

高等学校电工电子类系列教材



电机与电气控制技术

MOTOR & ELECTRICAL CONTROL TECHNOLOGY

主编 / 卢 燕

主审 / 孟祥忠



中国石油大学出版社

高等学校电工电子类系列教材

TM3
103

电机与电气控制技术

MOTOR & ELECTRICAL
CONTROL TECHNOLOGY

主 编 卢 燕

副主编 张雅静 朱文杰 岳耀宾

主 审 孟祥忠

中国石油大学出版社

内容提要

本书包括了“电机学”、“电力拖动基础”和“常用低压电器原理及控制技术”等课程的内容。全书共分十二章,其中第一章为电力拖动系统的动力学基础;第二、三章为直流电机;第四章为变压器;第五、六、七、八、九章为交流电机;第十、十一、十二章为电动机选择和控制方面的内容。

教材编写以基本原理和应用性为指导思想,以电力拖动系统中使用最为广泛的电机与拖动形式为重点,既吸收了现有电力拖动教材的内容,又适当增加了电动机控制方面的内容。

本书可作为高等学校本科自动化、电气工程及其自动化等专业的教材,也可作为工科其他专业的参考教材,对广大工程技术人员也有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电气控制技术/卢燕主编. —东营:中国石油大学出版社,2009.12

ISBN 978-7-5636-2991-6

I. 电… II. 卢… III. ① 电机学 ② 电气控制 IV. TM3 TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 233563 号

电机与电气控制技术

主 编:卢 燕

责任编辑:刘 静

出 版 者:中国石油大学出版社(山东 东营,邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: cbs2006@163.com

印 刷 者:青岛锦华信包装有限公司

发 行 者:中国石油大学出版社(电话 0546—8391810)

开 本:185×260 印张:16.75 字数:407千字

版 次:2009年12月第1版第1次印刷

定 价:28.80元

版权专有,翻印必究。举报电话:0546—8391810

本书封面覆有带中国石油大学出版社标志的激光防伪膜。

本书封面贴有带中国石油大学出版社标志的电码防伪标签,无标签者不得销售。

编 审 委 员 会

BIANSHEN WEIYUANHUI

高等学校电工电子类系列教材 ◀◀

主 任 王志功 (东南大学)

副 主 任 马家辰 (哈尔滨工业大学威海分校)

曹茂永 (山东科技大学)

编委会成员 (以姓氏笔画为序)

于海生 (青岛大学)

王宝兴 (聊城大学)

刘法胜 (山东科技大学)

李贻斌 (山东大学)

张 勇 (济南大学)

周绍磊 (烟台海军航空工程学院)

武玉强 (曲阜师范大学)

侯加林 (山东农业大学)

韩 力 (北京理工大学)

谭博学 (山东理工大学)

王培进 (烟台大学)

卢 燕 (青岛理工大学)

刘庆华 (中国石油大学出版社)

李 明 (中国矿业大学)

郑永果 (山东科技大学)

周应兵 (山东交通学院)

孟祥忠 (青岛科技大学)

唐述宏 (潍坊学院)

褚东升 (中国海洋大学)

綦星光 (山东轻工业学院)

编委会秘书 刘 静 (中国石油大学出版社)

出版说明

，距卦距实距工，富丰容内，整定系朴，朴

卦由要主林殊类一。泊目泊卦

殊所实已芒工于由

，距成似林殊食将整计卧

臣味融自善本卧

在信息技术作为当前信息技术的基础，在国民经济和社会发展中起着越来越直接和越来越重要的作用。在高校中，由于广阔的技术应用和良好的就业前景，使电工电子类专业成为近年来发展势头最强劲的专业之一。在学生人数激增、学科应用拓展、学科发展加速的现实背景下，要使高校的专业教学跟上发展的步伐，适应社会的需求，则必须进行课程体系和课程内容的改革。这是摆在我们电工电子类专业从教者面前的一项重要而紧迫的任务。

