

基于STEP-NC的开放式 数控系统及关键技术研究

杜娟 著



國防工業出版社
National Defense Industry Press

基于 STEP-NC 的开放式 数控系统及关键技术研究

杜娟 著

國防工業出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以面向 STEP-NC 的数控加工和智能技术在制造中的应用为主线,较全面地介绍了数控加工中所涉及到的新型数控系统构成、刀具路径设计、工艺设计、数控机床故障诊断等基础知识和智能化制造技术。具体内容为:STEP-NC 数据模型分析;基于 STEP-NC 的开放式 CNC 系统;面向 STEP-NC 的数控加工刀具路径规划技术;基于 Multi-Agent 技术的工艺协同设计;基于遗传算法在工序优化及柔性作业车间调度中的应用研究;基于模糊神经网络的数控机床故障诊断技术。

本书可供企业、高等工科院校、院所从事数控技术、机电一体化研究的工程技术人员及相关科研人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于 STEP-NC 的开放式数控系统及关键技术研究/杜娟著.

—北京:国防工业出版社,2014.9

ISBN 978-7-118-09545-6

I. ①基… II. ①杜… III. ①数控机床—数字控制系统

IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 100780 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 11¼ 字数 265 千字

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

前 言

自 20 世纪 50 年代第一台数控机床诞生以来, 数控技术已经取得了日新月异的飞速发展, 特别是与今天迅速发展的电子和计算机等技术相结合, 更显示出其优越的性能, 数控机床已成为现代制造系统中必不可少的组成部分。然而, 一直以来, 数控系统主要采用国际标准 ISO 6983 作为 NC 编程的数据接口, 这使得传统的 CNC 系统存在许多不足, 主要表现为缺少智能性和开放性(交互性)。当前, 随着人工智能、专家系统、控制技术和计算机等技术的迅速发展, 使得现代制造系统向集成化、数字化、智能化和柔性化等方向发展, 显然传统的数控系统远远不能满足现代制造业的需求。为此, 国际标准化组织 ISO TC184/SC1 从 20 世纪 90 年代后期开始研究和制定能够满足 CAD/CAM 与 CNC 系统进行数据交换的编程接口——STEP-NC。STEP-NC 不但为实现集成化的制造奠定了基础, 也为实现智能化的制造提供了根本保证, 这是因为新的数据接口给 CNC 系统提供了丰富的零件几何和加工等高层次信息。可以想象, 当 STEP-NC 数据接口应用到未来的数控编程时, 将会引起数控技术领域的一次重大革命。未来的新型 CNC 系统, 不论是其体系结构还是功能都将完全不同于传统的 CNC 系统, 而伴随着人工智能技术在数控加工领域的不断应用, 新型 CNC 系统将是一个开放式、智能化的制造系统。

本书对基于 STEP-NC 智能化的数控加工关键技术进行了深入研究。在深入分析和研究 STEP-NC 数据模型的基础上, 构建了开放式的数控系统体系结构; 在实现数控加工等方面, 将智能技术融入到数控加工的工艺设计、工艺优化、故障诊断等应用中。具体来说, 本书的主要内容如下:

(1) 对 STEP-NC 数据模型接口进行详细分析, 主要内容包括 STEP-NC 模型特点、程序结构、实体定义及 EXPRESS 语言等。

(2) 构建了基于 STEP-NC 的开放式数控系统的体系结构, 提出了一种基于 PMAC 运动控制卡和 PC 集成的硬件结构。设计了一个 STEP-NC 文件解释器, 并对其工作流程进行了详细论述。在基于网络化的集成制造系统中, 为了使 STEP-NC 文件能够被分布于不同区域的制造子系统共享, 研究了 STEP-NC 文件到 XML 文件的转换技术。为了使 STEP-NC 能够在传统 CNC 系统中得到推广和应用, 研究了 STEP-NC 文件到传统以“G”代码为主体 NC 程序的转换技术。

(3) 描述了面向 STEP-NC 数控加工的刀具路径规划技术。根据 STEP-NC 模型接口支持特征技术的特点, 提出了一种基于制造特征的参数化刀具路径设计技术。书中主要以型腔类制造特征加工为例, 详细论述了参数化刀具路径设计的思路和原理。五轴加工已成为当前复杂曲面精密加工的主要手段, 为此, 书中研究了复杂曲面的刀

具局部干涉判断和处理技术。

(4) 工艺设计是零件数控加工过程中的重要组成环节, 为了提高设计效率和设计质量, 提出一种基于 Multi-Agent (多代理技术) 的协同工艺设计方法。构建了一个基于 Multi-Agent 技术的工艺协同设计系统体系结构, 并对其关键技术如协同策略、通信策略等进行了研究。

