

双值电容单相异步电动机的设计与性能分析

殷世雄¹, 王爱元^{1,2}, 姚晓东^{1,2}, 王成敏¹, 李吉程¹

(1. 上海电机学院 电气学院, 上海 201306;

2. 佛山市高明区明戈新型电机电控研究院, 广东 佛山 528500)

摘要: 单相异步电动机在单相电源供电的场所有广泛且不可替代的应用, 不过单相异步电动机也存在效率及功率因数低、材料用量大、振动噪声大等突出问题。以提高电动机的能效为主要目标开展了双值电容单相异步电动机设计研究, 分析了电动机的工作原理。以 YL801-2 型电动机为例, 根据机座号选用定转子冲片, 对定子绕组和定转子的槽型尺寸进行了方案选择和效率的优化设计。通过场路耦合有限元方法计算了额定工况和启动工况下的输入电流、输出转矩、效率、堵转转矩/堵转电流等性能指标, 结果表明该电动机的各项指标达到了 GB 18613—2020 二级能效要求和 JB/T 7588—2010 的技术条件要求, 该设计对进一步提高单相异步电动机的能效有一定的借鉴作用。

关键词: 单相异步电动机; 双值电容; 单层叠绕组; 匝比

中图分类号: TM343.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)11-0029-05

doi: 10.12177/emca.2022.119

Design and Characteristic Analysis of Double Capacitance Single-Phase Asynchronous Motor

YIN Shixiong¹, WANG Aiyuan^{1,2}, YAO Xiaodong^{1,2}, WANG Chengmin¹, LI Jicheng¹

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. Gaoming District Minge New Type Motor Electronic Control Research Institute, Foshan 528500, China)

Abstract: Single-phase asynchronous motor is widely and irreplaceable in the place of single-phase power supply. However, the single-phase asynchronous motor also has some problems, such as low efficiency and power factor, large amount of materials, large vibration and noise. The design and research of double capacitance single-phase asynchronous motor is carried out to improve the energy efficiency, and the working principle of the motor is analyzed. Taking YL801-2 motor as an example, the stator and rotor punching plates are selected according to the frame number, and the scheme selection and efficiency optimization design are carried out for the stator winding and slot size. The input current, output torque, efficiency, locked torque/locked current and other performance of indicators under rated and starting conditions are calculated by field circuit coupling finite element method. The results show that the performance reach the level II energy efficiency requirements of GB 18613—2020 and the technical requirements of JB/T 7588—2010. The design can be used for references to further improve the energy efficiency of single-phase asynchronous motors.

Key words: single-phase asynchronous motor; double value capacitance; single-layer lapped winding; turn ratio

收稿日期: 2022-06-30; 收到修改稿日期: 2022-09-19

作者简介: 殷世雄(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机优化设计。

王爱元(1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向为工程电磁场计算分析、电动机节能控制等。

0 引言

单相异步电动机具有结构简单、成本低廉、运行可靠的优势,在家用电器、办公设备和小型生产机械等需要单相电源供电的设备中应用广泛,并且不可被替代。然而这类电动机因采用单相电源供电,电机内部两相绕组通常工作于不对称状态,与三相异步电动机相比,存在效率及功率因数低、材料消耗大、振动噪声严重等缺点。随着国家节能环保战略的提出,电动机的能效标准不断提高并强制实施,GB 18613—2020 明确了单相异步电动机的能效标准,这对该类电动机的设计制造提出来了更高的要求。

单相异步电动机由于其特殊设计及固有的能效等级难于提升缺陷,也引起了学术界和工业界的关注。文献[1]运用三维有限元瞬态场计算了具有斜槽转子的单相感应电机电磁特性。文献[2]介绍了一种通过离线试验提取电容起动的单相异步电动机参数的方法。文献[3]提出了通过定子齿的不对称设计提高单相异步电动机效率的方法。文献[4-6]进行了不同转子槽型对感应电机运行性能影响的分析。文献[7-9]通过算法来对单相感应电机进行了多目标优化,通过改变转子的尺寸以及槽型,提高了电机运行性能。文献[10]利用有限元仿真对定子槽进行了优化设计,结果表明优化后电机的功率因数和效率均得到了改善。文献[11-12]利用响应面法对电机进行了优化设计。在其他方面近年也有相应研究,如调速控制^[13-14]等。

