

# 材料塑性成型工程学

原料-产品生产系统的优化

又称为计算机辅助生产管理系统

一、计算机轧制辅助工程发展状况

二、生产系统的优化

三、工艺规程制订的数学模拟

# 第十五章 系统科学与最优化方法

- 15.1 系统科学的发展现状及基本概念
- 15.2 塑性加工系统工程特点
- 15.3 系统分析的一般步骤
- 15.4 塑性加工的评价指标
- 15.5 最优化方法的应用与分类

# 15.1、系统科学的基本概念及发展现状

- 15.1.1 引言
- 15.1.2 国内外轧钢生产中的模拟和优化研究
- 15.1.3 . 国内外轧钢生产中原料—产品生产系统的优化

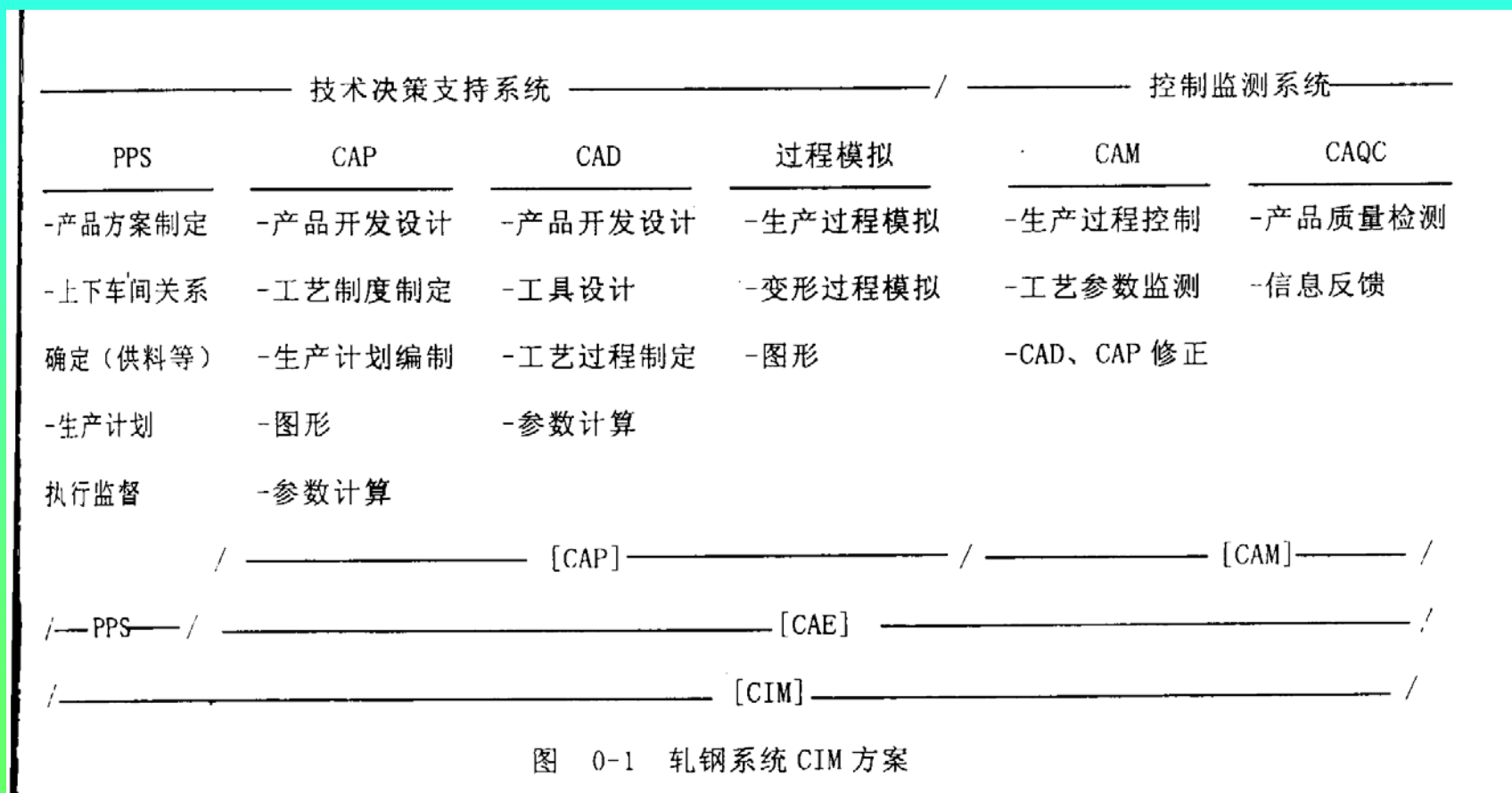
- **15.1.1引言**

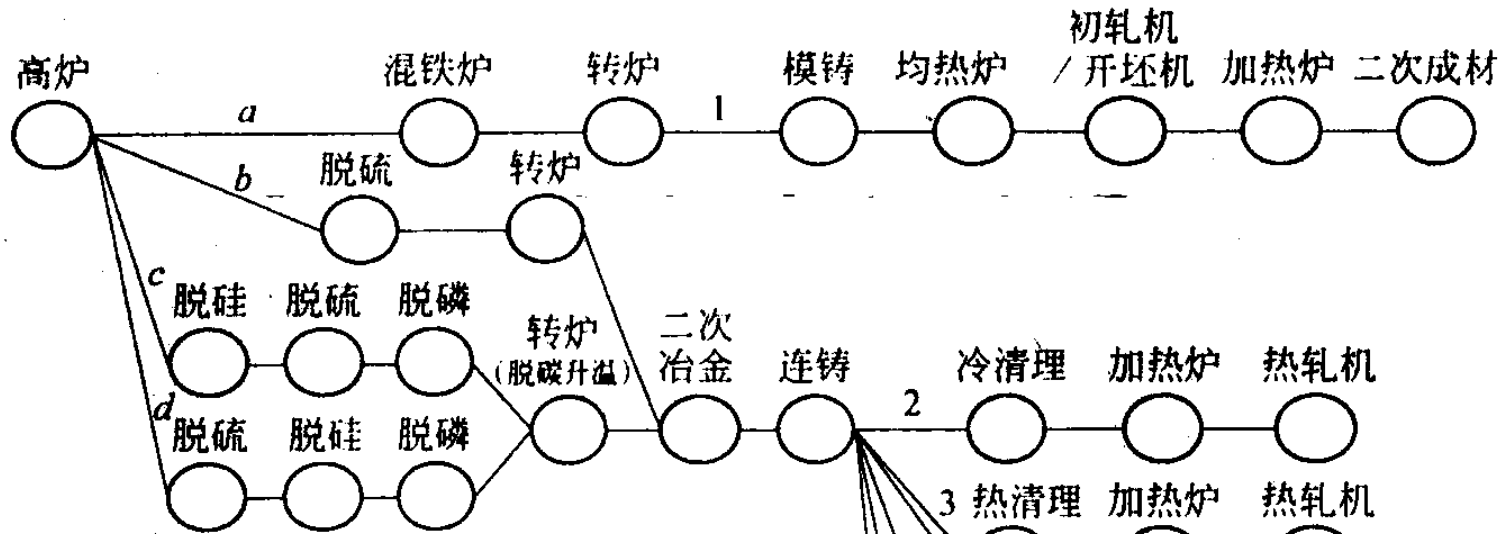
- 目前在我国一提到计算机应用，人们往往想到自动化控制系统，而忽视技术决策支持系统的作用。
- 轧钢技术决策支持系统可为轧钢产品结构优化提供可靠的依据。同时，它本身就是工艺技术结构优化的一个重要方面。
- 美国钢铁学会组织众多专家、学者 指出：
- 必须开发灵活的能够比较不同生产工艺和产品质量的方法，考虑带有一定柔性以适应不同生产路径或对现有工艺进行改造

- 我国国家冶金局规划发展司组织的冶金科技发展指南中也指出，“十一五”期间，我国钢铁工业科技进步的具体目标与主要方向是：
  - （1） 优化钢铁生产流程，节能降成本，提高经济效益
  - （2） 以市场为导向，调整产品结构，提高实物质量和增加短缺品种
  - （3） 加强环保和资源综合利用，推进清洁生产，走可持续发展道路
  - （4） 提高钢铁企业生产过程的自动化水平和管理信息化水平
- 着重提出要大力研究钢铁企业内部各工序间的优化组合，充分发挥整条生产线的生产能力

- 21世纪轧钢技术进步将集中于生产工艺流程的连续化、紧凑化，过程控制将实现轧材性能的高品质化、品种规格多样化及控制和管理的计算机化和信息化。
- 计算机辅助轧钢生产管理系统（PPS）、计算机辅助工艺制定（CAP）
- 计算机辅助设计（CAD）
- 计算机辅助质量监控（CAQ）
- 计算机辅助工程（CAE）以及其他种种计算机辅助功能。
- 综合应用到整个轧钢生产过程中，形成了计算机集成生产系统（CIM）
-

- 图 轧钢系统CIM方案。
- 其中轧钢技术决策支持系统提出决策或为决策提供依据，自动化控制系统是实现决策的执行系统。





高炉与转炉之间：

*a*—铁水进混铁炉入转炉：

*b*—铁水脱硫入转炉：

*c*—铁水脱硅、脱硫、脱磷入转炉(脱碳升温)：

*d*—铁水脱硫、脱硅、脱磷入转炉(脱碳升温)

转炉之后：

1—模铸钢锭冷装炉轧制(IC-CCR)：

2—连铸坯冷装炉轧制(CC-CCR)：

3—连铸坯热送轧制(CC-HCR)：

4—无缺陷连铸坯直接热装炉轧制(CC-DHCR)：

5—连铸坯直接轧制(CC-DR)：

6—薄板坯连铸—连轧：

7—薄带连铸

图5 高炉—转炉—热轧生产流程的演进

Fig. 5 Evolution of BF-BOF-Rolling process



## 15.1.2. 国内外轧钢生产中的模拟和优化研究

- 用计算机模拟生产过程中各工段或各工序的配合以优化生产过程的协调性，模拟变形过程以优化变形参数以及其他工艺制度的优化，美国、德国、日本、加拿大和前苏联等国。
- ①生产过程的模拟与优化
- 美国开发了均热炉—初轧机仿真系统，均热坑数量和装入能力的优化设计及均热炉—轧机的合理配合和作业调度；

- 加拿大的轧钢厂直观仿真系统用于编制作业计划，减少了工序和生产时间，减少了中间库存。
- ②变形过程和参数的模拟与优化：
- 德国IBF研究所开发了轧制钢轨和工字钢等异型断面时变形区中各点的变形分布、温度分布等的模拟。
- 建立了轧材组织和性能与工艺参数间关系的模型。按工艺参数预报轧后轧材组织和性能，或者按产品性能要求优化控轧、控冷工艺制度。



