



# 基于 AMESim 和 MATLAB 的液压调速回路 仿真实验教学研究

蒋 丹<sup>1</sup>, 赵雯婷<sup>1</sup>, 周兵源<sup>1</sup>, 付益路<sup>1</sup>, 郭 庆<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学 机械与电气工程学院, 成都 611731; 2. 电子科技大学 航空航天学院, 成都 611731)

**摘要:** 在液压与气动技术实验教学中, 为了让学生更加深入地了解液压调速回路的组成部分、工作原理以及回路系统的优缺点等, 在探究性小班教学中引入了 AMESim 仿真软件和 MATLAB 软件。学生基于 AMESim 软件对 3 种节流调速回路进行搭建、调试、运行及分析, 包括回路调速特性、供油压力变化、回路承受负值负载能力等, 同时将回路速度-负载特性 AMESim 仿真结果与 MATLAB 理论仿真结果进行对比。通过调速回路的直观模型和仿真结果的可视化研究, 引导学生对不同的液压与气动回路进行搭建和分析, 帮助学生加深对不同回路功能特点的理解和认识, 使得教学形式更加多样化。在实验教学中引入 AMESim 仿真软件, 可以提高学生理论联系实际的能力, 激发学生对液压传动知识的学习兴趣, 培养其专业能力和实践应用能力。

**关键词:** 液压传动; 节流调速回路; 仿真实验教学; AMESim; MATLAB

中图分类号: TH137.7

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220007

## Research on Simulation Experimental Teaching of Hydraulic Speed Control Circuits Based on AMESim and MATLAB

JIANG Dan<sup>1</sup>, ZHAO Wenting<sup>1</sup>, ZHOU Bingyuan<sup>1</sup>, FU Yilu<sup>1</sup>, GUO Qing<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** In the experimental teaching of hydraulic and pneumatic technology, AMESim simulation software and MATLAB software are introduced into the exploratory small class teaching to help students have a deeper understanding of the components, working principle and advantages and disadvantages of the hydraulic speed control circuits. Based on AMESim software, students can build, debug, run and analyze the three kinds of speed control circuits including characteristics of speed control, changes of supply pressure and ability of endurance of negative force. The comparisons between AMESim simulation results and MATLAB theoretical simulation results of speed-force characteristics are presented. And the visualization of intuitive model and simulation results can help students build other different hydraulic and pneumatic circuits, deepen their impression and understanding of the characteristics of the other circuits and make the teaching forms more diversified. Using AMESim software in experimental teaching can improve students' ability to integrate theory with practice, stimulate interest in learning hydraulic transmission knowledge and cultivate their professional ability and practical application ability.

**Key words:** hydraulic transmission; speed control circuits; simulation experimental teaching; AMESim; MATLAB

“液压与气动技术”是机械设计制造及自动化专业的一门专业课程<sup>[1]</sup>。传统教学方式通常是老师讲授元件及回路的组成、工作原理、特点等, 实验环节通常包括学生完成各种液压气动元件的拆装、设计与搭建液压气动回路实验等。然而, 学生对液压与气压传动的一些抽象公式的理解往往不够深刻<sup>[2-3]</sup>。因此, 在本课程的教学过程中,

重点讲解理论内容的同时, 还注重对学生理论联系实际的能力培养。随着计算机辅助教学<sup>[4]</sup>、探究性小班课堂教学趋势的兴起, 只有将专业软件的仿真实验融于教学中, 才能不断地创新、发展、改革教学方式以适应时代的变化, 使得教学形式更加多样化<sup>[5-6]</sup>。

AMESim 是一款多学科领域的仿真软件<sup>[7-8]</sup>,

收稿日期: 2021-12-29; 修回日期: 2023-01-08

基金项目: 电子科技大学液压与气动技术课程探究性小班项目(2018XBJX0188); 四川省科技计划项目(2022YFG0341)。

作者简介: 蒋丹(1988-), 博士, 副教授, 主要从事流体传动与控制方面的研究。E-mail: jdan2002@uestc.edu.cn

它操作简单、易于学习、功能强大，因而在工程界早已成为一种建模和仿真的标准软件<sup>[9-12]</sup>。节流调速回路的理论分析是液压与气动技术课程的重点，学生可以基于 AMESim 软件平台搭建节流调速回路的仿真模型，在仿真过程中对节流调速回路的调速特性进行进一步深入研究。