本文在介绍双值电容单相异步电动机设计原理的基础上,以 YL801-2 型电动机为例,依据现行的国家标准,对定子绕组、主副绕组的线径和匝数比进行了合适的选择以及对定转子的槽型尺寸通过迭代法进行了优化。通过有限元分析计算了电机的各项性能指标。设计案例达到现行国家标准的 2 级能效和其他技术条件。

1 双值电容单相电动机的原理设计

双值电容单相异步电动机的电路连接如图 1 所示,定子为两相正交绕组, W_m 为主绕组匝数, W_a 为副绕组匝数,转子通常为笼型转子。启动时副绕组串接并联电容值较大的启动电容 C_s 和电

容值较小的运行电容 C_R ,当转速上升至同步速的 75% 左右时,依靠离心开关 S 的作用,启动电容从电路中切除,因此具有较高的效率和较好的启动性能。

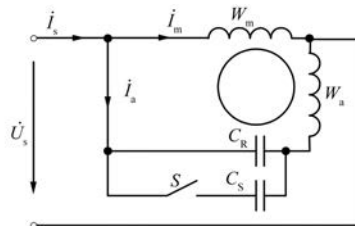


图 1 绕组的电路连接图

根据正反旋转磁场的理论,正负序电流为

$$\begin{cases} I^+ = \frac{I_m - jaI_a}{2} \\ I^- = \frac{I_m + jaI_a}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_m 、 I_a 、 a 分别为主绕组电流、副绕组电流、副绕组与主绕组的匝数比。

单相电源供电条件下的绕组电流分相,导致电动机不对称运行,出现了负序电流,负序电流的存在增大了各项损耗和电机的振动噪声,因此需要减少负序电流。当负序电流为零时,电机工作在对称运行状态,副主绕组匝数比和串联电容的容抗分别为^[15]

$$a = \frac{x_{lm} + x'_f}{R_{lm} + R'_f} \quad (2)$$

$$x_c = (1 + a^2)(x_{lm} + x'_f) \quad (3)$$

式中: R_{lm} 、 x_{lm} 分别为主绕组的电阻和漏电抗; R'_f 、 x'_f 分别为正序简化等效电路中二次侧绕组的电阻和电抗归算值。

在一定转速下,当匝数比和容抗满足式(2)、式(3)时,电动机内部为处于对称状态的圆形旋转磁场。但等效电路的参数取决于电磁场分布、铁磁材料饱和等多种因素,匝比和容抗的选择又受到电动机系列化生产中参数离散化选取的影响,因此很难做到负序分量为零的对称化设计,必需结合设计实例尽可能做到额定负载状态的近似对称运行。

输入电动机的电功率 P_1 ,扣除定子铜损耗 P_{Cu1} 、铁损耗 P_{Fe} 后为电磁功率 P_e ,关系式为

$$P_e = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} \quad (4)$$

电磁功率 P_e 在转子上转化为转子铜损耗 P_{Cu2} 、机械损耗 P_m 和杂散损耗 P_Δ ，剩余的则转轴输出机械功率 P_2 ，满足如下关系：

$$\begin{cases} P_{Cu2} = sP_e \\ P_2 = P_e - P_{Cu2} - P_m - P_\Delta \end{cases} \quad (5)$$

式中： s 为转差率。

电动机的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (6)$$

2 电动机的绕组设计和磁路计算

2.1 绕组型式选择

单相异步电动机的绕组可以选用正弦绕组或者叠绕组。正弦绕组采用同心式绕组，每个槽中绕组匝数空间上近似按基波余弦规律排列，使得气隙磁动势谐波含量少，电动机的损耗小、振动噪声小。但是每个线圈的匝数不等，制造工艺复杂，并且必需采用双层绕组，需要相间绝缘，降低了槽的有效利用率。采用叠绕组可使每个线圈的匝数相同，槽的利用率提高、工艺简化，可以采用单层绕组并选用有力节距降低谐波。针对 YL801-2 的双值电容单相异步电动机，经初步的电磁计算比较，本设计选择单层叠绕组型式。

