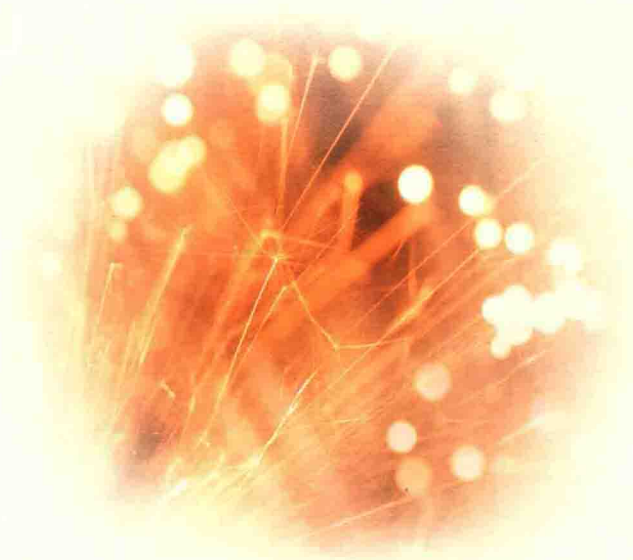


DIANHUOHUA JIAGONG SHUKONG XITONG RUANJIAN DE
YANFA YU YINGYONG

电火花加工数控系统软件的研究与应用

黄海鹏 ◎著



厦门大学出版社 国家一级出版社
XIAMEN UNIVERSITY PRESS 全国百佳图书出版单位

DIANHUOHUA JIAGONG SHUKONG XITONG RUANJIAN DE
YANFA YU YINGYONG

电火花加工数控系统软件的研发与应用

黄海鹏 ◎著



厦门大学出版社
XIAMEN UNIVERSITY PRESS

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

图书在版编目(CIP)数据

电火花加工数控系统软件的研发与应用 / 黄海鹏著. — 厦门 : 厦门大学出版社, 2018. 4

ISBN 978-7-5615-6766-1

I. ①电… II. ①黄… III. ①电火花加工-数字控制系统-系统软件-软件开发
IV. ①TG661-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 270569 号

出 版 人 郑文礼

责任编辑 郑 丹

封面设计 蒋卓群

技术编辑 许克华

出版发行 厦门大学出版社

社 址 厦门市软件园二期望海路 39 号

邮政编码 361008

总 编 办 0592-2182177 0592-2181406(传真)

营销中心 0592-2184458 0592-2181365

网 址 <http://www.xmupress.com>

邮 箱 xmup@xmupress.com

印 刷 厦门市金凯龙印刷有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 11.25

插页 2

字数 240 千字

版次 2018 年 4 月第 1 版

印次 2018 年 4 月第 1 次印刷

定价 42.00 元

本书如有印装质量问题请直接寄承印厂调换



厦门大学出版社
微信二维码



厦门大学出版社
微博二维码

前言

电火花加工(electrical discharge machining,简称 EDM)属于特种加工技术的一种,具有脉冲放电能量密度高、没有宏观切削力等特点,适用于难加工金属材料的加工。其加工形式属于反拷贝加工,结合多轴联动数控技术,通过合理的轨迹规划,可以完成空间复杂结构的加工。基于以上特点,多轴联动电火花加工已经成为航空、航天领域一些关键零部件非常适用甚至是不可替代的加工方法。

目前,EDM 数控技术的发展趋势为由简单控制向多轴联动控制发展,软件化程度越来越高,开放式发展成为大势所趋。我国目前在高档 EDM 数控设备方面已经取得了一定的研究成果,但还有很长的一段路要走。故作者将多年来在多轴联动 EDM 数控系统软件方面的研究成果归纳总结,供相关行业的从业人员和广大读者参考,也为推动我国多轴联动 EDM 数控设备关键技术的进步,推动我国航空、航天事业的发展略尽绵薄之力。

