

## 基于 FPGA 的综合潮流控制器的设计与实现

邱大强, 李群湛, 舒泽亮, 周福林, 余俊祥

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 分析了同相牵引供电系统的结构与原理, 并提出了综合潮流控制器的一种设计与实现方案。该方案通过采用改进的瞬时无功功率检测方法, 计算出补偿电流并通过控制背靠背的 SVG 系统实现同相牵引供电和电能质量综合治理。详细介绍了以 FPGA 为核心的综合潮流控制器的设计和实现方法, 该控制器由先进的 FPGA、A/D 转换和 IGBT 等电路构成, 通过对多路电压、电流实时输入信号进行采集和处理, 由 FPGA 快速计算生成指令电流, 最后再通过滞环调制方式控制背靠背的 SVG 系统从而实现同相牵引供电。仿真和实验验证了方案的正确性和有效性。

**关键词:** 同相牵引供电系统; 综合潮流控制器; 瞬时无功功率; 协调控制器; FPGA

### Design and realization of integrated power flow controller based on FPGA

QIU Da-qiang, LI Qun-zhan, SHU Ze-liang, ZHOU Fu-lin, YU Jun-xiang

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The structure and theory of novel co-phase traction power supply system (TPSS) are developed and the design and realization scheme of integrated power flow controller (IPFC) are proposed. The modified instantaneous reactive power detection method which could calculate the compensation current immediately is applied in the system. The back to back SVG system could achieve co-phase TPSS and comprehensive management of power quality according to compensation current. The design and realization of IPFC based on FPGA is introduced in detail. The controller is composed of FPGA, A/D conversion and IGBT circuits and so on, and through the multiple voltages and current real-time signal acquisition and processing, the instruction current could be calculated by the FPGA quickly and after hysteresis modulation, the co-phase TPSS could be realized. The correctness and effectiveness of the scheme are authenticated by simulation and experiment.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.51007075).

**Key words:** co-phase TPSS; IPFC; instantaneous reactive power; coordination controller; FPGA

中图分类号: TM761; U223 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0163-05

## 0 引言

电气化铁路具有运载能力强、速度快、能耗低、对环境污染小等优点而得到快速发展。目前我国采用的是异相的牵引供电方式, 随着地高速重载铁路的运行, 牵引负荷引起的电能质量问题引起广泛的关注。由于异相供电牵引网上有“电分相”的存在, 列车在过分相时经常会引起过电压现象, 极大地降低了既有牵引系统的可靠性。同时列车在“过分相”时会有减速现象, 相关数据表明机车从 250 km/h 加速到 300 km/h 需要约 4 min 的加速时间, 严重地限

制了列车的行驶速度。新型的同相供电系统从根本上解决了电能质量和“过分相”问题, 为电气化铁路的发展提供了良好选择。该系统能够将公用电网的三相电转换成适合于电气化铁路的单相电, 在解决电能质量问题的同时并在适当条件下能够实现牵引网的多边供电。

目前同相牵引供电系统是研究的热点问题: 文献[2-5]针对牵引变压器的不同接线形式, 提出了不同结构的基于综合潮流控制器的同相供电系统方案; 文献[7-9]主要研究了潮流控制器的控制方案以及调制方法。以上的研究主要是通过 Matlab 和 PSCAD 仿真软件实现并没有进行相关硬件设计和研究。

针对以上问题, 本文对综合潮流控制器的硬件设计与实现进行了研究, 提出以 FPGA 芯片为核心

**基金项目:** 铁道部重大科技项目 (Z2006-047); 国家科技支撑计划 (2007BAA12B05); 国家自然科学基金项目 (51007075); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20090184120010)

的综合潮流控制器的设计与实现方案。该方案能够对多路电压、电流信号进行实时采集和处理,结合改进的瞬时无功功率检测方法,通过 FPGA 快速地计算出指令电流,最后再通过滞环比较的方法,产生控制 IGBT 导通的指令脉冲,经过驱动电路放大后控制背靠背的 SVG 系统。本文首先从理论及仿真的角度分析和验证了该系统的可行性,最后完成了实验室的系统模型,测试结果分析表明该系统切实可行。

