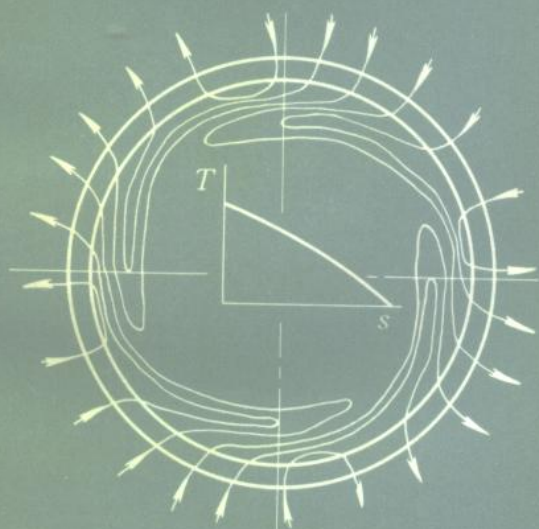


唐孝镐 宁玉泉 傅丰礼 著

实心转子异步电机及其应用



机械工业出版社

实心转子异步电机及其应用

唐孝镐

宁玉泉 著

傅丰礼



机械工业出版社

本书是根据作者近几年来在实心转子异步电机理论及其应用研究的基础上撰写而成的，书中反映了著者的最新研究成果。本书以解析法和有限元法对实心转子异步电机中电磁场的二维和三维分析为理论基础，论述了转子结构优化、参数计算、运行特性、设计计算以及作螺旋运动等几种特殊类型的实心转子电机，并阐明了作为力矩电机、调压调速电机和高速异步发电机等诸方面的应用前景。

为了便于读者开发应用这类电机，本书除了完整地给出了三相和单相实心转子异步电动机电磁计算程序外，并给出了作者研制的驱动电动螺旋压力机的实心转子三相异步电动机的电磁计算实例。

本书可作为高等学校电机专业学生和研究生参考书，也可供有关电机厂和科研单位的技术人员参考。

实心转子异步电机及其应用



责任编辑：熊天荣 版式设计：冉晓华
封面设计：方 芬 责任校对：熊天荣
责任印制：王国光

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（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 $11 \frac{3}{8}$ · 字数 250 千字
1991 年 3 月北京第一版 · 1991 年 3 月北京第一次印刷
印数 0,001—2,570 · 定价：7.30 元

★

ISBN 7-111-02369-2/TM·313

前 言

本书是在近年来华中理工大学(原华中工学院)电机教研室有关教研组的工作基础上编写的。研究工作曾得到国家教委博士基金会的资助。

实心转子异步电机早在1896年就有人提出过。20年代苏联的一些学者进行过有益的理论探讨,但由于它的效率和功率因数较低,故用途有限。可是,它具有的某些特点,使其在某些领域十分有用。例如:(1)结构简单,转子的机械可靠性高,特别适宜于高速甚至超高速运行;(2)起动性能好,起动转矩大而且起动电流小,特别适宜于重载起动,或在恶劣起动条件下如在馈线路长以致压降大,单独供电系统中发电机功率与电动机功率接近等情况下起动;(3)机械特性“软”且具有一定的线性度;(4)转子热稳定性好,可以较长时间处于制动运行状态,特别适宜于作为力矩电机或用作挖掘机的动力等;(5)运行时振动和磁噪声较低;(6)适宜于采用定子调压调速的场合,调速范围宽,转子散热条件好,低速运行时定子绕组铜耗较小等等。此外,它还适宜于频繁正、反转,特别是反复短时工作状态(S_3 、 S_4) (因其惯性常数高)以及制造时比较容易校平衡等。

近年来,出现了长输电线末端轻载时因容性无功过剩的电压高的问题。分析表明,采用实心转子异步电动机作为发电机运行,在这种系统中,可吸收一部分相应的容性无功功率,并同时发出有功功率,所以既经济又可靠。在风力发电

