



华中科技大学

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

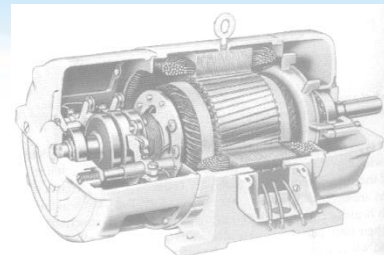


FIGURE 5-5
Cutaway diagram of a wound-rotor induction motor. Notice the brushes and slip ring that the rotor windings are skewed to eliminate slot harmonics. (Courtesy of Magné)

电机拖动与控制

Electrical Machines Drive and Control

控制科学与工程系

李叶松

东二楼309

yesongli@hust.edu.cn



华中科技大学

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

教材与参考书

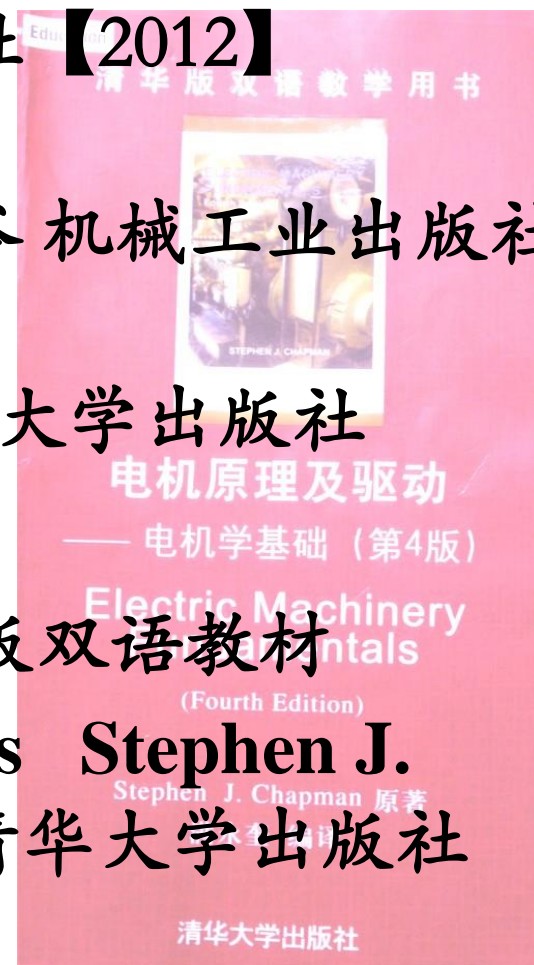
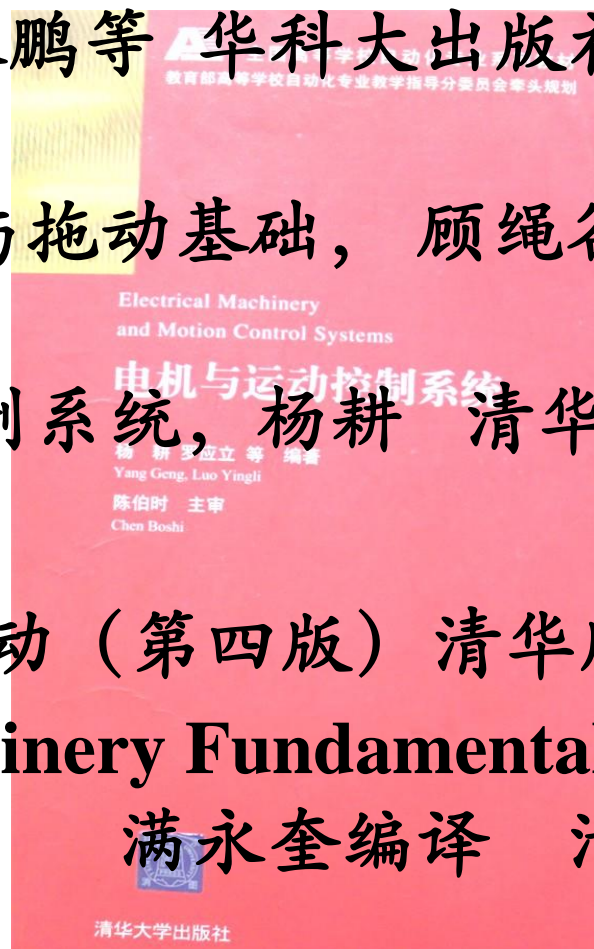
教材： 电机与电力拖动基础

尹泉、周永鹏等 华科大出版社【2012】

参考书： 1、 电机与拖动基础， 顾绳谷 机械工业出版社

2、 电机与运动控制系统， 杨耕 清华大学出版社

3、 电机原理及驱动（第四版） 清华版双语教材
(Electrical Machinery Fundamentals Stephen J. Chanman 原著) 满永奎编译 清华大学出版社



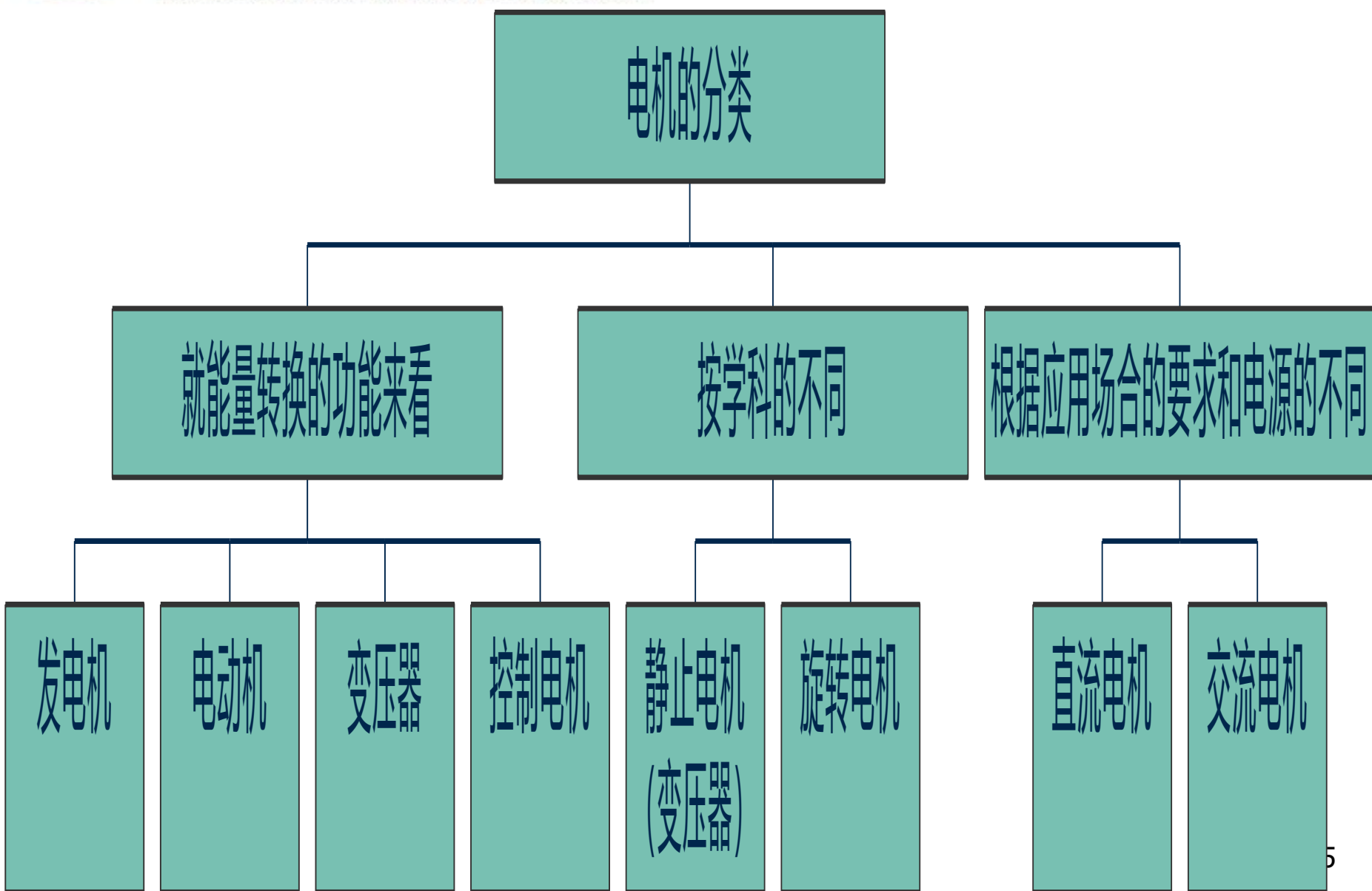
电力拖动(Electrical Drives)

用电动机作为动力的拖动。将电能高效率地转换成机械能，反之亦可。

In general, a electrical drive can be *defined* as a **power conversion means** characterized by its capability to efficiently *convert electrical power from an electrical power source (voltage and current) into mechanical power (torque and speed) to control a mechanical load or process.* In some case, this power flow is reversed or can even be *bi-directional*.

常见电机类型





0.1电机及电力拖动技术的发展概况

- 作为一种易生产、易传输、易分配、易使用、易控制、低污染的能源，电能是现代最大量应用的一种能量形式。作为一种高效的机电能量转换工具，电机及其拖动控制系统在国民经济、国防装备的现代化发展和社会生活中发挥着越来越重要的作用，是第二次工业革命的标志。

50%的电能通过电机转换。

- 最先制成电动机的人，据说是德国的雅可比。他于1834年前后成了一种简单的装置：在两个U型电磁铁中间，装一六臂轮，每臂带两根棒型磁铁。通电后，棒型磁铁与U型磁铁之间产生相互吸引和排斥作用，带动轮轴转动，这是直流电机的雏形。

- **雅可比**做了一具大型的装置，安在小艇上，用320个丹尼尔电池（铜锌）供电，**1838**年小艇在易北河上首次航行，时速只有**2.2**公里。
- 美国的**达文波特**也成功地制出了驱动印刷机的电动机，印刷过美国电学期刊《电磁和机械情报》。但这两种电动机都没有多大商业价值，用电池作电源，成本太高、不实用。
- **1870**年比利时工程师**格拉姆**发明了直流发电机。格拉姆证明向直流发电机输入电流，其转子会象电动机一样旋转。于是，这种格拉姆型电动机大量制造出来。效率也不断提高。
- 德国的**西门子**制造出更好的发电机，**1879**年，在柏林工业展览会上，西门子公司制造的无烟排放的电动车引起关注。

- 西门子电机车当时只有3马力，后来美国爱迪生的电机车达12—15马力。但全是直流电机，只限于驱动电车。
- **1883年特斯拉**发明了交流电动机。它是根据电磁感应原理制成，又称感应电动机，这种电动机结构简单，使用交流电，无需整流，无火花，因此被广泛应用于工业和家庭电器中。
- 直流电动机良好的控制特性，一直在要求高控制性能（宽范围调速、高精度转速、转矩、转角控制）的电力拖动领域中占据着主要地位。
- 在**20世纪晚期**由于交流电动机控制方法（**矢量控制**技术和**交流变频、调压**技术）在理论和实现上的突破和功率电子技术、微处理器技术的进步使控制的实现变得容易，而发生了根本性的转变。

发展概况

■ 以交流电动机构成的电力拖动系统及相关的变频调速与位置伺服控制成为现代电力拖动应用研究的主流，各种现代控制理论方法、现代电力电子器件和高性能微电子器件、微处理器的成功应用，使交流拖动系统的性能不断获得提高。

■ 目前，以绿色能源为标志的新能源发电技术、绿色交通技术发展迅速，交流发电机、电动机控制作为诸如风力发电、电动汽车的核心技术，也成为研究热点。

■ 而传统的直流拖动系统在各种如舰船、车辆、卫星、太空探测等移动设备中仍然占有一定地位。

磁悬浮列车



大型车床



引路车



爬行机器人



电机及电力拖动在自动化学科中的地位

- 最早期的自动控制系统甚至可以追溯到公元前，那时的自动化是以水力作动力的。第一个在工业过程中应用的自动化系统被认为是James Watt在1769年发明的蒸气机速度调节器，它也不是以电能为动力的。所以自动化一般可以划分为**电类、非电类**两大类。
- 而电类自动化又可按其组成结构、研究重点分为**过程自动化**和**单机自动化**。
- 在单机自动化中，按照控制系统构成方式，还可进一步划分为**开环（电器控制）**和**闭环（电气控制）**控制两大类型。
- 电机是现代电类自动化系统中机电能量转换不可或缺的工具（重要被控对象）。用电机拖动机械运动称为**电力拖动**，也称为电气传动。电机及其拖动技术是电气自动化技术的重要基石之一，它是自动化专业中的一门**核心专业基础**课程。



控制策略 算法与实现手段

工程中的自动化运动控制系统 与自动化专业课程设置的关系

控制理论、微机原理、计算机控制技术、实时嵌入式系统、电路理论、数电、模电、电器控制、数字信号处理、人工智能技术

功率电子技术

电机拖动与电气控制

控制对象

计算机指令系统

控制器
微处理器，
数模器件
控制电器

电功率
放大、
变流装置

执行电机

执行机械

计算机原理、微机控制技术、C语言、计算机网络与通信技术、PLC、图像视觉技术、工业现场总线

控制命令

反馈检测装置

传感器技术、
信号检测技术

控制目标

弱电到强电转换

运动控制系统



课程学习特点

- 电力拖动是一门既带专业性又带基础性的课程。在电机拖动中要求**运用理论来解决实际问题**，而实际问题的客观情况常常是比较复杂、综合的。因此在分析时，有必要**先将问题简单化，找出主要矛盾**，运用理论加以解决，这样得到的结论已经足以正确反映客观规律，当然还有一定程度的近似性。有需要时，再深入分析较次要的矛盾，得到更精确的解答。

在学习课程时要处处从实际出发考虑，不要仅仅满足于公式中数学上的关系，必须**通过公式的符号看到它们所代表的物理量之间的关系**，同时**重视数学计算，重视实验**。

思维方式和常识活化的历练----电机与拖动。



学习重点

- 自动化专业的**基础**，描述**问题或对象进行认知思辨分析的过程**，突出**实现控制**的特点，本课程的侧重点放在**电机运行原理、模型、相关电磁与机械参数关系、电动机能量变换与机电特性、控制特性和方法的分析**方面，对交、直流电机作为电动机用作电力拖动运行时的**运行原理、动、静态数学模型、开环状态下电动机的起动、调速和快速制动的基本方法**作深入、详细讨论，为实现它们的自动化闭环控制奠定基础。
- 思考问题的方法：where、what、how。



華中科技大學

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

§ 2 直流电动机原理 (Direct-Current Motors Principle)

思考问题:

- 为什么大部分电机是旋转运动的?
- 如何深入认识这个问题的需求特征?
- 如何理解解决这一问题的关键因素?