本文指导学生采用 AMESim 软件分别对 3 种节流调速回路系统进行仿真，并将结果与 MATLAB 软件的理论仿真结果进行对比。通过这一探究性实验教学环节，帮助学生对比分析 3 种节流调速回路的结构特点、工作原理与回路特点，同时可以使学生尽快掌握 AMESim 仿真软件的使用方法。

## 1 节流调速回路工作原理

节流调速回路的工作原理是通过改变回路中流量控制元件通流截面的大小来控制流入执行元件的流量，以调节其运动速度<sup>[13]</sup>。

### 1.1 3 种节流调速回路结构

节流调速回路因流量控制阀的位置不同控制流入执行元件流量的方式是不同的。根据流量控制阀在节流调速回路中的位置分为进油节流调速回路、回油节流调速回路和旁路节流调速回路 3 种<sup>[14-16]</sup>，具体回路结构如图 1 所示。

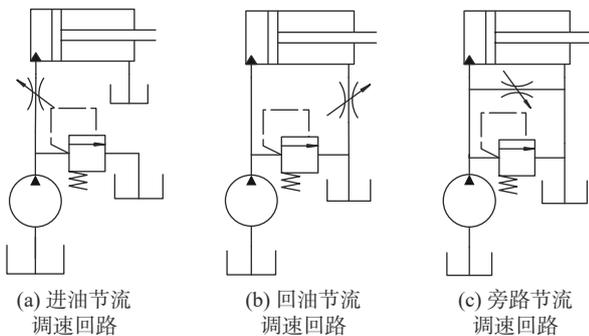


图 1 3 种节流调速回路原理图

### 1.2 3 种节流调速回路调速特性

在液压系统中执行元件一般为液压缸，工作时运动速度的主要影响因素为输入的流量和本身的参数。当不考虑泄漏等因素时，液压缸的运动速度<sup>[17]</sup>为：

$$v = \frac{q}{A} \quad (1)$$

式中， $v$  为活塞杆的运动速度， $q$  为液压缸的输入流量， $A$  为液压缸输入端的有效作用面积。

由此可知，控制液压缸中活塞杆的工作速度

可以通过控制输入到液压缸输入端的流量或者是改变液压缸输入端有效作用面积来实现。

进油节流调速回路节流阀控制进油路的流量来调节液压缸运动速度，定量泵输出的多余的液压油通过溢流阀回流到油箱，同时溢流阀也起到回路保护的作用，液压缸平衡方程：

$$p_1 A_1 = p_2 A_2 + F \quad (2)$$

式中， $p_1$  为液压缸进油腔的压力， $A_1$  为液压缸进油腔有效作用面积， $p_2$  为液压缸回油腔的压力， $A_2$  为液压缸回油腔有效作用面积， $F$  为进油节流调速回路外负载。

已知条件： $p_2=0$ ，故  $p_1=F/A_1$ ，可以得到：

$$q_1 = K A_T \Delta p^m = K A_T \left( p_p - \frac{F}{A_1} \right)^{0.5} \quad (3)$$

式中： $K$  为常数； $A_T$  为节流阀的过流面积， $A_T = \pi d^2/4$ ； $p_p$  为泵的出口压力； $m$  取 0.5，这里的节流阀可视为薄壁小孔。

可得进油节流调速回路中活塞杆运动速度<sup>[18-19]</sup>为：

$$v_{\text{进}} = \frac{q_1}{A_1} = \frac{K A_T}{A_1} \left( p_p - \frac{F}{A_1} \right)^{0.5} \quad (4)$$

大多数教材中只给出了进油节流调速回路中活塞杆运动速度的推导过程。因此，在探究性小班教学中，通过对进油节流调速回路的理论分析，引导学生进一步推导出回油节流调速回路和旁路节流调速回路的活塞杆运动速度的表达式：

$$v_{\text{回}} = \frac{q_2}{A_2} = \frac{K A_T \left( p_p \frac{A_1}{A_2} - \frac{F}{A_2} \right)^{0.5}}{A_2} \quad (5)$$

$$v_{\text{旁}} = \frac{q_1}{A_1} = \frac{q_t - k_1 \left( \frac{F}{A_1} \right) - K A_T \left( \frac{F}{A_1} \right)^{0.5}}{A_1} \quad (6)$$