1

DISPLACEMENT

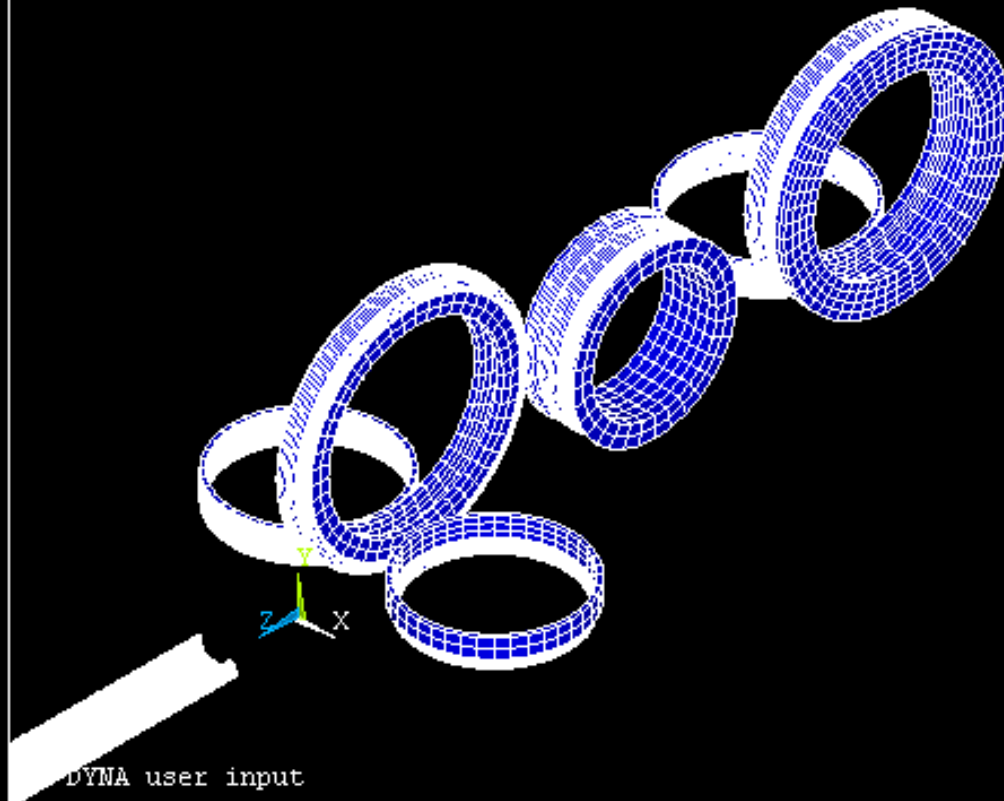
STEP=1

SUB =1

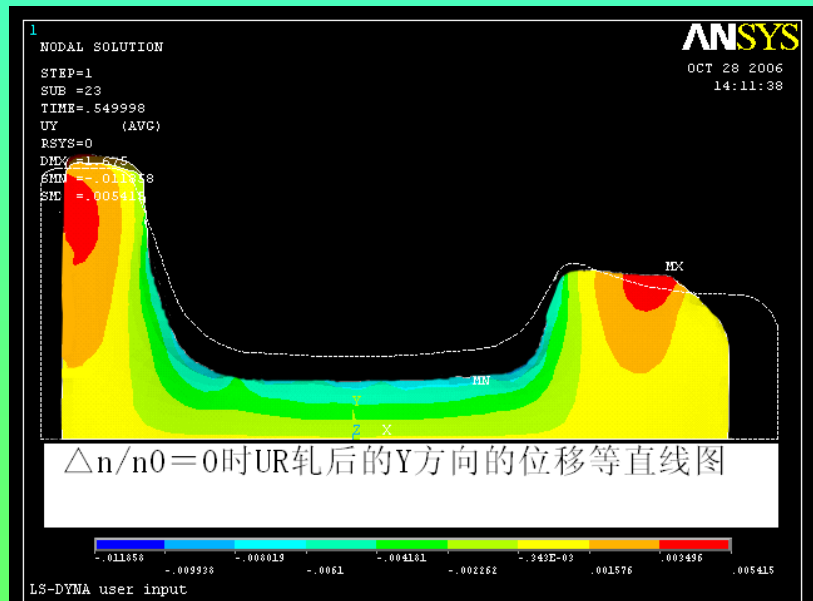
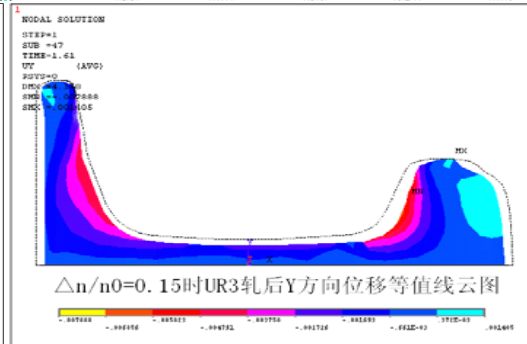
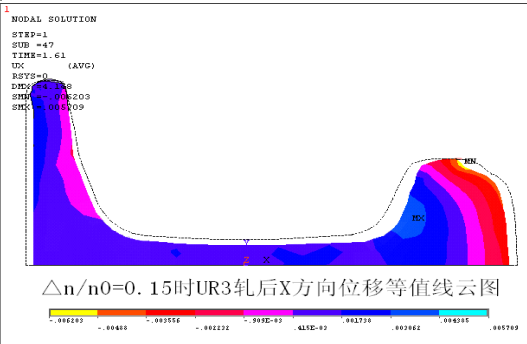
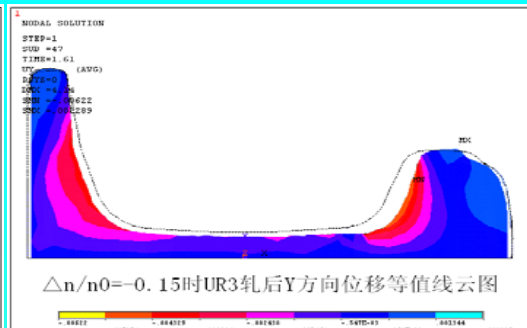
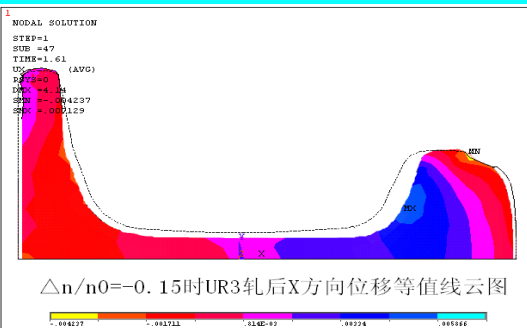
ANSYS

OCT 23 2006

10:40:20



DYNMA user input







1

NODAL SOLUTION

STEP=1

SUB =1

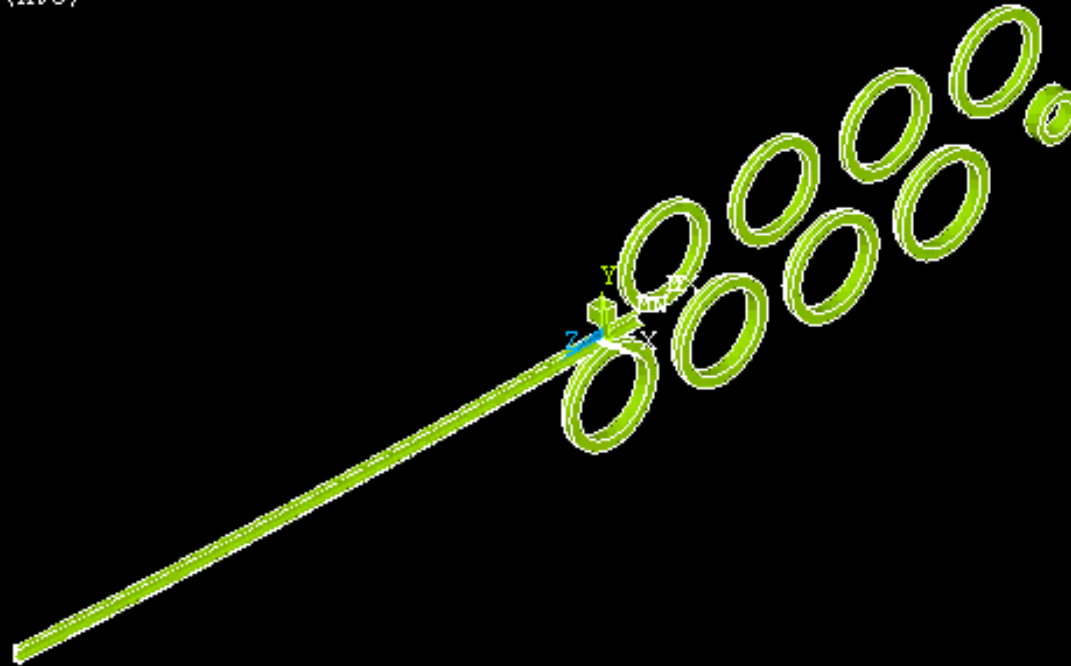
SZ (AVG)

RSYS=0

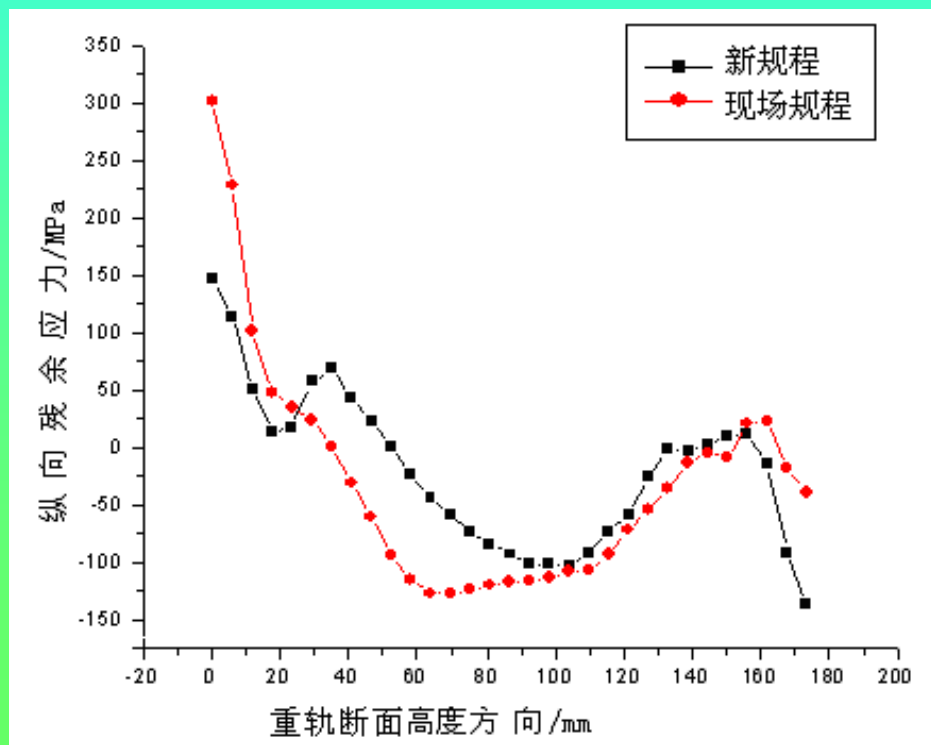
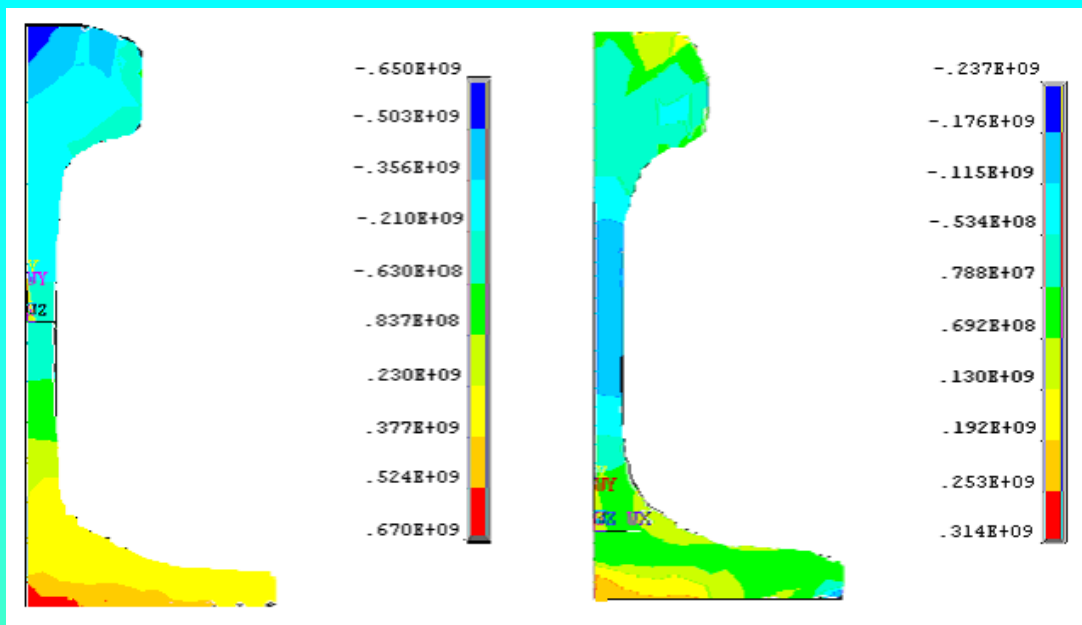
ANSYS

APR 10 2006

10:36:56



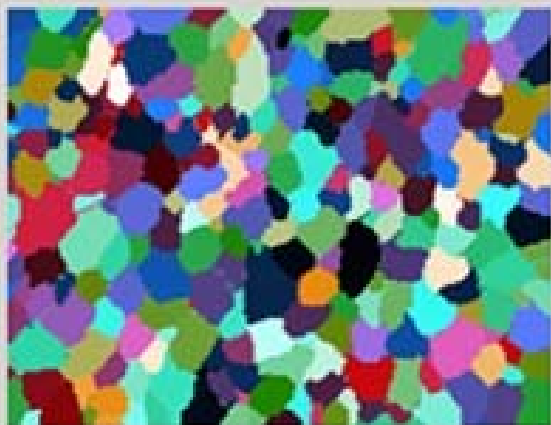
LS-DYNA user input







25 晶粒数 平均晶粒面积 平均晶粒半径



45 晶粒数 平均晶粒面积 平均晶粒半径



120 晶粒数 平均晶粒面积 平均晶粒半径



0 晶粒数 平均晶粒面积 平均晶粒半径



0 晶粒数 平均晶粒面积 平均晶粒半径



131 晶粒数 平均晶粒面积 平均晶粒半径

数据处理操作区



开始晶体生长

自定义生长

结果分析

图片处理

查看初始图

关于本模拟软件

- 德国、美国一些工厂还开发了无缝钢管在变形区中的形状变化、壁厚分布和各有关参数变化的模拟和图形显示系统，用以优化工具参数和轧机调整参数。
- 前苏联也建立了根据轧制工艺参数预报轧材性能或按轧材性能要求优化轧制工艺的程序系统。其中用于高精度型材拉拔工艺的系统。
- ③工艺制度的优化：
  - 前苏联建立了钢锭从浇注到轧制成品整个过程中的热状态变化模型，得出综合能耗最小的钢锭加热制度。

- I. Koffner 等报道了优化加热制度可使轨梁轧机生产率提高5%、温度波动下降70%、废品率下降60%。
- 美国报道的热轧带钢压下规程计算机优化程序能按多目标优化压下规程。
- 前苏联建立了描述型钢轧后水冷时轧件温度场模型，它可以模拟有任何水冷段数的冷却过程和预报在连续冷却过程中奥氏体的分解，据此可以优化控轧控冷制度。
- ④以提高成材率为目标的工艺优化是计算机应用于轧钢工艺优化的中的一个重要方面。

- 用计算机根据各成品材的定尺长度综合优化钢锭（连铸坯）—中间坯—成品材之间的尺寸和重量关系，并根据轧后轧件的长度预报，优化成品剪切方案，以减少切损提高成材率。
- 如前苏联某2800mm厚板轧机使用计算机优化板坯重量和轧后厚板的剪切，使初轧机金属消耗下降6kg/t，因厚板剪切量减少可获经济效益10万卢布/年。
- 另一钢管厂的优化程序使1988年管坯消耗比原计划下降1360t。
-

- 工艺过程的计算机模拟还用来代替新轧机投产时的试轧，大大缩短了投产期。
- 前苏联某  $\phi 450\text{mm}$  连续中型轧机投产前用计算机模拟了各产品的轧制工艺，发现  $\phi 60\text{mm}$  圆钢在原设计终轧速度为  $4.7\text{m/s}$  时，设备负荷和咬入条件等均比允许值低许多。
- 15.1.3 国内外轧钢生产中原料—产品生产系统的优化
- 轧钢领域中，应用孔型设计优化、压下—温度—速度规程优化、坯料和剪切优化、设备匹配优化等单元工艺技术优化系统集成起来形成了轧钢工艺技术决策优化系统。

- **原料和成品的剪切优化系统**直接决定着钢材产品的成材率和定尺率，影响着企业的总体经济效益。
- **国外研究过程及现状**
- 1976年，前苏联学者提出了一种启发式算法，在保证轧件剪切长度不超出公差的前提下，采用计算机控制，充分利用板坯的有效长度，在钢坯定尺范围内适当改变钢坯剪切长度，基本上做到了每根轧件的无剩余剪切。

- 1976年G. B. Tilanus和C. Gerhardt提出一种两阶段启发式算法。首先从众多的坯料中找出了与定货品种在重量, 数量方面相匹配的坯料, 然后应用启发式算法找出其中最优的六种组合, 并粗略地考虑了钢坯重量波动的影响。实践证明在大型机上只需几秒钟即可得到问题的解。
- 1977年R. S. Stainton报道了他们采用启发式算法编制的剪切规划用于某厂的高强度棒材剪切<sup>[8]</sup>, 使棒材切余减少大约4%。

