

分类号\_\_\_\_\_

密级\_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

# 学 位 论 文

## 首钢型材厂计算机辅助孔型设计软件的研究

作 者 姓 名 董 应 全

指导教师姓名 陈晓波 教授 东北大学信息科学与工程学院

潘 燕 高级工程师 首钢型材厂

申请学位级别 硕士 学科类别 工学

学科专业名称 计算机技术

论文提交日期 2004 年 6 月 论文答辩日期 2004.8.29

学位授予日期 \_\_\_\_\_ 答辩委员会主席 井元伟

评阅人 \_\_\_\_\_

东 北 大 学

2004 年 6 月

## 首钢型材厂计算机辅助孔型设计软件的研究

## 摘 要

在未来的一个时期,由于奥运战略的需要,我国尤其是北京建筑钢材市场的竞争将日趋激烈。在这种形势下,钢铁企业要求具有更为灵活的应变能力 and 超强的市场竞争能力,才能够生存发展。对于地处首都的钢铁企业来说,必须在开发新产品,增加新品种,提高产品质量等方面狠下功夫,才能巩固已有市场,打开新的销路,提高市场竞争能力。这些形式对型钢孔型设计工作提出了更高的要求,进一步优化孔型设计,使型钢生产达到优质、高产、低消耗的目标。

首钢型材厂是首钢主要的棒材生产厂,年生产棒材达 150 万吨。作为一个建厂不久的新厂,不断开发市场有潜力的高附加值的产品,扩大生产的品种和规格,缩短开发周期已成为当务之急。本课题的任务是为首钢型材厂研制开发一套棒材连轧孔型计算机辅助设计实用软件,以改变传统的依靠人工设计孔型的状况,实现高效、低成本、优质的工作效果。

本课题在借鉴前人开发 CARD 系统经验的基础上,并结合现场生产实际,而研制开发出的一套适用于首钢型材厂生产需要的,面向工程技术人员的,简单易行的棒材连轧孔型的计算机辅助设计软件。

整个软件内容包括原始数据的输入、压下规程的设计、力能参数的计算、约束条件的校核、孔型系统图的绘制,轧制图表的打印输出等模块。

软件的开发环境是 Windows 2000 平台,采用了面向对象的高级编程语言 (Visual Basic 6.0) 和当代较为流行的绘图软件包 AutoCAD,软件界面友好、美观,操作简便易行,针对性强,功能较为实用。

该软件的开发弥补了首钢棒材和线材 CARD 系统研究上的不足,经现场应用表明,该系统提高了连轧孔型设计的效率和质量,显示了效率高、功能全、修改方便等特点,较好地满足了现场需求,并且具有一定的实际应用价值。

关键词: 棒材连轧; 孔型; 计算机辅助设计

## Development of Computer Aided Roll Pass Design Software for Continuous Rolling of Bars for Shou Gang Section Rolling Mill

### Abstract

During the next period, due to the requirements of Olympic Games, the competition of construction steel products market will be more and more intense in China, especially in Beijing. Under this situation, only those iron and steel enterprises who have the ability to adapt to the changes flexibly and who have the super competition ability can survive. For the iron and steel enterprises in Beijing, they must focus on these aspects such as developing new products, increasing new varieties and improving products quality etc. so that they can consolidate the previous market, exploit new market and improve the market competition ability. The situation puts higher requirements on the roll pass design for continuous rolling of bars and requires the enterprises further optimize roll pass design to make the bar production reach the goal of high quality, high production and low consumption.

Shougang Section Rolling Mill is the main rolling bar factory with annual production up to 1,500,000 tons. As a new factory, the urgent task is to develop the potential product with high accessional value, to enlarge the varieties and to shorten the cycle of development. The task of this dissertation is to develop a piece of computer aided roll pass design software for continuous rolling of bars for Shougang Section Rolling Mill to change the traditional situation that roll pass design is depend on manual work and to realize the effect of high efficiency, low cost and high quality.

By investigating and studying the condition of the field, A computer aided roll pass design software for continuous rolling of bars for Shougang NO.2 Section Mill is Developed successfully on the basis of prior researchers' work and experiences, which meets the need of the production, faces to the technicians and can be used easily.

The whole system includes the following modules: data input, pass designing, force-energy parameters calculation, restriction conditons checking, pass system drawing and rolling graph printout etc.

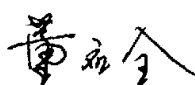
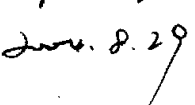
This system is developed under the environment of windows 2000,using object-oriented visual basic 5.0 as programming language, and up-to-date Auto CAD R14 as drawing tool, Which makes interface more friendly, Beautifully and have many advantages such as convenient operation, strong pertinence and practical function.

The development of the software makes up the shortages in the research of CARD Systems of Shougang bars and wires. The application shows that the system improves the efficiency and quality of roll pass design for continuous rolling of bars, displays the characteristics such as high efficiency, full function and convenient modification and meets the requirements of locale with practical application value.

**Keywords:** Continuous Rolling of Bars; Roll Pass ; Computer Aided Design

## 声 明

本人声明所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

本人签名：   
日 期： 

# 1 绪 论

## 1.1 研究背景

目前,我国中小型型材及线材轧机有 1000 余套,占总轧机套数的 55%左右,型线材产量占钢材总产量的 60%以上。2003 年钢材总量达 2.2 亿吨,随着我国国民经济的发展,基础设施建设迅猛发展,钢材(小型材)的总需求量还会进一步增长。型钢生产面临着原材料价格上涨,生产成本加大的严峻形势,提高产品质量,调整产品结构,增加产品数量,开发经济型钢与专用型钢等新品种和降低成本是我国型钢生产中亟待解决的主要问题。型钢孔型设计则是解决以上问题的关键技术之一。<sup>[18][5][9]</sup>

## 1.2 研究本课题的意义

计算机辅助孔型设计 CARD(computer aided roll pass design 以下简称 CARD),它是利用现代电子计算机系统高速计算、快速绘图等特点,来帮助孔型设计人员完成孔型设计各个环节中的大量计算和绘图工作,如利用电子计算机的逻辑判断能力和计算能力来选择孔型系统,确定轧制道次,完成各道次的孔型和轧辊各结构要素的选定和几何尺寸的计算;计算各道次轧件的宽展、前滑以及轧制力和力矩的大小;进行设备能力和塑性条件等限制因素的校核;选择最优的轧制程序;以及利用计算机指挥绘图机画出工程上实用的孔型图和配辊图。当将 CARD 系统与 CAM 系统(Computer Aided Manufacturing)结合起来时,能够把设计结果转化为操作命令,直接指挥 NC(Numerical Control)机床来加工孔型样板和车削轧辊。<sup>[1]</sup>

CARD 系统通常可分为软件和硬件两部分,其中硬件一般称为 CAD 工作站或图形工作站,它由主机和各种外围设备组成。而软件是指记载在磁盘上的各种计算机程序的集合,它的主要部分是完成某些特定任务的各类功能模块。这些模块在设计者的参与下指挥计算机来完成各种计算、判断和绘图等工作。利用 CARD 系统设计孔型时,设计者向计算机输入一些必要的原始数据、技术要求和控制参数,在几小时甚至几十分钟之内就可得到一个品种的孔型图以及变形和力能参数的计算结果。<sup>[41][42]</sup>

利用 CARD 系统设计孔型有下列特点:速度快可缩短设计周期。现代电子计

# 1 绪 论

## 1.1 研究背景

目前,我国中小型型材及线材轧机有 1000 余套,占总轧机套数的 55%左右,型线材产量占钢材总产量的 60%以上。2003 年钢材总量达 2.2 亿吨,随着我国国民经济的发展,基础设施建设迅猛发展,钢材(小型材)的总需求量还会进一步增长。型钢生产面临着原材料价格上涨,生产成本加大的严峻形势,提高产品质量,调整产品结构,增加产品数量,开发经济型钢与专用型钢等新品种和降低成本是我国型钢生产中亟待解决的主要问题。型钢孔型设计则是解决以上问题的关键技术之一。<sup>[18][5][9]</sup>

## 1.2 研究本课题的意义

计算机辅助孔型设计 CARD(computer aided roll pass design 以下简称 CARD),它是利用现代电子计算机系统高速计算、快速绘图等特点,来帮助孔型设计人员完成孔型设计各个环节中的大量计算和绘图工作,如利用电子计算机的逻辑判断能力和计算能力来选择孔型系统,确定轧制道次,完成各道次的孔型和轧辊各结构要素的选定和几何尺寸的计算;计算各道次轧件的宽展、前滑以及轧制力和力矩的大小;进行设备能力和塑性条件等限制因素的校核;选择最优的轧制程序;以及利用计算机指挥绘图机画出工程上实用的孔型图和配辊图。当将 CARD 系统与 CAM 系统(Computer Aided Manufacturing)结合起来时,能够把设计结果转化为操作命令,直接指挥 NC(Numerical Control)机床来加工孔型样板和车削轧辊。<sup>[1]</sup>

CARD 系统通常可分为软件和硬件两部分,其中硬件一般称为 CAD 工作站或图形工作站,它由主机和各种外围设备组成。而软件是指记载在磁盘上的各种计算机程序的集合,它的主要部分是完成某些特定任务的各类功能模块。这些模块在设计者的参与下指挥计算机来完成各种计算、判断和绘图等工作。利用 CARD 系统设计孔型时,设计者向计算机输入一些必要的原始数据、技术要求和控制参数,在几小时甚至几十分钟之内就可得到一个品种的孔型图以及变形和力能参数的计算结果。<sup>[41][42]</sup>

利用 CARD 系统设计孔型有下列特点:速度快可缩短设计周期。现代电子计

计算机的计算速度是惊人的,可在几分钟内完成人工几年的计算量。把孔型设计中大量繁琐的计算和枯燥的绘图等工作交给计算机去做,可使这些耗费时间最多的环节轻而易举地完成,从而使计算周期大为缩短。用传统的方法设计一套复杂断面型钢新产品的孔型,一般需要几星期甚至几个月的时间,而用 CARD 系统几小时即可画出孔型图。这样就把孔型设计人员从拉计算尺、画铅笔道等繁琐的工作中解放出来,使之有更多的精力从事创造性劳动。可进行优化设计,提高孔型设计的科学性<sup>[6][34]</sup>。过去靠人工来做孔型设计,都是以经验为基础的,并常常掺杂着一些设计者的艺术想象。例如角钢的蝶形孔和钢轨的帽形孔等,简直就像一件精美的艺术品。以致有一种观点认为:孔型设计是一项经验加艺术的工作。这种带着设计者主观色彩的设计方法难以保证设计出的孔型是最优的。特别是在我国的一些中小型轧钢车间,对某些标准产品的孔型设计往往是互相转抄,以轧制出合格产品为目标,不考虑生产过程的优化问题。而在 CARD 系统中则引进了现代计算方法中的最优化计算技术,通过大量的计算和比较,在给定条件下寻求最优的孔型设计和最优的轧制程序,以求达到节能,优质,高产,提高综合经济效益的目的,把孔型设计工作由艺术上升为科学。利用 CARD 系统进行孔型设计时,只要原始数据和控制参数输入正确,在计算机绘图的过程中一般不会出错。据资料介绍,微机读写磁盘时出错的概率约为 10<sup>-10</sup> 而且是不可重复的。这就保证了设计结果的精确性和可靠性。而靠人工设计时偶然的计算失误和笔误等是难以避免的,即使是很细心的人,进行几百次乃至上千次计算时也难免有几次错误,所以一项正规的设计都要经过设计者本人的反复验算和别人的校核、复查和审核等,道道把关以减少错误。相比之下, CARD 系统在这方面的优点是很明显的。一般说来,只要 CARD 系统中的数学模型是可靠的,那么得到的设计结果就是可靠的。可以利用现代计算方法得到轧制过程的较精确的理论解。过去在孔型设计时,对型钢轧制过程中各项参数的计算多采用工程法,推导公式时利用的假设条件与孔型中轧制的实际情况相差甚远,故往往计算精度不高,有时不得不用经验系数加以修正;而在 CARD 系统中,由于有了计算能力极强的计算机,使我们有可能利用现代塑性加工力学中的一些新的计算方法,如能量法和有限元法等来求解各种型钢的轧制过程,使之得到较为精确的理论解。这样一方面可使对轧制过程各项参数的计算结果更精确,另一方面还可对轧制过程中的温度场、速度场、应力场等物理过程进行综合分析,即用计算机来模拟轧制过程,把计算机当做一架“实验轧机”,一套新的设计产生之后首先在此计算机上进行模拟轧制,及时发现并纠正设计中的不妥之处,以减少或避免在新产品试轧期的损失。国外的实践表明,用这种方法设计的孔型可以一次试轧成功,这对新产品的开发是很有意义的。<sup>[2][3]</sup>

[4]



并在我国型钢生产领域发挥越来越重要的作用。

### 1.3 课题的研究方案

在借鉴前人开发 CARD 技术的经验基础上,采用计算机进行孔型设计,把有关的经验数据、数学模型、设计类型贮存在计算机内,再根据设计要求,建立数学模型,确定目标函数,然后通过计算机进行解析计算,并对结果进行审查、研究,判断其是否满足设计要求,如果不满足设计要求则可重算或修改,直至满足要求为止。这一过程可在图形显示器上通过人一机对话完成。最后将优化结果用自动绘图机画在标准图纸上。然后再进行审查研究和判断模型的解析结果以及修改模型等工作,这项工作一般需要丰富的经验和直觉知识,由设计者完成比用计算机完成显得更为有利。因此就发展了人一机密切配合的、各尽所长的人—机对话型计算机辅助设计系统,将孔型设计工作推向了一个新的更高的水平。

计算机辅助孔型设计系统主要应完成以下设计任务:

从主管理程序出发,首先选择设计类型。设计类型一般为:

- (1)已知设备性能参数,产品和坯料的断面形状、尺寸,进行孔型设计;
- (2)已知产品和坯料的断面形状、尺寸,终轧速度的变化范围,确定连轧机架数和各架轧机轧辊转速;
- (3)分析现有孔型设计并提出最优设计方案。

从而开发出一套适用于首钢型材厂现场需要的,面向工程技术人员的,简单易行的计算机辅助孔型设计软件。经分析、比较几种数学模型,确定符合工厂轧制实际的、简便的各类模型(如宽展模型和轧制模型等)。利用面向对象的高级的编程语言(Visual Basic)和当今世界最为流行的 Auto CAD 绘图软件包,使软件界面友好、美观,操作简便,功能完善。

### 1.4 CARD 系统类型及发展

探索利用计算机设计孔型的工作早在 60 年代末,70 年代初就开始了,八十年代得到了较大发展,目前已在主要钢材生产国得到了广泛应用。总体上可以把 CARD 系统的发展归纳为六种类型的发展阶段:

单一功能型。此系统产生于 CARD 发展初期,其特点是采用了传统的孔型设计方法,参数多由经验公式得出,而且需要人工输入大量参数。它只是用计算机代替了人工的计算或绘图工作,即只完成了设计工作的个别环节。受当时轧制理论水平和计算机技术的限制,此系统只适用于特定的轧制情况,计算精度也不高。

并在我国型钢生产领域发挥越来越重要的作用。

### 1.3 课题的研究方案

在借鉴前人开发 CARD 技术的经验基础上,采用计算机进行孔型设计,把有关的经验数据、数学模型、设计类型贮存在计算机内,再根据设计要求,建立数学模型,确定目标函数,然后通过计算机进行解析计算,并对结果进行审查、研究,判断其是否满足设计要求,如果不满足设计要求则可重算或修改,直至满足要求为止。这一过程可在图形显示器上通过人一机对话完成。最后将优化结果用自动绘图机画在标准图纸上。然后再进行审查研究和判断模型的解析结果以及修改模型等工作,这项工作一般需要丰富的经验和直觉知识,由设计者完成比用计算机完成显得更为有利。因此就发展了人一机密切配合的、各尽所长的人—机对话型计算机辅助设计系统,将孔型设计工作推向了一个新的更高的水平。

计算机辅助孔型设计系统主要应完成以下设计任务:

从主管理程序出发,首先选择设计类型。设计类型一般为:

- (1)已知设备性能参数,产品和坯料的断面形状、尺寸,进行孔型设计;
- (2)已知产品和坯料的断面形状、尺寸,终轧速度的变化范围,确定连轧机架数和各架轧机轧辊转速;
- (3)分析现有孔型设计并提出最优设计方案。

从而开发出一套适用于首钢型材厂现场需要的,面向工程技术人员的,简单易行的计算机辅助孔型设计软件。经分析、比较几种数学模型,确定符合工厂轧制实际的、简便的各类模型(如宽展模型和轧制模型等)。利用面向对象的高级的编程语言(Visual Basic)和当今世界最为流行的 Auto CAD 绘图软件包,使软件界面友好、美观,操作简便,功能完善。

### 1.4 CARD 系统类型及发展

探索利用计算机设计孔型的工作早在 60 年代末,70 年代初就开始了,八十年代得到了较大发展,目前已在主要钢材生产国得到了广泛应用。总体上可以把 CARD 系统的发展归纳为六种类型的发展阶段:

单一功能型。此系统产生于 CARD 发展初期,其特点是采用了传统的孔型设计方法,参数多由经验公式得出,而且需要人工输入大量参数。它只是用计算机代替了人工的计算或绘图工作,即只完成了设计工作的个别环节。受当时轧制理论水平和计算机技术的限制,此系统只适用于特定的轧制情况,计算精度也不高。论水平和计算机技术的限制,此系统只适用于特定的轧制情况,计算精度也不高。

并在我国型钢生产领域发挥越来越重要的作用。

### 1.3 课题的研究方案

在借鉴前人开发 CARD 技术的经验基础上,采用计算机进行孔型设计,把有关的经验数据、数学模型、设计类型贮存在计算机内,再根据设计要求,建立数学模型,确定目标函数,然后通过计算机进行解析计算,并对结果进行审查、研究,判断其是否满足设计要求,如果不满足设计要求则可重算或修改,直至满足要求为止。这一过程可在图形显示器上通过人一机对话完成。最后将优化结果用自动绘图机画在标准图纸上。然后再进行审查研究和判断模型的解析结果以及修改模型等工作,这项工作一般需要丰富的经验和直觉知识,由设计者完成比用计算机完成显得更为有利。因此就发展了人一机密切配合的、各尽所长的人—机对话型计算机辅助设计系统,将孔型设计工作推向了一个新的更高的水平。

计算机辅助孔型设计系统主要应完成以下设计任务:

从主管理程序出发,首先选择设计类型。设计类型一般为:

- (1)已知设备性能参数,产品和坯料的断面形状、尺寸,进行孔型设计;
- (2)已知产品和坯料的断面形状、尺寸,终轧速度的变化范围,确定连轧机架数和各架轧机轧辊转速;
- (3)分析现有孔型设计并提出最优设计方案。

从而开发出一套适用于首钢型材厂现场需要的,面向工程技术人员的,简单易行的计算机辅助孔型设计软件。经分析、比较几种数学模型,确定符合工厂轧制实际的、简便的各类模型(如宽展模型和轧制模型等)。利用面向对象的高级的编程语言(Visual Basic)和当今世界最为流行的 Auto CAD 绘图软件包,使软件界面友好、美观,操作简便,功能完善。

### 1.4 CARD 系统类型及发展

探索利用计算机设计孔型的工作早在 60 年代末,70 年代初就开始了,八十年代得到了较大发展,目前已在主要钢材生产国得到了广泛应用。总体上可以把 CARD 系统的发展归纳为六种类型的发展阶段:

单一功能型。此系统产生于 CARD 发展初期,其特点是采用了传统的孔型设计方法,参数多由经验公式得出,而且需要人工输入大量参数。它只是用计算机代替了人工的计算或绘图工作,即只完成了设计工作的个别环节。受当时轧制理论水平和计算机技术的限制,此系统只适用于特定的轧制情况,计算精度也不高。

多功能型。此系统大部分参数可用数学模型计算,数学模型多为经验—统计模型,除计算轧件尺寸和孔型尺寸外,还可计算变形参数、力能参数、轧制温度等量。多功能型 CARD 系统在单一功能型的基础上完善了计算功能,并扩充了绘图等其它功能。由于模型方面的研究不断深化,计算精度也有了很大提高。但这种系统不能综合考虑各种设备和工艺条件,设计结果与实际尚有一定距离,许多地方还需要人工干预。

多功能优化型此系统在多功能型的基础上引入了优化技术。优化目标可以是:产量最高、轧制节奏最短、能耗最低、设备负荷最低、连轧张力最小等。或以能耗、道次、轧制速度等多目标为综合优化目标。在优化算法上,常用的有网格法<sup>[22]</sup>、动态规划法、枚举法、一维及二维搜索法等<sup>[12]</sup>。该系统综合考虑了轧制过程中各种影响因素,并根据优化目标用数学方法寻求最优解,使设计结果趋于合理。但由于孔型轧制过程十分复杂,并非所有信息都能用数学模型来表示,尤其是复杂断面型钢生产,按一定优化目标求得的最优解可能并不符合实际情况。因此人们考虑将专家系统引入 CARD 系统中,让计算机模仿专家的工作方式来提高解决复杂问题的能力。

多功能专家型。专家系统是人工智能的一个研究领域。目前 CARD 专家系统正处于探索和发展阶段。阿亨大学塑性成型研究所开发了简单断面型钢孔型设计的计算机辅助设计专家系统。在系统中首先形成“设计规则”,根据设计结果实现过程的模拟,然后再经过“诊断规则”对模拟的结果进行评价,指出存在的问题,最后再经过“修正规则”对设计进行修改,这样来实现专家的工作方式。

CAD/CAM 联合系统。CAD/CAM 联合系统就是计算机辅助设计和辅助加工系统。这个系统的工作特点是:首先进行计算机辅助设计,将设计的结果作为信息传给计算机辅助加工系统,以控制机床进行加工或制造。

生产过程闭环控制中的 CARD 系统<sup>[31]</sup>。目前,在国外有的厂家已经把 CARD 技术应用于生产过程的闭环控制系统中。这种系统由计算机辅助设计系统 CARD、计算机辅助制造系统 CAM (Computer Aided Manufacturing)、数控机床 N/C(Numerical Control)和生产过程数据采集系统 DACS(Data Acquisition and Control System)等环节组成。形成了设计---加工---生产---测量---重新设计这样一种理想的质量控制环。

该系统的特点是整个控制过程全面实现计算机化。轧钢生产过程的有关数据经 DACS 系统进行实时采集和处理,传给 CARD 系统进行分析,根据这些实测数据修改原设计,将重新设计结果传递给 CAM 系统,CAM 对 CARD 的设计结果进行 N/C 编程预处理,由 CAM 通过 NC 控制线切割机或轧辊车床加工样板或孔型。加工好的轧辊用在轧钢生产过程中,再重复生产---采集数据---改进设计的循环过

程,使孔型设计日趋完善,整个生产过程始终处于一种动态优化状态之中。

#### 1.4.1 国外 CARD 发展动态

国外计算机辅助孔型设计的研究始于 60 年代后期,取得了大量的研究成果。1967 年 Brück,J.发表的线材轧机精轧机组立辊—椭圆孔型计算机辅助设计方法和 1969 年 Gedin,H.发表的椭圆—方孔型计算机辅助设计方法是较早的 CARD 研究成果。1973 年 Suppo,U.等发表了圆断面计算机辅助孔型设计的计算方法,1978 年 Kozono,H.发表了孔型设计 CAD/CAM 系统,把设计数据与 NC 编程相结合。1981 年 Nilsson,R.发表了圆钢计算机辅助孔型设计。1982 年 Mank,P-J,Kopp,R.发表了计算机辅助孔型设计。1983 年 Mank,P-J.在 Kopp 教授指导下完成的计算机辅助孔型设计博士论文,系统地开发了简单断面和异型断面孔型计算机辅助设计方法,包括确定孔型尺寸,计算全部变形参数、力能参数、轧件温度等所有重要参数和绘图功能。1982 年前苏联开发了简单断面最优化孔型设计自动计算系统。1981 年瑞典皇家技术学院金属工艺系开发出一套名为 ANGEL 的角钢轧辊孔型设计软件包。在美国钢铁协会的主持下, Battlle—Columbus 实验室和 Timken 公司于 1983 年联合研制出了名为 Rpdrod 的计算机圆钢孔型辅助设计软件包,美国的 Roll Data of Iowa 公司也进行了这方面的工作。美国 Aston 大学 Section and Profiles 有限公司于 1983 年联合建立了一个关于孔型设计和加工的计算机程序,整个系统包括孔型设计、孔型图库、样板设计和轧辊设计。英国 Metform 公司及英国机床工业研究联合会分别于 1984 年和 1981 年开发了一套关于轧辊设计的软件。1985 年日本的山口喜弘等人完成了棒材轧制 CARD 系统<sup>[4]</sup>。

#### 1.4.2 国内 CARD 发展状况

由于我国计算机的普及与应用起步较晚,在 CARD 研究方面与发达国家有很大差距。国内的 CARD 研究始于 1984 年,到目前为止已经取得了大量成果,开发的软件系统不少已经在工厂中使用,取得了良好的效果。如北京科技大学开发的型钢轧制过程仿真方法库,与江西钢厂、天津第三轧钢厂、承德钢铁公司、鞍钢中型厂及武汉钢铁公司合作开发的简单断面、角钢、工字钢和轻轨等计算机辅助孔型设计系统,与首钢红冶钢厂合作,对热轧角钢过程模型化进行了研究,建立了负荷分配优化的角钢孔型设计软件系统,与齐齐哈尔钢厂合作,研究建立了适于高速线材轧制的专用宽展模型,开发了以微张力为目标函数的高速线材轧制 CARD 系统;西安冶金建筑学院(西安建筑科技大学)与太原钢铁公司合作开发

的简单断面型钢计算机辅助优化孔型设计；东北大学开发的棒、线材孔型计算机优化设计软件及与马鞍山钢铁公司合作开发的 H 型钢和工字钢孔型设计系统，等等。

目前，国内在计算机辅助孔型设计方面存在的问题是：

优化理论、优化目标问题。全面优化需要综合考虑所有参数，但若以某一目标为主时，明确地得知该目标是否可以实现是极为关键的。此外，多目标优化的方法还未解决，孔型的优劣还要凭人的经验进行判断。如何将优化判据理论化、数字化，从而有利于计算机的使用，也是需要解决的问题之一。

模型问题。CARD 技术能否应用于生产，关键在于模型的准确性。适合大多数情况的模型往往不如一些在特定条件下所研究的模型准确。因此，应从生产实际中采集数据，建立数据库和模型，以提高模型的准确性。

CARD 技术具有极大的优越性和实用性，一经兴起，便得到了迅速发展，在金属压力加工工具设计中得到了广泛应用。随着塑性变形理论和计算机应用技术的不断发展，必将得到进一步完善。

### 1.4.3 计算机辅助孔型设计的发展前景

计算机辅助孔型设计是随着计算机技术和轧制理论的发展而发展的。有限元模拟方法的出现和发展，使轧制理论的研究步入一个崭新的阶段。因为利用有限元法来求解型钢轧制时，可以得到变形区内各处金属流动和网格变形的详细信息，并且比较容易与轧制过程中轧件的温度场及轧辊变形等问题联合求解，从而得到对轧制过程比较完整而又真实的描述。把有限元方法算出的大量数据按照时间顺序采样，转换成网格尺寸的变化，以图形的方式在计算机显示器的屏幕上连续地再现出来，就可以使计算机像一架实验轧机那样来直观地模拟实际轧制过程。而计算机技术的发展，特别是网络技术、面向对象编程技术、虚拟现实技术的出现和发展，为 CARD 技术的发展提供了技术上的支持。因此，计算机辅助孔型设计的发展方向为：

1. 轧制过程数学模型更加齐全、精确。用理论分析和统计回归相结合方法建立各种品种、规格产品的数学模型，模型精度高，完全满足实际生产要求，对模型的适用范围作出清晰的界定。
2. 更加丰富。不仅仅用于孔型设计，还具备动态生产过程的模拟。
3. 故障诊断功能、预报产品性能等，与 CAP、CAM 等一起构成轧钢的 CIMS。
4. 智能化程度高。利用人工智能、模糊理论等很好地解决生产过程中的模糊量问题。建立通用及专用的 CARD 知识库、数据库，不仅能够进行工艺参数设计，

的简单断面型钢计算机辅助优化孔型设计；东北大学开发的棒、线材孔型计算机优化设计软件及与马鞍山钢铁公司合作开发的 H 型钢和工字钢孔型设计系统，等等。

目前，国内在计算机辅助孔型设计方面存在的问题是：

优化理论、优化目标问题。全面优化需要综合考虑所有参数，但若以某一目标为主时，明确地得知该目标是否可以实现是极为关键的。此外，多目标优化的方法还未解决，孔型的优劣还要凭人的经验进行判断。如何将优化判据理论化、数字化，从而有利于计算机的使用，也是需要解决的问题之一。

模型问题。CARD 技术能否应用于生产，关键在于模型的准确性。适合大多数情况的模型往往不如一些在特定条件下所研究的模型准确。因此，应从生产实际中采集数据，建立数据库和模型，以提高模型的准确性。

CARD 技术具有极大的优越性和实用性，一经兴起，便得到了迅速发展，在金属压力加工工具设计中得到了广泛应用。随着塑性变形理论和计算机应用技术的不断发展，必将得到进一步完善。

### 1.4.3 计算机辅助孔型设计的发展前景

计算机辅助孔型设计是随着计算机技术和轧制理论的发展而发展的。有限元模拟方法的出现和发展，使轧制理论的研究步入一个崭新的阶段。因为利用有限元法来求解型钢轧制时，可以得到变形区内各处金属流动和网格变形的详细信息，并且比较容易与轧制过程中轧件的温度场及轧辊变形等问题联合求解，从而得到对轧制过程比较完整而又真实的描述。把有限元方法算出的大量数据按照时间顺序采样，转换成网格尺寸的变化，以图形的方式在计算机显示器的屏幕上连续地再现出来，就可以使计算机像一架实验轧机那样来直观地模拟实际轧制过程。而计算机技术的发展，特别是网络技术、面向对象编程技术、虚拟现实技术的出现和发展，为 CARD 技术的发展提供了技术上的支持。因此，计算机辅助孔型设计的发展方向为：

1. 轧制过程数学模型更加齐全、精确。用理论分析和统计回归相结合方法建立各种品种、规格产品的数学模型，模型精度高，完全满足实际生产要求，对模型的适用范围作出清晰的界定。
2. 更加丰富。不仅仅用于孔型设计，还具备动态生产过程的模拟。
3. 故障诊断功能、预报产品性能等，与 CAP、CAM 等一起构成轧钢的 CIMS。
4. 智能化程度高。利用人工智能、模糊理论等很好地解决生产过程中的模糊量问题。建立通用及专用的 CARD 知识库、数据库，不仅能够进行工艺参数设计，

更能进行方案设计，对方案进行合理评价。整个设计过程不需人工干预，完全成为非交互形式系统。利用虚拟现实等技术，实现设计和轧制过程模拟可视，更具有直观性。

5. 智能优化。通过综合运用专家系统、模糊论、广义优化论，实现包括不确定量在内的工艺参数优化，很好地解决多目标优化问题，实现方案的优化设计、评价。

6. 通用性、可扩充性、易维护性强，对用户更加友好。系统结构更加规范，通过建立基本模型库、算法库、行业标准，提供二次开发工具，涵盖各个品种、规格的原料、产品；利用面向对象、多媒体等技术，操作方便、实用。



## 2 数学模型的选择

在计算机辅助孔型设计中要用到相关的数学模型，而数学模型选择是否符合科学合理，精度是否适合实际需求等都会直接影响到孔型设计的质量。目前，描述金属变形、受力等参数的数学模型很多，不同的数学模型有不同的假设条件，适用于不同的变形条件，科学合理的选择数学模型是计算机辅助孔型设计中的核心工作之一，对孔型设计的结果有重要意义。

### 2.1 宽展模型

#### 2.1.1 宽展模型的类型

宽展是轧制时客观存在的现象，在孔型设计中，必须准确地确定宽展的大小，否则不是孔型充不满，就是过充满，这两种情况都可能造成废品。

由于影响宽展的因素很多，一般公式中很难把所有的影响因素都考虑进去。现有的宽展公式，多数只考虑几个影响因素，而用一个系数估计其它因素的作用。如果把这些公式应用在得出这些公式或系数的假设条件下，计算结果一般接近实际情况，否则，计算结果则与实际相去甚远。现选择几个比较典型的、切合实际的而又在 CARD 中经常使用的宽展公式加以介绍和分析。

##### 2.1.1.1 巴赫契诺夫宽展公式

前苏联学者巴赫契诺夫根据金属压缩后往横向和高向移位体积之比与其相应的变形功之间的比值相等这个条件，于 1950 年提出的宽展公式为：

$$\Delta b = 1.15 \frac{\Delta h}{2H} \left( \sqrt{R \Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right) \quad (2.1)$$

式中： $\Delta h$ —压下量； $H$ —轧件轧前高度；

$R$ —轧辊半径；

$f$ —摩擦系数。其中： $f$ 按可下式计算：

$$f = K_1 K_2 K_3 (1.150 - .0005t) \quad (2.2)$$

式中： $K_1$ —考虑到轧辊的材质影响系数，对于钢轧辊  $K_1=1.0$

铸铁轧辊  $K_1=0.8$ ；

$K_2$ —考虑到轧制速度的影响系数;

$K_3$ —考虑到轧件的材质影响系数, 可按表 2.1 所列的实验数据选取;

$t$ —轧制温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

该公式考虑了压下量、变形区长度和摩擦系数的影响。在公式的推导过程中, 也考虑了轧件宽度和前滑的影响, 但该公式是在忽略宽度影响时的简化形式。这个公式正如作者本人分析证明的, 对宽轧件, 即  $B/2\sqrt{R\Delta h} > 1$  时, 计算结果是正确的。实验证明, 用巴赫契诺夫公式计算平辊轧制和箱形孔型中的自由宽展可以得到与实际相接近的结果。

### 2.1.1.2 艾克隆德宽展公式

艾克隆德认为, 宽展决定于压下量及接触面上纵横阻力的大小, 并由此出发, 得出直接计算轧件轧后宽度的公式:

$$b = \sqrt{4m^2(H+h)^2\left(\frac{l}{B}\right)^2 + B^2 + 4ml(3H-h) - 2m(H+h)\frac{l}{B}} \quad (2.3)$$

式中:  $m = \frac{1.6fl - 1.2\Delta h}{H+h}$ ;

$l = \sqrt{R\Delta h}$ ;

$h$ —轧件轧后高度;

$l$ —变形区长度;

$B$ —轧件轧前宽度。

$f$  按 (2.2) 式计算。

艾克隆德公式考虑的因素比较全面, 适用的范围较大, 计算结果也相当符合实际情况, 但计算较为复杂。

### 2.1.1.3 彼德诺夫—齐别尔宽展公式

$$\Delta b = C \frac{\Delta h}{H} \sqrt{R\Delta h} \quad (2.4)$$

式中:  $\Delta h$ —压下量;

$H$ —轧件轧前高度;

$R$ —轧辊半径;

$C$ —系数。

1917 年俄国学者彼德诺夫, 根据变形金属往横向和纵向流动的体积与其克服摩擦阻力所需要的功成正比这个条件, 导出了上述形式的公式。1930 年德国学者

齐别尔在研究了接触表面的摩擦力、并发现阻碍延伸的趋势正比于接触弧长度及相对压下量的基础上,提出了类似于公式(2.2)的形式,对系数C作了重新规定,一般为0.35—0.45。

该公式没有考虑轧件宽度的影响,所以不能用于轧件宽度小于或等于其厚度的轧制条件。

#### 2.1.1.4 乌萨托夫斯基宽展公式

$$\beta = \eta^{-w}$$

$$\text{当 } \eta \geq 0.5 \text{ 时 } W = 10^{-1.269\left(\frac{B}{H}\right)\left(\frac{H}{D}\right)^{0.556}} \quad (2.5)$$

$$\text{当 } \eta < 0.5 \text{ 时 } W = 10^{-3.457\left(\frac{B}{H}\right)\left(\frac{H}{D}\right)^{0.968}} \quad (2.6)$$

式中:  $\beta$ —相对宽展系数,  $\beta = b/B$ ;

$\eta$ —压下系数的倒数,  $\eta = h/H$ ;

$D$ —轧辊工作直径。

该公式在计算较大或较小断面轧件时是比较精确的。

#### 2.1.1.5 日兹宽展公式

1900年,德国学者日兹根据实际经验提出如下宽展公式:

$$\Delta b = K \cdot \Delta h \quad (2.7)$$

式中:  $K$ —宽展系数,  $K=0.35—0.48$ 。

其它因素的影响一并放入宽展系数  $K$  中考虑。 $K$ 是在长期的生产实际中,通过大量的实测资料统计得出的。对于不同的轧机和不同的轧制条件有不同的数值。但具体的生产条件下,若轧制条件变化不大时,系数  $K$  也变化不大。使用日兹公式形势十分简单,便于手工计算,能迅速地确定出宽展值,计算结果也比较准确。但系数  $K$  的值要有大量经验数据时,才能选择得较为准确。对于缺乏实际经验的孔型设计人员来说,要选择正确的孔型系数较为困难,因此工厂和有经验的孔型设计者常采用这种模型。

