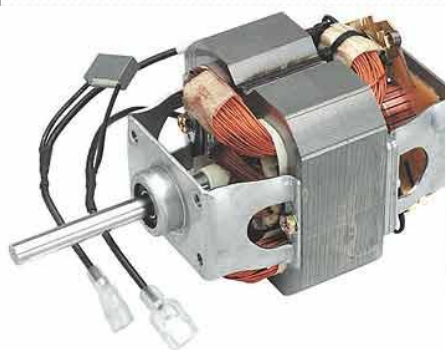


2016年微电机、减速电机行业自动化生产与磁性材料创新技术研讨会

# 浅谈永磁铁在微电机应用及铜线与磁材应用

田村（中国）企业管理有限公司技术开发部  
聂应发  
2016-10-28



直流电机



压缩机电机



铝线应用空气压缩机电机



永磁同步电动机

# 内容提要

1

永磁同步电机说明及应用发展

2

电线漆包线特性与应用

3

绝缘材料在电机中使用说明

4

电机铁心组成及说明应用

5

永磁铁氧体介绍及电机说明

## 1.1) 微电机及直流减速机定义及说明

**微电机是指直径小于160mm或额定功率小于750W的电机。**

**应用领域：**常用于操控体系或传动机械负载中，用于完成机电信号或能量的检测、解析运算、扩大、履行或变换等功能。微电机归纳了步进电机、微电子、电力电子、计算机、自动操控、精细机械、新材料等多门学科的高新技术职业。

**微电机实质上**就是一个直流电动马达，通电后转速通常很高，至少几百转/分，更高点的可以达到上万转，在这种情况下，电机的力矩很小，无法带动较重的东西，但是由于微电机具有低转速、大力矩的特点，这点事交流电机无法取代的，这样我们就可以通过减速器调节微电机的转速，也可以通过电子调速器达到无级减速的目的。

**直流减速器即直流减速机**，是原动机和工作机靠同时接入直流电源供电的的独立的闭式传动装置，用来降低转速和增大转矩，以满足工作需要  
直流减速器即直流减速机，是原动机和工作机靠同时接入直流电源供电的的独立的闭式传动装置，用来降低转速和增大转矩，以满足工作需要。直流减速器概述：经过精密加工，确保定位精度，具有很高的技术含量，节省空间，可靠耐用。更广泛地适用于自动化驱动系统中。可以根据不同客户需要灵活选用不同的电压：12V、24V、36V、48V等供电电压。

## 1.2) 永磁同步电机优点

永磁同步电机与异步电机性能相比，具有明显的优势，它的效率高，功率因素高，能力指标好，体积小，重量轻，温升高，技能效果显著，较好地提高了电网的品质因素，充分发挥了现有电网的容量，节省了电网的投资，它极大的解决了用电设备中的“大马拉小车”现象。

1、效率及功率因素：异步电机在工作时，转子绕组要从电网吸收部分电能励磁，消耗了电网电能，这部分电能最终以电流在转子绕组中发热消耗掉，该损耗约占电机总消耗的20~30%，它使电机的效率降低。该转子励磁电流折算到定子绕组后呈感性电流，使进入定子绕组中的电流落后于电网电压一个角度，造成电机的功率因数降低。另外，从永磁同步电机与异步电机的效率及功率可以看出，异步电机在负载率<50%时，其运行效率和运行功率因数大幅度下降，所以一般都要求其在经济区内运行，即负载率在75%-100%之间。永磁同步电机在转子上嵌了永磁体后，由永磁体来建立转子磁场，在正常工作是转子和定子磁场同步进行，转子中无感应，不存在转子电阻损耗，只此一项可提高电机效率4%-5%

## 1.3) 永磁同步电机优点

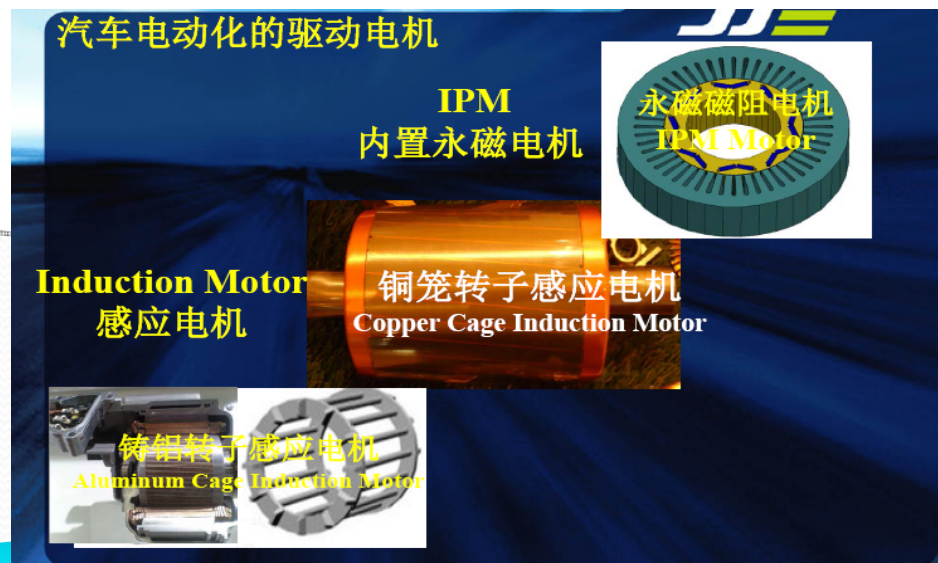
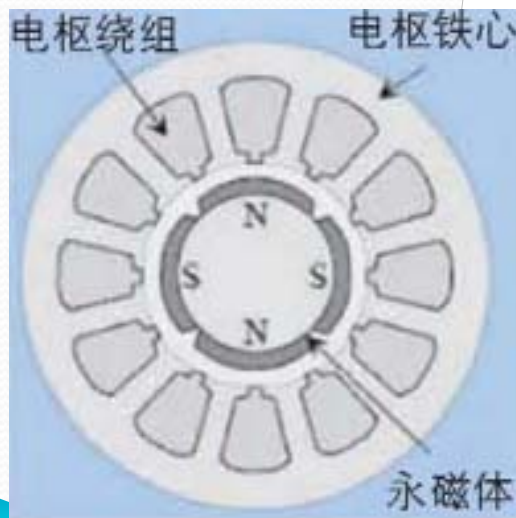
。由于在永磁电机转子中无感应电流励磁，定子绕组有可能呈现纯阻性负载，使电机功率因数几乎为1. 从永磁同步电机与异步电机的效率及功率上面可以看出，永磁同步电机在负载 $>20\%$ 时，其运行效率和运行功率因数随之变化不大，且运行效率 $>80\%$ 。

2、起动转矩异步电机启动时，要求电机具有足够大的起动转矩，但又希望起动电流不要太大，以免电网产生过大和电气设备的正常运行。此外，起动电流过大时将使电机本身受到过大电做力的冲击，如果经常起动，还有事绕组过热的危险。因此异步电机的起动设计往往面临着两难选择。永磁同步电机一般也是采用异步启动方式，由于永磁同步电机正常工作时，可使转子绕组不起作用，在设计永磁电机时，可使转子绕组完全满足高起动转矩的要求，例如使起动转矩倍数由异步电机的1.8倍上升到2.5倍，甚至更大，较好地解决了动力设备中“大马拉小车”的现象。

3、工作温升由于异步单机工作时，转子绕组有电流流动，而这个电流完全以热能的形式消耗掉，所以在转子绕组中将产生大量的热量，使电机的沮度升高，影响了电机的使用寿命。由于永磁电机效率高，转子绕组中不存在电阻损耗，定子绕组中较少有或几乎不存在无功电流，使电机温升低，延长了电机的使用寿命。

## 1.4) 永磁同步电机基本原理

- 电机是以磁场为媒介进行机械能和电能相互转换的电磁装置。
- 为在电机内建立进行机电能量转换所必需的气隙磁场，可有两种方法：一种是在电机绕组内通以电流来产生磁场，如普通的直流电机，同步电机和异步电机等；另一种是由永磁体来产生磁场，即永磁同步电机。
- 从基本原理来讲：永磁同步电机与传统电励磁同步电机是一样的，其唯一区别为传统的电励磁同步电机是通过在励磁绕组中通入电流来产生磁场的，而永磁同步电机是通过永磁体来建立磁场的，并由此引起两者分析方法存在差异。



## 1.5) 永磁同步变频调速电机应用前景

基于永磁同步电机上述众多优势，特别在目前国家‘节能减排’的大背景下，其应用前景极为广阔。随着永磁体及永磁同步电机控制技术的日益成熟可靠，其应用范围基本上可以覆盖目前应用电机所有领域：

### 电动汽车

伴随汽车工业的急速发展，环保问题也越来越严重，为了解决上述问题，并且大幅改善燃油经济型，毫无疑问就是使用电动汽车。永磁同步电机以其高效率、高功率因数和高功率密度等优点，正逐渐成为电动汽车驱动系统的主流电机之一。

### 轨道交通领域

**2007年**，阿尔斯通公司研发的新一代永磁牵引电机系统的高速**AGV**列车—**V150**，创下列车速度世界新纪录**574.8km/h**。

### 电梯领域

永磁同步电机产生较小的谐波噪声，应用于电梯系统中，可以带来更佳的舒适感；

### 医疗器械领域

传统高速旋转的整流子电机不仅故障率高，且寿命短、噪声大、无法做消毒处理。用电子换向无刷直流永磁电机可以极大的提高工作可靠性，降低噪声，延长寿命，是开发新一代医疗器械的关键。

