

永磁电机及其控制原理

第一讲 永磁材料及其磁路计算

第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 磁学的单位:

表 2-1

国际单位制和高斯单位制中磁学单位的对照

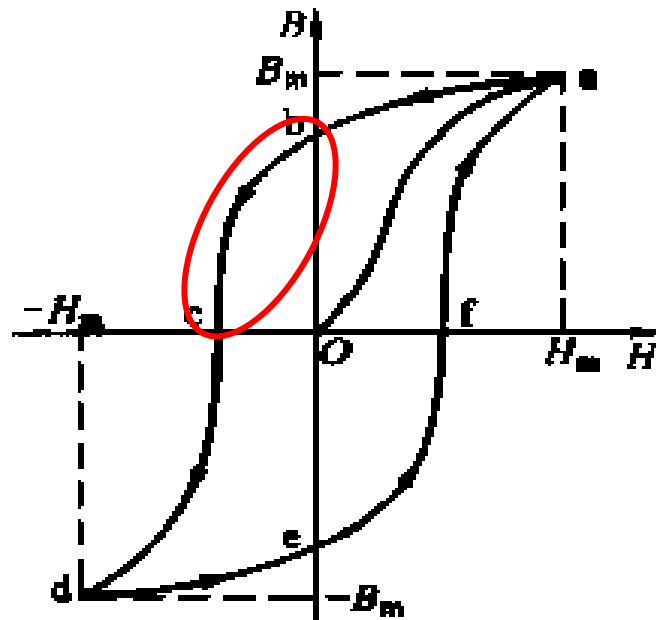
物 理 量		国际单位		高斯单位		换算关系
名称	符号	名称	符号	名称	符号	
电流	I	安培	A	静电单位	CGSE	$1A=3 \times 10^9 \text{ CGSE}$
磁感应强度	B	特斯拉	T	高斯	G	$1T=10^4 G$
磁场强度	H	安培/米	A/m	奥斯特	Oe	$1A/m=4\pi \times 10^{-3} \text{ Oe}$
磁通[量]	Φ	韦伯	Wb	麦克斯韦	Mx	$1Wb=10^8 \text{ Mx}$
磁动势	F	安培	A	吉伯	Gb	$1A=4\pi \times 10^{-1} \text{ Gb}$
最大磁能积	$(BH)_{\max}$	焦耳/立方米	J/m ³	兆高奥	MGOe	$1J/m^3=4\pi \times 10^{-5} \text{ MGOe}$

第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 1.1 永磁材料的特性曲线:

- 磁滞回线

- 外加 H 下，永磁材料中 B 的变化曲线（ B 滞后于 H ，磁滞现象）
- H_m 、 B_m 下，曲线面积最大的磁滞回线，磁性能最稳定



第一讲 永磁材料及其磁路计算

1.1 永磁材料的特性曲线:

- 退磁线

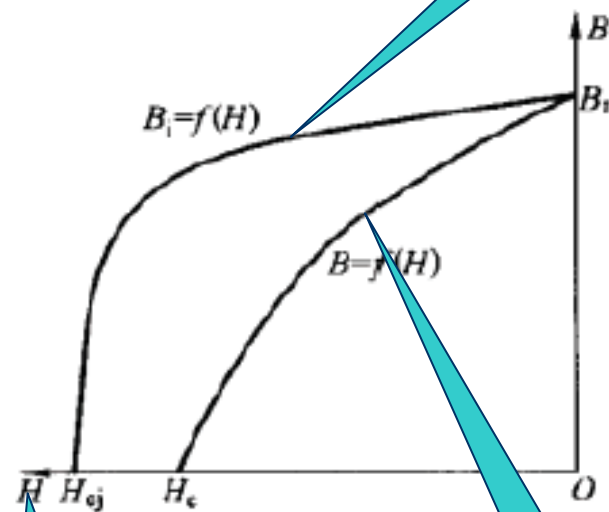
- 永磁材料磁滞回线的二象限描述了：外部H为负（去磁）时，材料B变化曲线，即退磁线。

- 内禀退磁线

- 永磁材料本身是不导磁材料，因此其退磁线中扣除材料本身的 $\mu_0 H$ 就剩下因材料自身的原因形成的B，称为内禀磁感应强度，记为 B_i
- 永磁材料中的B由两部分构成：

