21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

控制电机与特种电机及其控制系统

孙冠群 于少娟 主 编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

控制电机与特种电机及其控制系统

主　编　孙冠群　于少娟
副主编　李　璟　蔡　慧　曹金亮
　　智泽英　左　龙　丁　伟

北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书共分为11章：绪论、测速发电机、自整角机测控系统、旋转变压器、伺服电动机及其控制系统、步进电动机及其控制系统、无刷直流电动机及其控制系统、开关磁阻电动机及其控制系统、直线电动机、盘式电机、超声波电动机。除第1章外，其他各章按照如下模式进行编写：开篇引入应用实例，即引言，重点介绍电机及其系统构成、电机工作原理、电机本体分析、控制策略与系统应用等，一般使用工程实例讲解控制系统。

本书适合作为高等院校电气工程及其自动化、自动化、机械电子工程等专业的本科教材或参考书，也可供科研院所、相关企业从事电气自动化技术的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

控制电机与特种电机及其控制系统/孙冠群，于少娟主编. —北京：北京大学出版社，2011.1
(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)
ISBN 978-7-301-18260-4

Ⅰ.①控… Ⅱ.①孙…②于… Ⅲ.①微型控制电机—高等学校—教材②电机—控制系统—高等学校—教材 Ⅳ.①TM383②TM301.2

中国版本图书馆CIP数据核字（2010）第246250号

书　　名：控制电机与特种电机及其控制系统
著作责任者：孙冠群　于少娟　主编
策 划 编 辑：李　虎
责 任 编 辑：程志强
标 准 书 号：ISBN 978-7-301-18260-4/TP·1139
出　版　者：北京大学出版社
地　　址：北京市海淀区成府路205号　100871
网　　址：http://www.pup.cn　http://www.pup6.com
电　　话：邮购部62752015　发行部62750672　编辑部62750667　出版部62754962
电 子 邮 箱：pup_6@163.com
印　刷　者：
发　行　者：北京大学出版社
经　销　者：新华书店
787毫米×1092毫米　16开本　22.75印张　528千字
2011年1月第1版　2011年1月第1次印刷
定　　价：42.00元

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究　　举报电话：010－62752024
电子邮箱：fd@pup.pku.edu.cn

前　言

电力电子技术、控制技术、数字信号处理技术、微电子技术、材料技术和计算机技术的飞速发展，推动了现代电机技术的发展，推动了新型电机的产生，拓宽了电机的应用领域，并且将电机技术与诸如电力电子、控制理论、数字信号处理、计算机技术等融为一体，使它们不可分割。在传统电机之外的控制电机与特种电机，已不能用传统的电机概念来理解。

本书需要对电机学进行先期学习，即在学习了传统电机的结构、原理、电磁关系、特性与应用等基础知识之后，才能进而对传统电机之外的控制电机与特种电机展开讨论，适应了现代电机的发展趋势。控制电机与特种电机本体与其控制系统已经密不可分，本书将电机与控制合二为一，侧重介绍了各种控制电机与特种电机的选择范围、应用实例，以及使用方法和注意事项，并突出介绍了相关电机的控制系统，力求达到理论与实践相结合，为学生在实际工作中能灵活应用、合理选择、正确使用电机打下良好基础。

本书共分 11 章，涉及 10 个系列的控制电机或特种电机的工作原理、电磁关系、特性、控制系统等内容，包括绪论、测速发电机、自整角机测控系统、旋转变压器、伺服电动机及其控制系统、步进电动机及其控制系统、无刷直流电动机及其控制系统、开关磁阻电动机及其控制系统、直线电动机、盘式电机、超声波电动机。为了便于教学，本书在保持全书系统性和完整性的同时，各章又自成体系，各院校完全可以根据自己的需要有选择地讲授相关内容。

本书由中国计量学院孙冠群(第 8、10、11 章、附录)与太原科技大学于少娟(第 1、4 章)任主编，参加编写的还有中国计量学院的李璟(第 5 章)、蔡慧(第 9 章)，太原科技大学的曹金亮(第 6 章)、智泽英(第 7 章)、左龙(第 3 章)、丁伟(第 2 章)。本书依据本科教学大纲编写而成。在本书编写过程中得到了各方面人士的支持，特别是得到了编者所在学院的大力支持和帮助，相关学科的老师对本书提出了许多宝贵意见，对此谨向他们表示诚挚的感谢！

