

中图分类号: TM564/TM581

论文编号: 1028703 08-0193

学科分类号: 080804

# 硕士学位论文

## 具有电弧检测功能的直流固态功率 控制器的研究

研究生姓名 吴卓奇

学科、专业 电力电子与电力传动

研究方向 航空配电

指导教师 王莉 副教授

南京航空航天大学

研究生院 自动化学院

二〇〇八年三月

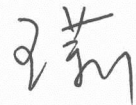
中图分类号: TM564/TM581  
学科分类号: 080804

论文编号: 1028703 08-0193

# 硕士学位论文

## 具有电弧检测功能的直流固态功率 控制器的研究

硕士生姓名 吴卓奇  
学科、专业 电力电子与电力传动  
研究方向 航空配电  
指导教师 王莉 副教授



南京航空航天大学  
研究生院 自动化学院  
二〇〇八年三月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics  
The Graduate School  
College of Automation Engineering

# Research on DC Solid State Power Controller with Arc Detection

A Thesis in

Electrical Engineering

by

Wu Zhuoqi

Advised by

Associate Professor Wang li

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

MAR, 2008

## 承诺书

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本人授权南京航空航天大学可以有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅，可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的学位论文在解密后适用本承诺书)

作者签名： 吴卓奇  
日 期： 2008年3月19日

## 摘 要

固态功率控制器作为先进飞机配电系统中的重要配电电器，其兼有开关和保护的功能。但是，在实际运用中发现，除了过流、短路等故障会引起飞机配电系统的不安全，电弧也是造成飞机不安全的一个重要因素。因此，为了提高飞机的安全性，在固态功率控制器的基础上加入故障电弧检测是固态功率控制器的一个发展方向。

本文首先介绍了电弧的原理、特性及其模型的发展，并选择了 Cassie 模型做为故障电弧的仿真模型，得到了为实验做指导的波形。

其次，在实验室条件下做了串型电弧和并型电弧的实验，得到了两者故障发生时的电流波形和数据。然后，本文对实验数据进行了快速傅立叶分析和 TCA 分析，并将故障电弧和正常情况、其他故障情况的分析结果进行了比较，设计了一种故障电弧的检测算法，并利用实验数据对算法进行了初步验证。

再次，本文介绍了具有电弧检测功能的固态功率控制器的软硬件设计。在硬件部分，本文对数字部分和功率部分的设计进行了介绍；在软件部分，本文对主程序、数据处理、故障电弧检测算法以及通讯程序进行了阐述，其中，重点研究了故障电弧检测算法的软件实现。

最后，对具有电弧检测功能的直流固态功率控制器的原理样机进行了实验，实验结果验证了理论分析和软、硬件设计的正确性。

关键字：直流固态功率控制器，快速傅立叶变换，TCA，电弧检测算法，数字化

---

\*本课题为航空科学基金(03F52032)资助项目

## Abstract

Solid State Power Controller (SSPC) is the important equipment in advanced aircraft power distribution system, which plays the role of both switch and protection. However, in applying to reality, it is found that, except malfunctions such as over current, short circuit, arc fault is also a insecure key factor of aircraft. Therefore, to improve the aircraft security, adding the function of arcing fault detection is a develop direction of SSPC.

Firstly, this paper introduces the arc's principle, characteristic property and its model development. Then, the Cassie arc model is chosen to simulation, and the waves, which are used to guide the experiment, are got.

Secondly, in the laboratory condition, the experiments of series arc and parallel arc are done, and the current waves and data are got. Then, this paper makes the FFT analysis and TCA analysis with data of the arc experiments, and compares the results with normal and other faults. Then, this paper designs an algorithm to detect arcing fault, and then proves this algorithm with these data of experiments.

Then, this paper describes the hardware and software design of the SSPC with arc detection. In the part of hardware, this paper describes the design of digital part and power part. In the part of software, this paper describes the main program, data process program, arcing fault detection program and communication program. During these software, this paper emphasizes on the software of arcing fault detection.

Finally, the prototype of SSPC with arc fault detection is established. The experiment results are obtained on this prototype, which prove that the theories and analysis are correct.