## 1.6) 永磁同步变频调速电机应用前景

### 船舶电力推进领域

推进电机是船舶综合电力系统的重要组成部分、永磁同步推进电机具有体积小、重量轻、效率高、噪声低、易于实现集中遥控、可靠性高、可维护性好等优点，是船舶推进电机的理想选择。

### 挤出机领域

螺杆驱动电机是挤出机动力系统的重要组成部分、永磁同步电机具有体积小、重量轻、效率高、噪声低、可靠性高、可维护性好等优点，是挤出机驱动电机的理想选择。

### 家电行业领域

由于永磁电机在低运转时效率极高，可以有效的降低频繁启动的损耗，是实现家电节能的较佳技术途径之一。

永磁同步电机是众多高新技术和高新技术产业的基础，它与电力电子技术和微电子控制技术相结合，可以制造出许多新型的、性能优异的机电一体化产品和装备，代表了**21**世纪电机发展的方向。



# 1.7) 永磁微特电机的分类及使用特点

## 1.1 铁氧体永磁微特电机

由于铁氧体材料价格低廉，有其它永磁材料无法比拟的优点，这类电机不论在国外还是国内，其产量均超过永磁微特电机总产量的90%以上，在汽车电器电机、办公设备电机、计算机外设电机、玩具电机等方面得到广泛使用。预计在今后相当长一段时间内，铁氧体永磁微特电机仍拥有广阔的市场。

## 1.2 铝镍钴永磁微特电机

铝镍钴永磁材料具有较好的磁性能(高剩磁及高磁能积)，较高的温度稳定性，其性能优于铁氧体而次于稀土永磁体，价格亦高于铁氧体而低于稀土永磁体，加工性能良好、价格适中。

铝镍钴永磁电机在军用微特电机、精密微特电机如高精度直流伺服电动机、直流力矩电机、线绕杯形转子电动机、永磁同步电动机、永磁感应子式步进电动机、低速同步电动机、直流测速发电机、有限转角力矩电机和测速发电机等产品中得以广泛应用。

## 1.3 稀土永磁微特电机

稀土永磁材料磁性特别好，有数倍于铝镍钴磁体的高磁能积，但由于价格昂贵，所以这类电机起初仅用于军用方面，如航空用无刷直流电动机、稀土力矩电动机等。近年来，科技进步，对电子电器产品提出了高效、小型化的需求，这就要求微特电机体积小、重量轻。为了保持或增加电机性能，必须采用高性能的永磁材料。稀土磁钢的发展，特别是钕铁硼的出现，大大加快了稀土永磁微特电机的推广进程。美国通用汽车公司计划将高级豪华小轿车中14种微特电机改用钕铁硼磁钢。今后，随着钕铁硼价格的降低，固有缺点的进一步克服，稀土永磁微特电机将成为极有发展前途的一类永磁电机。

## 1.8) 变频电机优点及说明

- 变频调速得到了迅速的推广，变频调速具有以下
- 特点：
  - 1. 节能，使得电机节能大约30-40%。
  - 2. 调速水平高，调速结构简单，体积小，投资费用轻。
  - 3. 随着电力电子技术的发展，使用方便，有利于控制生产工艺、提高质量。
- 因此，变频电机在矿山、冶金、电力、运输，家电、军工等方面均有广泛的应用前景，并逐步取代机械变速和直流调速，

## 1.9) 变频电机优点及说明

- 但是变频IGBT, PWM调速装置提供的脉冲波, 具有高耸的尖峰(高电压峰值)波峰, 有陡峭的上升时间,
- 加上可变化的或极高的频率, 还有局部放电和局部介电加热等因素对漆包线绝缘漆膜产生严重的破坏, 使变频电机在使用时很易匝间击穿。这大大缩短了漆包线的使用寿命, 所以必须研制耐电晕漆包线。
- 如何使漆包线能够耐电晕, 需要耐电晕电线解决

## 1.10) 耐电晕电线优点及说明

- 美国Phe lps Dodge公司于1995年首次推出了中间加屏蔽层的聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺三涂层漆包线，屏蔽层是掺有钛、硅、锑、铬等固态金属化合物的有机涂层。这种带屏蔽层的复合漆包线具有耐电晕性能。1998年德国Herberts公司推出新配方改善局部放电性能，1999年美P. D. George公司又利用纳米技术细化有机涂层，改善了附着性，基本稳定了目前耐电晕漆包线的主流特性，沿用至今。QP/200 1.0mm的耐电晕漆包线性能进行测试。起始电晕电压见表1，耐高频脉冲电压时间见表

表 1 变频漆包线起始电晕耐压

测试频率 (HZ)	50	100	450	800	1000	10000	15000	20000
起始电晕耐压 (V)	700	700	730	700	680	680	660	610

表 2 漆包线的耐高频脉冲电压时间

频率 (HZ)	脉冲上升沿时间 (MS)	温度 (°C)	电压 (V)	击穿时间 (min)
20000	0.10	25	3500	17
20000	0.10	90	3500	13
20000	0.10	155	3500	10
20000	0.10	155	3000	12
20000	0.10	155	2500	29

## 二、定子绕组线材组成及说明



2. 1) 由若干根相互绝缘的圆形或矩形线绕制而成，电流的载体，形成磁场；

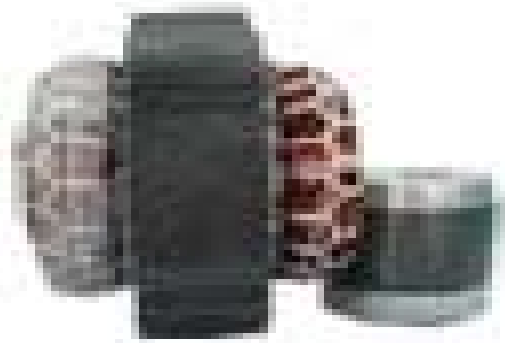
2. 2) 绕组分成：

① 散嵌绕组（低压）1140V及以下

② 成型绕组（高压）材料：QZ-130、QZ-2/155、QZY-2/180、SB、SBMB

## 2.3) 漆包线概念、用途及说明

1. 漆包线是在导体上涂上漆膜绝缘（层）的电线，因为在使用中常常绕制成线圈的形式，也称为绕组线。
2. 漆包线主要用在电工器材中实现电磁能的转换，如电能转换动能，动能转换电能，电能转化为热能或进行电量测定等；它是电机、电器、电工仪表、电信装置以及日用电器中不可缺少的材料。



压缩机电机



直流电机



水泵电机

## 2.4) 漆包线概念、用途及说明



铝线应用



2. 空气压缩机电机

## 2.5) 銅線與鋁線差異及設計重點

特性 \ 元素		鋁	銅
純度		99.50%	99.95%
比重		2.703	8.890
原子量		26.98	63.54
熔點		660°C	1083°C
熔解潛熱		93 Cal/g	51 Cal/g
比熱 ( 溫升率 )		0.211 Cal/°C .g.	0.0919 Cal/°C .g.
線膨脹係數		23 x 10 <sup>-6</sup> / °C	17 x 10 <sup>-6</sup> / °C
電阻系數		28.264 Ω mm <sup>2</sup> /km	17.774 Ω mm <sup>2</sup> /km
導電率		61%	100%
質量導電率		22.59%/g	11.24%/g
抗張強度		15-20 kg/mm <sup>2</sup>	35-47 kg/mm <sup>2</sup>
伸長率	0.50mm	7%	20%
	1.00mm	10%	25%
電阻溫度係數		0.00403 / °C	0.00381 / °C
化學特性：			
(1) 不受侵蝕		硝酸、硫酸、有機酸	有機酸
(2) 略受侵蝕		鹽水、鹽酸	稀硫酸、海水
(3) 受侵蝕較烈		氫氧化鈉	濃硫酸
物理特性：同等長度時			
等電阻	截面積	1.59	1
	線重量	0.48	1
等溫升	截面積	1.44	1
	線重量	0.44	1



## 2.6) 銅線與鋁線差異及設計重點

### 六.規格設計時DCR和用量比較：

- 1.相同DCR，鋁的線徑需比銅線徑的多1.3倍
- 2.相同DCR，鋁線用量約為銅線用量的0.5倍

### 七.規格設計時熱特性比較：

- 相同DCR，銅繞組與鋁繞組因電流造成的溫升相近
- 鋁的熱膨脹係數較大，相同溫升時，鋁的膨脹為銅的1.5倍，已驗證鋁線材料使用於PFC產品上在制程及環境的變化不會造成品質隱憂。
  - 鋁線在環境溫度的變化下漆包膜不會產生變異.
  - 鋁線在繞線及制程上之溫度變化不會造成漆包膜的變異.

