

声 明

本电子书由中国农业出版社数字出版，相关权利归中国农业出版社拥有。读者、著作权人和（或）依法可以行使著作权的权利人如有疑问，请与中国农业出版社联系：

地址：北京市朝阳区麦子店街 18 号楼

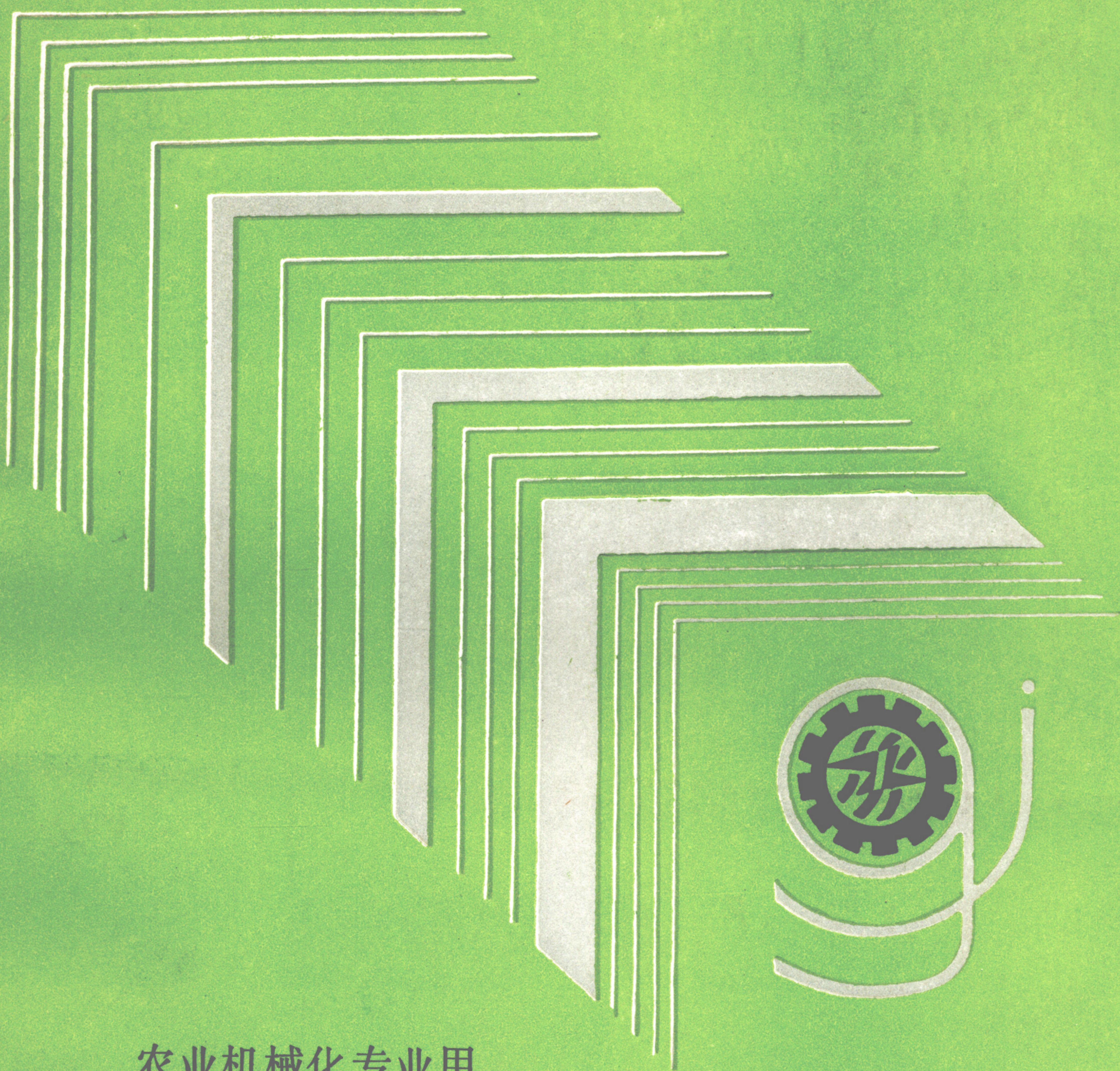
邮编：100026

电话：010-64194921 010-65005894

E-mail:lishanzhao@sina.com

中国农业出版社

全国高等农业院校教学参考书

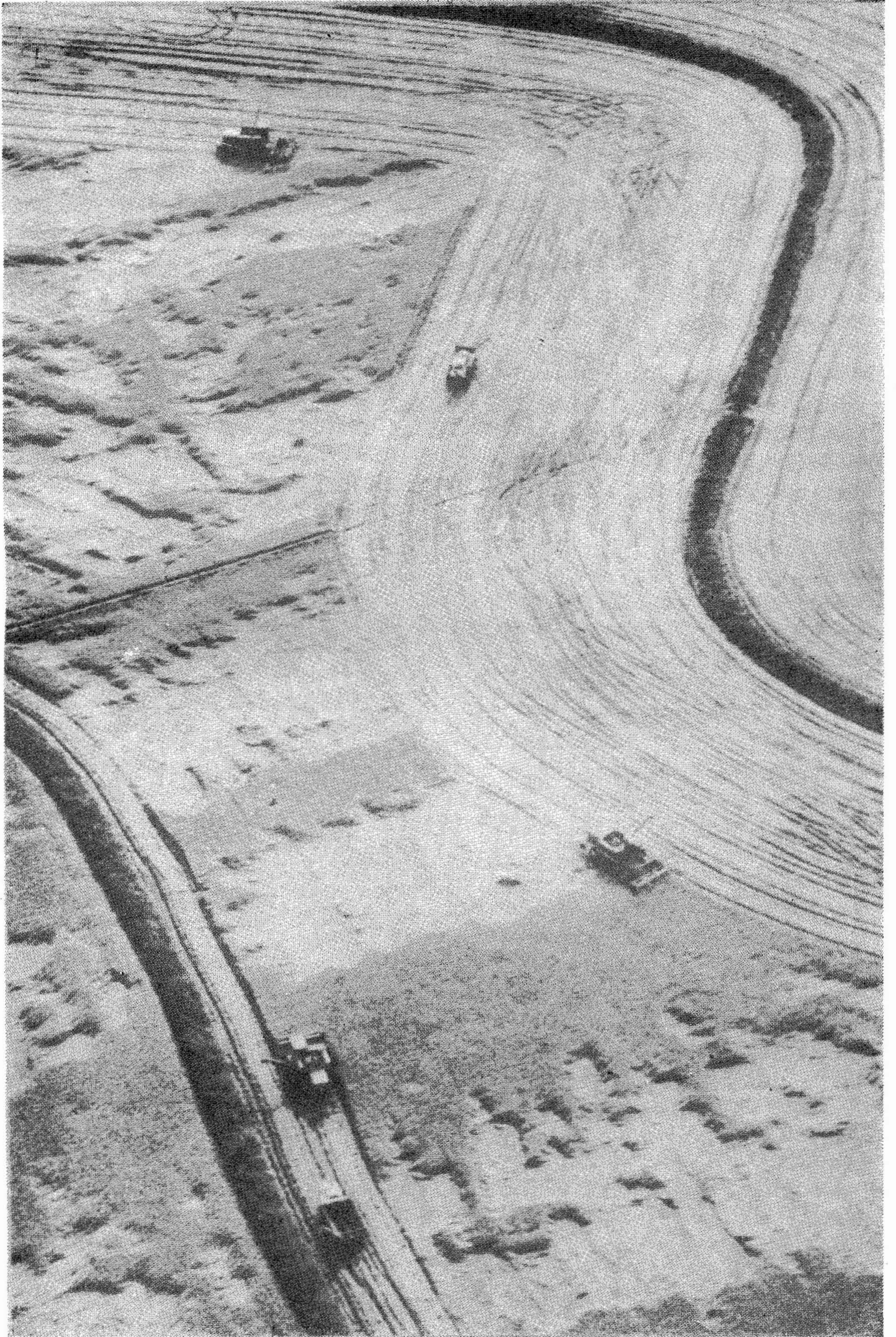


农业机械化专业用

农业生产工程模型

〔美〕D.R.亨特 著
陈济勤 王珍美 译

农业出版社



译者 陈济勤 (北京农业大学)
王珍美 (北京农业大学)
主审人 张季高 (中国农业工程研究设计院)

译 者 的 话

农业生产工程模型 (Engineering Models for Agricultural Production) 是美国伊利诺斯州立大学 (Illinois State University) 农业工程系教授 Donnell R. Hunt 为农业工程本科大学生撰写的教科书, 1985 年底由 AVI Publishing Company 出版。这本书明确提出培养农业生产系统工程师, 用系统的观点分析农业生产系统的农业装备子系统, 简略而全面地介绍了农业生产系统建模、工程经济评价、系统模拟的概念及其分析方法, 并且介绍了系统可行设计的程序与优化技术, 为读者提供了范围广阔的基本知识与资料。作为一本教材, 著者采用案例教学法, 重视学生思考与解题的训练, 在各章设置了习题, 并以整个第七章提供了建模项目, 以便使学生在面临实际问题研究时得以顺利入门。这本书可以作为我国农业工程大学本科和研究生的参考教材。

Donnell R. Hunt 教授是国际知名的农业机械运用管理学者, 他于 1954 年出版的大学本科教科书 Farm Power and Machinery Management, 被誉为欧美农业机械运用管理学的奠基著作。该书至 1983 年已经 8 版修订、5 次重印, 获得广泛采用。Hunt 教授自 60 年代起陆续发表了机器最佳幅宽、作业及时性与机器配备等方面的研究成果, 将系统方法应用于农业生产系统的装备子系统, 为推出农业生产工程模型一书提供了新颖的构架。

当前, 我国农业机械化已进入稳定发展的阶段。三十余年的实践表明, 农业机械化的发展必须符合我国国情, 走自己的路, 既不能套用任何一个国家的发展模式, 也不会是某几种农业机械化发展模式的“组合”或“包络”。三十余年的实践还表明, 在生产层次和机器层次上, 特别是在反映机械化大生产特征关于农业生产系统的设计、运行、管理与服务等方面, 有必要努力学习和吸收外国的一切有益的经验。译者将农业生产工程模型一书介绍给我国读者, 也正是想引为改进我国农业工程教育的借鉴。

译稿承蒙张季高教授悉心校正, 提高了译文质量, 使译者受益匪浅, 我们愿借此机会表示诚挚的感谢。由于译者水平有限, 仍不免存在译意不达与误译之处, 祈望广大读者惠予指正。

