面向高速高精加工的高性能数控系统展望

Prospect of High-Performance CNC System for High-Speed and High-Precision Machining

清华大学机械工程学院　方晨曦　叶佩青

方晨曦

清华大学机械工程系制造工程研究所博士研究生，研究方向为数控技术与系统。曾负责过多个数控系统的研发，并实现产业化应用。参与的课题主要有："高档数控机床与基础制造装备"科技重大专项"CKG5833 大型立式微结构超精密加工设备"，国家科技支撑计划"口腔修复体快速加工设备的研制"，西门子中国研究院 CKI 项目"并行控制技术研究及其在 NC 内核的实现"等。

数控技术作为先进制造的核心技术能极大地提高加工效率与零件加工质量，解决复杂零件的加工制造问题，对于我国产业升级有极其重要的意义。尤其高端数控技术是汽车、航空航天、船舶等行业的基础支撑技术，极具经济、社会、国防价值。

我国是制造业大国，2012 年有 220 种产品产量居世界第一[1]，但作为制造业基础工业的装备制造业目前仍集中于中低端产品，高端产品市场仍被美欧日等国家垄断。随着劳动力成本的不断上升，我国经济正处于调结构促转型的关键时期，面临发展高端制造的重要挑战与机遇，只有打破发达国家的技术垄断，进入高端制造与装备业产业链上游，在高端产品的国际竞争中占有一席之地，才能延续中国的经济奇迹，实现民族伟大复兴的"中国梦"。

数控技术作为先进制造的核心技术能极大地提高加工效率与零件加工质量，解决复杂零件的加工制造问题，对于我国产业升级有极其重要的意义。尤其高端数控技术是汽车[2]、航空航天[3]、船舶[4]等行业的基础支撑技术，极具经济、社会、国防价值。国家 2006 年在《国家中长期科学技术发展规划》中将高端数控技术列为重点支持内容，并且之后推出的高档数控机床、大型飞机等数个重大专项都与高端数控技术相关联。随着国家的持续支持与数控科研工作者的努力，我国已经涌现出广州数控[5]、华中数控[6]、蓝天数控[7]、大连光洋[8]等多个拥有自主知识产权的高档数控系统产品。

目前国产数控已经可以胜任一般的数控加工任务，并在中低端机床配套市场中取得较大的份额。但我国在高档数控产品的品种、性能等方面落后于国外先进水平一段距离，市场占有率不高，每年大量依赖进口高端数控系统。这样一方面造成外国高端数控系统高价高利润，数控系统占数控机床成本过高，提高了高端制造业成

本，制约了我国的产业升级；另一方面数控系统作为重要战略物资受制于人，面临限制出口、功能削减、运输锁定等不公正待遇，在发生突发事件时具有国家安全风险。所以我国有发展高端数控技术的迫切需求，高性能机床数控系统的研究，对提高企业的技术创新能力和产品附加值、增强产品的配套能力、优化产业结构等都具有重要的意义和广阔的应用前景。

高档数控系统发展需求

在先进制造背景下，各种新工艺、新材料、新设备层出不穷，对数控技术应用有了更多的实际需求，主要有以下 4 大方面。

1 高速高精数控技术

数控高速加工相比传统加工具有很多优势，第一，高速加工切削速度高，进给速度高，减小了切削力与热变形，从而工件变形小，加工噪声小，零件质量稳定性高，提高了零件的最终加工精度与表面粗糙度。第二，高速加工的加工时间短，可以显著提高生产效益。高速加工技术现在已广泛应用于航空航天零件机械加工领域，汽车模具加工领域和特种材料加工领域。对于薄壁类零件与大材料切除率零件，数控高速加工技术能明显提高加工质量与效率，对于一般零件加工，数控高速加工技术也能改善精加工切削工艺，具有极大的技术需求与应用潜力。

随着控制理论、测量技术、误差补偿技术不断提高，制造业对数控加工精度的要求也越来越高，在光学器件、惯导器件等国家重要领域都有着精密、超精密加工系统的迫切需求。

2 数控系统面向多领域的多功能化

随着数控系统硬件成本的降低与装备自动化要求的提高，完成简单逻辑与时序控制的 PLC 系统已经不能满足专用机械与装备的自动化需求，目前在专用机械与装备应用领域出现了泛数控化的趋势，Siemens 与安川公司都推出了融合运动控制与 PLC 的系列产品，我国也提出了“数控一代”计划。这对数控系统提出了新的要求：

