

轧制计算机辅助工程

中国金属学会

冶金继续工程教育丛书

冶金工业出版社

董德元 鹿守理 赵以相 编著

冶金继续工程教育丛书

轧制计算机辅助工程

董德元 鹿守理 赵以相 编著

冶金工业出版社

1991年

(京) 新登字036号

内 容 简 介

本书为“冶金继续工程教育丛书”之一。书中对近几年发展起来的计算机辅助工程(CAE)在轧制中的应用做了比较详尽系统的介绍。全书包括14章,分为3个部分。第1章即是第1部分,为塑性加工计算机辅助工程概论;第2—6章组成第2部分,为工程规划及设计;第7—14章组成第3部分,为过程模拟及检验,其中第7—9章为物理模拟,第10—14章为数学模拟。

本书可供从事轧制和其他塑性加工专业研究、生产、设计的科技人员学习和参考,也可作为大专院校有关专业师生的教学参考书。

冶金继续工程教育丛书

轧制计算机辅助工程

董德元 鹿守理 赵以相 编著

*

冶金工业出版社出版发行

(北京北海沿大街嵩祝院北巷33号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/32 印张12 3/4 字数290千字

1992年3月第一版 1992年3月第一次印刷

印数00,001~4,500册

ISBN 7-5024-0938-6

TG·134 定价9.60元

序

中国金属学会组织编写了“冶金继续工程教育丛书”，为大家办了一件好事。积极开展继续教育，对于提高冶金科技人员水平，促进冶金工业的发展具有重要意义。希望冶金战线各级领导重视这项工作，努力创造条件，为科技人员在职学习提供方便；同时也殷切希望广大冶金科技工作者坚持学习，不断吸收新知识，学习新技术，为实现四化、振兴中华做出更大贡献。

中国继续工程教育协会理事

冶金工业部副部长

徐大铨

一九八八年十二月

前 言

本书是根据中国金属学会“冶金继续工程教育丛书”出版计划和要求而编写的塑性加工专业教材之一。在吸收国内外最新成果和意见的基础上,书中探讨性地建立了塑性加工计算机辅助工程的体系雏形,其中包括目标、定义、内容及功能、原理及方法等。编写本书的主要目的是力图满足工程技术人员及领导用“模拟法”来代替或补充“试凑法”方面的要求。塑性加工计算机辅助工程是在计算机辅助下能进行工程计算机决策的网络系统,在这个网络中包含有规划、设计、模拟和检验4种内容及功能。以优化理论、相似理论和数值方法为基础,综合成优化分析、物理模拟和数学模拟三种主要方法。

全书由3部分组成,共分14章。第1部分,即第1章塑性加工计算机辅助工程概论,探讨了塑性加工CAE有关内容、方法及体系问题。第2部分由第2—6章组成,其内容为工程规划及设计,主要介绍了优化方法及其应用。第3部分由7—14章组成,其内容是过程模拟及检验,主要讲解了物理模拟和数学模拟,其中7、8、9章是物理模拟,10—14章是数学模拟。在物理模拟中介绍了相似理论,在数学模拟中讲述了数学模型建立、运筹学思路及数值方法。

本书是自学入门教材,采用了功能、方法和理论相互结合的方法编写。对有关学科理论,尽力深入浅出地进行阐述,以期把它们与塑性加工实际问题结合起来,在较坚实的理论基础上体现了实用性。

本书概论由作者集体编写;2—6章由赵以相、7—9章由鹿守理、10—14章由董德元编写。

在编写过程中，贺毓辛教授对初稿提出了许多中肯的、具体的修改意见，乔端教授对数学模拟部分进行了评阅，德国阿亨大学R.科普（Kopp）教授通过研究合作提供了许多很好的建议和宝贵资料，在此对他们表示衷心的感谢。康永林、张珂、朱有利、龚永平为部分章节提供了资料，并在编写过程中给予了大力协助，在此对他们深表谢意。感谢为我们提供建议和资料的国内外同行以及协助我们完成此项工作的老师和研究生。

