

电动摩托车用双定子永磁无刷直流电动机有限元 分析

张东¹ 龚宇²

上海大学特种电机研究室¹ 西迪阿特信息科技有限公司²

电动摩托车用双定子永磁无刷直流电动机有限元分析

DOUBLE-STATOR PERMANENT-MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR FOR ELECTRIC MOTORCYCLE FINITE ELEMENT ANALYSIS

张东 龚宇

(上海大学特种电机研究室 西迪阿特信息科技有限公司)

摘 要:该文首先对轮毂式永磁无刷直流电机的拓扑结构和运行原理进行了研究,给出了一种分数槽电机选取极数和槽数配合减小自定位转矩的一般方法;为进一步提高电机内部空间利用率和电机效率,提出了一种双层短距的绕组连接方式。其次,对二维场路耦合时步有限元法理论进行了阐述,并使用 JMAG 电磁场软件对样机进行了分析,给出了计算仿真结果。最后,通过试验验证了对样机的设计和分析是正确的,该电机适合驱动电动摩托车。

关键词:电动摩托车;轮毂式永磁无刷直流电机;双层短距;二维场路耦合时步有限元法

Abstract: Firstly, the topology and operation principle of the wheel-hub permanent-magnet brushless DC motor are researched in the paper. A general method for decreasing cogging torque by cooperating of pole number and slot number is given. To increase the inner space utilization rate and the motor efficiency, the double-layer-and-short-pitch windings are employed. Secondly, some simulation waveforms are acquired through the 2D circuit-field coupled time-stepping finite-element method. Finally, the experimental results of the motor prove the reliability of design and analysis. The motor is promising for the drive of electric motorcycle.

Key words: electric motorcycle; wheel-hub permanent magnet brushless dc-motor; double-layer-and-short-pitch; 2D circuit-field coupled time-stepping finite-element method

1 概述

永磁电机相对传统电机具有更高的功率密度和效率，特别是随着高性能永磁材料的出现，以及电力电子技术、微处理器的发展和大功率电子器件的涌现，使得逆变器供电的永磁电机的发展进入了一个广阔的天地。永磁无刷直流电机是在传统有刷永磁直流电机的基础上发展起来的，但是它却省去了电刷和换向器，从而大大提高了电机的运行可靠性和效率。此外，永磁无刷直流电机的气隙磁密波形呈矩形分布，在采用矩形波电流驱动时可以产生相对永磁同步电机更高的转矩[1]，因此永磁无刷直流电机具有更高的转矩密度，尤其在一些对振动噪声要求不高的地方，就更加显现出它的优势。永磁无刷直流电机的整个控制系统比较简单，成本较低，在一些对位置伺服要求不高的地方，如电动自行车和电动摩托车中是最佳之选。

采用轮毂式外转子的设计可以有效地降低电动车驱动系统机械结构的复杂程度，这样就可以很容易地做到直接驱动，从而使整个系统的效率得到有效的提高，并且降低了制作成本。本文主要针对直接驱动电动摩托车的要求，设计了一台分数槽轮毂式永磁无刷直流电动机，对电机的拓扑结构进行了研究；使用二维场路耦合时步有限元法对电机的性能和磁场分布进行分析，最后给出了试验结果，验证了这台电机非常适合电动摩托车的驱动。

2 有限元模型的建立

2.1 工作原理

电机的结构图如图 1 所示。该电机采用 22 极的多极对数设计，这样可以使电机轭部的厚度减小，使电机的体积缩小，重量减轻。槽数为 24 槽，因此相邻两槽间的距离与极距比为 11/12，构成分数槽绕组。这种分数槽电机的极数（ $2p$ ）与定子槽数（ Q ）之间存在 $2p = Q \pm 2$ 的关系；根据文献[3]可知这种极槽配合使得定、转子间的电磁力在任何转子位置上均相等，有效地减小了自定位转矩。当电机具有 m 相绕组时，电机定子的槽数就是 $4mk$ （ $k=1, 2, 3, \dots$ ），则电机的极数为 $4mk \pm 2$ 。这种电机的绕组连接如果采用单层绕组连接方式，由于每相的磁路基本上是独立的，就可以忽略各相绕组之间的互感^[3,7]，但是如果采用双层绕组连接方式，绕组之间的互感就存在了。由于转子永磁体采用表面式结构放置，因此电机各相绕组的电感不随转子位置变化。

