

电动机实用技术

〔日〕 野口昌介 著



机械工业出版社

电动机实用技术

〔日〕 野口昌介 著

邵富春 邵富群 刘怡忱 译



机械工业出版社

本书以生产现场实际应用电动机时所遇到的各种问题为主要内容。介绍异步电动机基本原理、机械特性、试验方法、绝缘温升与寿命，以及轴承、润滑、安装等。内容全面，叙述精简扼要。除讨论正常运行情况外，还涉及特性异常现象、过载运行原则和故障检查方法，以及噪声与消除等。对从事电动机使用、运行和维护方面的技术人员，很有参考价值。

新電気シリーズ
現場の電動機技術

野口昌介 著

オーム社

1980

第1版第5刷発行

* * *

电动机实用技术

〔日〕野口昌介 著

邵富春、邵富群、刘怡忱 译

*

责任编辑：张沪光

封面设计：刘代

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $8\frac{3}{8}$ · 字数 179 千字

1987年9月北京第一版·1987年9月北京第一次印刷

印数 00,001—17,100 · 定价：2.25元

*

统一书号：15033·6538

译 者 的 话

通常有关电动机方面的书籍，可分成两类。一类是介绍基本原理方面的书，除讲到工作原理外，还包括一部分选择方法，但基本上不包括安装、运行和维护方面的内容。另一类是电动机修理方面的书；它只讲电动机损坏后如何修理，其内容无非是修理工艺及某些计算方法。这类书并没有叙述电动机使用、运行和维护方面的知识。本书正好填补了前述两类书的空白。它从基本原理讲起，包括特性、试验方法、绝缘温升，以及轴承与寿命的估算方法；还介绍如何使用现代新型仪器，如X-Y记录仪、电磁示波器、存贮示波器和转速微分法等测量 $M-S$ 曲线的方法，从而可以直接观察异步电动机转速转矩特性。此外，本书还谈到怎样正确处理过负载运行和电动机容量与结构型式的选择。这些都是很有指导意义的知识。

在我国，由于生产上一直处于小规模状态，运行、维护方面的知识长期被忽视。实际上，现代化生产技术中，如果对复杂机器设备和工程系统，缺乏安装使用和维护方面知识，就无法指望能达到预期的生产指标。翻译出版本书的目的，为从事现场工作的工程技术人员提供系统知识；同时也告诉读者，从事运行、维护工作不能单纯依赖经验，还应该具备一定的理论基础。我们应该认识到，不只是培养从事研制或设计的技术人员是重要的，培养设备运行、维护技术人员同样也是现代生产系统所不可缺少的。对于这一点，本书能够起到一定作用。

IV

本书 1~11、40~51 为邵富群译；26~32 为刘怡忱译；其余部分由邵富春译，并增补常用符号表，改正原书中错误及附加译者注，整理全书等。

在本书翻译过程中，萧镜同志曾就译稿提出很多宝贵意见。特此致谢。

限于译者水平，书中难免有误，欢迎指正。

译 者

1985年12月

序 言

有关电动机通俗读物与专著方面的书已相当多。但对实际工作者来说，适合于中等水平的书还比较少。此外，与电动机有关的各种有用知识，很多地方也常常需要查阅。

为此，本书拟从初次使用电动机的人员出发，以生产现场骨干技术人员、实际运行维护人员所必需知道而又容易接受的知识为主要内容，不过分涉及专门学问。它以从事实际工作的人员为对象，并以在实际使用电动机时所遇到的现象和问题为重点予以解答。

本书译名为“电动机实用技术”，事实上是以异步电动机、更确切地说是以三相笼式电动机为主要内容的。

为使初次使用异步电动机的人也不致感到困难，专辟一定篇幅（从第1节至第19节），讲述基础知识。而实际使用中所必要的知识，放在第20节以后。如能逐节阅读，一定能获得实践中所必需的知识。