(5) 通过对 STEP-NC 数据接口的分析, 研究了面向 STEP-NC 数控加工的非线性工艺设计问题。提出并研究了基于改进遗传算法的柔性作业车间调度和基于精英选择遗传算法的工步序列优化技术, 为提高零件的加工质量和缩短产品制造周期奠定了基础。

(6) 未来新型的 STEP-CNC 系统将具有高级的故障诊断功能, 本书将模糊神经网络引入到数控机床的故障诊断中, 研究了基于模糊神经网络的数控机床故障诊断技术。并以 CAK6150 数控车床故障诊断为实例, 对上述技术进行了详细论述。

为了验证文中所提技术和方法的有效性和正确性, 除第 1 章外, 其他章节均有实例验证。

本书的研究工作和出版受国家自然科学基金项目(50805099)、山西省自然科学基金项目(2013011024-6)以及山西省回国留学人员科研项目(2013-095)资助完成。

由于作者水平有限, 书中不足、不妥之处在所难免, 敬请读者批评指正。

作者

2014 年 5 月

目 录

第 1 章 STEP-NC 数据模型分析	1
1.1 STEP-NC 出现背景	1
1.2 STEP-NC 数据接口特点	3
1.3 STEP-NC 数据模型	4
1.4 STEP-NC 程序的结构	5
1.5 STEP-NC 描述语言 EXPRESS	8
1.5.1 EXPRESS 的特点	8
1.5.2 EXPRESS 数据元素的说明	9
1.5.3 EXPRESS 语言的数据类型	9
1.6 EXPRESS 到 STEP-NC 文件的映射	10
第 2 章 基于 STEP-NC 的开放式 CNC 系统	12
2.1 基于 STEP-NC 的开放式 CNC 系统	12
2.1.1 STEP-CNC 系统的功能结构	12
2.1.2 STEP-CNC 系统的硬件结构	14
2.2 STEP-NC 解释器的设计	16
2.2.1 STEP-NC 解释器的功能	16
2.2.2 EXPRESS 语言到 C++ 语言的映射规则	17
2.2.3 类的设计原则	18
2.2.4 几个关键类的设计	19
2.2.5 解释器的工作原理	21
2.3 STEP-NC 与 XML 文件转换技术的研究	23
2.3.1 XML 及相关技术介绍	23
2.3.2 EXPRESS 与 XML 的区别及其映射	26
2.3.3 STEP-NC 与 XML 文件的转换	31
2.3.4 实例分析与验证	33
2.4 STEP-NC 文件到“G”代码的转换技术研究	36
2.4.1 两种编程标准的对比	36
2.4.2 STEP-NC 文件到“G”代码程序的自动转换技术	38
2.4.3 转换实例	42

第 3 章 面向 STEP-NC 数控加工的刀具路径规划技术	44
3.1 参数化刀具路径设计思路	44
3.2 特征概述	44
3.2.1 特征的定义	44
3.2.2 特征的分类	45
3.2.3 STEP-NC 制造特征有关定义	46
3.2.4 制造特征从属关系	47
3.2.5 STEP-NC 中几类典型制造特征的定义	48
3.3 型腔类制造特征的参数化刀具轨迹设计	50
3.3.1 参数化刀具轨迹设计的基本原理	51
3.3.2 带岛屿的型腔刀具轨迹参数化设计	52
3.3.3 槽的加工刀具轨迹参数化设计	55
3.4 自由曲面的刀具轨迹规划及参数化设计	56
3.4.1 NURBS 曲面简介	56
3.4.2 刀具轨迹曲线参数化生成	57
3.4.3 刀具轨迹仿真	59
3.5 复杂曲面五轴加工局部干涉处理技术研究	61
3.5.1 复杂曲面加工局部干涉处理技术发展现状	61
3.5.2 五轴数控加工模型及局部干涉	62
3.5.3 局部干涉的判断和处理	62
3.5.4 实例计算及分析	69
第 4 章 基于 Multi-Agent 技术的工艺协同设计	70
4.1 工艺设计现存问题与研究现状	70
4.1.1 工艺设计现存问题	70
4.1.2 工艺设计研究现状	71
4.2 Multi-Agent 技术简介	71
4.2.1 Agent 与 Multi-Agent System 概念	71
4.2.2 Agent 属性	72
4.2.3 Multi-Agent System 主要特点	73
4.3 基于 Multi-Agent 技术的工艺设计实现系统	74
4.3.1 基于 Multi-Agent 技术的工艺设计系统特点	74
4.3.2 基于 Multi-Agent 技术的工艺设计系统体系结构	75
4.4 基于 Multi-Agent 技术的工艺设计系统协同策略	76
4.4.1 Multi-Agent 系统协调	76
4.4.2 Multi-Agent 系统协作	77
4.4.3 Multi-Agent 系统协商	78
4.4.4 Multi-Agent 系统的协同策略	78