（1）易于扩展的总线技术；

（2）丰富的 IO 单元模块；

（3）可进行二次开发的软件框架；

（4）运动与控制体系结构更加全面，如兼顾联动与随动控制，处理好运动控制中前瞻与实时响应的矛盾。

3 通用高性能硬件平台化

高速高精数控系统具有复杂的前瞻速度规划与插补算法，同时需要更小的插补周期与高速处理程序段，所以要求硬件平台具有高计算性能。集成电路硬件日新月异。目前 x86 平台、ARM 平台性能正飞速发展，软硬件资源丰富，开发团体活跃，人力资源储备充足。多核 CPU 与 GPU 并行计算方兴未艾，冲破了单核 CPU 的计算瓶颈，成为主流发展方向。利用 PC 与手机行业的操作系统、开发工具、软件库等软件发展成果，能显著降低数控开发成本与风险，同时跟上时代发展的步伐。DSP、FPGA 等芯片分别在浮点运算与时序逻辑处理领域拥有优势，虽然相对封闭与资源规模小，但背后有商业公司的技术支持，仍可作为开发辅助平台。

4 模块化体系结构

为了适应市场增强竞争力，数控产品需要更新更快，研发周期缩短，敏捷地响应市场变化。模块化体系结构便于分工协作开发，可以加快研发进度与提高产品质量；模块化体系结构便于后期维护，可以获得更长的产品寿命；模块化体系结构可实现系统的重构，快速满足用户的特定需求；设计良好的模块化体系可以使系统脱离对特定软硬件的依赖，以最短的时间完成软硬件平台的升级，跟上技术发展的步伐；模块化体系结构还可以实现不同规格的数控品种，形成覆盖从低端到高端的产品线。

高速高精数控加工技术

现代制造技术已经形成全数字化设计制造体系，由 CAD/CAM/CNC 技术实现完整的设计制造流程。图 1 以口腔修复体数控加工过程为例说明数字化制造技术，由病人咬合之后的牙模经过三维扫描系统形成 STL 数字模型，医生通过 CAD 系统设计完善后由 CAM 系统生成刀轨路径，刀具轨迹信息通常由 G 代码形式表达，最后输入数控系统完成数控加工。

自由曲线刀轨有两种表达方法。一种是微小连续直线段方法，CAM 系统根据轨迹精度限制与系统控制周期将连续轨迹离散为微小直线段；另一种是参数曲线方法，CAM 系统将轨迹用 Nurbs 或 B 样条等拟合，直接交由数控系统处理。两种方法各有利弊：微段方法通用性好，但数据量大为数据传输造成负担，数据本身带有弓高误差，刀轨离散算法参数必须与数控系统参数相吻合，同时损失了轨迹全局信息，要求数控系统进行前瞻速度规划；样条方法则要求数控系统具有较强的插补处理性能，且轨迹连续性与曲率变化对数据压缩比有显著影响，通用性相对较差，一般只用于平滑自由曲线加工。

由于很多零件加工需要数十个小时，更优速度的加工具有直接的经济价值，所以时间最优速度规划近年来成为研究热点。除了要满足上述基本要求外，如何最大限度利用进给系统性能，在满足精度限制的条件下实现更高的加工速度和响应的更短的加工时间，具有重要的研究意义。时间最

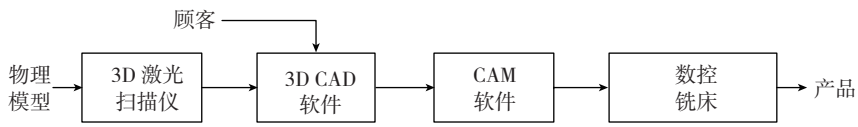

图1 口腔修复体数字化制造流程

优速度规划算法研究之前主要集中在贪婪算法，以沿路径迭代计算的解析方式近似的求出局部最优解，这种方法计算量小，稳定性好，有大量研究成果，但存在约束处理能力差，难以进行最优分析等不足。随着数字控制时代的到来与计算机性能的增强，人们逐渐将最优控制研究的注意力从解析解法转移到数值解法。近年来直接方法（Direct method）成为时间最优速度规划的研究重点，直接方法通过时间连续模型离散化将时间最优速度规划转化为一个静态最优化问题，使方法的适用性得到极大拓宽，只是目前计算效率与稳定性方面还有待继续提高。

