

策划编辑 高小红  
责任编辑 龙 敏  
封面设计 墨创文化  
上架编码 PLC-00078

# 电机与电气控制技术应用 (FX5U PLC机型)

电机与电气控制技术应用(FX5U PLC机型)

主编 孟召琴 杜娟 王晋伟 陈根生

电子科技大学出版社

# 电机与电气控制技术应用 (FX5U PLC机型)

主编 孟召琴 杜娟 王晋伟 陈根生



定价: 52.80元

电子科技大学出版社  
University of Electronic Science and Technology of China Press

# 电机与电气控制技术应用

## (FX5U PLC机型)



主编 孟召琴 杜娟 王晋伟 陈根生



电子科技大学出版社

University of Electronic Science and Technology of China Press

· 成都 ·

图书在版编目(CIP)数据

电机与电气控制技术应用：FX5U PLC 机型 / 孟召琴  
等主编. -- 成都：成都电子科大出版社，2025. 12.

ISBN 978-7-5770-1954-3

I . TM3; TM921.5

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025ED1137 号

电机与电气控制技术应用 (FX5U PLC 机型)

DIANJI YU DIANQI KONGZHI JISHU YINGYONG (FX5U PLC JIXING)

孟召琴 杜娟 王晋伟 陈根生 主编

策划编辑 高小红

责任编辑 龙敏

责任校对 饶定飞

责任印制 梁硕

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 [www.uestcp.com.cn](http://www.uestcp.com.cn)

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 湖北鄂南新华印刷包装股份有限公司

成品尺寸 185 mm×260 mm

印 张 22

字 数 480 千字

版 次 2025 年 12 月第 1 版

印 次 2025 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5770-1954-3

定 价 52.80 元

版权所有，侵权必究

# 目 录 CONTENTS

↓ 绪论·····	1
↓ 项目一 直流电动机及其电气控制系统 ·····	9
任务 1 直流电动机的拆装与检测 ·····	10
1.1.1 直流电机的基本结构及工作原理 ·····	10
1.1.2 直流电动机的励磁方式及机械特性 ·····	15
任务 2 直流电动机的电气线路安装与调试 ·····	24
1.2.1 电力拖动系统概述 ·····	24
1.2.2 他励直流电动机的电气控制线路 ·····	27
↓ 项目二 变压器及其应用·····	42
任务 1 变压器的认知 ·····	43
2.1.1 单相变压器概述 ·····	44
2.1.2 三相电力变压器概述 ·····	55
任务 2 特种变压器及其应用 ·····	70
2.2.1 小功率电源变压器 ·····	70
2.2.2 自耦变压器 ·····	70
2.2.3 仪用互感器 ·····	74

## 项目三 单相交流电动机及其应用 ..... 82

### 任务 单相交流电动机的认知与应用 ..... 83

3.1.1 单相交流异步电动机概述 ..... 84

3.1.2 单相交流异步电动机的类型 ..... 87

3.1.3 单相交流异步电动机的电气控制 ..... 90

## 项目四 三相交流异步电动机的电气控制系统 ..... 97

### 任务 1 三相交流电动机的认知与检测 ..... 99

4.1.1 三相交流异步电动机的结构组成及工作原理 ..... 100

4.1.3 三相交流异步电动机的启动、调速、制动原理及方法 ..... 110

### 任务 2 三相交流异步电动机的全压启动电气线路分析 ..... 119

4.2.1 继电器控制系统概述 ..... 120

4.2.2 低压电器元件概述 ..... 123

4.2.3 全压启动继电器控制电路 ..... 138

### 任务 3 三相交流电动机的多地控制、顺序控制电气线路分析 ..... 169

4.3.1 时间继电器概述 ..... 170

4.3.2 三相交流异步电动机的继电器控制线路 ..... 171

### 任务 4 三相交流异步电动机的正反转控制电气线路分析 ..... 194

4.4.1 低压电器元件概述 ..... 194

4.4.2 三相交流异步电动机的正反转继电器控制电路 ..... 199

### 任务 5 三相交流异步电动机的降压启动电气线路分析 ..... 216

4.5.1 笼型三相交流异步电动机的继电器控制降压启动线路 ..... 217

4.5.2 绕线型三相交流异步电动机的降压启动控制线路 ..... 229

### 任务 6 三相交流异步电动机的变极调速电气线路分析 ..... 240

4.6.1 双速电动机概述 ..... 241

4.6.2 双速电动机继电器控制变极调速线路 ..... 242

**任务 7 三相交流异步电动机的变频调速电气线路分析 ..... 255**

4.7.1 变频器概述 ..... 256

4.7.2 变频器的应用 ..... 259

4.7.3 三相交流异步电动机的变转差率调速 ..... 260

**任务 8 三相交流异步电动机的制动电气线路分析 ..... 269**

4.8.1 机械制动概述 ..... 270

4.8.2 电气制动线路分析 ..... 272

**↓ 项目五 控制电动机的电气控制系统 ..... 288**

**任务 1 步进电动机的电气线路分析及应用 ..... 290**

5.1.1 步进电动机的结构组成及工作原理 ..... 290

5.1.2 步进电动机的电气控制系统应用 ..... 293

**任务 2 伺服电动机的电气线路分析 ..... 302**

5.2.1 伺服电动机概述 ..... 302

5.2.2 伺服电动机的电气控制系统应用 ..... 307

**↓ 项目六 常用生产机械的电气控制系统 ..... 317**

**任务 1 CA6140 型普通车床电气控制线路分析 ..... 319**

6.1.1 CA6140 型车床概述 ..... 319

6.1.2 CA6140 型车床电气控制系统分析 ..... 322

6.1.3 CA6140 型车床常见的电气故障的排除或检查 ..... 324

**任务 2 X62W 型万能铣床电气控制线路分析 ..... 329**

6.2.1 X62W 型万能铣床的结构及控制要求 ..... 330

6.2.2 X62W 型万能铣床的电气控制线路分析 ..... 331

6.2.3 X62W 型万能铣床的常见故障的检查与排除 ..... 336

**参考文献 ..... 342**

# 项目一

## 直流电动机及其电气控制系统



### 项目导入



直流电动机因其调速性能优异、启动转矩大和控制简单等特点，广泛应用于工业自动化、交通运输、家用电器等领域。随着工业 4.0 和智能制造的推进，其对直流电动机的控制精度、响应速度和能效要求越来越高。因此，深入了解直流电动机的基本结构、工作原理、机械特性以及运行特性等基础知识，对提升设备性能和实现智能化控制具有重要意义。本项目旨在通过理论与实践相结合，让学生掌握直流电动机的结构组成及工作原理、控制方法和应用场景，并完成实际应用系统——调速风扇控制系统的安装与测试。

### 学习目标



#### 知识目标

- (1) 学习直流电动机的基本结构（定子、转子、电刷、换向器）和工作原理（电磁感应与转矩生成）。
- (2) 了解直流电动机的励磁方式，了解常见的负载特性。
- (3) 理解直流电动机的机械特性，掌握直流电动机拖动的系统稳定运行的条件。
- (4) 掌握直流电动机的启动、调速及制动方法和保护机制（如过流、过热保护）。

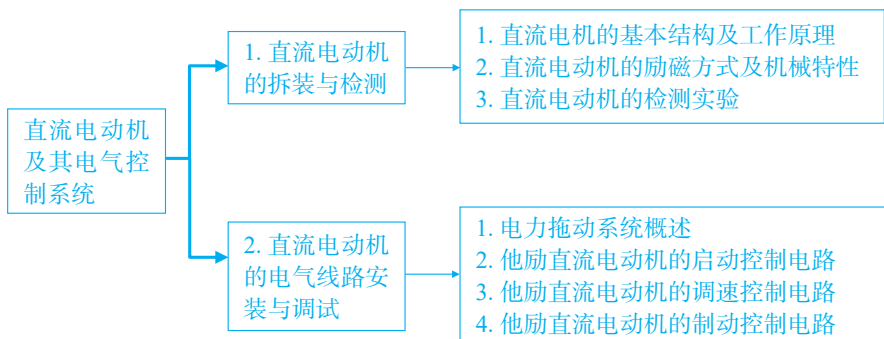
#### 能力目标

- (1) 能正确分析直流电动机调速线路的原理。
- (2) 能正确拆装、检测直流电动机。

#### 素养目标

- (1) 培养刻苦勤奋、诚实守信、持之以恒的学习态度。
- (2) 了解国内外直流电动机的发展历史，增强为国效力的信念，激发行业热情。

## 任务分解



## 任务 1 直流电动机的拆装与检测

### 任务引入

直流电动机是将直流电能转化为机械能的装置，由定子和转子组成，利用电磁感应原理工作。它具有运行可靠、驱动转矩大、调速性能好等优点，广泛应用于工业、农业、交通等领域，是现代生产生活中不可或缺的动力设备。在某工厂的车间里，控制某设备运行的直流电动机出现异常，设备无法完成正常的驱动工作。本任务要求大家拆装电动机，熟知其结构，检测其性能参数，找出故障并进行维修。我们应该怎么做呢？

