

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

王建辉, 张勇, 王鸿鹄.
IE4紧凑型变频调速三相永磁同步电机的
研制.
电机与控制应用, 2022, 49(3): 55.



SEARI
上電科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



科技改变未来
智慧创造价值

· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号 手机: 18918357509 电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904 邮箱: wangcj@seari.com.cn

IE4 紧凑型变频调速三相永磁同步电机的研制^{*}

王建辉¹, 张 勇², 王鸿鹄³

(1. 上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司, 上海 200063;

2. 双龙集团上海防爆电机盐城股份有限公司, 江苏 盐城 224007;

3. 上海电科电机科技有限公司, 上海 200063)

摘 要: 介绍了 IE4 效率等级的变频调速三相永磁同步电机系列产品的研制工作。为了提高设计精度和缩短设计周期, 本系列产品的电磁设计采用了基于场路结合的设计方法。一方面提升了设计的合理性, 产品性能指标可以满足标准要求; 另一方面合理的磁路设计提升了电机的功率密度, 减小了电机的体积, 本系列产品比通用系列产品普遍降低了 1~2 个机座号, 降低了材料成本。通过样机试制和型式试验, 验证了系列电机设计的合理性, 为国内 IE4 通用型变频调速三相永磁同步电机研究提供参考。

关键词: 永磁同步电机; IE4; 紧凑型

中图分类号: TM311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)03-0055-06

doi: 10.12177/emca.2022.002

Development of IE4 Compact Variable Speed Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor^{*}

WANG Jianhui¹, ZHANG Yong², WANG Honghu³

(1. Shanghai Engineering Research Center of Motor System Energy Saving Co., Ltd., Shanghai 200063, China;

2. Shanghai Explosion Proof Motor Yancheng Co., Ltd., Shuanglong Group, Yancheng 224007, China;

3. Shanghai Dianke Electric Machine Technology Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: The development of variable frequency speed regulation three-phase permanent magnet synchronous motor series products with IE4 efficiency grade is introduced. In order to improve the design accuracy and shorten the design cycle, the electromagnetic design of this series of products adopts the design method based on the combination of field and circuit. On the one hand, it improves the rationality of the design, and the product performance index fully meets the standard requirements. On the other hand, the reasonable magnetic circuit design improves the power density of the motor and reduces the volume of the motor. Compared with the general series products, this series generally reduces 1~2 frame numbers and reduces the material cost. Through prototype trial production and type test, the rationality of series motor design is verified, which provides a reference for IE4 general variable frequency speed regulation three-phase permanent magnet synchronous motor research in China.

Key words: IE4; compact; permanent magnet synchronous motor

0 引 言

2016 年, IEC 发布了 IEC TS 60034-30-2:2016

标准, 规定了变频器供电的变频调速电机的能效等级, 该标准已经等同转化为 GB/T 32891.2—2019^[1]。标准中将变频器驱动的电机效率分为

收稿日期: 2022-01-25; 收到修改稿日期: 2022-03-01

^{*} 基金项目: 上海市经济和信息化委员会工业互联网创新发展专项资金电机行业标识解析二级节点应用服务平台项目(2020-GYHLW-02006)

作者简介: 王建辉(1971—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电机设计与控制技术。

IE1、IE2、IE3、IE4、IE5 5 个等级,并给出了电机效率的计算方法。该标准的适用范围:额定功率 0.12~1 000 kW,额定电压 50~1 000 V,额定转速 600~6 000 r/min。在确定不同效率等级的标准值时,标准中给出了为计算标称效率限定值的参考效率值,结合插值公式和高频附加损耗系数,计算得到标称效率值,并以该标称效率值为电机 90%额定转速和额定转矩下效率的考核值。