译 者

1990年1月

序 言

农业工程是一种专业，它应用自然科学和技术来解决农业生产系统中产生的问题。系统可以用不同方法来识别，但大多数人认为，一个系统包含着许多因素，在它们的相互作用下完成其共同目标。子系统包含在一个较大的系统中。具有独立性的和有限目标的子系统，可促使整个系统目标的实现。农业工程师们可利用数学模型来解决农业生产的复杂系统问题。

农业生产系统的目标，是将生物捕获的阳光、水份和二氧化碳以及来自土壤中的矿物质，制成含有复杂化学成分的各种密集的能量块，这些就是人类和动物的营养源。此外，这些能量块可供制造厂和加工厂作为原料，生产与营养无关的种种产品。农业生产系统是以作物种植为基础的生物系统。全人类的生活有赖于这一生物系统的成就。

从史前起，劳动者们便努力提高自然系统的效率。早在远古时代，即已实行播前整地、选种种植、施肥、灌溉以及食物与饲料的贮藏。虽然在历史上没有确切地记载何时开始应用畜力来增强农业劳动生产力以改变原有的农业生产系统，但是，由于近代工程科学的发展，人类已在农业生产系统中投入了更多的能量和许多新的工艺和装备。现在农事中的主要活动，已均由新装备的子系统来运行。因此，农业工程师的任务是，设计和发展装备及其相应的工艺程序，以提高整个系统的效率和经济性。

本书为农业工程大学学生们介绍了基本的系统模拟概念。它应用经济学、概率和优化等概念于农业生产作业的数学模型，所采用的例子和提出的习题，均取材于各种专业的农业工程师任职的一般农场生产系统的农事活动。

建议在四年学制的第三年初讲授本课。微分方程和计算机程序设计应列为先修课，或在同期选修。最好有些农学实践知识。不言而喻，应备有两本常用的参考书：《美国农业工程师学会标准》和《农业工程师手册》。

研究系统问题的工程师应该是“T”型人才，即是说，在横向理解整个系统层次的概念，又在纵向掌握某个技术学科专业领域。这样，系统工程师们便可以和其它“T”型人物一道进行兼备广度和深度的研究。本书目的之一，是给学生提供“T”的横向拓宽而不是纵向加深的资料。

本书不拟精确阐述运筹技术，只限于提供信息和简介，以吸引学生将运筹学及数学模拟作为设计问题的工程求解工具。希望这一介绍能为深入研究所面临的农业生产系统设计的实际问题提供指导。

目 录

译者的话

序言

第一章 系统方法	1
一、田间机器系统的数学模拟	1
(一) 作业约束	2
(二) 动力约束	11
(三) 气象约束	22
二、田间作业	28
(一) 耕作制度	28
(二) 播种作业	29
(三) 化学制剂施用模型	30
(四) 收获与贮存系统	34
(五) 灌溉模型	41
第二章 工程经济	46
一、增量成本与微分成本	47
二、经济效率	48
三、资金的时间价值	49
四、设备投资费用	52
五、作业成本	55
六、生产成本	55
七、所得费用	55
八、不确定性费用	55
第三章 不确定性	57
一、概率概念	57
二、抽样问题	59
三、概率函数	61
四、分布	62
五、抽样	67
六、统计	70
(一) 置信区间	72
(二) 显著性	74
(三) 偶然性表	77
(四) 方差分析	78
七、回归与相关	81
八、蒙特卡洛法	84

