

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.033

基于 AMESim/Simulink 的碳纤维成型液压机三缸同步控制系统研究

李京¹, 马冲², 郭凡², 陆宝春¹

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210049;

2. 南通锻压设备如皋有限公司, 江苏 南通 226500)

摘 要:针对碳纤维成型液压机三缸不同步造成的碳纤维增强复合材料压缩性能、弯曲强度、疲劳强度等性能减低的问题,设计碳纤维成型液压机三缸同步控制系统,建立相应的数学模型;运用 AMESim/Simulink 进行联合仿真,分析三缸同步控制系统的动态特性。仿真结果表明:与 PID 控制相比,采用模糊 PID 自适应控制的阶跃响应时间缩短 7.36%,在指数负载力和随机负载力工况下,3 个液压缸的最大同步误差分别降低 44.6%、37.1%、10.7%、16.7%、31.3%、3.5%。

关键词:液压机;三缸同步;模糊 PID 自适应;AMESim/Simulink 联合仿真

中图分类号:TH137 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)04-0179-05

Research on Three-cylinder Synchronous Control System of Carbon Fiber Forming Hydraulic Press Based on AMESim/Simulink

LI Jing¹, MA Chong², GUO Fan², LU Baochun¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210049, China;

2. Nantong Forging and Pressing Equipment Rugao Co., Ltd., Nantong 226500, China)

Abstract: This study is aimed at the reduction in compressive properties, bending strength, fatigue strength, and other properties of carbon fiber reinforced composite materials caused by the non-synchronization of three cylinders in a carbon fiber molding hydraulic press. A three-cylinder synchronous control system for the hydraulic press is designed, according to which a corresponding mathematical model is established, co-simulation experiments are conducted using AMESim/Simulink, and analysis on its dynamics is made. The simulation results demonstrate that compared to traditional PID control, fuzzy adaptive PID control reduces the step response time by 7.36%, and decreases the maximum synchronization errors between hydraulic cylinders under exponential and random load conditions separately by 44.6%, 37.1%, 10.7%, 16.7%, 31.3%, and 3.5%.

Keywords: hydraulic press; three-cylinder synchronization; fuzzy adaptive PID; AMESim/Simulink joint simulation

0 引言

碳纤维增强复合材料因其具有强度高、比重小、耐疲劳和可塑性强等^[1]独特优势,在新能源汽车、轨道交通、航空航天等领域得到了广泛应用^[2],并已成为轻量化设计的发展趋势。随着碳纤维增强复合材料的发展,对碳纤维成型液压机的控制精度要求也越来越高。由于碳纤维的加压温度、形状结构等差异性使其反作用合力偏离碳纤维成型液压机的水平中心,且由于液压缸的泄漏、制造精度和摩擦阻力等因素^[3]会导致碳纤维成型液压机的三缸不同步,从而产生偏载力使活动横梁发生偏移。偏移后的活动横梁使上下模具难以精准合模,导致树脂基体与纤维材料的相容性较差,无法均衡地传递载荷,造成增强后的碳纤

维复合材料弯曲强度、压缩性能、疲劳强度等有所降低,影响碳纤维产品的成型精度和质量。因此需采用合理的同步控制算法来提高碳纤维成型液压机三缸同步控制精度,确保活动横梁的控制平行度达到较高准确度,从而保证碳纤维材料的性能。

为提高系统的同步控制精度,学者们做了大量研究并取得一定成果,蒋书运等^[4]通过 AMESim 及 Simulink 对插齿机主运动液压系统联合仿真。结果表明:利用 PID 调节器有效地降低了系统的稳态误差,提高了系统的响应速度。张于贤等^[5]通过 AMESim-Simulink 对深海加压系统进行 PID 控制仿真。仿真结果表明:在外干扰力作用下, PID 控制可以实现对两缸的同步控制,并达到控制精度要求。吴娜、穆洪云、周围等^[6-8]将

