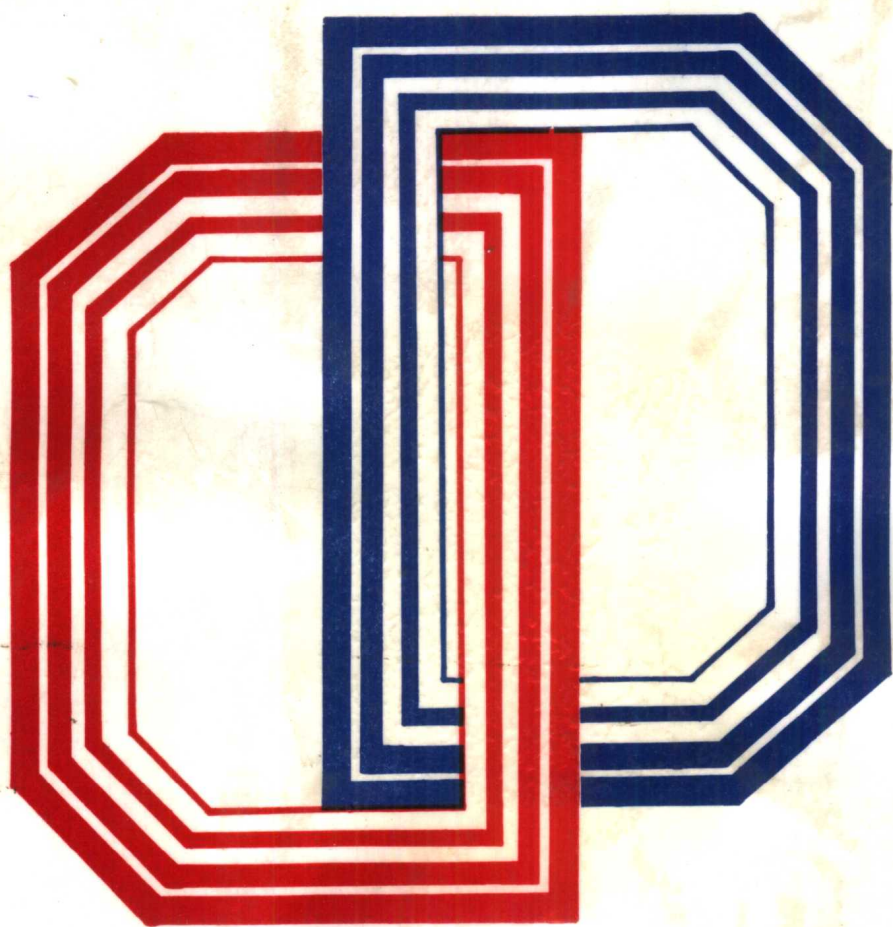


电力拖动 控制系统 设计手册

朱仁初 万伯任 主编



机械工业出版社

电力拖动控制系统设计手册

朱仁初 主编
万伯任



机械工业出版社

(京) 新登字054号

本手册为工业电气自动化专业学生毕业设计用书,也是自动化工程技术人员进行工程设计的参考手册。

本手册共分5篇,内容有拖动控制系统设计的共同问题、功率器件与控制单元、直流拖动控制系统、交流拖动控制系统、计算机辅助设计与仿真等内容。每篇又相应分章,内容全面、涉及面广、资料新、丰富,是一本难得的参考手册。

电力拖动控制系统设计手册

朱仁初 主编
万伯任

*

责任编辑:李卫东 版式设计:冉晓华
封面设计:方 芬 责任校对:肖新民
责任印制:路 琳

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)
邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张 31·字数 764 千字
1992年12月北京第1版·1992年12月北京第1次印刷
印数 0,001—3,550 定价:27.00元

*

ISBN 7-111-03256-X/TP·159

前 言

本手册是根据1983年4月高等学校自动化类专业教材编审委员会制订的新教学计划和教学大纲的要求编写的。

本手册是工业电气自动化专业高年级学生的一本教学参考书。本手册的内容与本专业设置的“电力拖动基础”，“半导体变流技术”，“电力拖动自动控制系统”，“自动控制理论”与“微型计算机原理与应用”等课程密切有关。本手册是教学实验、科研成果和工程实践的总结，在内容的编排方面，以上述课程的理论能在工程实际中应用为主要目的。因此，本手册既可作为上述课程联系实际的教学辅助资料，又可作为本专业学生从事毕业设计的主要参考书，也可作为从事自动控制系统方面工作的工程技术人员的参考资料。

本手册有绪言和主要内容五篇。第一篇为拖动控制系统设计的共同问题，内容有拖动控制系统设计的基本方法、对象特性和参数的实验测试，以及控制系统的调试。第二篇为功率器件与控制单元，内容有电力拖动系统中电动机、变流变压器、电抗器和脉冲变压器的选择，半导体变流装置、典型控制单元、检测与转换以及逻辑控制电路。第三篇为直流拖动控制系统，内容有直流电动机不可逆调速系统、可逆调速系统、伺服系统、稳速系统以及微型计算机控制的直流拖动系统。第四篇为交流拖动控制系统，内容有交-直-交变频调速系统、晶闸管串级调速系统以及无换向器电机调速系统。第五篇为计算机辅助设计与仿真。

本手册由西安交通大学朱仁初教授和陕西机械学院万伯任教授主编。其内容广泛，涉及的专业内容较深，所有篇章均由具有相应专长的作者执笔。其中，绪言、第一篇、第五篇分别由朱仁初、葛文运、吴韞章编写；第二篇、第三篇、第四篇分别由张津、林杞、王溥仁统稿，并在有关各章的标题附注中说明该章的编写者。