$$B = -\mu_0 H + B_i$$

$$B_i = B + \mu_0 H \quad B_i = f(H) \text{ 称为内禀退磁线}$$



内禀退磁线

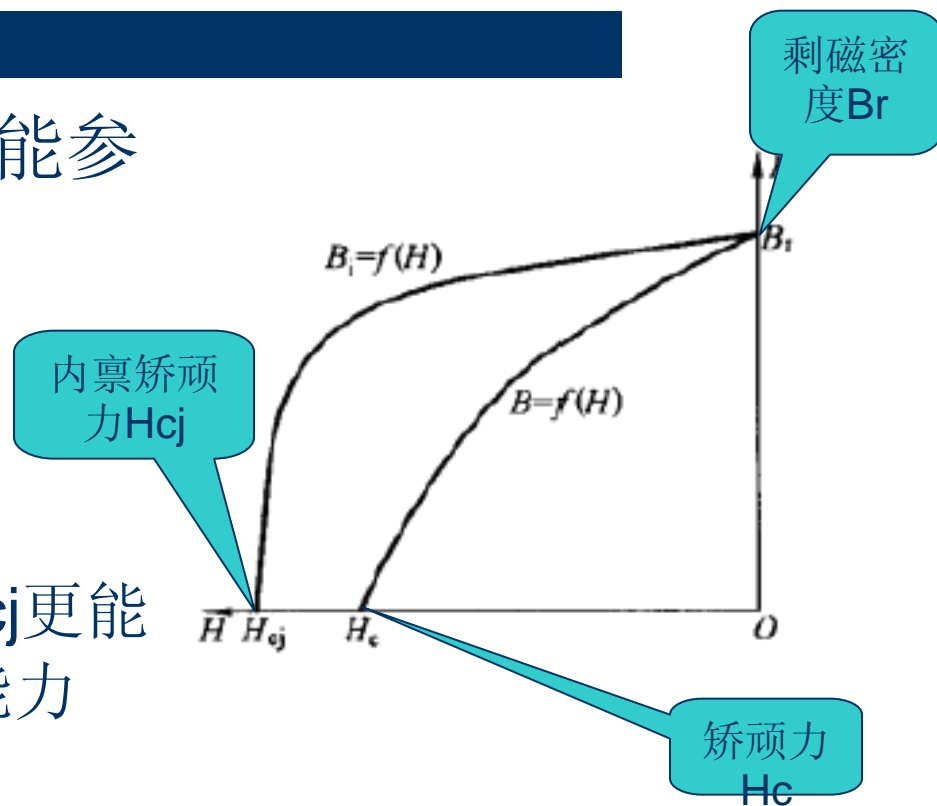
退磁线

H轴取反,
为方便

第一讲 永磁材料及其磁路计算

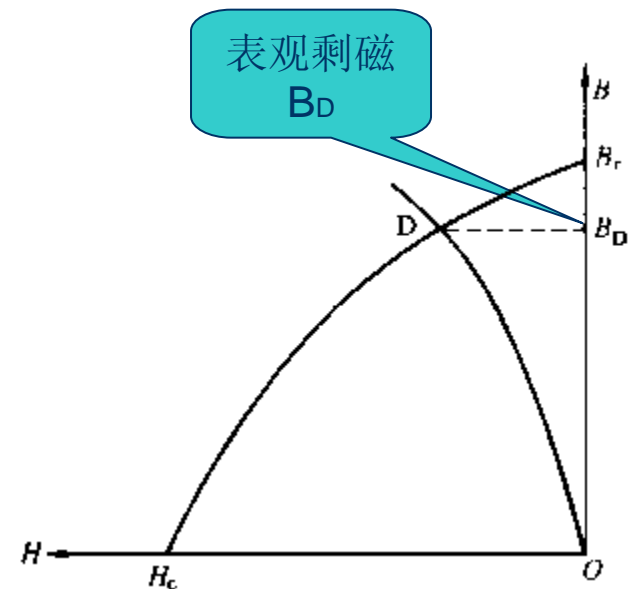
● 1.2 永磁材料的主要性能参数：

- 剩磁密度 B_r
- 矫顽力 H_c
- 内禀矫顽力 H_{cj}
- H_c 和 H_{cj} 差别较大， H_{cj} 更能表征材料保持磁性的能力



第一讲 永磁材料及其磁路计算

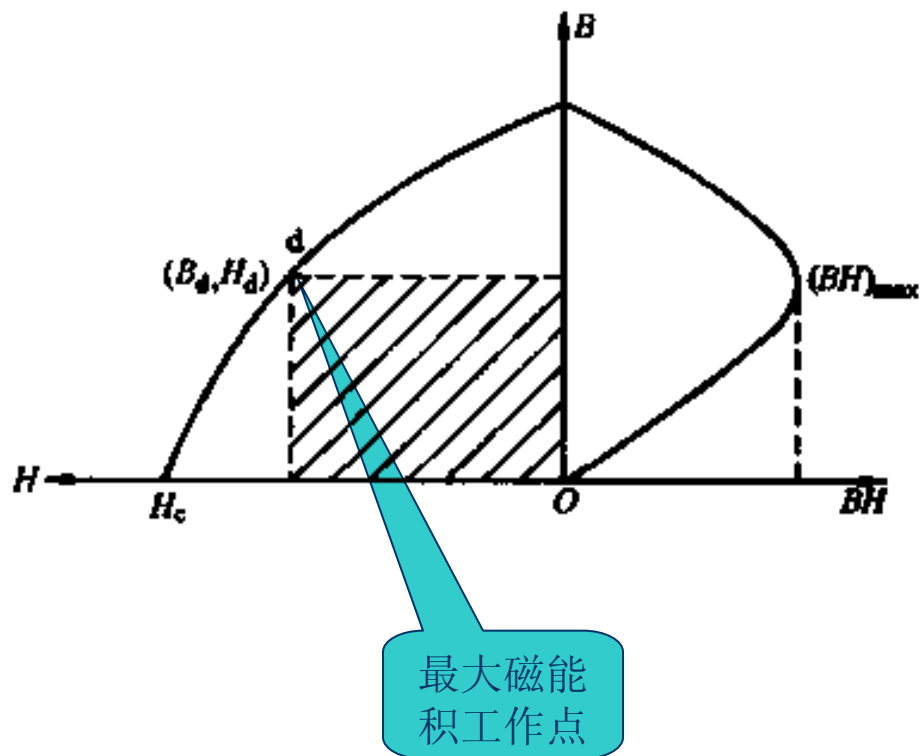
- 1.2. 永磁材料的主要性能参数：
 - 表观剩磁 B_D
 - 永磁材料在磁路开路状态下所表现出来的剩磁大小



第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 1.2. 永磁材料的主要性能参数：

- 最大磁能积 $(BH)_{\max}$
- 退磁线上某点表示永磁材料的一个工作状态，该点的磁能积为 BH 的乘积，表征该状态下永磁材料的磁场能量密度。
 - $(BH)_{\max}$ 代表了永磁材料的磁性能

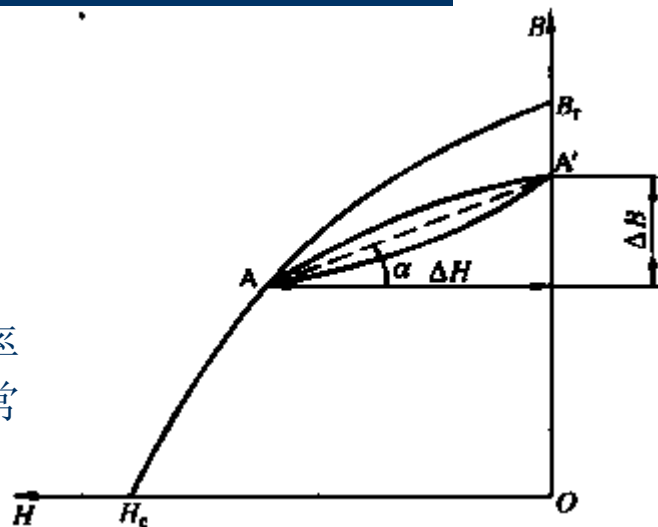


第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 1.2. 永磁材料的主要性能参数:

- 回复磁导率
- 永磁材料由于磁滞回线的原因其磁导率是变化的，但在计算中一般当作一个常数

$$\mu_{rec} = \tan\alpha = \frac{\Delta B}{\Delta H}$$



第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 1.2. 永磁材料的主要性能参数：

- 温度系数（通常为负的）

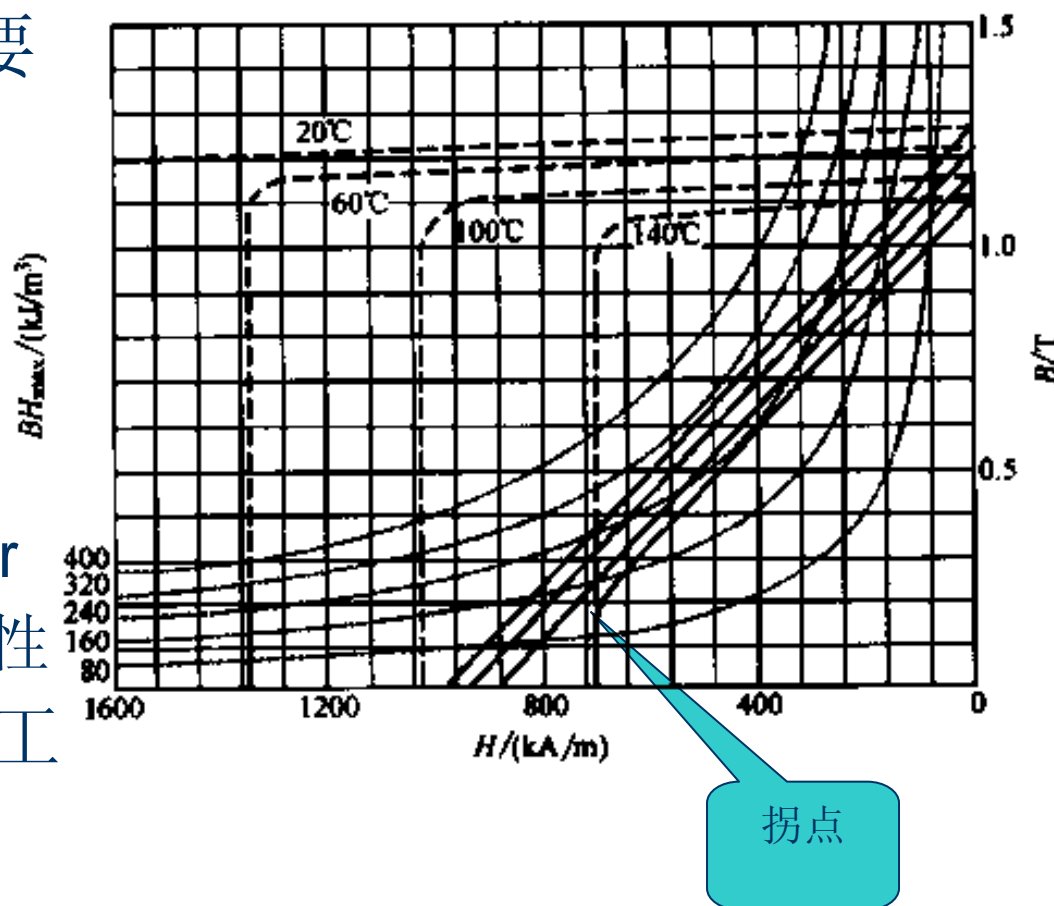
对于永磁材料而言，是一个很不利的性能参数

永磁体通常工作在电磁装置内，装置所处环境温度的变化和装置产生的热量使永磁体工作温度变化，对永磁体的性能有一定影响，其影响可用温度系数表示。

在永磁体允许的工作范围内，其所处环境温度每变化 1°C ，剩余磁感应强度变化的百分比称为剩磁温度系数，矫顽力变化的百分比称为矫顽力温度系数，分别用 α_{Br} 和 α_{Hc} 表示。温度系数表征了永磁材料的温度稳定性。

第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 1.2. 永磁材料的主要性能参数：
 - 负温度系数
 - 居里温度
 - 最高工作温度
 - 退磁线拐点
 - 临界场强 $H_k @ 0.9B_r$
 - 各向同性与各向异性
- 永磁材料稳磁处理工艺



第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 1.3.主要永磁材料的性能:

- 铁氧体 剩磁低、矫顽力高、回复磁导率小

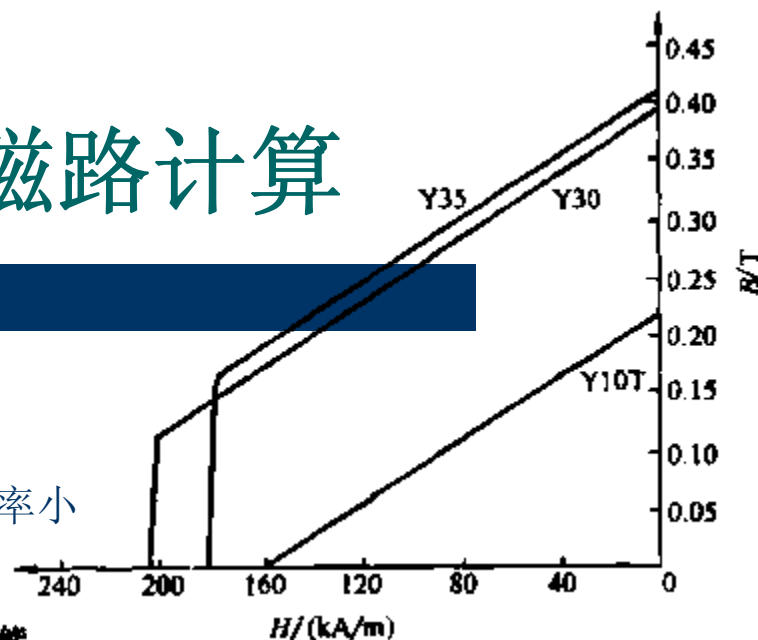


表 2-8

常用铁氧体永磁材料的性能

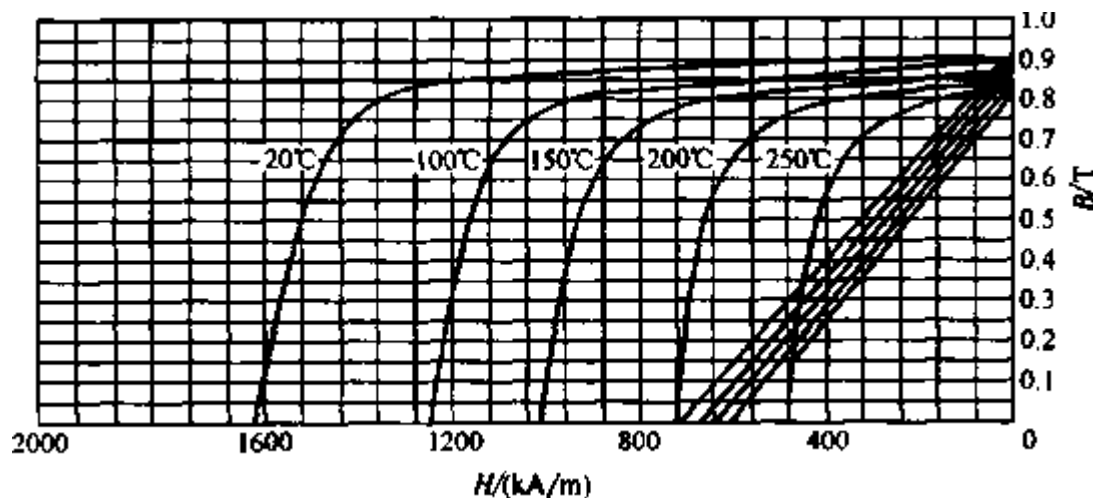
牌号 \ 参数	剩磁 /T	矫顽力 /(kA/m)	磁能积 /(kJ/m^3)	密度 /(g/cm^3)	居里温度 / $^{\circ}\text{C}$	相对回复磁导率	剩磁温度系数 /($\%/K$)
Y10T	≥ 0.20	128~160	6.4~9.6	4.0~4.9	450	1.05~1.3	-0.18~-0.20
Y15	0.28~0.36	128~192	14.3~17.5	4.5~5.1	450	1.05~1.3	-0.18~-0.20
Y20	0.32~0.38	128~192	18.6~21.5	4.5~5.1	450~460	1.05~1.3	-0.18~-0.20
Y25	0.35~0.39	152~208	22.3~25.5	4.5~5.1	450~460	1.05~1.3	-0.18~-0.20
Y30	0.38~0.42	160~216	26.3~29.5	4.5~5.1	450~460	1.05~1.3	-0.18~-0.20
Y35	0.40~0.44	176~224	30.3~33.4	4.5~5.1	450~460	1.05~1.3	-0.18~-0.20
Y15H	≥ 0.31	232~248	≥ 17.5	4.5~5.1	460	1.05~1.3	-0.18~-0.20
Y20H	≥ 0.34	248~264	≥ 21.5	4.5~5.1	460	1.05~1.3	-0.18~-0.20
Y25BH	0.36~0.39	176~216	23.9~27.1	4.5~5.1	460	1.05~1.3	-0.18~-0.20
Y30BH	0.38~0.40	224~240	27.1~30.3	4.5~5.1	460	1.05~1.3	-0.18~-0.20

第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 1.3 主要永磁材料的性能：稀土钴

稀土钴永磁居里温度高，一般为 $710\sim 800^{\circ}\text{C}$ ，剩磁温度系数为 $-(0.03\sim 0.09)\%/K$ ，磁性能稳定性好，可在 300°C 高温下使用。此外，稀土钴永磁具有很强的耐腐蚀和抗氧化能力，通常不需做表面处理。稀土钴永磁硬而脆，抗弯强度、抗拉强度及抗压强度较小。