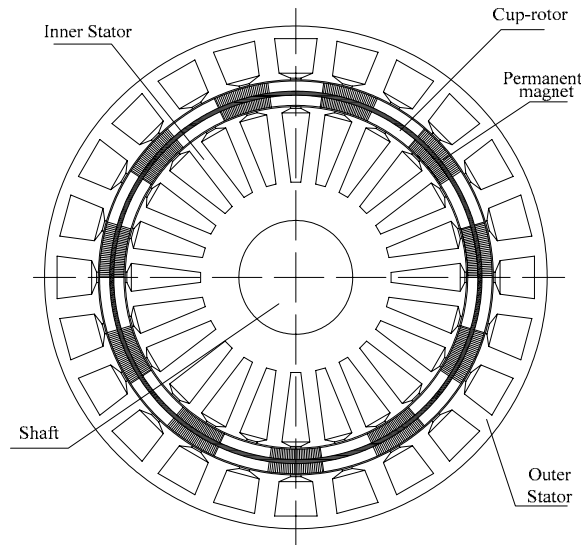


图 1 三相 22 极永磁无刷直流电机结构图

本文所述电机绕组采用了一种双层短距的绕组连接方式（如图 2 所示），相对文献 [2] 中提到的单层集中绕组，可以减小绕组的端部长度，提高电机内部空间和铜线的利用率，同时减小了铜耗，提高了电机效率。由于内外定子的绕组结构相同，以外定子进行分析，该电机每相绕组有 8 个线圈，共有 24 个线圈，分别缠绕在 24 个齿上；以 A 相为例，位于 24, 1, 2, 3, 4 槽中的相邻 4 个线圈串联构成 A 相绕组的第一部分，位于 12, 13, 14, 15, 16 槽中的 4 个线圈串联构成 A 相的第二部分，两部分线圈再串联连接，B、C 两相采用相同的方法连接绕组。为节约成本电机运行的控制方式采用传统的无刷直流 3/2 通电 120° 导通控制模式^[4]，根据位置传感器的信号来决定导通相。这样，如果 N 极所对应的槽电流的方向是向外，那么 S 极对应的槽电流的方向就是向内，如此产生连续的转矩，使得电机旋转。

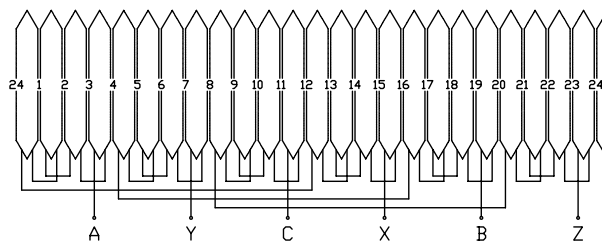


图 2 绕组连接图

2.1 二维场路耦合时步有限元法的理论

在绕组内部，由于每根导线面积很小，忽略涡流产生的电流不均匀效应，将电流看成均匀分布；同时忽略定转子叠片铁心中的涡流损耗和轴向磁场的变化，则电机满足的二维电磁场方程为^[6]：

$$\nabla \cdot (\nu \nabla A) = -J \quad (1)$$

由于矢量磁位 $\mathbf{A}$ 和电流密度 $\mathbf{J}$ 只存在 z 轴分量 A_z 和 J_z , 现约定 A_z 记为 A , J_z 记为 J , 式中 ν 为磁阻率。

以下对不同的区域进行分析：

①在定转子铁心区域、气隙区域没有外加电流分布。电磁场的方程为：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = 0 \\ S_1 : A = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, S_1 为电机模型外圆和内圆边界。

