



哈爾濱工業大學
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



自动控制实践A-6

- 直流电机的选用



复 习

1. 直流电机的调速运行

--串电阻调速

--弱磁调速

--调压调速



复 习

2. 直流电机的四象限运行

--四象限运行

--反馈制动

--能耗制动

--反接制动

--直流电机驱动控制的基本概念



目 录

1. 直流电机的选用

- 直流电机特点

- 直流电机的选用

- 直流伺服电机实例

2. 直流电机总结



直流电机特点

- 直流电机的优点

- 具有良好的线性控制特性，静、动态控制性能好。
- 调速范围广，易于无级调速、四象限运行。
- 起动、制动转矩大，易于快速起动、停车。

- 直流电机的应用

- 轧钢机、电气机车、无轨电车、中大型龙门刨床、军舰、潜艇等调速范围大的大型设备。
- 电池做电源的场合，如汽车、拖拉机等。
- 家庭：电动自行车、电动玩具。



直流电机特点

- 直流电机的缺陷

- 电刷、换向器结构限制了电机的最大功率、最高转速；
- 电刷、换向器结构限制了电机的安全性、适用性
- 电刷、换向器结构导致电机应用维护性差。
- 电磁兼容性差。

直流伺服系统正被交流伺服系统所逐步取代，但是其控制和应用的概念，是运动控制的基础；交流电机的控制是基于直流电机模型进行的。



直流电机铭牌参数

直流电动机的铭牌

1. 额定功率 P_N : 电机轴上输出的机械功率 ($T_N * n_N$) 。
2. 额定电压 U_N : 额定工作情况下的电枢上加的直流电压。
(例: 3V, 4.5V, 6V, 12V, 24V, 110V, 220V)
3. 额定电流 I_N : 额定电压下, 轴上输出额定功率时的电流 (并励应包括励磁电流和电枢电流) 三者关系:
 $P_N = U_N I_N \eta$ (η : 效率)
4. 额定转速 n_N : 在 P_N , U_N , I_N 时的转速。



直流电机铭牌参数

5. **最大转矩 T_M (Nm)**：电机在短时间内可输出最大转矩，它反映了电机的瞬时过载能力。
6. **机电时间常数 τ_m 和电磁时间常数 τ_e** ：分别反映了电机的两个过渡过程时间。
7. **转动惯量 (kgm²) J** ：高响应需求时，电机转子的转动惯量与负载惯量有匹配要求。
8. **最大电流 I_m (A)**：对应于可允许最大输出转矩时的电机电流。



直流电机铭牌参数

其它铭牌参数:

9. 电机极对数/极数

10. 防护等级(IP)

11. 工作制式: 连续、断续、短时。

12. 绝缘等级: A-105°C; E-120°C; B-130°C; F-155°C;

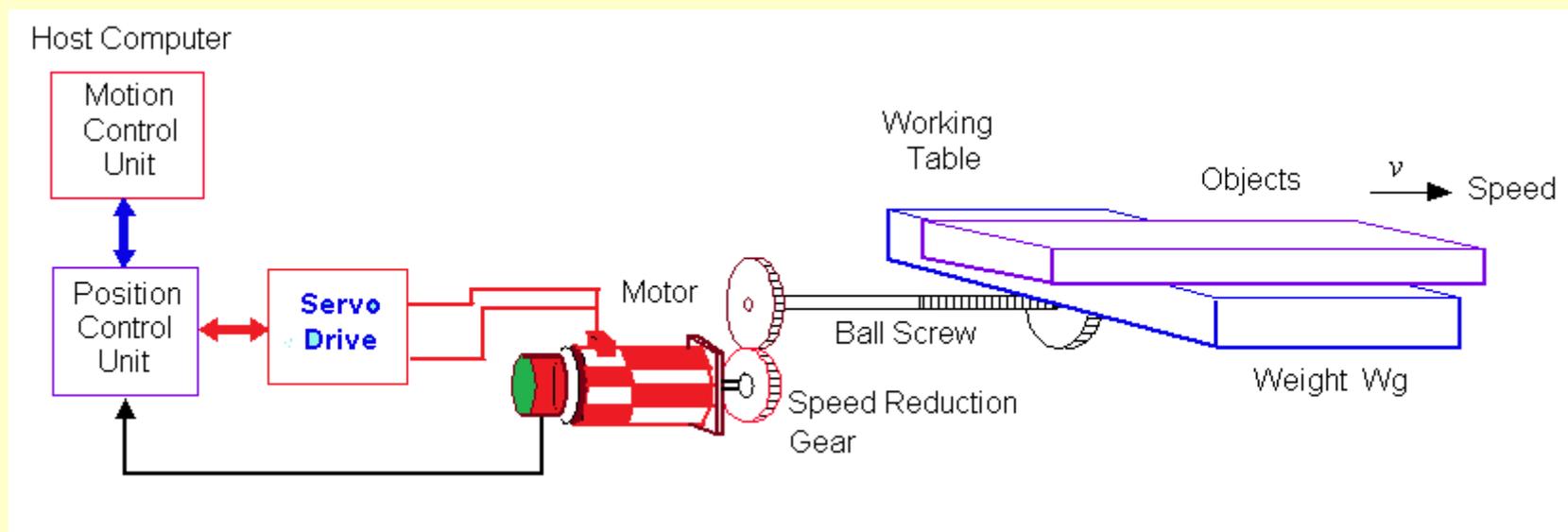
H-180°C C-高于180°C

13. 生产日期与序列号



电机的选择

电机选择的考虑



从电机侧看

$$J = J_m + \frac{1}{i^2} J_L \quad T_f = \frac{1}{i} T_L$$

J_L -负载转动惯量； J_m -电机转动惯量； i -齿轮速比

T_L -负载力矩；



电机的选择

(1) 峰值力矩—加速度+阻力矩

$$T_p = (J_m + J_L)a + T_f$$

J_m -电机转动惯量 J_L -负载折算转动惯量

a -加速度 T_f -折算阻力矩

(2) 额定力矩—电机长时间运行允许的最大电流

(3) 额定转速—转矩*转速=功率

(4) 力矩常数 K_t —电流，电势常数 K_e —电压；

(5) 尺寸、质量与接口形式



电机的选择

例1 考虑两个具有不同参数的电机，如表所示。需要电机在3000r/min速度下运行，并产生 $T=1.2 \text{ N m}$ （电磁力矩）。供电电源电压45V，问需要什么样的电机？