§ 2—1 DCM的基本工作原理、结构和额定数据

问题出发点:

- 电机实现能量转换的现实要求与关键因素是什么？电机结构是怎么回事？
- 电机结构设计分析的关键问题是什么？如何认识？

一、基本原理

两个重要公式：

(1) 法拉弟电磁感应定律—发电机原理： $e = Blv$ (Faraday's law of electromagnetic induction , In 1831)

有效长度为 l 的导体以线速度 v 在磁通密度为 B 的磁场中运动时，导体内将产生感应电动势 e ，若 B 、 l 、 v 在空间相互垂直，则 e 的大小等于三者的乘积，方向由右手定则确定。 B 为媒介，机—电转换数学描述。

(2) 洛伦兹电磁力(安培)定律 一电动机原理:
 $F = Bli$ (Lorentz electromagnetic force law,
In 1895)

有效长度为*l*并载有电流*i*的导体在磁通密度为*B*的磁场中时，导体上将受到电磁力*F*的作用，若*B*、*l*在空间相互垂直，则*F*的大小等于三者的乘积，方向由左手定则确定。*B*为媒介，电—机转换 数学描述。

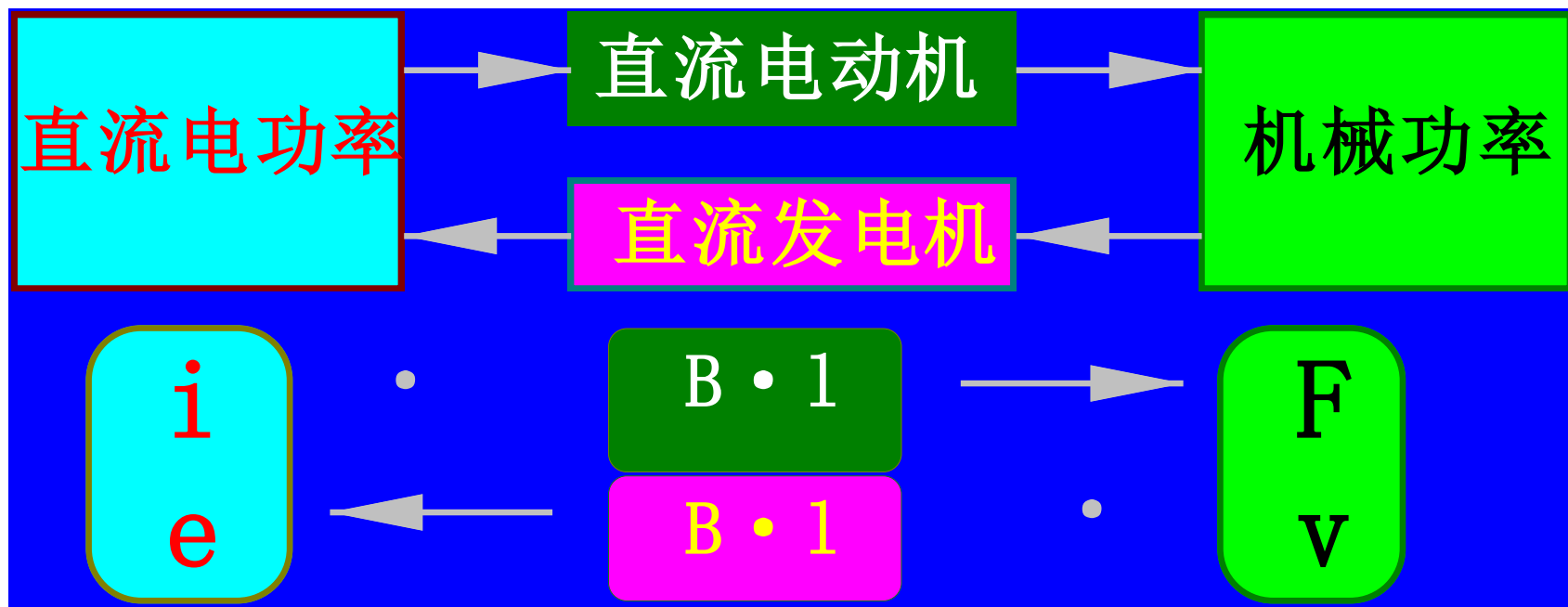
洛伦兹电磁力定律的原型：

- 电磁场中电荷 q 所受到的电磁力为 $\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$

\mathbf{v} ：电荷在电磁场中的运动速度。

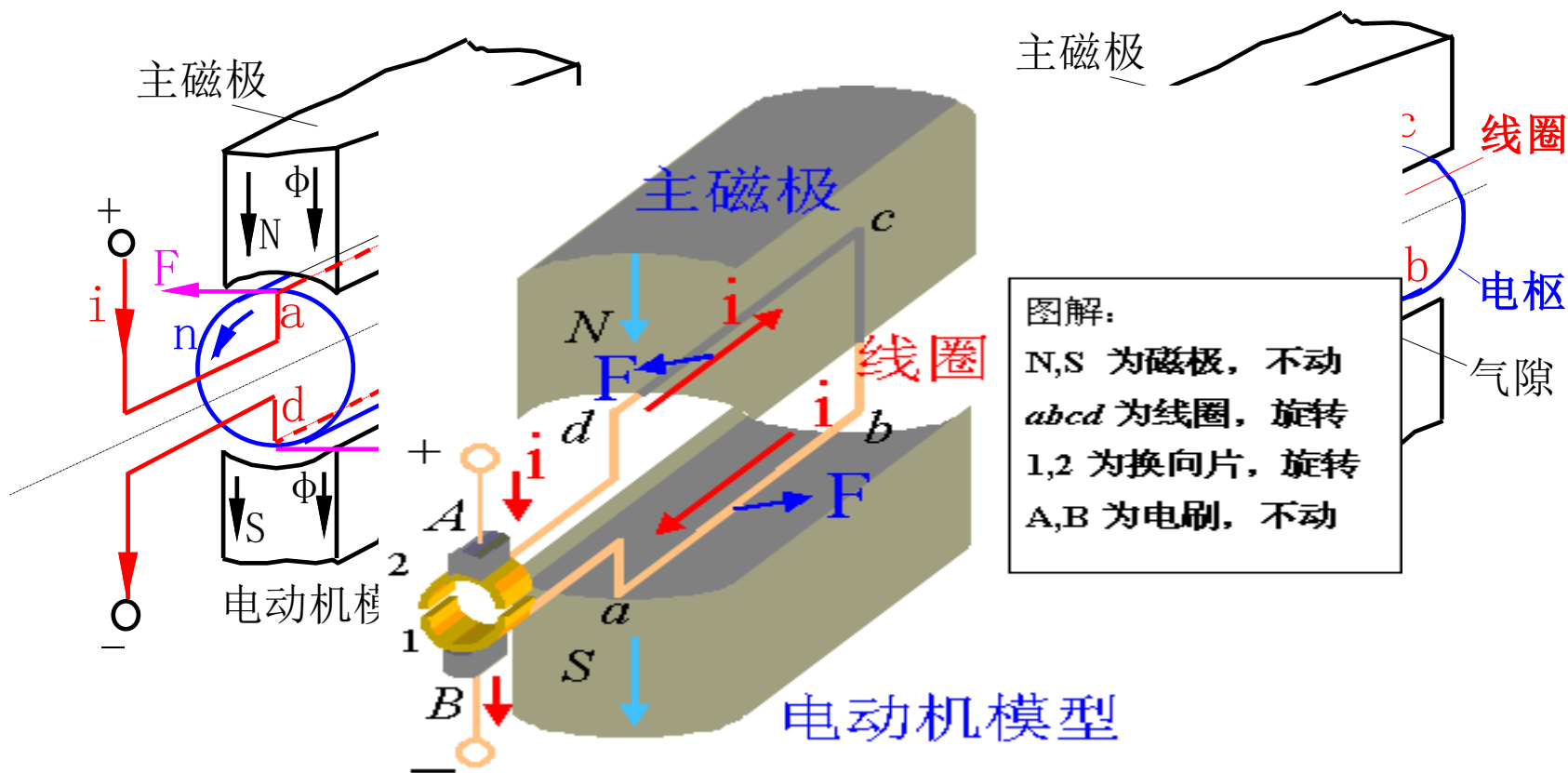
- 纯电场**中， $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$ 方向与电场强度方向一致，与电荷运动方向无关。
- 纯磁场**中， $\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ 力的方向总是同时与电荷运动方向和磁场强度方向正交。
- 对大量运动电荷，引入电荷密度 ρ [库仑/立方米]：力密度 \mathbf{F}_v 表示单位体积电荷所受的力 $\mathbf{F}_v = \rho(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$
乘积 $\rho\mathbf{v}$ 称为电流密度【安培/平方米】
- 由于导体截面积乘以电流密度等于电流 I ，所以磁场系统中作用载流导体长为 l ： $\mathbf{F} = I \times \mathbf{B}l$ ， 又称为安培定律】
- 【不考虑电场力时，运动电荷在磁场中所受的力称为洛伦兹力，载流导体在磁场中所受的力称为安培力】

- 由原理分析能量转换关系示意



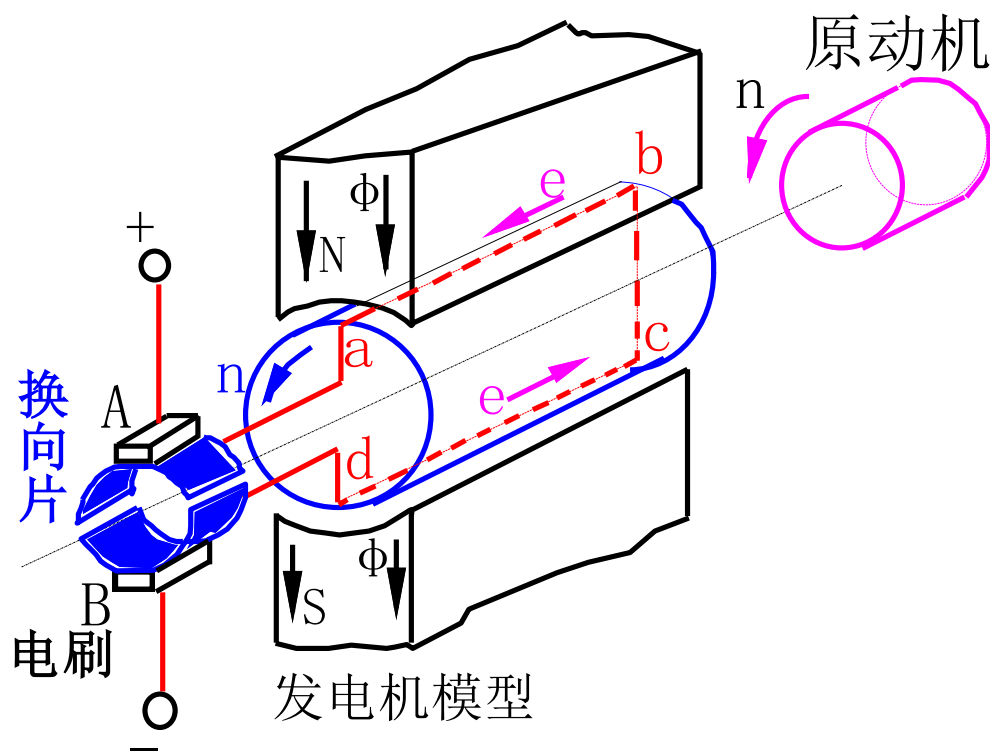


DCM的物理模型：从原理认识电机的结构特征

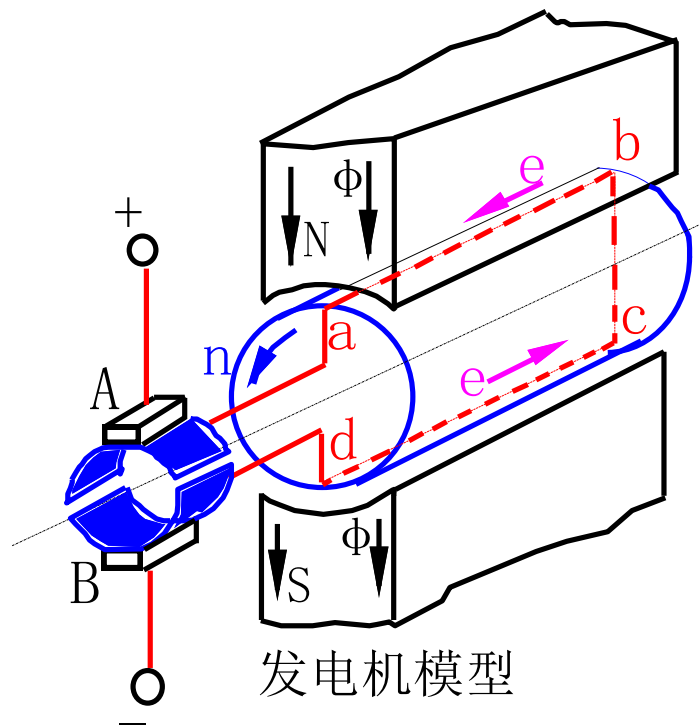
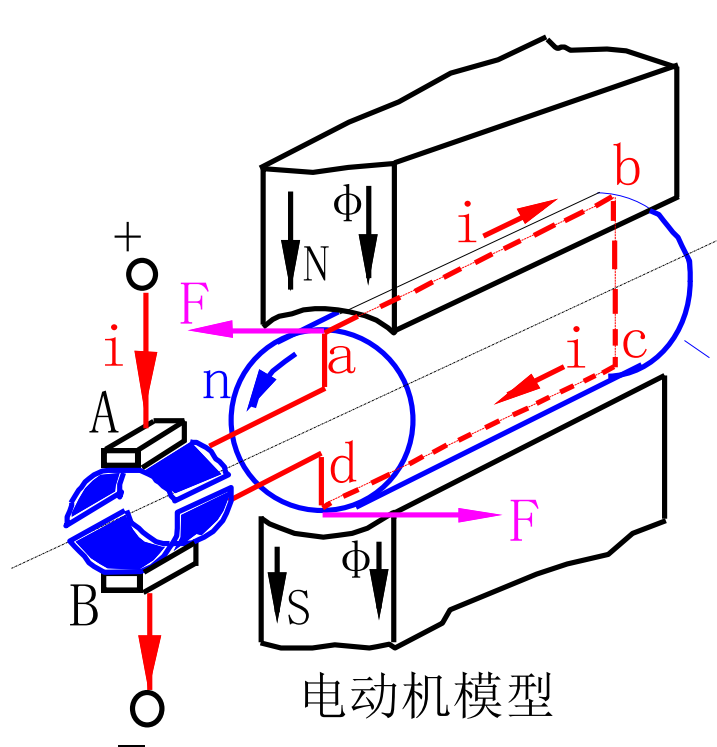


特点：每个磁极下的线圈元件边中电流方向固定不变。

直流发电机(dc generator)的物理模型



特点：电枢旋转方向不变时，电刷上的电压极性恒定，感应电动势是交流变化的。

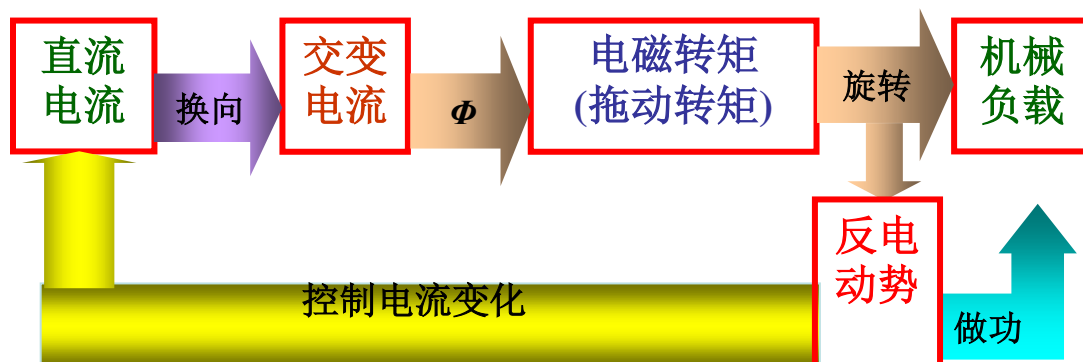


同一直流电机可作发电机运行，也可作电动机运行，关键在于输入功率的性质；

· 发电机原理和电动机原理总是同时出现的，这是实现能量转换平衡的关键。

- **发电**：输出电功率同时，导体元件中产生电流依 $F=Blv$ 产生反转矩(opposite electromagnetic torque)；平衡原动机拖动转矩，使发电机转速稳定（外在表现）。
- **电动**：轴上输出机械功率同时导体元件在主磁极下运动，依 $e=Blv$ 产生反电动势(counter-electromotive force, cemf)；平衡外加电源电压，限制导体元件电流和电动机电磁转矩，平衡负载转矩，使电动机转速稳定（外在表现）。

• 电动机电磁平衡关系



思考：直流电机为什么要保证每个磁极下的线圈元件边中电流方向固定不变？一对磁极时线圈空间旋转一周，线圈中的电流方向要改变几次？如果线圈旋转速度为1200转/分，则线圈中电流每秒要改变几次方向？

电机基本理论分析小结

- 电磁感应定律（法拉第、洛伦兹）→能量转换的实际特征→电机电磁场设计、电机结构设计
- 直流电动机为例：运动可持续→转动结构→换向换流问题→电刷、换向器结构

问题：

- （1）能量转换过程是如何平衡的？是为了满足什么需求？
- （2）电机实现能量转换传输的关键物理量是什么？
- （3）直流电动机动、静态运行时，磁场和绕组有效导体之间的空间关系是什么样的？
- （4）电机主磁场如何实现封闭性？