对于异步电动机的一般知识虽然也提到一些，但仅仅进行简单叙述。凡属实践中遇到的现象和基础知识等其他书中不太注意的地方，而在有关电动机专著中未曾谈到而又必要的知识，尽可能予以具体阐述。

为使所述的技术问题也能有益于电动机使用、制造方面的技术人员，对于与电动机有关领域的基础知识，也设置一定章节予以说明。

本书完稿时，感到还有很多不足之处，这应该归咎于著者，请读者指正。

Ⅵ

本书编写过程中曾参考多种文献，在此对文献作者表示感谢。另外，日本精工有限公司提供了宝贵的轴承照片、三菱电机有限公司名古屋制造厂土井主任、中津川制造厂鵜飼主任等，提供了很多资料和协助。本书编辑オーム出版社的飯島清一先生，为此书出版不辞劳苦、多方面帮忙。这里对所提到的有关各位，谨致衷心的感谢。

技术士（电气）野口昌介

昭和 51 年 2 月 11 日

常用符号表

A —— 轴承容许转速, 面积	H —— 传递功率
A_s —— 散热面积	H_m —— 摩擦产生的热量
B —— 磁密	H_s —— 散热系数
C —— 电容	I —— 电流
C_F —— 负载惯性率	I_0 —— 空载电流
$\cos \varphi$ —— 功率因数	I_1 —— 定子电流, 定子直流 制动电流
D —— 直径	I_2 —— 转子电流
dB —— 分贝	I_{2P} —— 转子正序电流
$E E_i$ —— 电压, 功能	I_{2N} —— 转子负序电流
E_0 —— 空载 (额定) 电压	I_{0N} —— 逆变器直流输出电流 平均值
E_s —— 堵转电压	I_Z —— 转动惯量
E_d —— 逆变器输入电压平均 值	I_s —— 起动电流
E_N —— 额定电压	I'_s —— 堵转电流
E_{20} —— 静止时转子电压	I_m —— 激磁电流
$ED\%$ —— 负载持续率	I_{sI} —— 额定电压时的堵转电 流
F —— 力	I_{dK} —— 截面惯性矩
F_i —— 力	i_d —— 逆变器输入电流平均 值
F_r —— (轴承) 径向载荷	i_r —— 转子电流
F_s —— (轴承) 轴向载荷	K —— 常数
f —— 频率	K_1 —— 从绕组到空气热传导
f_M —— 固有振动频率	K_2 —— 从铁心到空气热传导
f_n —— 基准频率	
f_z —— 力波频率	
GD^2 —— 飞轮效应	

X

K_{12} ——绕组与铁心间热传导	载荷
K_{w1} ——单相异步电动机绕组系数	P_a ——(轴承)动态等效轴向载荷
K_{w3} ——三相异步电动机绕组系数	PTC——正温度系数热敏半导体
k ——常数	P_m ——最大功率
L ——(轴承或绝缘材料)寿命	p ——极数
L_k ——宽度	Q ——热容量
L_x ——导线长度	Q_1 ——定子绕组总能量损耗
L_r ——转子电感	Q_2 ——转子总能量损耗
l ——线圈平均长度	q ——并联导线数
M ——质量, 力波模式	R, r ——电阻
M_h ——互感	R_i ——定子绕组绝缘电阻
M_w ——弯矩	r_m ——激磁电路电阻
M_{we} ——等效弯矩	$r/\min$ ——每分钟转数
m ——相数, 每相串联线圈数	r_1, R_1 ——定子电阻
n, N ——转速	r_2, R_2 ——转子电阻
n_s, N_s ——同步转速	S ——导线截面
n_k ——危险转速	S_1 ——单相异步电动机表观功率
n_N ——额定转速	S_3 ——三相异步电动机表观功率
P ——功率	SCR——可控硅整流元件
P_0 ——机械输出功率	s ——转差率
P_1 ——输入功率	T ——转矩
P_2 ——转子输入功率	T_1 ——正序转矩
P_L ——作用力	T_2 ——逆序转矩
P_N ——额定功率	T_{1L} ——皮带张紧侧拉力
P_r ——(轴承)动态等效径向	T_{2L} ——皮带从动边拉力