书稿经1989年12月在西安召开的审稿会议上讨论通过。在审稿时，上海交通大学陈敏逊教授（主审）、上海铁道学院邵丙衡教授、上海工业大学胡慎敏副教授、天津电气传动设计研究所叶王高级工程师等提出不少宝贵意见，谨致以衷心的感谢。

由于手册稿分头执笔，加之主编统稿仓促，所以书中难免存在缺点和错误，殷切期望广大读者提出批评意见。

编者

1991.7于西安

目 录

前言

绪言

第一篇 拖动控制系统设计的共同问题

第一章 拖动控制系统设计的基本

方法

第一节 设计的一般步骤

第二节 拖动控制系统的一般性技术要求

第三节 系统主要组成部分的方案比较和选择

第四节 拖动控制系统的稳态计算

第五节 拖动控制系统的动态计算

第二章 对象特性和参数的实验

测试

第一节 测量和识别对象特性的方法

第二节 直流电动机参数的测量

第三节 可控整流装置特性、参数的测量

第四节 直流拖动控制系统典型环节的特性测试

第三章 控制系统的调试

第一节 调试的一般问题

第二节 单元调试

第三节 不可逆系统的调试

第四节 可逆系统的调试

参考文献

第二篇 功率器件与控制单元

第一章 电力拖动系统中电动机、变流变压器、电抗器和脉冲

变压器的选择

第一节 电动机的选择

第二节 变流变压器的设计

第三节 电抗器的设计

第四节 脉冲变压器的设计

第二章 半导体变流装置

第一节 电力半导体器件简介

第二节 晶闸管整流器

第三节 变流装置的逆变器

第四节 直流斩波变流器

第五节 晶体管变流装置

第六节 变流装置主电路元件的保护

第三章 典型控制单元

第一节 概述

第二节 典型控制单元

第三节 典型控制单元电路原理图及简要说明

第四节 控制单元组合举例

第四章 检测与转换

第一节 电流检测

第二节 直流电压检测

第三节 位移检测

第四节 转速检测

附录2.4-1 旋转变压器

附录2.4-2 测速发电机

第五章 逻辑控制电路

第一节 电器控制电路的绘图原则、图形及文字符号

第二节 电气传动常用电器及选择

第三节 组成电器控制电路的基本规律

第四节 电动机起动、正反向运行及制动控制电路

第五节	可编程控制器PC	170
-----	----------------	-----

参考文献	182
------------	-----

第三篇 直流拖动控制系统

第一章	直流电动机不可逆调速系统	185	第二节	伺服系统的控制方案	236
第一节	直流电动机的调速方案	185	第三节	微型计算机伺服系统	241
第二节	晶闸管供电的不可逆直流调速系统	186	第四章	稳速系统	249
第三节	直流调速系统设计	195	第一节	数字稳速系统	250
第二章	可逆调速系统	210	第二节	常用环节	253
第一节	概述	210	第三节	稳速系统设计	256
第二节	有环流可逆调速系统	215	第五章	微型计算机控制的直流拖动系统	260
第三节	无环流可逆调速系统	220	第一节	概述	260
第四节	磁场可逆调速系统	231	第二节	控制环节的计算机实现	262
第三章	伺服系统	235	第三节	数字控制器的设计	273
第一节	概述	235	第四节	计算机控制系统举例	294
			参考文献	300	

第四篇 交流拖动控制系统

第一章	交-直-交变频调速系统.....	305	特性	370	
第一节	概述	305	第三节	串级调速系统的设计	384
第二节	电压型变频调速系统	308	第三章	无换向器电动机调速系统.....	399
第三节	电流型变频调速系统	318	第一节	概述	399
第四节	矢量变换控制系统	334	第二节	无换向器电动机与直流电动机的相似性及其特点	401
第五节	脉宽调制变频调速系统	345	第三节	无换向器电动机的控制方法	406
第六节	PWM大规模集成电路4752和它在交流电动机变频调速中的应用	352	第四节	无换向器电动机的调速系统和控制单元	408
第七节	变频调速装置的保护	357	第五节	无换向器电动机调速系统设计	419
第二章	串级调速系统.....	364	第六节	无换向器电动机的调试	426
第一节	概述	364	参考文献	428	
第二节	串级调速系统的工作原理和基本				

第五篇 计算机辅助设计与仿真

第一章	计算机仿真	431	第二节	基于频率法的计算机辅助设计	454
第一节	概述	431	第三节	基于时域法的计算机辅助设计	458
第二节	连续系统的计算机仿真	432	第四节	自动控制系统的参数最优化技术	468
第三节	采样控制系统的计算机仿真	448	附录		471
第四节	几个仿真程序的特点	452	参考文献		489
第二章	计算机辅助设计	453			
第一节	概述	453			

绪 言

一、拖动控制系统在国民经济建设中的作用

电力拖动控制系统是把电能转换成机械能的装置，它被广泛地应用于一般生产机械需要动力的场合，也被广泛应用于精密机械等需要高性能电气传动的设备中，用以控制位置、速度、加速度、压力、张力和转矩等。因此，电力拖动控制系统在国民经济中占有重要地位。由于工业技术的发展，电力拖动控制系统不断改进，并能够不断地适应愈来愈多的使用者对设备提出愈来愈严格的高性能和小体积的要求。