特性	元素	鋁	銅
比重		2.703	8.890
電阻系數		28.264 $\Omega$ mm <sup>2</sup> /km	17.774 $\Omega$ mm <sup>2</sup> /km
質量導電率		22.59%/g	11.24%/g
電阻溫度係數		0.00403 / °C	0.00381 / °C
物理特性：同等長度時			
等電阻	截面積	1.59	1
	線重量	0.48	1

## 2.7) 漆包线的分类及说明

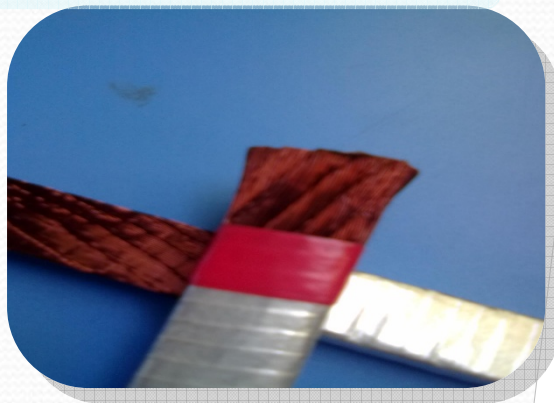
- 1. 电磁线分类:
- 1.1 按导体材料可分为: 铜, 铝, 铜包铝, 合金
- 1.2 按绝缘材料可分为: 漆包线, 绕包线, 无机绝缘线
- 1.3 按导体形状可分为: 圆线, 扁线, 异型线
- 我们公司现在主要的种类是漆包线。所以主要对漆包线进行讲述。
- 2. 漆包线的分类:
- 2.1 按绝缘材料分:
- 2.1.1 缩醛漆包线
- 2.1.2 聚酯漆包线
- 2.1.3 聚氨酯漆包线
- 2.1.4 改性聚酯漆包线
- 2.1.5 聚酯亚胺漆包线
- 2.1.6 聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺漆包线
- 2.1.7 聚酰亚胺漆包线

## 2.8) 电线种类与特性

部品名	耐熱等級	U L 認可	直焊性	特 長
NFW	A(105℃)	—	○	・ 焊錫溫度：380~400℃ ・ 替代保險絲的漆包銅線。適用於電源轉接器(ADAPTOR)。
LUW	B(130℃)	—	○	・ 焊錫溫度：320~340℃ ・ 低溫焊錫作業性佳。
LUY	B(130℃)	MW28C	○	・ 焊錫溫度：330~350℃ ・ B級低溫可焊聚胺酸漆包銅線外層加上尼龍漆膜，耐腐性佳。
UEW	B(130℃)	MW75C	○	・ 焊錫溫度：360~380℃ ・ 泛用聚胺酸漆包銅線。
UEY	B(130℃)	MW28C	○	・ 焊錫溫度：370~390℃ ・ 泛用聚胺酸漆包銅線外層加上尼龍漆膜，耐腐性佳。
FUEW	B(130℃)	130℃	○	・ 焊錫溫度：380~400℃ ・ 耐軟化溫度比泛用聚胺酸漆包銅線為高。
SFBW	F(155℃)	MW26C	○	・ 焊錫溫度：380~400℃ ・ F級可焊漆包銅線。
SFBY	F(155℃)	MW27C	○	・ 焊錫溫度：390~410℃ ・ F級可焊漆包銅線外層加上尼龍漆膜，耐腐性佳。
PEW	F(155℃)	MW5C	×	・ 一般用途的聚胺酸漆包銅線。 ・ 優良的耐腐蝕性。
PEY	F(155℃)	MW24C	×	・ 聚胺酸漆包銅線外層加上尼龍漆膜，耐腐性佳。 ・ 優良的耐腐蝕性及耐磨耗性。
LSFFW	F(155℃)	MW79C	○	・ 焊錫溫度：320~340℃ ・ F級低溫可焊聚胺酸漆包銅線。
LSFFY	F(155℃)	MW80C	○	・ 焊錫溫度：330~350℃ ・ F級低溫可焊聚胺酸漆包銅線外層加上尼龍漆膜，耐腐性佳。
SFFW	F(155℃)	MW79C	○	・ 焊錫溫度：390~410℃ ・ F級可焊聚胺酸漆包銅線。
SFFY	F(155℃)	MW28C MW80C	○	・ 焊錫溫度：400~420℃ ・ F級可焊聚胺酸漆包銅線外層加上尼龍漆膜，耐腐性佳。
SFHW	H(180℃)	MW82C	○	・ 焊錫溫度：420~440℃ ・ H級可焊聚胺酸漆包銅線。
SFHY	H(180℃)	MW83C	○	・ 焊錫溫度：430~450℃ ・ H級可焊聚胺酸漆包銅線外層加上尼龍漆膜，耐腐性佳。
SFEIW	H(180℃)	MW77C	○	・ 焊錫溫度：450~460℃ ・ 耐熱性比SFFW為高。
PEHW	H(180℃)	—	×	・ 雙層絕緣漆膜，在THE IC-PE外層加上AI。 ・ 良好的耐熱性及耐磨耗性。
EIW	H(180℃)	MW74C	×	・ U L 認可T1 (200℃)。 ・ 被廣泛使用在耐熱的電子機器設備上。
EIAIW	200℃	MW35C MW73C	×	・ 雙層絕緣漆膜，在E外層加上AI。 ・ 良好的耐冷媒性及耐磨耗性。
AIW	220℃	MW81C	×	・ 耐熱等級提高到220℃。 ・ 耐磨耗性、耐熱性和耐冷媒性均高於EIW。
APIW	220℃	—	×	・ 雙層絕緣漆膜，在AI外層加上PI。 ・ 耐磨耗性、耐熱性和耐冷媒性均優良。
PIW	240℃	—	×	・ 耐熱等級提高到240℃。 ・ 有機材料中耐熱性最高的線材。

## 2.9)加强绝缘防趋肤特殊导线

壓方漆包絞合線



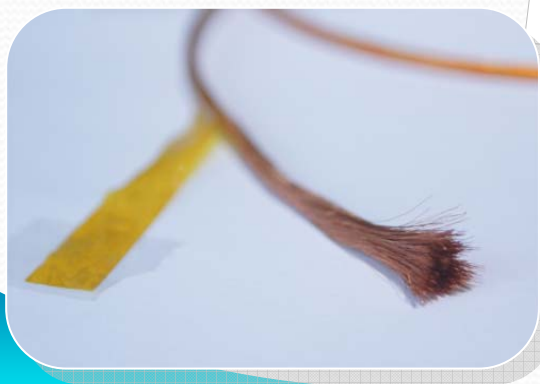
自粘絲包線



方型絲包線



聚酰亞胺薄膜麥拉線



自粘漆包絞線



三層絕緣線絞合線



## 2.10) 高频交流损耗分析及说明

铜的电阻率与趋肤效应深度  $\delta$  影响的导线直径要求:

25℃时:  $1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ;

100℃时:  $2.300 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ;

$$\delta = \frac{66.1}{\sqrt{f}} \quad (\text{mm});$$

$$\delta = \frac{75}{\sqrt{f}} \quad (\text{mm});$$

选取导线的直径应  $< 2\delta$

导线在高频的电阻值仍有变化, 电阻值的计算:

d: 线径 (mm); f: 工作频率 (Hz)

$$\frac{R_{ac}}{R_{dc}} = \frac{(d/2\delta)^2}{(d/2\delta)^2 - (d/2\delta - 1)^2}$$

## 2.11) 漆包线的分类及说明

### 3. 按漆包线的用途可分:

3.1 一般用途的漆包线（普通线）主要用于一般电机，电器，仪表。变压器等工作场合的绕组线如；聚酯漆包线，改性聚酯漆包线。

3.2 耐热漆包线；主要用于180℃及以上温度环境工作的电机，电器，仪表，变压器等工作场合的绕组线。如聚酯亚胺漆包线，聚酰亚胺漆包线，聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺复合漆包线。

3.3 特殊用途的漆包线；是指具有某种质量特性要求的漆包线，用于特定的场合的绕组线，如：聚氨酯漆包线（直焊性），自粘性漆包线

### 4. 按绝缘厚度分:

圆线：薄漆膜-1

厚漆膜-2

加厚漆膜-3

### 5. 按照耐热等级分

105, 130, 155, 180, 200, 220, 240级漆包线

## 2.12) 漆包线各型号表示方法及说明

	国标表示方法 (GB6109)	国际表示方法 (JIS日本工业标准)
聚酯漆包线	QZ	PEW
聚氨酯漆包线	QA	UEW
聚酯亚胺漆包线	QZY	EIW
聚酯亚胺复合聚酰胺酰亚胺漆包线	Q(ZY/XY)	EI/AIW
聚酰胺酰亚胺漆包线	QXY	AIW

表示漆包线的绝缘漆膜，国家标准GB6109中，第一个字母用“漆”的拼音字母“Q”表示，以后视不同的绝缘漆膜的拼音字母的主体字表示，有自粘层的用“N”表示，排在绝缘层代号的后面。日本工业标准中，采用相应绝缘漆英文的字母简写标识，如聚酯Polyester Wire，简写PEW，聚氨酯Polyurethane Wire，简称UEW，聚酯亚胺Polyester-imide Wire，简称EIW。如聚酯用“酯”的拼音字母“Z”表示，那么聚酯漆就表示为“QZ”；又如聚酯亚胺用“酯”，“亚”的拼音字母“Z”，“Y”表示，那么聚酯亚胺漆就表示为“QZY”；再如聚酯自粘性用“酯”，“粘”的拼音字母“Z”，“N”表示，那么聚酯自粘性漆就表示为“QZN”。

尼龙也称为聚酰胺，涂敷尼龙，聚氨酯复合尼龙：国标标识Q(A/X) 或者国际通用标识UEWN。自粘漆的表示，国标N，国际标识SB，Self-lubricant的简写

