

普通高等学校“十二五”规划教材

D IANLI TUODONG JICHU

电力拖动基础

【主 编】王洪诚 【副主编】仇 芝 蒋 林



四川大学出版社

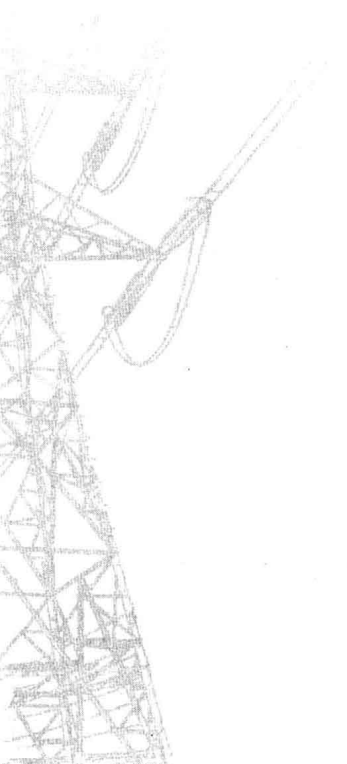
普通高等学校“十二五”规划教材



DIANLI TUODONG JICHU

电力拖动基础

【主 编】王洪诚 【副主编】仇 芝 蒋 林



四川大学出版社

责任编辑:张 阅
责任校对:王 锋
封面设计:墨创文化
责任印制:李 平

图书在版编目(CIP)数据

电力拖动基础 / 王洪诚主编. —成都: 四川大学出版社, 2011. 9

ISBN 978-7-5614-5481-7

I. ①电… II. ①王… III. ①电力传动—教材 IV. ①TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 191531 号

书名 电力拖动基础

主 编 王洪诚
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行 四川大学出版社
书 号 ISBN 978-7-5614-5481-7
印 刷 西南石油大学印刷厂
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 18
字 数 412 千字
版 次 2011 年 9 月第 1 版
印 次 2011 年 9 月第 1 次印刷
印 数 0 001~2 000 册
定 价 35.00 元(含光盘一张)

◆读者邮购本书,请与本社发行科联系。电话:85408408/85401670/85408023 邮政编码:610065

◆本社图书如有印装质量问题,请寄回出版社调换。

◆网址:www.scupress.com.cn

版权所有◆侵权必究

前 言

自 20 世纪 60 年代以来, 电力拖动基础一直是电气工程及其自动化、自动控制等专业的必修基础课程, 它主要介绍交、直流电动机的运行特性 (包括机械特性和起动、制动、调速性能分析), 是电力拖动自动控制系统的基础。

广义上讲, 现代电力拖动基础横跨电机学、电力电子学、自动控制原理、计算机应用技术等多个领域, 并不仅仅是电动机的运行特性, 但在有限的学时内, 无法完成这么多的内容, 因此一般概念上的电力拖动基础都仅限于传统意义上的电动机运行特性, 本教材也仅涉及这些内容。

近 20 余年来, 由于教学改革不断深入, 特别是随着科学技术的迅速发展, 可开课程和需开课程及教学内容不断增多, 很多学校不得不进行课程整合, 已经不再单独开设电力拖动基础课程, 而是把它与电机学结合起来, 开设电机与拖动基础或者类似的课程, 电力拖动基础课程教材也在近 20 年没有新的版本。但作者认为: 不管电力拖动系统新技术怎样发展, 电力拖动基础课程作为经典, 在高等教育大众化的背景下, 对主要承担培养应用型人才的一般普通高等学校的电气工程及其自动化、自动控制等专业, 单独开设电力拖动基础这样的具有传统特色的课程仍然非常必要, 相信这也将会成为人们的共识。鉴于此, 作者所在学校的相关专业一直将电力拖动基础作为独立课程开设, 一般在第三学年下学期开课 32~48 学时, 3~5 个实验。通过多年的教学实践和毕业生信息反馈, 该课程的开设在学生的实际工作中取得了较好的效果。