正是在这种共同认识的驱动下，我们 20 多所高校——一些平时在教学改革方面颇多交流、在学科建设方面颇多借鉴的院校，走到了一起。我们这些院校各有所长，在一起切磋、比较、学习，搭建了一个很好的学习和交流的平台，共同推动了教育教学改革，促进了各自的发展。经验告诉我们，教改的核心是课程体系和课程内容的改革，但课程体系和课程内容改革的成果呈现在学生面前的最主要资源便是构架完备系统的教材。因此，课程改革与教材建设同步，编写出一套适合当前教学改革要求、结构体系完备、体现教学改革思路的好教材，成了我们共同的追求。

教材指导教学，教材体现教改。根据我们现实的教学需求和进一步的发展规划，我们把这套教材的建设构架为三个方面，也可以说是三个模块：

第一个方面是电工电子的基础理论与技术教材，主要针对工科类学生的通识课或者基础课，包括信号与系统、电路分析、电子线路、模拟电子技术、数字电子技术、单片机原理及应用、微机原理及应用、电气控制及 PLC 技术、计算机控制技术、电机与电气控制技术、传感器与检测技术、电机与拖动等，涵盖电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术等专业的基础知识。为确保教材的权威性、科学性，各书主编及主要撰写者，均由具有多年教学经验的教授和专家担任。教材的覆盖面广、知识面宽，以高校的精品课建设为基础，着重基本概念和基本物理过程的论述，注重教学内容的内拓和精选，突出先进性、针对性和实用性。

第二个方面是实验与实训类教材。实验教学是培养学生基本工程素质、提高工程实践能力的重要手段，是高校工科教育教学改革的核心课题。为此，我们这些高校都极其重视实验教学改革与教材建设，不断更新实训教育理念，注重学生创新能力和动手能力的综合发展。国家级实验教学示范中心是高等学校实验教学研究改革的基地，引领全国高等学校实验教学改革的方向。我们的整套实训教材以山东科技大学和青岛大学“国家级电工电子实验教学示范中心”为依托，将任务驱动与项目引领相结合，融基础实验与综合技能训练、系

统设计与综合应用、工程训练和创新能力培养为一体,体系完整、内容丰富、工程实践性强,以期达到加强学生的系统综合设计能力和训练学生工程思维的目的。这一类教材主要包括电路实训教程、模拟电子技术实验教程、数字电路逻辑设计与实训教程、电子工艺与实训教程、PLC应用实训教程、电子工程实训教程、电气工程实训教程等。相信这部分教材对加强、规范和引导相关高校的实验教学会有有一定的借鉴作用。

第三个方面则是我们独具特色的电工电子类专业的双语教学教材。我们本着自编和引进并重的原则,打造适合我国高等教育发展的电工电子类双语教材体系。我们拥有具有东西方不同教学体系下丰富教学经验的外国专家和教授,他们以纯正的英语语言直接面向我们的大学生编写教材,这在国内恐属首创。比如这套教材中的双语教材之一《Introductory Microcontroller Theory and Applications》就是由英籍专家 Michael Collier 主编完成的英文版双语教材。该教材已在试用中得到了教师和学生的很高评价。在编写原创双语教材的同时,为了提供更丰富的双语教材资源,弥补原创双语教材在数量上的不足,各校将在共同讨论的基础上,引进相对适应性广泛的原版教材。另外,电工电子类双语教学网站也在同步建设中,为师生提供双语教学资源,打造师生互动平台。

诸事万物,见仁见智。对一套好教材的追求是我们的愿望。但当我们倾力追求教材对于我们学校现实的适用性时,我们真的惧怕它们或许已离另一些学校更远。站在不同的起点或角度进行教材构架时,这种差异有时会影响人们对教材的评判。这就时刻提醒我们参与教材编写的院校,在追求教材对于自身的适用性的同时,需要努力与其他院校做更多的沟通和了解,以使自身更好地融入全国教改的主流,同时使这套教材具有更好的普适性,有更广泛的代表意义和借鉴作用。

教材是教学之本。我们希望这套教材:不仅能符合专业培养要求,而且能顺应专业培养方向;不仅能符合教育教学规律,而且能符合学生的接受能力和知识水平;不仅能蕴含和体现丰富的教学经验和思想,而且能为学生呈现良好的学习方法,能指导学生学会自主学习,能调动学生的创造力和学习热情……我们将为此继续努力!