- 1989年，前苏联学者进行了锭—坯—材系统两阶段剪切优化研究<sup>[9]</sup>。他们采用了一种启发式算法，以切余最少为目标进行了从中型开坯轧机到棒材轧机坯料及产品的剪切优化，该算法应用于前苏联某棒材厂，头一年就使该厂的金属消耗下降118吨。
- 上述文献报道中的剪切优化都是单纯采用了启发式算法。
- 1981年住友制铁所在生产中采用线性规划，将定货的钢种、规格与原料的钢种、规格进行最佳调配，并采用启发式算法对生产的型钢进行



- 在线剪切优化，每隔1-2小时对来料重量进行实测，修改由原来估计重量为基础制定的剪切方案。该算法使住友大型型钢厂成材率提高2.0-4.0%。
- 1981年新日铁报道了室兰制铁厂棒材分厂采用计算机控制提高棒材剪切成材率的经验。他们采用了动态规划方法，以切余为最小目标进行了棒材的剪切优化，实现了成材率优先、主定尺优先、操作性能优先的三种剪切制度的模拟。在优化结果的指导下，该厂对控制设备和剪切设备进行了改造，使该厂1980年棒材成材率提高到 97.4%。

- 1979年前苏联学者报道了阿则尔巴德任斯克钢管厂进行的由850型初轧机、750开坯机到轧管机组的全程剪切优化的综合研究。他们采用动态规划方法，以钢锭利用体积最大为目标，编制了从初轧开始到轧管前管坯剪切结束的多阶段剪切制度优化程序。该程序的应用使此厂每年获得 24.6万卢布的经济效益。
- 1977年前苏联一家型钢厂针对中间坯编制的随机优化程序，使每根中间坯的切损从2.78卢布降到1.82卢布。

- 1989年前苏联学者使用了概率理论对钢锭重量进行了优化，其优化对象是1150板坯初轧机。生产实践表明，各种规格板坯与钢锭重量的匹配情况得到较大改善。
- 由以上两篇文献报道可见，人们开始将概率和随机的方法引入优化。
- 前苏联某钢厂建立了从初轧机到连续式开坯机的优化系统，用于该厂1300初轧厂，得出了使各部分工作节奏协调的坯料尺寸，使初轧道次减少两道，轧机负荷均匀，产量增加。

- 总之，国外在研究轧钢领域上下工厂（车间）供料关系优化中，剪切优化方法及目标函数是多种多样的。
- 国内研究过程及现状
- 对于自动化程度比较好的轧钢生产厂其剪切优化的研究主要放在控制系统上。例如：
- 成都无缝钢管厂设计的管坯剪切自动控制系统，可完成管坯的自动称重、测长和输送，以及长度优化剪切计算，定尺送料剪切等一系列的自动控制操作。

- 首钢第二型材厂通过对高速成品飞剪定长配尺剪切的影响因素及对成品材尾段的控制分析，提出了正确可行的优化配尺剪切控制方案。
- 包头钢铁设计研究院对引进的泰国泰龙棒材轧机因坯料长度波动而出现的堆钢现象，进行了倍尺剪的优化剪切研究，投入生产后效果较好。
- 但是，多数轧钢企业由于轧机比较陈旧，生产工艺不尽合理、连铸比低、供料关系不合理等原因，使得综合成材率较低。

- 1987年鞍钢140自动轧管机组使用“黄金定律”优化计算后，将原料从6m改为5.4m，下料支数减少15%，成材率提高0.75%，产量上升7%。
- 1990年北京科技大学与首钢特钢厂合作，采用了启发式方法、参数估计法、随机概率法等优化方法对原料至成品的规格匹配问题进行了优化。该软件在首钢特钢公司轧钢二厂进行了现场实验，效果良好。

- 1992年北京科技大学与包钢合作，对重轨的锭重和坯重进行了优化，采用了动态规划法和仿真优化，使成材率提高0.26%。
- 1998年唐钢把工程概率优化设计方法应用于剪切规程设计中，采用反向推理技术，以棒材规格、全定尺长度及根数作为已知条件，求解成材率最大时原料的规格和定尺长度，获得了更符合实际的剪切规程。



- 广州钢铁公司二轧厂棒材线，长期以来产品一直是按一定尺一非定尺组织生产的，平均定尺率只有53%左右。由于市场的变化，非定尺材造成积压。为使产品适销对路，必须进行生产改造。通过试轧，修改确定了合理的坯料单重，并改造了相应的生产设备。L20、22全定尺生产的投资费用在半年内已收回，定尺率的提高和定尺材差价两项在1995年和1996年累计已超过1千万元的经济效益。
- 从以上文献报道可以看出，确定合理的用坯尺寸是提高成材率的关键。



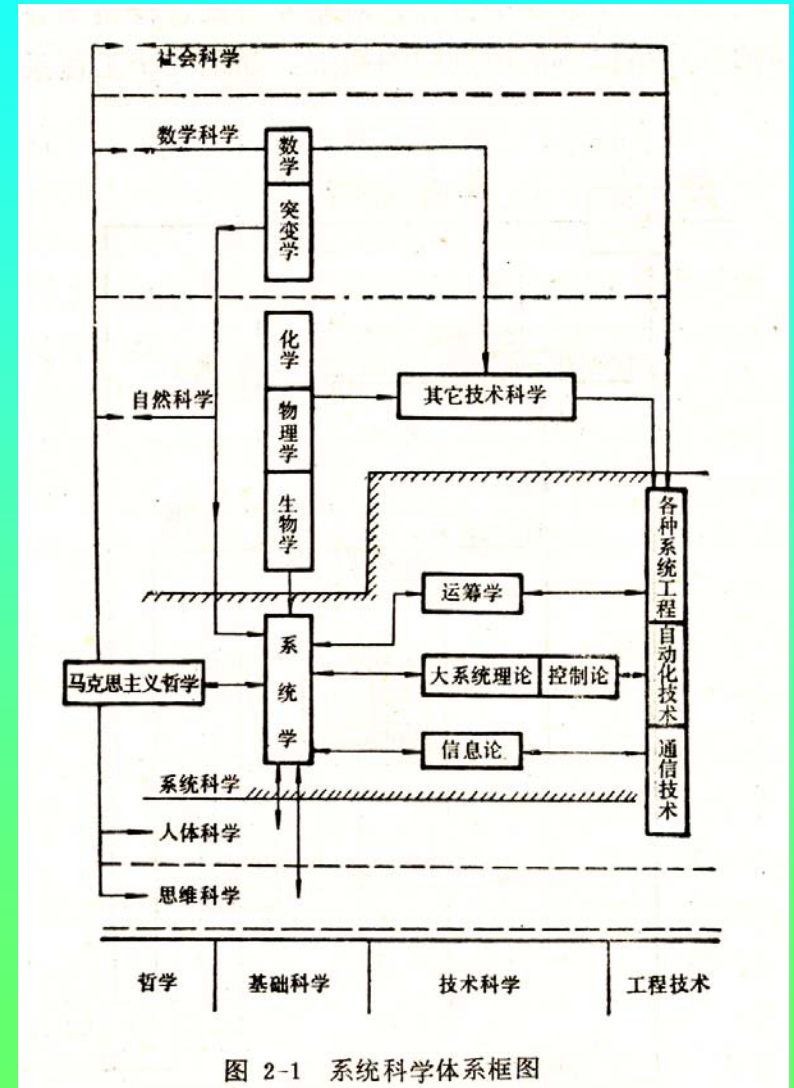
- 除了少数企业对剪切规程进行了优化设计外，大多数生产厂都是在生产中凭经验和手工计算，通过试轧摸索各种钢材的合适的坯料尺寸。这样势必会影响正常的生产秩序，而且每次修改都要改造一些装备，造成极大的人力、物力、财力的浪费。同时，该规划通过实验进行，无法总结其内在的规律性，以充分发挥设备的生产潜力。
- 综上所述，轧钢系统上下工厂（车间）供料关系的优化问题可分为两种类型：一种是在线优化，它是将优化和控制结合起来，也即根据来料的

- 情况选择相应的优化方案，控制轧制制度和剪切制度，降低某阶段的金属消耗，提高综合经济指标。这种优化算法适用于控制设备和监测设备完善的轧钢系统。另一种是离线优化，它考虑了较多的影响因素，对一个或几个过程进行整体规划，从宏观上改进系统的供料关系，提高企业的综合经济指标。

- 随着计算机运算速度的不断提高，人们开始将概率和随机的方法引入规划过程，选择并改进合适的优化算法，突破了以往只对某一确定性问题进行优化的局限性，把最优解看成带有波动的随机变量综合作用的结果。优化的对象也正从过去的某一阶段或某一过程扩大到轧钢系统的全过程。

# 15.1.4 系统科学的基本概念

- 系统：由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合而成的、具有特定功能的有机整体；而系统本身又是所属的一个更大系统的子（分）系统
- 系统科学：运用自然科学和社会科学的理论和方法，对系统进行规划、研究、设计、试验、制造和使用，以便充分地发挥人力、物力和财力的潜力，最后综合成一个技术上合理、经济上合算、研制周期短、能协调运转的实用系统的最优化管理科学



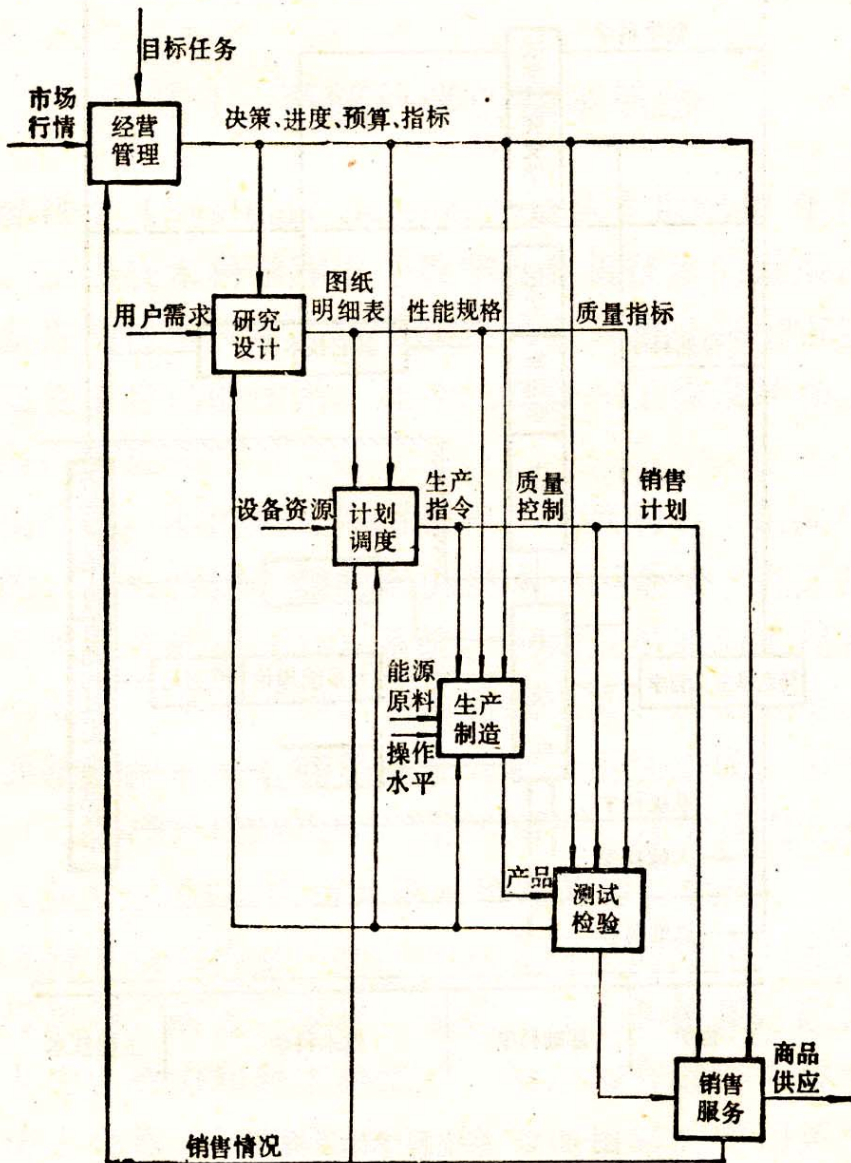


图 2-2 企业生产过程图

- 系统科学作为一门技术科学，系统科学与基础科学、其他技术科学和社会科学以及思维科学的密切联系。
- 系统科学作为一种科学方法，又称为系统工程
  - 为了达到一个或多个目标，对研究对象进行系统分析，用最少的耗费组成人们所期望的系统