第四章 系统模拟	87
一、数值方法	91
二、模拟	93
(一) 标定	98
(二) 摆幅标定	98
(三) 时间标定	99
三、不确定性模型	101
四、随机服务系统	103
第五章 系统的可行设计	107
一、稳定性	108
二、确定性系统	109
三、随机系统	117
第六章 优化设计	119
一、试算法	122
二、微分计算法	123
三、变分法	123
四、分配	125
(一) 线性规划	125
(二) 单纯形计算法	127
(三) 运输法	130
(四) 分配法	132
五、关键路线法	134
六、动态规划法	144
七、对策论	147
第七章 建模项目	154
项目 1 建立机器性能模型	154
项目 2 田间作业工程	154
项目 3 建立耕作的能量效率模型	155
项目 4 建立土壤含水量模型	156
项目 5 及时性经济	157
项目 6 经济的机器选择	158
项目 7 显著性差异	159
项目 8 回归与曲线拟合	160
项目 9 模拟元件	161
项目 10 建立模拟模型	163
项目 11 建立随机系统模型	165
项目 12 关键路线法	170
附录	171

第一章 系统方法

工程师的基本任务是设计，农业工程师则主要设计或改进设计农业生产系统的子系统中所使用的装备。任何一个可限定的系统，实际上很可能是另一个大一些的子系统的子系统，因此，就设计方法来说，系统和子系统的称谓是可以互换的。

设计过程包含一个决策的序列。许多因素影响决策，必须拟定一个指导方针，使设计合乎逻辑地进行，以达到所期望的目的。

对系统的设计或改变运行的建议，应采用一些有关决策的准则来评价。可能采用的有以下一些准则：

利润	安全
质量	时间的节省
性能	美观
对变化的适应性	数量
能量或物质的节约	环境方面的考虑

很少见到一项计划只有一个判定准则。对生产者来说，农业生产首先要有利可图，但是，操作者的安全、对技术或企业变化的适应能力以及系统运行所需的时间，都是适当的附加准则。近来意识到自然资源的有限性，使节能成为最时新的准则。

逐一地按步骤加以列举将更有助于对系统方法的理解。Wilson (1965) 列出了系统设计的程序如下：

- (1) 建立数学模型；
- (2) 分析系统对各单元的灵敏度；
- (3) 分析各组成与子系统间的相容性；
- (4) 确定系统在不同输入时的稳定性；
- (5) 根据若干预选的准则优化设计；
- (6) 预测系统的性能；
- (7) 用数学模型或样机来评价和检验系统。

作为利用上列程序的例子，将详细分析田间机器作业系统，并说明每个程序性步骤。

一、田间机器系统的数学模拟

卷首插图所示为常用于农业的一个机器子系统。3台联合收割机在同一地块作业，2台卡车用来装载从联合收割机粮箱卸下的谷粒，装满后运往仓库。系统的目标是单纯的，即在现有设备条件下以最短时间收获并贮藏最大量的谷粒。如不能达到高的生产率，将延长收获的总时间，增大因气候引起产量损失的可能性，并增加雇工费用。

收获和运输是该系统的2个单元。联合收割机在整个地块上都以无明显的谷粒损失所允许的高速度进行作业。驾驶员们争取在所有时间都保持全割幅，并避免由于转弯、故障或挂

结农具所造成的任何时间损失，当粮箱被盛满并且没有卡车来装运谷粒时，联合收割机只好停止作业。卡车司机们必须预计各联合收割机的需要，在适当的时间和地点接受卸载，并在另一台联合收割机需要它们之前完成卸粮行程。

农民们认识到保持高水平的系统生产率的必要性，往往采用双通道无线电传呼机，使联合收割机驾驶员们可用以通知卡车司机们粮箱需要卸粮，卡车司机们则回话告知他们在机器系统运输区段中的位置。

田间机器系统或者任何别的系统，如果能用一个公式，实际上就是用一个数学模型来描述，那便可能完整地分析和理解。通常，精确的公式不是未知便是复杂得难以应用。在这种情况下，只有在被称为系统约束的范围内才能适当地描述系统的性能。

现实世界的系统是被约束在一定的边界内运行的，没有约束的系统是不稳定的，常常会自行瓦解。工程师必须关注对系统的这些约束，同时不断寻求设法规避的途径。

农业生产系统的约束有：可用地、阳光、温度、土壤湿度、土壤肥力、可利用的劳动力、资金以及法律等等。对田间机器作业的3种约束是：（1）作业方面的，（2）有关功率方面的和（3）有关气象方面的。以下将逐一考察这些约束的影响。

（一）作业约束 作业率是通常表达田间机器性能的数学模型。常用的单位有每小时处理的面积、体积或质量。按国际单位制SI，田间机器性能的一般表达式为

$$\frac{\text{公顷数}}{\text{小时数}} = \frac{Sw}{10} \quad (1-1)$$

式中：S——机器的前进速度（km/h）；

w——机器的有效宽度（m）。

按传统的英制，该式可表达为

$$\frac{\text{英亩数}}{\text{小时数}} = \frac{Sw}{8.25} \quad (1-2)$$

式中：S——每小时英里（miles/h）；

w——英尺（ft）。

不能期望会按公制重新确定或换算现有地块的尺寸。公制的机器在英制地块上作业的机会将会很多，如（1—3）式的近似关系式，或许将更实用。

$$\frac{\text{英亩数}}{\text{小时数}} = \frac{Sw}{4} \quad (1-3)$$

式中：S——每小时公里（km/h）；

w——米（m）。

机器性能模型公式（1—1）—（1—3）均假定以机器满割幅（全幅宽）连续作业，称为理论生产率。实际的或有效的生产率则低些。田间系数这一术语考虑了下列引起时间损失诸因素的全部影响：（1）不作业的转弯；（2）小于全幅宽的作业；（3）与作业面积相关的停歇时间（保养，加油，装载，卸载等等）和（4）排除堵塞和机器调整（非预见的）引起的停机。

田间系数通常不考虑机器从农庄转移到田间的时间损失、运行结束后为进行田间作业而编排机具的时间损失、修理所耗费的时间，也不包括操作者个人需要的时间。

田间系数在数学上可表示为小数或百分比，它是有效利用时间与加工某一面积所花费的

总时间之比,也是有效的对理论生产率之比。用田间系数 FE (小数形式)去修正公式(1-1)——(1-3),便可得到改进的通用的数学模型表达式

$$\text{性能} = \frac{SwFE}{c} \quad (1-4)$$

式中: c ——取决于单位,为10, 8.25或4。

系统工程师可能并不追求田间系数值最大。常有的是,低生产率的机器有高的田间系数,高生产率的机器则有低的田间系数。如果要尽量减少作业所需的总时间,须选用高生产率的机器。然而,就任何特定的机器作业来说,田间系数应尽可能高。