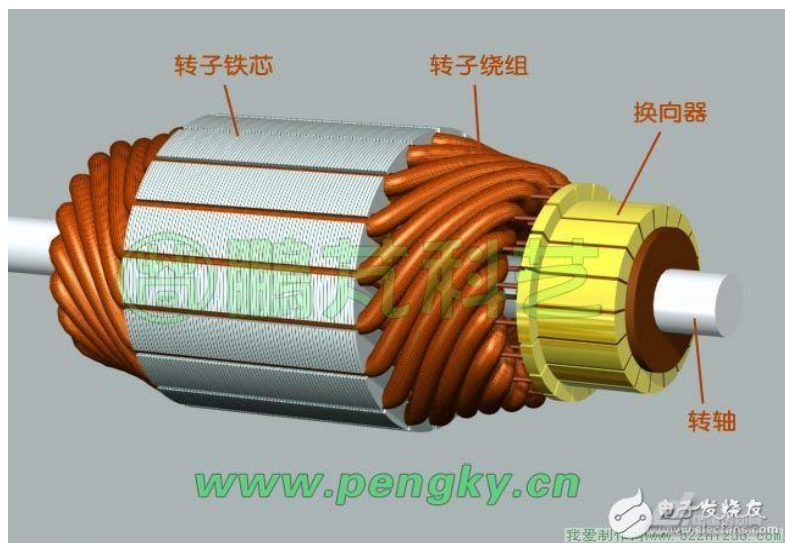
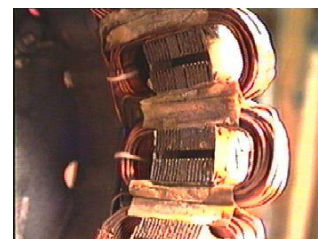
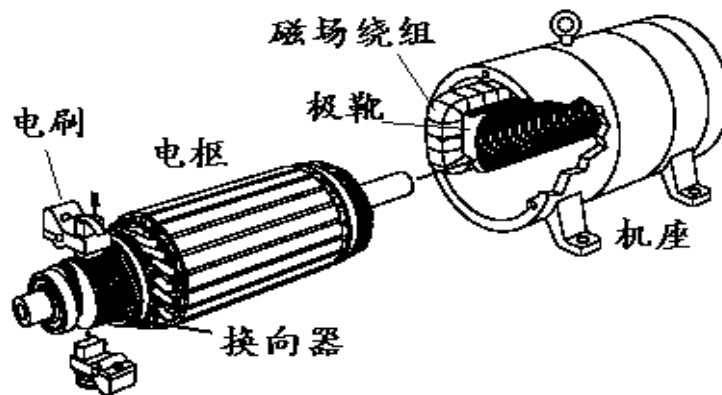
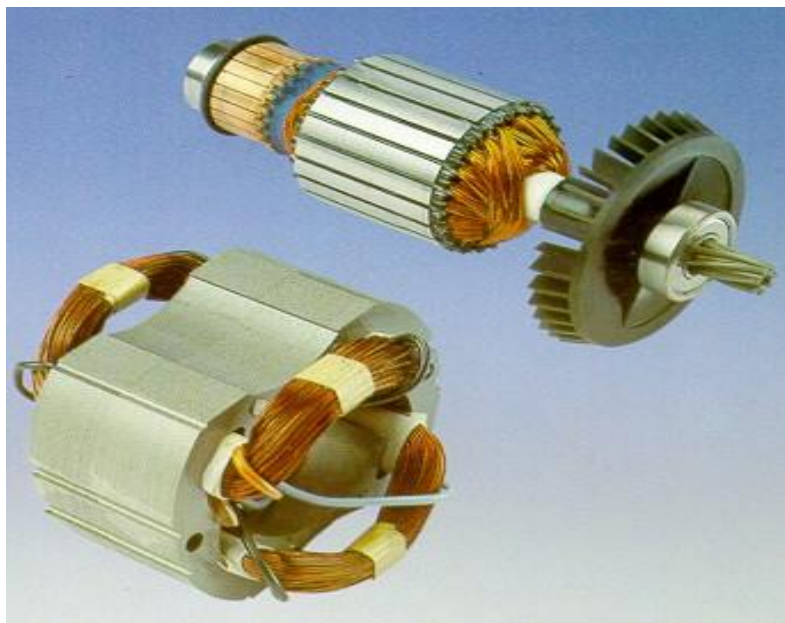
二、基本结构（阅读）

- 1、主磁极(main poles)
- 2、电枢(armature)绕组
- 3、电枢铁心(core)
- 4、换向器 (commutator)
- 5、换向极(commutating poles)
- 6、电刷(brushes)装置
- 7、机座



华中科技大学

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



直流电动机的额定参数：在特定旋转结构下的参数定义

正常工作的限制条件

额定电压 U_N ：额定工况下加在电枢绕组上的工作电压。（V、kV）

额定电流 I_N ：额定工况下长期运行的最大电枢电流。（A）

额定功率 P_N ：额定工况下电机轴上允许长期输出的最大机械功率。
（W、kW）

$$P_N = U_N I_N \eta_N$$

η_N ：额定工况下直流电动机的工作效率。

额定转速 n_N ：额定工况下电动机的运行速度。（r/min）

额定转矩 T_N ：额定工况下电动机轴上的输出转矩。（N·m）

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N}$$

P_N 的单位为kW。

说明：（若功率单位用W，则 $T = \frac{P[\text{瓦}]}{\Omega[\text{弧度/秒}]} = \frac{P}{n[\text{转/分}]} \frac{60}{2\pi} \approx 9.55 \frac{P}{n}$

§ 2—2 DC电动机的结构特征与工作特性

新问题：如何以抽象化的数学形式表达电机的运行特征？

物理概念和定律的复习：分析电机对象机电特性的基础

1、磁通密度B [Wb/m²,T]: (Wb=weber,T=tesla)(Magnetic Flux Density)

单位截面积上的磁通，描述磁场强弱及方向，可以具有**时间和空间**的特性。

在空间磁感应强度服从叠加原理：某一给定的电流分布在空间某点所产生的磁感应强度等于组成这电流分布的各电流元分别地在这同一点上所产生的磁感应强度的**矢量和**。磁力线方向与电流**方向满足右手螺旋**关系。

2、磁感应通量（磁通） ϕ [Wb]: (Magnetic Flux)

穿过某截面S的磁感应强度B的通量

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

在均匀磁场中，如果截面S与B垂直，则

$$\phi = BS$$



3、磁场强度H [安培/米]: (Magnetic Field Intensity), 计算导磁物质中的磁场用**辅助**物理量 $B = \mu H$

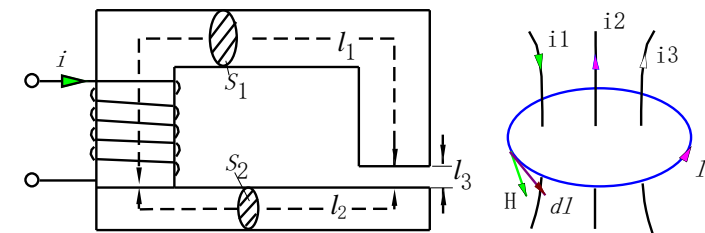
μ : 导磁物质磁导率。空气的磁导率为 μ_0

铁磁材料的 $\mu_{Fe} \gg \mu_0$ (几千~几万倍, 通常不是常数)

4、安培环路定律: (**全电流定律**) **磁路概念的认识**

磁场强度矢量**H**沿**任何闭合路径**的线积分等于该回路所环链的所有电流的代数和

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I$$



$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum i = \int_{l_1} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} + \int_{l_2} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} + \int_{l_3} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Ni$$

设各段磁路中磁通均匀分布, l 为磁路平均

长度, 则上式简化为 $\sum Hl = \sum Ni$ 或 $\sum U_m = \sum F$

其中 $U_m = Hl$
称为该段磁路的磁压;

$F = Ni$ 称为磁通势 (**磁势、磁动势**
【magnetomotive force】)。

N 为线圈匝数

5、磁路欧姆定律：

$$\phi = BS = S\mu H = \frac{Hl}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{U_m}{R_m} = \frac{F}{R_m} \quad \text{或} \quad F = \phi R_m$$

其中定义磁阻(magnetic reluctance)为： $R_m = \frac{l}{\mu S} [A/Wb]$

定义磁导为： $\Lambda_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu S}{l}$

思考题

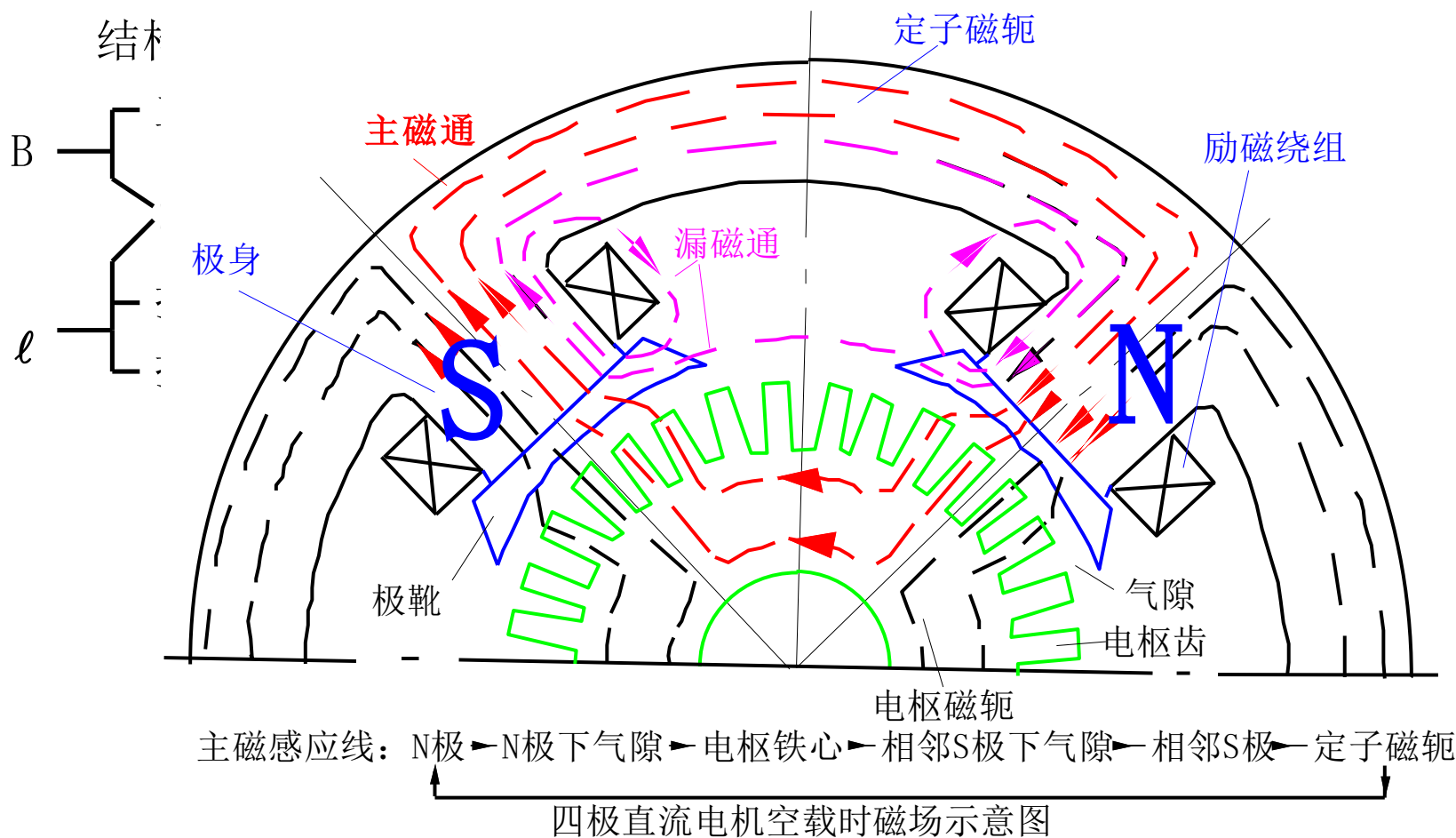
(1) 什么是安培定律？什么是磁场强度？什么是磁通密度？它们之间有什么关系？(2) 什么是Faraday定律？在一个闭合电路中，感应出的电动势与该电路所交链磁通的变化率成比例，电动势的方向可由楞次定律确定。

(3) 磁场对磁场中的导体产生力的必要条件是什么？

(4) 使磁场中的导体上产生电压的必要条件是什么？

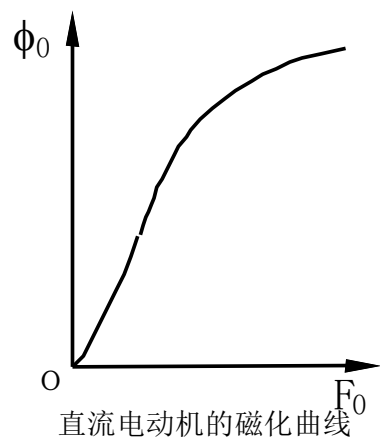
一、主磁极与主极磁场 main field poles, main poles magnetic field

- 问题：如何构造并分析直流电机磁场？

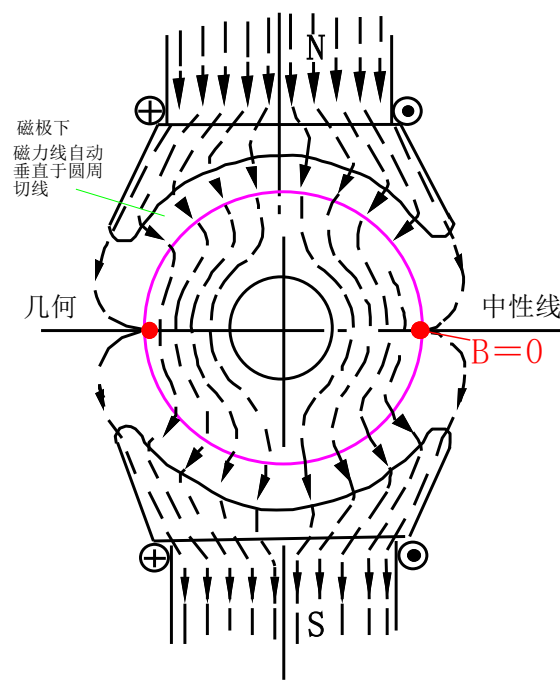


- 主磁极：套装有励磁绕组的电磁铁或经过充磁的稀土永磁磁铁。
- 磁路的等效简化：设1个主极的励磁磁通势、主磁通量分别为 F_0 ϕ_0
 R_m 为主磁极磁感应线所经路径上的总磁阻。则有：

$2F_0 = \phi_0 R_m$
- 磁路特点：具有一定饱和特性；包含气隙。



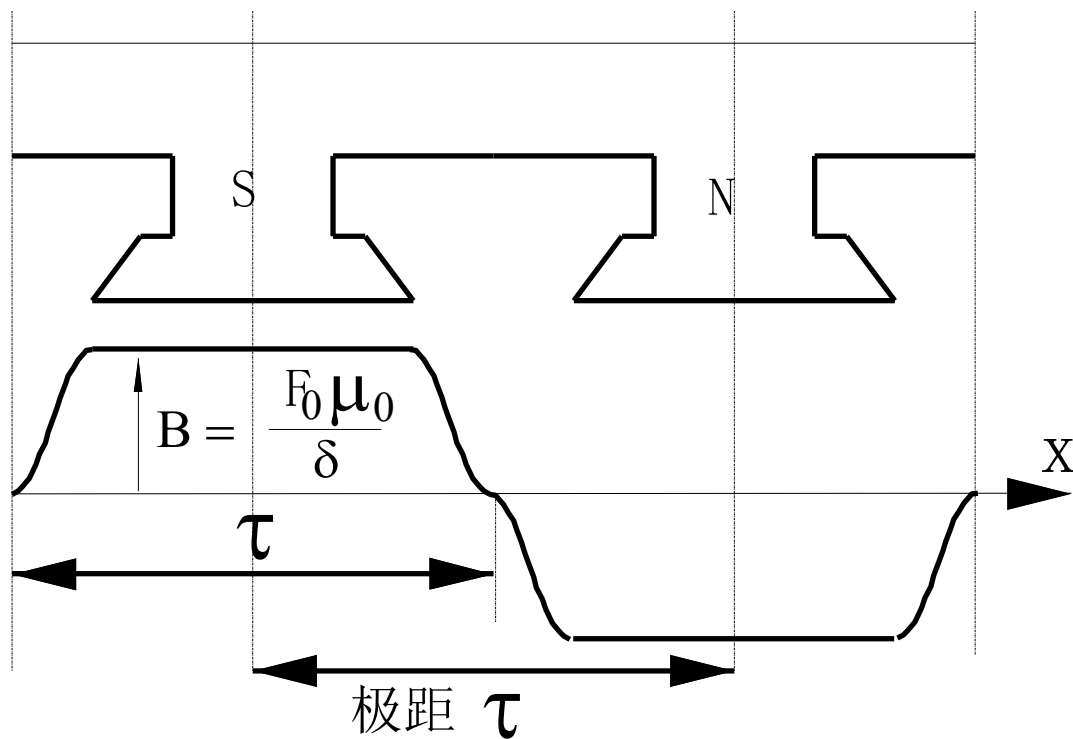
由两个基本公式：
 $F = Bli$ 、 $e = Blv$
 为了知道 F 、 e 的大小，
 必须知道
电枢铁心表面 B 的大小，
 因为产生电磁力矩的载流导体都分布于此。



- 在磁极下: $\because BS = \phi = \frac{2F_0}{R_m} = \frac{2F_0}{R_{m0} + R_{ms}}$
- 铁心磁阻 $R_{ms} = \frac{l - 2\delta}{\mu_s S} \ll \text{气隙磁阻 } R_{m0} = \frac{2\delta}{\mu_0 S}$
- $\therefore B \approx \frac{2F_0}{2\delta} \mu_0 = \text{常数}$
- 在极靴外, $\delta \uparrow \uparrow \rightarrow B \downarrow \downarrow$ 并在两极分界处降为0。
- 几何中性线:** 与主磁极轴线正交的电枢径向轴线（结构相关）；
- 磁场中性线、物理中性线:** 电枢表面 $B=0$ 处的电枢径向轴线（磁场相关）。
- 仅存在主磁通时二者重合。