由于作者业务水平所限，书中可能会有很多不妥之处，希望读者给予批评指正。

1991年1月，于北京科技大学

目 录

序

前言

1 塑性加工计算机辅助工程概论	1
1.1 塑性加工CAE发展简史	2
1.2 CAE定义及其组成	5
1.3 CAE的主要方法	7
参考文献	9
2 系统科学与最优化方法	10
2.1 系统科学的基本概念	10
2.2 塑性加工系统工程的特点	13
2.3 系统分析的一般步骤	16
2.4 塑性加工的评价指标	18
2.5 最优化方法的应用和分类	19
2.6 数学预备知识	27
参考文献	34
3 生产管理中的线性规划方法	35
3.1 生产管理问题	35
3.2 线性规划的标准形式	40
3.3 线性规划问题的解法	41
3.4 应用结果	48
参考文献	49
4 工艺制度制订中的非线性规划方法	51
4.1 工艺制度制订问题	51
4.2 无约束最优化方法	57
4.3 约束最优化方法	76
参考文献	90

6 设备参数设计中的多目标规划方法	91
5.1 设备参数设计问题	91
5.2 评价函数法	95
5.3 应用结果	103
参考文献	106
6 连轧机节能中的动态规划方法	107
6.1 最短路程问题	107
6.2 动态规划的基本概念	114
6.3 最优化原理	119
6.4 动态规划方程	120
6.5 连轧机节能的应用实例	123
参考文献	130
7 物理模拟的理论基础	131
7.1 基本概念	133
7.2 相似三定理	137
7.3 相似准数的导出方法	145
参考文献	170
8 塑性加工过程的物理模拟	171
8.1 塑性加工过程的相似条件	171
8.2 轧制过程的物理模拟	182
参考文献	213
9 物理模拟中的试验方法简介	215
9.1 视塑性法	216
9.2 光弹性、光塑性法	220
9.3 云纹法	227
参考文献	228
10 塑性加工数学模拟入门	230
10.1 塑性加工数学模拟概述	230
10.2 数学模拟的数学模型问题	233
10.3 塑性加工的数值方法问题	244

10.4	滑移线法评述	253
10.5	上限法评述及上限单元法	260
10.6	能量法简述	273
10.7	有限元法 (FEM) 简介	288
10.8	影响函数法	289
	参考文献	290
11	工艺规程制订的数学模拟	292
11.1	问题定义及目标函数的建立	293
11.2	数学模型的选定	297
11.3	工艺规程优化	310
	参考文献	314
12	CARD软件的数学模拟	316
12.1	高速线材孔型问题的定义及目标函数	316
12.2	轧制过程数学模型的选定	321
12.3	孔型设计方法及优化	329
12.4	CARD软件系统	332
	参考文献	337
13	影响函数法及板厚差数学模拟	338
13.1	影响函数法的简要说明	338
13.2	影响函数矩阵算法程序框图	348
13.3	板形预报实例	352
13.4	计算附录	357
	参考文献	368
14	有限元法及碳化物破碎分析	369
14.1	有限元法的简要说明	369
14.2	CAE模拟预报产品质量的基本途径	378
14.3	应力、应变的刚塑性有限元分析	381
	参考文献	396

塑性加工计算机辅助工程概论

随着科学技术的发展，在解决塑性加工工业中重大技术问题时，人们已经逐渐抛弃了经验直觉法，并较广泛地使用了试凑（错）法（Trial and Error Method）。例如，为了设计建造一个大型设备，先制造一台小型的，根据观测和检测的结果，再制造一台中型的，然后再建造一台大型的。在大型设备试生产一段时间后，再进行必要的修改。从冲压模具的设计、质量控制、生产线的建设到大型生产基地的决策等，多数都采用了这种方法。沿用经验直觉法进行决策而造成重大失误的风险是很大的。这种例证很多。由经验直觉法向试凑法的转化在观念和方法上都是一个重大进步。