**Keywords:** DC Solid State Power Controller(DC SSCP), FFT, TCA, arcing fault detection algorithm, digitization

## 注释表

### 一、缩略词与名称

符号	名称	符号	名称
SSPC	固态功率控制器	MSSPC	多通道固态功率控制器
TCB	熔断器	ECB	电子断路器
AFCI	电弧故障断路器	AFCB	电弧故障断路器
DSP	数字信号处理	CPLD	复杂可编程逻辑器件
DFT	离散傅立叶变换	FFT	快速傅立叶变换
TCA	三周算法	RPC	远程动力控制器

### 二、基本符号与名称

符号	名称	符号	名称
$g$	电弧电导	$\chi$	气体的热电离度
$T$	气体温度	$p$	气体压力
$W$	中性粒子的电离能	$\theta_M$	电弧时间常数
$P_{loss}$	耗散功率	$U_c$	电弧电压梯度
$I_{total}$	电路的总电流	$I_{arc}$	电弧电流
$I_{load}$	负载电流	$U_{arc}$	电弧电压
$U_d$	负载电压	$I_d$	负载电流
$U_{gs}$	MOS 管栅源电压		

## 目录

第一章 绪论 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.1.1 先进飞机配电系统 .....	1
1.1.2 固态功率控制器的历史与发展 .....	1
1.1.3 数字控制技术的特点与应用 .....	2
1.2 课题的研究意义与主要内容 .....	3
第二章 电弧故障特性仿真研究 .....	6
2.1 电弧简介 .....	6
2.1.1 电弧的原理、特性及其危害 <sup>[8]</sup> .....	6
2.1.2 电弧的分类 .....	6
2.2 电弧故障的仿真研究 .....	7
2.2.1 电弧模型及其发展 .....	7
2.2.2 电弧仿真数学模型的选择和介绍 .....	10
2.2.3 电弧故障的电流特性仿真分析 .....	12
2.2.3.1 纯阻性负载回路中的串型电弧故障仿真分析 .....	12
2.2.3.2 阻感性负载回路中的串型电弧故障仿真分析 .....	13
2.2.3.3 阻容性负载回路中的串型电弧故障仿真分析 .....	16
2.2.3.4 纯阻性负载回路中的并型电弧故障仿真分析 .....	17
2.2.3.5 阻感性负载回路中的并型电弧故障仿真分析 .....	18
2.2.3.6 阻容性负载回路中的并型电弧故障仿真分析 .....	19
2.3 本章小节 .....	21
第三章 电弧故障检测方法的研究 .....	22
3.1 引言 .....	22
3.2 电弧故障检测的国内外研究现状 .....	22
3.2.1 运用于开关柜中的电弧故障检测技术 .....	22
3.2.2 运用于汽车系统中的电弧故障检测技术 .....	23
3.2.3 电弧故障的频域检测技术 .....	24
3.2.4 电弧故障检测技术的新发展 .....	25



3.2.5	电弧故障检测的应用 .....	26
3.3	电弧故障实验及其数据分析 .....	26
3.3.1	电弧故障实验 .....	26
3.3.1.1	接线端松动实验 .....	27
3.3.1.2	闸刀实验 .....	28
3.3.2	电弧故障实验数据分析研究 .....	29
3.3.2.1	快速傅立叶变换 <sup>[42]-[46]</sup> .....	29
3.3.2.2	实验数据的 FFT 分析 .....	33
3.3.2.3	TCA 算法 <sup>[47]</sup> .....	37
3.3.3	电弧故障检测算法 .....	40
3.3.3.1	电弧故障检测算法设计 .....	40
3.3.3.2	初步算法验证 .....	42
3.4	本章小节 .....	43
第四章	具有电弧检测功能的直流固态功率控制器的研究 .....	44
4.1	引言 .....	44
4.2	具有电弧检测功能的直流固态功率控制器的硬件设计 <sup>[2]-[3],[48]-[51]</sup> .....	44
4.2.1	数字电路 .....	44
4.2.1.1	数字部分电源 .....	45
4.2.1.2	DSP 芯片 .....	46
4.2.1.3	CPLD 芯片 .....	48
4.2.1.4	通讯电路 .....	49
4.2.2	功率电路 .....	50
4.2.2.1	开关管 .....	50
4.2.2.2	开关管的驱动电路 .....	50
4.2.2.3	检测电路和短路保护电路 .....	50
4.3	具有电弧检测功能的直流固态功率控制器的软件设计 <sup>[49]-[52]</sup> .....	51
4.3.1	系统主程序 .....	51
4.3.2	数据处理子程序 .....	52
4.3.3	定时器 T1 中断子程序与电弧判断子程序 .....	54
4.3.4	通讯接收中断 .....	55
4.4	具有电弧检测功能的直流固态功率控制器的实验和分析 .....	55