本书共 5 个章节以及附录, 第 1 章为电力拖动系统运动方程, 主要内容包括相关物理学基础和运动方程, 运动方程中有关物理量的计算, 复杂系统运动方程及其参数计算, 电力拖动系统中的典型负载特性; 第 2 章为直流电力拖动, 主要内容包括直流电动机的特点, 直流电动机的机械特性, 直流电动机的起动, 直流电动机的制动, 直流电动机的调速, 直流拖动系统的过渡过程, 电动机在过渡过程中的能量损耗等; 第 3 章为交流电力拖动, 主要内容包括现代电力拖动与交流电动机, 交流电动机的机械特性, 交流电动机的起动, 交流电动机的制动, 交流电动机的一般性调速, 交流电动机的变频调速, 交流电力拖动系统中的过渡过程等; 第 4 章为电动机的选择, 主要内容包括电动机选择的一般原则, 电动机的发热与冷却, 连续工作制下电动机容量的选择, 短时工作制下电动机容量的选择, 断续周期工作制下电动机容量的选择, 选择电动机容量的工程方法等; 第 5 章为电力拖动基本控制线路, 主要内容包括控制线路基础知识, 起动控制线路, 调速控制线路, 制动控制线路, 生产机械基本电气控制线路等; 附录以浙江天煌科技实业有限公司生产的 DZSZ-1 型电机及电气技术实验装置为基础, 介绍了电力拖动

基础课程基本实验的目的与要求、实验设备和典型实验项目，供教材使用者参考，但所用实验设备不同，可能存在着差异。

本书由西南石油大学电气信息学院多年从事电气传动与控制科研和教学的王洪诚教授在电力拖动基础课程讲义的基础上，结合电力拖动技术的新特点编写而成。本书根据我国普通高等教育发展的新形势，在内容体系、编写方法和重点内容取舍方面与现有的同类教材有较大不同，充分体现了与时俱进的特点。

全书由王洪诚教授组织策划并编写了第1章、第2章，西南石油大学电气信息学院仇芝老师编写了第3章、第5章并完成了全部文稿的校核工作，西南石油大学电气信息学院蒋林副教授编写了第4章和附录。电力拖动基础课程讲义由西南石油大学电气信息学院李红伟副教授初审并在校内试用，全书由哈尔滨工业大学电气工程系王明彦教授和陕西理工学院马永翔教授主审，王明彦、马永翔教授分别认真审阅了全部书稿，提出了很多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

在全书的编写过程中，作者参阅了部分国内现有的同类教材，所有参阅教材已经在参考文献中列出，在此向这些作者表示感谢。

本书建议授课学时为40~48学时（包括课程实验6~8学时），可作为普通高等学校电气工程及其自动化、自动控制等专业的基础课教材，也可以作为高职高专院校相关专业的教材和其他电气信息类专业本、专科学生的选修教材或参考教材，同时可作为高级电工的电气技术培训教材。教材配有多媒体教学课件，与教材一并发行。