学生可以通过对式(4)~式(6)的对比，进而分析 3 种节流调速回路的影响因素。

## 2 节流调速回路 AMESim 仿真分析

### 2.1 AMESim 模型搭建

学生可根据节流调速回路结构和工作原理，利用 AMESim 软件搭建回路仿真模型。参考 3 种节流调速回路结构原理图(如图 1 所示)，在 AMESim 液压元件设计库中进行元件的选择和 3 种调速回路的搭建，如图 2 所示。

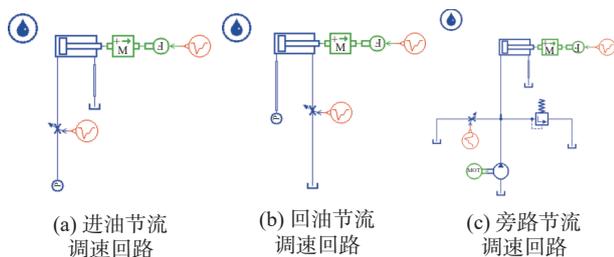


图2 3种节流调速回路AMESim模型

特别注意的是,在旁路节流调速回路模型搭建中,很多学生仍然采用恒压源,导致仿真无法进行,这主要还是基本概念不清晰。进油调速回路和回油调速回路由于在工作中的供油压力不随负载变化而变化,故称为定压式节流调速回路;而在旁路节流调速回路中,由于回路中的供油压力随负载的变化而变化,故称为变压式节流调速回路。

## 2.2 AMESim 参数设置

在完成草图搭建及子模型选择后,进行参数设定及仿真运行参数设定。对3种节流调速回路在固定载荷作用下的调速特性进行仿真分析。表1列出了一组学生的仿真参数,节流阀的开口大小 $d$ 根据给定信号进行调节。

表1 调速回路AMESim仿真参数

参数	数值
液压缸缸径/mm	25
活塞杆杆径/mm	12
液压缸行程/m	1
定量泵排量/ $\text{cc}\cdot\text{rev}^{-1}$	8
定量泵转速/ $\text{rev}\cdot\text{min}^{-1}$	1 500
进油回路外负载/N	3 000
回油回路外负载/N	3 000
旁路回路外负载/N	1 000
泵源压力/Pa	$98\times 10^5$
质量块/kg	0.01
旁路节流回路中溢流阀调定压力/Pa	$120\times 10^5$