尽管稀土钴磁性能优异，但含有储量稀少的稀土金属钐和昂贵的战略金属钴，价格昂贵，使其应用受到了很大限制，主要用于要求体积小、重量轻、性能稳定的场合。



第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 1.3 主要永磁材料的性能：稀土钴

表 2-9

部分稀土钴永磁体的磁性能

材料	参数 牌号	剩磁 /T	矫顽力 /(kA/m)	内禀矫 顽力 /(kA/m)	最大磁 能积 /(kJ/m ³)	居里 温度 /℃	最高工 作温度 /℃	剩磁温 度系数 /(%/K)	内禀矫顽力 温度系数 /(%/K)
钐钴 1:5 (SmPr)Co ₅	YX-16	0.81~0.85	620~660	1194~1830	110~127	750	250	-0.05	-0.3
	YX-18	0.85~0.9	660~700	1194~1830	127~143	750	250	-0.05	-0.3
	YX-20	0.9~0.94	680~725	1194~1830	150~167	750	250	-0.05	-0.3
	YX-22	0.92~0.96	710~750	1194~1830	160~175	750	250	-0.05	-0.3
	YX-24	0.96~1.0	730~770	1194~1830	175~190	750	250	-0.05	-0.3
钐钴 1:5 SmCo ₅	YX-20S	0.9~0.94	680~725	1433~1830	143~160	750	250	-0.045	-0.28
	YX-22S	0.92~0.96	710~750	1433~1830	160~175	750	250	-0.045	-0.28
钐钴 2:17 Sm ₂ (CoFeCuZr) ₁₇	YXG-24H	0.95~1.02	700~750	≥1990	175~191	800	350	-0.03	-0.2
	YXG-26H	1.02~1.05	750~780	≥1990	191~207	800	350	-0.03	-0.2
	YXG-28H	1.03~1.08	756~796	≥1990	207~220	800	350	-0.03	-0.2
	YXG-30H	1.08~1.10	788~835	≥1990	220~240	800	350	-0.03	-0.2
	YXG-24	0.95~1.02	700~750	≥1433	175~191	800	300	-0.03	-0.2
	YXG-26	1.02~1.05	750~780	≥1433	191~207	800	300	-0.03	-0.2
	YXG-28	1.03~1.08	756~796	≥1433	207~220	800	300	-0.03	-0.2
	YXG-30	1.08~1.10	788~835	≥1433	220~240	800	300	-0.03	-0.2
	YXG-24M	0.95~1.02	700~750	≥1433	175~191	800	300	-0.03	-0.2

第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 1.3.主要永磁材料的性能：钕铁硼

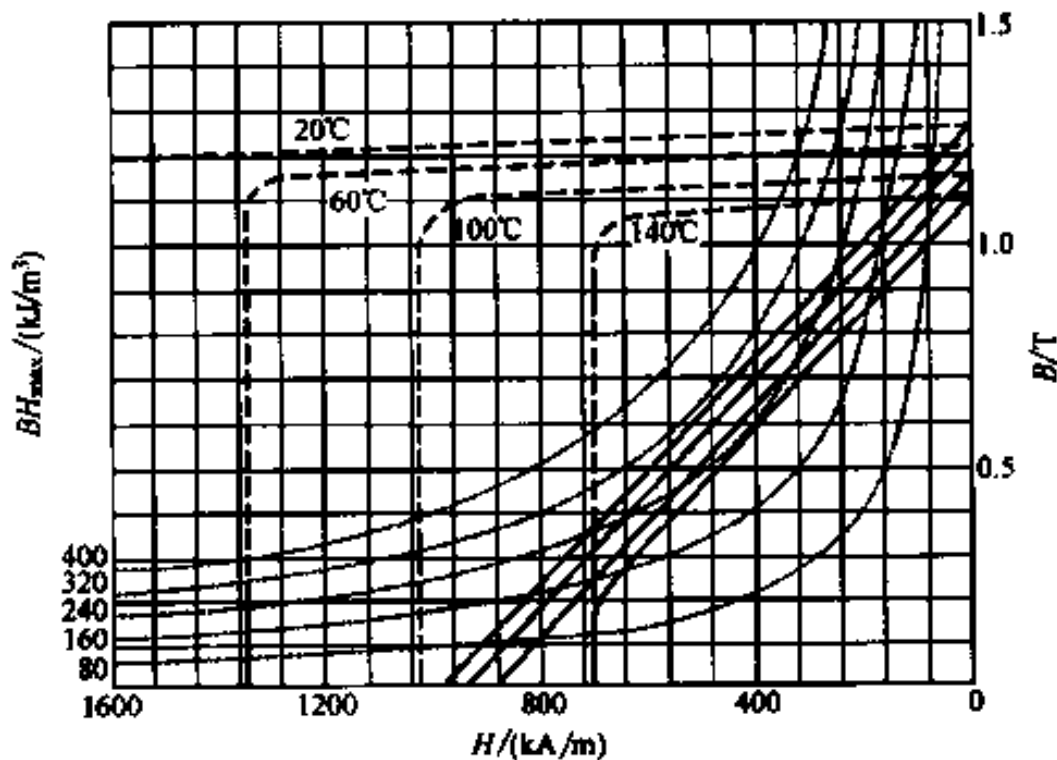
钕铁硼永磁的主要成分是 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ，是目前磁性能最强的永磁材料。它的最大磁能积可达 $398\text{kJ}/\text{m}^3$ ，为铁氧体永磁材料的 5~12 倍、铝镍钴永磁材料的 3~10 倍，理论值为 $527\text{kJ}/\text{m}^3$ ；剩磁最高可达 1.47T，矫顽力最高可超过 $1000\text{kA}/\text{m}$ ，能吸起相当于自身重量 640 倍的重物。由于不含钴且钕在稀土中的含量是钐的十几倍，钕铁硼的价格比稀土钴要低得多。

钕铁硼磁体居里温度低，为 $310\sim 410^\circ\text{C}$ ，温度稳定性较差，剩磁温度系数为 $-(0.095\sim 0.15)\%/K$ ，矫顽力温度系数为 $-(0.4\sim 0.7)\%/K$ ，通常最高工作温度为 150°C ，目前已有商业化的耐 200°C 高温的钕铁硼永磁。常温下退磁曲线为直线，但高温下退磁曲线的下部发生弯曲，若设计不当，易发生不可逆退磁。

牌号	/T	/(kA/m)	/(kA/m)	/(kJ/m ³)	/℃
N30	1.08~1.12	780~836	≥955	223~239	80
N33	1.14~1.17	820~876	≥955	247~263	80
N35	1.17~1.21	860~915	≥955	263~279	80
N38	1.22~1.26	860~915	≥955	287~303	80
N40	1.26~1.29	860~955	≥955	303~318	80
N42	1.29~1.32	860~955	≥955	318~334	80
N45	1.32~1.37	860~995	≥955	342~358	80
N48	1.37~1.42	860~995	≥955	358~382	80
N30M	1.08~1.12	780~836	≥1114	223~239	100
N33M	1.14~1.17	820~876	≥1114	247~263	100
N35M	1.17~1.21	860~915	≥1114	263~279	100
N38M	1.22~1.26	860~915	≥1114	287~303	100
N40M	1.26~1.29	860~955	≥1114	303~318	100
N42M	1.29~1.32	860~995	≥1114	318~334	100
N45M	1.32~1.37	860~1035	≥1114	342~358	100
N27H	1.02~1.06	756~804	≥1353	199~215	120
N30H	1.08~1.12	804~844	≥1353	223~239	120
N33H	1.14~1.17	820~876	≥1353	247~263	120
N35H	1.17~1.21	860~915	≥1353	263~279	120
N38H	1.22~1.26	860~915	≥1353	287~303	120
N40H	1.26~1.29	860~955	≥1353	303~318	120
N42H	1.29~1.32	860~955	≥1353	318~334	120
N44H	1.32~1.36	860~1035	≥1353	334~350	120
N27SH	1.02~1.06	756~804	≥1592	199~215	150
N30SH	1.08~1.12	804~844	≥1592	223~239	150
N33SH	1.14~1.17	820~876	≥1592	247~263	150
N35SH	1.17~1.21	860~915	≥1592	263~279	150
N38SH	1.22~1.26	860~915	≥1592	287~303	150
N40SH	1.26~1.29	860~955	≥1592	303~318	150