### 知识链接

直流电动机是指输入直流电能，输出机械能的旋转机械。直流发电机是指输入机械能，输出直流电能的旋转机械。两者的结构完全相同，都是由定子和转子两部分组成。

#### 1.1.1 直流电机的基本结构及工作原理

##### 一、直流电机的结构

直流电机的外观和结构如图 1-1-1 所示。它是由定子部分和转子部分组成的。

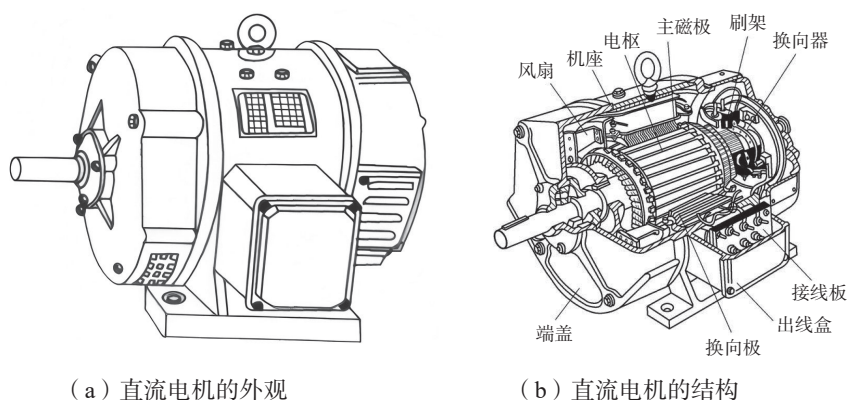


图 1-1-1 直流电机的外观和结构

### 1. 定子部分

直流电机的定子部分就是固定不动的部分，主要由主磁极、机座、换向极、电刷装置和端盖等组成。其各部分的结构放置如图 1-1-2 所示。

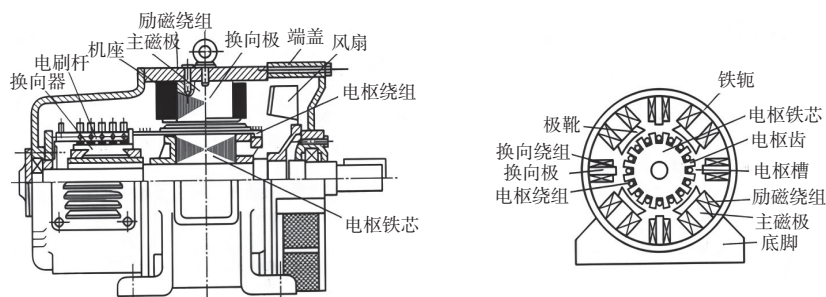


图 1-1-2 直流电机的定子的结构

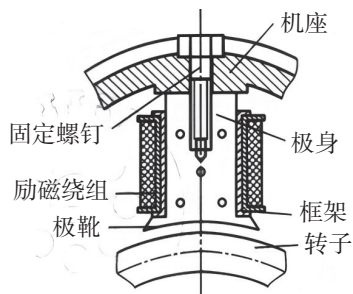
主磁极由主磁极铁芯和放置在铁芯上的励磁绕组构成，结构如图 1-1-3 所示。为减小涡流损耗，主磁极铁芯是用  $1.0 \sim 1.5 \text{ mm}$  厚的低碳钢板冲成一定形状，再用铆钉把冲片铆紧，然后固定在机座上形成的。主磁极铁芯分成极身和极靴。极靴的作用是使气隙磁通密度的空间分布均匀并减小气隙磁阻，同时对励磁绕组起支撑作用。主磁极上的线圈是用来产生主磁通的，称为励磁绕组。当给励磁绕组通入直流电时，各主磁极均产生一定极性，相邻两主磁极的极性是 N、S 极交替出现的。因此主磁极的作用是产生恒定、有一定空间分布形状的气隙磁通密度。

机座是电动机的外壳部分，一般直流电机均采用整体机座，整体机座是用导磁效果较好的铸钢材料制成的，能同时起到导磁和机械支撑作用。由于机座起导磁作用，因此机座是主磁路的一部分，称为定子铁轭。主磁极、换向极及端盖均固定在机座上。

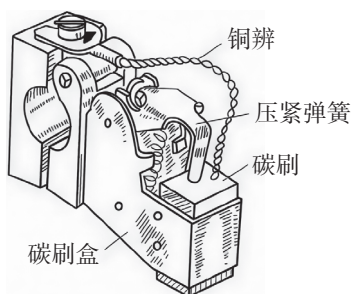
换向极安装在相邻的两主磁极之间，用来改善直流电机的换向性能。通常，电机容量超过  $1 \text{ kW}$  时均应安装换向极。换向极也是由铁芯和绕组组成的。换向极铁

芯一般用整块钢板制成,在其上放置换向极绕组。

电刷装置是直流电机的重要组成部分,其结构如图 1-1-4 所示。通过电刷可以把电机电枢中的电流与外部静止电路相连,也就是把外部电源与电机电枢相连。电刷装置与换向片一起完成机械整流,把电枢中的交变电流变成电刷上的直流或把外部电路中的直流变换为电枢中的交流。



1-1-3 主磁极的结构图



1-1-4 电刷装置的结构

电机中的端盖主要起封闭、支撑作用。端盖固定于机座上,其上放置轴承,支撑直流电机的转轴,使直流电机能够旋转。

## 2. 转子部分

直流电机的转子部分主要由电枢铁芯、电枢绕组、换向器等部分组成,如图 1-1-5 所示。

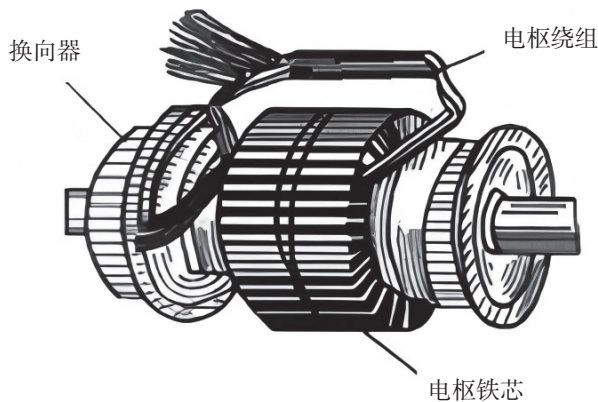
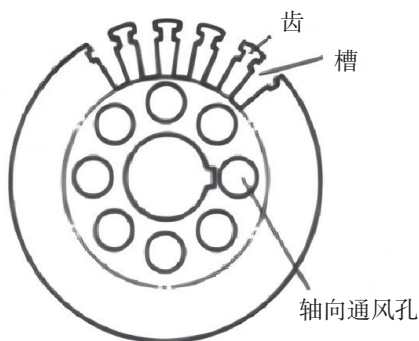


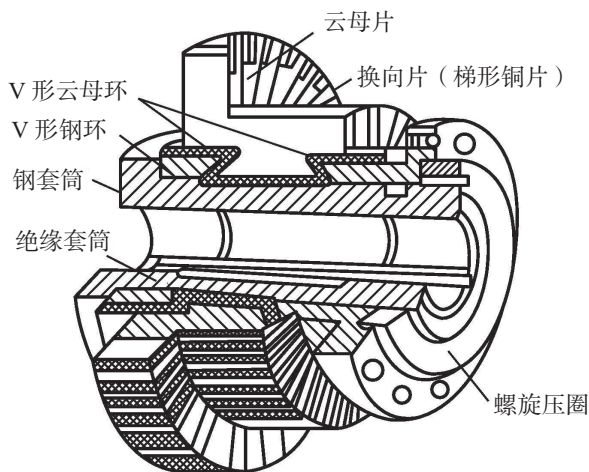
图 1-1-5 转子的结构

直流电机的转子是电机的转动部分,又叫电枢。电枢铁芯是主磁路的一部分,同时对放置在其上的电枢绕组起支撑作用。电枢铁芯通常用 0.5 mm 厚的低碳硅钢片或冷轧硅钢片冲压成如图 1-1-6 所示的形状,并在硅钢片的两侧涂绝缘漆。硅钢片上冲出的转子槽用来放置电枢绕组。



电枢绕组是由带绝缘的导体绕制而成的。对于小型电机，常采用铜导线绕制；对于大中型电机，常采用成型线圈。在电机中，每一个线圈称为一个元件，多个元件有规律地连接起来形成电枢绕组。绕制好的绕组或成型绕组放置在电枢铁芯上的槽内，放置在铁芯槽内的直线部分在电机运转时将产生感应电动势，称为元件的有效部分；在电枢槽两端把有效部分连接起来的部分称为端接部分，端接部分仅起连接作用，在电机运行过程中不产生感应电动势。

换向器是由换向片组合而成的，其结构如图 1-1-7 所示。换向器是直流电机的关键部件，也是最薄弱的部分。换向器采用导电性能好、硬度大、耐磨性能好的紫铜或铜合金制成，相邻的两片换向片间以 0.6~1.2 mm 的云母片作为绝缘。换向器固定在转轴的一端，换向片靠近电枢绕组一端的部分与绕组引出线相焊接。换向器又称“整流子”，对于发电机，换向器的作用是把电枢绕组中的交变电动势转变为直流电动势向外部输出直流电压；对于电动机，换向器的作用是把外界供给的直流电流转变为绕组中的交变电流以使电机旋转。



## 二、直流电机的工作原理

### 1. 直流发电机的工作原理

直流发电机的工作原理示意图如图 1-1-8 所示, 其定子绕组通电时会产生一个恒定的磁场, 图 1-1-8 中用蹄形磁体表示定子绕组。

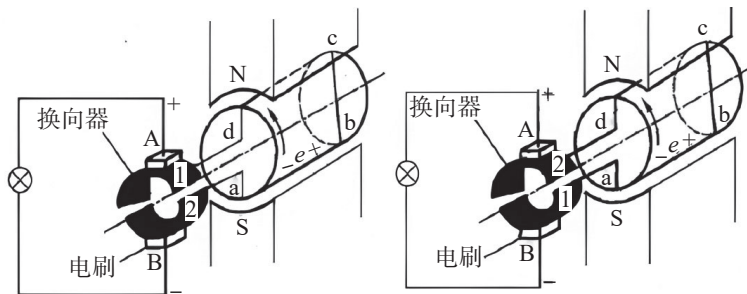


图 1-1-8 直流发电机的工作原理示意图

如果在电刷的两端接一个负载, 如指示灯, 那么负载就和内部转子元件一起形成了闭合回路。当外力驱动电枢旋转时, 电枢元件在一周内切割磁感线的方向发生变化, 电枢元件切割磁感线产生交变的感应电流或感应电动势, 使灯发光。由于电刷 A 始终与转到 N 极下的线圈边所连接的换向片 1 接触, 电刷 B 始终与转到 S 极上的线圈边所连接的换向片 2 接触, 因此电刷 A 的极性总为正, 电刷 B 的极性总为负, 在电刷两端可获得直流电动势。决定感应电动势方向的因素有两个: 一是电枢元件的运动方向 (电枢转向), 二是主磁极磁场的极性。所以, 改变磁场的极性也可使直流发电机电刷两端输出的电动势极性改变。

### 2. 直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理示意图如图 1-1-9 所示, 其定子绕组通电时会产生一个恒定的磁场, 图 1-1-9 中用蹄形磁体表示定子绕组。

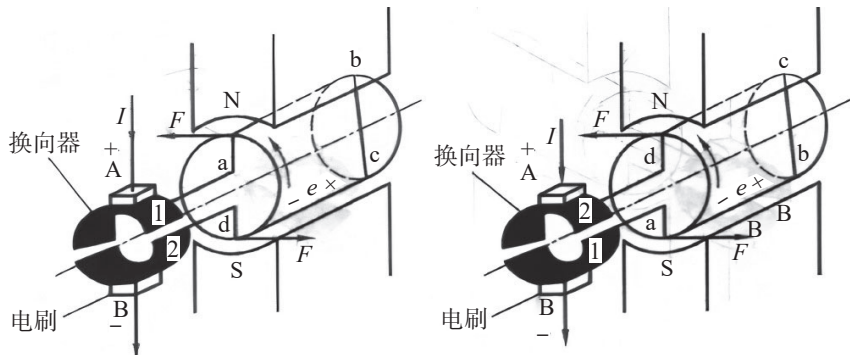


图 1-1-9 直流电动机的工作原理

如果在电刷的两端接一个直流电源, 那么直流电源就和内部转子元件一起形成

了闭合回路，内部电枢元件上就有电流流过。电流受到定子磁场对它的作用力，驱动电枢旋转。电枢旋转时，由于外接电源连接在电刷上的电流方向固定不变，电刷 A 始终与转到 N 极下的线圈边所连接的换向片 1 接触，电刷 B 始终与转到 S 极上的线圈边所连接的换向片 2 接触，因此电刷 A 的极性总为正，电刷 B 的极性总为负，与电刷 A 连接的是电枢元件的电流流入端，与电刷 B 连接的是电枢元件的电流流出端。电枢元件在旋转时位置发生变化，使得换向片与电刷的连接发生变化，电磁转矩不会改变方向。因此，电枢会沿一个方向连续输出机械能。