#### 2.1.2 宽展模型的选择

由于轧制理论还很不成熟,很不完善,再加上宽展问题本身的复杂性,迄今为止,还没有一个能适应多种情况下准确地计算宽展的理论公式。上述的这些宽

齐别尔在研究了接触表面的摩擦力、并发现阻碍延伸的趋势正比于接触弧长度及相对压下量的基础上,提出了类似于公式(2.2)的形式,对系数C作了重新规定,一般为0.35—0.45。

该公式没有考虑轧件宽度的影响,所以不能用于轧件宽度小于或等于其厚度的轧制条件。

#### 2.1.1.4 乌萨托夫斯基宽展公式

$$\beta = \eta^{-w}$$

$$\text{当 } \eta \geq 0.5 \text{ 时 } W = 10^{-1.269\left(\frac{B}{H}\right)\left(\frac{H}{D}\right)^{0.556}} \quad (2.5)$$

$$\text{当 } \eta < 0.5 \text{ 时 } W = 10^{-3.457\left(\frac{B}{H}\right)\left(\frac{H}{D}\right)^{0.968}} \quad (2.6)$$

式中:  $\beta$ —相对宽展系数,  $\beta = b/B$ ;

$\eta$ —压下系数的倒数,  $\eta = h/H$ ;

$D$ —轧辊工作直径。

该公式在计算较大或较小断面轧件时是比较精确的。

#### 2.1.1.5 日兹宽展公式

1900年,德国学者日兹根据实际经验提出如下宽展公式:

$$\Delta b = K \cdot \Delta h \quad (2.7)$$

式中:  $K$ —宽展系数,  $K=0.35—0.48$ 。

其它因素的影响一并放入宽展系数  $K$  中考虑。 $K$ 是在长期的生产实际中,通过大量的实测资料统计得出的。对于不同的轧机和不同的轧制条件有不同的数值。但具体的生产条件下,若轧制条件变化不大时,系数  $K$  也变化不大。使用日兹公式形势十分简单,便于手工计算,能迅速地确定出宽展值,计算结果也比较准确。但系数  $K$  的值要有大量经验数据时,才能选择得较为准确。对于缺乏实际经验的孔型设计人员来说,要选择正确的孔型系数较为困难,因此工厂和有经验的孔型设计者常采用这种模型。

#### 2.1.2 宽展模型的选择

由于轧制理论还很不成熟,很不完善,再加上宽展问题本身的复杂性,迄今为止,还没有一个能适应多种情况下准确地计算宽展的理论公式。上述的这些宽

展模型应用于孔型设计时,各自适用于不同的轧制条件。当实际生产的条件与建立的条件和假设接近时,设计结果比较精确。

考虑到本 CARD 软件是为首钢型材二厂现场工程技术人员开发的,因而所选用的宽展模型就应该适用于他们的设计习惯。一般来说,现场人员乐于采用形式简单而计算结果又较为准确的公式。与其它宽展公式相比,日兹公式这个特点十分突出。据统计,目前首钢所属的小型材厂几乎全部采用日兹公式进行宽展计算,而且根据 30 多年的实践来看,计算精度较高,完全能满足现场的轧制情况。虽说该公式在宽展系数的确定上较为困难,但该软件的使用者是具有丰富现场经验的孔型设计专家,而不是初出茅庐的孔型设计人员,再加上首钢小型材几十年生产所积累的大量数据,对宽展系数的正确选择不成问题。鉴于此,本设计选择了日兹公式作为宽展模型。

为了使没有经验的孔型设计人员也能比较正确地选择宽展系数的数值,可参考如下原则:<sup>[2]</sup>

(1) 其它情况相同的情况下,轧件温度越高,宽展系数越小。在一般情况下,在轧制过程中轧件温度是逐渐降低的,这样对于同类孔型系统,宽展系数应取越来越大的数值。

(2) 轧辊材质的影响。使用钢轧辊时应取较大的宽展系数。

(3) 轧件断面尺寸影响。轧件断面越大,宽展系数越小。在轧制过程中,轧件断面积减少的速度大于轧辊直径变化的速度,所以,宽展系数应沿轧制道次方向逐渐增加。

(4) 制钢种的影响。在其它条件相同时,普碳钢的宽展系数小,合金钢的宽展系数大。

(5) 轧制速度的影响。在其它条件相同时,轧制速度越高,宽展系数越小。

另外,还有其它因素影响宽展系数的取值范围。凡是有利于宽展的因素,宽展系数应取较大值,反之则相反。在轧制过程中,往往是多种因素同时起作用,所以选取宽展系数时,应考虑诸因素的综合影响。当然要分清楚主要影响因素和次要影响因素。前面五条在一般情况下是主要影响因素。

## 2.2 金属轧制时的力能参数模型

金属轧制时的力能参数是指轧制力、传动轧辊的转矩和功率等。

展模型应用于孔型设计时,各自适用于不同的轧制条件。当实际生产的条件与建立的条件和假设接近时,设计结果比较精确。

考虑到本 CARD 软件是为首钢型材二厂现场工程技术人员开发的,因而所选用的宽展模型就应该适用于他们的设计习惯。一般来说,现场人员乐于采用形式简单而计算结果又较为准确的公式。与其它宽展公式相比,日兹公式这个特点十分突出。据统计,目前首钢所属的小型材厂几乎全部采用日兹公式进行宽展计算,而且根据 30 多年的实践来看,计算精度较高,完全能满足现场的轧制情况。虽说该公式在宽展系数的确定上较为困难,但该软件的使用者是具有丰富现场经验的孔型设计专家,而不是初出茅庐的孔型设计人员,再加上首钢小型材几十年生产所积累的大量数据,对宽展系数的正确选择不成问题。鉴于此,本设计选择了日兹公式作为宽展模型。

为了使没有经验的孔型设计人员也能比较正确地选择宽展系数的数值,可参考如下原则:<sup>[2]</sup>

(1) 其它情况相同的情况下,轧件温度越高,宽展系数越小。在一般情况下,在轧制过程中轧件温度是逐渐降低的,这样对于同类孔型系统,宽展系数应取越来越大的数值。

(2) 轧辊材质的影响。使用钢轧辊时应取较大的宽展系数。

(3) 轧件断面尺寸影响。轧件断面越大,宽展系数越小。在轧制过程中,轧件断面积减少的速度大于轧辊直径变化的速度,所以,宽展系数应沿轧制道次方向逐渐增加。

(4) 制钢种的影响。在其它条件相同时,普碳钢的宽展系数小,合金钢的宽展系数大。

(5) 轧制速度的影响。在其它条件相同时,轧制速度越高,宽展系数越小。

另外,还有其它因素影响宽展系数的取值范围。凡是有利于宽展的因素,宽展系数应取较大值,反之则相反。在轧制过程中,往往是多种因素同时起作用,所以选取宽展系数时,应考虑诸因素的综合影响。当然要分清楚主要影响因素和次要影响因素。前面五条在一般情况下是主要影响因素。

## 2.2 金属轧制时的力能参数模型

金属轧制时的力能参数是指轧制力、传动轧辊的转矩和功率等。

2.2.1 轧制压力模型

计算轧辊及工作机架的主要零件的强度和计算传动轧辊所需的转矩及电机功率，一定要了解金属作用在轧辊上的总压力，即轧制力。

2.2.1.1 艾克隆德平均单位压力公式

计算平均单位压力的公式很多，参数选用各异，而公式又都具有一定的适用范围。目前，尚缺乏准确计算孔型中轧制时的平均单位压力公式，常用的是艾克隆德平均单位压力公式。该公式的形式为：

$$\overline{p} = (1+m) (K + \eta' \cdot \varepsilon) \tag{2.8}$$

式中： 1+m—考虑外摩擦影响的系数；  
K—平面变形抗力；  
 $\eta'$ —金属的粘度；  
 $\varepsilon$ —轧制时的平均变形速度, $S^{-1}$ 。  
摩擦系数 f 按公式 (2.2) 计算。

$$\varepsilon = \frac{2v \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}}{H + h}$$

艾克隆德利用实验数据得到如下无摩擦平面压缩变形抗力的计算公式：

$$K = (137 - 0.098t)(1.4 + C + Mn + 0.3Cr) \quad N/mm^2 \tag{2.9}$$
$$\eta = 0.01(137 - 0.098t) \cdot C' \quad N \cdot S/mm^2$$

式中： v—轧制速度，mm/s；  
t—轧制温度，℃；  
C、Mn、Cr—分别为钢中碳、锰、铬的含量，%；  
C'—轧制速度对  $\eta$  的影响系数，其数值见表 2.1：

表 2.1 轧制速度对  $\eta$  的影响系数 C'  
table 2.1 rolling speed to  $\eta$ 's influence coefficient C'

| 轧制速度 v<br>(m/s) | <6 | 6—10 | 10—15 | 15—20 |
|-----------------|----|------|-------|-------|
| 系数 C'           | 1  | 0. 8 | 0. 65 | 0. 6  |

当温度  $t \geq 800^{\circ}C$ 、 $Mn \leq 1\%$ 、 $Cr < 2—3\%$  时，这些公式是正确的。  
艾克隆德公式是用于计算热轧时平均单位压力的半经验公式，发表于 1927 年，

是最早的一个考虑各种因素对单位压力影响的公式，用于计算热轧低碳钢钢坯及型钢的轧制压力有比较正确的结果。因其简便实用，故在工厂里得到广泛的应用。所以，本设计软件采用艾克隆德公式计算平均单位压力。

### 2.2.1.2 总轧制压力计算公式

$$P = \bar{p} \cdot F \quad (2.10)$$

式中：P—轧制压力；

F—轧件与轧辊的接触面积。

F按下式求解：

$$\begin{aligned} F &= \bar{B} \cdot l \\ &= \frac{B+b}{2} \cdot l \\ &= \frac{B+b}{2} \cdot \sqrt{\Delta h R} \end{aligned}$$

## 2.2.2 轧制力矩模型

### 2.2.2.1 主电机传动力矩的组成

在轧制过程中，在主电机轴上，传动轧辊所需力矩最多由下面四部分组成：

$$M = \frac{M_z}{i} + M_m + M_K + M_d \quad (2.11)$$

式中： $M_z$ —轧制力矩；

$M_m$ —克服轧制时发生在轧辊轴承、传动机构等的附加摩擦力矩；

$M_K$ —空转力矩；

$M_d$ —动力矩，此力矩为克服轧辊不均匀运动时产生的惯性力所必需的；  
轧辊与主电机间的传动比。

组成传动轧辊的力矩的前三项为静力矩，即

$$M_j = \frac{M_z}{i} + M_m + M_K + M_d$$

### 2.2.2.2 轧制力矩计算公式

转动两个轧辊所需的轧制力矩为：



是最早的一个考虑各种因素对单位压力影响的公式，用于计算热轧低碳钢钢坯及型钢的轧制压力有比较正确的结果。因其简便实用，故在工厂里得到广泛的应用。所以，本设计软件采用艾克隆德公式计算平均单位压力。

### 2.2.1.2 总轧制压力计算公式

$$P = \bar{p} \cdot F \quad (2.10)$$

式中：P—轧制压力；

F—轧件与轧辊的接触面积。

F按下式求解：

$$\begin{aligned} F &= \bar{B} \cdot l \\ &= \frac{B+b}{2} \cdot l \\ &= \frac{B+b}{2} \cdot \sqrt{\Delta h R} \end{aligned}$$

## 2.2.2 轧制力矩模型

### 2.2.2.1 主电机传动力矩的组成

在轧制过程中，在主电机轴上，传动轧辊所需力矩最多由下面四部分组成：

$$M = \frac{M_z}{i} + M_m + M_K + M_d \quad (2.11)$$

式中：M<sub>z</sub>—轧制力矩；

M<sub>m</sub>—克服轧制时发生在轧辊轴承、传动机构等的附加摩擦力矩；

M<sub>K</sub>—空转力矩；

M<sub>d</sub>—动力矩，此力矩为克服轧辊不均匀运动时产生的惯性力所必需的；  
轧辊与主电机间的传动比。

组成传动轧辊的力矩的前三项为静力矩，即

$$M_j = \frac{M_z}{i} + M_m + M_K + M_d$$

### 2.2.2.2 轧制力矩计算公式

转动两个轧辊所需的轧制力矩为：

$$M_z = 2Pa = 2P \psi L \quad (2.12)$$

式中：a —力臂；

$\psi$ —力臂系数。

表 2.2 为热轧时，在不同的轧制条件下的力臂系数  $\psi$ ：

表 2.2 轧制压力的力臂系数  $\psi$

table 2.2 the arm of force coefficient  $\psi$  of rolling pressure

| 轧制条件    | 力臂系数 $\psi$ |
|---------|-------------|
| 热轧厚度较大时 | 0.5         |
| 热轧方断面   | 0.5         |
| 热轧圆断面   | 0.6         |

### 2.2.2.3 附加摩擦力矩计算公式

换算到主电动机轴上的总的附加摩擦力矩为：

$$M_m = \frac{M_{m1}}{i} + M_{m2} \quad (2.13)$$

式中：  $M_{m1}$ —轧辊轴承中的附加摩擦力矩；

$M_{m2}$ —传动机构（减速机座、齿轮机座）中的摩擦力矩。

对上下两个轧辊（共四个轴承）而言，

$$M_{m1} = \frac{P}{2} \cdot f_1 \cdot \frac{d}{2} \cdot 4$$

$$= Pd f_1$$

式中：P —作用在四个轴承上的总负荷，它等于轧制力；

d —轧辊辊颈直径；

$f_1$ —轧辊轴承摩擦系数，它取决于轴承构造和工作条件，见表 2.3。

表 2.3 轧辊轴承摩擦系数  $f_1$

table 2.3 roller axletree friction coefficient  $f_1$

|            |                          |
|------------|--------------------------|
| 滑动轴承金属衬热轧时 | $f_1 = 0.07 \sim 0.10$   |
| 滑动轴承塑料衬    | $f_1 = 0.01 \sim 0.03$   |
| 液体摩擦轴承     | $f_1 = 0.003 \sim 0.004$ |
| 滚动轴承       | $f_1 = 0.003$            |

$$M_{m2} = \left( \frac{1}{\eta_1} - 1 \right) \frac{M_{z1} + M_{m1}}{i} \quad (2.14)$$

式中:  $\eta_1$ —机构的效率, 即从主电动机到轧机的传动效率; 一级齿轮传动的效率一般取 0.96-0.98, 皮带传动效率取 0.85-0.90。

#### 2.2.2.4 空转力矩计算公式

$$M_K = (0.03 - 0.06) M_H \quad (2.15)$$

式中:  $M_H$ —电动机的额定转矩。

对新式轧机可取下限, 对旧式轧机可取上限。

$$M = 9549 \frac{K}{n} \quad \text{N} \cdot \text{m} \quad (2.16)$$

式中:  $K$ —电机额定功率, KW;

$n$ —电机额定转速, 转/分。

#### 2.2.2.5 动力矩的计算公式

$$M_d = \frac{GD^2}{38.2} \cdot \frac{dn}{dt} \quad \text{N} \cdot \text{M} \quad (2.17)$$

式中:  $D$ —回转体的直径, m;

$G$ —回转体的重量, N;

$\frac{dn}{dt}$ —回转体的转速, r/min。

### 2.3 棒材连轧孔型设计的计算模型

目前, 棒材连轧孔型设计的计算模型主要考虑以下几方面:

#### 2.3.1 轧制制度的限制模型

为了确保孔型设计的合理性, 还要有限制系统来检验, 以满足各个约束条件。

##### 2.3.1.1 主电机能力的限制

为了保证主电机的正常工作, 在轧制时, 电机必须同时满足不过载和不发热。校核时, 通常是以轧制的一个节奏内负荷的变化作为依据的。

##### 1. 过载校核

校核电机的过载条件为:

$$M_{\max} \leq K \cdot M_H$$

式中:  $\eta_1$ —机构的效率, 即从主电动机到轧机的传动效率; 一级齿轮传动的效率一般取 0.96-0.98, 皮带传动效率取 0.85-0.90。

#### 2.2.2.4 空转力矩计算公式

$$M_K = (0.03 - 0.06) M_H \quad (2.15)$$

式中:  $M_H$ —电动机的额定转矩。

对新式轧机可取下限, 对旧式轧机可取上限。

$$M = 9549 \frac{K}{n} \quad \text{N} \cdot \text{m} \quad (2.16)$$

式中:  $K$ —电机额定功率, KW;

$n$ —电机额定转速, 转/分。

#### 2.2.2.5 动力矩的计算公式

$$M_d = \frac{GD^2}{38.2} \cdot \frac{dn}{dt} \quad \text{N} \cdot \text{M} \quad (2.17)$$

式中:  $D$ —回转体的直径, m;

$G$ —回转体的重量, N;

$\frac{dn}{dt}$ —回转体的转速, r/min。

### 2.3 棒材连轧孔型设计的计算模型

目前, 棒材连轧孔型设计的计算模型主要考虑以下几方面:

#### 2.3.1 轧制制度的限制模型

为了确保孔型设计的合理性, 还要有限制系统来检验, 以满足各个约束条件。

##### 2.3.1.1 主电机能力的限制

为了保证主电机的正常工作, 在轧制时, 电机必须同时满足不过载和不发热。校核时, 通常是以轧制的一个节奏内负荷的变化作为依据的。

##### 1. 过载校核

校核电机的过载条件为:

$$M_{\max} \leq K \cdot M_H$$

式中:  $\eta_1$ —机构的效率, 即从主电动机到轧机的传动效率; 一级齿轮传动的效率一般取 0.96-0.98, 皮带传动效率取 0.85-0.90。

#### 2.2.2.4 空转力矩计算公式

$$M_K = (0.03 - 0.06) M_H \quad (2.15)$$

式中:  $M_H$ —电动机的额定转矩。

对新式轧机可取下限, 对旧式轧机可取上限。

$$M = 9549 \frac{K}{n} \quad \text{N} \cdot \text{m} \quad (2.16)$$

式中:  $K$ —电机额定功率, KW;

$n$ —电机额定转速, 转/分。

#### 2.2.2.5 动力矩的计算公式

$$M_d = \frac{GD^2}{38.2} \cdot \frac{dn}{dt} \quad \text{N} \cdot \text{M} \quad (2.17)$$