## 2.13) 漆包线各型号表示方法及说明

国标 1级表示方法：在标识后加“-1”为薄漆膜；

2级表示方法：在标识后加“-2”为厚漆膜；

3级表示方法：在标识后加“-3”为加厚漆膜；

例如：QA-1 表示薄漆膜聚氨酯漆包线；

QZY-2 表示厚漆膜聚酯亚胺漆包线。

国际通用 1种 表示方法：标识前加“1”为厚漆膜；

2种 表示方法：标识前加“2”为薄漆膜；

3种表示方法：标识前加“3”为特薄漆膜；

0种 表示方法：标识前加“0”为特厚漆膜。

例如：2UEW 表示薄漆膜聚氨酯漆包线,等同QA-1。

其中：QA-2 等同 1UEW（厚漆膜）；



## 2.14) 漆包线各型号表示方法及说明

- 当有彩色线时，表示加“R”—红色；“G”—绿色；“B”—蓝色；
- “Y”—本色；“N”—尼龙；“F”—热级 1 5 5
- 例如：2UEWR 表示：红色薄漆膜聚氨酯漆包线；
- 1PEWN 表示：尼龙复合厚漆膜聚氨酯漆包线。
- 2. 热级：即漆包线的耐热等级。
- 130级用“B”表示，即B级；
- 155级用“F”表示，即F级；
- 180级用“H”表示，即H级；
- 200级用“C”表示，即C级；
- 热级可以附带于标识后，例如：1PEW/155 或 1PEWF；1EI/AIW/200等。

## 2.15) 常用漆包线的特性和用途及说明

- 1. 缩醛漆包线：热级为105和120两种，具有良好的机械强度，附着性，耐变压器油及耐冷媒性能，但该产品耐潮性能差，热软化击穿温度低，耐用苯-醇混合溶剂性能弱等缺陷，目前仅少量用于油浸变压器，充油电机的绕组。
- 2. 聚酯及改性聚酯漆包线：普通聚酯漆包线，热级为130，经改性后漆包线热级为155级。该产品机械强度高，并具有良好的弹性，耐刮，附着性，电气性能和耐溶剂性能，它是我国目前生产量最大的一个品种，约占三分之二：广泛应用在各种电机，电器，仪表，电讯器材及家电产品上；该产品的弱点是耐热冲击性能差，耐潮性能较低。
- 3. 聚氨酯漆包线：耐热等级为130、155、180最大特点是具有直焊性，耐高频性能性好，易着色，耐潮性能好，广泛应于电子家电和精密仪器，电讯，仪表上，该产品弱点是机械强度稍差，耐热性能不高，且生产大规格线的柔韧性和附着性较差，因此该产品生产的规格以中小及微细线为多。

## 2.16) 常用漆包线的特性和用途及说明

- 4. 聚酯亚胺漆包线：热级180该产品耐热冲击性能好，耐软化击穿温度高，机械强度优良，耐溶剂及耐冷冻剂性能均较好，弱点是在封闭条件下易水解，广泛用于耐热要求高的电机，电器，仪表，电动工具电力干式压器等绕组。
- 5. 聚酯亚胺 / 聚酰胺酰亚胺复合层漆包线：是目前在国内使用较为广泛的耐热漆包线，其热级为200，该产品耐热性高，还具有耐冷冻剂，耐严寒，耐辐射等特性，机械强度高，电气性能稳定，耐化学性能和耐冷冻剂性能好，超负荷能力强。广泛应用于冰箱压缩机，空调压缩机，电动工具，防爆电动机及高温，高寒，耐辐射，超负荷等条件下使用的电机，电器。

## 2.17) 漆包线使用要求及检验

- 1、电工产品对漆包线的要求：漆包线广泛应用于电机、电器仪表、家用电器等的绕组线圈中。因此它的结构尺寸和各种性能必须满足电工产品的设计，制造加工和使用环境的要求。
- (1) 结构尺寸要求：电工产品在设计时根据其功率、槽形尺寸、和使用环境来选取漆包线的种类及漆膜厚度等级。其中尺寸部分将参照相应标准（如JIS、GB、IEC）要求，因此在生产时必须严格按标准来进行控制，否则将不能满足电工产品的要求。
- (2) 外观：外观也是漆包线的质量的重要指标，为满足绕制线圈和嵌线的要求，漆包线表面应光滑、均匀，磨擦系数小，不应有影响产品性能的缺陷。

## 2.18) 漆包线使用要求及检验

### 力学性能要求----机械性能

在绕线过程中，要承受弯曲、拉伸、锤打、碰撞等各种损害，故要求漆膜具有良好的耐磨性、耐刮性及良好的附着力。为方便加工还要求漆包线具有良好的柔软性、弹性、弯曲性能。

机械性能不良导致漆皮失去附着性、加工中漆皮被砍伤、最终导致短路等是电器件失去功能的一个主要原因

### 3. 1) 绝缘材料在电机中使用说明

- 电机中常用的绝缘材料，按其耐热能力分为A、E、B、F、H和C六个等级。
  1. A级绝缘 A级绝缘包括经过浸渍处理的棉纱、丝、纸等有机纤维材料以及普通漆包线上的磁漆等。目前仅在变压器中使用。A级绝缘的最高容许工作温度为 $105^{\circ}\text{C}$ 。
  2. E级绝缘  
E级绝缘包括用聚酯树脂、环氧树脂、三醋酸纤维等制成的薄膜，聚乙烯醇缩醛高强度漆包线上的磁漆等。用在中、小型交、直流电机中。E级绝缘的最高容许工作温度为 $120^{\circ}\text{C}$ 。
  3. B级绝缘B级绝缘包括云母、石棉、玻璃丝等无机物用有机漆或树脂(作了耐热性处理)作为粘合剂制成的材料及其组合物，聚酯高强度漆包线上的磁漆等。一般大、中型同步机及中、小型交、直流电机中采用。B级绝缘材料的最高容许工作温度为 $130^{\circ}\text{C}$ 。
  4. F级绝缘  
F级绝缘包括云母、石棉、玻璃丝等无机物用硅有机化合物改性的合成树脂漆，或耐热性能符合这一等级要求的醇酸、环氧树脂作为粘合物而制成的材料或其组合物。F级绝缘的最高容许工作温度为 $155^{\circ}\text{C}$ 。

## 3. 2) 绝缘材料在电机中使用说明

5. H级绝缘H级绝缘包括硅有机物以及云母、石棉、玻璃丝等无机物用硅有机漆作为粘合物而制成的材料。主要应用在接受要求尽量缩小尺寸、减轻重量的场合，如航空电机、吊车电机 牵引电机等。H级绝缘最高容许工作温度180℃。

### 6. C级绝缘

C级绝缘包括无粘合剂的云母、石英、玻璃丝等，用热稳定性特别好的肿有机树脂、聚酰亚胺浸渍漆等处理过的石棉、玻璃纤维织物或其他制成物，以及聚酰亚胺基漆包线的磁漆、聚酰亚胺薄膜等。C级绝缘是要求更高的绝缘材料，目前正在推广使用。它的最高容许工作温度在180℃以上。

关于绝缘材料的使用两须注意加下两点：

(1) 电机的绝缘等级由它所采用的主要绝缘材料中耐热等级最低的材料决定。在有

些特殊情况下，为了提高运行的可靠性，还要降低绝缘等级使用。

(2) 温度对绝缘材料寿命影响极大。实验表明，A级绝缘材料的寿命 $t(a)$ 与使用温度 $\theta$  (°C)

有如下关系：

$t = ce^{-a}$  式中 $c$ 和 $a$ 为试验决定的常数。例如当 $a \approx 0.088$ 时，每当温度增高8℃，绝缘寿命就缩短

### 3.3) 电机中热源分析及散热方法说明

一台电机中的温度分布和热量流通情况十分复杂。各种损耗形成不同的热风损耗转

化为热量后，将流过不同的材料，由电机外表面散发至外面。主要的热源来自电机内部，即来自电流流过导体时产生的铜损耗，以及在铁芯内当磁通变化时所产生的铁损耗。轴承摩擦所产生的热，仅为局部的热源，对绕组和铁芯的温升影响不大。当电机开始运转后，由于热量不断产生，各部分温度将继续增加，直到热量的产生和散发达到平衡为止。在电机内部，各点的温度是不均匀的。在发热量大而散热不易之处，例如在电枢的槽的底部温度为最高。绝缘材料同时也是不良的导热体，沿着绝缘层的温度梯度较高，而导电体同时也是良好的导热体，故在铜线内部的温度梯度很小。钢片的导热系数虽远不如铜，但依旧是良好的导热体。由于相邻叠片间的绝缘层，所以沿铁芯轴向的导热系数大为减小。叠片压紧时压力的大小，也可影响导热系数。



### 3. 4) 电机中热源分析及散热方法说明

绝缘材料的导热系数极小，仅为铜的导热系数的 $1/1000$ 以下。棉丝经过浸渍处理后，导热系数可以增加 $3/4$ 倍，故浸渍对于热量的流通有利。电机的热量向外发散时主要依靠对流作用，其次为幅射作用。因为电机的底座和电机所接触的空气都为不良导热体，由传导作用传热主要在电机内部进行。幅射作用的有效表面仅为电机各部分的外表面。对流作用又可区分为自然对流和强制对流两种。自然对流作用是由于和散热面相接触的热空气的上升，且其所逸出的空间由周围的空气的填补；强制对流作用是由待备的通风器，例如附装在机轴上的风扇，在冷却表面上形成气流。旋转着的电枢本身也起着带动气流的作用。限制温升的有效方法是增强散热作用。由于电机各部分的发热和散热过程比较复杂，影响的因素很多，所以对温升的计算通常只作近似的估算，在设计电机时，常以经验数据为依据。