编委会

2009年10月

前 言 „ PREFACE

本书根据在中国石油大学(华东)召开的“电工电子系列教材编审委员会”会议精神编写而成。全书共十二章,由直流电动机、交流异步电动机、变压器、电动机控制等部分组成,包括了“电机学”和“电力拖动与控制”等课程的主要内容。教材编写以基本原理和应用性为指导思想,以电力拖动系统中使用最为广泛的电机与拖动形式为重点,既吸收了现有电力拖动教材的内容,又适当增加了电动机控制方面的内容。

本书由青岛理工大学卢燕教授担任主编,烟台大学张雅静老师、青岛理工大学朱文杰老师、青岛科技大学岳耀宾老师担任副主编。具体分工如下:前言、绪论及第一、四、九、十、十一、十二章由卢燕、朱文杰老师负责编写;第二、三章由张雅静老师负责编写;第五、六、七、八章由岳耀宾老师负责编写。全书由卢燕教授负责统稿,由青岛科技大学孟祥忠教授担任主审。孟教授从编写大纲的拟定到内容取舍、编排等各个方面,都提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢!

由于编者水平所限,书中难免存在缺点和不足,恳请广大读者批评指正,在此一并表示感谢!

编 者

2009 年 11 月

目录 Contents

绪 论	1
第一章 电力拖动系统的动力学基础	3
第一节 电力拖动系统的运动方程	3
第二节 多轴电力拖动系统的化简	5
第三节 生产机械的负载转矩特性	9
第四节 电力拖动系统的稳定运行	10
第五节 电力拖动系统的过渡过程	13
小结	15
习题	16
第二章 直流电机	17
第一节 直流电机的工作原理与结构	17
第二节 直流电机的铭牌数据	22
第三节 直流电机的电枢绕组	23
第四节 直流电机的励磁方式及磁场	26
第五节 直流电机的感应电动势和电磁转矩	31
第六节 直流电机的换向	33
第七节 直流发电机	37
第八节 直流电动机	42
小结	47
习题	48
第三章 直流电动机的电力拖动	50
第一节 他励直流电动机的机械特性	50
第二节 他励直流电动机的启动	56
第三节 他励直流电动机的制动	59
第四节 直流电动机的调速	69
第五节 串励和复励直流电动机的电力拖动	76
小结	80

习题	80
第四章 变压器	83
第一节 变压器的基本工作原理与结构	83
第二节 变压器的空载运行	87
第三节 变压器的负载运行	89
第四节 变压器的等效电路及相量图	91
第五节 变压器的参数测定	94
第六节 三相变压器	97
第七节 变压器的运行特性	102
第八节 其他用途的变压器	105
小结	108
习题	109
第五章 三相异步电动机的基本原理	111
第一节 三相异步电动机的工作原理及结构	111
第二节 三相异步电动机的铭牌数据	114
第三节 三相异步电动机的定子绕组	115
第四节 三相异步电动机的定子磁动势及磁场	118
第五节 三相异步电动机定子绕组的感应电动势	127
小结	130
习题	131
第六章 三相异步电动机的运行原理	133
第一节 三相异步电动机的空载运行	133
第二节 三相异步电动机的负载运行	134
第三节 三相异步电动机的功率和转矩	138
第四节 三相异步电动机的工作特性	139
第五节 三相异步电动机的参数测定	141
小结	142
习题	143
第七章 三相异步电动机的电力拖动	145
第一节 三相异步电动机的机械特性	145
第二节 三相异步电动机的启动	150
第三节 三相异步电动机的电气制动	155
第四节 三相异步电动机的调速	159
小结	167
习题	167

第八章 单相异步电动机及控制电机

第一节	单相异步电动机	169
第二节	电磁调速感应电动机	172
第三节	伺服电动机	173
第四节	自整角机	178
第五节	旋转变压器	180
第六节	步进电动机	183
小结		189
习题		

第九章 同步电机

第一节	同步电机的结构和运行方式	191
第二节	同步电动机的电压方程和相量图	194
第三节	同步电动机的功率方程、功角特性和矩角特性	198
第四节	同步电动机的功率因数及 U 形曲线	202
小结		205
习题		205