# 15.2 塑性加工系统工程的特点

- **整体性：**整体性是把研究对象看成一个整体系统，这个系统又是由若干个子系统（如：孔型系统、延伸系数-----）有机地结合起来。

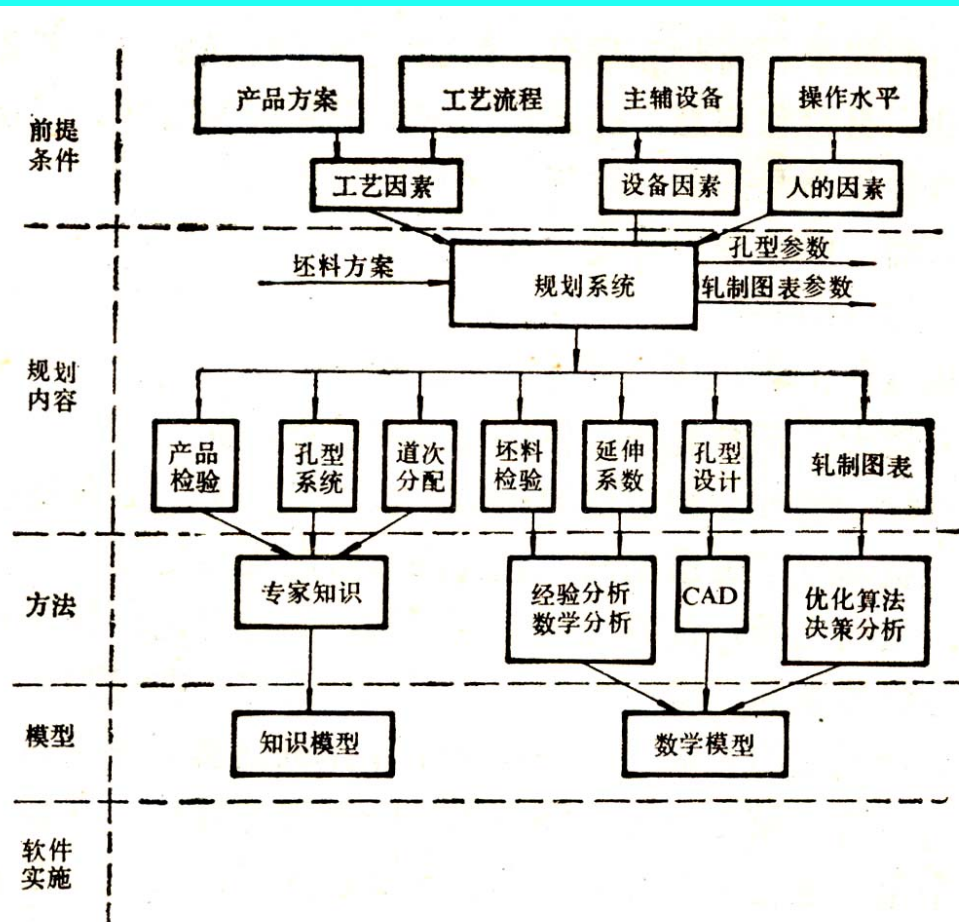
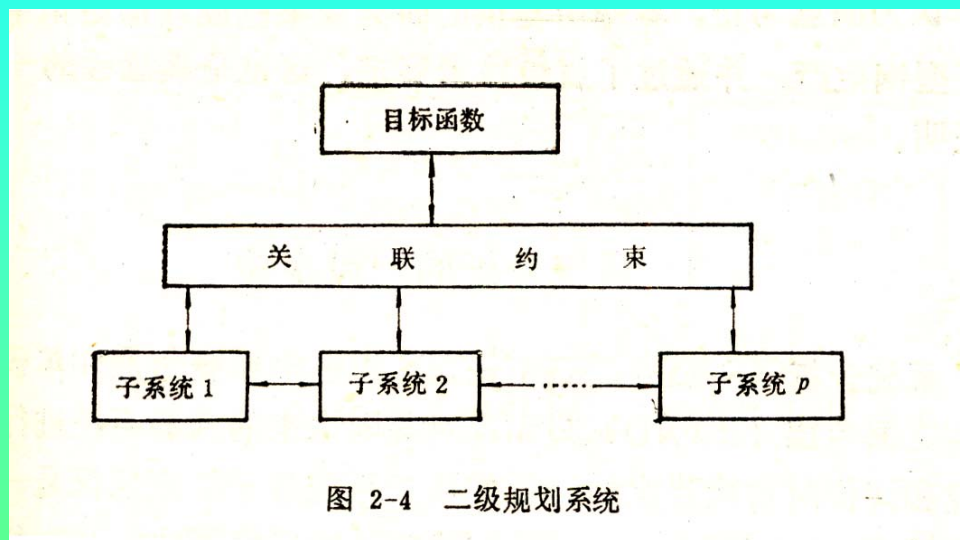


图 2-3 用于热轧型钢产品开发的规划系统



- **协调性**：协调性是协调子系统与子系统、子系统与整体系统之间的相互关系。以保证和提高系统的整体功能。如：在设计孔型时，要协调孔型系统、轧制道次、延伸系数和轧机操作方式的相互关系



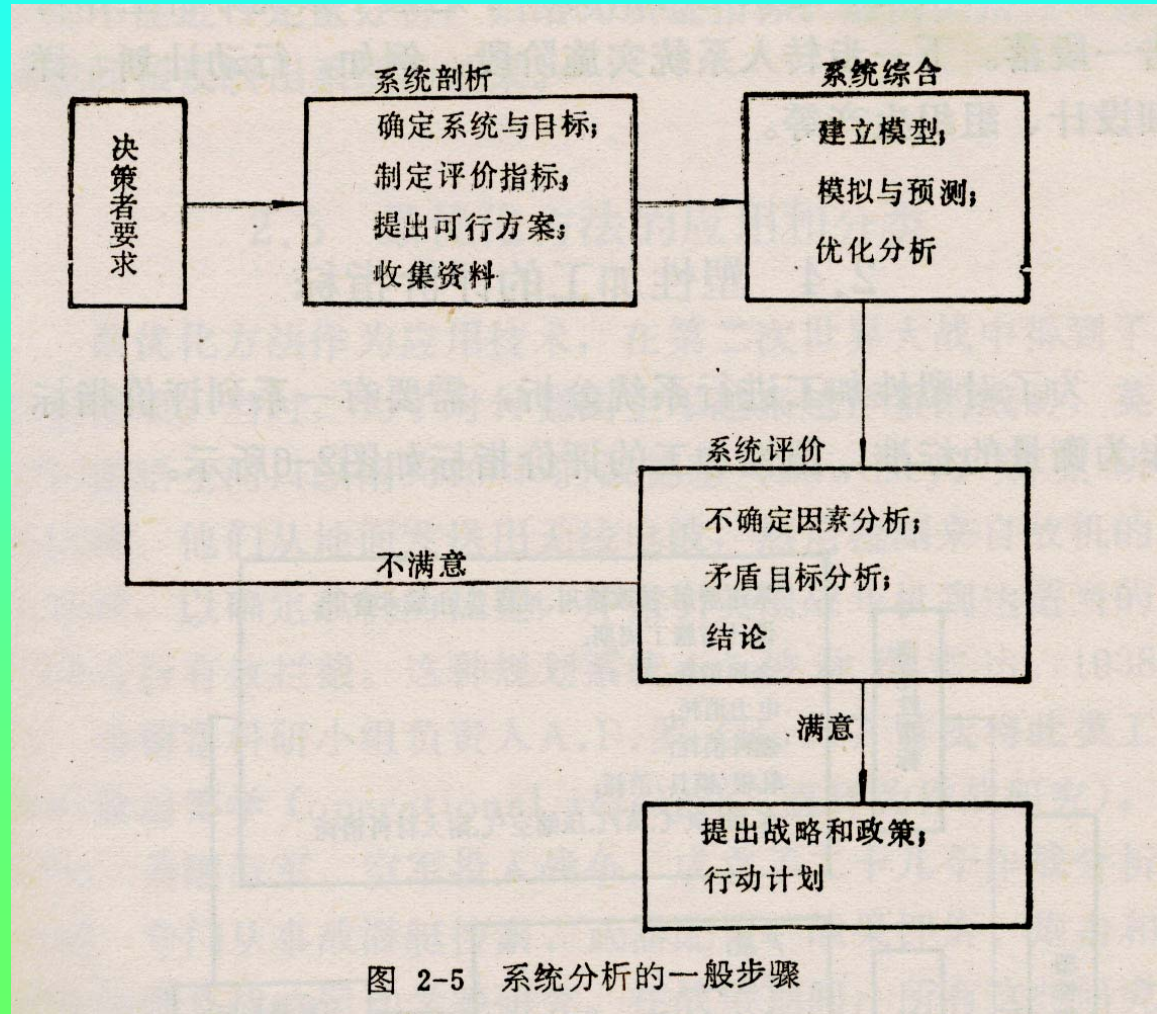
- **综合性**：综合运用各门学科提供的有关知识，建立相应的数学模型，并能用数学模型规划和预测目标函数值，以达到整体系统的综合最优化。
- **满意性**：系统工程的主要目的是提供最优工作的生产系统。
- 系统价值是由系统的功能、建立系统所需的费用、完成系统所需要的时间以及系统的可靠性等方面来决定。



## 15.3 系统分析的一般步骤

- 系统分析：是一种研究策略，是帮助决策者实现某目标而选择一种行动计划的办法。
- 系统剖析：又系统规划，问题是什么？如何组织这个项目？子系统是什么？子系统目标是什么？整体系统是什么？
- 系统综合：系统设计按照系统已给定的目标、评价标准及各个可行方案等资料，建立可以用于优化计算的数学模型，提出计算方法，计算每个被选出的可行方案，进行系统模拟预测其结果，对不同的结果做优化分析。

- 系统评价：说明优化分析的结果，而且根据决策者的要求进行再分析的工作，以便获得更好的结果。



## 15.4 塑性加工的评价指标

- 耗费分析：定量分析，换算成货币，归纳为数量指标
- 效益分析：不能进行定量分析，归纳为质量指标。

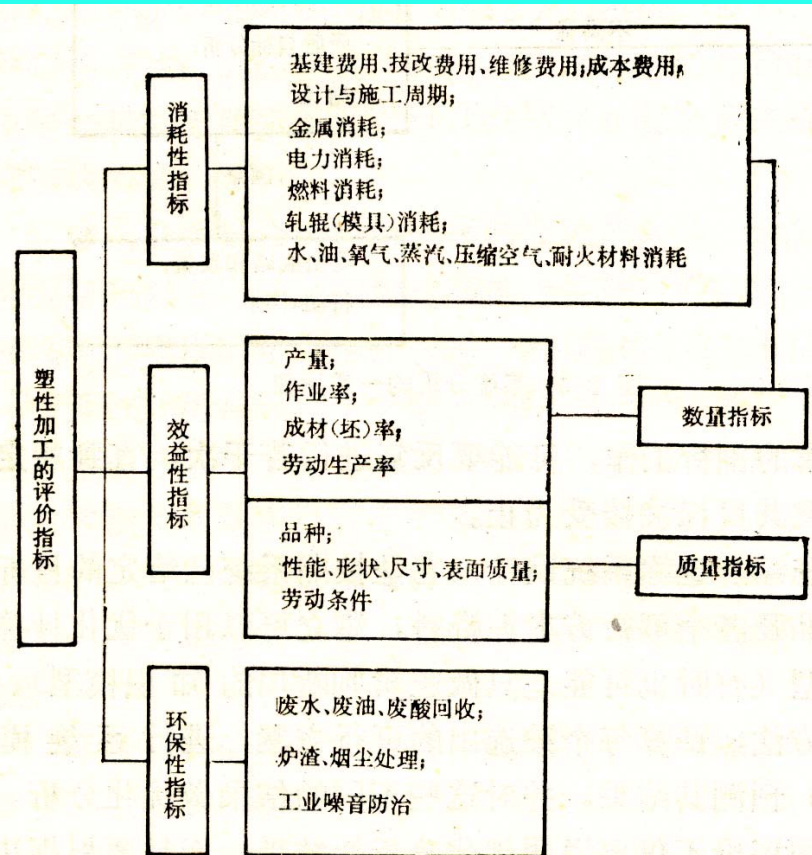


图 2-6 塑性加工的评价指标

- 最优化技术的发展
- 最优化技术研究解决的两类问题：
  - 1) 如何将最优化问题表示成数学模型
  - 2) 如何根据数学模型，尽快求出最优解
- 最优化技术迅速发展的主要原因：
  - ▲近代科技与生产发展的需要
  - ▲电子计算机的飞速发展
- 优化是在给定环境下获得最好结果的行为。优化的数学基础是运筹学。
- **运筹学**是数学的一个分支，是涉及用科学的方法和手段进行决策及确定最优解的数学。表2-1给出了运筹学中定义明确的领域。

# 运筹学方法

表 2-1

## 数学规划方法

1. 微积分方法
2. 变分法
3. 非线性规划
4. 几何规划
5. 二次规划
6. 线性规划
7. 动态规划
8. 整数规划
9. 随机规划
10. 可分离规划
11. 多目标规划
12. 网络法
13. 对策论

## 随机过程方法

1. 统计决策理论
2. 马尔科夫过程
3. 排队论
4. 更新论
5. 仿真方法
6. 可靠性理论

## 统计学方法

1. 回归分析
2. 群分析,  
模式识别
3. 实验设计
4. 鉴别分析  
(因子分析)

表 2-1 最优化方法的应用范围

应用部门	最优化问题	性质	最优化方法
计划与管理	生产计划 运输作业, 配料问题 任务指派 厂址选择 设备更新, 投资分配 技术改造方案	线性规划 线性规划 整数规划 非线性规划 动态规划 决策论	作图法 单纯形法 分枝定界法 步长加速法 动态规划法 决策树法
研究与设计	实验数据处理 初轧方坯鱼尾最小 轧制节奏最小 节能压下规程设计 H型钢孔型设计 成形过程模拟 新型轧机结构分析 管坯孔型设计 炼钢、连铸与连轧工序衔接	非线性规划 同上 同上 同上 同上 刚塑性 弹塑性 动态规划 排队论	最小二乘法 一维搜索法 距离函数法 罚函数法 网格法 有限元法 有限元法 动态规划法 随机服务系统
生产与制造	坯料尺寸选择 冷轧带钢纵向厚差最小 异步冷轧薄板板型 截料最省 轧机工作辊直径选择 减速器分速比设计 连轧机能耗最小	专家知识 非线性规划 同上 同上 多目标规划 同上 动态规划	启发式搜索法 阻尼牛顿法 影响函数法 拉格朗日乘法 评价函数法 复合形法 动态规划法
自动化	自动控制系统可靠性分析 仓库存取问题	动态规划 非线性规划	动态规划法 格里戴法



- 表2-1中，数学规划可用于在给定的约束集合下，求解多变量函数的极值。随机过程过程的方法可用于分析由一组已知概率分布的随机变量描述问题。
- 对各种不同类型的优化问题，必须选用适当的优化方法。因为目前还不存在一种优化方法可以有效地求解所有优化问题。
- 几种轧钢领域中常用的方法和可能利用的优化方法加以讨论。
- (1) 启发式算法
- 即运用与求解问题的特性有关的启发性知识（如解决问题的策略，技巧，对解的特性及规律的估计等实践知识），加快推理过程，提高搜索效率，减少运算时间的优化算法。

- 轧钢领域的原料—成品系统中，启发式算法已被广泛应用于轧钢问题的求解。
- (2) 线性规划法
- 在轧钢领域，线性规划法已有一些应用实例。在解决生产计划、运输作业、任务指派和资金利用等生产管理时，一般可以利用线性规划方法来解决。
- 首先要以数学的形式来描述所要求解的问题，也就是建立线性目标模型和约束方程；第二要保证约束条件形成的可行域为密闭的内部无空隙的凸集。



- (3) 参数估计法

- 在计算中对各变量进行实测，并对其均值和方差进行统计分析，以统计值近似总体均值和方差，将随机问题看成确定性问题，将均值看成名义值，理论值进行计算寻优。同时，用区间估计法确定均值和方差的执行区间，得到问题的解。
- 这种方法比较简单，而且模型本身并没有考虑随机因素的影响，它介于确定型和随机型优化之间。