### 3. 直流发电机和直流电动机的异同

电磁力的方向取决于磁场极性和导体中电流的方向，所以直流电动机获得反转的方法有两个：一是改变磁场极性；二是改变电源电压的极性，使流过导体的电流方向改变。应注意，二者只能改变其一，否则，直流电动机的转向不变。

直流发电机和直流电动机模型的结构完全相同，但工作原理不同。直流发电机的电磁转矩阻碍发电机旋转，是制动转矩。所以，原动机必须用足够大的拖动转矩来克服电磁转矩的制动作用。此时发电机从原动机吸取机械能，转换成电能向负载输出，这就是发电机的运行状态。给直流电动机的电枢绕组通入直流信号时，转子旋转导体 ab 和 cd 切割磁感线，产生感应电动势，由楞次定理可知感应电动势方向与电流方向相反。这就意味着，此电枢电动势是一反电动势，它阻碍电流流入电动机。所以，直流电动机要正常工作，就必须施加足够大的直流电源以克服反电动势的阻碍作用，电流送入电动机。这时电动机从直流电源吸取电能，转换成机械能输出。这就是电动机的运行状态。两种状态同时存在，我们把这一特性称为电机的可逆原理。电机最终的运行状态取决于它的外界条件。

## 1.1.2 直流电动机的励磁方式及机械特性

### 一、直流电动机的励磁方式

直流电动机的电枢绕组和励磁绕组的连接方式不同，产生的合成磁场也不同。根据励磁绕组与电枢绕组的连接关系不同，直流电动机的励磁方式分为他励、并励、串励和复励 4 种，如图 1-1-10 所示。

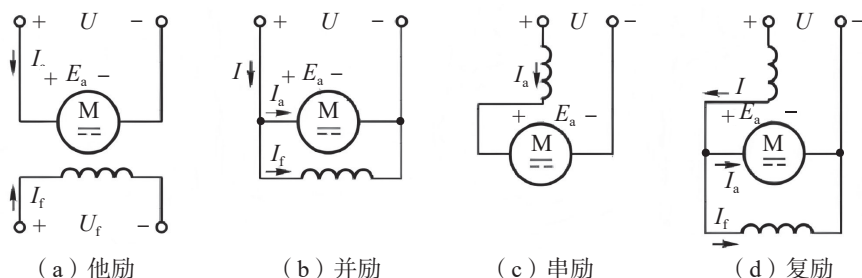


图 1-1-10 直流电动机的励磁方式

他励结构的励磁绕组由独立电源供电，与电枢绕组无直接电气连接。其特点是励磁电流可独立调节，调速范围宽，机械特性硬（转速随负载变化小）。他励结构的励磁绕组适用于需要精确控制转速和转矩的场合，如机床、伺服系统。

并励结构的励磁绕组与电枢绕组并联，共用同一电源。其特点是转速稳定性高，负载变化时转速波动较小；若励磁回路断开，可能导致“飞车”。并励结构常用于恒速运行的设备或宽调速场景，如风机、泵类。

串励结构的励磁绕组与电枢绕组串联，通过的电流相等。其特点是以牺牲转速稳定性换取高启动能力，启动转矩大，机械特性软（转速随负载增大急剧下降），禁止空载运行（空载转速过高）。串励结构的励磁绕组适用于需要高启动转矩的场景，如起重机、电力机车。

复励结构下，部分励磁绕组与电枢绕组串联，部分励磁绕组与电枢绕组并联。复励结构的励磁绕组同时包含并励绕组和串励绕组，分为积复励（磁场叠加）绕组和差复励（磁场抵消）绕组。复励综合了并励的稳定性和串励的高启动转矩，机械特性介于两者之间。积复励常见于需要兼顾启动与稳定运行的设备，如轧钢机、电梯。

励磁方式的选择取决于负载特性、调速需求及运行环境，是直流电动机多样化应用的核心基础。下面以他励直流电动机为例来学习它的机械特性。

## 二、他励直流电动机的机械特性

如图 1-1-11 所示为他励直流电动机的主电路。他励直流电动机的机械特性描述的是电动机转速  $n$  与输出转矩  $T$  之间的静态关系，是分析其运行性能的核心依据。其特性可通过理论公式与实验曲线相结合的方式深入解析，具体如下。

### 1. 固有机械特性方程与曲线

机械特性方程由电动机的基本电磁关系导出。根据电枢回路电压平衡方程  $U = E + I_a * R_a$ ；（ $U$  为电枢电压， $E = k\phi n$  为反电动势， $I_a$  为电枢电流， $R_a$  为电枢回路总电阻）及电磁转矩公式  $T = k\phi I_a$ ，可推导出转速与转矩的关系：

$$n = \frac{U}{k\phi} - \frac{R_a * T}{(k\phi)^2}$$

式中，系数  $k$  是和电动机的定子、转子结构相关的参数，它是一个常数。

这样，我们可以将转速与转矩的关系式转换为

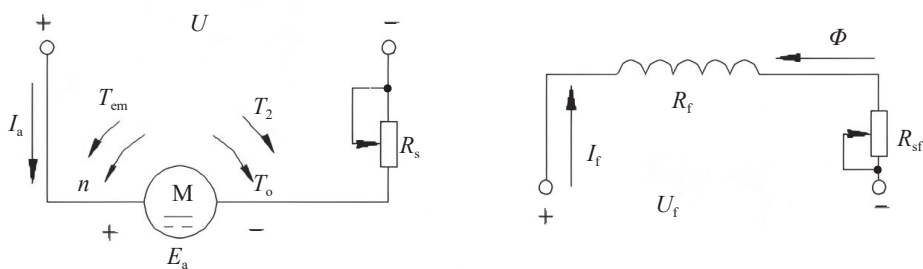


图 1-1-11 他励直流电动机的主电路

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T_{em} = n_0 - \beta T_{em} = n_0 - \Delta n$$

式中,  $C_e$  为电动势参数, 与电枢线圈绕制有关;  $C_T$  为电磁转矩常数, 与电动机结构有关;  $\Phi$  为励磁磁通;  $T_{em}$  为电磁转矩;  $\Delta n$  为转速降;  $n_0$  为理想空载转速;  $\beta$  为机械特性的斜率。该式表明, 机械特性曲线为一条向下倾斜的直线, 其截距为理想空载转速  $n_0 = U/k\Phi$ , 实际转速随负载转矩增大线性下降, 斜率由  $R_a/(k\Phi)^2$  决定, 由于电枢绕组的阻值非常小, 所以斜率很小, 直线比较接近水平线。特性曲线的“硬度”(转速随负载变化的敏感度) 取决于电枢电阻  $R_a$  和磁通  $\Phi$ 。他励电动机因  $R_a$  较小且  $\Phi$  独立可控, 通常呈现硬特性(负载变化时转速波动小)。电动机自身所固有的机械特性是在电枢电压、励磁磁通为额定值, 且电枢回路不外串电阻时的机械特性, 其  $U$ 、 $\Phi$ 、 $R_a$  均为常量。该式变为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T_{em}$$

描点得出他励直流电动机的机械特性曲线如图 1-1-12 所示。

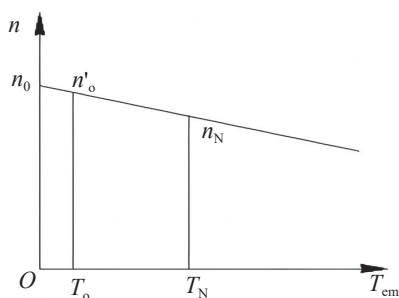


图 1-1-12 他励直流电动机的固有机械特性曲线

这条线描述的机械特性被称为电动机的固有机械特性。因为电枢电阻  $R_a$  很小, 固有机械特性的斜率  $\beta$  很小, 所以他励直流电动机的固有机械特性是硬特性。

## 2. 人为机械特性

调节  $U$ 、 $R$ 、 $\Phi$  等参数后得到的机械特性被称为人为机械特性。

### (1) 电枢回路串联电阻时的人为机械特性

保持  $U=U_N$ 、 $\Phi=\Phi_N$  不变, 只在电枢回路中串联接入电阻  $R_s$  时的人为机械特性方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_s}{C_e C_T \Phi_N^2} T_{em}$$

电枢回路串联电阻  $R_{s1}$  时的人为机械特性曲线如图 1-1-13 所示。

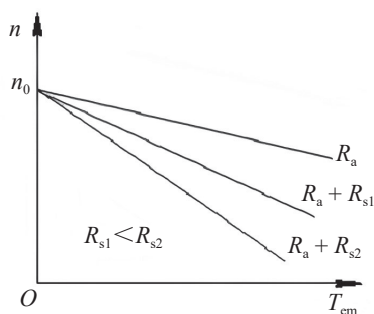


图 1-1-13 电枢回路串联电阻时的人为机械特性曲线

其特点是理想空载转速  $n_0$  不变, 但斜率  $\beta$  随串联电阻  $R_s$  的增大而增大, 所以特性变软。改变  $R_s$  的大小, 可以得到一组通过理想空载点  $n_0$  并具有不同斜率的人为特性曲线。

### (2) 降低电枢电压时的人为机械特性

保持  $\Phi=\Phi_N$ 、 $R=R_a$  不变, 只改变电枢电压  $U$  时的人为机械特性方程为

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

降低电枢电压  $U$  时的人为机械特性曲线如图 1-1-14 所示。

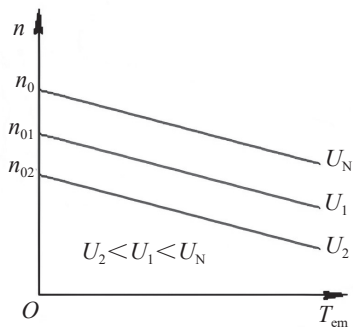


图 1-1-14 降低电枢电压时的人为机械特性曲线

其特点为斜率 $\beta$ 不变,但理想空载转速 $n_0$ 随电压的降低而成正比地减小。降低电压时的人为机械特性曲线是位于固有机械特性曲线下方,且与固有机械特性平行的一组直线。

