

通用运动控制技术现状、发展及其应用

蒋仕龙 吴宏 吕恕 龚小云

(固高科技(深圳)有限公司 深圳 518057)

摘要：运动控制技术的发展是制造自动化前进的旋律，是推动新的产业革命的关键技术。运动控制器已经从以单片机或微处理器作为核心的运动控制器和以专用芯片(ASIC)作为核心处理器的运动控制器，发展到了基于PC总线的以DSP和FPGA作为核心处理器的开放式运动控制器。运动控制技术也由面向传统的数控加工行业专用运动控制技术而发展为具有开放结构、能结合具体应用要求而快速重组的先进运动控制技术。基于网络的开放式结构和嵌入式结构的通用运动控制器逐步成为自动化控制领域里的主导产品之一。高速、高精度始终是运动控制技术追求的目标。充分利用DSP的计算能力，进行复杂的运动规划、高速实时多轴插补、误差补偿和更复杂的运动学、动力学计算，使得运动控制精度更高、速度更快、运动更加平稳；充分利用DSP和FPGA技术，使系统的结构更加开放，根据用户的应用要求进行定制化的重组，设计出个性化的运动控制器将成为市场应用的两大方向。

关键词：运动控制技术，运动控制器，点位控制，连续轨迹控制，同步控制

1 通用运动控制技术的发展现状

运动控制起源于早期的伺服控制(Servomechanism)。简单地说，运动控制就是对机械运动部件的位置、速度等进行实时的控制管理，使其按照预期的运动轨迹和规定的运动参数进行运动。早期的运动控制技术主要是伴随着数控(CNC)技术、机器人技术(Robotics)和工厂自动化技术的发展而发展的。早期的运动控制器实际上是可以独立运行的专用的控制器，往往无需另外的处理器和操作系统支持，可以独立完成运动控制功能、工艺技术要求的其他功能和人机交互功能。这类控制器可以成为独立运行(Stand-alone)的运动控制器。这类控制器主要针对专门的数控机械和其他自动化设备而设计，往往已根据应用行业的工艺要求设计了相关的功能，用户只需要按照其协议要求编写应用加工代码文件，利用RS232或者DNC方式传输到控制器，控制器即可完成相关的动作。这类控制器往往不能离开其特定的工艺要求而跨行业应用，控制器的开放性仅仅依赖于控制器的加工代码协议，用户不能根据应用要求而重组自己的运动控制系统。通用运动控制器的发展成为市场的必然需求。

由国家组织的开放式运动控制系统的研究始于1987年，美国空军在美国政府资助下发表了著名的“NGC(下一代控制器)研究计划”，该计划首先提出了开放体系结构控制器的概念，这个计划的重要内容之一便是提出了“开放系统体系结构标准规格(OSACA)”。自1996年开始，美国几个大的科研机构对NGC计划分别发表了相应的研究内容[3]，如在美国海军支持下，美国国际标准研究院提出了“EMC(增强型机床控制器)”；由美国通用、福特和克莱斯勒三大汽车公司提出和研制了“OMAC(开放式、模块化体系结构控制器)”，其目的是用更开放、更加模块化的控制结构使制造系统更加具有柔性、更加敏捷。该计划启动后不久便公布了一个名为“OMAC APT”的规范，并促成了一系列相关研究项目的运行。

通用运动控制技术作为自动化技术的一个重要分支，在20世纪90年代，国际上发达国家，例如美国进入快速发展的阶段。由于有强劲市场需求的推动，通用运动控制技术发展迅速，应用广泛。近年来，随着通用运动控制技术的不断进步和完善，通用运动控制器

作为一个独立的工业自动化控制类产品，已经被越来越多的产业领域接受，并且它已经达到一个引人瞩目的市场规模。根据 ARC 近期的一份研究，世界通用运动控制（General Motion Control GMC）市场已超过 40 亿美元，并且有望在未来 5 年内综合增长率达到 6.3%。

