

N: 间隙区增益: 0: 1, 1: 1/2, 2: 1/4, 3: 0
0~3表示

E: 偏差 -1000~1000%

V: 变化率报警设定 -1000~1000%

C: 补偿系数 -1000~1000%

T: 设定值、跟踪: 0: 无跟踪 1: 有跟踪

M: 测定值 0~99.9%不能操作

LDU由指示放大、输出放大、硬手操、通信控制等回路及调节部件组成, 与J系列不同之点是它由脉冲幅值信号驱动电路传递信息, 最后以模拟量4~20mA输出。当通过ABS进行PID控制时, 为能继承上位信息

的控制性, 采用与上位信息同样的速度。演算式:

$$\Delta P_n = \frac{100}{PB} \left[\Delta M_n + \frac{\Delta T}{I} E_n + \frac{D}{\Delta T} \Delta (\Delta \widetilde{M}_n) \right]$$

$$P_n = P_{n-1} + \Delta P_n$$

P_n : 输出值, ΔM_n : 测定值变化成分, $\Delta \widetilde{M}_n$: 为进行不完全微分而插入一次延迟要素的测定值变化成分, PB: 比例值, I: 积分值, D: 微分值, ΔT : 控制周期。

LDU的规格如下表所示:

输入及设定指示表 红针: 输入值 黑针: 设定值	指示范围 标尺长度 精 度 不灵敏度	0~1000% 100mm ±0.5% ±0.2%
输出指示表	指示范围 精 度	0~1000%, 20等分标尺 ±2.5%
设定值变更 拨盘	形 式 增减速度	速度形(与J系列的位置形不同) 40秒/全程
输出操作杆	形 式 增减速度	速度形(与J系列相同) 慢: 40秒/全程 快: 10秒/全程
硬手操功能	切换开关 操作杆位 置 精 度	拨动开关 ±5% (操作杆位置与输出表指示值之差)
状态变更功能	开 关 显 示	按钮式: 手动、自动、防冲(无扰动) LED: 手动、自动、防冲(无扰动)
备用保护显示		LED: (在标示栏内)
操作方式切换	开 关	拨动开关: S/N-L-M
标示栏及指示灯	指 示 灯	24VDC20mA(在标示栏内)
	信号形态 精 确 度 灵 敏 度 温 度 影 响 电 源 电 压 波 动 负 载 反 应 速 度	4~20mA DC ±0.2% 0.1% 每10°C±0.2% 每10%±0.2% 250Ω-750Ω 10-90%的变化0.5秒

华东蓉 摘自横河技报 Vol.23 No.1 1979

美国麻省理工学院控制实验课活动

Timothy L. Johnson

引 言

在过去的十年中, 在麻省理工学院的电气工程系

中, 控制系统实验课活动开展得很活跃。本文主要来谈“反馈控制系统课外实验课”这门课程。

反馈控制系统实验课的课程和目的是和电气工程系中其他课程相互密切有关的，特别与控制及估计理论有关。因而我们准备简要地来回顾一下这些课程，电气工程系的主课要求学生完成四门公共必修课和四门“核心”课程（粗略地归纳一下为：电路、信号分析及处理、计算机硬件、计算机软件）以及四门与计算机科学或“传统”的电气工程有关的四门加选课。这些课程强调基本概念以及解决特种设备或工程实际问题的能力。另外还需要学习二门实验课，这些实验课可从六到八门“课外”实验课的清单中进行挑选，而控制系统课外实验课就是其中之一。专门从事决策和控制的学生（通常是高年级）也要选修一门或几门这方面的实验课。通常，这些课程可以在二个学期中按应用的先后次序进行选择；第一学期解决确定性的频率域分析和设计方法，第二学期解决随机过程、滤波和线性动力学系统的随机控制，重点是频谱概念。从事决策和控制专门化方向的一年级研究生通常都要学习多变量动力学系统的控制和估计理论有关的三门课程，即：线性动力学系统的分析、随机过程和估计理论、线性及非线性系统的随机控制。最有代表性的是，控制系统课外实验课是电气工程系高年级学生的选修课，这些学生对于富氏变换和电气线路已比较熟悉，同时在课堂上正在学习控制方面的课程。通常这些学生希望继续进行自动控制理论或应用方面的研究生学习，但在麻省理工学院却不一定。

