


★ 服务热线: 400-615-1233

★ 配套精品教学资料包

★ www.huatengedu.com.cn

 河北省“十四五”职业教育规划教材

电机与电气控制 技术项目教程

DIANJI YU DIANQI KONGZHI
JISHU XIANGMU JIAOCHENG

电机与电气控制
技术项目教程

DIANJI YU DIANQI KONGZHI
JISHU XIANGMU JIAOCHENG

电机与电气控制 技术项目教程

主编
曲昀卿

主编 曲昀卿
主审 王计波 刘江水

选题策划 张云鹏
责任编辑 苏 莉
封面设计 刘文东


ISBN 978-7-5661-3332-8



9 787566 133328 >

定价: 49.80元


哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

X-B



河北省“十四五”职业教育规划教材

电机与电气控制 技术项目教程

主 编 曲昀卿
副主编 李英辉
主 审 王计波 刘江水



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

内 容 简 介

本书共5个项目,内容包括直流电机的应用与维护、变压器的应用与维护、交流电机的应用、三相异步电动机的电气控制、典型机械设备的电气控制。

本书可作为高等职业院校电气自动化等专业的教材,也可供相关从业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电气控制技术项目教程 / 曲昀卿主编. — 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2021. 11(2025. 1 重印)
ISBN 978-7-5661-3332-8

I. ①电… II. ①曲… III. ①电机学 - 高等职业教育 - 教材 ②电气控制 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①TM3
②TM921. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 241245 号

电机与电气控制技术项目教程

DIANJI YU DIANJI KONGZHI JISHU XIANGMU JIAOCHENG

选题策划 张云鹏

责任编辑 苏 莉

封面设计 刘文东

出版发行 哈尔滨工程大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区南通大街 145 号

邮政编码 150001

发行电话 0451-82519328

传 真 0451-82519699

经 销 新华书店

印 刷 三河市骏杰印刷有限公司

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 15.5 插页 1

字 数 321 千字

版 次 2021 年 11 月第 1 版

印 次 2025 年 1 月第 4 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5661-3332-8

定 价 49.80 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

本书根据教育部最新颁布的《高等职业学校专业教学标准》，同时参照企业行业标准、电工职业资格标准编写而成。在编写过程中，编者充分吸纳其他同类教材使用反馈信息，对接新的专业标准，结合高等职业院校特点，充分考虑与技能大赛的衔接，本着“够用、实用”的原则，注重任务驱动，重点突出任务实施，创新呈现形式，知识传授与技能培养并重，强化学生职业素养养成和专业技术积累，将专业精神、职业精神和工匠精神融入内容。

本书采用项目式教学模式编写，主要内容包括直流电机的应用与维护、变压器的应用与维护、交流电机的应用、三相异步电动机的电气控制、典型机械设备的电气控制。以三相异步电动机为重点，以电气控制基本环节为主线，各项目内容以实际应用为基础，并通过生产任务单的方式来验证理论的正确性，强化对学生职业技能的训练，培养和锻炼学生分析、解决生产实践过程中的电机与电气问题，以及电气控制系统识图、设计、安装调试与维护的能力。

本书具有明显的特色，主要表现在以下方面：

(1)结合地方经济开发特色教材，提高人才培养质量。结合河北地方经济，关注电机与电气控制技术的发展动向，吸收新知识、新材料、新技术和新工艺；同时体现分层教学的思想，以适应不同类型学生的需求。

(2)选取企业真实案例，注重技能训练，具有较强的实用性。本书项目内容来自企业实际工程项目或产品。针对高等职业院校学生实际和相关工作岗位对知识与技能的要求，删减烦琐的原理推导和定量计算内容，侧重基础知识储备和职业岗位技能训练，围绕实践活动编排教学内容，符合从感性到理性的认知规律，实用性强。

(3)拥有校企合作的编写团队。由石家庄职业技术学院、河北天业电气有限公司组成专兼结合的编写团队，其中有长期从事电机与电气控制技术教学和科研工作的优秀教师，也有长期从事电机与电气控制技术开发的企业工程技术



人员,团队的理论功底扎实,实践经验丰富。

(4)配有丰富的数字化教学资源。重点内容配有在线资源,学生可通过扫描二维码观看相关微课、视频等,延伸教材功能,丰富学生学习手段。

本书按 64 学时编写,各项目学时分配见下表。

项目名称	学时分配
项目一 直流电机的应用与维护	8
项目二 变压器的应用与维护	6
项目三 交流电机的应用	12
项目四 三相异步电动机的电气控制	28
项目五 典型机械设备的电气控制	10

本书由石家庄职业技术学院曲昀卿任主编,石家庄职业技术学院李英辉任副主编,其他参与编写的还有石家庄职业技术学院张晓静、曹松花、许彪、张艳琴、李积鹏、刘凤梅。具体编写分工如下:项目一由张晓静、曹松花、许彪编写,项目二由李英辉编写,项目三、项目四由曲昀卿编写,项目五由张艳琴、李积鹏编写,生产任务单由曲昀卿、刘凤梅编写。全书由曲昀卿统稿,石家庄职业技术学院王计波、河北天业电气有限公司刘江水主审。刘江水工程师对本书提出了许多宝贵的修改意见,在此深表感谢。

由于编者水平有限,教材中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正,以便我们修订完善。

编者

目录

Contents

项目一

▶ 直流电机的应用与维护	1
任务一 认识直流电机	2
知识链接	2
一、直流电机的特点和用途	2
二、直流电机的基本结构	4
三、直流电机的工作原理	6
四、直流电机的励磁方式	7
五、直流电机出线端子的标志	9
六、直流电机的铭牌数据与系列	9
七、直流电机的参数计算	10
任务二 直流电动机的调速	14
知识链接	15
一、他励直流电动机的机械特性	15
二、生产机械的负载转矩特性	17
三、电力拖动系统的稳定运行	19
四、他励直流电动机的调速	21
任务三 直流电动机的起动、反转和制动	26
知识链接	26
一、他励直流电动机的起动	26
二、他励直流电动机的反转	28
三、他励直流电动机的制动	28
生产任务单	31
任务四 直流电动机的使用、维护与检修	33
知识链接	33
一、直流电动机的使用	33
二、直流电动机的维护	34
三、直流电动机的保养	35
四、直流电动机的常见故障及其检修方法	35
思考与练习	38