为了便于自学，除绪论外，其他章都有知识架构、教学目标与要求、思考题与习题，并附有课程设计（见附录）供读者参考。

由于作者水平所限，书中难免存在不足之处，欢迎广大师生和读者批评指正。

编　者

2010 年 11 月

目　录

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　控制电机、特种电机与传统电机的区别 …… 1

1.2　控制电机与特种电机的种类 …… 2

1.3　控制电机与特种电机的应用概况 …… 2

1.4　控制电机、特种电机与其控制系统的关系 …… 3

第 2 章　测速发电机 …… 5

2.1　直流测速发电机 …… 8

2.1.1　直流测速发电机的输出特性 …… 8

2.1.2　直流测速发电机的误差及其减小的方法 …… 9

2.2　交流异步测速发电机 …… 15

2.2.1　空心杯转子异步测速发电机的结构和工作原理 …… 16

2.2.2　异步测速发电机的输出特性 …… 18

2.2.3　负载阻抗对异步测速发电机输出特性的影响 …… 18

2.2.4　异步测速发电机误差的产生原因及减小措施 …… 21

2.2.5　异步测速发电机的主要技术指标 …… 23

2.2.6　产生剩余电压的原因及减小措施 …… 24

2.3　测速发电机的应用举例 …… 27

2.3.1　位置伺服控制系统的速度阻尼及校正 …… 27

2.3.2　转速自动调节系统 …… 27

2.3.3　自动控制系统的解算 …… 28

小结 …… 30

思考题与习题 …… 32

第 3 章　自整角机测控系统 …… 34

3.1　自整角机概述 …… 35

3.1.1　自整角机的分类 …… 36

3.1.2　自整角机的结构 …… 39

3.1.3　控制系统对自整角机的技术要求 …… 42

3.2　控制式自整角机 …… 42

3.2.1　控制式自整角机的工作原理 …… 43

3.2.2　带有差动发送机的控制式自整角机的工作原理 …… 46

3.3　力矩式自整角机 …… 47

3.3.1　力矩式自整角机的工作原理 …… 47

3.3.2　阻尼绕组 …… 50

3.3.3　力矩式自整角机的性能指标 …… 50

3.4　自整角机测控系统及应用 …… 51

3.4.1　雷达方位角测量系统组成 …… 51

3.4.2　自整角机的测角与控制 …… 52

3.4.3　轴角/数字转换电路的硬件设计 …… 53

3.4.4　软件设计 …… 54

小结 …… 54

思考题与习题 …… 55

第 4 章　旋转变压器 …… 56

4.1　旋转变压器的类型和用途 …… 58

4.2　正、余弦旋转变压器 …… 60

4.2.1　正、余弦旋转变压器的结构 …… 60

4.2.2　正、余弦旋转变压器的工作原理 …… 62

4.2.3　正、余弦旋转变压器补偿方法 …… 68

4.3　线性旋转变压器 …… 72

4.3.1　线性旋转变压器结构 …… 72

4.3.2 线性旋转变压器工作原理 … 72
4.4 旋转变压器的使用 …… 74
4.4.1 工作方式 …… 74
4.4.2 旋转变压器的选择和使用 …… 75
4.4.3 旋转变压器的误差 …… 76
4.5 旋转变压器的应用举例 …… 77
4.5.1 旋转变压器在角度测量系统中的应用 …… 77
4.5.2 旋转变压器在解算装置中的应用 …… 82
小结 …… 86
思考题与习题 …… 90
第 5 章 伺服电动机及其控制系统 …… 91
5.1 伺服电动机概述 …… 94
5.2 直流伺服电动机及其控制 …… 95
5.2.1 直流伺服电动机的结构和分类 …… 95
5.2.2 直流伺服电动机的控制方式 …… 98
5.2.3 直流伺服电动机的稳态特性 …… 99
5.2.4 直流伺服控制技术 …… 101
5.3 直流伺服电动机的应用 …… 105
5.3.1 在位置控制系统中的应用 …… 106
5.3.2 在速度控制系统中的应用 …… 106
5.3.3 在混合控制系统中的应用 …… 107
5.3.4 在张力控制系统中的应用 …… 108
5.3.5 在自动检测装置中的应用 …… 109
5.3.6 在温度控制系统中的应用 …… 109
5.3.7 基于微处理器的直流伺服电动机系统 …… 110
5.4 异步伺服电动机及其控制 …… 113
5.4.1 异步伺服电动机的结构与分类 …… 114
5.4.2 异步伺服电动机的运行原理及分析 …… 115
5.4.3 异步伺服电动机的静态特性 …… 123
5.4.4 异步伺服电动机和直流伺服电动机的性能比较 … 125
5.5 异步伺服电动机的应用 …… 127
5.5.1 用于位置控制系统 …… 127
5.5.2 用于检测装置 …… 128
5.5.3 用于计算装置 …… 129
5.5.4 用于增量运动的控制系统 …… 129
5.6 永磁同步伺服电动机及其控制 …… 130
5.6.1 永磁同步伺服电动机的结构与分类 …… 130
5.6.2 永磁同步伺服电动机的工作原理 …… 134
5.6.3 永磁同步伺服电动机的稳态性能 …… 136
5.6.4 永磁同步伺服电动机的控制 …… 139
5.6.5 永磁同步伺服电动机的矢量控制策略 …… 148
5.7 永磁同步伺服电动机的应用 …… 152
5.7.1 永磁同步电动机伺服系统的设计 …… 152
5.7.2 伺服控制中相关控制策略 …… 156
5.7.3 永磁同步伺服电动机的 DSP 控制电路 …… 164
小结 …… 171
思考题与习题 …… 173
第 6 章 步进电动机及其控制系统 …… 177
6.1 步进电动机简介 …… 179
6.2 步进电动机分类 …… 181
6.3 步进电动机的工作原理、矩角特性及振荡现象 …… 182
6.3.1 步进电动机的工作原理 … 182
6.3.2 步进电动机的矩角特性 … 190
6.3.3 步进电动机的低频共振和低频失步 …… 192