### (3) 减弱励磁磁通时的人为机械特性

保持 $R=R_a$ 、 $U=U_N$ 不变,只减弱磁通 $\Phi$ 时的人为机械特性方程为

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

减弱励磁磁通时的人为机械特性曲线如图 1-1-15 所示。

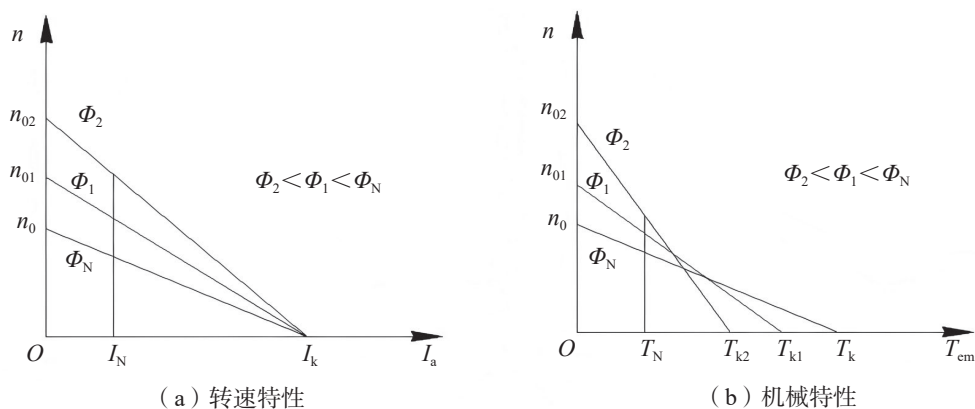


图 1-1-15 减弱励磁磁通时的人为机械特性

其特点是斜率 $\beta$ 和理想空载转速 $n_0$ 都随励磁电压的降低而增加,曲线斜率变大,截距也变大。

## 任务实施



### 1. 工具与仪表准备

#### (1) 工具

①扳手:如活动扳手、呆扳手等,用于拆卸和安装电动机的螺栓、螺母,包括地脚螺栓、端盖螺栓等。

②螺丝刀:有一字螺丝刀和十字螺丝刀,用来拆卸电动机接线盒的螺丝以及一些小型固定件。

③拉马:当需要拆卸电动机的皮带轮、联轴器或轴承时,拉马能方便地将其从轴上拉出。

④锤子:辅助拆卸一些紧配合的部件,要注意敲击力度,避免损坏部件,通常配合铜棒使用,防止敲伤电动机轴等关键部位。

⑤铜棒：在敲击部件时垫在部件与被敲击处之间，起到缓冲保护作用，如拆卸轴承时可保护轴。

（2）仪表

①万用表：可测量电动机绕组的电阻值，判断是否存在开路、短路情况，还能初步检测绕组与外壳间的绝缘电阻。

②兆欧表（绝缘电阻测试仪）：精确测量电动机绕组与绕组、绕组与外壳之间的绝缘电阻，准确反映绝缘性能。

③钳形电流表：在不切断电路的情况下测量电动机运行时的电流大小，判断是否过载等。

④转速表：用于测量电动机的实际转速，对比额定转速可分析转速异常情况。

⑤示波器：在复杂检测场景下，观察电动机启动、运行过程中的电压、电流波形变化，辅助排查故障。

⑥振动测试仪：检测电动机运行时的振动幅度和频率，以判断是否存在机械不平衡、轴承磨损等问题。

2. 操作步骤

①将准备好的拆装工具填入表 1-1-1 中。

表 1-1-1 拆装工具清单

序号	名称	型号	功能

②拆卸直流电动机，熟悉其内部结构，检修内部绕组。列出直流电动机的基本组成部件，填入表 1-1-2 中。

表 1-1-2 拆卸零件清单

序号	名称	型号	功能

③装配直流电动机。

④检测直流电动机的绕组电阻、绕组绝缘状况，检测性能参数是否达到要求。

## 任务评价



表 1-1-3 任务评价表

序号	评价内容	配分 / 分	评分标准	得分 / 分
1	拆卸前的准备	10	所需工具、仪表及材料未准备好,扣 2~5 分;外壳的清理未做好,扣 1~3 分	
2	拆卸	40	(1) 拆卸方法和步骤不正确,扣 2 分 / 次; (2) 碰伤绕组,扣 2~6 分; (3) 损坏零件,扣 2 分 / 次	
3	装配	30	(1) 装配标记不清楚,扣 2 分 / 处; (2) 装配步骤方法错误,扣 2 分 / 次; (3) 损坏零件,扣 2 分 / 次; (4) 轴承清洗不干净,加润滑油不适量,扣 3 分 / 只; (5) 紧固螺钉未紧,扣 1 分 / 只; (6) 装配后转动不灵活,扣 2~5 分	
4	检测	10	(1) 空载试验方法不正确,扣 2 分; (2) 绕组阻值不正确,扣 5~10 分	
5	安全操作规程	5	符合要求得 5 分,基本符合要求得 3 分,一般情况得 1 分(有严重违规可以一项否决,如不听劝阻,可终止操作)	
6	工具、耗材、工位整洁	5	(1) 根据情况,符合要求得 3 分,有 2 处错得 1 分,2 处以上错得 0 分; (2) 根据情况,做到得 2 分,未做到扣 2 分	
总分		100	合计	

## 练习巩固



## 一、选择题

- 直流电动机的定子部分主要用于 ( )
  - 产生旋转磁场
  - 提供机械支撑
  - 传导电流
  - 改变电流方向
- 换向器的作用是 ( )
  - 固定电枢绕组
  - 改变电枢电流方向
  - 增强磁场强度
  - 降低转速
- 电枢绕组位于直流电动机的 ( )
  - 定子
  - 转子
  - 电刷
  - 磁极



4. 直流电动机的励磁方式中, 励磁绕组与电枢绕组并联的是 ( )  
A. 他励                      B. 并励                      C. 串励                      D. 复励
5. 直流电动机的机械特性曲线描述的是 ( )  
A. 电压与电流的关系                      B. 转速与转矩的关系  
C. 效率与负载的关系                      D. 功率与转速的关系
6. 电刷与换向器的接触电阻过大会导致 ( )  
A. 转速升高                      B. 火花增大                      C. 效率提高                      D. 转矩减小
7. 直流电动机启动时, 通常需要限制 ( )  
A. 电压                      B. 电流                      C. 励磁                      D. 转速
8. 他励直流电动机的励磁电流由 ( )  
A. 电枢电压提供                      B. 独立电源提供                      C. 负载决定                      D. 换向器控制
9. 直流电动机的机械特性曲线的斜率主要取决于 ( )  
A. 电枢电阻                      B. 励磁电流                      C. 负载转矩                      D. 电源电压
10. 可以使直流电动机反转的方法是 ( )  
A. 改变电源极性                      B. 调换励磁绕组接线  
C. 同时调换电枢和励磁绕组接线                      D. 仅调换电枢绕组接线
11. 换向极的作用是 ( )  
A. 增强主磁场                      B. 改善换向过程                      C. 提高效率                      D. 增加转矩
12. 若直流电动机负载增大, 则电枢电流会 ( )  
A. 不变                      B. 减小                      C. 增大                      D. 先增后减
13. 直流电动机的额定转速是指 ( )  
A. 空载转速                      B. 满载转速                      C. 最高转速                      D. 最低转速
14. 电枢反应会导致 ( )  
A. 磁场增强                      B. 磁场畸变                      C. 换向器损坏                      D. 转速波动

## 二、判断题

1. 换向器的作用是固定电枢绕组。 ( )
2. 并励电动机的励磁电流与电枢电流无关。 ( )
3. 串励电动机适合用于需要恒定转速的场合。 ( )
4. 直流电动机的机械特性仅由电枢电阻决定。 ( )
5. 电刷的材料通常为高电阻合金。 ( )
6. 他励电动机的励磁绕组由独立电源供电。 ( )
7. 直流电动机的转速与电枢电压成正比。 ( )
8. 电枢反应会削弱主磁场强度。 ( )
9. 直流电动机的电磁转矩与电枢电流成反比。 ( )

### 三、简答题

1. 简述直流电动机的主要结构及其作用。
2. 直流电动机的电磁转矩是如何产生的？
3. 什么是电枢反应？它对直流电动机的运行有何影响？

#### 拓展视野



直流电动机因其调速性能优、启动力矩大等特点，在工业、交通、机器人等领域持续焕发活力。随着新材料、电力电子和智能控制技术的发展，直流电动机的前沿研究方向主要体现在以下几个方面。

#### 1. 高效节能与永磁材料革新

高性能永磁体：稀土永磁材料（如钕铁硼）的优化大幅提升了电动机功率密度和效率。而新型无稀土永磁材料（如铁氮化合物）的研究旨在降低成本并减少对稀土资源的依赖。

损耗控制技术：通过改进绕组工艺（如扁线绕组）、优化磁路设计，来降低铁损与铜损，提升电机效率至 IE4/IE5 超高效等级。

#### 2. 智能化与数字化控制

先进控制算法：结合人工智能与机器学习，实现电机状态监测、故障预测及自适应调速。例如，基于神经网络的参数辨识可实时优化控制策略。

物联网（IoT）集成：通过嵌入式传感器与云端数据交互，构建直流电动机的数字孪生模型，支持远程运维和能效管理。

#### 3. 宽禁带半导体器件驱动

碳化硅（SiC）与氮化镓（GaN）：高频、高温特性的宽禁带器件应用于电机驱动电路，可显著提高开关频率，减少谐波损耗，缩小系统体积，适用于电动汽车等高动态场景。

#### 4. 新型电机拓扑结构

无刷直流电机（BLDC）：结合电子换向技术，取消机械电刷与换向器，提升电动机的可靠性并降低其维护成本，在无人机、家电领域应用广泛。

轴向磁通电机：采用盘式结构，功率密度较传统径向电机提升 30% 以上，适用于空间受限的机器人关节或混合动力汽车。

#### 5. 特种应用场景创新

极端环境适应性：针对航空航天、深海探测等场景，开发耐高温、抗辐射、防腐蚀的直流电动机，例如采用陶瓷绝缘材料或真空封装技术。

微型化与柔性化：基于微机电系统（MEMS）工艺的微型直流电动机（直径 < 1 mm）可用于医疗微创器械，柔性电机则通过可变形结构来满足仿生机器人的需求。

## 6. 再生能源与储能系统结合

双向能量流动：在电动汽车或储能系统中，直流电机可作为发电机运行，通过回馈制动回收动能，提升能源利用效率。

直流电动机的发展将面临以下挑战：永磁材料的成本与可持续性之间的矛盾，高频驱动下的电磁兼容性问题，复杂工况下控制算法的实时性与鲁棒性需求问题。通过多学科交叉（材料科学、电力电子、控制理论）与工程实践结合，直流电动机仍将是现代能源转换系统的核心组件之一。

## 任务2 直流电动机的电气线路安装与调试

### 任务引入

直流电动机的电气线路安装与调试是确保其安全高效运行的关键环节，涉及电源匹配、线路连接、控制逻辑实现及参数校准等核心任务。本任务要求依据电机铭牌参数（额定电压、电流、功率）匹配电源与保护装置（断路器、熔断器），正确接线并接地，避免短路、过载或漏电风险；验证电枢回路、励磁回路，确保启动、调速、制动功能正常。

### 知识链接

#### 1.2.1 电力拖动系统概述

##### 一、电力拖动系统的三种工作状态

如图 1-2-1 所示，将直流电动机连接到某一负载系统中，电枢绕组通电时，电磁转矩  $T_{em}$  驱动负载系统加速运行，负载系统给电枢阻碍转动的负载转矩  $T_L$ ，当两者平衡时速度达到额定转速，系统将匀速正常工作。在此过程中，电动机的电磁转矩  $T_{em}$  通常与转速  $n$  同方向，是驱动性质的转矩；负载转矩  $T_L$  通常是制动性质的。