参数	电机A	电机B
$K_t / (\text{N m/A})$	0.1	0.2
$K_e / (\text{V} / (\text{rad/s}))$	0.1	0.2
R / Ω	0.5	2.0



电机的选择

例1 在3000r/min速度下运行，产生电磁力矩=1.2 N m

参数	电机A	电机B
Kt/ N m/A	0.1	0.2
Ke/ V/(rad/s)	0.1	0.2
R/ Ω	0.5	2.0

$$I_{\max} = \frac{T_P}{K_t} \rightarrow \begin{matrix} 12\text{A} \\ 6\text{A} \end{matrix}$$

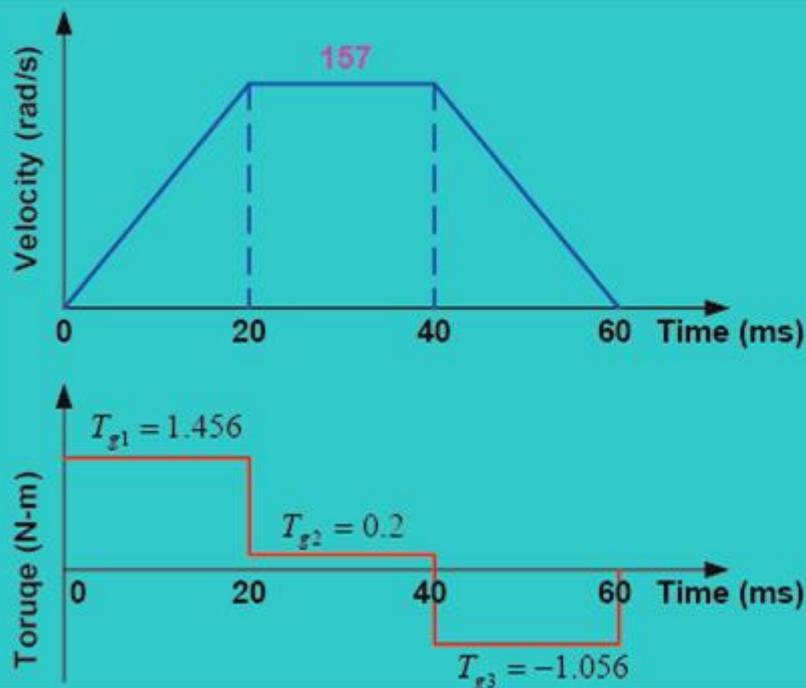
$$V_m = rI + K_e \cdot \Omega \rightarrow \begin{matrix} 37.4\text{V} \\ 74.8\text{V} \end{matrix}$$

供电电源电压45V



电机的选择

例2：摩擦阻力矩： 0.2Nm ，系统转动惯量 $1.6 \times 10^{-4}\text{kgm}^2$ 。
运动要求：60ms 旋转一圈，每秒重复10次。



$$\omega_p = \frac{\text{旋轉位移}}{\frac{1}{2}T_{\text{加速}} + T_{\text{等速}} + \frac{1}{2}T_{\text{減速}}} = \frac{2\pi}{0.04} = 157(\text{rad/s})$$

$$\alpha = \frac{\omega_p}{T_{\text{加速}}} = \frac{157}{0.02} = 7850(\text{rad/s}^2)$$

$$\begin{aligned} T_{g1} &= J_L \alpha + T_f \\ &= 1.6 \times 10^{-4} \times 7850 + 0.2 = 1.456(\text{Nm}) \end{aligned}$$

$$T_{g2} = T_f = 0.2(\text{Nm})$$

$$\begin{aligned} T_{g3} &= -J_L \alpha + T_f \\ &= -1.6 \times 10^{-4} \times 7850 + 0.2 = -1.056(\text{Nm}) \end{aligned}$$



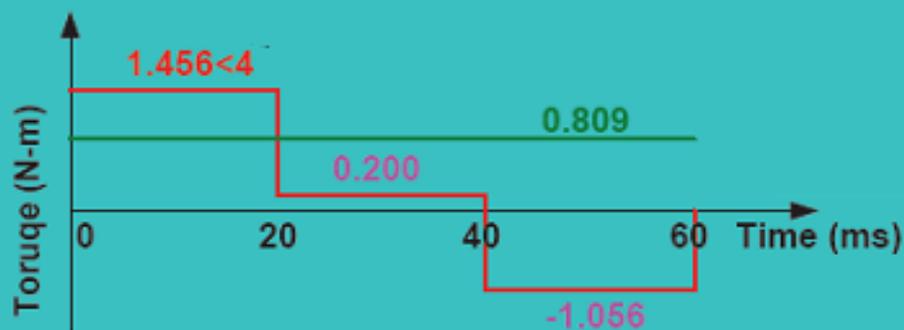
电机的选择

若所选电机:

连续转矩 $T_C = 1.2(Nm)$

最大力矩 $T_P = 4(Nm)$

最大速度 $\omega_P = 314(rad/s)$



则所选电机:

1. 满足最大力矩要求 (4) ;
2. 满足最大转速要求 (314) ;
3. 满足连续运转要求, 不会产生过热现象。

等效转矩 $T_{rms} < T_c$

$$T_{rms} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T T_g^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} = 0.809 < T_c = 1.2$$

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{T_A^2 t_1 + T_L^2 t_2 + T_B^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}$$