6.4 步进电动机的传递函数 …… 192
6.5 步进电动机的运动控制 …… 194
6.5.1 步进电动机驱动方法 …… 194
6.5.2 步进电动机的开环控制 … 198
6.5.3 步进电动机微步距控制 … 202
6.5.4 加减速定位控制 …… 205
6.5.5 步进电动机的闭环控制 … 207
6.6 步进电动机的应用 …… 209
小结 …… 212
思考题与习题 …… 214
第 7 章 无刷直流电动机及其控制系统 …… 216
7.1 无刷直流电动机的发展及分类 …… 218
7.1.1 无刷直流电动机的发展历史 …… 218
7.1.2 无刷直流电动机分类 …… 219
7.1.3 无刷直流电动机特点 …… 219
7.2 无刷直流电动机的基本组成和工作原理 …… 220
7.2.1 基本组成环节 …… 220
7.2.2 基本工作原理 …… 221
7.2.3 常用的位置传感器 …… 222
7.2.4 基本方程 …… 225
7.3 无刷直流电动机的正、反转 …… 229
7.4 直流无刷电动机的主回路 …… 231
7.5 无刷直流电动机的控制方法 …… 236
小结 …… 238
思考题与习题 …… 239
第 8 章 开关磁阻电动机及其控制系统 …… 241
8.1 开关磁阻电动机驱动控制系统的构成与工作原理 …… 244
8.1.1 SRD 系统的基本构成 …… 244
8.1.2 SR 电动机运行原理 …… 247
8.1.3 SRD 系统与其他系统的比较 …… 248
8.2 开关磁阻电动机的控制方式 …… 250
8.2.1 SR 电动机的数学模型 …… 251
8.2.2 SRD 系统的调速控制方式 …… 254
8.2.3 基于模糊控制算法的系统控制方式 …… 257
8.3 SRD 系统功率变换器 …… 259
8.3.1 主电路与主开关电力电子器件形式介绍 …… 260
8.3.2 SRD 功率变换器设计实例 …… 262
8.4 开关磁阻电动机控制器 …… 267
8.4.1 控制器硬件设计 …… 268
8.4.2 SRD 系统软件设计 …… 275
8.5 开关磁阻发电机 …… 283
8.5.1 开关磁阻发电机的运行原理 …… 284
8.5.2 开关磁阻发电机系统的构成 …… 285
8.5.3 开关磁阻发电机的控制策略 …… 286
小结 …… 286
思考题与习题 …… 287
第 9 章 直线电动机 …… 289
9.1 直线电机的基本结构 …… 292
9.2 直线感应电动机 …… 295
9.2.1 旋转电机的基本工作原理 …… 295
9.2.2 直线感应电动机的基本工作原理 …… 296
9.3 直线直流电动机 …… 298
9.3.1 永磁式直线直流电动机 … 298
9.3.2 电磁式直线直流电动机 … 299
9.4 直线同步电动机 …… 299
9.5 直线步进电动机 …… 300
9.6 直线电动机的应用 …… 302
9.6.1 作为直线运动的执行元件 …… 302
9.6.2 用于机械加工产品 …… 302
9.6.3 用于信息自动化产品 …… 303
9.6.4 用于长距离的直线传输装置 …… 305
9.6.5 用于高速磁悬浮列车 …… 306
小结 …… 309