一般规定，电动机处于电动工作状态时的旋转方向为转速  $n$  的正方向。电磁转矩  $T_{em}$  与转速  $n$  的正方向相同时为正，相反时为负；负载转矩  $T_L$  与转速  $n$  的正方向相反时为正，相同时为负。如果忽略电动机的空载转矩  $T_0$ ，那么当  $T_{em}=T_L$  时，电动系统处于静止或匀速运行状态，即稳定运行状态；当  $T_{em}>T_L$  时，电动系统处于加

速运行状态，即瞬时状态；当  $T_{em} < T_L$  时，电动系统处于减速运行状态，也是瞬时状态。

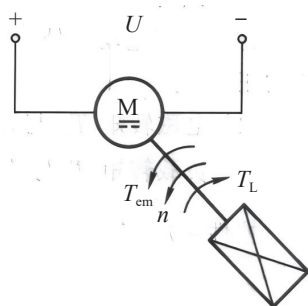


图 1-2-1 电力拖动系统

## 二、负载特性

要了解电动系统的运动规律，就必须了解电动机的机械特性  $n=f(T_{em})$  及负载特性  $n=f(T_L)$ ，然后根据两者之间的关系决定电力拖动系统的工作状态。

### 1. 恒转矩负载特性

恒转矩负载反抗性恒转矩负载和位能性恒转矩负载两种，其负载曲线如图 1-2-2 所示。

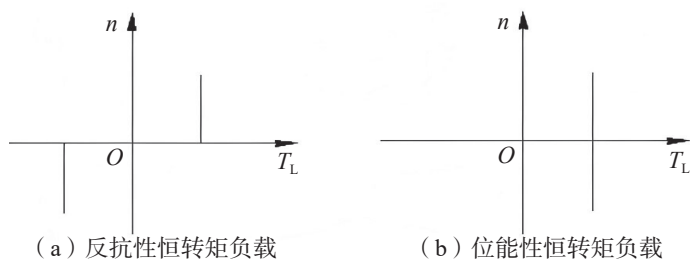


图 1-2-2 负载曲线

#### (1) 反抗性恒转矩负载

反抗性恒转矩负载是指负载转矩的大小恒定不变，方向总是与转速的方向相反，即负载转矩的性质总是起阻碍运动作用。

#### (2) 位能性恒转矩负载

位能性恒转矩负载是指负载转矩的大小恒定不变，且负载转矩的方向也不变。

### 2. 恒功率负载特性

恒功率负载曲线如图 1-2-3 所示。其特点是负载转矩与转速的乘积为一常数，即负载功率  $P_L = T_L n = \text{常数}$ ，负载转矩  $T_L$  与转速  $n$  成反比。

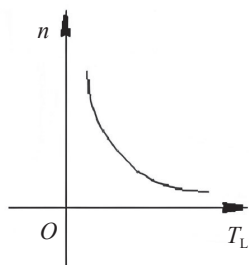


图 1-2-3 恒功率负载特性曲线

### 3. 泵与风机类负载特性

水泵、油泵、通风机和风扇等机械的负载转矩基本上与转速的平方成正比。风机类负载的特性曲线如图 1-2-4 所示。

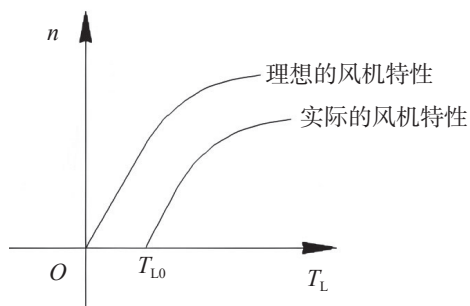


图 1-2-4 风机类负载特性曲线

## 三、电力拖动系统稳定运行的条件

我们将电磁转矩图线和负载转矩图线绘制在同一坐标系中, 如图 1-2-5 所示。图 1-2-5 (a) 系统中, 速度可以稳定在 A 点, 图 1-2-5 (b) 所示系统中, 速度不能稳定在 B 点。

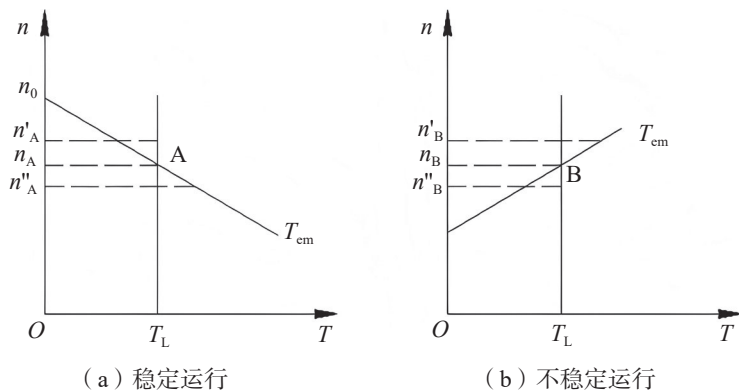


图 1-2-5 系统稳定运行情况分析

系统要稳定, 首先必须满足系统受力平衡。因此驱动电动机的机械特性与负载特性必须有交点, 即存在  $T_{\text{em}}=T_{\text{L}}$ 。其次要求系统能够灵活自动地调整速度的波动, 也就是说, 转速高于平衡点速度时要能减小速度, 转速低于平衡点速度时要能加大速度。因此要求在交点处, 满足

$$\frac{dT_{\text{em}}}{dn} < \frac{dT_{\text{L}}}{dn}$$

或者说, 在交点的转速以上存在  $T_{\text{em}} < T_{\text{L}}$ , 而在交点的转速以下存在  $T_{\text{em}} > T_{\text{L}}$ 。

## 1.2.2 他励直流电动机的电气控制线路

### 一、他励直流电动机的启动

电动机的启动是指电动机接通电源后, 由静止状态加速到稳定运行状态的过程。对直流电动机的启动, 一般要求是: 要有足够大的启动转矩; 启动电流要限制在一定的范围内; 启动设备要简单、可靠。

电动机在启动瞬间 ( $n=0$ ) 的电磁转矩被称为启动转矩  $T_{\text{st}}$ 。启动瞬间的电枢电流被称为启动电流  $I_{\text{st}}$ 。启动转矩为  $T_{\text{st}} = C_T \Phi I_{\text{st}}$ 。如果他励直流电动机在额定电压下直接启动, 由于启动瞬间转速  $n=0$ , 感应电动势  $E_{\text{a}}=0$ , 所以启动电流  $I_{\text{st}}$  为

$$I_{\text{st}} = \frac{U_{\text{N}}}{R_{\text{a}}}$$

因为电枢电阻  $R_{\text{a}}$  很小, 所以直接启动电流将达到很大的数值, 通常可达到  $(10 \sim 20) I_{\text{N}}$  ( $I_{\text{N}}$  为电动机的额定电流)。这么大的电流会损坏电动机, 因此直流电动机一般不允许直接启动, 而必须限制启动电流才能安全启动。他励直流电动机通常采用电枢回路串联电阻启动或降低电枢电压启动。

#### 1. 电枢回路串联电阻启动

在电枢回路中串联滑动变阻器  $R_{\text{S}}$  就可以分掉一部分电压, 从而降低启动电流, 其电路如图 1-2-6 所示。

对于普通直流电动机, 一般要求  $I_{\text{st}} \leq (1.5 \sim 2) I_{\text{N}}$ 。因此  $R_{\text{st}}$  的值应使  $I_{\text{st}}$  不大于允许值。电动机启动前, 应使励磁回路调节电阻  $R_{\text{sf}} = 0$ , 这样励磁电流  $I_{\text{f}}$  最大, 使磁通  $\Phi$  最大。电枢回路串联启动电阻  $R_{\text{st}}$ , 在额定电压下的启动电流  $I_{\text{st}} = U_{\text{N}} / (R_{\text{a}} + R_{\text{st}})$ 。在启动电流产生的启动转矩作用下, 电动机开始转动并逐渐加速, 电枢电流  $I_{\text{a}} = (U_{\text{N}} - E_{\text{a}}) / (R_{\text{a}} + R_{\text{st}})$ , 随着转速的升高, 电枢电动势 (反电动势)  $E_{\text{a}}$  逐渐增大, 使电枢电流逐渐减小。电磁转矩也随之减小 ( $T_{\text{em}} = C_T \Phi I_{\text{a}}$ ), 这样转速的上升速度就逐渐缓慢下来。为了缩短启动时间, 保持电动机在启动过程中的加速度不变, 就要求在启动过程中电枢电流维持不变, 因此随着电动机转速的升高, 应将启

动电阻平滑地切除,最后使电动机转速达到运行值。

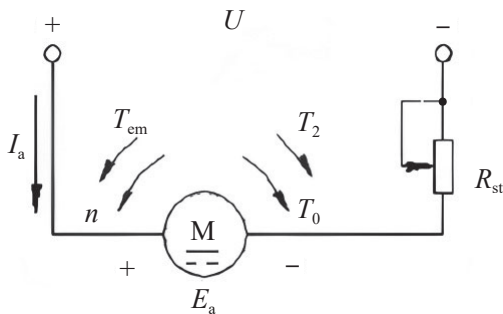


图 1-2-6 电枢回路串联电阻启动电路

## 2. 降低电枢电压启动

当直流电源采用晶闸管整流电源时,电压可连续调节,就可以采用降低电枢电压方法启动。启动时,以较低的电源电压启动电动机,启动电流便随电压的降低而成正比减小。随着电动机转速的上升,反电动势  $E_a$  逐渐增大,再逐渐提高电源电压,使启动电流和启动转矩保持在一定的数值上,从而保证电动机按需要的加速度提升转速。虽然降低电枢电压启动需要专用电源,设备投资较大,但它启动平稳,且启动过程中能量损耗小,因此仍得到了广泛应用。

## 二、他励直流电动机的调速

根据他励直流电动机的转速特性公式,可知:

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a$$

当电枢电流  $I_a$  不变时(即在一定的负载下),只要改变电枢电压  $U$ 、电枢回路串联电阻  $R_{ST}$  及励磁磁通  $\Phi$  中的任意一个量,就可以改变转速  $n$ 。因此,他励直流电动机具有三种调速方法,分别是电枢回路串联电阻调速、调压调速和弱磁调速。

### 1. 电枢回路串联电阻调速

在电枢回路串联接入电阻  $R_{s1}$ 、 $R_{s2}$  如图 1-2-7 所示。之后,其机械特性曲线会随着电阻的增大而变陡,如图 1-2-8 所示。由于速度值不能突变,因此系统速度会沿新的特性曲线减速至平衡位置稳定运行。