项目二

▶ 变压器的应用与维护 41

任务一 认识变压器 42

知识链接 42

一、变压器的用途 42

二、变压器的分类 43

三、变压器的基本结构 44

四、变压器的铭牌与额定值 46

任务二 单相变压器的运行 48

知识链接 48

一、变压器的工作原理 48

二、变压器的空载运行 49

三、变压器的负载运行 54

四、变压器参数的测定和标么值 57

五、变压器的运行特性 59

生产任务单 61

任务三 三相变压器的应用 65

知识链接 65

一、三相变压器的磁路系统——铁心的
结构特点 65

二、三相变压器的电路系统——联结组 66

三、变压器的并联运行 70

任务四 特种变压器的应用 71

知识链接 71

一、自耦变压器 71

二、仪用互感器 73

三、电焊变压器 75

思考与练习 76

项目三

▶ 交流电机的应用 81

任务一 认识三相异步电动机 82

知识链接 82

一、交流电机的分类 82

二、三相异步电动机的特点和用途 82

三、三相异步电动机的结构 82

四、三相异步电动机的基本工作原理 85

五、三相异步电动机的铭牌数据 89

任务二 三相异步电动机的运行 90

知识链接 90

一、三相异步电动机的空载运行 90

二、三相异步电动机的负载运行 91

三、三相异步电动机的功率和电磁转矩 92

四、三相异步电动机的工作特性	94
五、三相异步电动机的机械特性	95
六、三相异步电动机的起动	99
七、三相异步电动机的反转	103
八、三相异步电动机的制动	104
九、三相异步电动机的调速	107
任务三 三相异步电动机的使用、维护与检修	111
知识链接	111
一、三相异步电动机的选择原则	111
二、三相异步电动机的安装原则	111
三、三相异步电动机的接地装置	112
四、三相异步电动机起动前的准备	112
五、三相异步电动机起动时的注意事项	112
六、三相异步电动机运行中的监视	112
七、三相异步电动机的定期维修	113
八、三相异步电动机的常见故障及其处理方法	114
任务四 单相异步电动机的应用	118
知识链接	118
一、单相分相式异步电动机	118
二、单相罩极式(磁通分相式)异步电动机	120
思考与练习	122
项目四 ▶ 三相异步电动机的电气控制	125
任务一 电气控制线路图、接线图和布置图的识读	126
知识链接	126
一、电气原理图	126
二、电气元件布置图	128
三、安装接线图	129
四、电动机基本控制线路的安装步骤	130
任务二 常用低压电器	131
知识链接	131
一、低压断路器	131
二、接触器	135
三、电磁继电器	141
四、熔断器	154
五、主令电器	160
任务三 电动机点动、连动控制电路	164
知识链接	164
一、点动与连动控制电路概述	164
二、点动与连动控制电路的工作原理	165
生产任务单	167



任务四 电动机正反转控制电路	168
知识链接	169
一、正反转控制电路概述	169
二、正反转控制电路的工作原理	169
生产任务单	171
任务五 电动机的位置、自动往返、顺序和多地控制电路	173
知识链接	174
一、顺序控制电路	174
生产任务单	176
二、多地控制	178
三、自动往复循环控制	178
生产任务单	180
任务六 三相异步电动机的降压起动控制电路	182
知识链接	182
一、定子电路串电阻降压起动	183
二、星形-三角形降压起动	183
三、自耦变压器降压起动	185
四、延边三角形降压起动	186
生产任务单	187
任务七 三相异步电动机的制动控制电路	189
知识链接	189
一、电动机单向反接制动控制	189
二、电动机可逆运行反接制动控制	190
三、电动机单向运行能耗制动控制	191
四、电动机可逆运行能耗制动控制	192
五、无变压器单管能耗制动控制	193
六、机械制动控制	194
任务八 绕线转子异步电动机的基本控制电路	195
知识链接	195
一、转子绕组串接电阻起动控制	196
二、转子绕组串接频敏变阻器起动控制电路	198
三、凸轮控制器控制电路	199
四、电气控制系统常用的保护环节	201
思考与练习	203
项目五 典型机械设备的电气控制	207
任务一 阅读机床电气原理图的方法	208
知识链接	208
一、认识机床电气原理图	208
二、机床电气原理图的分析方法	209

项目五

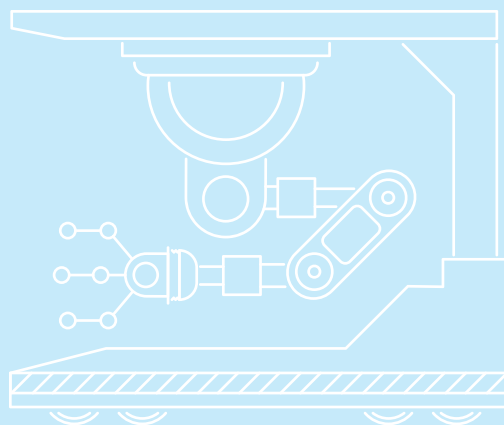


典型机械设备的电气控制

任务二 铣床的电气控制电路	210
知识链接	211
一、铣床的用途	211
二、X62W 型万能铣床的型号含义	211
三、X62W 型万能铣床的主要结构及运动形式	211
四、X62W 型万能铣床的电力拖动特点及控制 要求	212
五、X62W 型万能铣床控制电路的工作原理	212
六、X62W 型万能铣床正常工作时控制电路的 操作过程	213
七、X62W 型万能铣床控制盘的常见故障和 检修方法	214
生产任务单	215
任务三 Z3040 型摇臂钻床的电气控制电路	217
知识链接	217
一、Z3040 型摇臂钻床的主要结构和 运动形式	217
二、Z3040 型摇臂钻床的电力拖动特点 与控制要求	218
三、Z3040 型摇臂钻床液压系统简介	219
四、Z3040 型摇臂钻床电气控制系统分析	219
任务四 M7120 型平面磨床的电气控制电路	224
知识链接	224
一、M7120 型平面磨床的基本结构及 运动形式	224
二、M7120 型平面磨床电力拖动特点及 控制要求	225
三、M7120 型平面磨床电气控制电路分析	226
四、M7120 型平面磨床电气控制电路常见故障 分析	229
生产任务单	230
任务五 T68 型卧式镗床的电气控制电路	231
知识链接	232
一、T68 型卧式镗床的主要结构和运动形式	232
二、T68 型卧式镗床的电力拖动方式和 控制要求	233
三、T68 型卧式镗床的电气控制电路分析	233
生产任务单	237
思考与练习	239
参考文献	240

项 目

直流电机的应用与维护



任务一 认识直流电机

任务分析

直流电机是实现直流电能与机械能之间相互转换的电力机械,按照用途可以分为直流电动机和直流发电机两类。其中将机械能转换成直流电能的电机称为直流发电机,如图 1-1 所示;将直流电能转换成机械能的电机称为直流电动机,如图 1-2 所示。直流电机是工矿、交通、建筑等行业中的常见动力机械,是机电行业人员的重要工作对象之一。电气控制技术人员必须熟悉直流电机的结构、工作原理和性能特点,掌握主要参数的分析计算,并能正确熟练地使用直流电机。



图 1-1 直流发电机



图 1-2 直流电动机

任务目标

- 了解直流电机的特点、用途和分类;熟悉直流电机的基本工作原理;
- 认识直流电机的外形和内部结构,熟悉各部件的作用;
- 了解直流电机铭牌中型号和额定值的含义,掌握额定值的简单计算;
- 会进行直流电动机的检测、接线和简单操作。



知识链接

一、直流电机的特点和用途

1. 直流电机的特点

直流电机与交流电机相比,具有优良的调速性能和起动性能。直流电动机具有宽广的调速范围,平滑的无级调速特性,可实现频繁的无级快速起动、制动和反转;过载能力强,能承受频繁的冲击负载;能满足自动化生产系统的各种特殊运行要求。而直流发电机则能提

供无脉动的大功率直流电源,且输出电压可以精确地调节和控制。

但直流电机也有它明显的缺点:一是制造工艺复杂,消耗有色金属较多,生产成本低;二是运行时由于电刷与换向器之间容易产生火花,因而可靠性较差,维护比较困难。所以其在一些对调速性能要求不高的领域中已被交流变频调速系统所取代。但是在某些要求调速范围大、调速性好、精密度高、控制性能优异的场所,直流电机的应用目前仍占有较大的比重。

2. 直流电机的用途

由于具有良好的起动和调速性能,直流电动机常应用于对起动和调速有较高要求的场合,如大型可逆式轧钢机、矿井卷扬机、宾馆高速电梯、龙门刨床、电力机车、内燃机车、地铁列车、城市电车、电动自行车、造纸机、船舶机械、大型精密机床和大型起重机等,如图 1-3 所示。