- 磁场分布特性

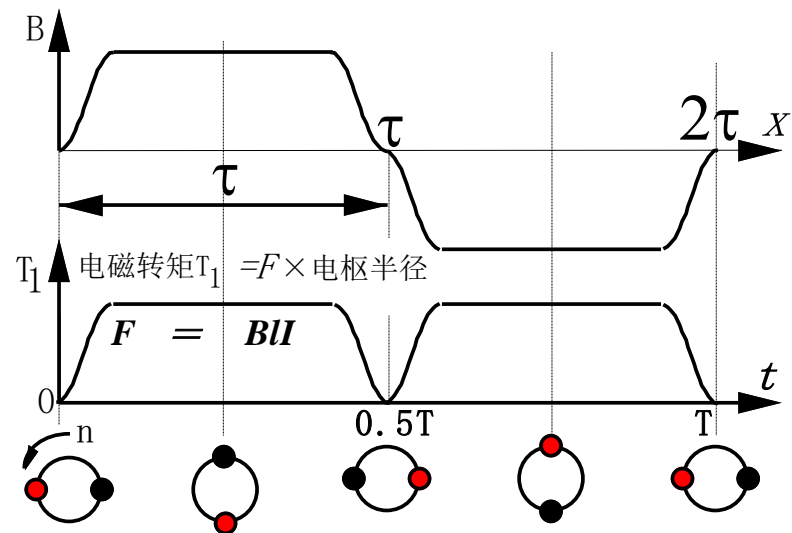
- (1) 取磁力线穿出电枢表面的 \mathbf{B} 为正。
- (2) 相邻两主磁极轴线间的距离称为极距 τ 。



二、电枢绕组 (I) Armature coils: 保证在同一主磁极下电流方向不变。

- 由于磁力线具有垂直出入介质表面的性质，两个基本公式 $F=Bl$ 、 $e=Blv$ 的正交条件成立。
- 当绕组元件中 I =常数时，元件边受电磁力 F 的大小决定于元件边所在空间位置上 B 的大小。
- 当电枢作匀速旋转时， **$F(t)$ 的变化规律与 $B(x)$ 的空间分布规律一致**，但因电刷和换向片的作用， F 的方向不变：

- **存在问题：** 转矩小、波动大、有零转矩点。
- **对策：** 增加绕组元件数、合理联接，增大转矩、减小脉动。



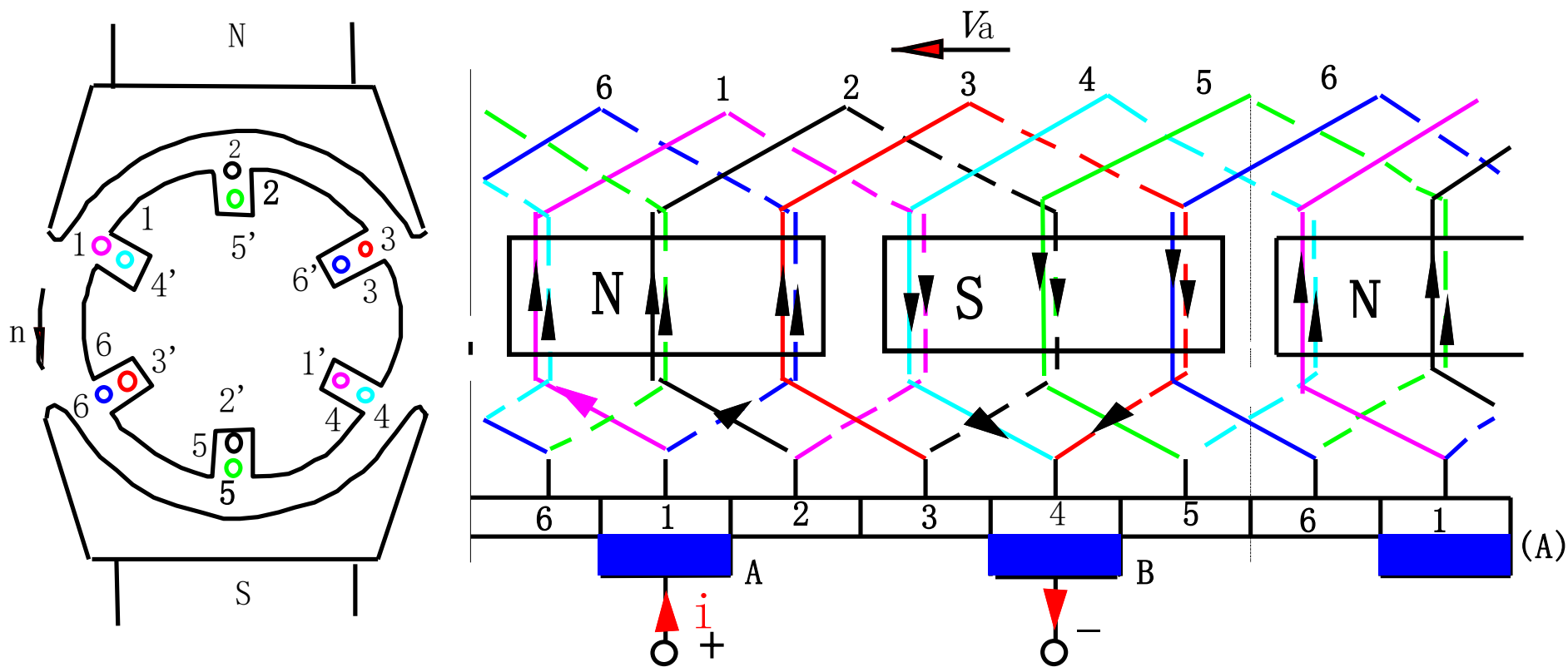
分析思考小结:

- 电磁感应原理 → 电机结构分析、组成定义、参数定义 → 电磁感应原理再认识
- **B**以及**B**和**L**的空间关系，是精确认识描述电机工作特性的关键
- 用电磁的分析方法分析电机的工作原理，电磁概念与磁路分析方法

思考问题:

- (1) 主磁场的结构特点？电机电磁场分析的切入点是什么？如何进行？
- (2) 转子结构如何适应主磁场结构以及导体簇（电枢绕组）的特点？

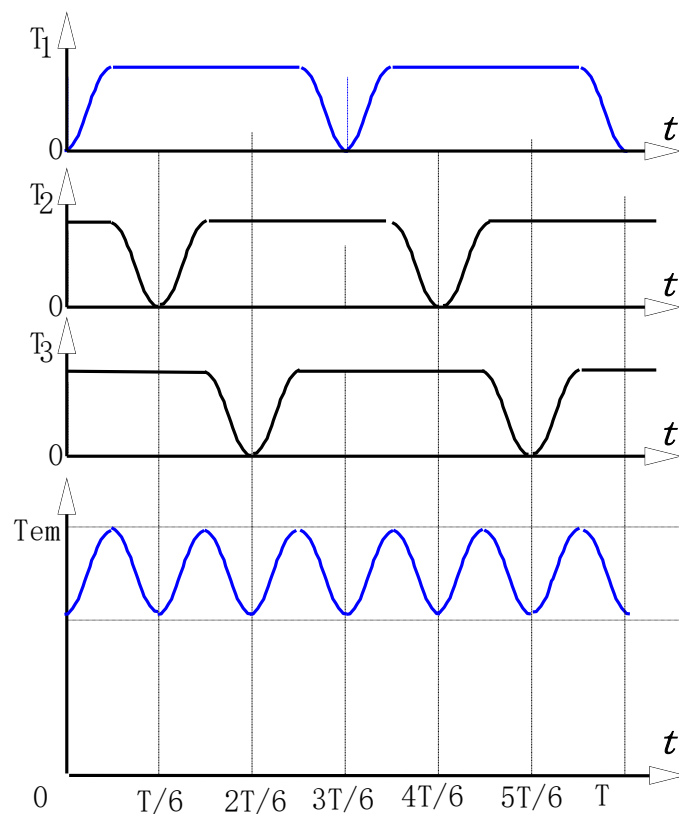
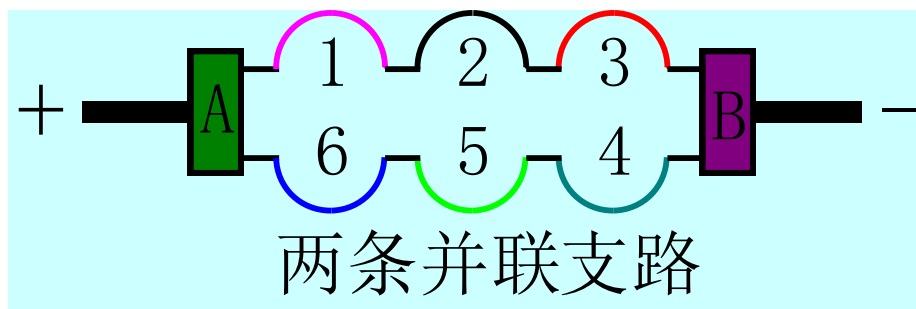
- 例： 1对磁极、6绕组元件模型：





分析：电枢以线速度 V_a 运动时，绕组元件和电刷A的换接顺序为1—2—3—4—5—6—…，

换接后仍保持使**同一磁极下的电流方向不变**。



• 特点:

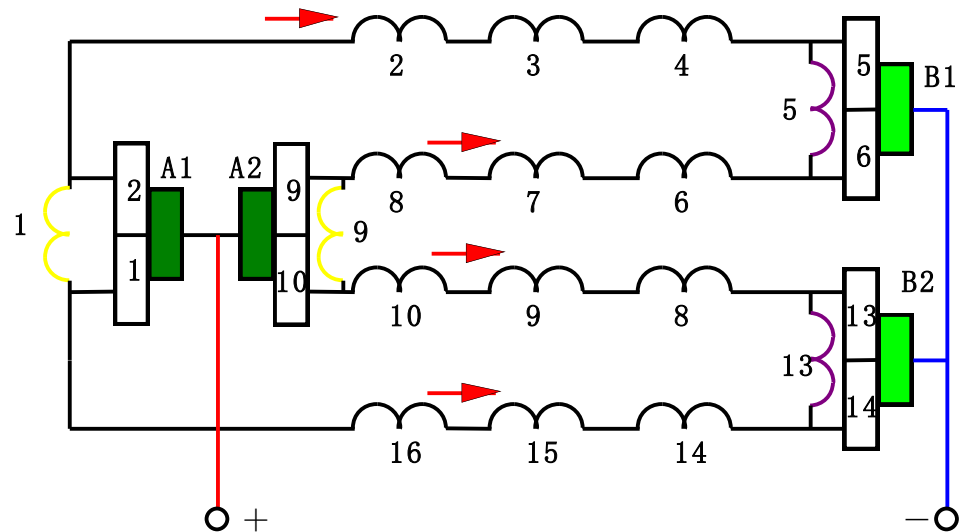
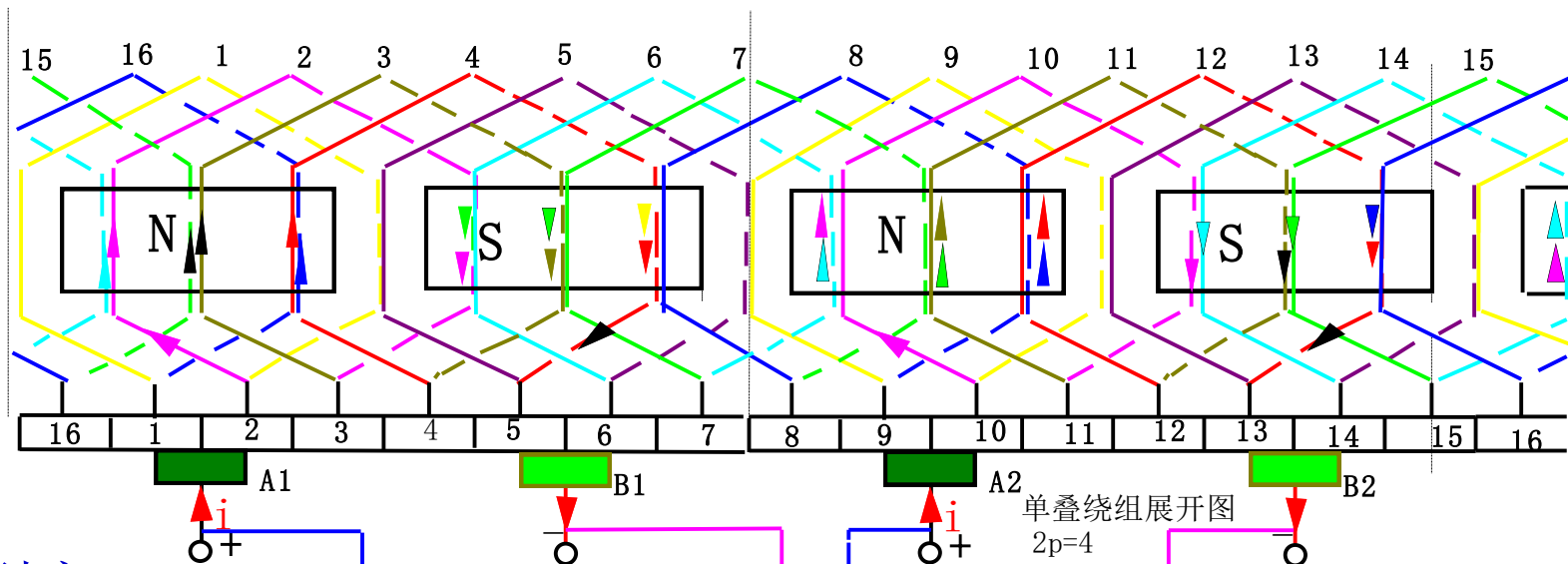
- 1、元件头尾相接，自成**闭合回路**。
- 2、加上电刷后，变成两条并联支路。 $I_a = 2ai_a$
a为**并联支路对数（等于磁极对数）**
- 3、同支路绕组元件上层边均在同主磁极下
- 4、电刷位于主磁极轴线通过的换向片上
- 5、并联支路对称，电枢旋转不改变特点。
- 6、电磁转矩等于各绕组元件建立的T之和：幅值增加，脉动减小，零转矩消除。
- 7、进一步增加绕组元件数， $T_{em} \uparrow$ 脉动↓



华中科技大学

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

实际电枢的常用绕组结构：叠绕($a=p$)、波绕($a=1$):



单叠绕组
并联支路对数 a =磁极对数 p

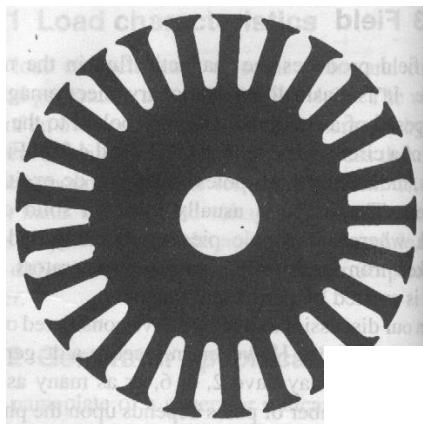
换向过程中被电刷
短路绕组在几何中
心线附近

磁极与电刷空间相对静止，电枢绕组连同换向片相对它们是运动的。磁极均匀分布，中心距为 τ 。

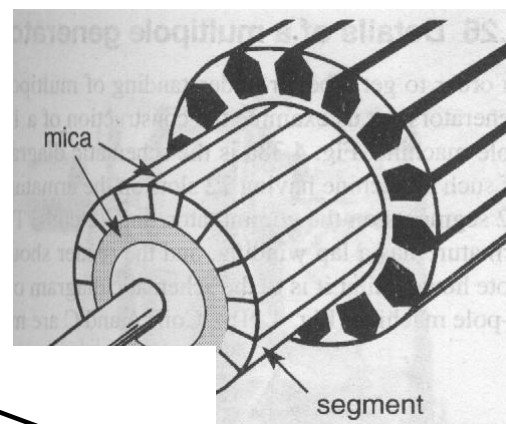
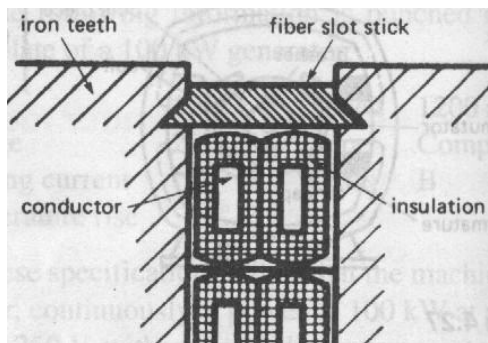


华中科技大学

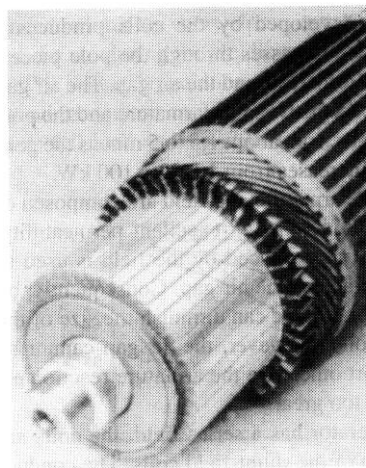
HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



