

半潜式钻井平台锚泊定位锚链张力优化

石建峰, 陈红卫, 王莉

(江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 半潜式平台长期在海洋上生产作业时, 为了防止其在外界环境风、浪、流的干扰下发生漂移, 通过锚泊定位控制平台使其始终在安全范围内工作; 当锚泊系统平台某角某一根或多根锚链张力过大或过小时, 就会造成锚链因疲劳而断裂及能量的浪费; 为充分发挥所有锚链的能力, 使各锚链张力值尽量接近, 对锚泊定位锚链张力进行研究; 在遗传算法的基础上结合非线性规划算法进行锚链张力优化, 结合两种算法的优点让优化结果具有更高的精度; 最后, 应用所建立的数学模型在 Matlab/Simulink 仿真环境下对 981 钻井平台进行仿真试验, 仿真结果表明能在满足锚链张力均衡分布的情况下充分满足平台的作业要求, 保证海洋平台工作的安全性。

关键词: 深水半潜式平台; 锚泊定位; 数学建模; 遗传算法; 仿真

Research on Optimization of Chain Tension for Mooring Anchor for Semi-submersible Platform

Shi Jianfeng, Chen Hongwei, Wang Li

(School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: The semi-submersible platform works in severe sea condition through the anchor mooring positioning, in order to prevent the platform in the external environment to drift under the interference of wind, wave and flow, this paper research on anchoring positioning chain tension. The genetic algorithm combined with nonlinear programming algorithm which can improve the optimization efficiency was adopted to optimize the tension, avoid the tension too large or too small which in platform of a corner, resulting in the chain due to fatigue fracture and energy waste. Simulation results of 981drilling rig was carried out on both in the standby condition and in operation condition, and the simulation in Matlab/Simulink results show that the scheme is effective to balance the distribution of tensions and keep the position of offshore platform.

Keywords: deepwater semi-submersible; anchor mooring positioning; mathematic modeling; genetic algorithm; simulation

0 引言

南海海洋环境极端复杂恶劣, 半潜式钻井平台满足了我国南海深海油气资源开发的需求, 它抗风浪能力突出、甲板空间大, 适用水深范围广。一般在 1 500 米以内的深海区, 半潜式平台通过锚泊定位在特定海域进行作业。半潜式平台锚泊系统, 通过用锚及锚链、锚缆将平台系于海上, 从而限制由风浪流引起的漂移, 使其保持在预定位置上。

以工作在我国南海海域的 981 深水半潜式钻井平台作为研究对象^[1-3], 它具有石油天然气勘探、海底钻井等多种功能, 最大作业水深达 1 500 米深, 981 半潜式钻井平台主要结构由四大部分组成: 上层甲板、4 个立柱、4 个横撑和 2 个浮体, 主要参数如表 1 所示。锚泊系统锚链的布置方式如图 1 所示, 12 锚缆成对称式布置, 一共 4 组, 每组 3 根。

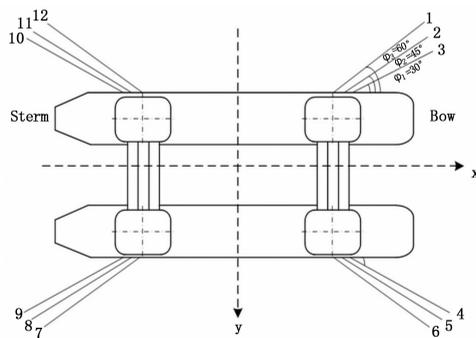


图 1 平台系泊系统布置

表 1 深水半潜平台主要参数

类型	单位	数值
甲板	m×m×m	74.42×74.42×8.60
立柱	m×m×m	17.385×17.385×21.46
浮体	m×m×m	114.07×20.12×8.54
生存吃水	m	16
作业吃水	m	19