第一作者简介:李京(1999—),男,湖北随州人,硕士研究生,研究方向为制造装备自动化与智能化,lijing_whale@163.com。

PID 与不同的控制算法相结合,均取得了很好的控制效果。

本文构建碳纤维成型液压机三缸同步控制系统的数学模型,设计模糊 PID 自适应控制系统,在 AMESim/Simulink 软件中联合建模与仿真,分析在两种典型负载力变化下三缸同步控制系统的动态特性。

1 三缸同步控制系统设计

为实现碳纤维成型液压机三缸高精度自适应同步运动,设计原理和实物图如图 1 所示。三缸同步控制系统包括控制器、电液伺服阀、位移传感器液压缸 1、液压缸 2 和液压缸 3。根据设计原理图,系统通过位移传感器将信号反馈给控制器,反馈信号与输入信号作差得到液压缸的位移偏差,通过控制器对位移偏差信号进行处理输出电流信号,控制电液伺服阀产生不同的阀口开度进而调节进入液压缸的流量,从而实现碳纤维成型液压机三缸自适应同步运动,保证活动横梁运动的水平精度。

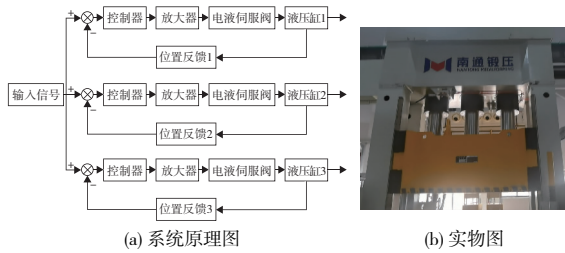


图 1 三缸同步控制系统原理图及实物图

1.1 电液伺服阀数学模型

电液伺服阀包括放大器和伺服阀两部分^[9],放大器是线性放大,数学模型为

$$G_a(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = K_a \quad (1)$$

式中: K_a 为放大器增益; $U(s)$ 为输入电压; $I(s)$ 为输出电流。

伺服阀看作二阶振荡环节,其数学模型为

$$G_{sv}(s) = \frac{X_v}{I} = \frac{K_{sv}}{s^2 + \frac{2\varepsilon_{sv}}{\omega_{sv}}s + 1} \quad (2)$$

式中: K_{sv} 为伺服阀增益; I 为伺服阀输入电流; ε_{sv} 为伺服阀阻尼比; ω_{sv} 为伺服阀固有频率。

1.2 液压缸数学模型

系统采用非对称液压缸,活塞杆伸出时活塞

杆位移 X_p 对电液伺服阀阀芯位移 X_v 的数学模型为^[10-11]

$$X_p = \frac{\frac{K_q}{A_p} X_v}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\varepsilon_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (3)$$

式中: K_q 为滑阀流量增益; A_p 为液压缸进油腔面积; ε_h 为液压缸阻尼比; ω_h 为液压缸固有频率。

1.3 位移传感器数学模型

位移传感器为线性环节^[12],建立数学模型:

$$G_f(s) = \frac{U_f(s)}{Y(s)} = K_f \quad (4)$$

式中: K_f 为位移传感器增益; $U_f(s)$ 为位移传感器输出电压; $Y(s)$ 为液压缸的位移。

2 模糊 PID 自适应控制器设计

2.1 模糊 PID 自适应控制器结构

模糊 PID 自适应控制器以期望位移与实际位移的偏差 e 和偏差变化率 e_c 为系统的输入,经过模糊控制输出 PID 的调节参数 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d ,整定 PID 控制中的 K_p 、 K_i 、 K_d 参数,从而使得模糊 PID 自适应控制能够精确地调节伺服阀阀芯的开口度,实现三缸的同步运动,图 2 为模糊 PID 自适应控制原理图^[13]。