### 3.5) 电机中绝缘等级材料使用说明

我国国家标准规定：电机使用的绝缘材料其最高允许温度以及最高允许温升分成七个等级。如表 11-1 所示。

各种绝缘材料最高允许温度与温升表

表 11-1

绝缘等级	Y	A	E	B	F	H	C
最高允许温度(℃)	90	105	120	130	155	180	180 以上
最高允许温升(℃)	50	65	80	90	115	140	140 以上
绝缘材料	未经过浸漆处理的棉纱、丝、纸等	用绝缘漆处理过的棉纱、丝、纸等	含有有机材料所组成的绝缘制品，如聚酯薄膜、环氧树脂、聚乙烯、胶纸板等	云母、石棉、玻璃纤维等制品	云母、石棉，用有机合成胶做粘合剂的制成品	硅有机材料或用硅有机材料做粘合剂的云母、石棉、玻璃纤维等制成品	玻璃、陶瓷、石英等无机材料

注：以上材料中 Y 级和 C 级在电机中极少采用。

电机在运行中最高工作温度  $\theta_{\max}$  不得超过绝缘材料最高允许温度  $\theta_m$ ，即  $\theta_{\max} \leq \theta_m$ 。这就是按发热条件保证电机长期运行而选用电机的依据。

### 3. 6) 电机中绝缘等级材料使用说明

#### 常见材料参数对比

项目	单位	3021酚醛 纸板	酚醛 纸板	3025酚醛 棉布板	酚醛 棉布板	3240环氧 酚醛玻璃 布	FR-4 环氧玻璃布	GPO-3	3250有机 硅玻璃布 板	BMC	SMC	钢纸板
密度	g/cm <sup>3</sup>	1.3~1.4	1.3~1.4	1.3~1.4	1.33	1.7~1.9	1.9	1.87	1.65	1.8~2.0	1.8~2.0	1.2
吸水率	%	2	1.2~1.6	2	0.4~0.8	0.8	0.07~0.16	0.2~0.4	1	0.2	0.25	63
拉伸强度	MPa				83	220	338	124	170			69
弯曲强度	MPa	120	120~170	100	130~180	350	490	259	200	82	150	103
耐压强度	MPa		290~340		290~340	300	333	228	350			241
冲击强度	KJ/m <sup>2</sup>		28~34	8.8	70~90	33	100	447	80	25	60	25
垂直层向 耐电压	KV/mm	12	10	8.2	10	14.2	16	23	18	12	12	8.6
耐电弧性	seconds						285	182		185	180	90
阻燃性							V0	V0		V0	V0	
耐热性	℃	120	120	120	130	130	160	160	180	160	160	90
耐热等级		E	E	E	B	B	F	F	H	F	F	Y

## ● 四、电机铁心组成及说明

铁芯是电机磁路的重要组成部分，它和转子铁芯、定子和转子之间的气隙一起组成电机的磁路。在异步电机中，定子铁芯中的磁通是交变的，因而产生铁芯损耗。铁芯损耗包括两部分：**磁滞损耗和涡流损耗**。

为了减小铁芯损耗，交流电机的定子铁芯必须用电阻系数大、磁滞回线面积小的薄板材料——硅钢片，经冲制和绝缘处理后叠压而成。

常用的铁芯材料有硅钢片、电工纯铁、铁镍合金、铁铝合金、铁钴合金和永磁材料等。

### 1. 对硅钢性能的要求主要是：

- ①铁损低，这是硅钢片质量的最重要指标。各国都根据铁损值划分牌号，铁损愈低，牌号愈高；
- ②较强磁场下磁感应强度（磁感）高，这使电机和变压器的铁芯体积与重量减小，节约硅钢片、铜线和绝缘材料等；
- ③表面光滑、平整和厚度均匀，可以提高铁芯的填充系数；
- ④冲片性好，对制造微型、小型电动机更为重要；
- ⑤表面绝缘膜的附着性和焊接性良好，能防蚀和改善冲片性；
- ⑥基本无磁失效。

## ● 4.2) 电机铁心组成及说明

### 二、电工纯铁

电工纯铁是一种含铁量在99.5%以上的优质钢，是一种低碳低硫低磷铁，包括原料纯铁和电磁纯铁两类。供料状态有直径不大于250mm的热轧、热锻及冷拉棒料和冷轧、热轧薄板。主要用于电器，电讯，仪表和国际尖端工业制做电磁元件，电磁铁芯等。

#### 主要特征：

- 1) 电磁性能好。矫顽力 ( $H_c$ ) 低，导磁率  $\mu$  高，饱和磁感 ( $B_s$ ) 高，磁性稳定又无磁时效。
- 2) 钢质纯净度高。电磁纯铁系列钢质均为镇静钢，又采用了精练，所以内部组织致密，均匀，优良，气体含量少，成品含碳量  $\leq 0.004\%$ ，这为用户简化和缩短零件退火工艺创造了可靠条件。
- 3) 冷、热加工性能好。冷加工如车、墩、冲、弯、拉……等都无问题。热加工，如再锻、再轧过程中，红脆敏感性小，不少牌号无红脆区，可保证在较大的温度范围内进行加工。
- 4) 表面质量好。具有良好的焊接和电镀性能。
- 5) 尺寸精度高。可提供超精度冷轧板，如板厚  $\leq 105\text{mm}$ ，厚度公差可保  $\leq 0.03\text{mm}$ ；板厚  $> 1.5\text{mm}$ ，厚度公差可保证  $\leq \pm 0.05\text{mm}$ 。



## ● 4.3) 电机铁心组成及说明

### 三、铁镍合金

含镍量在45%~80%的铁镍合金，经高温退火后有极好的磁性能。在较低磁通密度下，磁导率比硅钢片高10~20倍。旋转变压器、自整角机和测速发电机等控制电机铁芯常采用铁镍合金制成。



### 四、铁铝合金

铁铝合金是以铁和铝(占6%~16%)为主要成分、不含贵重元素的另一类高电磁性能软磁合金，在微电机中也得到应用。常用的铁铝合金可以有冷轧或热轧带材，片厚0.1~0.5mm。

### 五、铁钴合金

在铁钴合金材料中，饱和磁感应强度 $B_s$ 最高(高于纯铁)，居里温度高(98℃)，电阻率较低，含贵重金属钴大约50%，其型号为1J22，适用于作航空、航天特殊要求的微电机铁芯。

## ● 4.4) 电机铁心组成及说明

永磁材料又叫**硬磁材料**，其主要特征是剩磁感应和矫顽力高。永磁材料经饱和磁化以后，去掉磁化的磁场仍能长时间地保持强的、稳定的磁性，给电机励磁，建立磁场。永磁材料主要有铝镍钴、铁氧体永磁材料、稀土钴永磁材料、稀土钕铁硼永磁材料等系列。

永磁材料又叫**硬磁材料**，其主要特征是剩磁感应和矫顽力高。永磁材料经饱和磁化以后，去掉磁化的磁场仍能长时间地保持强的、稳定的磁性，给电机励磁，建立磁场。永磁材料主要有铝镍钴、铁氧体永磁材料、稀土钴永磁材料、稀土钕铁硼永磁材料等系列。

## ● 4.5) 小型电机定、转子铁心软磁性材料选原则

小型电机定、转子铁心软磁性材料选用原则：

### 1. 考虑磁场性质

电机铁芯磁路中的磁场有恒定磁场和旋转(交变)磁场两类。对工作在恒定磁场中的铁芯，如直流电机的主磁极、磁轭，同步电机转子磁极等，可选用电工纯铁、10号钢等。可充分利用其磁导率、饱和磁密较高的优势；对工作在旋转(交变、脉振)磁场中的铁芯，如各种交流电机铁芯、直流电枢铁芯及旋转变压器用铁芯等，均应选用相应合适的硅钢片，即保证磁导率和饱和磁密，又保证铁损要求。