装置以及专门向整流负载供电的系统中,采用这种发电机的可能性较大。

这些特定的已经存在的或可能开发的用途,以及转子三维涡流磁场计算研究的巨大吸引力,使各国学者近年来又进行了不少的探究工作,发表了许多有价值的论文和专著。

本书所述的电磁场计算分析、电机运行理论以及有关设计方面的工作是在前人工作的基础上进行的。例如:Chalmers 氏在1984年1月号的英国电工学报(PIEE, Vol. 133, Pt. B, P15)上发表的题为《实心转子异步电机的分析》一文中,提及曾被大量采用的转子阻抗角为 26.6° ,数值可能偏小,其它方面又提出许多不同数值(基于不同理论或方法),很不统一。其次,众所周知的 Gibbs 氏推荐的端部效应计算表达式虽很简明,但我们认为不甚合理,因为它没有计及饱和、转子材料性质以及转差率的影响。因此,我们以解析法和有限元法对实心转子异步电机中电磁场的二维和三维分析为理论基础,进行了较深入的研究,修正了上述数值和计算表达式,这些,已被实验证明是比较合理的。此外,有些出版较早的书籍又未涉及目前广泛应用的电磁场数值计算的内容,也没有一本书系统地叙述设计计算用的公式或程序等等。为此,我们不揣浅陋,写成此书,以期满足有兴趣的读者,特别是从事设计、研究工作者的需要。

本书共分为九章,第一章一~六、第二章由傅丰礼同志所写;第一章七、第三章和第五章以及第六章除三外,由宁玉泉同志所写,其余由唐孝镐同志所写。

本书在编写过程中得到教研室同仁的大力支持,特别是承华中理工大学电力系林金铭教授仔细阅审原稿,提出了许多宝贵意见并进行了具体的修改,谨此致谢!

作者学识有限，难免失误，而许多论述只能说是代表我们的一种观点，对此，甚盼广大读者和同行不吝批评指正。

作者

1989.10

目 录

第一章 光滑实心转子异步电动机的电磁场研究和参数计算	1
一、概述	1
二、用二维解析法计算光滑实心转子的参数与饱和效应修正系数	3
三、用二维有限元法计算光滑实心转子的参数与涡流效应修正系数	14
四、磁滞效应修正系数	22
五、用三维解析法计算光滑实心转子的参数与端部系数	26
六、用三维矢量磁位有限元法计算实心转子异步电动机的磁场分布	51
七、实心转子异步电动机在小转差运行时的磁场和参数	75
参考文献	90
第二章 开槽和带端环的实心转子异步电动机电磁场研究和参数计算	94
一、概述	94
二、用有限元法计算开槽实心转子的磁场分布	96
三、用等效磁路法计算开槽实心转子的参数	100
四、用解析法计算开槽实心转子的参数	108
五、带端环实心转子电磁场的三维分析	115
六、带端环实心转子的计算实例和分析	119
七、各种结构实心转子异步电动机性能的比较	126
八、小结	131
参考文献	132

第三章 螺旋运动实心转子异步电动机及其磁场分析	134
一、概述	134
二、螺旋运动实心转子异步电动机的电磁场分析	139
参考文献	150
第四章 利用多层理论对光滑实心转子异步电机的 分析研究	151
一、概述	151
二、利用多层理论对光滑实心转子异步电机电磁场的 二维分析和参数计算	152
三、利用多层理论对光滑实心转子异步电机电磁场的 三维分析和参数计算	162
参考文献	174
第五章 实心转子异步电机的原理与运行特性	175
一、实心转子异步电机的等效电路	175
二、实心转子异步电机的向量图以及准确与 简化等效电路图	179
三、实心转子异步电机的工作特性	183
参考文献	191
第六章 实心转子异步电机的性能改进	192
一、概述	192
二、实心转子异步电机容量及特性关系	193
三、实心转子三相异步电机的转子附加损耗	197
四、改进实心转子异步电机运行性能的措施	204
五、双层转子异步电机	214
参考文献	226
第七章 实心转子三相异步电动机的设计计算	228
一、概述	228
二、电机的主要尺寸及定子设计问题	229
三、转子参数与工作特性计算——单位磁阻抗法	232

