

柴油发电机调速系统迭代学习控制^{*}

邹屹东¹, 钱 晶¹, 曾 云¹, 王芳芳¹, 刘红锐², 郭雅卿¹

(1. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650504)

摘 要: 针对柴油发电机调速系统大多采用传统 PID 控制, 提出采用以 PID 作为学习律的迭代学习控制 (ILC) 策略, 利用其具有不依赖于被控系统的精确数学建模, 跟踪收敛快的特性, 设计了柴油发电机调速系统控制器。在 MATLAB/Simulink 中建立了柴油发电机调速系统仿真模型, 对 3 种基本工况进行了仿真研究, 详细分析了 ILC 在柴油发电机调速控制过程中的跟踪特性, 并将控制效果和传统 PID 控制进行了对比, 从仿真结果发现, 基于 ILC 建立的控制器不仅适用于柴油发电机调速系统, 而且表现出更好的动态性能。为柴油发电机的控制提供了新途径。

关键词: 迭代学习控制; 柴油发电机; 调速器; 控制; 仿真

中图分类号: TM 314 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)06-0082-06

doi: 10.12177/emca.2020.053

Iterative Learning Control of Diesel Generator Speed Control System^{*}

ZOU Yidong¹, QIAN Jing¹, ZENG Yun¹, WANG Fangfang¹, LIU Hongrui², GUO Yaqing¹

(1. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. College of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

Abstract: Most diesel generator speed control systems use traditional PID control. An iterative learning control (ILC) strategy that takes PID as the learning law is proposed. Making use of the characteristics of ILC of accurate mathematical modeling independent of the controlled system and fast tracking convergence, the diesel generator speed control system controller is designed. In MATLAB/Simulink, a simulation model of the diesel generator speed control system is established. Three basic working conditions are simulated and studied. The tracking characteristics of the ILC in the diesel generator speed control process are analyzed in detail, and the control effects of the proposed control and traditional PID control are compared. The results show that the controller based on ILC is not only suitable for the diesel generator speed control system, but also has better dynamic performance. A new way is provided for the control of diesel generators.

Key words: iterative learning control (ILC); diesel generator; speed controller; control; simulation

0 引 言

柴油发电机是作为一种快速电源在很多领域

中广泛使用, 如在微电网中柴油发电机作为主要电源, 因为快速响应对于运行的微电网有着重要的影响, 所以作为主要电源的柴油发电机需要能

收稿日期: 2020-04-06; 收到修改稿日期: 2020-05-06

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51869007, 51967009)

作者简介: 邹屹东 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水力机组稳定与控制。

钱 晶 (1967—), 女, 博士, 教授, 研究方向为水力机组稳定与控制。

够迅速起动,在负荷变化的过程中能够快速响应,以促进系统频率和电压稳定。柴油机发电机作为电厂中的备用电源往往面对的是故障工况,快速起动特性对于保证电厂的安全同样起着重要的作用。

柴油发电机调速系统在外界负荷发生波动时能自动调节喷油量,从而维持系统频率在一定的水平上运行。柴油机和发电机原理复杂,目前对柴油发电机的控制仍然是采用常规 PID 控制方法,为了提高控制性能,也有研究者将一些新的控制方法引入到控制策略中,进行进一步的研究。相关控制方法有模糊控制、神经网络控制、自适应控制以及多种控制策略相结合进行的各类控制。文献[1]在控制策略上引入模糊控制,比之前常规控制策略的精度大大提升,最高可达 85%。文献[2-4]在建立的柴油发电机数学模型的基础上,加入 PID 和神经网络,获得了较好的动态性和鲁棒性。自适应控制与模糊控制 2 种控制策略相结合的控制策略也能对柴油发电机调速控制起到明显的改善作用^[5]。文献[6-7]提出了基于 Hamilton 理论的柴油发电机调速控制策略,也取得了较好的控制效果。

迭代学习控制(ILC)适合于具有重复运动性质的被控对象,不依赖于被控系统的精确数学建模,该方法最早在 1978 年被提出^[8]。ILC 经过 40 年的研究与发展,其理论被应用在包括电力系统在内的各种工业自动化领域中。文献[9-10]通过 ILC 设计水电站调速系统,使得被控系统动态品质得到提高,并具有良好的鲁棒性以及抑制大超调特性。另外,为了较好实现发电厂操作的高效率和高负荷跟踪能力,采用基于 ILC 的非线性模型预测控制器,在时间和迭代次数方面表现出了良好的性能^[11-15]。