时间最优速度规划与伺服进给系统紧密联系，改变了传统数控系统单向数据流的体系结构。因为时间最优速度规划对约束模型提出了更高的要求，过于保守的电机力矩限制约束模型将使加速度性能被浪费；由于高速加工中跟随误差随进给速度一同增加，轮廓误差也被列为重要的约束条件。这样就使进给系统动力学模型变为速度规划算法的控制对象（图 2）。

在高精度数控加工中，伺服进给系统跟随各个轴的位置输入指令，为了得到更小的单轴跟随误差与跟踪性能，各种前馈 / 反馈控制策略得到研究。然而在数控加工多轴联动的时候，各个轴的跟踪精度是不一致的，这也就导致了瞬间误差较大的单轴决定了系统总体的轮廓精度。各轴之间协调性不强，除了造成性能保守甚至退化之外[9]，还因为未能充分考虑轨迹信息而不能达到最优性能。轮廓误差指当前实际位置到期望轨迹的最短距离，如图 3 所示，P_0 点相比 P_1 点有更大的跟踪误差，但却有更小的轮廓误差，更能反映出最终加工质量。大量研究表明，采用轮廓误差直接补偿，即使不改善各个单轴的跟踪误差，也能显著减小最终的轮廓误差[10]。轮廓误差控制须结合轨迹信息，具有明显的速度规划特征。

综上所述，高速高精加工数控系统有速度规划与伺服进给系统位置跟随控制两方面关键技术组成，两者之间相互影响紧密联系，目前的发展趋势是各自逐渐向对方渗透融合，未来数控中的“规划”和“控制”将结合在一起形成数控“最优控制”系统。

高性能数控系统

数控系统从计算平台上看可分为专用计算平台与通用计算平台两大类。其中，专用计算平台早在 20 世纪 50 年代就已出现，以专用集成系统（ASIC）作为计算平台，如西门子、Fanuc 等老牌数控品牌均基于此体系结构。随着电子工业的飞速发展，尤其是个人计算机（PC）行业所带动的软硬件升级热潮，x86 平台的性能迅速提升，成本迅速下降，配套产业健全，

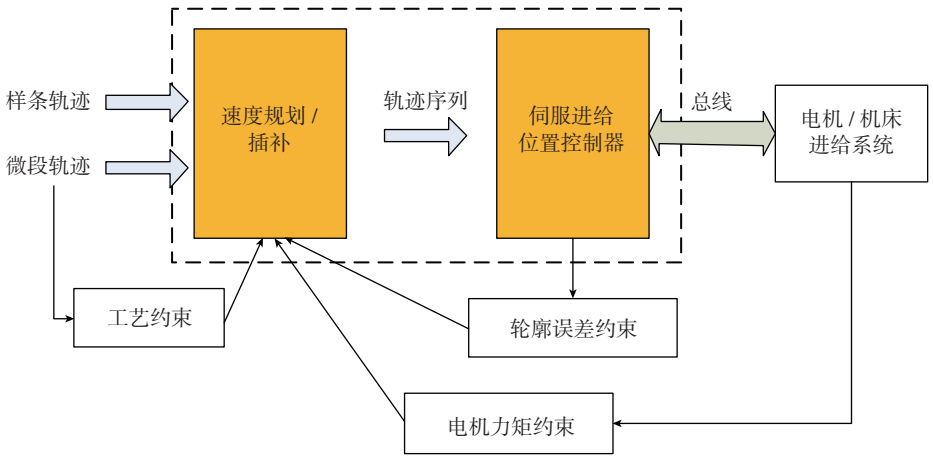

图2　数控系统高速高精加工关键技术示意图

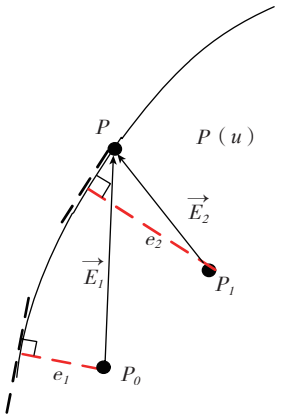

图3　跟踪误差与轮廓误差示意图

使得 x86 平台成为了数控系统的主流平台。近年来随着嵌入式设备的热潮，ARM 平台也加入了数控通用计算平台阵营。当前除了西门子等极少数老牌厂商因为历史遗留原因（如转移到通用计算平台将面临可靠性重新积累、降低了自己市场优势产品的封闭性等因素），新型厂商都选择了通用计算平台，如 FAGOR、PA 等外国厂商与所有国内的知名厂商。