现代化的塑性加工工业，特别是轧制生产，是一个由冶金、机械、电气、自动控制和其它设施组成的高效率、高精良的化学冶金、物理冶金、机械加工等综合的生产系统，而且工艺和设备又不断革新。人们发现，只是用试凑法已不能满足要求。例如，异型断面轧制孔型和复杂形状的冲压模具的设计和反复修改是一个很耗时费力的工作；一种产品的质量控制在连铸、连轧到成品生产线的协调性等都将受到众多随机因素的影响，人们很难作出正确的决策；连续、高速生产过程中，各因素之间的制约关系，也难进行检测和判

断；有时，小型设备并不能反映大型设备的问题，如用窄带钢难以模拟宽带钢的板型问题，用小锻件也难以模拟大型锻件的内部组织变化情况，等等。

近年来，人们设法提出一种新的观念和方法。这种方法应做到，在处理上述复杂技术问题时，在试验、制造、试生产之前，借助计算机辅助功能，对诸如规划、试验、设计等重大决策性问题提出预报性结论。它可以解决试凑法的耗时费力问题、因素众多难以决策的问题和克服不能进行试验的困难。这种方法我们称之为塑性加工的计算机辅助工程^[6]，简称塑性加工CAE (Computer Aided Engineering)。

由试凑法逐步过渡到CAE，对塑性加工来讲是一个重要进步，它必将促进科学技术的发展，而且也会带来巨大的经济效益。

本章首先简要说明CA (计算机辅助) 功能、CAE历史。然后，给出CAE的定义及其功能，并简要地介绍CAE处理问题的主要思路及程序。希望通过上述介绍，能把从其它学科引进来的优化、物理模拟、数值模拟等内容联系起来，形成一个CAE的整体概念。

1.1 塑性加工CAE发展简史

1.1.1 CA功能

计算机的应用是当前技术进步的重要标志之一。近年来计算机在各领域中的应用促进了科学技术和国民经济的飞速发展，可以预见今后的科技进步将更加依靠计算机的应用。

随着计算机的广泛应用，出现了众多的计算机辅助功能，它们构成了计算机应用的一个重要方面。从塑性加工角度来看，可以列出下列几种重要的CA功能^[6]。

CAD Computer Aided Design	计算机辅助设计
(Computer Aided Drafting)	
CAP Computer Aided Planning	计算机辅助规划
CAM Computer Aided	
Manufacturing	计算机辅助制造
CAQ Computer Aided Quality	
Control	计算机辅助质量控制
CAS Computer Aided Service	计算机辅助服务
CIM Computer Integrated	
Manufacturing	计算机集成制造
CAE Computer Aided	
Engineering	计算机辅助工程

1.1.2 塑性加工CAE的发展

目前文献对CAE介绍尚不多。人们认为CAE是在CAD（计算机辅助设计）的基础上发展而来的。早在50年代初期，美国通用汽车公司即开始尝试把计算机图形处理（Computer Graphics）功能应用于机械设计工作。60年代初期，美国麻省理工学院（MIT）首次提出CAD概念。到了60年代后期，商用CAD系统开始问世，并相继在汽车工业、航空工业、武器制造和工程设计等产业中得到实际应用，进而导致了CAD/CAM系统的开发期。

70年代，计算机技术迅速普及，随着计算机功能价格比的提高和三维CAD的出现，在工业发达国家，如美国、日本、德国等国，人们试图将CAD从绘图范围扩展到设计范围，并且利用计算机的其它辅助功能进行工程规划、设计以及过程模拟、产品检验的设想开始流行起来。

80年代，PC（过程控制）机Auto CAD（自动CAD）商用程序包诞生。由于Auto CAD具有很大的可扩充性，所

以它适合于各专业的开发利用。CAE作为计算机系统网络在工业生产中应用取得实际效果。这项新的工程技术代替了传统的经验直觉法和试凑法，大大地缩短了设计研究周期，节省了大量人力、物力和资金。

近年来，塑性加工理论、数值方法、优化技术和运筹学的发展^[5,8]，为将塑性加工中复杂问题进行综合分析规划或进行过程模拟提供了基础。在此基础上借助CA的各种功能，使塑性加工CAE的形成成为可能。