第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 1.3 主要永磁材料的性能：钕铁硼



第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 1.4. 永磁材料的充磁方式:

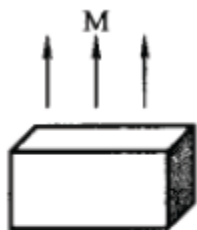


图 2-11 矩形永磁体的充磁方式

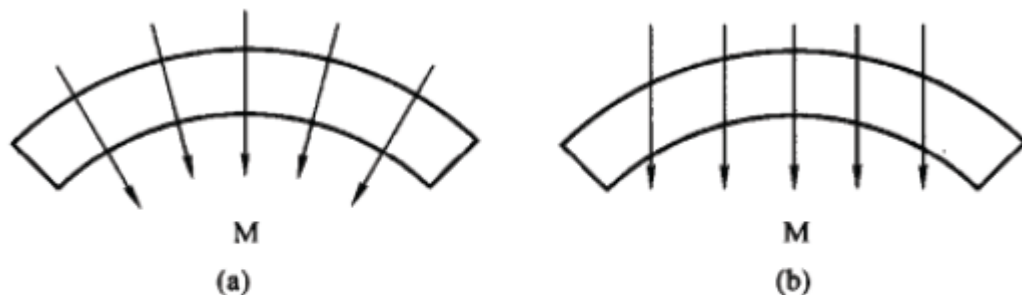


图 2-12 瓦片形磁极的充磁方式
(a) 径向充磁; (b) 平行充磁

第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 1.4. 永磁材料的充磁方式:

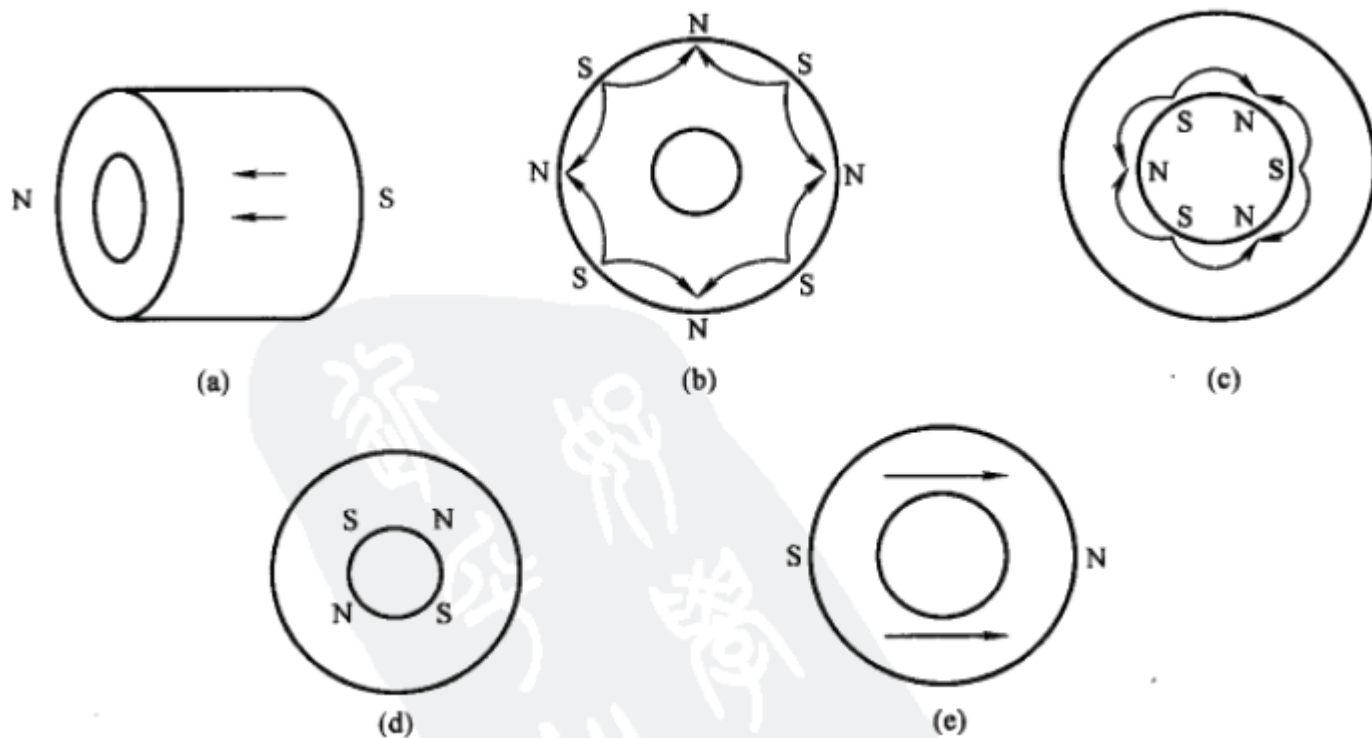


图 2-13 永磁环的充磁方式

第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 2.1磁路计算:
- 磁欧姆定律

$$F = \phi R_m$$

表 3-1

磁路与电路的类比

磁 路	电 路	磁 路	电 路
磁动势 F/A	电动势 E/V	磁导 $\Delta = \frac{1}{R_m} (H)$	电导 $G = \frac{1}{R} (S)$
磁压 U/A	电压 U/V	磁路方程 $F = \phi R_m$	电路方程 $U = IR$
磁通 ϕ/Wb	电流 I/A	磁通密度 $B = \frac{\phi}{S} (T)$	电流密度 $J = \frac{I}{S} (A/m^2)$
磁阻 $R_m = \frac{L}{\mu S} (H^{-1})$	电阻 $R = \rho \frac{l}{S} (\Omega)$		

第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 2.1磁路计算：
- 安培环路定律

$$\oint_L H \cdot dl = \sum i$$

第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 2.1磁路计算：
- 磁路基尔霍夫第一定律

$$\sum \phi = 0$$

- 基尔霍夫第二定律

$$Ni = \sum_{k=1}^3 H_k i_k = \varphi_1 R_{m1} + \varphi_2 R_{m2} + \varphi_3 R_{m3}$$

