功率、转速为输入的扬程预测模型, 并结合 STM32 和 ML4425 硬件平台形成压力反馈控制回路。实验和仿真结果表明, 该系统提高了血泵流量对扬程变化的响应灵敏度, 为维持左右心室流量平衡提供了参考; 仿真结果也可为控制参数优化和渐进式启动提供依据[13] [14]。

本研究仍受特定实验泵样本、单一控制策略及生理参数不完整等因素限制。后续工作可通过迁移学习或引入泵体结构参数提高模型泛化能力, 融合模糊逻辑、自适应控制及更多临床监测指标, 进一步提升系统的鲁棒性和生理适应性。

参考文献

- [1] 王重庆. 人工器官与材料[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1989: 56-63.
- [2] 荆腾. 叶轮式心脏泵的仿生控制研究[D]: [博士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2011.
- [3] 钱坤喜, 郑铭, 茹伟民. 离心型人工心脏电动叶轮血泵的左心室辅助动物长期存活试验研究[J]. 中国生物医学工程学报, 1997(3): 15-20.
- [4] 张立明. 人工神经网络的模型及其在工程中的应用[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993: 3-13, 32-52.
- [5] 李孝安, 张小. 神经网络与神经计算机导论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995: 34-41.
- [6] 张际先, 宓霞. 神经网络及其在工程中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 1-54.
- [7] 胡守仁, 沈清, 胡德文, 时春. 神经网络应用技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1993: 3-19.
- [8] 查森. 叶片泵原理及水力设计[M]. 镇江: 江苏理工大学, 1992: 20-74.
- [9] 李艳芳. 基于 MATLAB 的永磁同步电机矢量控制系统的设计[J]. 价值工程, 2024, 43(12): 97-99.
- [10] Masuzawa, T., Taenaka, Y., Kinoshita, M., Nakatani, T., Akagi, H., Takano, H., *et al.* (1993) A Cardiac Output Estimation Model with a Neural Network-Toward Total Artificial Heart Control. *Proceedings of the 15th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, San Diego, 31 October 1993, 932-933. <https://doi.org/10.1109/iembs.1993.978940>
- [11] Wakisaka, Y., Okuzono, Y., Taenaka, Y., Chikanari, K., Masuzawa, T., Nakatani, T., *et al.* (1997) Noninvasive Pump Flow Estimation of a Centrifugal Blood Pump. *Artificial Organs*, **21**, 651-654. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.1997.tb03716.x>
- [12] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [13] 张崇巍, 李汉强. 运动控制系统[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2002.
- [14] 刘永飘. 基于 DSP 的永磁交流伺服控制系统开发[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2006.

附录 A 训练样本与训练结果

Table A1. Training samples used for the neural network

表 A1. 神经网络训练样本

序号	n	P	Q
1	3000	4.351406	5167
2	3000	4.0975	4667
3	3000	4.048672	4500
4	3000	3.970547	4333
5	3000	3.863125	4167
6	3000	3.775234	4000
7	3000	3.736172	3833
8	3000	3.634609	3667
9	3000	3.540859	3333
10	3000	3.529141	3167
11	3000	3.4725	3000
12	3000	3.443203	2833
13	3000	3.374844	2667
14	3000	3.326016	2500
15	3000	3.31625	2333
16	3000	3.247891	2167
17	3000	3.189297	1833
18	3000	3.16	1667
19	3000	3.081875	1500
20	3000	3.062344	1333
21	3000	3.023281	1172
22	3000	2.977773	833
23	3000	2.925625	667
24	3000	2.736172	0
25	3100	4.673672	5400
26	3100	4.439297	4858
27	3100	4.390469	4692
28	3100	4.302578	4525
29	3100	4.165859	4350
30	3100	4.117031	4167
31	3100	4.038906	4000
32	3100	3.999844	3825