目前，通用运动控制器从结构上主要分为如下三大类：

基于计算机标准总线的运动控制器，它是把具有开放体系结构，独立于计算机的运动控制器与计算机相结合构成。这种运动控制器大都采用 DSP 或微机芯片作为 CPU，可完成运动规划、高速实时插补、伺服滤波控制和伺服驱动、外部 I/O 之间的标准化通用接口功能，它开放的函数库可供用户根据不同的需求，在 DOS 或 WINDOWS 等平台下自行开发应用软件，组成各种控制系统。如美国 Deltatau 公司的 PMAC 多轴运动控制器和固高科技（深圳）有限公司的 GT 系列运动控制器产品等。目前这种运动控制器是市场上的主流产品。

Soft 型开放式运动控制器，它提供给用户最大的灵活性，它的运动控制软件全部装在计算机中，而硬件部分仅是计算机与伺服驱动和外部 I/O 之间的标准化通用接口。就像计算机中可以安装各种品牌的声卡、CDROM 和相应的驱动程序一样。用户可以在 WINDOWS 平台和其他操作系统的支持下，利用开放的运动控制内核，开发所需的控制功能，构成各种类型的高性能运动控制系统，从而提供给用户更多的选择和灵活性。基于 Soft 型开放式运动控制器开发的典型产品有美国 MDSI 公司的 Open CNC、德国 PA（Power Automation）公司的 PA8000NT。美国 Soft SERVO 公司的基于网络的运动控制器和固高科技（深圳）有限公司的 GO 系列运动控制器产品等。Soft 型开放式运动控制的特点是开发、制造成本相对较低，能够给予系统集成商和开发商更加个性化的开发平台。

嵌入式结构的运动控制器，这种运动控制器是把计算机嵌入到运动控制器中的一种产品，它能够独立运行。运动控制器与计算机之间的通信依然是靠计算机总线，实质上是基于总线结构的运动控制器的一种变种。对于标准总线的计算机模块，这种产品采用了更加可靠的总线连接方式（采用针式连接器），更加适合工业应用。在使用中，采用如工业以太网、RS485、SERCOS、PROFIBUS 等现场网络通信接口联接上级计算机或控制面板。嵌入式的运动控制器也可配置软盘和硬盘驱动器，甚至可以通过 Internet 进行远程诊断。例如美国 ADEPT 公司的 SmartController，固高科技公司的 GU 嵌入式运动控制平台系列产品等。

我国在运动控制器产品开发方面相对落后，1999 年固高科技（深圳）有限公司在深圳成立，她是国内第一家专业开发、生产开放式运动控制器产品的公司。其后，国内又有其他几家公司进入该领域，但实际上，大多是在国内推广国外生产的运动控制器产品，真正进行自主开发的公司较少。“八五”期间，我国广大科研工作者也成功开发了两种数控平台和华中型、蓝天型、航天型、中华型等 4 种基本系统，这些系统采用模块化，嵌入式的软、硬件结构。其中以华中型较具代表性，它采用工业 PC 机上插接口卡的结构，运行在 DOS 平台上，具有较好的模块化、层次化特征，具有一定扩展和伸缩性。但从整体来说这些系统是数控系统，不是独立的开放式运动控制器产品。目前，我国是世界上经济发展最快的国家，市场上新设备的控制需求、传统设备技术升级、换代对运动控制器的市场需求越来越大。另外由于市场日益竞争的压力，系统集成商和设备制造商要求运动控制系统向开放式方向发展。同时，经济型数控市场占有率正在逐渐减小。在这样的形势下，

我国可以抓住这一机遇，研制出具有自主知识产权，具有高水平、高质量、高可靠性的开放式运动控制器产品。

2 通用运动控制器在国内的应用及发展

自 20 世纪 80 年代初期，通用运动控制器已经开始在国外多个行业应用，尤其是在微电子行业的应用更加广泛。而当时运动控制器在我国的应用规模和行业面很小，国内也没有厂商开发出通用的运动控制器产品。1999 年，固高科技（深圳）有限公司开始从事专业开发、生产开放式运动控制器产品。