②在永磁体区域, 永磁体采用等效面电流来进行处理。由于 NdFeB 永磁体的电阻率仅是铜线电阻率的几十倍, 而且电机内的永磁体放置采用表面式结构, 因此需要考虑永磁体内部涡流的影响。电磁场方程为：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = \sigma_{PM} \frac{\partial A}{\partial t} \\ S_2 : \nu_1 \frac{\partial A}{\partial n} - \nu_2 \frac{\partial A}{\partial n} = J_s \end{cases} \quad (3)$$

式中, σ_{PM} 为永磁体的电导率; S_2 为永磁体的边界; J_s 为永磁体边界等效面电流密度。

③定子绕组区域, Ω_1 区域内的 N 匝导体与 Ω_2 区域内 N 匝导体反向串联构成一相绕组, 并且与电机端部电阻 R_0 和端部电感 L_0 相串联, 在电压 u 和电磁场的共同作用下流过电流 i ; 由于每匝导体是由多根截面积很小的导体并绕而成, 因此可以忽略导体内部涡流产生的电流不均匀效应, 将电流看成均匀分布, 这样就完全成为路的问题。其中一相绕组的电磁场方程为：

$$\begin{cases} \Omega_1 : \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -\frac{iN}{S} \\ \Omega_2 : \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = \frac{iN}{S} \\ i = \left(e - L_0 \frac{di}{dt} - u \right) / \Sigma R \end{cases} \quad (4)$$

式中: S 为一相绕组同向导体区域 Ω_1 或 Ω_2 的截面积; e 为电磁场作用下, 一相导体

产生的反电势 $e = \frac{NI}{S} \left(-\int_{\Omega_1} \frac{\partial A}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega_2} \frac{\partial A}{\partial t} d\Omega \right)$, ΣR 为 Ω_1 、 Ω_2 内串联导体直线部分电

阻与端部电阻 R_0 的合成电阻。

其它相的处理同上。

通过使用伽辽金法离散以上的场路方程得到

$$[k]\left\{\begin{matrix} A \\ i \end{matrix}\right\} + [k']\left\{\begin{matrix} \frac{\partial A}{\partial t} \\ \frac{di}{dt} \end{matrix}\right\} = \{p\} \quad (5)$$

式中 $[k]$ 和 $[k']$ 为 $(n+m) \times (n+m)$ 的系数矩阵, n 为总节点数, m 为相数; $\{A\}$ 和 $\{i\}$ 是未知量, $\{A\}$ 为 n 个节点的矢量磁位, $\{i\}$ 为 m 相绕组的电流; $\{p\}$ 是一个与绕组电流、

永磁体的面电流和外加电压相关的一个列向量。进一步把 i 看成 A 的一部分, 把 $\frac{di}{dt}$ 看成 $\frac{\partial A}{\partial t}$ 的一部分, 方程可以简记为:

$$[k]\{A\} + [k']\left\{\frac{\partial A}{\partial t}\right\} = \{p\} \quad (6)$$

经过强加边界条件处理之后, 使用时步法时, 以上方程的迭代格式为:

$$\left(\left[k^{n'}\right] + \frac{[k']}{\Delta t}\right)\{A^{n'}\} = \{p^{n'}\} + \frac{[k']}{\Delta t}\{A^{n'-1}\} \quad (7)$$

式中 n' 代表第 n' 步计算, $\Delta t = t_{n'} - t_{n'-1}$ 是第 n' 步计算的步长。

此外, 还有一个与之相关的运动方程, 来决定电机模型旋转的位置^[5]。

$$T_{em} = T_L + R_\Omega \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (8)$$

式中: T_{em} 为电磁转矩的瞬时值; T_L 为负载转矩; R_Ω 为阻力系数; J 为转子的转动惯量; Ω 为转子的机械角速度。

对上式离散化处理得到的迭代格式为:

$$\Omega^{n'} = \frac{T_{em} - T_L - R_\Omega \Omega^{n'-1}}{J} \Delta t + \Omega^{n'-1} \quad (9)$$

通过电磁场计算获得电磁转矩 T_{em} , 然后使用 (9) 式, 可以求得当前的转速 $\Omega^{n'}$, 进一步通过下式:

$$\theta_L^{n'} = \Omega^{n'} \Delta t + \theta_L^{n'-1} \quad (10)$$

求得转子位置 $\theta_L^{n'}$ 。这样使得运动方程和场路方程联系在一起。根据上一步计算得到的电流 i 、转子位置 $\theta_L^{n'}$ 和电机的运行控制策略可以决定电路在当前步的导通情况，如此计算下去，就可以得到电机的运行特性。