第十章 电力拖动系统电动机的选择

第一节	电动机的发热、冷却过程及工作制分类	207
第二节	连续工作制电动机的选择	212
第三节	短时工作制电动机的选择	214
第四节	断续周期工作制电动机的选择	215
第五节	带冲击负载的电动机的选择	216
第六节	选择电动机功率的统计法及类比法	218
第七节	选择电动机时应考虑的几个问题	219
小结		220
习题		220

第十一章 常用控制电器

第一节	接触器	223
第二节	继电器	229
第三节	主令电器	231
第四节	手动控制器	235
第五节	保护电器	236
小结		241
习题		241

第十三章 继电器-接触器控制系统

第一节 概 述	242
第二节 绕线式异步电动机频敏变阻器启动控制线路	246
第三节 绕线式异步电动机按照时间原则启动控制线路	247
第四节 绕线式异步电动机带动力制动的可逆控制线路	248
第五节 控制线路的设计原则	250
小结	253
习题	253
常用符号表	254

参考文献

1. 电机学	第1章
2. 电机拖动基础	第2章
3. 电机与电气控制技术	第3章
4. 电机与电气控制技术	第4章
5. 电机与电气控制技术	第5章
6. 电机与电气控制技术	第6章
7. 电机与电气控制技术	第7章
8. 电机与电气控制技术	第8章
9. 电机与电气控制技术	第9章
10. 电机与电气控制技术	第10章
11. 电机与电气控制技术	第11章
12. 电机与电气控制技术	第12章
13. 电机与电气控制技术	第13章
14. 电机与电气控制技术	第14章
15. 电机与电气控制技术	第15章
16. 电机与电气控制技术	第16章
17. 电机与电气控制技术	第17章
18. 电机与电气控制技术	第18章
19. 电机与电气控制技术	第19章
20. 电机与电气控制技术	第20章
21. 电机与电气控制技术	第21章
22. 电机与电气控制技术	第22章
23. 电机与电气控制技术	第23章
24. 电机与电气控制技术	第24章
25. 电机与电气控制技术	第25章
26. 电机与电气控制技术	第26章
27. 电机与电气控制技术	第27章
28. 电机与电气控制技术	第28章
29. 电机与电气控制技术	第29章
30. 电机与电气控制技术	第30章
31. 电机与电气控制技术	第31章
32. 电机与电气控制技术	第32章
33. 电机与电气控制技术	第33章
34. 电机与电气控制技术	第34章
35. 电机与电气控制技术	第35章
36. 电机与电气控制技术	第36章
37. 电机与电气控制技术	第37章
38. 电机与电气控制技术	第38章
39. 电机与电气控制技术	第39章
40. 电机与电气控制技术	第40章
41. 电机与电气控制技术	第41章
42. 电机与电气控制技术	第42章
43. 电机与电气控制技术	第43章
44. 电机与电气控制技术	第44章
45. 电机与电气控制技术	第45章
46. 电机与电气控制技术	第46章
47. 电机与电气控制技术	第47章
48. 电机与电气控制技术	第48章
49. 电机与电气控制技术	第49章
50. 电机与电气控制技术	第50章
51. 电机与电气控制技术	第51章
52. 电机与电气控制技术	第52章
53. 电机与电气控制技术	第53章
54. 电机与电气控制技术	第54章
55. 电机与电气控制技术	第55章
56. 电机与电气控制技术	第56章
57. 电机与电气控制技术	第57章
58. 电机与电气控制技术	第58章
59. 电机与电气控制技术	第59章
60. 电机与电气控制技术	第60章
61. 电机与电气控制技术	第61章
62. 电机与电气控制技术	第62章
63. 电机与电气控制技术	第63章
64. 电机与电气控制技术	第64章
65. 电机与电气控制技术	第65章
66. 电机与电气控制技术	第66章
67. 电机与电气控制技术	第67章
68. 电机与电气控制技术	第68章
69. 电机与电气控制技术	第69章
70. 电机与电气控制技术	第70章
71. 电机与电气控制技术	第71章
72. 电机与电气控制技术	第72章
73. 电机与电气控制技术	第73章
74. 电机与电气控制技术	第74章
75. 电机与电气控制技术	第75章
76. 电机与电气控制技术	第76章
77. 电机与电气控制技术	第77章
78. 电机与电气控制技术	第78章
79. 电机与电气控制技术	第79章
80. 电机与电气控制技术	第80章
81. 电机与电气控制技术	第81章
82. 电机与电气控制技术	第82章
83. 电机与电气控制技术	第83章
84. 电机与电气控制技术	第84章
85. 电机与电气控制技术	第85章
86. 电机与电气控制技术	第86章
87. 电机与电气控制技术	第87章
88. 电机与电气控制技术	第88章
89. 电机与电气控制技术	第89章
90. 电机与电气控制技术	第90章
91. 电机与电气控制技术	第91章
92. 电机与电气控制技术	第92章
93. 电机与电气控制技术	第93章
94. 电机与电气控制技术	第94章
95. 电机与电气控制技术	第95章
96. 电机与电气控制技术	第96章
97. 电机与电气控制技术	第97章
98. 电机与电气控制技术	第98章
99. 电机与电气控制技术	第99章
100. 电机与电气控制技术	第100章