第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 2.2 永磁电机的磁路结构：

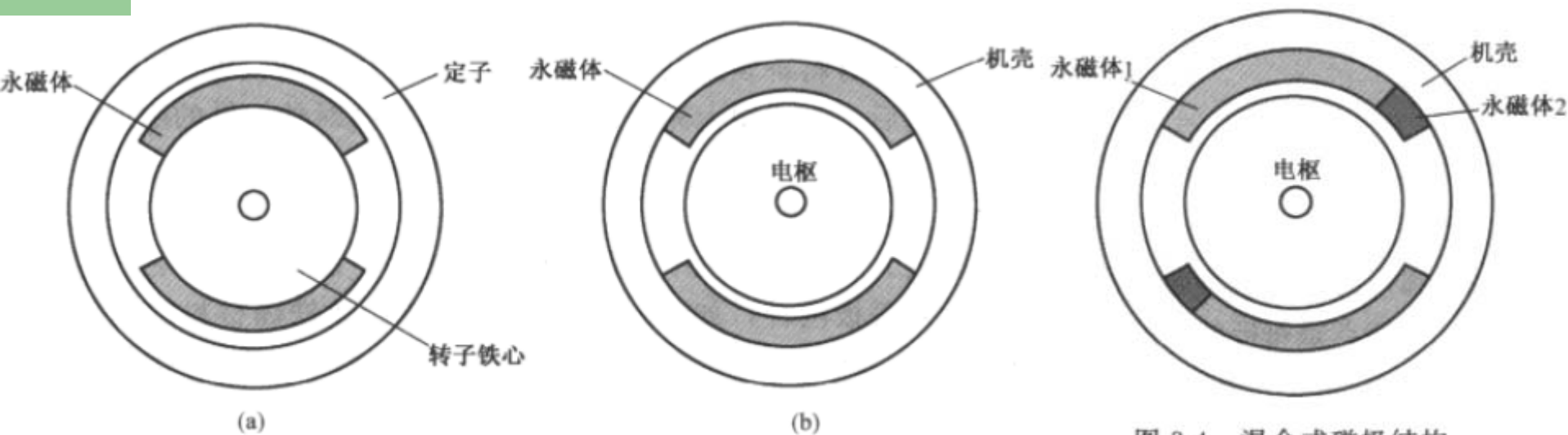


图 3-3 旋转磁极式和旋转电枢式结构

图 3-4 混合式磁极结构

第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 2.2 永磁电机的磁路结构：

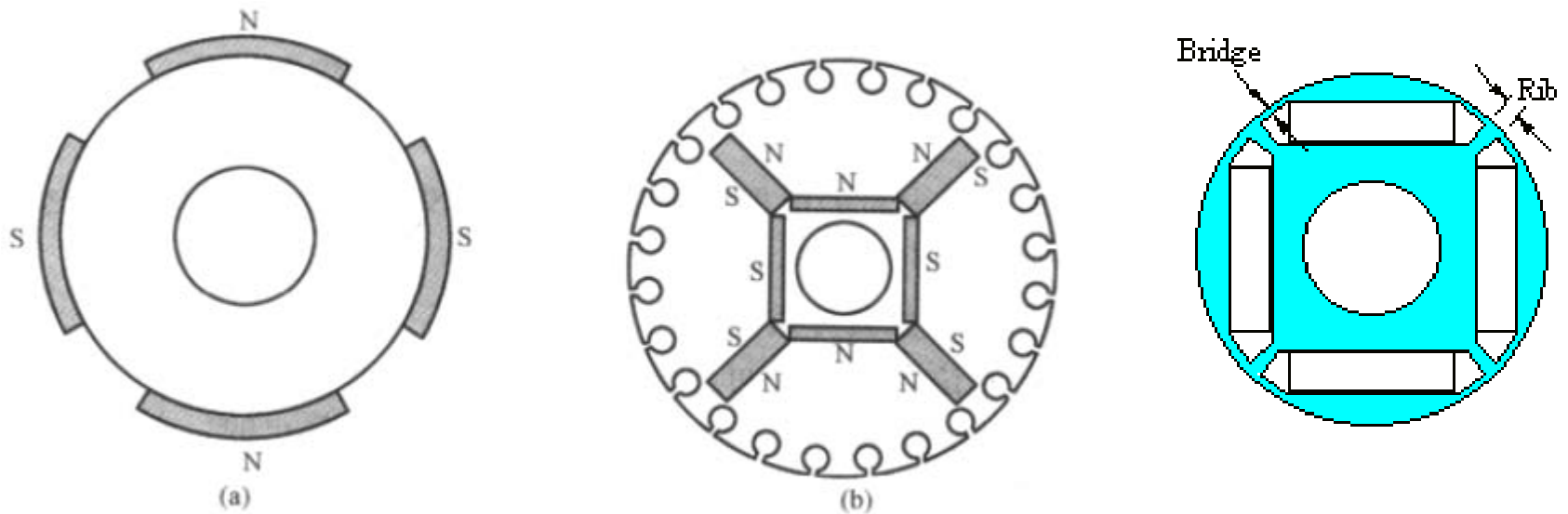


图 3-5 表面式和内置式结构

第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 2.2 永磁电机的磁路结构：

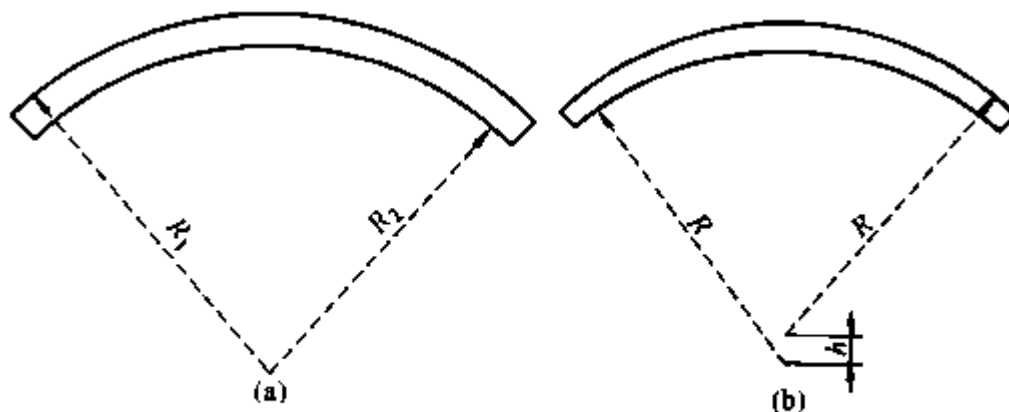


图 3-6 瓦片形磁极

(a) 同心瓦片形磁极；(b) 等半径瓦片形磁极

第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 2.2 永磁电机的磁路结构：

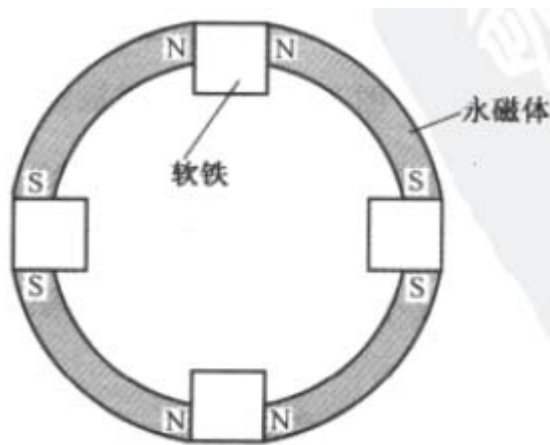


图 3-7 弧形磁极结构

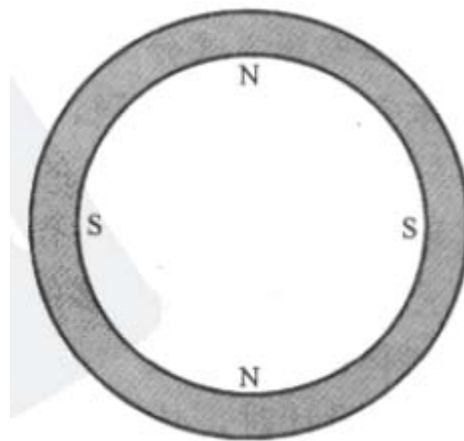


图 3-8 圆环形磁极结构

第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 2.2 永磁电机的磁路结构：

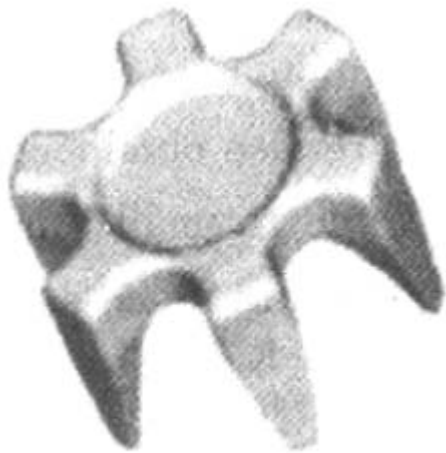


图 3-9 爪极结构

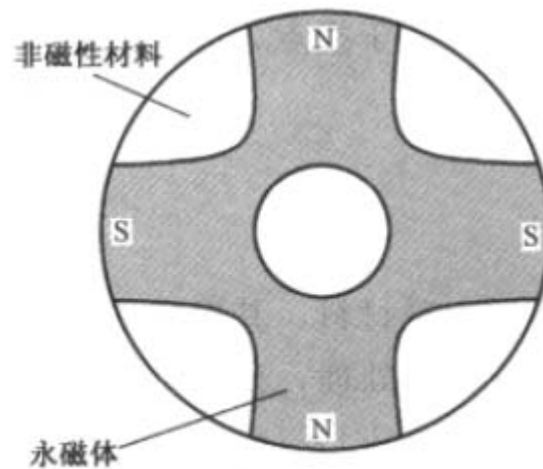


图 3-10 星形磁极

第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 2.3 永磁电机的磁路计算：

- 永磁电机磁路由永磁体、空气隙和铁心构成，磁路可分为永磁体部分和外磁路部分
- 外磁路部分与电励磁电机相同，只是注意永磁体部分磁路的计算

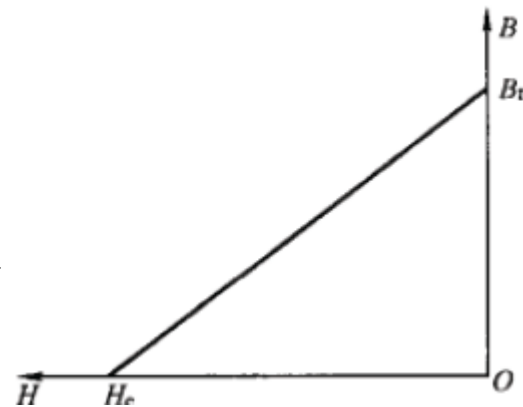
● 2.3.1. 永磁体的等效磁路

- 永磁体在整个磁路中相当于一个带内磁阻的磁源（压源 F_m 流源）

$$B = B_r - \frac{B_r}{H_c} H = B_r - \mu_0 \mu_r H$$

考虑： $\phi_m = BS_m$, $F_m = Hh_m$

$$\phi_m = BS_m = B_r S_m - \mu_0 \mu_r H S_m = \phi_r - \frac{\mu_0 \mu_r S_m}{h_m} H h_m = \phi_r - \frac{F_m}{R_m}$$



第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 2.3.1. 永磁体的等效磁路