2.1 网格剖分

下面利用电磁场软件 JMAG8.3 对电机模型进行分析，首先进行网格剖分，JMAG 提供了灵活优秀的网格剖分，本文采用手动剖分定转子网格，再利用软件自动剖分两层优良的滑移气隙网格，网格的节点数和单元数见表 1。其中，气隙网格径向分三段，中间层采用矩形单元，便于滑移，圆周方向则分 398 格。

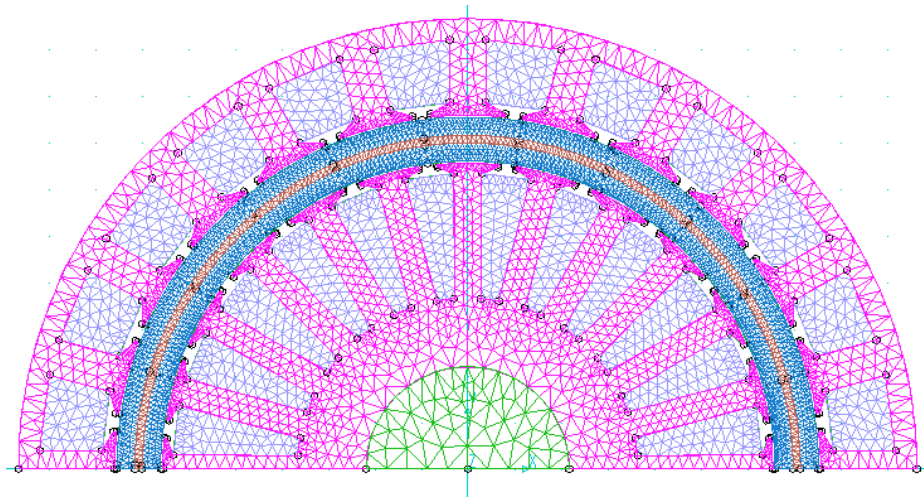


图 1 采用手动分段剖分的定转子网格图

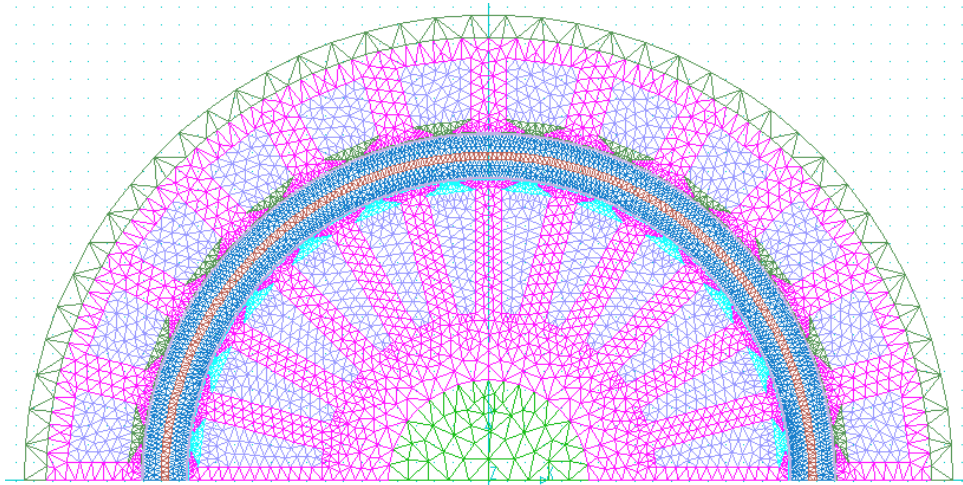


图 2 自动剖分两层气隙的网格图

表 1 电机有限元剖分节点数和单元数

项目	结点数	单元数
----	-----	-----

手动分段剖分的定转子网格	5884	9816
自动剖分两层气隙的网格图	8524	14529

2.3 材料与属性和电机的主要参数

计算中所使用的材料参数如下：

电工钢的材料参数，电工钢采用 DW465-50,利用 JMAG 可以方便的输入 B-H 数据建立自定义库。

真空磁导率： $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

NdFeB 电导率： $1.5 \mu \Omega \text{ m}$

铜线电导率： $0.0217 \mu \Omega \text{ m}$