根据 GB 18613—2020 二级能效要求、JB/T 7588—2010 的技术条件以及 Y3 系列电机的定转子铁心，确定电动机的设计参数和技术指标如表 1 所示，绕组为 Y 联结。

表 1 电动机的主要设计参数和性能指标

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子外径/mm	120	额定电压/V	220
定子内径/mm	75	频率/Hz	50
铁心长度/mm	76	额定功率/W	750
转子内径/mm	26	并联支路数	1
气隙长度/mm	0.2	效率/%	≥77.4
极数	2	功率因数	≥0.95
定/转子槽数	24/22	堵转转矩倍数	≥1.8
斜槽度	1.13	堵转电流倍数	≤5.5

考虑到绕组的短距、分布和斜槽，基波因数 k_{w1} 和谐波因数 k_{wv} 分别为

$$k_{w1} = \sin\left(\frac{y_1}{\tau}90^\circ\right) \frac{\sin\left(\frac{q\alpha}{2}\right)}{q\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \frac{\sin\left(\frac{c}{\tau}90^\circ\right)}{\frac{c}{\tau}90^\circ} \quad (7)$$

$$k_{wv} = \sin\left(\frac{vy_1}{\tau}90^\circ\right) \frac{\sin\left(\frac{qv\alpha}{2}\right)}{q\sin\left(\frac{v\alpha}{2}\right)} \frac{\sin\left(v\frac{c}{\tau}90^\circ\right)}{v\frac{c}{\tau}90^\circ} \quad (8)$$

式中： y_1 、 τ 、 q 、 α 和 c 分别为绕组节距、极距、每极每相槽数、槽距角和导体轴向斜过的距离； v 为谐波次数， $v = 2k + 1, k = 1, 2, \dots$ 。

谐波强度定义为

$$E_{vm} = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left(\frac{k_{wv}}{k_{w1}}\right)^2} \times 100\% \quad (9)$$

考虑两相电机低次谐波为 3 次和 5 次，绕组节距选择 9，主副绕组每极每相槽数为 6，定子轴向斜 1 个定子槽距，由此计算出绕组因数和前 39 次 ($m = 19$) 谐波强度分别为 0.832 和 5.5%。绕组的设计如图 2 所示，图 2 中 M_1 、 M_2 、 A_1 、 A_2 分别为主绕组和辅助绕组的首末引线段，数字为槽号，粗线为线圈，细线为线圈间接线或绕组引出线。

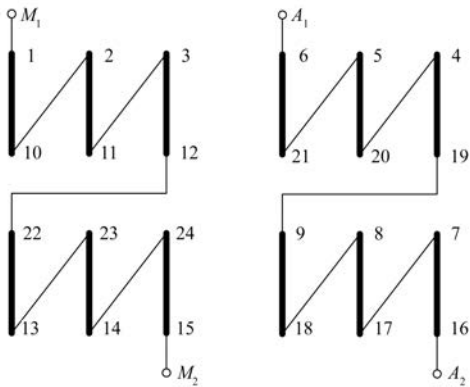


图 2 绕组设计图

2.2 磁路计算和电机效率的优化设计

绕组选型后，编制程序，初选设计参数，计算电机的各项性能，与表 1 中的数据对比，调整设计参数，反复迭代计算各项性能直至满足设计要求。

电机的机械损耗和杂散损耗，参照已制成的同规格单相异步电动机，计算中分别预取 30 W 和额定功率的 3%。

根据表 1 中定转子的铁心和相对应的三相异步电动机的槽型尺寸以及绕组设计，初设绕组匝

数比为 1.25, 运用磁路法迭代计算得到副绕组每槽匝数为 80、启动/运行电容为 $100\ \mu\text{F}/16\ \mu\text{F}$ 、主副绕组槽满率为 72%/77%、电机的效率为 76%。