目前，国内的运动控制器生产厂商提供的产品大致可以分为三类：

以单片机或微处理器作为核心的运动控制器，这类运动控制器速度较慢，精度不高，成本相对较低。在一些只需要低速点位运动控制和对轨迹要求不高的轮廓运动控制场合应用。

以专用芯片（ASIC）作为核心处理器的运动控制器，这类运动控制器结构比较简单，但这类运动控制器大多数只能输出脉冲信号，工作于开环控制方式。这类控制器对单轴的点位控制场合是基本满足要求的，但对于要求多轴协调运动和高速轨迹插补控制的设备，这类运动控制器不能满足要求。由于这类控制器不能提供连续插补功能，也没有前瞻功能（Look ahead），特别是对于大量的小线段连续运动的场合，如模具雕刻，不能使用这类控制器。另外，由于硬件资源的限制，这类控制器的圆弧插补算法通常都采用逐点比较法，这样一来圆弧插补的精度也不高。

基于 PC 总线的以 DSP 和 FPGA 作为核心处理器的开放式运动控制器。这类开放式运动控制器以 DSP 芯片作为运动控制器的核心处理器，以 PC 机作为信息处理平台，运动控制器以插卡形式嵌入 PC 机，即“PC+运动控制器”的模式。这样将 PC 机的信息处理能力和开放式的特点与运动控制器的运动轨迹控制能力有机地结合在一起，具有信息处理能力强、开放程度高、运动轨迹控制准确、通用性好的特点。这类运动控制器充分利用了 DSP 的高速数据处理功能和 FPGA 的超强逻辑处理能力，便于设计出功能完善、性能优越的运动控制器。这类运动控制器通常都能提供板上的多轴协调运动控制与复杂的运动轨迹规划、实时的插补运算、误差补偿、伺服滤波算法，能够实现闭环控制。由于采用 FPGA 技术来进行硬件设计，方便运动控制器供应商根据客户的特殊工艺要求和技术要求进行个性化的定制，形成独特的产品。

以上第一类运动控制器由于其性能的限制，在市场上所占份额较少，主要应用于一些单轴简单运动的场合，往往还面临同 PLC 厂商提供的定位控制模块的激烈竞争。第二类运动控制器因其结构简单、成本较低，占有一定的市场份额，但由于其专用芯片（ASIC）能提供运动控制的基本功能，用户可以利用该芯片设计专用的控制器而分薄了这类运动控制器的市场份额。第三类运动控制器是目前国类运动控制器产品的主流，目前国外开放式运动控制器产品已经开始大量进入中国；固高科技（深圳）有限公司相继开发出 GO、GT、GH 和 GU 系列基于 DSP 的开放式运动控制器产品，有近 150 个品种可供用户选择；应用也从传统的机床数控扩展到了如激光加工、服装、纺织、印染、电子加工等多个领域，市场规模也有较大的增长。

根据运动控制的特点和应用领域的不同，可以将运动控制分成以下几种形式：

点位运动控制：这种运动控制的特点是仅对终点位置有要求，与运动的中间过程即运动轨迹无关。相应的运动控制器要求具有快速的定位速度，在运动的加速段和减速段，采用不同的加减速控制策略。在加速运动时，为了使系统能够快速加速到设定速度，往往提高系统增益和加大加速度，在减速的末段采用 S 曲线减速的控制策略。为了防止系统到位后震动，规划到位后，又会适当减小系统的增益。所以，点位运动控制器往往具有在线可变控制参数和可变加减速曲线的能力。

连续轨迹运动控制：又称为轮廓控制，主要应用在传统的数控系统、切割系统的运动轮廓控制。相应的运动控制器要解决的问题是如何使系统在高速运动的情况下，既要保证系统加工的轮廓精度，还要保证刀具沿轮廓运动时的切向速度的恒定。对小线段加工时，有多段程序预处理功能。

同步运动控制：是指多个轴之间的运动协调控制，可以是多个轴在运动全程中进行同步，也可以是在运动过程中的局部有速度同步，主要应用在需要有电子齿轮箱和电子凸轮功能的系统控制中。工业上有印染、印刷、造纸、轧钢、同步剪切等行业。相应的运动控制器的控制算法常采用自适应前馈控制，通过自动调节控制量的幅值和相位，来保证在输入端加一个与干扰幅值相等、相位相反的控制作用，以抑制周期干扰，保证系统的同步控制。

固高科技公司从开发应用的角度把其产品相应地分成三类，他们是点位运动控制器，连续轨迹运动控制器和同步运动控制器。从目前国内市场的应用情况反馈来看，按照不同的运动特点和行业应用进行产品开发和市场推广，具有一定的优势。