- (4) 随机概率归一法

- 此算法是将多个随机变量的波动揉和到一个总变量中去，以各变量产生的波动范围求出总变量的波动范围，并假设其变化符合某一已知概率分布，求出此分布下总变量的方差和均值，然后研究总变量不同取值时的各点概率，寻求最优解。
- 此算法的优点是避开了繁重的测量工作，以归一总量的波动代表了各种变量的随机变化。

- (5) 工程概率优化法

- 此优化设计是对含有随机变量的模型，决定随机设计变量在满足一定的概率约束和常规约束下，使目标函数的某种概率指标收敛于极值。
- 工程概率优化设计方法是当前设计理论中的一种具有崭新思想的设计方法，它把最优化理论同概率论的思想结合起来，考虑了生产和工程实际中的各种随机因素，从而是一种更符合生产和工程实际的设计思想。

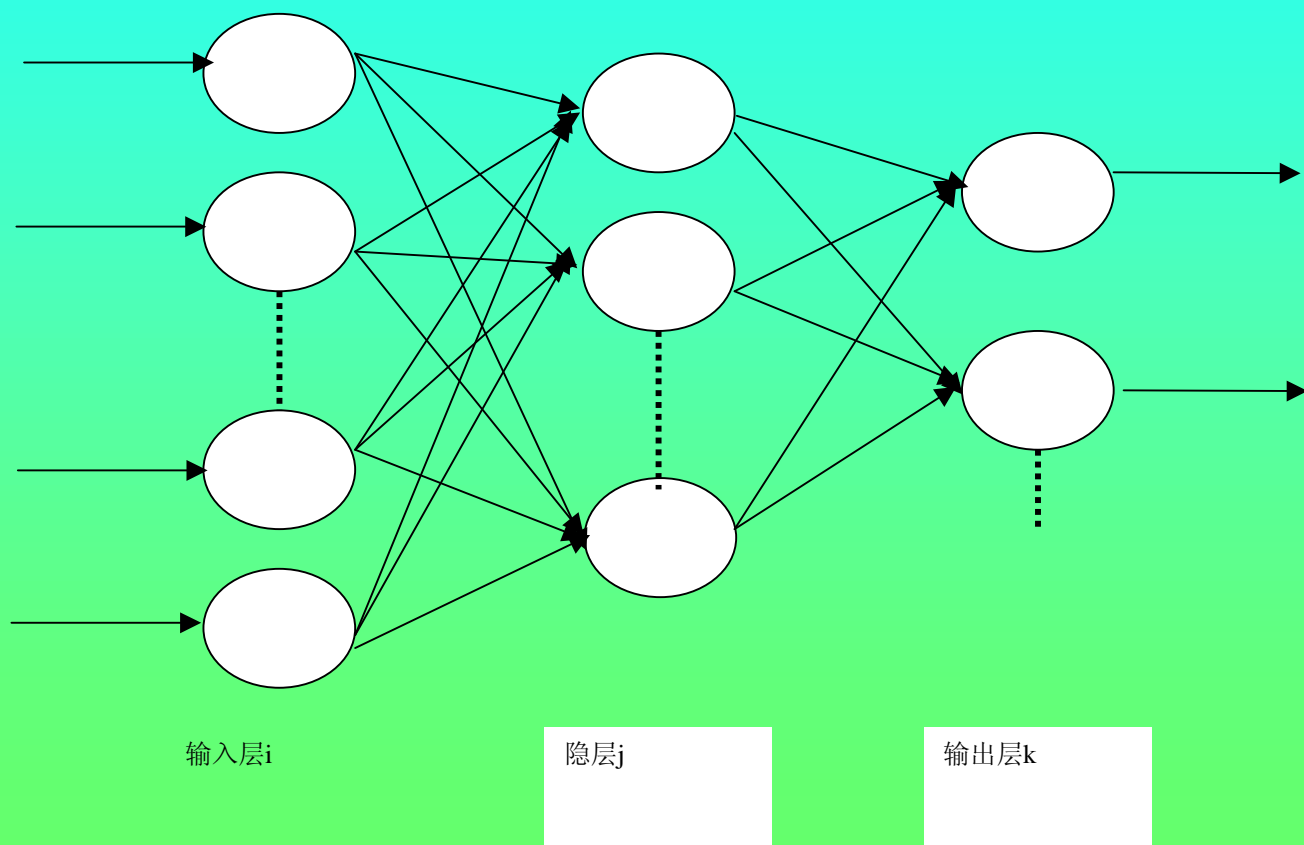
- (6) 动态规划法 (Dynamic Programming)
- 动态规划法可用于多级序贯结构中确定性的和随机性的、连续的或离散的、线性的和非线性的问题优化。
- 动态规划法中，还未找到一个统一的判别标准来判断哪些问题用动态规划法求解有效。
- 在使用动态规划法时主要存在的问题是：
  - ① 维数灾。当动态规划中维数增大时，计算机需要存储的数据量成倍增加，运算时间大大延长。
  - ② 动态规划模型中的状态很难确定。

- ③很难保证在动态规划过程中无后效性。
- 尽管有上述种种困难，由于动态规划没有一般优化中需要的数学模型，还是得到了较多应用。例如，武汉钢铁学院方云番等在“带钢热连轧机规程的优化”中应用了动态规划法。
- (7) 仿真
- 当实际系统的内部因素及其关系非常复杂，对系统的认识不够充分时，无法建立适当的数学模型，或建立的数学模型过于烦琐和复杂（如随机因素过多）时，求解此类问题的有效方法就是仿真。
- 仿真技术在轧钢领域内已有一些应用。

- 宝钢钢管公司购置了有限元分析软件，对油井管接头进行工况仿真、性能预测，结合实际情况，优化产品设计方案，达到以较低成本制造出优良油井管的目的。
- (8) 人工神经网络
- 人工神经网络具有处理信息速度快、计算能力强、高度容错、强鲁棒性等特点和自适应、自学习、归纳等智能性功能，使其可被用于非线性、强干扰、时滞不定、难于建模、快速多变的复杂系统的控制。
- 如德国Westfalen厂把神经网络作为数学模型的修正，组成综合神经网络模型，用来完成热轧带钢轧制力的预测。

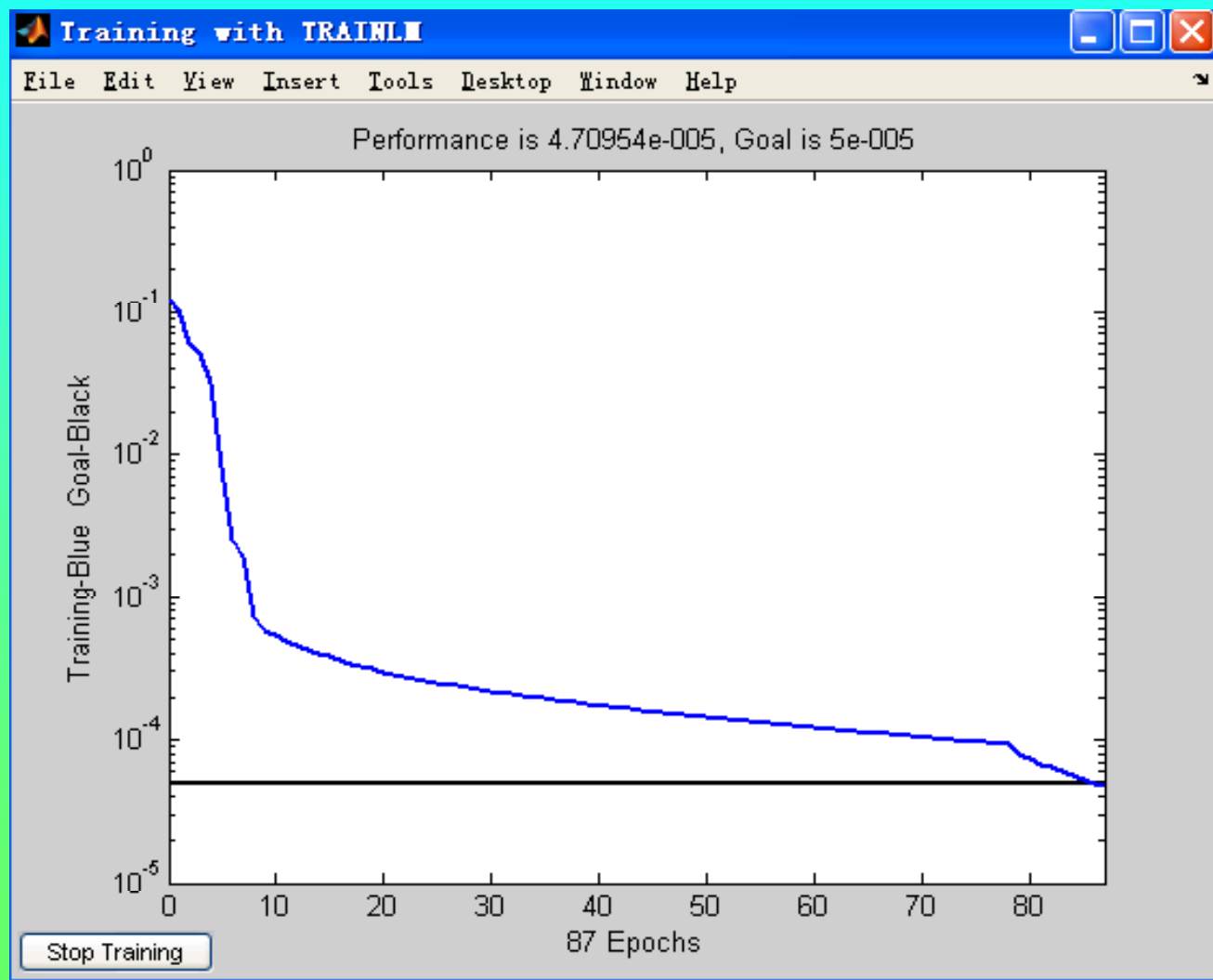
- 神经网络还可以用来预测冷轧变形抗力和摩擦系数, 高炉内煤气流分布及预报连铸漏钢等。
- 人工神经网络中的Hopfield网络引入“能量函数”的概念, 给出网络的稳定性判据, 可用来进行约束优化问题的求解, 但易陷入局部最小。
- 北京理工大学建立对象的人工神经网络模型, 根据模型输出对输入的梯度, 采用有约束梯度优化方法, 研究在限定范围内的对象输入参数的寻优, 为寻找最优生产条件或最优输入参数的生产过程提供了有效途径。
- 包含人工神经网络的在线表面监测系统
- 预测冷轧变形抗力和摩擦系数
- 预报轧制压力

人工神经网络：采用物理可实现的模型来模仿人脑神经细胞的结构和功能的系统。





## BP训练时生成的训练误差曲线



- (9) 遗传算法

- 遗传算法是模拟生物的遗传和长期进化过程发展起来的一种搜索和优化算法。它只需一个适应值函数，而不需要导数或其它辅助信息，具有广泛的适应性。
- 可同时搜索解空间中的许多点，能够快速全局收敛；使用概率规则指导搜索，因而能够搜索离散的多峰值复杂空间。
- 东北大学利用遗传算法很好地优化了板坯立轧短行程控制曲线。对于锭-坯-材多阶段的复杂优化计算，可考虑使用此算法。

- 通过对上述几种优化方法的分析，结合**原料—成品系统规划的特点**，原料—成品系统仿真，采用**启发式算法及随机概率归一法**，对坯、材的剪切规程及原始坯料的**最佳尺寸**进行优化。

# 第十六章、生产管理中的线性规划方法

- 16.1 生产管理问题
- 16.1.1. 生产优化方法的选择
- 什么是最优化问题？
- 我们所选择的方案是一切可能方案中最优的方案，这就是最优方案。
- （1）安排生产计划方面：如何在现有人力、物力条件下，合理安排产品生产，使总产值最高。
- （2）安排生产工艺方面：轧钢自动控制系统中连轧机各机架压下量的设定：
- （3）孔型方面设计：在设备、工艺条件允许的前提下，改变各中间孔型的形状、尺寸使轧制能耗最小。

- **16.1.2.生产计划问题**

- 生产计划、原料配料、运输作业、任务指派和资金利用等实际问题统称为生产管理问题。其中：
  - 一类问题是在一定数量的资源（人力、物力、财力）条件下，研究如何充分合理地运用这些资源，来完成最大量的任务。
  - 另一类问题是给定一项任务，应该怎样统筹安排，以最小量的资源来完成它。
  - 实际上，这两类问题是一个问题两个方面，都是在要求耗费最小量的情况下，获得最好的经济效益、环境效益和社会效益。

## 16.2 线性规划标准形式

- 线性规划的规划的标准形式:

- $\max f(X) =$

$$\sum_{j=1}^n c_j x_j$$

$$i, j=1, 2, \dots, m$$

满足约束条件

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_j \\ x_j \geq 0 \end{cases}$$

$$J=1, 2, \dots, n$$

## 16.3 线性规划问题的解法

- **图解法：**建立数学模型

$$\max f(x_1, x_2, \dots)$$

对于目标函数，当 $f(x_1, x_2, \dots)$ 取不同值时，即构成以目标函数值为等值线的平行直线族，随着此平行直线族不断向右上方移动，目标函数逐渐增大，当平行直线移动到某点时，目标函数值达到最大。

**单纯形法：**利用叠代的原理求解线性规划问题

在生产规划中，遇到线性规划的情况很少，通常所处理的目标函数和约束条件为非线性规划。

## 16.4 应用结果

- 例题1: 某厂生产甲、乙两种产品, 需要三种资源—劳动力、原材料、燃料.由生产计划部门提供数据

表 3-1 资源及产品利润数据

资 源	每件产品的资源消耗量		每天最大的资源供应量
	甲	乙	
劳动力, 工时	2	1	100
原材料, kg	2	3	120
燃料, kg	1	3	90
每件产品利润, 元/件	4	7	



- 问：这两种产品每天各生产多少件，才能使利润最大？

解：设每天生产甲、乙两种产品各为 $x_1$ 和 $x_2$ 件。该问题的数学模型可写成：

$$\max f(x_1, x_2) = 4x_1 + 7x_2 \quad (3-1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 2x_1 + x_2 \leq 100 \\ 2x_1 + 3x_2 \leq 120 \\ x_1 + 3x_2 \leq 90 \\ x_1, x_2 \geq 0 \end{cases} \quad (3-2)$$