目的及正规讲授

控制实验课的主要目的是：（1）培养学生对控制工程问题的感性认识，并培养学生具有设计低阶装置控制器的能力，（2）向学生介绍较复杂的多变量系统的模型确定方法和分析方法，（3）使学生能在实际问题前面将课堂知识进行消化和统一起来，（4）将控制系统的实践和术语向学生作一个基本的介绍。控制实验课不准备讲授当前的工业实际问题、标准或者对控制设备作个综述。对于控制方面的书籍和应用也不进行综述，实验课只是说明控制概念及控制设计的问题，并且不着重于纯理论分析。这门课的“正规”讲授偏重于某些设计方法应用的基本理论，并侧重于得出具有创造性的实际设计方法。现在不断强调计算机控制及自动化技术，对于模拟电路设计及结构也有一些侧重。

本课程有二个小时的讲课，一个小时的示范或解题，而每周九小时的活动为：准备、做练习及实验室试验，整个阶段为十四周。目前，讲课内容主要方面有以下一些：

- 确定物理系统动特性的数学模型。
- 静特性和动特性；线性化。
- 线性化对象动特性的离散时间、连续时间及频域

表示法。

- 不确定性的影响—测量、干扰、参数估计。
- 实现理论及系统识别的基本概念。
- 系统的定性性质—能控性、能观性、能稳性、系统类型。
- 反馈的效果，单输入单输出系统的常规设计和分析方法。
- 在多变量系统中现代控制方法的基本例子；设计要点。
- 计算机控制设备及实施方法。

本课程的内容在所有的课程中反映了相当特殊的地位，在上这门课的时候，学生一般都没有接触过控制或多变量系统，因此这门实验课通常是与有关控制的比较“标准”的选修课同时并进。因此，实验课的讲授时数通常不作为决策和控制内容的一部分。这样安排是因为这门实验课也可以给不是主修自动控制的大学生选修，对这些学生来说，课堂上讲授的全部内容再加上实验课，这样一来选修的时数就显得太多了。但是，确定动力学系统的数学模型、不确定性的影响以及动力学系统的定性性质，这些内容无论是控制专业还是非控制专业的学生都是适用的。对这些问题的了解不仅对于多变量系统正确应用现代控制方法是必不可少的，而且也是应用频域设计方法的一个前提（通常没有引起院士们的重视）。大学生有了这样的基础之后，开环系统的某些不足之处马上就明显了，同时就能牢固地树立反馈或补偿的基本概念。据此，如果使用模拟计算机，那么对于具有反馈的某个实验的体会就能建立控制的基本概念，于是粗略设计方法的应用就更能理解了。此外，在介绍包括现代控制理论及计算机控制技术的时域法时，正确地观察事物之间相互关系的能力和看法是很有用的。显然，这些内容主要是通过特殊的例子来进行讲授的，而高级的数学方法以及普遍性的意义在此并非目的。

实验课设备以及列入计划的实验项目

自一九六五年以来，控制实验室设备放在电子系统实验室的中央部位。控制实验室中放有十二张实验桌，有一个集中的供电电源（单相、三相、直流36伏、交流220伏、交流400赫等），并装有紧急情况下切断电源的按钮。每个学生都发给一套工具，包括连接机械和连接电气的工具以及线路板。实验室附近有一间工具间，由一名电子技术员管理，这间工具间也作为电子系统实验室的贮藏室。另外有一间计算机机房，其中有一台GPS型200T模拟计算机以及Adage图形显示终端，它带有二个磁带驱动器和一些存贮磁盘。Adage终端也可以用来驱动一个空中交通情况的显示设备，这种终端具有混合运行的能力。另外，为了加工试验电路板及进行样机

总计还设有一间机械加工间。这些设备是与论文研究项目一起共用的，这是由于实验室的编制是很小的（大约15个大学生）。实验项目每年都有变化，以前所做的一些内容如下：

- 直流电机控制。
- 模型电气火车及直流电机的参数估计。
- 铝棒的温度调节。
- 直流电机的碎—碎控制。
- 多变量系统的模拟仿真。

比较有代表性的情况是：实验课包括二个或三个“列入计划”的项目和一个由学生自选的项目。学生可以一个人独立做实验也可以二或三人一组一起做实验。笔者的经验说明：如果实验小组分得很小，那么学生之间的一些想法可以展开自由讨论这样就会得到很大的收获，以致不会埋没任何个人的创造性。“列入计划”的实验项目今后有些修改，准备在以下讨论。