四、转子参数与工作特性计算——透入深度法	242
五、光滑实心转子三相异步电动机电磁计算程序	258
六、驱动1000kN 电动螺旋压力机的实心转子三相异步 电动机的电磁计算	272
参考文献	296
第八章 实心转子单相异步电动机	297
一、概述	297
二、电容运转实心转子单相异步电动机的运行分析	298
三、电容运转实心转子单相异步电动机的等效电路和 运行性能计算	306
四、机械特性的调整——有效匝比 a 及外接电容 C 或 容抗 x_c 的选择问题	316
五、电容运转实心转子单相异步电动机电磁计算程序	319
参考文献	342
第九章 实心转子异步电机的应用	343
一、实心转子交流力矩电动机	343
二、螺旋运动实心转子异步电动机	346
三、调压调速实心转子异步电动机	349
四、实心转子异步发电机	352
参考文献	356

第一章 光滑实心转子异步电动机的 电磁场研究和参数计算

一、概 述

实心转子异步电动机具有结构简单、运行可靠、起动和调速性能好等优点，所以近年来得到了日益广泛的应用。然而，由于转子三维涡流场的复杂性，尽管近年来已获得不少有价值的成果，但仍有许多问题有待进一步探索。例如，单就涡流现象而言，在转子横截面中存在着横轴电枢反应，在转子纵截面中有径向去磁效应（使径向磁密沿轴向分布成为马鞍形），在转子表面两端又有由切向电流产生的端部效应。作者在研究工作中分离并保留了问题的主要关系，通过电磁场计算分别讨论了饱和效应、涡流效应、磁滞效应、端部效应的性质，并提出了相应的计算用修正系数，这样就使我们得以利用等效电路极为方便地考虑实心转子中复杂的三维非线性电磁过程。

根据电磁场理论，对于平面电磁波，理想的半无限大导体在单位长度、单位宽度内的阻抗可按式计算^[1-2]：

$$r + jx = (1 + j) \cdot \frac{1}{\sigma \delta} \quad (1-1)$$

式中 r ——理想半无限大导体在单位长度、单位宽度内的等效电阻；

x ——理想半无限大导体在单位长度、单位宽度内的

等效电抗;

σ ——导体的电导率;

Δ ——透入深度, 指磁密(磁通密度)或电密(电流密度)从导体表面处的数值衰减到其 36.9% (即衰减到表面值的 e^{-1}) 时的深度。

透入深度可按众所周知的下式计算:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_r \mu_0 \sigma}} \quad (1-2)$$

式中 ω ——磁密随时间变化的角频率;

μ_r ——导体的相对磁导率;

μ_0 ——空气的磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

透入深度的另一含义是在单位宽度、无限大深度的区间内依指数衰减流过导体的总电流 I_n 可以等效为在单位宽度、深度为 Δ 的薄层内均匀分布的电流。这时

$$I_n = \frac{J_0 \Delta}{\sqrt{2}} \quad (1-3)$$

式中 J_0 ——导体表面处的电流密度。

在实心转子异步电动机中, 考虑饱和效应、涡流效应、磁滞效应、端部效应的作用后, 在式(1-1)的基础上可得到折算至定子侧的转子阻抗

$$r'_2 = \frac{4m_1(K_{d\phi 1}W_1)^2}{s} \frac{L_2}{\pi D_2 \Delta \sigma_2} K_{rs} K_{rc} K_{rh} K_e \quad (1-4)$$

$$x'_2 = \frac{4m_1(K_{d\phi 1}W_1)^2}{s} \frac{L_2}{\pi D_2 \Delta \sigma_2} K_{xs} K_{xc} K_{xh} K_e \quad (1-5)$$