式中:  $D$ —回转体的直径, m;

$G$ —回转体的重量, N;

$\frac{dn}{dt}$ —回转体的转速, r/min。

### 2.3 棒材连轧孔型设计的计算模型

目前, 棒材连轧孔型设计的计算模型主要考虑以下几方面:

#### 2.3.1 轧制制度的限制模型

为了确保孔型设计的合理性, 还要有限制系统来检验, 以满足各个约束条件。

##### 2.3.1.1 主电机能力的限制

为了保证主电机的正常工作, 在轧制时, 电机必须同时满足不过载和不发热。校核时, 通常是以轧制的一个节奏内负荷的变化作为依据的。

##### 1. 过载校核

校核电机的过载条件为:

$$M_{\max} \leq K \cdot M_H$$

直流电机:

$$K=2.5—3.0$$

交流电机(不带飞轮):

$$K=1.5—3.0$$

式中:  $K$ —电机的允许过载系数;

$M_{\max}$ —轧制时, 电机轴上所承受的最大传动负荷;

$M_H$ —电机的额定力矩。

## 2. 发热校核

校核电动机温升的条件为:  $M_{\text{均}} \leq M_H$

而:

$$M_{\text{均}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{\sum t}} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{T}} \quad (2.18)$$

式中:  $M_{\text{均}}$ —均方根力矩;

$M_1, M_2, \dots, M_n$ —一个节奏时间内每一瞬时的负荷;

$t_1, t_2, \dots, t_n$ —与上述力矩对应的时间;

$T$ —节奏(周期)时间。

### 2.3.1.2 咬入条件的限制

在生产实践中, 有时因压下量过大或轧件温度过高等原因, 轧件不能咬入轧辊。而只有实现咬入并使轧件继续顺利地通过辊缝, 才能完成轧制过程。

通常, 将咬入条件定义为:

$$\alpha \leq \beta \quad (2.19)$$

式中:  $\alpha$ —咬入角;

$\beta$ —摩擦角;

$$\beta = \alpha_{\max}$$

$\alpha_{\max}$ —最大咬入角, 见表 2.4;

$f$ —轧件与轧辊间的摩擦系数, 可按公式 (2.1) 计算或查表 2.4。

为便于计算, 有时咬入条件也可表示为:

$$h_i < \Delta h_{\max} \quad (2.20)$$

式中:  $\Delta h_i$ —道次压下量;

$\Delta h_{\max}$ —最大压下量;

$$\Delta h_{\max} = D_{\min}(1 - \cos \alpha_{\max})$$

Dkmin — 轧辊最小工作辊径。

表 2.4 不同轧制条件下的最大咬入角  
table 2.4 the maximum biting angle under different rolling conditions

| 轧制条件                | 摩擦系数 $f$  | 最大咬入角 $\alpha_{\max}$   |
|---------------------|-----------|-------------------------|
| 在有刻痕或堆焊的轧辊<br>上热轧钢坯 | 0.45—0.62 | $24^{\circ}—32^{\circ}$ |
| 热轧型钢                | 0.36—0.47 | $20^{\circ}—25^{\circ}$ |

### 2.3.1.3 稳定性条件限制

一般采用轧件的长短轴之比来衡量轧件的稳定性条件，即

$$a_i < [a_{i\max}]$$

式中： $a_i$ —第  $i$  架轧机轧前轧件的长短轴之比；

$[a_{i\max}]$ —第  $i$  架轧机轧前轧件的允许轴比。

### 2.3.1.4 充填条件限制

如果轧出的轧件宽度超过了轧辊孔型的槽口宽度，则轧件会出“耳子”；如果轧出的轧件宽度远远小于轧辊孔型的槽口宽度，则轧出的轧件断面形状不合格。因此，要保证轧出高质量、高精度的合格产品，必须保证如下充填条件：

$$[\xi_{i\min}] < \xi_i < [\xi_{i\max}]$$

式中： $\xi_i$ —第  $i$  道轧件的充填系数；

$[\xi_{i\min}]$ 、 $[\xi_{i\max}]$ —分别为第  $i$  架轧机允许的最小和最大充填系数。

### 2.3.1.5 延伸能力限制

在型钢轧制过程中，轧件在孔型中的延伸能力是有一定限度的，要求：

$$\mu_i < [\mu_{i\max}]$$

式中： $\mu_i$ 、 $[\mu_{i\max}]$ —分别为第  $i$  道中轧件的实际延伸系数和最大允许延伸系数。

### 2.3.1.6 轧辊强度限制

通常，对轧辊辊身只校核弯曲应力，对辊颈则校核弯曲应力和扭转应力，而对辊头只校核传动端的扭转应力即可。

#### 1、辊身的强度计算

轧制力  $P$  所在辊身断面的弯曲力矩为:

$$M_{sh} = R_1 \cdot x = P \left(1 - \frac{x}{a}\right) x$$

弯曲应力为:

$$\sigma_{sh} = \frac{M_{sh}}{0.1D_k^3}$$

式中:  $R_1$ —轧辊支反力;

压下螺丝中心线间的距离;

$x$ —计算的轧槽与压下螺丝中心线间的距离;

$D_k$ —计算断面处的轧辊辊身的工作直径。

辊身强度条件为:

$$\sigma_{sh} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_b}{n}$$

式中:  $\sigma_b$ —轧辊材料的强度极限;

$n$  —轧辊安全系数, 一般取  $n=5$ ;

$[\sigma]$ —轧辊材料的许用应力。

各种轧辊材料的许用应力见表 2.5。

表 2.5 各种轧辊材料的许用应力 ( $n=5$ ) 时  
table 2.5 the permitted stress of different roller materials ( $n=5$ )

|                          | 合金锻钢      | 碳素锻钢        | 铸钢       | 铸铁        | 球墨铸铁       |
|--------------------------|-----------|-------------|----------|-----------|------------|
| 强度极限 $\sigma_b$<br>(Mpa) | 686—735   | 588—637     | 490—588  | 343—392   | 392—588    |
| 许用应力 $[\sigma]$<br>(Mpa) | 137.2—149 | 117.6—127.4 | 98—117.6 | 68.6—78.4 | 78.4—117.6 |

## 2. 辊颈的强度计算

辊颈上的弯矩  $M_j$ , 由最大支反力确定, 即

$$M_j = RC$$

式中:  $R$ —最大支反力;

$C$ —压下螺丝中心线至辊身边缘的距离, 其值可近似地取辊颈长度  $l$  之半,

$$\text{即 } C = \frac{l}{2}.$$

辊颈危险断面的弯曲应力和扭转应力为:

$$\text{弯曲应力: } \sigma_j = \frac{M_j}{0.1d^3}$$



$$\text{扭转应力: } \tau_j = \frac{Mn}{0.2d^3}$$

$$Mn = \frac{P}{2} (\sqrt{R\Delta h} + \mu_1 d)$$

式中:  $Mn$ —轧辊辊颈上的扭转力矩;

$\mu_1$ —轧辊轴承摩擦系数;

$d$ —辊颈直径。

轧辊辊颈的强度, 应该按弯曲和扭转的合成应力进行验算, 故计算的合成应力为:

钢轧辊根据第四强度理论计算合成应力  $\sigma_h$  :

$$\sigma_h = \sqrt{\sigma_j^2 + 3\tau_j^2}$$

铸铁轧辊根据第二强度理论计算合成应力  $\sigma_h$  :

$$\sigma_h = 0.375\sigma_j + 0.625\sqrt{\sigma_j^2 + 4\tau_j^2}$$

辊颈强度条件为:

$$\sigma_h \leq [\sigma]$$

辊头(梅花头)的强度计算

3. 梅花头上的最大应力产生在它的凹槽底部。按通常的梅花头形状, 当

$d_2 = 0.66d_1$  时, 其扭转应力  $\tau$  为:

$$\tau = \frac{Mn}{0.07d_1^3}$$

式中:  $d_1$ —梅花头的外径;

$d_2$ —梅花头凹槽的内接圆直径。

辊头强度条件为:

$$\tau \leq [\tau]$$

式中:  $[\tau]$ —轧辊材料的许用切应力。

钢:  $[\tau] = (0.5—0.6) [\sigma]$

铸铁:  $[\tau] = (0.8—1.0) [\sigma]$

### 2.3.2 金属变形的计算模型

#### 2.3.2.1 轧制道次的确定

$$n = \frac{\lg F_0 - \lg F_n}{\lg u_c}$$

式中：  $n$  —轧制道次；

$F_0$  —坯料断面积；

$F_n$  —成品断面积；

$u_c$  —平均延伸系数，根据经验或同类轧机用类同法选取。

#### 2.3.2.2 道次延伸系数的分配

延伸系数按道次分配的主要依据是：在轧制初期，因轧件温度高，金属的塑性好，变形抗力低，轧辊强度和电机能力不成为限制因素，而炉生氧化铁皮使摩擦系数降低，咬入条件成为限制变形量的主要因素；随着炉生氧化铁皮的脱落，咬入条件得到改善，而此时轧件温度降低不多，故延伸系数可不断增加，并达到最大值；随着轧制过程的继续进行，轧件的断面积逐渐减小，轧件温度降低，变形抗力增加，轧辊强度和电机能力成为限制变形量的主要因素，因此延伸系数降低；在最后几道中，为了减少孔型磨损，保证成品断面的形状和尺寸的精确度，应采用较小的延伸系数。在连轧机上轧制时，由于轧制温度高，轧件温度变化小，所以各道的延伸系数可以配成相等或近似相等。

人工分配完各道次的延伸系数后，要用其连乘积进行校核。若其连乘积等于总延伸系数，则说明确定的各道次的延伸系数是对的；否则需调整各道次的延伸系数，使其连乘积等于总延伸系数，即：

$$\begin{aligned} u_1 \times u_2 \times \cdots \times u_n &= \frac{F_0}{F_n} \\ &= u_z \\ &= u_c^n \end{aligned}$$

式中：  $u_1, u_2 \dots u_n$  —各道次延伸系数；

$u_z$  —总延伸系数。

设人工分配的道次延伸系数满足下列条件：

$$u_1' \times u_2' \times \cdots \times u_n' = A' \quad (2.21)$$

而理论上要求的道次延伸系数应满足如下条件:

$$u_1 \times u_2 \times \cdots \times u_n = A = \frac{F_0}{F_n}$$

若  $A=A'$ , 说明人工分配的各道次延伸系数正确; 若  $A \neq A'$ , 则利用计算机自动进行道次延伸系数的调整, 原理是:

公式 (2.3) 左右两边同乘以  $\frac{A}{A'}$  得:

$$u_1' \times u_2' \times \cdots \times u_n' \times \frac{A}{A'} = A' \times \frac{A}{A'} = A$$

则调整后的道次延伸系数为:

$$\begin{aligned} u_1'' &= \sqrt[n]{\frac{A}{A'}} \cdot u_1' \\ u_2'' &= \sqrt[n]{\frac{A}{A'}} \cdot u_2' \\ &\vdots \\ u_n'' &= \sqrt[n]{\frac{A}{A'}} \cdot u_n' \end{aligned}$$

### 2.3.2.3 孔型中压下量和宽展量的计算方法

#### 1. 外形轮廓法

按轧件的最大外廓尺寸来计算压下量:

$$\Delta h = H - h$$

$$\Delta b = b - B$$

这种方法最简单, 工厂里习惯采用, 但是不够准确.

#### 2. 平均高度法

$$\begin{aligned} \overline{\Delta h} &= \overline{H} - \overline{h} \\ &= \frac{Q}{B} - \frac{q}{b} \end{aligned} \quad (2.22)$$

式中:  $Q$ 、 $B$ —分别为轧制前轧件横断面积和轧件宽度;

$q$ 、 $b$ —分别为轧制后轧件横断面积和轧件宽度;

$\overline{\Delta h}$ —平均压下量;

$\bar{H}$ 、 $\bar{h}$ —分别为轧制前后轧件的平均高度，将轧前、轧后轧件化成等面积、等宽度的矩形计算。

平均高度法即按公式 (2.22) 来计算平均压下量，宽展量为轧后与轧前轧件的最大宽度之差，即

$$\Delta b = b - B$$

### 2.3.2.4 平均工作辊径的计算方法

通常用平均高度法近似确定平均工作辊径  $\bar{D}_k$ ，即把断面较为复杂的孔型的横断面积除以该孔型的宽度  $b$ ，得该孔型的平均高度  $\bar{h}$ ， $\bar{h}$  对应的轧辊直径即为平均工作辊径。

$$\bar{D}_k = D' - \left( \frac{q}{b} - S \right)$$

式中： $D'$ —辊环直径；

$S$ —辊缝值。

### 2.3.2.5 等轴断面轧件的尺寸计算

由于棒材连轧孔型系统为间隔出现方（箱）或圆等等轴断面孔型，因此孔型设计时可以利用这一特点，首先设计出各等轴断面的尺寸，即根据总延伸系数与各道次延伸系数的关系，给定每对方孔（或圆孔）的延伸系数，这样就可以确定出每个间隔方孔（或圆孔）的尺寸。

因为：

$$\begin{aligned} u_z &= u_1 \times u_2 \times u_3 \times \cdots \times u_n \\ &= u_{f2} \times u_{f4} \times u_{f6} \times \cdots \end{aligned}$$

又：

$$\begin{aligned} u_{f2} &= \frac{F_0}{F_1} \cdot \frac{F_1}{F_2} \\ &= u_1 \times u_2 \end{aligned}$$

则：

$$F_2 = \frac{F_0}{u_{f2}}$$

$$a_2 = \sqrt{F_2}$$

或：

$$d_2 = \sqrt{\frac{40}{\pi} F_2}$$

同理: 
$$F_4 = \frac{F_2}{u_{f4}}$$

$$a_4 = \sqrt{F_4}$$

或: 
$$d_4 = \sqrt{\frac{40}{\pi} F_4}$$

...

间隔方孔（或圆孔）的分配，可遵循延伸系数分配的一般原则进行。

设计出各间隔方（或圆）轧件断面尺寸后，就可根据相邻两个方（或圆）轧件的断面形状和尺寸，设计中间断面轧件的断面和尺寸。

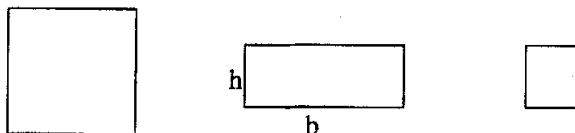
### 2.3.2.6 中间轧件断面尺寸计算

这里所指的中间轧件是两个方轧件（或圆轧件）之间的轧件，可为矩形或椭圆形轧件。在随后所介绍的确定这种中间轧件的断面尺寸，是指确定其断面最高处和最宽处的尺寸。

中间轧件断面尺寸的设计应根据轧件在孔型中的充满条件进行。

中间矩形轧件断面尺寸计算（两方夹一扁）

中间矩形轧件的尺寸应同时保证在本孔和在下一孔型中正确充满，即



$$\beta_1 = \frac{\Delta b_1}{\Delta h_1} = \frac{a - h}{b - a}$$

$$\beta_2 = \frac{\Delta b_2}{\Delta h_2} = \frac{b - A}{A - h}$$

式中:  $\beta_2$ 、 $\beta_1$  —分别为轧件在中间扁孔型和后一方箱孔型中的展宽系数;

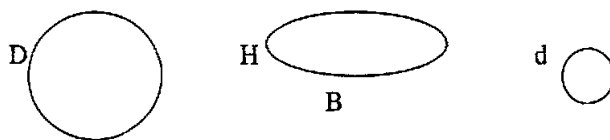
A、a —分别为中间扁孔型前后的方孔的轧件边长。

由上述条件，则可求得轧件在中间扁孔型中的轧件宽度 b 和高度 h。

$$b = \frac{A + A\beta_2 - a\beta_2 - a\beta_2\beta_1}{1 - \beta_2\beta_1}$$

$$h = \frac{a + a\beta_1 - A\beta_1 - A\beta_2\beta_1}{1 - \beta_2\beta_1}$$

中间椭圆形轧件断面尺寸计算（两圆夹一椭）



$$\beta_1 = \frac{\Delta b_1}{\Delta h_1} = \frac{d - h}{b - d}$$

$$\beta_2 = \frac{\Delta b_2}{\Delta h_2} = \frac{b - D}{D - h}$$

式中： $\beta_2, \beta_1$ —分别为轧件在中间椭圆孔型和后一圆孔型中的展宽系数；

D、d—分别为中间椭圆孔型前后的圆孔型的轧件直径。

上式联立求解可得中间椭圆孔型中的轧件宽度 b 和高度 h。

$$b = \frac{D(1 + \beta_2) - \beta_2(1 + \beta_1)d}{1 - \beta_1\beta_2}$$

$$h = d(1 + \beta_1) - \beta_1 b$$

孔型设计时，由于采用不同的宽展公式就形成了不同的孔型设计方法。需说明的是，在中间断面尺寸的设计时，计算宽展量用的是日兹宽展公式。

间隔方（或圆）和中间扁（或椭圆）轧件的断面尺寸计算完毕后，就可根据已确定的轧件断面形状和尺寸进行孔型的构成。

### 2.3.3 孔型系统的确定

根据首钢型材二厂的实际情况，粗轧机组采用箱形（平箱—立箱交替）孔型系统，精轧机组选用椭圆—立椭圆孔型系统。为便于本软件也可以推广到首钢各线材厂，供孔型设计时使用，精轧机组增设椭圆—圆孔型系统，粗轧机组仍沿用箱形（平箱—立箱交替）孔型系统。

#### 2.3.3.1 箱形孔型系统

##### 1. 特点

(1) 用改变辊缝的办法可以轧制多种尺寸不同的轧件,共用性好。这样可以减少孔型数量,减少换孔或换辊次数,提高轧机的利用率。

(2) 在轧件整个宽度上变形均匀,因此孔型磨损均匀,且变形能耗少。

(3) 轧件侧表面的氧化铁皮易于脱落,这对改变轧件表面质量是有益的。

(4) 与相等断面面积的其它孔型相比,箱形孔型在轧辊上的切槽浅轧辊强度较高,故允许采用较大的道次变形量。

(5) 轧件断面温度降较为均匀。

2. 轧件在箱形孔型中的变形系数

(1)延伸系数  $\mu$

轧件在箱形孔型中的延伸系数一般采用  $\mu = 1.15 \sim 1.6$ , 其平均延伸系数可取  $1.15 \sim 1.4$ 。

(2)宽展系数  $\beta$

轧件在箱形孔型中的宽展系数  $\beta = 0 \sim 0.45$ 。在不同情况下  $\beta$  的取值范围如表 2.6 所示。

表 2.6 不同轧值条件下的宽展系数  
table 2.6 expansion coefficient under different rolling conditions

| 轧制条件         | 型钢轧机轧前钢坯  |         |
|--------------|-----------|---------|
|              | 扁箱形孔型     | 方箱形孔型   |
| 宽展系数 $\beta$ | 0.25—0.45 | 0.2—0.3 |

