

数字技术与控制理论发展的思考

余达太

(北京科技大学机器人研究所 北京 100083)

(E-mail: yudatai@public3.bta.net.cn)

摘 要 论述了国内外自动化科学与技术的发展动态,结合北京科技大学机器人研究所 20 年来的技术开发与控制理论的研究探索,提出了数字技术与控制理论发展的思考.

关键词 数字技术,智能控制,快速运动控制

中图分类号 TP273

CONSIDERATION ABOUT DEVELOPMENT OF DIGITAL TECHNOLOGY AND CONTROL THEORY

YU Da-Tai

(Robotics Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

(E-mail: yudatai@public3.bta.net.cn)

Abstract This paper discusses the development and trend of automation science and technology at home and abroad. Combined with the technology exploitation and research in control theory over twenty years in the Robotics Institute at University of Science and Technology Beijing, consideration about “development of digital technology and control theory” is described.

Key words Digital technology, intelligent control, quick motion control

1 引言

在信息技术日新月异发展的 21 世纪,如何利用信息技术改造传统产业是世界各国研究和发展的重点方向之一.江泽民主席在 2000 年 8 月 21 日第十六届世界计算机大会开幕式上讲:“…数字化将成为信息技术发展的新动力…”.我国“十五”发展规划中指出,今后五年内我国一方面要信息化与工业化同步发展,另一方面要以信息化带动工业化.

本报告通过对国内外自动化科学与技术的发展动态,结合北京科技大学机器人研究所 20 年来的技术开发与控制理论的研究探索,提出数字技术与控制理论发展的思考问题,请各位与会专家、代表指正.

2 国内外自动化科学与技术的发展动态

现代工业自动化的组成是“机电一体化设备+自动控制+相关工艺”。

2.1 工业自动化单元装置

1) 可编程控制器(PLC)是以微处理器为基础,综合计算机与自动化技术而开发的工业控制装置,具有逻辑、顺序、定时、计数、数字运算等输入、输出控制功能。

2) 分布式控制系统(DCS)在系统网络下实现现场 I/O 控制站、操作员站和工程师站之间的协调运行。

3) 工业 PC 机(IPC)在普通 PC 机的基础上经过工业加固并配上相应工业软件而成。

4) 其它如 PCI 总线工业控制机、PID 调节器及控制器、机电设备数控系统(NC)、工业机器人(IR)等。

5) 现场总线控制系统(FCS),现场总线是一种互联现场自动化设备及其控制系统的双向数字通信协议。

6) 嵌入式计算机及控制器,单片机、单板机、智能部件等以及由 RISC CISC 及各种微处理器和微控制器组成的控制器等,多用于一些机电产品,特别是家电产品。

7) 电力电子装置,功率半导体技术的发展,实现了大功率的电力变换和智能化的运动控制,其中工业占 27%,家电占 24%,通信占 17%,计算机占 16%,汽车占 12%,其他占 4%。

8) 物流搬运系统与装置,物流与信息流是工厂生产自动化的重要辅助手段,其中传送带为几秒……一分钟之间的短循环小件传送,往复式搬运装置:有节拍的短距离搬运,有轨小车为近距离有轨传送,自动引导小车(AGV)为牵引式小车(2~5 辆)、单元装载式小车、托板式搬运车、叉式自动装卸车等,工业机器人为码垛机器人、自动分检机器人、高架输送机器人、上下料机器人等,自动化立体仓库包括智能贮运技术、自动存取系统、无线电数据技术与自动化数据收集技术、条形码技术等。

2.2 工业生产自动化技术

1) 柔性制造系统(FMS)适应中小批量生产系统. 要求具备自动加工、自动运输和贮存、集中监控、自动诊断以及修复等功能。

2) 计算机辅助设计(CAD)是一种生产辅助工具,利用计算机系统辅助一项设计工作的产生、修改、分析和优化等. 目前,在国际重大工程招标中,如果没有 CAD 完成的工程总体设计方案,就没有投标资格。