由于编者水平有限，书中疏漏难免，希望使用本教材的师生提出宝贵意见，以便再版时修改，作者深表感谢。

作者联系电话：028-83037557

教材联系邮箱：whc@swpu.edu.cn

教学课件联系邮箱：yallym@163.com

编者

2011年6月于四川成都

目 录

0 绪 论	(1)
0.1 拖动与电力拖动系统	(1)
0.2 电力拖动系统的发展	(1)
0.3 电力拖动在我国现代化建设中的地位 and 作用	(2)
0.4 电力拖动系统的分类和特点	(3)
0.5 本课程的性质和任务	(3)
第 1 章 电力拖动系统运动方程	(4)
1.1 相关物理学基础和运动方程	(4)
1.1.1 相关的物理学基础	(4)
1.1.2 电力拖动系统的组成	(5)
1.1.3 电力拖动系统运动方程式	(6)
1.2 运动方程中有关物理量的计算	(8)
1.3 复杂系统运动方程及其参数计算	(10)
1.3.1 复杂旋转系统的等效与参数计算	(11)
1.3.2 复杂直线运动系统的等效与参数计算	(15)
1.4 电力拖动系统中的典型负载特性	(23)
1.4.1 转矩不变型负载	(23)
1.4.2 功率不变型负载	(24)
1.4.3 指数型负载	(24)
小 结	(25)
习题 1	(25)
第 2 章 直流电力拖动	(27)
2.1 直流电动机的特点	(27)
2.1.1 磁路特点	(29)
2.1.2 电压平衡方程	(29)
2.1.3 功率平衡方程	(29)
2.1.4 转矩平衡方程	(29)
2.2 直流电动机的机械特性	(30)

2.2.1	机械特性方程	(30)
2.2.2	固有机械特性和人为机械特性	(33)
2.2.3	机械特性的绘制	(36)
2.3	直流电动机的起动	(38)
2.3.1	起动过程与起动方法	(38)
2.3.2	电枢回路串电阻分级起动	(39)
2.4	直流电动机的制动	(44)
2.4.1	制动定义与概念	(44)
2.4.2	能耗制动	(45)
2.4.3	直流电动机的反接制动	(48)
2.4.4	直流电动机的回馈制动	(50)
2.5	直流电动机的调速	(52)
2.5.1	基本概念与要求	(52)
2.5.2	电枢回路串电阻调速	(57)
2.5.3	调压调速	(59)
2.5.4	调磁调速	(61)
2.5.5	调速方法与负载的配合	(63)
2.6	直流电力拖动系统典型实例分析	(65)
2.6.1	反抗型负载	(65)
2.6.2	位能型负载	(67)
2.7	直流拖动系统的过渡过程	(69)
2.7.1	机械过渡过程	(70)
2.7.2	考虑电磁惯性时的过渡过程	(80)
2.8	电力拖动系统动态方程中时间常数的确定	(84)
2.8.1	机电时间常数 T_m 的确定	(85)
2.8.2	电磁时间常数 T_a 的确定	(86)
2.9	电动机在过渡过程中的能量损耗	(86)
2.9.1	理想空载下恒压起动时的能量损耗	(88)
2.9.2	理想空载下电压分级起动时的能量损耗	(88)
2.9.3	理想空载下能耗制动时的能量损耗	(89)
2.9.4	理想空载下反接制动时的能量损耗	(89)
2.9.5	理想空载下反转时的能量损耗	(90)
2.9.6	减小过渡过程能量损耗的方法	(90)
小 结	.....	( 91)
习题 2	.....	( 92)
第 3 章 交流电力拖动	.....	( 95)
3.1 现代电力拖动与交流电动机	.....	( 95)

3.1.1	交流电动机的特点	(95)
3.1.2	研究现代电力拖动系统的方法	(98)
3.2	交流电动机的机械特性	(101)
3.2.1	机械特性的三种描述形式	(101)
3.2.2	固有机械特性	(105)
3.2.3	人为机械特性	(106)
3.2.4	机械特性的绘制	(108)
3.3	交流电动机的起动	(113)
3.3.1	鼠笼式异步电动机的起动	(113)
3.3.2	绕线式异步电动机的起动	(122)
3.4	交流电动机的制动	(125)
3.4.1	能耗制动	(125)
3.4.2	反接制动	(129)
3.4.3	回馈制动	(132)
3.5	交流电动机的一般性调速	(137)
3.5.1	调速原理与调速方法	(137)
3.5.2	变极调速	(137)
3.5.3	改变转差率调速	(142)
3.6	交流电动机的变频调速	(152)
3.6.1	变频调速系统的组成结构	(152)
3.6.2	变频调速的基本控制规律	(155)
3.6.3	变频调速的分类	(158)
3.6.4	变频调速时电动机的机械特性	(162)
3.6.5	变频调速的未来发展趋势	(165)
3.7	交流电力拖动系统中的过渡过程	(165)
3.7.1	绕线式电动机拖动恒转矩负载时的过渡过程	(166)
3.7.2	鼠笼式异步电动机拖动系统的过渡过程	(167)
3.7.3	交流拖动系统过渡过程中的能量损耗	(170)
3.7.4	减少过渡过程能量损耗的方法	(171)
小 结	.....	(172)
习题 3	.....	(173)
第 4 章	电动机的选择	(175)
4.1	电动机选择的一般原则	(175)
4.1.1	电动机种类、型式、电压和转速的选择	(175)
4.1.2	电动机容量的选择	(177)
4.2	电动机的发热与冷却	(179)
4.2.1	电动机的发热过程	(179)