绪论

INTRODUCTION

一、概述

因易于生产、传输、变换、分配和控制,电能已成为使用最为广泛的现代能源,也是人们生产和生活中使用动力的主要来源。在电能的生产、传输、变换、分配和控制过程中,电机是主要的机电能量转换装置。例如,在电能的生产过程中,发电机将机械能转换成电能;在电能的传输过程中,变压器是主要的传输设备;在电能的使用过程中,电动机将电能转换为机械能。

电力拖动就是使用各种电动机作为原动机拖动生产机械运动,以完成一定的生产任务。由于电动机具有性能优良、高效可靠、控制方便等优点,因此,在现代化生产中,绝大多数生产机械都采用电力拖动。例如,在工农业生产和交通运输中,机床、轧钢机、起重机、卷扬机、鼓风机、抽水机、纺织机、印染机、印刷机、电动工具和电动车辆等都采用电力拖动;在人们的日常生活中,各种家用电器大都使用微特电机作为驱动装置;在自动控制系统、计算机系统和机器人等高新技术中,大量使用控制电机作为检测、放大和执行元件。

目前,电机与拖动的现状可以概括为以下两点:

(1) 电力拖动现已取代了其他拖动形式,成为最主要的拖动形式。与其他原动机相比,电动机有许多突出的优点。例如,电能的获得和转换比较经济,传输和分配比较便利,操作和控制比较容易等。因此,目前大多数的生产机械都采用电力拖动。

(2) 当代科学和技术的新成果广泛应用于电力拖动系统。例如,电力电子技术的发展,使晶闸管变流装置广泛地用作电力拖动系统的电源;电子技术的发展,使电子控制器件和微处理机成为电力拖动系统的主要控制手段;自动控制理论广泛应用于电力拖动自动控制中,大大提高了电力拖动系统的性能。

二、电力拖动的历史、现状和发展趋势

早在远古时代,人类已经应用流水作为动力来带动水车;17世纪末,人类开始利用蒸汽作为动力;1831年,法拉第发现了电磁感应现象;1888年,特斯拉发明了感应电动机,从此开始了电机与电力拖动的时代。

最初的电力拖动系统是通过天轴实现的,称为“成组拖动”。它是由一台电动机拖动一组生产机械,从电动机到各生产机械的能量传递以及在各生产机械之间的能量分配完全用机械方法,靠天轴及机械传动系统来实现。这种系统在能量传递过程中的损耗大、效率低、劳动条件差、可靠性不高,是一种陈旧落后的电力拖动方式。为了克服上述缺点,自20世纪