3) 制造业企业管理信息系统(MRP II)以物流需求计划为核心的闭环生产管理系统。

4) 计算机集成制造系统(CIMS)(略)。

5) 智能制造系统(IMS)(略)。

6) 灵活计算机集成制造系统(Agile CIMS)(略)。

7) 先进制造系统(略)。

8) 虚拟制造系统(略)。

9) IPD(Integrated Product Development)(略)。

2.3 国际工业自动化的发展趋势

1) 数字化现场总线、通信、网络技术的发展使控制系统的结构简化并向 FCS(现场总线

控制系统)发展.

2) 基于 PC 的控制, Soft PLC 迅速发展, 并向基于 Web 的自动化系统发展, 即与 IT 技术的密切结合.

3) 高速(100M bit/s 或更高)工业以太网已解决了通信确定性和实时控制等问题, 今后将有大发展.

4) 控制系统的纵横向之间的数据交换量日益增加, 因而要求标准化、高速、准确、高集成度的通信硬件、软件和一致性的数据和数据库.

5) 自动化技术的开放性(标准化、可互操作性和可互换性)、集成化(集成化系统、集成化控制器、集成化软件工具、网络集成等)的潮流不可阻挡, 因此软件的比重及所起的作用越来越大, 已成为下一代设计自动化系统与全厂乃至全球生产管理的关键技术. 组态软件、监控软件、实时控制软件(含控制算法与并行硬件结构)、系统软件、通信软件、应用软件等将是今后发展的重要方向.

1975 年至 2000 年, 国际工业自动化领域发生两次基本的革命: 1975 年~1985 年 PLC 技术基本取代了传统的继电器; 1985 年~1995 年工厂自动化中的网络与通信技术; 1998 年开始了开放自动化的新时代, 即 Open Control A New Era for PC Automation.

2.4 自动化的新时代开放控制的含义与关键

以 PC 为硬件平台、以 LAN 为通信链路的企业管理与办公室自动化和不同专用的 PLC 和现场总线设备的融会必须有三个不同的层次: 1) CALL-E(Engineering, 工程)描述应用的公共数据库, 为了组态和数据管理, 工程工具可访问公共数据库; 2) CALL-R(Runtime, 运行)描述在控制、操作和生产管理、计划层在运行时的通信; 3) CALL-P(Peripheral, 外围)在控制器相互之间以及在现场设备、外围设备间的通信.

3 我国自动化科学与技术发展中的问题与建议

1995 年由国家自然科学基金委员会组织的自然科学学科发展战略调研报告之一自动化科学与技术中指出: “...在控制理论方面, 由于面上的工业技术落后, 理论研究缺乏来自实际的推动力和新思想, 难以形成有意义的理论问题和新的研究方向...; 在控制工程方面, 我国与工业先进国家的差距可达 10~15 年...”^[1]. 这一论述基本反映了我国自动化科学与技术的现状.

根据权威部门的统计, 2000 年全世界工业自动化产品硬件部分市场超过了 200 亿美金, 年增长率大于 30%, 自动化控制软件的增长速度更快.

根据国家统计资料, 我国工业自动化年需求量为 700 亿人民币. 1999 年中央为了推动国企改革, 决定用 600 亿国债贴息贷款牵引 2000 亿投资, 支持 6 个行业的技术改造. 技术改造的重点是工艺和设备, 高水平的工艺和设备的实现必须依靠自动化与计算机技术, 因此, 进一步增加了工业自动化市场的容量. 基础自动化产品是工业、民用和军用机器设备及其生产系统实现自动化、智能化的基本控制单元之一. 没有基本控制单元(伺服、变频、可编程顺序控制器、各种传感器、检测仪器仪表等)就没有工业自动化, 没有工业自动化, 就没有工业现代化. 而我国工业现代化的瓶颈, 正是长期对基础自动化关注不够而形成, 高性能的基础自动化产品在国内很多是空白, 几乎被外国人所垄断. 例如, 根据 2000 年 4 月机械工业研究院发布的《中国机电产品市场报告系列》数据: 1995 年我国数控机床 47275 台, 占机床总数