本文将 ILC 引入柴油发电机的调速系统中,由于 ILC 不依赖于被控系统的精确数学建模,对于具有复杂非线性特点的柴油发电机系统具有很好的适应特性,可以避开复杂的数学模型。本文采用柴油发电机线性模型,在不同工况下进行仿真计算,并与常规 PID 控制进行了对比。研究结果表明,ILC 适用于柴油发电机控制,能够改善机组的暂态性能。

1 研究对象模型

1.1 柴油机执行器数学模型

控制柴油机的喷油嘴位移大小的执行器采用一个电磁执行器。该执行机构是由比例电磁铁和回位弹簧构成的系统,可以视作一个标准的一阶惯性环节,其传递函数为

$$G_z(s) = \frac{K}{T_k s + 1} \quad (1)$$

式中: K 为脉冲调制占比与喷油嘴齿条位置关系常数; T_k 为电磁执行器惯性时间系数。

1.2 柴油机数学模型

柴油机的状态变量不止一个,实际设计中根据工程需要各种不同阶数的模型均有应用。本文采用柴油机一阶惯性加延迟环节的数学模型,其传递函数为

$$G_g(s) = \frac{K_\eta}{T_g s + 1} e^{-\tau s} \quad (2)$$

式中: K_η 为柴油机放大系数; T_g 为柴油机时间常数; τ 为柴油机模型滞后时间。

1.3 发电机数学模型

发电机作为柴油机的输出对象,其原理较为复杂,研究中可以采用线性和非线性模型。本文采用发电机一阶线性模型,其传递函数可以表示为

$$G_a(s) = \frac{1}{T_a s + e_g} \quad (3)$$

式中: T_a 为发电机惯性时间常数; e_g 为发电机自调节系数。

1.4 被控对象及其控制器框图

柴油机、发电机、执行器连接框图如图 1 所示。柴油发电机所带负荷为孤立负荷。

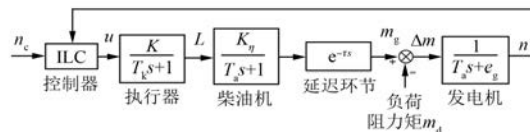


图1 柴油机、发电机、执行器连接框图

图 1 中, n_c 为给定目标转速(基准值), u 为控制器输出控制信号, L 为执行器输出位移信号, n 为同步发电机转速, m_g 为柴油机输出主动力矩, m_d 为负荷输入的阻力矩, n 为发电机输出转速。

柴油发电机调速控制需要保证调速系统 3 个基本功能:(1) 接入系统负荷增加,阻力矩增大,转速 n 下降,实现减速并加大进油量调节动作;(2) 负荷减少,阻力矩减少,转速 n 升高,实现增速并减少进油量调节工作;(3) 负荷不变,阻力矩与动力矩保持平衡,实现执行器输出位移 L 维持现有不变。以下的分析是在满足实际运行中对柴油发电机调速器的 3 个基本功能基础上展开。

2 ILC 算法

对于一个连续被控系统,迭代学习律如下:

$$u_{i+1}(t) = L[u_i(t), e_i(t), t] \tag{4}$$

式中: $u_{i+1}(t)$ 为第 $i+1$ 次的控制器输出项; $u_i(t)$ 为第 i 次的控制器输出项; $e_i(t)$ 为第 i 次误差项。

通过式(4)描述的形式迭代学习律寻找控制规律,使得被控对象在极短时间内实现低误差内的目标跟踪。

本文中采用的 ILC 方法中的学习律采用 PID 形式,学习增益为 PID 比例、积分以及微分的系数,输出控制误差作为学习因子。因此,ILC 可以表示为

$$u_{i+1} = u_i + P_o e_i + I_o \int e_i d\tau + D_o \dot{e}_i + P_c e_{i+1} + I_c \int e_{i+1} d\tau + D_c \dot{e}_{i+1} \tag{5}$$