通过对许多机器田间作业的调查,可以获得实际的性能数据。ASAE D230.4 (1984) ①列举了典型的田间系数与作业速度。

一个经改进且较为精确地表述田间作业所经历的时间损失的数学模型是

$$\frac{\text{公顷}}{\text{小时}} = \frac{1}{\frac{10.0}{Swe} + \frac{D}{60} + \frac{10000t}{3600Lwe}} \quad (1-5)$$

式中: S ——前进速度 (km/h);

w ——机器的额定幅宽 (m);

e ——覆盖区的有效宽度对额定幅宽的比值小数;

D ——非生产性时间;

t ——转弯时间 (秒/每次转弯);

L ——每次转弯路程的长度 (m)。

机器生产率与其前进速度成正比,但最高田间速度受下列诸因素的约束:

- (1) 机器的功能部件过载,
- (2) 不能精确地操纵机器,
- (3) 经过不平地面而造成结构损坏和功能损失,

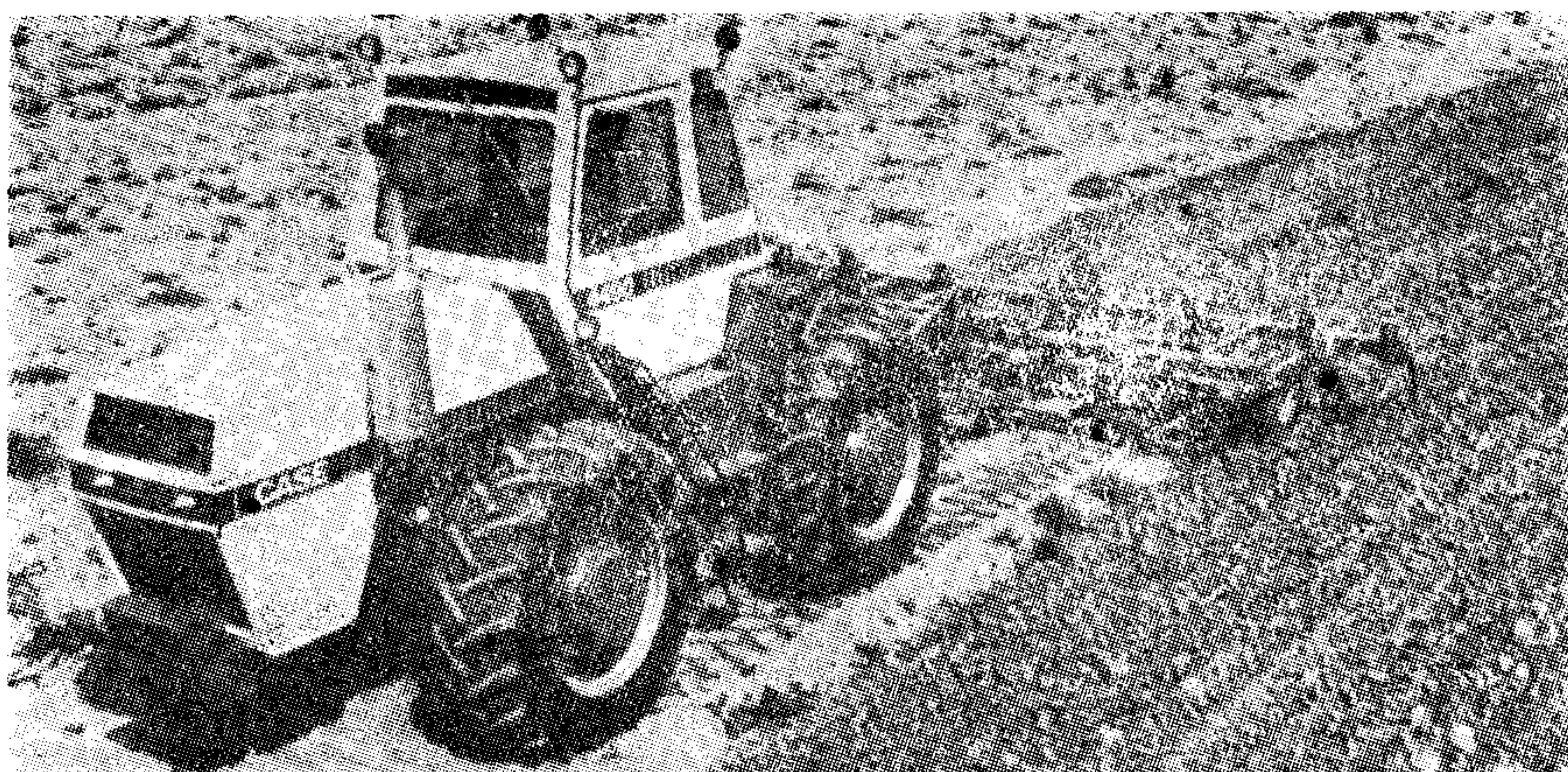


图1-1 重叠
槽形犁重复的上一行程约为其额定幅宽的20% ($e=0.8$)
(经J.I. Case公司同意)

① “ASAE标准” (1984) 是一本重要的参考书。

(4) 为减少损坏和损失而需要稳妥(低速和减速)地装卸物料。

优化速度是不因这些约束因素造成不良影响的尽可能高的速度。

机器性能也受制造幅宽的限制。机器有效幅宽不是指机器的实测尺寸,而是加工出的田间条带的理论宽度。播种机的实测值可能大大小于其有效宽度。单行播种机的有效宽度等于行距。压捆机的有效宽度是被搂集成草条的草条宽度。撒播机的宽度是由种子坠落的条带宽度确定的。耕作机器的宽度可由对机器的测量来确定,但实际上在田间运行时与前一行程有重叠作业地带,见图1—1。图1—2表示青饲收割机不满幅收割。式(1—5)用小数 e 说明理论作业幅宽的减少量。