转子阻抗角

$$\varphi_2 = \text{tg}^{-1} \frac{x'_2}{r'_2} \quad (1-6)$$

式中 m_1 ——定子绕组相数;

W_1 ——定子绕组每相串联匝数；

K_{dp1} ——定子绕组的基波绕组系数；

s ——转差率；

L_2 ——转子铁心长度；

D_2 ——转子铁心外径；

σ_2 ——转子材料的电导率；

K_{r1}, K_{x1} ——考虑饱和效应的电阻修正系数和电抗修正系数；

K_{r2}, K_{x2} ——考虑涡流效应的电阻修正系数和电抗修正系数；

K_{rh}, K_{xh} ——考虑磁滞效应的电阻修正系数和电抗修正系数；

K_e ——转子端部系数。

下面逐一讨论这些修正系数的计算方法，同时也阐明如何用不同的方法来计算转子参数。

二、用二维解析法计算光滑实心转子的参数与饱和效应修正系数

1. 线性求解

电机的二维模型如图 1-1 所示，考虑定、转子电流具有不同的角频率，在定子和转子上分别建立坐标系统。电磁场方程从定子侧进行求解，并采用下列假设：

- (1) 定、转子展开为半空间的平面铁磁体；
- (2) 定子绕组电流在定子和气隙交界面处用正弦分布的面电流来表示；
- (3) 定子铁心的磁导率 $\mu_1 = \infty$ ，电导率 $\sigma_1 = 0$ ；
- (4) 不考虑转子铁心的饱和与磁滞效应，转子铁心的

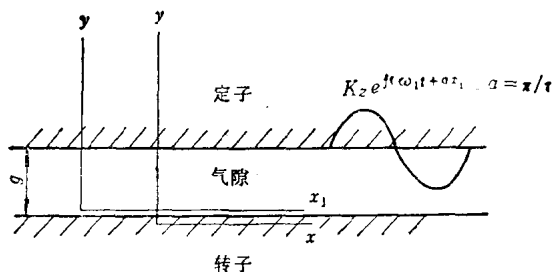


图1-1 电机二维模型示意图

$\mu_2 = \text{const}$, 电导率 $\sigma_2 = \text{const}$;

(5) 电机在轴向认为无限长, 涡流的端部效应用端部系数来考虑;

(6) 所有场量均随时间呈正弦变化。

根据麦克斯韦电磁场理论, 在气隙和转子中的电磁场方程分别为:

在气隙中

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_g}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_g}{\partial y^2} = 0 \quad (1-7)$$

在转子中

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_2}{\partial y^2} = j s \omega_1 \mu_2 \sigma_2 \dot{A}_2 \quad (1-8)$$

式中 $\dot{A}_g$ 、 $\dot{A}_2$ ——分别为气隙和转子中的矢量磁位;

ω_1 ——定子绕组电流角频率。

令气隙中的矢量磁位 $\dot{A}_g = C_g e^{j(\omega_1 t + \alpha x_1)}$, 其中 $\alpha = \pi/\tau$, τ 为转子极距, 则

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_g}{\partial x_1^2} = -\alpha^2 \dot{A}_g$$

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_s}{\partial y^2} = -\frac{\partial^2 \dot{A}_s}{\partial x_1^2} = a^2 \dot{A}_s$$

于是可求得

$$\dot{A}_s = C_s (\cosh ay + D_s \sinh ay) e^{j(\omega_1 t + ax_1)} \quad (1-9)$$

同样设转子中的矢量磁位 $\dot{A}_2 = C_2 e^{j(\omega_2 t + cx)}$, 则

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_2}{\partial y^2} = (a^2 + js\omega_1 \mu_2 \sigma_2) \dot{A}_2 = \xi^2 \dot{A}_2$$