### 1 同相牵引供电系统结构及原理

同相牵引供电系统主要由一次侧的公用电网、牵引变压器和综合潮流控制器组成,其结构如图 1 所示。

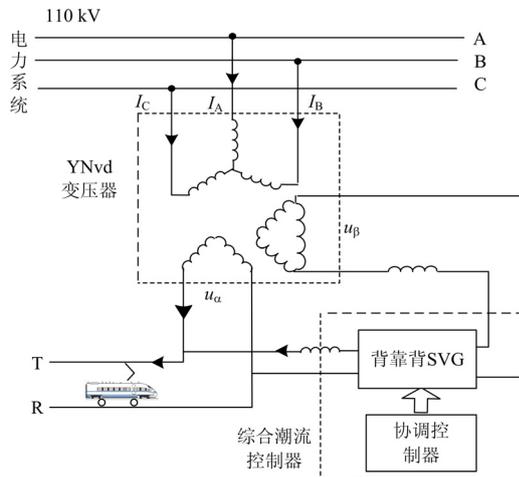


图 1 同相牵引供电系统结构图  
Fig.1 The structure of co-phase TPSS

电气化铁路一般通过 110 kV 的 PCC 节点接入公用电网,图 1 所示系统采用三相变两相的 YNvd 牵引变压器,该变压器原边采用星形接线,次边采用三角形和 V 形连接。当变压器阻抗匹配的时候,能够实现三相到两相的转化并能够有效地抑制三次谐波和零序电流。变压器的输出端电压  $u_\alpha$ ,  $u_\beta$  相位相差  $90^\circ$ 。由于电气化铁路是属于单相负荷,现有的异相牵引供电系统很难保证变压器二次侧负荷相等,由于二次侧的负荷不平衡会使得一次侧的三相电力系统的负荷不平衡并产生负序电流,会引起许多的电力系统故障。传统变压器无法实现三相到单相的平衡转换,而同相牵引供电系统通过综合潮流控制器将使  $u_\beta$  端输出负荷的一半有功功率转移到  $u_\alpha$  端口,从而实现单相牵引供电并且确保牵引变压器二次侧负荷相等,彻底解决负荷不平衡问题。综合潮流控制器主要由协调控制器和背靠背的 SVG 系统组成。协调控制器采集馈线电流、电压、 $\alpha$ 、 $\beta$

臂电压、电流等相关控制信号,通过 FPGA 实时计算出系统需要补偿的输入和输出有功、无功、谐波,生成指令电流,然后在滞环调制后产生相应的 IGBT 的脉冲信号,控制背靠背 SVG 系统生成相应电流,从而实现补偿牵引负荷所引起的无功和谐波,达到电能质量的综合治理。从系统结构可以看出,该系统取消了牵引变电所出口处的“过分相”,系统一次侧不需要换相连接,在情况允许时可闭合变电所之间的分区所,在实现多边供电的同时也增强了系统的可靠性。当综合潮流控制器出现故障时可退出运行,在短时间内 YNvd 等效为单相变压器,并不影响系统正常运行。

综合潮流控制器的补偿效果很大程度上取决于补偿电流的实时性,特别是对于牵引负荷的谐波补偿。在系统的控制过程中,对于指令电流的检测尤为重要,一般的检测算法均有半个或一个周波以上的检测延时而成为系统的薄弱环节。本文通过对原有的瞬时无功功率检测算法进行改进,使得其电流检测延时在  $1/6$  周波内,能够极大地提高系统的补偿效果。同时结合高性能的 FPGA 芯片,能够快速实时地计算出补偿电流,提高了整个系统的反应速度。

### 2 补偿电流检测算法

综合潮流控制器采用电力电子技术,首先将单相交流电整流成直流,然后在根据指令电流逆变成负荷需要的单相交流电。通过对  $\beta$  臂输出电压和电流的实时检测与控制,从而保证功率因素为 1 以及直流电容电压的稳定。通过对牵引变电所馈线、补偿电流以及  $\alpha$  臂的电压检测,实现对综合潮流控制器输出电流的控制。由于牵引负荷波动较大,对系统实时性较高,指令电流的检测和计算的实时性非常重要,因此对于补偿电流的检测变得尤为重要。

