

# “运动控制系统”课教学方法研究和部分难点分析

李练兵<sup>1</sup> 江春冬<sup>2</sup> 李 洁<sup>3</sup> 王 睿<sup>4</sup>

(河北工业大学控制科学与工程学院,天津,300130)

**摘 要:**“运动控制系统”是高等学校自动化专业和电气工程专业的综合性专业课程。本文结合作者多年的教学经验,介绍了多门课程融合,理论联系实际等多种教学方法。在此基础上,结合直流调速系统和交流调速系统,对讲述要点和具体方法进行了分析。

**关键词:** 运动控制系统; 教学; 方法; 难点

## Research on the Teaching Method of “Motion Control System” and Analysis of some Difficulties

Lianbing Li<sup>1</sup>, Chundong Jiang<sup>2</sup>, Jie Li<sup>3</sup>, Rui Wang<sup>4</sup>

(School of Control Science & Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, Tianjin, China)

**Abstract:** “The motion control system” is an integrated professional course for the automation and electrical engineering of universities. Combining with the author's years of teaching experience, this paper introduces many kinds of teaching methods, such as Multi-course integration, theory connection practice. Based on this, the main points and specific methods are analyzed in combination with the dc speed regulation system and ac speed regulation system.

**Key Words:** Motion control system; Teaching; methods; difficulties

### 引言

“运动控制系统”是高等学校自动化专业和电气工程及其自动化专业的综合性专业课程。它以电机与拖动基础、电力电子技术、自动控制理论、计算机控制技术等多门课程的知识为基础,有很强的理论性、知识性和应用性,对于所学的上述课程是一个综合应用过程<sup>[1]</sup>。学生对于转速单闭环参数计算、转速-电流双闭环工程设计、转子磁链定向的异步电机矢量控制等部分理解和掌握上有较大的难度<sup>[2]</sup>。这就要求教师在教学中不但要加强自身的理论和应用基础,还有善于运用板书公式

推导、多媒体动画演示和 MATLAB 仿真工具辅助,结合自控理论、电机学等先修内容进行讲解,同时对重点章节和知识点要采取相应的教学思路和教学方法,根据学生接受程度进行教学<sup>[3]</sup>。根据我们的体会,在教学当中应该注意以下几点:

### 1. 注重知识的融汇,打通各门课程的联系

运动控制系统与先修课程关系紧密。比如建立调速系统模型的过程,需要帮学生回顾控制理论、电力电子和电机学的基础知识,启发学生用先修知识来理解新学的知识。如晶闸管整流的功率放大单元,要让学生理解如何由输入量--控制电平

---

联系人: 李练兵第一作者: 李练兵(1972.2)男,博士,教授

来控制触发相位,进而得到输出平均电压。在理解简单的输入-输出关系的同时,理解线性近似和正相关性对控制系统的作用。控制电平和输出电压的关系在教师看来非常简单,但学生理解需要一个结合实际的过程,所以需要激活学生在电力电子技术实验装置中操作过的控制电平和输出电压的既有经验<sup>[4]</sup>。

对于稳态误差的讲解也要紧密结合控制理论的知识基础。首先要让学生会求误差传递函数。误差传递函数固然可以用输入参考值减去由闭环传递函数求得的输出量的方式计算。但根据梅逊公式,最简洁易记的计算方法是:

$$\text{负反馈闭环传递函数} = \frac{\text{前向通道传向通道}}{(1 + \text{开环传递函数})} \quad (1)$$

如果误差作为输出量,输入量--转速指令值的前向通道传递函数为1,而误差后面的环节看作反馈通道,所以开环传递函数不变,这样计算形式非常简单。在控制理论中这是最简单的知识,但在运动控制系统中却是最实用的分析方法,需要反复运用让学生产生习惯性反应。这个方法再结合独立作用原理,后面的负载电流扰动和电流截止负反馈等处的输出量求解,学生都会变得容易理解和掌握。

稳态误差值的计算则采用终值定理, $t \rightarrow \infty$  对应  $s$  域的  $s \rightarrow 0$ 。在自动控制理论中也是基础知识,但在求解转速闭环稳态误差时往往需要重新讲解终值定理、初值定理来帮助学生回忆。