图 1-3 直流电动机的用途

直流发电机主要用作各种直流电源,如直流电动机电源、化学工业中所需的低电压大电流的直流电源、直流电焊机电源等,如图 1-4 所示。

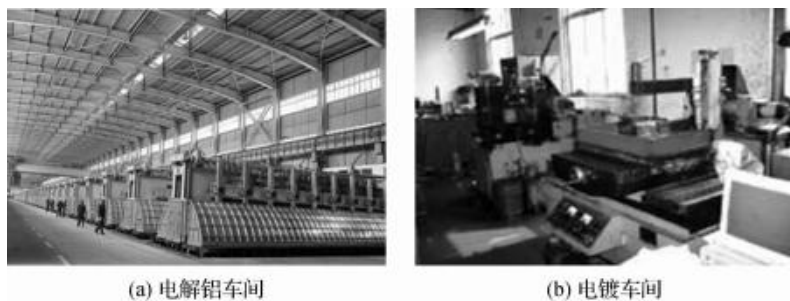
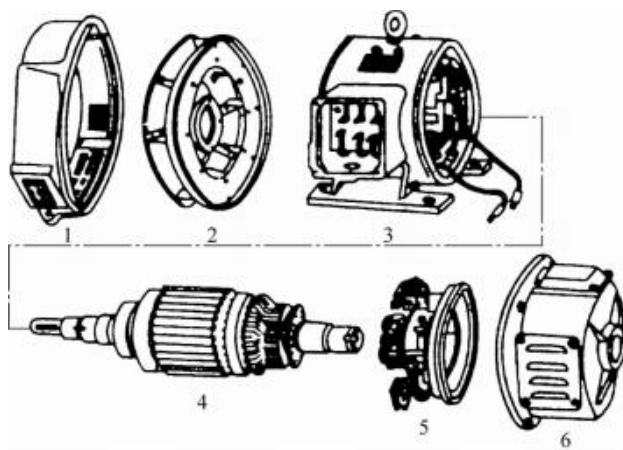


图 1-4 直流发电机的用途

二、直流电机的基本结构

直流电机由两个主要部分组成:一是静止部分,称为定子,主要用来产生磁通;二是转动部分,称为转子(通称电枢),是机械能变换为电能(发电机)或电能变换为机械能(电动机)的枢纽。在定子与转子之间有一定的间隙,称为气隙。图 1-5 所示为直流电机的主要部件,图 1-6 所示为直流电机的剖面图。下面简要介绍直流电机主要部件的结构及其作用。



1—前端盖;2—风扇;3—定子;4—转子;5—电刷及刷架;6—后端盖。

图 1-5 直流电机的主要部件



动画
直流电机外形
结构与解剖

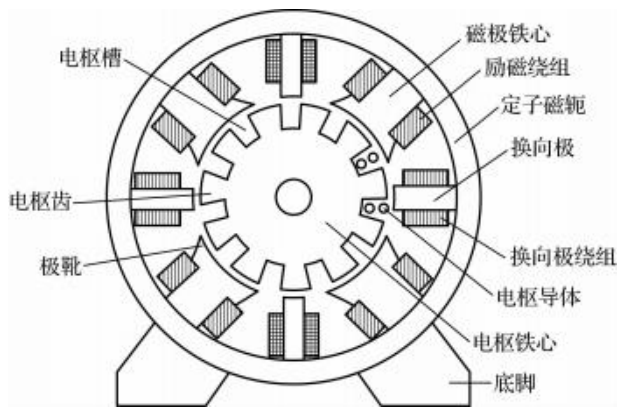


图 1-6 直流电机的剖面图

1. 定子部分

1) 主磁极

主磁极由磁极铁心和励磁绕组组成。当励磁绕组中通入直流电流后,铁心中即产生励磁磁通,并在气隙中建立励磁磁场。励磁绕组通常用圆形或矩形绝缘导线制成一个集中的线圈,套在磁极铁心外面。磁极铁心一般用 $1\sim 1.5\text{ mm}$ 厚的低碳钢板冲片叠压铆接而成,主磁极铁心柱体部分称为极身,靠近气隙一端较宽的部分称为极靴,极身与极靴交界处形成一个突出的肩部,用以支撑住励磁绕组。整个主磁极用螺杆固定在机座上。主磁极总是 N、

S 两极成对出现。用 p 表示电机的极对数,图 1-6 中的极对数 $p=2$,即有 2 对主磁极,此电机常称为 4 极电机。

2) 换向极

换向极由铁心和换向极绕组组成,当换向极绕组通过直流电流后,它所产生的磁场对电枢磁场产生影响,目的是改善换向,使电刷与换向片之间的火花减小。换向极绕组总是与电枢绕组串联,它的匝数少、导线粗。换向极铁心通常用厚钢板叠制而成,用螺栓安装在相邻两主磁极之间的机座上。直流电机功率很小时,换向极数可以减少为主磁极数的一半,甚至不装换向极。

3) 电刷装置

在直流电机中,为了使电枢绕组和外电路连接起来,必须装设固定的电刷装置。电刷装置由电刷、刷握、刷杆和刷杆座组成。电刷是用石墨等做成的导电块,放在刷握内,用弹簧压指将它压触在换向器上。刷握用螺钉夹紧在刷杆上,用铜绞线将电刷和刷杆连接,刷杆装在刷杆座上,彼此绝缘,刷杆座装在端盖上。

4) 机座

机座一方面用来固定主磁极、换向极和端盖等,所以要求它有一定的机械强度;另一方面作为电机磁路的一部分(称为磁轭),因此,又要求它有较好的导磁性能。机座一般用铸钢或钢板焊接制成。

2. 转子部分

1) 电枢铁心

电枢铁心是主磁路的一部分,同时要安放电枢绕组。由于电机运行时,电枢与气隙磁场间有相对运动,铁心中也会产生感应电动势而出现涡流和磁滞损耗。为了减少损耗,电枢铁心通常用厚度为 0.5 mm、表面涂绝缘层的圆形硅钢冲片叠压而成。冲片圆周外缘均匀地冲有许多齿和槽,槽内可安放电枢绕组,有的冲片上还冲有许多圆孔,以形成改善散热的轴向通风孔。

2) 电枢绕组

电枢绕组的作用是产生感应电动势和通过电流产生电磁转矩,实现机电能量转换。绕组通常用漆包线绕制而成,嵌入槽内后,用槽楔压紧;绕组伸出槽外的端接部分用无纬玻璃丝带扎紧。

3) 换向器

换向器的作用是与电刷一起将直流电动机输入的直流电流转换成电枢绕组内的交变电流,或是将直流发电机电枢绕组中的交变电动势转换成输出的直流电压。换向器是一个由许多燕尾状的梯形铜片间隔绝缘云母片排列而成的圆柱体,每片换向片的一端有高出的部分,上面铣有线槽,供电枢绕组引出端焊接用。

3. 气隙

气隙是电机磁路的重要部分。它的路径虽然很短,但由于气隙磁阻远大于铁心磁阻(一般小型电机的气隙为 0.7~5 mm,大型电机为 5~10 mm),对电机性能有很大的影响。

三、直流电机的工作原理

1. 直流发电机的工作原理

如图 1-7 所示, N、S 是一对在空间固定不动的磁极(可以是永久磁铁, 也可以是电磁铁), $abcd$ 是安装在可以转动的圆柱体上的一个线圈, 线圈两端分别接到两个相互绝缘的半圆形铜环(称为换向片)上, 换向片分别与固定不动的电刷(A 和 B)相接。这样, 旋转着的线圈可以通过换向片、电刷与外电路接通。

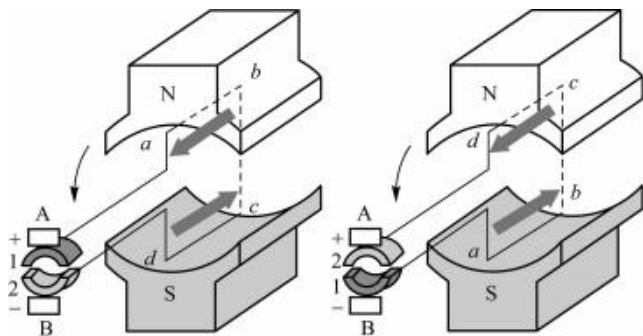


图 1-7 直流发电机的工作原理

当原动机带着电枢沿逆时针方向旋转时, 线圈两个有效边 ab 和 cd 将切割磁力线而产生感应电动势, 方向按右手定则确定。如图 1-7 所示, 导体 ab 中的电动势方向由 b 指向 a , 导体 cd 中的电动势则由 d 指向 c , 从整个线圈来看, 电动势的方向为 d 指向 a , 故外电路中的电流自换向片 1 流至电刷 A, 经过负载, 流至电刷 B 和换向片 2, 进入线圈。此时, 电流流出处的电刷 A 为正电位, 用“+”表示, 电流流入线圈处的电刷 B 则为负电位, 用“-”表示, 即电刷 A 为正极, 电刷 B 为负极。