- 永磁体在整个磁路中相当于一个带内磁阻的磁源（压源或流源）

$$\phi_m = BS_m = B_r S_m - \mu_0 \mu_r H S_m = \phi_r - \frac{\mu_0 \mu_r S_m}{h_m} H h_m = \phi_r - \frac{F_m}{R_m}$$

$\phi_r = B_r S_m$ 称为虚拟内禀磁通

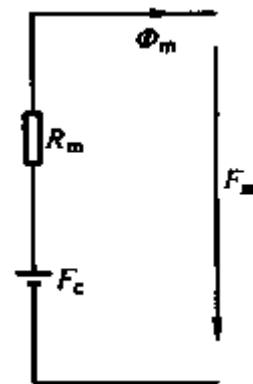
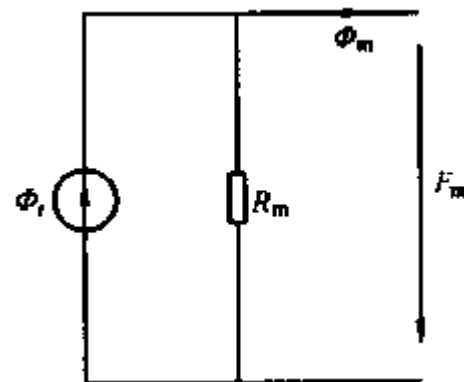
$R_m = \frac{h_m}{\mu_0 \mu_r S_m}$ 为永磁体的内磁阻

另一方面：

$$F_m = \phi_r R_m - \phi_m R_m = B_r S_m \frac{h_m}{\mu_0 \mu_r S_m} - \phi_m R_m = \frac{B_r}{\mu_0 \mu_r} h_m - \phi_m R_m$$

$$= H_c h_m - \phi_m R_m = F_c - \phi_m R_m$$

$F_c = H_c h_m$ 为永磁体的虚拟内禀磁动势



第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 2.3.2. 永磁电机外部磁路

- 永磁电机中永磁体向外部磁路提供磁通，外部磁路计算方法与以前相同，只是注意一些特殊之处。

{ 主磁路 主磁通 主磁导（通过主磁路计算）
漏磁路 漏磁通 漏磁导（漏磁导难以准确计算，通常以漏磁系数表示）

$$\text{漏磁系数} \quad \sigma = \frac{\text{总磁通}}{\text{主磁通}}$$

- 永磁电机漏磁系数分为极间漏磁系数和端部漏磁系数，对磁路计算的准确性有重要影响，漏磁场分出复杂，准确估算困难，一般按照磁极结构凭经验选取或通过电磁场有限元求取

第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 2.3.3. 永磁电机外部主磁路计算

- 当气隙均匀、磁密在极距内均匀、不计铁心端部效应时，气隙磁压降为：

$$F_{\delta} = H_{\delta} \delta = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta = \frac{\delta}{\mu_0 \tau L_a} \Phi$$

Φ 为每极磁通； δ 为气隙长度； τ 为极距； L_a 为铁心长度。

- 但由于齿槽效应、气隙磁密分布不均匀、铁心端部磁场的边缘效应，使得实际的气隙磁压降准确计算复杂。要用**3种**系数来考虑上述**3种**效应：

第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 2.3.3. 永磁电机外部主磁路计算

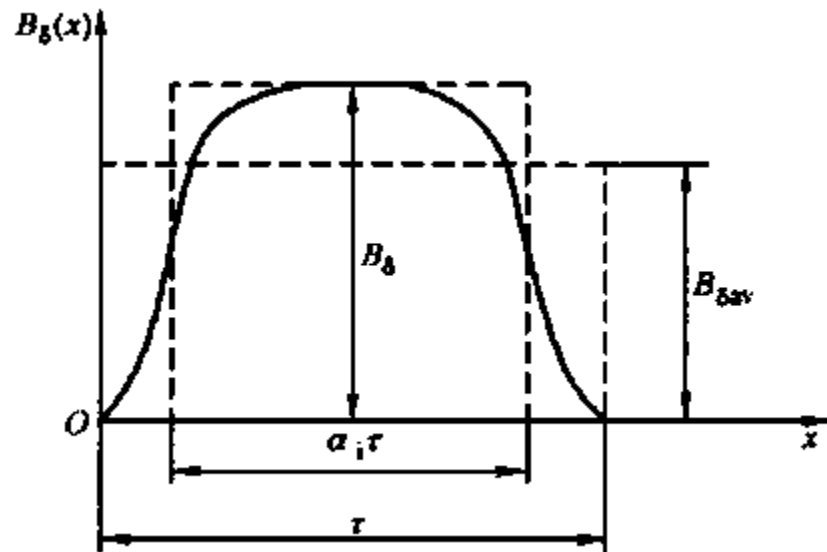
{	气隙系数	}	k_δ
	计算极弧系数		α_i
	铁心有效长度		L_{ef}