4.4.1	阻性负载下开通、关断测试 .....	56
4.4.2	容性开通、感性关断测试 .....	57
4.4.3	阻性负载下短路保护测试 .....	57
4.4.4	阻性负载时过流保护测试 .....	58
4.4.5	阻性负载时串型电弧保护测试 .....	59
4.4.6	阻感性负载时串型电弧保护测试 .....	60
4.4.7	阻容性负载时串型电弧保护测试 .....	60
4.4.8	阻性负载时并型电弧保护测试 .....	60
4.4.9	阻感性负载时串型电弧保护测试 .....	61
4.4.10	阻容性负载时并型电弧保护测试 .....	61
4.5	本章小节 .....	62
第五章	全文总结和展望 .....	63
5.1	本文的主要工作 .....	63
5.2	后续工作建议 .....	63
参考文献	.....	65
致谢	.....	69
攻读硕士学位期间参与完成的科研项目	.....	70
攻读硕士学位期间发表的论文	.....	72

## 图目录

图 1.1	热保护曲线与电弧水平示意图 .....	4
图 2.1	根据电弧产生位置的故障电弧分类 .....	7
图 2.2	MATLAB 中 Cassie 电弧模型 .....	11
图 2.3	串型电弧下的纯阻性负载的电路仿真图 .....	12
图 2.4	串型电弧下的纯阻性负载的电路电流及电弧电压波形 .....	13
图 2.5	串型电弧下的阻感性负载的电路仿真图 .....	14
图 2.6	串型电弧下的阻感性负载的电路电流波形 .....	14
图 2.7	阻感负载串型电弧电路图 .....	15
图 2.8	串型电弧下的阻容性负载的电路方针图 .....	16
图 2.9	串型电弧下阻容性负载的电路电流波形 .....	16
图 2.10	并型电弧下的纯阻性负载的电路仿真图 .....	17
图 2.11	并型电弧下的纯阻性负载的电路电流波形 .....	18
图 2.12	并型电弧下的阻感性负载的电路仿真图 .....	18
图 2.13	并型电弧下的阻感性负载的电路电流波形 .....	19
图 2.14	并型电弧下的阻容性负载的电路仿真图 .....	19
图 2.15	并型电弧下的阻容性负载的电路电流波形 .....	20
图 2.16	阻容负载并型电弧电路图 .....	20
图 3.1	基于热、声以及电磁特性的电弧故障检测装置 .....	22
图 3.2	汽车系统中电弧检测装置示意框图 .....	24
图 3.3	电弧电流频谱分布图 .....	24
图 3.4	串型电弧实验电气连接示意图 .....	27
图 3.5	串型电弧时螺柱和导线的接头部分 .....	27
图 3.6	串型电弧发生时电路电流波形 .....	28
图 3.7	并型电弧实验电气连接图 .....	28
图 3.8	闸刀实验设备 .....	29
图 3.9	并型电弧发生时电路电流波形 .....	29
图 3.10	8 点 DFT 逐级分解运算框图 .....	32
图 3.11	8 点蝶形信号流图 .....	32