目前，在生产的总电能中，大约有 $2/3$ 用在电力拖动上。单个电力拖动系统的功率可从几毫瓦到几百兆瓦，转速从每小时几转到每分钟几十万转，调速范围在无变速机构情况下可达 $1:10000$ 。

采用电力拖动自动控制系统，一方面可以把人们从繁重的体力劳动中解放出来，自动地把电能变换成所需要的机械能，另一方面也可以把人们从信息处理的繁杂的事务工作中解脱出来。因此，应用电力拖动自动控制系统可以具有以下一些优点：

- 1) 改善生产过程中的工作条件。
- 2) 节约劳动力。
- 3) 减少原材料和能源的消耗。
- 4) 提高生产设备的利用率。
- 5) 提高生产的效率和产品的质量。
- 6) 提高生产设备的可靠性、安全性及其寿命。
- 7) 减少故障率和重大故障的可能性。
- 8) 对于某些因生产工艺和环境条件等原因造成的不能或不宜由人进行控制的场合，可以实现过程控制等方式。

总的来说，正确地采用电力拖动系统，并使其进一步完善和发展，对国民经济具有十分重要和特别现实的意义。

为了提高电力拖动系统的使用性能和扩大其使用范围，电力拖动进一步发展的方向和主要内容为：

- 1) 采用低损耗电力电子装置的电力拖动系统，采用节能的起动、制动和调速的方法来提高能量的利用率。
- 2) 采用完善的信号处理方案（包含自适应算法和自学习算法），特别是应用微处理器和微型计算机系统来扩大调速范围，提高动态性能和调节精度。
- 3) 为了提高拖动系统（特别是位置和进给拖动系统）的加速能力，应研制热容量较大、过载能力较高的电动机及与其相应的电力电子装置。
- 4) 努力提高系统的可靠性和安全性，例如，提高元件的集成化程度，减少触点和采用易于维修的结构，采用必要的辅助设备来检查准备和运行情况，分析停机事故并采取相应措施等。

- 5) 在设计拖动系统时, 预先安排一些检测点和检测部件。
- 6) 采用不受干扰和不易损坏的部件, 用合理的配线技术和外形结构, 减小部件体积, 减少使用材料。
- 7) 选择合适的信息处理的周期。
- 8) 开发和应用计算机辅助设计方法, 以保证电力拖动自动控制系统的设计更合理化。
- 9) 对所选择的系统(功能、可靠性、受干扰情况及重大事故的状况等)性能进行仿真, 以便在实施前改正不合理的设计, 从而减少为改进系统所付的代价。
- 10) 研制运行可靠、费用较低的民用电拖方案。
- 11) 研制大功率的特殊拖动系统。
- 12) 研制高精度、快响应、宽范围的交流调速系统, 以取代现有的直流电力拖动系统。

二、拖动控制系统的目前概况

由于半导体技术在电力电子学和模拟及数字电子学方面的迅速发展, 促使了电力拖动控制系统的日新月异。

从20世纪60年代以来, 现代工业电力拖动系统的技术发展水平在不断地变化。到70年代中期, 电力拖动控制系统达到了全新的发展阶段。这种发展是以采用电力电子技术和微电子技术为基础的、新型的可关断电力电子器件的应用以及数据处理速度与运算精度愈来愈高的微处理机的普及, 使各类电动机的高性能实时控制系统有可能实现。

在世界各国的工业部门中, 至今尚广泛地应用着直流电力拖动系统。直流拖动的突出优点在于: 容易控制, 能在很宽的范围内平滑而精确地调速, 以及快速响应等。在一定时期以内, 直流拖动仍将具有强大的生命力。晶闸管使直流电力拖动的调速技术发生巨大变化。相对于原有的直流发电机组对直流电动机供电的直流拖动系统, 采用晶闸管静止变流器供电的系统具有体积小、无噪声、效率高等一系列优点。

在60年代和70年代, 直流拖动达到全盛时期。目前, 晶闸管控制的直流拖动普遍地应用于轧机拖动、纺织机械、造纸机械和电力机车等场合。用晶闸管变流器控制的他励直流电动机调速系统, 至今仍是工业中应用最广泛的拖动系统。这种系统若采用电枢电压控制, 可以得到低于基速的转速调节。若采用削弱磁场控制, 可以得到高于基速的转速调节, 可以通过晶闸管的串联和并联, 来达到高电压和大电流。功率、电压、电流和转速的极限, 是由直流电动机的极限所决定, 而不取决于变流器的半导体器件。

为了向直流电动机提供可变的电枢电压, 通常采用两种基本方法。一种是工频交流电源经过晶闸管相位控制整流桥输出可调的直流电压。另一种则是工频交流电源经过二极管整流桥得到直流电压, 再经过斩波器控制, 输出可调的直流电压。相位控制的应用很广泛, 能在很宽的范围内平滑地控制输出电压。但晶闸管相位控制在输出电压较低的情况下, 它对电网的功率因数较低。斩波器控制在电源与输出之间串联着两个变流器——二极管整流桥和直流调压斩波器。在斩波频率较高的情况下, 应采用快速晶闸管, 或者采用其它可关断电力电子器件。由于二极管整流桥与电源连接, 故电网的功率因数较高。由于高频斩波, 故可不设滤波器或滤波器尺寸很小。这是斩波器控制也能得到广泛应用的原因。