4.2.2	电动机的冷却过程	(181)
4.2.3	电动机的工作制	(182)
4.3	连续工作制下电动机容量的选择	(185)
4.3.1	恒值负载下电动机容量的选择	(185)
4.3.2	变化负载下电动机容量的选择	(187)
4.4	短时工作制下电动机容量的选择	(195)
4.4.1	选择连续工作制电动机	(195)
4.4.2	选择短时工作制电动机	(198)
4.4.3	选择断续周期工作制电动机	(199)
4.5	断续周期工作制下电动机容量的选择	(199)
4.6	选择电动机容量的工程方法	(202)
4.6.1	统计分析法	(202)
4.6.2	类比法	(203)
小 结	.....	(203)
习题 4	.....	(204)
第 5 章	电力拖动基本控制线路	(205)
5.1	控制线路基础知识	(205)
5.1.1	常用低压电器	(205)
5.1.2	控制线路基本知识	(211)
5.2	起动控制线路	(215)
5.2.1	直接起动	(215)
5.2.2	降压起动	(216)
5.3	调速控制线路	(226)
5.4	制动控制线路	(229)
5.4.1	能耗制动	(229)
5.4.2	反接制动	(232)
5.5	生产机械基本电气控制线路	(237)
5.5.1	点动与长动控制线路	(237)
5.5.2	顺序控制线路	(239)
5.5.3	多地控制线路	(241)
5.5.4	可逆运行控制线路	(242)
小 结	.....	(244)
习题 5	.....	(245)
附录	电力拖动基础课程基本实验	(247)
F.1	实验目的与要求	(247)
F.1.1	实验目的	(247)

F.1.2	实验的基本要求	(247)
F.2	实验设备	(249)
F.3	典型实验项目	(250)
F.3.1	直流他励电动机在各种运行状态下的机械特性	(250)
F.3.2	三相异步电动机在各种运行状态下的机械特性	(253)
F.3.3	三相异步电动机的起动与调速	(258)
F.3.4	三相异步电动机的正反转控制	(262)
F.3.5	工作台自动往返循环控制	(265)
F.3.6	三相鼠笼式异步电动机降压起动实验	(267)
F.3.7	三相绕线转子式异步电动机的起动控制	(271)
F.3.8	三相异步电动机的制动控制实验	(273)
参考文献		(277)

0 绪 论

0.1 拖动与电力拖动系统

在现代化工业生产、交通运输、科学研究等诸多领域，要完成加工操作或者位置移动，必须要有原动机的作用或者驱动，这种作用或者是拖动或者是推动，作用的结果是使被作用物体发生位移或者角位移，通过传动系统的转换，总可以统一称为拖动。作为拖动的原动机，可以是汽轮机、内燃机、水轮机、风力机械和电动机等。电动机使用电力作为能源，电力具有传输方便、易于转换等特点，因此电力拖动被广泛使用，成为拖动系统的主要形式，例如各类机床设备、起重设备、电动机车和纺织机械等；而其他形式的拖动只在某些特定情况下才采用，如火力发电厂采用蒸汽轮机拖动，水电厂采用水轮机拖动，风电厂采用风力机械拖动，汽车和小容量发电机采用内燃机或柴油机拖动等。本课程主要介绍电力拖动。