直流伺服电机等实例

1. 直流伺服电机

- 直流伺服电机特点

- 低惯量直流伺服电机

- 宽调速直流伺服电机

2. 直流力矩电机

- 直流力矩电机

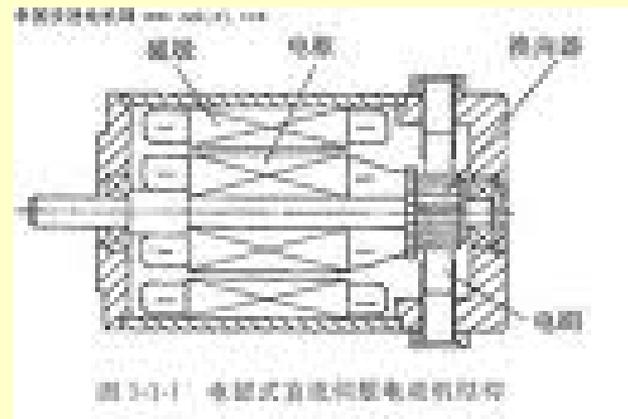
- 有限转角直流力矩电机

3. 直流微型电机/玩具电机



直流伺服电机

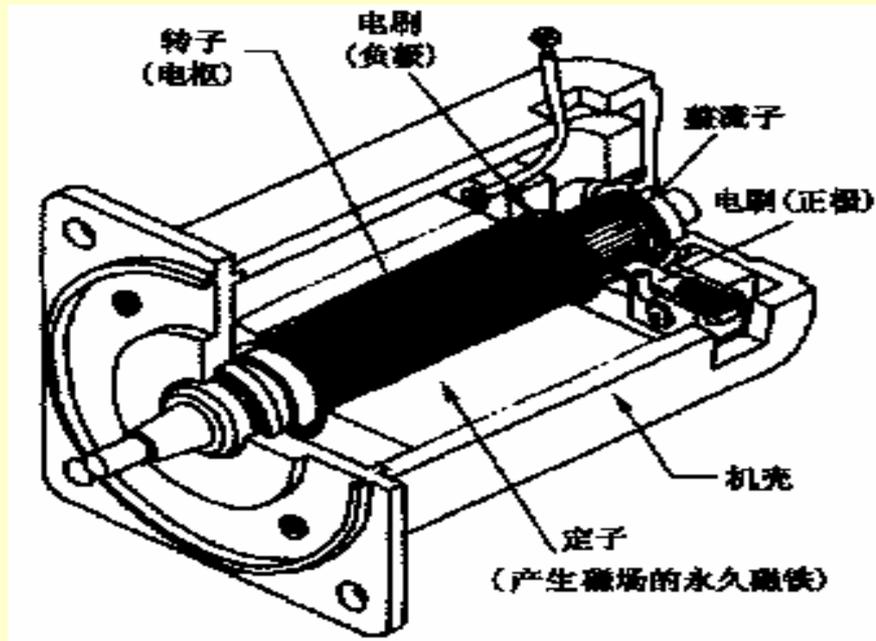
- 直流伺服电动机在原理上与普通的直流电动机并无区别，但是由于伺服电机工作特点的要求，在具体实现上结构有些区别。
- 普通电磁式直流伺服电动机
结构较复杂但控制方便，灵活，既可电枢控制，也可采用磁场控制。



直流伺服电机

- 永磁式直流伺服电动机

只能进行**电枢控制**，但是结构较简单，体积小、出力大、效率高。



直流伺服电机

直流伺服电机相对于普通直流电机的特点：

1. 惯量小、动作快反应快、过载能力大、调速范围宽；
2. 低速力矩大，波动小，运行平稳；
3. 低噪音，高效率；
4. 后端编码器反馈（选配）构成直流伺服；



直流伺服电机

直流伺服电机广泛应用于宽调速系统和精确位置控制系统中，其输出功率一般为1~几百瓦，也有达数千瓦。额定电压有6V、9V、12V、24V、27V、48V、110V、220V等；额定转速多在几百至几千r/min。





详细说明 General Specifications

绝缘等级 Insulation Class	B	130°C /F 155°C
运行温度 Operating Temperature Range	-5°C ~ +50°C	
相对温度/湿度 Environment Temperature/Humidit	20±2°C, 65%±5%RH	
防护等级 Protection	IP00	
安装方式 Installation	IMB14	
可选择配件 Choose Components	磁编码器	Magnetic encoder

电气性能 Electrical Specifications

电机型号 Model	额定电压 Rated Voltage (V)	空载转速 NoLoad speed (RPM)	空载电流 NoLoad Current (A)	额定转速 Rated Speed (RPM)	额定电流 Rated Curren (A)	额定转矩 Rated Torque (N.M)	额定功率 Rated Power (W)	机身长度 Length L (MM)
80ZY12-001	12	5200	1.8	4200	13	0.23	100	102
80ZY24-001	24	6000	1.5	5000	6.7	0.2	105	102
80ZY24-002	24	3600	1	2800	7.5	0.42	120	112
80ZY100-001	100	2400	0.2	1900	1.2	0.4	78	112
80ZY24-003	24	3000	1.3	2500	9.7	0.6	155	137
80ZY220-001	220	3700	0.1	3000	1	0.45	140	137

TN2P57 系列电机典型性能参数 (可按客户要求提供 OEM 定制其他参数)

符号		单位	型号			
			TN2P57-07D	TN2P57-09C	TN2P57-12E	TN2P57-16D
Ke	Back E.M.F	Volts/KRPM	6.0	5.6	12.1	12.0
Kt	Torque Constant	oz-in/Amp (mN.m/Amp)	8.1 (57.3)	7.6 (53.5)	16.4 (115.6)	16.2 (114.6)
Rt	Terminal Resistance	Ohms	1.00	0.62	1.75	1.30
L	Inductance	mH	1.1	0.76	2.46	2.03
Rth	Thermal Resistance	Deg C/Watt	4.9	4.4	3.8	2.9
Vt	Voltage Terminal	V dc	24	24	48	48
n _o	No load Speed @ Vt	RPM	4000	4286	3967	4000
I _o	No load Current @ Vt	Amp	0.55	0.60	0.28	0.32
T _c	Cont. Torque	oz-in (N.m)	21 (0.15)	30 (0.21)	45 (0.32)	65 (0.46)
n _c	Speed @ Vt & T _c	RPM	3558	3847	3569	3569
I _c	Current @ Vt & T _c	Amp	3.2	4.6	3.0	4.3
P _o	Power Out @ Vt & T _c	Watts	57	85	119	170
T _p	Peak Torque	oz-in (N.m)	42 (0.30)	59 (0.42)	91 (0.64)	129 (0.91)
n _p	Speed @ Vt & T _p	RPM	3117	3409	3172	3139
I _p	Current @ Vt & T _p	Amp	5.8	8.5	5.8	8.3

电机外形尺寸:



低惯量直流伺服电机

线绕盘式直流伺服电动机

电枢无铁心，没有磁饱和效应和齿槽效应，换向性能好，时间常数小，快速响应性能好。

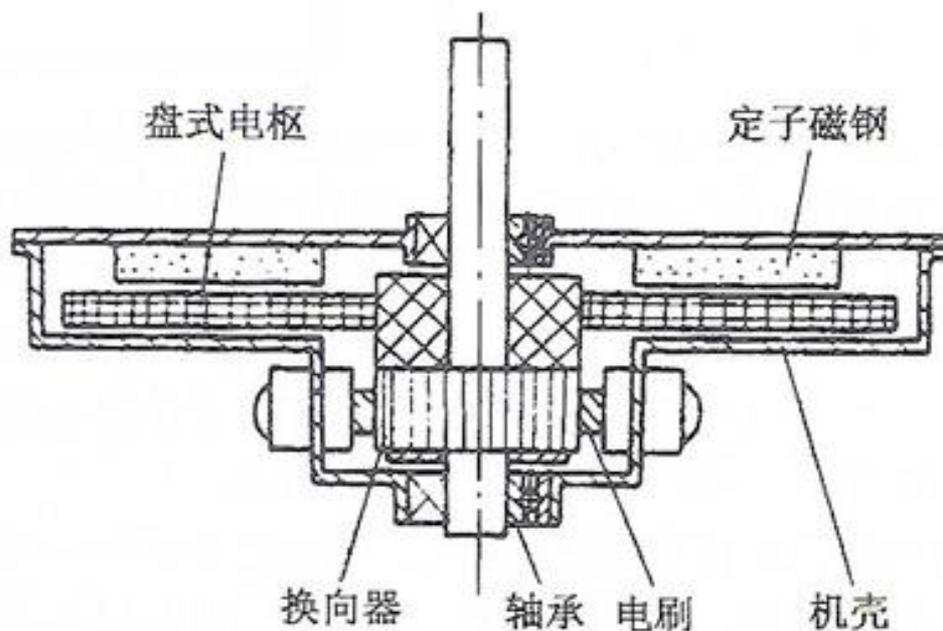


图 3-1-5 线绕盘式直流伺服电动机结构



低惯量直流伺服电机

印制绕组直流伺服电动机

电枢无铁心，没有磁饱和效应和齿槽效应，换向性能好，时间常数小，快速响应性能好