的 1.9%，而 1994 年日本达到 16.1%，1989 年美国已达 9.6%；1999 年美国、日本机床的数控化率高达 50% 以上，而我国还不到 5%。国家“十五”规划明确要求机床数控化率达到 30%，即 10 万台左右，以三轴数控为例测算，市场价值为 10 万元/套×10 万套/年=100 亿元/年。我国已经加入 WTO，被世界公认将成为世界制造基地。数控机床是制造业的工作母机，但其核心技术产品伺服电机及其控制系统与计算机控制系统几乎被日本、德国、欧洲、甚至台湾的产品所垄断，这是非常可怕的被别人卡着脖子的脆弱经济。

基础自动化包括基础控制理论以及相关技术，如集成电路、芯片等微电子与功率半导体技术、稀土材料的电子传感器技术、高导磁率硅钢材料…等技术及其产业化。

4 北京科技大学数字驱动技术

“六五”、“七五”、“八五”期间，北京科技大学机器人研究所在无国外样机的情况下，坚持了“依靠自己的力量，立足于创新，搞一些开创性的工作，扎下自己的根”这一技术路线，攻克了一系列技术难关，完成了《高精度 DC 伺服系统》、《16 位多 CPU 计算机硬件控制系统》、《实时软件控制系统》等 10 项专题与子专题的国家重大科技攻关任务。这一完整配套的成果，打破了国外对我们的技术封锁，“为我国机器人技术的自主发展作出了重要贡献，也是本次第 75 项攻关所取得的最大的成绩”（摘自机械电子工业部国家“七五”科技攻关总结报告）。上述技术中的 PWM 动态负荷跟踪技术、计算机高速并行处理技术、脉冲分配技术、自动编程技术、主动抑振控制技术等均达到国际先进或领先水平。

“八五”以后，研究小组基于机器人控制技术的研究成果，在三相交流异步电机、永磁交流同步电机、直线电机及其全数字化控制系统的研究开发中，又成功地解决了以下 4 项关键技术：SOC（系统级芯片）技术，即面向三相交流异步电机等高精度伺服控制系统的多 CPU（中央处理器）系统级芯片；Software（软件）技术，即根据独特的控制思想，自主设计了控制 SOC 的 OS（操作系统）和快速运动控制语言及其优化编译器；SIPM（系统级智能功率模块）技术，这是电机控制系统的关键技术与核心部件；根据变频伺服的控制思想，改造了传统三相异步电机的设计，极大地提高了电动车用低压三相交流异步电机的各项性能。

信息技术的发展，如网络技术，迫使传统工业控制单元也必须信息化、数字化。北京科技大学机器人研究所的数字驱动技术正是信息技术与传统控制单元技术相结合的典型代表，它将在 21 世纪成为伺服驱动领域的主流之一。该技术将形成我国新的经济增长点，是改造传统产业、提高产品技术含量、出口创汇及提高市场竞争能力的关键技术，同时也可以带动一批相关产业的发展。基于数字驱动技术的实验室产品，已成功地打开了电动车、家电、工业、国防四大领域的应用。如智能电动助力自行车、电动助力智能残疾车、电动轿车、混合动力客车……；超静音节能直接驱动洗衣机、超静音高效变频空调……；电梯、数控机床、单晶硅生产装置、医疗机械、海关集装箱检测设备……；雷达、移动卫星天线跟踪系统……等。这一新技术、新产品已经引起世界各国的关注与兴趣。

4.1 数字驱动技术创新点简述

系统级芯片 SOC (System On a Chip) 技术是面向 21 世纪的新概念。随着半导体微细加工工艺精度的不断提高，IC（集成电路）集成度以惊人的速度发展，面向某个专业技术领域结合数字和模拟技术，并将 A/D, D/A, I/O, LSI Logic 网络通信，以及对用户开放的 ROM, RAM 甚至电源与电源驱动电路 PWM 等都可以集成在同一封装芯片内，高效率地实现特

定功能的 ASIC 已成为 21 世纪的最新技术之一^[2].