续表

33	3100	3.87875	3491
34	3100	3.833828	3300
35	3100	3.765469	3133
36	3100	3.706875	2960
37	3100	3.687344	2790
38	3100	3.618984	2608
39	3100	3.570156	2425
40	3100	3.540859	2258
41	3100	3.462734	1917
42	3100	3.443203	1742
43	3100	3.394375	1567
44	3100	3.355313	1388
45	3100	3.335781	1222
46	3100	3.260977	875
47	3100	3.218594	700
48	3100	2.993984	0
49	3300	5.230313	5250
50	3300	5.093594	5083
51	3300	5.015469	4908
52	3300	4.87875	4717
53	3300	4.820156	4517
54	3300	4.732266	4333
55	3300	4.654141	4150
56	3300	4.556484	3950
57	3300	4.468594	3575
58	3300	4.41	3383
59	3300	4.341641	3200
60	3300	4.283047	3017
61	3300	4.234219	2833
62	3300	4.175625	2625
63	3300	4.0975	2442
64	3300	4.077969	2250
65	3300	3.980313	1883
66	3300	3.911953	1683
67	3300	3.882656	1500
68	3300	3.804531	1142

续表

69	3300	3.726406	763
70	3300	3.448086	0
71	3400	5.66	5450
72	3400	5.484219	5283
73	3400	5.367031	5092
74	3400	5.279141	4900
75	3400	5.210781	4691
76	3400	5.099453	4500
77	3400	5.044766	4300
78	3400	4.927578	4100
79	3400	4.839688	3708
80	3400	4.771328	3517
81	3400	4.702969	3325
82	3400	4.634609	3133
83	3400	4.546719	2950
84	3400	4.488125	2750
85	3400	4.429531	2517
86	3400	4.390469	2333
87	3400	4.292813	1958
88	3400	4.214688	1742
89	3400	4.175625	1555
90	3400	4.144375	1375
91	3400	4.107266	1183
92	3400	3.990078	787
93	3400	3.710195	0
94	3500	6.197109	5633
95	3500	5.943203	5467
96	3500	5.796719	5283
97	3500	5.66	5075
98	3500	5.630703	4860
99	3500	5.542813	4667
100	3500	5.406094	4450
101	3500	5.337734	4233
102	3500	5.230313	3850
103	3500	5.152188	3650
104	3500	5.044766	3458
105	3500	4.971523	3242

续表

106	3500	4.917813	3060
107	3500	4.868984	2833
108	3500	4.800625	2608
109	3500	4.742031	2417
110	3500	4.605313	2033
111	3500	4.536953	1808
112	3500	4.488125	1605
113	3500	4.468594	1437
114	3500	4.400234	1233
115	3500	4.302578	810
116	3500	3.959219	0
117	3700	7.359219	6017
118	3700	7.046719	5650
119	3700	6.75375	5450
120	3700	6.548672	5183
121	3700	6.421719	4992
122	3700	6.167813	4530
123	3700	6.060391	4125
124	3700	5.988125	3900
125	3700	5.904141	3700
126	3700	5.786953	3467
127	3700	5.738125	3275
128	3700	5.572109	2800
129	3700	5.386563	2158
130	3700	5.279141	1917
131	3700	5.181484	1517
132	3700	5.103359	1317
133	3700	5.025234	858
134	3700	4.654141	0
135	3900	8.697109	6450
136	3900	8.482266	6200
137	3900	8.277188	6000
138	3900	8.120938	5783
139	3900	7.867031	5533
140	3900	7.613125	5317
141	3900	5.943203	923
142	4000	9.077969	6217
143	4000	6.558438	955

Table A2. Training results with different numbers of hidden neurons
表 A2. 不同隐含层神经元数量下的训练结果

隐元数	训练次数	最小均方误差
3	17462	5622.4624
4	19475	3969.5987
5	12842	4637.5736
6	11468	2947.3968
7	14632	3918.8072
8	19583	3546.9454
9	12117	3023.6413
10	16332	3114.6502