4.5	系统通信策略	79
4.5.1	Agent 通信层次模型	79
4.5.2	Agent 通信过程模型	80
4.5.3	KQML 语言	80
4.5.4	系统中 KQML 语言应用	81
4.6	系统数据库设计	82
4.6.1	SQL 简介	82
4.6.2	STEP-NC 与 SQL 间数据类型映射	83
4.6.3	系统数据库创建	85
4.7	系统实例验证	87
第 5 章	基于遗传算法的工序优化及柔性作业车间调度	89
5.1	遗传算法概述	89
5.1.1	遗传算法的基本思想及发展历程	89
5.1.2	遗传算法的理论基础	90
5.1.3	遗传算法的基本原理	90
5.1.4	遗传算法的发展现状	97
5.2	基于改进遗传算法的柔性作业车间调度	97
5.2.1	车间调度问题概述	97
5.2.2	柔性作业车间调度问题概念和特点	100
5.2.3	柔性作业车间调度问题的优化方法	101
5.2.4	柔性作业车间调度问题的优化过程描述法	102
5.2.5	柔性作业车间调度问题的模型描述	103
5.2.6	柔性作业车间调度问题的算法设计	105
5.2.7	改进遗传算法的收敛性和参数分析	113
5.2.8	算法的实例验证与应用	114
5.3	基于精英选择遗传算法的工艺优化设计	119
5.3.1	传统的计算机辅助工艺过程设计	119
5.3.2	基于 STEP-NC 的非线性工艺设计	119
5.3.3	基于 STEP-NC 的非线性工艺设计过程	120
5.3.4	加工工步序列的优化	121
5.3.5	应用实例	124
第 6 章	基于模糊神经网络的数控机床故障诊断技术	126
6.1	数控机床故障诊断概述	126
6.1.1	数控机床故障的分类	126
6.1.2	常用数控机床的故障诊断技术	127
6.1.3	现代数控机床故障诊断技术	128

6.1.4	基于模糊神经网络机床故障诊断技术	130
6.2	模糊逻辑理论	131
6.2.1	模糊理论概述	131
6.2.2	隶属函数的概述及确定方法	132
6.2.3	模糊逻辑和模糊推理	135
6.2.4	模糊逻辑系统	136
6.3	人工神经网络技术	138
6.3.1	神经网络理论基础	139
6.3.2	神经网络模型的结构与神经网络的学习	141
6.3.3	BP神经网络简介	143
6.4	模糊神经网络模型	144
6.4.1	模糊逻辑系统与人工神经网络的比较	145
6.4.2	模糊逻辑系统与人工神经网络之间等价性与互换机制	146
6.4.3	模糊神经网络的概念与模型	146
6.4.4	模糊神经网络的模型	147
6.4.5	模糊神经网络的学习与逼近	150
6.5	基于模糊神经网络的数控机床故障诊断实现	150
6.5.1	模糊神经网络混合分类器	151
6.5.2	模糊神经网络的训练	154
6.5.3	模糊神经网络故障诊断模型的仿真	166
	参考文献	170

第1章 STEP-NC 数据模型分析

1.1 STEP-NC 出现背景

1952 年美国 PARSONS 公司与麻省理工学院合作试制了世界上第一台三坐标数控立式铣床, 1954 年美国 Bendix-Cooperation 公司生产出第一台工业用数控机床。数控机床先是经历了电子管控制, 随后经历了晶体管控制、集成电路控制 (NC)、计算机控制 (CNC), 直到现在的微处理器控制 (MNC)。

目前, 随着世界先进制造技术不断兴起, 超高速切削、超精密加工等技术的应用, 柔性制造系统的迅速发展和计算机集成系统的不断成熟, 对数控加工技术提出了更高的要求。当今数控机床正在朝着高速度、高精度化, 以及柔性化、集成化和智能化的方面发展。同时, 数控程序编程的自动化程度也随着计算机应用技术的发展而得到进一步提高。目前, CAD/CAM 图形交互式自动编程已得到较多的应用, 它是利用 CAD 绘制的零件加工图样, 再经计算机内的刀具轨迹数据进行计算和后置处理, 从而自动生成 NC 零件加工程序, 以实现 CAD 与 CAM 的集成。随着 CIMS 技术的发展, 当前又出现了 CAD/CAPP/CAM 集成的全自动编程方式, 它与 CAD/CAM 系统编程的最大区别是其编程所需的加工工艺参数不必人工参与, 而直接从系统内的 CAPP 数据库获得。