自从引入半导体变流技术以来, 直流电动机在不断发展与完善。目前, 国外已能制造全补偿的电气无阻尼的直流电动机。这种电动机可以允许有很高的电流变化率, 从而可以满足快速响应的要求。但是, 总的来说, 直流电动机有两个致命的缺点:

1) 直流电动机因为带有换向器, 所以需要日常的维护。换向器对环境条件有一定的要求, 并且过载条件也有一定的限制。

2) 直流电动机的换向要求电枢绕组的漏感很小。这个要求限制了电枢的有效长度。并且转速愈高、过载能力愈大、磁场愈弱, 则对电枢长度的限制更为严格。直流电动机的电枢直径取决于电机的功率, 故在大功率且要求快速反应的系统中, 不得不采用费用高而技术性能不良的多电动机结构。采用提高直流电动机的电磁负荷来改善有效部分的利用率, 以达到降低电动机惯性矩的做法, 必将使电动机的效率降低, 因此, 这种做法也是有局限性的。

一直被直流电动机调速系统所占领的各种性能的调速领域, 正被日益发展的科学技术所支持的交流电动机调速系统所取代。这是各国科研与技术人员努力工作所追求的目标, 也是近代电气传动领域的发展方向。

回顾交流调速技术的发展, 是与多个学科的发展有着紧密的联系。其中, 最主要的是新型电力电子器件与大规模集成电路的出现和发展, 从而迅速地推动了电力电子电路和控制技术的不断创新。

通常所称的交流调速, 主要是指采用电子变流器的交流电动机变频调速。过去常用的变极、调压、滑差离合器等调速方法, 虽在今后可能还有一定的使用范围, 但传动领域的主要阵地最终将被先进的交流变频调速所占领。

交流电动机有各种类型。从结构上来说, 尤以笼型感应电动机最为简单。为了交流电动机的变频调速, 需要为电动机提供一个可变电电压和可变频率的电源。由于静止变频方法和调节方法的发展, 目前在各种应用领域中, 交流电动机的调速已达到实用阶段。通过对电动机类型、工作频率和变频方法的自由选择, 可以比应用直流电动机具有更多的优点, 而且更能满足拖动系统的使用要求。

下面分几个方面说明交流电力拖动控制系统的目前概况。

电力电子器件方面。我国目前应用的晶闸管是从60年代初逐步发展起来的。目前, 国产晶闸管与国外产品相比, 虽有一些差距, 但尚能满足用于大功率系统里低速开关运行的要求。

在可关断器件方面, 最初出现的GTO和GTR是用电流控制通断的。在我国, GTO和GTR没有得到及时的发展, 以致近十年来, 与国外相比, 器件和交流调速装置的差距在不断地扩大。GTO和GTR目前价格较贵, 加上这些器件的驱动电路和保护措施不够完善而易于损坏, 因此影响了它们在国内的推广应用。

另一种新型的可关断器件是用电场控制通断的。最初出现的是功率MOSFET(或称VD-MOS, 垂直导电型MOS场效应管), 继而又出现IGBT(绝缘栅晶体管), 这些都是通过改变沟道的导电类型, 而使器件通断的; 最近又出现SIT(静电感应晶体管)和SITH(静电感应晶闸管), 这些都是通过改变基区中空间电荷层的宽度, 而使器件通断的。与电流控制通断的器件相比, 场控器件具有安全工作区域大、驱动电路功率小、开关损耗小等优点。这类场控器件将逐渐成为今后交流变频调速系统所采用的主电路开关器件。当然, 随着电力电子技术的不断发展, 现有器件的进一步完善, 新型更完善的器件还将不断出现。

由于电力电子器件的响应速度快而其过载能力有限, 因而需要研究系统在欠压、过压、过流、过热等情况下的快速保护功能。

主电路方面。变频器以有无直流中间环节来区分, 有交-交变频器和交-直-交变频器。变

变频器作为负载的电源来说,可分为电流(源)型和电压(源)型。

交-交变频器,目前常以晶闸管作为开关器件,常用于变频器的输出频率为 $1/2$ 工频以下的大功率电气传动方面。由于采用较多的电力电子器件及输出频率较低等原因,交-交变频器的使用不够广泛。

交-直-交电流型变频器,通常由晶闸管的三相可控整流桥、直流环节大电感滤波器和晶闸管三相逆变桥所组成。这种变频器具有许多优点。它不需任何附加主电路,就能把负载电动机送来的能量返送电网。由于大电感滤波器的存在,限制了瞬时故障电流的上升率,从而比较容易实现过电流保护。在负载功率较大的情况下,容易以多重化实现变频器的功率扩大,同时改善对负载供电的电流波形。但是,在目前广泛应用自关断器件和应用PWM技术于电压型逆变器的情况下,电压型逆变器在许多方面优于电流型逆变器。

交-直-交电压型变频器,通常由二极管的三相整流桥、直流环节大电容滤波器和各种开关器件组成的三相逆变桥所组成。这种主电路的优点是只有逆变桥是受控的。直流环节恒定的电压,经过PWM逆变器的控制,可以实现输出电压和输出频率同时可调,对负载电动机供电。这种电路的结构简单,输出的电流波形接近正弦,因而广泛地得到应用。但是,这种电路不能实现负载反馈能量的再生和消耗。在负载仅有少量能量反馈时,通常在主电路的直流环节接入(由开关器件和能耗电阻所组成的)能量释放环节。在负载有大量的、经常的能量反馈时,通常用两组反并联的三相可控桥来代替前述二极管的三相不控整流桥。这时能够实现负载的能量返送电网。逆变桥的器件在大功率时,常用晶闸管,因而也必须配以换流电路。在中、小功率时,常采用GTO或GTR等自关断器件,因而主电路结构更为简单。