设 YNvd 牵引变压器副边电压分别为:

$$u_\alpha = \sqrt{2}U \sin \omega t \tag{1}$$

$$u_\beta = \sqrt{2}U \sin(\omega t + 90^\circ) \tag{2}$$

牵引变电所馈线电流:

$$i_{Load} = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + \sum_{n=2}^{+\infty} \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t + \phi_n) \tag{3}$$

其中:  $U$  为输出电压的幅值;  $I_1$  为基波电流幅值;  $\phi_1$  为基波功率因素角;  $I_n$  为  $n$  次谐波电流幅值;  $\phi_n$  为  $n$  次谐波功率因数角。

将馈线电流对应的基波电流分解成有功电流和基波无功电流,分别为  $I_p = I_1 \cos \phi_1$ ,  $I_Q = I_1 \sin \phi_1$ , 可

得  $i_{Load}$  :

$$i_{Load} = \sqrt{2}I_p \sin \omega t + \sqrt{2}I_Q \cos \omega t + h(t) \quad (4)$$

其中  $h(t)$  为谐波电流总和, 负荷消耗的瞬时功率:

$$P_{Load} = u(t) \cdot i_{Load}(t) \quad (5)$$

牵引变电所只需要公用电网提供有功功率, 而无功功率由变电所内部补偿。因此  $\alpha$  臂和  $\beta$  臂提供大小相等的有功电流分别为:

$$i_\alpha = \frac{\sqrt{2}}{2} I_p \sin \omega t \quad (6)$$

$$i_\beta = \frac{\sqrt{2}}{2} I_p \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (7)$$

考虑到在补偿无功和谐波时不消耗系统有功且一个周期内谐波和无功代数和为零, 因此综合潮流控制器的输出电流  $i_\gamma = i_{Load} - i_\alpha$  即:

$$i_\gamma(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} I_p \sin \omega t + \sqrt{2} I_Q \cos \omega t + h(t) \quad (8)$$

从以上的推导可以看出, 通过改进的瞬时无功功率算法能够快速准确地计算出综合潮流控制器补偿电流。其综合潮流控制器的输入端只需要输入负载消耗的一半有功电流, 输出端电流包含了补偿的谐波以及无功。

### 3 硬件设计与实现

综合潮流控制器主要由协调控制器和背靠背的 SVG 系统构成, 其中协调控制器是设计的重点和难点, 其结构如图 2 所示。

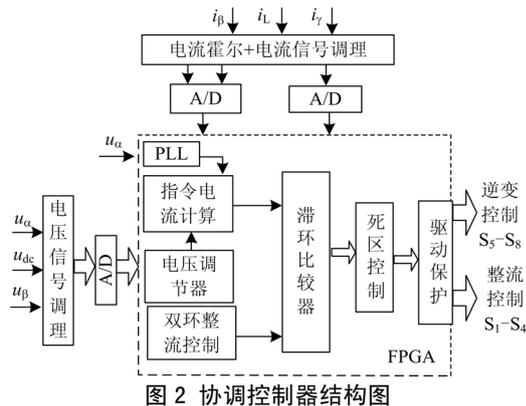


Fig.2 The structure of coordinate controller

协调控制器主要由 FPGA、A/D 转换和传感器等组成, 负责系统的整流控制、逆变控制以及相关通信功能。其中 FPGA 负责控制命令接收运行状态反馈、数据采集、补偿电流计算和双环整流控制, 并且完成对双环整流和补偿电流计算, 对输出的控制信号进行 PWM 调制并产生高精度的驱动脉冲,

同时实现对综合潮流控制器的过电压、过电流以及开关器件故障的保护功能。由于系统的实时性要求高, 从系统实时性的角度考虑, 采用高速的 A/D 转换器, 并通过增加隔离处理功能提高系统的整体可靠性。