20 年代开始,“单电动机拖动系统”被广泛使用。在这一系统中,一台生产机械用一台单独的电动机拖动,使得电动机与生产机械在结构上密切配合。可以用电气调节方法调节每台生产机械的转速,从而简化了机械结构,而且易于实现生产机械运转的自动化。但是,如果用一台电动机拖动具有多个工作机械结构的生产机械,则机械内部仍然将保留着复杂的机械传动机构。因此,自 20 世纪 30 年代起,“多电动机拖动系统”开始得到广泛应用,即每一个工作机构用单独的电动机拖动,从而使生产机械的结构大为简化。例如,具有三个主轴的龙门铣床用三台电动机拖动,每台电动机拖动一根主轴运动。某些生产机械的生产过程长而且连续,如造纸、印刷、纺织、轧制等,也都采用多电动机拖动系统。这些机械一般由多个部分组成,每一部分可用单独的电动机拖动。

随着生产的发展,对上述单电动机拖动系统和多电动机拖动系统提出了更高的要求。例如,要求提高加工精度与工作速度、快速启动、快速制动、快速逆转、实现在很宽范围内的调速及整个生产过程的自动化等。要完成这些任务,除电动机本身外,必须有自动控制设备,以组成自动化电力拖动系统。

随着现代电力电子技术、自动化技术和计算机技术的发展,电力拖动技术的发展趋势为:用交流电力拖动系统取代直流电力拖动系统。

(2) 从节能的角度改造电力拖动系统。例如,用交流调速系统拖动风机、水泵类负载。采用新技术不断提高电力拖动系统的性能,进一步完善系统功能。

通过系统集成和技术融合,组成大规模综合自动化控制系统,以进一步提高生产效率。

本课程:

三、本课程的性质、任务和要求

本课程是自动化、电气工程及其自动化等相关专业的专业基础课,其任务是使学生了解电机的基本结构、工作原理和性能参数,熟悉电力拖动系统的各种运行方式,掌握电力拖动系统的性能分析、电动机选择、电动机控制等方面的知识,为“电力拖动自动控制系统”、“PLC 控制系统”等后续课程准备必要的基础知识。

本课程主要研究和分析电机与电力拖动系统的基本理论问题,为突出实用性,对电机控制内容作了简要介绍,并对典型控制电路进行了分析,具有“电机学”、“电机与拖动基础”和“常用低压电器原理及控制技术”等课程的内容。

通过本课程的学习,学生应达到如下要求:

(1) 掌握一般交直流电机和变压器的基本理论,包括电磁关系和能量关系等,能运用等效电路和相量图等方法推演电机的基本电路方程,并进行参数计算。

(2) 熟悉电力拖动系统的静态特性及其分析方法,包括电动机的机械特性和各种运转状态。

(3) 熟悉电力拖动系统的动态特性及其分析方法,能正确分析系统的稳定运行状况。

(4) 熟悉电动机的铭牌参数,掌握电动机的选择方法。

(5) 掌握电动机控制的基本知识,能分析和设计简单的控制电路。

(6) 掌握电机与电力拖动系统的基本实验方法和技能。

(7) 了解电机与电力拖动系统的应用领域和发展趋势。

第一章 电力拖动系统的动力学基础

本章是电力拖动的基础,主要分析电力拖动系统中电动机带动生产机械在运动过程中的力学问题。第一节将引入电力拖动系统的运动方程;第二节将介绍多轴电力拖动系统的化简与折算方法;第三节将介绍生产机械的负载转矩;第四节主要讨论电力拖动系统的稳定运行问题;第五节讨论电力拖动系统的动态过渡过程。

第一节 电力拖动系统的运动方程

拖动就是由产生动力的原动机带动生产机械产生运动。生产机械的原动机大多采用各种类型的电动机,以电动机作为原动机拖动生产机械运动的拖动方式,称为电力拖动。如图 1-1 所示,电力拖动系统一般由电动机、生产机械的传动机构、工作机构、控制设备和电源组成,通常又把传动机构和工作机构称为电动机的机械负载。



图 1-1 电力拖动系统的组成

一、运动方程式

电力拖动系统经过化简,都可转为图 1-2(a)所示的电动机转轴与生产机械的工作机构直接相连的单轴电力拖动系统。各物理量的方向标示如图 1-2(b)所示。根据力学中刚体转动定律,该系统的运动方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-1)$$