## 2.3 AMESim 仿真结果分析

该组学生在进油节流调速回路中节流阀的阀开口孔径 $d$ 分别设定为0.3、0.5、0.7、0.9 mm,其仿真结果如图3所示。

回油节流调速回路的仿真数据设定和进油节流调速回路参数设定相同,其仿真结果如图4所示。

旁路节流调速回路由于调速方式与进油、回

油回路不同,设定节流阀开口孔径 $d$ 分别为1.0、1.5、2.0 mm,其仿真结果如图5所示。

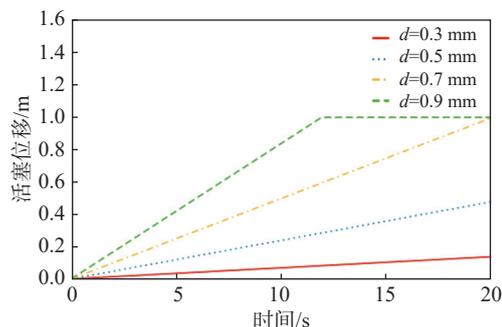


图3 不同节流阀开口的进油节流调速回路活塞位移曲线

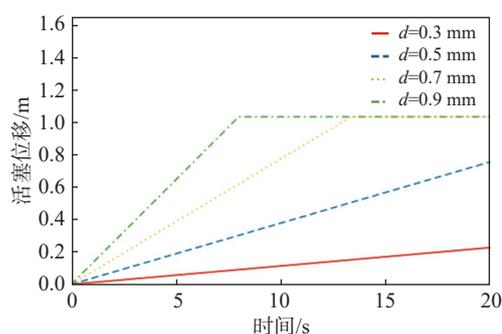


图4 不同节流阀开口的回油节流调速回路活塞位移曲线

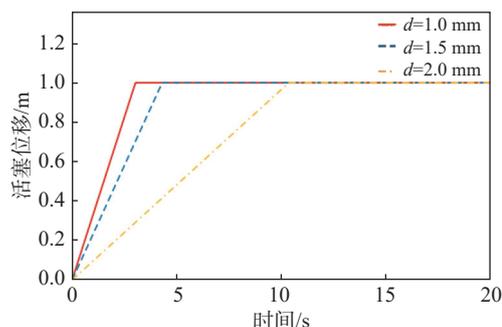


图5 不同节流阀开口的旁路节流调速回路活塞位移曲线

通过对比图3、图4和图5,进油节流调速回路和回油节流调速回路在相同实验条件下,回路的调速结果具有很大相似性;同时进油节流调速回路和回油节流调速回路速度控制阀开口越大,执行元件液压缸外伸速度越快,且回油节流调速回路活塞杆运行速度更快;而旁路节流调速回路与之相反,节流阀开口越大,调速回路的执行元件运动速度越慢。

在探究性小班教学中,允许学生进行探索研究,鼓励学生积极查找资料来解决各种技术问题。有一组学生就给出了3种回路中供油压力随负载变化的曲线对比图,如图6所示,进一步验证了定

压式节流调速回路(进油、回油节流调速回路)和变压式节流调速回路(旁路节流调速回路)的区别。

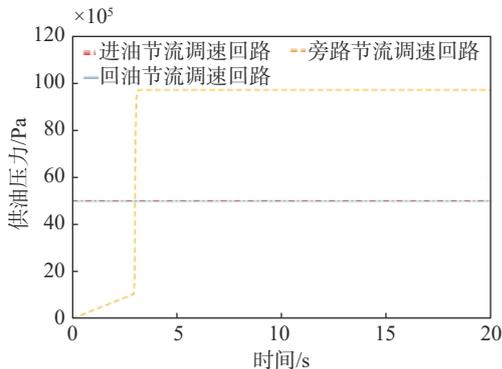


图 6 3 种节流调速回路供油压力变化曲线

还有一组学生对进油、回油节流调速回路的承受负值负载的能力进行了仿真分析, 如图 7 所示。验证了回油节流调速回路能够在负值负载下工作; 而进油节流调速回路由于回油腔没有背压, 因此不能在负值负载下工作。

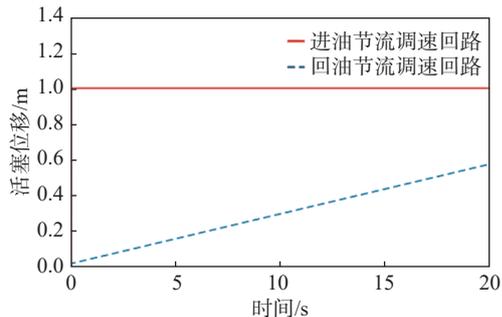


图 7 进油和回油节流调速回路在负值负载下活塞位移曲线

通过以上探究性仿真实验教学, 让学生直观认识 3 种节流调速回路的特点, 进一步引导学生分析其回路的区别及工程应用背景。

### 3 节流调速回路速度负载特性仿真结果

学生掌握了基于 AMESim 仿真软件分析 3 种节流调速回路的调速特性后, 引导学生尝试通过理论公式和 MATLAB 软件进行理论值的计算, 可以提高学生的自学能力和创新能力。

学生可根据式(4)~式(6), 利用 MATLAB 软件对 3 种节流调速回路进行仿真分析。同时, 在 AMESim 软件中负载质量块质量设定为 0.01 kg, 仿真得到进油、回油、旁路节流调速回路执行元件液压缸活塞的运动速度与外载荷的关系。表 2 列出了一组学生的仿真参数。