固高科技公司的通用运动控制器产品采用以 DSP 为核心，结合 FPGA 现场逻辑可编程器件的灵活性完成运动控制的硬件架构。运动控制过程中，由 DSP 实现运动规划，多轴插补、伺服控制滤波等数据运算和实时控制管理。FPGA 逻辑可编程器件和其他相关器件组成伺服控制和位置反馈硬件接口。为了满足市场需求，使运动控制器具有真正面向对象的开放式控制结构和系统重构能力，固高科技公司的 GT 系列产品考虑了用户可以将自己设计的控制算法加载到运动控制器的内存中，而无需改变控制系统的结构设计就可以重新构造一个特殊用途的运动控制器。

根据不同的应用场合和对象，固高科技公司的运动控制器采用多种改进型的 PID 控制算法，例如综合了积分分离的 PID 控制算法；带死区的 PID 控制算法等。在运动控制领域中，比例、积分、微分(PID)调节器以其结构简单，可靠性高等优点得到了广泛的应用。而且 PID 控制与其它控制算法结合，形成了许多有价值的控制策略，例如自适应 PID 控制、智能 PID 控制等。传统的 PID 控制器结构如图 1 所示。其输入、输出关系可表示为：

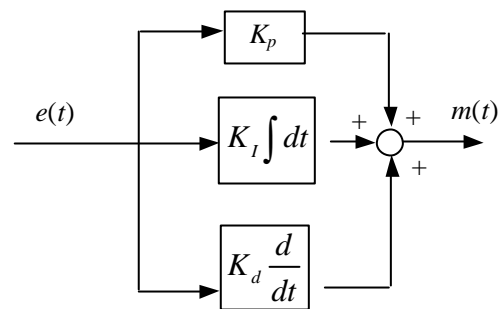


图 1 PID 控制器结构

传统的 PID 控制器结构如图 1 所示。其输入、输出关系可表示为：

$$m(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

上式中， K_p 、 K_I 、 K_D 分别为比例、积分、微分增益， $e(t)$ 为偏差控制信号， $m(t)$ 为控制器输出。对强耦合、周期性、多频扰动等运动控制精度要求高的场合，常规 PID 调节就难以得到满意的控制效果。对于周期性、多频扰动常见的控制方法有以下几种：

- (1) 学习控制是一种通过重复的试运行来形成目标输入，从而在有限时间内产生所需输出的方法，它被认为是一种对目标输入的逆系统进行反复生成的方法。
- (2) 自适应前馈控制是通过自动调节控制量的幅值和相位，来保证在输入端加一个与干扰幅值相等、相位相反的控制作用，以抑制周期干扰。
- (3) 内模控制 (Internal Model Control) 是将干扰模型包含在反馈环内，控制器的设计主要是选择一个适当的传递函数，使闭环系统稳定，且具有期望的输入、输出性能，以抑制周期性干扰。这种方法还可处理多频干扰问题。
- (4) 重复控制则是采用内模原理，通过建立重复补偿器和稳定化补偿器，使系统具有内部稳定性和稳态鲁棒性，进而抑制周期性干扰。

由于运动控制器的应用范围越来越广泛，为了适应新的情况、特定环境和对象，不断会有新的运动规划、多轴插补和控制滤波算法出现。

运动控制技术已经成为现代化的“制器之技”，运动控制器不但在传统的机械数控行业有着广泛的应用，而且在新兴的电子制造和信息产品的制造业中起着不可替代的作用。通用运动控制技术已逐步发展成为一种高度集成化的技术，不但包含通用的多轴速度、位置控制技术，而且与应用系统的工艺条件和技术要求紧密相关。事实上，应用系统的技术要求，特别是一个行业的工艺技术要求也促进了运动控制器的功能的发展。通用运动控制器的许多功能都是同工艺技术要求密切相关的，通用运动控制器的应用不但简化了机械结构甚至简化了生产工艺。通用运动控制器的主要功能在多个行业得到广泛的应用：