考虑到 $y = -\infty$ 时 $\dot{A}_2$ 必须为零, 得

$$\dot{A}_2 = C_2 e^{\xi y} e^{j(\omega_2 t + cx)} \quad (1-10)$$

式中 $\xi = \sqrt{a^2 + js\omega_1 \mu_2 \sigma_2}$

为了求出常数 C_s 、 D_s 、 C_2 , 须利用下列边界条件:

(1) 在转子表面的矢量磁位必须连续, 即

$$\dot{A}_s|_{y=0} = \dot{A}_2|_{y=0}$$

考虑到 $\omega_1 t + ax_1 = s\omega_1 t + cx$, 由式(1-9)和(1-10)得

$$C_s = C_2$$

(2) 在转子表面的磁场强度切向分量必须相等, 即

$$\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \dot{A}_s}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial \dot{A}_2}{\partial y} \Big|_{y=0}$$

设相对磁导率 $\mu = \mu_2/\mu_0$, 于是求得

$$D_s = \frac{\xi}{\mu a}$$

(3) 在定子表面的磁场强度切向分量之差应等于定子面电流密度, 因定子铁心磁导率 $\mu_1 = \infty$, 故

$$\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \dot{A}_s}{\partial y} \Big|_{y=s} = \dot{K}_{s2}$$

式中 $\dot{K}_{s2}$ ——定子表面的面电流密度, 按下式计算:

$$\dot{K}_{s2} = \frac{2m_1 K_a p_1 W_1}{\pi D_{i1}} \sqrt{2} I_1 e^{j(\omega_1 t + ax_1)}$$

$$= K_z e^{j(\omega_1 t + \alpha x)} \quad (1-11)$$

式中 D_{i1} ——定子内径,

$$K_z = \frac{2\sqrt{2} m_1 K_{dp1} W_1 I_1}{\pi D_{i1}}.$$

最后求得

$$C_s = C_2 = \frac{\mu_0 K_z}{a \left(\text{sh} ag + \frac{\xi}{\mu_r a} \text{ch} ag \right)} \quad (1-12)$$

考虑到在电机中, 气隙长度 $g \ll$ 极距 τ , 所以

$$\text{sh} ag \approx ag, \quad \text{ch} ag \approx 1$$

于是得到转子中的矢量磁位解

$$\dot{A}_2 = \frac{\mu_0 K_z}{a^2 g + \xi / \mu_r} e^{\xi y} e^{j(s\omega_1 t + \alpha x)} \quad (1-13)$$

依据式(1-13), 可以求得转子电磁场的其它参数为:

$$\text{电场强度 } \dot{E}_x = -\frac{\partial \dot{A}}{\partial t}$$

$$= -j s \omega_1 \frac{\mu_0 K_z}{a^2 g + \xi / \mu_r} e^{\xi y} e^{j(s\omega_1 t + \alpha x)} \quad (1-14)$$

$$\text{磁场强度 } \dot{H}_x = \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial \dot{A}_2}{\partial y}$$

$$= \frac{\xi K_z}{\mu_r (a^2 g + \xi / \mu_r)} e^{\xi y} e^{j(s\omega_1 t + \alpha x)} \quad (1-15)$$

$$\dot{H}_y = -\frac{1}{\mu_2} \frac{\partial \dot{A}_2}{\partial x}$$

$$= -j \frac{a K_z}{\mu_r (a^2 g + \xi / \mu_r)} e^{\xi y} e^{j(s\omega_1 t + \alpha x)} \quad (1-16)$$

进入转子表面的坡印延矢量

$$\dot{S}_r = -\frac{1}{\eta} \dot{E}_x(y=0) \dot{H}_x^*(y=0)$$

$$= \frac{1}{2} j s \omega_1 \frac{\mu_0 K_r}{(a^2 g + \xi / \mu_r)} \frac{\dot{\xi} K_r}{\mu_r (a^2 g + \xi / \mu_r)} \quad (1-17)$$