到目前为止, 虽然数控技术在很多方面都得到了很大的发展, 但其依然还是采用国际标准 ISO 6983 作为 NC 编程的数据接口, 这种数据接口造成了当前 CNC 系统存在许多不足:

(1) 柔性化和智能化程度不高。由于该接口主要是采用 G 代码和 M 代码来描述零件的加工, 它提供给 CNC 系统的主要是刀具中心运动轨迹和速度等低层次的信息, 而不包括零件的几何和工艺信息, 所以在 CNC 系统中难以实现三维刀具形状尺寸及加工余量的补偿, 当实际工作情况有所不符时 (如刀具尺寸变化), 原有程序无法使用, 操作者无法在线进行干预。另外, 由于 NC 程序中缺乏对被加工零件的几何和工艺等高层次信息的描述, 所以造成了 CNC 系统在一定程度上仅是一个被动的执行机构, 缺乏一定的柔性和智能性。

(2) 产品信息从 CAD/CAM 到 CNC 是单向流动, 难以实现信息的共享和集成。零件程序一旦生成便无法更改, 当车间层的加工条件发生变化时, 变化信息难以反馈给上游的设计部门; 另外, 由于不同类型数控系统、不同厂家生产的机床编程的方法都不尽相同, 因此在传统的 NC 编程时不但要了解所选用的数控机床的规格型号、性能以及系统所具有的功能, 还要详细了解数控系统的编程说明书及指令格式, 这种强烈依赖于具

体数控系统的特点使得 NC 程序不具有可交换性。因此,不但 CNC 系统和上游的 CAD/CAPP/CAM 系统间难以实现信息的集成和共享,而且不同的 CNC 系统之间也难以实现信息的交换和共享。

(3) 不支持样条插补功能。由于受传统 CNC 系统插补(直线、圆弧插补,在三坐标以上加工时仅采用空间直线插补)能力的限制,在实际生产中,自由曲面零件的数控加工一般都采用 CAM 软件进行 NC 编程。CAM 软件的工作过程如下:首先对自由曲面进行刀具轨迹规划与生成,然后通过大量的微小直线段逼近刀具轨迹曲线,生成刀位数据文件和 NC 程序。采用这种方法有以下缺点:①势必产生大量的 NC 程序(G01)和相对较大的逼近误差。②会导致刀具轨迹曲线各 G01 段连接处几何上一阶、二阶导数的不连续,使本来光滑的轨迹曲线不再光滑。在加工中,由于刀具轨迹曲线的不连续会引起进给速度和加速度的不连续,将导致刀具运动方向和受力情况的突然变化,从而不可避免地引起机床振动,产生较差的表面质量,并加快刀具的磨损。③在 CNC 系统内由于频繁的程序段处理会导致较长的运算时间,也会限制进给速度的提高。④在复杂的精密零件加工中,NC 代码段定义的位移极小,在高速加工时会出现过切或欠切的可能性。因此,传统的 CNC 系统的插补技术严重影响了曲面加工的插补精度和加工效率。

(4) ISO 6983 数据接口存在语义歧义,不能保证数据被数控系统正确识别和理解。

(5) 传统的 NC 程序在转化成加工指令之前必须进行后置处理。

智能化和集成化是现代制造系统未来的发展趋势之一。虽然通过产品数据交换标准(Standard for The Exchange of Product model data, STEP)以及计算机技术和信息通信技术,可以在一定程度和范围内实现 CAD/CAPP/CAM 系统之间的信息集成和共享,但是与作为现代制造系统核心基础的数控加工的集成问题多年来却很少得到重视,CAD/CAM 系统一直采用 ISO 6983 向 CNC 系统传送 NC 程序。可见,为了在计算机辅助系统(Computer Aided System, CAS)与 CNC 系统之间实现数据共享与交换,现代 CNC 系统还需要进一步完善和发展,以满足基于信息的现代制造系统如智能化与网络化制造的需要。因此,目前国际标准化组织正在制定能满足 CAX 系统与 CNC 系统进行数据交换的标准——STEP-NC (ISO 14649),其目的是取代目前普遍使用的 NC 编程接口标准 ISO 6983,提供一种不依赖任何具体系统的中性机制。

STEP-NC 本质上是 STEP 标准在 NC 领域的扩展。STEP 定义了 CAD 设计数据标准,STEP-NC 基于 STEP 并包含了制造信息,详细说明了各种 NC 工艺方法的信息内容和语意。它用制造信息注释产品/零件设计信息,制造信息包括材料、制造特征、工具需求、工步等信息。