长度单位为： mm

表 2 给出了电机的主要参数。

表 2 电机的主要参数

额定功率	1.5 kW
额定相电压	230 V
额定转速	290rpm
内定子内径	92 mm
内定子外径	165 mm
外定子内径	191 mm
外定子外径	245 mm
轴向长度	50 mm
气隙长度	0.6 mm
内定子槽数	24
外定子槽数	24
极数	22
永磁体块数	44

3 计算结果图

图 3 和图 4 分布给出了负载磁力线和磁通密度的波形,图 5 给出了考虑涡流和不考虑涡流时相电流的计算结果比较,考虑涡流时,只需要在 JMAG 中对材料设置电导率就可以。图 6 给出了试验测得的电流波形。图 7 为额定转速下的转矩计算波形,平均转矩在 3Nm 左右。

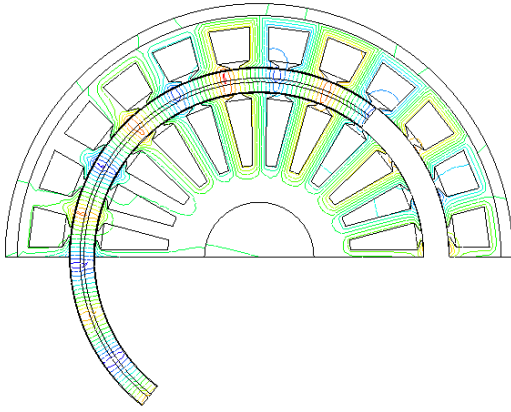


图 3 负载磁力线分布图

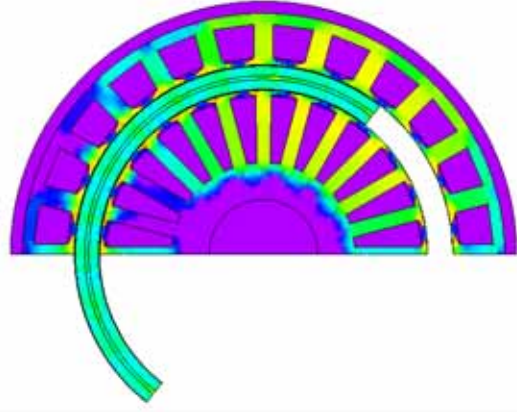


图 4 负载磁通密度图

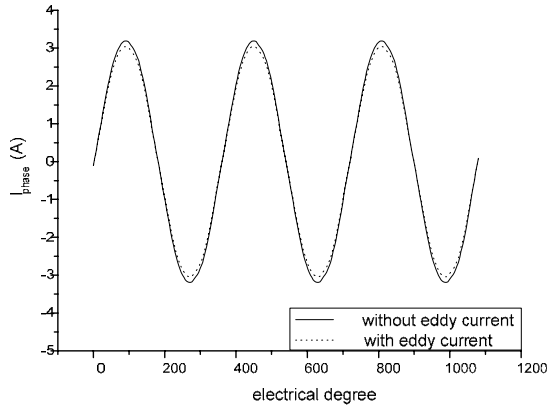


图 5 相电流比较

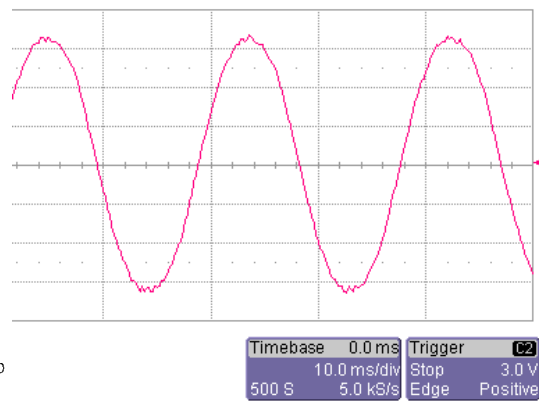


图 6 测得的相电流波形

(幅值为 325V, 负载电阻为 106 Ω , 电流幅值为 3.07A)