式中, T_e 为电动机的电磁转矩 ($N \cdot m$); T_L 为生产机械的阻力转矩 ($N \cdot m$); J 为电动机单轴系统上的总转动惯量 ($kg \cdot m^2$); Ω 为电动机的角速度 (rad/s)。



图 1-2 单轴电力拖动系统

在工程计算中,通常用转速 n (单位为转/分, r/min) 代替角速度 Ω ,用飞轮惯量或称飞轮矩 GD^2 代替转动惯量 J 。 n 与 Ω 的关系为

$$\Omega = \frac{2\pi}{60} n \quad (1-2)$$

J 与 GD^2 的关系为

$$J = mr^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-3)$$

式中, D 为系统转动部分的回转直径(m); g 为重力加速度,可取 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; m 为系统转动部分的质量(kg); G 为系统转动部分所受重力(N); r 为系统转动部分的回转半径(m)。

将式(1-2)和式(1-3)代入式(1-1),可以得到电力拖动运动方程的实用形式

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-4)$$

式中, GD^2 为系统转动部分的总飞轮矩($N \cdot m^2$); 375 为具有加速度量纲的系数。

二、运动方程中方向的约定

式(1-4)中的 T_e 、 T_L 和 n 都是有方向的,它们的实际方向可以根据图 1-2(b)给出的参考正方向,用正、负号来表示。通常以转速 n 为参考量,首先确定 n 的正方向。 n 的正方向的选取是任意的,习惯上把提升重物时电动机的转向定义为正方向,即逆时针旋转为正,顺时针旋转为负。规定 T_e 的正方向与 n 的正方向相同, T_L 的正方向与 n 的正方向相反。

图 1-2(b)中, n 逆时针为正, T_e 的方向与 n 的方向相同为正,是拖动转矩; T_L 与 n 反方向为正,是制动转矩。这样规定参考正方向恰好符合式(1-4)中负载转矩 T_L 前有一个负号的表达关系。

三、运动方程的物理意义

式(1-4)表明,电力拖动系统的转速变化 dn/dt (即加速度)由电动机的电磁转矩 T_e 与生产机械的负载转矩 T_L 的关系决定。

(1) 当 $T_e = T_L$ 时, $dn/dt = 0$, 表示电动机以恒定转速旋转或静止不动,电力拖动系统的这种运动状态被称为静态或稳态;

(2) 若 $T_e > T_L$ 时, $dn/dt > 0$, 系统处于加速状态;

(3) 若 $T_e < T_L$ 时, $dn/dt < 0$, 系统处于减速状态。

即一旦 $T_e \neq T_L$, 则转速将发生变化。我们把这种运动状态称为动态或过渡状态。

第二节 多轴电力拖动系统的化简

前面我们讨论了单轴电力拖动系统问题,但是实际的电力拖动系统往往是复杂的。有的生产机械需要通过传动机构进行转速匹配,因此增加了很多齿轮和传动轴;有的生产机械需要通过传动机构把旋转运动变成直线运动,比如,刨床、起货机等。由于这类拖动系统有两根或两根以上不同转速的轴,所以称为多轴电力拖动系统,简称多轴系统。如何来研究多轴系统的运动过程呢?一般来说,有两种解决办法:

(1) 对拖动系统的每根轴分别列出其运动方程,联立方程组消除中间变量。这种解法会因方程较多,计算量大而比较繁杂。

(2) 用折算的方法把复杂的多轴拖动系统等效为一个简单的单轴电力拖动系统,然后对等效系统建立运动方程,以实现问题求解。这种方法相对而言较为简单。

一、系统等效的原则

在电力拖动系统的分析中,对于一个复杂的多轴电力拖动系统而言,比较简单而且实用的方法是用折算的方法把它等效成一个简单的单轴电力拖动系统来处理,并使两者的动力学性能保持不变。图 1-3 所示为一个典型的等效过程。