在控制手段方面,近十年来也在迅速地变化着。从分立元件组成的控制系统,到采用运算放大器等集成电路的控制系统,由于单片微型计算机功能的不断加强,运算速度的不断提高,价格较低而可靠性较高,故目前趋向采用以单片微机为核心的控制系统。这种系统的控制规律由软件构成,只需配备少量的接口电路(例如主电路器件的驱动电路,电压、电流、转速等反馈电路)就能形成一个完整的控制系统。其硬件结构简单,可以通过容易更改的软件来实现不同的控制规律或不同的性能要求。单片微机除了实现系统的控制以外,还能兼顾系统的保护、诊断和自检等功能。所以单片微机是目前较为理想的控制手段。

在控制策略方面,也是多种多样的。由于感应电动机的参量在相互之间有着紧密的耦合关系,加上参数的变化和非线性,因而造成控制的困难。

最简单的调速方案是由变频器对感应电动机提供电压与频率之比按一定规律变化的电源。但其性能较差,不能用于要求较高的场合。

采用滑差频率控制的方案,虽比上述开环系统进了一步,形成了转速闭环,但也只能满足静态要求,其动态性能较差。

矢量控制系统由于将感应电动机的定子电流分解为转矩分量和磁场分量,而该两分量相互垂直,故使感应电动机的控制解耦,可以实现与直流电动机相仿的控制。矢量控制系统的精度较高,它要求检测与反馈环节具有一定的精度,它也要求系统能作一系列复杂的运算。矢量控制系统对感应电动机转子电阻(因温度变化和动态集肤效应等引起)的变化敏感。因而,对于电动机参数变化较大的情况,在某些要求较高的场合中,还需应用自适应控制。即使如此,动态过程中原先解耦的关系可能不再成立,从而影响性能。

另一种方法是将电动机实际的转矩和磁场与给定的转矩和磁场进行比较,通过二点式调

节器进行直接调节。这是简单的控制规律，它可避免矢量控制的复杂运算，也可避免电动机参数变化对系统运行性能的影响。这种控制方法已被交流调速的科研工作者所接受，并已有相应的成果出现。

除此之外，在控制规律方面还有滑模变结构、模型参考自适应等，并相应地有一定数量的科研成果发表。总之，在控制规律方面还有许多工作可做，人们正在寻求适合各种运行要求的不同方案，以供实际应用。

同时，电力拖动控制也大大地推动了控制领域的学术发展，产生了一些新型的 控制结构，并在各种控制工程中推广应用。这是由于电力拖动控制系统比较典型，其系统的结构比较明确，因此，其静态和动态特性也是可以控制的。

国外由于新型电力电子器件和专用电子电路的支持，研究工作进展较快，各类高性能的电力拖动控制系统已经开始达到实用阶段，而从总的进程来看，还将有一个持续过程。我国从事电力拖动自动控制系统方面研究工作的人员，还将有许多工作可做。

三、本手册的性质、任务和使用方法

工业电气自动化专业的学生在学习专业课程中和学完所有课程以后，都有理论联系实际的教学环节，其中，尤以毕业设计更为重要。电力拖动系统可以作为工业电气自动化专业的学生一个非常典型的联系实际的课题。学生在课程学习的基础上，在教师的指导下学会设计一个电力拖动系统，必将在今后的工作岗位上能够早日承担实际的有关工程任务。学会设计一个电力拖动系统，也为设计更复杂的自动控制系统打下坚实的基础。因此，本手册作为工业电气自动化专业课程联系实际的教学辅助资料，也可作为本专业学生从事毕业设计时的主要参考书。本手册也可作为从事自动控制系统方面工作的工程技术人员的参考资料。

电力拖动系统为了满足某种工艺要求，可以有多种多样的实现方案。本手册的任务是使设计者在掌握其内容的基础上，能够灵活地应用、设计和计算所选用的调速系统，并且达到静态和动态的要求。

读者在使用本手册的时候，建议先对本手册的结构作一大概的了解，以便必要时能够迅速地查到所需要的内容。

本手册主要内容分为五篇。

第一篇作为设计第三篇和第四篇所讲的各拖动系统时的基本参考资料。其主要内容为：

- 1) 根据生产机械提出的要求，选用合适的拖动系统。
- 2) 为了能够计算调速系统的静态和动态特性，介绍对象特性和参数的测试方法。
- 3) 系统的调试是决定系统能否使用、能否达到预定指标的关键步骤。这一部分的内容，对于初学者来说尤为重要。

第二篇集中介绍拖动系统的一些常用的控制单元，供第三篇和第四篇所讲述的各种系统选用。

第三篇和第四篇是本书的中心内容。各章的第一节，概述该章拖动系统的分类、性能指标和应用场合。各章的随后各节，分别详细介绍某种拖动系统。一般可以包含下列内容：

- 1) 工作原理简介。
- 2) 主电路和控制电路框图。
- 3) 主电路的选用和计算。
- 4) 各框图的选用。第二篇内常用控制单元的选用，个别特殊单元的介绍。

- 5) 控制电路静态工作点的选择。
- 6) 工程设计方法的选用和调节器参数的选择。
- 7) 系统的调试以及可能出现的问题。
- 8) 系统的派生和改进。
- 9) 举例。