2.3.3.2 椭圆—立椭圆孔型系统

1. 特点

- (1) 轧件变形均匀
- (2) 易于去除轧件表面氧化铁皮, 成品表面质量好。
- (3) 椭圆件在立椭孔型中能自动找正, 轧制稳定。
- (4) 轧件与孔型的接触线长, 因而轧件宽展较小。
- (5) 轧件的表面缺陷如裂纹、折迭等较少。

2. 轧件在椭圆—立椭圆孔型系统的延伸系数主要取决于平椭圆孔型的宽高比,

其值为  $1.8 \sim 3.5$ 。平均延伸系数为  $1.15 \sim 1.34$ 。

轧件在平椭孔型的延伸系数  $\mu_t = 1.15 \sim 1.55$  , 一般用  $\mu_t = 1.17 \sim 1.34$  。

轧件在立椭孔型中的延伸系数  $\mu_l = 1.16 \sim 1.45$  , 一般用  $\mu_l = 1.16 \sim 1.27$  。

### 2.3.3.3 椭圆—圆孔型系统

#### 1. 特点

(1) 变形较均匀, 轧制前后轧件的断面形状能平滑地过渡, 可防止产生局部应力。

(2) 由于轧件没有明显的棱角, 轧件变形和冷却比较均匀, 轧制中有利于去除轧件表面的氧化铁皮, 成品表面质量好。

(3) 在某些情况下, 可由延伸孔型轧出成品圆钢, 故共用性较大。

#### 2. 轧件在椭圆—圆孔型系统的变形系数

##### (1) 延伸系数

轧件在椭圆孔型中的延伸系数  $\mu_l = 1.2 \sim 1.6$

轧件在圆孔型中的延伸系数  $\mu_y = 1.2 \sim 1.4$

##### (2) 宽展系数

轧件在椭圆孔型中的宽展系数  $\beta_l = 0.5 \sim 0.95$

轧件在圆孔型中的宽展系数  $\beta_y = 0.3 \sim 0.4$

### 2.3.4 孔型的构成

#### 2.3.4.1 箱形孔型的构成

##### 1. 孔形高度 $h$ 等于轧件轧后高度

##### 2. 槽底凸度(平箱孔)

$$f = 2 \sim 6 \text{ mm}$$

一般在轧制顺序前面孔型中的  $f$  值取大些, 在后面取小些, 轧制普碳钢时  $f$  取大些; 轧合金钢时取小些, 或  $f=0$ 。方箱孔的  $f=0$ 。

##### 3. 槽底宽度 $b_k$

$$b_k = B - (0 \sim 6) \text{ mm}$$

式中:  $B$ —来料宽度。

在确定  $b_k$  时, 最好使来料与孔型槽底和两侧壁同时接触, 以保证轧件在孔型中轧制稳定。

##### 4. 槽口宽度 $B_k$

$$B_k = b + \Delta \text{ mm}$$

式中:  $b$ —轧件轧后宽度;

$\Delta$ —展宽余量, 取  $5 \sim 12 \text{ mm}$ 。



### 2.3.3.3 椭圆—圆孔型系统

#### 1. 特点

(1) 变形较均匀, 轧制前后轧件的断面形状能平滑地过渡, 可防止产生局部应力。

(2) 由于轧件没有明显的棱角, 轧件变形和冷却比较均匀, 轧制中有利于去除轧件表面的氧化铁皮, 成品表面质量好。

(3) 在某些情况下, 可由延伸孔型轧出成品圆钢, 故共用性较大。

#### 2. 轧件在椭圆—圆孔型系统的变形系数

##### (1) 延伸系数

轧件在椭圆孔型中的延伸系数  $\mu_t = 1.2 \sim 1.6$

轧件在圆孔型中的延伸系数  $\mu_y = 1.2 \sim 1.4$

##### (2) 宽展系数

轧件在椭圆孔型中的宽展系数  $\beta_t = 0.5 \sim 0.95$

轧件在圆孔型中的宽展系数  $\beta_y = 0.3 \sim 0.4$

### 2.3.4 孔型的构成

#### 2.3.4.1 箱形孔型的构成

##### 1. 孔形高度 $h$ 等于轧件轧后高度

##### 2. 槽底凸度(平箱孔)

$$f = 2 \sim 6 \text{ mm}$$

一般在轧制顺序前面孔型中的  $f$  值取大些, 在后面取小些, 轧制普碳钢时  $f$  取大些; 轧合金钢时取小些, 或  $f=0$ 。方箱孔的  $f=0$ 。

##### 3. 槽底宽度 $b_k$

$$b_k = B - (0 \sim 6) \text{ mm}$$

式中:  $B$ —来料宽度。

在确定  $b_k$  时, 最好使来料与孔型槽底和两侧壁同时接触, 以保证轧件在孔型中轧制稳定。

##### 4. 槽口宽度 $B_k$

$$B_k = b + \Delta \text{ mm}$$

式中:  $b$ —轧件轧后宽度;

$\Delta$ —展宽余量, 取  $5 \sim 12 \text{ mm}$ 。

### 5. 侧壁斜度 $\varphi$

一般用 10—25% , 个别可大些。

### 6. 内外圆角半径 R 和 r

$$R=0.1-0.2h; r=0.05-0.15h$$

## 2.3.4.2 椭圆孔型的构成

### 1. 孔型宽度 $b_k = (1.088-1.11) b$

相当于孔型的充满度  $\delta = \frac{b}{b_k} = 0.9-0.92$  , 即希望立椭圆孔型中给轧件留一些

展宽余量。

通常使用的孔型  $\delta = 0.69-1$  , 以  $\delta = 0.8-0.9$  较好, 这样椭圆件两侧不会太尖, 对轧件两侧温降不会太快。

### 2. 孔型高度 h

等于椭圆轧件的轧后高度

### 3. 辊缝 S

$$S=(0.2-0.3)h$$

### 4. 圆弧半径 R

$$R = \frac{(h-s)^2 + b_k^2}{4(h-s)}$$

### 5. 椭圆轧件断面积 $F_t$

$$F_t = \frac{2}{3} b (h-s) + sb$$

## 2.3.4.3 立椭圆孔型的构成

### 1. 孔型高度 $H_K$

与轧出轧件的高度 H 相等

### 2. 孔型宽度 $B_K$

$$B_K = (1.055-1.1) b$$

### 3. 弧形侧壁半径

$$R_1 = (0.7-1.0) B_K$$

$$R_2 = (0.2-0.25) R_1$$

4. 外圆角半径  $r$ 

$$r = (0.5 \sim 0.75) R$$

5. 辊缝  $S$ 

$$S = (0.1 \sim 0.25) H_K$$

## 2.3.4.4 圆孔型的构成

1. 孔型高度  $h_k$ 

$$h_k = \sqrt{\frac{F_y}{3.14}} = 2R$$

式中  $F_y$  — 圆断面轧件的断面积。

2. 孔型宽度  $b_k$ 

$$b_k = 2R + \Delta$$

式中:  $\Delta$  — 展宽余量, 可取  $\Delta = 2 \sim 4 \text{ mm}$ 。

3. 扩张半径  $R'$ 

$$R' = \frac{b_k^2 + s^2 + 4R^2 - 4R(\sin \alpha + b_k \cos \alpha)}{8R - 4(\sin \alpha + b_k \cos \alpha)}$$

4. 扩张角  $\alpha$ 

$$\alpha = 15^\circ \sim 30^\circ, \text{ 通常取 } \alpha = 30^\circ.$$

5. 外圆角半径  $r$ 

$$r = 2 \sim 5 \text{ mm}$$

6. 辊缝  $S$ 

$$S = 2 \sim 5 \text{ mm}$$

## 2.3.4.5 成品圆孔的构成

1. 孔型宽度  $B_K$ 

$$B_K = [d_0 + (0.5 \sim 1.0) \Delta^+] \times (1.011 \sim 1.014)$$

2. 孔型高度  $h$ 

$$h = 2r = d_0 (1.011 \sim 1.014)$$

式中:  $d_0$  — 标准直径;

$\Delta^+$  — 正公差;

$r$  —基圆半径。

3. 张开角  $\alpha$

$$\alpha = 25^\circ - 30^\circ \quad (\text{多用 } 30^\circ)$$

4. 槽口倒角  $r'$

$r'=0$ , 有利于增大调整范围或防止出耳子。或  $r'=(0.5-1.0) \text{ mm}$

5. 基圆半径  $r$

$$r = \frac{\sqrt{(h-S)^2 + (2B_k - \sqrt{3}h)^2}}{8\cos(60^\circ + \arctg \frac{2B_k - \sqrt{3}h}{h-2S})}$$

6. 辊缝  $S$

见表 2.7。

表 2.7 圆钢成品孔型辊缝值  $S$

table 2.7 round steel finished product roll pass roller slot value  $S$

| $d \text{ (mm)}$ | 6—12 | 12—18 | 18—25 | 25—30 | 32—50 | 60—80 |
|------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $S \text{ (mm)}$ | 1    | 1.5   | 2     | 2.5   | 3—4   | 4—5   |

## 2.3.5 绘制孔型的坐标点的几何关系

### 2.3.5.1 箱形孔

绘制箱形孔所需的坐标点如图 2.1 所示:

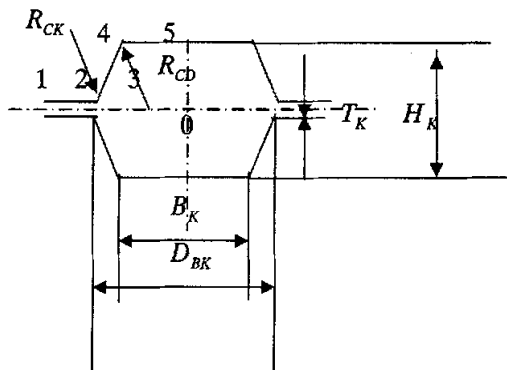


图 2.1 箱形孔孔型构成和坐标点选择

fig. 2.1 composing of box-shape roll pass and coordinate dot choose

$$x_1 = x_0 - 0.5 D_{BK} - 1.5 T_K$$

$$y_1 = y_0 + 0.5 T_K$$



$$x_1 = x_0 - 0.5 B_k - 1.5 T_K$$

$$y_1 = y_0 + 0.5 T_K$$

$$x_3 = x_0 - 0.5 B_k$$

$$y_3 = y_0 + 0.5 T_K$$

$$x_5 = x_0$$

$$y_5 = y_0 + 0.5 H_K$$

$$x_{01} = x_0$$

$$y_{01} = y_5 - D_K$$

$$y_{02} = y_1 + R_{ck}$$

$$y_l = \frac{D_R (y_{02} - y_{01})}{D_R + R_{CK}}$$

$$x_l = \sqrt{D_R^2 - y_l^2}$$

$$\Delta_x = x_l \frac{R_{CK}}{D_R}$$

$$x_{02} = x_{01} - x_l - \Delta_x$$

$$x_2 = x_{02} \quad y_2 = y_1$$

$$x_4 = x_2 + \Delta_x$$

$$y_4 = y_{01} + y_l$$

式中:  $R_{ck}$  — 外圆角;

$D_R$  — 圆弧半径。

### 2.3.5.3 圆孔

在对称的四分之一断面内圆孔各坐标点的几何关系如图 2.3 所示:

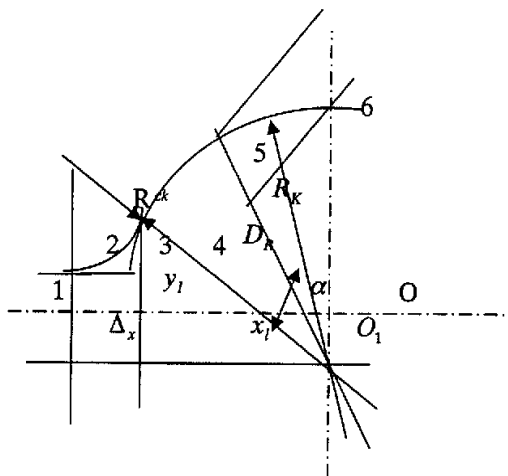


图 2.3 圆孔各坐标点的几何关系

fig. 2.3 round hole geometry relations of different coordinate dots

$$x_0=0 \quad y_0=0$$

$$x_1 = x_0 - 0.5 B_k - 1.5 T_K$$

$$y_1 = y_0 + 0.5 T_K$$

$$x_3 = x_0 - 0.5 B_k$$

$$y_3 = y_0 + 0.5 T_K$$

$$x_5 = x_0 - R_5 \cdot \cos \alpha$$

$$y_5 = y_0 + R_k \cdot \sin \alpha$$

$$x_6 = x_0$$

$$y_6 = y_0 + R_k$$

$$x_2 = x_{02} = x_{01} - x_l - \Delta x$$

$$y_2 = y_1$$

$$x_4 = x_2 + \Delta x$$

$$y_4 = y_{01} + y_l$$

$$y_l = D_R \frac{y_{02} - y_{01}}{D_R + R_{CK}}$$

$$x_l = \sqrt{D_R^2 - y_l^2}$$

$$\Delta x = x_l \frac{R_{CK}}{D_R}$$

$$y_{01} = y_5 - D_R$$

$$y_{02} = y_1 + R_{ck}$$

式中:  $\alpha$  —扩张角;

$R_k$  —基圆半径;

$B_k$  —孔型宽度;

$R_{ck}$  —外圆角半径;

$D_R$  —扩张半径。

### 2.3.6 连轧机秒流量相等原则

连轧机各机架顺序排列, 轧件同时通过数架轧机进行轧制。连续轧制时, 随着轧件断面的压缩, 轧制速度递增, 保持正常的轧制条件就必须遵守轧件在轧制线上每一机架的“秒流量保持相等的原则”。

$$F_1 V_1 = F_2 V_2 = \cdots = F_n V_n \quad (2.23)$$

式中: 1, 2, ..., n —沿轧制方向的轧机序号;

$F_1, F_2, \cdots, F_n$  —轧件通过各机架时的轧件出口断面积;

$V_1, V_2, \cdots, V_n$  —轧件通过各机架时的出口轧制速度;

$F_1 V_1, F_2 V_2, \cdots, F_n V_n$  —轧件在各机架轧制时的秒流量。

已知:

$$V_1 = \frac{\pi D_1 n_1}{60}, V_2 = \frac{\pi D_2 n_2}{60}, \cdots, V_n = \frac{\pi D_n n_n}{60}$$

代入公式 (2.23) 得:

$$F_1 D_1 n_1 = F_2 D_2 n_2 = \cdots = F_n D_n n_n$$

式中:  $D_1, D_2, \cdots, D_n$  —各机架的轧辊工作直径;



$$y_4 = y_{01} + y_l$$

$$y_l = D_R \frac{y_{02} - y_{01}}{D_R + R_{CK}}$$

$$x_l = \sqrt{D_R^2 - y_l^2}$$

$$\Delta x = x_l \frac{R_{CK}}{D_R}$$

$$y_{01} = y_5 - D_R$$

$$y_{02} = y_1 + R_{ck}$$

式中:  $\alpha$  —扩张角;

$R_k$  —基圆半径;

$B_k$  —孔型宽度;

$R_{ck}$  —外圆角半径;

$D_R$  —扩张半径。

### 2.3.6 连轧机秒流量相等原则

连轧机各机架顺序排列, 轧件同时通过数架轧机进行轧制。连续轧制时, 随着轧件断面的压缩, 轧制速度递增, 保持正常的轧制条件就必须遵守轧件在轧制线上每一机架的“秒流量保持相等的原则”。

$$F_1 V_1 = F_2 V_2 = \cdots = F_n V_n \quad (2.23)$$

式中: 1, 2, ..., n —沿轧制方向的轧机序号;

$F_1, F_2, \cdots, F_n$  —轧件通过各机架时的轧件出口断面积;

$V_1, V_2, \cdots, V_n$  —轧件通过各机架时的出口轧制速度;

$F_1 V_1, F_2 V_2, \cdots, F_n V_n$  —轧件在各机架轧制时的秒流量。

已知:

$$V_1 = \frac{\pi D_1 n_1}{60}, V_2 = \frac{\pi D_2 n_2}{60}, \cdots, V_n = \frac{\pi D_n n_n}{60}$$

代入公式 (2.23) 得:

$$F_1 D_1 n_1 = F_2 D_2 n_2 = \cdots = F_n D_n n_n$$

式中:  $D_1, D_2, \cdots, D_n$  —各机架的轧辊工作直径;

$n_1, n_2 \dots, n_n$ —各机架的轧辊转速。

考虑到前滑影响时, 轧辊线速度与轧件运动速度间的关系为:

$$V_1' = (1 + S_1) V_1, V_2' = (1 + S_2) V_2 \dots, V_n' = (1 + S_n) V_n$$

故可得考虑前滑影响时的秒流量不变方程式应为

$$F_1 D_1 n_1 (1 + S_1) = F_2 D_2 n_2 (1 + S_2) = \dots = F_n D_n n_n (1 + S_n) = C$$

式中: C—连轧常数。

可以判断, 按轧制顺序前滑的数值是逐道增加的, 即

$$S_1 < S_2 < \dots < S_n$$

$S_1$  由于前滑计算非常复杂, 计算结果也不十分精确, 故连轧计算中假设前滑值等于零, 这样与实际生产中连轧之间存在少量的拉力是不发生矛盾的。

在实际连轧工作中, 由于轧制时的前滑、钢种、轧制温度、孔型磨损以及调整等因素的变化, 长时间保持理论上的秒流量相等使连轧常数恒定是相当困难的, 甚至是办不到的。只能做到秒流量近似相等, 即连续轧制只能处于动态平衡之中。为了使轧制过程能够顺利进行, 常有意识地采用堆钢或拉钢的操作技术。一般在连续轧机上, 机组与机组之间采用堆钢轧制, 而机组内的机架与机架之间采用拉钢轧制。当轧制小型断面钢材时, 为了保证轧件断面尺寸精确, 应该绝对禁止有拉钢现象存在, 而必须使之稍有堆钢; 对于大、中断面轧件, 为了避免损坏设备, 允许稍有拉钢现象存在。