坡印廷矢量在转子表面的积分即为进入转子的复功率 $\dot{S}$ ，其实部代表有功功率 P_r ，其虚部代表无功功率 Q_r ，于是

$$\dot{S} = P_r + jQ_r = 2p\tau L_r \dot{S}_r \quad (1-18)$$

式中 p ——电机极对数。

折算至定子侧的转子阻抗

$$r'_{2s} = \frac{P_r}{s m_1 I_2'^2} K_r \quad (1-19)$$

$$x'_{2s} = \frac{Q_r}{s m_1 I_2'^2} K_r \quad (1-20)$$

$$\text{式中} \quad I_2' = \frac{|\dot{H}_x| \pi D_2}{2\sqrt{2} m_1 K_{sp} W_1} \quad (1-21)$$

2. 非线性求解

在聂孟 (Нейман) [1-4] 根据磁导率随空间坐标变化的假设，作出了半铁磁空间平面电磁波传播的一维经典分析之后，文献 [1-5] 又发展了二维分析，现按照二维理论讨论非线性参数的计算。

计算时采用下列假设：

- (1) 转子沿轴向为无限长；
- (2) 磁场强度 H 和电场强度 E 随时间呈正弦变化；
- (3) 因为 $B = f(H)$ 具有非线性关系，这里仅讨论磁密 B 的基波；

(4) 磁导率 μ_2 是转子表面的磁场强度 H_{2s} 和空间坐标 y 的函数；

(5) 不考虑磁滞效应；

(6) 磁化曲线用 n 阶抛物线表示，即

$$B = K_n H^{\frac{1}{n}}$$

$$\mu_2 = \frac{B}{H} = K_n H^{\frac{1}{n}-1} \quad (1-22)$$

式中 K_n 、 n ——根据不同导磁材料确定的系数。

令 E_x 、 H_x 、 H_y 沿 x 方向表示为

$$\dot{E}_x = E_{xm} e^{j(\omega_1 t + ax)} \quad (1-23)$$

$$\dot{H}_x = H_{xm} e^{j(\omega_1 t + ax)} \quad (1-24)$$

$$\dot{H}_y = H_{ym} e^{j(\omega_1 t + ax)} \quad (1-25)$$

且有

$$\frac{\partial \dot{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \dot{H}_x}{\partial y} = \sigma_2 \dot{E}_x \quad (1-26)$$

$$\frac{\partial \dot{E}_x}{\partial x} = j\omega_1 \mu_2 \dot{H}_y \quad (1-27)$$

$$\frac{\partial \dot{E}_x}{\partial y} = -j\omega_1 \mu_2 \dot{H}_x \quad (1-28)$$

将式(1-23)和(1-27)对 x 求导, 得

$$\frac{\partial \dot{E}_x}{\partial x} = j\omega_1 \mu_2 \dot{H}_y = ja \dot{E}_x \quad (1-29)$$

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_x}{\partial x^2} = -a^2 \dot{E}_x = j\omega_1 \left(\mu_2 \frac{\partial \dot{H}_y}{\partial x} + \dot{H}_y \frac{\partial \mu_2}{\partial x} \right) \quad (1-30)$$

将式(1-28)对 y 求导, 得

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_x}{\partial y^2} = -j\omega_1 \mu_2 \frac{\partial \dot{H}_x}{\partial y} + \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial \mu_2}{\partial y} \frac{\partial \dot{E}_x}{\partial y} \quad (1-31)$$

由式(1-29)和(1-30)求得

$$\frac{\partial \dot{H}_y}{\partial x} = \frac{a}{s\omega_1 \mu_2} \dot{E}_x \left(ja - \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial \mu_2}{\partial x} \right) \quad (1-32)$$

代入式(1-26)得

$$\frac{\partial \dot{H}_x}{\partial y} = \frac{a}{s\omega_1 \mu_2} \dot{E}_x \left(ja - \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial \mu_2}{\partial x} \right) - \sigma_2 \dot{E}_x \quad (1-33)$$