思考题与习题 …… 310
第 10 章　盘式电机 …… 311
10.1　盘式电机概况 …… 312
10.2　盘式直流电机 …… 313
10.2.1　盘式直流电机的结构特点 …… 313
10.2.2　盘式直流电机的基本电磁关系 …… 315
10.3　盘式同步电机 …… 316
小结 …… 320
思考题与习题 …… 322
第 11 章　超声波电动机 …… 323
11.1　超声波电机概述 …… 325
11.1.1　超声波电机发展历史 … 325
11.1.2　超声波电机的特点 …… 326
11.1.3　超声波电机的分类 …… 328
11.2　行波型超声波电动机 …… 329
11.2.1　行波型超声波电动机的结构特点 …… 329
11.2.2　行波型超声波电动机的运行机理 …… 330
11.2.3　行波型超声波电动机的驱动控制 …… 333
11.3　超声波电动机的应用 …… 336
小结 …… 340
思考题与习题 …… 341
附录　课程设计 …… 342
课程设计一　步进电动机驱动系统设计 …… 342
课程设计二　永磁无刷直流电动机控制系统设计 …… 345
参考文献 …… 351

第1章 绪 论

通过对电机学或电机与拖动课程的学习，可以掌握传统电机的结构、原理、电磁关系、特性与应用等基础知识。本书将对传统电机之外的控制电机与特种电机展开讨论。鉴于部分特种电机对其控制系统的严重依赖，如果没有对应的控制系统，这部分电机本身将没有任何应用价值，因此，本书书名定为：控制电机与特种电机及其控制系统。

1.1 控制电机、特种电机与传统电机的区别

在各类自动化系统中，需要用到大量的各种各样的元件。控制电机就是其中的重要元件之一，它属于机电元件，在系统中具有执行、检测和解算的功能。尽管从基本原理来说，控制电机与普通的传统旋转电机没有本质上的差别，但后者着重于对电机的力能指标方面的要求，而前者则着重于对特性、高精度和快速响应方面的要求，满足系统对它提出的要求。

一般来说，与传统电机相比，在工作原理、结构、性能或设计方法上有较大特点的电机都属于特种电机的范畴。①从工作原理来看，有些特种电机已经突破了传统电机理论的范畴，例如超声波电动机，不是以磁场为媒介进行机电能量转换的电磁装置，而是利用驱动部分(压电陶瓷元件的超声波振动)和移动部分之间的动摩擦力而获得运转力的一种新原理电机。②即使在传统电机理论的范畴内，许多电机的工作原理也具有较大的特殊性，可以称其为特种电机。例如，步进电动机是将数字脉冲信号转换为机械角位移和线性位移的电机，采用高性能永磁体后制成永磁混合式步进电动机，并采用先进的控制技术，其技术指标和动态特性有明显的改进和提高。开关磁阻电机是一种机电一体化的新型电机，在电机发明之后的一百多年来，磁阻电机的效率、功率因数和功率密度都很低，长期以来只能用作微型电动机，而磁阻电机与电力电子器件相结合构成的开关磁阻电机，其功率密度与普通异步电机相近，可在很宽的运行范围内保持高效率，系统总成本低于同功率的其他传动系统，目前国内最高已有 400kW 的产品出售。③从结构来看，除了传统的径向磁场旋转电机之外，还出现了许多特殊结构电机，如直线电机、盘式电机(横向磁场)等。

从以上的介绍可以看出，除了典型的通用直流电机、异步电机、同步电机、静止变压

器等之外，其他类型的电机都可以归为特种电机的行列，也就意味着，控制电机也可以列为特种电机的序列。但是，由于控制电机的称呼历史较长，在我国高等教育自动化类专业中，一直以来都是一门不可或缺的课程，在这里，习惯上称控制电机之外的非传统电机为特种电机，控制电机定义为自动化系统中常用的微型特种电机。

1.2 控制电机与特种电机的种类

根据 1.1 节的定义可知，控制电机一般包括直流测速发电机、直流伺服电动机、交流异步伺服电动机、旋转变压器、自整角机、步进电动机、直线电机等；特种电机包括开关磁阻电动机、永磁无刷直流电动机、交流永磁同步伺服电动机、盘式电机、超声波电机等。依用途而定，永磁无刷直流电动机、交流永磁同步伺服电动机等可以划为控制电机的范畴。

本书在后续的讲授过程中，不再特别强调到底是属于控制电机还是所谓特种电机的范畴，因为这并没有多大意义。重要的是通过本书，将传统电机之外常用的特殊电机及其控制系统一一介绍给大家。

