

# 开放式数控技术及其在我国的发展状况

## Open-Architected NC Technology and Its Development in China

哈尔滨工业大学机电工程学院 富宏亚  
沈阳工业大学机械工程学院 梁全



富宏亚

哈尔滨工业大学机电学院教授、博士生导师。主要从事机械制造自动化方面的教学与研究。主持和主要完成了各类科研项目 40 余项,发表学术论文 60 余篇,获发明专利 6 项。在机床数控技术、智能加工、纤维缠绕/铺放成型技术等方面取得多项成果。

开放式数控系统的设计思想诞生于 20 世纪 80 年代,近 30 年的研究取得了巨大的进展,已建立了基于互操作和分级式软件模块的开放式体系结构标准规范。从 90 年代开

始,国内一些研究单位也投入了一定量的资金和人力进行开放式数控系统的研究工作。根据电器与电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)对开放式数控系统的定义,开放式系统应该提供这样一些功能:它们能使应用程序在不同厂商的各种平台上运行,能支持与其他系统应用的相互操作,并且具有用户界面的一贯形式。简单地说,开放式系统应该具有可移植性、可互操作性和一致性。不言而喻,“开放性”是该技术的最主要的特征。从技术角度上,“开放性”可以为 3 类:数控系统软件的开放性、加工数据模型的开放性和硬件实施平台的开放性。图 1 所示的树形图可描述开放

式数控系统开放性的技术分支,从中可以清楚地看出开放式数控系统的关键技术。本文将分别从“软件的开放性”、“加工数据模型的开放性”和“硬件实施平台的开放性”等方面,介绍各领域内的关键技术、国内的研究现状和存在的问题,并提出解决方法和建议,与同行交流和共享。

### 系统软件的开放性

从本质上说,开放式数控系统的开放性得益于软件,而软件开放性中最重要的是数控系统的开放式体系结构。它包括系统的软硬件组成部件的划分和各部件间的连接与约束(如拓扑关系、同步关系和通讯协议等)。CNC 系统的体系结构不仅为

系统的分析、设计和制造提供参考框架,也是指导系统在整个生存期内进行扩展、更新、维护和二次开发的基础,是整个系统的灵魂,是开放性实现的根源。

的可能。但事实上,选用何种平台直接影响到开发难度、成本等一系列核心问题。目前常见的方案一种是采用 Windows+RTX 方案,RTX 可以认为是内置于 Windows 的一个子系统,

实现,目前国内采用的主要方式是在 Windows 操作系统下采用微软的组件对象模型(Component Object Module, COM)技术来进行开发。所谓 COM 是由微软提出的一种适合于分布式软件模型的标准。这种系统将数控功能分成若干模块,按 COM 标准开发各模块的具体功能,通过相互间的标准接口完成实际的任务。然后通过标准的接口卡把数控系统的软件和机床连接起来,形成一套简洁、通用、具有很高开放性的数控系统。

#### 4 有限状态机

CNC 系统是一个复杂且具有不同层次实时性要求的多任务控制器。系统中每个对象的功能、行为、起始过程、以及它们之间相互操作的关系,在系统建模中都必须得到清晰的描述。目前最有效的手段就是有限状态机(Finite State Machine, FSM)理论。有限状态机由有限的状态和相互之间的转移构成,在任何时候只能处于给定数目的状态中的一个。FSM 经常被应用于反应式系统的建模。数控系统根据输入的信息控制机床移动,实现加工操作,其行为是可预见的,属于典型的反应式系统,将外部输入的信息表示为 FSM 的输入事件,将机床的加工操作表示为 FSM 的动作,因此,有限状态机在开放式软数控系统的开发中占有重要的地位。

#### 5 数控系统中的任务调度

组件技术和有限状态机是 OMAC 体系结构所引入的技术,而任务调度是任何体系结构数控系统都要面临的问题。通常数控系统的操作任务包括管理和控制两大部分。前者对系统实时性要求不高,后者就具有强实时性的要求。早期的计算机数控系统中,缺少全面的任务调度机制,对任务执行的控制通常采用前后台结构或多重中断结构,而前后台结构的缺点是程序运行时资源不能