其中， $\max$ 和 $\text{s.t.}$ 分别是 $\text{maximize}$ （使之达到最大值）和 $\text{subject to}$ （满足…条件）的缩写。

- 例题2 最优化技术的基本概念和解法
- 下面简要介绍最常用的优化方法：线性规划、非线性规划和动态规划。
- (1) 线性规划的基本概念
- 先举一个简单的例子说明什么是线性规划？例如：生产规划的最优化问题。设某车间生产A、B两种产品，每种产品各有两道工序，分别由两台机器完成这两道工序。若每台机器每周至多工作40小时，而产品A的单价为200元，产品B的单价为500元，问每周A、B产品应各生产

- 多少件，可使总产值为最高？
- A、B产品需用的工时

产品	工序	
	第一道	第二道
A	1.5小时	2小时
B	5小时	4小时

- 设该车间每周应生产产品A、B分别为 $X_1$ 、 $X_2$ 件，则约束条件为：

- $\{ 1.5X_1 + 5X_2 \leq 40$
- $\{ 2X_1 + 4X_2 \leq 40$
- 而且
- $X_1 \geq 0$
- $X_2 \geq 0$
- 而要求该车间每周的总产值为最大就是目标函数S，即：
- $S = 200X_1 + 500X_2 = \text{Max}$
- 这个生产规划优化问题就是求出X1、X2的最优解。既能满足约束条件而又使目标函数为最大。这就是一个线性规划问题。

- 因目标和约束条件均为线性函数，故成为线性规划。
- 线性规划问题的解法：图解法、单纯形法
- **图解法** 上述例题中，已知数学模型：

**解：**设每天生产甲、乙两种产品各为 $x_1$ 和 $x_2$ 件。该问题的数学模型可写成：

$$\max f(x_1, x_2) = 4x_1 + 7x_2 \quad (3-1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 2x_1 + x_2 \leq 100 \\ 2x_1 + 3x_2 \leq 120 \\ x_1 + 3x_2 \leq 90 \\ x_1, x_2 \geq 0 \end{cases} \quad (3-2)$$

其中，max和s.t.分别是maximize（使之达到最大值）和subject to（满足…条件）的缩写。

- 在图所示的直角坐标中，所给的约束条件可表示为由五个半平面（见图中）围成的 $OABCD$ 可行域，由于 $OABCD$ 是一个凸集，所以最优解必定位于 $OABCD$ 凸集的某个顶点或其边界上。

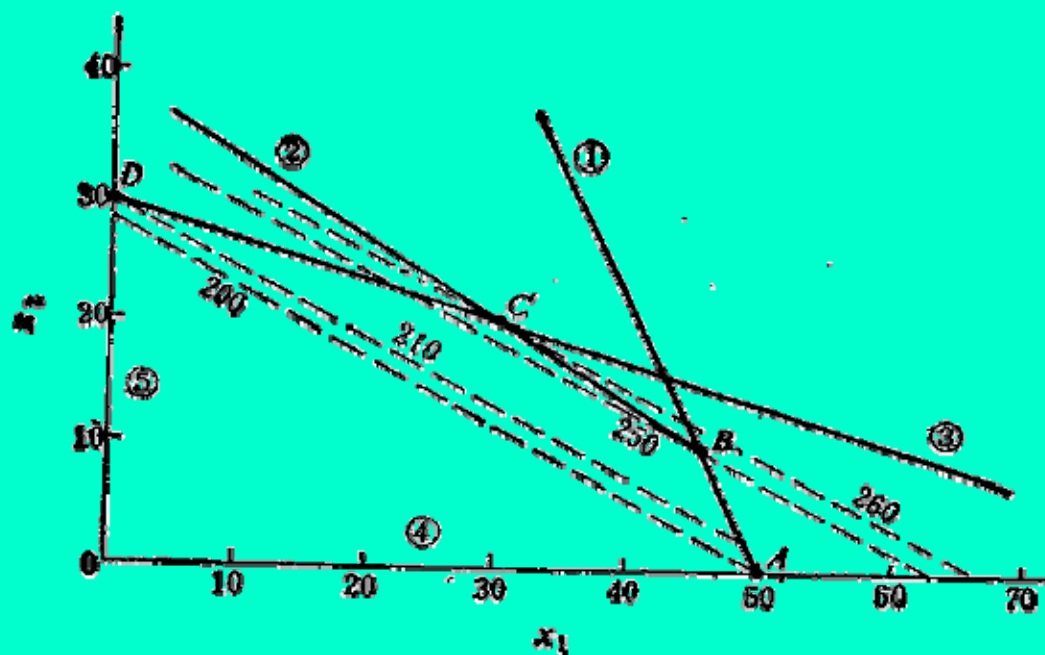


图 3-1 图解法

- 图形法适用于变量维数 $n < 2$ 的线性规划问题，这种方法理论上可以推广到 $n$ 维空间。
- (2) 非线性规划的基本概念及寻优方法
- 只要目标函数或约束条件为非线性函数则规划问题为非线性规划。
- 在优化孔型设计中，很多问题属于非线性规划。例如：
  - 在前后两道方孔尺寸给定的条件下，如何分配中间椭圆孔的压下量，在变形许可得条件下，得到轧制能耗最小的椭圆孔。

- 则其目标函数为：
- $S = f(\Delta h, b_K, \dots, V, T, D)$
- 而约束条件为
- $\mu_f \mu_t = \mu_z$
- $B b_K \leq B_K$
- 式中  $\Delta h$  为压下量；  $b_K$  是轧件宽；  $V$  轧件速度；  $T$  是轧件温度；  $D$  是工作辊径；  $\mu_f$ 、 $\mu_t$  分别为小方孔和中间椭圆孔的延伸系数；  $\mu_z$  总延伸系数；  $B_K$  孔型宽；  $B$  是系数。此例中，其目标函数和约束条件分别为非线性规划，故可归纳为非线性规划问题。
- 非线性规划问题的求解方法大致可以归为两大类：



- ①间接寻优方法(解析法)
- 利用函数求导数寻求函数极值的方法，这类方法要求把一个非线性规划问题用数学方程式描述出来，再按照充分条件或者问题的实际物理意义间接地确定最优解，因此成为间接法。
- 这类间接寻优方法适用于求解目标函数具有简单明确的数学形式的非线性规划问题。而对于目标函数比较复杂，或者无明确的数学表达式的情况，难以解析处理时，间接法就无能为力。

- 对于孔型设计时的寻优，由于影响轧制过程分析的因素很多，目标函数通常都是很复杂的，所以间接寻优法在孔型设计中的使用受到了限制。这时往往借助下面的直接寻优法。
- ②直接寻优方法（搜索法）
- 这是一种数值方法。利用函数在某一局部区域的性质或一些已知点的数值，来确定下一步计算的点，这样一步步搜索、逼近，最后达到最优点。直接寻优方法为两类：消去法和爬山法。
- （A）消去法

- 它是不断消去部分搜索区间，逐步缩小最优点存在地范围来寻求最优点的。此类方法处理单变量函数的寻优问题是十分有效的。
- (B) 爬山法
- 它根据已经求得的目标函数数值，判断前进的方向，逐步改善目标函数而到达最优。这类似爬山攀高峰。故爬山法。该法主要用于解决多变函数的寻优问题。
- 非线性规划的寻优方法与线性规划方法的区别在于：似乎没有一种计算方法甚至一类计算方法对非线性规划问题是普遍有效的。各种计算方法适合不同情况。

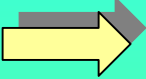
- 几乎所以得非线性规划的寻优方法求解的结果往往都是局部最优解。若非线性规划中的目标函数是凸函数，则局部最优解就是全局最优解。
- （3）动态规划的基本概念及最优化原理
- 人们在生产和科学实验等活动中，往往要按照预定的任务去实现某种受控过程。在过程进行中，应如何在客观条件允许的范围内选择最好的措施去控制过程的发展，以期最好地完成预定任务。这就叫作过程最优化。动态规划过程的基本概念和原理，是与过程最优化问题紧密的联系在一起的。

# 最优化原理

- 最优化原理可叙述如下：“一个过程的最优策略具有这样的性质，即无论它初始状态与初始策略如何，随后的诸决策对以第一个决策所形成的形态作为初始状态的过程而言，必须构成一个最优策略。”

# 最短路线问题

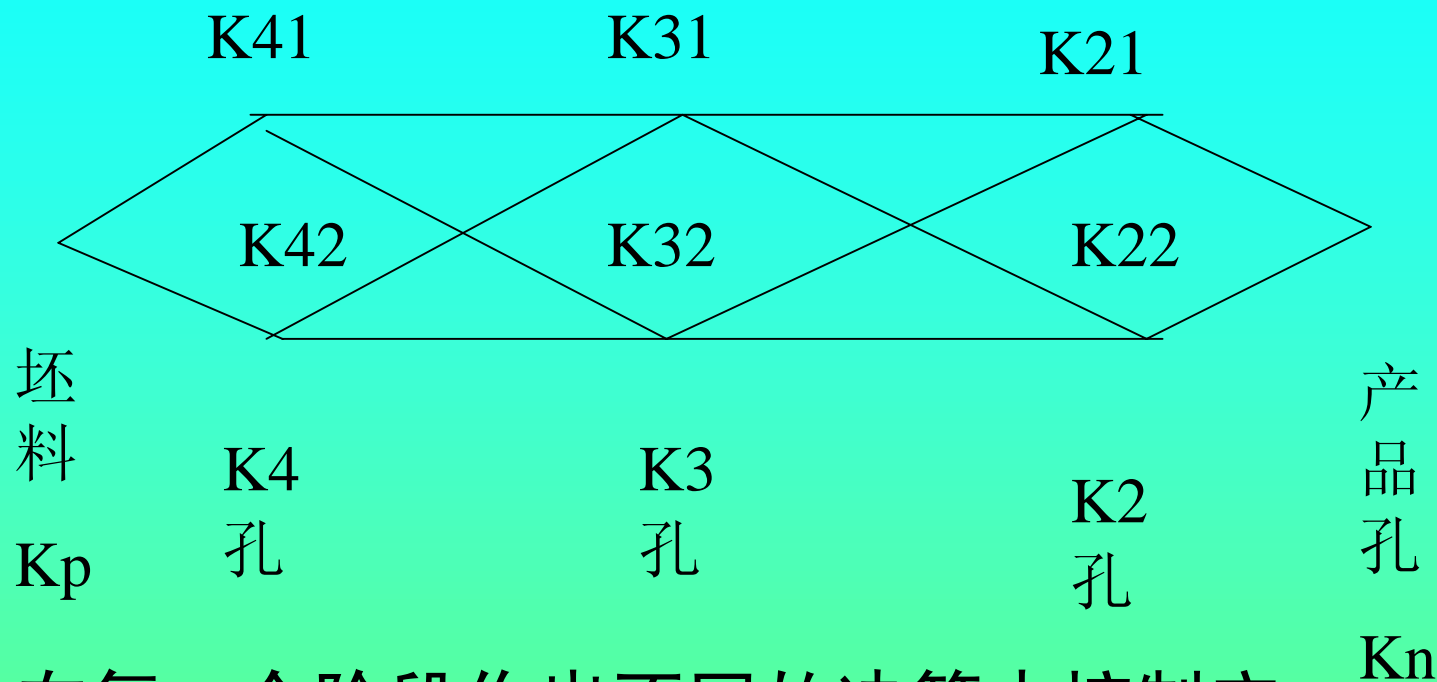
- 将此原理用于最短路线问题时可叙述为：一条路线如果是最短路线，则对该线上的任何一点来说，最短路线以此点为**起点**的其余部分，仍然是从此点到**终点**的最短路线，不具有这种性质的路线，必然不是最短路线。
- 因此根据这点，我们可以对过程的各个阶段，**一个阶段一个阶段、一个点一个点地检查**，每个阶段只保留那些可能成为最短路线上的点线而丢掉其它不符合上述性质的点线，这样的寻找过程就是逐段检查、逐段过虑的**动态过程**。

- 为了说明这些概念和原理，举一实例
- 延伸系数分配问题
- 某轧机轧制某种规格的圆钢，在孔型系统选定的前提下，各个孔型的延伸系数可以在一定范围内波动，即各个孔型的尺寸可以有波动，孔型尺寸变化可影响相邻道次的能耗。
- 我们希望找到一种轧制方案，从坯料  成品轧制能耗最小。
- 例如： $K_{ij}$ 表示各个尺寸不同的孔型， $i$ 表示道次数， $j$ 表示尺寸方案，相应两点的连线上的数字表示假设的轧制能耗。
- 我们可以把这种最小能耗问题中所考虑的过程分为若干阶段。


- 从坯料到K4孔作为第一段，依此类推，这是一个五阶段过程。每一段开始我们都面临作出决策：在几条不同的路线中选择哪条路，即这一段路的终点选在哪一点上？这些决策不同，所走路线就不同。



- 图 用不同轧制方案轧制时的假设能耗示意图



在每一个阶段作出不同的决策去控制它的发展过程，这就是过程最优化的一种。


- 过程最优化问题，可以用动态规划法的方法求解。
- 上述例题最小能耗问题可以用最直观的**穷举法**求解。
- 从坯料  成品共有八种不同的轧制方案，对于每一种方案，将各段的轧制能耗相加，就得到相应的目标函数（总轧制能耗）如下：
 

方案	轧制能耗
① $K_p - K_{41} - K_{31} - K_{21} - K_{11}$	$44 + 46 + 41 + 39 = 170$

- | 方案                                  | 轧制能耗              |
|-------------------------------------|-------------------|
| ② $K_p-K_{41}-K_{31}-K_{22}-K_{11}$ | $44+46+43+40=173$ |
| ③ $K_p-K_{41}-K_{32}-K_{21}-K_{11}$ | $44+46+43+39=171$ |
| ④ $K_p-K_{41}-K_{32}-K_{22}-K_{11}$ | $44+46+44+40=174$ |
| ⑤ $K_p-K_{42}-K_{31}-K_{21}-K_{11}$ | $45+44+41+39=169$ |
| ⑥ $K_p-K_{42}-K_{31}-K_{22}-K_{11}$ | $45+44+43+40=172$ |
| ⑦ $K_p-K_{42}-K_{32}-K_{21}-K_{11}$ | $45+44+42+39=171$ |
| ⑧ $K_p-K_{42}-K_{32}-K_{22}-K_{11}$ | $45+44+44+40=174$ |
- 比较上述八种不同轧制方案的目标函数值，选出目标函数值最小的方案，就是最优方案。  
最优方案为：
- |                                     |                   |
|-------------------------------------|-------------------|
| • $K_p-K_{42}-K_{31}-K_{21}-K_{11}$ | $45+44+41+39=169$ |
|-------------------------------------|-------------------|