W.汤普森 (Thompson) 概述了计算机辅助功能的发展历史^[1]，他认为过去生产与检验、规划与调度、设计与绘图三条线是分头前进的。到80年代上述三条线有汇合在一

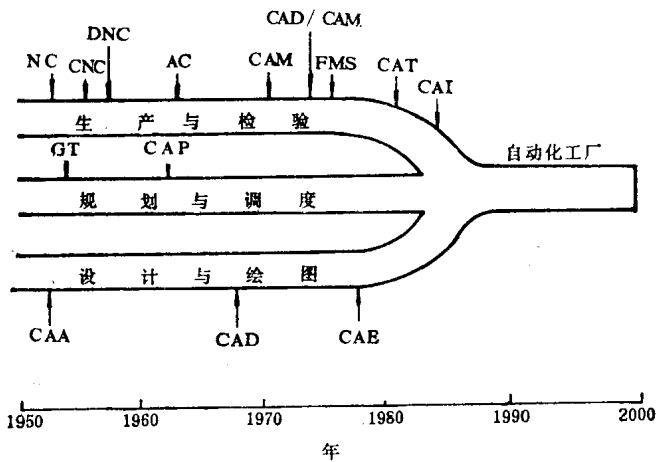


图 1-1 计算机辅助功能进展

- | | |
|--------------|--------------|
| NC—数字控制； | FMS—柔性生产系统； |
| CNC—计算机数字控制； | CAI—计算机模拟输入； |
| CAT—计算机辅助检验； | GT—成组工艺； |
| DNC—动态数字控制； | CAA—计算机辅助分析 |
| AC—自适应控制； | |

起的趋势（图1-1）。

1984年，R.科普（Kopp）教授等人提出CAE应与CAD/CAM工作站联接，并按照三种水平（宏观的、分布的、微观的）对工件、工具和机器进行过程模拟和优化设计^[5]。

我们认为上述三条线汇合在一起的条件就是形成较为完善的CAE。从目前情况看，塑性加工CAE已较成功地解决了下列技术问题。从这些具体技术问题中，就可以看出它在上述三条线汇合中所起的作用。

（a）把几何图形和过程数据从用户的CAD/CAM工作站电传到加工车间的CAD/CAM系统，以减少绘图和三维模型化时间。在计算机屏幕上演示出加工过程中产品的变形参数和性能参数以及任意剖面的分布状况。

（b）用专家知识协助设计者进行工具形状及产品性能的优化设计。

（c）用计算机模拟加速设计进程，减少反复试验次数。

（d）用经济模型软件，为客户报价需要提供迅速而准确的回答。

（e）规划并控制生产过程。

（f）分析成本，适时修正并充实生产数据库。

1.2 CAE定义及其组成

根据CAE的发展及其任务，我们将其定义为：在计算机辅助下能进行工程计算和决策的网络系统（见图1-2），在这个网络中包括有规划、设计、模拟和检验四个部分，由这四部分所组成的CAE可以循环往复，也可独立进行工作。

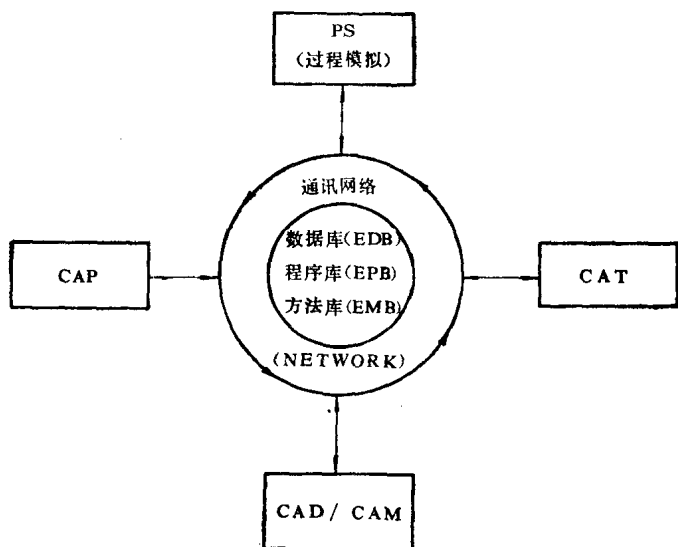


图 1-2 塑性加工CAE的组成

1.2.1 计算机辅助规划 (CAP)

