

嵌入式力矩电机的设计方法研究*

□ 王洪根 □ 杨庆东

北京信息科技大学 机电工程学院 北京 100192

摘要:介绍一种用于机床直驱部件的嵌入式力矩电机的设计和电磁结构优化方法。为了使嵌入式力矩电机满足机床内部结构紧凑的要求,必须具有较高的磁密。通过计算分析,得到不同长径比、不同磁极对数、不同槽极比与力矩的关系曲线,然后提出适合于机床部件嵌入式力矩电机的力矩设计经验参考公式。通过有限元软件对电机模型的分析和对样机输出力矩的测试,验证了设计的合理性。

关键词:嵌入式力矩电机 直接驱动 电机设计

中图分类号:TH123

文献标识码:B

文章编号:1000-4998(2014)01-0028-04

Abstract: This paper introduces a method for designing of the embedded torque motor as a direct drive assembly for machine tools and for optimization of the electromagnetic structure. In order to let the embedded torque motor satisfy compact structure in the machine higher flux density should be presented. Through computational analysis it is available to obtain varied length-diameter ratio, various numbers of pole pairs, different slot-to-pole ratio and torque curve relationship and set forth the reference formulas for empirical design of embedded torque motor that is adaptive to the machine assemblies. By analyses of the motor model with finite element software and test of the output torque of the prototype, the rationality of the design has been verified.

Key Words: Embedded Torque Motor Direct Drive Motor Design Empirical Formula

为实现高档数控机床高速、高精度的要求,选择力矩直接驱动电机(简称直驱)作为进给部件的高档数控机床在不断增加^[1]。如力矩电机直接驱动转台、双摆铣头等,抛弃传统的中间机械传动装置,实现了“零传动”^[2],使电机直接与负载相联,将电磁力直接作用于运动体。其优点有:机械部件减少,驱动结构紧凑^[3];无反向间隙,加工精度高^[4];高动态性,高伺服性^[5]。

高档数控机床要求结构更加简单紧凑,这使机床内部空间减小,必然要求减小其内部功能部件总体尺寸,使用嵌入式力矩电机可实现节省空间的目的。嵌入式力矩电机要求大的输出力矩,依据直驱部件工况的不同,其结构受到外部空间的限制,所以电机轴向长度和径向长度有很多变化,这就要求嵌入式力矩电机在

* 北京市教委科技成果转化项目(编号:PXM2013-014224-000062)

收稿日期:2013年8月

的运行提供技术支持。纯电动车充换电站基础设施的建立,需要联合汽车制造商、电网企业及当地政府相关部门共同建设。

参考文献

- [1] 谷靖,欧阳明高.微型纯电动汽车的系统构型与关键参数设计[J].汽车工程,2013,35(1):7-12.
- [2] 张鹏,黎志照.串联式混合动力电动汽车功率参数的优化匹配[J].机械制造,2005(9):36-37.
- [3] 周胜,周云山.纯电动汽车动力匹配及计算仿真[J].计算