为了完善我国工业电机的产品体系,推动中小型电机行业技术进步,满足日益严格的节能减排要求,自 2019 年 3 月起,在中小型电机行业开展了 IE4 能效等级的紧凑型变频调速三相永磁同步电机产品的开发,成立了由上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司、上海电科电机科技有限公司、金华江科动力有限公司、江苏锡安达防爆股份有限公司、江苏大中电机股份有限公司、安波电机(宁德)有限公司、西门子电机(中国)有限公司、上海 ABB 电机有限公司、长沙长利电气有限公司等企业组成的产品开发联合设计工作组,确定系列产品名称为“TYP 系列变频调速三相永磁同步电动机”,功率范围:0.55~315 kW,机座号:80~355,转速:3 000 r/min、1 500 r/min、1 000 r/min 和 750 r/min,冷却方式 IC416,完成了共 95 个规格的电磁设计和结构设计,电机型谱参考了 YE4 系列(IP55)三相异步电机^[2],并在其基础上降低了机座号。与通用笼型异步电机相比,该系列产品在相同功率和转速情况下,普遍降低了 1~2 个机座号,从而大幅降低了电机的制造成本,有利于电机的市场推广。

研制过程中对场路结合设计方法、极数选择分析、削弱转矩波动设计、抗去磁能力分析、缩小机座号的机械性能分析和结构设计、安全性设计等关键技术做了研究。其中场路结合方法是一种兼顾精度和效率的方法^[3-5]。为了提高设计精度和缩短设计周期,该系列产品的电磁设计采用了一种基于场路结合的设计方法^[6],主要是通过电流源激励 2D 有限元时步法的分析结果反推得到基于交直流双反应理论的永磁同步电机电路、磁路模型中的参数,从而得到确定的永磁同步电机解析模型,再通过解析模型来设计相同冲片结构的同机座同转速的其他规格。

根据系列设计的结果,与 YE2、YE4 本体有效

材料作了对比,说明了 TYP 系列在达到高于 IE4 效率的同时成本较低。

最后,通过样机试制、测试结果,验证了本系列设计关键技术研究结果和设计方法的正确性。

1 关键技术研究

为了确保所开发电机产品的效率等级能够达到 IE4,降低电机的成本,缩短设计周期,针对电磁和机械设计方法进行了研究,主要内容如下。

1.1 场路结合设计方法

电磁场有限元计算方法是一种常用的永磁电机设计方法,具有计算准确和适应性强的优点,但是在永磁电机系列设计中,电机规格数较多,用电磁场进行设计会降低设计速度,不能满足工程实际的需求。

考虑到系列设计电机的结构具有电磁结构一致性,本系列产品开发中采用了一种场路结合的设计方法,该方法提出了一种永磁电机的电磁性能计算方法,采用路方法进行设计,其中的部分参数通过典型规格电机的电磁场分析得出,并在设计完毕后,通过电磁场有限元计算对典型规格设计方案进行仿真验证,这样一方面提升了设计速度,另一方面也能够保证产品的设计精度。

本项目提出的电机场路结合的设计方法,为该系列产品的设计提供了理论基础。全系列共有 95 个规格,当选择每个机座号、不同极数下的最长铁心长度规格为场路结合计算设计方案后,需要进行电磁场分析的方案仅有 25 个,其余方案均可以通过路方法派生设计。电机型谱如表 1 所示。

总设计时间缩短了约 60%,大大提升了开发效率。该设计方法已整合到电机工业互联网协同设计平台,能够为整个电机行业提供设计服务。

1.2 极数选择分析

同一个功率和转速,可对应多个极数方案,而形成不同的极槽配合,对电机的性能有着不同的影响^[7-8]。为了分析 TYP 系列永磁同步电机的较优极数方案,本文以一台 160 机座号,22 kW,1 500 r/min 样机为例,设计了如图 1 所示的 4 极、6 极和 8 极电磁方案,进行有限元分析,并对结果进行对比。