图 3.12	FFT 程序流程图 .....	34
图 3.13	三周期值不同情况示意图 .....	37
图 3.14	TCA 结果示意图 .....	38
图 3.15	常见变化及其 TCA 结果 .....	38
图 3.16	8 种情况下直流分量的 TCA 数据图 .....	39
图 3.17	8 种情况下 500~2000Hz 内的电流分量的百分比的 TCA 数据图 ..	41
图 4.1	具有电弧检测功能的直流固态功率控制器 .....	44
图 4.2	与 2812 配套的 TPS70351 的典型电路 .....	45
图 4.3	时序图 .....	45
图 4.4	TMS320F2812 管脚图 .....	46
图 4.5	通讯电路设计 .....	49
图 4.6	改进后的通讯电路 .....	49
图 4.7	开关管驱动电路 .....	50
图 4.8	主程序流程图 .....	51
图 4.9	数据处理自程序流程图 .....	52
图 4.10	跳闸曲线 .....	53
图 4.11	电弧判断子程序流程图 .....	54
图 4.12	实验平台示意图 .....	56
图 4.13	实验平台及实验设备实拍图 .....	56
图 4.14	阻性负载下开通、关断波形 .....	57
图 4.15	感性开通、感性关断波形 .....	57
图 4.16	短路保护波形 .....	58
图 4.17	过流保护波形 .....	58
图 4.18	3 条跳闸曲线比较图 .....	59
图 4.19	阻性负载串型电弧保护波形 .....	59
图 4.20	阻感性负载串型电弧保护波形 .....	60
图 4.21	阻容性负载串型电弧保护波形 .....	60
图 4.22	阻性负载并型电弧保护波形 .....	61
图 4.22	阻感性负载并型电弧保护波形 .....	61
图 4.24	阻容性负载并型电弧保护波形 .....	61

## 表目录

表 3.1	自然顺序与码位倒序( $N=8$ ).....	33
表 3.2	电路电流在各情况下各频段的分布情况表.....	35
表 3.3	含量百分比表.....	36
表 3.4	异常个数统计表.....	42
表 4.1	过流保护时间表.....	58

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 先进飞机配电系统

飞机配电系统按照控制方式来分有常规式、遥控式和自动配电三种。常规配电方式的输电线必须全部引入座舱内的配电箱，以便飞行员手动操纵各用电设备。遥控配电方式的配电箱靠近用电设备，控制开关在座舱里，由飞行员发出的控制信号通过继电器或接触器通断用电设备。自动配电方式通过计算机控制的多路数据总线传递控制信号和状态信息，由机械式接触器或固态功率控制器对用电设备进行控制，取消了飞行员座舱内众多的控制开关和控制线，减轻了重量，提高了可靠性和维修性<sup>[1]</sup>，从而构成了先进飞机配电系统。

近年来，由于用电设备的增加和自动化程度的提高，飞机正朝着多电飞机、全电飞机的方向发展，飞机的配电系统也逐渐向先进飞机配电系统发展。

先进飞机配电系统是指以飞机电气系统处理机为控制中心，采用多路传输技术，通过汇流条控制器、电气负载管理中心、电气远程终端、大电流机电混合式功率控制器以及固态功率控制器(Solid State Power Controller, 简称 SSPC)对飞机电气负载进行自动管理的固态配电系统。在先进飞机配电系统中，电气负载管理中心是一个非常关键的部分，它由配电中心、固态功率控制器和嵌入式终端构成。配电中心有 270V 直流汇流条、28V 直流汇流条、115V 交流汇流条和蓄电池汇流条，每个汇流条采用自动后备方式，正常工作时由基本电源供电，基本电源故障时转为备用电源供电。嵌入式终端用于接收固态功率控制器的状态信息，发送控制命令，对多个固态功率控制器进行管理，同时监控配电中心工作并选择配电中心电源<sup>[2]</sup>。

#### 1.1.2 固态功率控制器的历史与发展

固态功率控制器作为先进飞机配电系统中的重要配电设备，主要用于接通或关断用电设备的电源，同时还具有过载保护功能和自检测功能，可以通过状态信息向嵌入式终端指示负载是否已经发生跳闸或出现了故障，它取代了常规系统中的机械开关、继电器和热断路器。固态功率控制器是一种无触点开关，它