本书的内容包含多轴联动 EDM 数控系统软件的架构、建模、开发以及应用等各个阶段,并且包含 EDM 辅助技术——电极预装系统的相关内容。本书的主要技术特点为:结合 Linux 和 RT-Linux 操作系统,进行开放式、软件化的多轴联动 EDM 数控技术的开发;建立多轴联动 EDM 数控系统软件双核控制三模块串联结构模型;针对 EDM 功能的多样性要求,提出功能服务子模块的“多线程—多功能执行器”模型;针对 EDM 必须实时判断外部硬件状态调控加工过程的特性,提出执行实时控制任务的线程承载法;针对多轴联动 EDM 中多运动轴控制的复杂性,建立抽象对象并以此构建了驱动模块,提出共享内存分区建立策略和交换缓存分区建立策略;引入 EDM 电极预装系统概念,能够实现复杂电极的预先检测、位姿调整及安装工作。

本书共 9 章,第 1 章对 EDM 数控技术进行了概述,第 2 章介绍了多轴联动

EDM 数控系统的软件架构,第 3~6 章分别介绍了数控系统软件各模块及模块间通信的构建,第 7 章介绍了数控系统软件的开发,第 8 章介绍了数控系统软件的搭载与应用,第 9 章介绍了 EDM 电极预装系统软件的研发与应用。

本书可供从事 EDM 数控技术的科研人员和工作人员阅读,同时可供相关领域的读者参考。

本书在写作过程中,得到了哈尔滨工业大学的王振龙教授、迟关心教授、李茂盛同志,以及其他专家的关心与指导,同时参考了大量的国内外相关文献,在此一并表示衷心的感谢!

本书在出版过程中,得到了厦门理工学院学术专著出版基金的资助,在此表示衷心的感谢!

书中不妥之处,恳请读者批评指正。

黄海鹏

2018 年 2 月

目 录

第 1 章 EDM 数控技术概述	001
1.1 EDM 简介	001
1.1.1 EDM 的原理及特点	001
1.1.2 EDM 的应用与发展	002
1.2 EDM 数控技术的发展	003
1.2.1 由简单控制向多轴联动控制发展	003
1.2.2 软件化程度越来越高	003
1.2.3 开放式发展成为大势所趋	004
1.3 Linux 操作系统发展及应用	005
1.3.1 Linux 操作系统的发展	006
1.3.2 Linux 操作系统的特点	006
1.3.3 实时 Linux 的发展	008
1.3.4 基于 Linux 平台的数控系统开发	009
1.3.5 基于 Linux 平台的 EDM 数控系统软件开发可行性	010
第 2 章 多轴联动 EDM 数控系统的软件架构	012
2.1 软件架构简介	012
2.1.1 软件架构的含义	012
2.1.2 软件架构的组成	013
2.1.3 软件架构的目标	013
2.1.4 软件架构的流程	014
2.2 EDM 数控机床硬件结构的特点	014
2.3 数控系统软件功能需求分析与功能划分	016
2.4 数控系统软件结构层次划分	017
2.5 数控系统软件整体结构构建	020
2.5.1 各模块确立	020
2.5.2 模块间通信确立	020

2.5.3 整体结构确立	021
2.6 数控系统软件功能运行机制	022
第3章 数控系统软件用户管理模块构建	024
3.1 GUI简介	024
3.1.1 GUI概述	024
3.1.2 数控系统软件 GUI 组成	025
3.1.3 GUI 开发	025
3.2 GUI子模块构建	027
3.2.1 GUI 功能组成	027
3.2.2 加工控制功能	027
3.2.3 坐标移动功能	029
3.2.4 定位功能	029
3.2.5 手动加工功能	029
3.2.6 文件加工功能	030
3.2.7 加工履历功能	030
3.2.8 机床参数管理功能	030
3.2.9 加工条件管理功能	031
3.2.10 加工条件调整功能	031
3.2.11 网络设置功能	031
3.2.12 信息提供功能	032
3.3 功能服务子模块构建	033
3.3.1 多线程建立	034
3.3.2 多功能执行器建立	034
3.3.3 任务执行功能执行器	034
3.3.4 信息提供功能执行器	036
3.3.5 数控代码译码器	037
3.3.6 电极半径补偿器	040
3.3.7 数控命令执行器	041
3.4 用户管理模块整体运行机制	041
3.4.1 信息提供运行机制	042
3.4.2 任务执行运行机制	043
第4章 数控系统软件实时控制模块构建	044
4.1 实时控制模块结构确立	044