- (1) **运动规划功能** 实际上是形成运动的速度和位置的基准量。合适的基准量不但可以改善轨迹的精度，而且其影响作用还可以降低对传动系统以及机械传递元件的要求。通用运动控制器通常都提供基于对冲击 (Jerk) 加速度和速度等这些可影响动态轨迹精度的量值加以限制的运动规划方法，用户可以直接调用相应的函数。对于加速度进行限制的运动规划产生梯形速度曲线；对于冲击进行限制的运动规划产生 S 形速度曲线。一般说来，对于数控机床而言，采用加速度和速度基准量限制的运动规划方法，就足已获得一种优良的动态特性。对于高加速度、小行程运动的快速定位系统如 PCB 钻床、SMT 机，其定位时间和超调量都有严格的要求，往往需要高阶导数连续的运动规划方法。
- (2) **多轴插补、连续插补功能** 通用运动控制器提供的多轴插补功能在数控机械行业获得了广泛的应用。近年来，由于雕刻机市场，特别是模具雕刻机市场的快速发展，推动了运动控制器的连续插补功能的发展。在模具雕刻中存在大量的短小线段加工，要求段间加工速度波动尽可能小，速度的变化的拐点要平滑过渡，这样要求运动控制器由速度前瞻 (Look ahead) 和连续插补的功能。固高科技公司推出了专门应用于小线段加工工艺的连续插补型运动控制器，该控制器在模具雕刻、激光雕刻、平面切割等领域获得了良好的应用。

- (3) **电子齿轮与电子凸轮功能** 不但可以大大地简化机械设计，而且可以实现许多机械齿轮与凸轮难以实现的功能。电子齿轮可以实现多个运动轴按设定的齿轮比同步运动，这使得运动控制器在定长剪切 (fixed-length cutting) 和无轴传动的套色印刷方面有很好的应用。另外，电子齿轮功能还可以实现一个运动轴以设定的齿轮比跟随一个函数，而这个函数由其他的几个运动轴的运动决定；一个轴也可以以设定的比例跟随其他两个轴的合成速度。如工业缝纫机和绗缝机的应用中，Z 轴 (缝线轴) 可以跟随 XY 轴 (移动轴) 的合成速度，从而使缝针脚距均匀。电子凸轮功能可以通过编程改变凸轮形状，无需修磨机械凸轮，极大地简化了加工工艺。这个功能使运动控制器在机械凸轮的淬火加工、异型玻璃切割和全电机驱动弹簧机等领域有良好的应用。
- (4) **比较输出功能** 是指在运动过程中，位置到达设定的坐标点时，运动控制器输出一个或多个开关量，而运动过程不受影响。如在 AOI 的飞行检测 (Flying inspection) 中，运动控制器的比较输出功能使系统运行到设定的位置即启动 CCD 快速摄像，而运动并不受影响，这样极大地提高了效率，改善了图像质量。另外，在激光雕刻应用中，固高科技公司的通用运动控制器的这项功能也获得了很好的应用。
- (5) **探针信号锁存功能** 可以锁存探针信号产生的时刻，各运动轴的位置，其精度只与硬件电路相关，不受软件和系统运动惯性的影响，在 CMM 测量行业有良好的应用。

另外，越来越多的 OEM 厂商希望将他们自己丰富的行业应用经验集成到运动控制中去，针对不同的应用场合和控制对象，个性化设计运动控制器的功能。固高科技公司已经开发了通用运动控制器应用开发平台，使通用运动控制器具有真正面向对象的开放式控制结构和系统重构能力，用户可以将自己设计的控制算法加载到运动控制器的内存中，而无需改变控制系统的结构设计就可以重新构造一个特殊用途的专用运动控制器。

今后基于计算机标准总线的运动控制器仍然是市场的主流，但是，基于网络的嵌入式运动控制器会有较大的发展。基于计算机标准总线的通用运动控制器主要是板卡结构，采用的总线大都为 ISA、PCI。由于它们的应用依附于通用 PC 计算机平台，从工业控制的角度分析，这种运动控制器的优缺点如下。

优点：

- (1) 硬件组成简单，把运动控制器插入 PC 总线，连接信号线就可组成系统；
- (2) 可以使用 PC 机已经具有的丰富软件进行开发；
- (3) 运动控制软件的代码通用性和可移植性较好；
- (4) 可以进行开发工作的工程人员较多，不需要太多培训工作，就可以进行开发。