具有响应快、电磁干扰小、寿命长、可靠性高以及便于计算机远程控制等优点。

固态功率控制器的发展与飞机配电系统的发展是密不可分的。在国外,尤其是在美国,SSPC已经经历了一定的发展阶段。20世纪60年代初,美国就试图将SSPC应用于飞机的配电系统,但是受到了当时的半导体器件和散热技术的限制。随着半导体工业及其他科学技术的发展,到60年代末,美国对SSPC的研究已经取得了很大的进展,并通过将SSPC应用到飞机上控制个别负载证明了SSPC的可行性。70年代初,美国着手研究将SSPC应用于整个飞机的配电系统,提出了固态配电系统的概念,它是由遥控信号通过SSPC来操纵负载,座舱内只引入传送遥控信号的控制线,SSPC只具有遥控开关及过载保护(跳闸)功能。70年代中期,美国开始研究将计算机技术应用于飞机配电系统,同时对SSPC也提出了新的要求,即能够向系统提供其状态信息。随着科学技术的飞速发展,特别是电力电子技术与计算机技术的发展,在80年代初,美国又提出了综合电源与航空电子信息系统,其中,电气系统与电子系统共享数据总线,通过冗余数据总线传送全部的配电控制信号。通常在一架典型的飞机上需要用到500多个SSPC,因此,对SSPC的功率、功率密度、可靠性、性能、体积以及重量等又提出了更高的要求<sup>[3]</sup>。从90年代末开始,国外也展开了对多通道固态功率控制器(Multi-channel Solid State Power Controller,简称MSSPC)的研究,比如,2005年LEACH公司(Leach International Corporation)推出了28V小电流定额的固态功率控制器组的样机。国内研究情况与国外的差距非常大,对MSSPC的研究起步较晚,目前南京航空航天大学、西北工业大学等几所大学正在开展这方面的研究,其中南京航空航天大学已经研制成功了270V、2A的八通道固态功率器的样机。随着对飞机配电系统安全性的要求提高,事实又证明电弧故障是飞机电气故障中的一个很严重的故障,国外提出在下一代SSPC中增加电弧故障检测的功能。目前,目前,国外已经有电弧故障断路器(Arc Fault Circuit Interrupter,简称AFCI)的产品,但是将固态功率控制器和电弧故障检测结合起来的相关产品和文献却很少,只有在个别专利中看到将交流、直流电弧故障检测和固态开关结合的介绍<sup>[4]-[7]</sup>。

### 1.1.3 数字控制技术的特点与应用

随着数字信号处理(Digital Signal Processing,简称DSP)技术的飞速发展,其产品性能成几何级数不断提升,与此同时,由于市场日益成熟其产品价格则越

来越低，性能价格比日益提高。以 DSP 为核心的数字控制，不仅克服了模拟控制的缺陷，而且可以实现原来模拟控制系统不可想象的高复杂程度和高精度的控制策略。

与模拟控制方法相比，数字控制系统具有以下优点：硬件电路简单而且通用性好，可靠性高，可重复性好，系统易集成，体积小，重量轻；采用 DSP 作为控制器，可以用软件完成各种复杂的数学运算和控制策略，容易实现控制系统的智能化，可以更好地适应环境的变化；数字控制器的输入、输出通道可以实现控制量的模拟输出、反馈量的数字输入，具有数据采集速度快、值域范围宽、分辨率高、精度高等优点，为实现高性能控制系统打下了基础；借助 DSP 的通讯能力和现场总线技术可与其他设备联网，从而实现系统的监控，故障的诊断和自恢复等多种功能。

在多通道固态功率控制器中，有大量的逻辑电路和相关的时序电路，复杂可编程逻辑器件(Complex Programmable Logic Device, 简称 CPLD)在这里得到了良好的应用。CPLD 规模比较大，适合于时序、组合等逻辑电路场合，可以代替几十甚至几百块通用 IC 芯片。

DSP 和 CPLD 的应用从系统的角度集成了多个固态功率控制器，部分的模拟器件能以软件替代，使硬件的功能可以像软件一样通过编程来修改。SSPC 组共享大规模控制芯片、内部电源等资源，从而进一步提高功率密度。