- 可以看出，当段数很多，各段选择路线很多时，这种穷举法的计算量是很大的，甚至在计算机上也实现不了。
- 因此，采用动态规划法寻找最优轧制方案。动态规划一般是从过程的最后一个阶段开始计算，即最优决策是逆序决定过程。
- 第一步：看最后一个阶段，即从成品前孔至成品孔。由 $K_{21}$ 孔至 $K_{11}$ 孔只有一种选择，即 $K_{21} \longrightarrow K_{11}$ ，能耗为39，而由 $K_{22}$ 孔轧出成品也只有一种选择，即 $K_{22} \longrightarrow K_{11}$ ，能耗为40。

- 故：
- 从 $K_{21}$ 轧成 $K_{11}$ 的最小能耗为： $f_4(K_{21})=39$
- 从 $K_{22}$ 轧成 $K_{11}$ 的最小能耗为： $f_4(K_{22})=40$
- 第二步：看倒数第二段，即从 $K_3$ 孔至 $K_2$ 孔。
- $K_3$ 孔可以有两种不同的孔型尺寸 $K_{31}$ 和 $K_{32}$ ，
- 先看 $K_{31}$ ，现在尚不知道使用哪一个是最优方案。
- 如果采用 $K_{31}$ 为最佳方案，则最佳方案必须是以 $K_{31}$ 孔轧出的轧件为坯料轧出成品，由 $K_{31}$ 可以轧出 $K_{21}$ 也可以轧出 $K_{22}$ ，则采用 $K_{31}$ 孔时，有两种方案可以选择。
- 选用 $K_{21}$ ，则由 $K_{31}$ 轧出成品的能耗为：

- $d(K_{31}, K_{21}) + f_4(K_{21})$ ; 如选 $K_{22}$  用 $K_{31}$  轧出成品的能耗为 $d(K_{31}, K_{22}) + f_4(K_{22})$ ,  找出二种方案中能耗最小的作为由 $K_{31}$ 孔轧出成品的最小能耗 $f_3(K_{31})$ , 即:

- $f_3(K_{31}) = \min \begin{cases} d(K_{31}, K_{21}) + f_4(K_{21}) \\ d(K_{31}, K_{22}) + f_4(K_{22}) \end{cases}$

- $= \min\{42+39=80$

- $\{43+40$

- 即若 $K_{31}$ 从开轧, 则 $K_{31} - K_{21} - K_{11}$ 为最优轧制方案。

- $f_3(K_{32}) = \min \begin{cases} \rightarrow d(K_{32}, K_{21}) + f_4(K_{21}) \\ \rightarrow d(K_{32}, K_{22}) + f_4(K_{22}) \end{cases}$
- $= \min \{ 42 + 39 = 82$
- $\quad \quad \quad \{ 44 + 40$
- 若从 $K_{32}$ 从开轧, 则 $K_{32} - K_{21} - K_{11}$ 为最优轧制方案。
- 第三步: 看倒数第三阶段, 即第二阶段。可以从 $K_{41}$ 孔或 $K_{42}$ 孔开轧。
- 与前述同理可求得:

- $f_2(K_{41}) = \min \begin{cases} \rightarrow d(K_{41}, K_{31}) + f_3(K_{31}) \\ \rightarrow d(K_{41}, K_{32}) + f_3(K_{32}) \end{cases}$
- $= \min\{46+80\} = 126$
- $\{46+82\}$

- $f_2(K_{42}) = \min \begin{cases} \rightarrow d(K_{42}, K_{31}) + f_3(K_{31}) \\ \rightarrow d(K_{42}, K_{32}) + f_3(K_{32}) \end{cases}$
- $= \min\{44+80\} = 124$
- $\{46+82\}$

- 第四步：看第一阶段的情况，起点只有一个 $K_p$



- 与上述同理，可求得：

- $f_1(K_P) = \min \begin{cases} d(K_P, K_{41}) + f_2(K_{41}) \\ d(K_P, K_{42}) + f_2(K_{42}) \end{cases}$

- $= \min \{ 124 + 44 \} = 169$

- $\{ 124 + 45 \}$

- 这样，最后求得最优方案为： $K_P - K_{42} - K_{31} - K_{21} - K_{11}$

- 动态规划法，它就是过程的几个阶段分为几步，技术计算的方法与过程本身的

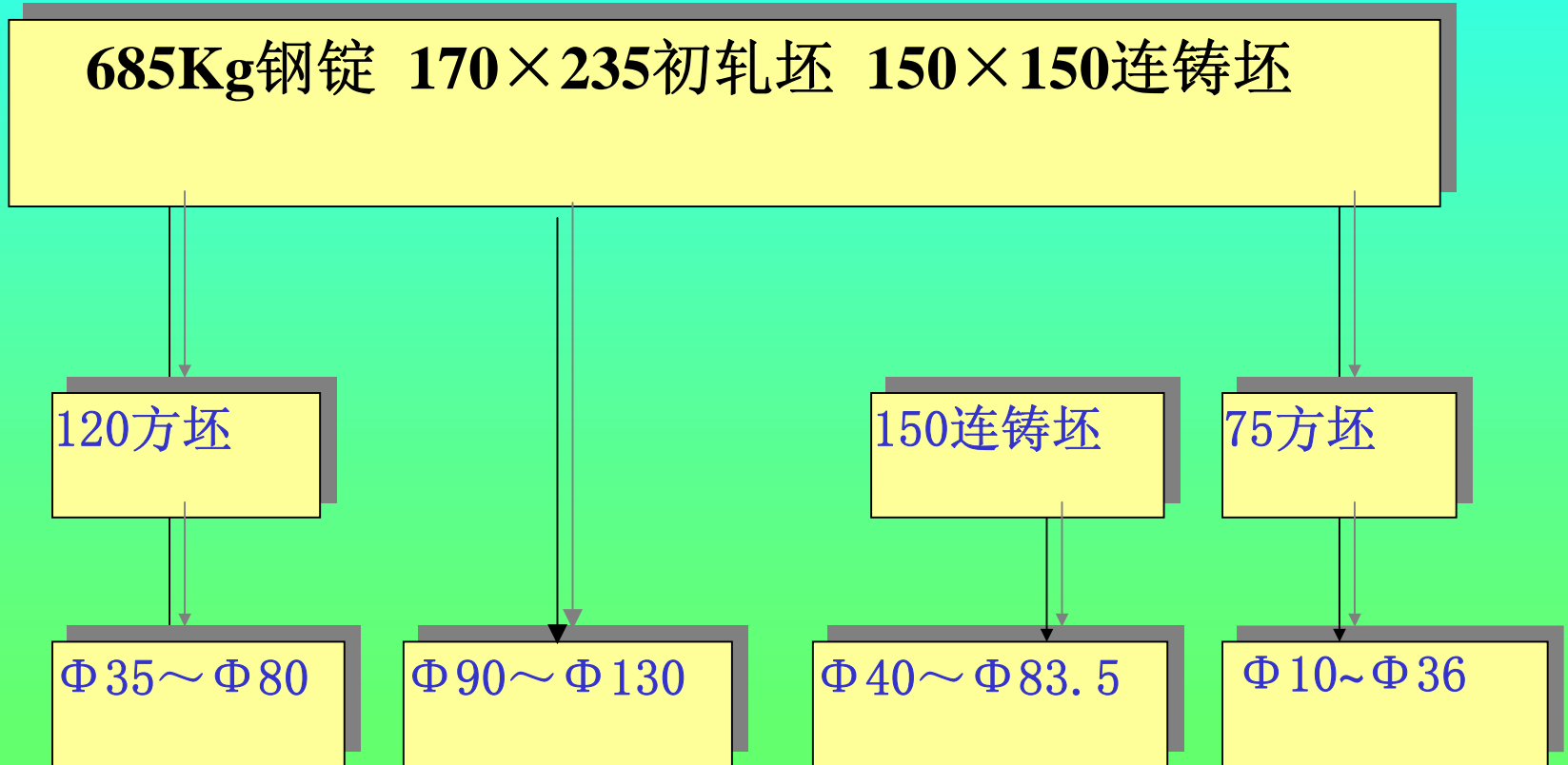
- 走向相反，即从最后一步开始计算到第一步。每一步都作出决策，即每一步都要决定最优方案。计算下一步时要利用上一步的计算结果，故称为迭代法。
- 动态规划法与穷举法相比，其优点如下：
- (A) 可减少计算工作量。如上例中，若用穷举法求解，共有8种可能的方案，每种方案要相加3次，共需要24次，而动态规划法则需要相加10次。
- (B) 丰富了计算结果 如上例中，用动态规划法计算，不仅得到从坯料至产品的最优轧制方案及其相应距离，而且得到从各中间孔开轧

- 至成品的最优轧制方案及其能耗。

- 原料—成品系统规划的特点分析

- 原料—成品系统以其多阶段，多分枝，多因素及多种因素交叉影响为特点，具有难以避免的人为因素和客观因素的影响。这主要表现在以下几个方面：
  - (1) 多阶段，多分枝
- 轧钢系统产品种类多，批量大，上下工厂（车间）之间有着紧密的制约关系。

- 以供料关系来说，一种钢锭  $\longrightarrow$  数种规格的钢坯  $\longrightarrow$  生产数种钢材，形成由钢锭至钢材的树枝状多阶段，多分枝的金属流程图，如图。



- (2) 存在着较大的尺寸波动和重量波动
- 钢锭的重量受到锭模尺寸公差、浇铸高度、注速等因素的影响，导致了各个钢锭之间重量的差异。
- 钢坯的单重受到其三维尺寸的影响。
- 钢坯断面受轧制温度、孔型磨损、轧辊弹跳等因素的影响，钢坯轧后长度受到轧材断面和来料重量的影响。轧件轧后长度影响钢坯剪切方案。
- 由此可见，原料—成品系统的生产规划（剪切）必须考虑各种因素波动的影响，这给优化带来很大困难。

- (3) 需要考虑金属消耗
- 轧钢生产中金属消耗主要由以下几部分组成：
  - ① 烧损：钢锭均热、钢坯加热过程的烧损，轧制中形成的二次氧化铁皮。
  - ② 切头尾：钢锭轧后为保证产品质量需一定量的切头尾。
  - ③ 清理：由于钢锭和钢坯外部质量缺陷、拉裂、疤痕等，需要火焰清理。
  - ④ 轧废和检废：生产中由于设备事故，轧件温度等因素不利于轧制进行时形成轧废。生产出的产品不符合产品标准而造成检废。

- 在系统规划中，一般仅考虑烧损和切头尾的影响。
- (4) 需要考虑设备条件和工厂平面布置的限制
- 在设备条件和工厂平面布置一定的情况下，规划后的结果必须适应设备条件和工厂平面布置。
- 锭重的大小受初轧机能力的限制。
- 钢坯轧后成品长度受车间平面布置限制。
- 坯料长度受加热炉长度的限制等。



- 由于**原料—成品系统规划**的种种特点，利用人工计算和凭经验已不可能得到最优解。利用试错法，还会造成极大的人力、财力、物力的浪费，这就需要寻找一种合适的优化方法。
- 在轧钢领域锭—坯—材系统剪切规划中，由于问题的复杂性，可以将实际生产中具有启发性的知识同线性规划相结合，建立符合要求的目标函数，求出最优剪切方案。

- 锭-坯-材系统优化

- 问题：当钢材要求按定尺交货时，由于坯料长度与成品之间的配合选择不当，常会造成剩余切损或欠定尺。

- ▲目标函数的确定原则

- 锭-坯-材系统的剪切优化中，最优指标可以是以下三种：

- （1）系统成材率最高
- （2）成品定尺率最高
- （3）成材率和定尺率皆达到一定的最佳值

## 最小切损为目标

$$Q=L_0-\sum K_i L_i \rightarrow \min$$

该函数可以满足各种对定尺率和成材率重视程度不同的钢材对应的锭-坯-材系统规划的要求。

### ● ▲ 求解问题的描述

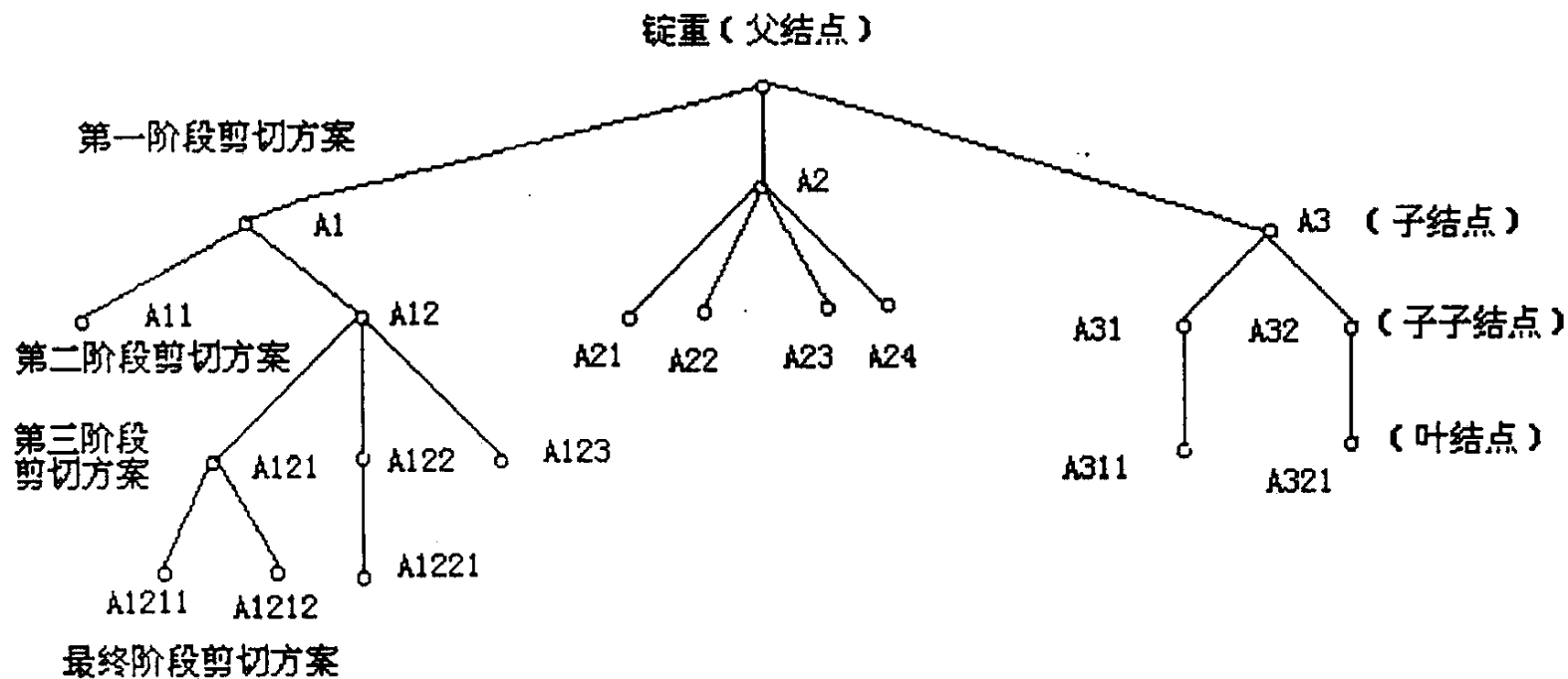


图4-1 剪切方案寻优的多级生成树

- 多阶段最优剪切问题，选择钢锭—开坯和开坯—成材的两阶段剪切组成。
- 在剪切方法上，选择“成倍数的剪切方法”，即各坯料剪切后应保证成品的长度是定尺的整数倍，而不留切余。
- ▲启发式优化算法的求解