4.1.1	任务确立	044
4.1.2	结构确立	045
4.1.3	多任务调度	046
4.2	多轴联动插补算法	047
4.2.1	插补算法确立	048
4.2.2	可逆直线插补算法	049
4.2.3	可逆圆弧插补算法	051
4.2.4	多轴联动插补算法	052
4.3	定位误差补偿方法	054
4.3.1	补偿原理	054
4.3.2	补偿策略	054
4.4	数控命令读取任务	055
4.5	手控盒处理任务	056
4.6	加工任务	058
4.6.1	伺服控制	058
4.6.2	抬刀控制	058
4.6.3	摇动控制	059
4.7	原轨迹回退任务	061
4.8	快速移动任务	061
4.9	接触感知任务	063
4.10	机床回零任务	064
4.10.1	直线轴回零	065
4.10.2	旋转轴回零	065
4.10.3	机床开机回零	066
4.11	极限移动任务	067
第5章	数控系统软件驱动模块构建	068
5.1	驱动方式选择	068
5.1.1	I/O 端口与 I/O 内存	068
5.1.2	I/O 内存驱动	069
5.2	伺服系统驱动	069
5.2.1	驱动对象参数确定	070
5.2.2	抽象对象构建	071
5.2.3	参数配置	074
5.2.4	机械坐标设定与获取	074

5.2.5	状态获取与判断	075
5.2.6	错误分析与清除	075
5.2.7	运动驱动	075
5.3	其他系统驱动	078
5.3.1	脉冲电源系统驱动	078
5.3.2	工作液循环系统驱动	078
5.3.3	检测系统驱动	078
5.3.4	手控盒系统驱动	078
第6章	数控系统软件模块间通信构建	079
6.1	用户管理模块与实时控制模块间通信构建	079
6.1.1	数据通信确定与划分	079
6.1.2	通信方法选择	081
6.2	共享内存建立	082
6.2.1	共享内存简介	082
6.2.2	共享内存建立策略	082
6.3	RT-FIFO 建立	083
6.3.1	RT-FIFO 简介	083
6.3.2	RT-FIFO 建立策略	083
6.4	实时控制模块和驱动模块间通信构建	084
6.5	数控系统软件整体运行机制	085
第7章	数控系统软件的开发	087
7.1	实时 Linux 运行环境的搭建	087
7.1.1	搭建过程	087
7.1.2	内核文件配置	088
7.1.3	Linux 下的 U 盘使用方法	090
7.2	主功能界面	091
7.2.1	信息显示模块	091
7.2.2	电参数显示及调整模块	092
7.2.3	功能按键模块	093
7.3	坐标移动	093
7.3.1	移动	094
7.3.2	半程移动	095
7.3.3	极限移动	096

7.3.4	回零	097
7.3.5	坐标设定	097
7.4	定位	099
7.4.1	端面定位	099
7.4.2	角定位	100
7.4.3	柱中心定位	101
7.4.4	孔中心定位	102
7.4.5	自动三点定位	103
7.5	手动加工	105
7.5.1	直线加工	105
7.5.2	圆弧加工	106
7.5.3	任意多数个加工	107
7.5.4	格子多数个加工	109
7.5.5	圆周多数个加工	110
7.6	文件加工	112
7.6.1	文件的打开、删除、拷贝与加工	114
7.6.2	文件的新建、编辑、保存与另存	115
7.6.3	文件内容的查找与替换	115
7.7	加工履历	117
7.7.1	显示加工履历	117
7.7.2	编译错误	118
7.8	机床参数	118
7.8.1	标志模块	120
7.8.2	电机模块	121
7.8.3	各轴模块	122
7.8.4	检测功能	122
7.9	加工条件	123
7.9.1	用户参数与系统参数	123
7.9.2	参数的修改、保存与删除	124
7.10	软件的开机自动运行	125
7.10.1	root 用户自动登录	125
7.10.2	软件自动运行	125
第 8 章	数控系统软件的搭载与应用	127
8.1	五轴联动 EDM 数控机床	127