本系统成功地实现了在 32 位 RISC 体系微处理器上嵌入 LSI Logic 以及模拟、数字 I/O、RS-232 和 422 串并行通讯、D/A 和 A/D 转换、快速运动控制语言及其优化编译器、电机矢量控制高速运算器、向用户开放的 RAM, ROM 和实时操作系统(OS)的面向三相交流异步电机等高精度伺服控制系统的多 CPU 系统级芯片. 该芯片的研制成功, 可实现高效运作, 极大地缩短产品的上市时间, 降低功耗和大大减少所占的 PCB 空间, 提高系统的可靠性, 特别是电磁干扰 EMI 大幅度降低, 同时极大地提高了系统的各项性能指标和降低了研制与生产成本.

软件技术(Software)具有很强的继承性, 版本升级是软件产品更新的主要手段. 支持本系统的 Software 技术平台是 SOC 的操作系统与快速运动控制语言. 其中快速运动控制语言(Quick Motion Control Language 简称 QMCL)的命令集是 1) 32 个 2 字节寄存器; 2) I/O 指令; 3) 串行、并行数据通信; 4) 显示指令; 5) 运算指令; 6) 逻辑指令; 7) 数据存储指令; 8) 电机控制指令; 9) 跳转等 100 余条指令. 用户只要掌握了上述快速运动控制语言和控制对象(电机)的铭牌参数以及控制要求, 就可以在不改变硬件系统的条件下, 任意开发硬件支持下的所希望的目标产品, 其开发速度、成本、性能都是目前传统技术所无法相比的.

系统级智能功率模块技术(SIPM)是电机控制系统的关键技术与部件之一, 目前, IPM(智能功率模块)和 ASIPM(专用智能功率模块)代表了今后的发展方向. SIPM 是我们提出来的新概念、新成果、新产品, 是我们独创的系统级智能功率模块.

电机技术, 电机是控制的重要对象. 在电动车和家电领域, 我们追求的目标是节能、高效; 在工业领域, 我们追求的目标是高效、高速(10 万 rpm 以上)、高精度.

网络与通讯技术, 网络与通讯加上自动化控制技术, 将是 21 世纪工业自动化的发展方向. 本数字系统技术针对今后世界生产体系的变化→全球化敏捷生产系统, 实现了通过网络与通讯技术的全球范围内的故障诊断、维修、技术开发与实时控制功能, 真正实现了 IT 与传统技术的相结合, 并形成一個全新概念的系统产品.

4.2 数字驱动系统的特点及其主要技术指标

1) 电机容量不受限制. 目前国际上在高精度领域占据主导地位的 DC 无刷伺服电机(永磁交流同步电机; DC 有刷伺服电机已基本淘汰)由于物理条件的限制, 其功率最大做到 10KW 左右, 因此限制了其应用领域, 而本数字驱动系统, 从数瓦到数百千瓦的三相交流异步电机均可作为高精度伺服电机使用, 极大地扩大了伺服电机的使用领域.

2) 低成本. 从电机自身机构、制造工艺看, 三相交流异步电机与其他电机相比, 最为简洁, 故成本最低, 其成本是 DC 伺服电机或 DC 无刷伺服电机的几分之一, 故价格优势极大.

3) 转速与转矩的独立控制. 本数字驱动系统可以实现三相交流异步电机任意转速下的转矩控制, 实现了同步电机所无法实现的复杂系统的控制.

4) 超小型化. 随着技术的迅速发展, 新型控制系统的硬件结构可以不断向小型化方向发展.