小结构尺寸时有足够的输出力矩。本文对嵌入式力矩电机主要设计参数进行优化,得出嵌入式力矩电机设计的经验公式。

1 嵌入式力矩电机的结构特点及约束条件

1.1 嵌入式力矩电机的结构特点

力矩电机有多种分类方式,按其结构形式分为:内转子力矩电机、外转子力矩电机、内外转子力矩电机、盘式单边力矩电机等(图1)。

不同力矩电机特性差异很大,应根据具体设计要求选择力矩电机,表1给出了不同结构力矩电机的特性。

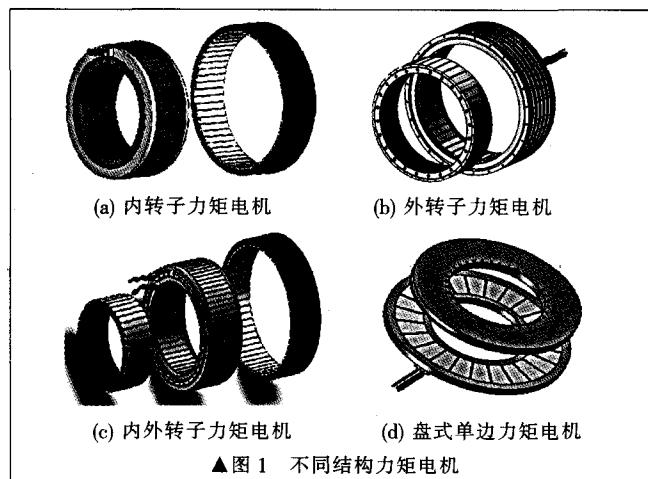
目前数控机床上的嵌入式力矩电机主要是外转子和内转子结构,因为其结构简单,容易实现安装和冷却,尤其是外转子结构的力矩电机,在相同的外部尺寸限制下,转子磁轭上可以安装更多的永磁体,比内转子

机仿真,2013,30(2):135-139.

- [4] 查鸿山,宗志坚.纯电动汽车动力匹配计算与仿真[J].中山大学学报(自然科学版),2010,49(5):47-51.
- [5] 马文举.基于产业生命周期的我国汽车制造业优化升级研究[D].金华:浙江师范大学,2011.
- [6] 常绿.纯电动微型汽车动力传动系参数设计及动力性仿真[J].机械设计与制造,2010(6):43-45.
- [7] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2011. ▲

(编辑 丁 翼)





▲图1 不同结构力矩电机

表1 各结构力矩电机特性

力矩电机类型	内转子	外转子	内外转子	盘式单边
安装刚度	较好	较好	好	差
本体刚度	较好	较好	好	好
单位体积转矩	较大	较大	很大	小
磁拉力	很小	很小	很小	很大
转矩波动率	小	小	小	大
冷却	较容易	较容易	很复杂	复杂

结构力矩电机有更大的输出转矩。

1.2 嵌入式力矩电机约束条件

一种用于双摆铣头的嵌入式力矩电机与运动部件直接耦合,采用外转子结构,其主要尺寸的设计必须满足机械结构件的要求。表2给出了用于双摆铣头的嵌入式力矩电机的约束条件。

表2 电机约束条件

约束条件	参量	数值
尺寸和材料约束	电机外径/mm	≤312
	铁芯长度/mm	≤80
	电机内径/mm	≥140
	定子铁芯材料	DW312-50
	永磁体剩磁/T	1.1
	永磁体相对磁导率	1.04
	转动惯量/(kg·m ²)	≤0.5
功率电路限制	逆变器输入电压/V	220
	输出额定电流/A	2.35
	额定转速/(r·min ⁻¹)	60

2 嵌入式力矩电机力矩影响因素分析

2.1 计算极弧系数对力矩影响

电机气隙径向磁场沿圆周方向的分布是不均匀的,为了便于磁路计算,引入了计算极弧系数 $\alpha_i^{[6]}$ 。

对于表面式磁路结构,永磁磁极不带极靴时其极弧系数 α_p 为:

$$\alpha_p = b_M / \tau_1 \quad (1)$$

式中: b_M 为永磁体弧长, cm; τ_1 为极距, cm。

计算极弧系数 α_i 为:

$$\alpha_i = \alpha_p + \frac{4}{\frac{\tau_1}{\delta} + \frac{6}{1 - \alpha_p}} \quad (2)$$

式中: δ 为气隙长度, cm。

图2给出了气隙为1 mm时不同磁极对数下 α_i 的变化规律,从图上可以看出,当极对数 p 为5左右时,极弧系数存在最小值,当极对数大于5时,随着极对数的增加,计算极弧系数也逐渐增大,极对数 p 为40时, α_i 趋于平缓,此时 α_i 接近于0.8。

2.2 气隙磁密波形系数对力矩的影响

气隙基波幅值 $B_{\delta 1}$:

$$B_{\delta 1} = K_f \frac{\phi_{\delta 0} \times 10^4}{\alpha_i \tau_1 L_d} \quad (3)$$