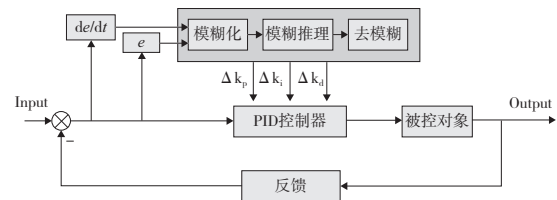


图 2 模糊 PID 自适应控制原理图

模糊 PID 自适应控制的参数公式如下^[14]:

$$\begin{cases} K_p = K'_p + \Delta k_p \cdot k_p^* \\ K_i = K'_i + \Delta k_i \cdot k_i^* \\ K_d = K'_d + \Delta k_d \cdot k_d^* \end{cases} \quad (5)$$

式中: K_p 、 K_i 、 K_d 分别为修正后参数; K'_p 、 K'_i 、 K'_d 分别为 PID 初始参数; Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 分别为 PID 控制的修正量; k_p^* 、 k_i^* 、 k_d^* 分别为修正量系数。

2.2 输入、输出模糊化处理

根据实际要求,系统 e 和 e_c 的基本论域定义为 $[-6, 6]$, Δk_p 的基本论域为 $[-3, 3]$, Δk_i 的基本论域为 $[-0.3, 0.3]$, Δk_d 的基本论域为 $[-0.03, 0.03]$ 。模糊控制中,用更多的语言变量来描述模

糊子集,可使模糊 PID 的控制精度和跟随性能得到提升^[15],于是将 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 、 e 和 e_c 的模糊子集定义成 {PB,PM,PS,ZO,NS,NM,NB},对应于 {正大,正中,正小,零,负小,负中,负大}。

2.3 模糊规则的建立

- 1) 当 $|e|$ 较大时,选择较大的 Δk_p 值降低系统的响应时间;选用较小的 Δk_d 和 Δk_i 值避免微分饱和和过超调^[16]。
- 2) 当 $|e|$ 和 $|e_c|$ 适中时,选择较小的 Δk_p 值以

减小系统超调;为确保系统的响应速度,取中等的 Δk_i 和 Δk_d 值。

- 3) 当 $|e|$ 较小时,适度增加 Δk_p 和 Δk_i 的值;选用合适的 Δk_d 值,降低系统静差^[17]。
- 4) 当 $|e_c|$ 较大时, Δk_d 的取值应当较小,当 $|e_c|$ 较小时,适当增加 Δk_d 值。

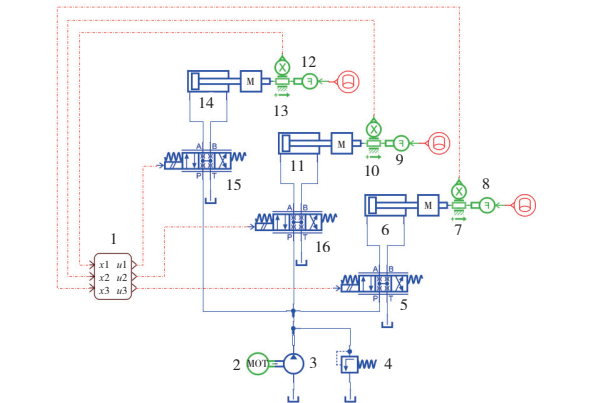
根据 PID 参数的调整规则,设计 PID 控制变量 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 3 个参数的控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

Δe	$\Delta k_p/\Delta k_i/\Delta k_d$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM//PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

3 AMESim/Simulink 联合仿真

运用 AMESim 软件^[18] 搭建碳纤维成型液压机三缸同步控制系统的液压模型,如图 3 所示,液压模型主要参数如表 2 所示。使用 Matlab/Simulink 仿真模块^[19] 建立模糊 PID 自适应控制器,并与 PID 控制系统对比,分别如图 4、图 5 和图 6 所示,然后对碳纤维成型液压机三缸同步运动进行联合仿真对比分析。