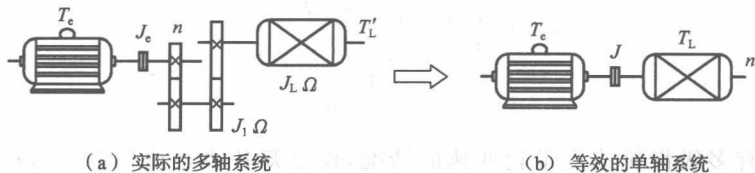


图 1-3 电力拖动系统的等效原理

在电力拖动系统中,折算原则一般是把负载轴上的转矩、转动惯量或者力和质量折算到电动机轴上,而中间传动机构的传送比在折算中相当于变压器的匝数比。系统等效的原则为:保持两个系统传递的功率及储存的动能相同。

二、多轴电力拖动系统等效为单轴电力拖动系统的方法

(一) 负载转矩的折算

先考虑一个简单的两轴系统,如图 1-4 所示。假如要把工作机构的转矩 T_L 折算到电动机轴上,其负载转矩的等效原则是:系统的传送功率不变。

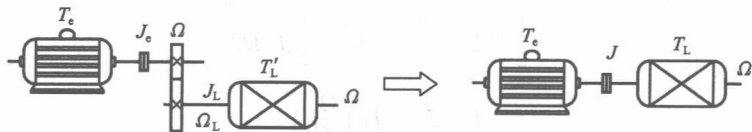


图 1-4 两轴电力拖动系统的等效

如果不考虑传动机构的损耗,工作机构折算前的机械功率为 $T'_L \Omega_L$,折算后电动机轴上的机械功率为 $T_L \Omega$ 。根据功率不变的原则,折算前后工作机构的传递功率相等,即

$$T'_L \Omega_L = T_L \Omega \quad (1-5)$$

式中, Ω_L 为生产机械负载的角速度; Ω 为电动机的角速度。

由式(1-5)可得

$$T_L = \frac{T'_L}{\Omega/\Omega_L} = \frac{T'_L}{j_L} \quad (1-6)$$

式中, j_L 为电动机轴与工作机械轴间的转速比, $j_L = \Omega/\Omega_L = n/n_L$ 。

如果要考虑传动机构的损耗,可以在折算公式中引入传动效率 η_c 。由于功率传送是有方向的,因此引入效率 η_c 时必须注意:要因功率传送方向的不同而不同。现分以下两种情况讨论。

(1) 电动机工作在电动状态:此时由电动机带动工作机构,功率由电动机各工作机构传送,传动损耗由运动机构承担,即电动机发出的功率比生产机械消耗的功率大。根据功率不变原则,应有

$$T'_L \Omega_L = T_L \Omega \eta_c \quad (1-7)$$

$$T_L = \frac{T'_L}{\eta_c \Omega/\Omega_L} = \frac{T'_L}{j_L \eta_c} \quad (1-8)$$

(2) 电动机工作在发电制动状态:此时由工作机构带动电动机,功率传送方向由工作机构向电动机传送,因而传动损耗由工作机构承担。根据功率不变原则,应有

$$T'_L \Omega_L = \frac{T_L \Omega}{\eta_c} \quad (1-9)$$

$$T_L = \frac{T'_L}{j_L} \eta_c \quad (1-10)$$

对于系统有多级齿轮或皮带轮变速的情况,设已知各级转速比为 $j_{L1}, j_{L2}, \dots, j_{Ln}$,则总的转速比为各级转速比之积,即

$$j_L = j_{L1} j_{L2} \dots j_{Ln} = \prod_{i=1}^n j_{Li} \quad (1-11)$$

在多级传动时,如果已知各级的传递效率为 $\eta_{c1}, \eta_{c2}, \dots, \eta_{cn}$,则总效率 η_c 应为各级效率之积,即

$$\eta_c = \eta_{c1} \eta_{c2} \dots \eta_{cn} = \prod_{i=1}^n \eta_{ci} \quad (1-12)$$

(二) 转动惯量和飞轮矩的折算

将图 1-4 中两轴系统中的电动机转动惯量 J_e 和生产机械的负载转动惯量 J_L 折算到电动机轴的等效系统的转动惯量 J 。其等效原则是:折算前后系统的动能不变,即有

$$\frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} J_e \Omega^2 + \frac{1}{2} J_L \Omega_L^2 \quad (1-13)$$

$$J = J_e + J_L \left(\frac{\Omega_L}{\Omega} \right)^2 \quad (1-14)$$

整理后