表 1 系列电机型谱

机座号	额定转速/(r·min ⁻¹)			
	3 000	1 500	1 000	750
额定功率/kW				
80M1	1.5(1)	0.55(0)	0.55(0)	0.55(1)
80M2	2.2(1)	0.75(0)	0.75(1)	—
80M3	—	1.1(0)	—	—
90S	3(1)	1.5(0)	1.1(0)	0.75(1)
90L	4(2)	2.2(1)	1.5(1)	1.1(1)
100L1	5.5(2)	3(0)	2.2(1)	1.5(1)
100L2	7.5(2)	4(1)	3(2)	2.2(2)
112M	11(2)	5.5(1)	4(1)	3(1)
132S1	15(1)	7.5(0)	5.5(0)	4(1)
132S2	18.5(1)	—	—	—
132M	22(2)	11(1)	7.5(1)	5.5(1)
160M1	30(2)	15(0)	11(0)	7.5(0)
160M2	37(2)	18.5(1)	—	—
160L	45(3)	22(1)	15(1)	11(1)
180M	55(3)	30(1)	18.5(1)	15(1)
180L	75(4)	37(2)	22(1)	18.5(2)
200L1	90(3)	45(2)	30(1)	22(1)
200L2	110(4)	55(2)	37(2)	—
225S	—	—	—	30(1)
225M	132(3)	75(2)	45(2)	37(2)
250M1	160(2)	90(1)	55(1)	45(1)
250M2	200(2)	110(2)	75(2)	55(2)
280S	—	132(1)	90(1)	75(1)
280M	250(2)	160(1)	110(1)	90(1)
315S1	315(1)	200(0)	132(0)	110(0)
315S2	—	250(1)	160(1)	132(1)
315S3	—	315(1)	200(1)	160(1)
315M	—	—	250(1)	—
355M1	—	—	—	200(0)
355M2	—	—	—	250(0)

注：括号内为降低的机座号数。

通过计算得到电机参数汇总如表 2 所示。

可见,1 500 r/min 额定转速、电机的效率和其他性能参数相当时,采用 8 极设计具有较低的成本、较低的转矩波动和较高的效率。在本系列产品的设计中,3 000 r/min 采用了 6 极设计,1 500 r/min、1 000 r/min 和 750 r/min 电机采用

了 8 极设计。

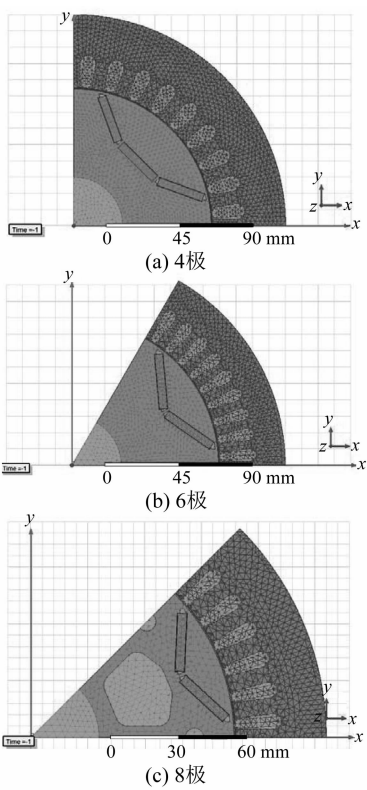


图 1 不同极数电机结构

表 2 参数汇总

参数名称	4 极	6 极	8 极
叠长/mm	215	170	200
成本/元	2 516	2 267	2 183
热负荷/(A·cm ⁻¹ ·A·mm ⁻²)	1 325	1 197	1 375
效率/%	94.55	95.07	94.60
功率因数	0.988 6	0.985 6	0.979 1
转矩/(N·m)	145	145	144
定子铁耗/W	212	210	246
转子铁耗/W	31.5	23.5	38.4
铜耗/W	586.1	464.2	513.7
机械损耗/W	80	80	80
杂散损耗/W	220	220	220

1.3 削弱转矩波动设计

本系列电机采用 V 形内插式永磁转子设计方案。为了降低转矩波动,对不同 V 形展开角、极弧系数等多方案作对比^[9-10]。

以一台 160 机座号,22 kW,1 500 r/min,8 极电机为例,分析不同极弧系数和 V 形展开角下转

矩平均值和转矩波动的变化。

如表 3 和图 2 所示,改变电机的极弧系数,可得平均力矩和转矩波动。转矩波动是指转矩的峰值与平均值的比。

极弧系数	0.66	0.69	0.71	0.72	0.73	0.75
平均转矩/(N·m)	136.9	139.5	142.0	142.4	142.2	143.0
转矩波动/%	2.96	2.51	1.96	1.50	1.16	1.27