T_m ——最大转矩	X_s ——堵转感抗
T_s ——起动转矩	x_1 ——定子感抗
T_P ——正序转矩	x_2 ——转子感抗
T_N ——扭矩, 逆序转矩	X_Z ——(轴承)径向系数
T_{Ne} ——等效扭矩	Y_Z ——(轴承)轴向系数
T_a ——电动机加速转矩	Z ——阻抗
T_s ——频繁起动每个循环时间	Z_1 ——定子槽数
T_s ——皮带有效张力	Z_2 ——转子槽数
T_{se} ——等效周期	Z_N ——绝对粘度
t ——时间	Z_P ——等效阻抗
$\text{tg } \delta$ ——介质损耗因数	Z_Q ——每小时起动次数
V ——电压, 滑动速度	α ——常数
V_0 ——零序电压	α_i ——加速度
V_{0N} ——逆变器直流输出电压平均值	γ ——密度
V_1 ——正序电压	γ_n ——逆变器控制角
V_2 ——逆序电压	δ ——位移
V_s ——旋转系数	$\Delta\theta$ ——温度差
v ——速度	ε ——电压变动率, 自然对数的底
W ——重量, 损耗	ε_m ——质量偏心距
W_0 ——空载损耗	η ——效率
W_1 ——定子输入功率	θ ——温升, 温度
W_2 ——转子输入功率	θ_c ——绕组温升
W_c ——铜损	θ_i ——铁心温升
W_i ——铁损	θ_e ——环境温度
W_s ——堵转功率	θ_F ——最高温升, 稳定温升
W_z ——载荷	λ ——相对于圆周的波长数
X ——感抗	A ——材料常数
	ν ——同步转速比

X

ρ —— 电阻率	τ_L —— 外缘扭应力
σ —— 应力	τ_{max} —— 最大剪应力
σ_b —— 弯曲应力	ϕ —— 磁通
σ_{max} —— 最大主应力	ϕ_d —— 直流电机磁通
τ —— 极距, 绝对温度, 发热时间常数	ω —— 角速度, 角频率
	ω_0 —— 同步角速度

目 录

常用符号表

1. 异步电动机为什么旋转	7
2. 怎样形成旋转磁场	2
3. 异步电动机基本结构和各部分的功能	6
4. 三相异步电动机的等效电路和特性计算	10
5. 根据圆图求特性	17
6. 单相异步电动机的等效电路和特性	24
7. 三相异步电动机转矩转速特性与用途	28
8. 三相异步电动机是如何起动的	31
9. 单相异步电动机是如何起动的	37
10. 单相异步电动机转矩转速特性和用途	39
11. GD^2 与起动时间和转子能量的关系	42
12. 怎样进行速度控制 I —— 变电压-转差控制	48
13. 怎样进行速度控制 II —— 变极控制	54
14. 怎样进行速度控制 III —— 变频控制	57
15. 绕线型异步电动机采用电磁滑差离合器的速度控制	61
16. 制动方法、制动方式与制动器的选择	67
17. 怎样进行制动 I —— 电制动	70
18. 怎样进行制动 II —— 机械制动	74
19. 怎样进行制动 III —— 电磁滑差离合器、磁滞离合器	77
20. 电动机的选择	79
21. 典型负载与所需转矩	83
22. 怎样计算变负载功率	90
23. 过负载运行的极限	92
24. 电压频率变化会造成怎样后果	96