STEP-NC 定义了一个新的 STEP 应用协议(AP238)作为 CAM 与 CNC 之间的数据交换规范。AP238 涵盖了产品从设计到成品全过程的所需的全部信息,如三维几何信息(AP203/AP214)、特征信息(AP224)、制造信息和检测信息(AP219)等。

STEP-NC 是欧盟 ESPRIT IV/29708 计划(1999—2001)的 STEP-NC 项目的名称。1994 年至 1996 年,德国阿亨工业大学在欧盟项目 OPTIMAL (ESPRIT III 8643)中就开始研究这种数据模型。在这个项目中,基于 STEP 的三维铣削模型数据模型首次用作 CAM 和 CNC 的接口。在后续的项目 ESPRIT IV/29708 中,研究范围扩大到 2.5D 铣削和

其他加工方法,如车削、电火花加工(Electron Discharge Machining, EDM)。STEP-NC 已经得到世界范围内广泛认同,2002 年初,由欧盟、美国、瑞士和韩国组成的联盟在国际性项目 IMS STEP-NC 中继续对其进行完善。目前,ISO 14649 的总体框架和铣削数据模型已经于 2001 年发布了国际标准草案(Draft International Standard, DIS),其他加工方法的数据模型定义很快将会发布。

STEP-NC 国际标准草案(ISO DIS 14649)包括:概述与基本原理(Part 1: Overview and Fundamental Principles)、通用的工艺数据(Part 10: General Process Data)、铣削工艺数据(Part 11: Process Data for Milling)和铣削刀具(Part 111: Tools for Milling)等。正在制定的 STEP-NC 标准有:车削加工数据(Part 12: Process Data for Turning)、电火花加工(Part 13: Process Data for EDM)、木材和玻璃加工(Part 14)、检测(Part 15)等。

STEP-NC 标准在世界范围内不断获得越来越多的支持。随着 STEP-NC 标准的建立,人们越来越重视基于 STEP-NC 的 CNC——STEP-CNC 系统的研究和开发。由于 STEP-NC 提供各种“加工什么”(即产品信息)和“怎样加工”(即工艺过程)的信息,所以 STEP-CNC 能够支持各种智能化功能,而基于 ISO 6983 的传统的 CNC 系统则无法实现。

1.2 STEP-NC 数据接口特点

STEP-NC 作为一个 CAD/CAM 和 CNC 系统之间进行信息交换的数据接口,相比于传统的 ISO 6983 具有以下的特点和优点:

(1) STEP-NC 与 STEP 兼容。CNC 系统不需要转换就可直接使用三维 CAD 数据控制机床。

(2) 在 ISO 6983 中,信息流自顶向下(从 CAD 经 CAM 到 CNC 系统),缺少协同支持。而采用 STEP-NC 能够在 CAD/CAM 与 CNC 系统之间实现双向数据传送,这样可直接将在机床上修改的信息反馈给上游的 CAD/CAM 系统或工艺规划部门,在系统之间实现信息和知识共享,同时也为不同部门实现协同工作提供了一种机制。

(3) STEP-NC 采用特征技术,容易实现 CAD/CAM/CAPP/CNC 的信息集成。

(4) 基于 STEP-NC 的 CNC 系统能够直接读取自由曲线曲面信息,因此能够使用样条插补技术,以改善加工表面质量。

(5) STEP-NC 提供了一种中性机制,与 CAD/CAM 系统、机床或 CNC 系统制造商无关,程序具有良好的互操作性和可移植性。

(6) 采用 STEP-NC 能够使 CNC 系统的功能更加丰富和实现智能化。基于 STEP-NC 的 CNC 系统可以输入完整的零件信息和加工过程信息,这样 CNC 系统就可以实现刀具路径自动生成、刀具自动选择、工艺支持、自动进刀和退刀、安全性检查以及加工过程优化等功能,为 CNC 系统进行自主加工提供了基础。

(7) STEP-NC 使 CNC 系统更可靠、更安全、更容易使用。据 Super Model 项目估算,在中小批量生产中,使用 STEP-NC 可以减少零件编程时间 35%、减少生产准备时间 75%、减少零件加工时间 50%,以及取消 4500 多个后置处理程序。

(8) STEP-NC 采用面向对象的方法和特征技术, 使 NC 程序具有很高的结构化程度。

(9) 基于 STEP-NC 的 CNC 系统使用图像接口 (GUI), 编程界面好, 使现场编程和程序修改方便、容易。

可见, STEP-NC 着眼于全生命周期产品数据的无缝连接, 为 CNC 系统的开放性和智能化提供了广阔的发展空间, 同时也解决了 CNC 系统与 CAS 系统之间的双向信息交换问题, 为真正实现开放式 CNC 系统和网络化制造奠定了坚实的基础, 必将对现代自动化制造技术的发展产生巨大而深远的影响。