随后对主绕组线径进行调整, 使主副绕组槽满率近似相同。考虑主副绕组磁动势的平衡、电流密度、槽满率和散热, 根据匝比进行效率优化, 主副绕组的线径满足:

$$\left(\frac{d_m}{d_a}\right)^2 = a \quad (10)$$

式中: d_m 、 d_a 分别为主副绕组的线径, 线径还需满足国标漆包圆绕组线的技术规范^[16]。

进一步观察发现定转子轭部磁密大于齿部磁密, 并且轭部严重饱和, 这是因为直接采用三相异步电动机的铁心冲片和槽型尺寸, 导致铁耗较大。因此, 在保持槽面积、平行齿不变的前提下, 调整定转子槽的槽宽和槽高。

经过优化设计后, 匝比为 1.32、主副绕组的槽满率接近 76%、效率为 83.2%, 堵转转矩和堵转电流分别为 $4.87\ \text{N}\cdot\text{m}$ 和 $19.6\ \text{A}$, 各项性能均满足表 1 的性能指标。

3 电磁场有限元计算

根据电路和磁路确定的设计参数, 建立电磁场瞬态有限元计算模型, 分别计算额定负载工况和堵转工况下电机的磁场和各项性能指标。

图 3 为额定负载工况下稳态磁场图。图 3(a) 表明, 定转子的槽漏磁少, 这是由于设计中槽宽较大、槽高较小, 磁感线分布合理, 减少了定子励磁电流; 图 3(b) 表明定子铁心的磁密稍大于转子铁心磁密, 其中定子轭部磁密最大值为 $1.68\ \text{T}$, 接近铁磁材料 B - H 曲线的饱和膝点, 铁心损耗不大, 材料得到充分利用。

图 4 为额定负载工况下 1 个电周期内的电流和电磁转矩的波形图, 图 4 中显示电流存在一定的谐波, 而电磁转矩存在明显的二次分量, 原因有两个方面: (1) 二维电磁场计算没有计及斜槽的作用; (2) 绕组匝数和电容值只能取整数和接近现有电容器产品的标定值, 电动机工作于一定程度的不对称状态, 气隙内磁场为椭圆形旋转磁场。

图 5 为堵转状态 1 个电周期内的电流和电磁转矩的波形图, 与额定负载的稳态相比, 图 5 中显示电流和电磁转矩较大, 以至于二维电磁场计算

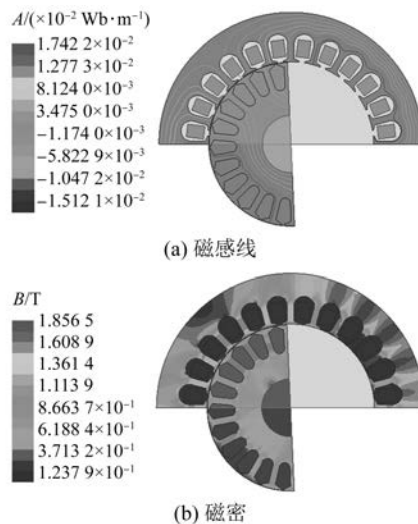


图 3 额定负载稳态时的磁场分布图

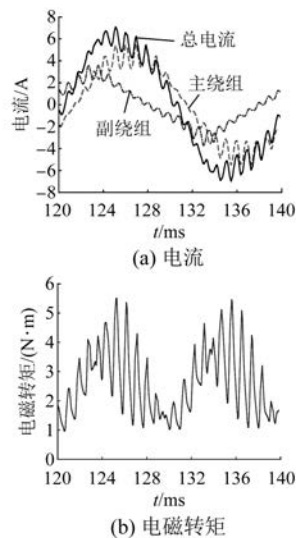


图 4 额定负载稳态时 1 个电周期内的电流和电磁转矩

中齿槽引起的波动不明显, 同时电磁转矩有负值的瞬态, 而正值的电磁转矩幅值较大、作用时间也较长, 在 1 个电周期内电磁转矩的平均值为堵转转矩。

经过进一步处理, 得到有限元计算的电机主要性能, 如表 2 所示。与上述电路磁路的计算相比, 效率有所下降、电流有所增大, 这是因为有限元法更好地计及齿槽、谐波和磁性材料的饱和等多种因素。与表 1 根据现行标准确定的性能相比, 达到了现行能效 2 级标准和电动机的堵转性能要求。