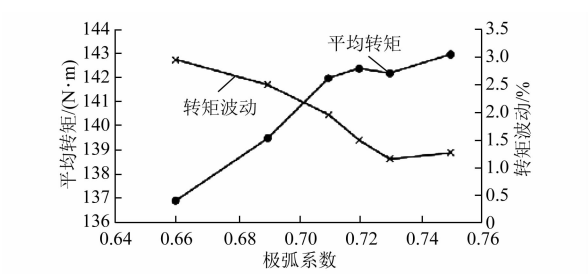


图 2 不同极弧系数的平均转矩和转矩波动

从图 2 可知,随着极弧系数增加到 0.73,转矩脉动最小,为 1.16%。

当极弧系数为 0.708~0.719 时,在最大转矩和转矩波动之间取得平衡。

通过设计不同的磁钢张角,然后计算不同磁钢张角对转矩波动的影响。为了比较相同成本方案,采用不同磁钢张角并保持磁钢总面积不变。计算结果如表 4 和图 3 所示。

张角/(°)	充磁方向 长度/mm	永磁体宽/ mm	平均转矩/ (N·m)	转矩 波动/%
110	4.516	28.310	142.227	2.21
120	4.776	26.770	142.948	2.08
130	5.000	25.570	143.110	1.91
140	5.185	24.660	143.317	1.62

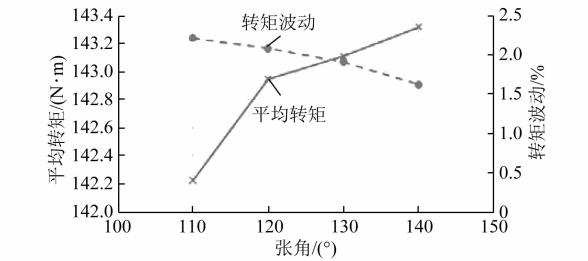


图 3 不同磁钢张角下的平均转矩和波动

根据分析结果,本系列电机设计时采用下列设计规范:

- (1) 每极槽数 6 时,可采用 $4.25/6=0.708\ 3$ 的极弧系数;
- (2) 每极槽数 9 时,可采用 $6.25/9=0.694\ 4$ 的极弧系数;
- (3) 每极槽数 12 时,可采用 $8.25/12=0.687\ 5$ 的极弧系数;
- (4) V 型磁钢展开角 130° 。

按上述设计规范,全系列电机的额定负载转矩波动低于 5%,保证了电机运转平稳。

1.4 抗去磁能力分析

通过对电磁方案的仿真分析,通过校核的程序,得到如图 4 所示去磁工作特性,其退磁曲线从左上到右下的三个点分别为空载工作点,额定负载工作点和过载工作点。过载是指两倍额定电流过载。

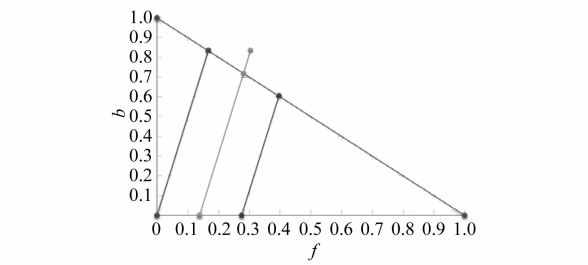


图 4 磁钢工作点

计算 3 000 r/min 和 1 500 r/min 额定转速的各个规格,可以得到各工作点的磁密标么值和磁势标么值。

其中两倍额定电流过载去磁工作点磁密标么值如图 5 所示。

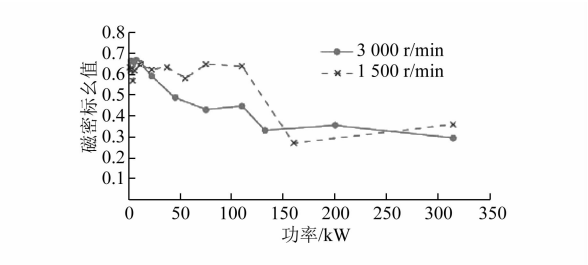


图 5 两倍额定电流过载去磁工作点磁密标么值

从图 5 中可以看到,最低磁密标么值 0.272。磁钢均选用 N38UH 磁钢,按 100 ℃ 的曲线,其拐

点的磁密标么值小于 0, 因此所有规格都可以保证在两倍额定电流下不会发生去磁, 并且具有较大的余量。

本系列电机设计采用下列规范来保证抗去磁能力:

- (1) 磁钢空载工作点磁钢磁密标么值不低于 0.7;
- (2) 磁钢额定工作点磁钢磁密标么值不低于 0.5;
- (3) 磁钢 2 倍负载电流工作点磁钢磁密标么值不低于 0.27;
- (4) 磁钢选用 UH 牌号, 最高工作温度 180 ℃。

1.5 缩小机座号的机械性能分析和结构设计

电机缩小机座号后, 对结构强度提出了更高的要求。本系列电机设计针对轴伸键应力、轴承载荷和寿命、轴的强度和刚度、轴的危险截面安全系数等作了计算校核。通过计算分析, 确定采用 YE2(YX3) 相同机座和铁心三圆。3 000 r/min 的系列机座采用 YE2(YX3) 系列异步电机 2 极机座、轴承、轴伸及轴伸键; 1 500 r/min、1 000 r/min 和 750 r/min 的系列机座采用 YE2 系列异步电机 4 极、6 极和 8 极对应机座、轴承、轴伸和轴伸键 (YE2 系列异步电机 4 极、6 极和 8 极机座相同)。

针对 V 形内插式转子冲片, 核算了加强筋的离心应力。最高速 (按 3 000 r/min 的 1.44 倍, 即 4 320 r/min) 下由离心力引起的最大应力不高于硅钢片屈服强度。

转轴材料应采用 45#钢, 并作调质处理。

1.6 安全性设计

因为机座号缩小和功率放大, 应按 GB/T 14711—2013《中小型旋转电机通用安全要求》检查接线柱直径要求和爬电距离。为保证机座和接线柱通用, 部分缩小机座较多的规格, 需要从 3 路出线改为 2 个 3 路 (6 路) 出线 (电机为星型接法), 以降低接线柱载流量。225 和 280 机座 3 000 r/min 的规格需要改大接线板上螺栓的直径。

2 成本对比

在电机材料成本方面, 由于本系列电机普遍降低了机座号, 在机座、端盖等结构件成本上显然具有更低的成本。

经统计, TYP 系列变频调速三相永磁同步电机和 YE2(IP55) 笼型三相异步电机比较, 其有效材料成本如图 6 和图 7 所示。

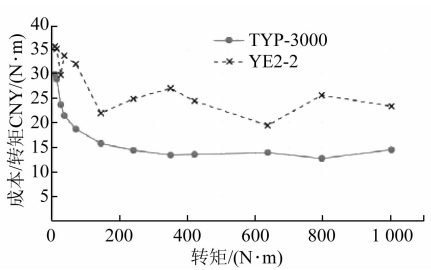


图 6 3 000 r/min 时 TYP 和 YE2(IP55) 不同转矩规格的有效材料成本

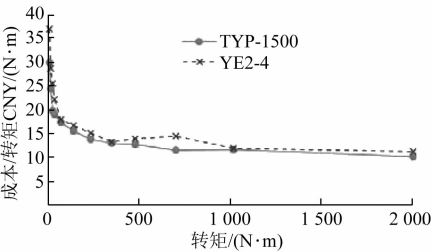


图 7 1 500 r/min 时 TYP 和 YE2(IP55) 不同转矩规格的有效材料成本

上述有效材料成本按表 5 和表 6 的设定价格。

表 5 YE2 系列有效材料设定价格			元/kg
材料	铜线	铸铝	硅钢片
价格	60.0	14.0	7.5

表 6 TYP 系列有效材料设定价格			元/kg
材料	N38UH	N30UH	铜线
价格	350.0	310.0	60.0
材料	50WW470	50WW350	35WW300
价格	7.8	8.8	9.5