8.1.1	机床主体	128
8.1.2	控制电柜	128
8.2	数控系统软件搭载与调试	130
8.2.1	驱动验证	130
8.2.2	电机设置	130
8.2.3	功能验证	131
8.2.4	Bug 排查	131
8.2.5	加工调试	131
8.2.6	定位误差补偿	132
8.3	带叶冠整体式涡轮盘加工实验	134
8.3.1	带叶冠整体式涡轮盘简介	134
8.3.2	涡轮盘加工方法	135
8.3.3	涡轮盘加工过程	136
8.3.4	涡轮盘加工要求	136
8.3.5	涡轮盘加工难点	136
8.3.6	定位准备	137
8.3.7	粗加工与精加工	138
8.3.8	加工结果	140
8.3.9	实验结论	141
第9章	EDM 电极预装系统软件的研发与应用	143
9.1	EDM 电极预装系统简介	143
9.1.1	预装系统概念的提出	143
9.1.2	预装功能实现原理	144
9.2	电极离线位姿调整	144
9.2.1	调整原理	144
9.2.2	调整过程	145
9.3	电极形状精度检测方法	146
9.3.1	检测流程	146
9.3.2	检测原理	147
9.4	特征点确定与数据提取	148
9.4.1	特征点的确定	148
9.4.2	特征点数据提取	149
9.4.3	数据格式	150
9.5	检测路径规划	150

9.5.1	检测路径规划原则	150
9.5.2	检测坐标系建立	151
9.5.3	检测路径起点确定	152
9.5.4	自由曲线检测路径规划	153
9.5.5	自由曲面检测路径规划	153
9.5.6	电极检测路径规划	154
9.6	电极形状精度评定	154
9.6.1	自由曲线轮廓误差求取	155
9.6.2	电极截面线轮廓误差求取	157
9.6.3	电极形状精度评定流程	158
9.7	电极预装系统软件开发	159
9.7.1	软件功能简介	159
9.7.2	电极检测功能	160
9.7.3	位姿检测功能	161
9.7.4	手动检测功能	162
9.7.5	参考点管理功能	163
9.8	电极预装系统硬件	165
9.9	电极预装实验	166
9.9.1	实验组成	166
9.9.2	实验结果	166
	参考文献	168

第1章

EDM 数控技术概述

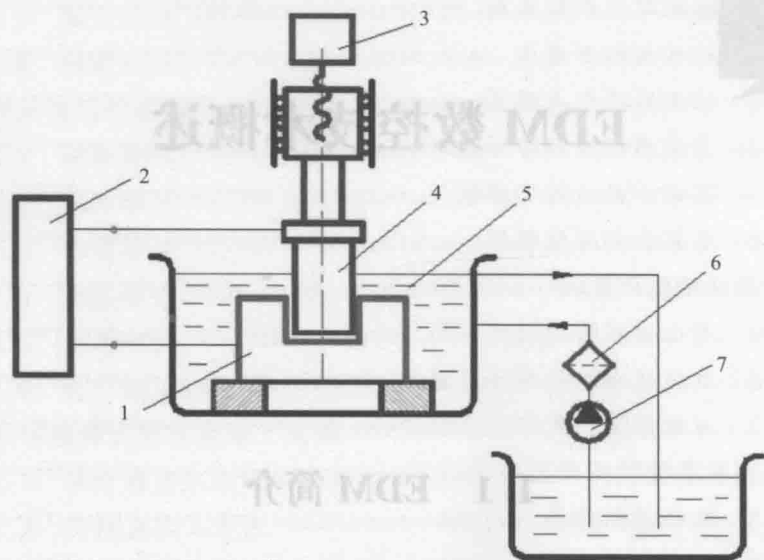
1.1 EDM 简介

1.1.1 EDM 的原理及特点

电火花加工(electrical discharge machining, 简称 EDM)是特种加工技术的一种, 由苏联学者拉扎连科夫妇(Dr.B.R.Lazarenko 及 Dr.N.I.Lazarenko)于 20 世纪 40 年代研究开创, 主要包括电火花成型加工和电火花线切割加工。目前业界内通常将电火花成型加工简称为 EDM, 而将电火花线切割加工简称为线切割加工。本书中所称的 EDM, 亦特指电火花成型加工。