### 2. 考虑各种电机对冲片铁芯磁导率的方向性和均匀性。

中小型及微特电机冲片铁芯一般采用无取向硅钢片，以满足电机对磁场分布的各向同性的要求。变压器和大型电机(一般直径大于900mm)冲片铁芯常采用取向硅钢片。



## ● 4.6) 小型电机定、转子铁心软磁性材料选原则

3. 考虑电机铁芯工作磁密高低。

电机铁芯工作磁密可分为高低两类。对驱动类小功率电机应选用低硅或无硅冷轧钢片；对工业和控制用电机应采用高硅硅钢片。

4. 考虑电机铁芯损耗的大小。

### (1) 硅钢片厚度的选择

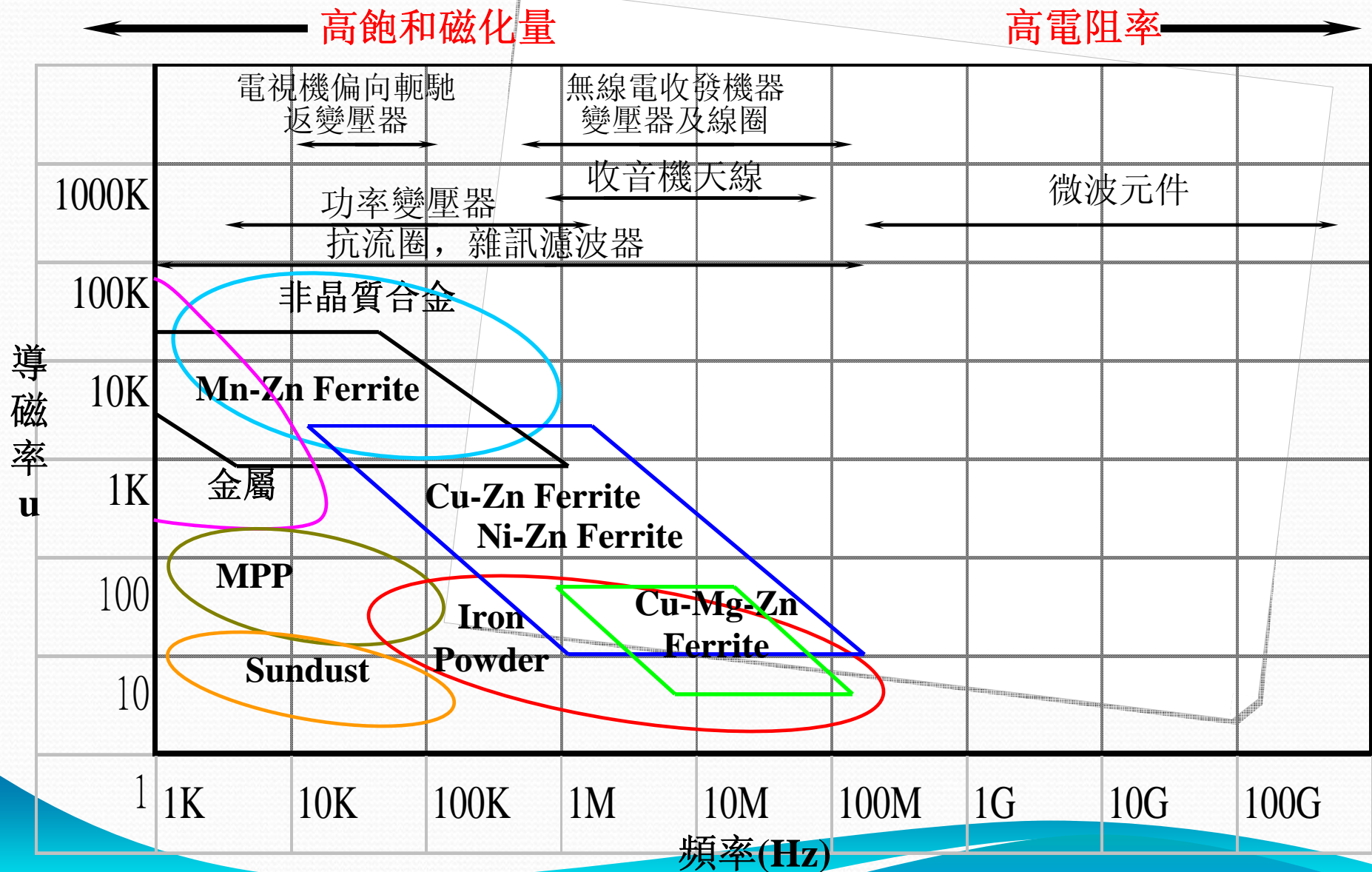
薄硅钢片叠成的铁芯片间绝缘多，铁损较小，但叠片数增加，冲裁、叠压工作量大。用厚硅钢片时，叠成的铁芯片间绝缘少，铁损较大，但叠片数少，加工量就相应减少。

### (2) 电机铁芯重量大小的考虑

对大功率电机，铁芯重量大，应选用单位铁损值较小的硅钢片等软磁材料。对小功率电机，特别是驱动类微电机，铁芯重量小，相对来说，对铁芯材料单位铁损值可以适当放宽。

5. 考虑电机铁芯材料的价格。

# 4.7) 各種磁性材料的適用範圍



## 5.1) 永磁铁氧体行业概述

永磁铁氧体是以SrO或BaO及Fe为原料，通过陶瓷工艺（预烧、破碎、制粉、压制成型、烧结和磨加工）制造而成，具有宽磁滞回线、高矫顽力、高剩磁，一经磁化即能保持恒定磁性的功能性材料。按生产工艺不同，将永磁铁氧体分为烧结和粘结两种，其中烧结又分为干压成型和湿压成型，粘结分为挤出成型、压制成型和注射成型。由粘结铁氧体料粉与合成橡胶复合而制成的具有柔软性、弹性及可扭曲的磁体又被称做橡胶磁。根据成型时是否外加磁场则分为各向同性永磁体和各向异性永磁体。

### 2 对永磁材料的要求

- 1) 要能建立起较高的气隙工作磁通，在电机低速运转时，也要保证有较大的功率输出。
- 2) 矫顽力要大，适应发电机动态磁路的特点，提高其输出特性的稳定性。
- 3) 磁能积要大，提高电机比功率。
- 4) 去磁曲线近似直线，或去磁曲线很大部分接近直线，回复曲线基本上与去磁曲线重合，磁钢无需进行特殊的稳磁处理。
- 5) 要求磁稳定性良好，即耐温度变化、耐振动、耐冲击等。
- 6) 机械强度高，价格低廉。

	TDK	横店东磁	江粉磁材
1	FB6	DM4040、DM4240等	JMP-5、JMP-6
2	FB9	DM4350、DM4545等	JMP-7
3	FB12	/	JMP-8(研发中)

## 5.2) 铁氧体永磁材料的性能

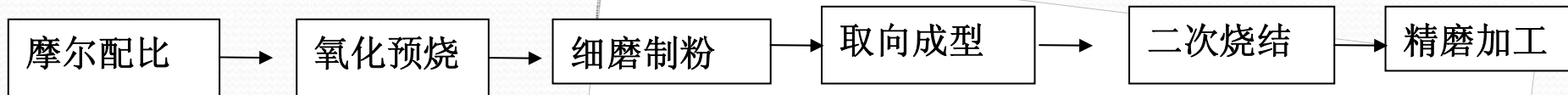
大量生产的铁氧体磁钢有钡铁氧体和锶铁氧体两类。

- 1) 铁氧体磁钢的剩磁 $B_r$ 较小 ( $B_r=2000\sim 4400G$ )，只有铝镍钴磁钢的三分之一。
- 2) 铁氧体磁钢的矫顽力较大 ( $H_c=1600\sim 3500Oe$ )，利用铁氧体磁钢矫顽力大的优点，恰当设计磁路，可以弥补剩磁 $B_r$ 低的缺点，建立较高的工作气隙磁通。
- 3) 去磁曲线斜率接近1，可在去磁曲线上选择尽可能高的工作点。
- 4) 机械强度高，抗压强度为  $(100\sim 200)kg/cm^2$ ，硬度为  $480HV\sim 580HV$ ，且价格低，约为铝镍钴钢的  $1/10\sim 1/8$ 。
- 5) 铁氧体磁钢受温度影响大，一般温度上升  $100^\circ C$ ， $B_r$ 就降低  $(18\sim 20)\%$ 。

### 4 锶铁氧体在飞轮发电机中的应用

随着农用运输车的发展，单缸柴油机所安装的飞轮发电机，要求在外形尺寸基本不变的情况下，输出功率有较大的提高。在外形尺寸基本不变的情况下原来45W发电机已发展到250W，功率超过原来的5倍以上，基本上可以说磁性材料在起着主导作用。若采用铝镍钴、稀土钴等磁性材料，性能虽然优越，但价格昂贵，不宜采用，而锶铁氧体价格便宜， $B_r$ 、 $H_c$ 值均高于钡铁氧体， $B_r$ 值也适合于设计300W以下的发电机，并且在发电机磁路内建立最大磁势时的工作点较稳定，钡铁氧体磁钢该工作点一般选择在磁曲线拐点附近，在拐点附近磁钢性能随温度变化相当明显，而锶铁氧体拐点在工作区域以外。因此，高性能的锶铁氧体是设计较大功率发电机的理想材料。

## 5.3) 烧结永磁的关键工艺



- 1)、细化晶粒的平均尺寸：铁磁学的研究表明，铁氧体晶粒的单畴临界尺寸为：0.9—0.94微米。为了制备尺寸均匀、粒径分布范围窄且接近单畴的铁氧体颗粒，工艺上应采用多级粉碎的方法例如：三级粉碎法；第一级将铁氧体粉碎至10—15微米；第二级将铁氧体粉碎至2—4微米；第三级将铁氧体粉碎至0.8—1.0微米达到单畴临界尺寸。

- 2)、提高晶粒取向度：压型磁场是实现磁晶粒取向的重要环节，工艺控制的关键是合模空间位置的磁场强度（H），研究得到 $H=3000—4000Gs$ 才能获得晶粒沿磁场方向的一致定向排列，

- 3)、提高烧结密度：提高压型压力、减少毛坯在高温收缩时的摩擦阻力以及在料浆中加入助溶剂是提高烧结密度的有效方法。

- 4) 提高磁晶各向异性常数：铁氧体磁性来源于电子之间的交换偶合作用，根据晶界“钉扎”理论使用间隙化合物能改善和提高磁晶各向异性常数，近年来由于纳米技术的发展使材料领域产生了新的飞跃，“离子置换、离子替代”方法是铁氧体工艺最新、应用最多的方法。