1.3 控制电机与特种电机的应用概况

控制电机已经成为现代工业自动化系统、现代科学技术和现代军事装备中不可缺少的重要元件，它的应用范围非常广泛，例如：自动化生产线中的类机械手、火炮和雷达的自动定位、船舶方向舵的自动操纵、飞机的自动驾驶、遥远目标位置的显示、机床加工过程的自动控制和自动显示、阀门的遥控，以及电子计算机、自动记录仪表、医疗设备、录音录像设备等中的自动控制系统。

特种电机技术综合了电机、计算机、新材料、控制理论等多项高新技术，其应用遍及军事、航空航天、工农业生产、日常生活的各个领域。

(1) 工业控制自动化领域。随着现代工业的自动化和信息化，各类控制电机与特种电机被越来越广泛的应用，尤其以数字化形式为控制方式的现代混合式步进电动机、交流伺服电动机、直线伺服电动机等。

(2) 信息处理领域。信息产业在国内外都受到高度重视并获得高速发展，信息领域配套的微电机全世界每年的需求量约 15 亿台(套)。这类电机绝大部分是精密永磁无刷电动机、精密步进电动机等。

(3) 交通运输领域。目前，在高级汽车中，为了控制燃料和改善乘车感觉以及显示有关装置状态的需要，要使用 40～50 台电动机，而豪华轿车上的电动机可多达 80 台，汽车电器配套电机主要为永磁直流电动机、无刷直流电动机等。作为 21 世纪的绿色交通工具，电动汽车在各国受到普遍的重视，电动车辆驱动用电机主要是无刷直流电动机、开关磁阻电动机、永磁同步电动机等，这类电机的发展趋势是高效率、高出力、智能化。此外，特种电机在机车驱动、轮船推进中也取得了广泛应用，如直线电机用于磁悬浮列车、地铁的驱动在我国已经进入了商业应用阶段。



(4) 家用电器领域。目前，工业化国家一般家庭中约用到 35 台以上的特种电机。为了满足用户越来越高的要求和适应信息时代发展的需要，实现家电产品节能化、舒适化、网络化、智能化，甚至提出了网络家电(或信息家电)的概念，家电的更新换代周期很快，对为其配套的电机提出了高效率、低噪声、低振动、低价格、可调速和智能化的要求。无刷直流电动机、开关磁阻电动机等新兴的机电一体化产品正逐步替代传统的单相异步电动机。

(5) 高档消费品领域。VCD 和 DVD 等音响设备配套电机主要为印刷绕组电机、绕线盘式电机等，摄像机、数码照相机等高档电子消费产品需求量大，产品更新换代快，也是微特电机的主要应用领域之一，这类电机属于精密型、制造加工难度大，尤其进入数字化后，对电机提出了更苛刻的要求。

(6) 电气传动领域。工农业生产的各个部门都离不开电气传动系统，在要求速度控制与位置控制(伺服)的场合，特种电机的应用越来越广泛。如开关磁阻电机、无刷直流电机、功率步进电机、宽调速直流电机在数控机床、自动生产线、机器人等领域的应用。

(7) 特种用途，包括各种飞行器、探测器、自动化武器装备、医疗设备等。这类电机多为特殊电机或新型电机，包括从原理上、结构上和运行方式上都不同于一般电磁原理的电机，主要为低速同步电动机、谐波电动机、有限转角电动机、超声波电动机、微波电动机、电容式电动机、静电电动机等。

1.4 控制电机、特种电机与其控制系统的关系

不管是控制电机还是特种电机，与普通圆柱式交直流电机相比，它们都有其各自的特殊性，但基本上共同的一点是，它们更需要借助于控制器的控制来发挥作用，如开关磁阻电机没有位置信号的信息电机将无法运转、步进电机若无脉冲信号不能步进，无刷直流电机、永磁交流同步电机等若没有转子位置的信号将不能如期发挥它们的作用，等等。控制电机、特种电机与其控制系统是密不可分的，单独认识电机本体而不能理解其控制原理，是不完整的，可以说，脱离开系统来单独谈这些电机是没有实际意义的。