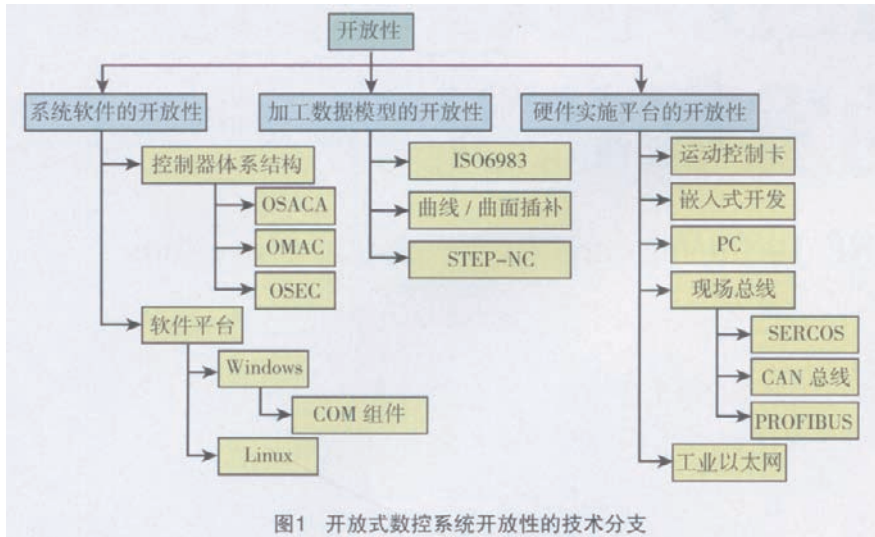


图1 开放式数控系统开放性的技术分支

#### 1 体系结构的研究

到目前为止,世界上已有几个组织开展了开放结构控制器体系结构的研究工作,比较有影响的是欧洲的 OSACA (Open System Architecture for Controls Within Automation System)、美国的 OMAC (Open Modular Architecture Controller) 和日本的 OSEC (Open System Environment for Controller)。国内已有多家研究单位对这几种种体系结构进行了充分比较,并在以美国的 OMAC 为基础、采用 COM 组件技术实现方式来搭建开放式结构控制器方面做了一些尝试。从近几年的发展看,该种研究方向是正确的、适合中国国情的。也正因为选用了 OMAC 体系结构,引出了实现该体系结构所需要的一系列关键技术,包括实时操作系统、组件开发技术、有限状态机和实时系统下的任务调度等。

#### 2 软件平台

开放式数控系统的硬件平台主要是个人计算机(Personal Computer, PC)。而软件平台就有了多种选择

它不影响 Windows 的原有功能,而增加了其实时性。这种方式适合熟悉 Windows 操作系统的中国用户进行开发,能够在一定程度上降低开发难度,但是无论 Windows 还是 RTX 都不是中国自主知识产权的操作系统产品,该开发平台价格昂贵(尤其是 RTX),底层技术保密,造成国内开放式数控系统的开发严重依赖国外,这对软数控系统的产业化、降低生产成本都十分不利。另一种方案是采用 RTLinux,虽然由于其开源的特性,没有知识产权的问题和底层开发的限制,但对中国用户来说,加大了开发难度,增加了工作量,也阻碍了国内开放式软数控系统的研究进展。事实上,国内在开发平台的选择上,一直面临着两难的抉择。

#### 3 组件技术

OMAC 是目前国内应用比较广泛的开放式数控系统体系结构,而 OMAC 所定义的开放式数控系统的开放性、模块化、可扩展性、可伸缩性和标准独立的接口的实现都离不开组件技术。关于组件技术的

合理协调;多重中断带来的问题是对硬件要求高,模块的动态调度性较差。为了解决上述问题,目前的研究方向是采用实时系统调度模式对数控任务的运行进行统一管理。这样可以使系统运行过程中任务相互协调,提高资源利用率,且易于功能扩展,是一种理想的数控系统实现方式。

## 加工模型的开放性

在开放式数控系统开放性三大发展趋势中,加工模型的开放性占有十分重要的地位。目前,绝大多数商用数控系统加工所采用的数控程序都是基于国际标准 ISO6983 的,它的特点是针对刀具和机床坐标轴进行编程,将以特征表示的零件高层信息处理成以点、线表示的底层几何信息。但采用这种方式,一方面会造成复杂曲线曲面加工精度和制造效率的降低,不利于先进数控系统对高速高精加工的技术追求;另一方面,G 代码无法保存许多与零件设计、加工制造相关的原始信息,不利于现代工业实现自动化、柔性化和集成化生成的目标。由此,产生了复杂样条曲线曲面直接插补技术,直至 STEP-NC 技术的诞生。

### 1 复杂样条曲线曲面直接插补

早期对数控系统样条曲线直接插补的研究是基于对传统 CNC 插补算法的不足而开展的。传统 CNC 插补能力的不足主要体现为在加工复杂曲面零件时,从 CAM 软件中将刀具路径转化到 CNC 系统中,会造成复杂曲线曲面加工精度和制造效率的降低,这是因为传统数控系统只支持直线和圆弧直接插补,在加工复杂曲线曲面时,CAM 软件不得不将复杂曲线离散成小直线段,正是这些小直线段造成了加工精度(离散后必然造成精度降低)和加工效率(每个小直线段都要加减速控制)的降低。而如果采用复杂曲线(如 NURBS)直接插补算法,由于 NURBS 的特性,上述问题