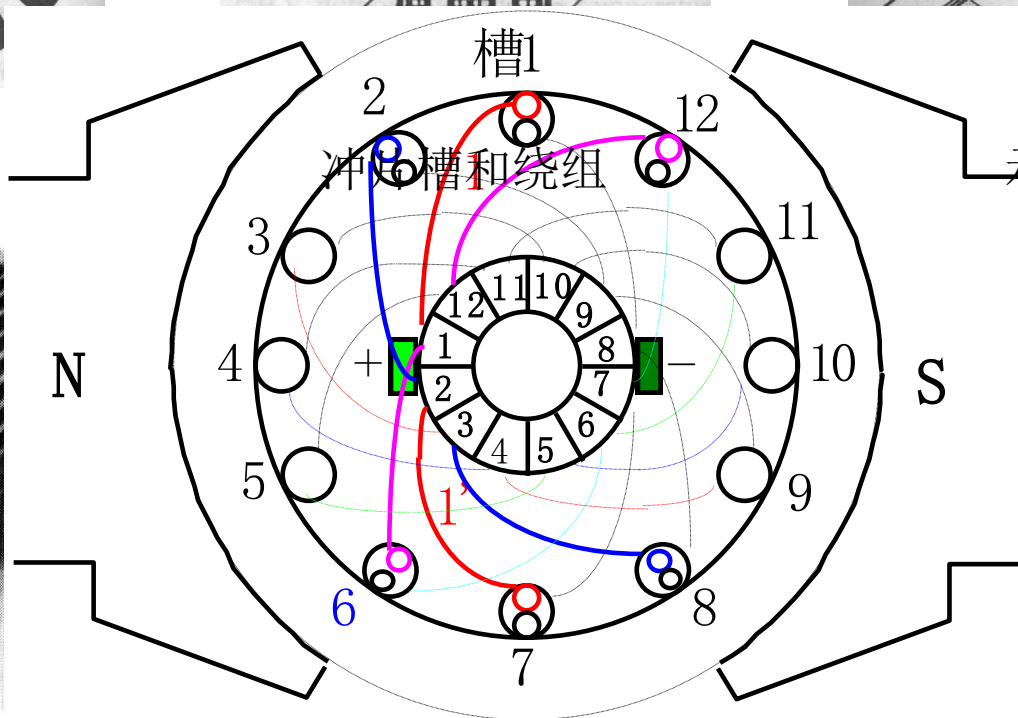
转子冲片



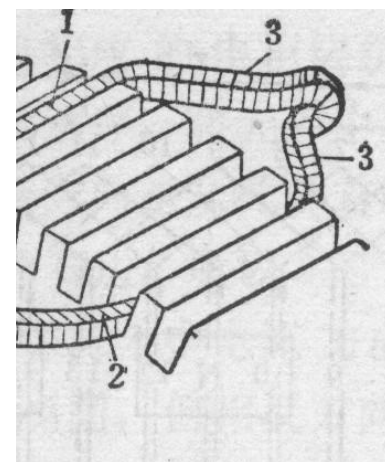
示意图



转子实际结构



物理结构
换向片和电刷

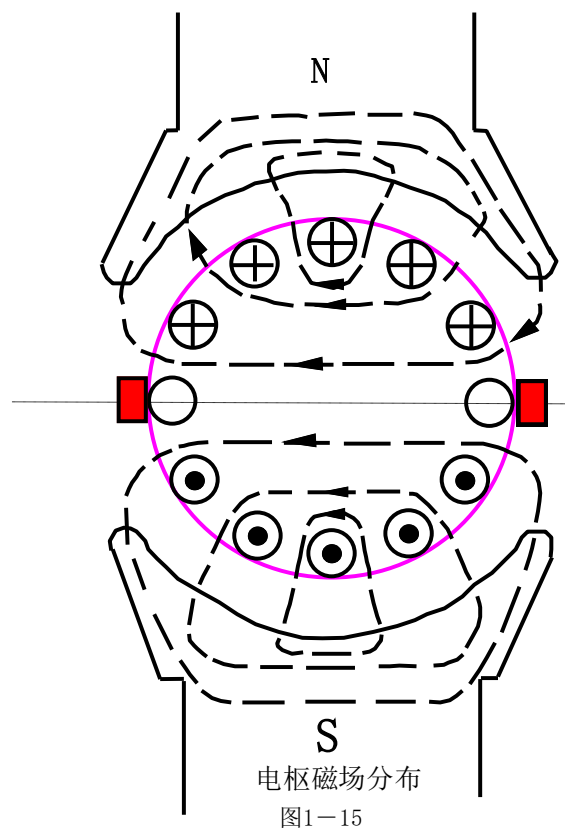
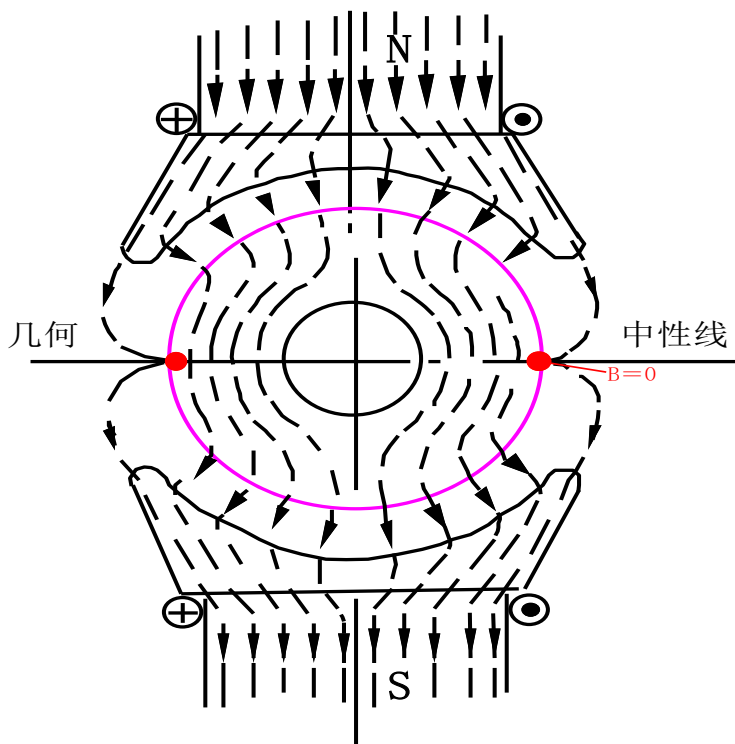


绕组叠放

- **问题：**直流电机是否存在特殊问题需要分析与认识？

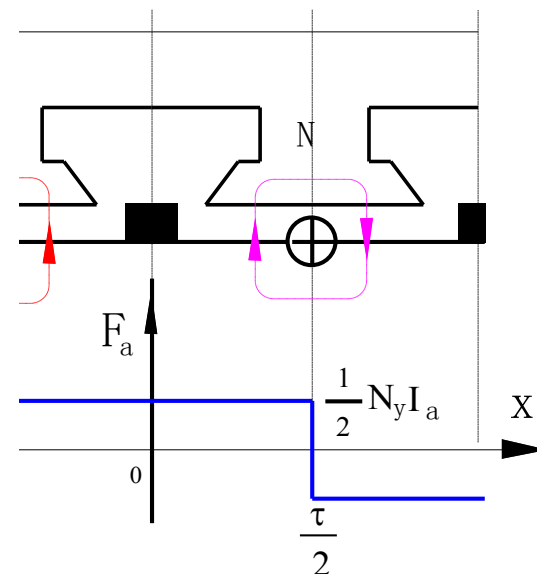
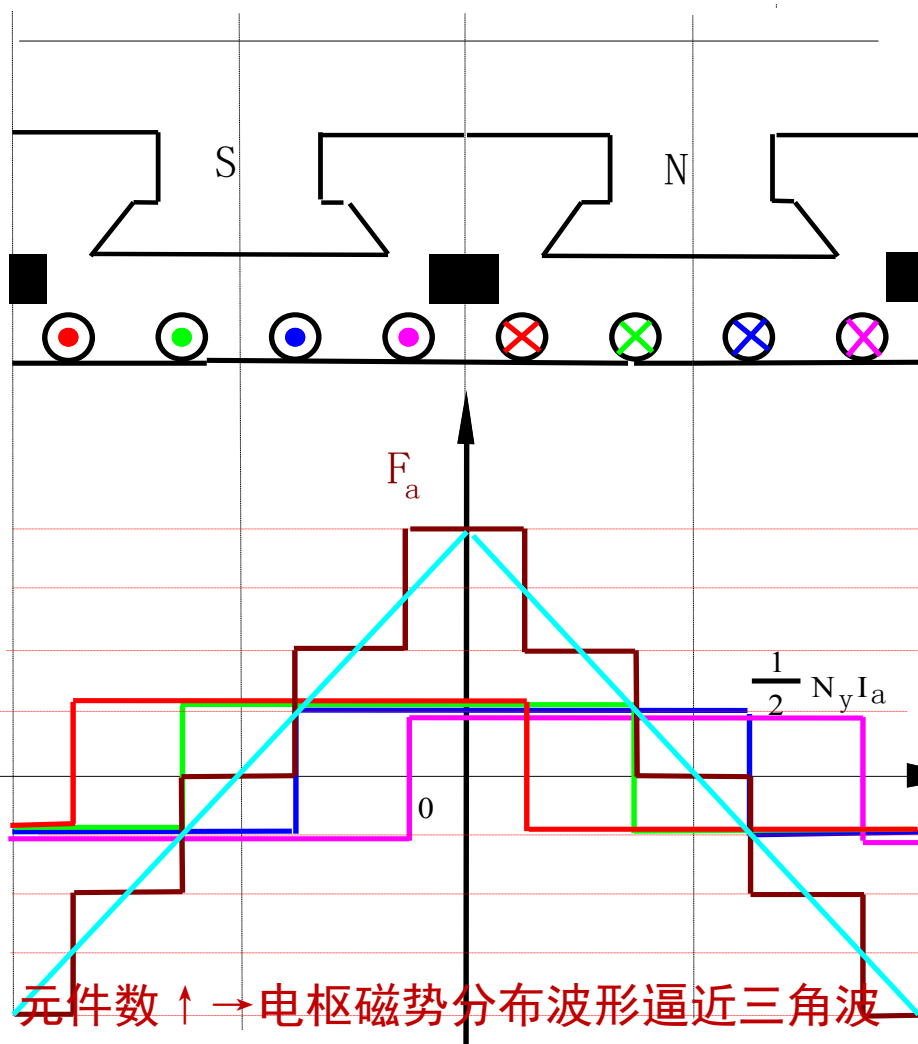
三、电枢反应[armature reaction] (B , I) :

- 电枢电流产生磁场的影响





电枢反应磁势的空间分布：



元件所产生的电枢磁势

有一元件，元件边在磁极轴线上

有 N_y 根导线，元件中电流为 I_a

结论：宽度为1个极距的元件所产生的电枢磁势在空间的分布为一个以两个极距为周期，幅值为 $\frac{1}{2}N_y I_a$ 的矩形波

I_a

四个元件所产生的电枢磁势

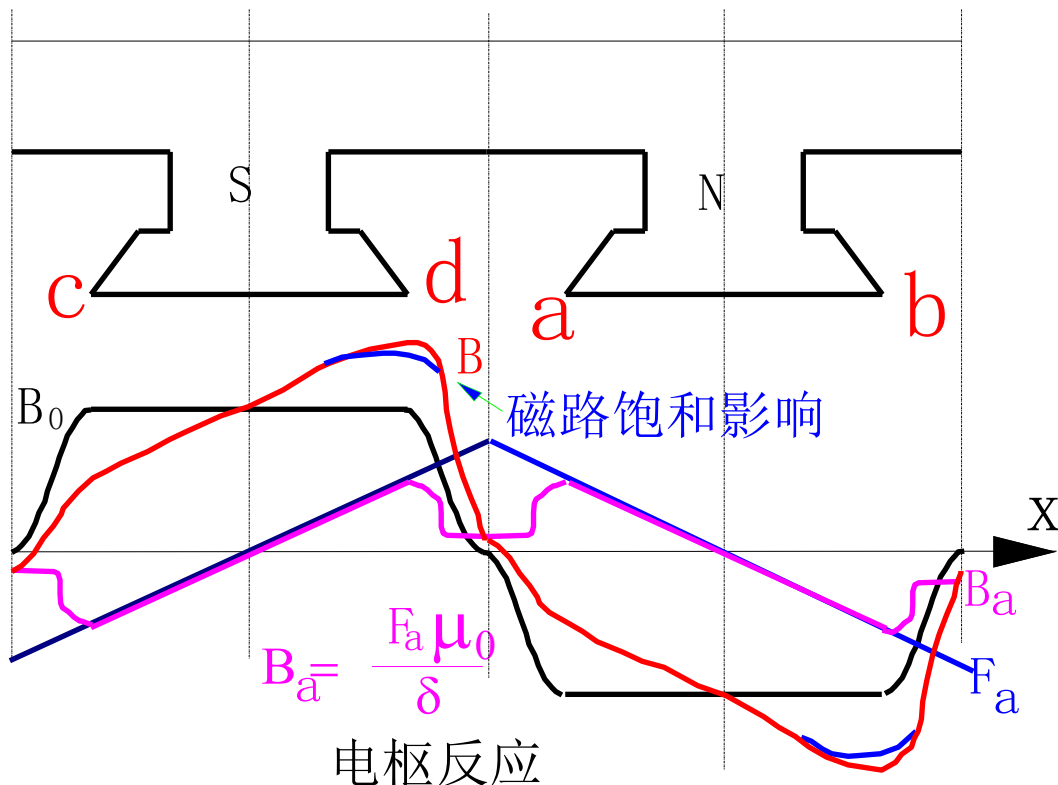
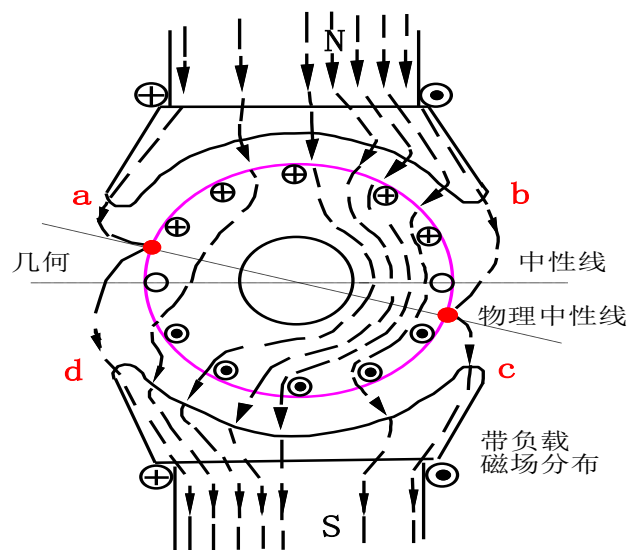