EDM 的基本原理是: 工具和工件分别连接脉冲电源的两极, 浸入具有一定绝缘度的工作液中, 基于工具和工件正负两极之间的脉冲性火花放电时的电蚀现象来去除多余金属, 从而达到对工件的尺寸、形状及表面质量的预定加工要求, 如图 1-1 所示。

EDM 具有如下一些显著特点: 第一, 脉冲放电的能量密度高, 便于应用在用普通的加工方法难以胜任的特殊材料工件的加工上, 不受材料硬度影响, 不受热处理状况影响; 第二, 加工时工具电极与工件不接触, 没有宏观的切削力, 工具电极材料不需要比工件材料硬, 可以实现软刀具加工硬工件; 第三, 由于 EDM 属于反拷贝形式的加工, 故可以通过设计特殊形状的工具电极来完成复杂形状的加工; 第四, 结合多轴联动技术, 可以合理地规划工具电极的加工轨迹, 完成狭窄结构和复杂结构的加工, 并且加工精度较高。



1—工件;2—脉冲电源;3—自动进给调节系统;4—工具;5—工作液;6—过滤器;7—工作液泵

图 1-1 EDM 基本原理

1.1.2 EDM 的应用与发展

由于 EDM 加工特点及优势,目前主要用于各种普通切削方法难以胜任的脆、硬材料的加工,如硬质合金、钛合金和淬火钢等;加具有复杂型腔的模具和零件;加工各种异形孔、深槽、窄缝等;还可以在微细加工领域进行微孔的加工,完成微细铣削工作。目前电火花加工已成为一种重要的加工方法,广泛应用于模具制造、车辆、航空航天等众多领域。

自从拉扎连科夫妇于 1943 年发明第一台 EDM 机床以来,经过 70 多年的发展,EDM 机床的加工形式已经由最开始的单轴简单运动发展到目前的多轴复杂运动。近年来,EDM 相关应用领域的迅猛发展,对 EDM 提出了更高的要求。目前多轴联动 EDM 技术已成为 EDM 的重要发展方向和研究领域。

随着我国航空、航天事业的飞速发展,许多关键零部件的高精度、高效加工问题日益突出。目前,航空、航天领域所使用的许多关键零部件具有如下几个特点:第一,采用高硬度、高强度、高熔点的难加工耐热合金材料作为胚料。这些材料的可切削性差,对刀具、切削方法和加工工艺的要求都非常高。第二,结构通常包含自由曲面。有的曲面形状复杂,曲率变化非常剧烈,普通加工方法的加工工艺无法处理。第三,有的包含狭小空间结构和复杂型腔结构。这就导致了刀具的活动空间受到很大的限制,许多加工方法因为加工轨迹干涉而无法完成加工。零部件的这些自身特点导致其加工成了一个难题。目前多轴联动 EDM 已经成为这些零部件非常适用而且不可替代的加工方法。

而想要完成这些零部件的加工,则必须实现多轴联动 EDM 的数字控制。

1.2 EDM 数控技术的发展

1.2.1 由简单控制向多轴联动控制发展

传统的 EDM 数控机床是控制单轴在 Z 坐标轴方向上进行加工,后来逐步发展为三轴独立和三轴联动控制数控成型加工。目前大量应用的 EDM 数控机床还是以三轴及三轴以下为主。但是在进行形状复杂的零部件加工时,单轴、三轴 EDM 机床已经不能完全满足要求,往往需要四轴、五轴甚至五轴以上联动的 EDM 数控机床来进行加工。近些年来,伴随着我国航空、航天事业的飞速发展,四轴、五轴联动 EDM 数控机床的需求量明显增长。