5) 高性能. 32 位 CPU(64 位 CPU)+ASIC+专用 IC 的一体化(SOC)设计, 面向三相交流异步电机的全数字矢量控制, 实现了模拟技术与数字技术的融合, 极大地提高了系统的各项性能指标. 以伺服系统的核心指标为例: 速度控制比 $N = V_{\max}/a$ 可达 1:30000 以上, 并可实现零速力矩控制.

6) 高可靠性. 由于采用了 SOC(系统级芯片)与(S)IPM(或 IGBT)和新型开关电源模

块,使可靠性大幅提高.特别是(S)IPM 自身具有过压、过流、短路、缺相、温升、电磁干扰等检测与保护功能,以及低功耗等,所以单元安全可靠.这也是全数字化技术的最大优点之一.

7)多功能化.电流矢量控制、电压矢量控制、电压/频率控制、电压/相位差控制、消耗电流控制等 10 余种控制方式都可通过软件参数方式自由设定.

8)其它.远程通信、故障诊断、维修与技术支持、控制等功能.

20 年来,北京科技大学机器人研究所坚持在技术开发中发现问题,针对实际问题提出理论课题,再以理论解释、验证并指导实践.正如钱学森先生所说:“科学是认识世界的知识;技术是改造世界的知识;工程是改造世界的实践”.目前,北京科技大学机器人研究所的这一成果已经得到国家的评估与认可,进入成果向产业化的转化阶段.

5 控制理论发展的思考

电机及其控制是工业自动化的最底层、最基本的单元之一,也是众多学者认为是理论成熟、技术成熟的领域.而恰恰是这些基本控制单元在国内大多是空白,几乎被外国人所垄断,严重影响了我国工业的技术进步与发展.信息科学,特别是微电子与功率半导体技术的发展,为我们自动化学科带来了新的生机与挑战.20 年的研究开发工作,使我们不得不对控制理论的发展提出以下思考:1)数字控制取代模拟控制是工业界优胜劣汰的决定因素;2)数字技术遵循科学规律,并融入新的理念、哲学思想与文化等就会获得技术上的创新;3)经典模拟控制的研究终极是数字控制,数字控制的研究终极是模拟控制;异步电机与同步电机的不同,可以解释为“绝对滑差”是异步电机,“相对滑差”是同步电机;控制理论中的积分与微分就是数字控制中的具有单位时间的加法与减法;数学中的 0 和 1(二进制)是计算机的基础,也是数字控制的基础,0 和 1 状态根据正负逻辑可任意定义…可以认为是控制论中的相对关系;4)数字控制中的“量子误差”能够得到控制的话,系统性能将得到大幅度的提高.

20 年的基础自动化的研究开发,使我们深深感到,经典的线性控制理论、非线性控制理论、鲁棒、自适应控制等在数字化时代,必须要有新的发展.模拟系统的离散化,尚不能称为是真正的数字控制,数字控制更接近模仿人类智能的智能控制,其具体的技术、技巧和方法居多,基础研究明显跟不上.建议“十五”期间,国家自然科学基金委员会对:1)智能控制的认识论与方法论;2)智能控制的基本统一理论框架;3)重要典型的基本控制对象的应用技术;4)网络、通信与控制综合自动化系统的应用技术;5)基于微电子与功率半导体技术的基础自动化的应用技术等理论问题或应用作为优先资助的方向之一.

参 考 文 献

- 1 国家自然科学基金委员会. 自动化科学与技术. 北京:科学出版社,1995
- 2 三菱综合研究所. 2001 年展望——この新技术が未来を変えろ. 日本清文社,1996

余达太 1970 年毕业于北京钢铁学院(现北京科技大学),1982 年毕业于日本九州工业大学研究生院获工学修士学位、入日本安川电机制作所工作后回国. 现任北京科技大学机器人研究所所长,教授、博士生导师. 从事机器人、电动汽车、工业、国防等自动控制及其智能控制理论与应用的研究、教学与研究生的培养工作.