PWM 发生器采用滞环比较的方法, 由 FPGA 仿照 DSP 的事件管理器, 生成对称的三角波与脉宽值比较, 当三角波低于脉宽值, IGBT 输出无效脉冲, 另一个 IGBT 输出有效脉冲; 当三角波高于脉宽值, 两管状态反之。为防止同一桥臂的 IGBT 同时导通, 采用 FPGA 设计了死区控制, 通常采取一个 IGBT 先关断, 一段时间后另一个 IGBT 再导通的控制方式。FPGA 中的死区产生通过延时导通和立即关断的方式实现的。脉冲封锁, 当系统检测到硬件故障状态时, 立即闭锁脉冲从而保证功率器件安全。

考虑到该系统主要以 FPGA 为核心, 对 FPGA 资源要求很高, 本文选用 Altera 公司的 EP3C55F 系列, 其内核采用 1.5 V 电源供电, 功耗小, 端口工作电压为 3.3 V, 具有速度快, 运行稳定等特点。该系列芯片采用查找表 (LUT) 和 LAB (嵌入式阵列块) 相结合的结构适合应用于具有复杂逻辑及有存储、缓冲能力系统。由于系统采用全数字控制方式, 因此具有较强的抗干扰能力。

### 4 仿真结果与实验研究

#### 4.1 仿真研究

本文利用 Matlab/Simulink 软件进行同相牵引供电系统仿真, 其负载电流滞后电压  $30^\circ$ , 负载电流波形如图 3 所示。

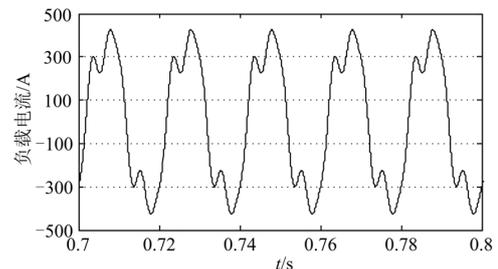


图 3 牵引负荷电流

Fig.3 The current of load

$$i_L = 400\sin(\omega t - 36^\circ) + 120\sin(3\omega t - 25^\circ) + 60\sin(5\omega t - 75^\circ)$$

在异相的牵引供电系统方式下, 变电所采用 YNvd 接线方式运行, 当某牵引变电所只有单臂有列车的情况, 其负荷不对称度达到 100%。牵引变电所需要设计专门的滤波器组来滤除机车产生的谐

波电流和补偿无功，否则将对三相电力系统引起严重的电能质量问题，图 4 为 YNvd 接线方式下，牵引负荷无补偿情况时的 110 kV 原边电流。

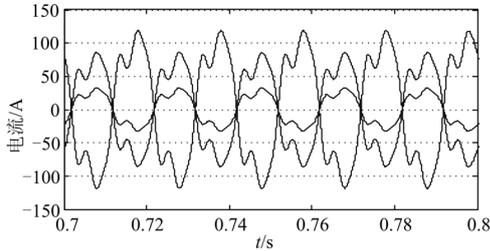


图 4 YNvd 接线方式原边电流  
Fig.4 Primary-side current of YNvd

针对异相供电的电能质量问题，图 5 为同相牵引供电系统下的 110 kV 侧原边电流。

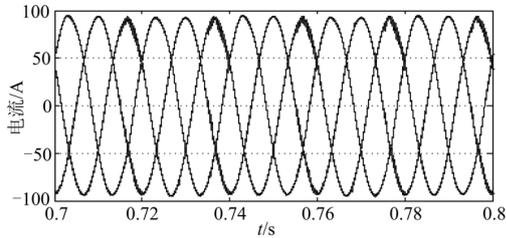


图 5 同相牵引供电系统 110 kV 原边电流  
Fig.5 110 kV primary-side current of co-phase TPSS

通过对比图 4 和图 5，可以看出通过综合潮流控制器的作用，110 kV 侧原边电流其谐波含量少，

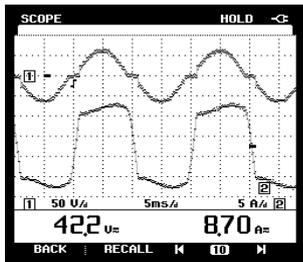
电流平衡，且功率因数可以接近 1。同时由于综合潮流控制器补偿了系统的谐波和无功，能够减少牵引变电所的容量。从仿真结果可以看出，同相牵引供电系统 110 kV 侧电流比异相供电时电流相对较小。