可逆调速电路涉及较多电力电子技术的知识。桥式可逆电路的控制方法与其调制方式关系密切,理解 PWM 的单极性调制和双极性调制非常重要。让学生认识到 PWM 波形在关断期间的续流回路是分辨单极性还是双极性的方法。如果续流回路包含电源,就会出现电能回馈现象,这样负载两端电压就会有正负两种,这属于双极性。如果续流回路不包含电源,此时负载两端电压为0,这样就是单极性调制。可逆 V-M 电路则是用到有源逆变的知识。一定要让学生理解到控制电压与触发控制角的对应关系,即控制电压为0时,触发角为90度,平均电压为0;控制电压为正时,触发角小于90度,输出平均电压为正,属于整流状态;控制电压为负时,触发角大于90度,输出平均电压

为负,如果有电流(电流只能沿晶闸管导通方向流动),此时进入动态的有源逆变状态。分析逆变还是整流与控制电压的正负和平均电流流经哪组有关,这就使得本组他组的状态和控制器的输出状态结合起来<sup>[5]</sup>。

## 2. 理论与实验相结合,在实际中验证理论

“运动控制系统”的闭环控制器设计强调稳、准、快,这三个指标也是自动控制理论的研究重点。运动控制系统不仅可以让学生学习闭环控制器的设计方法,还可以亲身感受到所谓控制系统的稳定性问题、准确性问题和响应的快慢速度。

在运动控制实验中,很多情况下我们只是让学生按照要求设置好参数后,开机做实验,记录阶跃输入下的电流和转速响应波形。虽然也记录不同负载下的闭环转速,但并没有让学生理解调速精度的要求,无法去体会和验证稳定性和准确性问题。我们在实验中让学生通过调整调节器参数,使得系统出现振荡,让学生调出转速周期性振荡的状态,真实地看到闭环调速系统的振荡现象,并通过纠正参数获得稳定的控制能力。通过改变调节器参数还可以观察到转速出现超调和逐渐不出现超调的过渡过程,观察到不同参数对系统响应速度的影响。记录这些参数和波形,可以更好地分析参数对动态响应的特点和原因。

对于双闭环设计的原理也要紧密结合自动控制理论来进行讲解,特别是被控对象和典型系统之间的关系,要通过调节器的选取来使两者一致。在回顾经典控制理论补偿控制器设计方法的同时,强调理论设计和工程设计的区别,使学生不把两者设计思想对立,而是统一起来。双闭环调节器设计方法的近似处理和近似条件非常重要。近似处理方法是工程性很强的方法,适用于各种实际系统的简化处理。其近似条件与系统工作的闭环带宽关系密切,所以还要特别讲解闭环频率特性和带宽的概念以及带宽频率和开环幅频特性的截止频率之间的关系。在这个过程中还要把分贝的表示方法和便利性讲解清楚。

### 3. 深入浅出,生动讲解,激发学生的学习兴趣

异步电动机调速控制是相对难以理解的一部分。大部分学生容易对异步机的基本参数关系有误解。由于存在转差,所以学生很自然地认为定子磁链等物理量是异步的。所以我们上课时带两个条形磁铁,用两个磁铁模拟内圈和外圈的转子和定子。当把外圈的定子磁铁从与转子磁铁同相位的零转矩位置逐渐转到 90 度的过程中,让学生体验吸引转子磁铁的旋转的转矩逐渐增到最大,再转 90 度又减到 0,继续旋转则产生相反转矩的效果。通过实际演示让学生理解到如果定子磁链不同步的后果是转矩周期振荡,平均转矩为 0。知道了这个现象,再讲异步机的电磁物理量的同步性学生就容易接受了。为了形象地理解异步机的工作原理,我们把异步机称作“自同步电机”。知道了转子上的电磁物理量都是与定子电磁物理量同步,且稳态时的旋转速度都是同步转速这个基本知识,再理解后续内容就要容易多了。