与面积相关的非生产性时间损失可以模拟并作出某种置信度的预测。这些损失的例子,

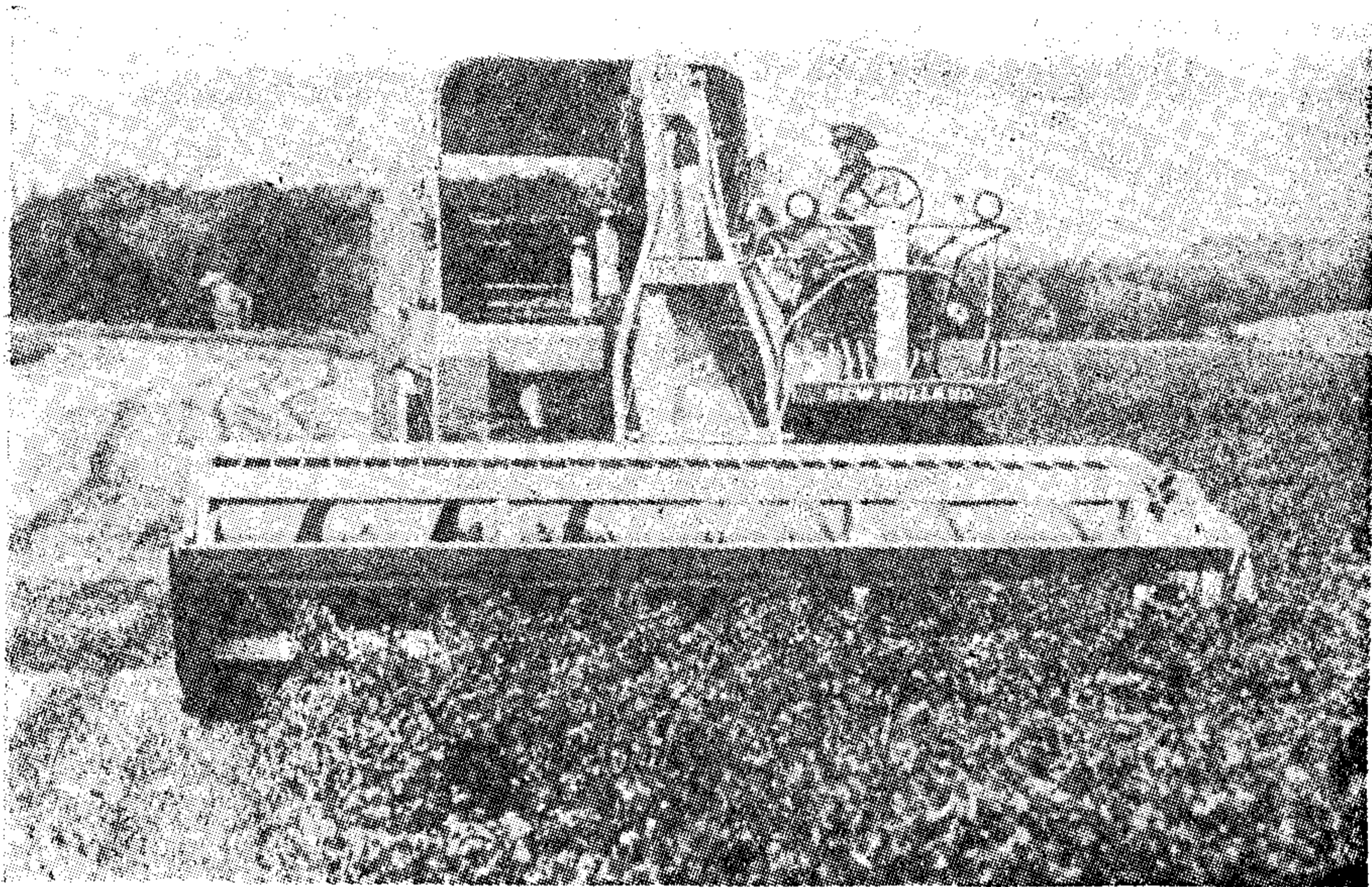


图1—2 不满幅收割
青饲收割机收割宽度包括8%的已割区($e=0.92$)
(经Sperry New Holland同意)

表1—1 作业季节田间机器故障概率①②

作 业	40ha以上 农 场			120ha以上 农 场			200ha以上 农 场			每作业 40ha 概 率	期 望 发生率 (ha)
	概率	%	小时	概率	%	小时	概率	%	小时		
春季耕作	0.196	17.50	10.66	0.238	16.80	11.66	0.285	17.81	13.56	0.109	372
玉米播种	0.157	14.02	4.43	0.199	14.04	4.63	0.255	15.94	5.33	0.133	304
大豆播种	0.068	6.07	3.73	0.089	6.28	4.05	0.085	5.31	3.71	0.102	397
中 耕	0.081	7.23	6.99	0.100	7.06	6.34	0.085	5.31	5.99	0.045	898
大豆收获	0.239	21.31	7.65	0.308	21.74	7.38	0.320	20.00	8.17	0.363	112
玉米收获	0.379	33.84	11.66	0.483	34.08	11.91	0.570	35.63	12.32	0.323	125
平均停歇时间(h)			9.80			12.70			15.60		

① 引自Hunt (1983)。

② 农场平均面积: 玉米——47.3ha (116.9英亩);
大豆——26.5ha (65.5英亩)。

如收获机器卸载所需的时间，给机器加种子和肥料，更换犁铧，磨锐青饲收割机的刀片等等。在完成一定面积作业后，都会发生上述这类停歇。确定时间损失的实际值需要的补充数据有：作物产量、粮箱容积、利用率和磨损率。

故障停歇导致机器实际生产率降低，这种降低无法预测。表1—1为查定许多田间机器的作业得出的概率值。故障概率乘每次故障的平均停歇时间，再除以全年作业面积，所得出的时间可和其它与作业面积相关的非生产性时间损失项相加。

转弯引起的时间损失取决于机器在田间的作业方法。图1—3所示为农民通常采用的若干方法。有些方法的转弯时间基本不变，但留地头式方法因来回行程间距离的变化而使其转弯时间不同。