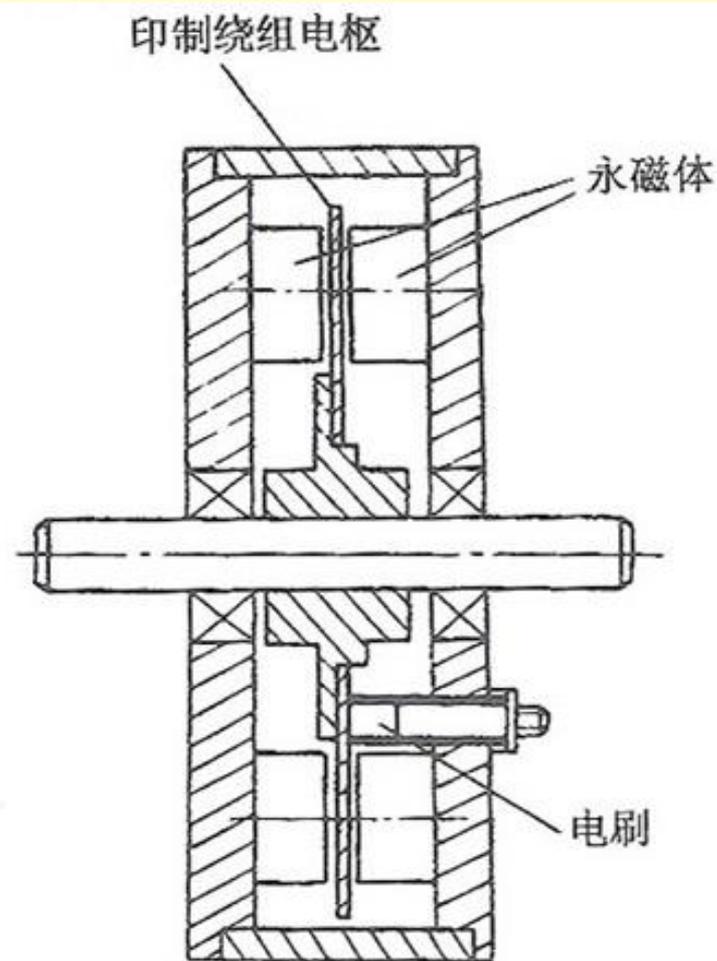


图 3-1-4 印制绕组直流伺服电动机结构



低惯量直流伺服电机

杯型电枢直流伺服电动机

转动惯量非常小，具有较高的加速能力，时间常数可小于1ms。

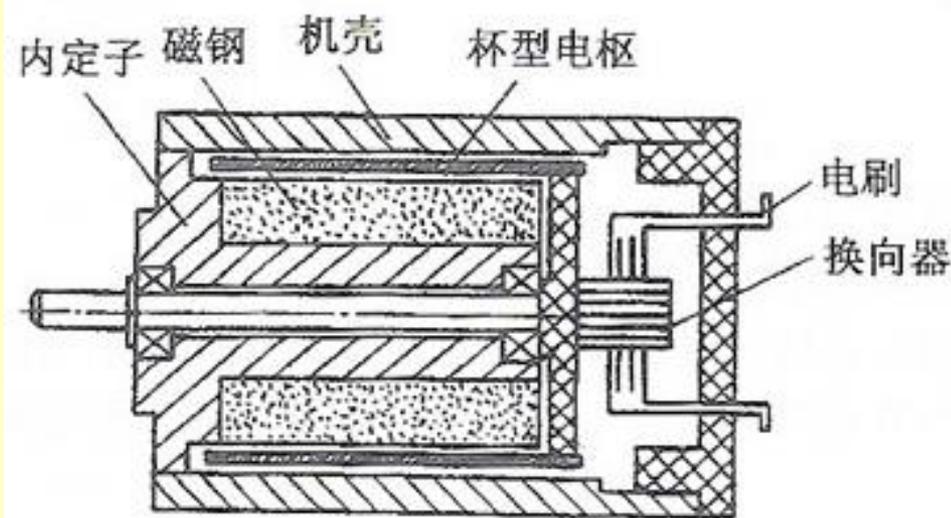
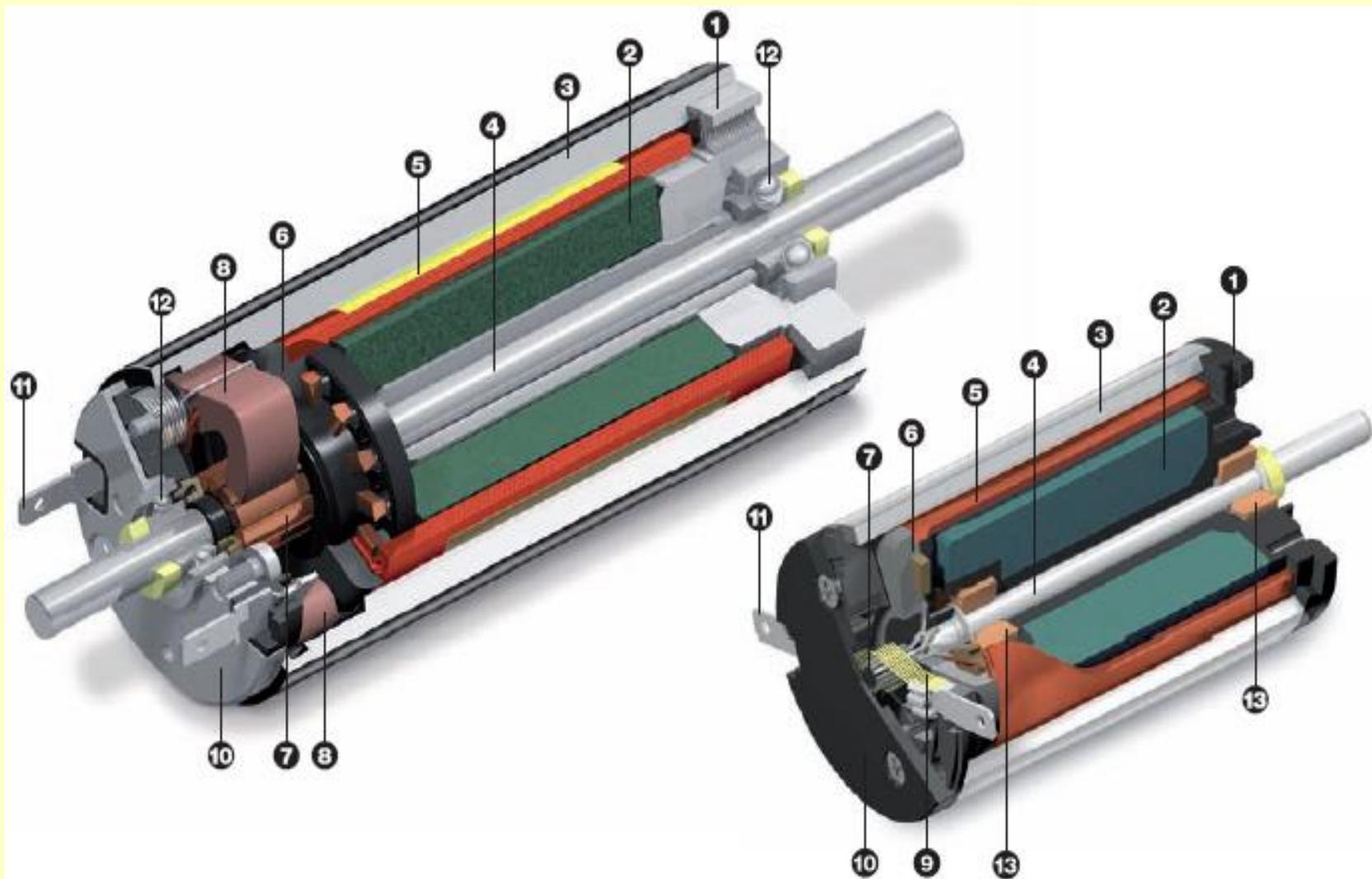