堆钢对钢材断面精度有好处, 但由于断面小, 速度快, 不易操作, 容易造成人身、设备事故, 影响作业率; 如果在直线连轧存在拉钢, 设备负荷增加, 对设备的薄弱环节—轧辊、减速机、轴承的损坏特别严重, 也会造成设备事故增加, 轧机的作业率下降。

在可以进行单机调速的连轧机上, 可以通过直流电机进行自动调整, 以保证连轧常数的稳定性。

一般在孔型设计完毕后, 在保持各架轧机连轧常数相等的情况下, 按下式计算出相应各架连轧机的轧辊转数, 即

$$n = \frac{C}{FD}$$

式中:  $n$ 、 $F$ 、 $D$ —任意一架连轧机的轧辊转数、轧件断面积、轧辊平均工作直径。

连轧常数  $C$  根据精轧机计算, 即:

$$C = F_n D_n n_n$$

式中:  $n_n$ —是根据精轧成品道次的轧制速度  $v_n$  计算出来的, 即  $n_n = \frac{60v_n}{\pi D_n}$ , 而  $v_n$  是根据

具体的轧制条件选取的。

### 2.3.7 孔型设计的程序

#### 2.3.7.1 了解产品的技术条件

包括产品的断面形状、尺寸及其允许偏差，也包括对产品表面质量、金相组织和性能的要求；对某些产品还应了解用户的使用情况极其特殊要求。

#### 2.3.7.2 了解原料条件

包括已有钢坯的形状和尺寸，或者是按孔型设计要求重新选定原料的规格。

#### 2.3.7.3 了解轧机的性能及其它设备条件

包括轧机的布置、机架数、辊径、辊身长度、轧制速度、电机能力、加热炉、移钢和翻钢设备、工作辊道和延伸辊道、剪切机的性能以及车间平面布置情况等。

#### 2.3.7.4 选择合理的孔型系统

选择孔型系统是孔型设计的关键步骤之一。对于新产品，设计孔型之前应该了解类似产品的轧制情况及其存在的问题。在品种多、但产量要求不高的轧机上，应该采用共用性大的孔型系统，这样可以减少换辊次数和轧辊的储备量。但在品种比较单一，即专业化较高的轧机上，应该尽量采用专用的孔型系统，以排除其它产品的干扰，使产量提高。

#### 2.3.7.5 总轧制道次的确定

孔型系统选择之后，必须首先确定轧制该产品时所采用的总轧制道次数及按道次分配变形量。

轧制道次数应取整数，具体应取奇数还是偶数则取决于轧机的布置形式。

#### 2.3.7.6 各道次变形量的分配

分配各道次变形量主要考虑以下几个问题：

1. 金属的塑性
2. 咬入条件
3. 轧辊强度和电机能力
4. 孔型的磨损

不难看出，影响道次变形量的因素是很复杂的，经常是各种因素综合起作用。

### 2.3.7.7 确定轧件的断面形状和尺寸

根据各道次的延伸系数确定各道次轧件的断面积，然后按照轧件的断面积及其变形关系确定轧件的断面形状和尺寸。

### 2.3.7.8 确定孔型的形状和尺寸

根据轧件的断面形状和尺寸确定孔型的形状和尺寸，并构成孔型。应指出，有时孔型设计是根据经验数据直接确定孔型尺寸及其构成，这时可不事先确定轧件的尺寸。

### 2.3.7.9 绘制配辊图

把设计出的孔型按一定规格配置在轧辊上，并绘制配辊图。

### 2.3.7.10 进行必要的校核

对咬入条件和电机负荷进行校核，必要时，也要对轧辊强度等约束条件进行校核。

### 2.3.7.11 轧辊辅件设计

根据孔型图和配辊图设计导卫装置、检测样板等辅件并构图

## 3 棒材孔型计算机辅助系统设计

### 3.1 CARD 系统的功能要求

CARD 是 CAD 在轧制工程领域的具体应用,是专业技术和计算机技术、优化技术的有机组合。研制和开发 CARD 系统时,不仅要求软件具有良好的设计、绘图功能,还应注重辅助管理功能。一般要求 CARD 系统的功能有:

- (1) 强大的计算功能。能够快速地进行复杂的变形系数、力能参数等的计算。
- (2) 完善的图形处理功能。这些功能主要有图形的屏幕显示、图形的实时修改以及结果的图形输出。
- (3) 友好的人机界面,便于用户对话和操作。
- (4) 丰富的在线帮助功能,便于初次使用者对设计过程的了解和监督,减少不必要的错误发生。
- (5) 完好的软硬件兼容性,具有较好的适用范围。
- (6) 良好的可维护性、可扩充性。

### 3.2 CARD 系统支持软件的选择

CARD 系统功能的完好与否同用所选用的软件有着直接的关系,一般涉及到以下方面:

#### 3.2.1 编程语言的选择

根据 CARD 系统的功能要求,在研制开发棒材连轧 CARD 系统时,决定采用 Microsoft 公司的 Windows2000 平台下的 Visual Basic 6.0 作为编程语言。

Visual Basic 是最早使用面向对象编程的语言之一,它同早期的 Basic、C 语言的根本区别是事件驱动语言同过程化语言之间的区别。用过程化语言编写的程序执行时是一次次按顺序进行的,只有子程序的调用和转向语句才能改变逻辑流程,打断顺序序列。但总地来说,程序是处于过程化的逻辑流程的控制之中。而 Visual Basic 是一种事件驱动语言,程序指令只在某个特殊事件调用该程序代码时才执行。事件驱动程序不是一系列由上至下顺序执行的指令集合,而是包括多个不独立的过程,每一过程都与定义于应用程序用户界面上的一个对象相关联。Visual

## 3 棒材孔型计算机辅助系统设计

### 3.1 CARD 系统的功能要求

CARD 是 CAD 在轧制工程领域的具体应用,是专业技术和计算机技术、优化技术的有机组合。研制和开发 CARD 系统时,不仅要求软件具有良好的设计、绘图功能,还应注重辅助管理功能。一般要求 CARD 系统的功能有:

- (1) 强大的计算功能。能够快速地进行复杂的变形系数、力能参数等的计算。
- (2) 完善的图形处理功能。这些功能主要有图形的屏幕显示、图形的实时修改以及结果的图形输出。
- (3) 友好的人机界面,便于用户对话和操作。
- (4) 丰富的在线帮助功能,便于初次使用者对设计过程的了解和监督,减少不必要的错误发生。
- (5) 完好的软硬件兼容性,具有较好的适用范围。
- (6) 良好的可维护性、可扩充性。

### 3.2 CARD 系统支持软件的选择

CARD 系统功能的完好与否同用所选用的软件有着直接的关系,一般涉及到以下方面:

#### 3.2.1 编程语言的选择

根据 CARD 系统的功能要求,在研制开发棒材连轧 CARD 系统时,决定采用 Microsoft 公司的 Windows2000 平台下的 Visual Basic 6.0 作为编程语言。

Visual Basic 是最早使用面向对象编程的语言之一,它同早期的 Basic、C 语言的根本区别是事件驱动语言同过程化语言之间的区别。用过程化语言编写的程序执行时是一次次按顺序进行的,只有子程序的调用和转向语句才能改变逻辑流程,打断顺序序列。但总地来说,程序是处于过程化的逻辑流程的控制之中。而 Visual Basic 是一种事件驱动语言,程序指令只在某个特殊事件调用该程序代码时才执行。事件驱动程序不是一系列由上至下顺序执行的指令集合,而是包括多个不独立的过程,每一过程都与定义于应用程序用户界面上的一个对象相关联。Visual

Basic 是通过建立一个事件驱动的环境,供用户直接调用。程序设计者只需专注于数据的运算处理。根据 CARD 系统的发展现状,人一机对话的交互式 CARD 系统还会在一定时期内占主要地位,这就需要有良好的人机界面作为基础。Visual Basic 采用图形化界面,是 Windows 环境下最具亲和力的程序语言。它不但吸收了 C 语言语句丰富的长处,具有强大的功能,而且继承了 Visual Basic 语言简单易学的优点,编程效率较高,这将极大地缓和本软件在开发时间上所受的限制。Windows 2000 平台下的 Visual Basic 6.0 新软件产品,是 90 年代最为流行的操作系统和编程语言之一,它相对于 Visual Basic 早期的版本功能更强大。因此 Visual Basic 是开发棒材连轧 CARD 系统的较为理想的语言。

### 3.2.2 图形支持软件的选择

计算机图形支持软件主要有以下形式:

#### 3.2.2.1 用高级语言绘图

高级语言一般都有较强的绘图功能,可将设计结果直接在屏幕上绘出,这种绘图方法在人一机交互式的 CARD 软件中具有直观、灵活、占用内存少等优点,但输出到打印机或绘图仪时精度较差,仅用于过程显示。

#### 3.2.2.2 用高级语言调用绘图仪指令绘图

用高级语言调用绘图仪指令绘图,可直接将设计结果绘成图形输出,速度快,精度较好,但一个绘图程序只能用于一种绘图仪或一系列与其兼容的绘图仪,可移植性差,给软件的推广应用带来了阻力。

#### 3.2.2.3 应用功能完备的绘图软件包绘图

绘图软件包具有很强的人一机对话功能,可与多种语言建立接口,将设计结果很快绘成图形,对硬件的适应性较强,可移植性好,增大了软件的适用范围。

在设计棒材连轧 CARD 系统时,一方面要考虑屏幕图形的处理,另一方面还要考虑图形的输出。综合考虑上述支持软件,决定采用绘图软件包绘图,具体选用目前在微机上广泛使用的 Autodesk 公司的 Auto CAD 14.0 图形软件包作为图形支持软件,实现 CARD 系统的绘图功能。Auto CAD 是当前最为流行的 CAD 软件包,在我国几乎可称为是中国微机 CAD 的标准。应用范围包括机械、电子、航天、造船、建筑、土木等所有的工程设计领域。其主要特点是:

Basic 是通过建立一个事件驱动的环境,供用户直接调用。程序设计者只需专注于数据的运算处理。根据 CARD 系统的发展现状,人一机对话的交互式 CARD 系统还会在一定时期内占主要地位,这就需要有良好的人机界面作为基础。Visual Basic 采用图形化界面,是 Windows 环境下最具亲和力的程序语言。它不但吸收了 C 语言语句丰富的长处,具有强大的功能,而且继承了 Visual Basic 语言简单易学的优点,编程效率较高,这将极大地缓和本软件在开发时间上所受的限制。Windows 2000 平台下的 Visual Basic 6.0 新软件产品,是 90 年代最为流行的操作系统和编程语言之一,它相对于 Visual Basic 早期的版本功能更强大。因此 Visual Basic 是开发棒材连轧 CARD 系统的较为理想的语言。

### 3.2.2 图形支持软件的选择

计算机图形支持软件主要有以下形式:

#### 3.2.2.1 用高级语言绘图

高级语言一般都有较强的绘图功能,可将设计结果直接在屏幕上绘出,这种绘图方法在人一机交互式的 CARD 软件中具有直观、灵活、占用内存少等优点,但输出到打印机或绘图仪时精度较差,仅用于过程显示。

#### 3.2.2.2 用高级语言调用绘图仪指令绘图

用高级语言调用绘图仪指令绘图,可直接将设计结果绘成图形输出,速度快,精度较好,但一个绘图程序只能用于一种绘图仪或一系列与其兼容的绘图仪,可移植性差,给软件的推广应用带来了阻力。

#### 3.2.2.3 应用功能完备的绘图软件包绘图

绘图软件包具有很强的人一机对话功能,可与多种语言建立接口,将设计结果很快绘成图形,对硬件的适应性较强,可移植性好,增大了软件的适用范围。

在设计棒材连轧 CARD 系统时,一方面要考虑屏幕图形的处理,另一方面还要考虑图形的输出。综合考虑上述支持软件,决定采用绘图软件包绘图,具体选用目前在微机上广泛使用的 Autodesk 公司的 Auto CAD 14.0 图形软件包作为图形支持软件,实现 CARD 系统的绘图功能。Auto CAD 是当前最为流行的 CAD 软件包,在我国几乎可称为是中国微机 CAD 的标准。应用范围包括机械、电子、航天、造船、建筑、土木等所有的工程设计领域。其主要特点是:



- (1) 具有良好的工作界面及强大的绘图与图形编辑功能;
- (2) 既可实现交互式绘图, 又可实现自动绘图;
- (3) 结构开放性好, 可与用其它语言编写的 CAD 系统或 CAM 系统连接, 进行数据交换, 为用户开辟了在其基础上进行应用开发的广阔前景;
- (4) 软件易于掌握。

另外, 由于 Auto CAD 能够支持多种打印机和绘图仪, 这将大大提高棒材连轧 CARD 系统的通用性。

### 3.2.3 图形软件与高级语言的连接

要想使绘图软件真正起到计算机辅助设计的作用, 就必须赋予它“参数制图”的能力。就是说设计者只需给出参数(如孔型设计中轧件的高度、宽度、辊缝等等), 便可得到所要求的图形。但实际上一般说来象 Auto CAD 这类的微机图形软件本身的计算功能较差, 要想实现参数制图还不得不借助于象 FORTRAN、BASIC 等计算功能较强的高级语言。这实质上是要求图形软件具有与高级语言连接的“接口”, 用户给出参数, 经高级语言程序处理后, 生成某种 Auto CAD 所能接受的文件, 送入计算生成所要求的图形。

为此, Auto CAD 系统提供了与高级语言结合的“接口”, 这种“接口”就是 Auto CAD 系统的命令文件(.SCR)。本设计采用 Visual Basic 6.0 编写绘制孔型系统图的命令文件(.SCR), 然后通过按钮选项直接进入 Auto CAD 14.0 中, 从其 TOOLS 菜单中选择 RUN SCRIPT 命令(或在命令状态下运行 SCRIPT 命令), 调入该命令文件进行绘图。

## 3.3 计算机辅助孔型设计系统的功能

计算机辅助孔型设计系统, 即 CARD 程序设计软件是由一系列具有各种功能的模块组成的。所谓模块, 就是利用高级语言编写的子程序, 在设计过程中根据需要不断地调用它们, 以便完成确定的设计任务。根据功能的不同, 可将所有模块分成三大部分, 即设计计算部分, 逻辑判断部分和输入、输出部分。图 3-1 即为 CARD 程序设计软件的功能。



- (1) 具有良好的工作界面及强大的绘图与图形编辑功能;
- (2) 既可实现交互式绘图, 又可实现自动绘图;
- (3) 结构开放性好, 可与用其它语言编写的 CAD 系统或 CAM 系统连接, 进行数据交换, 为用户开辟了在其基础上进行应用开发的广阔前景;
- (4) 软件易于掌握。

另外, 由于 Auto CAD 能够支持多种打印机和绘图仪, 这将大大提高棒材连轧 CARD 系统的通用性。

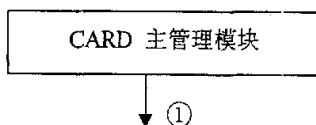
### 3.2.3 图形软件与高级语言的连接

要想使绘图软件真正起到计算机辅助设计的作用, 就必须赋予它“参数制图”的能力。就是说设计者只需给出参数(如孔型设计中轧件的高度、宽度、辊缝等等), 便可得到所要求的图形。但实际上一般说来象 Auto CAD 这类的微机图形软件本身的计算功能较差, 要想实现参数制图还不得不借助于象 FORTRAN、BASIC 等计算功能较强的高级语言。这实质上是要求图形软件具有与高级语言连接的“接口”, 用户给出参数, 经高级语言程序处理后, 生成某种 Auto CAD 所能接受的文件, 送入计算生成所要求的图形。

为此, Auto CAD 系统提供了与高级语言结合的“接口”, 这种“接口”就是 Auto CAD 系统的命令文件(.SCR)。本设计采用 Visual Basic 6.0 编写绘制孔型系统图的命令文件(.SCR), 然后通过按钮选项直接进入 Auto CAD 14.0 中, 从其 TOOLS 菜单中选择 RUN SCRIPT 命令(或在命令状态下运行 SCRIPT 命令), 调入该命令文件进行绘图。

## 3.3 计算机辅助孔型设计系统的功能

计算机辅助孔型设计系统, 即 CARD 程序设计软件是由一系列具有各种功能的模块组成的。所谓模块, 就是利用高级语言编写的子程序, 在设计过程中根据需要不断地调用它们, 以便完成确定的设计任务。根据功能的不同, 可将所有模块分成三大部分, 即设计计算部分, 逻辑判断部分和输入、输出部分。图 3-1 即为 CARD 程序设计软件的功能。



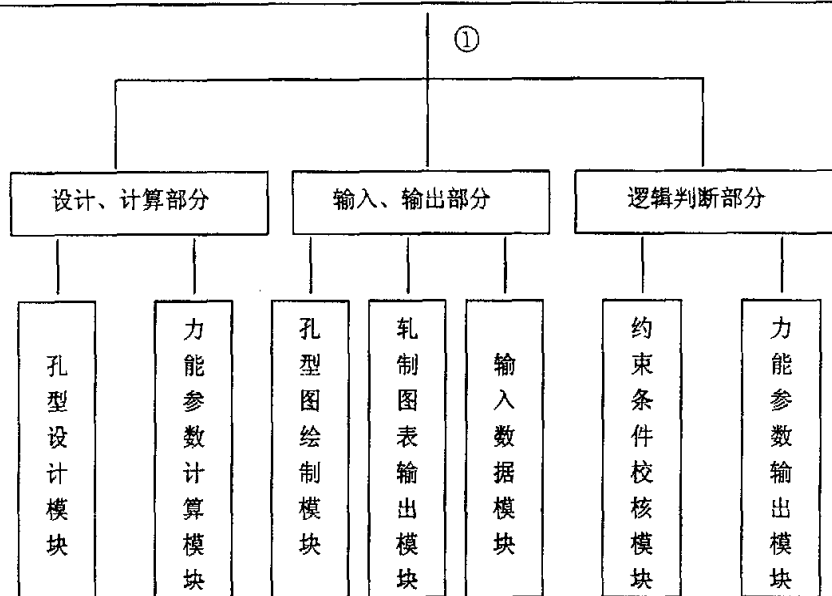


图 3.1 CARD 程序设计软件的功能

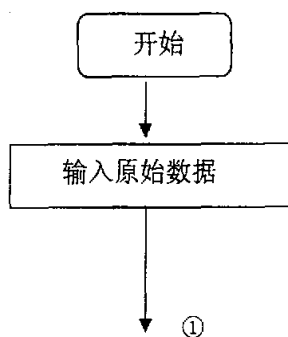
fig. 3.1 the function of CARD programming design software

