

基于 PSO 优化的形状记忆合金驱动器 自适应滑模控制研究

关翔予, 王庆辉

(沈阳化工大学, 辽宁 沈阳 110000)

摘要:针对形状记忆合金(SMA)材料在控制过程中的非线性迟滞、精度差等问题, 该文提出了一种基于粒子群优化的自适应滑模控制算法。首先, 搭建形状记忆合金驱动器装置, 并建立了驱动器的机理模型, 在此基础上设计了自适应滑模控制器, 其中针对滑模控制过程中存在的抖振及收敛速度慢等问题, 引入了饱和函数趋近律, 最后结合粒子群算法(PSO)优化滑模控制器参数。仿真结果表明, 相较于传统 PID 和滑模控制器, 基于 PSO 优化的自适应滑模控制算法对形状记忆合金驱动器的系统控制具有更高的响应速度、稳定性和鲁棒性。

关键词:形状记忆合金; 机理模型; 自适应滑模控制; 粒子群算法

中图分类号: TP273 + .3

文章编号: 1000 - 0682(2024)02 - 0113 - 05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.02.020

Research on adaptive sliding mode control of shape memory alloy driver based on PSO optimization

GUAN Xiangyu, WANG Qinghui

(Shenyang University of Chemical Technology, Liaoning Shenyang 110000, China)

Abstract: This paper proposes an adaptive sliding mode control algorithm based on particle swarm optimization to address the issues of nonlinear hysteresis and poor accuracy in the control process of shape memory alloy (SMA) materials. Firstly, a shape memory alloy actuator device was constructed, and a mechanism model of the actuator was established. Based on this, an adaptive sliding mode controller was designed. In order to address the problems of chattering and slow convergence in the sliding mode control process, a saturation function approach law was introduced, and particle swarm optimization (PSO) was used to optimize the sliding mode controller parameters. The simulation results show that compared to traditional PID and sliding mode controllers, the adaptive sliding mode control algorithm based on PSO optimization has higher response speed, stability, and robustness for the system control of shape memory alloy actuators.

Keywords: shape memory alloy; mechanism model; adaptive sliding mode control; particle swarm optimization

0 引言

形状记忆合金材料由于其特殊的形状记忆效应、超弹性、阻尼特性、高温稳定性和耐腐蚀性能等优点, 被广泛应用于医疗、航空航天、汽车、建筑等领域, 具有广阔的发展前景^[1]。形状记忆合金驱动器则是利用形状记忆合金材料的特殊性能来实现运动控制和执行特定任务的装置^[2]。

国内外已经有许多研究人员在形状记忆合金材料上提出较为权威性的研究成果。目前被广泛应用的模型^[2-5]包括 Tanaka 模型, 该模型基于自由能、非平衡热力学和能量平衡方程构成。Liang - Rogers 模型在 Tanaka 模型的基础上优化了马氏体体积分数式, 将函数中的指数函数改用余弦函数来实现, 这样更符合材料的相变规律。Brison 模型在

收稿日期: 2023 - 11 - 23

第一作者: 关翔予(2000—), 男, 硕士, 主要研究方向为基于形状记忆合金驱动器的空间薄膜捕获系统控制研究。

通信作者: 王庆辉(1972—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师。

前两者模型基础上不仅考虑了温度诱发马氏体相变,同时又考虑了应力诱发下的马氏体相变,但是模型较为复杂。为考虑简化建模过程的复杂度,因此该文采用 Liang - Rogers 模型为 SMA 材料模型。

SMA 驱动器的研究是最复杂和最具有意义的研究方向,其具有可替代传统电机驱动的潜力^[6]。Hwang D 等^[7]根据摆动步进电机的工作原理设计了旋转驱动机构,由渐开线齿轮组和曲轴组成的驱动机构能够有效地将 SMA 线的膨胀和收缩转化为旋转运动。驱动器控制方面,李晓光等^[8]对形状记忆合金驱动器进行了系统建模,通过采用自适应反步滑模控制方法有效的抑制了 SMA 的非线性迟滞问题。尹海斌^[9]等人采用拮抗驱动方式实现对 SMA 材料制成的仿人腕关节进行精准的位置控制。胡冰山等人^[10]对形状记忆合金弹簧执行器,设计具有抗饱和和抗过热功能的 PID 位置控制器,实现对 SMA 致动器的控制位置。该文则为 SMA 材料控制提供新方法,采用基于 PSO 优化的自适应滑模控制算法,针对 SMA 材料控制精度等问题,通过将控制器的输出值调节 PWM 的方式^[11]实现对驱动器旋转角度的精确控制。