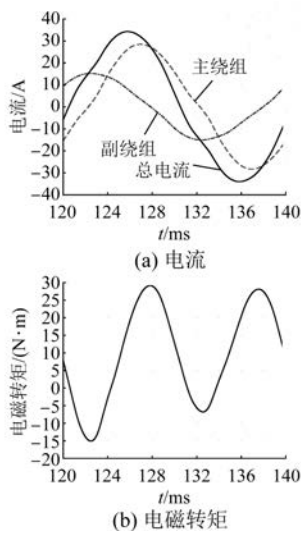


图5 堵转状态时1个电周期内的电流和电磁转矩

表2 有限元计算的电机性能指标

输出 功率/W	输入 电流/A	效率/ %	功率 因数	堵转转矩 倍数	堵转电流 倍数
750	4.38	79	0.98	3	5.4

4 结 语

论文对双值电容单相异步电动机的电磁设计进行了研究,设计案例达到现行国家标准的2级能效和其他技术条件,效率优化过程中得出以下结论:

- (1) 单层叠绕组是高效单相异步电动机的优选方案。
- (2) 副主绕组匝数比和线径的选择需综合考虑副主绕组磁动势平衡、槽满率、电流密度、电机散热等。
- (3) 采用三相异步电动机的定转子冲片需要对定转子的槽型尺寸进行优化调整。

【参考文献】

[1] BACHER J, WALDHART F, MUETZE A. 3-D FEM calculation of electromagnetic properties of single-phase induction machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(1): 142.

[2] CALE J, LUTE C, ROSS G, et al. Characterization procedure for unsymmetrical single-phase capacitor-

start induction machines [J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2021, 8: 2.

[3] 姜志刚,赵新超,杜荣法. 单相电机定子不等齿宽设计及有限元分析[J]. 电机与控制应用, 2013, 40(7): 15.

[4] 朱兴旺,黄开胜,刘丰,等. 电容运转单相异步电动机的效率分析[J]. 微特电机, 2017, 45(6): 8.

[5] 应凯文,赵朝会. 不同转子槽形对感应电机性能影响的对比分析[J]. 微特电机, 2019, 47(11): 15.

[6] BAI L, ZHAO Z, LEI Y, et al. Study on the loss reduction of high-efficient high-voltage series induction motors[C] //2011 International Conference on Electrical Machines and Systems.

[7] YOUNAS M B, KHALID H A, JAVED ADEEL, et al. Performance enhancement of single-phase induction motor using GA based multi-objective optimisation [J/OL]. International Journal of Electronics, 2021. <https://doi.org/10.1080/00207217.2021.1969445>.

[8] 金永星,王爱元,王涛,等. 基于粒子群算法的核屏蔽感应电机多目标优化设计[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 53.

[9] SHAMI U T. A novel technique to determine the required capacitance for a single phase induction motor by applying roundness algorithm [J]. Measurement, 2019, 142: 79.

[10] 金永星,王爱元,孙健,等. 核屏蔽感应电机效率和功率因数综合优化设计[J]. 电机技术, 2019(2): 1.

[11] 杜晓彬,黄开胜,谭耿锐,等. 基于响应面法的永磁电机转矩多目标优化[J]. 微特电机, 2019, 47(6): 20.

[12] 王宇钢,修世超. 应用响应面法的电机支架多目标优化设计[J]. 机械设计与制造, 2021(10): 42.

[13] 王卓然,曾敏,袁松,等. 基于STM32的单相电机调速控制器的设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(8): 116.

[14] 张娅琴,徐政,陈锐坚. 单相感应电动机自整定优化调速控制的研究[J]. 电力电子技术, 2020, 54(8): 26.

[15] 李隆年,王宝玲,周汝潢,等. 电机设计[M]. 北京:清华大学出版社, 1992.

[16] 中国电器工业协会. 漆包圆绕组线: GB/T 6109—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.