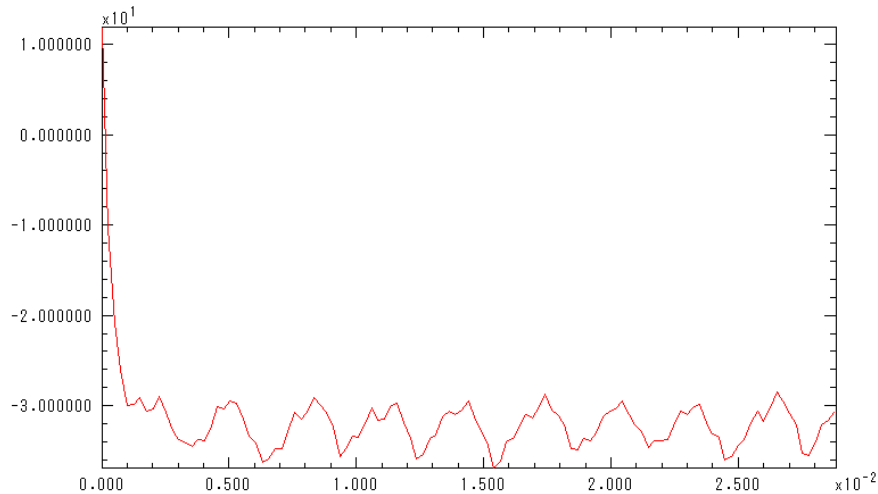


图 7 额定转速下的电磁转矩计算波形

(注：由于采用了顺时针方向旋转，因此转矩为负值)

4 分析与结论

本文述及了一台采用分数槽的电动摩托车用双定子永磁无刷直流电动机的设计, 设计过程采用场路耦合时步有限元法对电动机的性能进行了分析, 该理论作为目前最接近电机实际物理变化过程, 是最完善的计算方法, 文中对不同区域给出了对应的磁场方程和相应的离散方程。JMAG 正是运用了先进的场路耦合时步有限元法, 在计算过程考虑到了电机铁心饱和、

电枢反应和永磁体内涡流等复杂情况,因此更加适合用于研究电机的运行性能,试验结果也验证了这一点。由于采用了特殊的设计,使得这台电机具有高转矩密度、低转动惯量和小自定位转矩等优点,并且通过试验得到了验证,因此它非常适合用作电动摩托车和电动自行车的驱动电机。

5 参考文献

- [1] H. Weh, H. Mosebach. Design concepts and force generation in inverter-fed synchronous machines with permanent magnet excitation[J]. IEEE Trans. Magnetics, vol. 20, pp. 1756-1761, 1984.
- [2] C. C. Chan, J. Z. Jiang, G. H. Chen, K. T. Chau. A Novel Polyphase Multipole Square-Wave Permanent Magnet Motor Drive For Electric Vehicles[J]. IEEE Trans. Industry Application, vol. 30, pp. 1258-1266, 1994
- [3] Nicola Bianchi, Silverio Bolognani. Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors[J]. IEEE Trans. Industry Application, vol. 38, pp. 1259-1265, 2002
- [4] 张琛. 直流无刷直流电动机原理及应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2001
- [5] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1997
- [6] 龚宇, 崔巍, 江建中, 施进浩. 永磁电机有限元时步法的研究与应用. 微特电机, 2005.10
- [7] 傅为农. 斜槽异步电机的场路耦合时步法有限元模型及其应用[D]. 上海大学博士论文, 1997
- [8] 江建中, 夏伟. 新型机电一体化变速驱动装置[J]. 上海工业大学学报, 1994, 15(3), 214-223

附:作者简介

龚宇:1980.1, 硕士, 主要从事永磁电机的设计分析与电磁场计算

张东:1975.2, 博士, 主要从事于新型永磁电机设计及其驱动研究