经过这些年的发展,EDM 数控技术也由传统的单轴简单控制依次发展为三轴独立控制、三轴联动控制、四轴联动控制、五轴及以上联动控制。其中在发展到四轴联动控制之后,经历了一段比较长时间的空闲期,因为四轴联动已经可以满足当时的生产加工需要。后来因为出现了特殊材料、特殊结构工件的加工要求,才逐步发展为五轴及以上联动控制。由于多轴联动数控机床的数控系统开发、数控程序编制都远比三轴联动数控机床复杂得多,因此多轴联动数控技术的发展水平在国际上一直被作为衡量一个国家设备自动化水平高低的标志,EDM 数控技术的发展水平同时也从一个侧面反映了一个国家制造业水平的高低。

1.2.2 软件化程度越来越高

随着数控技术的开放化和计算机软件的迅猛发展,大量软件技术迅速融入数控系统中,软件所实现的功能在数控系统中所占的比重越来越大,使得数控技术已经进入“软数控”(SoftCNC)时代。软数控的显著特点就是不使用专门的硬件板或运动控制器,所有的运动控制功能完全通过数控系统软件实现。如今提到数控系统,许多人的认识和第一反应就是运行于主控机当中的数控系统软件,可见数控技术的软件化趋势已经使人们把大部分的研究精力都集中于数控系统软件的研发上。图 1-2 所示为数控技术软件化的发展历程。提高 EDM 数控系统的软件化程度,有利于提高系统的移植性,同时能够摆脱对硬件的过分依赖,减少开发成本,是一个很好的选择。

软数控降低了整个系统的硬件成本,同时也增强了整个系统的柔性。但是软数控必须面对的一个重要问题就是数控系统的实时性如何保证,这是对软数控的一个挑战。

现在普遍采用的方法是应用实时操作系统或者改进非实时操作系统的实时性来开发数控系统软件,相对而言应用一款成熟的实时操作系统作为开发平台进行数控系统软件的开发是比较简单易行的方法,避免了对操作系统原理的修改,减少了风险。

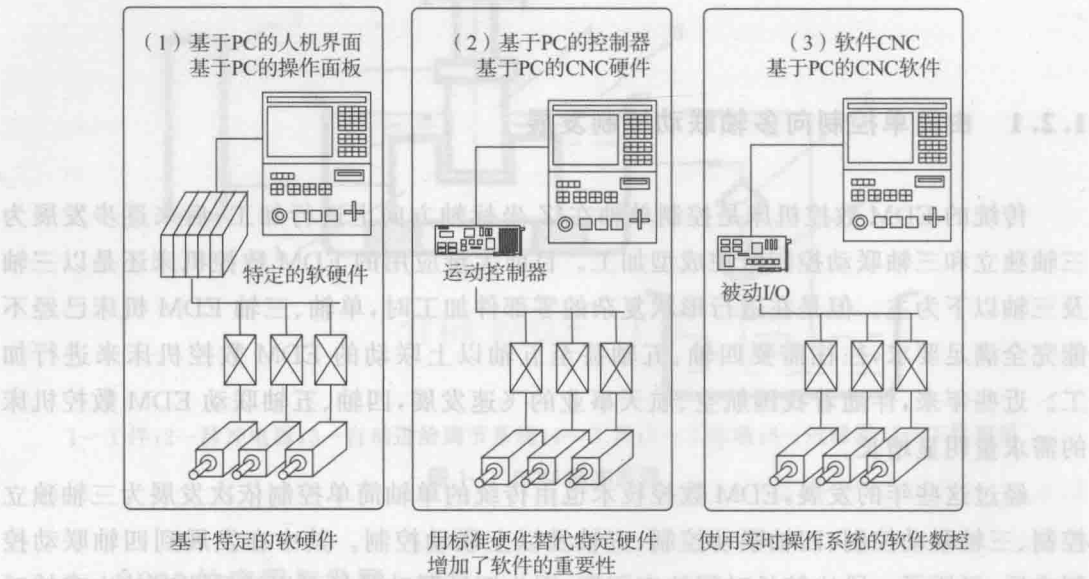


图 1-2 数控技术软件化发展历程

1.2.3 开放式发展成为大势所趋

20 世纪 90 年代以来,数控技术最重要的发展趋势是数控系统的开放化,EDM 数控系统也必然要走开放化的共同发展道路。传统的数控系统是封闭的,是数控厂商为了获得最大的自我利益而制作的专有打包产品,不对外开放,这必然不利于业内人士的共同研发和用户的选择,进而大大地阻碍了数控技术的发展。计算机技术及其相关技术的进步促进了开放式数控系统的诞生。