表 2 调速回路速度-负载特性 AMESim 仿真参数

仿真参数	数值
液压缸缸径/mm	32
活塞杆杆径/mm	16
液压缸行程/m	1
定量泵流速/(cc·rev <sup>-1</sup> )	18
定量泵转速/(rev·min <sup>-1</sup> )	1 000
进油回路外负载/N	0~3 550
回油回路外负载/N	0~3 550
旁路回路外负载/N	0~5 000
泵源压力/Pa	50×10 <sup>5</sup>
质量块/kg	0.01
旁路节流回路中溢流阀调定压力/Pa	120×10 <sup>5</sup>

进油、回油、旁路节流调速回路速度与外负载仿真结果对比分别如图 8~图 10 所示。图 8 和图 9 选取节流阀开口孔径分别为 0.5、0.7、0.9 mm。图 10 代表旁路节流调速回路节流阀开口孔径分别为 3.0、3.5、4.0 mm 时执行元件运动速度和外载荷的关系。通过对比可知, 进油、回油、旁路节流调速回路调速特性的 MATLAB 理论计算与 AMESim 仿真结果基本吻合。

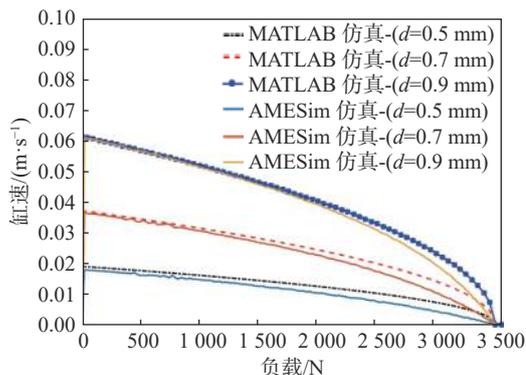


图 8 不同节流开口的进油节流调速回路速度-负载特性

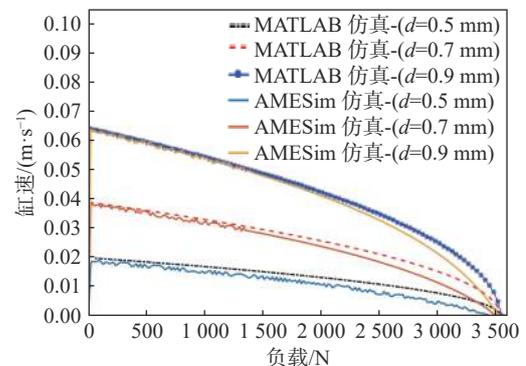


图 9 不同节流阀开口的回油节流调速回路速度-负载特性

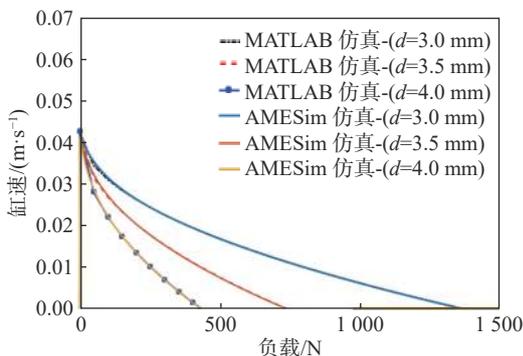


图10 不同节流阀开口的旁路节流调速回路速度-负载特性

通过图8、图9和图10的对比,引导学生分析3种节流调速回路速度负载特性的相同点、不同点及原因。从图8和图9中可以看出,当供油压力和液压缸缸径一定时,进油、回油节流调速回路的最大承载能力相等。前两种回路中节流阀开口孔径一定时,负载越大刚度越小,负载越小刚度越大,同时同一负载条件下节流阀开口孔径越大,速度刚度越低。从AMESim仿真结果看,回油节流调速回路启动时速度均出现短时间的震动现象,引导学生分析其原因。

从图10中可以看出旁路节流调速回路中节流阀开口孔径一定时,负载越大,速度刚度越大;负载越小,速度刚度越小。相同负载条件下,节流阀开口孔径越大刚度越大,这与前面两种回路的特性相反。

#### 4 教学过程设计与评价

液压与气动技术课程采用百分制,平时占25分、实验占25分、期末占50分。实验成绩考核根据学生提交的实验报告质量进行评定。在实验成绩评定过程中,提交的AMESim回路仿真实验报告占实验成绩的50%。