● 1. 计算极弧系数的确定:

$$\alpha_i B_\delta \tau = \int_0^\tau B_\delta(x) dx$$

由此得计算极弧系数

$$\alpha_i = \frac{\frac{1}{\tau} \int_0^\tau B_\delta(x) dx}{B_\delta} = \frac{B_{\delta av}}{B_\delta}$$

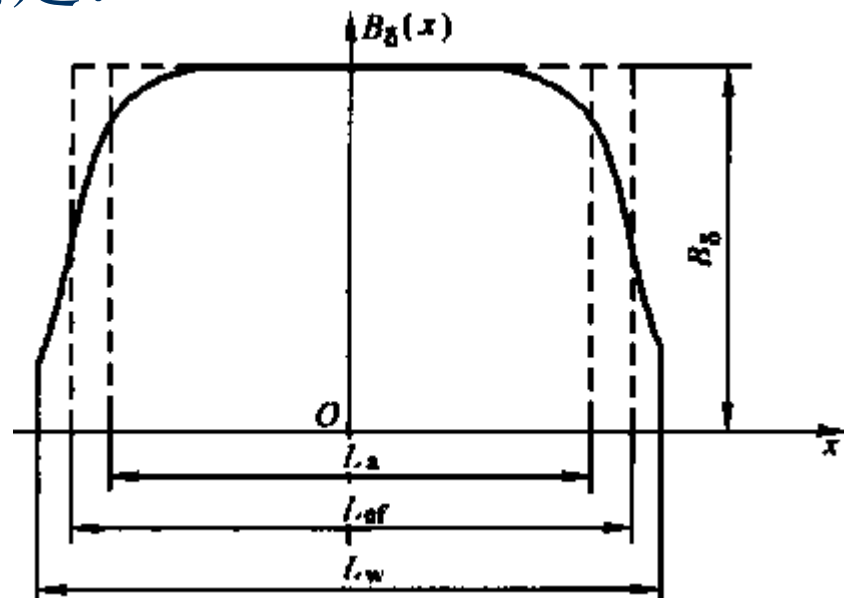


第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 2.3.3. 永磁电机外部主磁路计算
- 2. 电枢有效铁心程度的确定:

$$B_{\delta} L_{ef} = \int_{-\frac{L_w}{2}}^{\frac{L_w}{2}} B_{\delta}(x) dx$$

$$L_{ef} = \frac{\int_{-\frac{L_w}{2}}^{\frac{L_w}{2}} B_{\delta}(x) dx}{B_{\delta}} = \frac{\Phi_{\delta}}{B_{\delta}}$$



第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 2.3.3. 永磁电机外部主磁路计算
- 3. 气隙系数的确定：
 - 当永磁体不直接面对空气（内置式）时：

$$k_{\delta} = \frac{\delta_e}{\delta} = \frac{t}{t - \sigma_s b_s}$$

δ_e 为有效气隙长度； t 为电枢齿距； b_s 为电枢槽口宽； σ_s 为槽宽缩减因子

$$\sigma_s = \frac{2}{\pi} \left\{ \arctan\left(\frac{b_s}{2\delta}\right) - \frac{\delta}{b_s} \ln\left[1 + \left(\frac{b_s}{2\delta}\right)^2\right] \right\}$$

第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 3. 气隙系数的确定:

- 当永磁体直接面对空气（表面式）时:

$h_m + \delta$ 代替式中的 δ , 得

$$k_{\delta m} = \frac{t}{t - \sigma_{sm} b_s}$$

式中

$$\sigma_{sm} = \frac{2}{\pi} \left\{ \arctan \left(\frac{1}{2} \frac{b_s}{\delta + h_m} \right) - \frac{\delta + h_m}{b_s} \ln \left[1 + \left(\frac{1}{2} \frac{b_s}{\delta + h_m} \right)^2 \right] \right\}$$

有效气隙为

$$\delta_e = k_{\delta m} (h_m + \delta) - h_m$$

气隙系数为

$$k_{\delta} = \frac{\delta_e}{\delta} = k_{\delta m} \left(\frac{h_m}{\delta} + 1 \right) - \frac{h_m}{\delta}$$

第一讲 永磁材料及其磁路计算

- 2.3.4. 永磁电机外磁路的特性曲线计算方法：
 - 永磁电机外磁路包含气隙、定转子齿、定转子轭
 - 外磁路特性曲线即外磁路的总磁压降与磁通的关系
 - 一般计算步骤：

(1) 确定气隙磁通。对于结构数据一定的永磁电机，每极磁通 Φ' 可如下粗略确定

$$\Phi' = b_m L_m B'_k \quad (3-35)$$

式中， b_m 为每极永磁体的总宽度； L_m 为永磁体的轴向长度； B'_k 为永磁体的预估工作点，可如下选取

$$B'_k = B_r \frac{h_m}{h_m + \delta} \quad (3-36)$$

(2) 选取不同的磁通 $\Phi = (0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95, 1.0, 1.05, 1.1, 1.15, 1.2, 1.25)$ Φ' ，计算相应的外磁路总磁压降。

第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 2.3.4. 永磁电机外磁路的特性曲线计算方法:

永磁体安放在定子上, (永磁直流电机) $F = F_{\delta} + F_{t2} + F_{j1} + F_{j2}$

永磁体安放在转子上, 无槽 (永磁同步电机) $F = F_{\delta} + F_{t1} + F_{j1} + F_{j2}$

永磁体安放在转子上, 有槽 (异步启动永磁同步电机)

$$F = F_{\delta} + F_{t1} + F_{t2} + F_{j1} + F_{j2}$$

曲线 $F = f(\Phi)$ 就是所要求的外磁路空载特性。由于外磁路的磁通与相应磁动势的比值就是外磁路的磁导 Λ , 可以方便地得到 $\Lambda = f(\Phi)$ 。

通过主磁导和漏磁系数确定漏磁导, 漏磁路的磁化特性曲线为 $\Phi_{\sigma} = \Lambda_{\sigma} F$

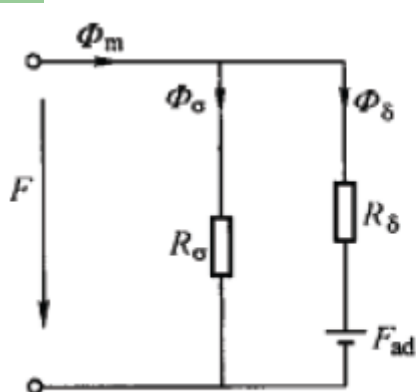
第一讲 永磁材料及其磁路计算

● 2.3.5. 永磁电机的等效磁路:

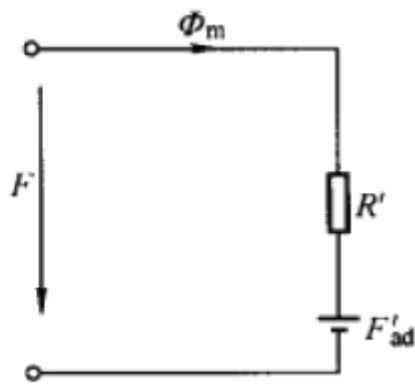
当电机带负载运行时，电枢绕组中的电流产生电枢反应磁场，其中的直轴电枢反应磁动势 F_{ad} 经过主磁路作用在永磁体上，对永磁体有助磁或去磁作用。因此，主磁路和电枢反应可用主磁路的磁阻和直轴电枢反应磁动势 F_{ad} 的串联来表示（当 F_{ad} 为正时，起去磁作用；当 F_{ad} 为负时，起助磁作用），漏磁路用其磁阻表示，主磁路和漏磁路并联

外磁路的等效磁路:

永磁电机的等效磁路:



(a)



(b)