图3-1-6 空心杯型电枢直流伺服电动机结构



低惯量直流伺服电机



低惯量直流伺服电机



直流空心杯型伺服电动机

22SYK0601.U

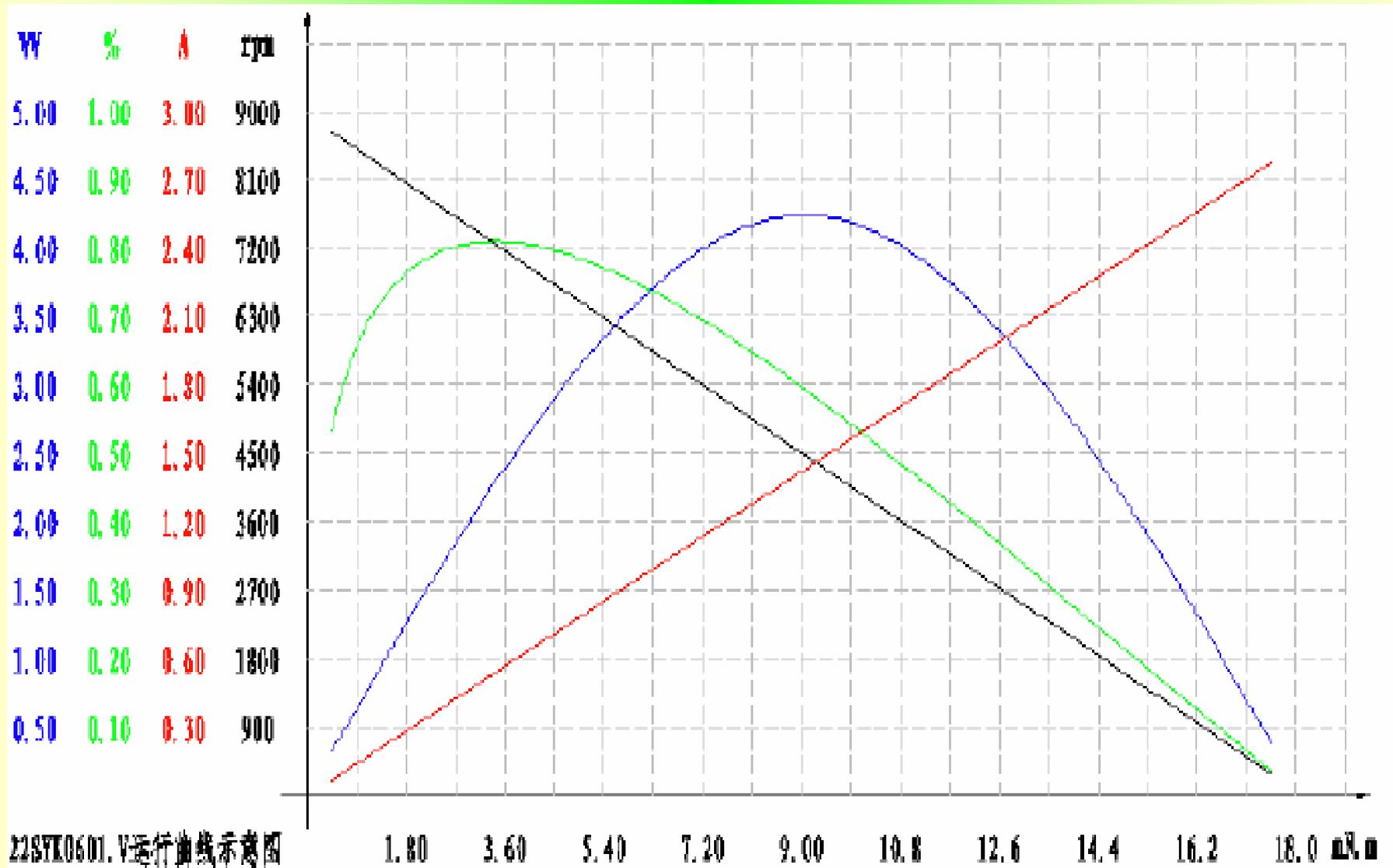
贵金属电刷

滑动轴承(可订制滚动轴承)

运行参数 (25 °C)	标称功率	W	1.0	最大输出功率	W	3.17	
	额定电压	V	3	最大效率	%	79	
	端电阻 ±10%	Ω	0.7	电机运行 区域上限	最大电流	mA	380
	空载转速 ±10%	rpm	8,080		最大转矩	mN. m	1.33
	空载电流 ±50%	mA	52		转速	rpm	7,363
	转速常数	rpm/V	2693		输出功率	W	1.02
	转矩常数	mN. m/A	3.5	转子最大温度	°C	+85	
	启动电流	mA	4285	环境温度	°C	-20~+65	
	堵转转矩	mN. m	15.01	重量	g	45	



低惯量直流伺服电机



低惯量直流伺服电机

中华人民共和国机械行业标准

JB/T 5867—1991

空心杯电枢永磁直流伺服电动机 通用技术条件

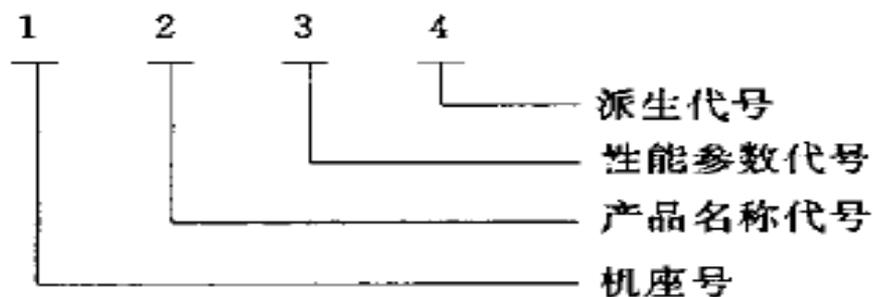


低惯量直流伺服电机

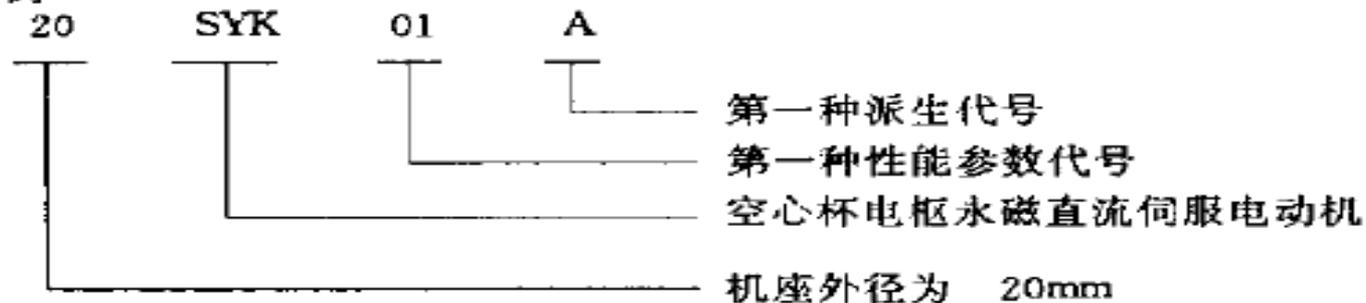
3 产品分类

3.1 电机型号

电机型号由下列部分组成



3.1.1 型号示例



3.1.2 机座号

机座号及其相应的机座外径如表 1 规定



宽调速直流伺服电机

宽调速直流伺服电动机

- 具有调速范围宽，在闭环控制中调速比可做到1：2000以上；
- 过载能力强，最大转矩可为额定转矩的5到10倍；
- 低速转矩大，可以与负载同轴连接。
- 这类电机使用在数控机床的进给伺服驱动、雷达天线驱动及其它伺服跟踪驱动系统中。