## 5.4) 永磁铁氧体关键工艺技术及发展趋势

1) 铁氧体器件日趋向高性能、小型化方向发展：在当今微电子时代铁氧体功能器件更多地用于：各种电子时钟、永磁直流微电机、精密仪器仪表、传感器等。

2) 汽车领域对铁氧体器件的需求日趋增大：例如车用电子扇电机、启动电机、暖风电机、冷凝器电机、玻璃自动升降电机、雨刮器电机及音响器喇叭磁环等，最新应用的汽车防抱死装置、减震消音装置中均使用了铁氧体材料。可以肯定汽车自动化程度越高使用的铁氧体就越多。

3) 家用电器对铁氧体器件的市场需求日益增加：例如微波炉、电饭褒、洗衣机、电风扇及各种健身器材、电动玩具等均使用铁氧体材料，其器件功能多样、形状各异、品种及产量日益增加。

4) 出口产品从中低档逐步向中高档方向发展：预计在今后几年中我国的烧结铁氧体制造技术将达到世界先进水平，将大批生产价格在3000—6000元/吨之间的高档铁氧体材料及器件。

## 5.5) 永磁铁氧体在现代电子信息技术中的应用

主要应用	应用范围
计算机及外围设备	磁盘驱动马达、磁头驱动马达及传动机构、主动轮马达、风扇马达、卷带马达、送纸马达及传动机构、吸引磁体等
OA设备	驱动马达、笛簧接点元件、磁辊装置传感器、透镜系统驱动马达、分检机马达等
VCD、DVD影碟机	主轴马达、影碟片转换器等
录像机	磁头驱动马达、主动轮马达、卷带马达、加载马达、加载传动机构、PC传感器、笛簧接点元件、磁鼓等
电视机	扬声器、中心调整磁体、色彩校正磁体
收录机	扬声器、同步马达、主动轮马达、卷带马达、话筒、耦合器等
信息显示系统	磁性文字显示仪、磁翻转信息显示机
通讯设备	电话送话器、微波通信器件、扬声器、笛簧接点元件、传真机用磁辊送纸马达等