1 机理模型与材料模型

1.1 形状记忆合金驱动器结构

驱动器由一根形状记忆合金丝和弹簧连接,其右侧固定,左侧安装角度传感器,通过给形状记忆合金丝通电加热的方式控制物体的旋转,评估驱动器对角度的控制效果。

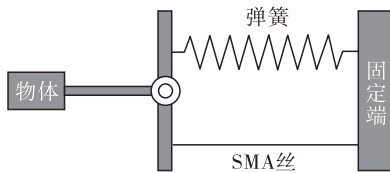


图1 驱动器机理模型简图

1.2 本构关系模型

根据 Liang - Roger 的一维本构关系模型^[2], SMA 材料的本构关系式为:

$$\dot{\sigma}(t) = E \dot{\varepsilon} + \Omega \dot{\xi} + \Theta \dot{T} \quad (1)$$

其中: $\dot{\sigma}$ 为材料的应力速率; E 为材料的弹性模量; $\dot{\varepsilon}$ 为材料的应变速率; Ω 为相变系数; $\dot{\xi}$ 为马氏体体积分数变化速率; Θ 为热传递系数; \dot{T} 为材料温度变化速率。

其中,弹性模量和相变系数表达式如下:

$$E = E_A + \xi(E_M - E_A) \quad (2)$$

$$\Omega = -\varepsilon_R E \quad (3)$$

其中: E_A 和 E_M 分别为奥氏体和马氏体的弹性模量; ε_R 为最大可恢复应变。

1.3 相变模型

形状记忆合金材料在加热过程中,当材料温度超过奥氏体的起始温度时,材料内部开始由马氏体转变为奥氏体,引发奥氏体相变:

$$\xi = \left(\frac{\xi_0}{2} \right) \{ \cos[a_A (T - A_s) + b_A \sigma] + 1 \} \quad (4)$$

冷却过程同理,引发马氏体相变:

$$\xi = \frac{1 - \xi_0}{2} * \left\{ \cos[a_M (T - M_f) + b_M \sigma] + \frac{1 + \xi_0}{2} \right\} \quad (5)$$

其相变过程最终推导出马氏体体积分数的变化。式中 ξ_0 为初始状态的马氏体体积分数, a_A, a_M, b_A, b_M 分别为 SMA 材料的相关常数,计算如下:

$$a_M = \frac{\pi}{M_s - M_f}, a_A = \frac{\pi}{A_f - A_s} \quad (6)$$

$$b_M = -\frac{a_M}{C_M}, b_A = -\frac{a_A}{C_A} \quad (7)$$

其中: M_s, M_f, A_s, A_f 分别代表 SMA 马氏体起始、终止温度和奥氏体起始、终止温度; C_A, C_M 分别表示在温度为 A_f, M_f 时 SMA 材料的应力和温度之间的一阶导数。

1.4 热力学模型

发生相变条件需要一定的热量,实验采用给 SMA 通电加热的方式,其电压一部分产生热量,另一部分模拟室温空气散热。其热力学模型如下:

$$m C_p \dot{T} = \frac{V^2}{R} - h A_w (T - T_0) \quad (8)$$

其中: $m, C_p, R, V, h, A_w, T_0$ 分别为 SMA 材料的质量、比热、电阻、加热电压、传热系数、表面积和环境温度。由于 SMA 相变过程中材料电阻会发生变化,其关系式为:

$$R = R_A + (R_M - R_A) \xi \quad (9)$$

传热系数与材料温度相关,其关系式如下:

$$h = h_0 + h_2 T^2 \quad (10)$$

其中: R_M, R_A 分别为 SMA 在马氏体和奥氏体状态的电阻; h_0, h_2 分别为零阶和二阶传热系数。

1.5 驱动器的动力学模型

根据扭矩平衡原理建立角度 - 力矩的动力学模型^[12]:

$$I \ddot{\theta} + c \dot{\theta} + k \theta = F_{sma} \quad (11)$$

其中: I, c, k 分别为转动惯量、扭转阻尼系数和弹簧的弹性系数; θ 为驱动器物体的转动角度; $\dot{\theta}$ 为

转动角速度; $\ddot{\theta}$ 为转动角加速度; F_{sma} 为形状记忆合金丝输出力, 与本构模型输出应力关系为:

$$F_{sma} = \sigma A_w \quad (12)$$

1.6 驱动器的运动学模型

驱动器物体的角度与 SMA 丝应变相关, 其关系式为:

$$\varepsilon l = a\theta \quad (13)$$

其中: l, a 分别为 SMA 的长度和物体距转轴的距离。

2 控制算法设计

2.1 自适应滑模控制

根据(11)和(12)式。设 $x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}, u = F_{sma}$, d 为小于 5% 扰动。建立控制系统方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{k}{I}x_1 - \frac{c}{I}x_2 + \frac{1}{I}u - \frac{d}{I} \end{cases} \quad (14)$$

取 $e(t)$ 为期望角度 x_{1d} 与实际角度 x_1 的误差:

$$e(t) = x_{1d} - x_1 \quad (15)$$

求导:

$$\dot{e}(t) = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 \quad (16)$$

定义滑模面为:

$$s(t) = \gamma e(t) + \dot{e}(t) \quad (17)$$

选取滑模指数趋近律:

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ps, \epsilon > 0, p > 0 \quad (18)$$

将(15)(16)(17)代入到(18)得到:

$$\gamma(\dot{x}_{1d} - x_2) + \left(\ddot{x}_{1d} + \frac{k}{I}x_1 + \frac{c}{I}x_2 - \frac{1}{I}u + \frac{d}{I} \right) = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ps \quad (19)$$

得到滑模控制器:

$$u = I(\epsilon \operatorname{sgn}(s) + ps + \gamma \dot{e} + \ddot{x}_{1d}) + \frac{k}{I}x_1 + \frac{c}{I}x_2 + \frac{d}{I} \quad (20)$$

由于 d 的扰动有界:

$$0 \leq d \leq 0.05 \quad (21)$$

则取 d 为:

$$d = 0.025 - 0.025 \operatorname{sgn}(s) \quad (22)$$

随即满足:

$$\begin{cases} s > 0, \dot{s} < 0 \\ s < 0, \dot{s} > 0 \end{cases} \quad (23)$$

2.2 稳定性判断

定义李雅普诺夫 (Lyapunov) 函数:

$$V = \frac{s^2}{2} \quad (24)$$

求导:

$$\dot{V} = s \dot{s} \leq 0 \quad (25)$$

因此控制系统渐进稳定。

2.3 饱和函数优化

在上述滑模控制中的指数趋近律包含符号函数, 而符号函数为不连续函数, 是产生控制系统抖振的主要原因。

$$\operatorname{Sat}(s) = \begin{cases} 1, & s > \Delta \\ \beta s, & |s| < \Delta, \quad \beta = \frac{1}{\Delta} \\ -1, & s < -\Delta \end{cases} \quad (26)$$

其中, β 为增益系数。采用上述饱和函数替代指数函数可以解决抖振问题, 提高系统响应速度。

2.4 粒子群算法

粒子群优化算法是一种基于群体智能的优化算法, 通过模拟鸟群中个体之间的协作和信息共享来搜索最优解^[13]。粒子群算法如下:

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = \omega \mathbf{v}_i^k + c_1 r_1 (\mathbf{p}_i^k - \mathbf{x}_i^k) + c_2 r_2 (\mathbf{g}_i^k - \mathbf{x}_i^k) \quad (27)$$

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \mathbf{x}_i^k + \mathbf{v}_i^{k+1} \quad (28)$$