收稿日期: 2015-12-08; 修回日期: 2016-02-24。

基金项目: 江苏省产学研联合创新资金(BY2013066-08); 江苏科技大学海洋装备研究院科研基金(HZ2015006)。

作者简介: 石建峰(1992-), 男, 江苏如皋人, 硕士研究生, 主要从事船舶自动化、计算机仿真方向的研究。

陈红卫(1966-), 女, 教授, 主要从事船舶自动化、计算机仿真方向的研究。

1 数学建模

1.1 平台系统数学建模

半潜式平台在海上的运动是六自由度运动, 在锚链张力优化研究中仅考虑纵向、横向和艏摇三自由度水平面运动, 简化后

的半潜式平台近似低频运动数学模型为^[4-6]：

$$\begin{cases} M\dot{v} + Dv = \tau \\ \dot{\eta} = R(\phi)v \end{cases} \quad (1)$$

式中, $R(\phi)$ 为转换/旋转矩阵; $v = [u, v, r]^T$ 为运动坐标系下纵荡、横荡和摇艏的速度; $\eta = [x, y, \phi]^T$ 为固定坐标系下纵荡、横荡和摇艏值; M 为惯性矩阵 ($M = M_A + M_{RB}$), 包括附加质量和附加惯性矩阵; D 为阻尼矩阵; τ 为钻井平台所受的外力, 包括风、流、和二阶波浪漂移作用引起的环境干扰力、锚链的张力。矩阵 M_{RB} 、 M_A 、 D 的组成形式如下:

$$\begin{aligned} M_{RB} &= \begin{bmatrix} m00 \\ 0mmxg \\ 0mxcI_z \end{bmatrix} & M_A &= \begin{bmatrix} -X_u00 \\ 0-Y_v-Y_r \\ 0-N_v-N_r \end{bmatrix}; \\ D &= \begin{bmatrix} -X_u00 \\ 0-Y_v-Y_r \\ 0-N_v-N_r \end{bmatrix} & R(\phi) &= \begin{bmatrix} \cos(\phi) - \sin(\phi)0 \\ \sin(\phi)\cos(\phi)0 \\ 001 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

1.2 环境载荷建模

1.2.1 风载荷

风载荷的建模研究比较成熟, 作用于平台上所产生的风力和风力矩为^[4]:

$$\begin{cases} X_{wind} = 0.5\rho_a V_w^2 C_X(\gamma_w) A_T \\ Y_{wind} = 0.5\rho_a V_w^2 C_Y(\gamma_w) A_L \\ N_{wind} = 0.5\rho_a V_w^2 C_N(\gamma_w) A_L L \end{cases} \quad (2)$$

其中: X_{wind} , Y_{wind} , N_{wind} 分别为风干扰下产生的纵荡力、横荡力及艏摇力矩; ρ_a 为空气密度; V_w 为海面以上 10 m 的平均风速; $C_X(\gamma_w)$, $C_Y(\gamma_w)$, $C_N(\gamma_w)$ 分别为纵荡、横荡方向的风力系数和艏摇方向的风力系数, 采用 OCIMF 的风力系数和风力距系数数值^[7]; A_T 和 A_L 为平台水面以上部分的纵向截面积的总和及横向截面积的总和。 L 为平台的总长。

1.2.2 流载荷

海流对平台的作用力和力矩建模为^[4]:

$$\begin{cases} X_{current} = 0.5\rho V_c^2 C_X(\beta) A_y \\ Y_{current} = 0.5\rho V_c^2 C_Y(\beta) A_x \\ N_{current} = 0.5\rho V_c^2 LC_N(\beta) A_s \end{cases} \quad (3)$$

其中: $X_{current}$, $Y_{current}$, $N_{current}$ 分别表示海流干扰作用到被控平台上产生的纵荡力、横荡力和艏摇力矩; ρ 为海水密度取 1.025 kg/m^3 ; V_c 海流流速; L 为被控平台总长; A_y 和 A_L 分别为海面以下部分的纵向截面积的总和及横向截面积之和。 $C_X(\beta)$, $C_Y(\beta)$, $C_N(\beta)$ 分别是平台的纵荡力系数, 横荡力系数以及艏摇力矩系数^[7]。