由电动机拖动生产机械运动的系统称为电力拖动系统或电气传动系统。凡是在生产过程中完成加工、升降、搬运等各项工作的机械，统称为生产机械，例如，机床、泵类、起重机、轧钢机和电动机车等。由电动机及其控制设备以及生产机械组成的成套装置，称为电力拖动装置，或电力拖动系统。在电力拖动系统中，电动机的作用是把电能转换成机械能带动生产机械运动，此时电动机主要是作为原动机使用的；然而在某些情况下，电动机也起阻止运动的作用，这时称为制动，它把机械能重新转换成电能，这时我们称电动机运行在电磁制动状态。

0.2 电力拖动系统的发展

19 世纪末 20 世纪初，随着电能的广泛应用，电动机逐步取代了蒸汽轮机，成为拖动系统中最常用的一种原动机。电力拖动的发展，从拖动系统的结构上讲，大体上经历了成组拖动、单机拖动和多机拖动三个阶段。成组拖动是用一台电动机拖动一根天轴或地轴，电动机作恒速运转，由传动带或者齿轮分别传动去拖动多台生产机械，生产机械

的速度改变靠改变皮带轮的直径或者齿轮的齿数来实现，这在早期的电力拖动系统中被广泛使用，例如我国 20 世纪 70 年代在棉花产区大量使用的轧花机就是这种拖动形式。由于这种拖动方式结构不尽合理，电动机性能不能充分发挥，所以效率很低，已经不采用了。

单机拖动是指由一台电动机拖动一台生产机械，从而减少了中间传动机构，提高了效率，并可充分利用电动机的调速性能来满足生产机械的工艺要求。

随着现代化工业生产水平的不断提高和生产机械的不断现代化，加工手段和加工过程越来越复杂，在一台生产机械上往往同时具有多套运动机构，如果仍采用一台电动机来拖动，传动机构就非常复杂甚至根本无法实现，于是，对于现代化的生产机械（如数控加工中心），大都采用由多台电动机来拖动同一机械的不同运动机构，这种复杂的拖动方式就是多机拖动，即一台电动机只拖动生产机械中的某一个部件，例如机床的刀架或者夹紧装置。由于采用多机拖动方式易于实现自动化生产，因此，在现代化的电力拖动系统中大都采用多电动机拖动方式，特别是近几十年来，随着电力电子技术的迅速发展和计算机技术的广泛应用，使电力拖动系统，特别是交流电动机拖动系统，进入了一个全新的发展阶段。

从拖动系统的类型上讲，电力拖动系统经历了三个阶段：在 20 世纪 80 年代以前，直流电动机的拖动系统在电力拖动中占主导地位，凡是需要调速的高精度自动控制系统，都是非直流电动机拖动莫属，交流电动机拖动只能在不需要调速的场合或者通过其他机械方式调速的地方作恒速运行。20 世纪 80 年代以后，随着电力电子技术和计算机技术的快速发展与应用，交流电动机变频调速技术的迅速发展和成熟，交流电动机拖动系统在电力拖动中处于绝对的主流。进入 21 世纪以来，随着电机技术、控制理论、数字脉宽调制技术、新材料技术、微电子技术及现代控制技术的进步，稀土材料永磁无刷直流电机拖动系统开始出现和应用，近年来已成为国内外最活跃、最具发展前途的拖动控制系统，直流电力拖动大有重新夺回主导地位和发展壮大之势。可以预见的是，随着永磁无刷直流电机拖动系统的发展，未来交流拖动和直流拖动将共同对工农业生产和人们生活起到重要的作用。

0.3 电力拖动在我国现代化建设中的地位和作用

我国是一个制造业大国，又处在经济的高速增长时期，2010 年经济总量已经跃居世界第二，国家正在向着工业化、城市化快速推进，电力装机容量和用电量都在迅速增加。同时，作为一个负责任的发展中大国，为解决世界环境问题和气候变化问题，大力推广使用清洁能源是我国经济发展的基本出发点和战略方针。电力能源不管是源自太阳能、核能、风能、海洋能，还是源自传统的煤—电转换，它自身是易于传输、使用和转换的清洁能源，电力拖动系统在我国机械制造、装备加工、国防建设、交通运输、电子工业等各行各业都有着十分重要的地位和作用。