式中: K_f 为气隙磁密波形系数; L_d 为定子铁芯长度, cm; $\phi_{\delta 0}$ 为空载主磁通, Wb。

$$\phi_{\delta 0} = (b_m B_r b_m L_m \times 10^{-4}) / \sigma_0 \quad (4)$$

式中: b_m 为永磁体空载工作点; B_r 为计算剩磁密度, 钕铁硼材料的 $B_r=1.25$ T; σ_0 为空载漏磁系数; b_m 为永磁体宽度, cm; L_m 为永磁体长度, cm。

可以看出,气隙磁密波形系数对电机的气隙磁密基波幅值有较大影响,而决定气隙磁密波形系数的又是计算极弧系数。从图3可以看出, K_f 的值随着计算极弧系数的变化存在一个最大值,此时 α_i 约为1,气隙磁密波形系数 K_f 为1.273。

2.3 永磁体尺寸对力矩的影响

图4、图5表示出槽数为64、70、84时永磁体宽度和长度对电机力矩的影响,由图4、图5可以看出,随着永磁体宽度和长度的增加,输出力矩也随之变大;槽数越多,输出力矩也越大。永磁体宽度 b_m :

$$b_m < \frac{\pi (D+2\delta)}{2p} \quad (5)$$

式中: D 为定子外径, cm。

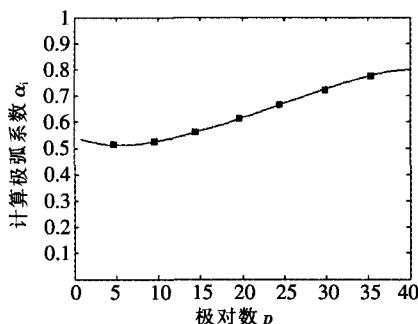
从式(5)中可以看出,永磁体宽度还受到磁极对数的限制。

2.4 每槽导体数对力矩影响

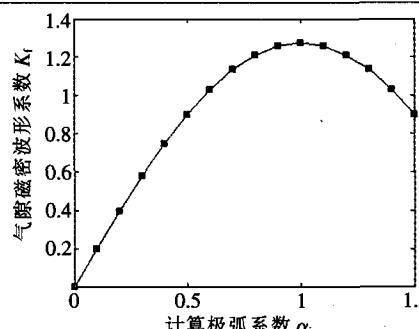
电机通过切割磁感线产生力。定子每槽导体数也决定了电机转矩的大小,图6给出了不同槽极比时,定子每槽导体数对力矩影响,可以看出电机力矩随着导体数的增加而变大,但不同槽极比的力矩电机力矩变化率不同。

3 嵌入式力矩电机力矩计算经验公式

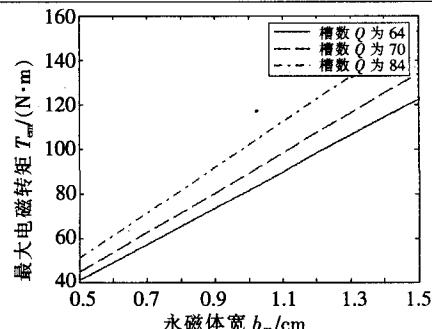
永磁同步电机最大电磁转矩为 T_{em} ,其值与电磁负荷和电机主要尺寸有关:



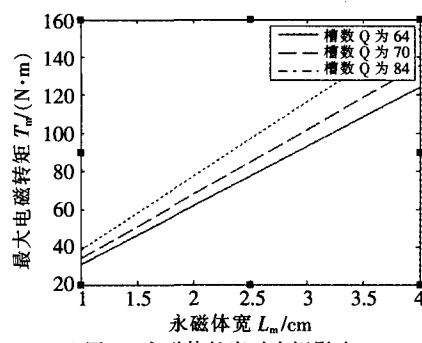
▲图2 极对数对计算极弧系数影响



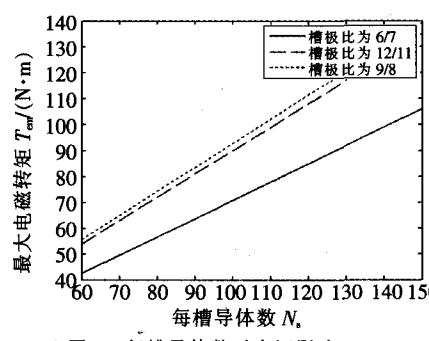
▲图3 计算极弧系数对气隙磁密波形系数影响



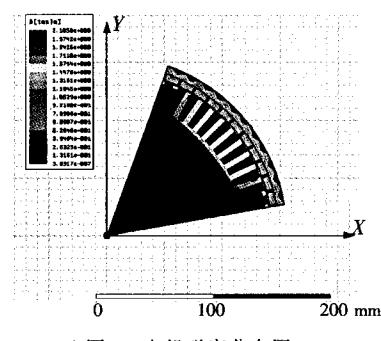
▲图4 永磁体宽度对力矩影响



▲图5 永磁体长度对力矩影响



▲图6 每槽导体数对力矩影响



▲图7 电机磁密分布图

$$T_{em} = \frac{\sqrt{2} \pi}{4} B_{d0} L_{d0} D^2 A \times 10^{-4} \quad (6)$$

$$A = \frac{m N K_{dp}}{p \tau_1} \quad (7)$$

$$N = \frac{N_s Q}{2 m a} \quad (8)$$

式中: A 为定子电负荷有效值, A/cm ; m 为电机相数; I 为相电流, A ; K_{dp} 为电机绕组系数; N 为每相绕组串联匝数; N_s 为每槽导体数; Q 为定子槽数; a 为并联支路数, 为 1。

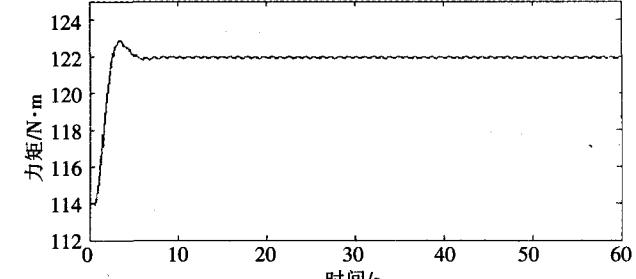
因为嵌入式电机受到尺寸限制, 设计者在最初并不知道在给定尺寸下所设计的电机能否满足设计要求。为了在设计之初就能估算出嵌入式电机输出的最大力矩, 根据上述关系式, 进行推导, 将式(8)代入式(7), 再将式(3)、式(4)、式(7)代入式(6), 整理可得:

$$T_{em} = \frac{\sqrt{2} \pi K b_m B L_{d0} D^2 m N_s Q I K_{dp} \times 10^{-4}}{8 a \alpha \sigma_0 \tau_1^2 p} \quad (9)$$

根据式(9)计算出笔者所设计的嵌入式力矩电机, 可输出最大扭矩为 120 N·m。

4 有限元分析结果及实验结果分析

根据以上分析, 设计了用于直驱双摆洗头 A 轴的槽极比为 72/66 的力矩电机。通过有限元计算, 获得电机磁密分布图(图 7), 由图中可以看出, 所设计的样机具有较高的磁密。利用平衡力矩法对样机输出力矩进行测试, 得到力矩测试结果图(图 8)。由图中可以看出, 直驱双摆洗头 A 轴堵转力矩在 122 N·m 稳定并有



▲图8 力矩测试结果图

小幅上下波动, 试验所得结果与设计计算结果吻合较好, 该文提出的设计和优化方法, 对嵌入式力矩电机设计分析具有很好的参考价值。

5 结论

本文研究了一种嵌入式力矩电机的力矩优化方法, 为该类电机设计者提供了理论参考公式。通过有限元法对电机性能进行分析计算, 验证了电机具有较高的磁密。通过对样机测试, 验证了所得经验公式的合理性和有效性。

参考文献

- [1] 杨庆东. 面向数控机床直驱电机应用测试研究 [J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2013(2).
- [2] Brandenburg G, Bruckl S, Dorman J. Comparative Investigation of Rotary and Linear Motor Feed Drive Systems for High Precision Machine Tools [C]. Proceedings of 6th International Workshop on Advanced Motion Control,