电枢回路串联电阻调速的优点是设备简单,操作方便。缺点是由于电阻分段调节,所以调速的平滑性差。低速时特性曲线斜率大,静差率大,所以转速的相对稳定性差。轻载时调速范围小,额定负载时调速范围一般为  $D \leq 2$ 。若负载转矩保持不变,则调速前和调速后因磁通不变,电动机的电磁转矩  $T_{em}$  和电枢电流  $I_a$  不变 ( $T_{em} = C_T \Phi I_a = T_L$ ),输入功率 ( $P_1 = U_N I_a$ ) 也不变,但输出功率 ( $P_2 \propto T_L n$ ) 却随转速下降而减小,减小的部分被串联的电阻消耗掉了,所以损耗较大,效率较低。而

且转速越低，所串联的电阻越大，损耗越大，效率越低，所以这种调速方法是不太经济的。

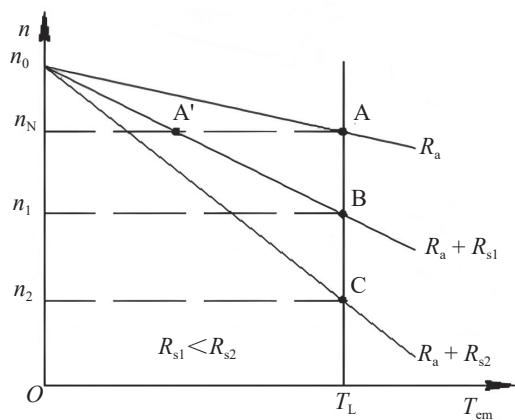
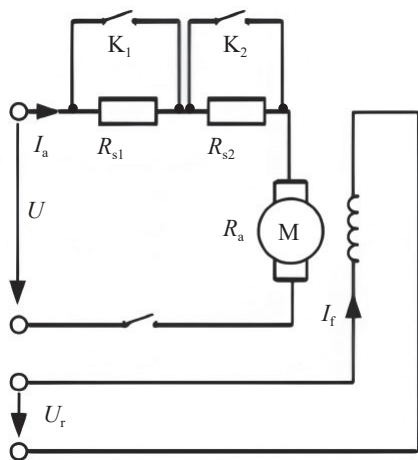


图 1-2-7 电枢回路串联电阻调速主电路 图 1-2-8 电枢回路串联电阻调速特性曲线

## 2. 降压调速

降压调速是将专门的可调电源连接在电枢绕组上，调节电枢电压，其机械特性曲线如图 1-2-9 所示，为一系列的平行线。由于速度不能突变，所以当减小电枢电压时，系统速度会沿新的特性曲线减速至平衡位置稳定运行。

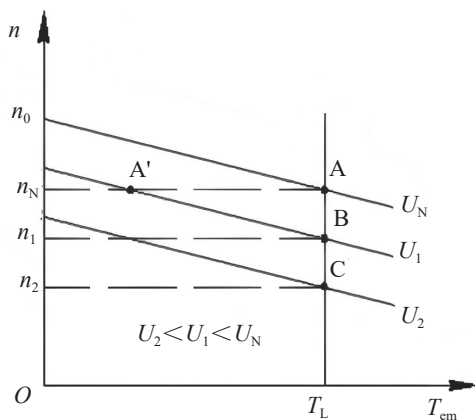


图 1-2-9 降压调速特性曲线

降压调速的优点是电源电压能够平稳调节，可以实现无级调速；调速前后机械特性曲线的斜率不变，负载变化时，速度稳定性好；无论轻载还是重载，调速范围相同，一般可达  $D=2.5\sim 12$ ；系统的电压可调，电能损耗较小。降压调速的缺点是需要一套电压可连续调节的直流电源，如晶闸管-电动机系统（简称“SCR-M 系统”）。调压调速多用在调速性能要求较高的生产机械上，如机床、造纸机等。对

于恒转矩负载, 调速前后电动机的电磁转矩不变, 因为磁通不变, 调速后的稳态电枢电流等于调速前的电枢电流。

### 3. 弱磁调速

弱磁调速是将专门的可调电源连接在励磁绕组上, 减小励磁电压, 其机械特性曲线如图 1-2-10 所示, 为斜率、截距都增大的一系列直线。由于速度值不能突变, 所以当减小励磁电压时, 系统速度会沿新的特性曲线加速至平衡位置稳定运行。

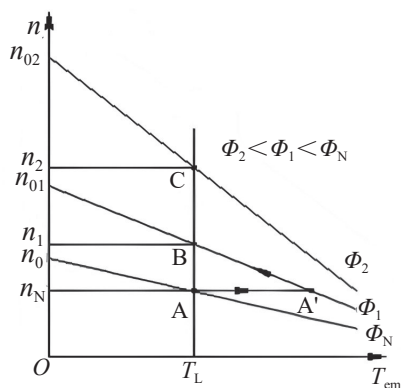


图 1-2-10 减弱磁通调速特性曲线

弱磁调速的优点有：由于在电流较小的励磁回路中进行调节，因而控制方便，能量损耗小，设备简单，而且调速平滑性好。虽然弱磁升速后电枢电流增大，电动机的输入功率增大，但由于转速升高，输出功率也增大，电动机的效率基本不变，因此弱磁调速的经济性是比较好的。弱磁调速的缺点有：机械特性的斜率变大，特性变软；转速的升高受到电机换向能力和机械强度的限制，因此调速范围不可能很大，一般  $D \leq 2$ 。对于恒转矩负载，调速前后电动机的电磁转矩不变，因为磁通减小，所以调速后的稳态电枢电流大于调速前的电枢电流，这一点与前两种调速方法不同。

### 4. 直流电动机的正反转控制

前面已经说过，直流电动机之所以能够输出机械能，是因为电枢线圈受到了电磁力矩的作用。电磁力矩的方向取决于磁场极性和电枢绕组元件中电流的方向，所以直流电动机获得反转的方法有两种：一是改变磁场极性；二是改变电源电压的极性，使流过导体的电流方向改变。应注意，二者只能改变其一，否则，直流电动机的转向不变。直流电动机的正反转控制电路如图 1-2-11 所示。

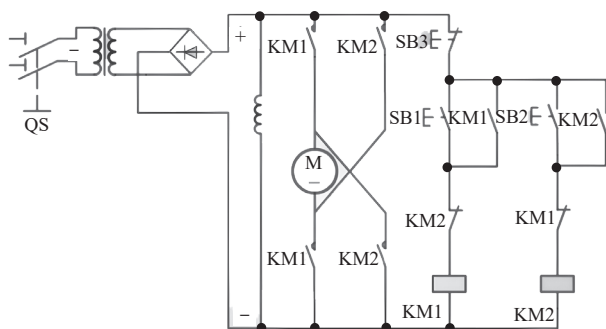


图 1-2-11 直流电动机的正反转控制电路

直流电动机的正反转控制电路由整流电路、主电路和控制电路三部分组成。工作时，合上电源开关 QS，按下正转按钮 SB1，接触器 KM1 通电，KM1 动断辅助触点先断开，对反转控制电路实现互锁，然后 KM1 动合辅助触点闭合自锁，KM1 主触点闭合，电动机电枢绕组正向通电，电动机正转运行。若需要电动机反转，则按下反转按钮 SB2，反转接触器 KM2 线圈通电，KM2 动断触点先断开，对正转控制电路实现互锁，然后 KM2 动合触点闭合自锁，KM2 主触点闭合，电动机电枢绕组反向通电，电动机反转运行。按下停止按钮 SB3 即可切断控制电路，使接触器线圈断电，主触点断开，电动机断电，停止转动。

### 三、他励直流电动机的制动

他励直流电动机运行状态时的电磁转矩  $T_{em}$  与  $n$  方向相同，电动机为电动状态，电磁转矩为驱动转矩。当需要制动时，需要给系统增加一个与  $n$  方向相反的制动转矩。由于电动机在电枢绕组转动时切割磁感线会产生感应电流，该感应电流与电动状态下产生电磁转矩的电流方向相反，其产生的电磁转矩为制动转矩。因此，他励直流电动机的制动方式有能耗制动、反接制动和回馈制动三种。

#### 1. 能耗制动

能耗制动主电路如图 1-2-12 所示。开关 S 接电源侧为电动状态运行，此时电枢电流  $I_a$ 、电枢电动势  $E_a$ 、转速  $n$  及驱动性质的电磁转矩  $T_{em}$  的方向如图 1-2-12 所示。当需要制动时，将开关 S 投向制动电阻  $R_B$ ，电动机便进入能耗制动状态。初始制动时，因为磁通保持不变、电枢存在惯性，其转速  $n$  不能马上降为零，而是保持原来的方向旋转， $n$  和  $E_a$  的方向均不改变。但是，由  $E_a$  在闭合回路内产生的电枢电流  $I_{aB}$  却与电动状态时的电枢电流  $I_a$  的方向相反，由此产生的电磁转矩  $T_{emB}$  也与电动状态时的  $T_{em}$  的方向相反，变为制动转矩，于是电动机处于制动运行。制动运行时，电动机将动能转换成电能，并消耗在电阻上，直到电动机停止转动为止，所以这种制动方式被称为能耗制动。

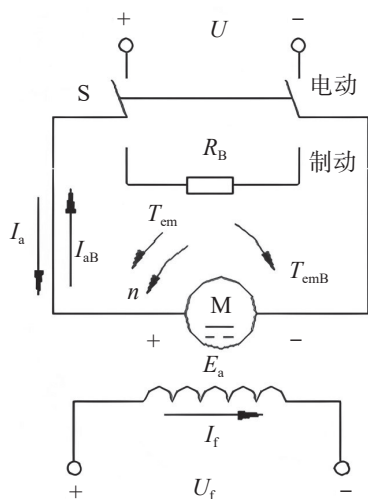


图 1-2-12 能耗制动主电路

能耗制动时的机械特性曲线，就是在  $U=0$ 、 $\Phi=\Phi_N$ 、 $R=R_a + R_B$  条件下的一条人为机械特性曲线。人为机械特性方程为

$$n = \frac{R_a + R_B}{C_e C_T \Phi_N^2} T_{em}$$

人为机械特性曲线如图 1-2-13 所示。

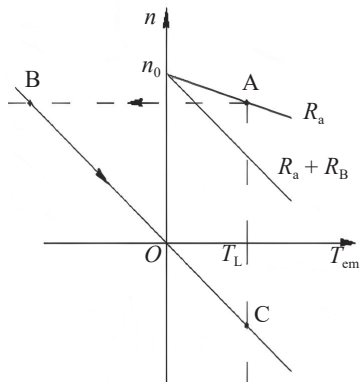


图 1-2-13 能耗制动时的人为机械特性曲线

改变制动电阻  $R_B$  的大小，可以改变能耗制动特性曲线的斜率，从而改变起始制动转矩的大小以及下放位能负载时的稳定速度。 $R_B$  越小，特性曲线的斜率越小，起始制动转矩越大，而下放位能负载的速度越小。减小制动电阻，可以增大制动转矩，缩短制动时间，提高工作效率。但制动电阻太小，将会造成制动电流过大。通常，限制最大制动电流为额定电流的 2~2.5 倍。