0.4 电力拖动系统的分类和特点

电力拖动系统可以根据其拖动生产机械的电动机类型分为直流电力拖动系统和交流电力拖动系统。凡是采用直流电动机作为原动机的拖动系统称为直流电力拖动系统；使用交流电动机作为原动机的拖动系统称为交流电力拖动系统。

由于交流异步电动机结构简单、设备成本低和维修方便，电力取得容易，而且可以在环境条件较恶劣的情况下运行，所以交流电力拖动系统在工农业生产中得到了广泛的应用。过去长期困扰交流电力拖动系统应用的调速问题，也随着变频器的应用得到了彻底解决，交流调速已经达到并超过了直流调速的性能，成为电力拖动系统的主流，并且还在控制方式和性能上不断地发展，应用范围迅速扩大，交流电力拖动在工业生产中成为电力拖动的主流方式。

直流电力拖动系统作为最早应用于工农业生产的拖动系统，经过近一个世纪的研究应用，技术已经完善，曾经是电力拖动系统特别是电力拖动自动控制系统的主体和首选，它的特点是起动转矩大、调速范围宽、调速性能好、易于控制等。但由于直流电动机需配置换向器和电刷装置，限制了电动机向高速和大容量方面发展，而且设备成本高，同时也不能直接用于易燃、易爆等工业场合。直流电动机的这些缺点在很长时间没有得到根本改善。近年来，随着科学技术的飞速发展，稀土材料的永磁无刷直流电机及其控制技术迅速发展起来，它保留了有刷直流电机优良的调速性能，同时又克服了有刷直流电机的一系列缺点，并且还具有效率高、能耗低、噪音低等优点，因此在各个领域，如数控机床、智能机器人、航空航天、电动交通工具等得到了广泛的应用。

0.5 本课程的性质和任务

电力拖动基础课程是电气工程及其自动化、自动控制及电气信息类专业的一门专业基础课。学生应该在掌握大学物理、力学、电磁场理论、电路原理、电子技术、电力电子技术和电机学等先序课程的基础知识后，进行本课程的学习。通过学习，学生将获得由各种电动机所组成的电力拖动系统的基本理论和系统运行在各种状态时的静、动态特性的计算方法，以及如何选择电动机容量、了解电力拖动系统的基本控制线路与分析方法，能够进行基本的电力拖动系统实验操作和实验数据处理，掌握实验曲线的绘制等基本技能，为进一步学习本专业的有关后续课程，如电力拖动自动控制系统、电气控制与PLC、工厂供电、低压电器继电器控制系统等提供必备的基础知识。

第 1 章 电力拖动系统运动方程

电力拖动是由电动机作为原动机的系统，无论是做直线运动还是旋转运动，它都是一个运动的系统。作为运动系统，我们首先应该研究它的运动规律，然后分析它的运行特性和特点。本章主要研究电力拖动系统的一般规律，即系统应该满足的运动方程，第 2 章和第 3 章再根据电动机的类型分别研究它们的运行特性。