1.2.3 二阶波浪力

二阶波浪力是波浪作用于钻井平台使其缓慢偏离原来位置的力, 在研究平台的低频响应时必须对二阶波浪力加以控制。

二阶波浪力通过经验公式计算^[4]:

$$\begin{cases} X_{wave} = 0.5\rho g L \xi^2 C_{xw} \cos\alpha \\ Y_{wave} = 0.5\rho g L \xi^2 C_{yw} \sin\alpha \\ N_{wave} = -0.25\rho g L^2 \xi^2 C_{mw} \sin\alpha \end{cases} \quad (4)$$

其中: X_{wave} , Y_{wave} , N_{wave} 分别表示纵荡、横荡和艏摇干扰力/力矩; ξ 为平均波幅; C_{xw} , C_{yw} , C_{mw} 分别为纵向力漂移系数、横向力漂移系数和艏摇漂移系数^[7]; ρ 为海水密度; g 为重力加速度; L 为平台的平台长度; α 为波浪与半潜式钻井平台中线的夹角。

2 锚泊定位系统张力优化

2.1 最优控制策略模型

海上半潜式钻井平台进行作业时, 其锚泊系统所有锚链共同作用来平衡环境载荷及其产生的外力矩; 为防止单根或多根锚链因疲劳使用而断裂, 同时又充分发挥所有锚链的能力, 各锚链张力值应尽量接近^[8-10]。

设定目标函数为任意锚链之间张力差的平方和最小来达到张力优化目的, 建立规划模型^[11-12]:

$$\min F = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{12} (T_i - T_j)^2 \quad (5)$$

为了防止平台在环境载荷作用下发生慢漂运动, 通过等式约束来保证海洋平台的位置^[11-12]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{12} T_i \cos\varphi_i - F_x = 0 \\ \sum_{i=1}^{12} T_i \sin\varphi_i - F_y = 0 \\ \sum_{i=1}^{12} T_i d_i (-\cos\theta_i \sin\theta_i + \sin\varphi_i \cos\theta_i) - N = 0 \end{cases}$$

其中: F_x 和 F_y 为海洋环境横荡及纵荡方向上的扰动力; N 为海洋环境艏摇方向上的干扰力矩; T_i 为锚链张力; φ_i 为锚链的布置角度; θ_i 为着缆点和平台中心的连线与 x 轴的夹角; d_i 为着缆点到平台中心位置的距离。

不等式约束用来保证锚链的安全性:

$$T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$$

2.2 优化算法

上述约束条件中存在着等式约束, 变量的个数是 12, 等式约束有 3 个, 选择其他 9 个锚链张力变量 T_1, T_2, \dots, T_9 作为设计变量, 其余 3 个变量 T_{10}, T_{11}, T_{12} 由线性方程组求出, 由此保证等式约束成立。

遗传算法全局搜索能力强, 计算时效性较高, 适合求解超静定约束优化问题^[13-14]。但其局部搜索能力弱, 容易陷入局部最优解。锚链张力优化是以张力的均匀分布为基础, 优化方法的精度很重要。为了使张力优化性能指标达到最优, 将非线性规划和遗传算法相结合, 两种算法同时进行搜索, 从而达到更好优化解, 提高寻优结果的精度。

其步骤可总结如下:

- 1) 初始化参数。包括种群规模 Q , 代数 G , 变量 $T = [T_1, T_2, \dots, T_{12}]$, 交叉率 P_c , 变异率 P_m 。
- 2) 编码操作。变量 T 采用实数编码, 每一个变量用一个实数表示, 编码的长度即每个染色体基因的个数, 在约束边界 $[L, U]$ 内随机生成 Q 个个体作为初始群体。
- 3) 计算种群适应度值, 从中找出最优个体。
- 4) 遗传算法操作。经过选择、交叉、变异操作产生新种群。

选择操作采用轮盘赌法, 交叉操作采用实数交叉法, 变异操作则是随机从种群中选取一个个体, 选择个体中的一点进行变异产生更优秀的个体。

- 5) 非线性寻优。每进化一定代数后, 得到满足约束的最优控制量解以得到所有满足目标函数的最优种群个体为初始值进行局部非线性寻优, 并把寻到的局部最优值作为新个体染色体继续进化。

6) 判断进化是否结束, 若否则返回 3)。

算法流程如图 2 所示。

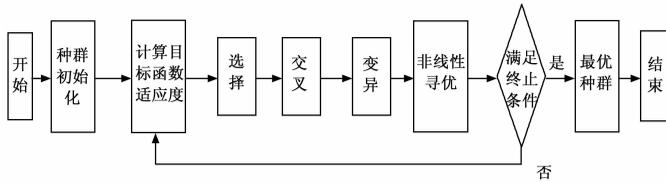


图 2 优化算法流程图 PHam.