第五篇主要介绍几个计算机辅助设计和计算机仿真的实用程序。使用计算机可方便地对所研究的系统进行设计和分析。

在具体设计电力拖动系统时，以上五篇的内容是互相关连的。

由于篇幅的限制，本手册不可能把电力拖动系统有关的所有内容全部编入。必要时，读者可以参照其它有关的参考资料。

第一篇 拖动控制系统设计 的共同问题

第一章 拖动控制系统设计的基本方法

电力拖动控制系统的设计是一项综合性工作,对于初学设计的人来说,往往不清楚设计工作的基本任务是什么、有哪些具体内容、如何着手进行等。本篇针对拖动控制系统的原理性设计,介绍有关设计的基本内容、方法和步骤,供工业电气自动化专业学生进行毕业设计工作时参考,也适合电气工程技术人员进行拖动控制系统设计时参考。

广泛地用于各种工业生产机械上的电力拖动控制系统,一般都具有自动调节和自动控制的功能。虽然各种生产机械所采用的电力拖动方式、目的不尽相同,但系统的基本结构框图大体相同,如图1.1-1所示。

系统各部分的功能:功率变流器把电网能量变换成合适的形式向电动机供电;电动机通过传递机构与工作机械相连,实现电能转换成机械能;控制或调节装置是系统中重要的信息处理单元,用来实现预先设定的控制或调节规律,产生调节指令 C 。装置有二个输入量:给定量(或操纵量) R 和反馈量 X_2 ,给定量由手动或上级装置(例如计算机)给出,反馈量一般取自系统被调量的实际值。装置的输出量 C 控制

着系统的相应部件工作,从而实现自动控制和自动调节作用。保护装置用作系统的事故保护,及时切断电动机的电源。测量装置是系统不可少的部件,它一方面给显示、报警和记录装置提供信息,同时也向控制或调节装置提供反馈信息。

典型的电力拖动控制系统有调速系统、随动系统、张力控制系统、多分部速度协调控制系统和稳速系统等类型,本篇则以工业中应用最为广泛的调速系统、随动系统作为讨论设计工作的基点。

由上所述可知,电力拖动自动控制系统不外乎完成如下基本任务:

- 1) 利用高效率的变流装置提供所需要的电能。

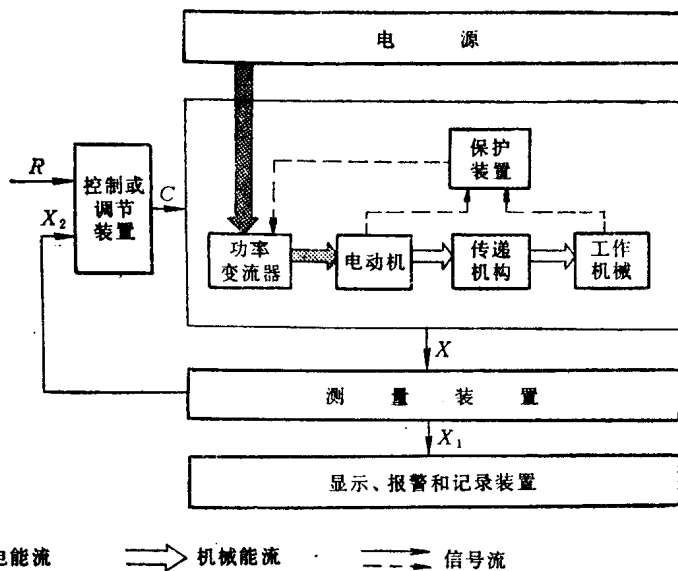


图1.1-1 电力拖动自动控制系统的基本结构

X —测量值 C —控制量 R —输入量

- 2) 把电能转换成工作机械所需要的机械能。
- 3) 采用各种调节元件来控制电能与机械能的转换。
- 4) 准确地复现由人工或指令装置给出的控制信号, 以满足生产过程、科学试验等技术要求。
- 5) 为确保操作人员和技术设备的安全, 系统应对事故状态进行自动保护与闭锁。
- 6) 为实现显示、报警、记录以及产生调节指令等功能, 系统还需设立测量及监控装置。

要完成上述各项设计任务, 设计者应具备有关“电机及拖动基础”、“电力电子学”、“电力拖动自动控制系统”、“自动控制原理”、“微型计算机原理及接口”以及“测量技术”等方面的知识。

第一节 设计的一般步骤

电力拖动自动控制系统的设计过程, 原则上还没有一种确定的工作步骤可以遵循, 何况设计工作还常存在着多种因素的制约。一个好的设计往往要在成本与技术性能之间进行合理的折衷处理, 因此设计工作是一种综合地解决实际问题的创造性工作。设计工作的效率与设计结果的质量, 很大程度上取决于设计人员的知识和工作经验。尽管如此, 在总结前人设计经验的基础上, 设计过程大致可以划分成几个粗略的阶段。

一、设计工作的准备

设计准备要达到二个目的:

- 1) 根据给出的任务, 查找有关资料, 收集完成设计任务适用的材料。
- 2) 仔细分析所接受的设计任务, 明确工作任务。

具体实施方法: 根据给出的任务, 从专业书、参考文献、手册、专利文摘、国家标准以及类似项目的研制报告等, 查找下列有关材料:

- 1) 可能实现的拖动系统的基本结构、原理性方案、典型设计。
- 2) 可供使用的组件、元器件的技术性能、经济指标和市场供应情况。
- 3) 应当遵循的规章、规程、标准和工业技术方面的方针、政策。
- 4) 需要考虑的保护措施。
- 5) 类似项目研制中积累的经验和今后发展方向。