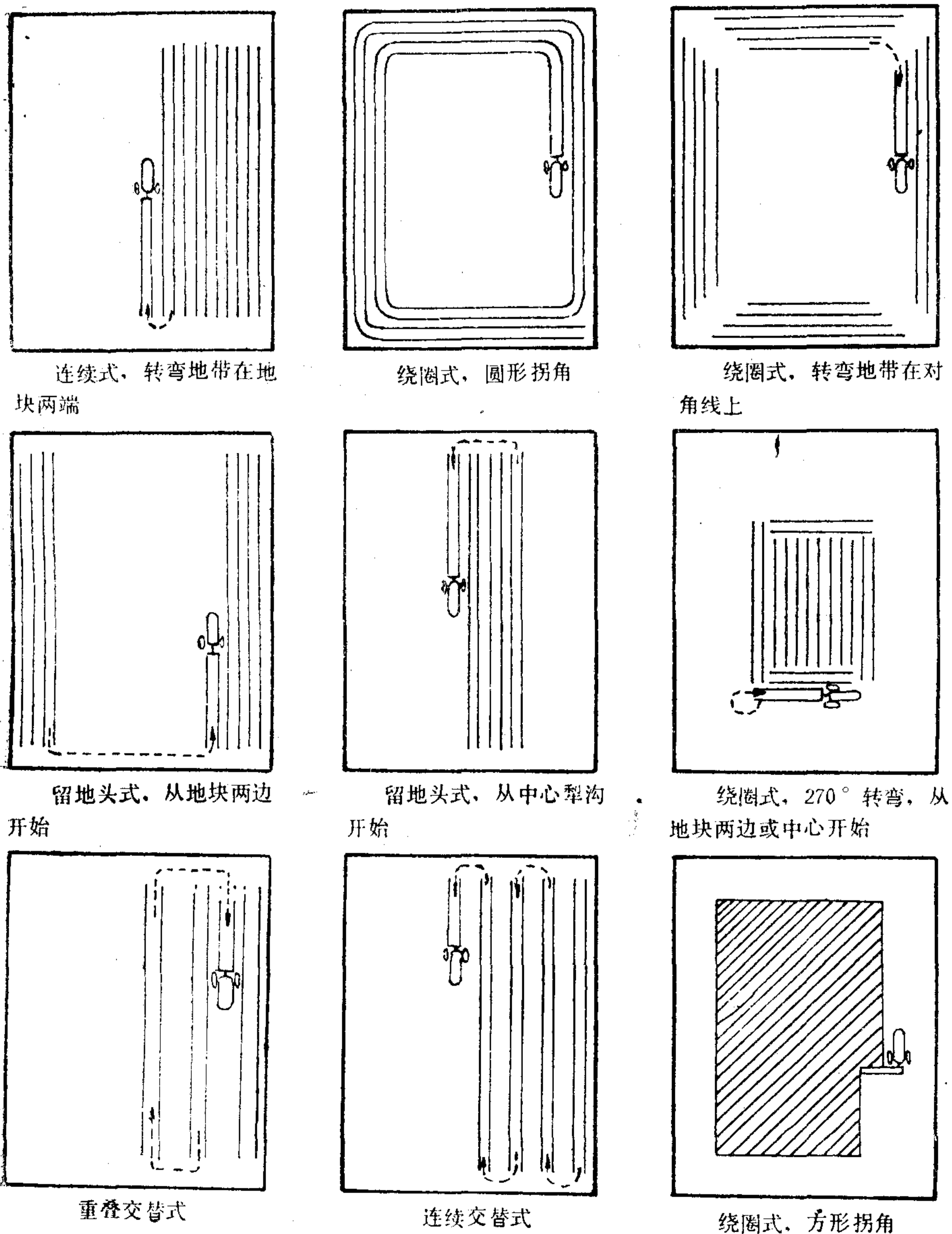


图1—3 矩形地块上机器作业的常用方法

(引自 Hunt, 1983)

Hunt (1933) 推导了预测机器性能和比较各方法有效性的描述作业方法效率 (PE) 的数学模型。方法效率是理论作业时间与理论时间及采用该方法时的时间损失之和的比值。

现在为留地头式方法建模, 以说明其步骤与逻辑性。采用壁式犁作业来分析, 是因为该作业比用其它农具更需要严格的方法。闭垅与开垅小区交替的适当安排如图1—4与1—5所示。当犁的相邻两行程朝对方翻盖前一行程的底沟时, 出现闭垅。翻盖的犁沟彼此相背留下一条沟或明渠, 称为开垅。留地头式方法所用的符号:

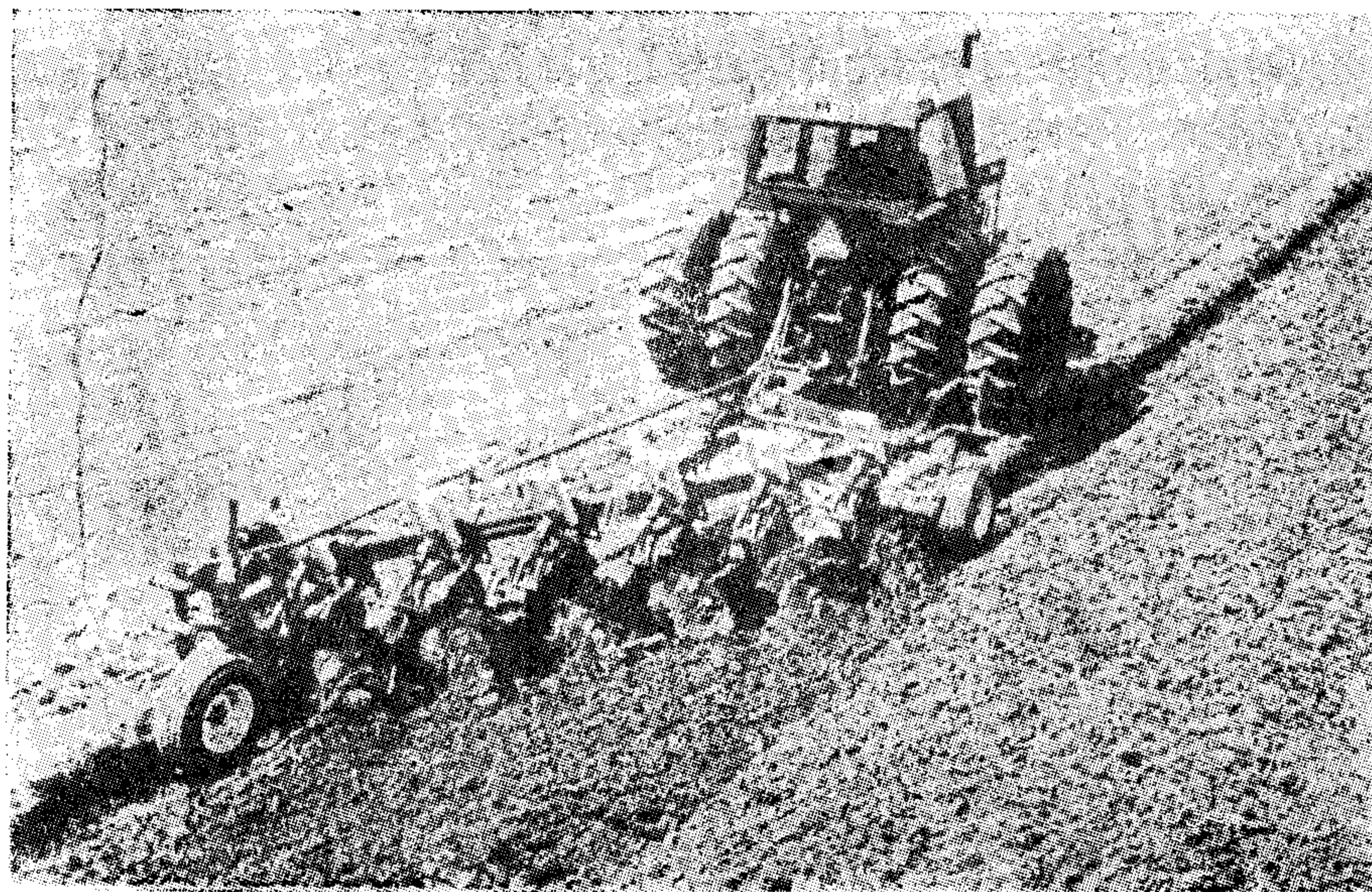


图1—4 单向耕作的壁式犁其相邻行程向同一方向翻耕
(经International Harvester同意)

w ——犁的有效幅宽 (m) ;

f ——沟长 (m) ;