因为异步机存在非线性问题而导致学生对异步机的多种调速方法比较迷茫。所以要根据异步电机稳态等效模型的转差率  $s$  的条件,当  $s$  非常小时,让学生理解到其线性特征,从而让学生认识到对不同工作区域有不同的特性,并要特别强调稳态工作区域为线性区的基本特点及其必要性,让学生简化其理解方法,并自觉建立在线性区中转矩和转差速度成正比的工作特性。这样异步机的转差频率控制就不存在理解的障碍,只要把转子转速 + 转差速度 = 同步转速指令值这个实现问题讲解清楚,转速闭环的转差频率控制原理学生自然就理解了。

异步电机的矢量控制更是难点之一。首先是磁链模型的理解,要重新回到磁路原理进行分析,让学生理解自感、互感和漏感的关系,强调磁动势和磁场在气隙圆周上呈正弦分布的特点,理解线圈间的相互感应与相角位置的关系。

对于不同坐标系下的模型变换部分必须用板书逐个画图演示每一个坐标系变量向另一个坐标系的轴上的投影变换方法。还要将坐标变换的公式从一个个系数转换为系数矩阵,这个过程在黑

板上逐渐推导出结果,比 PPT 放映 3-2 变换、2-3 变换的公式要细腻很多,降低了理解坐标变换计算的难度。

有了前面讲的“自同步电机”这个概念,讲到同步旋转坐标系  $d-q$  时,稳态时电磁物理量都会变为直流量,学生就会非常容易理解。不需要再去讲人站在同步旋转磁场上观察磁场是静止的。旋转坐标系下的数学模型由于教材上的讲解一般不太详细,所以也要在黑板上推导,让学生理解模型得到的过程,避免不同坐标系变换时的困惑。从  $d-q$  到转子磁链定向的  $m-t$  坐标也是容易混乱的知识点。 $m-t$  坐标是  $d-q$  坐标系  $d$  轴按转子磁链定向的特殊情况,但在  $m-t$  坐标系下可以实现异步机励磁和转矩解耦控制的可能性。因此基于  $m-t$  坐标系的两轴调节器和近似解耦控制框图是要求学生掌握的核心内容。

### 4. 充分运用数字仿真工具,基于仿真验证进行理论设计

MATLAB 是目前最流行的数字仿真工具,采用 MATLAB 辅助教学非常便利。利用其 Simulink 工具可以进行直观的系统构建,调速系统的各个模块可以直接显示出来。设置好被控对象和控制器的参数后,通过运行仿真文件,可以观察到系统各个变量的波形。参数的修改非常容易,甚至可以在线修改参数以便随时观察到参数对控制性能的影响。比如对于转速-电流双闭环直流调速系统的动态特性分析,可在 Simulink 中构建设计双闭环调速系统,仿真观察其转速、电流以及各个控制量的动态波形。改变调节器参数,可以绘制出不同的仿真曲线这样可以使学生直观地认识到双闭环系统的特点。

交流调速中的矢量控制仍然可以采用 MATLAB 来进行仿真演示。通过构建转子磁链定向的矢量控制模型,可以通过观察  $m-t$  坐标的定子电流以及磁链和转矩、转速等量的波形。让学生真切感受到矢量变换与直流调速之间的等效关系,感受矢量变换的解耦控制效果。还要通过 MATLAB 设计作业等形式让学生养成随时采用仿真方法来分析验证设计方案的习惯。

## 结束语

“运动控制系统”的讲解不但要求教师具有坚实的理论和知识基础,还要有丰富的工程实践经验。在备课、讲述、课后作业和实验等各个阶段,根据学生的掌握状况,灵活地掌握课程进度和讲授方法。不断改进运动控制系统的教学方法,同时持续不断地更新讲授内容,紧跟社会需求发展的步伐,对于培养合格的工程技术人才非常重要。

## 参考文献

- [1] 林立等。“电力电子及运动控制”教学方法探讨。电气电子教学学报。第34卷,第4期,2012.8
- [2] 朱艺锋等。专业课程“运动控制系统”的课堂教学方法探析。实验室研究与探索。第32卷,第11期,2013.11
- [3] 陈霞等。“运动控制系统”课程教学探讨与实践。电气电子教学学报。第37卷,第2期,2012.4
- [4] 高林等。运动控制系统多环节教学模式的探讨。中国现代教育装备,第7期,2008.7
- [5] 王春风等。PWM 直流调速系统实验的教学实践。实验室研究与探索。第31卷,第8期,2012.8