当线圈转过 90° 时, 两个线圈的有效边 ab 、 cd 位于磁场物理中性面上, 导体的运动方向与磁力线平行, 不切割磁力线, 因此感应电动势为零。虽然两电刷同时与两换向片相接, 把线圈短路, 但线圈中无电动势和电流。

当线圈转过 180° 时, 线圈有效边中的电动势方向改变, 在 S 极下为 $a \rightarrow b$, 在 N 极下为 $c \rightarrow d$ 。由于此时电刷 A 和电刷 B 所接触的换向片已经互换, 因此电刷 A 仍为正极, 电刷 B 仍为负极, 输出电流的方向不变。

由以上分析可得出直流发电机的工作原理: 当原动机带动直流发电机电枢旋转时, 在电枢绕组中产生方向交变的感应电动势, 通过电刷和换向器的作用, 在电刷两端输出方向不变的直流电动势。

2. 直流电动机的工作原理

直流电动机在机械构造上与直流发电机完全相同, 图 1-8 所示是直流电动机的工作原理图。电枢不用外力驱动, 把电刷 A、B 接到直流电源上, 假定电流从电刷 A 流入线圈, 沿 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 方向, 从电刷 B 流出。载流线圈在磁场中将受到电磁力的作用, 其方向按左手定则确定, ab 边受到向上的力, cd 边受到向下的力, 形成电磁转矩, 结果使电枢沿逆时针方向转动, 如图 1-8(a) 所



视频

直流电动机的工作原理



动画

直流发电机的工作原理

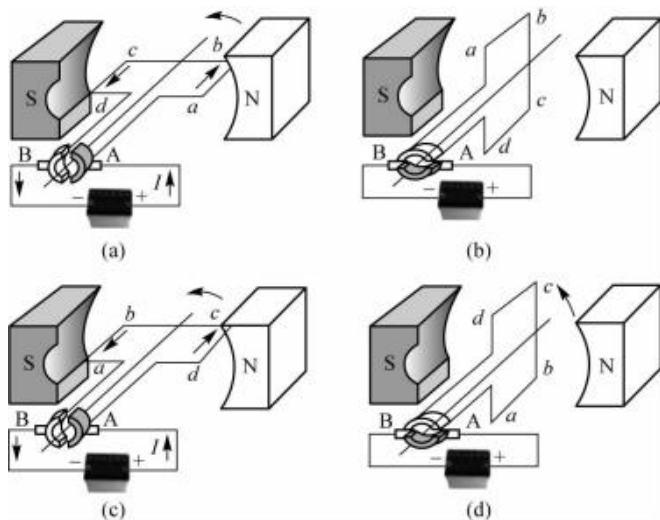


视频

直流电机的结构和原理

示。如图 1-8(b)所示,当电枢转过 90° 时,线圈中虽无电流和力矩,但其在惯性的作用下继续旋转。

如图 1-8(c)所示,当电枢转过 180° 时,电流仍然从电刷 A 流入线圈,沿 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ 方向,从电刷 B 流出。与图 1-8(a)比较,通过线圈的电流方向改变,但两个线圈边受电磁力的方向没有改变,即电动机只朝一个方向旋转。若要改变其转向,必须改变电源的极性,使电流从电刷 B 流入,从电刷 A 流出。



动画

直流电动机原理演示

图 1-8 直流电动机的工作原理

由以上分析可得直流电动机的工作原理:当直流电动机接入直流电源时,借助于电刷和换向器的作用,直流电动机电枢绕组中流过方向交变的电流,从而使电枢产生恒定方向的电磁转矩,保证了直流电动机朝一定的方向连续旋转。

综上所述,不论是直流发电机还是直流电动机,换向器可以使正电刷 A 始终与经过 N 极下的导体相连,负电刷 B 始终与经过 S 极下的导体相连,故电刷之间的电压是直流电,而线圈内部的电流则是交变的,所以换向器是直流电机中换向的关键部件。通过换向器和电刷的作用,把直流发电机电枢中的交变电动势整流成电刷间方向不变的直流电动势;把直流电动机电刷间的直流电流变成线圈内的交变电流,以确保电动机沿恒定方向旋转。

3. 直流电机的可逆原理

比较直流发电机与直流电动机的结构和工作原理,可以发现:一台直流电机既可以作为发电机运行,也可以作为电动机运行,只是其输入输出的条件不同。

如果在电刷两端加上直流电源,将电能输入电枢,则从电机轴上输出机械能,驱动生产机械工作,这时直流电机将电能转换为机械能,工作在电动机状态。

如果用原动机驱动直流电机的电枢旋转,从电机轴上输入机械能,则从电刷两端可以引出直流电动势,输出直流电能,这时直流电机将机械能转换为直流电能,工作在发电机状态。

同一台电机,既能做发电机运行,又能做电动机运行的原理,称为电机的可逆原理。

四、直流电机的励磁方式

直流电机在进行能量转换时,不论是将机械能转换为电能的发电机,还是将电能转换为

机械能的电动机,都以气隙中的磁场作为媒介。除了采用磁铁制成主磁极的永磁式直流电机之外,直流电机都是通过在励磁绕组中通以励磁电流产生磁场的。励磁绕组获得电流的方式称为励磁方式。根据励磁支路和电枢支路的相互关系,有他励、自励(并励、串励和复励)两种励磁方式。

1. 他励方式

他励方式中,电枢绕组和励磁绕组电路相互独立,电枢电压与励磁电压彼此无关,接线图如图 1-9 所示。

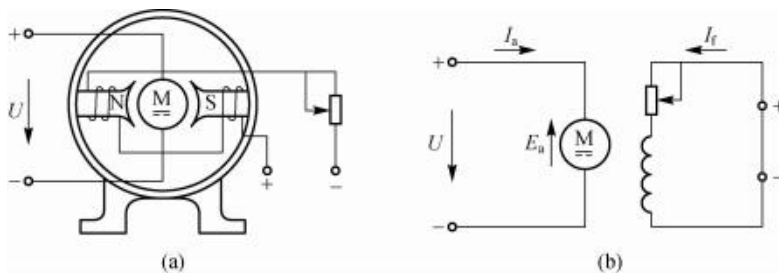


图 1-9 他励电机接线图

2. 自励方式

1) 并励方式

并励方式中,电枢绕组和励磁绕组是并联关系,由同一电源供电,接线图如图 1-10 所示。

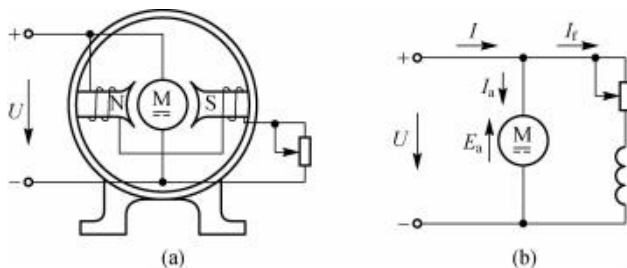


图 1-10 并励电机接线图

2) 串励方式

串励方式中,电枢绕组与励磁绕组是串联关系,接线图如图 1-11 所示。

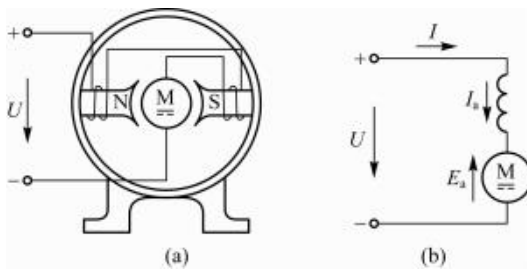


图 1-11 串励电机接线图

3)复励方式

复励电机的主磁极上有两部分励磁绕组,其中一部分与电枢绕组并联,另一部分与电枢绕组串联。当两部分励磁绕组产生的磁通方向相同时,称为积复励,反之称为差复励,接线图如图 1-12 所示。