目前，x86 平台相比其他通用平台具有明显的性能优势，如 Intel i7-4770K 主频高达 3.9GHz，而且具有 4 个核心，支持 8 个并行线程，国内如蓝天数控、大连光洋产品皆将计算任务集中于 x86 平台。很多厂商为了避开通用操作系统内核的实时化改造而选择了将实时性要求高的计算（如插补与位置环控制）放在 ARM 或 DSP 平台上，还有的厂商直接将低档产品建立在 ARM 平台上。一个平台有计算性能、资源丰富性、系统实时性、浮点数计算等诸多考虑因素，选择时需要仔细权衡。需要注意速度规划与插补、位置闭环控制密不可分，将其分散在不同 CPU 将造成信息传输与模块间同步的问题，会限制系统向高速高精加工方向发展（图 4）。

高速加工需要系统更强的计算能力，而规划问题算法往往计算复杂计算量大，难以满足实时性能，而被迫简化妥协甚至放弃。传统数控大多基于以各种“单核”“少核”CPU 为核心的

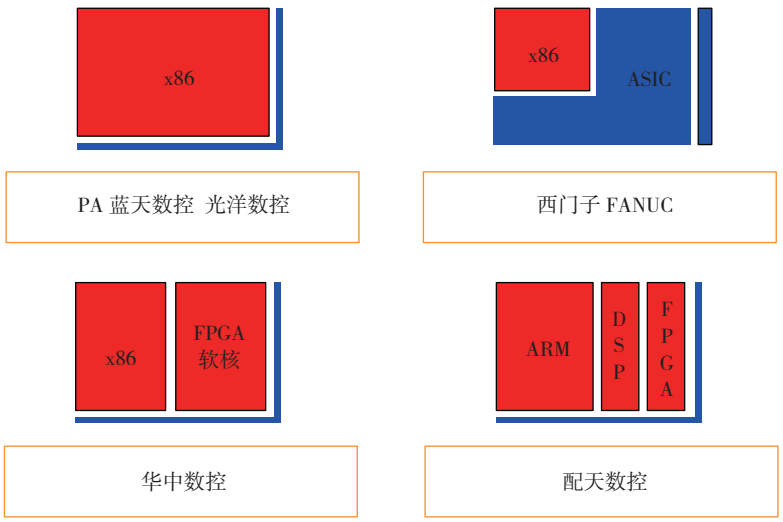

图4 几种不同结构的数控系统

嵌入式平台或 PC 平台，其计算性能已发展接近瓶颈，所以，采用大规模并行体系结构是解决这一性能瓶颈的有效途径。近年来，GPU 的高速发展，计算速度远远超过普通 CPU，由于在消费级市场长期的竞争与发展，GPU 目前在浮点数计算能力，数据带宽等超出 CPU 数十倍。在这个背景下，其应用已经渐渐从图形专用领域转为通用计算领域。如果其能承担数控中繁重计算的任务，不但可以显著提高数控系统的计算能力，使其采用更加复杂的算法，还能解放出 CPU 从而取得更快的控制周期(图 5)。

现在 GPU 已成为 PC 的标准配置(在以 PC 为平台的工业控制系统里，常常嵌入在主板芯片或直接集成在 CPU 中)，所以对于 PC 用户而言，GPU 是标准的，无额外成本的计算单元。其在数控系统中目前的应用只涉及碰撞检测模块，潜力尚未被充分挖掘，如数控样条插补、空间刀补等模块都适用于大规模并行计算。随着数控性能的不断提高和功能的不断发展，如何在 CNC 中更好地利用 GPU 这个资源以免资源浪费，摆脱 CPU 某些的计算瓶颈以达到性能提升，具有重要意义。