1.3 STEP-NC 数据模型

尽管借助于 STEP 标准可以实现不同 CAD 系统之间以及 CAD 和 CAM 之间的信息交流和共享, 但是, 对于 CAD/CAM 与 CNC 系统之间, 以及不同 CNC 系统之间的信息交流和共享却一直是一个盲区, 为此国际标准化组织将 STEP 应用从 CAM 系统延伸到了 CNC 控制器, 并将延伸部分的标准命名为 STEP-NC。图 1-1 所示为 STEP 及 STEP-NC 的应用情形。

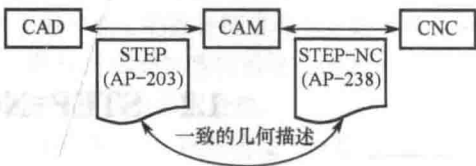


图 1-1 STEP 及 STEP-NC 的应用情形

STEP-NC 数据模型的基本原理是根据制造特征采用面向对象的方法来进行 NC 编程, 这里的对象是指制造特征及加工特征相对应的工艺数据。STEP-NC 数据模型如图 1-2 所示, 其主要包含工件 (Workpiece) 和加工计划 (Workplan) 两部分。

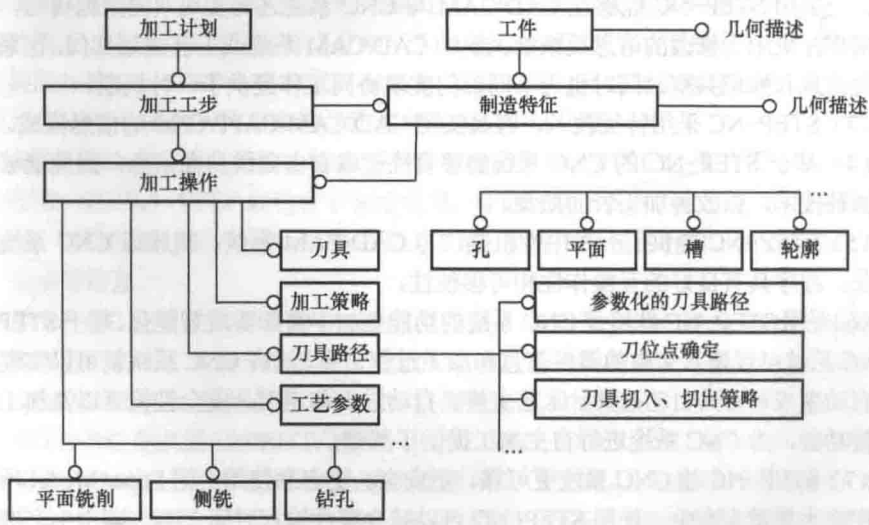


图 1-2 STEP-NC 数据模型

工件是由制造特征（Manufacturing Feature）来定义。制造特征是指工件上一个具有语义的几何实体，它描述一个工件的材料切除区域，表达一个加工过程的结果，例如孔（Hole）、槽（Pocket）、平面（Plane）、轮廓（Profile）等。制造特征通过几何属性描述，描述“是什么”，但不给出工件如何加工的任何指令，与加工过程有关的信息只包含在加工操作中。

加工计划是一个加工工步（Machining Workingstep）序列。加工工步是制造特征与工艺信息的组合，是加工过程的基本组成部分。它将制造特征与具体的加工操作（Machining Operation）联系起来，描述材料切除顺序、位置及相关参数。加工操作描述做什么以及使用的加工方法和参数，包括加工方法、刀具、加工策略和刀具路径（Toolpath）等。值得注意的是，在 STEP-NC 中刀具路径说明是可选的，而在 ISO 6983 中刀具路径是 NC 程序的主要内容。因此，基于 STEP-NC 的 CNC 系统必须具备刀具路径生成功能。

1.4 STEP-NC 程序的结构

基于 STEP-NC 的零件数控加工程序是根据 ISO 10303 Part21 规定的一种物理文件格式来描述的，从结构上分为文件头和数据段两部分。第一部分为文件头，其以“HEADER”为标记，说明文件名、编程者、编程日期和注释等；第二部分为数据段部分，这是零件程序的主要和核心部分，该部分以“DATA”关键字作为开始标记，包含了所有的制造任务及其相关的工艺数据和几何信息。文件头和数据段都以“ENDSEC”作为结束标志。

数据段部分的内容可以分为三部分：加工计划及可执行操作（Workplan and Executables）、工艺信息描述（Technology Description）和几何信息描述（Geometry Description），数据段中的“PROJECT”实体关键字是可执行任务开始的入口点。图 1-3 显示了 STEP-NC 零件程序内容之间的结构关系。