## 1.2 课题的研究意义与主要内容

《中国火灾统计年鉴》显示，因电气原因引发的火灾在各类火灾中高居榜首，约有 30%的火灾是由住宅电气线路老化或配置不合理造成的，并正以平均每年 1%的速度持续上升。相比之下，根据美国国家防火协会(NFPA)和美国消费类产品安全委员会统计，约 9%的火灾和 7%的死亡是因用电造成的，美国消费产品安全委员会(CSPC)统计显示与住宅配线系统问题有关的家庭火灾每年有 40,000 起。美国联邦航空管理局(FAA)指出电气故障是无数商业飞机发生事故的主要问题，如 1996 年 7 月 TWA 800 的坠毁，以及 1998 年 9 月 SR111 的坠毁，怀疑均为电弧故障引起的事故；军方也认为电气故障是造成安全问题和飞机不能准点起飞的重要原因。

电气故障主要是由过流、短路引起的线路过热引起的，严重时甚至烧毁周边



物品，引起大火。熔断器(TCB)和电子断路器(ECB)就是起到在过流或短路的情况下防止电线过热，保护电线的作用。电气故障除了过流、短路等故障外，还有一个非常严重的故障，那就是电弧。化学药品的泄漏、电线的老化甚至飞机维修过程，都有可能会损坏电线，这些损坏都有可能引起电弧故障。电弧的特点是温度很高，电流较小，持续时间短，一旦出现击穿点则会频繁出现。电弧放电时，会产生大量的热，能引燃周围的易燃易爆品，造成火灾甚至爆炸。而事实证明电弧故障正是引起飞机故障、部件失灵甚至飞机起火的重要原因之一，但是 TCB 和 ECB 却不能针对电弧故障进行保护。从图 1.1 可以发现，TCB 和 ECB 不能进行保护是由于低水平电弧的电流很小，甚至小于额定电流，断路器不会有反应；而高水平电弧的电流虽然较大，但是其持续时间太短，传统断路器还来不及做出保护动作，电弧就已经熄灭。因此，为了全面提高飞机配电系统的安全，除了现在已有的热保护以外，线路上还需要增加电弧保护。

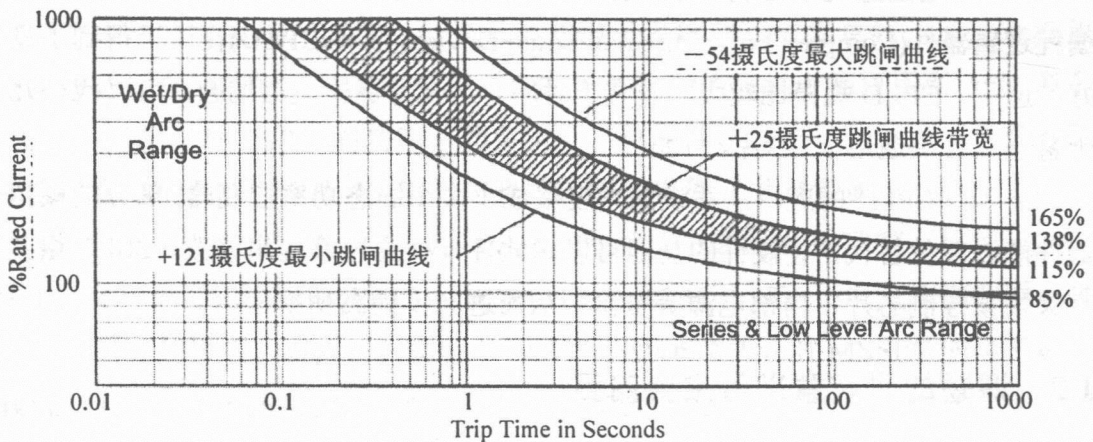


图 1.1 热保护曲线与电弧水平示意图

目前的 SSPC，只能起到 ECB 的作用，如果能使 SSPC 也具有电弧检测功能，将使飞机固态配电系统更加安全可靠。此外，电弧检测除了可以军用外，还可以广泛运用于民用配电系统及通讯电源网络系统等民用工业领域。

本课题主要对具有电弧故障检测功能的直流固态功率控制器进行了研究，包括了对直流电弧故障的仿真，用仿真结果来指导实验；进行了直流电弧故障的实验，用实验数据来分析获得直流电弧故障的特点；利用得到的直流电弧故障的特点，进行算法的设计和验证。在硬件上，主要设计了以 DSP 和 CPLD 为核心的具有电弧故障检测功能的直流固态功率控制器；在软件上，重点研究了电弧检测算法和通讯程序。