式中: $\mathbf{v}_i^k, \mathbf{x}_i^k$ 为当前 i 在第 k 次迭代时候, 粒子所处的速度和位置; ω 表示惯性权重, 其值影响算法的收敛性能; \mathbf{p}_i^k 表示粒子 i 的个体的最优值; \mathbf{g}_i^k 表示粒子群的全局最优解; c_1, c_2 为学习因子; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

粒子群算法的工作流程如图 2 所示。

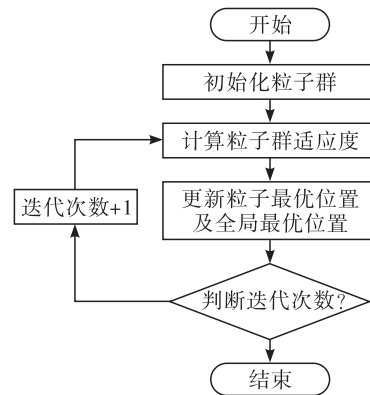


图2 粒子群算法的工作流程图

引入 PSO 优化滑模控制能有效提高驱动器控制系统的稳定性、精度和响应速度。SMA 驱动器反馈角度与目标角度作差, 当误差仍然存在时, 算法会持续优化滑模控制器的内部参数, 直至误差消除。

3 仿真实验

首先在 SIMULINK 中搭建上述材料模型、机理模型以及控制算法等, 控制系统结构如图 3 所示。

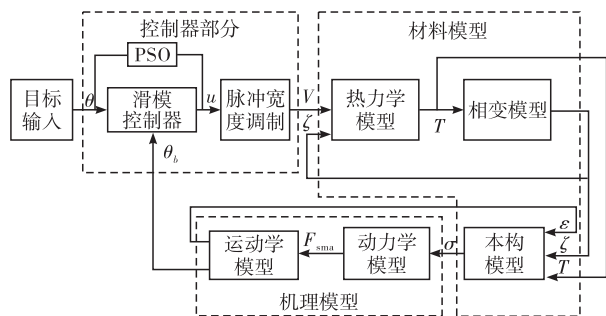


图 3 控制系统结构框图

仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数	数值	参数	数值
Θ	0.05	U	6 V
ε_R	0.023	T_0	25 °C
E_A	31.5 Pa	R_M	0.819 7 Ω
E_M	20 Pa	R_A	0.724 6 Ω
M_s	100 °C	h_0	20
M_f	80 °C	h_2	5.0e-04
A_s	110 °C	I	2.54e-4 kg·m ²
A_f	130 °C	c	0.08 kg·m ² /s
m	0.015 kg	k	0.4 kg·m ² /s ²
C_p	200 J/kg·°C	l	0.1 m
A_w	1.5e-5 m ²	a	0.05 m