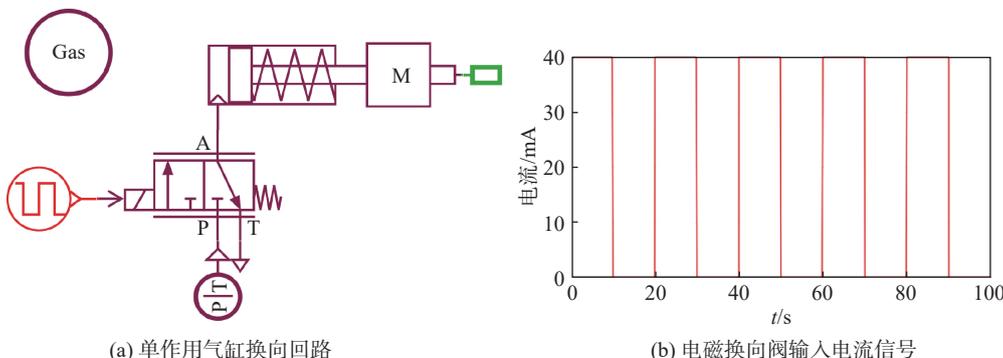
前几届学生的AMESim回路仿真实验主要基

于进油、回油、旁路节流调速回路的仿真。为了达到抛砖引玉的目的,目前这部分内容已经开放给学生,让他们通过学习这3个案例,去完成其他的回路仿真。提交的AMESim回路仿真实验报告按照分组完成,每组2名学生,不同回路的分组如表3所列。

学生提交的AMESim回路仿真实验报告如图11所示。学生针对不同的回路系统,基于AMESim仿真软件搭建不同的液压和气动回路,在仿真过程中掌握不同回路的结构特点和工作原理,进一步分析回路的特性,包括执行元件的运动过程、管路内流量和压力变化过程。

表3 不同回路的仿真内容

分组	回路仿真内容
第1组	液压调压回路
第2组	液压减压回路
第3组	液压卸荷回路
第4组	液压保压回路
第5组	液压变量泵-定量马达容积调速回路
第6组	液压定量泵-变量马达容积调速回路
第7组	液压变量泵-变量马达容积调速回路
第8组	液压差动连接回路
第9组	液压双泵供油回路
第10组	液压快慢速换接回路
第11组	液压两种工作速度换接回路
第12组	液压锁紧回路
第13组	液压多缸动作回路
第14组	气动方向控制回路
第15组	气动缓冲回路
第16组	单作用气缸速度控制回路
第17组	气动双向调速回路
第18组	气液联动回路
第19组	气动双手同时操作回路
第20组	气动安全回路