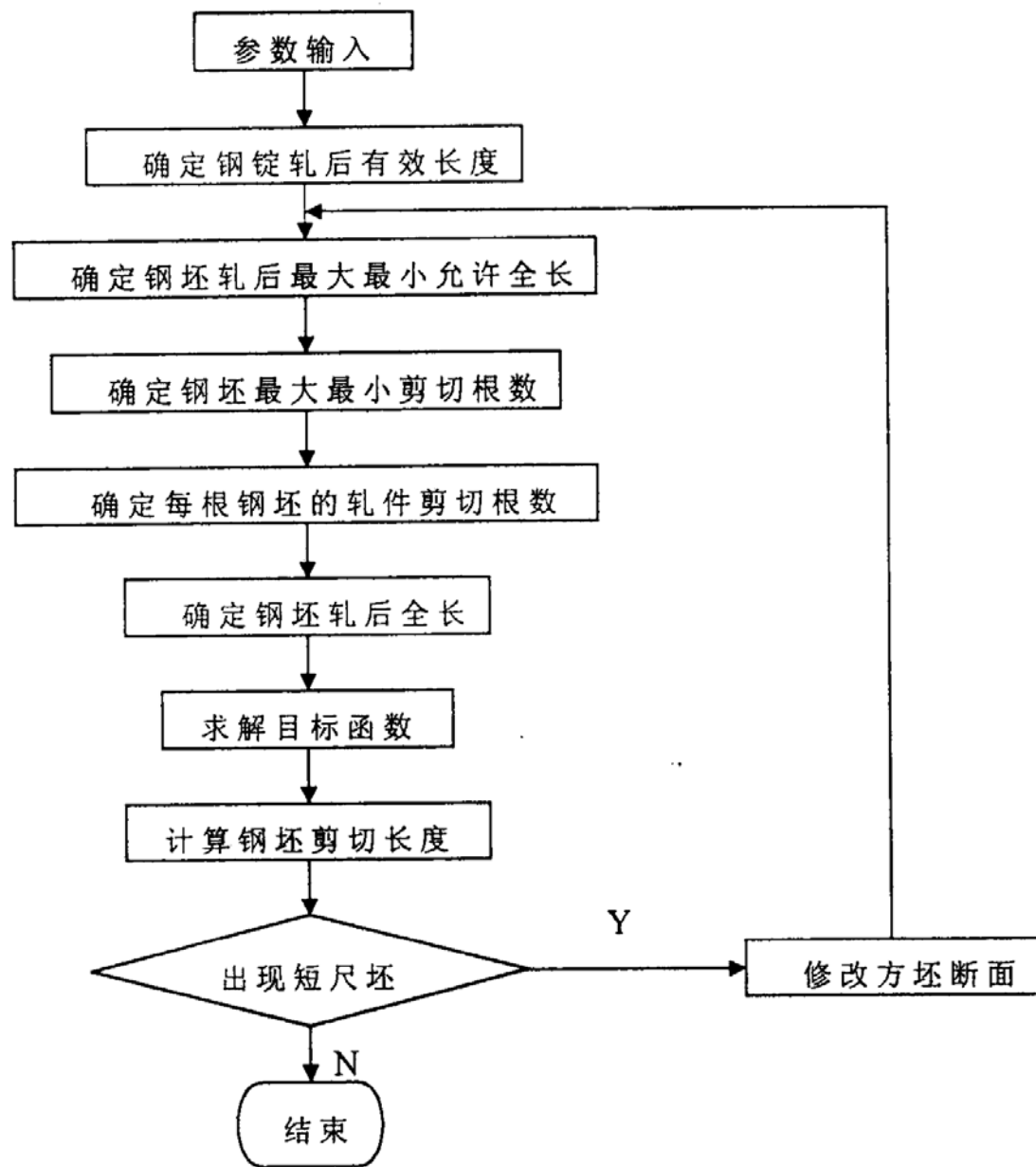


图 4-2 锭—坯—材全程剪切优化计算流程图

- 1. 钢锭轧后钢材有效长度的确定:

- (1) 钢锭轧后钢材有效长度 $L_0$ 的确定

在本系统中，钢锭轧后钢材的有效长度可由下式确定

$$L_0 = [G_0(1-k_1) - q_k](1-k_2) / g_c$$

式中  $G_0$ —钢锭原始重量;

$k_1$ 、 $k_2$ —开坯、成材烧损率，%;

$q_k$ —钢锭开坯后的切头切尾重量;

$g_c$ —成品轧件每米单重。

- 2. 钢坯轧后允许长度的确定:
- 考虑加热炉允许的坯料长度; 冷床长度

$$l_{cmin} = \mu \cdot l_{pmin} \quad (2)$$

$$l_{cmax} = \mu \cdot l_{pmax} \quad d > \phi 36\text{mm} \quad (3)$$

$$l_{cmax} = \min(\mu \cdot l_{pmax}, l_c) \quad d \leq \phi 36\text{mm} \quad (4)$$

$$\mu = g_p(1 - k_2) / g_c \quad (5)$$

式中  $\mu$ —坯到材的总延伸系数;

$l_{cmax}$ 、 $l_{cmin}$ —钢坯轧后钢材的最大、最小允许全长;

$l_{pmax}$ 、 $l_{pmin}$ —成材车间加热炉允许的最大、最小坯料长度;

$l_c$ —小型车间圆钢的冷床长度;

$g_p$ 、 $g_c$ —钢坯、钢材单重, t/m。

### • 3. 每根坯的成品剪切根数的确定:

$$\text{定尺定货时} \quad l = l_0 + \Delta l + \Delta \quad (6)$$

$$\text{范围定货时} \quad l = l_{\min} + \Delta l + \Delta \quad (7)$$

$$\text{倍率定货时} \quad l = (\text{int} [dl_{\min} / l_b] + 1) l_b + \Delta l + \Delta + \Delta \Delta \quad (8)$$

式中  $l_0$ —定尺定货长度;

$l_{\min}$ —范围定货最小长度;

$dl_{\min}$ —定尺机允许最小长度;

$l_b$ —倍率 (含锯缝);

$\Delta l$ —搜索步长

定尺定货时  $\Delta l \in [0, \text{定货公差}]$

范围定货时  $\Delta l \in [0, (l_{\max} + \text{定货公差} - l_{\min})]$

倍率定货时  $\Delta l \in [0, bl, (dl_{\max} + \text{定货公差} - (\text{int} [dl_{\min} / l_b] + 1) l_b)]$

$\Delta$ —剪切公差;



- 将钢坯轧后最小、最大允许全长除以轧件剪切长度后再取整，可得到每根坯的成品材最小、最大剪切根数：

$$n_1 = \text{int}[l_{c\min} / l] + 1 \quad (9)$$

$$n_2 = \text{int}[l_{c\max} / l] \quad (10)$$

- 4. 单根钢坯轧后全长的确定：

#### ① 单根钢坯轧后全长 $L_i$ 的确定

由轧件剪切长度和根数的乘积并考虑工艺所必须的切头切尾长  $l_k$ ，可确定不同剪切根数下钢坯轧后的全长，各长度之间相差一个剪切长度。

$$L_i = (n_2 - i + 1) l + l_k$$

$$i \in [1, (n_2 - n_1 + 1)]$$

式中  $l_k$ —成品轧件切头切尾长度。

## • 5. 目标函数及约束条件:

### ⑤ 目标函数及约束条件

目标函数：钢锭轧后有效长度切余最小：

$$Q=L_0-\sum_{i=1}^{n_2-n_1+1}K_iL_i \rightarrow \min \quad (11)$$

约束条件：成品轧件剪切总长度不超过钢锭轧后有效全长：

$$\sum_{i=1}^{n_2-n_1+1}K_iL_i \leq L_0 \quad (12)$$

式中  $K_i$  — 每根钢锭的钢坯剪切根数；

$n_2-n_1+1$ — 坯料长度种类。

系统采用启发式搜索解此线性规划。对于每种成品规格，如果坯料长度在 2 种以上，考虑到坯料的存放和开坯车间剪切的实现，系统虽对所有可能的坯料长度都进行组合寻优，但最多给只给出 2 个切余最小的坯料长度的组合，也可视用户要求只采用一种长度的坯料。

## • 6. 钢坯长度的计算

### ⑥ 钢坯长度 $L_{pi}$ 的计算

求出最佳钢坯轧后全长后，考虑烧损，按体积不变定律可求得钢坯剪切长度：

$$L_{pi} = L_i / \mu$$

## • 7. 补充过滤计算：

### ⑦ 补偿过滤计算

从理论上讲，按照（9）式确定的成品轧件剪切根数，已包含所有可能的剪切根数，但因对剪切根数的作了取整处理，可能会出现由目标函数求出的切余长度小于成品剪切根数  $n_1$  所对应的钢坯轧后最小全长，而大于加热炉最短长度所对应的钢坯轧后全长（ $l_{cmin} < Q < l_{min}[L_i]$ ）的情况。所以，上述优化计算还必须考虑这一因素，形成补偿过滤模块。这种情况无法用公式确定，只能在搜索中遇到，所以称其为“补偿过滤”模块。

- 8. 定义允许最大切余长度：50mm剩余切损
- 9. 分化切余，修正方坯断面，形成实用剪切方案

优化计算后最小切余有以下 4 种情况，可相应采用不同的处理方法。

其一，切余总长度大于成品轧件剪切长度，小于钢坯轧后允许最小全长：

$$l < Q_{\min} < l_{e\min}$$

由于此时切余太大，但又小于钢坯轧后最小允许全长，出现坯料长度小于加热炉允许最小坯长的短尺坯。如果按此方案剪切，浪费太大或出现短尺坯不宜装炉。因此，首先拒绝此方案，然后启动修正模块修正钢坯断面尺寸，以获得合理的剪切方案。

其二，切余长度小于成品轧件剪切长度，但切余相对较大，足以将其均分到每根坯料上，使坯料长度加长，但如果坯料长度已达到最大值，则保持原方案不变。

4. 3. 3. 3. 第四类

其三，切余长度小于成品轧件剪切长度，但切余量很小，不足以将其均分到每根坯料上，则保持原方案不变。

其四，切余长度小于成品剪切根数  $n_1$  所对应的钢坯轧后最小全长，但相对也较大，只是此剪切方案是通过补偿过滤计算得到的，此时的剪切钢坯由数根长坯和 1 根短坯组成，切余完全是由这根短坯产生的。因此，尽管有时切余较大，但也不能等分给其它坯料；否则，此短坯将小于加热炉允许的最小坯长。

# • 计算结果:

## 6.2.1 某厂基本工艺参数

某特钢厂的供料关系如图 2-1 所示。该生产系统的基本数据如下:

### 1) 钢锭、钢坯

表 6-1 钢锭及钢坯的基本参数

钢锭 kg	钢坯规格 mm	切头 mm	切尾 mm	剪切段数	定尺长度 mm	单坯理论重量 kg
685	120×120	500	100	2	2700	300
	75×75	2150	250	7	2000	85

2) 连铸坯规格:  $150 \times 150 \times 2400 \sim 2800\text{mm}$

### 3) 各轧钢车间的工艺条件

- ① 开坯车间 550 轧机辊道至大剪: 22m;
- ② 中型车间钢坯加热炉允许长度: 2.4~2.8m, 冷床长度 7m;
- ③ 小型车间钢坯加热炉允许长度: 1.75~2.2m;

- ④ 小型车间 1#冷床
  - ⑤ 长度 67m，冷却钢材的最大直径为  $\phi 26$ ；2#冷床长度为 13m，冷却钢材的最大直径为  $\phi 40$ ；
  - ⑥ 小型车间的长围盘带有夹送辊；
  - ⑦ 锭一坯烧损率：1.5%；坯一材烧损率：1.5~2.0%；
- 4) 钢材剪切公差：0~50mm，成品轧件切头切尾长：100mm。

### 6.2.2 锭—坯—材系统仿真结果分析

以某厂 2000 年 6 月生产的  $\phi 40$  锚链钢为例，基本参数见表 6-2 至表 6-4。

表 6-2

理论锭重	切头	切尾	烧损	理论收得率
685kg	9.5%	1.5%	1.5%	87.5%

表 6-3

钢坯规格 mm	单重 g/m	定尺 m	定尺允许 偏差 mm	边长允许 偏差 mm	烧损 %	范围尺 m
120×120	110.34	2.7	40	+3.5, -2	1.5	2.4~2.8

表 6-4

钢材 mm	单重 kg/m	倍率 mm	根数	齐头 mm	定尺长度 mm
$\phi 40$	9.865	490	12	70	5950

$\phi 40$  锚链钢实际生产情况、理论计算值及仿真统计结果见表 6-5。

表 6-5  $\phi 40$  锚链钢生产定尺率、成材率对比 %

	锭-坯 成坯率	坯-材 成材率	锭-材 成材率	钢材 定尺率	钢锭 定尺率
实际生产	87.26	>94.36	>82.51	>93	95.68
仿真统计值	87.12	94.45	82.88	96.12	100
理论值	87.5	95.43	82.92	100	100