经过对现有各类技术资料的审查和分析, 结合被设计的拖动控制系统的技术要求, 综合出设计工作的具体任务。

二、评价和比较方案

有了明确的设计任务, 就可从众多的可行方案中选出一个或几个比较满意的方案, 在它们相互之间或与基本方案之间进行全面的比较, 以选出最好的解决方案。

评价和比较方案的依据, 主要是各方案在技术、工艺和经济性能方面的优劣, 此外, 是否满足外形、结构上的要求; 对工作环境是否造成有害影响(如噪声、振动、无线电干扰以及对电网污染)等。

1. 技术性能的评价

评价技术性能时, 要审查设计结果能在多大程度上达到预期的目的和要求。为此, 需要

把不同方案的一些重要的技术参数与设计任务书中规定的技术指标进行比较。

2. 工艺、经济性能的评价

评价和比较方案的工艺、经济性能时,要检查设计结果能在多大程度上保证生产成本低而生产率高,或采用性能价格比的指标来度量。

为了定量地表示各可行性方案对设计规定要求的满足程度,原则上都可采用“量化”的方法。即选择系统的若干重要性能指标作为系统参数,用品质变量 Q_i 表示,并规定

$$Q_i = \begin{cases} 5 & \text{很好地满足了第 } i \text{ 个系统参数提出的要求} \\ 4 & \text{较好地满足了第 } i \text{ 个系统参数提出的要求} \\ 3 & \text{满足了第 } i \text{ 个系统参数提出的要求} \\ 2 & \text{对第 } i \text{ 个系统参数的要求满足得不够好} \\ 1 & \text{对第 } i \text{ 个系统参数的要求满足得较差} \end{cases}$$

品质变量 Q_i 相当于评价与比较系统工艺、经济性能的度量, Q_i 值的大小表示与其对应的系统参数的满足程度,数值越大则满足的程度越好。今以图1.1-2为例,说明各可行性方案的定量分析方法。图中画出了对三个方案进行评定的七个系统参数,这样,每个方案的特点都可以从图上直观地看出。

可行性方案之间采用“量化”方法进行比较时,又可分为二种不同的情况。

情况1:系统对各个特性参数都是同等对待的,那末可以简单地按照三条曲线的

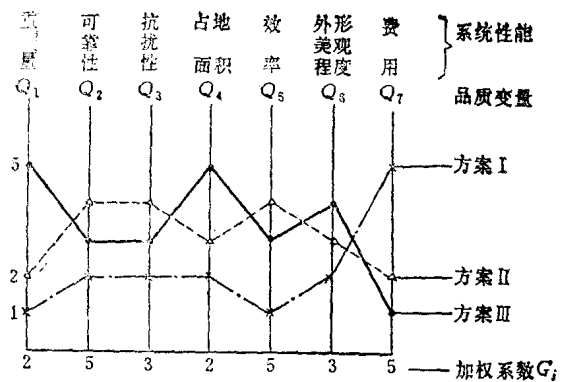


图1.1-2 可行性方案的工艺、经济性能比较

的各评定点的“数值和”决定最好的解决方案,令 $S = \sum_{i=1}^7 Q_i$ 。

情况2:系统对各个特性参数需要区别对待,因为实际系统中各性能指标的重要程度是有所不同的。此时则采用加权系数 G_i ,其数值大小由设计者选取,并用各评定点的“加权和”

来决定最好的解决方案。令 $S_G = \sum_{i=1}^7 G_i Q_i$ 。由图1.1-2可以求得下述结果

方案 I	方案 II	方案 III
$S = 15$	22	24
$S_G = 58$	81	76

可以清楚地看出,在情况1时,方案III是最好的解决方案,而在情况2时,方案II则是最好的。

三、原理设计工作

原理设计阶段是整个设计过程的主体,是完成给定的设计任务所进行的全面论证、分析和计算阶段。

(一) 拖动控制系统技术指标的确定

在详细分析、研究工作机械的生产工艺和技术要求的基础上,拟订出拖动控制系统应达到的性能指标。确定系统合理的技术指标是设计工作的重要一环,技术指标订得过低,将使系统工作时不能满足工作机械的生产要求,不切实际地追求系统过高的技术性能要求,又将导致拖动控制系统过份复杂或者要付出大量的投资,有时甚至是不可能达到的,因此必须从实际需要出发,统筹兼顾全面地考虑。

(二) 拖动控制系统的方案论证

拖动控制系统的方案论证包括对组成系统的主要部分——电动机、功率变流器和控制(含信号检测)装置的各种可行性方案作出综合比较,按技术、工艺和经济性能等方面进行全面评价,必要时还可对各方案的主要特性参数进行粗略的计算。方案论证的重点有两个方面。

1. 拖动电动机选用交流电动机还是直流电动机

应根据两类电动机的各自特点和拖动系统的要求作出选择。一般地讲,交流电动机结构简单、没有整流器、维护检修方便、工作可靠、价格低廉,对于不需要调速或调速要求不高的场合,应优先考虑采用。近年来,性能优异的交流变频调速系统得到飞跃发展,尤其是矢量控制技术的应用,交流拖动系统在控制性能和经济上都已可与直流拖动相媲美。直流电动机易于实现调压、调磁调速,具有很好的调速性能,并且已有成熟的控制系统和运行经验,因此,直流拖动系统能满足生产机械提出的宽调速、高精度和快速响应等要求,但其结构上因存在换向器,不仅使得维护困难,使用环境受到限制,而且还阻碍了电动机向高转速、大容量方向的发展。