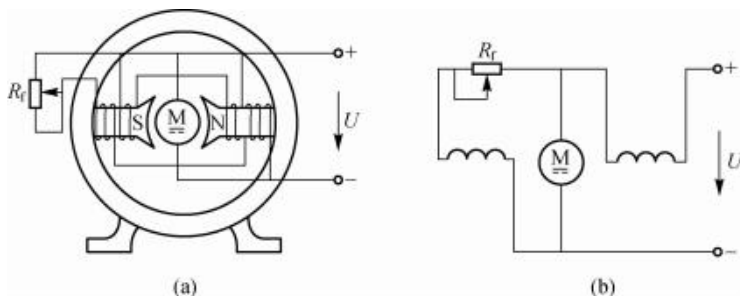


图 1-12 复励电机接线图

五、直流电机出线端子的标志

电机每个绕组的出线端子都有明确的标志,用字母标注在接线柱旁或引出导线的金属牌上。直流电机出线端标志如表 1-1 所示。

表 1-1 直流电机出线端标志

绕组名称	出线端标志	绕组名称	出线端标志
电枢绕组	A ₁ A ₂	串励绕组	D ₁ D ₂
换向极绕组	B ₁ B ₂	并励绕组	E ₁ E ₂
补偿绕组	C ₁ C ₂	他励绕组	F ₁ F ₂

注:下标“1”是首端,为正极;下标“2”是末端,为负极。

六、直流电机的铭牌数据与系列

每一台电机上都有一块铭牌,上面列出一些具体的数据,称为额定值。这是电机制造厂按照国家标准和该电机的特定情况规定的电机额定运行状态时的各种运行数据,也是对用户提出的使用要求。如果电机使用时处于轻载状态(即负载远小于额定值),则电机能持续正常运行,但效率低、不经济。如果电机运行超出额定值,则称为过载,将缩短电机的使用寿命,甚至可能损坏。根据负载条件合理选用电机,使其运行数据接近额定值才会既经济合理,又可以使电机可靠地工作,并且具有优良的性能。表 1-2 是一台直流电机的铭牌。

表 1-2 直流电机的铭牌

型号	Z4-112/2-1	励磁方式	并励
功率	5.5 kW	励磁电压	180 V
电压	440 V	效率	81.190%
电流	15 A	定额	连续

续表

转速	3 000 r/min	温升	80 °C
产品编号	× × × ×	出厂日期	2001 年 10 月
× × × × 电 机 厂			

【例 1-1】一台直流电动机,额定功率 $P_N=22 \text{ kW}$,额定电压 $U_N=110 \text{ V}$,额定转速 $n_N=1\ 000 \text{ r/min}$,额定效率 $\eta_N=85\%$,求其额定电流和额定负载时的输入功率。

解: 额定电流 $I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{22 \times 10^3}{110 \times 85\%} \approx 235 \text{ A}$

输入功率 $P_1 = U_N I_N = 110 \times 235 = 25\ 850 \text{ W} = 25.85 \text{ kW}$

【例 1-2】一台直流发电机,额定功率 $P_N=11 \text{ kW}$,额定电压 $U_N=230 \text{ V}$,额定转速 $n_N=2\ 860 \text{ r/min}$,额定效率 $\eta_N=85\%$,求其额定电流和额定负载时的输入功率。

解: 由发电机三个额定值之间的关系 $P_N = U_N I_N$ 得

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{11 \times 10^3}{230} \text{ A} \approx 47.83 \text{ A}$$

由额定效率公式 $\eta_N = \frac{P_N}{P_1} \times 100\%$ 得

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{11 \times 10^3}{0.85} \text{ W} \approx 12.94 \text{ kW}$$

七、直流电机的参数计算

直流电动机在电枢表面均匀分布的绕组中通入直流电流后,与电动机定子磁场相互作用产生电磁力形成电磁转矩,使其转子旋转。

1. 电磁转矩

在直流电动机中,电磁转矩是由电枢电流与合成磁场相互作用而产生的电磁力所形成的。根据电磁力定律,作用在电枢绕组中每一根导体上的平均电磁力为

$$f = Bli$$

对于给定的电动机,磁感应强度 B 与每极的磁通 Φ 成正比;每根导体中的电流与从电刷流入的电枢电流成正比;导线长度 l 在电动机制成后是一个常量。所以直流电动机的电磁转矩 T 的大小可表示为

$$T = C_T \Phi I_a$$

式中, C_T 为与电动机结构有关的常数,称为转矩系数; Φ 为每极磁通, Wb ; I_a 为电枢电流, A 。

由上式可知,直流电动机的电磁转矩与每极磁通和电枢电流的乘积成正比。电磁转矩的方向由左手定则判定。

直流电动机的电磁转矩 T 与转速 n 及轴上输出功率 P 的关系式为

$$T = 9\ 550 \frac{P}{n}$$

2. 电枢电动势

当电枢转动时,电枢绕组中的导体不断切割磁力线,因此每根载流导体中将产生感应电动势,其平均值为 $E = Blv$,其方向由右手定则判定,如图 1-13 所示。将此图与图 1-8 对照可

以看出该电动势的方向与电枢电流的方向相反,因而称为反电动势。对于给定的直流电动机,磁感应强度 B 与每极磁通 Φ 成正比,导体的运动速度 v 与电枢的转速 n 成正比,而导体的有效长度和绕组匝数都是常数,因此直流电动机两电刷间总的电枢电动势 E_a 的大小为

$$E_a = C_e \Phi n$$

式中, C_e 为与电动机结构有关的另一常数,称为电动势系数。

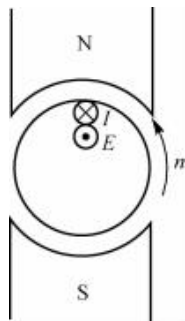


图 1-13 电枢电动势和电流

由此可知,直流电动机在旋转时,电枢电动势 E_a 的大小与每极磁通 Φ 和电动机转速 n 的乘积成正比,它的方向与电枢电流方向相反,在电路中起着限制电流的作用。

3. 电磁功率

以上分析的电磁转矩和电枢电动势是直流电机的两个重要因素,在直流电机的机电能量转换中起着至关重要的作用。

直流发电机是将机械能转换成电能的电磁装置。当直流发电机在原动机输入的机械功率产生的拖动转矩的作用下逆时针匀速旋转时,发电机电枢绕组的载流导体将受到电磁转矩的作用,而且电磁转矩的方向与拖动转矩的方向相反,是制动转矩。如果这时原动机不继续输入机械功率,则发电机转速将下降,直至为零,也就不能输出电能了。为了使发电机继续输出电能,原动机应不断地向发电机轴上输入机械功率,以产生拖动转矩去克服电磁转矩,保持发电机恒速运转,从而持续向外输出电功率。由此可知,电磁转矩作为拖动转矩的阻转矩来吸收原动机的机械功率,并通过电磁感应作用将其转换成电功率。原动机为克服电磁转矩所输入的这部分机械功率,可表示为电磁转矩与机械角速度的乘积。由于是电磁转矩,因此克服所消耗的这部分机械功率称为电磁功率,用 P_{em} 表示,即

$$P_{em} = T\Omega$$

其中, $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ 。

根据电磁转矩表达式 $T = C_T \Phi I_a$ 和 $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ 可得

$$P_{em} = T\Omega = \frac{pN}{2\pi a} \cdot \Phi I_a \cdot \frac{2\pi n}{60} = \frac{pN}{60a} \cdot \Phi n I_a = E_a I_a$$