3.1 仿真结果分析

图 4 为不同控制器下 SMA 驱动器输出角度曲线。图 5 为不同控制器下 SMA 输出的应力曲线。

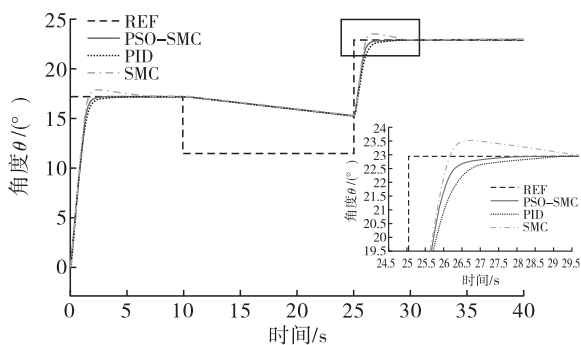


图 4 不同控制器下 SMA 驱动器输出角度曲线

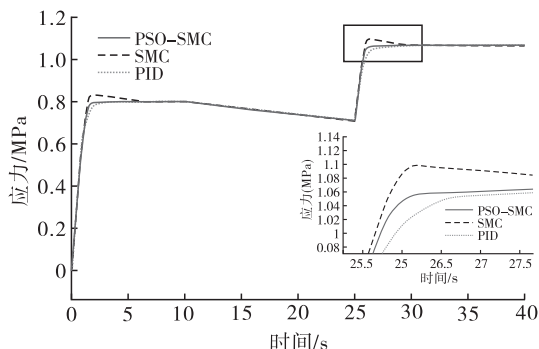


图 5 不同控制器下 SMA 材料输出的应力曲线

分别设置目标角度为 0.3 rad、0.2 rad 和 0.4 rad 时。观察驱动器系统的响应速度和稳定性。实验结果表明,该文设计的控制器算法,在 SMA 加热过程中,驱动器达到目标角度的收敛速度、稳定性、鲁棒性均好于普通滑模控制和传统 PID 控制。SMA 降温过程由于 PWM 占空比均为 0,而无明显差异。

图 6 为不同控制器下驱动器系统的电压输出曲线图。

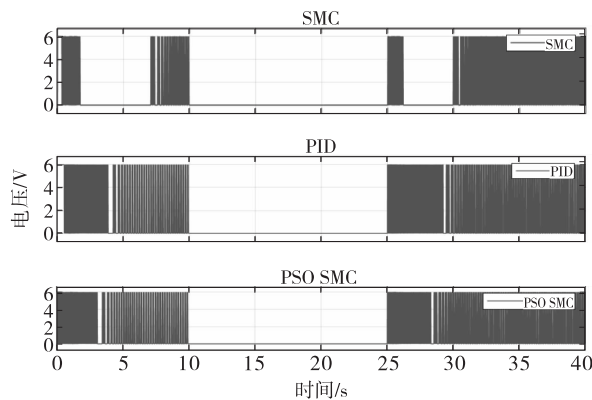


图 6 不同控制器下驱动器系统的电压输出曲线图

图 7 为图 6 截取的部分放大图。

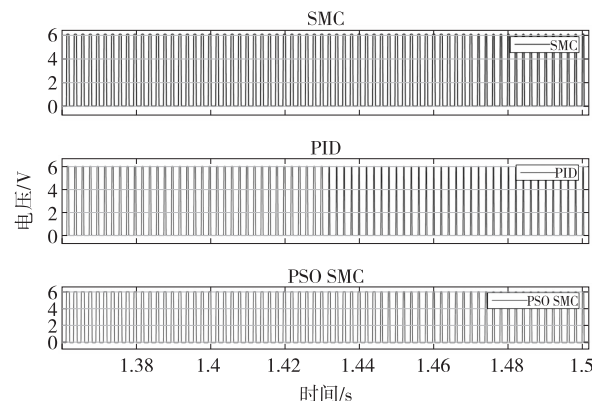


图 7 1.35 s~1.5 s 驱动器系统输出电压图

结果表明,采用控制器调节 PWM 占空比的方法效果明显,即误差越小占空比越小。图中 1.35 s 处的角度曲线误差较大,因此 PWM 占空比较大,而约 1.5 s 处的角度曲线误差较小,则占空比明显减小。综上所述采用该方法调节,可以实现对驱动器角度的精准控制。

4 结论

该文通过构建形状记忆合金的材料模型和驱动器的机理模型,设计了基于粒子群优化的自适应滑模控制器。在此过程中采用了饱和函数来优化滑模控制过程中的抖动问题,此举有效地减少了控制系统的不稳定性。同时,通过将控制器的输出用于调

节 PWM 脉宽的方式,实现了对驱动器输出角度的精确控制。

为了验证所提控制策略的有效性,该文在 Simulink 中搭建了仿真模型,并将该控制策略与传统的 PID 和滑模控制进行对比。仿真结果表明,相对于传统控制方法,所提的基于 PSO 的自适应滑模控制器在 SMA 驱动器控制中展现出了更高的响应速度和稳定性,为形状记忆合金材料的应用提供了新的思路和方法。

参考文献:

- [1] 周博,王志勇,薛世峰. 形状记忆合金超弹性螺旋弹簧的力学模型[J]. 机械工程学报, 2019, 55(08): 56-64.
- [2] TANAKA K. A thermomechanical sketch of shape memory effect: one - dimensional tensile behavior[J]. Res Mechanics, 1986, 18: 251-263.
- [3] LIANG C, ROGERS C A. One - dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials [J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2013, 1(2): 207-234.
- [4] Brinson, L. C. One - dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: Thermomechanical derivation with non - constant material functions and redefined martensite internal variable[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 1993, 4(2): 229-242.
- [5] 梁明威. 基于形状记忆合金的柔性驱动平台回滞建模

与控制算法研究[D]. 广州:华南理工大学,2022.