2.3 张力优化

平台在待机工况下一年一遇海情 (风速 26.3 m/s, 流速 1.03 m/s, 海浪有义波高 6 m, 三者方向均为 60°) 锚链张力优化结果如表 2 所示。遗传算法的初始参数为: $Q=200$; $G=200$; $P_c=0.7$; $P_m=0.01$ 。

优化结果表明, 改进的遗传算法具有更高的优化精度, 更适合锚链张力的优化。

3 张力优化的应用仿真

张力优化算法的有效与否以及是否适用于半潜式钻井平台锚泊定位系统是需要通过仿真实验来进行验证, 锚泊定位平台的位姿信息解算流程如图 3 所示, 其中 $A = -M^{-1}D$, $B = M^{-1}$ 。

将张力优化模型、钻井平台数学模型和外界环境载荷模型相结合, 在 Matlab/Simulink 仿真环境下, 搭建系统仿真模型如图 3 所示, 仿真模型主要包括: PID 控制器 (Surge, Sway, Yaw), 张力分配 (tension_allocation), 平台低频运动数学模型 (Plat_model), 外界环境干扰力 (Wind, Current, Wave)。张力分配优化算法和平台数学模型用 Simulink/Subsystem 模块来实现, 环境载荷模型用 Simulink/MATLAB-Function 模块实现。

表 2 两种优化方法结果

NO.	T_i/KN	
	GA	改进 GA
1	935	833
2	1014	903
3	1167	1034
4	2441	2346
5	2714	2567
6	2949	2671
7	3316	2690
8	3170	2812
9	2944	2842
10	1974	1872
11	1649	1511
12	1371	1224

一年一遇的海情 (风速 26.3 m/s, 流速 1.03 m/s, 海浪有义波高 6 m, 三者方向均为 60°), 以 $[0, 0, 0]$ 为平台的期望位置对半潜式平台的纵荡、横荡和摇荡运动进行仿真研究。仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 半潜式平台的张力优化应用仿真虽然存在一定的稳态误差, 但远远小于平台控制在在工作水深 3% 的要求, 满足了平台作业要求的同时又保证了海洋平台工作的安全性。