1.1 相关物理学基础和运动方程

1.1.1 相关的物理学基础

由于电力拖动系统是由物理器件或元件组成的具有运动特征的集合，它必然应该遵循物理运动规律，满足物理定律。在电力拖动系统中涉及的物理定律主要有：

1.1.1.1 牛顿第一定律在电力拖动系统中的表述

当系统未受到外力或所受到的外力的合力等于 0 时，系统保持静止或者匀速运动状态不变，即当 $F=0$ 时，有

$$v = 0 \text{ 或 } v = a(\alpha = 0)$$

式中， F 为系统所受到的外力的合力；

v 为系统运动速度；

a 为常数；

α 为系统的加速度。

1.1.1.2 牛顿第二定律在电力拖动系统中的表述

电力拖动系统在做直线运动时，系统所受到的作用力的合力 F 等于系统总的质量 m 与系统的加速度 α 的乘积，即

$$F = m\alpha \quad (1-1)$$

式中， F 为系统所受到的外力的合力；

m 为系统的总质量；

α 为系统的加速度。

1.1.1.3 牛顿定律在旋转的电力拖动系统中的表述

当旋转系统未受到外力矩或所受到的外力矩的合力矩等于 0 时，系统保持静止或者

匀速旋转运动状态不变，即当 $T=0$ 时，有

$$\omega = 0 \text{ 或 } \omega = a(\beta = 0)$$

式中： T 为旋转系统所受到的外力的合力矩；

ω 为旋转系统的角速度；

a 为常数；

β 为角加速度。

电力拖动系统在做旋转运动时，旋转系统所受到的外合力矩 T 等于系统总的转动惯量 J 与系统的角加速度 β 的乘积，即

$$T = J\beta \quad (1-2)$$

式中， T 为旋转系统所受到的外力的合力矩；

J 为旋转系统总的转动惯量；

β 为角加速度。

需要特别说明的是，上述物理定律在电力拖动系统中的表述，已经忽略了电力拖动系统本身的几何尺寸，把整个电力拖动系统当成了一个质点来处理，这在工程计算中是允许的；有关的证明这里不再介绍，请读者参考有关文献。

1.1.2 电力拖动系统的组成

一般情况下，电力拖动系统的组成结构如图 1-1 所示。

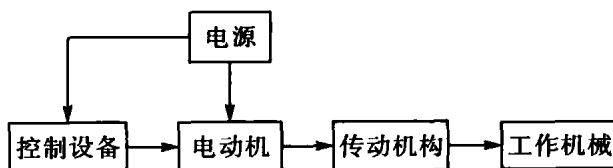


图 1-1 电力拖动系统组成结构框图

其中，电动机作为原动机，它实现将电能转换为机械动力，用以拖动工作机械进行加工或者移动；工作机械是执行和完成加工或者移动任务的机械部分，不同的工作机械（生产机械）可能有很大的差异，但是拖动的主要方式是直线运动和旋转运动两种；控制设备用以控制电动机的运行方式，达到满足工艺要求，通常是由继电器—接触器或者可编程控制器等组成；传动机构也叫减速装置，是连接电动机轴与工作机械轴的刚性机构，一般由齿轮箱组成，实现速度、传动方向和方式的改变，对于简单的拖动系统，也可以将电动机轴与工作机械轴通过联轴器直接连接而省去传动机构，这种系统称为单轴系统，这时电动机与工作机械转速相同。过去这种连接方式比较少，因为电动机的转速一般都远远高于工作机械，但是在现代电力拖动系统中，已经可以通过直接控制电动机的转速来调节工作机械的转速，称为电动机直接驱动系统，从而去除了传动机构，使工作机械的体积和重量大大减小，传动效率提高，所以随着科学技术的发展，在现代电力拖动系统组成中，传动机构有被淘汰的趋势；电源向系统提供能量，是电力拖动系统中必不可少的组成部分。

1.1.3 电力拖动系统运动方程式

所谓电力拖动系统运动方程，就是电力拖动系统应该遵循的物理运动规律。由于电力拖动系统有平面运动、直线运动和旋转运动方式，它们的运动规律在形式上有所不同，所以它们的运动方程在形式上也有所差异，下面分别介绍。

1.1.3.1 直线运动

根据牛顿第二定律在电力拖动系统中的表述，有

$$F = m\alpha$$

式中，等号左右两边的量纲应该相同，质量 m 与加速度 α 的乘积也应该是力，即由质点的惯性表现出阻碍速度变化的力，我们称其为动态负载力，这就是所有外力的合力与动态负载力的平衡关系，因此我们称其为质点的运动方程式。