2. 自动调节系统是采用模拟量控制还是采用数字量控制

两种控制方式具有本质的区别,前者系统的控制变量是连续变化的,后者的控制变量则是离散值。由此造成两种系统调节性能的不同。选用模拟控制还是数字控制,主要取决于拖动控制系统对精度、可靠性、快速性、灵活性、智能化以及多功能等要求。例如,数字式给定装置、反馈发送器和比较装置等元件的精度比相应的模拟式元件高出很多,并且信号以数字形式传输具有很强的抗扰性。基于这些优点,数字控制系统作为一种高精度控制系统在拖动系统的设计中受到重视。近年来随着微电子技术的发展以及微型计算机生产成本的降低和体积的微型化,由微型计算机组成的数字控制系统日益广泛地得到应用。这类系统除了具有一般数字控制系统的优点外,由于微型计算机的集成度高、系统组成元件少,更提高了系统的可靠性。此外,微机控制系统的调节规律是由软件实现的,它具有高度的灵活性,不仅能实现模拟控制系统常用的PID调节规律,而且还能方便地引入各种先进的控制规律,如非线性控制、前馈复合控制、最优控制和自适应控制等。尤其突出的是采用微型计算机控制的拖动系统还能实现故障自诊断等功能,较之模拟控制系统具有更高的可靠性和先进性。综上所述,微型计算机的应用为拖动控制系统的高精度、智能化、多功能等方面创造了条件,是拖动控制系统设计时可供选择的一种重要方案。但是也应看到,微型计算机的应用也存在一些限制和问题。例如,数据采集与控制作用之间存在着滞后关系和计算机的运算速度高低,都会影响微机控制系统响应的快速性和动态性能;计算机的有限字长对于控制或检测信号分辨率的限制;数据处理过程的舍入误差和截取误差可能导致系统的不稳定或降低系统的静态和动态精度等等。鉴于模拟控制系统与数字控制系统具有各自的优缺点,有时则选用数-模混合控制系统,以便把二者的优点结合起来。

(三) 确定闭环调节系统的结构

一般地讲, 如果设计任务所要完成的技术要求只是控制一个物理量, 如转速或电压, 那么就采用单闭环调节系统。当然, 为了改善系统的性能, 也可采用双闭环或多闭环调节系统; 如果所要完成的技术任务需要控制多个物理量, 则要采用多闭环调节系统。不论是单闭环结构还是多闭环结构, 都要选择好控制变量及相应的检测手段, 然后根据反馈、前馈、最优化或自适应等概念组成闭环调节系统, 并确定相应的调节器。

由两个或多个反馈回路共同控制一个调节对象时, 常采用串级控制的方式。即内环的输入作用由外环供给, 逐级向外延伸。这种控制方式下的拖动控制系统, 一般对内环调节的快速性要求较高而对调节的精度要求较低。反之, 外环则要求精度较高而快速性较低。根据这一特点, 故对调节精度要求高的拖动控制系统, 外环采用数字量信号而内环采用模拟量信号的数-模混合控制系统。

此外, 对于被控对象的参数在工作范围内波动较大, 可能变化到原有值的四倍以上或四分之一以下, 一般需要采用自适应调节器, 以保持系统具有良好的性能指标。

(四) 拖动控制系统的静态与动态设计、计算

1. 静态设计的要求

- 1) 正确选择组成系统的各环节、各种组件、器件的数量、参数或容量等。
- 2) 确定系统各环节之间的匹配关系。例如, 功率变流器的输出电压与电动机额定电压相适配; 控制电压的幅值与触发脉冲的最大相移相适配等。
- 3) 系统的静特性计算, 主要是确定系统的开环增益, 以满足工作机械提出的稳态要求。

2. 动态设计的要求

在保证系统稳定性的前提下, 满足系统提出的各项动态性能指标。主要有:

- 1) 跟随性能指标, 通常以过渡响应的最大超调量 σ 与响应时间 t_s 来表示。
- 2) 抗扰性能指标, 通常以最大动态降落 $\Delta C_{\max}$ 与恢复时间 t_f 来表示。

动态设计的任务是正确选用校正装置(或调节器), 包括校正装置的结构形式与参数; 校正装置的连接方式等。

四、拖动控制系统的仿真研究和模拟试验

在系统的原理设计完成后, 通常总要利用计算机仿真技术, 对所设计系统进行仿真研究, 或有条件时对模型系统进行试验研究, 以考核设计、计算结果的正确性。

按照实际系统在运行中可能发生的工作状况进行计算机仿真或实验研究, 可以发现理论计算设计出的系统在何种程度上满足了给定任务所提出的要求。造成理论计算与仿真或实验研究结果不符的原因, 主要是理论计算时往往对系统及其组成部分引入近似或简化处理。如果仿真或实验研究的结果不满意, 就要进行修正或者选择另一种方案重新进行设计。如果结果满意了, 就可以编制全套设计资料, 为样机的试制作好准备。

五、样机制造与各类技术文件的编制

经过以上四个阶段的工作, 拖动控制系统的原理设计计算工作已经完成, 剩下的工作是进行样机的制造, 包括控制电路印制板、控制柜等的设计、制作和安装、调试; 各类技术文件的编制, 包括部件、组件、元器件等明细表、电气原理图(系统的及各单元环节的)、产品说明书、操作维护手册等。这里不作详细介绍。