S_p ——耕地速度 (km/h) ;

S_e ——转弯速度 (km/h) ;

n ——闭垅小区数;

$2n-1$ ——小区总数;

L ——地块长度 (m) ;

W ——地块宽度 (m) 。

暂且忽略地头不计:

耕作一垅所需时间 $\frac{f}{1000S_p}$ (小时/行程)

整个地块作业行程数 $\frac{W}{w}$

耕作全部小区的总时间 $\frac{fW}{1000S_p w}$

小区宽度 $\frac{W}{2n-1}$ (m)

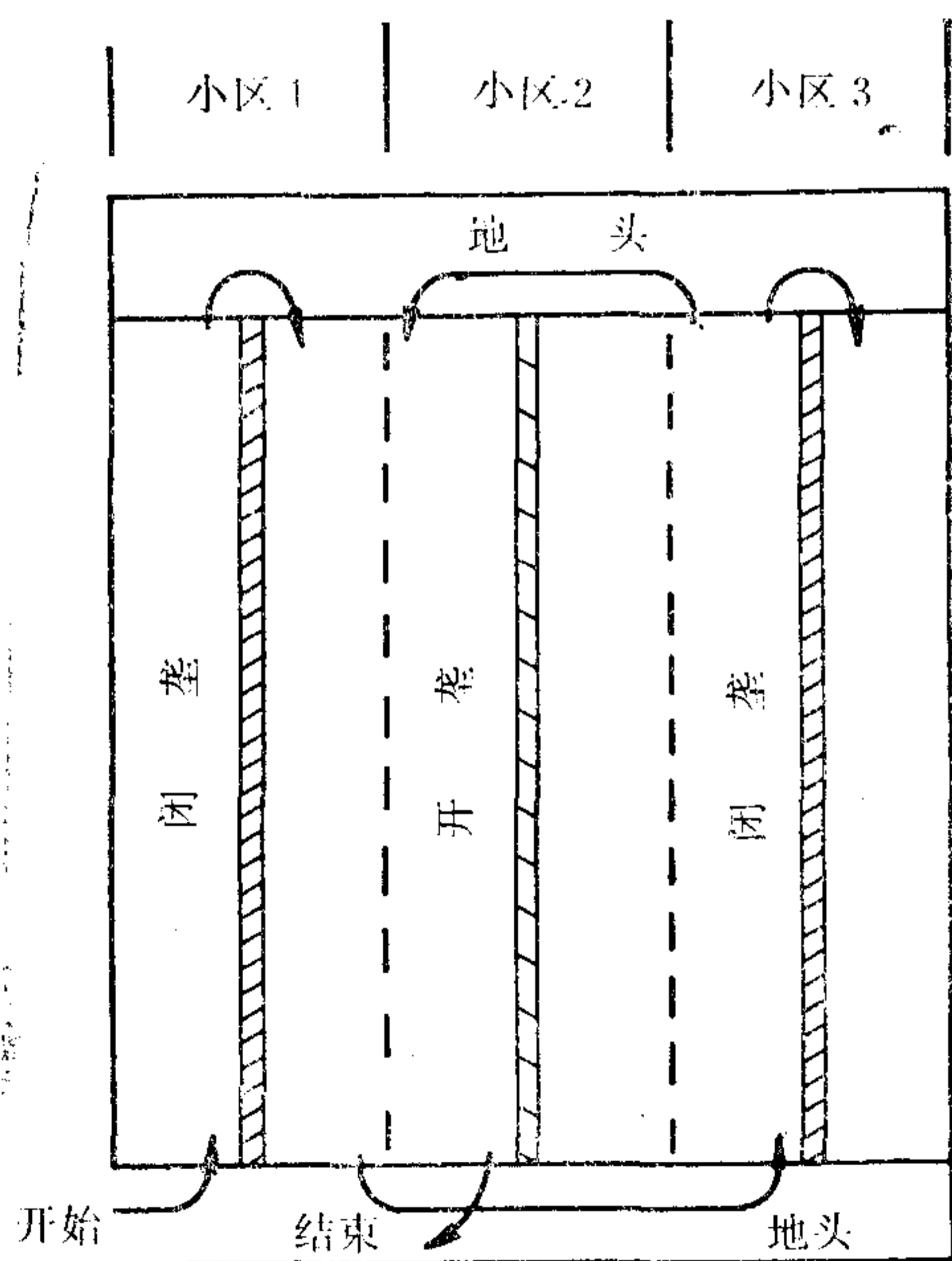


图1—5 留地头式耕地方法在未耕的地头上转弯

平均转弯距离 小区宽度的一半

$$\text{平均转弯时间} = \frac{1}{2} \left(\frac{W}{2n-1} \right) \frac{1}{1000S_e} \quad (\text{h})$$

$$\text{转弯总时间} = \frac{W}{w} \left[\frac{W}{2(2n-1)1000S_e} \right] \quad (\text{h})$$

$$\text{方法效率} = \frac{\text{耕作时间}}{\text{总耕地时间}}$$

总耕地时间 耕作时间 + 转弯时间 + 修整开垅时间

（修整时间是假定需要一个附加的行程以平整高低不平的地面和局部覆盖开垅）

$$PE = \frac{fW}{1000S_p w} \left/ \left[\frac{fW}{1000S_p w} + \frac{W^2}{2(2n-1)1000S_e w} + \frac{(n-0.5)f}{1000S_p} \right] \right.$$

$$PE = \frac{(4n-2)fWS_e}{(4n-2)fWS_e + W^2S_p + (4n^2 - 4n + 1)f w S_e}$$

令PE对n的一次微分等于零，可导出某一特定地块的最优小区数（时间损失最少）的公式（1—6）及最佳小区宽度 W_0 （m）的公式（1—7）。

$$n_0 = 0.5 + \sqrt{\frac{W^2 S_p}{4f w S_e}} \quad (1-6)$$

$$W_0 = \sqrt{\frac{f w S_e}{S_p}} \quad (1-7)$$

假定采用了最优小区数，加上完成一个闭垅小区的地头面积的耕作时间，整个地块作业的方法效率为

$$PE = \frac{4(4n-2)LWS_e}{4(4n-2)LWS_e + 4W^2S_p + 4(4n^2 - 4n + 1)fS_e w + (L-f)^2S_p(4n-2)} \quad (1-8)$$