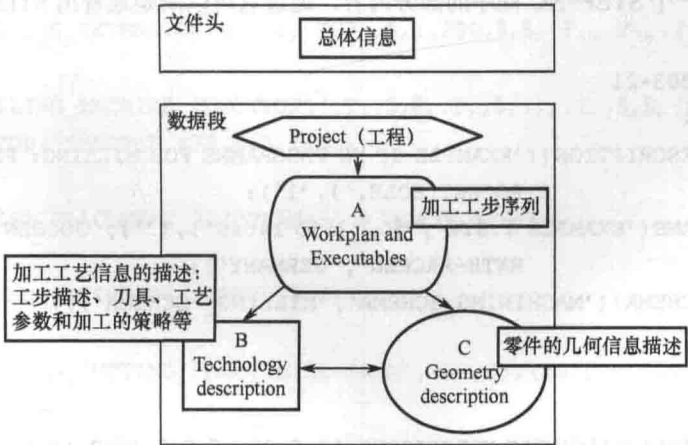


图 1-3 STEP-NC 程序结构

1) 工程实体 (Project Entity)

工程实体是一个程序可执行的初始点, 它包含于任何一个 ISO 10303 Part21 格式文件的数据段 (Data) 部分, 且是唯一的。

2) 加工计划和可执行性 (Workplan and Executables)

加工计划 (Workplan) 是由一组加工工步 (Workingsteps) 的序列组成。工步代表了加工任务中的最小执行单位, 每个工步主要包含了一个制造特征 (Manufacturing_Feature) 及其相对应的加工操作 (Machining_Operation), 制造特征部分描述了特征的几何信息和拓扑结构, 而加工过程中所有工艺信息则包含在了加工操作实体部分。

可执行性 (Executables) 是所有可执行对象的基类, 它主要是激发一个加工操作动作, 加工操作的顺序是由加工计划来指定的。可执行性的类型主要分为三种: 加工工步 (Workingsteps)、加工函数 (NC Function) 和程序结构 (Program Structure)。程序结构主要有顺序结构、平行结构和条件分支结构等。

3) 加工工步 (Workingstep)

加工工步是组成 STEP-NC 程序的最基本单位, 从图 1-2 可以看出, 通过加工工步将制造特征和对其进行的加工操作相联系起来。加工操作实体中主要包含了零件加工过程中所用加工刀具 (Tool)、加工策略 (Strategy)、加工方法 (如钻孔、粗铣平面等) 以及工艺参数 (Technology) 等。加工策略是指加工时采用的加工方式, 如加工一个封闭槽时, 既可以采用环形切削方式也可以采用行切方式进行铣削加工; 工艺参数则指主轴转速、切削速度和切削液等工艺信息。

4) 几何描述 (Geometry Description)

在 STEP-NC 程序中, 对于工件总体结构信息、安装和定位面信息以及制造特征几何信息等都是依据国际标准 ISO 10303 所规定的格式来进行信息的描述和表达, 即: STEP-NC 中的几何信息描述方式与 STEP 中的几何信息描述方式完全兼容。这样做的好处就是 CNC 系统可以直接读取 CAD 系统中的数据, 从而避免了数据格式的转换以及在转换过程可能造成的信息丢失现象。