宽调速直流伺服电机

中华人民共和国机械行业标准

JB/T 5866—2004

代替 JB/T 5866—1991

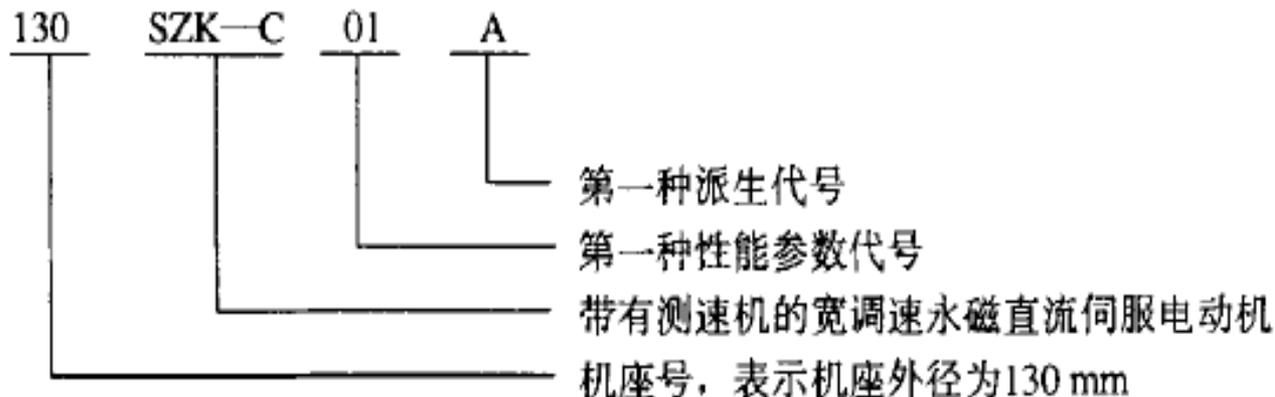
宽调速永磁直流伺服电动机通用技术条件

General specification for wide-regulating-speed permanent magnet DC
servo motor



宽调速直流伺服电机

4.1.2 型号示例



4.1.3 机座号

机座号由电动机的机壳（铁心段）外径（单位为mm）来表示。

4.1.4 产品名称代号

产品名称代号用大写汉语拼音字母SZK表示宽调速永磁直流伺服电动机，其含义是：S代表伺服电动机，Z代表直流，K代表宽调速。

对机组形式，产品名称代号用SZK—□表示，□用C代表测速机，X代表旋转变压器，M代表编码器，Z代表制动器。

当电动机装有两种以上元件时，在SZK—后所加代表各元件符号的排列顺序依次为C、X、M、Z。

4.1.5 性能参数代号

性能参数代号以两位阿拉伯数字01~99表示。

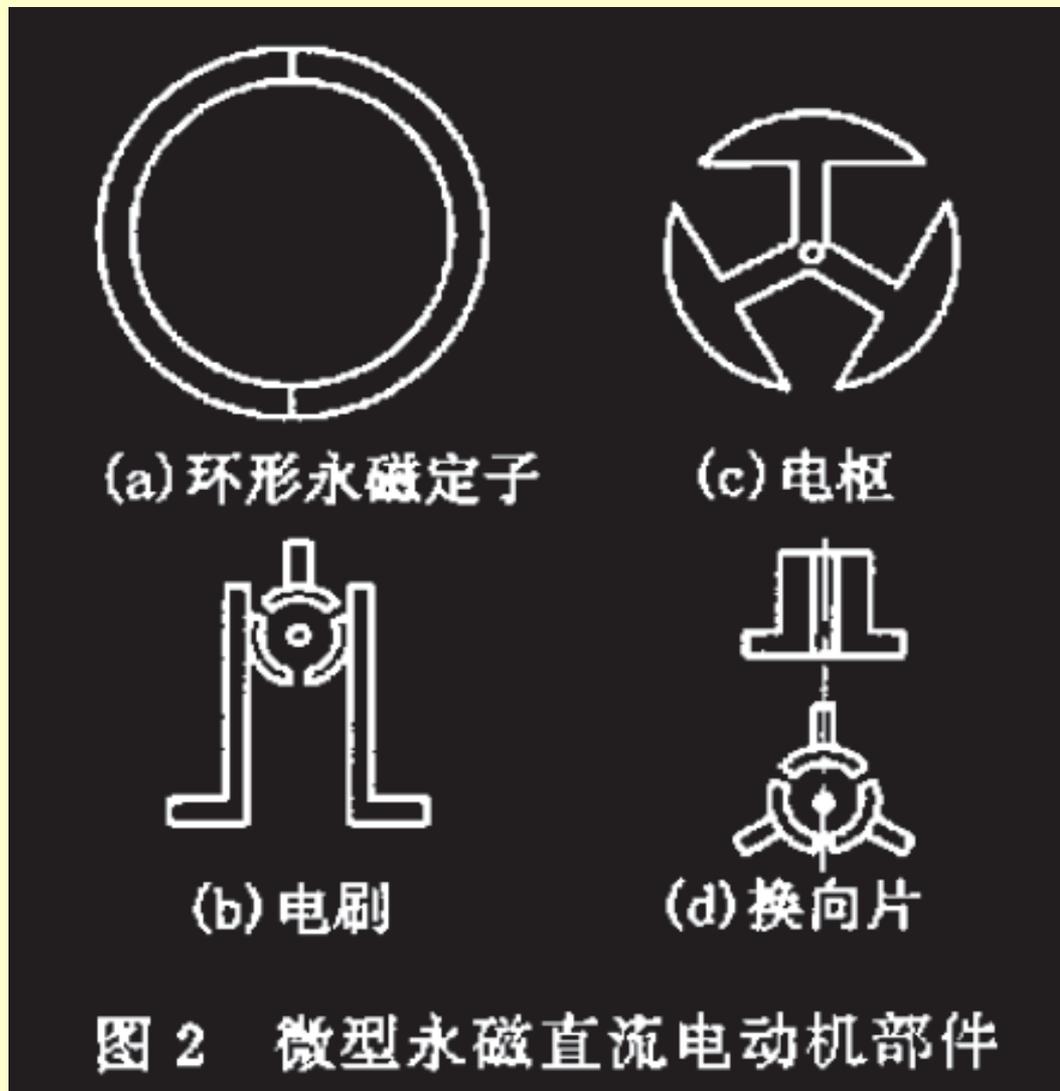


5	技术要求
5.1	使用环境条件
5.2	出线方式及出线标记
5.3	外观和装配质量
5.4	绝缘介电强度
5.5	绝缘电阻
5.6	旋转方向
5.7	正、反转速差率
5.8	空载起动电压
5.9	超速
5.10	反电动势系数
5.11	直流电阻
5.12	静摩擦转矩
5.13	额定电流
5.14	温升
5.15	换向火花
5.16	热时间常数
5.17	额定功率
5.18	电枢转动惯量
5.19	机械时间常数
5.20	电气时间常数
5.21	转矩波动系数
5.22	电流过载倍数
5.23	噪声
5.24	电磁骚扰（电磁干扰）
5.25	低温
5.26	高温
5.27	振动

6	试验方法
6.1	试验条件
6.2	外观和装配质量
6.3	绝缘介电强度
6.4	绝缘电阻
6.5	旋转方向
6.6	正、反转速差率
6.7	空载起动电压
6.8	超速
6.9	反电动势系数
6.10	直流电阻
6.11	静摩擦转矩
6.12	额定电流
6.13	温升
6.14	换向火花
6.15	热时间常数
6.16	额定功率
6.17	电枢转动惯量
6.18	机械时间常数
6.19	电气时间常数
6.20	转矩波动系数
6.21	电流过载倍数
6.22	噪声
6.23	电磁骚扰（电磁干扰）
6.24	低温
6.25	高温
6.26	振动
6.27	冲击
6.28	恒定湿热
6.29	寿命