其中: P_o 和 P_c 、 I_o 和 I_c 、 D_o 和 D_c 分别为比例、积分、微分项的学习增益系数,当取不同值或零值时,可以构成 P、D、PI、PD、PID 型 ILC 算法。

迭代学习 PID 控制算法步骤如图 2 所示。其中, $y_d(t)$ 为控制目标, $u_0(t)$ 为初始控制信号, $y_i(t)$ 为系统输出, $e(t)$ 为系统误差。本文的仿真假设以下条件:

- (1) 被控系统的结构每次运行保持不变;
- (2) 给定系统期望输出轨迹 $y_d(t)$,迭代计算过程中保持期望输出轨迹 $y_d(t)$ 不变;
- (3) 期望控制输出 $u(t)$ 存在且唯一,即在给定的初始状态 $x(0)$ 下,经过若干次迭代计算后, $y(t)$ 趋近于 $y_d(t)$;
- (4) 每次运行的输出 $y_i(t)$ 均可观测,误差信号为 $e(t) = y_d(t) - y_{i+1}(t)$ 。

3 仿真研究

3.1 柴油发电机调速系统模型建立

在 MATLAB/Simulink 环境中,搭建柴油发电

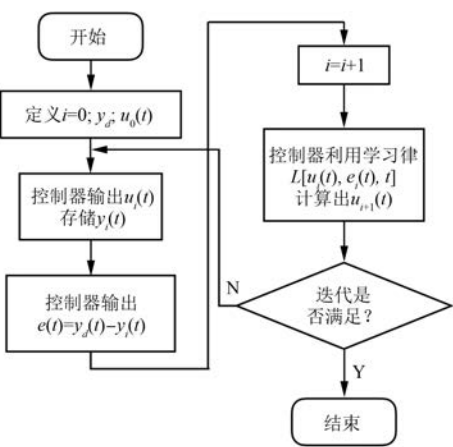


图 2 迭代学习 PID 控制算法步骤

机调速系统,如图 3 所示。ILC 迭代控制的实现主要由图 3 中 Switch 模块和由 S 函数编写的 ILC 模块组成,其参数如表 1 所示。

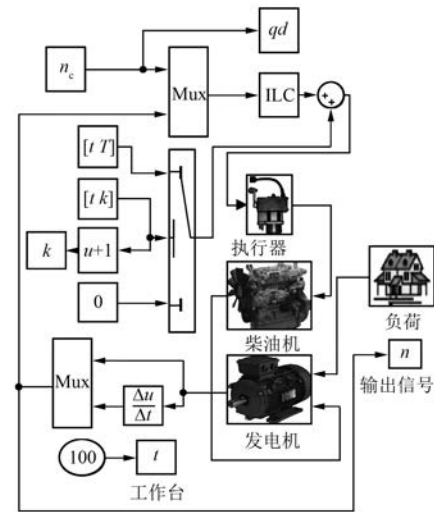


图 3 柴油发电机 ILC 仿真框图

表 1 仿真参数

K	T_k	K_η	T_g	τ	T_a	e_g	n_c
93.8	12.1	0.3	0.1	0.037	3	1	1

迭代学习过程通过误差或者迭代次数进行限制,当控制器检测到控制误差小于期望误差值时,程序结束学习,本文采用迭代次数作为迭代学习的限制因子。

在仿真和实际工业控制应用过程中,关于期望轨迹的选择进行以下几点讨论:

- (1) 理论上可以给定完美的期望轨迹,但仿

真过程中可能会出现迭代时间加长,不收敛等情况,从而需要调整期望轨迹。

(2) 在实际应用中,根据实时数据现场迭代会造成调节时间过长和不收敛的问题,导致控制失败。为了避免这类问题出现,ILC 系统可以对实际运行数据进行提前训练,获得离线训练结果,结合理论分析给出合理的期望轨迹,从而保证控制的有效性和优化效果。

3.2 柴油发电机调速系统仿真及分析

对开机、增、减负荷 3 种基本工况进行仿真分析,并对传统 PID 和 ILC 2 种控制方法的时域响应进行对比。仿真中采用标么值,基准值采用额定工况下的各个参数。