华中科技大学

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

• 直流电机的电枢反应

电枢反应磁势 F_a 的性质：空间静止；与 F_0 相交链。

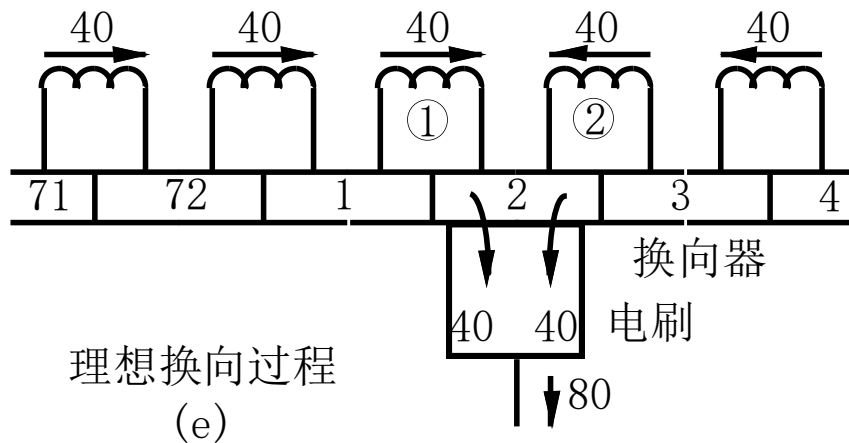
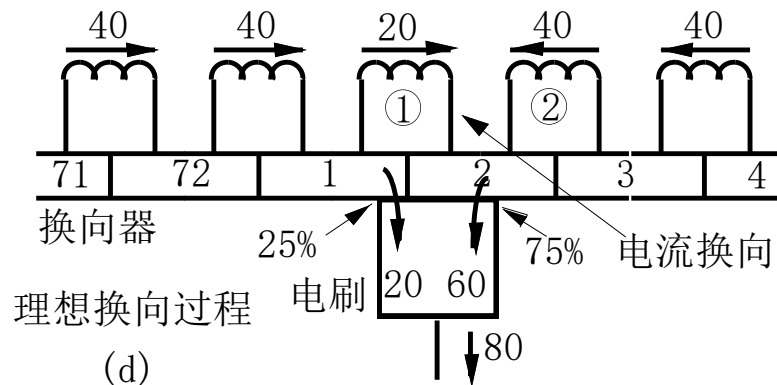
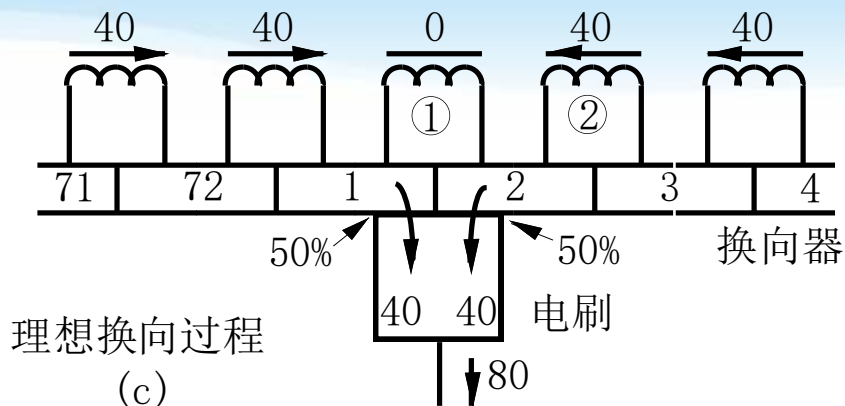
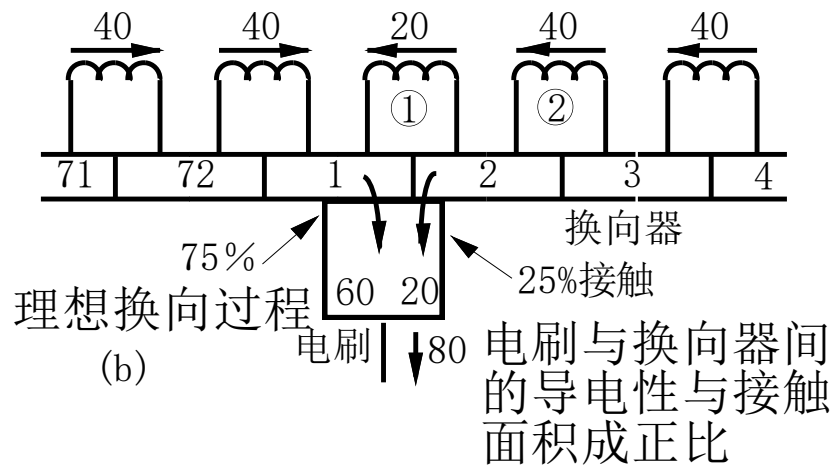
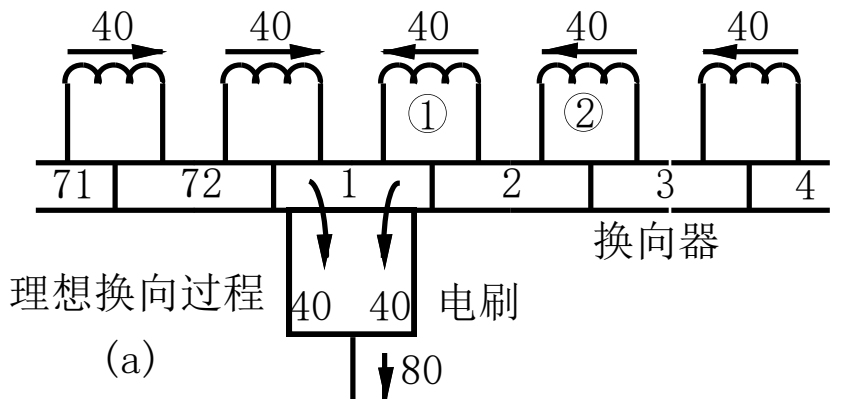


- 气隙磁场畸变，物理与几何中性线不重合
- 每极磁通比空载时略减小

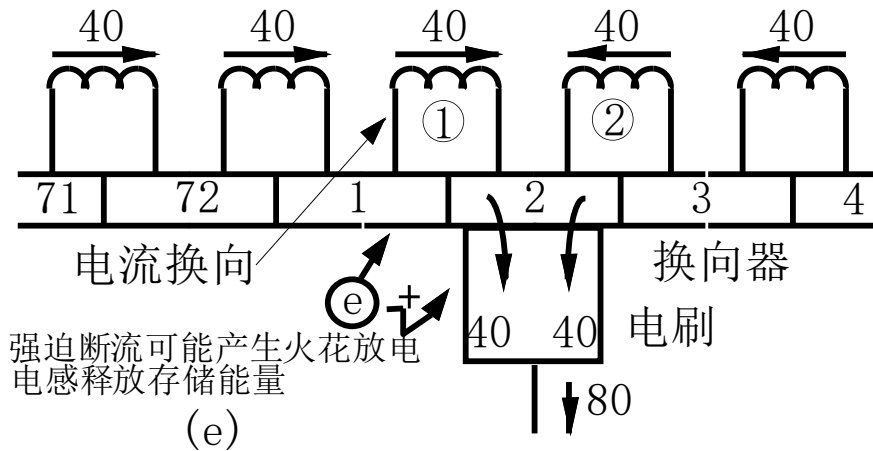
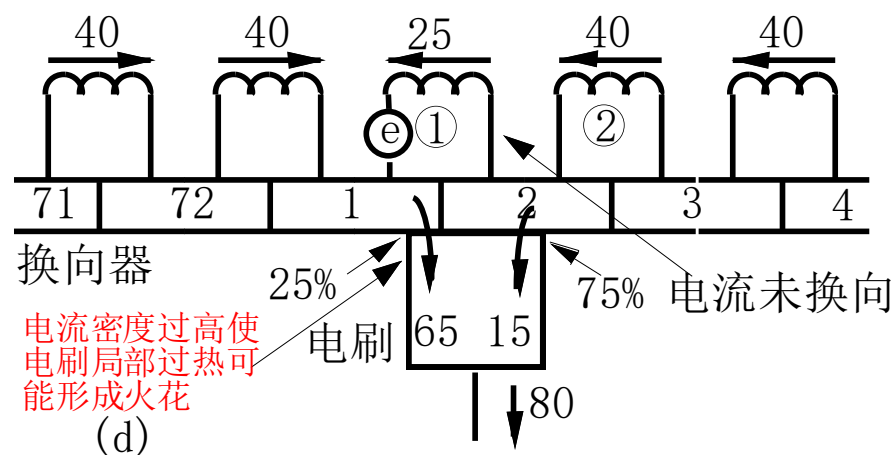
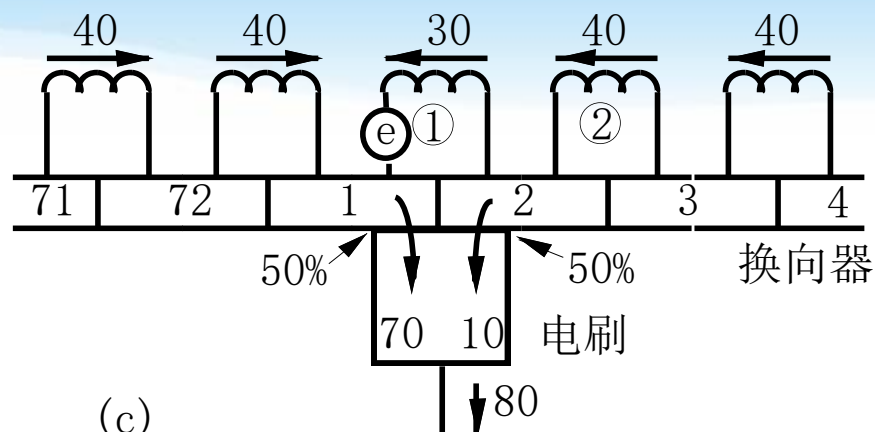
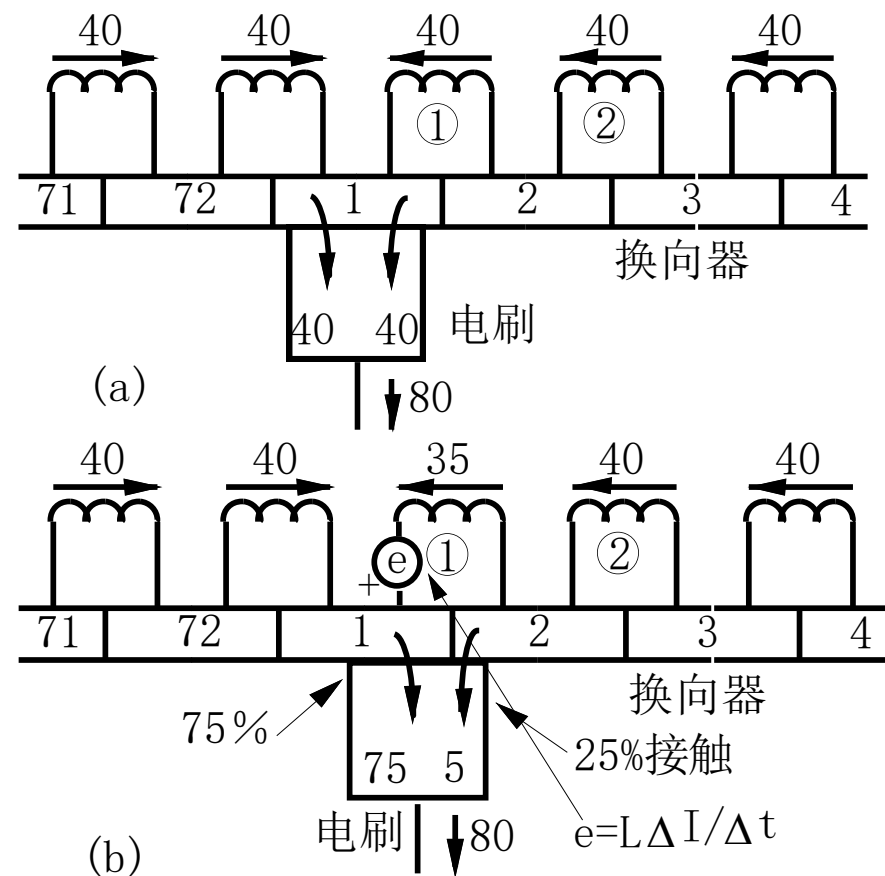
四、换向:

1) 线圈电感的影响

• 理想换向过程

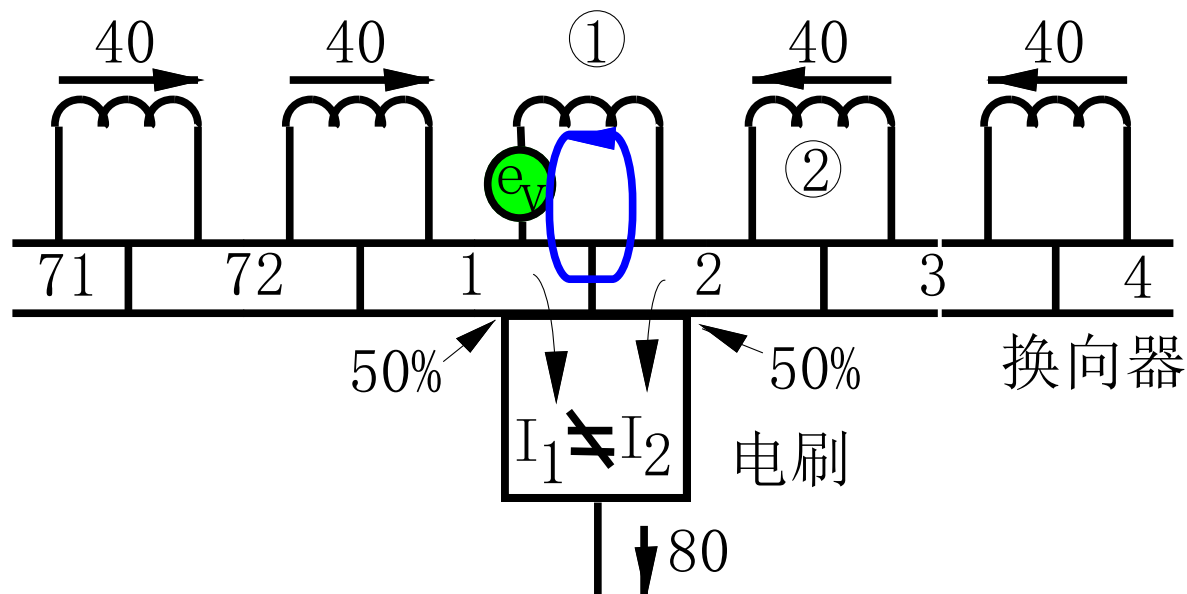


实际换向过程



结果：DCM在高速大功率（大电流）领域应用受限：换向困难、换向器很容易损坏。

2) 电枢反应的影响



电枢反应使几何中性线上磁通非0
 换向中被电枢短路的线圈电压非0
 经电刷短路造成电刷顶端局部
 电流密度过大可能过热损坏

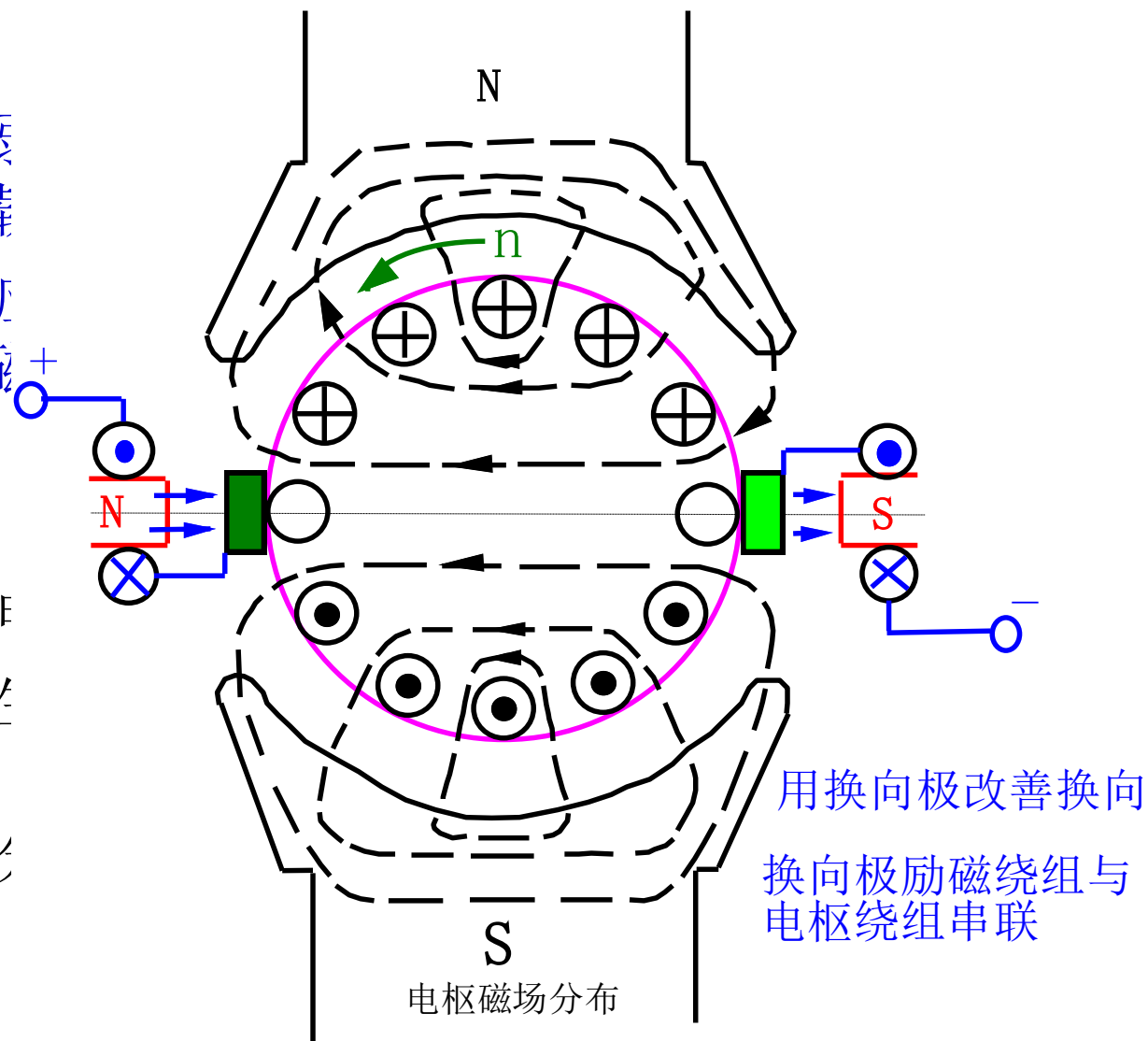


两点结论:

- 换向器是电机中最薄弱环节，其容量、转速、过载能力受其限制。
- 改善换向削弱电枢反应，利用 I_a 励磁产生磁通。

小结:

- 改善转矩特性产生了电枢反应
- 多绕组元件的设计产生电枢反应
- 如何认识和理解电枢反应
- 电枢反应问题的特征分析
- 换向问题的认识

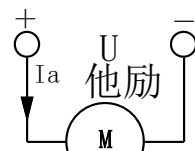


• 附录阅读材料：直流电机名词术语介绍

- (1) 极轴线：磁极的中心线；
- (2) 几何中性线：磁极之间的平分线，物理中性线： $B=0$ 的直线；
- (3) P ：极对数， a ：由电刷和换向器连接的绕组并联回路对数；
- (4) τ 极距：在电枢铁心表面上，一个极所占的距离。可用槽数表示， $\tau=Z/P$ ，式中 Z 为电枢总槽数；
- (5) 元件（线圈）：是绕组的一个基本单元，可为单匝，也可为多匝；
- (6) 元件节距 Y_1 （第一节距）：元件两条边的距离，以槽数计，总是整数， $y = \frac{Z}{p} \pm \epsilon$ 整数 ϵ ：是使凑成整数的分数。
- (7) 合成节距 Y ：相串联两个元件的对应边在电枢表面上的距离，称为合成节距，通常也用槽数来表示；
- (8) 换向器节距 Y_k 通常用换向片数 K 来表示。
- (9) 有效导体：绕组元件链接主磁场的部分；



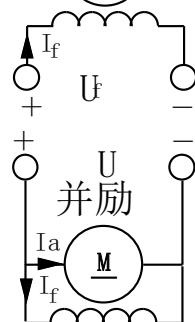
五、励磁方式及电枢供电电路



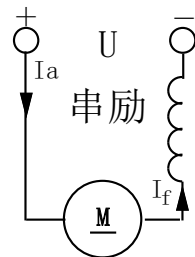
特点

separately excited

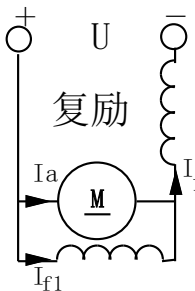
- 他励：励磁电流稳定，与电枢电流无关，不计电枢反应时，磁通为常数。当采用调压调速时，磁通不变。



- 并励：直流电源内阻小时特点与他励相同，否则励磁电流可能随负载增大而减小。当采用调压调速时，磁通会随之改变。



- 串励：负载变化时励磁电流及主磁通同时改变。



compound

- 复励：励磁电流和主磁通随负载的变化程度介于他励与串励二者之间。

概念回顾

- **空载磁场：**发电机出线端没有电流输出，电动机轴上不带机械负载，即电枢电流为零的状态。这时的气隙磁场，只由主极的励磁电流所建立，所以直流电机空载时的气隙磁场，又称励磁磁场。
- **主磁通：**经过主磁极、气隙、电枢铁心及机座构成磁回路。它同时与励磁绕组及电枢绕组交链，能在电枢绕组中感应电动势和产生电磁转矩，称为主磁通，
- **漏磁通：**仅交链励磁绕组本身，不进入电枢铁心，不和电枢绕组相交链，不能在电枢绕组中感应电动势及产生电磁转矩，称为漏磁通。
- **磁滞损耗：**在加至铁芯的每个交流电流周期中使磁畴完成重新定向所消耗的能量。（磁化损耗）。
- **涡流损耗：**感应电势产生涡流流过具有电阻的铁芯，产生的能量损耗。



直流机原理的基础





一、电磁转矩 T_{em}

分析的思路： $\because B(x)$ 是 x 的函数

→ 某一根导体的 $T(x)$

→ dx 弧长内导体所建立的 dT

→ 一个极距上的所有导体所建立的电磁转矩 $\int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} dT = T_{\tau}$

→ 电枢全部导体所建立的电磁转矩 $T_{em} = 2pT_{\tau}$

分析:

- 1根导体: $\because F_x = B_x l i_a \therefore T_x = \text{力} * \text{力臂} = (B_x l i_a \frac{D_a}{2})$
 $D_a = \text{电枢直径}$
- dx 弧长中的导体数 (假设导体在电枢表面均分, 总数 N) $\frac{N}{D_a \pi} dx$
- dx 区间内导体所建立的转矩:

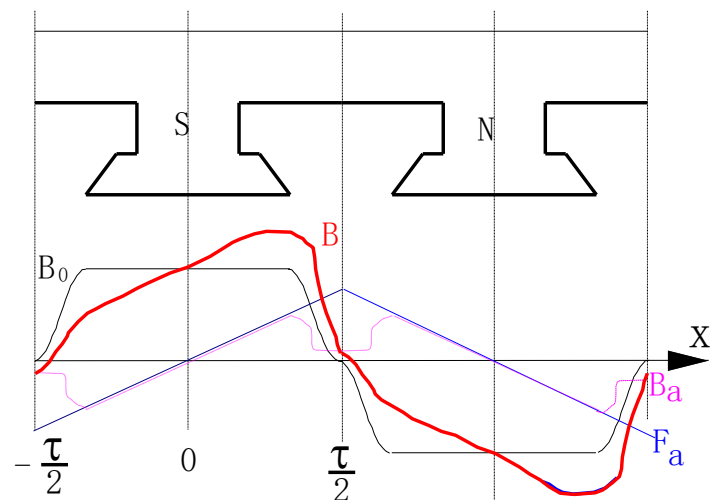
$$dT = T_x (\frac{N}{D_a \pi} dx) = B_x l i_a \frac{N}{2\pi} dx$$
- 一个主极下导体产生的转矩:

$$T_\tau = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} dT = \frac{N i_a}{2\pi} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} B_x l dx = \frac{N i_a}{2\pi} \phi$$

其中

$$\phi = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} B_x l dx$$

为DCM的**每极磁通**
 [flux per pole]。



磁通在一个极距下的积分: 每极磁通 ϕ

5、由 $T_{\tau} = \frac{N i_a}{2\pi} \phi$ ，因 $I_a = 2a i_a$

p为磁极对数，a为电枢绕组并联支路对数
则电枢全部导体产生的电磁转矩为：

$$\therefore T_{em} = 2pT_{\tau} = 2p \frac{N}{2\pi} \phi \frac{2a i_a}{2a} = \frac{pN}{2\pi a} \phi I_a = K_T \phi I_a$$

重要结论：

$$\therefore T_{em} = K_T \phi I_a$$

其中转矩系数、转矩常数

$$K_T = \frac{pN}{2\pi a}$$

特点：

- 直流电动机电磁转矩与每极磁通和电枢电流的乘积成正比。
- 对他励DCM，不考虑电枢反应影响时、励磁电流恒定时，有

$$T_{em} = C_T I_a, \quad C_T = K_T \phi = \text{常数} \quad \text{【有量纲：} [\text{Wb}] \text{】 或 Nm/A}$$

优点：

- 直流电动机的电磁转矩直接受电枢电流控制【线性、能观能控】。
- 对单叠绕组 $p=a$ ，增加 p 并不影响转矩常数。
- 在直流电机中，增加磁极主要用于减小电机尺寸，改善大电机性能。

一般电机越大，磁极对数越多。 $[p=a, I_a = 2ai_a : p \uparrow \rightarrow i_a \downarrow]$

二、电枢电动势 Armature Counter-Electromotive Force

基本概念：电角度和机械角度：

机械角度 θ_x ：电枢旋转一周，机械角度变化360度或 2π 弧度。

[弧度/秒]= $\frac{2\pi}{60}n$ Ω 机械角速度

电角度 θ_e ：电枢旋转经过2个极距，电角度变化360度或 2π 弧度。
（用于描述电枢链接的磁感应强度B的周期变化范围）

$$\theta_e = p\theta_m$$

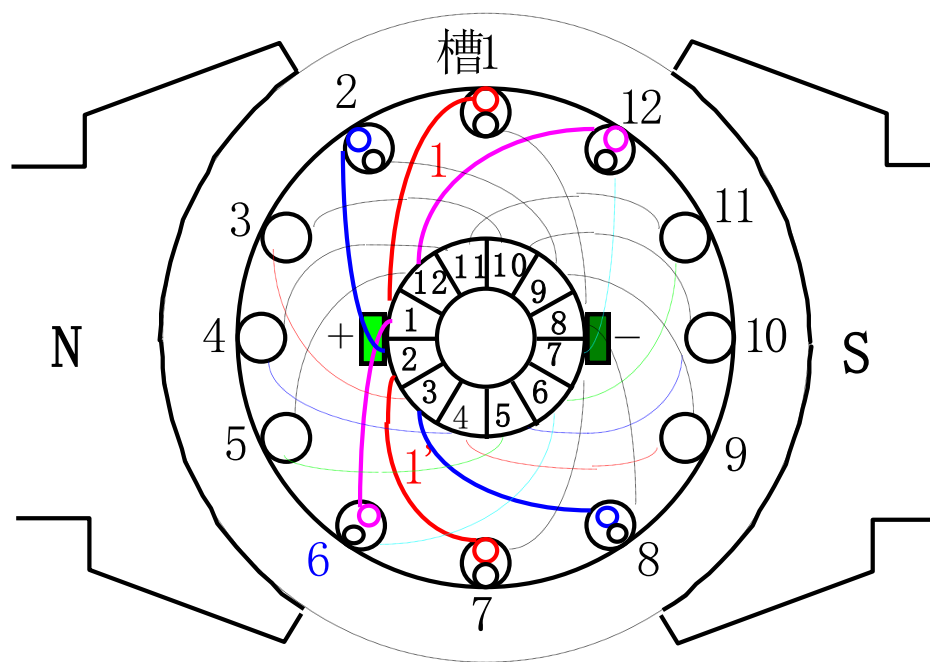
电角速度

$$\omega = p\Omega = p\frac{2\pi}{60}n$$

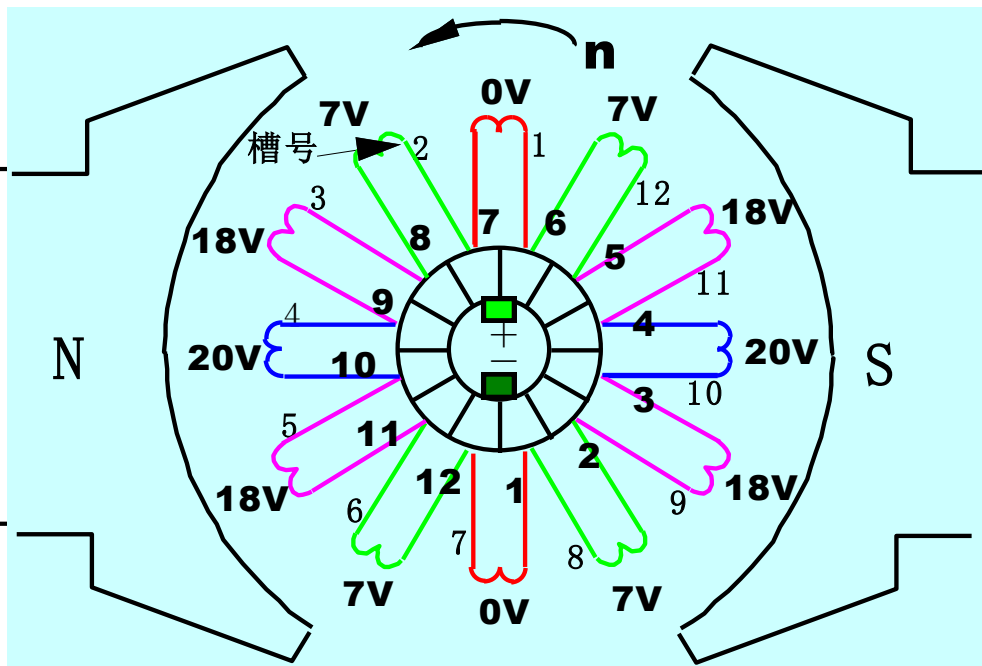


• 电枢电动势（反电势）

E_a 为支路各串联绕组元件内感应电动势之和。



物理结构



原理接线与反电动势举例 $E_a = 70V$

- 任一元件转过 τ ， $\Delta\phi = 2\phi$ ，每元件内感应电势瞬时值不同，但任何瞬时支路构成情况不变，**支路各元件电势瞬时值总和不变**
 $\therefore E_a =$ 任一元件转过一极距的感应电势平均值 \times 支路串联元件数。



- 由电磁感应定律： $e = -N_s \frac{d\phi}{dt}$ N_s 为每个绕组元件的匝数。

- 一元件转过一极距后感应电势的平均值（数值）： 转

过一极距：电角度 $\theta_e = \omega \Delta t = \pi$, 即 $\Delta t = \frac{\pi}{\omega}$

$$E_{av} = N_s \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = N_s \frac{\Delta\phi}{\frac{\pi}{\omega}} = N_s \frac{2\phi}{\frac{\pi}{p \frac{2\pi}{60} n}} = N_s \frac{4\phi}{60} pn$$

- 电枢绕组总元件数为S，每支路串联元件数为 $\frac{S}{2a}$

- 电枢表面总导体匝数： $N = 2SN_s$

- 电枢电势 $E_a = \frac{S}{2a} E_{av} = \frac{S}{2a} N_s \frac{4\phi}{60} pn = \frac{pN}{60a} \phi n = K_e \phi n$

重要结论:

$$E_a = K_e \phi n \quad , \quad K_e = \frac{pN}{60a}$$

(电势系数、电势常数)

特点:

- DCM的反电势与磁通和电机转速的乘积成正比。
- 电动工作时，反电势的方向与电枢电流方向相反
- 对他励，磁通不变时，

$$E_a = C_e n \quad , \quad C_e = K_e \phi = \text{常数}$$

〔有量纲：[Wb]或[V/r/min]〕

$$\frac{K_T}{K_e} = \frac{\frac{pN}{60a}}{\frac{2\pi a}{pN}} = \frac{C_T}{C_e} = \frac{60}{2\pi} \approx 9.55$$

- 方程代表电动机机电能量的转换关系:

$$E_a = K_e \phi n = K_T \phi \frac{2\pi}{60} n = K_T \phi \Omega$$

- 两边同乘电枢电流：[电能]

$$E_a I_a = K_T \phi I_a \Omega = T_{em} \Omega \quad [\text{机}]$$

思考题：

- 什么是转矩？它在电机旋转运动中扮演什么角色？
- 什么是换向？换向器为什么要将外部的直流电压转换成电枢绕组元件上的交流电压？
- 什么是电角度？它和机械角度有什么关系？
- 什么是反电势？它的大小和方向如何确定？
- 如何揭示电机模型的输入和输出定量数学关系？
(特殊的实际和一般的理论)

§ 2—4 电动势平衡方程与功率平衡方程

• 他励直流电动机的原理电路(稳态)

R_a 为电动机电枢绕组和换向器总电阻

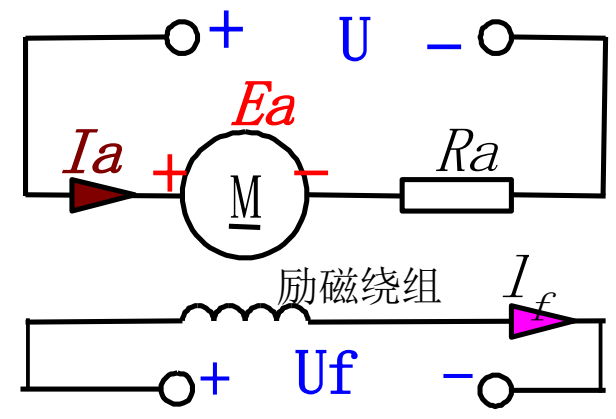
各电量**假定正向**按**电动机惯例**：
与电动机正常运行状态下的实际方向一致
重要结论：

一、稳态电动势平衡方程（等效电枢回路）

$$\begin{cases} U = E_a + R_a I_a \\ E_a = K_e \phi n \end{cases}$$

R_a 为包括电刷电阻在内的电动机电枢绕组电阻，与外电路无关。

需要注意物理量纲的一致性。



电动机惯例假定正向



例：设某他励直流电动机 $R_a = 1\Omega$; $n = 500r / \min$ 时 $E_a = 50V$

如果 $U = 150V$ ，计算：

- a. 起动电流；
- b. 电动机在 $1000r/\min$ 和 $1460r/\min$ 时的反电动势；
- c. 在 $1000r/\min$ 和 $1460r/\min$ 时的电枢电流。

解：a. 依据运动变化规律，起动瞬间电枢是静止的，反电动势为 $0V$ ，起动电流仅受 R_a 限制 $I_a = U / R_a = 150 / 1 = 150A$

b. 因励磁不变，反电动势与转速成正比，由 $n = 500r / \min$ 时 $E_a = 50V$ ，可得 $C_e = \frac{E_a}{n} = \frac{50}{500} = 0.1[V / r / \min]$ 或 $[Wb]$

$n = 1000r / \min$ 时， $E_a = C_e n = 0.1 \times 1000 = 100V$

$n = 1460r / \min$ 时， $E_a = C_e n = 0.1 \times 1460 = 146V$

c. 在 $1000r/\min$ 时， $I_a = (U - E_a) / R_a = (150 - 100) / 1 = 50A$

在 $1460r/\min$ 时， $I_a = (U - E_a) / R_a = (150 - 146) / 1 = 4A$

二、功率平衡方程：

$$\because U = E_a + R_a I_a$$

$$\therefore UI_a = E_a I_a + R_a I_a^2 \quad \text{忽略励磁功率时, 输入功率 } P_1 = UI_a$$

$$\text{; 铜耗 } P_{cu} = R_a I_a^2$$

$$\text{电磁功率: } E_a I_a = K_e \phi n \frac{T_{em}}{K_T \phi} = \frac{K_e}{K_T} T_{em} n = T_{em} \frac{2\pi}{60} n = T_{em} \Omega = P_{em}$$