1—控制器;2—电机;3—液压泵;4—溢流阀;5、15、16—电液伺服阀;6、11、14—液压缸;7、10、13—位移传感器;8、9、12—负载力。

图 3 三缸同步控制系统物理模型

表 2 液压元件基本参数

元件参数	数值
电机转速/(r/min)	2 000
液压泵排量/(mL/r)	50
系统压力/MPa	25
液压缸最大行程/m	2
液压缸活塞直径/mm	410
液压缸活塞杆直径/mm	380
伺服阀额定流量/(L/min)	0.132
伺服阀固有频率/Hz	283
伺服阀阻尼比	0.6

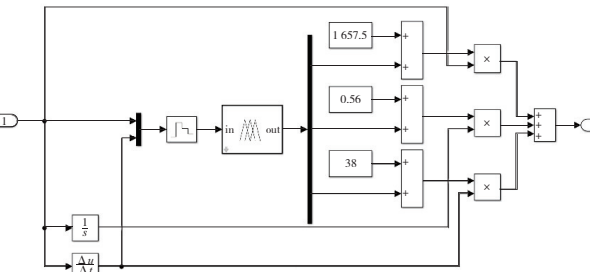


图 4 模糊 PID 自适应控制器

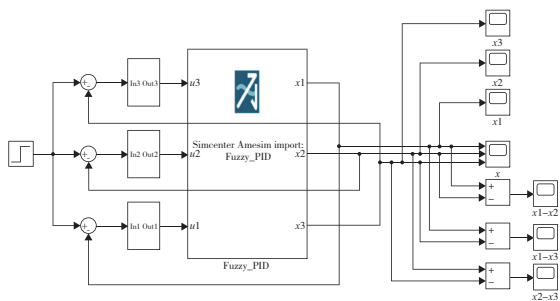


图5 模糊PID自适应控制系统simulink模型

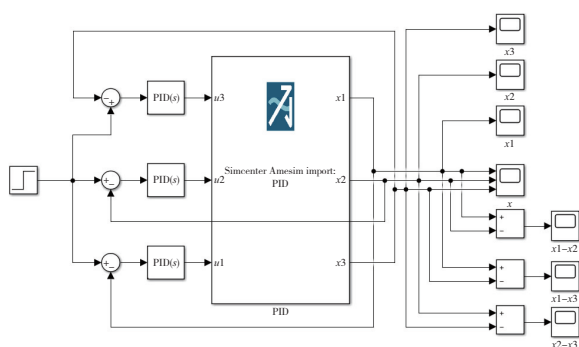


图6 PID控制系统simulink模型

3.1 系统阶跃响应分析

如图7所示,对系统进行阶跃响应分析。由结果可知:模糊PID自适应的调节响应时间为0.503 s到达稳定状态,相比于PID控制的调节稳定时间0.54 s,速度加快7.36%。因此模糊PID自适应控制系统在响应速度方面具有显著的优越性,有效地降低了液压缸的时滞效应,具有较强的鲁棒性。

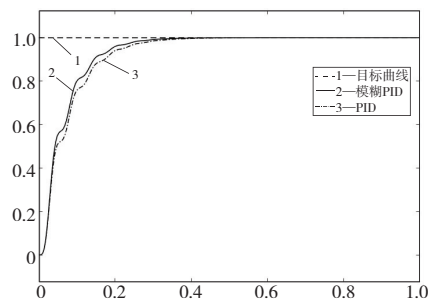


图7 模糊PID与PID的阶跃响应

为验证设计模型的稳定性,对碳纤维成型液压机的三缸施加指数负载力和随机负载力工况,分析其同步控制性能。

3.2 指数负载力工况下三缸同步控制性能

在碳纤维成型液压机实际运行过程中,液压缸所受的力为指数负载力,如图8(a)所示。液压

缸1、液压缸2、液压缸3所受的负载力分别为3 000 kN、3 012 kN、3 024 kN的指数负载力。由图8(b)、图8(c)、图8(d)可以得到,在模糊PID自适应与PID控制下,液压缸1与液压缸2的最大同步误差分别为0.044 1 mm和0.079 6 mm;液压缸1与液压缸3的最大同步误差分别为0.068 4 mm和0.093 8 mm;液压缸2与液压缸3的最大同步误差分别为0.039 4 mm和0.044 1 mm。故与PID控制相比,采用模糊PID自适应控制使液压缸1与液压缸2、液压缸1与液压缸3、液压缸2与液压缸3的最大同步误差分别降低44.6%、37.1%、10.7%。