3.2.1 柴油机发电机调速系统开机工况

图 4 所示为开机过程转速与迭代次数的响应曲线。曲线反映每次迭代后,柴油发电机转速在时域上的动态响应, i 为迭代次数。从图 4 可以看出,迭代过程是收敛的,迭代 1 次,转速即快速接近期望值,与迭代 6 次的效果差别并不大,因此在该工况下 ILC 的迭代次数可以设置为 1,可以提高控制速度。

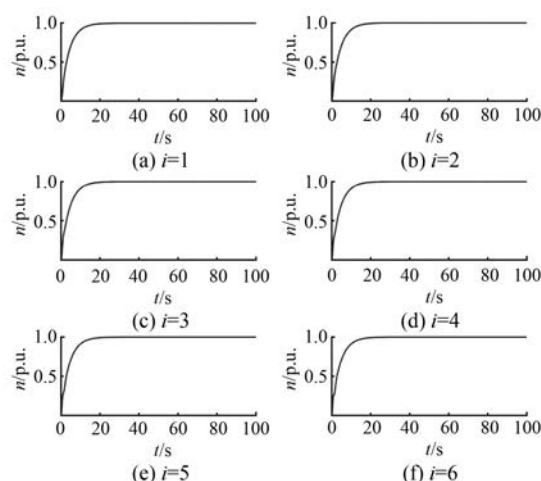


图 4 开机过程不同迭代次数下的响应曲线

图 5 所示为开机过程柴油发电机转速响应曲线。图 5 中,实线为采用 ILC 时的全局最优控制输出,虚线为采用常规 PID 时的系统时域响应输出。从图 5 可知,系统在采用传统 PID 控制时,控制响应速度较快,但是出现超调,超调量为 0.114 p.u.,最终达到稳定的时间为 25 s;而采用 ILC 时曲线比较平稳,没有出现超调量,调节时间

不到 20 s。结果验证了在开机工况下 ILC 能够明显抑制系统的超调。

虽然 ILC 的本质也是 PID 控制,但是通过引入迭代学习后能够使控制效果得到进一步的优化。

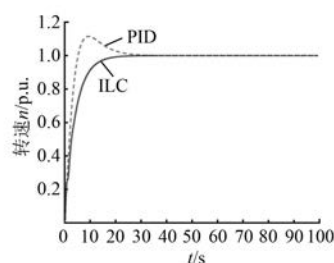


图 5 开机过程的柴油发电机转速响应曲线

3.2.2 柴油发电机调速系统增负荷工况

在 $t=50$ s 时出现 50% 额定负荷扰动,调速系统在不同迭代次数下 ILC 响应曲线如图 6 所示。由图 6 可知,随着迭代次数从 1~6 的增长,系统超调量随之变化。当迭代次数达到 4 次时,此时系统表现出最优的性能,对应的最大转速为 1.033 p.u.。但是,迭代次数超过 4 次时,ILC 表示超过学习状态,对系统在抑制超调量上作用降低。因此,在本仿真工况下 ILC 的迭代学习次数取为 4。

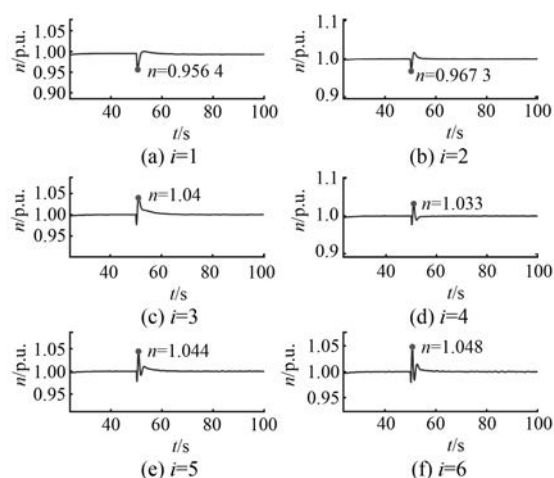


图 6 增负荷扰动下不同迭代次数下的转速响应曲线

图 7 为增负荷工况下的转速响应曲线。控制器在第一响应中出现了较大的调整率,通过 4 次迭代学习,控制系统的超调量得到了有效的抑制,同时系统响应出现 3 次小幅度振荡。从图 7 可以