从上面对比可以看出, TYP 系列变频永磁同步电机的成本低于同功率 YE2(IP55), 从而远低于 YE4(IP55) 三相异步电机。

3 样机试制情况

按项目计划任务书要求, 选取不同功率、不同转速的 20 个规格作为样机方案试制, 功率涵盖 0.55~315 kW 四个转速规格, 如图 8 所示。其中 7

台典型规格样机的型式试验数据如表 7 所示。

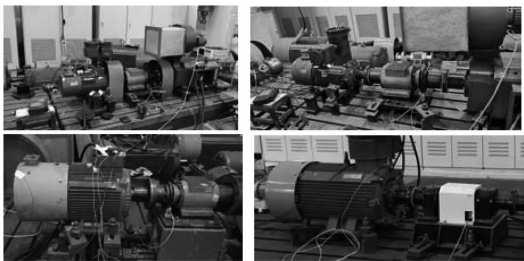


图 8 样机型式试验

从试验结果可以看出,电机效率指标均达到了 IE5 效率等级,超过了原定的 IE4 能效的设计要求。样机全部规格可以在 0.25 倍额定转速~1.0 倍额定转速之间恒转矩调速,1.0 倍额定转速~1.2 倍额定转速恒功率调速,电机综合性能达到了设计要求。后续根据试验情况,降低了硅钢片牌号,以使得电机效率保证为 IE4。

表 7 样机试验数据

型号	功率/ kW	转速/ (r·min ⁻¹)	标称 效率/ %	额定转速 测试效率/ %	降低 机座 号/个
TYP80M-8	0.55	750	78.3(IE5)	82.04	1
TYP112M-8	4	1 000	90.2(IE5)	92.58	1
TYP132M-6	22	3 000	94.4(IE5)	94.70	2
TYP160L-8	22	1 500	94.9(IE5)	94.85	1
TYP180M-6	55	3 000	95.7(IE5)	96.94	3
TYP250M2-8	110	1 500	96.3(IE5)	96.80	2
TYP315S3-8	315	1 500	96.8(IE5)	97.99	1

4 结 语

通过场路结合设计方法,完成了 IE4 效率等级 TYP 系列变频调速永磁同步电机 4 个转速系列 95 个规格产品的开发,开拓了国内变速驱动领域。样机大部分规格已达到 IE5,为 IE5 效率等级的系列产品开发奠定了基础。

在变频调速的场合,TYP 系列永磁同步电机的效率可以达到 IE4 和 IE5,远超 YVF2 异步变频电机;在型谱方面,TYP 系列变频调速三相永磁电机普遍降低了 1~2 个机座号,使得其成本低于 YVF2 等通用变频电机;也可以通过缩短叠长派生出与 YVF2 相同型谱的产品,以适应旧设备的安装尺寸。因此,在变频调速的场合,TYP 系列变频调速三相永磁电机具有很大的优势。

【参 考 文 献】

[1] 中国电器工业协会. 旋转电机效率分级(IE 代码)第 2 部分: 变速交流电机: GB/T 32891.2—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

[2] 黄坚, 姚丙雷, 顾德军, 等. IE4 超超高效率电机系列产品的开发[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(2): 56.

[3] 陈博, 王淑红. 基于场路耦合的永磁同步电机性能分析[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 45.

[4] 李灏淳, 曹继伟, 李立毅. 基于场路耦合的高速永磁同步电机设计方法[EB/OL]. 中国科技论文在线, 2016. [http://www. paper. edu. cn/ releasepaper/ content/201612-368](http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201612-368).

[5] 梅凡, 谢宝昌, 高强, 等. 永磁电机分析的场路耦合时步有限元法[J]. 电机与控制应用, 2012, 39(9): 5.

[6] 王建辉, 刘朋鹏, 韦福东. 基于 ANSYS 的永磁同步电机场路结合电磁设计方法[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(5): 17.

[7] 刘景辉, 黄开胜, 陈治宇. 不同极槽配合对永磁同步电机性能的影响[C]//2014 年小功率电机学术交流会, 2014: 50.

[8] 上官璇峰, 张涛. 极数对永磁无刷直流电机性能影响的研究[J]. 微特电机, 2011, 39(12): 10.

[9] 陈可, 杨奇飞, 周慧芳. 永磁同步电机极弧系数选取[J]. 电工技术, 2020(11): 43.

[10] 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.