示范教学，教具及非列入计划的 实验课项目

在介绍新的有趣的领域时以及说明课程内容对系统的应用时，由于这些内容太复杂不大适合在概论中讲授，然而示范教学方法却是一个很有成效的方法。例如为了说明非线性动力学系统的解与初始条件有关以及极限环的特性，将Van der pol振荡器在模拟机上进行仿真就是一个很有效的方法。传感器及控制执行装置的特性以及实际的一些限制条件都可以通过示范教学有效地来说明。有时候交流载波控制及可编程控制器的设计也可以进行示范表演。在市场上一些商品化的示教单元也有出售，但是对于上大课来说是很费钱的。

近年来许多学生和教职员把注意力集中在研制直观教具上，目前，以下一些教具已付诸实施。

- (1) 采用频域法图解设计的计算机程序，波德(Bode)、奈魁斯特(Nyquist)、根轨迹等。
- (2) 控制及线性代数程序包(CLAP)——用于线性多变量系统的成批方式仿真及设计的程序包。
- (3) 现代控制系统分析和设计的电视磁带，并有实际例子。(由Athans教授发明)
- (4) 在阵风干扰作用下，最优控制作用的飞机的计算机仿真(具有计算机图象显示)。
- (5) 用于分时计算机系统的会话式线性规划程序包。

有些教学辅助设备的研制水平已超出了“未列入计划”的大学生实验项目或学士论文项目。“未列入计划”的实验课项目的关键问题是可以帮助学生用原始的想法来解决有实际意义的问题。一些新奇的和困难的问题从教

学的观点上来看通常都是不重要的，但是如果将一个问题放到实验室中去得到真实和可行的解决办法，那通常是很值钱的，如果想研究一下非定型的装置或传感器，在实际上往往受到一些条件的限制，尤其对于较高精度的和完善的设备来说在许多实验室中是不许可的，为此研制了以下一些项目：

- 模型河流污染控制。
- 关于微分对策的最优追踪—逃逸仿真。
- 高速地面车辆控制规律的模拟仿真。
- 模型火车控制系统。
- 倒摆。
- 采用微处理机技术实现卡尔曼(Kalman)滤波。

“未列入计划”的实验课项目通常作为科学学士论文或者作为专题研究项目。

实验课今后发展方向

很显然，对复杂的系统来说，在控制系统设计中重点将进一步从硬件转移到软件，因此实验课的课程必须反映这个经济转变。学生需要掌握更多的数字接口、实时编程、有限字长及存储约束、采样效果等知识。控制实验课的今后发展计划要求将控制实验与小型计算机进行接口，这些小型机的软件通常以高级语言来编写并在一台较大的兼容机器上离线编译，然后设计的软件在实时环境中执行。因此，学生将会遇到一些真实的硬件限制，并且也能从实际的实验中得到直观的反馈，而不是实际的实验仿真。更改设计就不再需要更改硬件，数值数据很容易制成表格。可以预料几门有关的课程也会有一些变动，诸如要加强离散时间结果，对控制器逻辑运行及有关的有限状态机概念也要给予注意。如果扩充了这些内容之后，那末在研究生的第二学期要介绍的重点为系统识别、滤波、检测及非线性系统的控制方面的应用，这些课讲起来就有了一定的基础。

从国际上来看，在其他的控制实验室中类似的发展预计为直接数字控制(DDC)，并且普遍采用大功率固态器件。在控制系统设计中一些卓有成效的成果诸如“非因果”或时间延迟控制器、非线性控制规律和有限状态控制会随着硬件的发展而出现。另外，多变量系统的最优控制方法在适当的成本下也是容易实现的。在这些情况下，工业部门和教育部门加强协作对于彼此都是可能的并且都是有益的。今后，控制系统的设计要求一定会更复杂，效率将会更高。

译自 “Proceedings of The IFAC 6th
World Congress” Part 4

张乃光译、马赛夫校