电气及电子工程师协会(institute of electrical and electronics engineers, IEEE)对“开放式”一词做了如下的定义:一个开放式系统能够使各种应用合理地运行在来自多个供应商的不同平台上,能够与其他系统应用程序进行相互的操作,并给用户提供一致的交互界面的性能。为了给控制器厂商建立一个中立的控制标准,美国于 1987 年发起了“下一代控制器”(the next generation work-station/machine control,简称 NGC)计划。之后开放式体系结构的数控系统获得了迅速的发展。

目前许多国家都在进行开放式数控系统平台的标准制定和产品开发工作,如欧盟的自动化控制系统的开放式体系结构(open system architecture for control within automation systems,简称 OSACA)、日本的控制器的开放式系统环境(open system envi-

ronment for controller, 简称 OSEC)、中国的开放式数控系统(open numerical control system, 简称 ONC)等。我国于 2003 年 1 月 1 日开始实施了开放式数控系统国家标准 GB/T 18759.1-2002, 这非常有利于促进我国 EDM 数控产业的开放式发展, 推动整个行业 EDM 数控技术的共同发展。

Windows 操作系统是如今应用最广泛、发展相对比较成熟的操作系统, 运用 Windows 操作系统来开发数控系统也是比较广泛采用的一种方法。但是, Windows 操作系统从根本上来说并不是一个开放式的操作系统, 其关键技术还垄断在个别国际组织的手中, 不对外界公开。因此, 利用 Windows 操作系统并不能开发出真正的开放式数控系统。20 世纪末, 随着 Linux 操作系统的面世, 开放式数控系统的发展获得了新的生命力。Linux 操作系统实现了真正开放式, 其内核源代码完全对所有用户公开, 用户可以真正实现对操作系统最底层的操作, 这大大增加了数控系统开发的方便性、灵活性、开放性, 促进了开放式数控系统的飞速发展。经过多年来的应用与发展, Linux 操作系统的功能得到了极大的丰富和增强, 稳定性得到了充分的验证, 作为一个性能良好的通用操作系统逐渐为广大用户所接受; 而且随着其实时性改造方案的日趋成熟, Linux 操作系统的实时性也得到了保证, 从而使基于 Linux 操作系统的软数控实现成为可能。因此, 采用 Linux 操作系统进行开放式、软件化的数控系统的研究开发工作已如火如荼地开展起来了。

对开放式数控系统来说, 通用的软硬件平台是至关重要的。个人计算机(personal computer, 简称 PC)产业的迅速发展和 PC 的大范围普及, 给开放式数控系统的发展提供了广阔的舞台。PC 因其开放性好、具有较高的性价比, 已成为开放式数控系统首选的硬件平台, 数控系统专用硬件也逐步实现了“PC 化”。相应地, 越来越多的适用于 PC 的专用数控硬件也随之诞生, 比如高度集成化 CPU、RISC 芯片、大规模可编程集成电路 CPLD、FPGA 和可编程多轴控制器(programmable multi-axes controller, PMAC)等, 并且这些硬件都逐步成为开放式数控系统的通用硬件。以 PC 作为硬件平台, 以 Linux 操作系统作为软件平台, 开发开放式、软件化的 EDM 数控系统, 是一个非常合适、合理且实际的选择。

1.3 Linux 操作系统发展及应用

Linux 操作系统是由芬兰大学生 Linus Torvalds 最早开发的一种 UNIX 类操作系统。由于其遵守 GNU 的通用公共许可证 GPL(general public license), 源代码完全开放, 故一出现就立刻引起了广大计算机爱好者的关注, 并吸引了全世界许多优秀的计算机天才无私地投入 Linux 共同开发工作之中。伴随着互联网技术的飞速发展和普及, 全世界的 Linux 开发人员能够更方便地交流开发成果与开发心得, 这就促使 Linux 在