选择制动电阻的原则是

即

$$I_{aB} = \frac{E_a}{R_a + R_B} \leq (2 \sim 2.5) I_N$$

$$R_B \geq \frac{E_a}{(2 \sim 2.5) I_N} - R_a$$

式中,  $E_a$  为制动瞬间 (即制动前电动状态时) 的电枢电动势。如果制动前电动机为额定运行, 则  $E_a = U_N - R_a I_N \approx U_N$ 。

能耗制动简单, 但随着转速的下降, 电动势减小, 制动电流和制动转矩也随之减小, 制动效果变差。图 1-2-14 为能耗制动电路原理图。

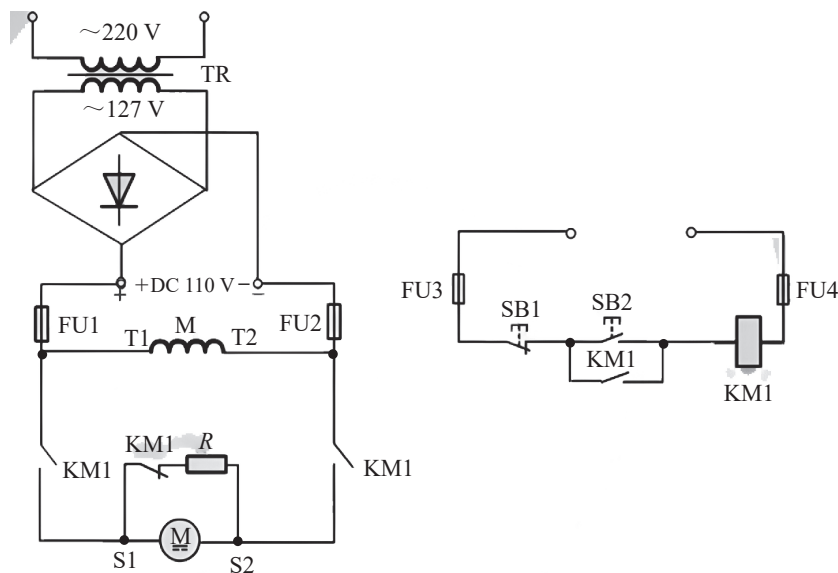


图 1-2-14 能耗制动电路原理图

直流电动机的制动控制电路由整流电路、主电路和控制电路三部分组成。用它可以对电动机进行制动控制。工作时, 整流电路将交流电转变为 110 V 的直流电, 直流电动机主电路接到整流电路。输出端控制电路接 380 V 交流电源, 电动机工作时, 按下 SB2, 控制电路中 KM1 线圈通电。KM1 辅助动断触点断开制动电阻, KM1 辅助动合触点闭合自锁。主电路中 KM1 动和主触点闭合, 电动机转动。停止工作时, 按下 SB1, 控制电路中 KM1 线圈断电, 主电路中 KM1 主触点断开, 电动机断电, 但电动机由于惯性仍继续转动, 主电路中 KM1 动断辅助触点闭合, 大电阻  $R$  接入电动机电枢电路中进行能耗制动, 制动结束, 电动机停止转动。

## 2. 反接制动

他励直流电动机的反接制动是通过改变电枢或电源极性实现快速制动, 可分为两种: 一种是电枢电压反接制动, 另一种是倒拉反转反接制动。

### (1) 电枢电压反接制动

电枢电压反接制动的电路图如图 1-2-15 所示。

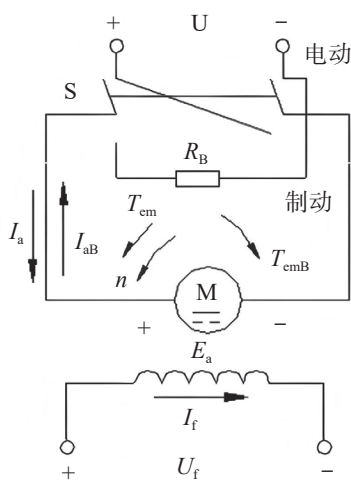


图 1-2-15 电枢电压反接制动的电路图

开关 S 投向电动侧时, 电枢接正极性的电源电压, 此时电动机处于电动状态运行。进行制动时, 开关 S 投向制动侧, 此时电枢回路串联接入制动电阻  $R_B$  后, 接上极性相反的电源电压, 即电枢电压由原来的正值变为负值。此时, 在电枢回路内,  $U$  与  $E_a$  顺向串联, 共同产生很大的反向电枢电流  $I_{aB}$ 。其大小为

$$I_{aB} = \frac{-U - E_a}{R_a + R_B} = -\frac{U + E_a}{R_a + R_B}$$

电动状态时, 电枢电流的大小由  $U$  与  $E_a$  之差决定, 而反接制动时, 电枢电流的大小由  $U$  与  $E_a$  之和决定, 因此反接制动时电枢的电流非常大。为了限制过大的电枢电流, 反接制动时必须在电枢回路中串联接入制动电阻  $R_B$ ,  $R_B$  的大小应使反接制动时电枢电流不超过电动机的最大允许电流  $I_{\max}$ ,  $I_{\max} = (2 \sim 2.5) I_N$ 。因此, 应串联接入的制动电阻的阻值为

$$R_B \geq \frac{U + E_a}{(2 \sim 2.5) I_N} - R_a$$

电压反接制动时的机械特性曲线就是在  $U = -U_N$ 、 $\Phi = \Phi_N$ 、 $R = R_a + R_B$  条件下的一条人为机械特性的阻, 如图 1-2-16 所示。

反接制动时, 从电源输入的电功率和从轴上输入的机械功率全部转变成电枢回路上的电功率, 一起消耗在电枢回路的电阻 ( $R_a + R_B$ ) 上, 其能量损耗是很大的。反接制动适用于快速停车, 如紧急制动或频繁正反转设备 (机床、冲压机等)。

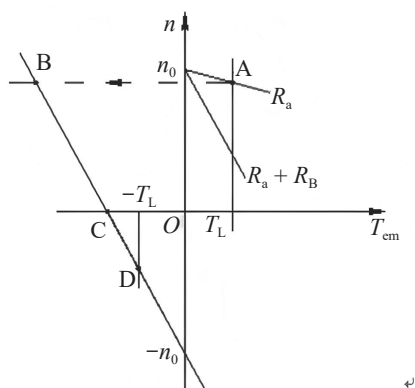


图 1-2-16 电枢电压反接制动系统机械特性曲线

## (2) 倒拉反转反接制动

倒拉反转反接制动电路如图 1-2-17 (a) 和 (b) 所示。位能负载的倒拉作用使电动机在位能负载（如起重机下放重物）拖动下反转，电枢电动势方向与电源电压同向，电流反向，产生制动转矩以平衡负载。当位能很大时，电动机能出现反转制动运行，又因为此时的  $E_a$  与  $U$  也是顺向串联，共同产生电枢电流，这一点与电压反接制动相似，因此把这种制动称为倒拉反转反接制动。倒拉反转反接制动转速反向，制动转矩与负载平衡，需保持电枢回路串联电阻以维持稳定低速。负载越大，电动机串联接入的电阻  $R_B$  越大，最后稳定的转速越高，下放重物的速度也越快。实现位能负载的倒拉反转时，电枢回路中串联接入一个较大的电阻  $R_B$ ，将得到一条斜率较大的人为机械特性曲线，如图 1-2-17 (c) 所示。因此这种方式只适用于重物匀速下放控制设备，如起重机、电梯。

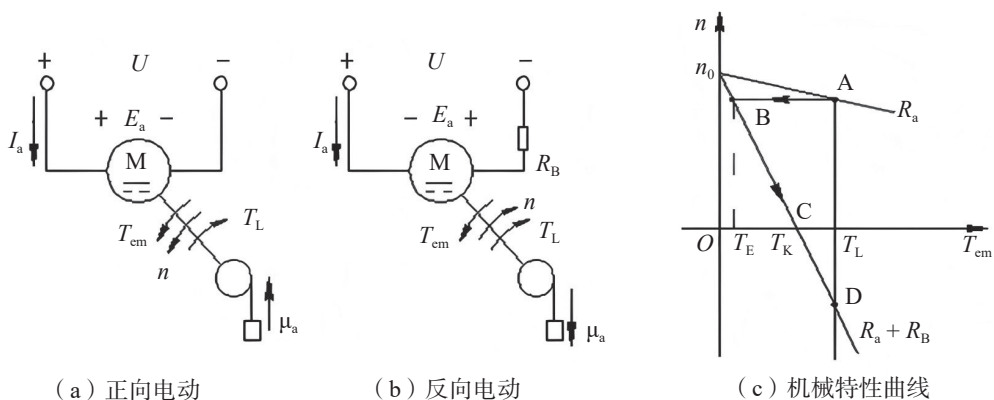


图 1-2-17 倒拉反转反接制动电路及机械特性曲线

反接制动时需严格限制电流，避免电枢过热；制动结束瞬间需及时断电，防止反向启动。

### 3. 回馈制动

回馈制动是一种将机械能转化为电能并回馈至电源的高效制动方式，常见于他励直流电动机运行转速高于理想空载转速的工作情况。电动状态下运行的电动机，在某种条件下（如电动机拖动车下坡时）会出现运行转速  $n$  高于理想空载转速  $n_0$  的情况。此时， $E_a > U$ ，电枢电流反向，电磁转矩的方向也随之改变，由驱动转矩变成制动转矩。从能量传递方向看，此时电机处于发电状态，将机械能转换成电能回馈给电网，因此称这种状态为回馈制动状态。回馈制动的优点是能量回收率高，节能环保；制动过程平滑，具有自适应性；无电阻发热损耗。回馈制动仅适用于转速高于  $n_0$  的工作情况，需配套双向变流装置，成本较高。

回馈制动时的机械特性方程式与电动状态时相同，只是运行在特性曲线上不同的区段。回馈制动有正向回馈制动和反向回馈制动两种。

#### (1) 正向回馈制动

当电动机在外力（如位能负载或惯性）驱动下，转速  $n$  超过理想空载转速  $n_0$  时，反电动势  $E$  将大于电源电压  $U$ ，导致电枢电流  $I_a$  反向，反向电流使电动机产生与转向相反的电磁转矩，电磁转矩的大小随转速升高而增大，将机械能转化为电能回馈电网。系统工作时需保持励磁电流恒定（他励特性）且电源具备吸收电能的能力（如可控整流电路或电池系统）。通过电力电子器件（如 IGBT、SiC 模块）调节电枢电压，控制回馈电流大小，并与储能系统协同管理电能，确保制动过程稳定高效。

正向回馈制动在很多电动系统中都有应用。例如：在电动汽车下坡时，驱动轮拖动电动机超速运行，电能回充至电池，延长续航；在高速旋转机械（如离心机）断电后，利用惯性动能回馈减速；在电梯下行控制时，轿厢自重带动电机发电，降低能耗并提升安全性。