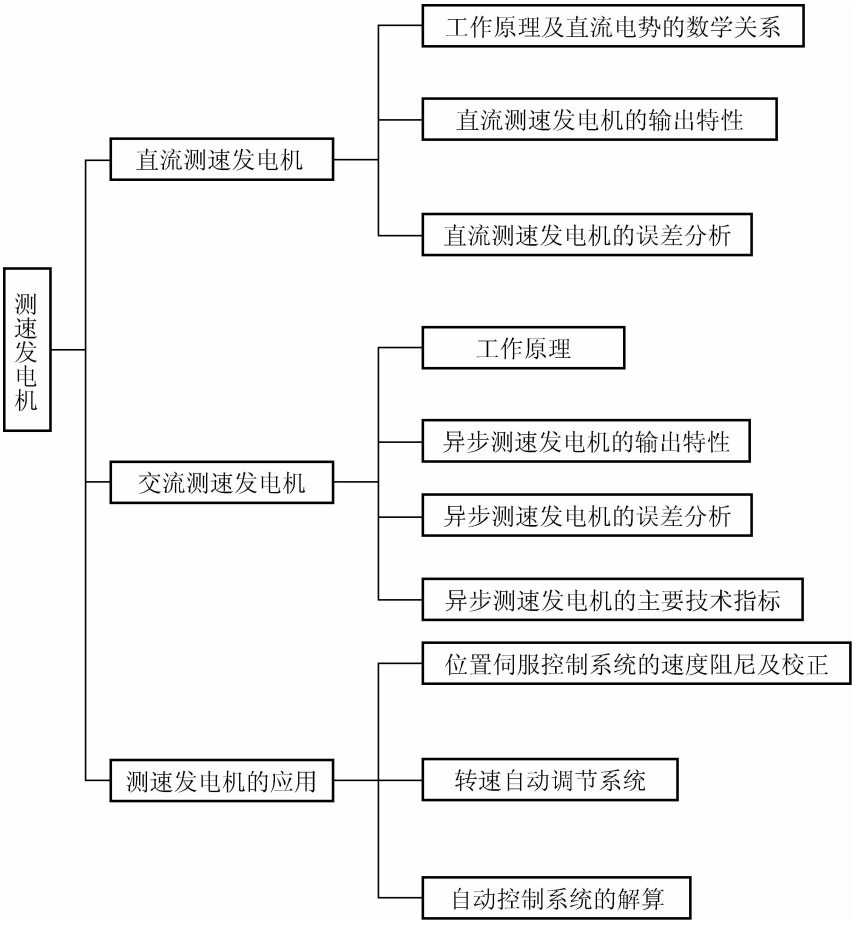
以前，由于用于电机控制的器件、控制理论等的滞后，严重影响了这些电机的性能、技术发展与推广应用。而随着新型电力电子器件的不断涌现，电机控制技术飞速发展，而微处理器的应用促进了模拟控制系统向数字控制系统的转化，数字化控制技术使得电机控制所需的复杂算法得以实现，大大简化了硬件设计，降低了成本，提高了精度，特别是最近几年来，工业控制的功能模块或专用芯片不断涌现，如美国的 AD 公司和 TI 公司都推出了用于电动机调速的数字信号处理器(DSP)，它将一系列外围设备如模/数(A/D)转换器，脉宽调制(PWM)发生器和 DSP 集成在一起，为电机控制提供了一个理想的解决方案。以开关磁阻电机控制为例，其常用的控制方法是电流模拟滞环控制和电压 PWM 调速控制。过去这种电压 PWM 控制策略都是通过分散的模拟器件实现的，因此，系统往往是电流开环，电流的大小和波形都缺乏相应的控制，最终影响到整个系统的运行性能。数字信号处理技术的快速发展以及高速、高集成度的电机控制专用 DSP 芯片的出现，不仅为开关磁阻电机的数字电流控制提供了强有力的基础，而且在电压 PWM 控制的基础上引入

电流闭环，实现了数字化，从而使得电流以最小的偏差逼近目标值，对提高电机出力和效率、降低电机噪声和转矩脉动有很大作用。

因此，无论是某些新型电机，还是传统的控制电机或特种电机，要实现提高性能的目的，控制系统俨然已经成为电机系统不可或缺的一部分，离开控制系统谈电机已经越来越不合时宜。

第2章 测速发电机

知识架构



教学目标与要求

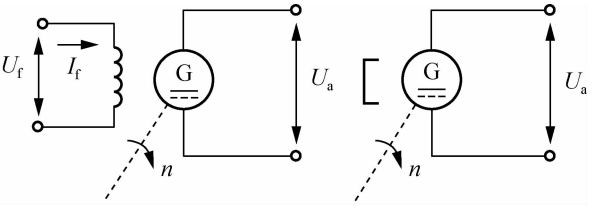
- 了解直流测速发电机电枢绕组的电动势及电压平衡方程式
- 掌握直流测速发电机的输出特性
- 掌握产生误差的原因及减小误差的方法
- 了解交流异步测速发电机的结构及其原理
- 掌握交流异步测速发电机的特性及其主要技术指标