25. 不平衡电压运行会造成什么影响	102
26. 频繁起动有什么影响	105
27. 周围环境(高温、高湿、振动、散热不良等)的影响	110
28. 转矩异常现象 I——爬行现象	114
29. 转矩异常现象 II——转子电路不平衡及吉尔吉斯现象	118
30. 转矩异常现象 III——杂散转矩	122
31. 气隙不匀造成的影响	125
32. 残余电压、自激现象和轴电流是怎么回事	128
33. 怎样进行绕组试验	132
34. 怎样进行电动机试验	138
35. 怎样进行实际负载试验	141
36. 怎样测量转速转矩特性	145
37. 怎样进行温度试验	150
38. 轴受力过大的后果	158
39. 滚动轴承的各种问题	166
40. 滑动轴承的各种问题	179
41. 容许温升限度	184
42. 绝缘材料是怎样老化的	187
43. 怎样诊断绝缘的好坏	194
44. 旋转体不平衡与振动	199
45. 异步电动机的噪声问题	209
46. 所需电源容量的大小	220
47. 怎样保护电动机	225
48. 搬运和安装的注意事项	239
49. 怎样运行和维护	243
50. 异步电动机故障诊断与对策	246
51. 异步电动机公式	251
参考文献	253

1. 异步电动机为什么旋转

把通有电流的导体放置在磁场中，则作用在导体上的电磁力

$$F = BIl$$

式中 F ——力 (N)⊖；

B ——磁通密度 (Wb/m²)；

I ——电流 (A)；

l ——导体长度 (m)。

该式表达了电动机的基本原理。图 1.1 表示产生力的原理图。

为了产生电磁力，必须同时存在电流和磁通。

在磁场中的带电流导体之所以产生力，是由于磁通就像拉紧的橡皮筋一样具有弹性，并力求通过最短距离。这种情况可用图 1.2 说明。它表示带电流导体周围由于磁通⊗疏密不匀而产生力。

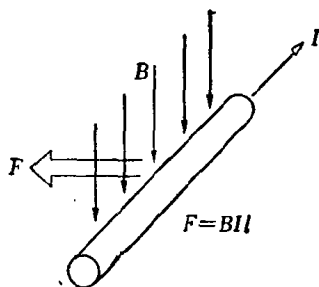


图1.1 力的产生

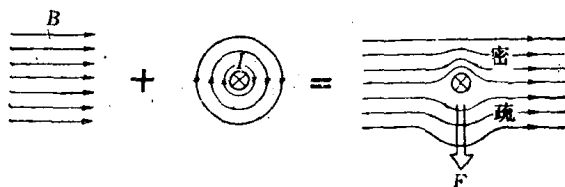


图1.2 力的产生

⊖ 原文有误为 (N/m)——审校注。

⊗ 原书此处为磁场。但磁场是整体概念，改用磁通更好些——译者注。

图 1.3 所示为用左手定则确定力的方向，电流、磁通和力三者互相垂直。

异步电动机的原理，可用感应圆盘来说明，如图 1.4 所示。用铜或铝制成的圆盘，它的旋转轴由轴承支撑。将圆盘的边缘放置在马蹄形永久磁铁的磁极之间。当永久磁铁沿箭头方向快速运动时，圆盘产生涡流。由于磁通与涡流相互作用，使圆盘沿相同方向旋转；并且圆盘的速度低于永久磁铁的速度。

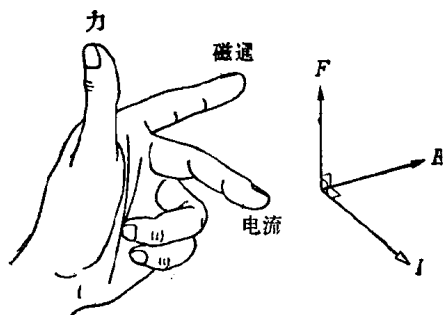


图 1.3 左手定则

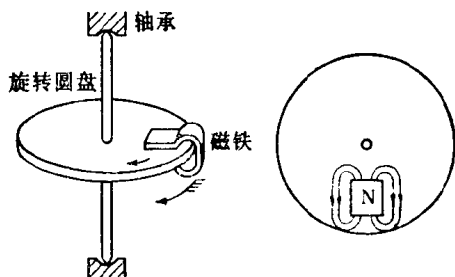


图 1.4 感应圆盘

上述情况表明，放置在移动磁场中的导体，在它的内部产生感应电势和电流。电流与磁通相互作用产生旋转力或转矩，从而使旋转机构转动。

2. 怎样形成旋转磁场^[1]