### 3.3.1 主管理模块

此模块的功能是在整个设计过程中根据设计人员的需要,将各个相对独立的模块有机地联系起来,从而实现程序的各种功能。主管理模块采用汉字提示的菜单方式运行,设计人员根据需要选用适当的选项即可进行相应的操作。

### 3.3.2 输入数据模块

此模块可完成系统所需的工艺及设备原始参数的输入,程序框图见图 3-2。



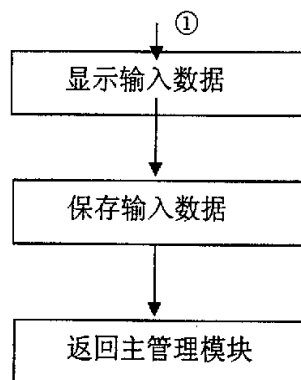
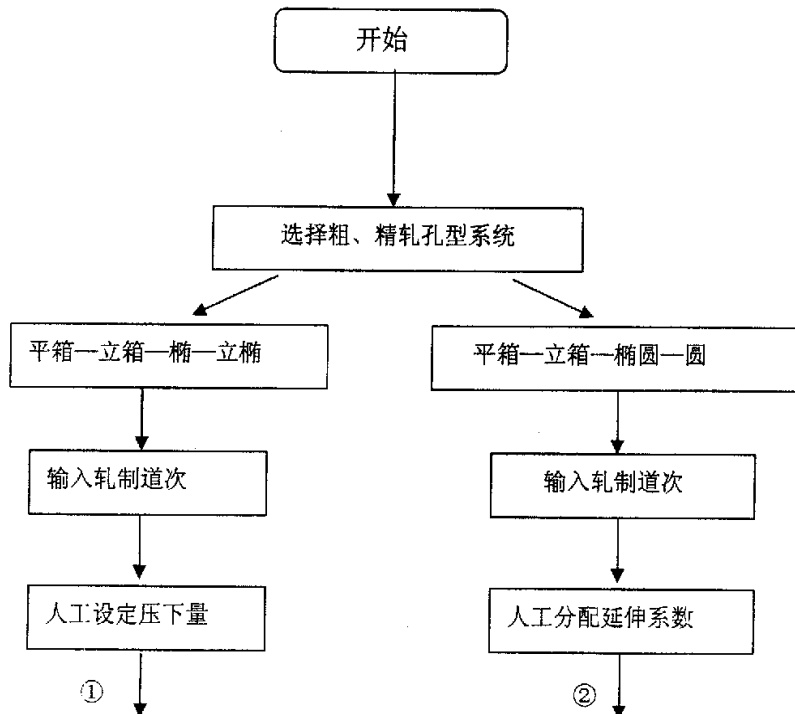


图 3.2 输入数据模块程序框图  
graph 3.2 program frame of data input module

### 3.3.3 孔型设计模块

该模块用于进行孔型系统的选择，延伸系数的分配，压下量的确定和轧件尺寸( $h \times b$ )的计算。程序框图见图 3.3。



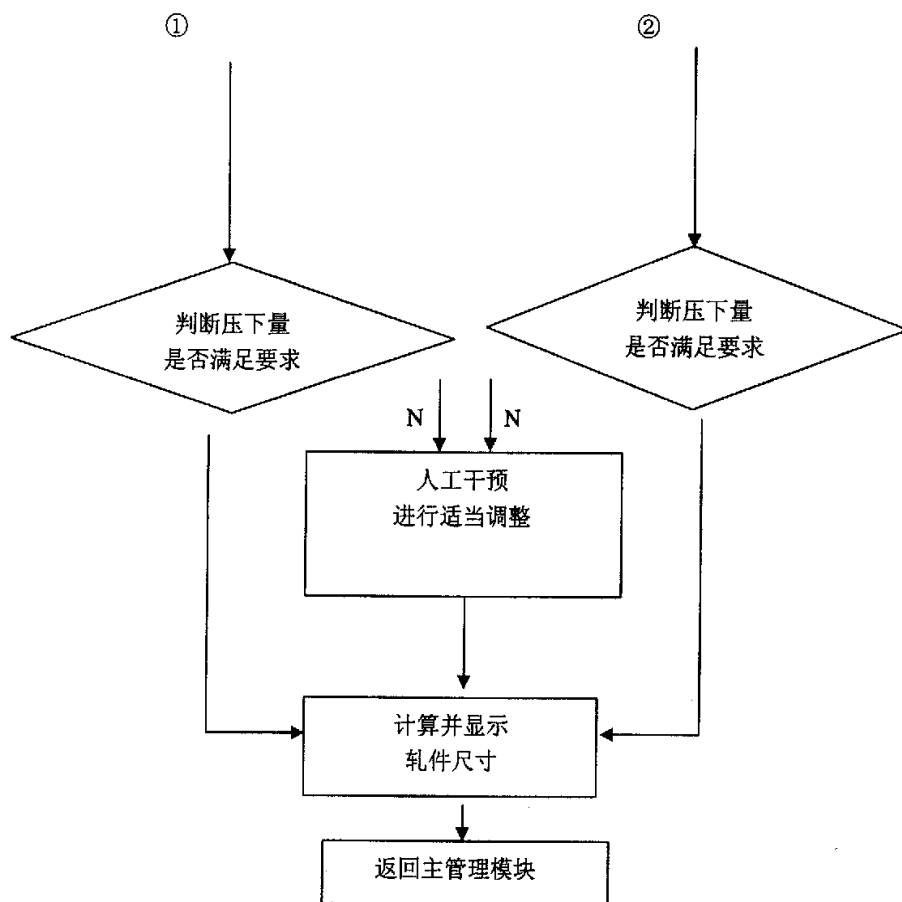
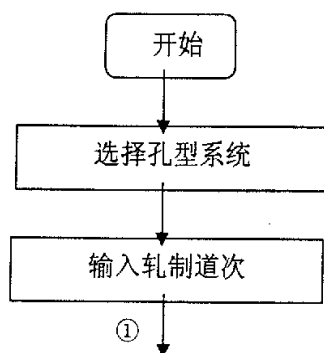


图 3.3 孔型设计程序框图

graph 3.3 program frame of roll pass design module

### 3.3.4 力能参数计算模块

该模块用于计算轧制力和轧制力矩等力能参数。程序框图见图 3.4。



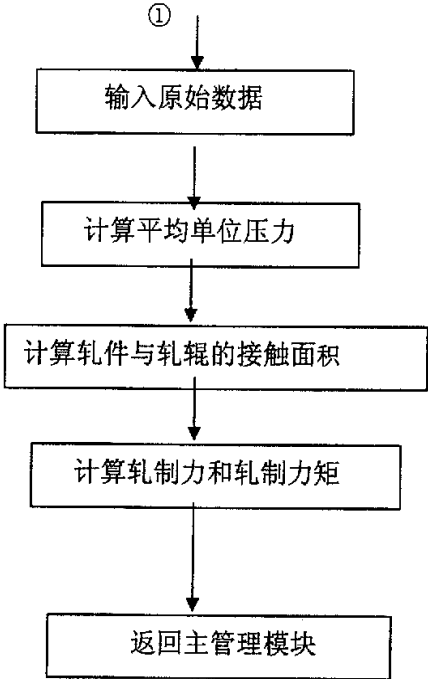
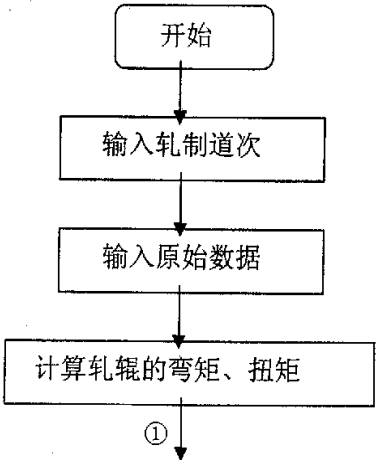


图 3.4 力能参数计算模块程序框图

graph 3.4 program frame of force-energy parameters calculation module

3.3.5 约束条件校核模块

该模块可完成轧辊的强度校核，电机发热、过载校核和轧件咬入条件校核。程序框图见图 4.5。



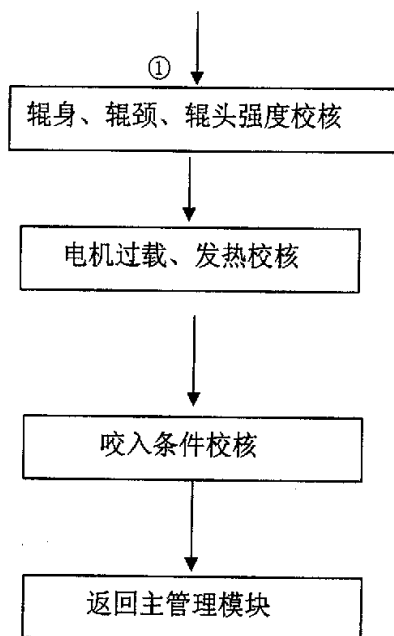
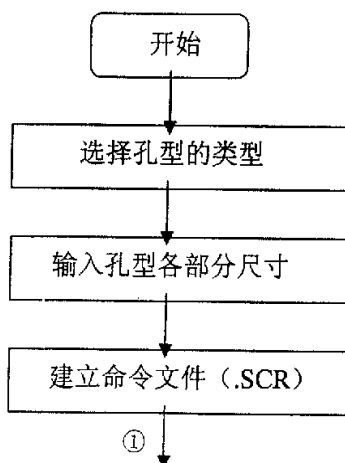


图 3.5 约束条件校核模块程序框图

graph 3.5 program frame of restriction conditions check module

### 3.3.6 孔型图绘制模块

该模块可完成孔型图的自动生成和 Auto CAD 的输出, 将抽象的数字具体化, 图形化, 用以直观地检验设计结果的优劣。程序框图见图 3.6。



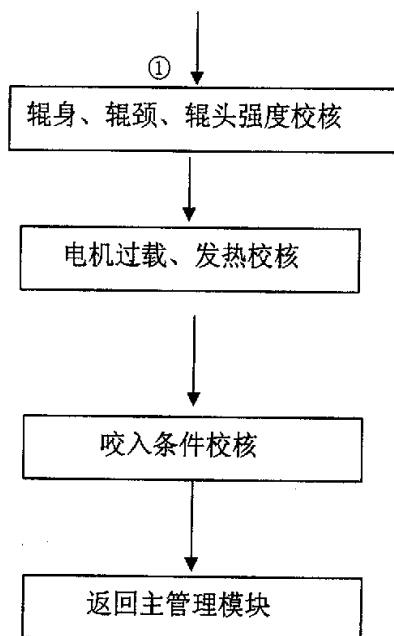
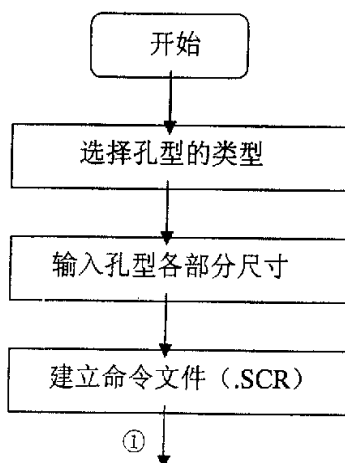


图 3.5 约束条件校核模块程序框图

graph 3.5 program frame of restriction conditions check module

### 3.3.6 孔型图绘制模块

该模块可完成孔型图的自动生成和 Auto CAD 的输出, 将抽象的数字具体化, 图形化, 用以直观地检验设计结果的优劣。程序框图见图 3.6。





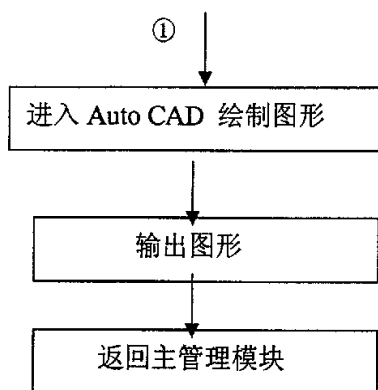
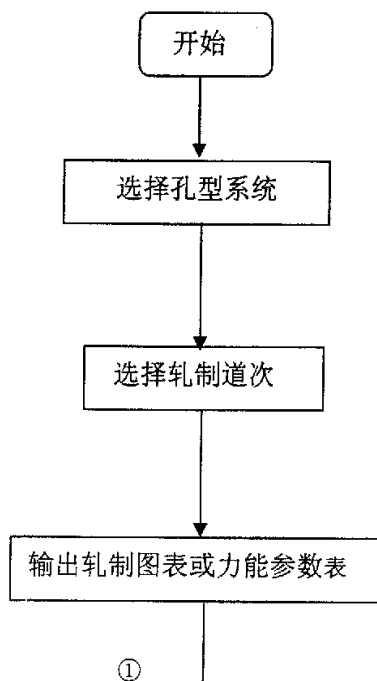


图 3.6 孔型图绘制模块程序框图  
graph 3.6 program frame of roll pass drawing module

### 3.3.7 轧制图表和力能参数输出模块

该模块可以表格的形式输出设计好的压下规程和轧制力、轧制力矩等力能参数，供设计人员进行综合判断。程序框图见图 3.7。



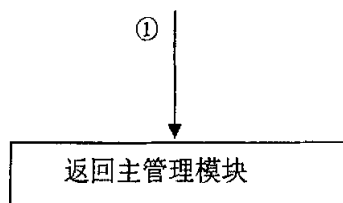


图 3.7 轧制图表和力能参数输出模块程序框图

fig. 3.7 program frame of rolling diagram and force-energy parameters output module

4 设计实例

本章以一个设计实例来说明本软件的设计能力。

设计要求： 对 300 mm 连续式小型轧机轧制 mm 圆钢进行孔型设计。

原始数据： 坯料为  $140\times140\text{ mm}^2$  连铸方坯，最终成品断面为圆钢，直径为  $\phi 25\text{ mm}$ ，终轧速度为  $12\text{ m/s}$ ，产品公差为  $\phi 25\pm0.4\text{ mm}$ ，轧制周期  $T=45\text{ 秒}$ ，连轧常数  $C=105.749\times10^6$ ，机时产量  $Q=136\text{ T/h}$ ，设备参数见表 4.1 所示。

设计结果： 轧制图表、轧制力及轧制力矩等力能参数表、孔型系统图、软件运行界面等各项最终结果见附图。因篇幅所限，这里只给出几个选项的代表内容。

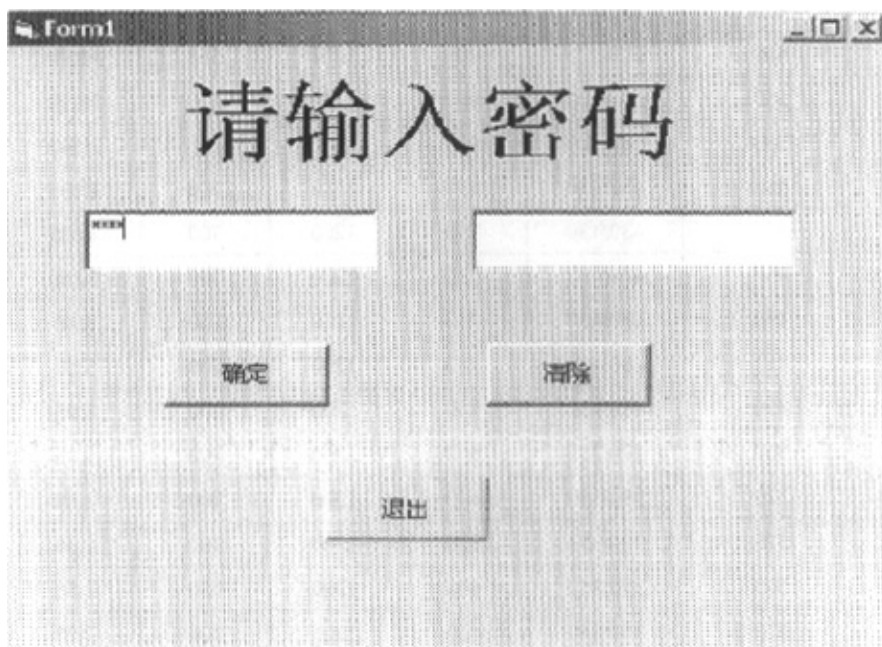
表 4.1 主要数据  
table 4.1 main data

| 架次 | 轧辊名义直径<br>(mm) | $D_{\max}/D_{\min}$<br>(mm) | 辊身长度<br>(mm) | 电机转数<br>(转/分) | 电机功率<br>(KW) | 减速比<br>i |
|----|----------------|-----------------------------|--------------|---------------|--------------|----------|
| 1  | 550            | 580/520                     | 900          | 1200          | 550          | 59.64    |
| 2  | 550            | 580/520                     | 900          | 1200          | 550          | 49.90    |
| 3  | 550            | 580/520                     | 900          | 1200          | 550          | 39.90    |
| 4  | 550            | 580/520                     | 900          | 1200          | 550          | 29.40    |
| 5  | 450            | 480/430                     | 750          | 1200          | 700          | 18.33    |
| 6  | 450            | 480/430                     | 750          | 1200          | 700          | 13.25    |
| 7  | 450            | 480/430                     | 750          | 1200          | 700          | 10.50    |
| 8  | 450            | 480/430                     | 750          | 1200          | 700          | 8.10     |
| 9  | 450            | 480/430                     | 750          | 1200          | 700          | 6.50     |
| 10 | 450            | 480/430                     | 750          | 1200          | 700          | 5.05     |
| 11 | 370            | 390/350                     | 600          | 1200          | 700          | 3.46     |
| 12 | 370            | 390/350                     | 600          | 1200          | 700          | 2.69     |
| 13 | 370            | 390/350                     | 600          | 1200          | 700          | 2.06     |
| 14 | 370            | 390/350                     | 600          | 1200          | 950          | 1.56     |
| 15 | 370            | 390/350                     | 600          | 1200          | 700          | 1.23     |
| 16 | 300            | 320/295                     | 600          | 1200          | 950          | 1.00     |
| 17 | 300            | 320/295                     | 600          | 1200          | 700          | 1.00     |
| 18 | 300            | 320/295                     | 600          | 1200          | 950          | 1.00     |