都可以得到圆满的解决。目前样条曲线插补的难点主要集中在五坐标样条曲线插补上,主要技术难点是用什么样的样条曲线来表示刀具姿态。

### 2 STEP-NC

1991 年,国际标准化组织(ISO)颁布的工业产品数据交换标准(Standard for Exchange of Product model data, STEP),利用 STEP 体系结构的可扩展性,将其扩展到制造领域,提出了 STEP-NC (STEP-Compliant Data Interface for Numeric Controls)的概念和相关数据模型。STEP-NC 数控程序与传统数控程序之间的主要区别是前者一般只提供了产生刀具路径所需的信息,而不直接提供刀具路径。因此,基于 STEP-NC 的数控系统的难点在于除了要求数控系统能够解释 STEP-NC 程序之外,更重要的是要求数控系统要具有生成刀具路径的能力。

从以上分析可以看出,数控系统 NURBS 直接插补算法与 STEP-NC 有着天然的联系。笔者认为,在加工模型的开放性方面,国内开放式数控系统的研究应分以下步骤进行:第一步,全面稳定地支持国际标准 ISO6983 (这步已经实现);第二步,使数控系统全面地支持以 NURBS 为代表的样条曲线、曲面插补(这部分的研究在五坐标、曲面插补上还不够成熟);第三步,研究并扩充 STEP-NC 标准,最终研制出全面支持 STEP-NC 标准的开放式数控系统。

总体上说,未来数控系统的运行模式应该是在对 STEP-NC 数控程序分析后,直接用 NURBS 曲线、曲面插补的方式完成加工。

## 硬件实施平台的开放性

### 1 开放式数控系统的硬件架构

国内对开放式数控系统硬件实施平台研究的发展轨迹,大致经历了基于运动控制卡、基于嵌入式开发平台和基于通用 PC (纯软件数控系统)

这 3 阶段发展历程。

国内早期就开始应用,并且现在比较成熟的、针对特殊需求的开放式数控系统即是所谓的“NC 嵌入 PC 型”。其开放性是通过调用嵌入到 PC 中的 NC 的控制器功能函数实现的。这种系统的开放性受到嵌入 NC 开放性限制。但是由于目前如 PMAC 卡等相关的嵌入式 NC 产品已经比较成熟,国内在搭建具有特殊需求(通常是专用机)的数控系统时,通常选用这种方式。

从公开的报道看,国内比较成熟的数控系统企业,如广州数控和大连光洋的数控系统产品,都是在嵌入式系统环境下进行开发并实现的。而对这种基于嵌入式环境的数控系统的开放性研究,国内还只是停留在高校和研究机构进行研究的阶段。

### 2 现场总线

开放式数控系统的硬件实施平台构建中,现场总线的选择是不可忽视的。因为开放式数控系统通常要求以现场总线作为数控系统与伺服驱动之间的接口。而国内在现场总线标准的制定、成熟的数字伺服驱动产品方面,都落后于国外数控系统厂家。国产数控装置与伺服驱动之间的接口仍然采用“脉冲量或模拟量接口”标准,不能满足高速高精数控系统的通信要求。因而,现场总线技术的落后,严重制约了我国开放式软数控系统的发展。

从目前国内对现场总线的研究上看,现场总线协议和标准的制定比较适合中国国情的方向是将以以太网引入数控系统现场总线。这是因为以太网的传输速率要优于国外成熟现场总线 CAN 和 PROFIBUS 等,同时,能够使我国在缺少硬件方面核心技术的情况下,在尽可能短的时间内,采用通用电子器件,打破国外对我国在现场总线方面的技术封锁。另外一种比较先进的技术是 SERCOS 接口技术, SERCOS 是用于

数字控制器与数字驱动器之间的高速串行总线接口和数字交换协议。开发者在掌握了 SoftSERCANS 提供的 DLL 函数以及相关的参数设置后,就可以很方便地实现控制器和驱动器的实时数据交换。

### 国内开放式数控系统的研究成果

从目前公开报道的资料上看,国内几家大学和研究单位都进行了开放式数控系统的研究。山东大学对开放式数控系统的研究涉及的领域比较全面,包括体系结构、现场总线和 STEP-NC 等。建立了 Agent 型的 STEP-NC 控制器的框架结构,并以美国 STEP TOOLS 公司的底层软件 ST-Developer 为开发环境,开发了一个铣削程序的解释器,并对现场工艺规划模型、数控加工数据库和简单特征的仿真系统进行了开发。华中科技大学在这方面的研究比较深入,在开放式实时系统的任务调度、基于以太网的数控系统数字接口技术等方面,深入到了数控系统应用技术的底层核心、最前沿领域;在基于软件芯