缺点：

- (1) 采用板卡结构的运动控制器采用金手指连接，单边固定，在多数环境较差的工业现场 (振动，粉尘，油污严重)，不适宜长期工作。
- (2) PC 资源浪费。由于 PC 的捆绑方式销售，用户实际上仅使用少部分 PC 资源，未使用的 PC 资源不但造成闲置和浪费，还带来维护上的麻烦。
- (3) 整体可靠性难以保证，由于 PC 的选择可以是工控机，也可以是商用机。系统集成

后，可靠性差异很大。并不是由运动控制器能保证的。

(4) 难以突出行业特点。不同行业、不同设备其控制面板均有不同的特色和个性。

嵌入式 PC 的运动控制器能够克服以上缺点。这种产品会有较好的市场前景。由于 SOM (system on module) 和 SOC (system on chip) 技术的快速发展，嵌入式 PC 运动控制器获得了良好的发展。嵌入式运动控制器产品可以很方便地将在 PC 上开发的应用系统，不加任何改动就可以很方便地移植过来。作为用户来讲，他们仅仅开发跟其具体项目有关、相对独立的人机界面就可以了。由于嵌入式 PC 的运动控制平台具有标准 PC 的接口功能，用户不需要再购买工业 PC 就能很方便的组成他们自己的系统。这种嵌入式运动控制器既提高了整个系统的可靠性，有时系统更加简洁和高度集成化。

随着工业现场网络总线技术的发展，基于网络的运动控制器获得了极大的发展，并已经开始应用于多轴同步控制中。越来越多的传统的以机械轴同步的系统开始采用网络运动控制器控制的电机轴控制，这样可以减少系统地维护和增加系统的柔性。

由于我国的特殊市场需求，一些其它的专用运动控制系统也会越来越多。例如图象伺服控制的专用运动控制器，力伺服的专用运动控制器等。根据用户的应用要求进行客制化的重构，设计出个性化的运动控制器将成为市场应用的一大方向。

一个典型的运动控制系统主要由运动部件、传动机构、执行机构、驱动器和运动控制器构成，整个系统的运动指令有运动控制器给出，因此运动控制器是整个运动控制系统的灵魂。用户必需使用通用运动控制器提供的标准功能进行二次开发，根据自己的应用系统的工艺条件，应用运动控制器的相关功能，开发出集成了自己的工艺特点和行业经验的应用系统。同时，用户还需要了解构成运动控制系统的其他部件，必须保证机械系统的完备，才能集成出高质量的运动控制系统。从我国的经济发展的情况来看，通用运动控制器的应用和市场仅仅是刚刚启动。与美国和欧洲发达国家相比，我国在运动控制器技术开发上政府的投入很少，在该领域没有形成统一的产品标准。高等院校的教育还没有跟上，没有培养出一大批能够开发和应用运动控制器的人才。在市场推广过程中碰到的最大困难就是国内的系统集成商和设备制造商缺乏应用工程师。使得运动控制器的应用工作受阻，售后技术支持难度加大。因此，快速培养一大批运动控制器的开发应用人才是加快新的技术革命和新的产业革命的关键。

参考文献

李泽湘，运动控制技术的发展历史，固高科技公司宣传资料

蒋仕龙，固高科技公司运动控制器高级培训教程

吴宏 等，通用运动控制技术的现状与发展，2003 年中国机械工程协会年会论文集

蒋仕龙 等，开放式运动控制器及其应用案例，2003 年中国机械工程协会年会论文集

Von Hans Gro 等，自动化技术中得进给电气传动（基础、计算、设计），机械工业出版社

P. K. Wright. Open architecture manufacturing: The impact of open computer systems on self sustaining machinery and the machine tool industry[C]. Proceeding of the Manufacturing International '90-Part 2: Advances in Manufacturing Systems, Atlanta, GA. Mar. 1990: 41~47.

N Arda Erol, Yusuf Altintas, Mabo Robert Ito. Open System Architecture Modular Tool Kit for Motion and Machining Process Control[J].ASMETransactions On Mechatronics, 2000,5(3): 281~291.

杜建铭，基于 Agility 的开放式网络化数控系统及其在滚齿加工中的应用研究，博士论文，西安交通大学，2003

作者简介：蒋仕龙，男，1968 年生，固高科技（深圳）有限公司，市场部经理。研究方向为运动控制技术、先进制造技术、机器人控制技术。