- [6] 徐殿国,白凤强,张相军,等.形状记忆合金执行器研究综述[J].电工技术学报,2022,37(20):5144-5163.
- [7] HWANG D, IHN Y S, KIM K. Compact modular cycloidal motor with embedded shape memory alloy wires[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018(5):1-1.
- [8] 李晓光,张弼,赵新刚,等.形状记忆合金驱动器的自适应滑模反步控制[J].控制理论与应用,2020,37(01):137-146.
- [9] 尹海斌,薛欢,章志大,等.形状记忆合金驱动的仿人腕关节机构理论与运动控制[J].机械科学与技术,2023,42(02):181-189.
- [10] HU B, LIU F, MAO B, et al. Modeling and position control simulation research on shape memory alloy spring actuator[J]. Micromachines, 2022, 13(2): 178.
- [11] GILARDI G, HASLAM E, BUNDHOO V, et al. A shape memory alloy based tendon-driven actuation system for biomimetic artificial fingers, part II: modelling and control[J]. Robotica, 2010, 28(5):675-687.
- [12] SHAKIBA S, AYATI M, YOUSEFI-Koma A. Development of hybrid prandtl-ishlinskii and constitutive models for hysteresis of shape-memory-alloy-driven actuators[J]. Robotica, 2021, 2021(2021):1-15.
- [13] 李锦钰,白海军,刘玉旺.基于改进粒子群算法的四足机器人步态研究[J].工业仪表与自动化装置,2023(05):70-75.

(上接第 60 页)

- [6] WANG T Z, ZHOU Y H. A nonlinear transient constitutive model with eddy current effects for giant magnetostrictive materials[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(12): 13–20.
- [7] ZHAN Y S, LIN C. A constitutive model of coupled magneto – thermo – mechanical hysteresis behavior for giant magnetostrictive materials[J]. Mechanics of Materials, 2020, 148: 103477.
- [8] KIM S, KIM K, CHOE K, et al. A nonlinear magneto –

mechanical coupling model for magnetization and magnetostriction of ferromagnetic materials[J]. AIP Advances, 2020, 10(8).

- [9] 胡继敏,郭峰,赵祯,等. 温度对扭矩传感器弹性体 17-4PH 特性的试验[J]. 船舶工程, 2023, 45(S1): 406-411.
- [10] 冯张彬,熊福敏,王健,等. MEMS 多晶硅纳米膜压力传感器过载能力设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2023(04):89-92+97.

(上接第 100 页)

- [9] 陈宝奇,周再祥,张强.基于混沌麻雀搜索算法优化 BP 神经网络的短期风电功率预测[J].工业仪表与自动化装置,2022(6):13-17.
- [10] 姜海燕.基于 BP 神经网络的牵引供电系统的故障预测研究[J].工业控制计算机,2022,35(6):82-84.
- [11] 曹培,徐鹏,贺建明,等.基于多源感知的开关柜绝缘缺陷检测技术[J].中国电力,2021,54(10):117-124+133.
- [12] 陈明,张文静,赵杰.基于多源感知的电力工程数据信息处理与识别技术研究[J].电子设计工程,2023,

31(4):178–182.

- [13] 祝小钧. 多源感知网络中数据融合方法研究与应用 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2022: 23-46.
- [14] 王鹏, 杨雨君, 陈曼龙, 等. 分布式质量块结构高 g 值加速度传感器仿真分析 [J]. 仪表技术与传感器, 2023(5): 19-24+29.
- [15] 但丁谊, 丁克勤, 舒安庆. 基体封装式光纤布拉格光栅传感器的应变传递及其影响因素 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 147-155.
- [16] 张芮, 朱姿娜. 柔性电涡流式触觉传感器性能仿真与分析 [J]. 仪表技术与传感器, 2021(6): 16-20+25.