正向回馈制动时的机械特性曲线位于第二象限，如图 1-2-18 的 AB 段。（外力驱动加速、降压调速时的回馈制动）

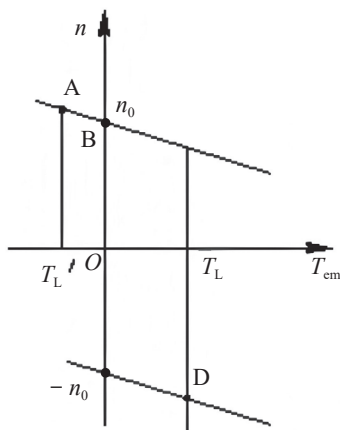


图 1-2-18 回馈制动时的机械特性

## （2）反向回馈制动

反向回馈制动是他励直流电动机在特定反向运行工作情况下实现能量回馈的关键制动方式，其核心在于电动机反向旋转时通过电磁作用将机械能转化为电能回馈电源，兼具高效制动与能量回收功能。

当外力（如位能负载或机械惯性）迫使电动机转子反向旋转时，电枢导体切割磁场的方向改变，反电动势  $E$  的极性随之反转。若此时电源电压  $U$  的极性保持不变，且满足  $|E| > |U|$ ，则电枢电流  $I_a$  反向，电机进入发电状态。反向电流将机械能转化为电能回馈电网，同时产生与旋转方向相反的电磁转矩，形成有效制动。系统需要保持励磁电流方向不变，确保磁场方向固定，否则反电动势极性混乱将破坏制动过程。制动转矩随反向转速升高而增大，适用于高速反向工作情况的平滑减速控制。反向回馈制动要求电源具备接收反向电能的能力，如采用双向 DC-AC 变流器或接入储能电池。其采用闭环调速系统，实时检测转速与电流，通过脉冲宽度调制（PWM）动态调整电枢电压，维持稳定回馈电流；设置过压、过流保护模块，防止电网电压波动或短路损坏设备；与储能系统协同工作，平滑电能回馈波动，提升电网兼容性。

反向回馈制动在很多电动系统中都有应用。例如：起重机械下放重物，重物拖动电机反转时，反向回馈制动可稳定下放速度并回收能量，减少机械制动器损耗；列车下坡或减速时，驱动轮反向拖动电动机发电，电能回充牵引供电系统；轧辊反转过程中，利用反向回馈制动快速降速，提升生产效率与能效等。

反向回馈制动的优点是：能量回收率可达 60%~80%，显著降低系统能耗；无须额外制动装置，电气控制直接调节制动强度，动态响应快；减少机械制动器的使用频率，降低维护成本，设备寿命长。反向回馈制动的缺点是：电路复杂，需配置双向功率变换器及储能单元，系统成本较高；反向转速与电源电压需精确匹配，避免电流冲击或振荡，稳定性差；大电流回馈时需优化散热设计，防止功率器件过热。

反向回馈制动时的机械特性曲线位于第四象限，如图 1-2-18 的 CD 段。（转速反向起重机下放重物、弱磁升速后制动）

反向回馈制动通过机电能量双向转换，实现了他励直流电动机在反向运行工作情况下的高效制动与能量回收，是绿色工业驱动与智能交通系统的关键技术之一。其工程化应用需结合电力电子技术与智能控制算法，在提升能效的同时确保系统安全性与经济性。

## 任务实施

### 1. 安装准备

检查直流电动机与控制器绝缘性能，确认电缆规格（截面积、耐压等级）符合要求；设计电气原理图，明确主电路（电枢、励磁）、控制电路（启停按钮、调速信号）及保护电路（过流、欠压）的连接节点。

### 2. 线路安装

按“先主后控”原则接线：主电路连接电源、电枢与励磁端子；控制电路接入继电器或 PLC/PWM 调速模块。采用屏蔽线隔离信号干扰，确保接地可靠（接地电阻 $\leq 4\ \Omega$ ）。

### 3. 分阶段调试

空载测试：逐步升压至额定值，监测空载电流与转速是否正常，排查异常振动或噪声。

带载试验：施加阶梯负载，记录电枢电流、温升及转速波动，验证过载能力与散热设计。

功能验证：测试正反转、能耗制动、回馈制动等功能，校准调速精度（误差 $\leq \pm 2\%$ ）。

安全防护：操作前断电验电，佩戴绝缘工具；调试中设置急停按钮与机械限位。

故障诊断：针对常见问题（火花过大、转速不稳）制定预案，如检查换向器接触、电刷压力或励磁电流稳定性。

## 任务评价



表 1-2-1 任务评价表

序号	评价内容	配分 / 分	评价要求	评分标准	得分 / 分
1	电路及程序设计	40	(1) 能正确分配 V0 地址，并绘制 V0 接线图； (2) 设备组态； (3) 根据控制要求，正确编制梯形图	(1) V0 地址分配错误或缺少，每个扣 5 分； (2) V0 接线图设计不全或有错，每处扣 5 分； (3) CPU 组态与现场设备型号不匹配，扣 10 分； (4) 梯形图表达不正确或画法不规范，每处扣 5 分	
2	安装与连线	20	根据 V0 接线图，正确连接电路	(1) 连线错一处，扣 5 分； (2) 损坏元器件，每只扣 5~10 分； (3) 损坏连接线，每根扣 5~10 分	

续表

序号	评价内容	配分 / 分	评价要求	评分标准	得分 / 分
3	调试与运行	20	能熟练使用编程软件编制程序, 下载至 CPU, 并按要求调试运行	(1) 不能熟练使用编程软件进行梯形图的编辑、修改、转换、写入及监视, 每项扣 2 分; (2) 不能按照控制要求完成相应的功能, 每缺一项扣 5 分	
4	安全操作	20	确保人身和设备安全	违反安全文明操作规程, 扣 10~20 分	
总分		100	合计		

## 练习巩固



### 一、选择题

- 他励直流电动机启动时, 通常在电枢回路中串联电阻, 其主要目的是 ( )
  - 增大启动转矩
  - 限制启动电流
  - 增大励磁电流
  - 降低电源电压
- 他励直流电动机调速时, 下列方法中可以实现恒转矩调速的是 ( )
  - 改变电枢电压
  - 减弱励磁磁通
  - 增大电枢回路电阻
  - 提高电源频率
- 能耗制动时, 电动机的电枢绕组应 ( )
  - 接独立电源
  - 短接外部电阻
  - 反向连接电源
  - 断开电源
- 他励直流电动机采用弱磁调速时, 转速变化范围是 ( )
  - 低于额定转速
  - 高于额定转速
  - 等于额定转速
  - 无法确定
- 反接制动的特点是 ( )
  - 电能回馈电网
  - 制动转矩随转速降低而增大
  - 需要断开励磁绕组
  - 电枢电压反向
- 他励直流电动机启动时, 若直接全压启动, 会导致 ( )
  - 转速过高
  - 电枢电流过大
  - 励磁电流为零
  - 转矩过小
- 改变电枢电压调速的优点是 ( )
  - 调速范围宽且平滑
  - 适合大功率场合
  - 无须额外设备
  - 效率最高



8. 回馈制动适用于以下工作情况中的 ( )
  - A. 电动机停机
  - B. 电动机转速高于理想空载转速
  - C. 电动机带重物下放
  - D. 电动机堵转
9. 他励直流电动机调速时, 电枢回路串联电阻调速的缺点是 ( )
  - A. 只能降速
  - B. 能量损耗大
  - C. 调速范围窄
  - D. 以上都是
10. 以下制动方式中, 需要保持励磁电流不变的是 ( )
  - A. 能耗制动
  - B. 反接制动
  - C. 回馈制动
  - D. 所有制动方式

## 二、判断题

1. 他励直流电动机启动时必须先接通励磁电源, 再接通电枢电源。 ( )
2. 弱磁调速时, 电动机的输出功率基本保持不变。 ( )
3. 反接制动时, 电枢电流方向与电动状态时相同。 ( )
4. 能耗制动需要外接直流电源供电。 ( )
5. 改变电枢电压调速时, 励磁电流需保持额定值不变 ( )
6. 回馈制动时, 电动机将机械能转化为电能回馈电网。 ( )
7. 他励直流电动机启动电阻应全程保留在电枢回路中。 ( )
8. 电枢回路串联电阻调速属于恒功率调速。 ( )
9. 反接制动时需在电枢回路串联大电阻以避免电流过大。 ( )
10. 弱磁调速会导致电动机机械特性变软。 ( )

## 三、简答题

1. 简述他励直流电动机的三种调速方法及其特点。
2. 说明能耗制动的工作原理及适用场景。
3. 为什么反接制动时需要限制电流? 应如何实现呢?

### 拓展视野

直流电动机电气控制技术正朝着智能化、高效化、集成化的方向突破, 结合新兴学科与工程需求, 形成以下前沿趋势。

#### 1. 智能控制算法升级

AI 与机器学习: 基于深度学习的参数辨识与自适应 PID 控制 (比例、积分、微分控制), 动态优化调速精度; 强化学习用于多目标协同 (如效率与转矩平衡), 提升复杂工作情况下的鲁棒性。

模型预测控制 (MPC): 通过实时预测电机状态, 优化开关频率与电流谐波,

减少电磁损耗，适用于高频驱动的 SiC/GaN 器件场景。

## 2. 高频化与宽禁带器件应用

SiC 与 GaN：高频开关  $> 100\text{ kHz}$ ，降低滤波器体积，提升响应速度与能效，尤其在电动汽车驱动中可以实现高功率密度与低热损耗。

集成化驱动模块：将驱动芯片、传感器与保护电路集成，减少寄生参数，增强电磁兼容（EMC）性能，适用于微型电机与精密伺服系统。

## 3. 数字化与边缘计算融合

数字孪生技术：通过嵌入式传感器与云端数据构建电机虚拟模型，实时仿真运行状态，支持故障预测与寿命评估。

边缘智能控制：在控制器端部署轻量化 AI 模型，实现毫秒级决策（如无位置传感器控制），减少对中央处理器的依赖。

## 4. 多物理场协同优化

电磁 - 热 - 机械耦合设计：利用有限元分析（FEA）与拓扑优化算法，协同降低涡流损耗与振动噪声，提升电机与控制器的匹配效率。

能量闭环管理：在回馈制动、微电网等场景中，通过双向 DC-DC 变换器实现电能高效存储与复用，系统能效提升  $15\% \sim 30\%$ 。

## 5. 可持续性与绿色控制

无稀土电机控制：针对铁氧体等低磁性能材料，开发新型磁场定向控制（FOC）策略，补偿转矩波动，拓展环保电机的应用范围。

低功耗待机技术：采用脉冲供电与休眠模式，降低空载能耗，满足物联网设备的节能需求。

目前，高频化带来的电磁干扰抑制、智能算法的实时性保障、多学科协同设计工具链开发等仍是关键难点。未来，直流电机控制将更深度地融入工业 4.0 与碳中和体系，成为智能装备与绿色能源的核心驱动单元。