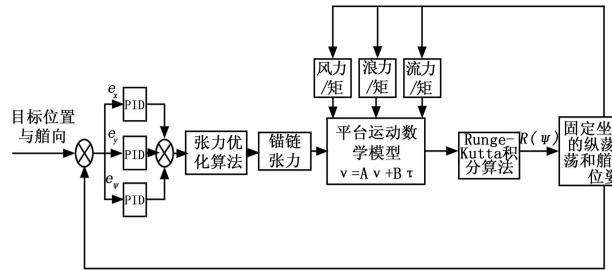


图 3 平台运动信息的求解

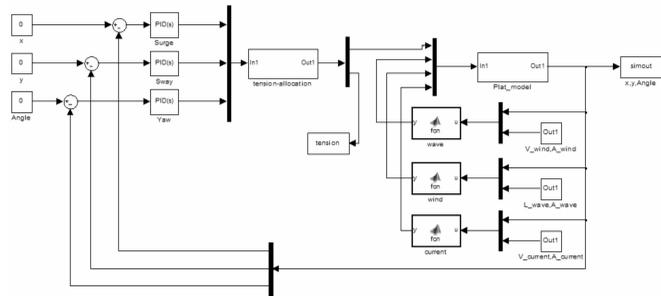


图 4 张力优化仿真框图

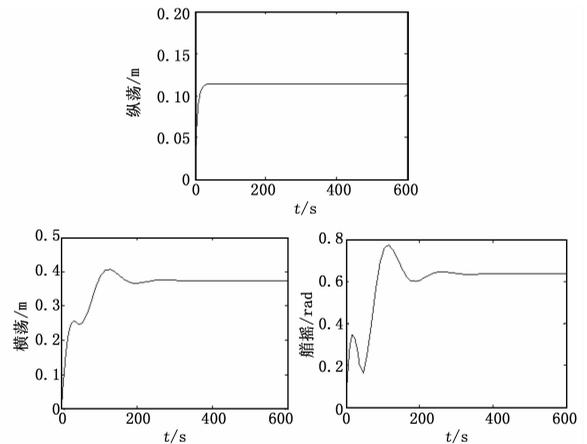


图 5 仿真结果

4 结语

以“海洋石油 981”深水半潜式钻井平台为研究对象, 对平台的低频运动模型、以及风、流与二阶波浪力载荷进行了数学建模, 利用改进的遗传算法优化锚链的张力, 以使其受力均衡, 防止单根或多根锚链因受力过大而断裂, 充分发挥了所有锚链的能力。最后, 仿真结果表明所建立的模型切实可行, 易于工程上的实施与推广。

参考文献:

[1] 史琪琪, 杨建民, 肖飞龙. 深水锚泊定位半潜式钻井平台性能数值与试验研究 [J]. 海洋工程, 2011, (4): 30-36.
 [2] 王世圣, 谢彬, 曾恒一, 等. 3 000 m 深水半潜式钻井平台运动性能研究 [J]. 中国海上油气, 2007 (8): 277-281.
 [3] 李东亮, 王文祥, 杨风允. 深水半潜式钻井平台锚泊定位系统安装工艺的研究 [J]. 中国造船, 2013, (1): 173-180.
 [4] Fossen T I. Guidance and Control of Ocean Vehicles [M]. John Wiley and Sons, Ltd., 1994.
 [5] Wang Fang, Li Ye, Wan Lei, etc. Modeling and motion control

strategy for AUV [A]. Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation [C]. 2009; 4851-4857.

[6] Fossen T I. Handbook in Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control [M]. John Wiley and Sons Ltd, 2011.

[7] 边信黔, 付明玉. 船舶动力定位 [M]. 北京: 北京科学出版社, 2011.

[8] 金鸿章, 苏晓宇, 于安才, 等. 基于锚链切换的平台自动锚泊定位系统设计 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18: 93-98.

[9] Berntsen P I B, Aamo O M, Leira B J. Ensuring mooring line integrity by dynamic positioning: controller design and experimental tests [J]. Automatica, 2009, 45 (5): 1285-1290.

[10] Mehdi Shafieefar, Aidin Rezvani. Mooring optimization of floating platforms using a genetic algorithm [J]. Ocean Engineering,

2007 (34): 1413-1421.

[11] Sun T, Gui W B, Yu Z G. Semi-Submersible Platform Positioning Mooring Control Test System Design and Application [J]. Marine Engineering, 2012 (32): 84-86.

[12] 李敏哲. 深水定位系泊系统反正实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013

[13] 胡 宽, 常新龙, 宋笔锋, 等. 求解含等式约束化问题的遗传算法 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45 (1): 92-97.

[14] 徐 梅, 文士发, 王福林, 等. 遗传算法求解约束优化问题时产生初始种群的改进方法 [J]. 东北农业大学学报, 2014, 45: 105-111.

[15] 王 芳, 万 磊, 徐玉如, 等. 深水半潜式钻井平台动力定位实时交互仿真系统 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011 (32): 1395-1401.

(上接第 182 页)

示, 发送响应状态: 如图 6 所示, 在发送完 1 个字节命令数据之后, 主机驱动时钟线、从机驱动数据线为低电平保持 100 μs 时间, 此段时间作为发送完一个字节数据的响应。

数据信息发送结束状态: 当主、从机接收到 00h 字节数据信息时, 标志着数据信息发送结束, 结束数据信息的发送。

3.2 PRBS 码检测 LVDS 接口电路

在传输 AD 采样数据之前, 要对设备的 LVDS 接口电路进行误码检测以保证数据传输的高可靠性。PRBS 码即伪随机序列, 伪随机序列具有预先不可确定性和不可重复实现性, 但是对于收发数据的双方, PRBS 码却是确定的, 因此可以利用 FPGA 内部的线性反馈移位寄存器产生伪随机数序列来检测 LVDS 接口电路的误码率。