结束语

我国数控系统产业经历了从无到有，从低端到高端，从星星之火到遍地开花的自主创新发展之路，取得了显著的成绩。但我们也应该清楚地看到，目前我国数控行业在低端产品方面面临恶性竞争与外企倾销，在高端产品方面仍未占据一席之地，正处于国际间产业竞争的关键阶段。我们必须在数控性能指标与系统技术平台上发挥后发优势，充分利用相关产业与前沿研究成果，实现数控技术的跨越式发展，使中国成为真正的制造强国。

参 考 文 献

[1] 工业和信息化部运行监测协调局 . 2012 年中国工业经济运行上半年报告 [EB/OL].[2012-12-28].http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11294132/n12858387/15092583.html.

[2] 盛伯浩 . 加速发展高效精密成套制造装备推进国产数控机床在汽车制造业中的应用 . 中国工业报 , 2006:2.

[3] 韩雄 , 汤立民 . 大型航空结构件数控加工装备与先进加工技术 . 航空制造技术 , 2009 (1): 44-47.

[4] 刘洋 . 抓住机遇打造品牌——从船舶工业的发展趋势看国产数控机床市场的发展前景 . 机电新产品导报 , 2003 (10): 33-35.

[5] 杨兴安 . 广州数控的产业化之路 . 机械工人 (冷加工), 2007 (6): 12.

[6] 陈吉红 . 奋进的中国数控系统产业 . 金属加工 (冷加工), 2012 (11): 11-12.

[7] 于东 , 韩旭 . 自主创新加速 “蓝天数控” 产业化进程 . 科技成果纵横 , 2010 (5): 7.

[8] 高荆萍 . 大连光洋全数字总线开放式高档数控系统项目通过鉴定 . 中国工业报 , 2007:1.

[9] 丛爽 , 刘宜 . 多轴协调运动中的交叉耦合控制 . 机械设计与制造 , 2006 (10): 166-168.

[10] Yeh S, Hsu P. Estimation of the contouring error vector for the cross-coupled control design. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(1): 44-51.

[11] NVIDIA. CUDAC Programming Guide. NVIDIA Corporation, 2011. （责编 深蓝）

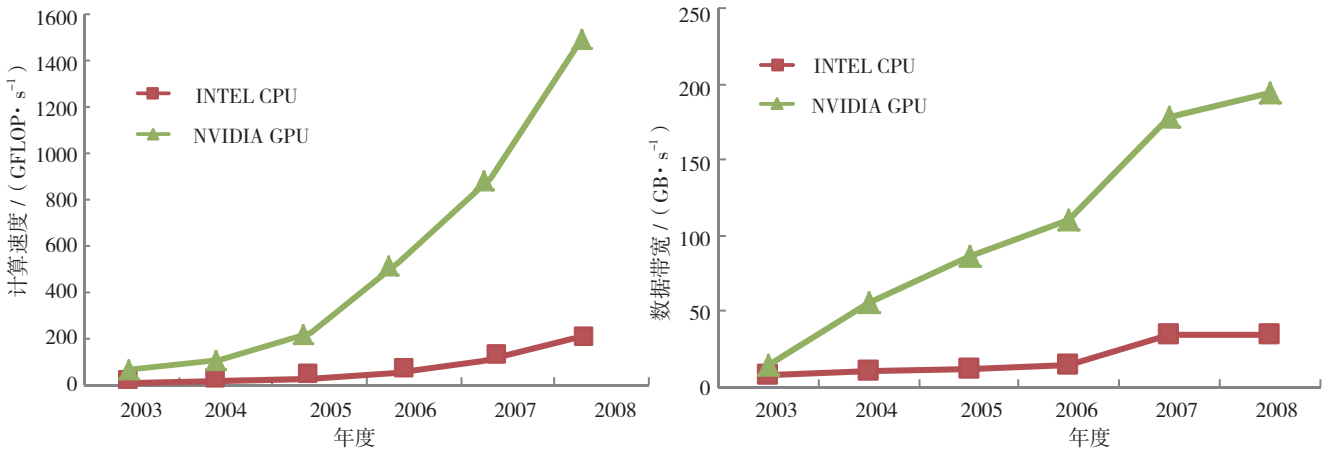

图5 GPU与CPU性能对比[11]