上式表明,机械功率属性的电磁功率全部转换为电功率属性的电磁功率 $E_a I_a$ 。由此可见,发电机中的电磁转矩在机电能量转换过程中起着至关重要的作用,是机电能量转换得以实现的必要因素。有了电磁转矩,才迫使发电机从原动机吸收大部分机械功率,并通过电磁感应作用将其转变为电功率。电磁功率是联系机械能量和电磁能量的桥梁,在电磁能量与

机械能量的工程计算中有着非常重要的意义。

同理,直流电动机在机电能量转换过程中,为了连续转动而输出机械能,电源电压也必须不断向电动机输入电能,将电功率属性的电磁功率 $E_a I_a$ 转变为机械功率,反电动势 E_a 在此也起着至关重要的作用。

4. 电动势平衡方程式

图 1-14 所示为他励直流电动机的结构示意图和电路图。电枢电动势为反电动势,与电枢电流方向相反;电磁转矩为拖动转矩,与电动机转速的方向一致; T_L 为负载转矩; T_0 为空载转矩,与电动机转速的方向相反。

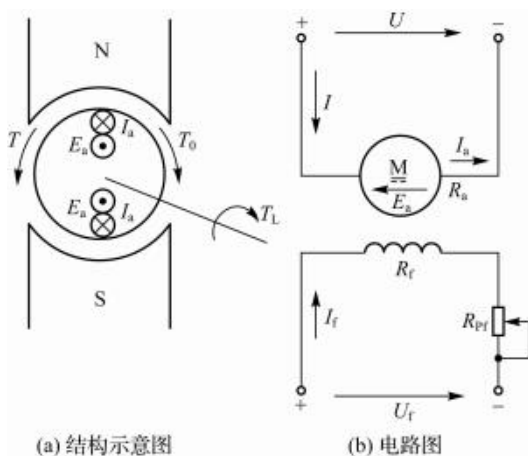


图 1-14 他励直流电动机的结构示意图和电路图

由基尔霍夫定律可知,在电动机电枢电路中存在如下回路电压方程式。

$$U = E_a + I_a R_a$$

式中, U 为电枢电压; I_a 为电枢电流; R_a 为电枢回路内电阻。

5. 功率平衡方程式

电动机在机电能量转换中,同样遵循能量守恒定律,因此它不可能将输入的电功率全部转换成机械功率,在转换过程中总有一部分能量不能被利用,这部分能量称为损耗。直流电动机的损耗按产生的性质可分为机械损耗、铁心损耗、铜耗和附加损耗四种,下面分别讨论各种损耗产生的原因及影响损耗大小的因素。

1) 机械损耗 P_m

电动机旋转时,必须克服摩擦阻力,因此产生机械损耗。其中有轴与轴承摩擦损耗,电刷与换向器摩擦损耗,以及转动部分与空气的摩擦损耗等。机械损耗与电动机转速的高低有关。当电动机的转速变化不大时,可认为机械损耗基本不变,即为不变损耗。

2) 铁心损耗 P_{Fe}

当直流电动机旋转时,电枢铁心中因磁场反复变化而产生的磁滞损耗和涡流损耗称为铁心损耗。在转速和气隙磁密变化不大时,可认为铁心损耗也是不变的,即为不变损耗。

以上分析了机械损耗 P_m 和铁心损耗 P_{Fe} 。这两种损耗在直流电动机已经转起来,但还没有带负载时就有,即空载时就已经存在。因此,这两种损耗合称空载损耗 P_0 ,即

$$P_0 = P_m + P_{Fe}$$

两者都是不变损耗。

3) 铜耗 P_{Cu}

当直流电动机运行时,在电枢回路中有电枢电流流过,把该电流在电枢绕组的电阻上产生的损耗称为铜耗。由于电动机运行时,电枢电流随负载的变化而变化,因此电动机中的铜耗为可变损耗。

4) 附加损耗 P_S

附加损耗又称杂散损耗,主要包括结构部件在磁场内旋转而产生的损耗、电枢齿槽的影响使气隙磁通产生脉动而在主极铁心和电枢铁心中产生的脉动损耗、电枢反应使气隙磁场畸变在电枢铁心中产生的损耗等。

注意:附加损耗很难计算和测定,一般靠经验估算。对有补偿绕组的电机,附加损耗可取为 $0.5\%P_N$;而对无补偿绕组的电机,附加损耗可取 $1\%P_N$ 。

综上所述,直流电动机总损耗 $\sum P$ 为

$$\sum P = P_m + P_{Fe} + P_{Cu} + P_S$$

当他励直流电动机接上电源时,电枢绕组流过电流,电源向电动机输入的电功率为

$$P_1 = UI = UI_a = (E_a + I_a R_a) I_a = E_a I_a + I_a^2 R_a = P_{em} + P_{Cu}$$

上式表明,输入的电功率有很小一部分被电枢绕组消耗(电枢铜耗),而大部分作为电磁功率转换成机械功率。

从上面的分析可知:当电动机转动时,还要克服各类摩擦引起的机械损耗、电枢铁心损耗及附加损耗,所以电磁功率转变出来的机械功率,一小部分消耗在机械损耗和铁心损耗上,大部分从电动机轴上输出,故电动机输出的机械功率为

$$P_2 = P_{em} - P_{Fe} - P_m - P_S$$

若忽略附加损耗,则输出机械功率为

$$\begin{aligned} P_2 &= P_{em} - P_{Fe} - P_m = P_{em} - P_0 \\ &= P_1 - P_{Cu} - P_0 \\ &= P_1 - \sum P \end{aligned}$$

则直流电动机的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} \times 100\%$$

一般中小型直流电动机的效率为 $75\% \sim 85\%$,大型直流电动机的效率为 $85\% \sim 94\%$ 。他励直流电动机的功率平衡关系可用功率流程图来表示,如图 1-15 所示。

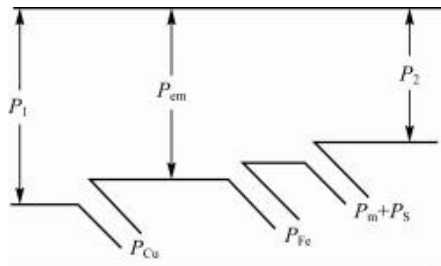


图 1-15 他励直流电动机的功率流程图

6. 转矩平衡方程式

经过上述分析可知,要使直流电动机处于稳定运行状态,即转速恒定,就必须使加在电动机轴上的所有转矩保持平衡。而电动机稳定运行时,作用在电动机轴上的转矩有三个:一个是电磁转矩 T ,方向与转速 n 相同,为拖动转矩或驱动转矩;一个是电动机空载损耗转矩 T_0 ,即电动机空载运行时的阻转矩,方向总与转速 n 方向相反,为制动转矩;还有一个是轴上所带生产机械的负载转矩 T_L ,即电动机轴上的输出转矩,也可视为制动转矩。因此可得电动机稳定运行时的转矩平衡关系式为拖动转矩等于总的制动转矩,即

$$T = T_L + T_0$$

由于空载转矩 T_0 的数值仅为电动机额定转矩的 $2\% \sim 5\%$,因此空载转矩在重载或额定负载下常忽略不计;而电动机轴上输出的机械转矩 T_2 与电动机轴上所带的负载转矩 T_L 相平衡,即 $T_2 = T_L$,则由 $T = T_2 + T_0$ 可得电动机输出转矩的常用计算公式为