图 7 是 16 级线性反馈移位寄存器的电路结构 (其数学表达式为 $p(x) = x^{16} + x^5 + x^3 + x^2 + 1$)^[6]。其中 ⊕ 表示门电路中的异或运算。

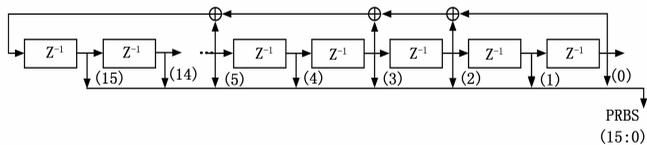


图 7 移位寄存器结构示意图

利用 FPGA 内部丰富的触发器资源, 可以生成 16 级反馈型的移位寄存器。

如图 8 所示 PRBS 码同步检测流程图。主机与从机通过低速的 IIC 总线启动 PRBS 码的校验命令之后, 从机的同步数据检测模块实时检测主机发送来的数据。在检测到预设的数据时, 同步数据检测模块产生的同步信号启动从机生成 PRBS 码与主机发送来的 48 位 PRBS 码逐位进行比较^[6], 当码型不同时, 启动计数器累计误码的个数, 上位机定时访问计数器的状态, 计算出误码率并显示在上位机界面上。

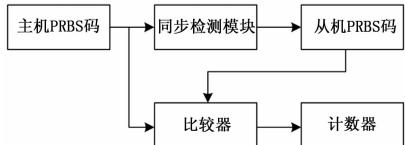


图 8 PRBS 码同步检测流程

4 测试结果

误码率与数据速率、预加重电压、环境温度、芯片供电电压噪声等因素密切相关。这里控制环境温度为 +25℃, 芯片供电电压为恒压低噪声 3.3V。利用设计的 PRBS 码检测电路测试被测设备的 LVDS 链路通信质量, 得出误码率与数据速率、预加重电压、电缆长度关系如表 1 所示。

表 1 误码率与数据速率、预加重电压、电缆长度关系

时钟 预加重 电缆	66 MHz		75 MHz		100 MHz	
	无	有	无	有	无	有
2 米	0%	0%	0%	0%	0%	0%
5 米	0%	0%	1.2E-22	0%	5.3E-20	0%
10 米	0%	0%	5E-10	3E-11	4E-15	0%

在环境温度 +25℃、2 米电缆、连续 5h 工作条件下, 本文设计的 LVDS 接口电路在 66 MHz、75 MHz、100 MHz 时钟速率下传输 PRBS 数据的误码率为 0, 表明接口电路在此条件下通信稳定, 数据速率达到 3.09~4.68 Gb/s。

5 结语

本文设计的 IIC 电路满足在 100 kHz 时钟速率下快速进行双向传输信息的需求, 同时自定义的 IIC 总线协议可以有效控制 LVDS 接口实现电路误码率检测以及数据信息传输; 多通道 LVDS 接口电路在 2 米长的电缆、100 MHz 时钟速率下, 最大数据带宽可达 4.68 Gb/s。满足前端 AD 高速采集的数据传输需求, 为更高速 AD 采样提供宽余传输带宽。

参考文献:

[1] 张 威, 苗克坚, 陆 寅. 基于 LVDS 的多路 SPI 的 PCI 板卡设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (3): 790-792.

[2] 任 伟, 张彦军, 白先民. 基于 LVDS 的高速数据传输装置的设计 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12 (29): 7759-7763.

[3] 邵 华, 刘亚斌, 徐志跃. 实时高速 LVDS 串行数据采集系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (3): 424-426.

[4] 应建华, 石枝林, 夏晓明. 一种串行时钟芯片的 IIC 总线接口电路设计 [J]. 计算机与数字工程, 2007, 35 (9): 180-183.

[5] 孙 轩. 非接触式手机充电平台的设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

[6] 田永和, 马小平. 基于 FPGA 的 PRBS 伪随机序列的实现与研究 [J]. 山西电子技术, 2006 (1): 41-43.