正如前面原理所阐明的那样，异步电动机必需依靠交流电流形成以一定速度旋转的磁场。

三相交流电和旋转磁场 如图 2.1 所示, 在三个互相差 $2\pi/3$ 电角度的线圈中通入三相电流, 就形成在空间以一定方向和一定速度旋转的旋转磁场。

在图 2.1 所示线圈中形成图 2.2 所示的磁通分布。P 点的磁通

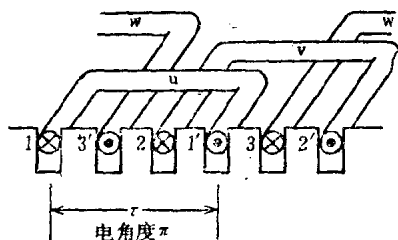


图 2.1 三相线圈

$$\begin{aligned}\phi &= \phi_1 \sin \pi x / \tau \\ &\quad + \phi_2 \sin (\pi x / \tau - 2\pi / 3) + \phi_3 \sin (\pi x / \tau - 4\pi / 3)\end{aligned}$$

式中 τ —— 极距;

x —— P 点距 u 相线圈 1 的距离。

其中, $\phi_1 = \phi_m \sin \omega t$, $\phi_2 = \phi_m \sin (\omega t - 2\pi / 3)$, $\phi_3 = \phi_m \sin (\omega t - 4\pi / 3)$ 。因而

$$\begin{aligned}\phi &= \phi_m \left\{ \sin \omega t \sin \frac{\pi x}{\tau} + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \sin \left(\frac{\pi x}{\tau} - \frac{2\pi}{3} \right) \right. \\ &\quad \left. + \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \sin \left(\frac{\pi x}{\tau} - \frac{4\pi}{3} \right) \right\}\end{aligned}$$

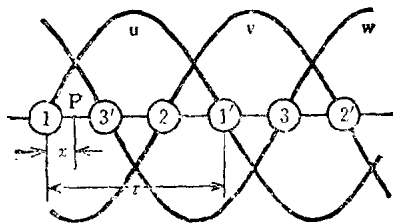


图 2.2 三相线圈的磁通分布

$$\begin{aligned}
 &= \frac{3}{2} \phi_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau} \right) \\
 &= \frac{3}{2} \phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau} + \frac{\pi}{2} \right)
 \end{aligned}$$

当 $\omega t - \frac{\pi x}{\tau} = 0$ 和 $\frac{dx}{dt} = v = \frac{\omega \tau}{\pi}$ 时, $\phi = \frac{3}{2} \phi_m \sin \frac{\pi}{2}$ 。

这就表明, 合成磁通分布曲线是空间正弦波, 最大值为

$\frac{3}{2} \phi_m$ 、速度为 $\frac{\omega \tau}{\pi}$ 、沿正相序方向旋转。旋转速度

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{\omega \tau}{\pi} = \frac{(2\pi f) \tau}{\pi} = 2f\tau = 2f \left(\frac{2\pi r}{p} \right) \\
 &= \frac{2f}{p} (2\pi r)
 \end{aligned}$$

式中 f —— 频率(Hz);

ω —— 角频率;

p —— 极数;

r —— 半径。

因此, 旋转磁场的同步转速用下式表示

$$n_s = \frac{2f}{p} \times 60 = \frac{120f}{p} \quad (\text{r/min})$$

旋转磁场穿过转子, 在转子导体内感应出电压, 并使导体内有电流。旋转磁场的磁通与转子电流互相作用产生电磁转矩。转子受转矩作用而旋转。从产生转矩的原因可知, 转子内必须有电流。因此, 转子旋转的必要条件是, 转子导体内有感应电压, 转子转速低于旋转磁场转速, 转子导体必须与旋转磁场交链, 转子导体内有电流。换句话说, 转子的转速要比旋转磁场稍低一点, 以便产生感应作用, 并保持其继续旋转。