在电力拖动系统中，系统的直线运动是一种主要的运动方式，如机床工作台的往返运动、起重机的吊钩上下移动、电梯轿箱的上下运动等。由物理学我们知道，在一定的条件下，这些刚体的直线运动可以看成为质点运动，运动方程可由式 (1-1) 来描述。

为了便于分析，同时从电力拖动系统的实际情况考虑，我们把作用在直线运动部件上的外力根据作用效果分为两类：一类是拖动部件运动的力 F ，显然它就是电动机的驱动力，称为拖动力；另一种是由于摩擦和惯性因素等产生的阻碍部件运动的力 F_L ，也就是阻碍力，我们称其为静负载力，如图 1-2 所示。

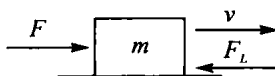


图 1-2 质点上的作用力与运动方向示意

在这样的分类下，直线运动方程式可以改写成如下形式：

$$F - F_L = m\alpha = m \frac{dv}{dt} \quad (1-3)$$

式中， F 为与运动方向一致的驱动力；

F_L 为静负载力（阻力）；

m 为直线运动部件的总质量；

v 为运动部件的线速度；

$\frac{dv}{dt}$ 为直线运动部件的加速度。

由于通常我们都是直接采用速度来描述系统的运动状态的，这样直线运动的运动方程可以直接写成

$$F - F_L = m \frac{dv}{dt} \quad (1-4)$$

1.1.3.2 旋转系统的运动方程式

在电力拖动系统中，旋转运动是另外一种主要的运动形式之一，例如在机械加工中，有大量的加工工件和固定机构绕着加工轴线旋转。与直线运动类似，我们由物理学

定律在刚体转动运动中的表述，很容易得出这些旋转部件的运动规律。

旋转系统根据结构形式，分为简单旋转系统（即单轴系统）和复杂旋转系统（即多轴系统），如图 1-3 所示。



图 1-3 简单旋转系统和复杂旋转系统示意

单轴系统是指直接将电动机轴通过联轴器与工作机械轴刚性连接，工作机械的转速与电动机相同的系统，如图 1-3 (a) 所示。这种系统结构简单，可以直接应用旋转系统的运动方程式 (1-2) 进行分析，由式 (1-2) 可得

$$T - T_L = J\beta = J \frac{d\omega}{dt}$$

即

$$T - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-5)$$

式中， T 为电动机的驱动转矩，即电磁转矩；

T_L 为静负载转矩，即阻转矩；

J 为运动部分总的转动惯量；

$\beta = \frac{d\omega}{dt}$ 为旋转系统的角加速度；

ω 为旋转系统的角速度。

多轴系统是指电动机与工作机械之间通过传动装置（减速箱）连接的系统，这种系统由于经过多级减速，具有多根转动轴，如图 1-3 (b) 所示。由于这种系统电动机和工作机械不在同一根轴上，不能直接应用运动方程式 (1-2) 进行分析，必须首先把多轴系统等效折算成为单轴系统，然后再按照单轴系统的分析方法来计算。

式 (1-5) 就是简单旋转系统所遵循的运动方程，和式 (1-4) 比较，可见直线运动方程和旋转运动方程形式完全相似，其各物理量之间存在着对应关系。但需要特别注意的是，在直线运动系统中驱动和静负载都是力，而在旋转运动系统中驱动和静负载都是力矩。

另外还需要说明，无论是平面运动、直线运动还是旋转运动的系统，必须唯一地选择各个物理量的参考方向或者正方向，一旦参考方向选定，则与参考方向相反的物理量必须取负。对于平面和直线运动系统，参考方向的选取没有统一的规定；而对于旋转系统而言，通常人们把电动机的反时针方向旋转选为转速的参考方向，把与电动机反时针方向旋转一致的驱动力矩即电磁转矩选为转矩的参考方向，至于电量的参考方向与电路原理中参考方向的选择一致，图 1-4 是一种参考方向选择的示意图。