引言

测速发电机(tachogenerator)是自控系统的常用元件，它可以把转速信号转换成电压信号输出，输出电压与输入的转速成正比关系，用于测量旋转体的转速，亦可作为速度信号的传送器。在自动控制系统和计算装置中，测速发电机一般作为测速元件、校正元件、解算元件和角加速度信号元件等。

按输出信号的形式，测速发电机可分为直流测速发电机和交流测速发电机两大类。

表示符号如图 2.1 所示。



(a)电磁式　　(b)永磁式

图 2.1　直流测速发电机

1. 直流测速发电机

直流测速发电机实际上是一种微型直流发电机，按励磁方式可分为以下两种。

(1) 电磁式直流测速发电机：表示符号如图 2.1(a)所示。定子常为二极，励磁绕组由外部直流电源供电，通电时产生磁场。目前，我国生产的 ZCF 系列直流测速发电机为电磁式，如图 2.2 所示。



图 2.2　ZCF 系列直流测速发电机

(2) 永磁式直流测速发电机：表示符号如图 2.1(b)所示。定子磁极由永久磁钢做成。由于没有励磁绕组，所以可省去励磁电源。它具有结构简单，使用方便等特点，近年来发展较快。其缺点是永磁材料的价格较贵，受机械振动易发生不同程度的退磁。为防止永磁式直流测速发电机的特性变坏，必须选用

矫顽力较高的永磁材料。目前，我国生产的CY、ZYS系列直流测速发电机为永磁式，如图2.3所示。



图2.3 CY、ZYS系列直流测速发电机

2. 交流测速发电机

交流测速发电机包括同步和异步两种。交流异步测速发电机又分为空心杯转子异步测速发电机、笼式转子异步测速发电机两种。

(1) 同步测速发电机：以永久磁铁作为转子的交流发电机。输出电压和频率随转速同时变化，又不能判别旋转方向，使用不便，在自动控制系统中用得很少，主要供转速的直接测量用。

(2) 空心杯转子异步测速发电机：由内定子、外定子以及在它们之间的气隙中转动的杯形转子所组成。励磁绕组、输出绕组嵌在定子上，彼此在空间相差90°电角度。杯形转子由非磁性材料制成。其输出绕组中感应电动势大小正比于杯形转子的转速，输出频率和励磁电压频率相同，与转速无关。反转时输出电压相位也相反。杯形转子是传递信号的关键，其质量好坏对性能起很大作用。由于它的技术性能比其他类型交流测速发电机(空心杯发电机)优越，结构不很复杂，同时噪声低，无干扰且体积小，是目前应用最为广泛的一种交流测速发电机。我国生产的CK系列测速发电机就属于这一类，如图2.4所示。

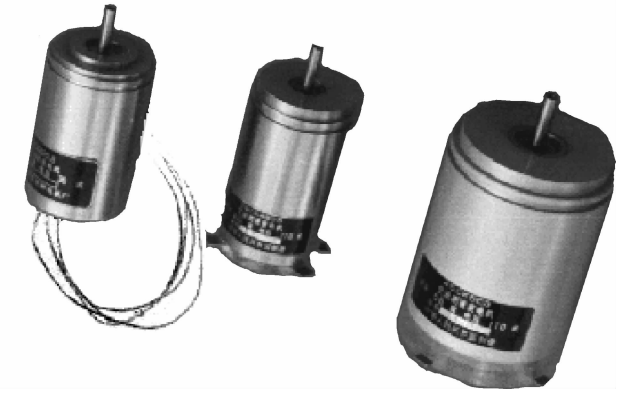


图2.4 CK系列空心杯转子异步测速发电机

(3) 笼式转子异步测速发电机：与交流伺服电动机相似，因其输出的线性度较差，仅用于要求不高的场合。

作为自动控制系统的常用元件，自控系统一般要求测速发电机要有精确度高、灵敏度高、可靠性好等特点。具体要求为：

① 输出电压与转速呈线性关系；

② 温度变化对输出特性的影响要小；

③ 输出电压的斜率特性要好，即转速变化所引起的输出电压的变化要灵敏；

④ 剩余电压(转速为零时的输出电压)要小；

⑤ 输出电压的极性和相位能够反映被测对象的转向；

⑥ 摩擦转矩和惯性要小。

在实际应用中，对测速发电机的要求因自控系统特点的不同又各有侧重。例如，作为解算元件时，对线性误差、温度误差和剩余电压等都要求较高，一般允许在千分之几到万分之几的范围内，但对输出电压的斜率要求却不高；作校正元件时，对线性误差等精度指标的要求不高，而要求输出电压的斜率要大。