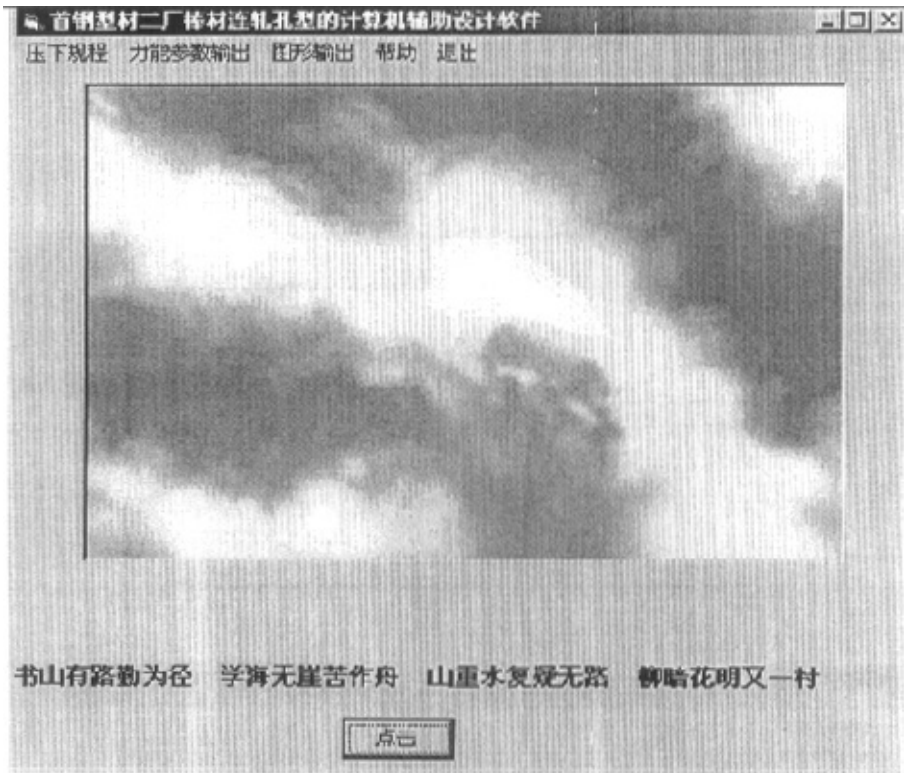
## 4.1 CARD 软件使用说明

首先输入密码, 密码正确即可进入主界面, 选择主菜单中的选项, 执行相应的功能。界面选项应注意: 一是粗轧孔型系统为平箱——立箱孔型系统。精轧孔型系统分为椭圆—立椭圆孔型系统和椭圆—圆孔型系统, 其中, 椭圆—立椭圆孔型系统轧制道次为 12—26 道次, 椭圆—圆孔型系统轧制道次为 12—23 道次。二是钢材的品种为圆钢、螺纹钢和线材, 产品尺寸为  $\phi 5.5$ — $\phi 40\text{mm}$ , 三是 CAD 命令文件 (.SCR) 存在 C:\progreмм files 目录下, 椭圆—立椭圆孔型系统轧制图表存在 C:\progreмм files\zhazhitubiao.dat 下, 椭圆—圆孔型系统存在 C:\progreмм files\yuanbiao.dat 下。

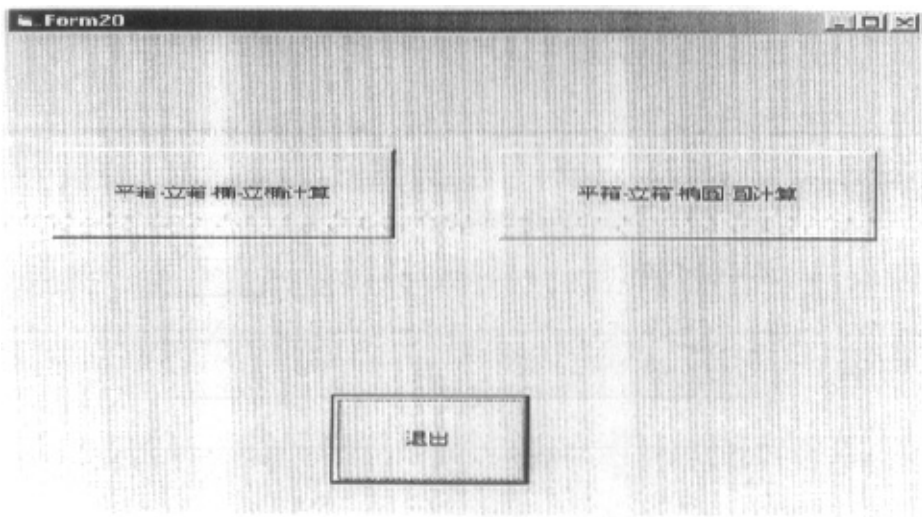
## 4.2 CARD 软件运行界面简介



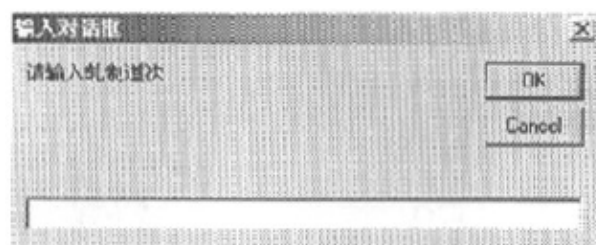
CARD 程序开始界面, 输入密码



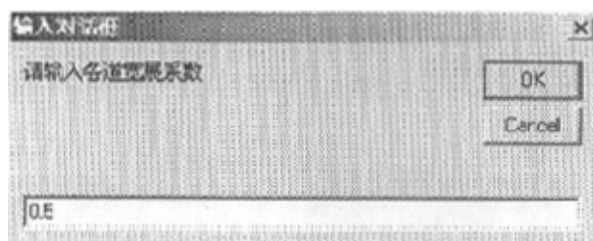
CARD 程序主界面，可选择菜单执行任务



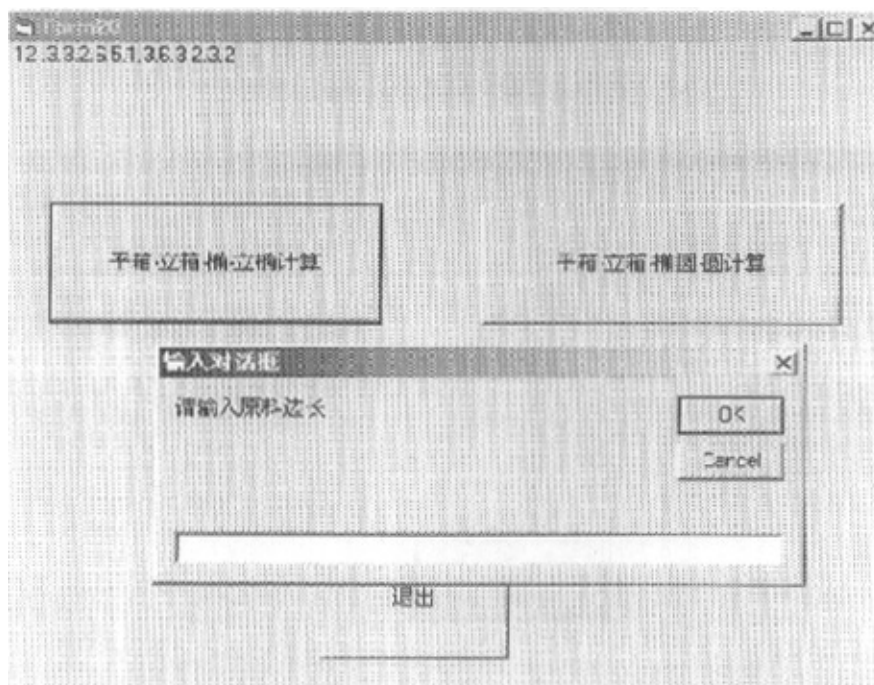
选择孔型系统



输入轧制总道次数



输入各道次宽展系数



输入轧制原料边长尺寸

| 通次   | 1                | 2               | 3                | 4                | 5                | 6        | 7 |
|------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|----------|---|
| 宽度系数 | 1.1              | 1.2             | 1.3              | 1.2              | 1.4              | 1.2      |   |
| 压力系数 | 1.480267         | 1.30277         | 1.295293         | 1.30775          | 1.202717         | 1.1102   |   |
| 宽度   | 125.253398875701 | 104.02438890237 | 11.2490625031982 | 76.2512342379237 | 1451472885326    | 60.5     |   |
| 高度   | 80.144912223173  | 106.92438890237 | 119.672366762139 | 76.2512342379237 | 137.341684343954 | 7.295999 |   |
| 压力量  |                  |                 |                  |                  |                  |          |   |

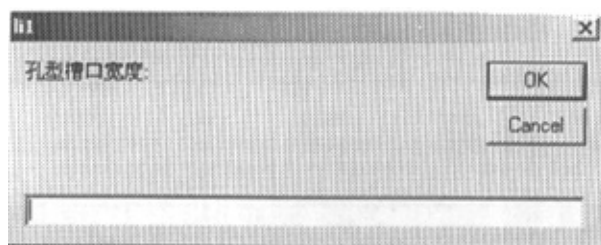
轧制图表

Form11 is a graphical user interface for selecting hole types. It contains six buttons arranged in a 2x3 grid: 平箱 (Flat Box), 立箱 (Vertical Box), 螺紋 (Thread), 平箱 (Flat Box), 平箱 (Flat Box), and 同 (Same). A 退出 (Exit) button is located at the bottom center.

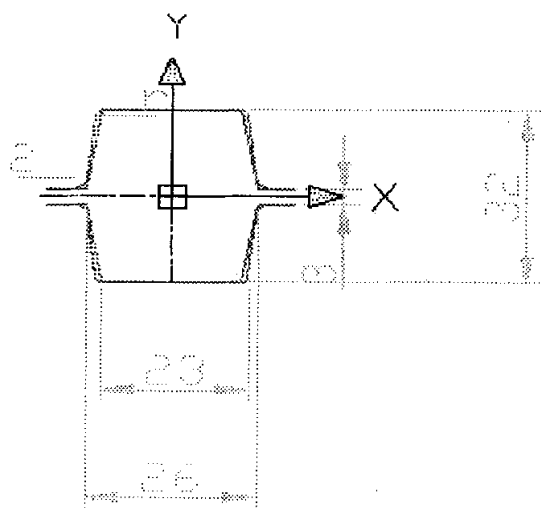
绘制孔型种类

Form14 is a graphical user interface for selecting a drawing hole type. It contains three buttons: 平箱 (Flat Box), 退出 (Exit), and a button with a drawing icon labeled Traving.

选择绘制孔型



输入孔型尺寸



箱形孔 CAD 绘图



## 5 结 论

1. 在总结前人研制计算机辅助孔型设计系统的基础上,为首钢型材二厂开发出了一套棒材连轧孔型的计算机辅助设计软件。整个软件内容包括:原始数据的输入,压下规程设计,力能参数计算,约束条件校核,孔型系统图的绘制和轧制图表的输出等项模块。虽然功能上不一定比以前的 CARD 系统完善,但在满足现场需要上,面向工程技术人员上,操作简单易行上,本课题做了积极的尝试,也是该软件的特色。运行结果与工厂生产数据基本吻合,说明比较贴近现场实际。

2. 经分析、比较几种数学模型,确定了符合工厂轧制情况的简便的各类模型。形式简单的数学模型因计算方便广受现场工程技术人员的欢迎,但考虑的因素少,导致结果精度降低;而复杂的数学模型虽考虑的因素较多,但设计步骤繁琐,且每个步骤又容易产生新的误差,对生产一线来说实用性不强,难于推广。所以选择了既简单实用,计算精度又贴近现场实际的数学模型(如宽展模型、轧制力、轧制力矩等力能参数模型)是本软件的又一特色。

3. 软件的开发充分考虑了现场工程技术人员的操作习惯。以往开发出来的 CARD 软件校核的约束条件很多,而现场实际只需验算一、二种(如延伸系数、轧制力和电机能力),把其它影响因素都纳入到这一、二种制约因素中去,设计付诸实施后轧制效果也很好。因此,本着金属的压缩、宽展和延伸因遵循体积不变定律而相互联系又相互制约这个特点,只校核很少的约束条件就能通过整个孔型设计。

4. 本软件以 Windows 98 作为开发平台,采用了可视化的 Visual Basic 5.0 作为开发语言,选择了 Auto CAD R14 作为绘图软件包,使界面友好、美观,操作简便,功能完善。在制定开发方案时,采用了面向对象的设计方法和专家系统的设计原则,软件适用性好,可移植性强,有一定的推广价值。

## 参 考 文 献

1. 鹿守理, 计算机辅助孔型设计 [M], 北京:冶金工业出版社, 1993, 11-69
2. 赵松筠, 唐文林, 型钢孔型设计 [M], 北京:冶金工业出版社, 1993, 70-87
3. 董德元, 鹿守理, 赵以相, 轧制计算机辅助工程 [M], 北京:冶金工业出版社, 1992, 10-90
4. 山口喜弘等, 计算机辅助孔型设计 (CAD) 在棒材轧制中的应用 [J], 国外钢铁, No.5 1986, 39—43
5. 顾卓, 贺毓辛, 我国 CARD 技术发展评述 [J], 轧钢, No.4, 1991, 53—54
6. 吴迪, 刘相华, 白光润, 微型计算机辅助孔型设计 [M], 沈阳:东北大学出版社 1993, 5-67
7. 赵志业, 金属塑性变形与轧制原理 [M], 北京:冶金工业出版社, 1980, 56-123
8. 黄守汉, 塑性变形与轧制原理 [M], 北京:冶金工业出版社, 1994, 24-196
9. 王廷溥, 轧钢工艺学 [M], 北京:冶金工业出版社, 1981, 5-156
10. 翁正中, 型钢生产 [M], 北京:冶金工业出版社, 1993 7-79
11. 桂万荣, 轧钢车间机械设备 [M], 北京, 冶金工业出版社, 1989, 26-167
12. 黄守汉等, 中德计算机辅助工程 (CAE) 学术会议专辑 (下册) [J], 北京钢铁学院学报, 1998, 35-44
13. 古捷才等, 简单断面型钢孔型的计算机辅助设计 [J], 钢铁钒钛, No.3 1997, 34—39
14. 王建民, 棒材连轧计算机辅助孔型设计系统开发研制 [D], 北京:北京科技大学, 1994,
15. 王栋良, 棒材连轧孔型计算机辅助设计软件开发 [D], 北京:北京科技大学, 1997,
16. 黄守汉等, 孔型设计 [M], 上海, 上海人民出版社, 1977, 38-47
17. 黄蔚, 简单断面型钢孔型计算机辅助设计系统的开发 [D], 北京:北京科技大学, 2000,
18. 李士琦, 高俊山, 王政, 冶金系统工程 [M], 北京:冶金工业出版社, 1992, 32-79
19. 赵俊萍, 鹿守理, 曲扬, 计算机辅助孔型设计 (CARD) 技术的应用与发展 [J], 轧钢, 北京, No.1, 1998, 59—62
20. 刘慰俭, 顾书梁, 计算机辅助孔型设计概况 [J], 上海金属, Vol.5, No.10, 1998, 43

—47

21. 刘莲英, 王秀美, 鹿守理, CARD 方法库的动态, 连接技术 [J], 北京科技大学学报, Vol.11, No.4, 1989, 349—353
22. 吴迪, 白光润, 可逆万能轧机 H 型钢孔型优化设计 [J], 钢铁, Vol.24, No.3, 1989, 31—34
23. 赵松筠, 计算机孔型设计系统简介 [J], 轧钢, No.4, 1987,
24. 尤敬成, 轧辊孔型计算机辅助设计的进展 [J], 轧钢, No.1, 1987,
25. 曹燕, 杨红等, 计算机辅助孔型设计的发展 [J], 钢铁, Vol.30, No.6, 1995, 74—77,
26. 白光润, 栾瑰馥, 型钢孔型设计 (1) [J], 轧钢, No.1, 1991, 54—57
27. 费道存等, 微机轧钢孔型辅助设计 [J], 轧钢, No.2, 1991, 37—39
28. 闫玮, Y 型三辊轧机计算机辅助孔型优化设计 [D], 北京: 北京科技大学, 1988
29. 张生, 计算机辅助简单断面型钢轧辊孔型最优设计 [D], 北京: 北京钢铁学院, 1985
30. 郭清阁, 槽钢 CARD 及设计结果的诊断和优化系统的研制 [D], 北京: 北京科技大学, 1999
31. 冯宗律译, Tom Bakey 著, CAD/CAM 手册 [M], 北京: 航空工业出版社, 1989, 24-78
32. 白光润等, 孔型设计 [M], 沈阳: 东北工学出版社, 1993
33. 吴迪, 白光润, 一种棒钢最优化计算机辅助孔型设计方法, 塑性加工理论及新技术开发年会论文集 [J], 沈阳: 东北工学出版社, 1988, 34-56
34. 范鸣玉, 最优化技术基础 [M], 北京: 清华大学出版社, 1986, 78-126
35. K.F. Kennedy, T. Altan, Computer-Aided Analysis of metal flow stresses and Rollpass Design in Rod Rolling [J], Iron and steel Engineer, Vol.62, No.6, 1983, 50—54
36. H. Riegger, C.R. Boer, Roll Pass Design by Interactive Graphic Computing [J], J. Applied Metal work, Vol.3, No.4, 1985
37. J.F. Kennedy, D.A. North, Introduction to roll and pass design [J], Iron and steel Engineer, May, 1992, 38—42
38. M.D. Conneely, Standardization of roll pass design for bar mills, Iron and Steel Engineer, May, 1992, 38—42
39. M. Lestain, A. Poloni, The endless welding rolling [J], process. MPT Inter-national. 1999, 1, 70-75
40. 周霭如, 宫士鸿, Visual Basic 程序设计教程 [M], 北京: 清华大学出版社,

- 2000, 123-156
41. 谭浩强, 薛淑斌, 袁枚, Visual BASIC 程序设计 [M], 北京: 清华大学出版社, 2000, 25-134
42. 唐建生, 计算机辅助绘图与设计 [M], 北京: 电子科技大学出版社, 1997, 67-79
43. 高元茂, 陈树有, Auto CAD(13.0)计算机辅助设计教程 [M], 北京: 电子工业出版社, 1996, 15-35
44. 唐嵬, CAD R14 简明教程 [M], 北京: 电子工业出版社, 1999, 67-89
45. 刘鸿文, 材料力学 [M], 北京: 高等教育出版社, 1986, 67-78
46. 王廷溥 齐克敏, 金属塑性加工学 [M], 北京: 冶金工业出版社, 2004, 12-234

## 致 谢

本论文在指导教师——陈晓波教授的指导和帮助下完成的，在此对陈晓波教授所给予的认真、细致的指导表示衷心的感谢！尤其是陈教授抱病为我批阅论文，并及时提出改进建议，这种严谨治学的科学态度，恪尽职守敬业精神令人感动！同时，对我的同事——杨卫东、张生、田玫等给予的无私帮助表示诚挚的感谢！