## 5.5) 电机在汽车产业中运用

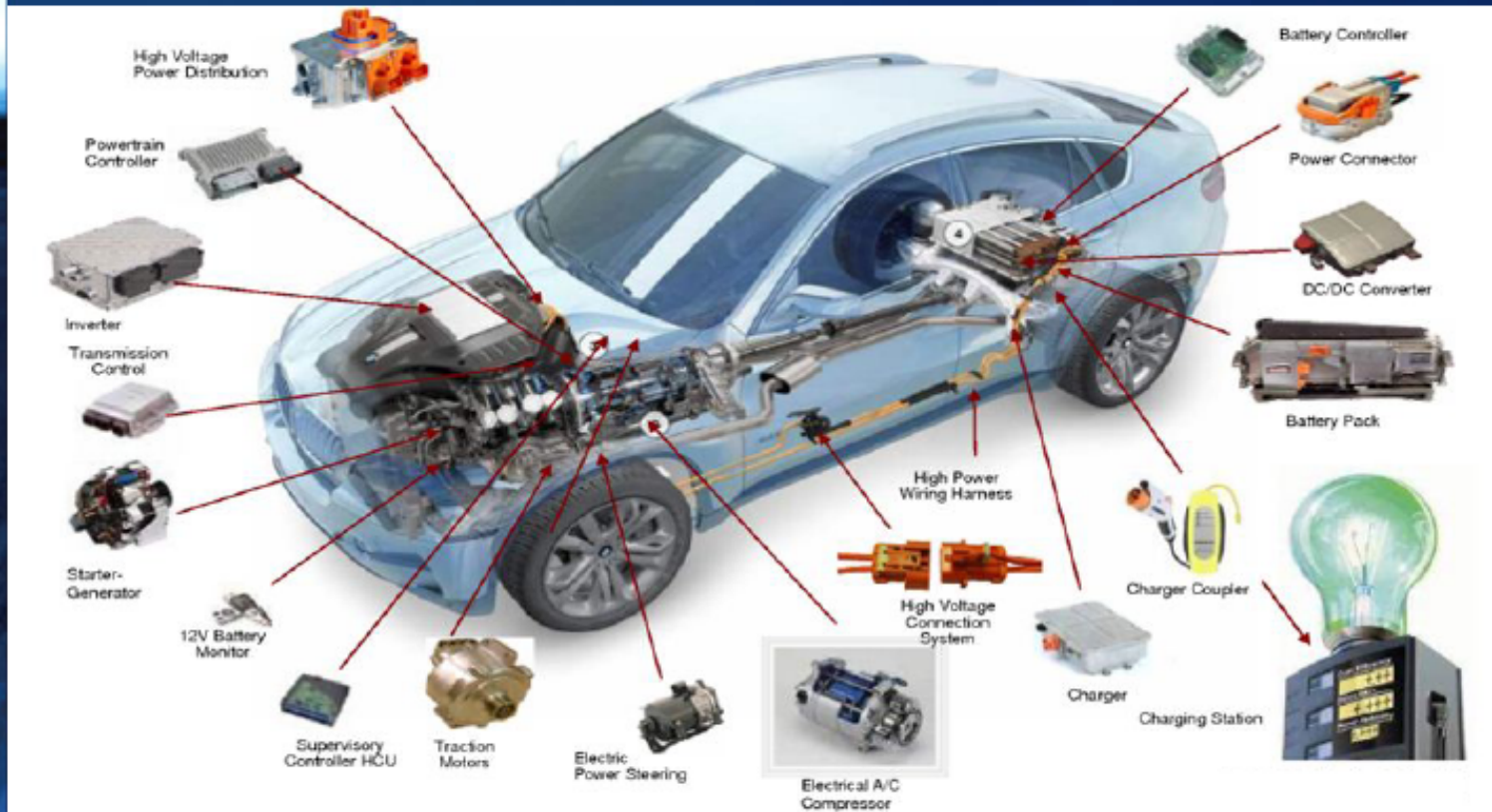
### 电气零部件在EV/HEV中关键作用

三大电：电机/E-motor、电池/Battery、电控/e-Control,

三小电：空调/AC Pressure、转向/Power Steering、制动/Brake by Wire



driving the next

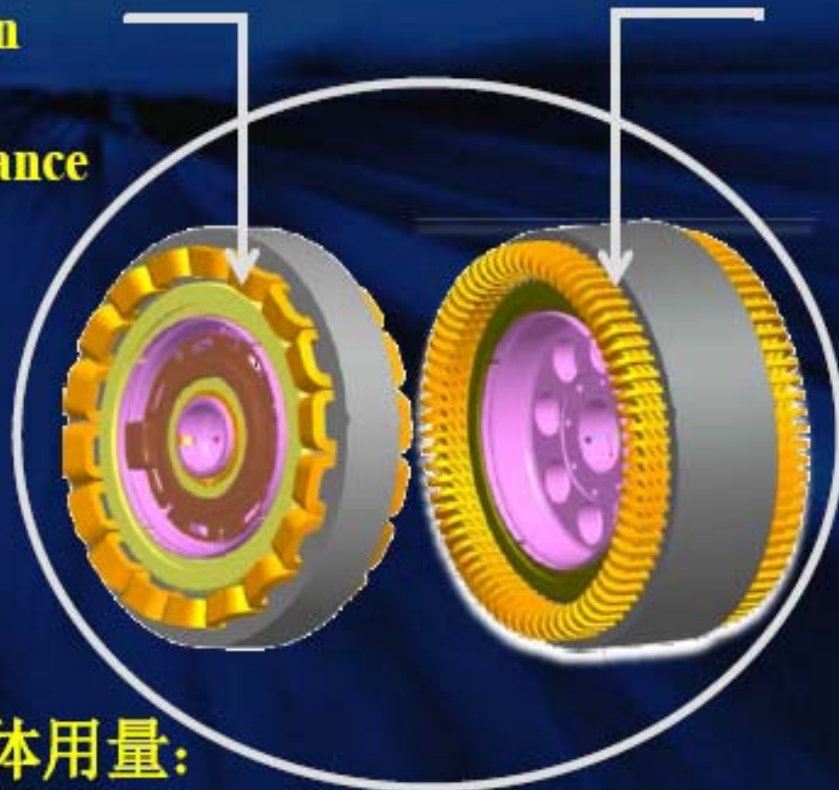




## 5.6) 永磁磁体在两种绕组分布图

### 集中绕组

- Short end turn
- Better rotor Position tolerance



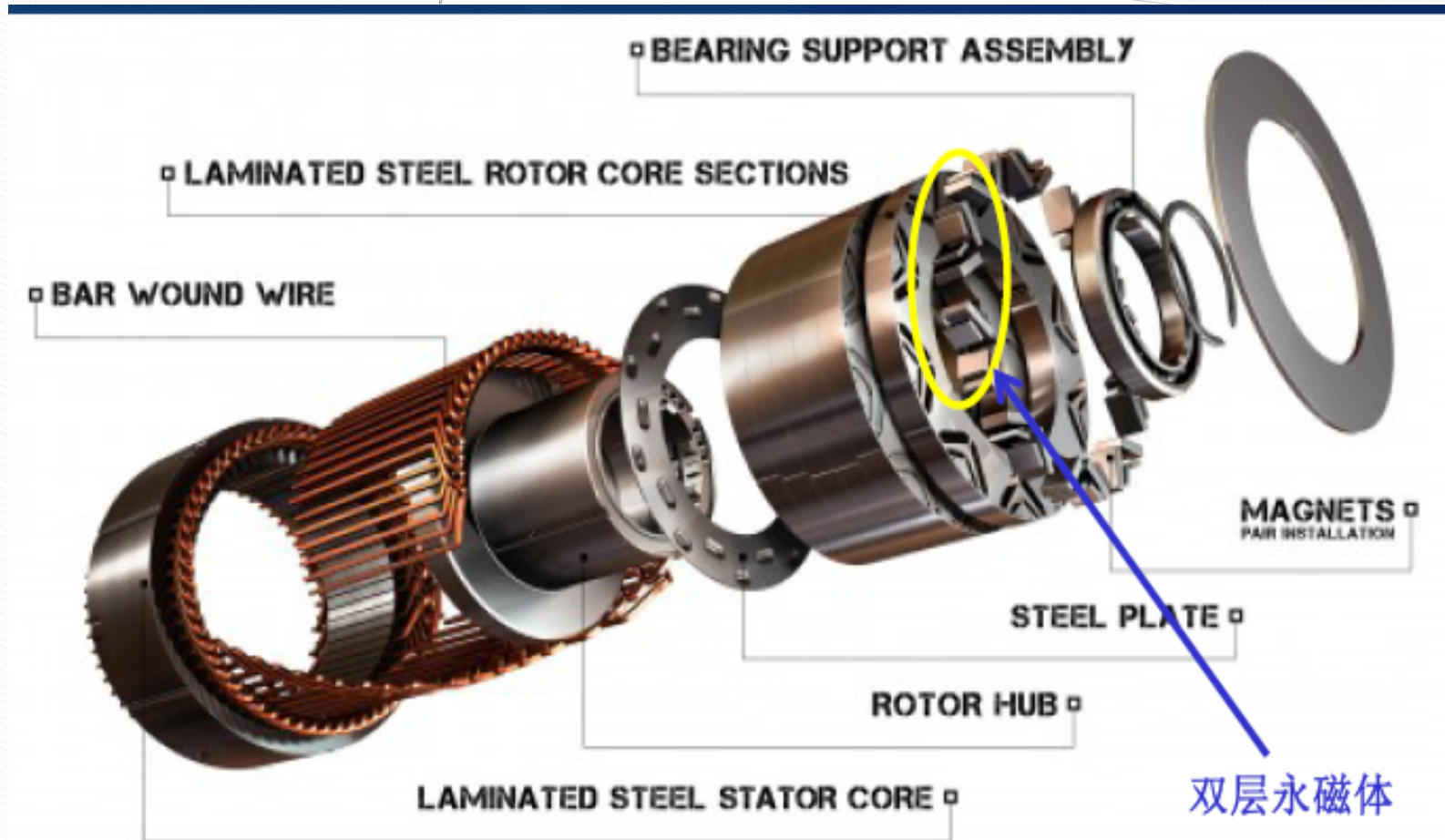
### 分布绕组

- High Reluctance Torque
- Better heating rejection

### 永磁电机永磁体用量:

- 商用车直驱5~14公斤/电机，带减变速器的4~10公斤/电机
- 乘用车跑车：2~5kg/电机，纯电动车1~2kg/电机，混动0.8~1.5kg

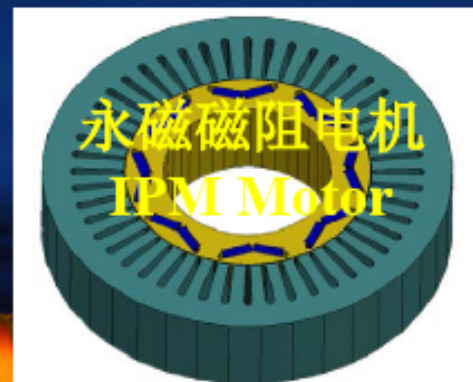
## 5.7) 永磁磁体在电机分布图



## 5.8) 永磁磁体在电机绕组分布图

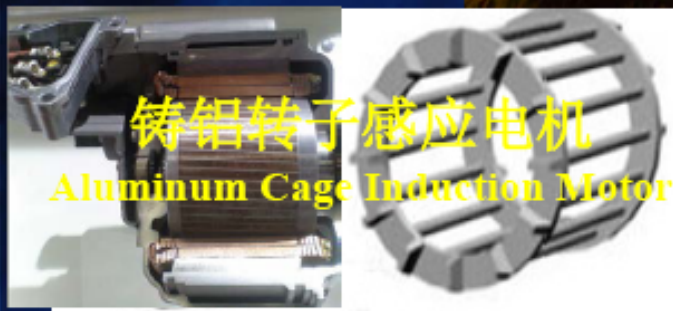
汽车电动化的驱动电机

IPM  
内置永磁电机



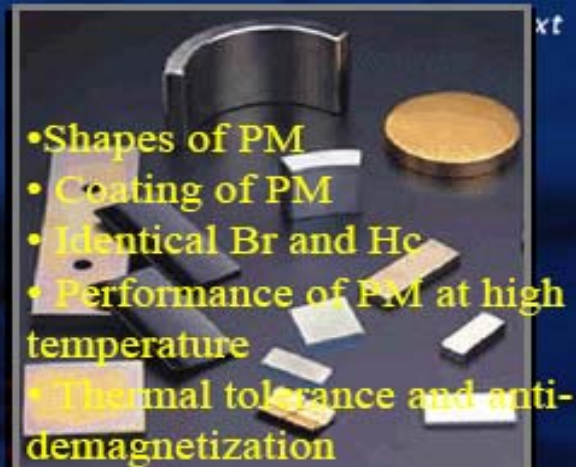
Induction Motor  
感应电机

铜笼转子感应电机  
Copper Cage Induction Motor

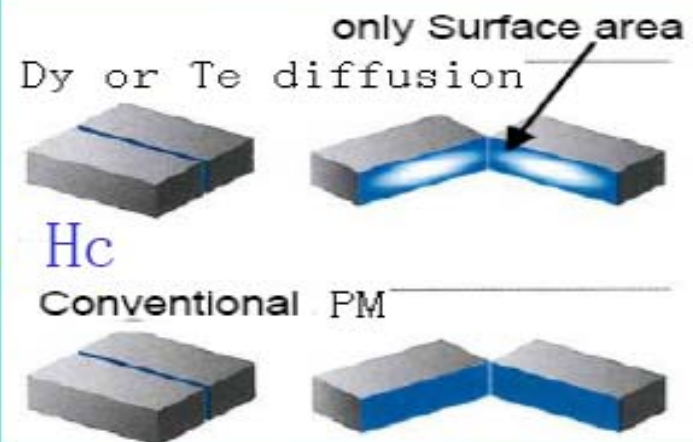


## 5.9) 永磁磁体需要解决问题

### 永磁体渗重稀土：镨或铽



- 涂层：镀金属 vs. 绝缘
- 试验认证：温度循环、涂层
- 永磁等级UH、EH等，BH、Br、
- 铁氧体 vs. 稀土永磁
- 预充磁 vs. 整体充磁



## 5. 10) 中国高性能电机供应链面临较高技术挑战

**Performance**

电磁性能

**EMC/EMI**

电磁干扰

**Power Electronics**

电力电子

**Mechanics**

机械

**Thermal Management**

热交换

**Vibration**

振动

**Noise**

噪音

**IP Grade**

防护

**Safety**

安全

**Environment**

环保

**Measurement/Testing**

测试/试验



**PM (Temperature, DeMag, Aging, Coating, Cutting)**  
永磁体 (耐高温, 抗去磁, 抗老化, 涂层, 加工)

**Silicon Steel (Permeability, losses, uniformity)**  
硅钢片 (高磁导率, 低损耗, 均匀一致)

**Magnetic Wires (Corona guard, Extraction, temp cycle)**  
电磁线 (耐电晕漆膜, 抗拉, 温度循环等)

**Cables (Temp., corrosion, EMC/EMI etc.)**  
电缆 (耐温, 防腐, 抗拉, 抗EMI)

**Shaft Splines (Precise machining, heating process)**  
内外花键轴 (精密加工, 热处理)

**Temperature Sensors (accuracy, consistency, installing)**  
温度传感器 (精度, 一致性, 安装)

**Position/speed sensor (accuracy, anti-EMI, temperatur)**  
位置传感器-旋变 (准确, 抗EMI)

**Bearings (speed, noise, bearing current, life)**  
轴承 (高转速, 低噪音, 长寿命)

**High/Low Voltage Connectors (Reliability, protection)**  
高低压接插件 (可靠, 保护)

**Housing (Casting, extraction, welding, O-ring)**  
壳体 (整体铸造, 拉伸, 焊接)

**Installation/Assembly (Interfering fit etc.)**  
整体集成 (过盈装配)

**Supplier chain issues: very few suppliers for PM, Silicon Steel, Corona guard wire;**

注意: 供应链尚不成熟, 永磁体、硅钢片和防电晕电磁线等只有极少数供应商可以满足要求; 高速轴承、温度和位置传感器主要依赖进口; 水冷壳体制造水平较低

谢谢光临，  
请批评指正！