双支撑旋涡泵的设计研究*

□ 张康智 □ 陈万强 □ 李祥阳 □ 王芳

西安航空学院 军工装备研究所 西安 710077

摘要: 双支撑旋涡泵以其小流量、高扬程的特点而应用广泛,在理论研究的基础上,对其优点进行分析,并对其结构进行设计。

关键词: 双支撑 旋涡泵 叶轮

中图分类号:TH314

文献标识码: A

文章编号:1000-4998(2014)01-0031-02

特种车辆工况条件差,对旋涡泵的转速要求高达14 000 r/min,传统的旋涡泵无法满足其使用性能,如目前国内众多旋涡泵转速在1 450~2 900 r/min,其结构均采用单支撑悬浮式的分离式结构(图1),虽然具有结构简单、用料少的优点,但是由于仅一端固定,受力变形大;装配零件较多,使装配误差大,造成泵的整体尺寸变大以及传动精度无法得到保证等问题。

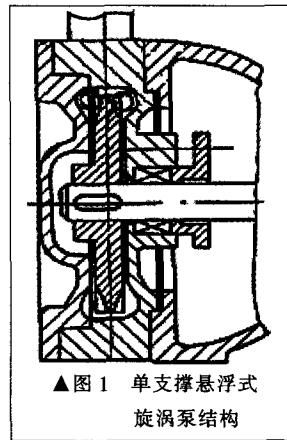
双支撑旋涡泵能够满足特种车辆使用要求,为此,对高性能新型双支撑旋涡泵进行设计和研究,以期打破欧美等发达国家对我国此类技术的长期封锁和产品垄断。特种车辆用装备系列产品的研制成功并实现产业化,将提高我省高校科技发展水平在全国相关领域内的知名度及其影响,成为陕西省特种车辆技术和工业化的支柱产业。

1 双支撑旋涡泵的特点

双支撑旋涡泵采用了闭式叶轮、开式流道、高精度滚动轴承双支撑结构,电动机和泵体直接相连并传递动力。在保证压力(扬程)和流量的前提下,泵的体积和质量大幅度减小,工作可靠。泵的材料均选用不锈钢并

* 陕西省教育厅科研计划项目(编号:2013JK1036)

收稿日期:2013年8月



经适当的热处理,具有很高的强度和耐磨性,并且抗振性和耐腐蚀性能良好。

1.1 双支撑式旋涡泵结构特点

(1) 双支撑式的整体式结构是指叶轮、传动轴是一个整体,其几何尺寸小,结构如图2所示。

(2) 叶轮封闭与流道相通。叶轮封闭是指叶片中间有隔板(图2);流道相通是指旋涡泵两端直接打通进出口,所形成的流场是一个贯通的流场(图3为贯通流场模型)。

1.2 双支撑式旋涡泵结构优点

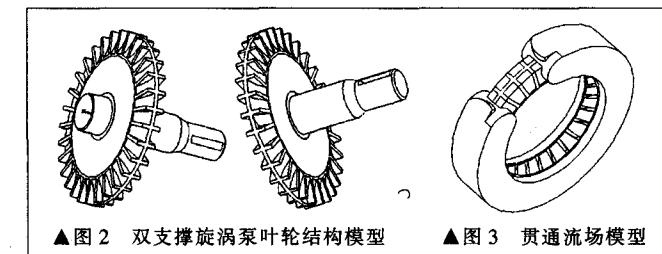
(1) 保证叶轮与泵壳间隙的恒定性。叶轮的两端的轴肩与高精度轴承精密配合,增加了叶轮运动的稳定性。

(2) 旋涡泵整体紧凑,减少了传统旋涡泵的安装误差所带来的影响。

(3) 零件制造精度高。加工时以两端中心孔定位来加工两支撑及叶片,符合基准统一和基准重合原则,保证了叶轮的形位公差。

2 双支撑旋涡泵叶轮关键尺寸设计

2.1 双支撑旋涡泵关键尺寸的计算



- [5] 李绪成. 直线电动机在数控机床中的应用及发展趋势[J]. 世界制造技术与装备市场, 2005(6): 71-74.
- [6] 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.

(编辑 小前)