下面是一个 STEP-NC 程序的部分内容, 通过它可以清楚地看出 STEP-NC 程序的结构和组成。

```
ISO-10303-21
HEADER;
FILE_DESCRIPTION(('EXAMPLE OF NC PROGRAMME FOR MILLING: PLANAR FACE,
POCKET, HOLE. '), '1');
FILE_NAME('EXAMPLE 1.STP', '$', ('ISO 14649'), (''), 'JOCHEN WOLE', 'WZL
RWTH-AACHEN', 'GERMANY');
FILE_SCHEMA(('MACHINING_SCHEMA', 'MILLING_SCHEMA'));
ENDSEC;

DATA;
#1=WORKPIECE('SIMPLE WORKPIECE', #2, 0.010, $, $, $, (#57,) #58, #59, #60));
#2=MATERIAL('ST-50', 'STEEL', (#3));
```

```

#3=PROPERTY_PARAMETER('E=200000N/M2');
#4=PLANAR_FACE('PLANAR_FACE1',#1, (#16),#42,#61,$,$,$,$,#62,());
#5=ROUND_HOLE('HOLE1 D=22m',#1, (#19,#20),#43,#63,$,$,$,$,#64,$,#6,
$, $);
#6=THROUGH_BOTTOM_CONDITION();
#7=CLOSED_POCKET('POCKET1',#1, (#21,#22),#44,#65,#66,#67,$,$,(),,
$, #8,#68);
#8= PLANAR_POCKET_BOTTOM_CONDITION();
#9=PROJECT('EXECUTE EXAMPLE1',#10, (#1));
#10=WORKPLAN('MAIN WORKPLAN', (#11, #12, #13, #14, #15),$,#36);
#11=MACHINING_WORKINGSTEP('WS FINISH PLANAR FACE1',#46,#4, #16);
#12= MACHINING_WORKINGSTEP('WS DRILL HOLE1',#46,#5, #19);
#13= MACHINING_WORKINGSTEP('WS REAM HOLE1',#46,#5, #20);
.....
#16=PLANAR_FINISH_MILLING($,$,'FINISH PLANAR FACE1',#25,10.00,$,
#50,#30,#35,#17,#18,2.500);
#17=PLUNGE_RAMP($,45.000);
#18=PLUNGE_RAMP($,45.000);
#19=DRILLING($,$,'DRILLING HOLE1',#26,10.00,$,#48,#31,#35,$,
0.000);
#20=REAMING($,$,'REAM HOLE1',#27,10.00,$,#49,#32,#35,$,10.000,.T.,
$, $);
.....
#25=BIDIRECTINAL(5.000,4.000,.T.,#69,#70);
#26=DRILLING_TYPE_STRATEGY(75.000,50.000,2.000,50.000,8.000,10.000,
$,200.00);
.....
#30=MILLING_TECHNOLOGY(0.04,.TCP.,$,1.200,$,$,.F.,.F.,.F.);
.....
#35=MILLING_MACHINE_FUNCTIONS(.T.,$,$,.F.,$,(),.T.,$,$,());
#36=SETUP('SETUP1',#38,#45, (#37));
.....
#40=AXIS2_PLACEMENT_3D('PLANAR1',#77,#78,#79);
.....
#46=PLANE('SECURITY PLANE',#40);
.....
#50=MILLING_CUTTING_TOOL('MILL 20MM',#53,(), (50.000),80.000,$,$);
.....
ENDSEC;
END-ISO-10303-21

```


1.5 STEP-NC 描述语言 EXPRESS

EXPRESS 语言是一种形式化建模语言，主要是面向对象的，描述的是产品数据的概念模式。STEP 标准文件就是用该语言来描述的，主要对象是 STEP 中的逻辑层，但是 EXPRESS 的使用不限于 STEP 标准。STEP-NC 是 STEP 的延伸，所以 EXPRESS 也是 STEP-NC 的描述语言，而且在 1994 年 10 月，它被规范成国际标准 (ISO 10303—11:1994) 即工业自动化系统及集成产品数据表达和交换的 Part11 描述方法：EXPRESS 语言参考手册。

1.5.1 EXPRESS 的特点

EXPRESS 语言是描述方法的重要组成部分，也是 STEP-NC 标准的基础，是一种形式化建模语言。它可以对产品的材料、管理信息、几何、拓扑等进行表达，对其中某一区域的对象 (Object)、对象所包括的信息单元以及对象的许可与限制的操作给予一定的说明。一般来说，对于任何复杂事物的描述，都可以用 EXPRESS 语言机制来进行表达，其具有如下几个特点：

(1) EXPRESS 是一种面向对象的形式化模型语言，而不是传统的程序设计语言。它只提供数据的定义功能，与具体的计算机系统和程序设计语言无关。当需要执行这些定义数据时，则必须用 EXPRESS 模型数据与其他各种程序设计语言建立关系。

(2) 实体 (ENTITY) 是 EXPRESS 定义的新类型，以 ENTITY 开头，END_ENTITY 结束。在信息模型的描述中，实体是主要的被描述对象。客观世界中的特定对象、概念的描述以及对它们之间关系的表达都可以通过它加以说明，表示形式如下：

```
ENTITY center_drill
    SUBTYPE OF (milling_tool_body);
END_ENTITY;
```

(3) EXPRESS 具有超强的继承机制，可以描述实体之间的网状继承关系，这种关系是通过子类 (SUBTYPE) 和超类 (SUPERTYPE) 来实现的。子类是从超类中派生出来的，它继承了超类的所有属性，并在其继承关系上引入了三个关系算子：ONEOF、AND、ANDOR。

ONEOF 表示实体之间是互斥关系，这些实体不能在同一时间被实例化，而只能是其中的一个，表示形式如下：

```
ENTITY drill
    ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF (twist_drill, spade_drill,))
    SUBTYPE OF (milling_tool_body);
END_ENTITY;
```

AND 表示实体可以同时被实例化，它们可以结合在一起而生成一个新的实体，该实体拥有被运算实体的特征，表示形式如下：