#### 4.2 实验论证

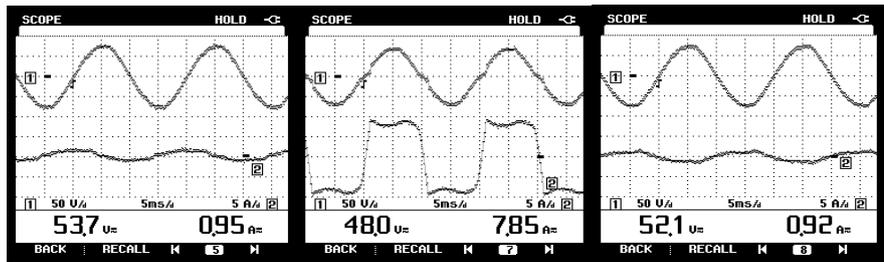
根据系统的设计方案，本文采用 EP3C55F 系列芯片，依照上述模型和控制策略进行了实验研究。实验参数的设定 YNvd 变压器原边输入线电压 380 V/50 Hz，次边输出电压  $u_\alpha = u_\beta = 51$  V， $L = 1.43$  mH， $C = 50$   $\mu$ F，负载  $R_L = 3.3$   $\Omega$ ，直流侧给定  $U_{dc} = 150$  V。

从系统实验结构如图 1 所示。在综合潮流控制器没有工作时，YNvd 的  $\alpha$  臂接入模拟的牵引负荷此时的负荷电压、电流如图 6 (a) 所示，可以看出牵引负荷电流包含了大量的谐波和无功，其波形接近于方波，图 6 (b) 为此时 YNvd 原边的三相的电压、电流波形。通过对原边三相电流的测量可知，A 相电流为 0.95 A，B 相电流为 7.85 A，C 相电流为 0.92 A，电流谐波含量大，电能质量差。同时三相电压也存在一定的不对称。

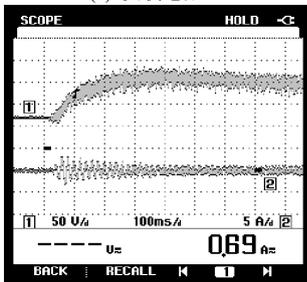
从图 6 (d) 中看出，当综合补偿器补偿以后，其 YNvd 原边的三相的电流波形补偿效果明显。基本补偿了负载的谐波电流。同时从原边电压可以看出，其电流不平衡度得到明显改善。图 6 (c) 是靠背中间直流电容电压，通过双环控制其直流电压稳定。



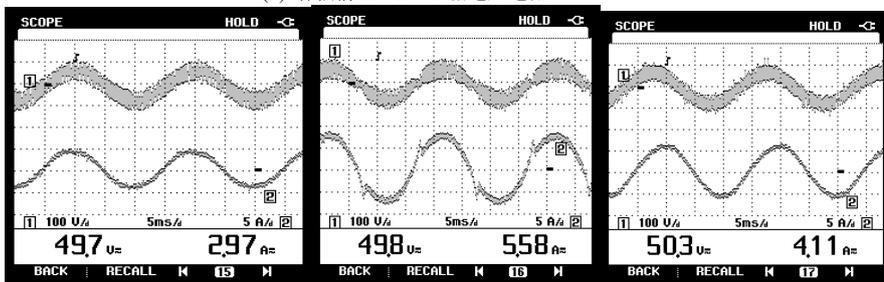
(a) 负载电流



(b) 补偿前 A、B、C 相电压电流



(c) 直流电压



(d) 补偿后 A、B、C 相电压电流

图 6 实验系统测试结果

Fig.6 The result of system test

## 5 结论

本文首先介绍了同相牵引供电系统的结构及原理,并通过软件对系统进行了仿真。由于系统对实时性要求较高,本文提出以FPGA为核心,采用改进的瞬时无功功率算法完成了综合潮流控制器设计。通过对试验系统的调试与测试,从实验结果可以看出,该方案能够实现无功、负序、谐波的综合补偿。同时同相牵引供电系统能够取消“电分相”,为高速重载铁路的发展提供了较好的方案。