看出,常规 PID 转速暂态超调量为 13%,调节时间约为 20 s;而系统采用 ILC 控制时,暂态超调量仅为 3.3%,调节时间约为 10 s。两者控制效果的对比反映出控制器经过迭代学习后能够将控制量反馈给柴油机的调节机构,减少了系统的超调量,维持了柴油发电机输出转速的稳定。

从以上分析可知,无论是超调量还是调节时间,在突增负荷工况下,ILC 效果均优于 PID。因此,采用 ILC 可以明显改善柴油发电机调速系统的动态特性。

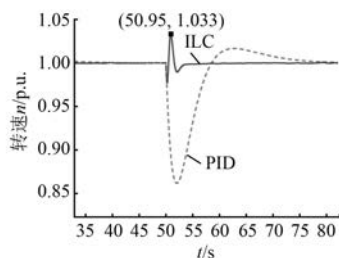


图7 增负荷工况下的转速响应曲线

3.2.3 柴油发电机调速系统在减负荷工况

在 $t=50\text{ s}$ 出现减少 40% 额定负荷的扰动,调速系统迭代学习的跟踪过程曲线、转速响应曲线分别如图 8、图 9 所示。由图 8 可知,ILC 的迭代次数从 1 增加到 3,系统的最大输出响应分别为 1.027、1.026、1.021 p.u.,但迭代次数超过 3 次时,系统开始表示超过学习状态,不利于系统的控制响应。因此,在该工况下系统设置迭代次数为 3 时,系统表现出最好的动态响应。

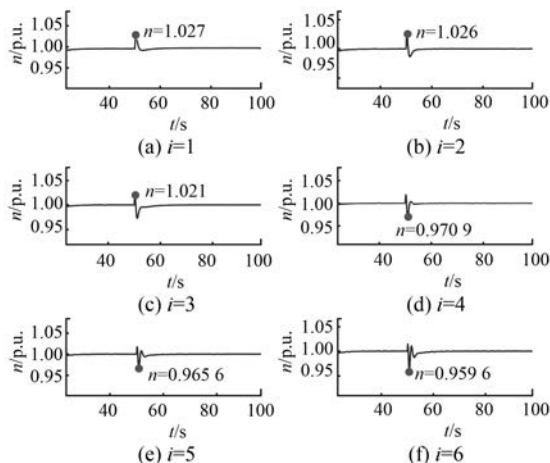


图8 减负荷扰动下不同迭代次数下的响应曲线

图 9 为迭代次数设置为 3 时转速响应曲线。从图 9 可知,当系统在 50 s 启动甩 40% 额定负荷仿真时,采用 PID 控制的柴油发电机调速系统的转速最大超调量达到了 14%,而采用 ILC 时为 2.1%。在调节时间上,采用常规 PID 控制 20 s 完成调节过程,但采用 ILC 在约 5 s 就达到了稳定,ILC 的调节性能大大优于 PID 控制。

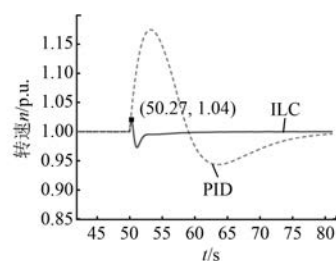


图9 减负荷工况下的转速响应曲线

综上所述,由于 ILC 中引入了迭代学习算法,使得在控制过程中能够不断优化相关参数,因此控制效果要优于传统 PID 控制。而且负荷扰动越小,稳定时间越小,这一性能适用于频繁调节的柴油发电机正常运行时的负荷调整。

4 结 语

本文以柴油发电机调速系统为控制对象,通过在不同的运行工况下对 ILC 的控制效果进行了仿真分析,并与常规 PID 进行对比,得出以下结论:

(1) ILC 通过在调节过程中不断调节相关参数来达到控制过程优化,从算法的迭代过程仿真曲线看到,调节的迭代过程,使得算法在抑制超调的同时缩短了暂态调整时间,达到综合优化的目的。