片的开放式数控系统方面比较有特色,把数控系统的功能进行抽象并进行封装,将数控软件设计成具有通用接口可以重用的软件芯片,每 1 个软件芯片完成数控系统的 1 个独立模块的功能;并通过建立数控系统软件芯片集成开发环境对软件芯片进行管理,用户可以对软件芯片库进行检索以及维护,还可以添加自己制作的软件芯片。北京航空航天大学提出了基于 RT-Linux 的开放式数控系统的概念。并在 RT-Linux 的系统平台上,实现了基于组件的开放结构的数控系统的原型系统。该系统以任务模块作为系统功能单元,以虚拟模块系统实现数控系统功能单元间的信息交换与同步,支持系统在启动时重构,实现了系统的良好开放性。

哈尔滨工业大学针对我国数控技术发展的特点,利用 Windows、RTX、工业 PC 机和 SoftSERCANS 通讯卡作为软件开发平台,现场总线接口采用 SERCOS 标准,采用层级式有限状态机模型作为系统的动态行为模型,开发了一套运动控制器软件系统,该控制器架构如图 2 所示。并利用该软件系统配置了 2 台数控铣床样机(分别为三坐标和五坐标,其中五坐标机床样机如图 3 所示),在这 2 台工业样机上进行 STEP-NC 和多坐标样条曲线直接插补的研究工作,并完成了一系列加工试验。

国内开放式数控技术经过十余年的发展,取得了长足的进步,但还没有达到成熟产品化的程度。从软件的开放性看,国内应该加大对实时操作系统的研究,争取尽早研制出具有自主知识产权、稳定的实时操作系统,为数控系统的开发提供良好稳定的平台;在加工数据模型的开放性方面,国内应该进一步完善复杂曲线曲面直接插补技术和 STEP-NC 标准的研究,争取最终达到全面兼容 STEP-NC,并直接用样条曲线进行插补的目标;在硬件实施平台的开放

性方面,主要是尽快制定一套现场总线的统一规范和标准,并尽快形成产品,弥补我国在现场总线应用方面的不足。

### 结束语

回顾国内这十几年艰辛的研究历程,确实取得了一定的研究成果,但也留下一些遗憾和对现实的反思。

开放式数控系统的开发基础平台——包括操作系统 Windows 和实时内核软件 RTX,目前国内都没有相关成熟的替代产品,虽然数控系统软件本身拥有自主知识产权,可其运行平台却不得不依赖国外的产品;下一代数控编程接口标准——STEP-NC,以及驱动器现场总线的接口协议——SERCOS,这 2 项标准的制定都和中国无关;与数控技术相关的外围技术和产品,包括高速电主轴、直线电机、与数控系统配套的 CAD/CAM 软件等,无论在哪一个领域,国内都没有可以和国际厂商水平相当的公司或企业。国内开放式数控系统及其相关领域的研究,核心技术基础薄弱、理论应用研究滞后、产业化成果匮乏,总之,国内开放式数控技术的发展之路任重而道远。

开放式数控系统及开放式数控机床的研究是当前数控技术“带有变革性”的重大发展方向,因为开放计划的实施,把世界上所有的系统开发商都推到了同一起跑线。因此我们应该抓住机遇,坚持走数控系统开放化的技术路线,跟踪掌握数控技术的最新进展,解决其中的关键技术,为新一代国产开放式数控系统的研制打下坚实的基础。历史多次证明,发展中国家要想赶超发达国家,应该不断加强基础研究,只有拥有坚实的基础,创造性的成果才能应运而生。随着中国经济实力的提升,国家应该大力支持基础领域的研究,国产数控机床必将拥有光辉的明天。

(责编 淡蓝)



图2 开放式运动控制器的模块化结构

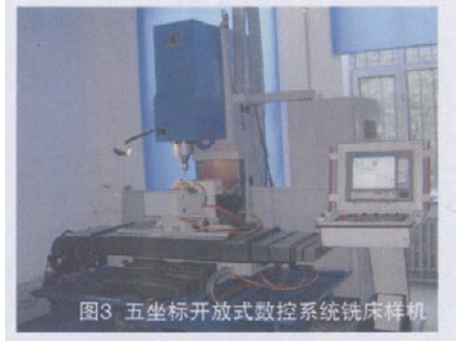


图3 五坐标开放式数控系统铣床样机