## 参考文献

- [1] 曹建猷. 电气化铁路供电系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.  
CAO Jian-you. Electrified railway power supply system [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983.
- [2] 李群湛. 牵引变电所供电分析及综合补偿技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.  
LI Qun-zhan. Analysis and synthesize compensation technique of traction power supply system[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.
- [3] 李群湛, 张进思, 贺威俊. 适于重载电力牵引的新型供电系统的研究[J]. 铁道学报, 1988, 12: 23-30.  
LI Qun-zhan, ZHANG Jin-si, HE Wei-jun. Study of a new power supply system for heavy haul electric traction [J]. Journal of the China Railway Society, 1988, 12: 23-30.
- [4] 魏光, 李群湛, 黄军, 等. 新型同相牵引供电系统方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (10): 80-83.  
WEI Guang, LI Qun-zhan, HUANG Jun, et al. Research on new cophase traction power supply system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (10): 80-83.
- [5] 张秀峰, 高仕斌, 钱清泉, 等. 基于阻抗匹配平衡变压器和 AT 供电方式的新型同相牵引供电系统[J]. 铁道学报, 2006 (8): 32-37.  
ZHANG Xiu-feng, GAO Shi-bin, QIAN Qing-quan, et al. A novel cophase traction power supply system based on impedance matching balance transformer and AT power supply mode [J]. Journal of the China Railway Society, 2006 (8): 32-37.
- [6] Tanaka T, Ishikura N, Hiraki E. A novel simple control method of an active power quality compensator used in electrified railways with constant DC voltage control[C]. //Proceedings-34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON. 2008: 502-507.
- [7] 解绍锋, 李群湛, 贺建闽. 同相供电系统对称补偿装置控制策略研究[J]. 铁道学报, 2002 (4): 109-113.  
XIE Shao-feng, LI Qun-zhan, HE Jian-min. Control strategy of symmetry compensation system for traction power supply system in phase[J]. Journal of China Railway Society, 2002 (4): 109-113.
- [8] SUN Zhou, JIANG Xin-jian, ZHU Dong-qi. A novel active power quality compensator topology for electrified railway[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004 (7): 1036-1042.
- [9] 吴命利, 李群湛. 同相供电对称补偿的接线形式与补偿装置容量选择[J]. 机车电传动, 2000 (5): 15-18.  
WU Ming-li, LI Qun-zhan. Connection forms and compensator capacity determination of symmetrical compensation for cophase supply[J]. Electric Drive for Locomotives, 2000 (5): 15-18.
- [10] 郭伟峰, 杨世彦, 杨威. 基于DSP-FPGA全数字控制的并联有源电力滤波器[J]. 电工技术学报, 2007 (5): 123-127.  
GUO Wei-feng, YANG Shi-yan, YANG Wei. Shunt active power filter based on DSP-FPGA fully digital control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007 (5): 123-127.
- [11] 邵国君, 蔡旭. 基于DSP和FPGA的消弧线圈数字励磁调节器[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (8): 75-77.  
SHAO Guo-jun, CAI Xu. Digital excitation regulator based on DSP and FPGA for arc-suppression coil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (8): 75-77.
- [12] 左小琼, 孙建军, 查晓明. 基于DSP和FPGA实现的逆变电源重复学习控制[J]. 电工技术学报, 2006 (5): 42-46.  
ZUO Xiao-qiong, SUN Jian-jun, ZHA Xiao-ming. Repetitive learning control of inverter system and its DSP+FPGA implementation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006 (5): 42-46.

收稿日期: 2010-01-05

作者简介:

邱大强 (1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向牵引供电系统分析及其电力电子技术在新型牵引供电系统中的应用; E-mail: 453299681@qq.com

李群湛 (1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事牵引供电系统理论及电能质量的分析与控制等相关科研与教学工作。