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_2}{2\pi n/60} \approx 9.55 \frac{P_2}{n}$$

在额定情况下, $P_2 = P_N$, $T_2 = T_N$, $n = n_N$, 则

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$$



任务二 直流电动机的调速



任务分析

直流电动机的最大优点是具有线性的机械特性,调速性能优异,因此其被广泛应用于对调速性能要求较高的电气自动化系统中。要了解、分析和掌握直流电动机的调速方法,首先要掌握直流电动机的机械特性,了解生产机械的负载特性。直流电动机有三种不同的人为机械特性,所对应的就是三种不同性能的调速方法,分别应用于不同的场合。因此,熟悉机械特性是基础,掌握调速方法是目的。知道了各种调速方法的性能特点后,可以根据实际生产机械负载的工艺要求选择一种最合适的调速方法,发挥直流电动机的最大效益。



任务目标

- 熟悉他励直流电动机机械特性方程的表达式;
- 掌握他励直流电动机机械特性的特点;
- 了解生产机械的负载特性;
- 了解直流电动机稳定运行条件;
- 熟悉他励直流电动机调速的目的;
- 理解他励直流电动机调速指标的含义;
- 重点掌握直流电动机的三种调速方法;
- 学会直流电动机调速方法的操作。



知识链接

直流电动机的机械特性是指在稳定运行情况下,电动机的转速与电磁转矩之间的关系,即 $n=f(T)$ 。机械特性是电动机的主要特性,是分析电动机起动、调速、制动等问题的重要工具。下面以他励直流电动机为例讨论机械特性。

一、他励直流电动机的机械特性

1. 机械特性的一般表达式

他励直流电动机的电动势平衡方程为 $U=E_a+I_aR$ 。因为 $E_a=C_e\Phi n$,所以 $n=\frac{E_a}{C_e\Phi}$ 。根据 $T=C_T\Phi I_a$,得 $I_a=T/C_T\Phi$,可得机械特性方程为

$$n=\frac{U}{C_e\Phi}-\frac{R}{C_eC_T\Phi^2}T$$

当 U 、 R 、 Φ 的数值不变时(C_e 、 C_T 是由电动机结构决定的常数),转速 n 与电磁转矩 T 为线性关系。他励直流电动机的机械特性曲线如图 1-16 所示。

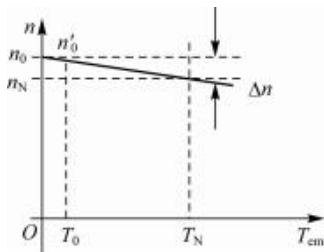


图 1-16 他励直流电动机的机械特性曲线

电动机的机械特性分为固有机械特性和人为机械特性。

2. 他励直流电动机的固有机械特性

电枢加额定电压、气隙每极磁通量为额定值、电枢回路不串联电阻时(即 $U=U_N$, $\Phi=\Phi_N$, $R=0$, R 是指人为附加的电阻)的机械特性称为固有机械特性(自然特性),其特性方程为

$$n=\frac{U_N}{C_e\Phi_N}-\frac{R_a}{C_eC_T\Phi_N^2}T$$

由于电枢绕组的电阻 R_a 阻值很小,因此 Δn 很小,固有机械特性为硬特性。

3. 他励直流电动机的人为机械特性

改变电压、电阻、磁通当中一个或几个就得到人为机械特性。他励直流电动机的人为机械特性有三种:电枢回路串电阻、改变电源电压、改变磁通。

1) 电枢回路串电阻的人为机械特性

保持 $U=U_N$ 、 $\Phi=\Phi_N$ 不变, 只在电枢回路中串入电阻 R_{pa} 的人为机械特性, 称为电枢回路串电阻的人为机械特性, 特性方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_{pa}}{C_e C_T \Phi_N^2} T$$

与固有机械特性相比, 电枢回路串电阻的人为机械特性的特点为: 理想空载转速 n_0 不变, 与固有机械特性相同; 由于电枢回路串入电阻, 斜率变大, 机械特性变软。图 1-17 所示是不同 R_{pa} 时的一组人为机械特性。观察特性曲线可知, 改变电阻 R_{pa} , 可使电动机的转速发生变化, 因此电枢回路串电阻的方法可以用于调速。

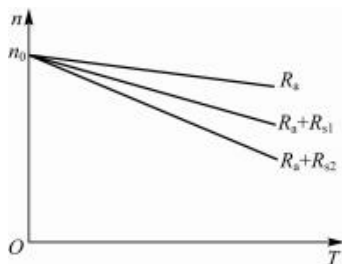


图 1-17 他励直流电动机电枢回路串电阻的人为机械特性

2) 改变电源电压的人为机械特性

当 $\Phi=\Phi_N$, 电枢回路不串接电阻, 即 $R_{pa}=0$, 改变电源电压的人为机械特性方程为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T$$

由于受到绝缘强度的限制, 电源电压只能从电动机额定电压 U_N 向下调节。

与固有机械特性相比, 改变电源电压的人为机械特性的特点为理想空载转速 n_0 正比于电压 U , U 下降时, n_0 成正比减小; 特性曲线斜率 β 不变。图 1-18 所示为改变电源电压的一组人为机械特性曲线, 它是一组平行直线。因此, 改变电源电压也可用于调速, U 越低, 转速越低。

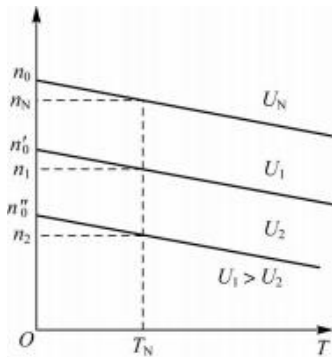


图 1-18 他励直流电动机改变电源电压的人为机械特性

3) 改变磁通的人为机械特性

保持电动机的电枢电压 $U=U_N$, 电枢回路不串电阻(即 $R_{pa}=0$)时, 改变磁通的人为机械特性方程式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T$$

由于电机设计时, Φ_N 处于磁化曲线的膝部, 接近饱和段, 因此, 磁通只可从 Φ_N 向下调节, 也就是调节励磁回路串接的可变电阻 R_{pf} 使其增大, 从而减小励磁电流 I_f , 减小磁通 Φ 。

与固有机械特性相比, 改变磁通的人为机械特性的特点是: 理想空载转速与磁通成反比, 减弱磁通 Φ , n_0 升高; 斜率 β 与磁通的平方成反比, 减弱磁通使斜率增大。

图 1-19 所示为一组减弱磁通的人为机械特性曲线。随着减弱 Φ , n_0 升高, 曲线斜率变大。若用于调速, 则 Φ 越小, 转速越高。

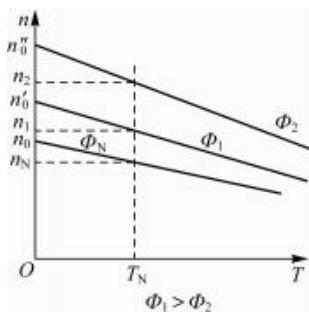


图 1-19 他励直流电动机减弱磁通的人为机械特性

二、生产机械的负载转矩特性

不同生产机械的负载转矩随转速的变化而变化的规律不同, 对此用负载转矩特性来表征, 即生产机械的转速与负载转矩之间的关系。各种生产机械的负载转矩特性大致可分为以下三类。

1. 恒转矩负载特性

恒转矩负载就是负载转矩的大小为一恒定值, 与转速的大小无关, 它包括反抗性恒转矩负载和位能性恒转矩负载两种。

1) 反抗性恒转矩负载

反抗性恒转矩负载的特点是: 负载转矩的大小不变, 而负载转矩的方向始终与生产运动的方向相反, 总是阻碍电动机运转; 当电动机的旋转方向改变时, 负载转矩的作用方向也随之改变, 永远是阻力矩; 特性曲线总在第一或第三象限, 如图 1-20 所示。具有这类特性的生产机械常见的有轧钢机、机床的平移机构和皮带运输机等。