直流电动机（注意：交流电动机在这一点上是不同的）

电磁功率通过电动机全部转换成机械功率： $P_M = P_{em}$

[注： P_M 还不是轴上输出的机械功率]

重要关系式：

$$\text{电磁转矩 } T_{em} = \frac{\text{电磁功率 } P_{em}}{\text{机械角速度 } \Omega}$$

空载损耗 P_0 ：轴承摩擦、冷却风扇风阻、铁心涡流损耗

• 轴上输出功率 $P_2 = P_{em} - P_0$

功率平衡方程（忽略励磁损耗）：

$$P_1 = P_{cu} + P_{em} = P_{cu} + P_0 + P_2$$

$$\therefore \frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_{em}}{\Omega} - \frac{P_0}{\Omega}$$

$$\therefore T = T_{em} - T_0$$

即**轴上输出转矩=电磁转矩-空载转矩**

通常将空载转矩作为一种**负载转矩**并入机械负载转矩考虑
认为电磁转矩就是电动机轴上输出转矩，称为

• **电动机转矩：** $T = T_{em}$

• 讨论：

1. 磁场在直流电机机电能量转换过程中的作用：

稳态运行时，气隙磁场不变，磁场能量不变，磁场未直接参加能量转换，仅起媒介作用：

$e=B/v$ ，磁场与绕组交链的磁通发生变化时产生，机械能通过磁场为媒介转化成电能；

$F=B/i$ ，绕组中的电流与气隙磁场相互作用产生，电能通过磁场为媒介转化成机械能。

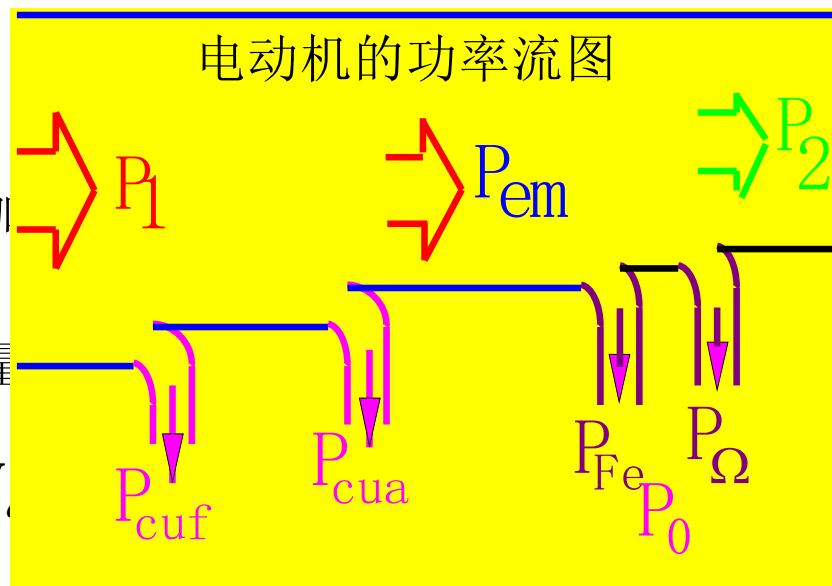
2. 能量守恒关系：

$$\left(\begin{array}{c} \text{电源输入的电能} \\ \text{减 去} \\ \text{电阻中能量损耗} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{磁场中能量的增加} \\ \text{加 上} \\ \text{铁芯中损耗的能量} \end{array} \right)$$

并励时 $P_1 = UI = UI_f + UI_a$

忽略励磁电路铜耗：

$$P_1 \approx UI_a = P_{cua} + P_{em} = P_{cua} + P_{Fe} + P_{\Omega} + P_2 = P_{cua} + P_0 + P_2$$





例：忽略励磁损耗，计算前例起动、 $n=1460\text{r/min}$ 时的输入功率，电磁转矩，电磁功率。

a. 起动时： $P_1 = UI_a = 150 \times 150 = 22500[\text{W}] = 22.5[\text{kW}]$

$$T_{\text{em}} = C_T I_a = 9.55 C_e I_a = 9.55 \times 0.1 \times 150 = 143.25[\text{N} \cdot \text{m}]$$

$$P_{\text{em}} = T_{\text{em}} \Omega = 0[\text{W}]$$

b. $n=1460\text{r/min}$ 时：

$$P_1 = UI_a = 150 \times 4 = 600[\text{W}] = 0.6[\text{kW}]$$

$$T_{\text{em}} = C_T I_a = 9.55 C_e I_a = 9.55 \times 0.1 \times 4 = 3.82[\text{N} \cdot \text{m}]$$

$$P_{\text{em}} = T_{\text{em}} \Omega = T_{\text{em}} \frac{2\pi}{60} n = 3.82 \times \frac{1}{9.55} \times 1460 = 584[\text{W}]$$

$$\text{或： } P_{\text{em}} = P_1 - P_{\text{cua}} = P_1 - I_a^2 R_a = 600 - 4^2 \times 1 = 584[\text{W}]$$

$$\text{或： } P_{\text{em}} = E_a I_a = C_e n I_a = 0.1 \times 1460 \times 4 = 584[\text{W}]$$

讨论问题：（1）电磁转矩和感应电动势数学表达的物理意义是什么？现实意义？

（2）电机能动→电机能合理地动？（正确的拖动方式）
不采取任何限流措施，直接加额定电压的起动称**直接起动**。

直流电动机直接起动的优点是：

起动转矩很大，不需另加起动设备，操作简便。

严重的缺点是：起动电流很大，一般可达额定的10~20倍。

可能产生强烈火花损坏换向器。

结论：1、除低压、小容量外，DCM一般**不容许直接起动**。

2、**DCM起动和运行中须保证励磁始终正常**。

引出问题：能量转换过程的数学描述？如何精确、简要？如何形成控制这一过程的手段？

思考题：

1. 直流电机电枢绕组和绕组元件中的电流哪个是方向不变、哪些是交变的？为什么稳态时可以不考虑电枢绕组的电感影响？什么时候需要考虑它的作用？
 2. 理解直流电机电枢绕组电路模型、电势平衡方程、功率平衡方程的意义。
 3. 认识电磁转矩、轴上输出转矩、空载转矩、负载转矩的特性。
- 分析发电机功率平衡的过程。

§ 2—5 转速特性和机械特性

建立机电能量转换关系的统一表达

·转速特性: $n = f(I_a)$

·机械特性: $n = f(T)$

由稳态电势平衡方程:

$$U = E_a + R_a I_a = K_e \phi n + R_a \frac{K_T \phi}{K_T \phi} I_a = K_e \phi n + \frac{R_a}{K_T \phi} T_{em}$$

认为: $T_{em} = T$ [即机械特性中的T为电磁转矩]

得到 重要关系式:

机械特性方程:
$$n = \frac{U}{K_e \phi} - \frac{R_a}{K_e K_T \phi^2} T$$

转速特性方程:
$$n = \frac{U}{K_e \phi} - \frac{R_a}{K_e \phi} I_a$$

特性形状：

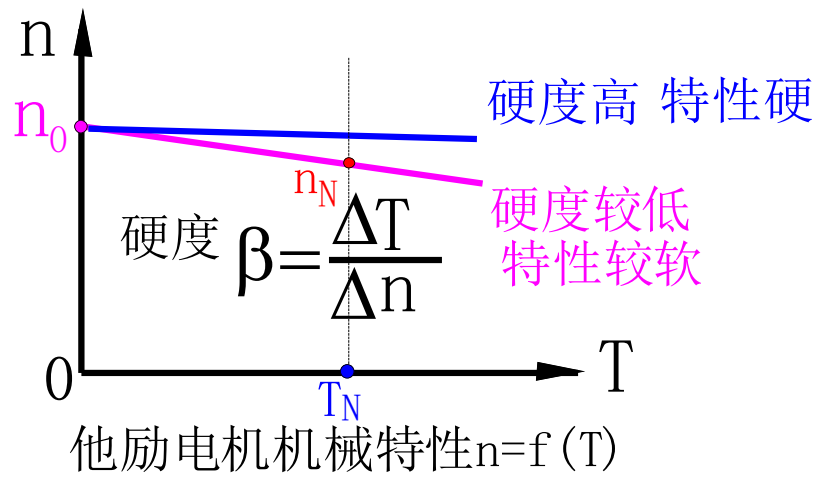
- 他励：忽略电枢反应时，磁通为常数

$$n = n_0 - \frac{R_a}{C_e C_T} T$$

为线性方程，

$$n_0 = \frac{U}{C_e}$$

称为理想空载转速



机械特性的作法：
过 $(n_0, 0)$, (n_N, T_N) 作直线



例2—4 他励DCM: $P_N = 2.8kW, U_N = 220V, I_N = 15.6A, n_N = 1500r/min$

试计算其机械特性。

解: 即要求 n_0, T_N 。 $n_0 = \frac{U_N}{C_e}$ 所以需先求出 C_e 。

又 $C_e = \frac{U_N - R_a I_N}{n_N}$, 还需先得到 R_a :

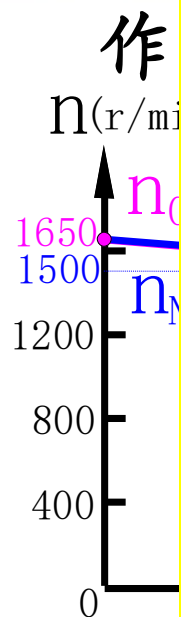
R_a 的估算: 额定工况下电枢铜耗约为总损耗的50%~75%。

$$I_a^2 R_a = (0.5 \sim 0.75)(1 - \eta_N) U_N I_N, \quad \eta_N = \frac{P_N}{U_N I_N}$$

本例取50%计算, 得: $R_a = 0.5(1 - \eta_N) U_N I_N = 1.3\Omega$

$$C_e = \frac{U_N - R_a I_N}{n_N} = 0.133 V/r/min$$

$$n_0 = \frac{U_N}{C_e} = 1650r/min \quad T_N = C_T I_N = 9.55 C_e I_N = 19.8 N \cdot m$$



作 二者的机械特性图基本相同。

从机械特性推导过程看，前式计算更合理。

他励DCM的电枢电流与电磁转矩成正比关系，
机械特性和转速特性具有相同的形状。
因电流容易测量，故更常用转速特性讨论他励系统的性能。

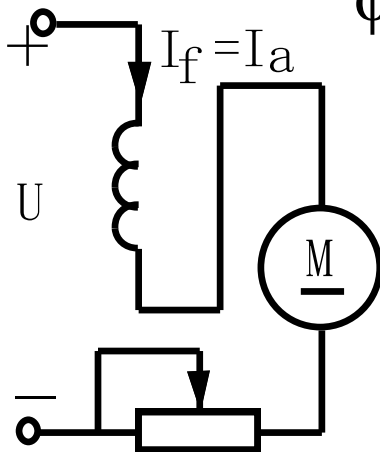
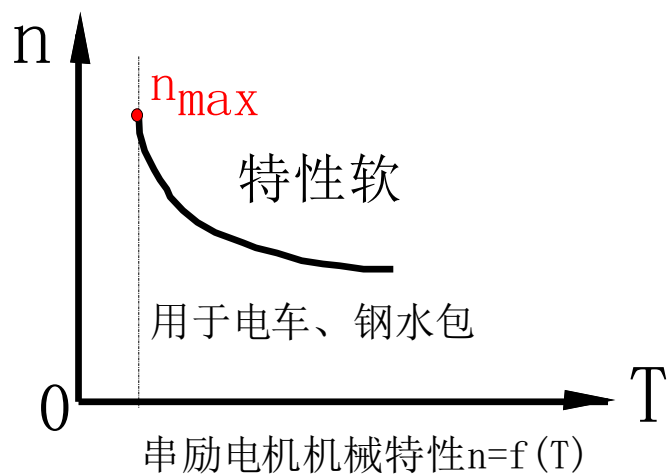
讨论：

$T_N = C_T I_N$ 求得的是额定电磁转矩。

$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N}$ 求得的是额定轴上输出转矩。与上结果相差 T_0

对本例用后式计算时：
$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \frac{2.8}{1500} = 17.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

串励式DCM特性分析：



$$\phi = CI_a, T = K_T \phi I_a = K_T CI_a^2$$

$$n = \frac{U}{K_e \phi} - \frac{R_a}{K_e K_T \phi^2} T$$

$$= \frac{U}{K_e CI_a} - \frac{R_a}{K_e K_T C^2 I_a^2} K_T CI_a^2$$

$$= \frac{U}{K_e \sqrt{\frac{C}{K_T} CK_T I_a^2}} - \frac{1}{K_e C} R_a$$

$$= C_1 \frac{U}{\sqrt{T}} - C_2 R_a$$

磁路线性时：磁通与励磁电流即电枢电流成正比。

转速特性为双曲线方程：负载增大时转速下降很快，特性很软。

磁路饱和时，负载增大磁通仅略微增加，特性渐变硬，但仍比他励软。

串励式DCM特点：

- 空载或轻载时, $I_f = I_a$ 很小, 导致 n 非常高 (飞车),
危险: 串励电动机不容许空载运行, 不容许采用皮带等
易滑脱的传动机构。

GB755-87规定: $n_{\max} = n_{1/4}$ (电动机 $P_2 = P_N/4$ 时的转速)

- 起动转矩较大
- 过载时 n 下降较大, 输出功率 $P_2 = T\Omega$ 变化不大, 可避免电机受损

负载减轻时转速可自动回升, 适用于电力机车。



例：DCM在某转矩时的 $n=1000\text{r/min}$, $I_a = 40\text{A}$ $R_a = 0.05\Omega$ $U = 110\text{V}$

1、他励工作时，若转矩增大到原来4倍，求此时的 I_a 和 n

2、串励工作时，若转矩增大到原来4倍，求此时的 I_a 和 n

假定磁路不饱和。

解：1. 他励，磁通为常数，转矩与电枢电流成正比，记原转速下电流为 I_{a0} 则

$$I_a = 4I_{a0} = 4 \times 40 = 160\text{A}。 K_e \phi = C_e = \frac{U - R_a I_{a0}}{n} = \frac{110 - 0.05 \times 40}{1000} = 0.108[\text{V} / \text{r} / \text{min}]$$

$$n = \frac{U - R_a I_a}{C_e} = \frac{110 - 0.05 \times 160}{0.108} = 944[\text{r} / \text{min}]$$

2. 串励，磁路不饱和时磁通与 I_a 成正比，原转矩为

$$K_T \phi I_{a0} = K_T C I_{a0}^2, \text{现转矩增大到4倍: } K_T C I_a^2 = 4 K_T C I_{a0}^2 \quad I_a = 2I_{a0} = 2 \times 40 = 80\text{A}$$

$I_a = 2I_{a0}$ ，故磁通比原来增大一倍，

$$n = \frac{U - R_a I_a}{K_e \phi} = \frac{110 - 0.05 \times 80}{2 \times 0.108} = 491[\text{r} / \text{min}]$$

可见串励的特性比他励软很多。



例：他励直流电动机 $P_N = 2.7$ [千瓦], $U_N = 200$ [伏], $n_N = 1500$ [转/分], $\eta_N = 90\%$, 电枢电阻 $R_a = 0.8$ [欧]。试求额定状态下的：①输入功率 P_1

②额定电流 I_N ③电磁功率 P_{em} ④空载损耗 P_0 ⑤电磁转矩 T_{em}

⑥空载转矩 T_0 ⑦轴上输出转矩 T

解：本题所用计算公式为 $P_1 = \frac{P_N}{\eta_N}$, $I_N = \frac{P_N}{U_N \times \eta_N}$ $P_{em} = P_1 - P_{cua} = P_1 - I_N^2 R_a$

$$P_0 = P_{em} - P_N \quad T_{em} = 9.55 \frac{P_{em}}{n_N} \quad T = 9.55 \frac{P_N}{n_N} \quad T_0 = 9.55 \frac{P_0}{n_N} = T_{em} - T$$

则有：

$$P_1 = 3\text{KW} \quad I_N = 15\text{A} \quad P_{em} = 2.82\text{kW} \quad P_0 = 0.12\text{kW}$$

$$T_{em} = 18.0\text{N} \cdot \text{m} \quad T = 17.2\text{N} \cdot \text{m} \quad T_0 = 0.8\text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{或：} \quad C_e = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} \quad C_T = 9.55 C_e$$

$$T_{em} = C_T I_N = 9.55 \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} I_N = 9.55 \frac{200 - 15 \times 0.8}{1500} \times 15 = 18.0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

习题：2—10、2—12、2—13、2—14；第12题要求画出机械特性图。

学习提示：

- 各章小结内容须仔细阅读理解。
- 本章给出的几个重要方程（电磁转矩、感应电势、电势平衡方程、功率平衡方程）须牢固掌握其物理意义及在分析和计算中的正确使用方法
- 课堂例题与习题中的计算所用公式应能熟练掌握应用
解题计算与作图应注意按规范要求。
- 每学完一章最好写出自己的本章学习要点，将需要记忆的重要概念和公式归纳，以便总复习时使用。