2.1 直流测速发电机

2.1.1 直流测速发电机的输出特性

测速发电机输出电压和转速的关系，称为输出特性(output characteristic)，即 $U=f(n)$。直流测速发电机的工作原理与一般直流发电机相同。

根据直流电机理论，在磁极磁通量 Φ 为常数时，电枢感应电动势为

$$E_a=C_e\Phi n=K_n \tag{2-1}$$

式中：C_e 称为电动势常数，取决于电机的结构；Φ 为电机气隙磁通；$K_e=C_e\Phi$，为常数；n 为电机转速。

空载时，流过电枢的电流 $I_a=0$，对应的直流测速发电机的输出电压和电枢感应电动势相等，因而输出电压与转速成正比。

负载时，如图 2.5 所示。因为电枢电流 $I_a\neq0$，对应直流测速发电机的输出电压为

$$U_a=E_a-I_aR_a-\Delta U_b \tag{2-2}$$

式中，ΔU_b为电刷接触压降；R_a为电枢回路电阻。

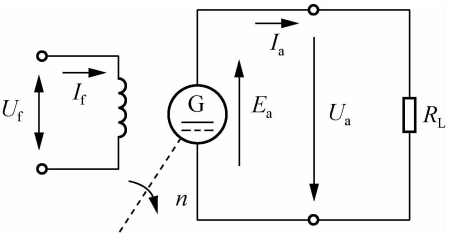


图 2.5 直流测速发电机带负载输出特性原理图

在理想情况下，不考虑其电刷和换向器之间的接触电阻，即 $\Delta U_b=0$，则直流测速发电机在负载时的输出电压为

$$U_a=E_a-I_aR_a \tag{2-3}$$

式（2-3）称为直流发电机电压平衡方程式，式中，R_a为电枢回路的总电阻，包括电枢绕组的电阻、电刷和换向器之间的接触电阻；I_a为电枢总电流，且显然有，在带有负载后，由于电阻 R_a 上有电压降，测速发电机的输出电压比空载时小。负载时电枢电流为

$$I_a=\frac{U_a}{R_L} \tag{2-4}$$

式（2-4）中，R_L 为测速发电机的负载电阻。

将式(2-4)代入式(2-3)得

$$U_a=E_a-\frac{U_a}{R_L}R_a \tag{2-5}$$

化简后为

$$U_a=\frac{E_a}{1+\frac{R_a}{R_L}} \tag{2-6}$$

将式(2-1)代入式(2-6)得

$$U_a=\frac{C_e\Phi}{1+\frac{R_a}{R_L}}n \tag{2-7}$$

即

$$U_a=\frac{K_e}{1+\frac{R_a}{R_L}}n=Cn \tag{2-8}$$

其中，$K_e=C_e\Phi$，为常数。

$$C=\frac{K_e}{1+\frac{R_a}{R_L}}$$

C 为测速发电机输出特性的斜率。当不考虑电枢反应，且认为 Φ、R_a 和 R_L 都能保持为常数时，斜率 C 也是常数，输出特性便有线性关系。对于不同的负载电阻 R_L，对应的测速发电机输出特性的斜率也不同，并且它随负载电阻的增大而增大，如图 2.6 中实线所示。

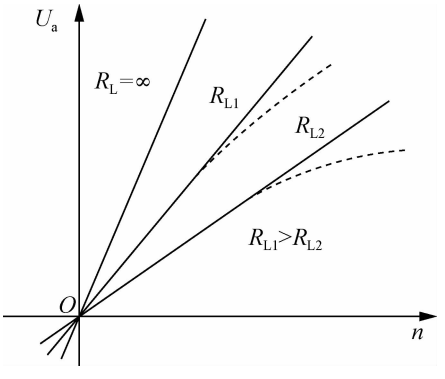


图 2.6 直流测速发电机的输出特性

实际上直流测速发电机的输出特性 $U_a=f(n)$并不是严格的线性特性，而是与线性特性之间存在有误差，如图 2.6 中的虚线所示。下面分析直流测速发电机误差的产生原因及减小误差的方法。

2.1.2 直流测速发电机的误差及其减小的方法

1. 温度影响

前边得出的 $U_n=f(n)$为线性关系的条件之一是励磁磁通 Φ 为常数。实际上，发电机周围环境温度的变化以及发电机本身发热都会引起发电机绕组电阻的变化。当温度升高时，励磁绕组电阻增大，励磁电流减小，磁通也随之减小，输出电压就降低。反之，当温