如果方法效率为0.9，地块作业的理论时间为9.0h，则所需的总时间为9/0.9或10h。那末，转弯时间损失为1h（包括与方法相关的修整开垅的损失）。

这一时间损失可用来估算式（1—5）中所需计算的转弯时间。如果地块恰好需要120个行程耕完，则每次转弯的平均时间损失为1/120h，或每次转弯为30s。

现将其它方法的方法效率概括在表1—2中，并按相同的地块与作业数据进行对照。

连续式，对角线转弯带

$$PE = \frac{LW}{LW + 2aW - \frac{1}{2}a^2 + 1.828wW + wL}$$

式中： a ——转弯带的宽度（m）。

连续式

$$PE = \frac{LW}{LW + 0.27777tS_p(W + L - f)}$$

式中： t ——转弯时间（s）。

表1-2 矩形地块的耕地方法比较①

方 法	说 明	方法效率 (%)
留地头式, 6 m宽	$f=394\text{m}$, $n=7$ (最优) $S_e=8.0\text{km/h}$ $S_f=4.8\text{km/h}$ ②	93.0
连续式	$t=10\text{s}$, $f=394\text{m}$	95.7
连续式, 对角线转弯带	$\alpha=10\text{m}$ (转弯带宽度)	94.8
连续式, 圆形拐弯, 90°	$r=3\text{m}$ (不打结式转弯的半径) $r_0=6\text{m}$ (打结式转弯的半径)	91.8
连续式, 270°转弯	$r_0=6\text{m}$	82.5

① $L=W=400\text{m}$; $S_p=6.4\text{km/h}$; $w=2\text{m}$.

② 为地头耕作时转弯速度——译者注, 根据Hunt(1983)。

连续式, 270°转弯

$$PE = \frac{L}{L + 2w + 13.42r_0}$$

式中: r_0 ——打结式转弯的半径 (m)。

连续式, 圆形拐弯

$$PE = \frac{L}{L + 2.73r_0 + 2.48r + 6w}$$

式中: r ——不打结式转弯的半径 (m)。

田间机器子系统之间可能出现不相容性。例如, 如果田间机器系统制备的是干草捆, 而设计的运输系统是运碎草的, 就会出现不相容。

为了相容, 运输作业可列为田间机器系统的一种约束, 反之亦然。进而, 运输作业的卸载也是附加的约束。为了精确地模拟机器系统的性能, 常常需要将三个子系统——田间作业, 运输作业和卸载 (或装载) 作业——综合到一个大系统中, 进行更精确的分析。

循环图。Hunt(1983)提出的循环图, 是机器作业系统的一种图解式模型。绘制循环图的规则见表1-3。图1-6和1-7为循环图示例。该图将各机器的有关作业时间联结在一起组成循环。

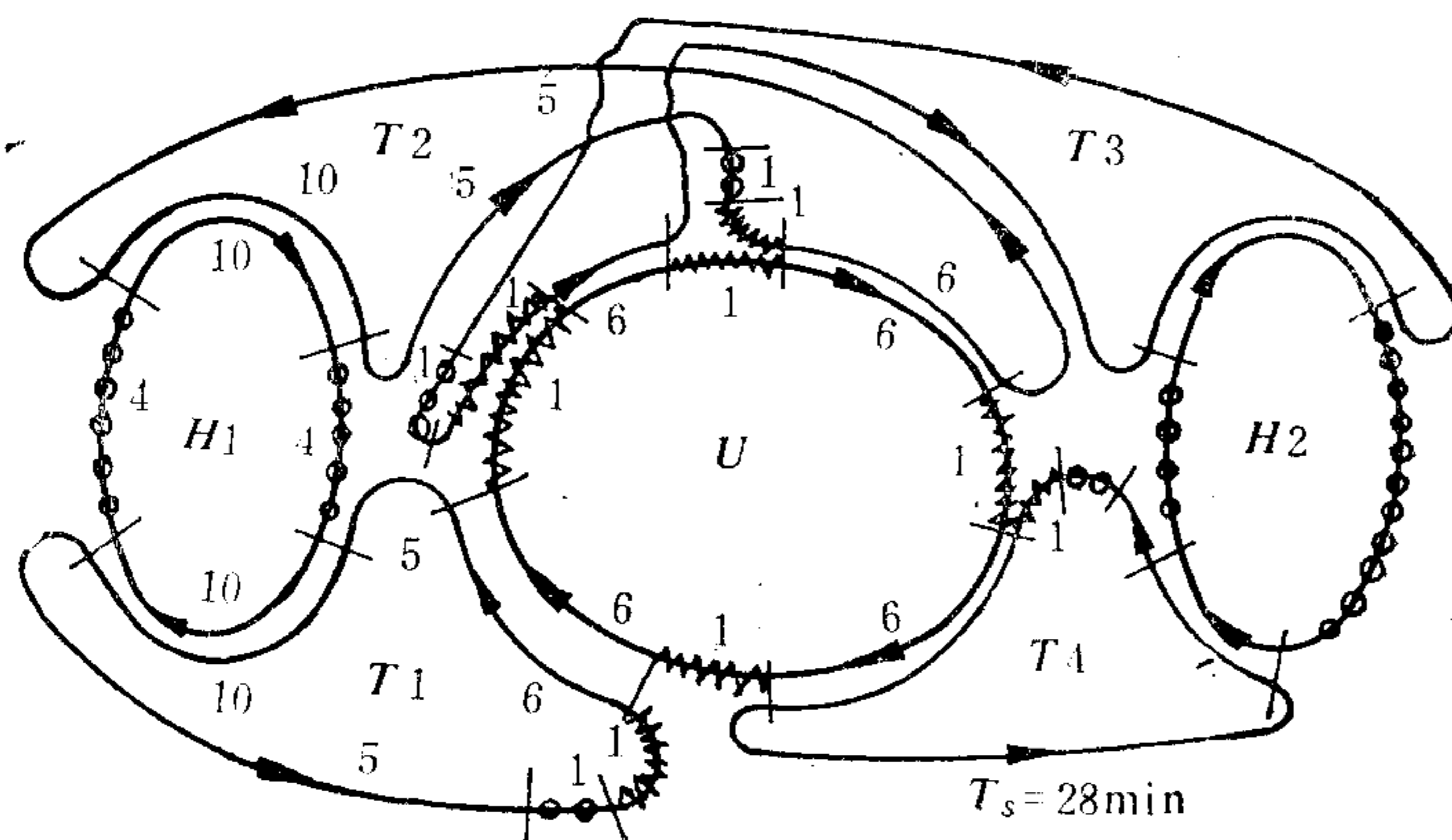


图1-6 2台收割机 H_1 和 H_2 , 由4台卡车(T_1 到 T_4)担任运输, 1台卸料机 U

(引自Hunt, 1983)

成循环。收获系统是最容易理解的例子, 但对于给田间作业供应种子、肥料及其它物资的运输, 循环图技术也同样奏效。有三种作业类型: 一种如图1-8, 运输车伴随收割机作业; 第二种见图1-9, 拖车必须从运输拖拉机上摘下并挂到收割机上; 第三种如卷首插图所示, 收割机将收获物积聚在它的粮箱里, 然后周期性地卸给等待着的运输车。

Benock 等 (1981) 开发了一个收获系统的计算机模拟