工程规划主要是研究工程计划管理工作和重大技术问题的有关安排和估值问题。一般可归纳为在满足既定要求下，按照一个或多个评价指标来寻求最优方案。

1.2.2 计算机辅助设计 (CAD)

在CAD中有时也包括CAM。从CAP选出的最优方案出发，依照设计规范和约束条件，进行优化设计和制图，所需的大量资料由数据库 (Engineering Data Base)、方法库 (Engineering Method Base) 和程序库 (Engineering Program Base) 以数据通讯方式提供。

1.2.3 过程模拟 (Process Simulation)

过程模拟既是CAE主要功能之一,也是完成其它三种功能的重要手段。模拟是对真实事物的形态、工作规律或信息传递规律在特定条件下的一种相似再现。

重大工程的可行性研究、产品设计和工艺规程制订以及许多劳动组织、经济活动等重大问题多属多输入、多输出、多层次、多阶段的决策问题,过程模拟可以将上述问题超前相似再现,并给出多种可供抉择的结果。

过程模拟对于试凑法来讲,不但在思维上,而且在方法上也是一个质的变化。它有三个特别突出的特点:(a)超前性,它可以在施工、设计、试验、生产之前,超前进行相似再现;(b)综合性,它可以对多输入、多输出、多层次、多阶段的复杂过程进行综合研究,而不是孤立地判断;(c)可行性,目前在塑性理论、数学和计算机发展的情况下,这种模拟是可行的。

1.2.4 计算机辅助检验 (CAT)

它的主要功能是根据过程模拟的结果与标准(包括产品、过程及工程等)对工程规划和设计结果进行评估,并决定如何修改和是否可行。这一功能在解决了计算机过程模拟的基础上是不难实现的。

1.3 CAE的主要方法

完成CAE四种功能的主要方法有三个:物理模拟、数学模拟和最优化分析。

物理模拟是指基本现象相同的模拟。一般情况是指在实

验条件下用缩小的（或放大的）模型来进行现象的研究。模型与原型的所有物量相同、过程的物理本质相同，区别只在于物理量的大小不同。因此，物理模拟也可说成是保持同一物理本质的模拟。

物理模拟可以提供过程的边界条件、本构方程、各种参数及反映，所以，它是为工程规划、设计提供依据、数据或边界条件的主要方法，也是为数学模拟使用的数学模型和边界条件等的建立的主要手段。

物理模拟的主要理论依据是相似理论、它保证了用它所得结果与所研究对象的行为之间的相似性。

数学模拟是对过程进行数学的描述并以数学方法获得过程的环节、路径或结果。它的主要依据是反映过程规律的有关数学模型以及反映特殊要求的过程综合数学模型（目标函数及约束条件）。

数学模拟主要用于工程规划和设计等问题的过程描述及分析、结果显示及检验评估的模拟中，同时也为工程规划及设计、检验提供数据和信息，因而它是非常重要的方法。

数学模拟主要依靠数学模型来进行，因而反映过程规律的塑性力学，特别是近年发展起来的力学中的数值方法起了决定性作用，它保证了工程需要的可靠性和实际应用的可行性。

数学模拟涉及到数学模型的建立、运筹学标准技术的运用和正确使用计算机的能力。

最优化分析是从所有可能方案中选择最合理的一种以达到最优目标。很自然，无论是在数学模拟中还是在物理模拟中都将用到最优化分析。

CAE目前还处于完善和发展阶段，为了使其在塑性加工中得到更广泛和更有效的应用，还要进一步补充和完善其