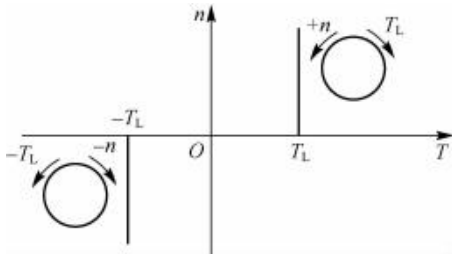


图 1-20 反抗性恒转矩负载的特性曲线

2) 位能性恒转矩负载

位能性恒转矩负载的特点是:负载转矩由重力作用产生,不论生产机械运动的方向是否发生改变,负载转矩的大小和方向始终不变。这种负载转矩特性曲线始终在第一或第四象限,如图 1-21 所示。例如,起重设备提升重物时,负载转矩为阻力矩,无论是提升重物还是下放重物,负载转矩的方向不变,但转速方向发生改变。

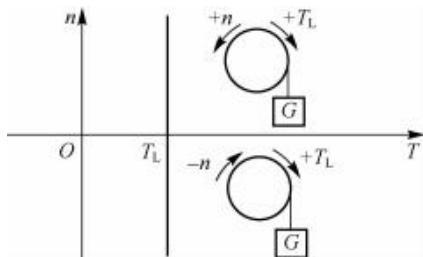


图 1-21 位能性恒转矩负载的特性曲线

2. 恒功率负载特性

恒功率负载的特点是:当转速变化时,负载从电动机吸收的功率为恒定值,此时的负载功率值为

$$P_L = T_L \Omega = T_L \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi}{60} T_L n = \text{常数}$$

可见,负载转矩与转速成反比。在实际中,一些机床切削加工,粗加工时,切削量大,切削阻力大,负载转矩大,用低速切削;精加工时,切削量小,切削阻力小,负载转矩小,用较高的速度切削。

恒功率负载的特性曲线如图 1-22 所示。

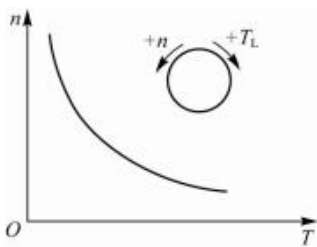


图 1-22 恒功率负载的特性曲线

3. 通风机型负载特性

通风机型负载的特点是:负载转矩的大小与转速的平方成正比,即

$$T_L = Kn^2$$

式中, K 为比例常数。

常见的通风机型负载有鼓风机、水泵、液压泵和油泵等,负载特性曲线如图 1-23 所示。

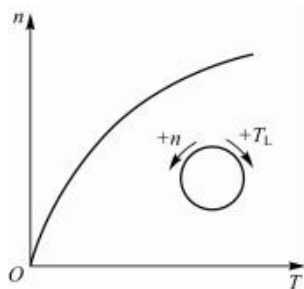


图 1-23 通风机型负载的特性曲线

以上是三类典型的负载特性,而实际生产机械的负载特性常为几种类型负载的综合。例如,起重设备提升重物时,电动机除受到位能性负载转矩外,还要克服系统机械摩擦所造成的反抗性负载转矩,所以电动机轴上的负载转矩应是上述两种负载转矩之和。

三、电力拖动系统的稳定运行

电力拖动系统是指由电动机拖动生产机械,并且通过传动机构带动生产机械完成一定工艺要求的系统。在电力拖动系统中,电动机作为原动机,生产机械作为负载,把电动机带动生产机械运转的方式称为电力拖动。电力拖动系统一般由电动机、生产机械的工作机构、传动机构、控制设备及电源五部分组成,如图 1-24 所示。

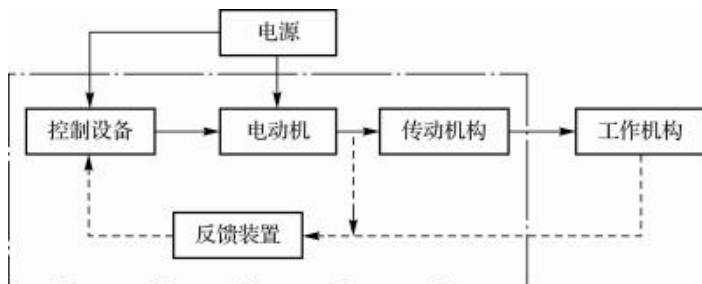


图 1-24 电力拖动系统的组成

电源为电动机和控制设备提供电能;电动机作为原动机,通过传动机构带动生产机械完成某一生产任务;控制设备是由各种控制电气元件、可编程控制器组成的,用以控制电动机的工作状态,从而实现对电动机的自动控制。常见的电力拖动系统有洗衣机、水泵、机床、电梯等。

稳定运行是指电力拖动系统在某种外界因素的扰动下,离开原来的平衡状态,当外界因素消失后,仍能恢复到原来的平衡状态,或在新的条件下达到新的平衡状态。此处的“扰动”一般指负载的微小变化或电网电压的波动。电动机在电力拖动系统中运行时,会使系统出现稳定运行和不稳定运行两种情况。

电力拖动系统是由电动机和生产机械负载构成的,为了分析方便,常把电动机的机械特性曲线和负载转矩特性曲线画在同一个坐标系中,如图 1-25 所示。当系统以转速 n_A 恒速

运行时,电动机的电磁转矩 T 与负载转矩 T_L 相等,称为静态或平衡状态。可见,只要两条特性曲线有交点,就是平衡状态,而平衡是否稳定则取决于两种特性是否配合。

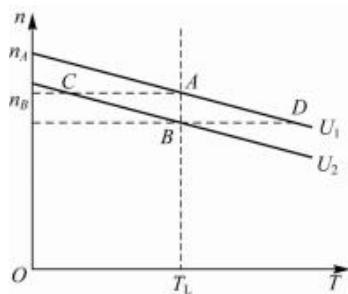


图 1-25 电源电压波动时的稳定运行

图 1-26 所示为他励直流电动机存在较强电枢反应时,其机械特性与恒转矩负载配合的情况。当电枢电流较大,即电磁转矩较大时,由于电枢反应的去磁作用较强,转速随转矩的增加而升高,机械特性上翘。此时,若电网电压从 U_1 波动至 U_2 ,瞬时转速 n_A 不能突变,电磁转矩突变为 T_B ,则有 $T_B > T_L$,使系统加速。

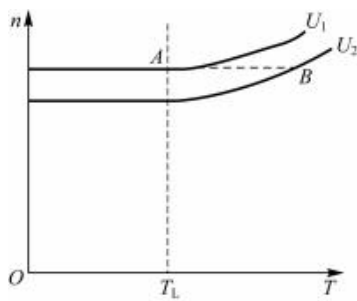


图 1-26 电力拖动系统的不稳定运行

当系统的转速增加到太高时,电枢电流太大,换向困难,电动机过热,机械强度不够,会使电动机毁坏,可见,A 点不是稳定运行点。

从上面对于是否稳定运行的分析可以看出,在电力拖动系统中,电动机的机械特性与负载转矩特性有交点,即 $T = T_L$,仅仅是系统稳定运行的必要条件。系统要稳定运行,还需要两种特性配合恰当。电力拖动系统稳定运行的充分必要条件是在 $T = T_L$ 处,有

$$\frac{dT}{dn} < \frac{dT_L}{dn}$$

对恒转矩负载,因为 $dT_L/dn = 0$,所以平衡稳定的充分必要条件是在 $T = T_L$ 处,有

$$\frac{dT}{dn} < 0$$

由以上分析可以得到:下斜的机械特性与恒转矩负载配合,系统能够稳定运行;上翘的机械特性与恒转矩负载配合,系统不能稳定运行。