(2) ILC 对柴油发电机调速系统的运行工况控制是有效的,与常规 PID 的效果相比,ILC 能缩短机组的暂态调节时间,具体表现在超调量小,调节时间短。

(3) ILC 不依赖于被控系统的精确数学建模,因此本文的 ILC 实现是基于研究对象的简单模型。对高阶模型下的控制的效果以及工程应用中的柴油发电机模型的合理选择等问题,未来将展开研究。

【参考文献】

- [1] 尤向阳.船舶电站柴油机调速系统模糊控制算法[J].舰船科学技术,2018,40(24): 64.
- [2] 汤积仁,雷玉勇,聂光伟,等.神经网络 PID 控制在柴油机调速系统中的应用[J].煤矿机械,2010,31(1): 201.
- [3] 许徽,暨仲明.基于改进型 BPNN-PID 的发动机调速系统研究[J].工业控制计算机,2017,30(7): 34.
- [4] 宋恩哲,王毓源,丁顺良,等.RBF 神经网络理论在柴油机控制中的应用[J].哈尔滨工程大学学报,2018,39(5): 908.
- [5] 房俊全,朱从乔.柴油机调速系统的模糊自适应 PID 控制[J].微计算机信息,2005(15): 55.
- [6] 梁浩哲,韩冰,张丹瑞.基于 Hamilton 理论的船舶柴油发电机组控制策略[J].中国航海,2019,42(1): 6.
- [7] 张利军,孟杰,兰海.基于 Hamilton 函数方法的船舶发电机组综合协调控制[J].控制理论与应用,2011,28(11): 1541.
- [8] UCHIYAMA M. Formation of high speed motion pattern of mechanical arm by trial[J]. Transaction of the Society of Instrumentation and Control Engineer, 1978,19(7): 6.
- [9] 马花婷. H_{∞} 迭代学习控制算法研究及其在水轮机调速系统中的应用[D]. 太原: 太原科技大学, 2010.
- [10] 高博琛.水力机组迭代学习 PID 控制算法研究[D].西安:西安理工大学,2016.
- [11] LIU X, KONG X. Nonlinear fuzzy model predictive iterative learning control for drum-type boiler-turbine system[J]. Journal of Process Control, 2013, 23(8): 1023.
- [12] WANG J, LIU X. A new kind of nonlinear model predictive iterative learning control[C]//Proceedings of the 2012 24th Chinese Control and Decision Conference(CCDC), 2012.
- [13] 刘金琨.智能控制[M].4 版.北京:电子工业出版社,2017.
- [14] 侯世英,时文飞,万江.基于 CMAC-PID 控制的柴油发电机组的建模与仿真[J].系统仿真学报,2007,19(13): 3052.
- [15] 李铁军.柴油机电控技术实用教程[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [9] 杨德勇,支永健,闵建军,等.PWM 逆变驱动系统传导干扰分析及抑制[J].大功率变流技术,2017(3): 1.
- [10] 肖培,王珏,凌明祥,等.场线路多耦合下电机及其驱动系统辐射电磁干扰预测方法研究[J].电子学报,2017,45(10): 2449.
- [11] 郑军奇.EMC 电磁兼容设计与测试案例分析[M].2 版.北京:电子工业出版社,2016.
- [12] 钱照明,程肇基.电力电子系统电磁兼容设计基础及干扰抑制技术[M].杭州:浙江大学出版社,2000.
- [13] 罗玲,黄其,张远.开式绕组无刷电机换相转矩脉动抑制研究[J].电气工程学报,2019,14(4): 1.
- [14] 马仰华,韩宗虎,王继良.机抖激光陀螺抖频匹配技术的优化[J].中国激光,2016,43(10): 24.
- [15] ZHANG C W, WANG X Y, FORBES L. Simulation technique for noise and timing jitter in electronic oscillators[C]// Proceedings the 16th International Conference on Microelectronics, 2004.
- [16] 钱照明,汪顿生,徐德鸿,等.中国电气工程大典(第 2 卷): 电力电子技术[M].北京:中国电力出版社, 2009.
- [17] 杜明磊,徐中明,丁良旭,等.雨刮电机对整车电磁辐射干扰的仿真与试验研究[J].汽车工程,2012,34(10): 937.
- [18] KWAK S, MUN S. Model predictive control methods to reduce common-mode voltage for three-phase voltage source inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(9): 5019.

(上接第 45 页)