(a) 单作用气缸换向回路

(b) 电磁换向阀输入电流信号

图11 第14组学生提交的AMESim回路仿真实验报告

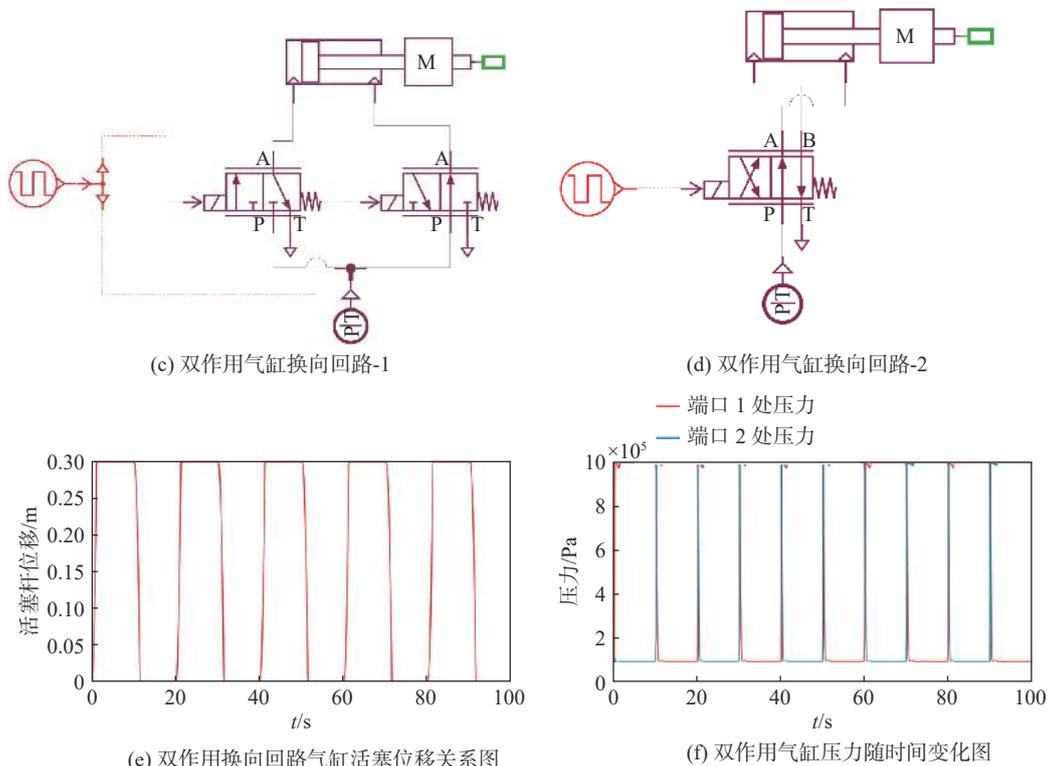


图 11 (续)

### 5 结束语

由于多数教材只定性地给出了 3 种调速回路特性曲线，深入地理解和掌握调速回路的相同点和不同点还需要学生动手动脑，通过具体的仿真实验来验证教材的知识点。调速回路的仿真过程起到了抛砖引玉的作用，更重要的是引导学生搭建不同的液压与气动回路，从不同回路仿真实验中得到回路特性曲线。最后通过 MATLAB 理论仿真结果对比分析验证两者的准确性，对不同回路的特性有更深入的了解。

“纸上得来终觉浅，绝知此事要躬行”，在液压与气动技术探究性小班教学中，通过引导学生运用 AMESim 仿真软件对不同液压与气动回路进行仿真分析，提高学生理论联系实际的能力，培养其专业能力和实践应用能力，同时能够运用本专业知识和工程技术，对流体传动领域的复杂工程技术问题进行综合分析。

### 参考文献

[1] 张俊俊, 兰若璇, 刘丽娟. “新工科”理念下的液压技术人才培养课程体系改革[J]. 高教研究, 2020(1): 52-55.

[2] 王威, 戴锦春, 巫世晶. AMESim在液压传动教学中的应用[J]. 液压气动与密封, 2014(10): 52-55.

[3] 蒋丹, 杨平, 王从岭. AMESim在《液压传动》实践教学中的应用[J]. 实验科学与技术, 2012, 10(2): 47-49.

[4] 刘亚丰, 余龙江, 卢伟群, 等. 教育信息化背景下虚拟仿真教学资源建设[J]. 实验科学与技术, 2018, 4(2): 195-198.

[5] 倪君辉, 詹白勺, 余伟平. 基于项目教学的液压与气压传动课程综合改革[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(11): 182-185.

[6] 刘洋, 倪亚玲, 吴婷婷. 虚拟仿真技术在机电一体化实验教学中的应用[J]. 实验科学与技术, 2016, 10(5): 11-13.

[7] 梁全, 谢基晨, 聂利卫. 液压系统Amesim计算机仿真进阶教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016, 1-3.

[8] CHEN J S, LIU X H, WANG T J, et al. Charging valve of the full hydraulic braking system[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(3): 1-11.

[9] LAI W B, LI D T, XIE Y H. Simulation and experimental study of hydraulic cylinder in oscillating Float-Type wave energy converter[J]. Polish Maritime Research, 2020, 27(2): 30-38.

[10] LI C S, LIU X H, WANG X, et al. Optimization of multi-way valve structure in digital hydraulic system of loader[J]. Energies, 2021, 14: 700-700.

[11] ZHOU W. Simulation of hydraulic system faults for marine machinery based on AMESim[J]. Journal of Coastal Research, 2019, SI(94): 357-361.

(下转第 97 页)