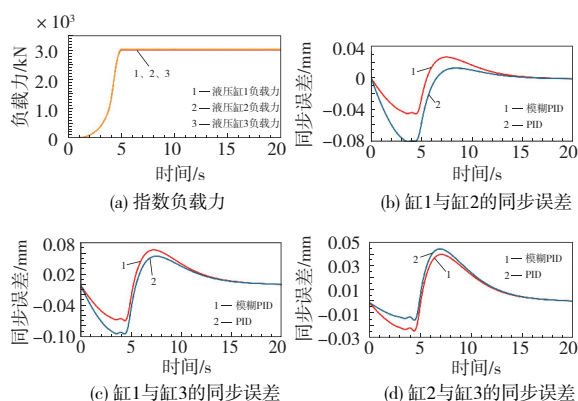


图8 指数负载力液压缸同步控制性能

3.3 随机负载力工况下三缸同步控制性能

在碳纤维成型液压机工作运行中,液压缸所受的负载力在偏载情况下会出现随机变化的情况。因此,为验证系统的稳定性,对3个液压缸施加随机负载力,负载变化情况如图9(a)所示,液压缸1、液压缸2、液压缸3所受的随机负载力分别为3 000~3 000.5 kN、3 001.2~3 001.7 kN、3 002.4~3 002.9 kN,由图9(b)、图9(c)、图9(d)的结果可以得到,在模糊PID自适应和PID控制下,液压缸1与液压缸2的最大同步误差分别为0.045 8 mm、0.055 0 mm;液压缸1与液压缸3的最大同步误差分别为0.067 0 mm、0.097 5 mm;液压缸2与液压缸3的最大同步误差分别为0.041 0 mm、0.042 5 mm。故采用模糊PID自适应控制相比于PID控制,液压缸1与液压缸2、液压缸1与液压缸3、液压缸2与液压缸3的最大同步误差分别降低16.7%、31.3%、3.5%。

4 结语

针对碳纤维成型液压机三缸不同步造成的碳

纤维增强复合材料性能降低,设计碳纤维成型液压机三缸同步控制系统,建立相应的数学模型,并利用 AMESim 搭建三缸同步控制系统液压物理模型,使用 Simulink 构建模糊 PID 自适应控制系统,最后进行 AMESim/Simulink 联合仿真。仿真结果表明:与 PID 控制相比,采用模糊 PID 自适应控制系统阶跃响应时间缩短 7.36%,在指数负载力工况下,液压缸 1 与液压缸 2、液压缸 1 与液压缸 3、液压缸 2 与液压缸 3 的最大同步误差分别降低 44.6%、37.1%、10.7%;在随机负载力工况下,液压缸 1 与液压缸 2、液压缸 1 与液压缸 3、液压缸 2 与液压缸 3 的最大同步误差分别降低 16.7%、31.3%、3.5%。故采用模糊 PID 自适应控制,有效地加快了液压缸的响应速度,且在工作过程受力不均、负载存在变化的情况下,降低了三缸之间的同步误差,对于提高碳纤维成型液压机三缸同步控制性能具有重要意义。

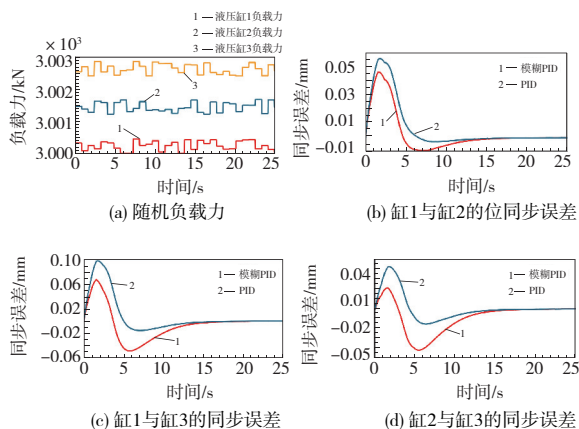


图9 随机负载力液压缸同步控制性能

参考文献:

- [1] 刘柳薪,卢晓英,吴颖,等. 碳纤维增强树脂基复合材料界面改性及应用进展[J]. 材料工程,2024,52(9): 70-81.
- [2] 张为军,薛忠民,王欣,等. 纤维增强复合材料典型应用与前景展望[J]. 复合材料科学与工程, 2024(增刊1):30-37.
- [3] 张旭帮. 重载不平衡工况下管片拼装机提升双缸同步控制研究[D]. 郑州:郑州轻工业大学,2024.
- [4] 蒋书运,杨成伟,姚华. 插齿机主运动液压系统的仿真分析[J]. 机械制造与自动化,2015,44(2):1-3,10.
- [5] 张于贤,李昭,林静. 基于 AMESim-Simulink 的深海加压系统 PID 控制仿真分析[J]. 机床与液压,2022, 50(3):167-170.
- [6] 吴娜,袁名伟. 锻造机双缸液压同步控制系统建模及仿真[J]. 锻压技术,2020,45(1):144-150.
- [7] 穆洪云,罗艳蕾,杜威,等. 基于 BP-PID 的双液压缸电液同步控制仿真研究[J]. 液压气动与密封,2022, 42(9):14-18,13.
- [8] 周围,李群明,高志伟,等. 基于模糊 PID 的送杆机构同步控制建模与仿真研究[J]. 机电工程,2020, 37(9):1006-1012.
- [9] 沈中华,程虎强,李涵. 基于模糊 PID 算法的甘蔗切梢器电液比例位置控制系统设计[J/OL]. 农业机械学报,2024:1-13. (2024-10-11) [2025-24-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.s.20241010.1555.002.html>.
- [10] 柯贤峰,肖世德. 基于粒子群优化的模糊 PID 阀控液压缸控制仿真[J]. 液压气动与密封,2024, 44(11):61-66.
- [11] 张宏鹏,李国平,杨双旺,等. 基于 AMESim 与 Simulink 联合仿真的运梁机双液压系统同步控制方法研究[J]. 液压气动与密封,2022,42(12):7-13.
- [12] 邵景干,贺占蜀,吴振全,等. 80 MN 压剪试验机竖向加载模糊 PID 控制系统的设计[J]. 机床与液压, 2024,52(18):116-122.
- [13] 王少坤,李伟,陈峰,等. 海上风电安装平台液压升降同步控制系统仿真[J]. 液压气动与密封,2024, 44(10):55-63.
- [14] 陆海峰,王业统,黄福伟,等. 模糊 PID 控制在移栽机械手控制系统的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2024(4):331-336.
- [15] 邓传涛,贺红林,胡国友,等. 飞行器自调平系统的模糊 PID 控制研究[J]. 机械设计与制造,2023(6): 79-83.
- [16] 梁志鑫,王野牧,王能发,等. 垂直冲击试验台同步及快速制动液压控制系统研究[J]. 机电工程,2024, 41(11):2087-2097.
- [17] 罗明,周建平,周忠祥,等. 油田卸水机械臂的设计及其液压控制系统的优化[J]. 机床与液压,2025, 53(1):194-201.
- [18] 郭金中,梁全,张国健,等. 基于 AMESim 的电液伺服系统半实物仿真方法研究[J]. 机械工程与自动化, 2022(2):10-13.
- [19] 张于贤,李昭,林静. 基于 AMESim-Simulink 的深海加压系统 PID 控制仿真分析[J]. 机床与液压, 2022,50(3):167-170.

收稿日期:2023-10-18