永磁直流微电机



永磁直流微电机

WZY-131型玩具电动机的性能列表如下，供大家总装测试时作为参考。

电压		空载		负载				制动力矩 (克·厘米)
使用电压范围 (伏)	测试电压 (伏)	转速 (转/分)	电流 (安)	转速 (转/分)	电流 (安)	力矩 (克·厘米)	功率 (瓦)	
1.5-3.0	1.5	7600	0.27	5200	0.71	6.5	0.3	20.6
1.5-3.0	3.0	13800	0.34	9400	1.00	10	0.96	32.5



永磁直流微电机

微型永磁直流电动机技术性能指标

项目	录音机电动机	中档电动机	玩具电动机
额定电压/V	6~12	1.5~15	1.5~6
额定转矩/($\times 10^{-3}$ Nm)	0.8~1	0.8~3	0.8~2
额定转速/(r/min)	2 200~2 400	5 000~8 000	6 000~12 000
稳速精度/(%)	± 2		
噪 声/dB	40 以下	60 以下	70 以下
寿 命/h	1000 以上	60~200	30 以下
价 格/元	10 元左右	3 元左右	1 元左右
用途	具有稳速装置,用于收录机、微型收录机、单放机、照相机、激光唱机、电唱机、幻灯机等	电动剃须刀、电吹风、微型吸尘器、电动按摩器、充气机、切片机、电动牙刷、医疗器具等	各种电动玩具、航模



直流电机总结

要掌握：

- 1) **DCM**的基本方程；
- 2) **DCM**调速方法和调速特性；
- 3) 电机的选择

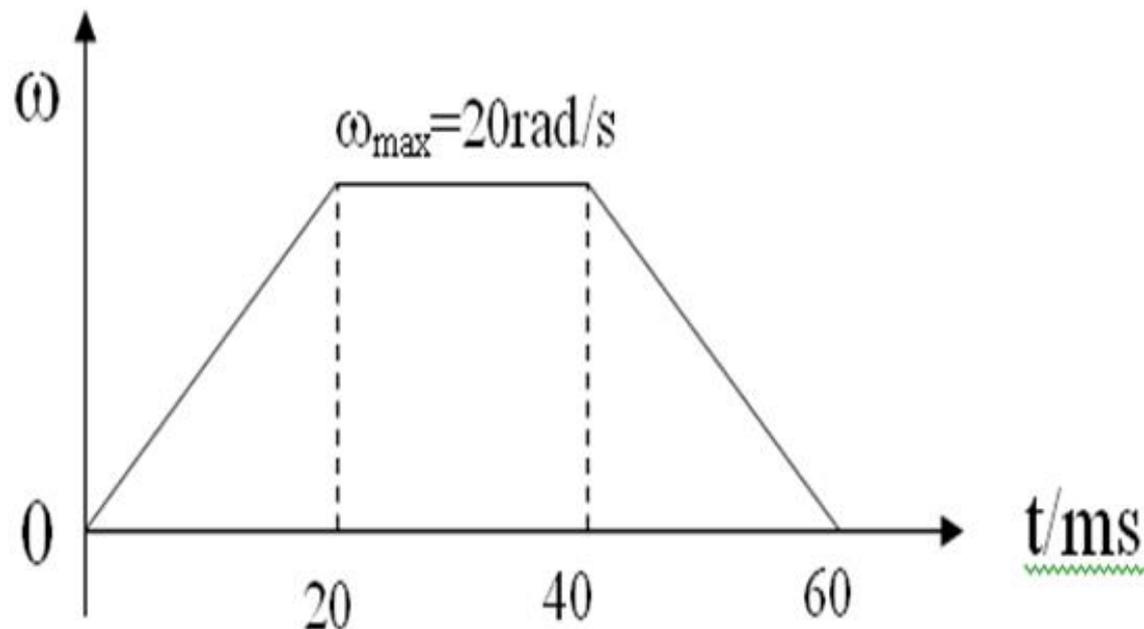
要了解：

- 1) 直流电机结构；
- 2) 直流电机的电枢反应和换向特点
- 3) 直流伺服电机及种类



部件选择考试例题

5.3 机床加工中，工件的运动采用伺服电机系统驱动，要求工件机动运动具备重复完成下图所示以 60ms 为周期的运动。



工件的转动惯量 $J_L = 2 \cdot 10^{-2} \text{ kgm}^2$ ，工件运动的摩擦力矩 $T_f = 4 \text{ Nm}$ ；确定采用10:1的减速器驱动方案，有多种直流伺服电机可供选择，这些电机的转动惯量都是 $J_M = 2 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$ ，额定转速都是 3000rpm；



部件选择考试例题

- 1) 不考虑减速器的转动惯量和效率，根据工件驱动需要，对驱动电机的最高转速、峰值力矩、额定转矩如何要求？（5分）
- 2) 在两种电机峰值转矩和额定转矩都满足驱动需求的前提下，如果
甲电机力矩系数 $K_t=0.4 \text{ Nm/A}$ ，电势系数 $K_e=0.4 \text{ V/rad/s}$ ，电枢电阻 $R=2 \Omega$ 。
乙电机力矩系数 $K_t=0.1 \text{ Nm/A}$ ，电势系数 $K_e=0.1 \text{ V/rad/s}$ ，电枢电阻 $R=0.5 \Omega$ 。
假设机床驱动供电电压为 110 V DC ，两种电机是否都能采用？从高效率运行的角度，你选择哪一种电机并说明原因（3分）
- 3) 为了实现工件驱动达到定位精度 0.2° 的要求，可以在电机侧安装光电码盘进行转角负反馈控制，减速器环节会产生 0.04° 以内的驱动传输误差，现在有 8 位、10 位、13 位的绝对式光电编码器可作为电机侧位置检测传感器，合理的选择应是哪



致 谢

本文档所引用的许多素材，来源于互联网上国内外的课件、科技论文、文章、网页等。本文引用只是为了给学生提供更好的教学素材，非商业目的。对这些所引用素材的原创者，在此表示深深的谢意。

